

香 川 大 学 農 学 部 紀 要

第 47 号

1986年10月

MEMOIRS OF FACULTY OF AGRICULTURE  
KAGAWA UNIVERSITY

No. 47, October 1986

開放型畜舎内の放射熱環境に関する研究

衰 輪 雅 好

香 川 大 学 農 学 部

香川県木田郡三木町

FACULTY OF AGRICULTURE, KAGAWA UNIVERSITY

Miki-tyô, Kagawa-ken, Japan

## 香川大学農学部紀要

第 47 号

1986年10月 発行

各研究室の業績を発表するため、本学部は“香川大学農学部学術報告”と“紀要”を発行している。この“紀要”は研究の完成した比較的長い論文を発表するために発行されている。既刊の標題は最後の i-iv 頁に記載されている。“学術報告”および“紀要”の交換または寄贈については、香川県木田郡三木町 香川大学農学部 (☎761-07) あて照会されたい。

Memoirs of Faculty of Agriculture, Kagawa University

No. 47, October 1986

The Faculty of Agriculture, Kagawa University publishes “Technical Bulletin” (Gakuzyutu Hokoku) and “Memoirs” (Kiyô), and latter contains extended treatises. The titles of each number of “Memoirs” are printed on the pages i to iv inside back cover. Correspondence concerning the exchange of publications should be directed to Faculty of Agriculture, Kagawa University, Miki-tyô, Kagawa-ken, Japan, 761-07.

## 開放型畜舎内の放射熱環境に関する研究

衰 輪 雅 好

## A Study on Thermal Radiation Environment in an Open-type Livestock Barn

Masayoshi MINOWA

## 目 次

第1章 緒 論	(2)
1.1 家畜の暑熱環境と畜舎	(2)
1.2 従来の研究	(3)
1.2.1 暑熱環境における家畜の温熱指標	(3)
1.2.2 畜舎内の放射熱環境	(5)
1.3 本研究の目的と方針	(7)
第2章 開放型畜舎内における放射熱量の事例的研究	(7)
2.1 緒 言	(7)
2.2 測定畜舎と測定方法	(8)
2.2.1 測定畜舎の概要	(8)
2.2.2 測定方法	(10)
2.3 測定結果および考察	(11)
2.3.1 舎内における下向き放射熱量	(12)
2.3.2 舎内気温を基準にした屋根内表面温度	(13)
2.3.3 舎内における上半球実効放射温度	(15)
2.4 摘 要	(16)
第3章 暑熱環境の評価に関する研究	(17)
3.1 緒 言	(17)
3.2 暑熱環境に対する肥育豚の呼吸数, 直腸温度, 心拍数の反応	(18)
3.2.1 実験方法	(18)
3.2.2 実験結果および考察	(19)
3.3 肥育豚の呼吸数を指標とした暑熱環境評価温度	(25)
3.3.1 測定方法	(25)
3.3.2 解析方法	(26)
3.3.3 測定結果および考察	(27)
3.4 摘 要	(30)
第4章 開放型畜舎内における放射熱量の算定方法	(31)
4.1 緒 言	(31)
4.2 畜舎内放射熱量の算定方法	(33)
4.2.1 仮定条件と舎内放射熱量の算定式	(33)
4.2.2 気象条件	(36)
4.2.3 放射伝熱に関する形態係数	(37)
4.2.4 地表面温度	(39)
4.2.5 屋根外表面・内表面温度	(41)
4.3 模型畜舎における算定結果の検証	(43)

4.3.1	模型畜舎の概要	(43)
4.3.2	測定方法	(44)
4.3.3	模型畜舎内放射熱量の算定	(44)
4.3.4	結果および考察	(46)
4.4	現存畜舎における算定結果の検証	(51)
4.4.1	対象畜舎の概要と舎内放射熱量の測定方法	(51)
4.4.2	舎内放射熱量の算定	(51)
4.4.3	結果および考察	(52)
4.5	摘 要	(53)
第5章	開放型畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元の要因分析	(54)
5.1	緒 言	(54)
5.2	分 析 法	(55)
5.2.1	要因分析法	(55)
5.2.2	因子水準の設定	(57)
5.2.3	放射熱量特性値	(58)
5.3	分析結果および考察	(62)
5.3.1	放射熱量に対する要因効果	(62)
5.3.2	放射熱量の予測式	(66)
5.4	分析結果の適用	(70)
5.4.1	日中における舎内放射熱量の予測値	(70)
5.4.2	日中における舎内放射熱量の予測値と実測値との比較	(72)
5.4.3	予測式の適用	(72)
5.5	摘 要	(73)
第6章	切妻屋根式開放型畜舎内における豚の屋根内表面に対する形態係数	(75)
6.1	緒 言	(75)
6.2	解析方法	(76)
6.2.1	形態係数に関して豚と等価な円筒の設定方法	(76)
6.2.2	円筒の屋根内表面に対する形態係数	(81)
6.3	円筒モデル設定のための測定方法	(87)
6.3.1	供 試 豚	(87)
6.3.2	立体角投射カメラによる形態係数の測定方法	(87)
6.4	結果および考察	(89)
6.4.1	微小面の豚に対する形態係数	(89)
6.4.2	形態係数に関して豚と等価な円筒	(90)
6.4.3	豚の屋根内表面に対する形態係数	(92)
6.5	摘 要	(100)
第7章	結 論	(101)
謝 辞		(105)
参考文献		(105)
SUMMARY		(110)
付録-1	用語の説明	(114)
付録-2	切妻屋根式開放型畜舎内の微小水平面に下向きに入射する放射熱量を計算する電算機プログラム	(115)
付録-3	形態係数に関して豚と等価な円筒の半径, 長さ, 中心位置を求める電算機プログラム	(137)

## 第1章 緒 論

### 1.1 家畜の暑熱環境と畜舎

家畜・家禽（以下、単に家畜と称する）は、図1-1に示すように、ある環境温度の範囲内においては産熱量

と放熱量との平衡を保ち、ほぼ一定の体温を維持している<sup>1,2)</sup>。体温調節に使われるエネルギーが多ければ多いほど生産に利用されるエネルギーは減少する<sup>3,4)</sup>。したがって、家畜の生産性を高めるためには体温調節に使われるエネルギーは最小にすることが望ましい。

家畜の体温調節機能は環境、特に温熱環境に大きく影響されると言われている<sup>5,6)</sup>。温熱環境は気温、湿度、風速および放射熱の要因から構成される。温熱環境要因のうち家畜の体熱放散にもっとも大きな影響を及ぼすのは気温であり<sup>7)</sup>、従来から家畜の温熱環境と家畜の生理反応あるいは生産反応との関係については気温が第一義的に考えられてきた。

気温が高くなるにしたがい家畜の体熱放散は抑制されるために、家畜は採食量を減らして産熱量を減少させる。この結果、家畜の生産性は低下する<sup>4,8,9)</sup>。生産性が低下し始める気温の高温側の下限は、いろいろな条件によって異なるが、多くの成畜においては24~27°Cであると言われている<sup>8)</sup>。家畜の生産性が低下し始める気温よりも高い気温の環境は暑熱環境と呼ばれる<sup>10)</sup>。暑熱環境においては、湿度の上昇や放射熱の増加は体熱放散を一層抑制して家畜の熱ストレス（下線を付した用語の説明は付録-1に示してある）を助長し、風速の増加はそれを緩和すると言われている<sup>1-3,5-9)</sup>。

わが国における8月の平均気温（日最高気温と日最低気温との平均の月平均値）は北海道と東北地方の一部を除いた他の地域では24~28°Cであり<sup>11)</sup>、夏季の日中は明らかに暑熱環境であると言える。したがって、これらの地域においては畜舎の構造についても防暑対策が重要な課題である<sup>12)</sup>。畜舎は壁構造によって開放型、閉鎖型、折衷型の3種類に大別できる<sup>14)</sup>が、開放型畜舎においては畜舎構造が舎内の温熱環境、特に放射熱に及ぼす影響が大きいと思われる。

わが国において夏季の日射量は大きく、日射は畜舎内の家畜に直接入射するだけでなく、畜舎や地面などを加熱し、その結果畜舎や地面から射出する長波長放射熱を増加させ、間接的にも家畜に入射する。高温環境下の家畜に放射熱が入射することは、それだけ熱ストレスを増大させることになるであろう。

暑熱環境において放射熱が家畜に入射する場合の生理反応あるいは生産反応の評価は従来の気温を主体にした評価とは異なるものと考えられる。したがって、夏季における畜舎の環境設計を合理的に行うためには、放射熱を含めた温熱環境に対する家畜の生理反応あるいは生産反応を総合的に捉え、これらの反応を指標とした温熱環境評価法の確立が要求される。また放射熱による熱ストレスを緩和するために、家畜に入射する放射熱量を可能な限り小さくするような畜舎が要望される。このような畜舎の設計指針を確立するためには、舎内の放射熱量に関係する多数の要因と舎内放射熱量との定量的な関係を明らかにする必要がある。

## 1.2 従来の研究

### 1.2.1 暑熱環境における家畜の温熱指標

BECKETT<sup>15)</sup>は、豚の呼吸量と産熱量を指標として、気温と湿度を一元的に表す有効温度 (swine effective temperature) の算定図を示した。LEE<sup>16)</sup>は、生理的に最大可能な蒸散による放熱量と熱ストレスを消失させるの

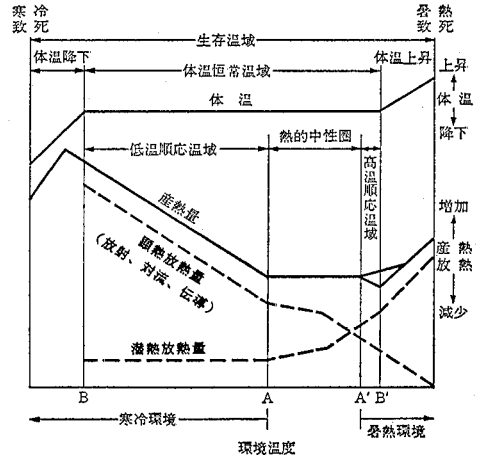


図 1-1 環境温度と家畜の体温調節との関係<sup>2)</sup>

- A : 産熱量に関する低温臨界温度
- A' : 産熱量に関する高温臨界温度
- B : 体温に関する低温臨界温度
- B' : 体温に関する高温臨界温度

表 1-1 家畜の生理反応に基づく温熱指標

家畜	温熱指標	生理指標	報告者
育成牛	① $0.35 t_d + 0.65 t_w$	直腸温度	BIANCA <sup>22)</sup>
乳牛	② $0.1 t_d + 0.9 t_w$	呼吸数・呼吸量	辰巳ら <sup>26)</sup>
	③ $0.35 t_d + 0.65 t_w$	呼吸数	三村ら <sup>24)</sup>
	④ $0.09 t_d + 0.65 t_w + 0.26 t_g$	呼吸数	山本ら <sup>27)</sup>
	⑤ $0.65 t_d + 0.35 t_w$	直腸温度	INGRAM <sup>23)</sup>
育成豚	⑥ $0.75 t_d + 0.25 t_w$	呼吸数	ROLLERら <sup>25)</sup>
	⑦ $0.6 t_d + 0.4 t_w$	呼吸数	山本ら <sup>30)</sup>
	⑧ $(0.7 \sim 0.8) t_d + (0.3 \sim 0.2) t_w$	呼吸数	山本ら <sup>29)</sup>
産卵鶏	⑨ $0.75 t_d + 0.25 t_w - (2.6 \sim 4.9) \sqrt{V_a}$	呼吸数	山本 <sup>28)</sup>
羊	⑩ $0.1 t_d + 0.9 t_w$	呼吸数	山本ら <sup>31)</sup>

1)  $t_d$ : 乾球温度 (°C)  $t_w$ : 湿球温度 (°C)  $t_g$ : 黒球温度 (°C)  $V_a$ : 風速 (m/s)

2) 温熱指標の適用範囲は次のとおりである; ①  $30.0 \leq t_d \leq 50.0$ ,  $20.4 \leq t_w \leq 32.5$

②  $20.0 \leq t_d \leq 40.0$ ,  $13.8 \leq t_w \leq 38.3$  ③  $4.9 \leq t_d \leq 34.3$ ,  $2.1 \leq t_w \leq 27.1$

④  $1.7 \leq t_d \leq 34.6$ ,  $0.7 \leq t_w \leq 27.3$ ,  $7.9 \leq t_g \leq 50.7$

⑤  $32.0 \leq t_d \leq 40.0$ ,  $22.0 \leq t_w \leq 36.0$  ⑥  $34.4 \leq t_d \leq 42.8$ ,  $22.8 \leq t_w \leq 33.3$

⑦  $15.0 \leq t_d \leq 35.0$ ,  $12.2 \leq t_w \leq 31.6$  ⑧  $24.8 \leq t_d \leq 37.1$ ,  $16.9 \leq t_w \leq 32.9$

⑨  $21.0 \leq t_d \leq 35.0$ ,  $16.9 \leq t_w \leq 32.9$ ,  $0 \leq V_a \leq 4.0$

⑩  $20.0 \leq t_d \leq 35.0$ ,  $14.5 \leq t_w \leq 31.5$

に必要な蒸散による放熱量との比をストレイン指数 (relative strain index) として提示し、ジャージー牛への適用例を示した。これらの温熱指標<sup>17)</sup>は体温調節反応としての蒸散による放熱量に基づいたものである。

家畜の呼吸数と体温は暑熱環境の影響を表す指標として有効であることが認められており<sup>18-21)</sup>、呼吸数と体温を指標として温熱環境要因それぞれに重みを付けた温熱指標が提示されている<sup>22-31)</sup>。また、この温熱指標を体感温度と呼ぶことが提唱されている<sup>24, 27-30)</sup>。

家畜の生理反応に基づいた温熱指標を表 1-1 に示す。温熱指標における乾球温度と湿球温度の重みの家畜間の差異は体表面における体熱放散様式の相違を表し、湿球温度の重みが大きい家畜は蒸散による体温調節能力が大きく、乾球温度の重みが大きい家畜は蒸散能力が小さいと言われている<sup>29, 32, 33)</sup>。

表 1-1 に示した温熱指標は簡単な式で使用に便利であるが、放射熱を考慮した温熱指標は山本(あや)と山本(禎)<sup>27)</sup>が提示した乳牛についての 1 例だけである。気温、湿度、風速および放射熱を総括した温熱指標は現在まで報告されていない。

人間に対する温熱指標を家畜の生産性の評価に適用した研究が報告されている<sup>34-39)</sup>。BERRY ら<sup>34)</sup>および INGRAHAM<sup>36)</sup>は乾球温度と湿球温度で表した温湿指数 (temperature-humidity index) と乳牛の産乳減少量および乳牛の受胎率との関係をそれぞれ求めた。HAHN<sup>13, 41, 42)</sup>および HAHN と OSBURN<sup>43, 44)</sup>はこの指標を畜舎の環境設計の基準として用いた。また、谷<sup>38)</sup>は体表面からの放熱量を指標とした不快感指数<sup>40)</sup>を乳牛に適用し、不快感指数と産乳量との関係を明らかにした。

BUFFINGTON ら<sup>35)</sup>は、温湿指数の乾球温度の代りに黒球温度を用いた黒球温湿指数 (black globe-humidity index) を提示し、日向における乳牛の生理・生産反応には温湿指数よりも黒球温湿指数の方が良く適合することを報告した。OLIVEIRA と ESMAY<sup>37)</sup>も、夏季のプロイラー鶏舎内における実測から、黒球温湿指数が鶏の生産性を良く表すことを報告した。

THOMAS と ACHARYA<sup>39)</sup>は、熱帯地における乳牛の産乳量に対する温熱指標として、午前 9 時と午後 3 時における温湿指数と日照時間を組合せた温湿日照指数 (temperature-humidity-sunshine index) を提示し、温湿日照指

数は温湿指数よりも産乳量の減少を良く表すことを報告した。

以上から、家畜の生理反応あるいは生産反応に基づいた温熱指標に関する研究においては、放射熱の影響は十分に評価されていないことが問題点として残されている。

### 1.2.2 畜舎内の放射熱環境

#### (1) シェイドに関する研究

シェイド (shade) は、家畜の体熱放散を阻害することなく日射熱を遮断する簡単な、かつ経済的な方法であり<sup>3,5,7-9,46-50</sup>、シェイド下における放射熱量とシェイドの構造、シェイド葺材表面の日射吸収率・放射率および周囲地表面との関係が明らかにされている<sup>51-57</sup>。

KELLY と ITTNER<sup>56</sup>) は、シェイドによって生じる日陰の中心位置の上半球からの放射熱量が露地の上半球からの放射熱量の55~65%であり、下半球からの放射熱量は露地のその約28%であること、また日陰における放射熱量がシェイド葺材や地表面の種類によって異なることを報告した。

KELLY ら<sup>57</sup>) は、シェイドの日陰の中心に位置する小球に入射する放射熱量を求める計算方法を示し、以下のことを明らかにした。

- ① シェイドの長軸が東西方向のときの放射熱量は、長軸が南北方向のときよりも小さい。
- ② シェイドの大きさは放射熱量にほとんど影響を及ぼさない。
- ③ シェイドの位置が地表から高くなるにしたがい、また小球が地表面に近づくにしたがい放射熱量は小さくなる。
- ④ シェイド近傍の地表面温度を低くすることは、放射熱量を減少させる有効な方法である。

シェイドの位置が高くなると日陰の中心における放射熱量が減少することは、GARRETT ら<sup>53</sup>) も指摘した。他方 BOND ら<sup>52</sup>) は、シェイドの位置が高くなるとシェイド下の中央における放射熱量は増加するが、これは日向地表面からの短波長放射熱量が増加するためであると報告した。また GIVENS<sup>54</sup>) は、快晴日の少ない地域においてシェイドの位置を高くすると、天空から入射する日射量が増加することを報告した。

BOND ら<sup>51</sup>) は、シェイド表面の日射吸収率・放射率とシェイド下の放射熱量との関係を検討した。すなわち、金属板シェイド葺材の内外表面を黒色塗装、白色塗装、無塗装の3種類とし、これらの組合せのもとで放射熱量を測定した。その結果、ある条件下においては外表面が白色、内表面が黒色の場合にシェイド下の放射熱量は最小になることを明らかにした。しかし、その条件についての詳細な解析は行われていない。

KELLY と BOND<sup>55</sup>) は、葺材の異なる35種類のシェイド下の放射熱量を測定し、外表面を白色塗装、内表面を黒色塗装した金属板シェイド下の放射熱量が小さいことを報告した。

RANNFELT と KROESKE<sup>45</sup>) は、シェイドに関する従来の研究結果を総括し、暖地における開放型豚舎の防暑上の設計指針を提唱している。

#### (2) 畜舎構造に関する研究

DALE と GIESE<sup>58</sup>) は、閉鎖型畜舎において日射熱による舎内気温の上昇を抑制するためには、屋根外表面を白色塗装し、屋根内表面をアルミペイントで塗装することがもっとも有効であることを指摘した。PARKER<sup>59</sup>) も、屋根内表面からの長波長放射熱量を抑制するためには屋根外表面を白色にし、屋根内表面にアルミ箔を用いることが非常に効果的であることを指摘した。MACFARLANE<sup>48</sup>) は、鉄板屋根の内表面に接着したアルミ箔の長波長放射熱量減少効果は一般的な断熱材の約5mm厚に相当すると言及した。

SMITH<sup>50</sup>) は、熱帯地・亜熱帯地において家禽に入射する放射熱量を小さくするためには、家禽舎の外表面の日射吸収率は小さく、放射率は大きくして、内表面の日射吸収率は大きく、放射率は小さくすることが効果的な方

法であると言及した。しかし、開放型畜舎の構造や周囲地表面の種類などによっては、放射率の大きい屋根内表面が有利であることは容易に推察できるが、この問題に関する従来の研究は皆無である。

BONDら<sup>60)</sup>は、夏季の日中において時刻の経過に伴い東側、南側、西側の順に外壁内表面からの放射熱量が有意に増加することを報告した。また、HODGESとFARMER<sup>61)</sup>は、暑熱対策として外壁内表面の温度上昇を防ぐことを指摘した。さらに、岡本と向居<sup>62)</sup>は牛床の位置を外壁内表面、特に南側の外壁内表面から離すことを推奨している。

直達日射を遮断するためには、畜舎の南側の外壁や開口部には庇を設けることが効果的であり<sup>6,10,63-65)</sup>、東側や西側には樹木やすだれなどの垂直的な遮蔽物を設けることが有効である<sup>6,10,63)</sup>。特に、建物の西側に植栽した日陰樹は防暑効果の大きいことが報告されている<sup>65-67)</sup>。

NEUBAUER<sup>68)</sup>およびNEUBAUERとCRAMER<sup>69)</sup>は、日射熱による舎内気温の上昇に及ぼす畜舎形状の影響をモデルを用いて実験的に検討した。すなわち、容積一定で断面の形が円形、半円形、三角形、正方形および長方形の立体モデルの軸方向の長さをそれぞれ2~3段階に変え、軸方向を東-西と南-北に設置し、モデル内部の気温を測定した。その結果、円形、半円形、三角形の断面のモデルよりも正方形断面と長方形断面のモデルの方の内部気温が低いこと、およびいずれのモデルにおいても長軸方向が東-西で、かつ東と西に面する表面積が小さいほど内部気温が低いことを明らかにした。渡辺<sup>63)</sup>によれば、任意の高さの直方体の建物において、夏季に外壁表面の受ける1日の積算日射量が最小になる形状は、北緯30~40度の地域では南北方向の辺長に対する東西方向の辺長の比が2.4~3.9の場合である。

NEUBAUERら<sup>66)</sup>は、切妻屋根のような傾斜面の夏季における表面温度について検討し、傾斜面の水平傾角については表面温度がもっとも低くなるのは60~80度の場合であり、傾斜方位については北がもっとも低く、南、西の順に高くなり、東がもっとも高くなることを明らかにした。また、夏季において傾斜面が受ける1日の積算日射量は、傾斜方位が東および西の場合にもっとも大きく、北の場合にもっとも小さいことが報告されている<sup>63,64,70)</sup>。

DALEとGIESE<sup>58)</sup>、GRIFFINとVARDAMAN<sup>71)</sup>、HODGESとFARMER<sup>61)</sup>、REECEら<sup>72)</sup>およびTODDとDANIELS<sup>73)</sup>は、日射熱の影響による家畜の生産性の低下を防ぐためには屋根に断熱を施す必要があることを指摘した。しかし、断熱についての具体的な数値は提示されていない。

CLAYTONとBOYD<sup>74)</sup>は、体重が4.5lb(約2.0kg)のレグホーン種の鶏を想定した球形熱量計を作製し、夏季の気温と日射量の日変動をシミュレートした実験装置において、熱量計と外壁内表面との長波長放射熱交換量を7種類の屋根構造別に測定した。養輪ら<sup>75)</sup>は、CLAYTONとBOYD<sup>74)</sup>の測定結果から、熱量計が屋根内表面だけから受ける正味放射熱の日積算量と屋根の熱貫流抵抗の関係を求め(図1-2)、鶏の放射熱負荷量の観点からは屋根の熱貫流抵抗を $1.5\text{ m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}/\text{kcal}$ 以上にする必要がないことを指摘した。

開放型畜舎の屋根外表面温度および舎内の放射熱量については、体系的な解析の試みが報告されている<sup>37,76)</sup>。BRAUDと

NELSON<sup>76)</sup>は、切妻屋根式開放型畜舎の金属板屋根葺材の外表面における強制対流伝熱現象について、定常状態を仮定して次元解析を適用するとともに、模型畜舎と実物大畜舎における測定から屋根の外表面温度を予測する無次元式を提示した。彼らが解析対象として取上げた畜舎構造の因子は以下の10個であった。

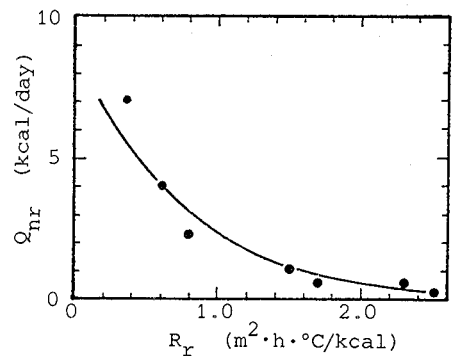


図1-2 レグホーン鶏が屋根内表面から受ける正味放射熱量( $Q_{nr}$ )と屋根の熱貫流抵抗( $R_r$ )との関係<sup>75)</sup>



- |             |               |
|-------------|---------------|
| ① 軒高        | ② 屋根の幅        |
| ③ 屋根勾配      | ④ もやの幅        |
| ⑤ もやの数      | ⑥ 屋根表面の日射吸収率  |
| ⑦ 屋根表面の放射率  | ⑧ 波板屋根葺材の波形間隔 |
| ⑨ 屋根葺材の熱伝導率 | ⑩ 屋根葺材の厚さ     |

この解析は定常状態での強制対流伝熱現象を対象としているため、屋根外表面温度に及ぼす畜舎構造因子の固有な影響を正確に評価できないことが問題として残されている。例えば、風が弱くなるにつれて屋根外表面の温度が屋根勾配によって大きく異なることは容易に推察できるが、このような影響は評価されていない。

OLIVEIRA と ESMAY<sup>37)</sup> は、開放型畜舎内の放射熱量を予測する数学モデルを作製し、気象条件、畜舎の方位、畜舎の構造や材料などのパラメーターから放射熱量が求められると言及した。しかし、放射熱量が最小になるような畜舎構造は明らかにされていない。

従来、畜舎内の放射熱に関する研究は微小面や小球に入射する放射熱量を対象としたものであり、家畜に入射する放射熱量についての研究は皆無に等しい。

以上に述べたように、畜舎内の放射熱に関する研究においては次の点が問題として残されている。

- ① 畜舎内の放射熱量に影響を及ぼす畜舎構造要因の相互関係
- ② 畜舎内の放射熱量を最小にする畜舎諸元
- ③ 畜舎内の家畜に入射する放射熱量の評価

### 1.3 本研究の目的と方針

本研究は、畜舎内の暑熱環境を家畜の生理反応で評価する温熱指標を確立すること、および家畜の放射熱負荷量を可能な限り小さくする開放型畜舎の諸元（畜舎の形状的な要素の他に、建築材料の熱特性値や畜舎周囲の地表面の種類などを含めて畜舎諸元と呼ぶことにする）を提示することを目的として、以下の項目について検討を行うものである。

- (1) 夏季における開放型畜舎内の放射熱環境の実態を明らかにする。
- (2) 豚を供試家畜として、高温条件下の放射熱に対する生理反応を捉え、これに基づいた温熱指標を提示する。
- (3) 開放型畜舎内の短波長放射熱量と長波長放射熱量の算定方法を提示する。
- (4) 夏季における開放型畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響を数値シミュレーションにより総合的に定量評価する。次いで、その評価に基づき、畜舎内の放射熱量を求める予測式を提示するとともに、放射熱量を最小にする畜舎諸元を明らかにする。
- (5) 豚を対象として、放射伝熱に関する家畜の形態係数を明らかにし、畜舎内の放射熱環境を家畜の放射熱負荷量で評価する。

## 第2章 開放型畜舎内における放射熱量の事例的研究

### 2.1 緒言

わが国の暖地・温暖地における夏季の開放型畜舎内は、気温が家畜の高温臨界温度よりも高いうえに、日射に起因する放射熱が家畜に入射するような環境である。従来、高温環境下における放射熱は家畜の生理・生産に悪影響を及ぼすことが明らかにされている<sup>18-21, 27, 35, 37, 39, 71-73, 77-81)</sup>。したがって、暑熱環境下においては畜舎内

の家畜に入射する放射熱は可能な限り抑制されねばならない。しかし、暖地・温暖地の夏季における畜舎内の放射熱量の測定例は皆無に等しく、畜舎構造と舎内放射熱量との関係は明確にされていないのが現状である。

本章では、開放型畜舎内における放射熱環境の実態を把握する目的で、夏季の日中において3種類の開放型畜舎と1種類の閉鎖型畜舎の舎内環境を測定し、舎内における放射熱量の実態を明らかにする。また、舎内の放射熱量、舎内気温を基準にした屋根内表面温度および舎内気温を基準にした平均放射温度と屋根の熱貫流抵抗および屋根外表面の日射吸収率との関係について検討する。

## 2.2 測定畜舎と測定方法

### 2.2.1 測定畜舎の概要

測定畜舎は香川県下にある閉鎖型の繁殖豚舎および開放型の採肉鶏舎と採卵鶏舎である。

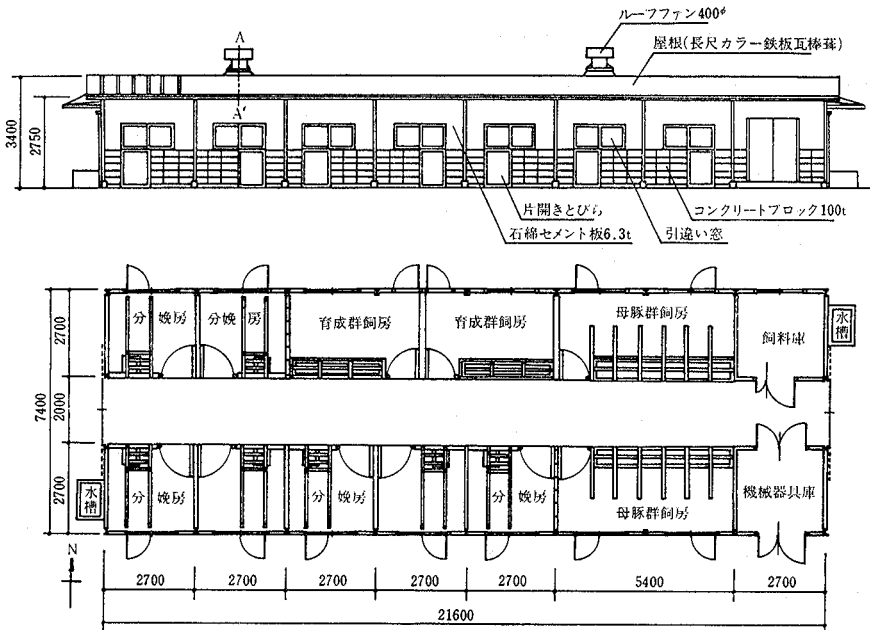


図 2-1 切妻屋根式繁殖豚舎の立面図（南面）と平面図

繁殖豚舎は香川大学農学部付属農場の豚舎で軽量鉄骨構造である。建設地は標高が約 160 m の丘の上であり、周囲は草地の斜面である。図 2-1 に繁殖豚舎の立面図と平面図を示す。豚舎は桁行長 21.6 m、梁間長 7.4 m、棟高 3.4 m、軒高 2.75 m であり、屋根は切妻型である。屋根葺材は厚さ 0.4 mm の長尺カラー（明灰色）鉄板で、屋根勾配は 1.5/10（屋根傾角 8.5 度）である。外壁の上半分は厚さ 6.3 mm の石綿セメント板であり、下半分は厚さ 100 mm のコンクリートブロックである。外壁の一部に開口部を設け、開口部には引違窓（0.75×1.5 m）と片開き扉（0.75×1.5 m）が取り付けられている。桁行方位は東一西であり、棟部にはルーフファンが 2 個設置してある。舎内は全面コンクリート床であり、豚舎の南側と北側にはコンクリートで舗装した運動場（7.0×21.6 m）が付設されている。

図 2-2 に繁殖豚舎の屋根の断面図を示す。屋根は、屋根葺材

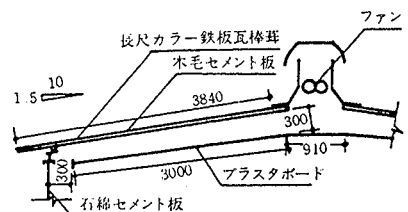


図 2-2 切妻屋根式繁殖豚舎の屋根断面図（A-A'）

の下側に厚さ 15mm の木毛セメント板、次いで間隙 300mm の中空層、最下層に厚さ 9mm のプラスチックボードからなる。中空層は強制通風、自然通風および密閉にすることができ、屋根の熱抵抗を変えることができる<sup>82)</sup>。

測定時には、体重約 250kg の母豚 7～14頭と体重約 4～20kg の子豚約 30頭が収容されていた。なお、測定は窓、片開き扉および出入り口戸のすべてを全開し、開放型豚舎に近い状態で行った。

採肉鶏舎は図 2-3 に示すように、かまぼこ屋根式の平飼い方式である。鶏舎は桁行長 15m、梁間長 7.3m、棟高 3.5m であり、桁行方位は北北東—南南西である。屋根は亜鉛鉄板とベニヤ合板の間に 45mm の中空層を設けた二重構造である。床は全面コンクリートであり、妻面はベニヤ合板を張った壁部と金網を張った開口部からなる。測定は鶏を出荷してから約 1 週間後に行い、測定時には給餌器や敷きわらは取除かれていた。また、測定は片側妻面にあるベニヤ合板製扉を開放した状態で行った。なお、測定対象とした鶏舎は、並列してある 4 棟のうちの内側の 1 棟である。

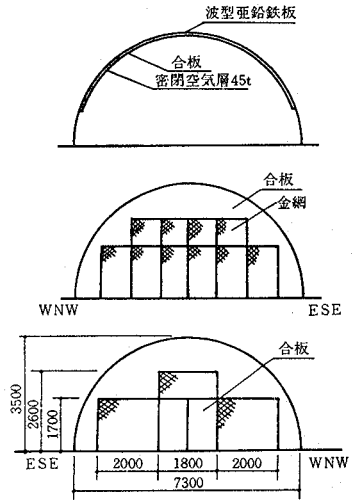


図 2-3 かまぼこ屋根式採肉鶏舎の立面図と断面図

採卵鶏舎の 1 つは図 2-4 に示すように、セミモニター屋根 (semi-monitor roof) 式の雛 2 段ケージ方式である。鶏舎は桁行長 35.0m、梁間長 3.1m、棟高 3.0m、軒高 2.5m であり、桁行方位は東—西である。屋根葺材は亜鉛鉄板だけであり、屋根勾配は南側が 1/10 (屋根傾角 5.7 度)、北側が 1/3 (18.4 度) である。鶏舎の妻面側は出入り口を除き板張りであり、両側面は柱だけの構造である。1 棟での飼養羽数は約 1500 羽である。測定は 12 棟あるうちの 1 棟において飼養状態で行った。なお、測定鶏舎の東側、南側、北側には 2～3m 離れて測定舎と同一形式の鶏舎がそれぞれ並列して建てられている。

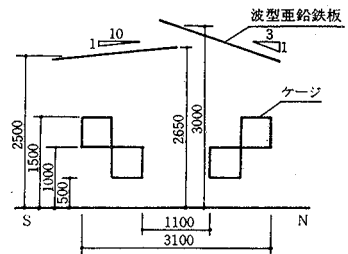


図 2-4 セミモニター屋根式採卵鶏舎の断面図

採卵鶏舎の他の 1 つは図 2-5 に示すようにモニター屋根 (monitor roof) 式の雛 2 段ケージ方式である。鶏舎は桁行長 49.0m、梁間長 16.8m、棟高 2.9m、軒高 2.3m であり、桁行方位は北北西—南南東である。屋根葺材は亜鉛鉄板だけであり、屋根勾配は 1/14 (屋根傾角 4.1 度) である。鶏舎の妻面は軒高から上部には板が張られ、下部には金網が張られている。両側面はすべて金網が張られている。測定は、約 5300 羽の採卵鶏を飼養している状態で行った。なお、この鶏舎は東北東に面した傾斜地の直下に位置し、傾斜地以外の周囲は水田である。

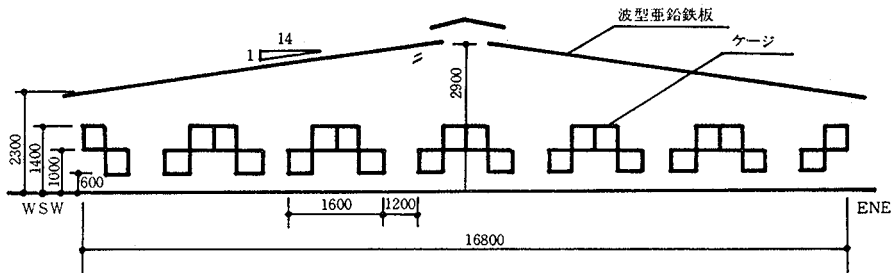


図 2-5 モニター屋根式採卵鶏舎の断面図

以上の測定対象畜舎は以下においては、屋根中空層を強制通風とした場合の繁殖豚舎を No. 1, 自然通風とした場合を No. 2, 密閉状態とした場合を No. 3 とし、かまぼこ屋根式採肉鶏舎を No. 4, セミモニター屋根式採卵鶏舎を No. 5, モニター屋根式採卵鶏舎を No. 6 と表す。

測定畜舎における屋根の熱貫流抵抗と屋根外表面の日射吸収率を表 2-1 に示す。熱貫流抵抗は、外表面側と内表面側の熱伝達率をそれぞれ 19.5, 8.0 kcal/m<sup>2</sup>・h・°C<sup>83)</sup> とし、屋根葺材の熱伝導率<sup>84)</sup> と厚さから計算で求めた値である。ただし、No. 1~No. 3 における中空層の熱コンダクタンスは相原ら<sup>82)</sup> の値を採用した。

屋根外表面の日射吸収率は No. 1~No. 3 においては相原ら<sup>82)</sup> の実測値であり、No. 4~No. 6 については渡辺<sup>84)</sup> から引用した値である。ただし、No. 5 においては屋根外表面に多くのさびが見られたので、特に 0.4 を 0.7 に修正した。

以上から、測定結果の解析は、屋根の熱貫流抵抗については 5 水準、屋根外表面の日射吸収率については 2 水準 (0.77 と 0.7 は同一視した) で行った。

### 2.2.2 測定方法

測定は、昭和52年8月10日から9月6日、および昭和53年7月20日から8月8日の晴天日の日中に以下の項目について行った。

- |              |                |           |
|--------------|----------------|-----------|
| ① 舎外水平面全日射量  | ② 舎内水平面全波長放射熱量 | ③ 屋根内表面温度 |
| ④ 外気温        | ⑤ 舎内気温         | ⑥ 外風速     |
| ⑦ 屋根内表面近傍の風速 |                |           |

さらに昭和53年には

- ⑧ 舎内水平面短波長放射熱量

についても測定を行った。

舎外水平面全日射量は、測定畜舎の棟部中央においてエプレー型全天日射計 (英弘精機製, MS-60) で測定した。

舎内における下向きの全波長放射熱量と短波長放射熱量は、それぞれ通風式風防型放射収支計 (英弘精機製, CN-11) とエプレー型全天日射計 (英弘精機製, MS-42) を用いて測定した。これらの放射熱量の測定位置は、畜舎の桁行方向および梁間方向のほぼ中央で、高さは家畜からの放射熱を受けないことを考慮して選定した。すなわち、No. 4 は鶏がいないので床面から 0.2m と低い高さで、No. 1~No. 3 は床面から 0.9m, No. 6 では 1.4m, No. 5 では 1.5m とした。

屋根内表面温度は、畜舎の桁行方向のほぼ中央において、断面の全長にわたる 4~6 点について CC 熱電対を接着して測定し、これらの平均値を採用した。

外気温と舎内気温は、No. 1~No. 3 では自記寒暖湿度計 (太田計器製) を用いて連続測定し、これらの測定値は約 2 時間間隔で測定したアスマン通風乾湿球湿度計 (太田計器製) の値で補正した。No. 4~No. 6 ではアスマ

表 2-1 測定畜舎における屋根の熱貫流抵抗と屋根外表面の日射吸収率

測定畜舎	熱貫流抵抗 (m <sup>2</sup> ・h・°C/kcal)	日射吸収率
No. 1	0.68	0.77
No. 2	0.59	0.77
No. 3	0.57	0.77
No. 4	0.37	0.4
No. 5	0.18	0.7
No. 6	0.18	0.4

測定畜舎の番号は以下のとおりである。

- No. 1: 繁殖豚舎—強制通風通気層  
 No. 2: 繁殖豚舎—自然通風通気層  
 No. 3: 繁殖豚舎—密閉空気層  
 No. 4: かまぼこ屋根式採肉鶏舎  
 No. 5: セミモニター屋根式採卵鶏舎  
 No. 6: モニター屋根式採卵鶏舎

ン通風乾湿球湿度計（太田計器製）で測定した。いずれの畜舎においても、外気温は畜舎から約2m離れた地上1.5mの位置で、舎内気温は舎内放射熱量の測定位置の近くでそれぞれ測定した。

外風速は繁殖豚舎だけにおいて測定した。測定は桁行方向のほぼ中央の軒先で、地上から3mの高さで光電式三杯型風速計（牧野応用測器研究所製）を用いて行った。

屋根内表面近傍における風速は、屋根内表面温度の各測定点において熱線風速計（日本科学工業社製、11-111）で測定し、これらの平均値を採用した。なお、熱線風速計の読取り値は30～60秒間における計器の最多指示値とした。

アスマン通風乾湿球湿度計による外気温と舎内気温、および屋根内表面近傍における風速の測定は毎正時と毎30分時に行った。これら以外の測定については自記寒暖湿度計や自動平衡型記録計（横河電機製）で連続記録し、毎正時および毎30分時の前後15分にわたる30分間の平均値をその時刻の測定値とした。

### 2.3 測定結果および考察

測定日における気象条件と舎内環境の日中の平均値を表2-2に示す。昭和52年と53年の測定期間における舎外水平面全日射量の平均値は信頼率95%でそれぞれ608±37, 643±35 kcal/m<sup>2</sup>・hであり、これらの差異は5%水準で有意でなかった。また、外気温の平均値は信頼率95%でそれぞれ29.1±1.0, 33.0±0.7°Cであり、これらの差異は1%水準で有意であった。したがって、両年における測定結果は、舎外全日射量については1水準、外気温については2水準として解析する。

表2-2 測定日における気象条件と舎内環境（日中の平均値）

測定月日	測定畜舎	舎外全日射量 (kcal/m <sup>2</sup> ・h)	気温 (°C)	風速 (m/s)	舎内気温 (°C)	屋根内表面温度 (°C)	屋根内表面風速 (m/s)	舎内全波長放射熱量 (kcal/m <sup>2</sup> ・h)	舎内短波長放射熱量	
(昭和52年)										
8.10	No. 4	549	27.1	—	28.7	33.8	—	436	—	
	14	No. 5	688	29.5	—	30.4	52.2	—	496	
	20	No. 6	614	27.0	—	27.1	34.9	—	436	
	29	No. 1	652	29.6	1.7	29.8	29.8	0.2	414	
	30	No. 2	628	30.1	1.7	29.7	31.6	0.15	423	
	31	No. 1	568	30.6	1.5	29.8	30.3	0.15	417	
9. 1	No. 2	566	30.5	1.6	29.7	31.4	0.15	419	—	
	5	No. 3	641	28.4	1.8	28.4	31.1	0.15	418	
	6	No. 3	569	29.2	1.5	29.2	31.9	0.15	422	
(昭和53年)										
7.20	No. 1	607	33.0	1.5	32.1	33.1	0.2	431	2.4	
	21	No. 1	677	33.9	1.9	32.8	33.2	0.15	432	2.6
	22	No. 2	698	33.9	2.9	33.0	34.1	0.2	436	2.4
	23	No. 2	635	32.8	1.8	32.2	34.2	0.2	436	2.5
	24	No. 3	666	34.1	1.9	32.8	35.6	0.2	444	2.8
	25	No. 3	646	33.0	1.8	32.1	34.8	0.15	440	3.1
8. 1	No. 5	684	33.0	—	33.6	47.6	1.0	490	11.1	
	5	No. 4	620	31.6	—	31.5	37.0	0.15	447	10.3
	8	No. 6	551	31.6	—	32.0	36.2	0.7	440	5.3

- 1) 日中の時間は、昭和52年8月20日においては10時30分から15時、昭和53年8月1日においては10時30分から15時30分、他の測定日においてはすべて10時から15時である。
- 2) 測定畜舎の番号は表2-1に同じである。

表 2-2 に示した測定日の気象条件は、わが国の暖地・温暖地における暑熱期の気象条件をほぼ代表していると考えられる。なお、外風速は 1.5~2.9 m/s であり、これが舎内の放射熱量に影響を及ぼすことは容易に推察できるが、ここでは外風速は単に測定条件にとどめた。

### 2.3.1 舎内における下向き放射熱量

舎内放射熱量の測定位置における微小水平面の屋根内表面に対する形態係数は No. 1~No. 3, No. 4, No. 5 および No. 6 においてそれぞれ 0.89, 0.96, 0.85, 0.99 と算定された。この結果、形態係数が 1 に近い値であることから、舎内における下向き全波長放射熱の放射源はほとんど屋根内表面であると判断できる。また、下向き全波長放射熱量に占める下向き短波長放射熱量の割合は、表 2-2 から No. 1~No. 3 では 1% 以下であり、No. 4~No. 6 では約 2% 以下であった。このことから、以下の考察では全波長放射熱量は長波長放射熱量として扱う。

BOND ら<sup>51)</sup> および PARKER<sup>59)</sup> は、屋根内表面からの放射熱量が屋根内表面の放射率と日射吸収率、および屋根内表面近傍における風速に影響されることを指摘している。しかし、本測定においては、舎内の下向き放射熱量に占める短波長放射熱量の割合が約 1~2% ときわめて小さかったこと、また屋根内表面近傍における風速も 0.15~1.0 m/s と変動範囲が小さかったことから彼らが指摘した点については検討できなかった。

表 2-2 に示したように、日中における舎内放射熱量の平均値は約 400~500 kcal/m<sup>2</sup>·h であり、舎外水平面全日射量の約 60~80% に相当する。また、舎内放射熱量の最大値は平均値の約 1.02 倍であり、最大値の出現時刻は No. 1~No. 3 では外気の最高温度出現時刻にほぼ一致し、No. 4~No. 6 では太陽の南中時刻にほぼ一致していた。

舎内の放射熱量と屋根の熱貫流抵抗との関係を図 2-6 に示す。図中の No. 1~No. 3 の放射熱量は各年の測定

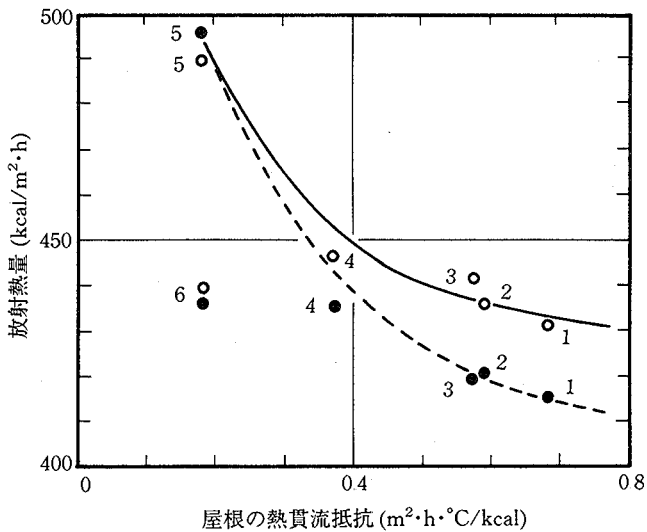


図 2-6 舎内における下向き放射熱量 (Q) と屋根の熱貫流抵抗 (R<sub>r</sub>) との関係

図中の番号は表 2-1 に示した測定畜舎番号である。

●: 昭和52年測定  
(日射量 608 kcal/m<sup>2</sup>·h, 外気温 29.1°C)

○: 昭和53年測定  
(日射量 643 kcal/m<sup>2</sup>·h, 外気温 33.0°C)

—:  $Q = 428 + 176 \exp(-5.24 R_r)$

-----:  $Q = 406 + 202 \exp(-4.51 R_r)$

(回帰曲線は No. 4 と No. 6 を除いて求めたものである)

値の平均値で示してある。

図 2-6 から、屋根外表面の日射吸収率が大きい場合 (No. 1~No. 3, No. 5) には、屋根の熱貫流抵抗が増大すると舎内の放射熱量は減少する傾向にあり、放射熱量に及ぼす熱貫流抵抗の影響は 1% 水準で有意であった ( $F_0=24.5^{**}>F(3, 10; 0.01)=6.55$ )。屋根外表面の日射吸収率が小さい場合 (No. 4, No. 6) には、放射熱量に及ぼす熱貫流抵抗の影響はほとんど見られない。

No. 5 と No. 6 の熱貫流抵抗は両者とも  $0.18 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  と同じであるが、No. 6 の放射熱量は No. 5 よりも約 10% 小さい。これは、屋根外表面の日射吸収率が No. 5 では 0.7 であるのに対して、No. 6 では 0.4 であるためと考えられる。屋根外表面の日射吸収率の低減が放射熱量の減少に及ぼす傾向は PARKER<sup>59)</sup> の報告に一致する。

屋根の熱貫流抵抗が大きい No. 1~No. 3 における放射熱量は外気温が低くなると減少する傾向にあり、放射熱量に及ぼす外気温の影響は 1% 水準で有意であった ( $F_0=131^{**}>F(1, 8; 0.01)=11.3$ )。一方、熱貫流抵抗が小さい No. 5 と No. 6 においては放射熱量に及ぼす外気温の影響は有意でなかった。

屋根外表面の日射吸収率が大きいとき舎内の放射熱量は屋根の熱貫流抵抗に有意に影響されることから、No. 1~No. 3 と No. 5 を対象として測定年別すなわち外気温の水準別に回帰曲線を求め、これらを図 2-6 に示す。

図 2-6 に示した回帰曲線から、屋根外表面の日射吸収率が 0.4 と小さく、熱貫流抵抗が  $0.18 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  と小さい No. 6 の放射熱量は、日射吸収率が 0.7 程度で、熱貫流抵抗が約  $0.4 \sim 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  における放射熱量に相当することがわかる。このことから、熱貫流抵抗の小さい屋根の畜舎内の放射熱量を減少させるためには、屋根外表面の日射吸収率を小さくすることが有効であると言える。

図 2-6 において、日射吸収率 0.4 の No. 4 が日射吸収率 0.7 の回帰曲線近くにあることは、屋根形状が原因していると考えられる。すなわち、No. 4 は屋根形状がかまぼこ型で桁方向が南—北に近いので、屋根外表面が受ける日射量が他の畜舎に比べて大きいことが大きな原因の 1 つであると考えられる。これと同様の傾向が舎内気温の上昇と畜舎の屋根形状との関係においても見られることを、NEUBAUER と CRAMER<sup>69)</sup> は報告している。

### 2.3.2 舎内気温を基準にした屋根内表面温度

屋根内表面温度が舎内の長波長放射熱量を決定する主な要因であることは明らかである。そこで、放射熱量の場合と同様に、屋根内表面温度と屋根の熱貫流抵抗および屋根外表面の日射吸収率との関係について検討する。ただし、舎内気温が異なる場合の屋根内表面温度を比較検討するため、屋根内表面温度は舎内気温からの上昇温度で表し、これを屋根内表面の昇温と呼ぶことにする。

表 2-3 に、屋根内表面昇温の日中における平均値を示す。表 2-3 によれば、屋根内表面の昇温は No. 1 では  $1^\circ\text{C}$  以下、No. 2 では約  $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 、No. 3 では約  $3^\circ\text{C}$  である。また、No. 4 と No. 6 の屋根内表面の昇温は

表 2-3 日中における屋根内表面の昇温の平均値

測定畜舎	測定年月日 (年.月/日)	屋根内表面の昇温 ( $^\circ\text{C}$ )
No. 1	52. 8/29	0.0
	52. 8/31	0.5
	53. 7/20	1.0
	53. 7/21	0.4
No. 2	52. 8/30	1.9
	52. 9/ 1	1.7
	53. 7/22	1.1
	53. 7/23	2.0
No. 3	52. 9/ 5	2.7
	52. 9/ 6	2.7
	53. 7/24	2.8
No. 4	53. 7/25	2.7
	52. 8/10	5.1
No. 5	53. 8/ 5	5.5
	52. 8/14	21.8
No. 6	53. 8/ 1	14.0
	52. 8/20	7.8
	53. 8/ 8	4.2

- 1) (屋根内表面の昇温) = (屋根内表面温度) - (舎内気温)
- 2) 測定畜舎の番号は表 2-1 に同じである。
- 3) 日中の時間は表 2-2 に同じである。

約 4~8°C である。さらに、No. 5 における屋根内表面の昇温は 14~22°C であり、他に比べて著しく大きい。No. 5 の屋根内表面の昇温が著しく大きいのは、屋根の熱貫流抵抗が小さく、かつ屋根外表面の日射吸収率が大きいためと考えられる。

図 2-7 に屋根内表面の昇温と屋根の熱貫流抵抗との関係を示す。図 2-7 において、No. 1~No. 3 は各年の測定値の平均値で示してある。また、図中の回帰曲線および図に付記した重回帰式は、18組の本測定値と昭和51年夏季に No. 1~No. 3 において同様の測定を行って得た 6 組の測定値<sup>82)</sup>を加えた計 24 組の測定値から、屋根の熱貫流抵抗、屋根外表面の日射吸収率、舎外水平面全日射量および外気温を説明変数として求めたものである。なお、舎外水平面全日射量と外気温は説明変数として有意でなかったことを付記する。

図 2-7 から、屋根外表面の日射吸収率が 0.77 および 0.7 と大きい No. 1~No. 3 と No. 5 の場合には、屋根の熱貫流抵抗が増大するにしたがい屋根内表面の昇温は減少する傾向にあり、屋根内表面の昇温に及ぼす熱貫流抵抗の影響は 1% 水準で有意であった ( $F_0=49.3^{**}>F(3, 10; 0.01)=6.55$ )。屋根外表面の日射吸収率が 0.4 と小さい

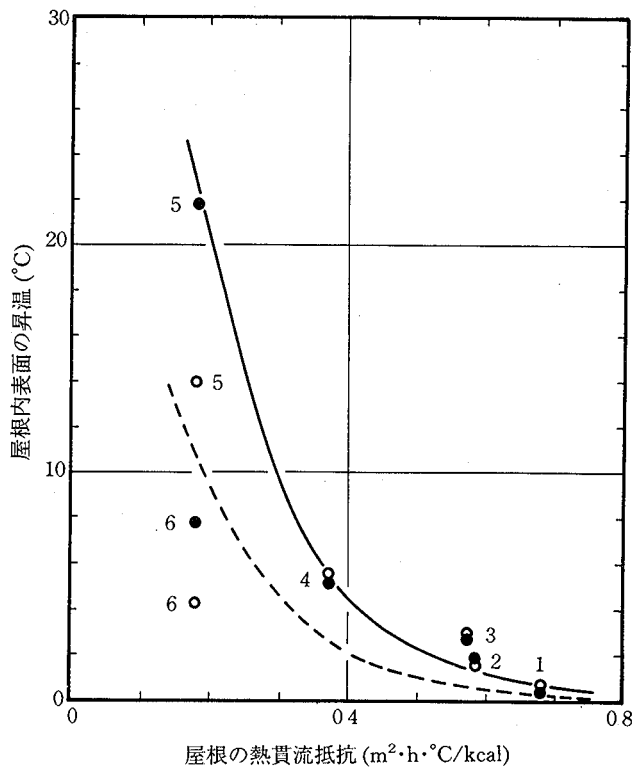


図 2-7 屋根内表面の昇温 ( $t_{ri} - t_i$ ) と屋根の熱貫流抵抗 ( $R_r$ )、屋根外表面の日射吸収率 ( $a_{ro}$ ) との関係

屋根内表面の昇温とは舎内気温 ( $t_i$ ) を基準にした屋根内表面温度 ( $t_{ri}$ ) である。

図中の番号は表 2-1 に示した測定畜舎番号である。

●: 昭和52年測定  
(日射量 608 kcal/m<sup>2</sup>·h, 外気温 29.1°C)

○: 昭和53年測定  
(日射量 643 kcal/m<sup>2</sup>·h, 外気温 33.0°C)

$$t_{ri} - t_i = 14.45 \exp(-7.36 R_r + 2.58 a_{ro}) \quad (R = 0.719^{**})$$

—:  $a_{ro} = 0.7$     - - -:  $a_{ro} = 0.4$



No. 4 と No. 6 においては、屋根内表面の昇温に及ぼす熱貫流抵抗の影響は見られない。

熱貫流抵抗が  $0.18 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  と小さい No. 5 の屋根内表面の昇温が同じ熱貫流抵抗である No. 6 よりも平均で約  $14^\circ\text{C}$  高いが、これは図 2-6 において述べた舎内放射熱量の場合と同様に、外表面の日射吸収率が大きいためと考えられる。

外気温が  $29.1^\circ\text{C}$  のとき (図中の黒丸) と  $33.0^\circ\text{C}$  のとき (図中の白丸) の屋根内表面の昇温の差は、日射吸収率が  $0.7$  の No. 5 においては  $7.8^\circ\text{C}$  であり、日射吸収率が  $0.4$  の No. 6 においては  $3.6^\circ\text{C}$  である。このことから、屋根の熱貫流抵抗が小さい場合には屋根内表面の昇温に及ぼす屋根外表面の日射吸収率と外気温の影響は、熱貫流抵抗の大きい場合 (No. 1~No. 3) に比較して顕著に表れることがわかる。なお、熱貫流抵抗が大きい No. 1~No. 3 では屋根内表面の昇温に及ぼす外気温の影響は有意でなかった。

図 2-7 に示した回帰曲線から、日中における屋根内表面の昇温を  $1^\circ\text{C}$  程度にするためには、屋根外表面の日射吸収率が  $0.7$  の場合には約  $0.6 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  以上の熱貫流抵抗が必要であり、日射吸収率が  $0.4$  の場合には約  $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  以上の熱貫流抵抗が必要であると推定できる。また、熱貫流抵抗が  $0.18 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  の屋根における外表面の日射吸収率を  $0.7$  から  $0.4$  に小さくすることは、屋根内表面の昇温の観点から熱貫流抵抗を約  $0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$  まで増加することと同じであると言える。換言すれば、屋根内表面の昇温を抑制するためには、熱貫流抵抗の小さい屋根においては外表面の日射吸収率を小さくすることが効果的であると言える。

図 2-7 において、屋根外表面の日射吸収率が  $0.4$  である No. 4 の屋根内表面の昇温が日射吸収率から判断すると大きい傾向にあることは、図 2-6 で述べた舎内放射熱量の場合と同様に、No. 4 の屋根形状がかまぼこ型であるためと考えられる。

### 2.3.3 舎内における上半球実効放射温度

舎内における放射熱環境の評価値として平均放射温度<sup>84)</sup>も有効なものの1つである。特に、屋根内表面の昇温と同様に舎内気温を基準にした平均放射温度すなわち実効放射温度<sup>85)</sup>は、舎内気温が異なる場合の放射熱環境を比較検討する上で有効であると考えられる。

以下では舎内の下向き放射熱量に基づく実効放射温度を上半球実効放射温度と呼称する。上半球実効放射温度は次式から求めることができる。

$$t_{er} = t_{mr} - t_i = \left\{ 100 \left( \frac{Q}{4.88} \right)^{1/4} - 273 \right\} - t_i \quad (2-1)$$

ここで

$t_{er}$  : 舎内における上半球実効放射温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$t_{mr}$  : 舎内における上半球平均放射温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$t_i$  : 舎内気温 ( $^\circ\text{C}$ )

$Q$  : 舎内における下向き放射熱量 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )

4.88: 完全黒体の放射定数 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ )

(2-1)式に測定値を代入して日中における上半球実効放射温度の平均値を求めた結果を表 2-4 に示す。表 2-4 には実効放射温度と屋根内表面の昇温 (表 2-3) との温度差も示してある。

表 2-4 から、No. 5 の上半球実効放射温度は屋根内表面の昇温よりも  $4.1 \sim 7.6^\circ\text{C}$  低い。これは、舎内放射熱量の測定位置における微小水平面の屋根内表面に対する形態係数が測定畜舎の中で  $0.85$  と最小であること、および外壁がないために天空に対する形態係数が大きく、特に北方天空への放射熱損失<sup>86)</sup> が大きいことによるためと考えられる。

表 2-4 日中における舎内上半球実効放射温度の平均値および実効放射温度と屋根内表面の昇温との温度差

測定畜舎	測定年月日 (年 月/日)	上半球実効 放射温度 (°C)	(実効放射温度) - (屋根内表面の昇温) (°C)
No. 1	52. 8/29	0.7	0.7
	52. 8/31	1.2	0.7
	53. 7/20	1.5	0.5
	53. 7/21	1.0	0.6
No. 2	52. 8/30	2.4	0.5
	52. 9/ 1	1.7	0.0
	53. 7/22	1.4	0.3
No. 3	53. 7/23	2.3	0.3
	52. 9/ 5	2.8	0.1
	52. 9/ 6	2.7	0.0
No. 4	53. 7/24	3.0	0.2
	53. 7/25	3.1	0.4
	52. 8/10	5.7	0.6
No. 5	53. 8/ 5	4.9	-0.6
	52. 8/14	14.2	-7.6
No. 6	53. 8/ 1	9.9	-4.1
	52. 8/20	7.4	-0.4
	53. 8/ 8	3.1	-1.1

- 1) 測定畜舎の番号は表 2-1 に同じである。
- 2) 日中の時間は表 2-2 に同じである。
- 3) (屋根内表面の昇温) = (屋根内表面温度) - (舎内気温) (表 2-3 参照)

No. 1~No. 3 においては上半球実効放射温度と屋根内表面の昇温とはほぼ同じである。これは、放射熱量の測定位置における微小水平面の屋根内表面に対する形態係数は No. 5 の形態係数と大差ないが、No. 5 には外壁がないのに対して No. 1~No. 3 には外壁があるためと推察できる。

外壁のない No. 4 と No. 6 の上半球実効放射温度が No. 1~No. 3 と同様に屋根内表面の昇温とほぼ同じであるのは、舎内放射熱量の測定位置における微小水平面の屋根内表面に対する形態係数が 1 に近いためである。

以上から上半球実効放射温度は、舎内の放射熱量に及ぼす畜舎形状の影響が大きいことを示唆していると言える。

## 2.4 摘 要

開放型畜舎内における放射熱環境の実態を把握する目的で、夏季日中において開放型のかまぼこ屋根式採肉鶏舎、セミモニター屋根式採卵鶏舎、モニター屋根式採卵鶏舎および閉鎖型の切妻屋根式繁殖豚舎における舎内環境を測定し、舎内放射熱量、屋根内表面の昇温(舎内気温を基準にした屋根内表面温度)および上半球実効放射温度(舎内気温を基準にした平均放射温度)と屋根の熱貫流抵抗・外表面の日射吸収率との関係について検討した。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 本測定で得られた畜舎内の微小水平面に入射する下向き放射熱量の日中における平均値は約 400~500

kcal/m<sup>2</sup>・hであり、舎外水平面全日射量の約60～80%であった。

- (2) 舎内における放射熱量の最大値は平均値の約1.02倍であり、最大値の出現時刻は、熱貫流抵抗が小さい屋根の畜舎では太陽の南中時刻に、熱貫流抵抗が大きい屋根の畜舎では外気の最高温度出現時刻にほぼ一致していた。
- (3) 屋根の熱貫流抵抗が大きくなるにしたがい、舎内の放射熱量と屋根内表面の昇温はそれぞれ減少した。舎内放射熱量と屋根内表面の昇温に及ぼす熱貫流抵抗の影響は、屋根外表面の日射吸収率が大きいときには高度に有意であった。
- (4) 舎内における放射熱量は、屋根の熱貫流抵抗が大きい場合には外気温に影響され、熱貫流抵抗が小さい場合には外気温よりも日射量に影響された。
- (5) 日中における屋根内表面の昇温の平均値を1°C程度にするために必要な屋根の熱貫流抵抗は、屋根外表面の日射吸収率が0.7の屋根では約0.6 m<sup>2</sup>・h・°C/kcalであり、日射吸収率が0.4の屋根では約0.5 m<sup>2</sup>・h・°C/kcalと推定された。
- (6) 熱貫流抵抗が約0.2 m<sup>2</sup>・h・°C/kcalと小さい屋根において外表面の日射吸収率を0.7から0.4に小さくすることは、舎内の放射熱量を抑制する観点からは熱貫流抵抗を約0.2～0.3 m<sup>2</sup>・h・°C/kcalだけ大きくすることに相当する。
- (7) 舎内における微小水平面の屋根内表面に対する形態係数が小さい畜舎においては上半球実効放射温度と屋根内表面の昇温との差は大きく、形態係数が1に近い畜舎においてはこれらの差はほとんどなかった。このことは、舎内の放射熱量に及ぼす畜舎形状の影響が大きいことを示唆している。なお、舎内放射熱量、屋根内表面の昇温および上半球実効放射温度に及ぼす屋根形状の影響についての詳細な検討は今後に残された問題である。

### 第3章 暑熱環境の評価に関する研究

#### 3.1 緒言

第2章において、夏季日中の畜舎内の気温は約27～34°C、放射熱量は約400～500 kcal/m<sup>2</sup>・hであることが明らかになった。このような高温で放射熱量の多い暑熱環境が家畜の生産性にどのように影響するかが問題である。

家畜の生産反応は温熱環境に大きく影響されると言われている<sup>5,6)</sup>が、生産反応と温熱環境との関係は明確にされていない<sup>8,9,13,87)</sup>。したがって、暑熱環境の評価は研究が進んでいる家畜の生理反応に基づかざるを得ない。一方、畜舎の環境設計の立場からは、家畜は生理的に快適な環境において最大の生産をもたらすであろうとの見解がある<sup>14,88)</sup>。

従来、温熱環境を家畜の生理反応で評価した研究<sup>22-31)</sup>の中で、放射熱を考慮した研究は1例<sup>27)</sup>であり、それも屋外での日射熱の影響を考慮したにすぎない。そこで本章では、生理反応に基づいて暑熱環境の評価を行うために肥育豚を対象にして、まず高温・高湿に対する呼吸数、直腸温度および心拍数の反応、次に放射熱を加えたときのそれらの反応を測定し、暑熱環境を評価する指標としては生理反応のうちで何がもっとも便利で適切であるかを明らかにする。さらに、その結果に基づいて温熱環境を生理反応を指標として総合的に評価する。

## 3.2 暑熱環境に対する肥育豚の呼吸数、直腸温度、心拍数の反応

### 3.2.1 実験方法

昭和56年11~12月に農林水産省畜産試験場の動物用人工気象室において気温、相対湿度および放射熱に対する豚の生理反応について実験した。

#### (1) 供試豚と飼養方法

供試豚はランドレース種(L種)3頭と大ヨークシャー種(W種)4頭の肥育豚であり、実験開始時の体重は38.0~50.5kgであった。供試豚は4頭(L種とW種それぞれ2頭)と3頭(L種1頭とW種2頭)に分けて人工気象室の2室に収容し、単飼ケージで飼養した。飼料は、1日当たり約2kgの産肉能力検定用のものをほぼ半分ずつ、9時頃と17時頃の2回に分けて給与した。水は飼料給与時に適量を与えた。

#### (2) 人工気象室の概要

ここでは、豚を4頭収容した室をC室、3頭収容した室をD室と呼ぶことにする。両室の大きさは同じであり、奥行きは5m、間口は3.5m、床からの天井高さは3mである。両室とも床はコンクリートであり、内壁表面はステンレスである。C、D室とも照明用として200Wの白熱電球が天井に16個取付けられている。暑熱環境の感作中は白熱電球を点燈し、感作終了後の18時から翌日の7時までこれを消燈した。D室にはさらに、熱放射用として床面上約2.3mの室内中央部に可視光線フィルターで覆われた500Wの白熱電球が21個設置されている。

室内の気温と相対湿度は両室ともフィードバック制御方式によって制御され、精度は気温が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内、相対湿度が $\pm 5\%$ 以内である。なお、室内の気温と相対湿度の測定値はミニコンピューターシステムに記録されるようになっている。

D室における熱放射は可視光線フィルターを透過するため長波長放射熱であり、放射熱量は白熱電球の点燈数を変えることによって10段階に調節できる。

両室内の風速は $0.25\text{m/s}$ と一定である。なお、制御装置で設定した感作条件は設定後15分以内に出現した。

#### (3) 生理反応の実験方法

##### (3-1) 気温および相対湿度に対する生理反応

気温は $30^{\circ}\text{C}$ と $35^{\circ}\text{C}$ の2水準を設定し、それぞれに対して相対湿度40、60、80%の3水準を組合せた感作条件下で生理反応を測定した。実験はC室とD室では異った組合せの感作条件下で同時並行的に行った。感作時間は約3時間としたが、豚の事故を防止するために、3時間以内でも直腸温度が $41^{\circ}\text{C}$ 以上になるときはただちに感作を終了した。

同じ室において1日に2種類の感作条件を設定するときには、1回目の測定が終了した後に快適な感作条件(気温 $20^{\circ}\text{C}$ )に戻し、生理反応が正常値に回復してから2回目の感作条件を設定した。

呼吸数と心拍数は、豚の両側の第6~7肋骨中央部および尻部の3か所に電極を張付け、呼吸運動に伴う電極間のインピーダンス(impedance)の変化と心臓の運動に伴う電極間の電位差を、テレメーター計測装置を通して熱ペン書きオシログラフにそれぞれ連続記録した。直腸温度はサーミスター温度計を肛門から約10~15cmの深さまで挿入して測定し、測定値はテレメーター計測装置を通してミニコンピューターシステムに収録した。

生理反応の測定は10時から16時にかけて行った。測定時間外は両室とも気温を $20^{\circ}\text{C}$ の一定値とし、相対湿度は次の日に行う感作条件に設定した。

##### (3-2) 放射熱に対する生理反応

豚に入射する放射熱量は、気温が $30^{\circ}\text{C}$ で相対湿度が60%の条件において高水準と中水準の2種類とした。

放射熱の感作は、気温および相対湿度の設定条件下で生理反応が安定した後に開始した。感作時間は約40～60分とした。放射熱の感作は、3頭を同時に行うと豚に入射する放射熱量がケージの位置によって著しく異なることが予想されたので、1頭ごとに行った。

豚体表面上における正味放射熱量は、豚の直上と直下の水平面において通風式風防型放射収支計（英弘精機製、CN-40）を用いて測定した。また体表面温度は放射温度計（BARNES社製、モデル12-8500）で測定し、正味放射熱量と体表面温度は放射熱の感作前後と感作中に数回測定した。なお豚体表面に入射する放射熱量は、豚体表面の放射率を0.955<sup>47)</sup>として、測定した正味放射熱量と体表面温度から算出した。

### 3.2.2 実験結果および考察

#### (1) 高温環境に対する生理反応

快適気温20℃における生理反応は、相対湿度40, 60, 80%の3水準間では差異が見られなかったため、供試豚ごとの平均値で示すと表3-1のとおりである。表3-1に示した呼吸数、直腸温度および心拍数は、従来提示されている正常値<sup>79,89,90)</sup>にほぼ一致する。以下においては、高温環境に対する生理反応は表3-1に示した値からの増減値で表すことにした。

表3-1 気温20℃における供試豚の呼吸数、直腸温度および心拍数

供試豚	品種	体重 (kg)	呼吸数 (回/分)	直腸温度 (°C)	心拍数 (回/分)
C1	W	47.6	17.7	39.1	105
C2	L	50.2	25.5	39.6	112
C3	L	38.0	17.0	39.1	125
C4	W	39.5	20.1	39.0	113
D1	W	47.2	40.2	39.1	118
D2	W	50.5	48.0	39.5	121
D3	L	48.4	25.2	39.2	123
(平均)		45.9	27.7	39.2	117

1) W: 大ヨークシャー種 L: ランドレース種

2) 相対湿度は40～80%である。

#### (1-1) 呼吸数の反応

気温が20℃からそれぞれ30℃と35℃に上昇したときの呼吸数の変化を相対湿度40, 60, 80%別に図3-1に示す。

図3-1から、気温が30℃で相対湿度が40, 60, 80%（以後、30℃-40%のように書き表す）および35℃-40, 60%における呼吸数の変化にはばらつきが大きく、気温と相対湿度の差異が見られない。また、呼吸数は時間が経過するにつれて平衡状態に達する、いわゆる緩和現象<sup>91)</sup>を示す傾向にある。他方、35℃-80%における呼吸数は感作時間に対して直線的に増加している。なお、感作開始から1時間後までにおける呼吸数の平均増加率は、気温が30℃で相対湿度が40, 60, 80%のときにはそれぞれ104, 123, 76回/分であり、気温が35℃のときにはそれぞれ81, 89, 172回/分であった。

35℃-80%を除いた他の感作環境条件においては呼吸数の変化にはばらつきが大きいことから、たんに瞬間的な呼吸数を生理反応の指標として用いることには問題がある。そこで、本実験結果から平衡状態の呼吸数を予測するために以下の検討を行った。

時刻 $t=0$ において外的条件を変化させ、そのまま一定に保つとき、緩和現象を示す物理量 $Y$ の $t$ 時間後における値は、時定数を $\tau$ とすると次式<sup>91)</sup>で表すことができる。

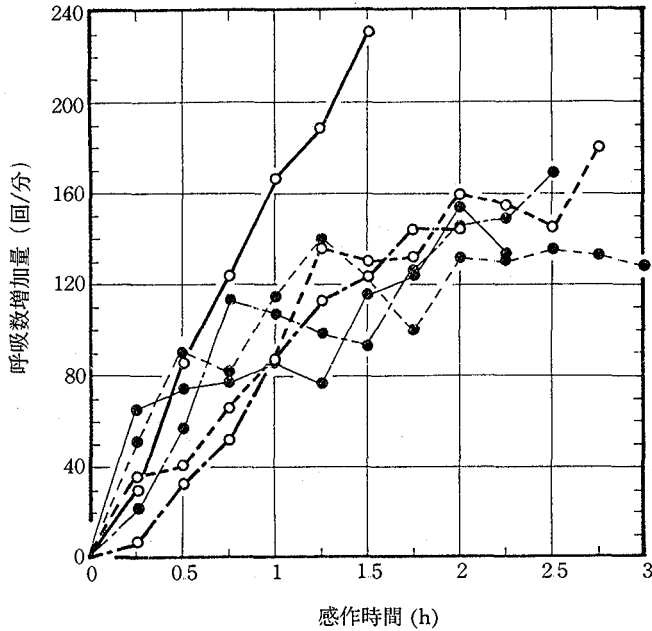


図 3-1 呼吸数反応に及ぼす気温と湿度の影響 (呼吸数増加量は気温 20°C における呼吸数を基準としている)

- : 気温 35°C    - - - - : 相対湿度 40%
- - - - : 相対湿度 60%
- : 気温 30°C    ———— : 相対湿度 80%

$$Y = C_2 - (C_2 - C_1) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3-1)$$

ここで、 $C_1$  は  $t=0$  における  $Y$  の値であり、 $C_2$  は  $t=\infty$  すなわち平衡状態における  $Y$  の値である。

本実験結果のうち 35°C-80% の場合を除いた呼吸数の反応に(3-1)式を適用し、環境条件別に応答時間と平衡に達したときの呼吸数 (以下においては平衡呼吸数と呼ぶことにする) を求めた結果を表 3-2 に示す。表 3-2 には参考のために、ROBINSON と LEE<sup>90)</sup> の測定値から筆者が算出した応答時間と平衡呼吸数も合わせて示した。なお、彼らの測定値は 21.1°C-65% の条件から高温条件に移行したときの豚 (体重約 60 kg) の呼吸数である。

表 3-2 から、気温が 30°C と 35°C における平衡呼吸数はそれぞれ 149~201 回/分と 227~342 回/分であり、両者間には 26~193 回/分の差異がある。また、気温が 30°C においては平衡呼吸数に及ぼす相対湿度の影響には一定の傾向は見られないが、35°C においては相対湿度が 40% から 60% に上昇すると平衡呼吸数は 115 回/分増加する。さらに、平衡呼吸数の 63.2% (時定数)、80% および 90% に達する応答時間には環境条件によって大きい差が見られる。

本実験結果の応答時間と、ROBINSON と LEE<sup>90)</sup> の測定値から求めた応答時間との間には、ほぼ同じ環境条件においてもかなりの差が見られる。このような差は、本実験が気温 20°C、相対湿度 40、60、80% の初期環境条件から気温 30、35°C の環境条件に移行したときの反応であるのに対して、ROBINSON と LEE<sup>90)</sup> の測定は気温 21.1°C、相対湿度 65% の初期環境条件から相対湿度一定で各気温条件に移行したときの反応であり、換言すれば初期環境条件と移行環境条件との相対的な差異によるためと考えられる。

一方、本実験結果の気温 30°C における平衡呼吸数 149~201 回/分、および気温 35°C における平衡呼吸数 227~342 回/分は、ROBINSON と LEE<sup>90)</sup> の測定値から求めた 29.5°C と 32.2°C における 137~207 回/分、および 35°C

表 3-2 暑熱環境に対する呼吸数の反応特性

環境条件	応答時間 (h)			平衡呼吸数 (回/分)
	63.2%応答	80%応答	90%応答	
30°C—40%	0.4	0.7	0.9	154
30°C—60%	1.1	1.7	2.5	201
30°C—80%	0.4	0.7	1.0	149
35°C—40%	2.8	4.5	6.4	227
35°C—60%	6.5	10.5	15.0	342
23.9°C—65%*	0.5	0.8	1.1	49
26.7°C—65%*	2.4	3.9	5.6	71
29.4°C—65%*	1.7	2.7	3.8	137
32.2°C—65%*	3.0	4.8	6.9	207
35.0°C—65%*	5.2	8.3	11.9	358
37.8°C—65%*	0.9	1.5	2.1	236
40.6°C—65%*	2.6	4.1	5.9	356
43.3°C—65%*	1.6	2.6	3.7	334

\*: ROBINSON と LEE<sup>90)</sup> の測定値から筆者が算定した。

以上における236～358回/分にそれぞれほぼ一致している。このことから、平衡呼吸数は初期環境条件に関係なく、感作した環境条件だけによって決まると考えられる。

(1-2) 直腸温度の反応

気温が20°Cから30°Cと35°Cに上昇したときの直腸温度の変化を相対湿度別に図3-2に示す。なお30°C—

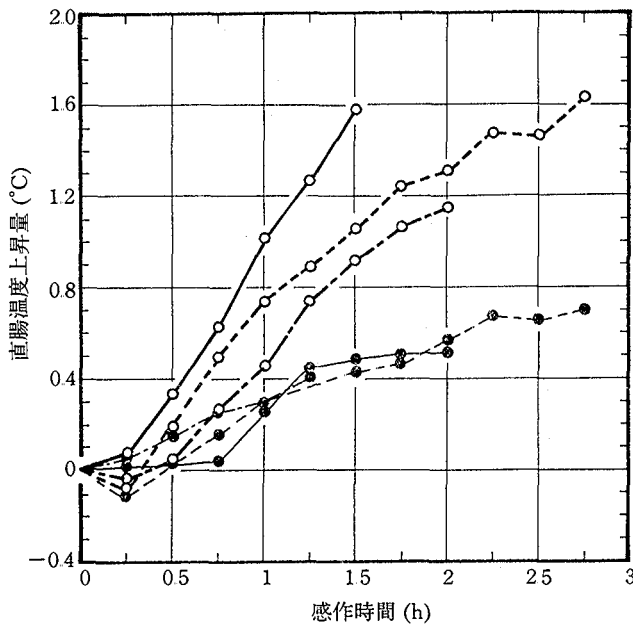


図 3-2 直腸温度反応に及ぼす気温と湿度の影響 (直腸温度上昇量は気温 20°C における直腸温度を基準としている)

○: 気温 35°C    - - - - : 相対湿度 40%  
 ●: 気温 30°C    - - - - : 相対湿度 60%  
                   —: 相対湿度 80%

60%における直腸温度は、サーミスター温度計が肛門から外れた豚が興奮状態になり、他の豚も興奮し始めたために感作開始後1.25時間までしか測定できなかった。

図3-2において、直腸温度は感作開始直後に低くなる傾向がある。この傾向は暑熱環境への移行が急なために血管の拡張反応が過剰に働き、一時的に過度の体熱放散が行われたためと考えられる。なお、感作開始から1時間後までにおける直腸温度の平均上昇率は、気温が30°Cで相対湿度が40, 60, 80%のときにはそれぞれ0.4, 0.3, 0.2°Cであり、気温が35°Cのときにはそれぞれ0.8, 0.5, 1.0°Cであった。

呼吸数の場合と同様に、直腸温度の反応に(3-1)式を適用し、環境条件別に応答時間と平衡に達したときの直腸温度（以下においては平衡直腸温度と呼ぶことにする）を求めた結果を表3-3に示す。表3-3には、ROBINSONとLEE<sup>90)</sup>が呼吸数の場合と同じ条件で測定した直腸温度の反応から筆者が算出した応答時間と平衡直腸温度も合わせて示した。なお、(3-1)式が適用できたのは本実験では30°C-40, 80%と35°C-40%の場合だけであり、ROBINSONとLEE<sup>90)</sup>の測定値では29.5°Cと32.2°Cの場合だけであった。

表3-3から、平衡直腸温度は35°C-40%の場合を除いて40.3-41.1°Cであり、平衡直腸温度に及ぼす気温と相対湿度の影響には一定の傾向が見られない。また、平衡直腸温度と表3-1に示した気温20°Cにおける直腸温度との差は約4°C以下である。なお、35°C-40%における平衡直腸温度43.1°Cは、鎌田ら<sup>92)</sup>が報告した体重約50kgの豚の致死体温（約43°C）に一致している。

平衡直腸温度の63.2, 80, 90%に達する応答時間は、気温が高くなるほど、および相対湿度が高くなるほど短くなる傾向にある。また、表3-2と表3-3から直腸温度の応答は呼吸数の応答よりも著しく遅いと言える。

暑熱環境の感作に対して直腸温度は変化幅が小さいことおよび応答が遅いことから、暑熱環境を評価する生理指標として直腸温度は呼吸数に比較して不便であると考えられる。

表3-3 暑熱環境に対する直腸温度の反応特性

環境条件	応答時間 (h)			平衡直腸温度 (°C)
	63.2%応答	80%応答	90%応答	
30°C-40%	5.9	9.5	13.6	41.1
30°C-80%	3.8	6.1	8.7	40.4
35°C-40%	5.0	8.1	11.6	43.1
29.5°C-65%*	9.3	15.0	21.5	40.9
32.2°C-65%*	5.2	8.4	12.0	40.3

\*: ROBINSONとLEE<sup>90)</sup>の測定値から筆者が算定した。

### (1-3) 心拍数の反応

気温が20°Cから30°Cと35°Cに上昇したときの心拍数の変化を相対湿度別に図3-3に示す。

図3-3から、いずれの感作環境条件においても感作開始後の3時間以内における心拍数は気温20°Cの場合に比較してほぼ±20回/分の差異であり、心拍数に及ぼす気温と相対湿度の影響はほとんど見られない。

ROLLERとGOLDMAN<sup>25)</sup>および山本ら<sup>30)</sup>は、豚の心拍数が気温や相対湿度などの環境条件よりも精神的動揺や採食活動などによって大きく影響されることを指摘している。本実験結果からは、このような指摘が再認識された。

### (2) 放射熱に対する生理反応

#### (2-1) 高水準放射熱量 (880 kcal/m<sup>2</sup>·h) の場合

30°C-60%の環境条件において放射熱量880 kcal/m<sup>2</sup>·hを41分間照射したときの生理反応を図3-4に示す。

図3-4から、呼吸数は放射熱照射前において156回/分であり、照射開始の13分後においても169回/分とほと



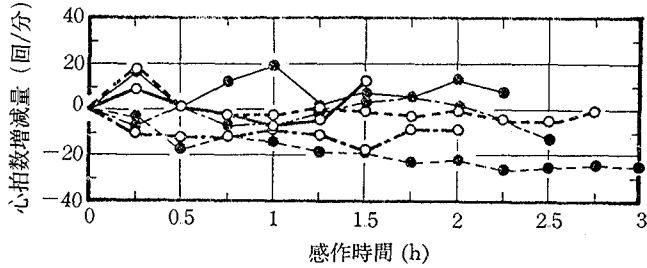


図 3-3 心拍数反応に及ぼす気温と湿度の影響 (心拍数増減量は気温 20°C における心拍数を基準としている)

- : 気温 35°C    - - - : 相対湿度 40%
- : 気温 35°C    - - - : 相対湿度 60%
- : 気温 30°C    — : 相対湿度 80%

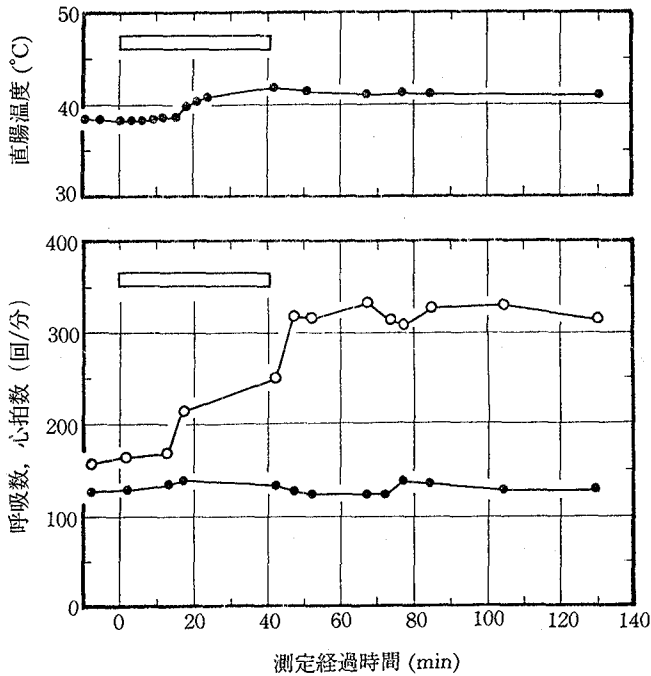


図 3-4 30°C-60%において豚体に 880 kcal/m<sup>2</sup>・h の長波長放射熱を41分間照射したときの生理反応

- : 呼吸数    ●: 直腸温度, 心拍数
- : 放射熱照射

んど変わらず、その後、照射終了直後まではほぼ直線的に増加し、約320回/分に達する。照射終了後はこの値でほぼ一定になる。

呼吸数が増加し始めるのは照射開始13分後からであり、このときまでに豚体に入射した積算放射熱量は約 190 kcal/m<sup>2</sup>であった。すなわち豚体に入射する放射熱の積算量が約 190 kcal/m<sup>2</sup>以上になると、呼吸数は増加し始めると言える。

放射熱照射終了後の呼吸数320回/分は、表 3-2 に示した 35°C-60%の環境条件における平衡呼吸数342回/分に近い値である。また、41分間の放射熱照射に対する呼吸数の増加率を、呼吸数がほぼ直線的に増加した経過時

間内（照射開始13分後から照射終了6分後まで）で求めるならば、1時間当たり $\{317(\text{回/分})-169(\text{回/分})\} \div \{34(\text{分})/60(\text{分})\} = 261(\text{回/分})$ となる。この増加率は(1-1)項で述べた $35^{\circ}\text{C}-80\%$ における1時間当たりの増加率172回/分よりも著しく大きい。換言すれば、呼吸数の増加率の観点からは、 $35^{\circ}\text{C}-80\%$ の環境条件の影響よりも豚体表面に $880 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ の放射熱量が41分間入射する影響の方が大きいと言える。なお、気温が $30^{\circ}\text{C}$ の環境において放射熱の照射が呼吸数の増加を助長することはBALDWINとINGRAM<sup>77)</sup>やINGRAM<sup>79)</sup>も報告している。

直腸温度は放射熱照射前には $38.5^{\circ}\text{C}$ であり、照射開始15分後から上昇を始め、照射終了1分後には $41.7^{\circ}\text{C}$ に達する。その後直腸温度はわずかに降下しながら推移し、照射終了90分後には $41.1^{\circ}\text{C}$ になる。

直腸温度が上昇し始めるまでに豚体に入射した積算放射熱量は約 $220 \text{ kcal/m}^2$ であった。すなわち、 $30^{\circ}\text{C}-60\%$ の環境条件において豚体に入射する放射熱の積算量が約 $220 \text{ kcal/m}^2$ 以上になると、直腸温度は上昇し始めると言える。

放射熱照射終了後の直腸温度 $41.1-41.7^{\circ}\text{C}$ は、表3-3に示した $30^{\circ}\text{C}-40\%$ の環境条件における平衡直腸温度 $41.1^{\circ}\text{C}$ に近い。また、41分間の放射熱照射に対する直腸温度の上昇率を、直腸温度が上昇し始めた照射開始15分後から照射終了1分後までの27分間における温度上昇で表すならば、1時間当たり約 $7.1^{\circ}\text{C}$ になる。この上昇率は(1-2)項で述べた $35^{\circ}\text{C}-80\%$ における1時間当たりの上昇率 $1.0^{\circ}\text{C}$ よりも著しく大きく、呼吸数の場合と同様に、放射熱の照射は直腸温度の上昇率にも大きく影響すると言える。

放射熱の照射が終了しても呼吸数および直腸温度はすぐには降下しない。このことは、高温環境下においては短時間の放射熱照射でも呼吸数および直腸温度に及ぼす放射熱の影響が長時間に及ぶことを意味している。

図3-4において、心拍数は測定経過時間を通して123~138回/分とほぼ一定値であり、心拍数に及ぼす放射熱の影響はほとんど見られない。

(2-2) 中水準放射熱量 ( $570 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ ) の場合

$30^{\circ}\text{C}-60\%$ の環境条件において放射熱量  $570 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  を59分間照射したときの生理反応を図3-5に示す。

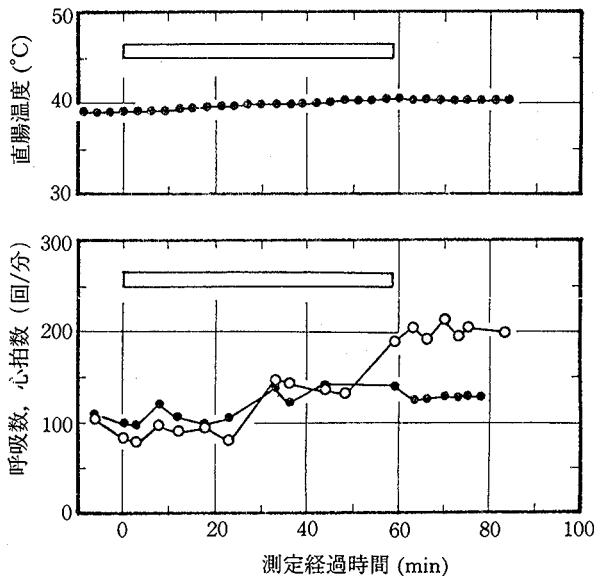


図3-5  $30^{\circ}\text{C}-60\%$ において豚体に  $570 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ の長波長放射熱を59分間照射したときの生理反応

○: 呼吸数 ●: 直腸温度, 心拍数  
□: 放射熱照射

図 3-5 から、呼吸数は放射熱照射前から照射開始23分後まで82~105回/分とほとんど変わらない傾向にある。その後呼吸数は増加し始め、33分後には147回/分に達する。33分後から48分後までは138~147回/分とほぼ一定であり、その後呼吸数は再び増加し、照射終了直後には192回/分に達する。照射終了以降は約200回/分とほぼ一定である。このような呼吸数の段階的な上昇変化は、鶏を 38°C-50%の環境条件に感作したときにも見られることを SHISHIDO<sup>93)</sup> が報告している。

呼吸数が増加し始めるまでに豚体に入射した積算放射熱量は約 220 kcal/m<sup>2</sup> であり、前述した照射放射熱量 880 kcal/m<sup>2</sup>·h の場合の積算放射熱量 190 kcal/m<sup>2</sup> に近い値である。このことから、30°C-60%の環境条件において豚体に入射する積算放射熱量が約 190~220 kcal/m<sup>2</sup> 以上になると、呼吸数が増加し始めると言える。

放射熱照射終了後の呼吸数約200回/分は、表 3-2 に示した 30°C-60%における平衡呼吸数201回/分に等しい。また、59分間の放射熱照射に対する呼吸数の増加率を、照射開始23分後から照射終了直後までの36分間で求めるならば、1時間当たり183回/分になる。この増加率は(1-1)項で述べた 35°C-80%における1時間当たりの増加率 172回/分に近い値である。換言すれば、呼吸数の増加率の観点から、30°C-60%において豚体表面に 570 kcal/m<sup>2</sup>·h の放射熱量が59分間入射する影響は、35°C-80%の環境における影響とほぼ同じであると言える。

直腸温度は、放射熱照射開始時の 39.3°C から照射終了10分後の 40.6°C まで徐々に上昇し、その後は 40.5~40.6°C とほぼ一定になる。

放射熱照射終了後の直腸温度 40.5~40.6°C は、表 3-3 に示した 30°C-80%の環境条件における平衡直腸温度 40.4°C に近い。また、59分間の放射熱照射に対する直腸温度の上昇は 1.3°C である。この上昇率は(1-2)項で述べた 35°C-80%における1時間当たりの上昇率 1.0°C に近い値である。呼吸数の場合と同様に、放射熱の照射は直腸温度の上昇率にも大きく影響していると言える。

放射熱の照射が終了しても呼吸数および直腸温度は、照射放射熱量が 880 kcal/m<sup>2</sup>·h の場合と同様に、すぐには降下しない。

図 3-5 において、心拍数は放射熱照射前から照射開始30分後までは99~122回/分であり、その後はやや増加し、照射終了時まで約130~140回/分である。照射終了後は約130回/分とほぼ一定である。心拍数は放射熱の照射によってやや増加する傾向にあるが、心拍数に及ぼす放射熱の影響は小さいと言える。

以上から、呼吸数は直腸温度および心拍数に比較して変化幅が大きく、かつ測定も容易なため、暑熱環境を評価する生理反応として便利な指標であると言える。ただし、平衡状態に達するまでの呼吸数の反応にはばらつきが大きいことに留意すべきである。次節においては、呼吸数を指標とした暑熱環境の評価法について検討する。

### 3.3 肥育豚の呼吸数を指標とした暑熱環境評価温度

#### 3.3.1 測定方法

昭和55年夏季に香川大学農学部附属農場の豚舎において、暑熱環境に対する豚の呼吸数の反応を測定した。

##### (1) 供試豚と飼養方法

供試豚は交雑種（ハンプシャー種×ランドレース種）雄去勢豚の2頭である。供試豚は測定時の単飼ケージに慣らすため、ケージには1週間前から収容した。ケージ収容時の豚の体重は25 kgと31 kgであり、10日間の測定が終了したときの体重はそれぞれ32 kgと41 kgであった。

飼料は市販の配合飼料を午前（8~9時）と午後（16~17時）の2回に分けて給与し、水は採食後に十分与えた。なお、豚は採食時を除いてほとんど横臥していた。

## (2) 温熱環境および豚の生理反応の測定方法

放射熱への感作は1頭ずつ交互に行い、感作開始前と感作中において豚の呼吸数が安定したときを見計って以下の項目について測定した。

- |         |               |
|---------|---------------|
| ① 乾球温度  | ② 湿球温度        |
| ③ 風速    | ④ 豚体に入射する放射熱量 |
| ⑤ 豚の呼吸数 | ⑥ 豚の体表面温度     |

これらの測定は10～15時において数回行った。温熱環境は放射熱を除いて自然の状態とした。

乾球温度と湿球温度は豚体近傍においてアスマン通風乾湿球湿度計（太田計器製）を用いて測定した。風速もまた豚体近傍において熱線風速計（日本科学工業社製，11-111）を用いて測定し、読取り値は30～60秒間における計器の最多指示値とした。

豚体に入射する放射熱量は、軀幹部中央の上・下両側体表面上のそれぞれにおいて通風式風防型放射収支計（英弘精機製，CN-40）で測定し、豚体の上・下面における測定値の平均値を豚体に入射する放射熱量とした。

豚体に入射する放射熱量は、第2章で述べた実測値を参考にして約400～800kcal/m<sup>2</sup>・hになるように赤外線ランプ（200W）の照射と直射日光下への暴露によって調整した。赤外線ランプによる放射熱量は電圧の変化で調整した。また、赤外線ランプによる放射熱量の限界を越えて放射熱を照射する場合には、ケージを屋外に出し黒色寒冷紗で覆った。この場合、直射日光から豚体の間接的に入射する放射熱量の調整は、寒冷紗の被覆枚数を2～4枚に変えて行った。なお、赤外線ランプで照射する場合も、黒色寒冷紗で被覆する場合も、上方と下方から豚体に入射する放射熱量はほぼ等しくなるように留意した。

豚の1分間当りの呼吸数は、脇腹の動きを30秒間数えることを4、5回繰返し、これらの平均値から求めた。

暑熱環境における豚の体表面温度は体表面全体にわたり一様になる傾向にある<sup>94)</sup>ことから、豚体表面温度は背から脇腹にかけての体表面の4か所だけで赤外線放射温度計（MICRON社製，MICRON-15）により測定し、これらの平均値を豚体表面温度とした。

## 3.3.2 解析方法

測定結果の解析に際し、呼吸数に及ぼす温熱環境要因の影響を一元的に表すために、放射熱量は平均放射温度<sup>84)</sup>に変換し、風速も新たな温度変換を試みた。

$$t_{mr} = 100 \left( \frac{Q}{4.88} \right)^{1/4} - 273 \quad (3-2)$$

$$t_{ea} = t_s - \frac{C_v}{C_0} (t_s - t_d) \quad (3-3)$$

ここで

$t_{mr}$  : 平均放射温度 (°C)

$Q$  : 豚体表面に入射する放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>・h)

4.88: 完全黒体の放射定数 (kcal/m<sup>2</sup>・h・°K<sup>4</sup>)

$t_{ea}$  : 風速相当温度 (°C)

$t_s$  : 豚体表面温度 (°C)

$C_v$  : 風速が  $V$  m/s における豚体表面の対流伝熱係数 (kcal/m<sup>2</sup>・h・°C)

$C_0$  : 無風時における豚体表面の対流伝熱係数 (kcal/m<sup>2</sup>・h・°C)

$t_d$  : 乾球温度 (°C)

$t_{ea}$  は、風速が  $V$  m/s における豚体からの対流放熱量と等しい対流放熱量を与える無風時の仮想気温であり、風速相当温度と呼ぶことにした。豚は測定中に横臥状態であったため、豚の体表面における対流伝熱係数は粗面平板における値<sup>84)</sup>を用いた。なお、体表面からの蒸散量は小さい<sup>95)</sup>ことから、潜熱放熱量に及ぼす風速の影響は無視した。

3.3.3 測定結果および考察

解析に供した温熱環境要因、呼吸数および豚体表面温度の平均値と変動範囲を表 3-4 に示す。データ組数は 52 であった。

表 3-4 温熱環境および供試豚の生理反応の平均値と変動範囲

要 因	平均	標準偏差	最高	最低
温熱環境				
乾球温度 (°C)	27.5	1.5	30.4	24.2
湿球温度 (°C)	24.1	0.9	26.6	22.3
風 速 (m/s)	0.3	0.3	1.2	0.1
放射熱量 (kcal/m <sup>2</sup> ·h)	442	88	827	376
風速相当温度 (°C)	25.6	1.9	29.7	21.5
平均放射温度 (°C)	34.5	13.7	87.8	23.3
生理反応				
呼吸数 (回/分)	107	48	215	22
豚体表面温度 (°C)	37.4	1.3	40.3	34.5

表 3-5 温熱環境要因間の単相関係数

	$t_w$	$t_{ea}$	$t_{mr}$
$t_d$	0.818**	0.664**	0.246
$t_w$		0.611**	0.079
$t_{ea}$			-0.081

\*\* : 1%水準で有意  $t_d$  : 乾球温度 (°C)  
 $t_w$  : 湿球温度 (°C)  $t_{ea}$  : 風速相当温度 (°C)  
 $t_{mr}$  : 平均放射温度 (°C)

温熱環境要因間の単相関係数を表 3-5 に示す。平均放射温度を除いた 3 種類の環境要因間にはいずれも 1%水準で有意な正の相関がある。

(1) 呼吸数に及ぼす温熱環境要因の影響

呼吸数と乾球温度の関係を図 3-6 に示す。図 3-6 から、呼吸数は 22~215 回/分の範囲であり、豚は多くの測定条件において熱性多呼吸になっている。豚の熱性多呼吸には牛において見られる速くて浅い呼吸型から呼吸数を減じた深い呼吸型への移行<sup>96)</sup>がほとんど生じない<sup>89)</sup>ことから、図 3-6 に示した呼吸数は豚の熱ストレスに対応していると見させる。

呼吸数に対する温熱環境要因の単相関は、表 3-

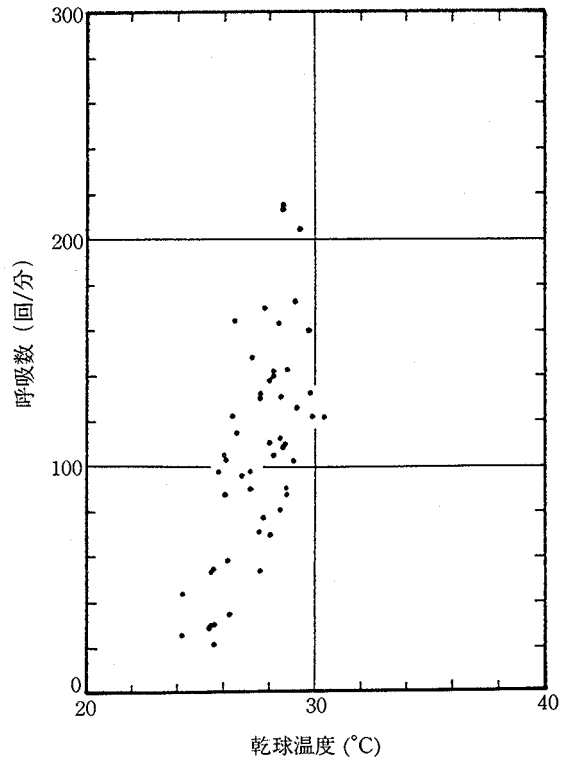


図 3-6 呼吸数と乾球温度の関係

表 3-6 呼吸数と温熱環境要因との単相関係数

	$t_d$	$t_w$	$t_{ea}$	$t_{mr}$
RR	0.648**	0.498**	0.273*	0.688**

\*, \*\*: 5%, 1%水準で有意 RR: 呼吸数(回/分)  
 $t_d, t_w, t_{ea}, t_{mr}$ : 表 3-5 に同じ

表 3-7 呼吸数と温熱環境要因との偏相関係数

	$t_d$	$t_w$	$t_{ea}$	$t_{mr}$
RR	0.381**	0.127	-0.064	0.695**

\*\* : 1%水準で有意 RR: 呼吸数(回/分)  
 $t_d, t_w, t_{ea}, t_{mr}$ : 表 3-5 に同じ

表 3-8 呼吸数の温熱環境要因に対する重回帰分析

項 目	$t_d$	$t_{mr}$
偏回帰係数	16.3	1.96
偏回帰係数の t 値	6.52**	7.20**
標準偏回帰係数	0.510	0.563
重相関係数	0.848	
重回帰式	$RR = -409 + 16.3 t_d + 1.96 t_{mr}$ ( $F_0 = 62.5^{**}$ )	

- 1) \*\*: 1%水準で有意 RR: 呼吸数(回/分)  
 $t_d$ : 乾球温度(°C)  $t_{mr}$ : 平均放射温度(°C)  
 2) 湿球温度と風速相当温度は説明変数として有意でなかった。

6 に示すようにすべて有意である。しかし、表 3-5 に示したように平均放射温度を除いた環境要因の間には有意な単相関があるため、呼吸数に対するそれぞれの単相関には他の環境要因の影響が含まれている。このような影響を取除くために、各要因について偏相関係数を求めた。その結果を表 3-7 に示す。

表 3-7 から、呼吸数に対する乾球温度と平均放射温度の偏相関は有意であり、湿球温度と風速相当温度の偏相関は有意でない。このことは、測定に供した温熱環境条件において呼吸数に真の影響を及ぼす環境要因が乾球温度と平均放射温度であることを意味している。

呼吸数の温熱環境要因に対する重回帰分析結果を表 3-8 に示す。表 3-8 から、乾球温度と平均放射温度の偏回帰係数はともに 1%水準で有意であり、重回帰式も 1%水準で有意である。

乾球温度と平均放射温度の間には有意な相関がない(表 3-5)ことから、乾球温度と平均放射温度の偏回帰係数はそれぞれ 1°C 当りの呼吸数の変化量を表している。すなわち、乾球温度と平均放射温度がそれぞれ 1°C 上昇すると呼吸数は約 16 回/分と約 2 回/分だけ増加する。しかしながら、表 3-4 に示したように、乾球温度の変動範囲は 24.2~30.4°C であるのに対し、平均放射温度の変動範囲は 23.3~87.8°C と大きいことから、呼吸数に及ぼす相対的な影響の度合いは偏回帰係数からではなく標準偏回帰係数から判断すべきである。表 3-8 に示したように、乾球温度と平均放射温度の標準偏回帰係数はそれぞれ 0.510 と 0.563 であり、呼吸数に及ぼす平均放射温度の影響の度合いは乾球温度よりもわずかに大きいことがわかる。このことは、SHRODE ら<sup>20)</sup> が乳牛における生理反応(呼吸数、直腸温度、心拍数)の温熱環境要因(気温、水蒸気圧、風速、日射熱)に対する重回帰分析から指摘したことと同様である。

(2) 呼吸数を指標とした暑熱環境評価温度

ここでは、呼吸数を指標として暑熱環境を一元的に評価する尺度(EET)は(3-4)式で表せるとし、EET を暑熱環境評価温度と呼ぶことにする。暑熱環境評価温度は、表 1-1 に示した温熱指標<sup>22-31)</sup>とは若干異なる。すなわち、従来の温熱指標は温熱環境を家畜の体熱放散条件として捉えた一元的な評価尺度であるのに対し、暑熱環境評価温度は豚体が受ける放射熱を表す平均放射温度を含んだ評価尺度である。ただし、いずれも家畜の生理反応に基づく評価尺度であることには変わりはない。

$$EET = a t_d + b t_w + c t_{ea} + d t_{mr} \quad (3-4)$$

ただし

$$a + b + c + d = 1$$

$$0 \leq a, b, c, d \leq 1$$

ここで

EET : 暑熱環境評価温度 (°C)

$t_d$  : 乾球温度 (°C)

$t_w$  : 湿球温度 (°C)

$t_{ea}$  : 風速相当温度 (°C)

$t_{mr}$  : 平均放射温度 (°C)

a, b, c, d: 重み

(3-4)式の重みを求めるために、重み a, b, c, d を0.1刻みで与えた286通りの暑熱環境評価温度それぞれにおいて、52組の測定値を(3-4)式に代入し、暑熱環境評価温度と呼吸数との単相関係数を計算した。計算の結果、単相関係数が最大になった暑熱環境評価温度は(3-5)、(3-6)式であり、風速相当温度の重みはゼロであった。

$$EET=0.6 t_d+0.3 t_w+0.1 t_{mr} \quad (3-5)$$

$$EET=0.7 t_d+0.2 t_w+0.1 t_{mr} \quad (3-6)$$

(3-5)、(3-6)式の暑熱環境評価温度と呼吸数との単相関係数は両者とも0.850 (1%水準で有意)であった。

(3-5)、(3-6)式の暑熱環境評価温度における重みはそれぞれ乾球温度については0.6~0.7、湿球温度については0.2~0.3、平均放射温度については0.1である。一方、従来の報告<sup>23, 25, 30)</sup>によれば表1-1に示したように、豚の温熱指標における乾球温度と湿球温度の重みはそれぞれ0.6~0.75と0.25~0.4である。暑熱環境評価温度における重みは、従来の温熱指標における重みと比較すると乾球温度についてはほぼ同じであるが、湿球温度については若干小さく、湿球温度についての減少分が平均放射温度の重みになっている。

表1-1に示したように、三村ら<sup>24)</sup>および山本(あや)と山本(禎)<sup>27)</sup>は乳牛の温熱指標として次式の体感温度を提示している。

$$ET=0.35 t_d+0.65 t_w \quad (3-7)$$

$$ET=0.09 t_d+0.65 t_w+0.26 t_g \quad (3-8)$$

ここで

ET: 体感温度 (°C)

$t_d$ : 乾球温度 (°C)

$t_w$ : 湿球温度 (°C)

$t_g$ : 黒球温度 (°C)

日射熱の影響も評価した(3-8)式における乾球温度の重み0.09は、(3-7)式における乾球温度の重み0.35から(3-8)式における黒球温度の重み0.26を差引いた値である。体表面における熱放散の観点から言えば、暑熱環境評価温度においても乾球温度の重みが平均放射温度の重みだけ小さくなることは容易に推察できる。しかしながら、本結果では湿球温度の重みが平均放射温度の重みだけ小さくなった。この相違は、(3-8)式が広範囲な乾球温度、湿球温度および黒球温度に基づいているのに対し、本測定で得られた(3-5)、(3-6)式は暑熱環境に主眼を置き、放射熱量の変動範囲に対して乾球温度と湿球温度の変動範囲が小さかったことが主な原因と考えられる。なお、広範囲の温熱環境に対する一般的な環境評価温度については今後に残された問題である。

(3-5)式と(3-6)式の暑熱環境評価温度に対する呼吸数の回帰係数はそれぞれ1°C当り20.8回/分と20.0回/分であった。野村ら<sup>97)</sup>の報告によれば、肥育豚の呼吸数が1回/分増加すると日増体量は4g減少する。このことを本結果に適用するには前述したように測定条件などの相違から問題があると考えられる。しかし、生産性の目安を見るためにこれを適用すれば暑熱環境評価温度1°Cの上昇は豚の日増体量を約80g減少させる。豚の快適温度(15.5~24°C)における日増体量は約0.9~1.1kgである<sup>98)</sup>ことから、暑熱環境評価温度1°Cの上昇は快適温度における日増体量のほぼ10%近くの低下をきたすことになる。

### 3.4 摘 要

本章では、夏季の畜舎内における暑熱環境の評価を家畜の生理反応に基づいて行うことを目的に、肥育豚を対象にして2種類の実験を行った。

第1の実験は、体重が約38～51 kgの肥育豚7頭を用い、人工気象室において気温、相対湿度および放射熱に対する生理反応（呼吸数、直腸温度、心拍数）を測定し、生理反応の応答特性の観点から、暑熱環境を評価する指標として3種類の生理反応の中で何がもっとも便利かを検討したものである。なお、この実験において風速はつねに0.25 m/sと一定であった。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 気温が20°Cの快適環境から気温が30°Cと35°Cでそれぞれ相対湿度が40, 60, 80%の暑熱環境に肥育豚を感作したとき呼吸数と直腸温度は、環境条件が高温・高湿になるにつれて緩和現象（時間が経過するにつれて平衡状態に達する現象）型の増加、上昇の変化から直線的な増加、上昇の変化になる傾向にあった。
- (2) 緩和現象型の変化を示した呼吸数と直腸温度について応答時間と平衡状態に達したときの値を推定した。それによれば、暑熱環境に対する呼吸数の応答は直腸温度の応答よりも速いこと、また呼吸数の変化幅は直腸温度の変化幅よりも大きいことから、暑熱環境を評価する生理指標として呼吸数は直腸温度に比較して便利であると言える。
- (3) 気温が30°Cで相対湿度が60%の環境条件における放射熱（880 kcal/m<sup>2</sup>・hを41分間照射した場合と、570 kcal/m<sup>2</sup>・hを59分間照射した場合）が呼吸数と直腸温度に及ぼす影響は、気温が35°Cあるいはそれ以上の気温条件における影響とほぼ同じである。たまた、豚体に入射する積算放射熱量が190～220 kcal/m<sup>2</sup>以上になると呼吸数と直腸温度が増加、上昇し始めると推定された。
- (4) 呼吸数の場合に比較して、心拍数に及ぼす気温、相対湿度および放射熱の影響は小さかった。
- (5) 以上から、暑熱環境を評価する生理反応として呼吸数がもっとも便利な指標であるが、平衡状態に達するまでの呼吸数の反応にはばらつきが大きいことに留意すべきである。

第2の実験は、体重が約25～41 kgの肥育豚2頭を用い、暑熱環境による呼吸数の変化を測定し、呼吸数を指標とした暑熱環境評価について解析したものである。この実験において乾球温度は24.2～30.4°C、湿球温度は22.3～26.6°C、風速は0.1～1.2 m/s、放射熱量は376～827 kcal/m<sup>2</sup>・hであり、呼吸数は22～215回/分であった。なお、風速は風速相当温度（21.5～29.7°C）に、放射熱量は平均放射温度（23.3～87.8°C）にそれぞれ変換して解析した。

得られた結果は以下のとおりである。

- (6) 呼吸数に対する暑熱環境要因の単相関はすべて有意であったが、偏相関は乾球温度と平均放射温度だけが有意であった。
- (7) 呼吸数に対する乾球温度と平均放射温度の標準偏回帰係数はそれぞれ0.510と0.563であり、呼吸数に及ぼす平均放射温度の影響の度合いは乾球温度よりもわずかに大きい。
- (8) 呼吸数を指標とした暑熱環境評価温度は次式のとおりである。

$$EET = a t_d + b t_w + c t_{mr}$$

ただし

$$a = 0.6 \sim 0.7 \quad b = 0.2 \sim 0.3 \quad c = 0.1$$

$$a + b + c = 1$$



ここで EET,  $t_d$ ,  $t_w$  および  $t_{mr}$  はそれぞれ暑熱環境評価温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 乾球温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 湿球温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) および平均放射温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) であり, a, b, c は重みである。なお, 上式は本実験条件から得たものであり, 広範囲の温熱環境に対する一般的な環境評価温度については今後に残された問題である。

## 第 4 章 開放型畜舎内における放射熱量の算定方法

### 4.1 緒 言

第 2 章において, 開放型畜舎内の放射熱量は屋根の熱貫流抵抗, 屋根外表面の日射吸収率および屋根形状などによって大きく異なることが把握された。また第 3 章において, 豚の生理反応に及ぼす放射熱の影響は大きいことが明らかになった。これらのことから, 暑熱環境において家畜の生産性の低下を防ぐためには畜舎内の放射熱量を緩和することが重要であると考えられる。

開放型畜舎内の放射熱量が気象条件, 畜舎構造, 畜舎周囲の地物などによって異なることは容易に予想できる。放射熱に起因する家畜の熱ストレスを緩和するような開放型畜舎を設計するためには, 多数の要因と舎内の放射熱量との関係を定量的に明らかにする必要がある。

本章では, 畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響を定量的に解析するために, 代表的な畜舎型式である切妻屋根式開放型畜舎を対象として, 舎内の短波長放射熱量と長波長放射熱量を理論的に算定する新たな方法を提示する。次いで, 模型畜舎と既存の畜舎において放射熱量を測定し, 算定方法の検証を行う。なお, 本章で使用する記号は以下のとおりである。

A : 面積 ( $\text{m}^2$ )

a : 日射吸収率 (—)

B(j): j(j=0,1,2,...) 時点前の吸熱応答係数 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

B'(j): j 時点前の貫流応答係数 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

CA : 計算値

d : 1 月 1 日を  $d=1$ , 12 月 31 日を  $d=366$  とした月日の通し番号

e : 均時差 (h)

F( $U_1, U_2, \dots$ ):  $U_1, U_2, \dots$  を媒介変数とする関数

f : 地表面の蒸発比 (—)

h : 対流伝熱係数 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

h' : 放射伝熱係数 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

H<sub>e</sub> : 畜舎の軒高 (m)

I : 大気透過率 (—)

J : 太陽定数 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )

K : 水蒸気移動係数 ( $\text{kg-vapor}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{kg-vapor}/\text{kg-humid air})$ )

k : 温度係数 (—)

L : 畜舎の桁行長 (m)

m : 微小水平面 P の直達日射に関する定数 (P が日向に位置するときには  $m=1$ , 日陰に位置するときには  $m=0$  である)

OB : 実測値

- $P$  : 畜舎内に位置する微小水平面  
 $P_1$  : 日向地表面温度における飽和水蒸気圧 (mmHg)  
 $P_2$  : 日陰地表面温度における飽和水蒸気圧 (mmHg)  
 $Q$  : 短波長放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)  
 $Q'$  : 長波長放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)  
 $\dot{Q}$  : 反射短波長放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)  
 $\dot{Q}'$  : 反射長波長放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)  
 $q$  : 伝導熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)  
 $q'$  : 潜熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)  
 $q_w$  : 水の気化潜熱 (kcal/kg-water)  
 $R$  : 地球と太陽との年間平均距離に対する対象日の実距離の比 (—)  
 $RE$  : 相対誤差 (%)  
 $S$  : 比湿 (kg-vapor/kg-humid air)  
 $S'$  : 飽和比湿 (kg-vapor/kg-humid air)  
 $T$  : 絶対温度 (°K)  
 $t$  : 温度 (°C)  
 $t'$  : 相当外気温度 (°C)  
 $t_c$  : 地温不易層の温度 (°C)  
 $t_x$  : 日向地表面下の深さ  $X_g$  m における地中温度 (°C)  
 $U_1 \sim U_6$  : 媒介変数  
 $V_a$  : 風速 (m/s)  
 $V_1 \sim V_{34}$  : 置換変数  
 $W$  : 畜舎の梁間長 (m)  
 $X$  : X 座標  
 $X_g$  : 日向地表面 ( $X_g=0$ ) から地中までの深さ (m)  
 $X_a$  : 絶対湿度 (kg-vapor/kg-dry air)  
 $Y$  : Y 座標  
 $Z$  : Z 座標  
 $\alpha$  : 方位角 (°)  
 $\Delta\tau$  : 時間間隔 (h)  
 $\delta$  : 太陽の赤緯 (°)  
 $\epsilon$  : 放射率 (—)  
 $\eta$  : 太陽の高度 (°)  
 $\theta$  : 水平傾角 (°)  
 $\lambda$  : 地表層土壌の熱伝導率 (kcal/m·h·°C)  
 $\sigma$  : ステファン・ボルツマン (Stefan-Boltzmann) 定数 (kcal/m<sup>2</sup>·h·°K<sup>4</sup>)  
 $\tau$  : 時刻 (h)  
 $\tau_{sd}$  : 中央標準時 (h)

- $\tau_{su}$  : 太陽の時角 ( $^{\circ}$ )  
 $\phi$  : 対象地の経度 ( $^{\circ}$ )  
 $\phi_{i-j}$  : 受射面  $j$  の放射面  $i$  に対する形態係数 (—)  
 $\phi'_{i-j}$  : 微小受射面  $j$  の放射面  $i$  に対する形態係数 (—)  
 $\psi$  : 対象地の緯度 ( $^{\circ}$ )

## 下添字

- a : 空気  
at : 水平面大気放射  
ds : 水平面直達日射  
dsr : 屋根外表面直達日射  
ds1 : 片側屋根 1 外表面直達日射  
ds2 : 片側屋根 2 外表面直達日射  
g : 地表面  
g1 : 日向地表面  
g2 : 日陰地表面  
p : 微小水平面  
r : 屋根  
ri : 屋根内表面  
ri1 : 片側屋根 1 内表面  
ri2 : 片側屋根 2 内表面  
ro : 屋根外表面  
ro1 : 片側屋根 1 外表面  
ro2 : 片側屋根 2 外表面  
s : 天空  
ss : 水平面天空日射  
su : 太陽

## 4.2 畜舎内放射熱量の算定方法

## 4.2.1 仮定条件と舎内放射熱量の算定式

算定式を導くに際し、以下の条件を仮定した。

- (1) 畜舎周囲の地表面は水平で、放射伝熱に関して同質である。
- (2) 屋根外表面、屋根内表面および地表面は完全拡散面である。
- (3) 畜舎は放射伝熱に関して柱・外壁が無視できる開放型である。
- (4) 地中および屋根における伝導熱流は 1 次元方向である。すなわち、地中では鉛直方向、屋根では表面の法線方向である。
- (5) 舎内における気温と風速はそれぞれ外気温と外風速に等しい。

家畜の放射熱負荷量を最小にする畜舎諸元を提示することが究極の目的であり、地表面などから家畜に入射する上向き放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響は天空や屋根内表面などから入射する下向き放射熱量に及ぼす影響よ

りも非常に小さいと考えられることから、ここでは下向き放射熱だけを対象とした。

放射熱受射面は微小水平面としたが、それは次の理由による。すなわち放射伝熱に関する家畜の形態係数が既知であるならば、家畜に入射する放射熱量は微小水平面に入射する放射熱量から推定できるからである。しかし家畜の形態係数は明らかにされていないので、これについては第6章で検討する。

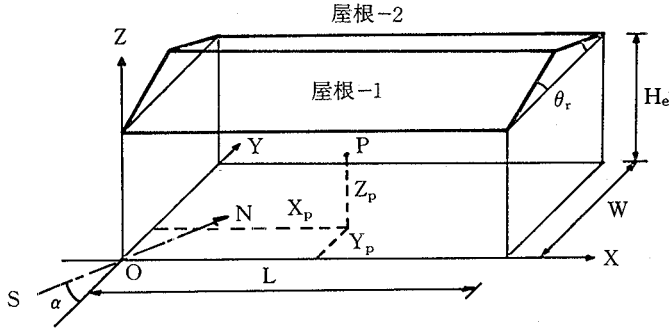


図4-1 算定方法の対象とした切妻屋根式開放型畜舎モデル

図4-1に示す座標系において、舎内の微小水平面Pに下向きに入射する短波長放射熱量 ( $Q_p$ ) と長波長放射熱量 ( $Q'_p$ ) を求める式を導いた。それらは次のとおりである。

$$Q_p = mQ_{ds} + \phi_{s-p} Q_{ss} + \phi_{r11-p} \dot{Q}_{r11} + \phi_{r12-p} \dot{Q}_{r12} \quad (4-1)$$

$$Q'_p = \phi_{s-p} Q'_{at} + \phi_{r11-p} \{ \dot{Q}'_{r11} + \sigma \epsilon_{r1} (T_{r11})^4 \} + \phi_{r12-p} \{ \dot{Q}'_{r12} + \sigma \epsilon_{r1} (T_{r12})^4 \} \quad (4-2)$$

なお、上式中の微小水平面に関する形態係数 ( $\phi_{s-p}$ ,  $\phi_{r11-p}$ ,  $\phi_{r12-p}$ ) を家畜に関する形態係数に置換え、さらに微小水平面に入射する直達日射量 ( $mQ_{ds}$ ) を家畜の体表面に入射する直達日射量に置換えることにより、家畜の体表面に入射する放射熱量を求めることができる。

(4-1), (4-2)式における屋根1内表面と屋根2内表面で反射する短波長放射熱量 ( $\dot{Q}_{r11}$ ,  $\dot{Q}_{r12}$ ) および長波長放射熱量 ( $\dot{Q}'_{r11}$ ,  $\dot{Q}'_{r12}$ ) は以下に示す(4-3)~(4-6)式で求めることができる。

$$\dot{Q}_{r11} = V_1(1-a_g)(\phi_{g1-r11} + V_2\phi_{g1-r12})Q_{ds} + V_1\{\phi_{s-r11} + V_2\phi_{s-r12} + (1-a_g)\phi_{g-r11} + V_2(1-a_g)\phi_{g-r12}\}Q_{ss} \quad (4-3)$$

$$\dot{Q}_{r12} = V_1(1-a_g)(\phi_{g1-r12} + V_2\phi_{g1-r11})Q_{ds} + V_1\{\phi_{s-r12} + V_2\phi_{s-r11} + (1-a_g)\phi_{g-r12} + V_2(1-a_g)\phi_{g-r11}\}Q_{ss} \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}'_{r11} = & V_3\{\phi_{s-r11} + V_4\phi_{s-r12} + (1-\epsilon_g)\phi_{g-r11} + V_4(1-\epsilon_g)\phi_{g-r12}\}Q'_{at} \\ & + V_3\phi_{r11-r12}\{V_4\sigma\epsilon_{r1}(T_{r11})^4 + \sigma\epsilon_{r1}(T_{r12})^4\} + V_3(\phi_{g1-r11} + V_4\phi_{g1-r12})\sigma\epsilon_g(T_{g1})^4 \\ & + V_3(\phi_{g2-r11} + V_4\phi_{g2-r12})\sigma\epsilon_g(T_{g2})^4 \end{aligned} \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}'_{r12} = & V_3\{\phi_{s-r12} + V_4\phi_{s-r11} + (1-\epsilon_g)\phi_{g-r12} + V_4(1-\epsilon_g)\phi_{g-r11}\}Q'_{at} \\ & + V_3\phi_{r11-r12}\{V_4\sigma\epsilon_{r1}(T_{r12})^4 + \sigma\epsilon_{r1}(T_{r11})^4\} + V_3(\phi_{g1-r12} + V_4\phi_{g1-r11})\sigma\epsilon_g(T_{g1})^4 \\ & + V_3(\phi_{g2-r12} + V_4\phi_{g2-r11})\sigma\epsilon_g(T_{g2})^4 \end{aligned} \quad (4-6)$$

ただし

$$V_1 = \frac{1 - a_{r1}}{1 - (1 - a_{r1})^2 (\phi_{r11-r12})^2} \quad V_2 = (1 - a_{r1}) \phi_{r11-r12}$$

$$V_3 = \frac{1 - \varepsilon_{r1}}{1 - (1 - \varepsilon_{r1})^2 (\phi_{r11-r12})^2} \quad V_4 = (1 - \varepsilon_{r1}) \phi_{r11-r12}$$

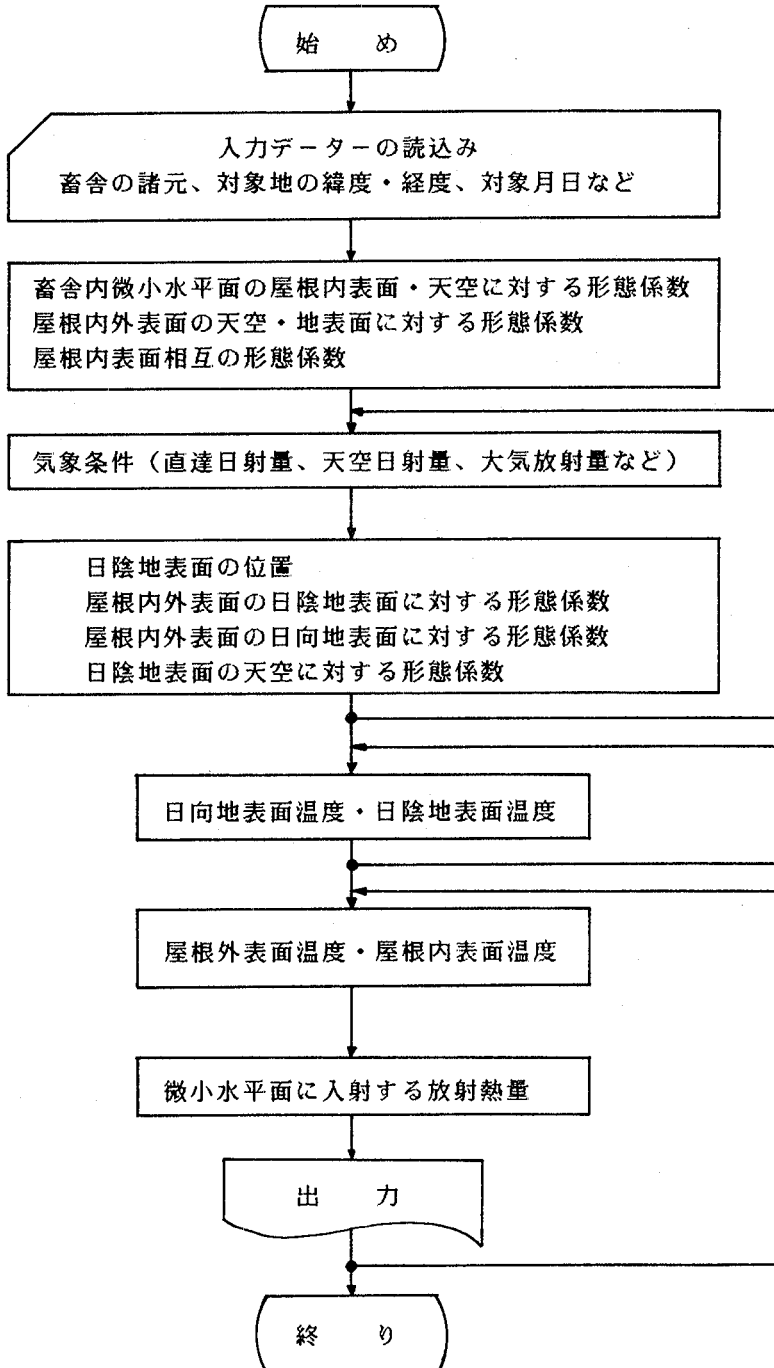


図4-2 畜舎内の放射熱量を計算する電算機プログラムの流れ図

以上の式から、畜舎内の微小水平面Pに下向きに入射する放射熱量を24時間にわたり30分間隔で計算する電算機プログラムを作製した。図4-2に電算機プログラムの概要を流れ図で示す。なお、プログラムは付録-2に示してある。

プログラムの主要な部分である気象条件、放射伝熱に関する形態係数、地表面温度、屋根外表面・内表面温度の計算方法の概要を以下に述べる。

#### 4.2.2 気象条件

気温は24時間にわたり30分間隔で与える。湿度は絶対湿度で表し、24時間にわたり不変とする。外風速も24時間にわたり不変とする。

水平面の直達日射量( $Q_{ds}$ )は(4-7)式<sup>70)</sup>、また天空日射量( $Q_{ss}$ )は(4-8)式<sup>11)</sup>で計算する。

$$Q_{ds} = \frac{J \sin(\eta)}{(R)^2} (I)^{\cos(\eta)} \quad (4-7)$$

$$Q_{ss} = \frac{1.2J(1-I)\{1-(I)^{\cos(\eta)}\} \sin(\eta)}{1-1.4 \ln(I)} \quad (4-8)$$

上式の直達日射量と天空日射量を求めるときに必要な太陽高度( $\eta$ )は(4-9)式<sup>70)</sup>、太陽方位( $\alpha_{su}$ )は(4-10)式<sup>70)</sup>、大気透過率( $I$ )は(4-11)式<sup>99)</sup>、地球と太陽との年間平均距離に対する対象日の実距離の比( $R$ )は(4-12)式<sup>100)</sup>、太陽の赤緯( $\delta$ )は(4-13)式<sup>100)</sup>、均時差( $e$ )は(4-14)式<sup>100)</sup>および時角( $\tau_{su}$ )は(4-15)式<sup>100)</sup>で計算する。

$$\eta = \sin^{-1} \{ \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\tau_{su}) \} \quad (4-9)$$

$$\alpha_{su} = \cos^{-1} \left( \frac{\sin(\eta) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\cos(\eta) \cos(\phi)} \right) \quad (4-10)$$

$$I = 1 - 0.3 \{ \sin(\eta) \}^{1/3} \quad (4-11)$$

$$R = 1.000104 - 0.01675382 \cos(\omega) - 0.05596336 \\ - 0.0001149089 \cos(2\omega) - 0.1636872 \\ + 0.000006182268 \cos(3\omega) - 0.1993716 \quad (4-12)$$

$$\delta = 0.3622133 - 23.24763 \cos(\omega) + 0.1532310 \\ - 0.3368908 \cos(2\omega) + 0.2070988 \\ - 0.1852646 \cos(3\omega) + 0.6201293 \quad (4-13)$$

$$e = -0.0002786409 + 0.1227715 \cos(\omega) + 1.498311 \\ - 0.1654575 \cos(2\omega) - 1.261546 \\ - 0.005353830 \cos(3\omega) - 1.157100 \quad (4-14)$$

$$\tau_{su} = 15(\tau_{sd} + e - 12) + \phi - 135 \quad (4-15)$$

$$\omega = 2\pi d/366 \quad (4-16)$$

また、太陽定数( $J$ )は1164 kcal/m<sup>2</sup>·h<sup>70)</sup>とする。

屋根外表面の直達日射量( $Q_{dsr}$ )は次式<sup>70)</sup>で求めることができる。

$$Q_{dsr} = \frac{J(I)^{\cos(\eta)}}{(R)^2} \{ \sin(\eta) \cos(\theta_r) + \cos(\eta) \sin(\theta_r) \cos(\alpha_{su} - \alpha_r) \} \quad (4-17)$$

水平面の大気放射量 ( $Q_{at}$ ) はプラント (Brunt) の式中の水蒸気圧を絶対湿度で表した次式<sup>101)</sup> から求める。

$$Q_{at} = \left( 0.51 + 2.10 \sqrt{\frac{X_a}{X_a + 0.622}} \right) \sigma (T_a)^4 \quad (4-18)$$

#### 4.2.3 放射伝熱に関する形態係数

(1) 畜舎内微小水平面 P の屋根内表面と天空に対する形態係数

舎内における微小水平面 P の屋根内表面に対する形態係数 ( $\phi_{r11-p}$ ,  $\phi_{r12-p}$ ) は、微小面の平面に対する形態係数を表す式<sup>70)</sup> を用いた (4-19), (4-20) 式から求めることができる。

$$\phi_{r11-p} = F(V_5, V_7, X_p, \theta_r) + F(V_5, V_7, L - X_p, \theta_r) - F(V_5, V_8, X_p, \theta_r) - F(V_5, V_8, L - X_p, \theta_r) \quad (4-19)$$

$$\phi_{r12-p} = F(V_6, V_7, X_p, \theta_r) + F(V_6, V_7, L - X_p, \theta_r) - F(V_6, V_8, X_p, \theta_r) - F(V_6, V_8, L - X_p, \theta_r) \quad (4-20)$$

ただし

$$F(U_1, U_2, U_3, U_4) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{U_2 \cos(U_4) - U_1}{V_9} \tan^{-1} \left( \frac{U_2}{V_9} \right) + \frac{U_3 \cos(U_4)}{V_{10}} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{U_2 - U_1 \cos(U_4)}{V_{10}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{U_1 \cos(U_4)}{V_{10}} \right) \right\} + \tan^{-1} \left( \frac{U_3}{U_1} \right) \right]$$

$$V_5 = Y_p + \frac{H_e - Z_p}{\tan(\theta_r)} \quad V_6 = (W - Y_p) + \frac{H_e - Z_p}{\tan(\theta_r)}$$

$$V_7 = \frac{W}{2 \cos(\theta_r)} + \frac{H_e - Z_p}{\sin(\theta_r)} \quad V_8 = \frac{H_e - Z_p}{\sin(\theta_r)}$$

$$V_9 = \{(U_1)^2 + (U_2)^2 - 2U_1U_2 \cos(U_4)\}^{1/2} \quad V_{10} = [\{U_1 \sin(U_4)\}^2 + (U_3)^2]^{1/2}$$

微小水平面 P の天空と屋根内表面に対する形態係数の合計は 1 であることから、微小水平面 P の天空に対する形態係数 ( $\phi_{s-p}$ ) は次式となる。

$$\phi_{s-p} = 1 - (\phi_{r11-p} + \phi_{r12-p}) \quad (4-21)$$

(2) 屋根の天空と地表面に対する形態係数

屋根外表面の天空と地表面に対する形態係数 ( $\phi_{s-ro1}$ ,  $\phi_{s-ro2}$ ,  $\phi_{g-ro1}$ ,  $\phi_{g-ro2}$ ), および屋根内表面の天空と地表面に対する形態係数 ( $\phi_{s-r11}$ ,  $\phi_{s-r12}$ ,  $\phi_{g-r11}$ ,  $\phi_{g-r12}$ ) は以下の式<sup>70)</sup> で求めることができる。

$$\phi_{s-ro1} = \phi_{s-ro2} = \frac{1 + \cos(\theta_r)}{2} \quad (4-22)$$

$$\phi_{s-r11} = \phi_{s-r12} = \frac{1 - \cos(\theta_r)}{2} \quad (4-23)$$

$$\phi_{g-ro1} = \phi_{g-ro2} = \frac{1 - \cos(\theta_r)}{2} \quad (4-24)$$

$$\phi_{g-r11} = \phi_{g-r12} = \frac{1 + \cos(\theta_r)}{2} \quad (4-25)$$

(3) 屋根内表面相互の形態係数

屋根 2 内表面の屋根 1 内表面に対する形態係数 ( $\phi_{r11-r12}$ ) は、屋根 2 内表面における微小受射面の屋根 1 内表面に対する形態係数 ( $\phi'_{r11-r12}$ ) を表す (4-26) 式を導き、(4-26) 式を 2 重積分する (4-27) 式から求めることができ

る。(4-27)式の計算はルジャンドル・ガウス (Legendre-Gauss)法<sup>102)</sup> によって行う。切妻屋根の場合には  $\phi_{r11-r12}$  と  $\phi_{r12-r11}$  は等しい。

$$\begin{aligned} \phi'_{r11-r12} = & \frac{1}{2\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{V_{11}}{W(1-U_6)} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{V_{12}}{W(1-U_6)} \right) \right. \\ & + \frac{U_6 - 2 \cos^2(\theta_r)}{V_{15}} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{V_{11}}{WV_{15}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{V_{12}}{WV_{15}} \right) \right\} \\ & - \frac{L \{ 2 \cos^2(\theta_r) - 1 \} U_6}{V_{16}} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{V_{13}}{V_{16}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{V_{14}}{V_{16}} \right) \right\} \\ & \left. - \frac{L \{ 2 \cos^2(\theta_r) - 1 \} (1-U_6)}{V_{17}} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{V_{13}}{V_{17}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{V_{14}}{V_{17}} \right) \right\} \right] \quad (4-26) \end{aligned}$$

$$\phi_{r11-r12} = \int_0^1 \int_0^1 \phi'_{r11-r12} dU_6 dU_s \quad (4-27)$$

ただし

$$\begin{aligned} V_{11} &= 2LU_s \cos(\theta_r) & V_{12} &= 2L(1-U_6) \cos(\theta_r) \\ V_{13} &= W \left\{ \frac{U_6}{2 \cos(\theta_r)} + (1-U_6) \cos(\theta_r) \right\} & V_{14} &= W(U_6-1) \{ \cos^2(\theta_r) - 0.5 \} \\ V_{15} &= \{ (U_6)^2 + 4(1-U_6) \cos^2(\theta_r) \}^{1/2} & V_{16} &= \{ (W)^2 (1-U_6)^2 \{ 1 - \cos^2(\theta_r) \} + (LU_s)^2 \}^{1/2} \\ V_{17} &= \{ (W)^2 (1-U_6)^2 \{ 1 - \cos^2(\theta_r) \} + \{ L(1-U_6) \}^2 \}^{1/2} \end{aligned}$$

(4) 屋根の日陰地表面に対する形態係数

屋根1外表面 ( $X_1-Y_1-Z_1$ 座標系) の日陰地表面 ( $X_2-Y_2-Z_2$ 座標系) に対する形態係数 ( $\phi_{g2-ro1}$ ) は次式<sup>103)</sup> から求めることができる。

$$\phi_{g2-ro1} = \frac{1}{2\pi A_{ro1}} \int_{ro1} \int_{g2} \{ \ln(V_{18}) dX_2 dX_1 + \ln(V_{18}) dY_2 dY_1 + \ln(V_{18}) dZ_2 dZ_1 \} \quad (4-28)$$

ただし

$$V_{18} = \{ (X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 \}^{1/2}$$

(4-28)式の計算は(4-27)式と同様にルジャンドル・ガウス法<sup>102)</sup> によって行う。また、屋根2外表面および屋根内表面の日陰地表面に対する形態係数 ( $\phi_{g2-ro2}$ ,  $\phi_{g2-r11}$ ,  $\phi_{g2-r12}$ ) も同様にして求めることができる。

(5) 屋根の日向地表面に対する形態係数

屋根外表面の日向地表面に対する形態係数 ( $\phi_{g1-ro}$ ) は、屋根外表面の地表面全体に対する形態係数から屋根外表面の日陰地表面に対する形態係数を差引くことにより求めることができる。屋根内表面の日向地表面に対する形態係数 ( $\phi_{g1-r1}$ ) も同様にして求めることができる。

$$\phi_{g1-ro1} = \phi_{g-ro1} - \phi_{g2-ro1} \quad (4-29)$$

$$\phi_{g1-ro2} = \phi_{g-ro2} - \phi_{g2-ro2} \quad (4-30)$$

$$\phi_{g1-r11} = \phi_{g-r11} - \phi_{g2-r11} \quad (4-31)$$

$$\phi_{g1-r12} = \phi_{g-r12} - \phi_{g2-r12} \quad (4-32)$$

(6) 日陰地表面の天空に対する形態係数

日陰地表面の天空に対する形態係数 ( $\phi_{s-g2}$ ) については、日陰地表面の天空に対する形態係数と日陰地表面の屋根内外表面に対する形態係数の合計が1であること、および日陰地表面と屋根内外表面との間に相反法則<sup>84)</sup>



を適用することにより次式を導いた。

$$\phi_{s-g2} = 1 - (\phi_{g2-r01} + \phi_{g2-r02} + \phi_{g2-r11} + \phi_{g2-r12}) \frac{A_r}{A_{g2}} \quad (4-33)$$

#### 4.2.4 地表面温度

##### (1) 日向地表面温度

日向地表面温度 ( $t_{g1}$ ) は、日向地表面の熱収支から導いた次式で求めることができる。

$$t_{g1} = t_a + \frac{a_g(Q_{ds} + Q_{ss}) + \epsilon_g Q'_{at} - \sigma \epsilon_g (T_{g1})^4 - (q_{g1} + q'_{g1})}{h_g} \quad (4-34)$$

上式の右辺には日向地表面の絶対温度 ( $T_{g1}$ ) があるので、日向地表面温度を求める計算は反復法で行う。水平面直達日射量 ( $Q_{ds}$ )、水平面天空日射量 ( $Q_{ss}$ )、水平面大気放射量 ( $Q'_{at}$ ) の計算にはそれぞれ(4-7)、(4-8)、(4-18)式を用い、日向地表面の潜熱伝達量 ( $q'_{g1}$ ) と地中伝導熱量 ( $q_{g1}$ ) の求め方は以下のとおりである。

まず、日向地表面の潜熱伝達量 ( $q'_{g1}$ ) は次式<sup>104)</sup> で求めることができる。

$$q'_{g1} = f q_w K (S'_{g1} - S_a) \quad (4-35)$$

また、地表面の水蒸気移動係数 ( $K$ ) は自然対流の場合には(4-36)式、強制対流の場合には(4-37)式で計算する<sup>101)</sup>。

$$K = \frac{h_g}{0.93(0.24 + 0.441X_a)} \quad (4-36)$$

$$K = \frac{h_g}{0.24 + 0.441X_a} \quad (4-37)$$

比湿 ( $S_a$ ) および日向地表面温度での飽和比湿 ( $S'_{g1}$ ) は以下の式<sup>85)</sup> から求める。

$$S_a = \frac{X_a}{1 + X_a} \quad (4-38)$$

$$S'_{g1} = \frac{0.622 P_1}{760 - 0.377 P_1} \quad (4-39)$$

なお、日向地表面温度における飽和水蒸気圧 ( $P_1$ ) の計算にはゴフ・グラッチ (Goff-Gratch) の式<sup>105)</sup> を用いる。

次に、時刻  $\tau$  の日向地表面における地中伝導熱量 ( $q_{g1}(\tau)$ ) は次式<sup>106)</sup> で表せる。

$$q_{g1}(\tau) = -\lambda \left. \frac{\partial t_x}{\partial X_g} \right|_{X_g=0} \quad (4-40)$$

上式の計算を応答係数 (Response-Factor) 法<sup>107,108)</sup> で行うと、時刻  $\tau$  における地中伝導熱量は次式で求めることができる。

$$q_{g1}(\tau) = \sum_{j=0}^{\infty} \{t'_{g1}(\tau - j \cdot \Delta\tau) - t_c\} B_g(j) \quad (4-41)$$

ここで、 $t'_{g1}(\tau - j \cdot \Delta\tau)$  は  $(\tau - j \cdot \Delta\tau)$  時における日向地表面の相当外気温度である。

応答係数法で地中伝導熱量を求めるためには日向地表面に対する相当外気温度 ( $t'_{g1}$ ) が必要である。この相当外気温度を算定する(4-42)式を導いた。

$$t'_{g1} = t_a + \frac{a_g(Q_{ds} + Q_{ss}) + \epsilon_g Q'_{at} - \sigma \epsilon_g (T_{g1})^4}{h_g} \quad (4-42)$$

上式の右辺には未知数  $T_{g1}$  が含まれているため、24時間にわたる地表面温度の第1回目の計算には(4-43)式の関係を利用する。

$$\sigma \epsilon_g (T_{g1})^4 = h'_{g1} (t_{g1} - t_a) + \sigma \epsilon_g (T_a)^4 \quad (4-43)$$

ただし

$$h'_{g1} = 4.88 \epsilon_g k_{g1} \quad k_{g1} = \frac{(T_{g1}/100)^4 - (T_a/100)^4}{t_{g1} - t_a}$$

したがって、第1回目の計算における相当外気温度は次のようになる。

$$t'_{g1} = t_a + \frac{a_g(Q_{ds} + Q_{ss}) + \epsilon_g Q'_{at} - \sigma \epsilon_g (T_a)^4}{h_g + h'_{g1}} \quad (4-44)$$

計算開始時刻における地中伝導熱量は未知なため、その初期値として適当な値を設定する。このため、計算開始時刻における地中伝導熱量が収束するまで、24時間にわたる地表面温度の計算を日単位で繰返す。相当外気温度は第1回目には(4-44)式を用い、第2回目以降は(4-42)式の  $T_{g1}$  に前回の値を代入して計算する。(4-44)式の計算に必要な温度係数 ( $k_{g1}$ ) は

表 4-1 温度係数 (k) の設定値

時刻	温度係数
0:00 - 6:30	1.1
7:00 - 10:00	1.2
10:30 - 15:30	1.3
16:00 - 20:00	1.2
20:30 - 23:30	1.1

表 4-1 に示す設定値を用いる。なお、表 4-1 に示した温度係数の設定値は後述する日陰地表面温度および屋根内外表面温度の計算にも用いる。

日中、ある時刻において日向である地表面の面積は、日陰地表面の面積よりも大きい。したがって、ある時刻の日向地表面温度は、部分的に日陰から日向になった経過時間を無視し、地表面全体について(4-34)式を適用して求めることにする。

(2) 日陰地表面温度

日陰地表面温度 ( $t_{g2}$ ) は、日陰地表面の熱収支から導いた次式で求めることができる。

$$t_{g2} = t_a + \frac{(a_g Q_{ss} + \epsilon_g Q'_{at}) \phi_{s-g2} - \sigma \epsilon_g (T_{g2})^4 - (q_{g2} + q'_{g2})}{h_g} \quad (4-45)$$

上式の計算もまた、日向地表面温度の場合と同様に反復法で行う。

日陰地表面の潜熱伝達量 ( $q'_{g2}$ ) は、次式<sup>104)</sup> で計算する。

$$q'_{g2} = f q_w K (S'_{g2} - S_a) \quad (4-46)$$

また、日陰地表面温度での飽和比湿 ( $S'_{g2}$ ) は次式<sup>85)</sup> から求める。

$$S'_{g2} = \frac{0.622 P_2}{760 - 0.377 P_2} \quad (4-47)$$

上式中の飽和水蒸気圧 ( $P_2$ ) はゴフ・グラッチの式<sup>105)</sup> から求める。

日陰地表面の地中伝導熱量は、日向地表面の場合と同様に応答係数法<sup>107, 108)</sup> で計算する。したがって、日陰地表面に対する相当外気温度が必要になる。この相当外気温度については、日向地表面温度の場合と同様に、温度係数 ( $k_{g2}$ ) を含む(4-48)式と温度係数を含まない(4-49)式を導いた。

$$t'_{g2} = t_a + \frac{(a_g Q_{ss} + \epsilon_g Q'_{at}) \phi_{s-g2} - \sigma \epsilon_g (T_a)^4}{h_g + h'_{g2}} \quad (4-48)$$

$$t_{g2} = t_a + \frac{(a_g Q_{ss} + \epsilon_g Q'_{at}) \phi_{s-g2} - \sigma \epsilon_g (T_{g2})^4}{h_g} \quad (4-49)$$

ただし

$$h'_{g2} = 4.88 \varepsilon_g k_{g2} \quad k_{g2} = \frac{(T_{g2}/100)^4 - (T_a/100)^4}{t_{g2} - t_a}$$

24時間にわたり日陰地表面温度を計算する方法は日向地表面温度の場合と同様である。ただし、前述したように日向地表面温度については部分的に日陰から日向になった経過時間を無視したが、日陰地表面温度については日向から日陰になった経過時間を考慮する。すなわち、ある時刻における日陰地表面の平均温度は、その時刻の1時間前に日向から日陰になったものとして(4-45)式から求める。

#### 4.2.5 屋根外表面・内表面温度

屋根外表面温度 ( $t_{ro1}$ ,  $t_{ro2}$ ) は、屋根外表面の熱収支から導いた以下の式で求めることができる。

$$t_{ro1} = t_a + \frac{V_{19} - \sigma \varepsilon_{ro} (T_{ro1})^4 - q_{ro1}}{h_{ro1}} \quad (4-50)$$

$$t_{ro2} = t_a + \frac{V_{20} - \sigma \varepsilon_{ro} (T_{ro2})^4 - q_{ro2}}{h_{ro2}} \quad (4-51)$$

ただし

$$\begin{aligned} V_{19} &= a_{ro} [Q_{ds1} + (1 - a_g) \phi_{g1-ro1} Q_{ds} + \{ \phi_{s-ro1} + (1 - a_g) \phi_{g-ro1} \} Q_{ss}] \\ &\quad + \varepsilon_{ro} [ \{ \phi_{s-ro1} + (1 - \varepsilon_g) \phi_{g-ro1} \} Q'_{at} + \sigma \varepsilon_g \{ \phi_{g1-ro1} (T_{g1})^4 + \phi_{g2-ro1} (T_{g2})^4 \}] \\ V_{20} &= a_{ro} [Q_{ds2} + (1 - a_g) \phi_{g1-ro2} Q_{ds} + \{ \phi_{s-ro2} + (1 - a_g) \phi_{g-ro2} \} Q_{ss}] \\ &\quad + \varepsilon_{ro} [ \{ \phi_{s-ro2} + (1 - \varepsilon_g) \phi_{g-ro2} \} Q'_{at} + \sigma \varepsilon_g \{ \phi_{g1-ro2} (T_{g1})^4 + \phi_{g2-ro2} (T_{g2})^4 \}] \end{aligned}$$

また屋根内表面温度 ( $t_{ri1}$ ,  $t_{ri2}$ ) は、それぞれの屋根内表面の熱収支式を導き、これらの熱収支式から求めた以下の式で計算することができる。

$$t_{ri1} = 100 \left[ \frac{V_{24}}{4.88 (\varepsilon_{r1})^2 \phi_{r11-r12}} \left\{ \frac{1 - (1 - \varepsilon_{r1}) (\phi_{r11-r12})^2}{V_{24}} \sigma \varepsilon_{r1} (T_{r12})^4 + h_{r12} (t_{ri2} - t_a) - q_{r12} - V_{22} \right\} \right]^{1/4} - 273.16 \quad (4-52)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{25}}{\varepsilon_{r1} \phi_{r11-r12}} \left\{ \frac{V_{25}}{V_{24}} \sigma \varepsilon_{r1} (T_{r12})^4 + h_{r12} (t_{ri2} - t_a) \right\} - \frac{\varepsilon_{r1} \phi_{r11-r12}}{V_{24}} \sigma \varepsilon_{r1} (T_{r12})^4 \\ + h_{r11} \left[ 100 \left\{ \frac{V_{24}}{4.88 (\varepsilon_{r1})^2 \phi_{r11-r12}} \left( \frac{V_{25}}{V_{24}} \sigma \varepsilon_{r1} (T_{r12})^4 + h_{r12} (t_{ri2} - t_a) \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - q_{r12} - V_{22} \right) \right\}^{1/4} - T_a \right] = \frac{V_{25}}{\varepsilon_{r1} \phi_{r11-r12}} (q_{r12} + V_{22}) + q_{r11} + V_{21} \quad (4-53) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} V_{21} &= \frac{a_{r1}}{V_{23}} (V_{26} + V_{28}) + \frac{\varepsilon_{r1}}{V_{24}} (V_{30} + V_{32}) \\ V_{22} &= \frac{a_{r1}}{V_{23}} (V_{27} + V_{29}) + \frac{\varepsilon_{r1}}{V_{24}} (V_{31} + V_{33}) \\ V_{23} &= 1 - (1 - a_{r1})^2 (\phi_{r11-r12})^2 \\ V_{24} &= 1 - (1 - \varepsilon_{r1})^2 (\phi_{r11-r12})^2 \\ V_{25} &= 1 - (1 - \varepsilon_{r1}) (\phi_{r11-r12})^2 \\ V_{26} &= (1 - a_g) \{ \phi_{g1-r11} + (1 - a_{r1}) \phi_{r11-r12} \phi_{g1-r12} \} Q_{ds} \\ V_{27} &= (1 - a_g) \{ \phi_{g1-r12} + (1 - a_{r1}) \phi_{r11-r12} \phi_{g1-r11} \} Q_{ds} \\ V_{28} &= [ \phi_{s-r11} + (1 - a_g) \phi_{g-r11} + (1 - a_{r1}) \phi_{r11-r12} \{ \phi_{s-r12} + (1 - a_g) \phi_{g-r12} \} ] Q_{ss} \\ V_{29} &= [ \phi_{s-r12} + (1 - a_g) \phi_{g-r12} + (1 - a_{r1}) \phi_{r11-r12} \{ \phi_{s-r11} + (1 - a_g) \phi_{g-r11} \} ] Q_{ss} \end{aligned}$$

$$V_{30} = [\phi_{s-r11} + (1 - \epsilon_g) \phi_{g-r11} + (1 - \epsilon_{r1}) \phi_{r11-r12} \{ \phi_{s-r12} + (1 - \epsilon_g) \phi_{g-r12} \}] Q_{at}$$

$$V_{31} = [\phi_{s-r12} + (1 - \epsilon_g) \phi_{g-r12} + (1 - \epsilon_{r1}) \phi_{r11-r12} \{ \phi_{s-r11} + (1 - \epsilon_g) \phi_{g-r11} \}] Q_{at}$$

$$V_{32} = \{ \phi_{g1-r11} + (1 - \epsilon_{r1}) \phi_{r11-r12} \phi_{g1-r12} \} \sigma \epsilon_g (T_{g1})^4 + \{ \phi_{g2-r11} + (1 - \epsilon_{r1}) \phi_{r11-r12} \phi_{g2-r12} \} \sigma \epsilon_g (T_{g2})^4$$

$$V_{33} = \{ \phi_{g1-r12} + (1 - \epsilon_{r1}) \phi_{r11-r12} \phi_{g1-r11} \} \sigma \epsilon_g (T_{g1})^4 + \{ \phi_{g2-r12} + (1 - \epsilon_{r1}) \phi_{r11-r12} \phi_{g2-r11} \} \sigma \epsilon_g (T_{g2})^4$$

屋根内外表面の伝導熱量 ( $q_{r01}$ ,  $q_{r02}$ ,  $q_{r11}$ ,  $q_{r12}$ ) もまた、地中伝導熱量の場合と同様に応答係数法<sup>107, 108)</sup>で計算する。応答係数法によれば屋根1の伝導熱量は(4-54), (4-55)式で求めることができる。

$$q_{r01}(\tau) = \sum_{j=0}^{\infty} t'_{r01}(\tau - j \cdot \Delta\tau) B_r(j) - \sum_{j=0}^{\infty} t'_{r11}(\tau - j \cdot \Delta\tau) B'_r(j) \quad (4-54)$$

$$q_{r11}(\tau) = \sum_{j=0}^{\infty} t'_{r01}(\tau - j \cdot \Delta\tau) B'_r(j) - \sum_{j=0}^{\infty} t'_{r11}(\tau - j \cdot \Delta\tau) B_r(j) \quad (4-55)$$

屋根2の伝導熱量も上式と同様にして計算できる。

伝導熱量の計算に必要な屋根内外表面に対する相当外気温度 ( $t'_{r01}$ ,  $t'_{r02}$ ,  $t'_{r11}$ ,  $t'_{r12}$ ) については(4-56)~(4-59)式を導いた。

$$t'_{r01} = t_a + \frac{V_{19} - \sigma \epsilon_{r0} (T_{r01})^4}{h_{r01}} \quad (4-56)$$

$$t'_{r02} = t_a + \frac{V_{20} - \sigma \epsilon_{r0} (T_{r02})^4}{h_{r02}} \quad (4-57)$$

$$t'_{r11} = t_a + \left[ \left\{ V_{21} + \frac{(1 - \epsilon_{r1})(\phi_{r11-r12})^2 - 1}{V_{24}} \sigma \epsilon_{r1} (T_{r11})^4 + \frac{\epsilon_{r1} \phi_{r11-r12}}{V_{24}} \sigma \epsilon_{r1} (T_{r12})^4 \right\} / h_{r11} \right] \quad (4-58)$$

$$t'_{r12} = t_a + \left[ \left\{ V_{22} + \frac{(1 - \epsilon_{r1})(\phi_{r11-r12})^2 - 1}{V_{24}} \sigma \epsilon_{r1} (T_{r12})^4 + \frac{\epsilon_{r1} \phi_{r11-r12}}{V_{24}} \sigma \epsilon_{r1} (T_{r11})^4 \right\} / h_{r12} \right] \quad (4-59)$$

地表面温度の場合と同様に温度係数 ( $k_{r01}$ ,  $k_{r02}$ ,  $k_{r11}$ ,  $k_{r12}$ ) を用いると、相当外気温度は以下ようになる。ただし、(4-62)式と(4-63)式は屋根1内表面と屋根2内表面が\*同温として導いた。

$$t'_{r01} = t_a + \frac{V_{19} - \sigma \epsilon_{r0} (T_a)^4}{h_{r01} + h'_{r01}} \quad (4-60)$$

$$t'_{r02} = t_a + \frac{V_{20} - \sigma \epsilon_{r0} (T_a)^4}{h_{r02} + h'_{r02}} \quad (4-61)$$

$$t'_{r11} = t_a + \frac{V_{21} - \{ V_{34} \sigma \epsilon_{r1} (T_a)^4 / V_{23} \}}{h_{r11} + (V_{34} h'_{r11} / V_{23})} \quad (4-62)$$

$$t'_{r12} = t_a + \frac{V_{22} - \{ V_{34} \sigma \epsilon_{r1} (T_a)^4 / V_{23} \}}{h_{r12} + (V_{34} h'_{r12} / V_{23})} \quad (4-63)$$

ただし

$$V_{34} = 1 - \epsilon_{r1} \phi_{r11-r12} - (1 - \epsilon_{r1})(\phi_{r11-r12})^2$$

$$h'_{r01} = 4.88 \epsilon_{r0} k_{r01}$$

$$h'_{r02} = 4.88 \epsilon_{r0} k_{r02}$$

$$h'_{r11} = 4.88 \epsilon_{r1} k_{r11}$$

$$h'_{r12} = 4.88 \epsilon_{r1} k_{r12}$$

$$k_{r01} = \frac{(T_{r01}/100)^4 - (T_a/100)^4}{t_{r01} - t_a}$$

$$k_{r02} = \frac{(T_{r02}/100)^4 - (T_a/100)^4}{t_{r02} - t_a}$$

$$k_{r11} = \frac{(T_{r11}/100)^4 - (T_a/100)^4}{t_{r11} - t_a}$$

$$k_{r12} = \frac{(T_{r12}/100)^4 - (T_a/100)^4}{t_{r12} - t_a}$$

屋根外表面および屋根内表面の温度を求める計算手順は以下のとおりである。

- ① (4-60)～(4-63)式から相当外気温度を24時間にわたり計算する。
- ② ①で求めた相当外気温度を用いてそれぞれの屋根内外表面の伝導熱量を計算し、第1回目の屋根内外表面温度を次のようにして求める。すなわち(4-50)、(4-51)式および(4-53)式からそれぞれ反復法にて  $t_{ro1}$ 、 $t_{ro2}$  および  $t_{ri2}$  を求め、次いで(4-52)式から  $t_{ri1}$  を求める。
- ③ ②で求めた屋根内外表面温度（第2回目の計算以降は④で求めた屋根内外表面温度）を用いて(4-56)～(4-59)式から相当外気温度を24時間にわたり求める。
- ④ ③で求めた相当外気温度を用いて屋根における伝導熱量を再び計算し、(4-50)～(4-53)式から屋根内外表面温度を24時間にわたり再度計算する。
- ⑤ 屋根内外表面温度が収束するまで③④の手順を繰り返す。

### 4.3 模型畜舎における算定結果の検証

#### 4.3.1 模型畜舎の概要

模型畜舎の外観を図4-3に示し、諸元を表4-2に示す。模型畜舎は、屋根内表面温度や舎内放射熱量の実測値と前節で提示した算定方法による計算値とを比較検討するために作製したものであり、実物大畜舎との相似則を満たしているものではないことを付記する。

模型畜舎の屋根勾配は約1/10（屋根傾角5.9度）、2/5（屋根傾角22.0度）、3/4（屋根傾角36.9度）の3種類である。桁行長と軒高は3種類ともそれぞれ1.8mと1.0mであり、梁間長は屋根勾配の小さい順に1.8、1.7、1.5mである。屋根葺材は厚さ1mmの亜鉛鉄板だけの場合とその内側に厚さ20mmの発泡ポリスチレン断熱材を用いた場合の2種類であり、屋根内外表面は白色塗装あるいはつや消し黒色塗装をした。屋根葺材が亜鉛鉄板だけの場合には、屋根葺材と骨組材の接触部における伝導熱を小さくするために、接触部の間に発泡ポリスチレンを挟んだ。模型畜舎の桁行方位は東—西、南東—北西および南—北とした。



図4-3 切妻屋根式模型畜舎（屋根傾角22度）

表 4-2 模型畜舎の諸元

測定 月日	屋根葺材	屋根表面の色		桁行長 (m)	梁間長 (m)	軒高 (m)	桁行方位	屋根傾角 (°)
		外表面	内表面					
8.20	GI	W	W	1.8	1.82	1.0	東—西	5.9
21	GI	W	W	1.8	1.82	1.0	東—西	5.9
23	GI+FP	W	W	1.8	1.82	1.0	東—西	5.9
30	GI	W	B	1.8	1.71	1.0	南東—北西	22.0
9. 2	GI+FP	W	B	1.8	1.71	1.0	南東—北西	22.0
4	GI	B	B	1.8	1.49	1.0	南—北	36.9
13	GI+FP	B	B	1.8	1.49	1.0	南—北	36.9

GI: 1 mm厚亜鉛鉄板 FP: 20 mm厚発泡ポリスチレン W: 白色 B: つや消し黒色

#### 4.3.2 測定方法

模型畜舎は周囲建物の影響を可能な限り小さくするために香川大学農学部運動場に設置し、昭和57年8月20日から9月13日の晴天日に以下の項目について測定した。

- ① 舎外水平面全日射量（使用測器：エプレー型全日射計，英弘精機製 MS-60）
- ② 舎外水平面全波長放射熱量（通風式風防型放射収支計，英弘精機製 CN-11）
- ③ 舎内水平面短波長放射熱量（エプレー型全日射計，英弘精機製 MS-42）
- ④ 舎内水平面全波長放射熱量（通風式風防型放射収支計，英弘精機製 CN-40）
- ⑤ 屋根内表面温度（表面温度測定用 CC 熱電対箔，千野製作所製）
- ⑥ 日向地表面温度（⑤と同じ）
- ⑦ 日陰地表面温度（表面温度測定用サーミスター温度計，横河電機製）
- ⑧ 外気の乾球温度と湿球温度（アスマン通風乾湿球湿度計，太田計器製）
- ⑨ 外風速（光電式三杯型風速計，牧野応用測器研究所製）

舎外における全日射量，放射熱量および乾・湿球温度は模型畜舎周辺の地上 1.5 m の位置で測定した。舎内における短波長と全波長の放射熱量は桁行方向および梁間方向の中央における地上 0.745 m の高さで測定した。外風速は軒高の位置で測定した。

日向地表面温度は，模型畜舎の近くで日中に日陰にならない定位置において測定した。日陰地表面温度は，模型畜舎の屋根で日陰になった地表面のほぼ中心位置で測定した。したがって，日陰地表面温度の測定位置は測定時ごとに移動した。

屋根内表面温度はそれぞれの片側屋根の 3 か所，計 6 か所で測定した。

測定は，8時45分から17時15分にかけて行った。乾球温度，湿球温度および日陰地表面温度は毎正時と毎30分時に測定した。これら以外の項目の測定は自動平衡型記録計（横河電機製）で連続記録し，毎正時および毎30分時の前後15分にわたる30分間の平均値をその時刻の測定値とした。ある時刻の片側屋根内表面温度は 3 か所の測定温度の平均値とした。舎内と舎外における長波長放射熱量はそれぞれ全波長放射熱量から短波長放射熱量を差引いて求めた。

#### 4.3.3 模型畜舎内放射熱量の算定

舎内における放射熱量の計算値は以下の測定条件値と測定値を前節の算定方法に適用して求めることができる。

- ① 屋根葺材と周囲地表層土壌の熱伝導抵抗・熱容量
- ② 屋根内外表面の日射吸収率と放射率

- ③ 地表面の日射吸収率，放射率および蒸発比
- ④ 測定月日
- ⑤ 測定地の緯度と経度
- ⑥ 測定日における模型畜舎の諸元
- ⑦ 舎内放射熱量の測定位置
- ⑧ 測定日における直達日射量，天空日射量，大気放射量，気温，絶対湿度，風速および地中温度

表 4-3 亜鉛鉄板<sup>107,108)</sup>，発泡ポリスチレン<sup>107,108)</sup>および土壌（重量含水率15%の砂質粘土<sup>84)</sup>の熱伝導比抵抗と容積比熱

種 類	熱伝導比抵抗 ( $\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$ )	容積比熱 ( $\text{kcal}/\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C}$ )
亜鉛鉄板	0.0242	821
発泡ポリスチレン	21.2	15.0
土 壌	1.27	587

測定条件値のうち①～③に関する数値は従来の文献<sup>84,104,106-108)</sup>から引用した。表 4-3 に，屋根葺材の亜鉛鉄板と発泡ポリスチレンおよび周囲地表層土壌の熱伝導比抵抗と容積比熱を示す。また，屋根表面の黒色塗装面と白色塗装面の日射吸収率はそれぞれ0.9と0.2であり，塗装面の放射率はいずれも0.9である<sup>84,108)</sup>。さらに運動場地表面の日射吸収率，放射率および蒸発比はそれぞれ0.85<sup>106,108)</sup>，1.0<sup>106)</sup>，0.1<sup>104)</sup>である。

測定地の緯度と経度は，高松市の北緯34度21分，東経134度3分を用いた<sup>109)</sup>。

測定日の地表面温度には前日の気象条件の影響が残存することを考慮して，気象データは前日の20時から測定当日の19時30分までを1日分とした。測定時間外の8時30分以前と17時30分以降の気温，相対湿度，風速および水平面全日射量は，模型畜舎の設置場所から約70m離れた香川大学農学部自動気象観測装置の測定値を用いた。このうち風速は地上10mにおける測定値であったので，模型畜舎の軒高である地上1.0mにおける値に換算した。なお，換算式は9～17時における模型畜舎での測定風速と自動気象観測装置での測定風速から求めた回帰式である。

水平面直達日射量は測定しなかったため，直達日射量は宇田川と木村<sup>110)</sup>が提示した直散分離法を用いて水平面全日射量の測定値から推定した。また，水平面天空日射量は全日射量の測定値から直達日射量の推定値を差引いて求めた。

水平面大気放射量は，9時から17時においては実測値を用い，9～17時以外の時間帯においては(4-18)式を用いて気温と絶対湿度から推定した。

絶対湿度は湿球温度あるいは相対湿度から換算<sup>108)</sup>した。また，風速は実測値と上述の換算値とから24時間の平均風速を算出して用いた。地表面および屋根内外表面における熱や水蒸気の移動は24時間の平均風速に相当する強制対流として扱い，地表面の対流伝熱係数( $h_g$ )と屋根内外表面の対流伝熱係数( $h_r$ )は以下の式<sup>84)</sup>から，地表面の水蒸気移動係数は(4-37)式からそれぞれ求めた。

$$h_g = 5.3 + 3.6 V_a \quad (4-64)$$

$$h_r = 4.8 + 3.4 V_a \quad (4-65)$$

地表面における水の気化潜熱は，地表面温度が25～40°Cの範囲を想定し，580 kcal/kg<sup>106)</sup>とした。

地中伝導熱量の計算に必要な地温不易層の温度は，香川大学農学部自動気象観測装置による地表面から深さ

50 cm での測定値の24時間平均値を用いた。

室内放射熱量の計算値(CA)は、次式で示す実測値(OB)との相対誤差(RE)で検証した。また、地表面温度および屋根内表面温度についても同様な検証を行った。

$$RE = \left| \frac{OB-CA}{CA} \right| \times 100 \quad (4-66)$$

#### 4.3.4 結果および考察

##### (1) 測定日における気象条件と地中温度

7例の測定日における気象条件と深さ50 cmの地中温度の9～17時の平均値を表4-4に示す。なお、風速と地中温度については前日の20時から測定当日の19時30分までの平均値も合わせて示した。

表4-4 日中(9時～17時)における気象条件および地中温度の平均値

測定月日	$Q_t$	$Q_{at}$	$t_a$	$x_a$	$V_a$	$t_{50}$
8.20	427	435	30.2	0.017	3.1(1.5)	25.0(25.0)
21	429	425	29.6	0.019	1.7(0.9)	25.0(25.0)
23	521	429	31.2	0.018	1.8(1.0)	25.3(25.3)
30	519	405	29.3	0.014	1.0(0.7)	25.3(25.3)
9.2	489	408	30.0	0.016	1.6(1.0)	25.5(25.5)
4	458	355	26.2	0.010	2.1(1.4)	26.0(26.0)
13	524	365	24.8	0.008	1.3(1.4)	23.1(23.3)
平均	481	403	28.8	0.015	1.8(1.1)	25.0(25.1)

1)  $Q_t$ : 水平面全日射量 (kcal/m<sup>2</sup>・h)     $Q_{at}$ : 水平面大気放射量 (kcal/m<sup>2</sup>・h)     $t_a$ : 気温 (°C)

$x_a$ : 絶対湿度 (kg/kg')     $V_a$ : 風速 (m/s)     $t_{50}$ : 深さ50 cmの地中温度 (°C)

2) 括弧内の値は、前日の20時から測定日の19時30分までの平均値である。

7例の測定日における9～17時の平均風速は1.0～3.1 m/sであり、24時間の平均風速0.7～1.5 m/sよりも大きい傾向にある。このことは日中の風速が夜間の風速よりも大きいことを意味している。したがって、地表面と屋根内外表面における対流伝熱係数を24時間の平均風速から算出したことは、日中における対流伝熱係数を過小評価していることになる。

##### (2) 地表面温度、屋根内表面温度および室内放射熱量の計算値と実測値の比較

###### (2-1) 日中の平均値についての比較

日向地表面温度、日陰地表面温度、屋根内表面温度、室内短波長放射熱量、室内長波長放射熱量の計算値および実測値の日中(9～17時)における平均値ならびに計算値と実測値との差異を測定日ごとに表4-5に示す。

表4-5から、地表面温度、屋根内表面温度、室内放射熱量の計算値は実測値よりも総体的には大きいと言える。以下において計算値と実測値との差異について検討する。

###### (2-1-1) 地表面温度

地表面温度の計算値と実測値との差異は、8月20、21日と9月13日の日向・日陰地表面温度および8月23、30日の日陰地表面温度において3.2～5.3°Cであり、これらは他の場合の差異0.3～2.6°Cよりも大きい傾向にある。

香川大学農学部自動気象観測装置の記録によれば、8月17日から19日の3日間に約10 mm、8月26、27日の2日間に25 mm、9月9日から11日の3日間に12 mm、そして9月12日に約15 mmの降雨があった。8月20、21日と9月13日における地表層土壌の熱伝導比抵抗は降雨の影響による土壌水分上昇のために設定値(表4-3)よりも小さくなり、他方、容積比熱は設定値よりも大きくなり、この結果として8月20、21日と9月13日の計算値



表 4-5 地表面温度、屋根内表面温度および舎内放射熱量の計算値と実測値との比較  
(9時~17時の平均値)

測定月日	$t_{g1}$	$t_{g2}$	$t_{r11}$	$t_{r12}$	$Q_p$	$Q_b$
8.20	40.5	33.0	35.6	35.4	61	444
	35.2	28.9	32.8	32.8	45	428
	5.3	4.1	2.8	2.6	16	16
8.21	42.5	34.8	36.2	36.0	63	447
	38.4	30.4	33.7	33.4	49	428
	4.1	4.4	2.5	2.6	14	19
8.23	44.9	35.4	37.2	36.9	70	453
	45.8	32.2	36.1	35.0	58	437
	-0.9	3.2	1.1	1.9	12	16
8.30	43.1	33.7	39.7	38.8	36	460
	42.1	29.0	39.4	36.9	20	443
	1.0	4.7	0.3	1.9	16	17
9. 2	42.3	34.0	40.1	39.7	37	464
	42.7	31.4	38.1	36.8	22	441
	-0.4	2.6	2.0	2.9	15	23
9. 4	36.4	28.7	46.1	41.4	65	472
	38.3	28.4	44.8	37.3	25	448
	-1.9	0.3	1.3	4.1	40	24
9.13	37.4	28.1	39.7	39.2	49	454
	32.1	23.8	36.8	34.5	21	424
	5.3	4.3	2.9	4.7	28	30

1)  $t_{g1}$ : 日向地表面温度 (°C)  $t_{g2}$ : 日陰地表面温度 (°C)  $t_{r11}$ ,  $t_{r12}$ : 屋根 1 内表面温度, 屋根 2 内表面温度 (°C)  $Q_p$ ,  $Q_b$ : 舎内短波長放射熱量, 舎内長波長放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

2) 各測定日において, 上段は計算値, 中段は実測値, 下段は計算値と実測値との差異である。

と実測値との差異は他の測定日に比べて大きくなったと推察できる。

8月23, 30日において日陰地表面温度の計算値と実測値との差異が大きいのは, 気象条件と日陰地表面温度の測定位置によるためと考えられる。すなわち, 表4-4に示したように8月23日と30日は全日射量が大きく, 風も比較的穏やかな気象条件であり, このような条件下においては日陰地表面と日向地表面との温度差が大きいことから, 日陰地表面の中心位置における温度は日陰地表面全体の平均温度よりも低いと推察できる。

#### (2-1-2) 屋根内表面温度

屋根内表面温度の計算値と実測値との差異は4.7°C以下である。なお, 9月4日と13日における屋根2内表面温度の計算値と実測値との差異は他の測定日に比べて大きい, このことを明確に説明できる理由は見当たらない。

#### (2-1-3) 舎内放射熱量

舎内短波長放射熱量の計算値と実測値との差異は12~40kcal/m<sup>2</sup>·hである。これらの差異の原因については後述の(2-2)項において検討する。また, 舎内長波長放射熱量の計算値と実測値との差異は16~30kcal/m<sup>2</sup>·hである。

舎内長波長放射熱量の計算値と実測値との差異の測定日ごとの変化は, 地表面温度や屋根内表面温度の場合に比較して小さい。これは, 次の理由によるためと考えられる。すなわち, 地表面や屋根内表面から射出する長波長放射熱が舎内の微小水平面に入射する過程においては, 長波長放射熱量には1以下の値である放射率と形態係

数が乗じられる（4.2節参照）ため、舎内長波長放射熱量の計算値と実測値との差異に及ぼす地表面温度や屋根内表面温度の計算値と実測値との差異の影響は小さくなるからである。

舎内長波長放射熱量の計算値と実測値との差異は計算値  $444\sim 472\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}$  に対して  $16\sim 30\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}$  であることから、計算値と実測値は良く一致していると言える。一方、舎内短波長放射熱量の計算値と実測値との差異は舎内長波長放射熱量の場合の差異と大差ない。しかし、計算値が  $36\sim 70\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}$  と小さいことから、計算値に対する差異の割合は舎内長波長放射熱量の場合に比べて非常に大きいと言える。

(2-2) 日中における変動の比較

ここでは、7例の測定日のうち8日30日と9月4日を例として、日中における計算値の変動と実測値の変動について比較検討する。

(2-2-1) 8月30日の場合

図4-4に、8月29日の20時から30日の19時30分までの気象要因の日変動を示す。

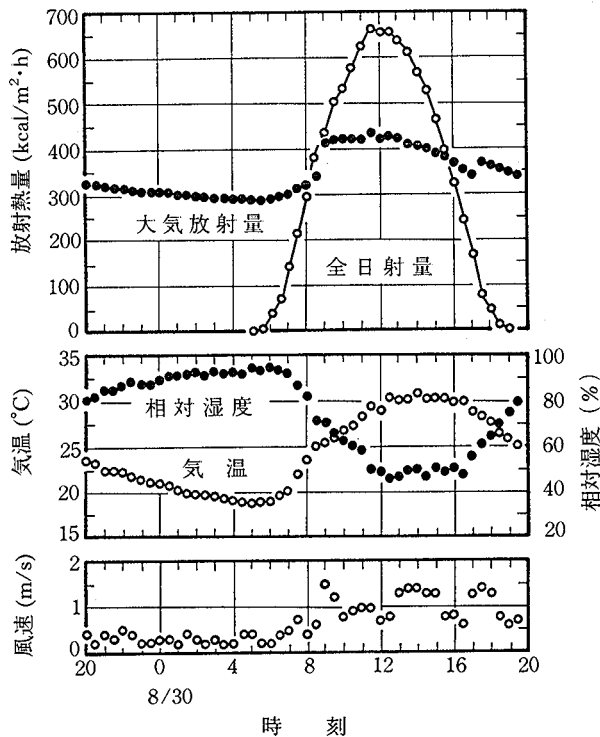


図4-4 気象要因の日変動（8月29日20時～8月30日19時30分）

図4-5に、9時から17時における地表面温度、屋根内表面温度および舎内放射熱量の計算値と実測値を示す。測定に供した模型畜舎は、表4-2に示したように、屋根傾角が $22.0$ 度であり、屋根葺材が亜鉛鉄板である。また、屋根外表面は白色、屋根内表面はつや消し黒色であり、桁行方位は南東—北西である。

図4-5から、日向・日陰地表面温度、屋根内表面温度および舎内長波長放射熱量の実測値には風速の変動によるためと考えられる小さな変動が見られるのに対し、計算値にはそのような変動が見られない。このような変動の差異は、計算値が24時間平均風速の一定値に基づいているためである。しかし、日中における計算値の変動は全体的には実測値の変動に対応している。

舎内短波長放射熱量においては、計算値が15～46 kcal/m<sup>2</sup>・hの範囲であるのに対し、実測値は14～22 kcal/m<sup>2</sup>・hと変動の範囲が小さくほぼ一定である。このような傾向は、屋根内表面が黒色である9月2, 4, 13日においても同様であった。屋根内表面が黒色の場合における舎内短波長放射熱量の計算値と実測値との変動の相違は、黒色面の日射吸収率の設定値が実際の値よりも小さすぎたこと、あるいは実測値が非常に小さいために舎内短波長放射熱量の変動を測定器が検出できなかったことによるためと考えられる。しかし、屋根内表面が白色のとき(8月20, 21, 23日)の舎内短波長放射熱量においては、直達日射が到達しない限り、計算値の変動は実測値の変動に対応していた。例えば、8月20日においては計算値は22～85 kcal/m<sup>2</sup>・hの範囲であり、実測値は15～69 kcal/m<sup>2</sup>・hの範囲であった。

(2-2-2) 9月4日の場合

9月3日の20時から4日の19時30分までの気象要因の日変動を図4-6に示す。

図4-7に、9時から17時における地表面温度、屋根内表面温度および舎内放射熱量の計算値と実測値を示す。測定に供した模型畜舎は、表4-2に示したように、屋根傾角が36.9度であり、屋根葺材が亜鉛鉄板である。また、屋根外表面と屋根内表面はともにつや消し黒色であり、桁行方位は南一北である。なお、10時の舎内長波長放射熱量については記録計の故障のために実測値が得られなかった。

図4-7から、地表面温度、屋根内表面温度および舎内長波長放射熱量の計算値の変動は前述した8月30日の場合と同様に、総体的には実測値の変動に対応している。このことは他の測定日(8月20, 21, 23日, 9月2, 13日)においても同様であった。

9時から16時までの舎内短波長放射熱量の計算値は21～63 kcal/m<sup>2</sup>・hの範囲であり、舎外の全日射量に対応した変動を示しているのに対し、実測値は19～31 kcal/m<sup>2</sup>・hと変動の範囲が小さくほぼ一定である。このことは8月30日の場合と同様である。

図4-7から、16時30分における舎内短波長放射熱量の計算値には、直達日射が明らかに含まれていることがわかる。しかし、実測では太陽が雲に覆われ、直達日射が到達していなかった。これと同様なことは、8月20, 21, 23日の17時および9月13日の16時30分においても見られた。舎内短波長放射熱量の計算値と実測値における

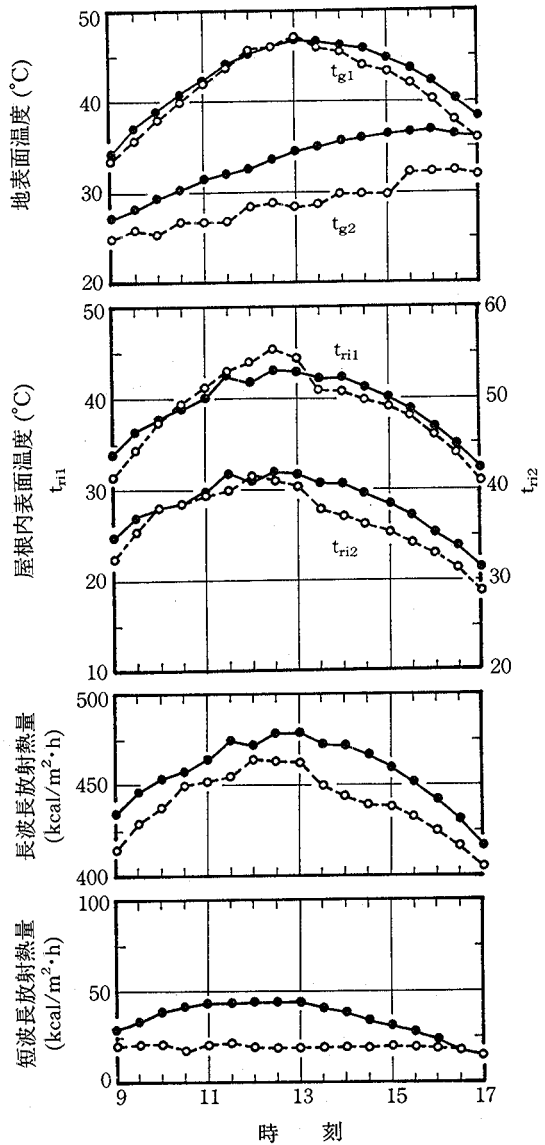


図4-5 地表面温度、屋根内表面温度および舎内放射熱量の計算値(●)と実測値(○)の比較(8月30日)

- t<sub>g1</sub>: 日向地表面温度
- t<sub>g2</sub>: 日陰地表面温度
- t<sub>ri1</sub>: 南西側屋根内表面温度
- t<sub>ri2</sub>: 北東側屋根内表面温度

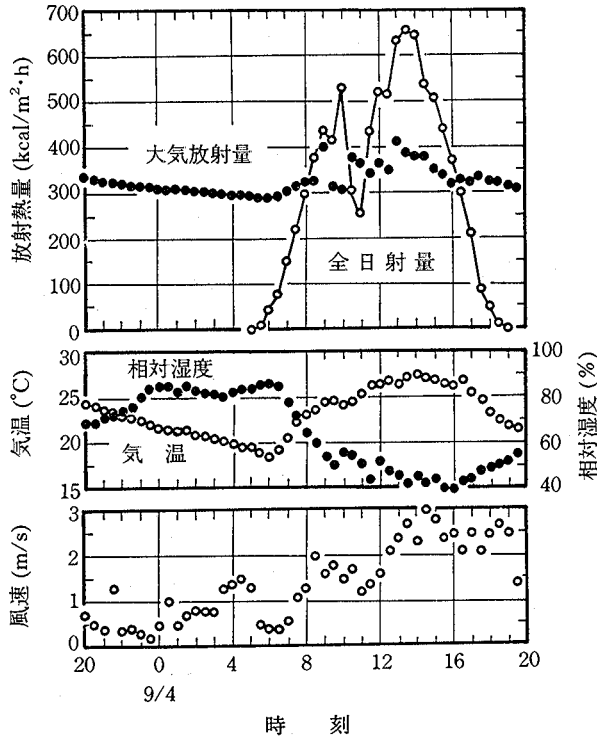


図4-6 気象要因の日変動（9月3日20時～9月4日19時30分）

このような差異は、直達日射量を全日射量の測定値から直散分離法<sup>110)</sup>で推定したためである。

17時において、舎内の微小水平面に直達日射が到達していることは実測値からわかる。しかし、直達日射の到達は17時10分頃から約5分間だけであったので、17時の前後15分間の平均値である実測値と17時の瞬時値である計算値との間には  $106 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  の差異が生じている。

これらのことから、計算および実測において舎内の放射熱量測定点に直達日射が到達する時間帯は相対誤差の検討から除外した。

(3) 計算値に対する実測値の相対誤差

表4-6に日向地表面温度、日陰地表面温度、屋根内表面温度、舎内短波長放射熱量、舎内長波長放射熱量および舎内全波長放射熱量の計算値に対する実測値の相対誤差を示す。表4-6に示す相対誤差は、各時刻における相対誤差から求めた信頼率95%の平均値である。

表4-6から日陰地表面温度および舎内短波長放射熱量の相対誤差がそれぞれ9.2～11.2、30.4～36.4%と大きいこと、また舎内長波長放射熱量の相対誤差が4.2～5.0%と小さいことについての理由は、すでに前項で述べたとおりである。

気象条件の1つである直達日射量は全日射量の実測値から直散分離法<sup>110)</sup>で推定したため、舎内短波長放

表4-6 地表面温度、屋根内表面温度および舎内放射熱量の計算値に対する実測値の相対誤差

要 因	相対誤差の平均値 (信頼率95%) (%)
日向地表面温度	7.3±0.9 (n=119)
日陰地表面温度	10.2±1.0 (n=119)
屋根内表面温度	6.8±0.6 (n=238)
舎内短波長放射熱量	33.4±3.0 (n=113)
舎内長波長放射熱量	4.6±0.4 (n=118)
舎内全波長放射熱量	7.1±0.5 (n=112)

n: データ数

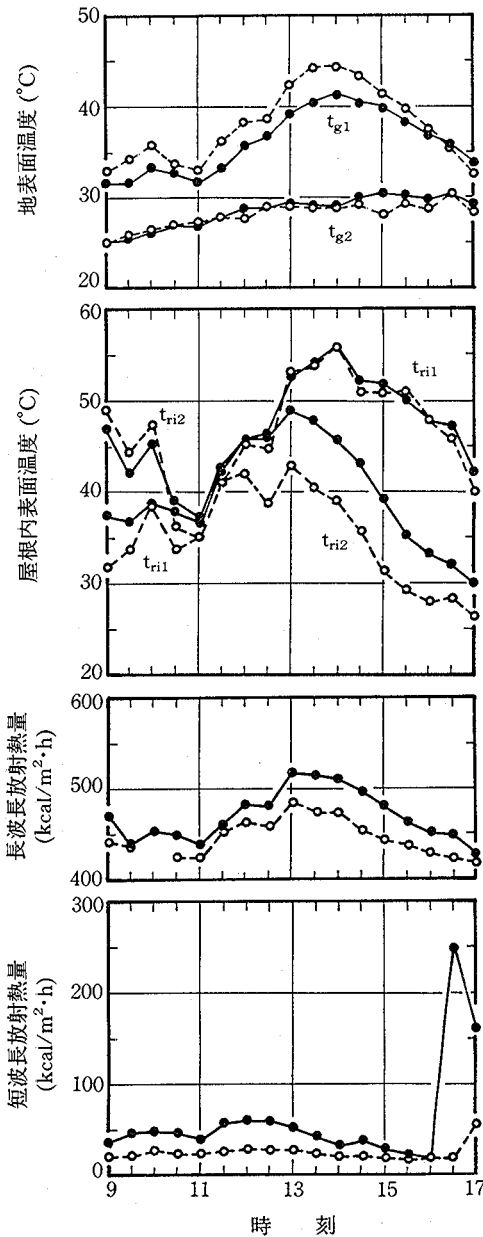


図 4-7 地表面温度，屋根内表面温度および舍内放射熱量の計算値(●)と実測値(○)の比較(9月4日)

- $t_{g1}$ : 日向地表面温度
- $t_{g2}$ : 日陰地表面温度
- $t_{ri1}$ : 西側屋根内表面温度
- $t_{ri2}$ : 東側屋根内表面温度

北側屋根(屋根傾角18.4度)の平均傾角12.1度の切妻型として扱った。屋根内外表面の日射吸収率と放射率は従来の文献<sup>84,108)</sup>を参考にして決めた。屋根葺材の亜鉛鉄板(厚さ1mm)と周囲地表層土壌の熱伝導比抵抗と容積比熱は表4-3に示した値を用い、裸地面の日射吸収率、放射率および蒸発比は、模型畜舎における検証の場合

射熱量の計算値の検証は定量的に十分な検討ができなかった。しかし、舍内放射熱量の実測値によれば舍内に直達日射が到達しない限り全波長放射熱量に占める短波長放射熱量の割合は屋根内表面が白色の場合には約14%以下であり、黒色の場合には約6%以下であったこと、また表4-6に示したように舍内全波長放射熱量の相対誤差は6.6~7.6%であることから、4.2節に提示した舍内放射熱量の算定方法は短波長放射熱量も含めて総体的には妥当であると言える。

#### 4.4 現存畜舎における算定結果の検証

本節では、第2章で述べた開放型畜舎内における放射熱量の実測値を対象として、舍内放射熱量の算定結果の検証を試みる。この場合、気象データは日中だけしか測定されていなかったため、舍内放射熱量の算定に必要な24時間の気象データは暑熱日を想定して、気温については大阪での年間最高気温極値の出現日における時刻別気温統計値<sup>111)</sup>を、舍外水平面全日射量すなわち水平面直達日射量と水平面天空日射量については8月7日における快晴条件下の計算値を採用した。したがって、気温と舍外水平面全日射量の実測値がそれぞれ時刻別気温統計値と全日射量計算値にもっとも近似していた昭和53年8月1日のセミモニター屋根式採卵鶏舎内の放射熱量実測値を検証の対象とした。

##### 4.4.1 対象畜舎の概要と舍内放射熱量の測定方法

検証の対象としたセミモニター屋根式採卵鶏舎の概要および鶏舎内における放射熱量の測定方法は、第2章の2.2節に述べたとおりである。

##### 4.4.2 舍内放射熱量の算定

4.2節に提示した算定方法からセミモニター屋根式採卵鶏舎内の放射熱量を計算する際に必要な条件値は、模型畜舎の場合と同様に鶏舎の諸元、屋根葺材と周囲地表層土壌の熱特性値および気象条件などに大別される。

表4-7に、セミモニター屋根式採卵鶏舎の諸元を示す。セミモニター屋根は南側屋根(屋根傾角5.7度)と

表 4-7 セミモニター屋根式採卵鶏舎の諸元

屋根の熱貫流抵抗	0.18	( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} / \text{kcal}$ )
屋根外表面の日射吸収率	0.7	
屋根外表面の放射率	0.7	
屋根内表面の日射吸収率	0.5	
屋根内表面の放射率	0.3	
地表面の種類	裸地面	
桁行長	35.0	(m)
梁間長	3.1	(m)
軒高	2.5	(m)
桁行方位	東-西	
屋根傾角	12.1	( $^\circ$ )

屋根傾角は南側屋根(屋根傾角5.7度)と北側屋根(屋根傾角18.4度)の平均値である。

と同様にそれぞれ  $0.85^{106,108}$ ,  $1.0^{106}$ ,  $0.1^{104}$  とした。

気温は前述したように年間最高気温極値の出現日における時刻別気温統計値<sup>111)</sup>を採用し、絶対湿度は日最低気温時の相対湿度が90%になるように設定した。

風速は  $0 \text{ m/s}$  とした。したがって、地表面と屋根内外表面における熱や水蒸気の移動は自然対流として扱い、自然対流伝熱係数は地表面においては水平な粗面平板における上向熱流時の値である  $5.3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}^{84}$ 、屋根外表面においては水平傾角が12.1度の平滑面平板における上向熱流時の値  $4.9 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}^{84}$ 、屋根内表面においては水平傾角が12.1度の平滑面平板における下向熱流時の値  $2.1 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}^{84}$  をそれぞれ採用した。

地温不易層の地中温度は  $25.0^\circ\text{C}$  とした。この地中温度(深さ50cm)は、設定した気温の日変動に近似した日の香川大学農学部構内における5年間(昭和52年~56年)の平均値である<sup>112)</sup>。また、地表面における水の気化潜熱は、前節の場合と同様に  $580 \text{ kcal/kg}^{106}$  とした。なお、鶏舎の位置する場所の緯度・経度は高松市の北緯34度21分、東経134度3分を用いた<sup>109)</sup>。

検証の評価は、模型畜舎の場合と同様に(4-66)式の相対誤差で行った。

#### 4.4.3 結果および考察

図4-8に、セミモニター屋根式採卵鶏舎内における短波長放射熱量および長波長放射熱量の実測値と計算値を示す。また、図4-8には舎外水平面全日射量および外気温の実測値と計算値も合わせて示す。

図4-8から、10時30分から15時30分における舎内長波長放射熱量の計算値と実測値はそれぞれ  $519 \sim 552 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  と  $461 \sim 491 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  の範囲である。計算値は実測値よりも  $52 \sim 71 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  大きいですが、両者の変動は良く対応している。

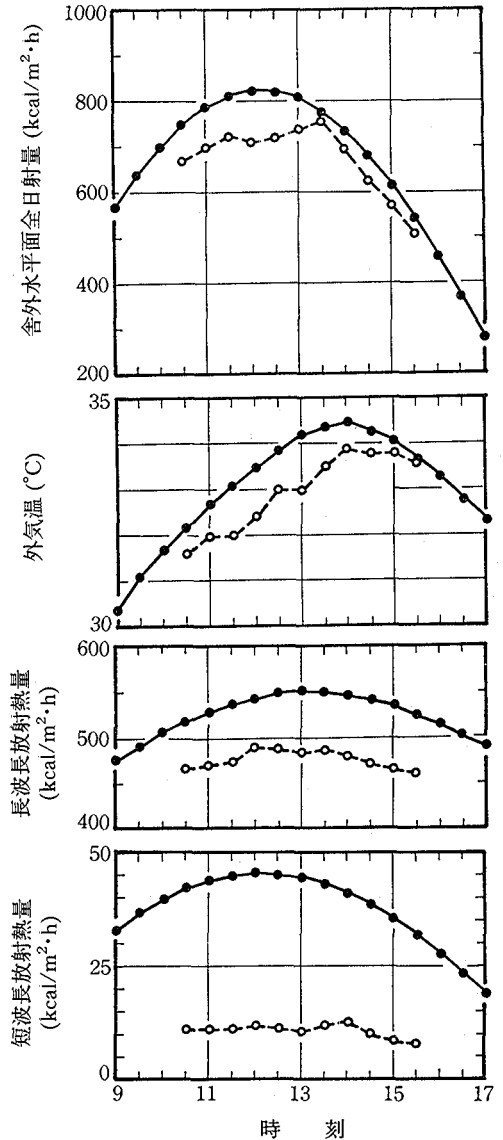


図 4-8 セミモニター屋根式採卵鶏舎内における短波長放射熱量および長波長放射熱量の実測値と計算値の比較(舎外水平面全日射量と外気温の実測値と計算値も合わせて示した) (昭和53年8月1日)

舎内短波長放射熱量の計算値は32~46 kcal/m<sup>2</sup>・hであるが、実測値は8~13 kcal/m<sup>2</sup>・hとほぼ一定である。実測値が計算値よりも著しく小さくてほぼ一定であることは主として、日向地表面から屋根内表面に到達する日射量および天空から舎内に直接到達する日射量が隣接する鶏舎によって減じられるためであると考えられる。

表 4-8 セミモニター屋根式採卵鶏舎内における放射熱量の計算値に対する実測値の相対誤差

要 因	相対誤差の平均値 (信頼率95%) (%)
長波長放射熱量	11.7±0.7 (n=11)
短波長放射熱量	73.6±1.1 (n=11)
全波長放射熱量	16.1±0.5 (n=11)

n: データー数

4-6 に示した模型畜舎の場合の4.2~5.0%よりも大きい。これは、舎内放射熱量の計算に際してセミモニター屋根を切妻屋根として扱ったこと、計算に使用した気象条件が実測値でなかったこと、周囲建物の影響を受けたことなどによるためと考えられる。しかしながら、畜舎内の長波長放射熱量に関する算定方法は、多くの条件を単純化しているにもかかわらず、図 4-8 と表 4-8 からセミモニター屋根型の現存畜舎についても妥当であると言える。

舎内短波長放射熱量の相対誤差は72.5~74.7%と非常に大きい。この原因は舎内長波長放射熱量について前述したのと同様な理由が考えられ、特に舎内短波長放射熱量に及ぼす周囲建物の影響は大きいと推察できる。

鶏舎内の放射熱量実測値によれば、全波長放射熱量に占める短波長放射熱量の割合は1.8~2.5%と小さかった。このために、舎内全波長放射熱量の相対誤差は舎内長波長放射熱量の相対誤差よりもわずかに大きい15.6~16.6%である。したがって、4.2 節に提示した舎内放射熱量の算定方法は、現存畜舎に対しても短波長放射熱量を含めて総体的には妥当であると言える。

#### 4.5 摘 要

本章では最初に、代表的な畜舎型式である切妻屋根式開放型畜舎を対象として、24時間の周期的非定常伝熱現象のもとで舎内の微小水平面に下向きに入射する短波長放射熱量と長波長放射熱量の算定方法を提示した。算定に用いた主要なパラメーターは以下のとおりである。

##### ①気象条件

- 直達日射量
- 天空日射量
- 大気放射量
- 気温
- 絶対湿度
- 風速

##### ②畜舎条件

- 桁行方位
- 桁行長
- 梁間長
- 軒高
- 屋根勾配
- 屋根外表面の日射吸収率
- 屋根外表面の放射率
- 屋根内表面の日射吸収率
- 屋根内表面の放射率
- 屋根葺材の熱伝導抵抗・熱容量

##### ③地表面条件

- 地表面の日射吸収率
- 地表面の放射率
- 地表面の蒸発比
- 地表層土壌の熱伝導抵抗・熱容量

表 4-8 に、鶏舎内における短波長放射熱量、長波長放射熱量および全波長放射熱量の計算値に対する実測値の相対誤差を示す。これらは、10時30分から15時30分の各時刻における相対誤差から求めた平均値 (信頼率95%) である。

表 4-8 から、舎内長波長放射熱量の相対誤差の平均値は信頼率95%の区間推定で11.0~12.4%であり、表

なお、算定方法の構築に際して対象とした切妻屋根式開放型畜舎は放射伝熱に関して柱・外壁が無視でき、また畜舎周囲の地表面は水平で、かつ放射伝熱に関して同質であるとした。

次に、算定方法の検証を行うために、周囲建物の影響が小さい場所に設置した切妻屋根式開放型の模型畜舎、および現存のセミモニター屋根式採卵鶏舎における舎内の長波長放射熱量と短波長放射熱量の実測値と計算値とを比較検討した。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 模型畜舎において、舎内の下向き長波長放射熱量の計算値と実測値との差異は約  $50 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下であり、計算値に対する実測値の相対誤差は  $4 \sim 5 \%$  であった。また、直達日射が到達しない条件下では舎内の短波長放射熱量の計算値と実測値との差異は約  $35 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下であり、相対誤差は  $30 \sim 36 \%$  であった。
- (2) セミモニター屋根式採卵鶏舎において舎内の下向き放射熱量の計算値と実測値との差異は、長波長放射熱量については約  $70 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下であり、短波長放射熱量については約  $35 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下であった。また、計算値に対する実測値の相対誤差は前者については  $11 \sim 12 \%$ 、後者については  $73 \sim 75 \%$  であり、模型畜舎の場合よりも大きかった。これは、屋根型式が切妻屋根型と異っていたこと以外に、主として周囲建物の影響によるためと考えられた。
- (3) 以上より、短波長放射熱量の相対誤差は大きいですが、舎内に直達日射が到達しない限り舎内の全波長放射熱量に占める短波長放射熱量の割合は小さい（実測値によれば模型畜舎においては屋根内表面が白色の場合には約  $14 \%$  以下、屋根内表面が黒色の場合には約  $6 \%$  以下であり、セミモニター屋根式採卵鶏舎においては約  $2.5 \%$  以下であった）ことから、舎内の放射熱量に関する算定方法は総体的には妥当であると言える。
- (4) また、舎内放射熱量の算定に際して設定した地表面や屋根内外表面の日射吸収率・放射率、地表層土壌や屋根葺材の熱伝導比抵抗・容積比熱および地表面や屋根内外表面の対流伝熱係数は、舎内長波長放射熱量の計算においてはほぼ妥当な値であると言える。しかし、屋根内表面の日射吸収率については、実際の値と設定値とのわずかな違いが舎内短波長放射熱量の計算値と実測値との差異に大きな影響を及ぼす可能性がある。なお、周囲建物および雲による日射量の変化があるときの舎内短波長放射熱量の算定方法については今後に残された問題である。

## 第5章 開放型畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元の要因分析

### 5.1 緒言

放射熱による家畜の熱ストレスを可能な限り小さくする開放型畜舎の諸元を提示するためには、舎内の放射熱量に有意な影響を及ぼす要因を明らかにし、有意な要因の影響の度合いを総合的に解明する必要がある。

第4章では、開放型畜舎内における放射熱量の算定方法を提示した。この算定方法によれば、舎内放射熱量に関与するパラメーター数すなわち因子数は畜舎側の条件だけでも10に達し、舎内放射熱量に及ぼす各因子の影響を野外実験により定量的に評価することは不可能に近い。

そこで本章では切妻屋根式開放型畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎構造、屋根内外表面の日射吸収率・放射率、屋根葺材の熱特性値および地表面の種類などの因子の影響の度合いを、第4章に提示した算定方法に基づく数値シミュレーションから応答解析法<sup>113)</sup>（応答解析は感度分析<sup>114)</sup>とも呼ばれる）による要因分析で総合的に定量評価する。また、有意な要因変動に基づいて舎内の放射熱量を求める実用的な予測式を提示する。さらに、舎内の放射熱量を最小にする畜舎諸元を明らかにするとともに、予測式の現存畜舎への適用について検討する。



本章において使用する記号は次のとおりである。

- F: 因子
- $F_i \times F_j$ : 因子  $F_i$  と因子  $F_j$  との 2 因子交互作用
- M: 特性値の平均値
- PR: 特性値の予測値
- Q: 短波長放射熱量の予測値 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )
- Q': 長波長放射熱量の予測値 ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )
- S: 変動
- V: 分散
- $\rho$ : 寄与率 (%)
- $\phi$ : 自由度

上添記号

$\overline{F_{i,j}}$ : (因子  $F_i$  の水準  $j$  における) 要因効果推定値

下添字

- er: 誤差
- i: 因子の種類
- $l, m, n, n1 \sim n11$ : (異なる因子の) 水準
- t: 全体
- mn: 日中 (9~17時) における平均
- mx: 日中 (9~17時) における最大

## 5.2 分析法

### 5.2.1 要因分析法

$n$  個の要因 ( $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$ ) が関係する物理量  $y$  はある関数  $f$  で次のように表すことができる。

$$y = f(F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n) \quad (5-1)$$

本分析では、第 4 章に提示した(4-1)式と(4-2)式が上式に該当する。

(5-1)式において、それぞれの要因に種々の値を入力して得られる出力  $y$  を分散分析に供することにより要因効果は評価できる。この方法は、応答解析法と呼ばれ<sup>113)</sup>、分散分析に供する  $y$  は特性値と呼ばれる<sup>113)</sup>。なお、 $n$  個の要因があるときには 1 因子効果 (主効果)、2 因子交互作用、3 因子交互作用、 $\dots$ 、 $n$  因子交互作用の  $n$  種類の要因効果がある<sup>114)</sup>。

本分析において対象とした特性値  $y$  は舎内の放射熱量であり、取上げた因子は舎内の放射熱量に大きな影響を及ぼし、畜舎の設計・建設に際して重要であると予想される次の 11 個である。

- |                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| ① 屋根の熱貫流抵抗 ( $F_1$ )  | ② 屋根外表面の日射吸収率 ( $F_2$ ) |
| ③ 屋根外表面の放射率 ( $F_3$ ) | ④ 屋根内表面の日射吸収率 ( $F_4$ ) |
| ⑤ 屋根内表面の放射率 ( $F_5$ ) | ⑥ 地表面の種類 ( $F_6$ )      |
| ⑦ 桁行長 ( $F_7$ )       | ⑧ 梁間長 ( $F_8$ )         |
| ⑨ 軒高 ( $F_9$ )        | ⑩ 桁行方位 ( $F_{10}$ )     |

⑩ 屋根勾配 ( $F_{11}$ )

因子の影響を2次成分まで評価するために各因子において3水準を設定すると、因子水準の組合せは $3^{11}=177,147$ 通りである。そこで、要因効果を効率的に評価するために因子水準の組合せについては、実験計画法で用いられる直交配列表<sup>113,114)</sup>を利用する。

畜舎内の放射熱量に対する要因分析の研究例は皆無であることから、どのような交互作用が放射熱量に有意な影響を及ぼすかは明らかでない。本分析では、多因子交互作用の中で要因効果が他に比べて大きく、また一般的に技術的な解釈が容易であると言われている<sup>114)</sup>2因子交互作用を分析対象とする。

第1章の1.2節で述べたように、開放型畜舎において日射熱の影響を小さくするためには、屋根の断熱と舎内に到達する直達日射の遮断が効果的である。このことから本分析では、屋根の熱貫流抵抗を主体とした2因子交互作用と直達日射の影響を考慮した2因子交互作用を取上げた。すなわち、屋根の熱貫流抵抗と他の因子( $F_1 \times F_2, F_1 \times F_3, \dots, F_1 \times F_{11}$ )、梁間長と軒高( $F_8 \times F_9$ )、桁行方位と屋根勾配( $F_{10} \times F_{11}$ )の12個の2因子交互作用である。

3水準系直交配列表の各列の自由度は2であることから、11個の主効果(主効果の自由度は2である)と12個の2因子交互作用(2因子交互作用の自由度は4である)を評価するためには、直交配列表の列の数が35必要である。そこで、列の数が40である直交配列表 $L_{81}(3^{40})$ を使用する。このとき5列が余り、さらに2個の2因子交互作用あるいは1個の3因子交互作用(3因子交互作用の自由度は8である)を評価することができるが、本分析では残りの5列は誤差項として取扱うことにする。すなわち、上述した12個以外の2因子交互作用と3因子以上の交互作用は誤差と見なす。なお、本分析で誤差と見なした交互作用についての要因分析は今後に残された問題である。

11個の因子を直交配列表 $L_{81}(3^{40})$ に割付けた結果の線点図を図5-1に示す。直交配列表 $L_{81}(3^{40})$ によれば因子水準の組合せは81通りである。なお、以後においては2因子交互作用は単に交互作用と呼ぶことにする。

直交配列表 $L_{81}(3^{40})$ による81通りの因子水準の組合せで、第4章に示した算定式に基づく舎内放射熱量の数値シミュレーションを行い、シミュレーション結果を特性値として以下の手順<sup>113)</sup>により分散分析を行う。すなわち、まず誤差項でF検定を行い、その結果5%水準で有意を示さない要因効果がある場合には、それらの中で分散が最小のものを誤差項にプールして再びF検定を行う。なおも有意にならない要因効果があるときには、分散が最小のものを誤差項に再度プールしてF検定を行う。有意を示さない要因効果がなくなるまで、あるいはプールした誤差項の自由度が全自由度の2分の1になるまでこれらの手順を繰返す。

分散分析の結果、有意を示した要因効果については寄与率と各水準の平均値すなわち要因効果推定値を求める。要因効果の寄与率( $\rho_i$ )は次式<sup>113)</sup>から求めることができ

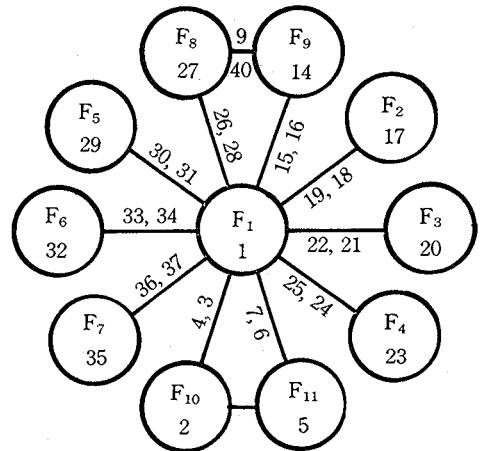


図5-1 因子 $F_1 \sim F_{11}$ の直交配列表割付け線点図

- $F_1$  : 屋根の熱貫流抵抗
  - $F_2$  : 屋根外表面の日射吸収率
  - $F_3$  : 屋根外表面の放射率
  - $F_4$  : 屋根内表面の日射吸収率
  - $F_5$  : 屋根内表面の放射率
  - $F_6$  : 地表面の種類
  - $F_7$  : 桁行長
  - $F_8$  : 梁間長
  - $F_9$  : 軒高
  - $F_{10}$  : 桁行方位
  - $F_{11}$  : 屋根勾配
- 番号は直交配列表における列番号であり、10, 12, 13, 38, 39番列は誤差項である。

る。

$$\rho_i = \left( \frac{S_i - \phi_i V_{er}}{S_i} \right) \times 100 \quad (5-2)$$

各水準の要因効果推定値は信頼率95%で求め、各水準別の有意差検定をダンカンの多重検定法 (Duncan's Multiple Range Test) で行う。

室内放射熱量 (特性値) の予測値 (PR) は、例えば要因効果  $F_1, F_2, F_3, F_1 \times F_2, F_1 \times F_3$  が有意であり、 $F_1, F_2, F_3$  の因子水準を  $l, m, n$  で表すならば、(5-3)式に示されるように特性値の平均値 ( $M$ ) と要因効果推定値 ( $\overline{F_{1,l}}, \overline{F_{2,m}}, \overline{F_{3,n}}, \overline{F_{1,l} \times F_{2,m}}, \overline{F_{1,l} \times F_{3,n}}$ ) の加減演算から求めることができる<sup>113)</sup>。

$$\begin{aligned} PR = & M + (\overline{F_{1,l}} - M) + (\overline{F_{2,m}} - M) + (\overline{F_{3,n}} - M) + \{(\overline{F_{1,l} \times F_{2,m}} - M) - (\overline{F_{1,l}} - M) - (\overline{F_{2,m}} - M)\} \\ & + \{(\overline{F_{1,l} \times F_{3,n}} - M) - (\overline{F_{1,l}} - M) - (\overline{F_{3,n}} - M)\} \end{aligned} \quad (5-3)$$

放射熱量の予測値は要因効果推定値と同様に信頼率95%で求める。

### 5.2.2 因子水準の設定

因子水準は、実際の値<sup>88,115-118)</sup>を参考にし、要因効果を補間法で推定するときの精度が極端に低下しない水準であることを考慮して設定した。

#### (1) 屋根の熱貫流抵抗 ( $F_1$ )

屋根は1mm厚の亜鉛鉄板だけの場合と、亜鉛鉄板の内表面側に15mm厚および30mm厚の発泡ポリスチレンをそれぞれ用いた場合の3種類を設定した。これらの屋根の熱伝導抵抗、熱容量および熱貫流抵抗を表5-1に示す。以後においては、屋根の種類は熱貫流抵抗で表すことにする。

表 5-1 屋根の熱伝導抵抗、熱容量および熱貫流抵抗

特 性	屋 根 の 種 類		
	G.I (1mm厚)	G.I (1mm厚) + F.P. (15mm厚)	G.I. (1mm厚) + F.P. (30mm厚)
熱伝導抵抗 ( $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$ )	0.0000242	0.318	0.636
熱 容 量 ( $kcal / m^2 \cdot ^\circ C$ )	0.821	1.05	1.27
熱貫流抵抗 ( $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$ )	0.176	0.494	0.812

- 1) G.I: 亜鉛鉄板 F.P.: 発泡ポリスチレン
- 2) 亜鉛鉄板の熱伝導比抵抗と容積比熱はそれぞれ  $0.0242 m \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$  と  $821 kcal / m^3 \cdot ^\circ C$  であり、発泡ポリスチレンのそれらは  $21.2 m \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$  と  $15.0 kcal / m^3 \cdot ^\circ C$  である<sup>108)</sup>。
- 3) 熱貫流抵抗の計算に際して、屋根外表面側と屋根内表面側の熱伝達率はそれぞれ  $19.5 kcal / m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$  と  $8.0 kcal / m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$  を用いた<sup>89)</sup>。

#### (2) 屋根内外表面の日射吸収率と放射率 ( $F_2 \sim F_3$ )

日射吸収率と放射率は表面の色および光沢が関係する。そこで、日射吸収率は白色系の0.2<sup>108)</sup>、黒色系の0.9<sup>108)</sup>およびこれらの中間値として0.55の3水準を設定した。また、放射率は金属光沢面の0.2<sup>108)</sup>、一般塗装面の0.9<sup>108)</sup>およびこれらの中間値の0.55を設定した。

#### (3) 地表面の種類 ( $F_4$ )

地表面は裸地、草地、コンクリートの3水準を設定した。これらの地表面の日射吸収率、放射率および蒸発比を表5-2に示す。

表 5-2 地表面の日射吸収率<sup>106,108)</sup>, 放射率<sup>106)</sup> および蒸発比<sup>104)</sup>

特 性	裸地面	草地面	コンクリート面
日 射 吸 収 率	0.85	0.75	0.65
放 射 率	1.0	1.0	1.0
蒸 発 比	0.1	0.3	0.0

(4) 桁行長 (F<sub>7</sub>), 梁間長 (F<sub>8</sub>) および軒高 (F<sub>9</sub>)

桁行長は大規模の畜舎では 100 m 近くのものがあり, また小規模の畜舎では 10 m に達しないものもある。これらの畜舎に対しても要因効果を推定するときの精度が低下しないように桁行長の水準は 10, 45, 80 m を設定した。

梁間長は, 鶏舎において見られる 3 m 前後から豚舎や牛舎で見られる 20 m 近くのものまでである。そこで, 梁間長は 3, 10, 17 m の 3 水準を設定した。

軒高は一般的には 2.5 m 程度のものが多いが, 防暑上 4 m 以上<sup>119)</sup>にする畜舎もある。そこで, 軒高の水準は 1.5, 3, 4.5 m を設定した。

(5) 桁行方位 (F<sub>10</sub>)

桁行方位は東-西, 南-北および南東-北西の 3 水準を設定した。

(6) 屋根勾配 (F<sub>11</sub>)

本分析では, 屋根勾配は屋根傾角で表すことにする。わが国の暖地・温暖地において夏季の太陽南中時における直達日射に対する法線面の水平傾角は約 20 度前後である。このことから屋根傾角は 20 度を中間値として 5, 20, 35 度を設定した。

以上の因子水準を表 5-3 にまとめて示す。

表 5-3 設定した因子水準

因 子	水 準		
	1	2	3
屋根の熱貫流抵抗 (F <sub>1</sub> ) (m <sup>2</sup> ·h·°C/kcal)	0.176	0.494	0.812
屋根外表面の日射吸収率 (F <sub>2</sub> )	0.2	0.55	0.9
屋根外表面の放射率 (F <sub>3</sub> )	0.2	0.55	0.9
屋根内表面の日射吸収率 (F <sub>4</sub> )	0.2	0.55	0.9
屋根内表面の放射率 (F <sub>5</sub> )	0.2	0.55	0.9
地表面の種類 (F <sub>6</sub> )	草地面	裸地面	コンクリート面
桁 行 長 (F <sub>7</sub> ) (m)	10.0	45.0	80.0
梁 間 長 (F <sub>8</sub> ) (m)	3.0	10.0	17.0
軒 高 (F <sub>9</sub> ) (m)	1.5	3.0	4.5
桁行方位 (F <sub>10</sub> )	東-西	南東-北西	南-北
屋根勾配 (F <sub>11</sub> ) (°)	5.0	20.0	35.0

屋根勾配は屋根傾角で表している。

5.2.3 放射熱量特性値

(1) 放射熱量シミュレーションの条件設定

要因分析のための特性値 (舎内放射熱量) を得るために, 直交配列表 L<sub>81</sub>(3<sup>40</sup>) に基づいた 81 通りの因子水準の組合せで, 舎内放射熱量のシミュレーションを付録-2 に示した電算機プログラムで行った。シミュレーションを行うために設定した条件は以下のとおりである。

対象場所は香川県高松市（全国酪農気候帯区分図<sup>88)</sup>における第3区（家畜管理上、冬季の寒さはほとんど問題ないが夏季の暑さが問題になる地域）のほぼ中央に位置する）とし、対象時期は8月7日とした。この地の緯度、経度は北緯34度21分、東経134度3分である<sup>109)</sup>。

気温の日変動は暑熱日を代表するものとして大阪での年間最高気温極値の出現日における時刻別気温統計値<sup>111)</sup>を採用した。絶対湿度は、日最低气温時に相対湿度が90%になると仮定して設定した。

風速は安全側を見込んで0m/sとした。したがって、屋根内外表面と地表面における熱や水蒸気の移動は自然対流として扱った。表5-4に、シミュレーションに用いた屋根内外表面の自然対流伝熱係数を屋根傾角別に表示

表 5-4 屋根内外表面の自然対流伝熱係数<sup>84)</sup>

屋根傾角 (°)	自然対流伝熱係数 (kcal/m <sup>2</sup> ・h・°C)	
	屋根外表面	屋根内表面
5	5.19	1.90
20	4.56	2.25
35	4.13	2.50

表 5-5 舎内放射熱量のシミュレーションに用いた気象条件

気象要因		日中(9~17時) の平均値
気温	(°C)	33.2
絶対湿度	(kg/kg')	0.018
風速	(m/s)	0
水平面全日射量	(kcal/m <sup>2</sup> ・h)	675
水平面大気放射量	(kcal/m <sup>2</sup> ・h)	371

絶対湿度と風速は24時間にわたり一定とする。

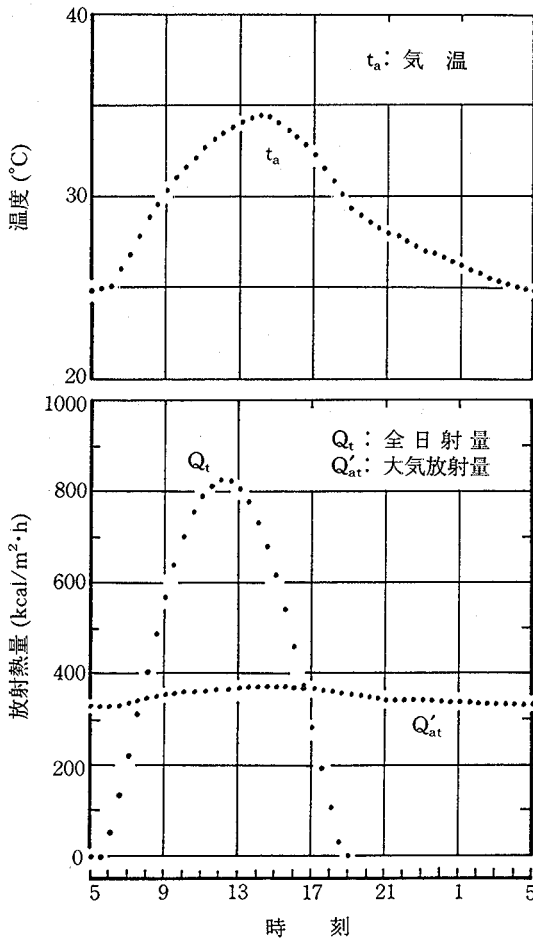


図 5-2 シミュレーションに用いた気温および計算された全日射量と大気放射量の日変動

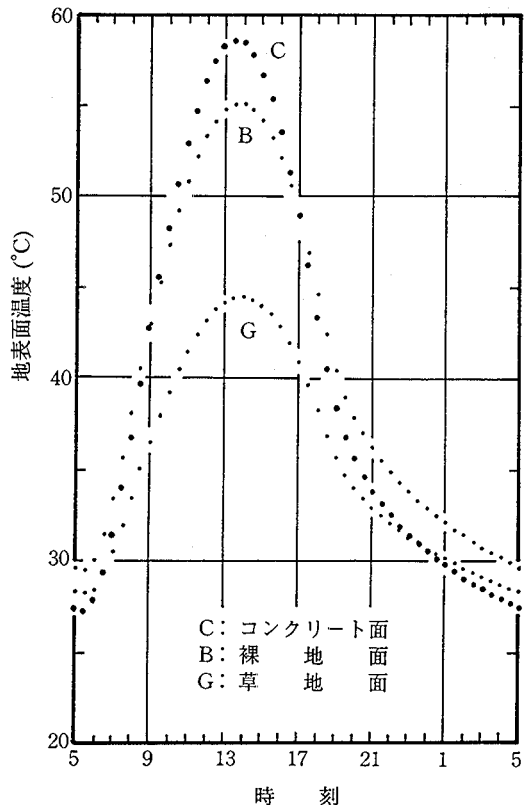


図 5-3 日向地表面温度の計算値

す。これらは、屋根外表面においては上向熱流の場合の値であり、屋根内表面においては下向熱流の場合の値である。地表面の自然対流伝熱係数は水平な粗面平板の値である  $5.3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}^{84)}$  を用いた。

畜舎周囲の地表層土壌は重量含水率が15%の砂質粘土とし、熱伝導比抵抗と容積比熱は表4-3に示した値とした。また、地温不易層(深さ50cm)の地中温度は  $25.0 \text{ °C}$  とした。これは設定した気温に近似した日の香川大学農学部構内における昭和52~56年の5年間の平均値である<sup>112)</sup>。地表面における水の気化潜熱は地表面温度が  $25 \sim 40 \text{ °C}$  の範囲を想定し、 $580 \text{ kcal/kg}^{106)}$  とした。

舎内放射熱量のシミュレーションに使用した気温、およびシミュレーションプログラム内で計算した全日射量と大気放射量の日変動を図5-2に示す。気温、全日射量および大気放射量の日最高値はそれぞれ  $34.5 \text{ °C}$ 、 $827 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  および  $377 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  である。また、9時から17時の日中における気象要因の平均値を表5-5に示す。

図5-3に草地、裸地、コンクリートにおける日向地表面温度の計算値を示す。これらの日最高温度はそれぞれ  $44.6$ 、 $55.1$ 、 $58.6 \text{ °C}$  である。なお、日陰地表面温度は、日陰地表面の天空に対する形態係数が畜舎の諸元により異なるため同じ種類の地表面でも畜舎により異なることを付記する。

(2) 要因分析に供する特性値

第1章において述べたように、従来の研究によれば気温が  $24 \sim 27 \text{ °C}$  以上になると家畜の生産性は低下し始める<sup>8)</sup>と言われている。また、第3章の3.2節では、気温が  $30 \text{ °C}$  の環境において豚体に入射する放射熱の積算量が  $190 \sim 220 \text{ kcal/m}^2$  以上になると、肥育豚の呼吸数と直腸温度がそれぞれ増加および上昇し始めることが明らかになった。これらのことを踏まえ、要因分析対象の時間帯は気温が  $30 \text{ °C}$  以上で、かつ舎外の水平面全日射量が  $200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以上である9時から17時とし、この時間帯における舎内放射熱量の平均値を要因分析に供した。平均値はシンプソン(Simpson)法<sup>120)</sup>による積分値を時間帯で除して求めた。

9時から17時における平均値を要因分析に供することとは、算定方法が周期的非定常伝熱現象であることの意味合いを弱めると考えられるので、さらにこの時間帯の最大値も分析に供した。

舎内の放射熱量は同一の畜舎においても位置により異なるが、特性値としては床面上1.0mにおける放射熱量とした。床面から1.0mの高さは、成牛においては体高の約3/4に、成豚においては体高より約10~30cm高い位置にそれぞれ相当し<sup>121)</sup>、雛2段ケージ方式の鶏舎においては床面から上段側のケージ床部までの高さである<sup>115)</sup>。また、放射熱受射面である微小水平面の屋根内表面に対する形態係数が最大になる位置は舎内中央近傍であることから、舎内中央における放射熱量を特性値とした。

以上に述べた要因分析に供する特性値は、以後においては表5-6に示すように呼称する。

シミュレーションによって求めた4種類の特性値を図5-4から図5-7に示す。図には特性値の最大値、最小値、平均値、標準偏差および変動係数も示してある。特性値1と特性値2の変動係数が大きいのは微小水平面に到達する直達日射の有無によるためである。

表5-6 要因分析に供する特性値

呼 称	特 性 値
特性値 1	舎内中央の床面上1.0mに位置する微小水平面に下向きに入射する短波長放射熱量の9時~17時の平均値
特性値 2	舎内中央の床面上1.0mに位置する微小水平面に下向きに入射する短波長放射熱量の9時~17時の最大値
特性値 3	舎内中央の床面上1.0mに位置する微小水平面に下向きに入射する長波長放射熱量の9時~17時の平均値
特性値 4	舎内中央の床面上1.0mに位置する微小水平面に下向きに入射する長波長放射熱量の9時~17時の最大値

舎内中央とは桁行長と梁間長との中央である。

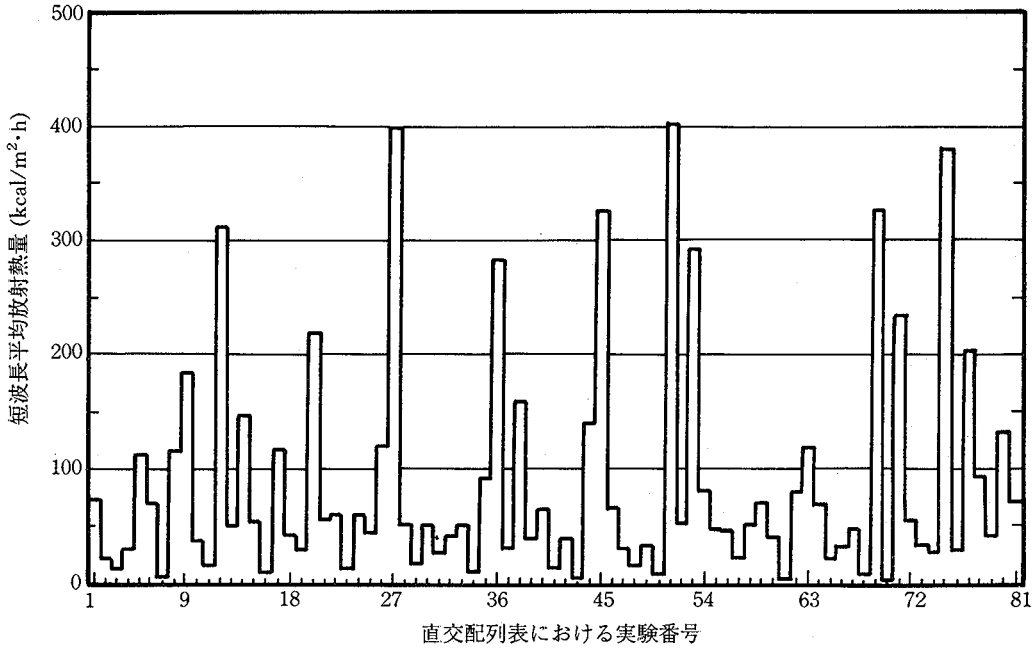


図 5-4 直交配列表  $L_{81}(3^{40})$  の因子水準組合せに基づく数値シミュレーションから得られた室内短波長平均放射熱量 (特性値 1)

最大値:  $403 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  (No. 51)    最小値:  $3.7 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  (No. 70)  
 平均値:  $88.1 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$                       標準偏差:  $98.8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$   
 変動係数: 112%

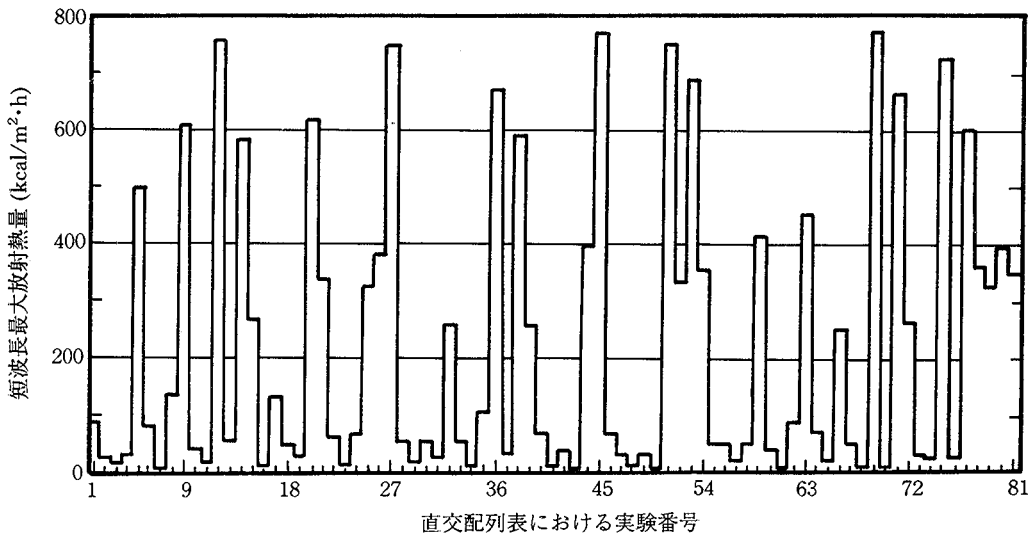


図 5-5 直交配列表  $L_{81}(3^{40})$  の因子水準組合せに基づく数値シミュレーションから得られた室内短波長最大放射熱量 (特性値 2)

最大値:  $779 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  (No. 69)    最小値:  $4.2 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  (No. 70)  
 平均値:  $223 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$                       標準偏差:  $252 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$   
 変動係数: 113%

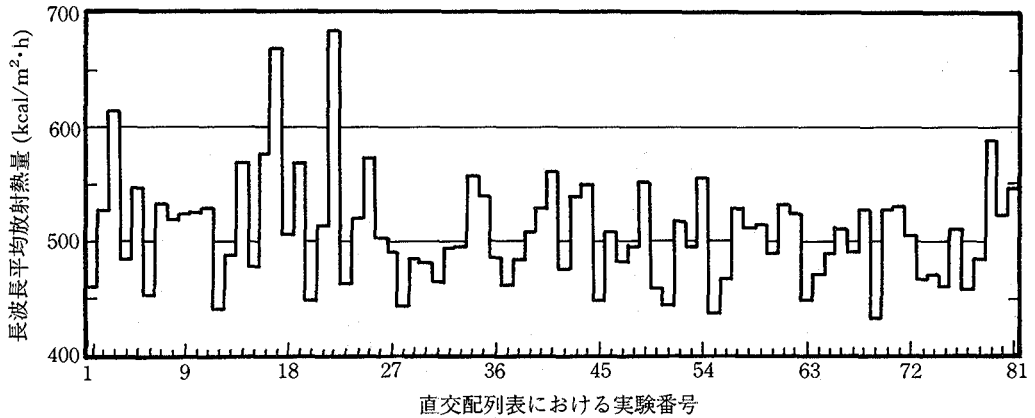


図 5-6 直交配列表  $L_{81}(3^{40})$  の因子水準組合せに基づく数値シミュレーションから得られた室内長波長平均放射熱量 (特性値 3)

最大値: 685 kcal/m<sup>2</sup>·h (No. 22)    最小値: 433 kcal/m<sup>2</sup>·h (No. 69)  
 平均値: 508 kcal/m<sup>2</sup>·h                      標準偏差: 47.4 kcal/m<sup>2</sup>·h  
 変動係数: 9.3%

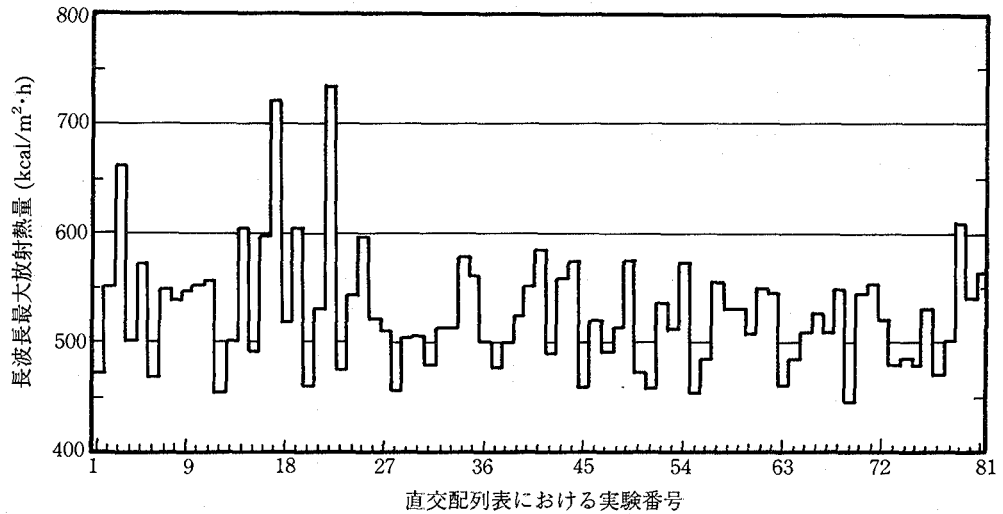


図 5-7 直交配列表  $L_{81}(3^{40})$  の因子水準組合せに基づく数値シミュレーションから得られた室内長波長最大放射熱量 (特性値 4)

最大値: 734 kcal/m<sup>2</sup>·h (No. 22)    最小値: 445 kcal/m<sup>2</sup>·h (No. 69)  
 平均値: 528 kcal/m<sup>2</sup>·h                      標準偏差: 54.3 kcal/m<sup>2</sup>·h  
 変動係数: 10.3%

### 5.3 分析結果および考察

#### 5.3.1 放射熱量に対する要因効果

##### (1) 短波長平均放射熱量 (特性値 1) に対する要因効果

特性値 1 の全変動に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位を表 5-7 に示す。

表 5-7 から、有意な要因変動は梁間長 ( $F_8$ )、軒高 ( $F_9$ )、桁行方位 ( $F_{10}$ )、屋根勾配 ( $F_{11}$ )、屋根内表面の日射吸収率 ( $F_1$ )、桁行長 ( $F_7$ )、地表面の種類 ( $F_6$ ) の主効果および梁間長と軒高との交互作用 ( $F_8 \times F_9$ ) である。特性値 1 に



おける全変動の67.6%はこれらの要因変動によるものであり、特に全変動の53.7%は梁間長と軒高によるものである。また、寄与率の順位は梁間長と軒高の主効果およびこれらの交互作用が上位であり、第4位である桁行方位の寄与率は上位の寄与率にくらべて著しく小さい。

特性値1に対する要因効果推定値を表5-8に示す。

(2) 短波長最大放射熱量(特性値2)に対する要因効果

特性値2の全変動に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位を表5-9に示す。

表5-7 日中(9~17時)の短波長平均放射熱量に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位

要因変動	寄与率(%)	順位	備考(有意水準)
F <sub>8</sub>	26.0	1	**
F <sub>9</sub>	16.1	2	**
F <sub>10</sub>	3.6	4	**
F <sub>11</sub>	3.2	5	**
F <sub>4</sub>	3.2	5	**
F <sub>7</sub>	2.4	7	**
F <sub>6</sub>	1.5	8	**
F <sub>8</sub> ×F <sub>9</sub>	11.6	3	**

\*\* : 1%水準で有意 F<sub>4</sub>~F<sub>11</sub> : 表5-3に同じ

表5-8 短波長平均放射熱量に対する要因効果推定値

要因効果	因子水準			要因効果推定値(kcal/m <sup>2</sup> ·h)		
	1	2	3	水準1	水準2	水準3
F <sub>4</sub>	0.2	0.55	0.9	107.7 <sub>a</sub>	93.3 <sub>a</sub>	63.3 <sub>b</sub>
F <sub>6</sub>	草地	裸地	コンク	97.2 <sub>a</sub>	69.2 <sub>b</sub>	97.9 <sub>a</sub>
F <sub>7</sub>	10.0	45.0	80.0	111.0 <sub>a</sub>	78.4 <sub>b</sub>	75.1 <sub>b</sub>
F <sub>8</sub>	3.0	10.0	17.0	159.3 <sub>a</sub>	53.2 <sub>b</sub>	51.9 <sub>b</sub>
F <sub>9</sub>	1.5	3.0	4.5	37.2 <sub>a</sub>	92.9 <sub>b</sub>	134.3 <sub>c</sub>
F <sub>10</sub>	東-西	南東-北西	南-北	63.9 <sub>a</sub>	89.0 <sub>b</sub>	111.4 <sub>c</sub>
F <sub>11</sub>	5.0	20.0	35.0	71.1 <sub>a</sub>	79.4 <sub>a</sub>	113.9 <sub>b</sub>
	3.0					
	1.5	3.0	4.5	49.4 <sub>ab</sub>	163.0 <sub>c</sub>	265.6 <sub>d</sub>
F <sub>8</sub> ×F <sub>9</sub>	10.0					
	1.5	3.0	4.5	31.9 <sub>ab</sub>	56.8 <sub>ab</sub>	70.7 <sub>b</sub>
	17.0					
	1.5	3.0	4.5	30.2 <sub>a</sub>	59.0 <sub>ab</sub>	66.4 <sub>ab</sub>

- 1) F<sub>4</sub>~F<sub>11</sub> : 表5-3に同じ コンク : コンクリート面
- 2) 各要因効果の要因効果推定値間において、下添字が異なるのは5%水準で有意差があることを表す。
- 3) 要因効果推定値の95%信頼限界は主効果で±14.0 kcal/m<sup>2</sup>·h, 交互作用で±24.2 kcal/m<sup>2</sup>·hである。

表5-9から、有意な要因変動は軒高(F<sub>9</sub>)、梁間長(F<sub>8</sub>)、桁行長(F<sub>7</sub>)、屋根勾配(F<sub>11</sub>)、桁行方位(F<sub>10</sub>)、地表面の種類(F<sub>6</sub>)の主効果および梁間長と軒高(F<sub>8</sub>×F<sub>9</sub>)、桁行方位と屋根勾配(F<sub>10</sub>×F<sub>11</sub>)の交互作用である。特性値2における全変動の67.4%はこれらの要因変動によるものであり、特に全変動の45.9%は軒高と梁間長によるものである。また、寄与率の順位は軒高、梁間長の順に高い。

特性値2に対する分析結果が特性値1に対する結果と大きく異なる点は ①屋根内表面の日射吸収率の主効果が有意にならないこと、②桁行方位と屋根勾配との

表5-9 日中の短波長最大放射熱量に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位

要因変動	寄与率(%)	順位	備考(有意水準)
F <sub>9</sub>	19.6	1	**
F <sub>8</sub>	18.4	2	**
F <sub>7</sub>	7.2	4	**
F <sub>11</sub>	5.9	5	**
F <sub>10</sub>	4.9	6	**
F <sub>6</sub>	1.4	8	*
F <sub>8</sub> ×F <sub>9</sub>	7.9	3	**
F <sub>10</sub> ×F <sub>11</sub>	2.1	7	*

\*, \*\*: 5%, 1%水準で有意 F<sub>6</sub>~F<sub>11</sub> : 表5-3に同じ

表 5-10 短波長最大放射熱量に対する要因効果推定値

要因効果	因子水準			要因効果推定値 (kcal/m <sup>2</sup> ・h)		
	1	2	3	水準1	水準2	水準3
$\overline{F_6}$	草地面	裸地面	コンク	267.0 <sub>a</sub>	182.6 <sub>b</sub>	219.5 <sub>ab</sub>
$\overline{F_7}$	10.0	45.0	80.0	320.8 <sub>a</sub>	180.2 <sub>b</sub>	168.2 <sub>b</sub>
$\overline{F_8}$	3.0	10.0	17.0	376.1 <sub>a</sub>	160.8 <sub>b</sub>	132.3 <sub>b</sub>
$\overline{F_9}$	1.5	3.0	4.5	72.7 <sub>a</sub>	254.5 <sub>b</sub>	342.0 <sub>c</sub>
$\overline{F_{10}}$	東-西	南東-北西	南-北	147.8 <sub>a</sub>	232.1 <sub>b</sub>	289.4 <sub>b</sub>
$\overline{F_{11}}$	5.0	20.0	35.0	162.0 <sub>a</sub>	197.2 <sub>a</sub>	310.0 <sub>b</sub>
	3.0					
	1.5	3.0	4.5	86.4 <sub>a</sub>	469.9 <sub>c</sub>	572.0 <sub>c</sub>
$\overline{F_8 \times F_9}$	10.0					
	1.5	3.0	4.5	66.9 <sub>a</sub>	130.6 <sub>a</sub>	284.7 <sub>b</sub>
	17.0					
	1.5	3.0	4.5	64.7 <sub>a</sub>	163.0 <sub>a</sub>	169.3 <sub>a</sub>
	東-西					
	5.0	20.0	35.0	43.7 <sub>a</sub>	165.5 <sub>ab</sub>	234.1 <sub>b</sub>
$\overline{F_{10} \times F_{11}}$	南東-北西					
	5.0	20.0	35.0	229.7 <sub>b</sub>	208.9 <sub>b</sub>	257.5 <sub>b</sub>
	南-北					
	5.0	20.0	35.0	212.6 <sub>b</sub>	217.1 <sub>b</sub>	438.4 <sub>c</sub>

- 1)  $F_6 \sim F_{11}$ : 表 5-3 に同じ コンク: コンクリート面
- 2) 各要因効果の要因効果推定値間において, 下添字が異なるのは 5%水準で有意差があることを表す。
- 3) 要因効果推定値の95%信頼限界は主効果で  $\pm 43.0$  kcal/m<sup>2</sup>・h, 交互作用で  $\pm 74.6$  kcal/m<sup>2</sup>・h である。

交互作用が有意になること, ③桁行長の主効果の寄与率が4番目に大きいことである。このような相違は, 特性値2の変動が微小水平面に入射する直達日射量に強く影響されているためと考えられる。

特性値2に対する要因効果推定値を表5-10に示す。

(3) 長波長平均放射熱量(特性値3)に対する要因効果

特性値3の全変動に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位を表5-11に示す。

表5-11から, 有意な要因変動は桁行長( $F_7$ )を除いたすべての主効果, 梁間長と軒高( $F_8 \times F_9$ )との交互作用および屋根の熱貫流抵抗とそれぞれ屋根外表面の日射吸収率( $F_1 \times F_2$ ), 屋根内表面の放射率( $F_1 \times F_5$ ), 梁間長( $F_1 \times F_8$ )との交互作用である。特性値3における全変動の89.6%はこれらの要因変動によるものである。

寄与率は, 屋根外表面の日射吸収率の主効果( $F_2$ )が19.4%と1番大きく, 次いで梁間長と軒高の交互作用( $F_8 \times F_9$ )が15.5%, 屋根勾配の主効果( $F_{11}$ )が

表 5-11 日中(9~17時)の長波長平均放射熱量に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位

要因変動	寄与率 (%)	順位	備考 (有意水準)
$F_2$	19.4	1	**
$F_{11}$	11.3	3	**
$F_1$	6.9	5	**
$F_5$	5.8	6	**
$F_6$	5.0	7	**
$F_9$	4.6	8	**
$F_4$	4.1	9	**
$F_8$	2.5	10	**
$F_3$	2.4	11	**
$F_{10}$	0.6	14	*
$F_8 \times F_9$	15.5	2	**
$F_1 \times F_2$	7.9	4	**
$F_1 \times F_5$	2.0	12	**
$F_1 \times F_8$	1.6	13	**

\*, \*\*: 5%, 1%水準で有意  
 $F_1 \sim F_{11}$ : 表 5-3 に同じ

11.3%である。これら3種類の要因変動だけで、全変動の46.2%が説明できる。

屋根の熱貫流抵抗が関係する4種類の要因変動 ( $F_1, F_1 \times F_2, F_1 \times F_3, F_1 \times F_8$ ) における寄与率の合計は18.4%であり、この合計は有意を示したすべての要因変動における寄与率の合計89.6%の約5分の1にすぎない。このことは、開放型畜舎内の長波長放射熱量が屋根の熱貫流抵抗だけでは評価できないことを意味している。

特性値3に対する要因効果推定値を表5-12に示す。

表5-12 長波長平均放射熱量に対する要因効果推定値

要 因 果	因 子 水 準			要因効果推定値 (kcal/m <sup>2</sup> ·h)		
	1	2	3	水準1	水準2	水準3
$F_1$	0.176	0.494	0.812	526.0 <sub>a</sub>	500.3 <sub>b</sub>	498.5 <sub>b</sub>
$F_2$	0.2	0.55	0.9	482.3 <sub>a</sub>	509.2 <sub>b</sub>	533.4 <sub>c</sub>
$F_3$	0.2	0.55	0.9	512.8 <sub>a</sub>	514.5 <sub>a</sub>	497.5 <sub>b</sub>
$F_4$	0.2	0.55	0.9	499.0 <sub>a</sub>	504.0 <sub>a</sub>	521.8 <sub>b</sub>
$F_5$	0.2	0.55	0.9	495.1 <sub>a</sub>	506.4 <sub>b</sub>	523.3 <sub>c</sub>
$F_6$	草地面	裸地面	コンク	497.9 <sub>a</sub>	503.7 <sub>a</sub>	523.2 <sub>b</sub>
$F_8$	3.0	10.0	17.0	498.3 <sub>a</sub>	517.1 <sub>b</sub>	509.5 <sub>b</sub>
$F_9$	1.5	3.0	4.5	518.6 <sub>a</sub>	512.2 <sub>a</sub>	494.1 <sub>b</sub>
$F_{10}$	東-西	南東-北西	南-北	502.4 <sub>a</sub>	512.1 <sub>b</sub>	510.4 <sub>ab</sub>
$F_{11}$	5.0	20.0	35.0	491.8 <sub>a</sub>	503.1 <sub>b</sub>	530.0 <sub>c</sub>
	0.176					
	0.2	0.55	0.9	479.2 <sub>a</sub>	522.8 <sub>d</sub>	576.0 <sub>e</sub>
$\overline{F_1 \times F_2}$	0.494					
	0.2	0.55	0.9	480.6 <sub>a</sub>	505.3 <sub>c</sub>	515.0 <sub>cd</sub>
	0.812					
	0.2	0.55	0.9	487.2 <sub>ab</sub>	499.4 <sub>bc</sub>	509.0 <sub>cd</sub>
	0.176					
	0.2	0.55	0.9	500.7 <sub>ab</sub>	523.5 <sub>c</sub>	553.8 <sub>d</sub>
$\overline{F_1 \times F_3}$	0.494					
	0.2	0.55	0.9	490.2 <sub>a</sub>	499.1 <sub>ab</sub>	511.6 <sub>bc</sub>
	0.812					
	0.2	0.55	0.9	494.3 <sub>a</sub>	496.8 <sub>ab</sub>	504.5 <sub>ab</sub>
	0.176					
	3.0	10.0	17.0	515.5 <sub>de</sub>	528.2 <sub>ef</sub>	534.3 <sub>f</sub>
$\overline{F_1 \times F_8}$	0.494					
	3.0	10.0	17.0	493.5 <sub>abc</sub>	518.8 <sub>de</sub>	488.6 <sub>ab</sub>
	0.812					
	3.0	10.0	17.0	485.8 <sub>a</sub>	504.2 <sub>bcd</sub>	505.6 <sub>cd</sub>
	3.0					
	1.5	3.0	4.5	543.0 <sub>e</sub>	496.3 <sub>b</sub>	455.6 <sub>a</sub>
$\overline{F_3 \times F_9}$	10.0					
	1.5	3.0	4.5	511.9 <sub>bc</sub>	529.1 <sub>de</sub>	510.2 <sub>bc</sub>
	17.0					
	1.5	3.0	4.5	500.9 <sub>bc</sub>	511.2 <sub>bc</sub>	516.4 <sub>cd</sub>

- 1)  $F_1 \sim F_{11}$ : 表5-3に同じ コンク:コンクリート面
- 2) 各要因効果の要因効果推定値間において、下添字が異なるのは5%水準で有意差があることを表す。
- 3) 要因効果推定値の95%信頼限界は主効果で $\pm 5.7$  kcal/m<sup>2</sup>·h、交互作用で $\pm 9.9$  kcal/m<sup>2</sup>·hである。

(4) 長波長最大放射熱量 (特性値 4) に対する要因効果

特性値 4 の全変動に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位を表 5-13 に示す。特性値 4 に対する分析結果が特性値 3 に対する結果と異なる点は、桁行方位の主効果 (F<sub>10</sub>) が有意でないことである。特性値 4 における全変動の 88.6% は表 5-13 に示した 13 個の要因変動によるものである。特に、屋根外表面日射吸収率の主効果 (F<sub>2</sub>) の寄与率は 20.7% と一番大きく、次いで梁間長と軒高との交互作用 (F<sub>8</sub>×F<sub>9</sub>) の寄与率が 13.7% と大きい。

特性値 4 に対する要因効果推定値を表 5-14 に示す。

5.3.2 放射熱量の予測式

(1) 短波長平均放射熱量 (特性値 1) の予測式

表 5-7 に示した有意な要因変動に基づき、特性値 1 の予測式を導くと次式のようになる。

$$Q_{mn} = [\overline{F_{4,n4}} + \overline{F_{6,n6}} + \overline{F_{7,n7}} + \overline{F_{10,n10}} + \overline{F_{11,n11}} + \overline{F_{8,n8}} \times \overline{F_{9,n9}} - 440.6] \pm 35.2 \quad (5-4)$$

特性値 1 は、表 5-8 に示した要因効果推定値を (5-4) 式に代入することにより容易に推定できる。なお、表 5-8 に示されていない因子水準の要因効果推定値は補間法で求めればよい。

〈計算例〉

以下に示す条件の畜舎における特性値 1 の予測値を求める。

屋根内表面の日射吸収率 (F<sub>4</sub>): 0.2

地表面の種類 (F<sub>6</sub>): 草地

桁行長 (F<sub>7</sub>): 10.0 m

梁間長 (F<sub>8</sub>): 3.0 m

軒高 (F<sub>9</sub>): 1.5 m

桁行方位 (F<sub>10</sub>): 東-西

屋根勾配 (屋根傾角) (F<sub>11</sub>): 5.0°

これらの因子水準の組合せは図 5-4 中の No. 1 と同じである。表 5-8 から要因効果推定値は次のとおりである。

$$\overline{F_{4,1}} = 107.7$$

$$\overline{F_{6,1}} = 97.2$$

$$\overline{F_{7,1}} = 111.0$$

$$\overline{F_{10,1}} = 63.9$$

$$\overline{F_{11,1}} = 71.1$$

$$\overline{F_{8,1} \times F_{9,1}} = 49.4$$

したがって、この畜舎における特性値 1 の予測値は (5-4) 式から

$$Q_{mn} = [107.7 + 97.2 + 111.0 + 63.9 + 71.1 + 49.4 - 440.6] \pm 35.2 = 59.7 \pm 35.2 \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h})$$

表 5-13 日中の長波長最大放射熱量に対して有意を示した要因変動の寄与率とその順位

要因変動	寄与率 (%)	順位	備考 (有意水準)
F <sub>2</sub>	20.7	1	**
F <sub>11</sub>	8.7	4	**
F <sub>1</sub>	8.3	5	**
F <sub>5</sub>	6.4	6	**
F <sub>6</sub>	5.6	7	**
F <sub>9</sub>	4.2	8	**
F <sub>4</sub>	3.6	9	**
F <sub>3</sub>	2.2	11	**
F <sub>8</sub>	2.1	12	**
F <sub>8</sub> ×F <sub>9</sub>	13.7	2	**
F <sub>1</sub> ×F <sub>2</sub>	9.1	3	**
F <sub>1</sub> ×F <sub>5</sub>	2.6	10	**
F <sub>1</sub> ×F <sub>8</sub>	1.4	13	*

\*, \*\*: 5%, 1%水準で有意

F<sub>1</sub>~F<sub>11</sub>: 表 5-3 に同じ

表 5-14 長波長最大放射熱量に対する要因効果推定値

要因効果	因子水準			要因効果推定値 (kcal/m <sup>2</sup> ·h)		
	1	2	3	水準1	水準2	水準3
$\overline{F_1}$	0.176	0.494	0.812	549.8 <sub>a</sub>	517.8 <sub>b</sub>	515.1 <sub>b</sub>
$\overline{F_2}$	0.2	0.55	0.9	497.1 <sub>a</sub>	527.9 <sub>b</sub>	557.7 <sub>c</sub>
$\overline{F_3}$	0.2	0.55	0.9	533.2 <sub>a</sub>	534.0 <sub>a</sub>	515.6 <sub>b</sub>
$\overline{F_4}$	0.2	0.55	0.9	517.8 <sub>a</sub>	522.5 <sub>a</sub>	542.4 <sub>b</sub>
$\overline{F_5}$	0.2	0.55	0.9	511.7 <sub>a</sub>	525.4 <sub>b</sub>	545.7 <sub>c</sub>
$\overline{F_6}$	草地面	裸地面	コンク	515.6 <sub>a</sub>	521.5 <sub>a</sub>	545.7 <sub>b</sub>
$\overline{F_8}$	3.0	10.0	17.0	516.9 <sub>a</sub>	536.9 <sub>b</sub>	528.9 <sub>b</sub>
$\overline{F_9}$	1.5	3.0	4.5	538.2 <sub>a</sub>	532.7 <sub>a</sub>	511.8 <sub>b</sub>
$\overline{F_{11}}$	5.0	20.0	35.0	511.0 <sub>a</sub>	522.3 <sub>b</sub>	549.4 <sub>c</sub>
	0.176					
	0.2	0.55	0.9	493.7 <sub>a</sub>	545.0 <sub>e</sub>	610.7 <sub>f</sub>
$\overline{F_1 \times F_2}$	0.494					
	0.2	0.55	0.9	495.6 <sub>a</sub>	523.1 <sub>cd</sub>	534.6 <sub>de</sub>
	0.812					
	0.2	0.55	0.9	502.2 <sub>ab</sub>	515.5 <sub>bc</sub>	527.8 <sub>cde</sub>
	0.176					
	0.2	0.55	0.9	517.7 <sub>ab</sub>	547.6 <sub>c</sub>	584.1 <sub>d</sub>
$\overline{F_1 \times F_5}$	0.494					
	0.2	0.55	0.9	506.9 <sub>a</sub>	515.8 <sub>ab</sub>	530.7 <sub>bc</sub>
	0.812					
	0.2	0.55	0.9	510.5 <sub>a</sub>	512.7 <sub>ab</sub>	522.2 <sub>ab</sub>
	0.176					
	3.0	10.0	17.0	538.1 <sub>cd</sub>	552.1 <sub>de</sub>	559.3 <sub>e</sub>
$\overline{F_1 \times F_8}$	0.494					
	3.0	10.0	17.0	511.1 <sub>ab</sub>	537.3 <sub>cd</sub>	504.9 <sub>ab</sub>
	0.812					
	3.0	10.0	17.0	501.6 <sub>a</sub>	521.3 <sub>bc</sub>	522.6 <sub>bc</sub>
	3.0					
	1.5	3.0	4.5	564.4 <sub>e</sub>	515.7 <sub>b</sub>	470.7 <sub>a</sub>
$\overline{F_8 \times F_9}$	10.0					
	1.5	3.0	4.5	530.5 <sub>bc</sub>	551.7 <sub>de</sub>	528.4 <sub>bc</sub>
	17.0					
	1.5	3.0	4.5	519.6 <sub>bc</sub>	530.7 <sub>bc</sub>	536.4 <sub>cd</sub>

- 1)  $F_1 \sim F_{11}$ : 表 5-3 に同じ コンク:コンクリート面
- 2) 各要因効果の要因効果推定値間において, 下添字が異なるのは 5%水準で有意差があることを表す。
- 3) 要因効果推定値の95%信頼限界は主効果で  $\pm 6.7$  kcal/m<sup>2</sup>·h, 交互作用で  $\pm 11.7$  kcal/m<sup>2</sup>·h である。

となる。No. 1 の特性値 1 は図 5-4 から 73.3 kcal/m<sup>2</sup>·h であり, この値は信頼率 95% の予測域内にある。

特性値 1 を最小にする因子水準の組合せは, (5-4)式と表 5-8 から予測できる。すなわち, 特性値 1 の値が最小になるように, (5-4)式中の要因効果推定値を要因変動の寄与率の大きい順に決定していけばよい。このようにして決定した要因効果推定値に対応する因子水準を表 5-15 に示す。表 5-15 に示す因子水準に基づいて特性値 1 を求めると, 信頼率 95% で 15.2 kcal/m<sup>2</sup>·h 以下となる。なお, 表 5-15 に示したすべての因子水準が同時

表 5-15 短波長平均放射熱量を最小にする因子水準

因 子	水 準
屋根内表面の日射吸収率 (F <sub>4</sub> )	0.9
地表面の種類 (F <sub>6</sub> )	裸地面
桁行長 (F <sub>7</sub> ) (m)	45.0 80.0
梁間長 (F <sub>8</sub> ) (m)	
軒高 (F <sub>9</sub> ) が 1.5m のとき	3.0 10.0 17.0
軒高が 3.0m のとき	10.0 17.0
軒高が 4.5m のとき	17.0
桁行方位 (F <sub>10</sub> )	東-西
屋根勾配 (F <sub>11</sub> ) (°)	5.0 20.0

- 1) 水準が 2 種類以上示されている因子においては、それらの水準における要因効果推定値間に 5% 水準で有意差がない。
- 2) 表に示した以外の因子の水準は任意である。
- 3) 屋根勾配は屋根傾角で表している。

表 5-16 短波長最大放射熱量を最小にする因子水準

因 子	水 準
地表面の種類 (F <sub>6</sub> )	裸地面 コンクリート面
桁行長 (F <sub>7</sub> ) (m)	45.0 80.0
梁間長 (F <sub>8</sub> ) (m)	
軒高 (F <sub>9</sub> ) が 1.5m のとき	3.0 10.0 17.0
軒高が 3.0m のとき	10.0 17.0
軒高が 4.5m のとき	17.0
桁行方位 (F <sub>10</sub> )	東-西
屋根勾配 (F <sub>11</sub> ) (°)	5.0 20.0

- 1) 水準が 2 種類以上示されている因子においては、それらの水準における要因効果推定値間に 5% 水準で有意差がない。
- 2) 表に示した以外の因子の水準は任意である。
- 3) 屋根勾配は屋根傾角で表している。

に実現不可能な場合には、表 5-7 に示した寄与率の順位に従って水準の実現を計って行く必要がある。

(2) 短波長最大放射熱量 (特性値 2) の予測式

表 5-9 に示した有意な要因変動に基づき、特性値 2 の予測式を導くと次式のようなになる。

$$Q_{mx} = [\overline{F_{6,n6}} + \overline{F_{7,n7}} + \overline{F_{8,n8}} \times \overline{F_{9,n9}} + \overline{F_{10,n10}} \times \overline{F_{11,n11}} - 669.2] \pm 113.9 \quad (5-5)$$

特性値 2 は、表 5-10 に示した要因効果推定値を(5-5)式に代入することにより容易に推定できる。

特性値 1 の場合と同様な方法で、(5-5)式と表 5-10 から特性値 2 を最小にする因子水準を求めた結果を表 5-16 に示す。表 5-16 に示す因子水準のとき、特性値 2 は信頼率 95% で 179 kcal/m<sup>2</sup>・h 以下となる。なお、表 5-16 に示したすべての因子水準が同時に実現不可能な場合には、表 5-9 に示した寄与率の順位に従って水準の実現を計って行く必要がある。

(3) 長波長平均放射熱量 (特性値 3) の予測式

表 5-11 に示した有意な要因変動に基づき、特性値 3 の予測式を導くと次式のようなになる。

$$Q'_{mn} = [-2\overline{F_{1,n1}} + \overline{F_{3,n3}} + \overline{F_{4,n4}} + \overline{F_{6,n6}} - \overline{F_{8,n8}} + \overline{F_{10,n10}} + \overline{F_{11,n11}} + \overline{F_{1,n1}} \times \overline{F_{2,n2}} + \overline{F_{1,n1}} \times \overline{F_{5,n5}} + \overline{F_{1,n1}} \times \overline{F_{8,n8}} + \overline{F_{8,n8}} \times \overline{F_{9,n9}} - 2541.4] \pm 20.1 \quad (5-6)$$

特性値 3 は、表 5-12 に示した要因効果推定値を(5-6)式に代入することにより容易に推定できる。

特性値 1 の場合と同様な方法で、(5-6)式と表 5-12 から特性値 3 を最小にする因子水準の組合せを求めることができる。表 5-11 に示したように、特性値 3 に 1 番大きな影響を及ぼす因子は屋根外表面の日射吸収率 (F<sub>2</sub>) であることから、ここでは特性値 3 を最小にする因子水準の組合せを屋根外表面日射吸収率の水準別に求めた。

屋根外表面の日射吸収率が 0.2 の場合の因子水準の組合せを表 5-17 に示す。表 5-17 に示した因子水準に基づいて特性値 3 を求めると、信頼率 95% で 367 ± 20 kcal/m<sup>2</sup>・h 以下となる。なお、表 5-17 に示したすべての因子水準が同時に実現不可能な場合には、表 5-11 に示した寄与率の順位に従って水準の実現を計って行く必要がある。

表 5-17 から、日中の舍内長波長放射熱量を抑制する観点からは、屋根外表面の日射吸収率が 0.2 と小さければ亜鉛鉄板屋根に断熱材を用いる必要がないと言える。

屋根外表面の日射吸収率が0.55の場合と0.9の場合においては、特性値3を最小にする因子水準の組合せは同じであり、この組合せを表5-18に示す。表5-18に示した因子水準に基づいて特性値3を求めると、屋根外表面の日射吸収率が0.55の場合には430±20 kcal/m<sup>2</sup>・h以下（信頼率95%）となり、日射吸収率が0.9の場合には439±20 kcal/m<sup>2</sup>・h以下（信頼率95%）となる。なお、表5-18に示したすべての因子水準が同時に実現不可能な場合には、寄与率の順位（表5-11）に従って水準の実現を計っていく必要がある。

表5-17と表5-18から、特性値3を最小にするためには、屋根外表面の日射吸収率が大きくなれば屋根の熱貫流抵抗を大きくしなければならぬことがわかる。ただし、屋根の熱貫流抵抗が特性値3に影響しない屋根外表面日射吸収率の上限値は、表5-12に示した要因効果推定値(F<sub>1</sub>×F<sub>2</sub>)から求めると約0.3である。また、屋根の熱貫流抵抗が大きくなると屋根内表面の放射率は特性値3に影響しなくなると言える。

表5-18 長波長平均放射熱量を最小にする因子水準（屋根外表面の日射吸収率（F<sub>2</sub>）が0.55の場合および0.9の場合）

因 子	水 準	
屋根の熱貫流抵抗 (F <sub>1</sub> ) (m <sup>2</sup> ・h・°C/kcal)	0.494	0.812
屋根外表面の放射率 (F <sub>3</sub> )	0.9	
屋根内表面の日射吸収率 (F <sub>4</sub> )	0.2	0.55
屋根内表面の放射率 (F <sub>6</sub> )	0.2	
屋根の熱貫流抵抗が0.494 m <sup>2</sup> ・h・°C/kcalのとき	0.2	0.55
屋根の熱貫流抵抗が0.812 m <sup>2</sup> ・h・°C/kcalのとき	0.2	0.55 0.9
地表面の種類 (F <sub>8</sub> )	草地	裸地面
梁間長 (F <sub>9</sub> ) (m)	3.0	
軒高 (F <sub>9</sub> ) (m)	4.5	
桁行方位 (F <sub>10</sub> )	東-西	南-北
屋根勾配 (F <sub>11</sub> ) (°)	5.0	

- 1) 水準が2種類以上示されている因子においては、それらの水準における要因効果推定値間に5%水準で有意差がない。
- 2) 表に示した以外の因子の水準は任意である。
- 3) 屋根勾配は屋根傾角で表している。

(4) 長波長最大放射熱量（特性値4）の予測式

表5-13に示した有意な要因変動に基づき、特性値4の予測式を導くと次式のようになる。

$$Q_{mx} = [-2\overline{F_{1,n1}} + \overline{F_{3,n3}} + \overline{F_{4,n4}} + \overline{F_{6,n6}} - \overline{F_{8,n8}} + \overline{F_{11,n11}} + \overline{F_{1,n1}} \times \overline{F_{2,n2}} + \overline{F_{1,n1}} \times \overline{F_{5,n5}} + \overline{F_{1,n1}} \times \overline{F_{8,n8}} + \overline{F_{8,n8}} \times \overline{F_{9,n9}} - 2110.3] \pm 23.0 \quad (5-7)$$

特性値4は、表5-14に示した要因効果推定値を(5-7)式に代入することにより容易に推定できる。

特性値1の場合と同様な方法で、屋根外表面日射吸収率の水準別に特性値4を最小にする因子水準の組合せを

表5-17 長波長平均放射熱量を最小にする因子水準（屋根外表面の日射吸収率（F<sub>2</sub>）が0.2の場合）

因 子	水 準	
屋根の熱貫流抵抗 (F <sub>1</sub> ) (m <sup>2</sup> ・h・°C/kcal)	0.176	
屋根外表面の放射率 (F <sub>3</sub> )	0.9	
屋根内表面の日射吸収率 (F <sub>4</sub> )	0.2	0.55
屋根内表面の放射率 (F <sub>6</sub> )	0.2	
地表面の種類 (F <sub>8</sub> )	草地	裸地面
梁間長 (F <sub>9</sub> ) (m)	3.0	
軒高 (F <sub>9</sub> ) (m)	4.5	
桁行方位 (F <sub>10</sub> )	東-西	南-北
屋根勾配 (F <sub>11</sub> ) (°)	5.0	

- 1) 水準が2種類示されている因子においては、それらの水準における要因効果推定値間に5%水準で有意差がない。
- 2) 表に示した以外の因子の水準は任意である。
- 3) 屋根勾配は屋根傾角で表している。

求めた。その結果を、屋根外表面の日射吸収率が0.2の場合については表5-19に、日射吸収率が0.55の場合と0.9の場合については表5-20にそれぞれ示す。屋根外表面の日射吸収率が0.2の場合、表5-19に示した因子水準に基づいて特性値4を求めると、信頼率95%で  $364 \pm 23 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下となる。また、表5-20に示した因子水準に基づくと、特性値4は屋根外表面の日射吸収率が0.55の場合には  $440 \pm 23 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下（信頼率95%）となり、日射吸収率が0.9の場合には  $452 \pm 23 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下（信頼率95%）となる。なお表5-19と表5-20においても、すべての因子水準が同時に実現不可能な場合には、表5-13に示した寄与率の順位に従って水準の実現を計って行く必要がある。

表5-19 長波長最大放射熱量を最小にする因子水準（屋根外表面の日射吸収率（ $F_2$ ）が0.2の場合）

因 子	水 準
屋根の熱貫流抵抗 ( $F_1$ ) ( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C} / \text{kcal}$ )	0.176
屋根外表面の放射率 ( $F_3$ )	0.9
屋根内表面の日射吸収率 ( $F_4$ )	0.2 0.55
屋根内表面の放射率 ( $F_5$ )	0.2
地表面の種類 ( $F_6$ )	草地面 裸地面
梁間長 ( $F_8$ ) (m)	3.0
軒高 ( $F_9$ ) (m)	4.5
屋根勾配 ( $F_{11}$ ) ( $^{\circ}$ )	5.0

- 1) 水準が2種類示されている因子においては、それらの水準における要因効果推定値間に5%水準で有意差がない。
- 2) 表に示した以外の因子の水準は任意である。
- 3) 屋根傾角は屋根勾配で表している。

表5-20 長波長最大放射熱量を最小にする因子水準（屋根外表面の日射吸収率（ $F_2$ ）が0.55の場合および0.9の場合）

因 子	水 準
屋根の熱貫流抵抗 ( $F_1$ ) ( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C} / \text{kcal}$ )	0.494 0.812
屋根外表面の放射率 ( $F_3$ )	0.9
屋根内表面の日射吸収率 ( $F_4$ )	0.2 0.55
屋根内表面の放射率 ( $F_5$ )	
屋根の熱貫流抵抗が $0.494 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C} / \text{kcal}$ のとき	0.2 0.55
屋根の熱貫流抵抗が $0.812 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C} / \text{kcal}$ のとき	0.2 0.55 0.9
地表面の種類 ( $F_6$ )	草地面 裸地面
梁間長 ( $F_8$ ) (m)	3.0
軒高 ( $F_9$ ) (m)	4.5
屋根勾配 ( $F_{11}$ ) ( $^{\circ}$ )	5.0

- 1) 水準が2種類以上示されている因子においては、それらの水準における要因効果推定値間に5%水準で有意差がない。
- 2) 表に示した以外の因子の水準は任意である。
- 3) 屋根傾角は屋根勾配で表している。

## 5.4 分析結果の適用

本節では、要因分析結果の現存畜舎への適用を試みる。以下においては、前節に示した放射熱量の予測式から求めた放射熱量はたんに予測値と呼ぶことにする。

対象とした現存畜舎は第2章で舎内放射熱量の測定を行った開放型のセミモニター屋根式採卵鶏舎とモニター屋根式採卵鶏舎および閉鎖型の切妻屋根式繁殖豚舎である。セミモニター屋根式採卵鶏舎の諸元は第4章の表4-7にすでに示した。表5-21に、モニター屋根式採卵鶏舎と切妻屋根式繁殖豚舎の諸元を示す。

### 5.4.1 日中における舎内放射熱量の予測値

3種類の畜舎における予測値を表5-22に示す。算定の1例として、セミモニター屋根式採卵鶏舎内の長波長平均放射熱量の場合を以下に示す。



表 5-21 モニター屋根式採卵鶏舎と切妻屋根式繁殖豚舎の諸元

諸 元	モニター屋根式 採 卵 鶏 舎		切 妻 屋 根 式 繁 殖 豚 舎	
	屋根の熱貫流抵抗 (m <sup>2</sup> ・h・°C/kcal)	0.18	0.68 (No. 1)	0.59 (No. 2)
屋根外表面の日射吸収率	0.4		0.77	
屋根外表面の放射率	0.3		0.9	
屋根内表面の日射吸収率	0.5		0.5	
屋根内表面の放射率	0.3		0.9	
地表面の種類	草地		コンクリート面	
桁行長 (m)	49.0		21.6	
梁間長 (m)	16.8		7.4	
軒 高 (m)	2.3		2.75	
桁行方位	南南東—北北西		東—西	
屋根傾角 (°)	4.1		8.5	

切妻屋根式繁殖豚舎の No. 1~No. 3 は表 2-1 に同じである。

表 5-22 現存畜舎内の日中における放射熱量の予測値と実測値

畜 舎 種 類	短波長放射熱量 (kcal/m <sup>2</sup> ・h)		長波長放射熱量 (kcal/m <sup>2</sup> ・h)	
	平均値	最大値	平均値	最大値
セミモニター屋根式 採 卵 鶏 舎	75±35 (11)	174±114 (13)	502±20 (478)	528±23 (491)
モニター屋根式 採 卵 鶏 舎	46±35 (5)	115±114 (7)	466±20 (435)	476±23 (446)
切妻屋根式繁殖豚舎				
No. 1	76±35 (3)	123±114 (3)	507±20 (429)	535±23 (439)
No. 2	76±35 (2)	123±114 (3)	513±20 (434)	542±23 (438)
No. 3	76±35 (3)	123±114 (3)	514±20 (439)	543±23 (447)

- 1) 切妻屋根式繁殖豚舎の番号は表 2-1 に同じである。
- 2) 実測値は昭和53年における値であり、括弧内に示す。

〈算定例〉

セミモニター屋根式採卵鶏舎の諸元 (表 4-7) に対応する要因効果推定値は、表 5-12 から以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 \overline{F_1} &= 526.0 & \overline{F_3} &= 507.2 & \overline{F_4} &= 503.3 \\
 \overline{F_6} &= 503.7 & \overline{F_8} &= 498.6 & \overline{F_{10}} &= 502.4 \\
 \overline{F_{11}} &= 497.1 & \overline{F_1 \times F_2} &= 545.6 & \overline{F_1 \times F_3} &= 507.2 \\
 \overline{F_1 \times F_6} &= 515.7 & \overline{F_6 \times F_9} &= 512.1 & & 
 \end{aligned}$$

したがって、長波長平均放射熱量は(5-6)式から

$$Q_{\text{mn}} = [-1052.0 + 507.2 + 503.3 + 503.7 - 498.6 + 502.4 \\ + 497.1 + 545.6 + 507.2 + 515.7 + 512.1 - 2541.4] \pm 20.1 = 502.3 \pm 20.1 \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h})$$

となる。

#### 5.4.2 日中における舎内放射熱量の予測値と実測値との比較

昭和53年における舎内放射熱量の实測値を表5-22の括弧内に示す。予測値は9~17時における平均値と最大値であるのに対して、実測値は10~15時あるいは10時30分~15時30分における平均値と最大値である。予測値と実測値を比較する際にこれらの時間帯の相違が影響するのは平均値についてである。しかし、第2章と第4章で述べたように現存畜舎内における放射熱量の实測値の変動は小さいことから、時間帯の相違による平均値の差異は小さいと考えられる。したがって、予測値と実測値との比較において時間帯の相違は考慮しないことにする。

表5-22から、舎内短波長放射熱量の予測値は実測値よりも著しく大きい。これは、舎内短波長放射熱量に関する要因分析の精度が良くなかったことおよび現存畜舎内の短波長放射熱量は外壁や周囲建物の影響を直接受けやすいことによるためと考えられる。しかし、予測値の畜舎別による差異は実測値の差異に対応している。このことから、短波長放射熱量についての要因分析結果は、定性的には現存畜舎に適用できると言える。

舎内長波長放射熱量の予測値は実測値よりも若干大きい傾向にあるが、これは予測値が典型的な暑熱日の気象条件に基づいているためと推察できる。また、両鶏舎における舎内長波長放射熱量の予測域の下限値は実測値にほぼ一致しているが、繁殖豚舎における予測域の下限値は平均値の場合には約60 kcal/m<sup>2</sup>·h、最大値の場合には約80 kcal/m<sup>2</sup>·hだけ実測値よりもそれぞれ大きい。繁殖豚舎におけるこれらの差異は、予測値は畜舎の外壁がないという前提に基づいているのに対して、実際の繁殖豚舎には外壁があることが主な原因と考えられる。

#### 5.4.3 予測式の適用

##### (1) 短波長放射熱量予測式の適用

舎内の短波長放射熱量を最小にする因子水準(表5-15, 5-16)と大きく異なる畜舎諸元(表4-7, 5-21)の中で、寄与率の順位が高い因子(表5-7, 5-9)は短波長放射熱量を増大させている。このような因子は放射熱環境を改善する上で対象となる。

セミモニター屋根式採卵鶏舎において改善対象となる因子は屋根内表面の日射吸収率である。屋根内表面の日射吸収率を現状の0.55から0.9に変えると、舎内短波長放射熱量の日中における平均値は(5-4)式から77.8 kcal/m<sup>2</sup>·h以下になり、現状での予測値(表5-22)に比べて約29%減小する。しかし、この場合には舎内の長波長放射熱量は現状の予測値に比べて約4%増大することが(5-6), (5-7)式から算定できる。

モニター屋根式採卵鶏舎において桁行方位を現状の南南東-北北西から東-西に変えると、短波長放射熱量の平均値と最大値は(5-4)式と(5-5)式から両者とも約45 kcal/m<sup>2</sup>·h以下になり、現状での予測値に比べて平均値については約45%、最大値については約81%それぞれ減少する。

繁殖豚舎において周囲地表面をコンクリート面から裸地面にすると、舎内の短波長放射熱量は現状での予測値に比べて平均値については約38%、最大値については約30%それぞれ減少することが予測できる。

第2章と第4章で指摘したように、現存畜舎においては直達日射が舎内に到達しない限り、舎内の下向き全波長放射熱量に占める下向き短波長放射熱量の割合は約2~3%以下と小さい。したがって、畜舎の設計や現存畜舎の改善に際しては、特別な場合、例えば梁間長に対して軒高が高く、日中に直達日射が舎内に到達するような場合を除き、長波長放射熱量の予測式だけを適用して舎内の放射熱量を予測し、その対策を考慮すれば良いと考えられる。

## (2) 長波長放射熱量予測式の適用

短波長放射熱量の場合と同様に、長波長放射熱量を最小にする因子水準（表 5-17～5-20）と大きく異なる畜舎諸元（表 4-7, 5-21）の中で、寄与率の順位が高い因子（表 5-11, 5-13）は長波長放射熱量を増大させている。

セミモニター屋根式採卵鶏舎において改善対象となる因子は、屋根外表面の日射吸収率と軒高である。さびが多く見られた屋根外表面を白色に塗装すると、外表面の日射吸収率と放射率はそれぞれ0.2と0.9になり、舎内長波長放射熱量の日中における平均値は(5-6)式から  $426 \pm 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  と算定され、現状での予測値に比べて約15%の減少になる。同様に、最大値は(5-7)式から  $438 \pm 23 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  と算定され、約17%減少する。また、軒高を2.5 m から4.5 m にすると長波長放射熱量の平均値は  $447 \pm 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  になり、現状での予測値に比べて約11%減少する。同様に、最大値も  $468 \pm 23 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  となり、約11%減少する。しかし、軒高を4.5 m にすると舎内短波長放射熱量の平均値と最大値は、(5-4)式と(5-5)式からそれぞれ  $213 \pm 35 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  と  $641 \pm 114 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  になり、現状での予測値に比べて著しく増大する。このように軒高を高くすると長波長放射熱量は減少するが、梁間が狭い畜舎では短波長放射熱量が著しく増大するため、新たに日除けが必要になるであろう。なお、軒高を4.5 m にしてさらに屋根外表面を白色にすると、舎内の長波長放射熱量は約26～28%減少することが予測できる。

モニター屋根式採卵鶏舎と切妻屋根式繁殖豚舎においても屋根外表面を白色にすると舎内の長波長放射熱量は、現状での予測値に比べてそれぞれ約10%および約5%減少することが予測できる。

以上のように、前節に示した舎内放射熱量についての要因効果推定値と予測式は畜舎の設計に際してだけでなく、現存畜舎の改善法の検討にも有効に利用できる。

## 5.5 摘 要

夏季における切妻屋根式開放型畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響を定量評価し、舎内の放射熱量を最小にする畜舎諸元を明らかにすることを目的として、数値実験による要因分析を行った。

要因分析の対象とした因子は以下の11個である。

- |             |               |
|-------------|---------------|
| ① 屋根の熱貫流抵抗  | ② 屋根外表面の日射吸収率 |
| ③ 屋根外表面の放射率 | ④ 屋根内表面の日射吸収率 |
| ⑤ 屋根内表面の放射率 | ⑥ 地表面の種類      |
| ⑦ 桁行長       | ⑧ 梁間長         |
| ⑨ 軒高        | ⑩ 桁行方位        |
| ⑪ 屋根勾配      |               |

各因子において3水準を設定し、直交配列表  $L_{81}(3^{10})$  に基づいた81通りの因子水準の組合せに従って、暑熱日の気象条件のもとで第4章に提示した算定方法により舎内放射熱量の数値シミュレーションを行い、舎内中央の床面上1.0 m に位置する微小水平面に下向きに入射する放射熱量の日中（9～17時）における平均値（平均放射熱量）と最大値（最大放射熱量）を要因分析に供した。次いで、要因分析結果の現存畜舎への適用について検討した。なお、要因分析の対象とした要因効果は、上述の11個の因子の主効果および屋根の熱貫流抵抗と他の因子、梁間長と軒高、桁行方位と屋根勾配の12個の2因子交互作用である。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 舎内の短波長平均放射熱量に有意な影響を及ぼす因子は、影響の度合いの大きい順に ① 梁間長, ② 軒

- 高, ③ 桁行方位, ④ 屋根勾配, ⑤ 屋根内表面の日射吸収率, ⑥ 桁行長, ⑦ 地表面の種類であり, 全変動の約68%はこれらの因子によるものであった。特に, 全変動の約54%は梁間長と軒高によるものであった。
- (2) 舎内の短波長最大放射熱量に有意な影響を及ぼす因子は, 影響の度合いの大きい順に ① 軒高, ② 梁間長, ③ 桁行長, ④ 屋根勾配, ⑤ 桁行方位, ⑥ 地表面の種類であった。全変動の約67%はこれらの因子によるものであり, 特に全変動の約46%は梁間長と軒高によるものであった。
- (3) 舎内短波長平均放射熱量と舎内短波長最大放射熱量については, 要因効果推定値 (表 5-8, 5-10) の加減演算だけから算定できる実用的な予測式 ((5-4), (5-5)式) を提示した。
- (4) 以上から, 舎内の短波長平均放射熱量を最小にする畜舎諸元が明らかになった。それは次のとおりであり, このとき短波長平均放射熱量は  $15.2 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下 (信頼率95%) となる。
- ① 梁間長は軒高が 4.5 m のときには 17 m 以上であり, 軒高が 3 m のときには 10 m 以上である。また, 軒高が 1.5 m のときには梁間長は 3 m 以上である。
  - ② 桁行方位は東-西である。
  - ③ 屋根傾角は 20 度以下である。
  - ④ 屋根内表面の日射吸収率は 0.9 以上である。
  - ⑤ 桁行長は 45 m 以上である。
  - ⑥ 畜舎周囲の地表面は草地, 裸地, コンクリートの中で裸地である。
- (5) また, 舎内の短波長最大放射熱量を最小にする畜舎諸元も明らかになった。それは, ① 屋根内表面の日射吸収率は関係しないことおよび ② 地表面は裸地あるいはコンクリートであること以外は (4) と同じである。このとき短波長最大放射熱量は  $179 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下 (信頼率95%) となる。
- (6) 舎内の長波長平均放射熱量に有意な影響を及ぼす因子は, 影響の度合いの大きい順に ① 屋根外表面の日射吸収率, ② 梁間長と軒高, ③ 屋根勾配, ④ 屋根の熱貫流抵抗, ⑤ 屋根内表面の放射率, ⑥ 地表面の種類, ⑦ 屋根内表面の日射吸収率, ⑧ 屋根外表面の放射率, ⑨ 桁行方位であり, 全変動の約90%はこれらの因子によるものであった。
- (7) 舎内の長波長最大放射熱量に有意な影響を及ぼす因子は, 桁行方位の影響が有意でないことを除いて (6) と同じであり, 全変動の約89%はそれらの因子によるものであった。
- (8) 舎内長波長平均放射熱量と舎内長波長最大放射熱量については, 要因効果推定値 (表 5-12, 5-14) の加減演算だけから算定できる実用的な予測式 ((5-6), (5-7)式) を提示した。
- (9) (6)~(8) から, 舎内の長波長平均放射熱量を最小にする畜舎諸元が明らかになった。それは以下に示す (a), (b) であり, このとき長波長平均放射熱量は (a) の場合すなわち屋根外表面の日射吸収率が 0.2 以下の場合には  $367 \pm 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下 (信頼率95%) となり, (b) の場合すなわち屋根外表面の日射吸収率が 0.55 以上の場合には  $439 \pm 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  以下 (信頼率95%) となる。
- (a) 屋根外表面の日射吸収率が 0.2 以下の場合
- ① 屋根葺材は亜鉛鉄板であり, 屋根外表面の放射率は 0.9 以上 (すなわち屋根外表面は一般的な白色塗装面), 屋根内表面の日射吸収率と放射率はそれぞれ 0.55 以下と 0.2 以下 (すなわち屋根内表面は金属光沢面) である。
  - ② 軒高は 4.5 m 以上と高いほうがよく, かつ梁間長は 3 m 以下と短いほうがよい。
  - ③ 屋根傾角は 5 度以下である。
  - ④ 畜舎周囲の地表面は草地, あるいは裸地である。

⑤ 桁行方位は東一西、あるいは南一北である。

⑥ 桁行長は関係しない。

(b) 屋根外表面の日射吸収率が $0.55$ 以上の場合

① 屋根葺材は亜鉛鉄板と厚さ $15\text{ mm}$ 以上の発泡ポリスチレンである。

② 屋根外表面の放射率は $0.9$ 以上（すなわち屋根外表面は一般的な塗装面）である。

③ 屋根内表面の日射吸収率は $0.55$ 以下（すなわち屋根内表面は明色あるいは白色）である。

④ 厚さ $15\text{ mm}$ 程度の発泡ポリスチレン断熱材を用いた屋根では屋根内表面の放射率は $0.55$ 以下（すなわち屋根内表面は光沢面）であり、厚さ $30\text{ mm}$ 以上の発泡ポリスチレンを用いた屋根では屋根内表面の放射率は関係しない。

⑤ 軒高と梁間長、屋根傾角、畜舎周囲の地表面、桁行方位および桁行長については(a)と同じである。

(10) また、舎内の長波長最大放射熱量を最小にする畜舎諸元も明らかになり、それは桁行方位が関係しないこと以外は(9)と同じである。このとき長波長最大放射熱量は屋根外表面の日射吸収率が $0.2$ 以下の場合には $364 \pm 23\text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 以下（信頼率 $95\%$ ）となり、屋根外表面の日射吸収率が $0.55$ 以上の場合には $452 \pm 23\text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 以下（信頼率 $95\%$ ）となる。

(11) 予測式は典型的な暑熱日の気象条件に基づいて得られたため、現存畜舎における予測値は実測値よりも大きい傾向にあった。しかし、設計の立場からは予測式は安全側にあり、十分に有効であると考えられる。

(12) 直達日射が舎内に到達しない限り、現存畜舎内の放射熱量の予測は長波長放射熱量の予測式だけを適用すれば実用上は十分であると言える。なお、閉鎖型畜舎においても舎内長波長放射熱量の予測式は適用できる。なお、今後に残された問題点は ① 本分析で取上げなかった要因効果の中に舎内放射熱量、特に舎内短波長放射熱量に有意な影響を及ぼす要因効果が残されている可能性があること、② 屋根形状が切妻屋根式畜舎と大きく異なるかまほ屋根式畜舎内の放射熱量に関する要因分析は別に行う必要があることである。

## 第6章 切妻屋根式開放型畜舎内における豚の屋根内表面に対する形態係数

### 6.1 緒言

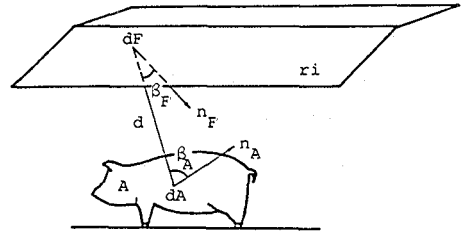
第5章では切妻屋根式開放型畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元（屋根の熱貫流抵抗、屋根内外表面の日射吸収率・放射率、地表面の種類、桁行長、梁間長、軒高、桁行方位、屋根勾配）の影響を定量的に評価したが、この評価は微小水平面に下向きに入射する放射熱量に基づいていた。畜舎内の暑熱環境を家畜の生理・生産反応で評価するという前提に立てば、舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響は微小水平面に入射する放射熱量よりも、家畜体表面に入射する放射熱量すなわち家畜の放射熱負荷量に基づくべきであると考えられる。

従来、家畜の放射熱負荷量は放射計や黒球温度計のような微小面や小球に入射する放射熱量で評価されている<sup>47, 51-60, 122-124</sup>。しかし、家畜は屋根内表面などに対して微小要素と見なせる位置・形状の関係にあるとは言えない。換言すれば、家畜の屋根内表面に対する形態係数を明らかにする必要がある。

家畜の形態係数はその形状の複雑さから理論<sup>34</sup>的に求めることは困難であり、家畜を簡単な立体モデルに置換えて、モデルの形態係数を求めるのが普通である<sup>125-128</sup>。

PERRYとSPECK<sup>128</sup>は牛の実物大モデルを用いて、微小面の牛に対する形態係数を形態係数測定機（mechanical shape factor integrator）で実測し、実測値と同じ形態係数を与える球を設定した。次いで、球の舎内壁面に対する形態係数を求める式を提示した。家畜の形態係数に関する研究はこの報告以外に見るべきものはない。

本章では、第5章に示した要因分析結果を家畜の放射熱負荷量で評価するために豚を対象として、まず微小面の豚に対する形態係数と等価な立体モデルを設定する。次に、この立体モデルを用いて豚の屋根内表面に対する形態係数を数理解析で求め、豚の屋根内表面・天空に対する形態係数と微小水平面の屋根内表面・天空に対する形態係数との差異について検討する。なお、解析に際しては ① 豚は平坦な床に正姿勢で起立し、対象とする豚の周囲には他の豚はいない、および ② 豚体表面と屋根内表面はそれぞれ完全拡散面であると仮定する。



$$\phi_{ri-A} = \frac{1}{S_A} \int_A \int_{ri} \frac{\cos(\beta_F) \cos(\beta_A)}{\pi d^2} dF dA$$

図 6-1 切妻屋根式開放型畜舎内の豚と屋根内表面との放射伝熱に関する位置関係

- A: 豚
- ri: 屋根内表面
- dF: 屋根内表面に位置する微小面
- dA: 豚体表面に位置する微小面
- n<sub>F</sub>: 微小面 dF の法線方向
- n<sub>A</sub>: 微小面 dA の法線方向
- d: dF と dA との距離
- β<sub>F</sub>, β<sub>A</sub>: dF と dA を結ぶ線とそれぞれ n<sub>F</sub>, n<sub>A</sub> とが作る角
- φ<sub>ri-A</sub>: 豚の屋根内表面に対する形態係数
- S<sub>A</sub>: 豚の有効放射面積

## 6.2 解析方法

### 6.2.1 形態係数に関して豚と等価な円筒の設定方法

#### (1) 豚の屋根内表面に対する形態係数と立体モデル

豚 (A) と屋根内表面 (ri) が図 6-1 に示す位置関係にあるとき、屋根内表面から豚に入射する放射熱量 (Q<sub>ri-A</sub>) は次式で求めることができる。

$$Q_{ri-A} = \phi_{ri-A} Q_{ri} S_A \tag{6-1}$$

ここで

- Q<sub>ri-A</sub>: 屋根内表面 (ri) から豚 (A) に入射する放射熱量 (kcal/h)
- φ<sub>ri-A</sub>: 豚の屋根内表面に対する形態係数 (-)
- Q<sub>ri</sub>: 屋根内表面から射出される放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>・h)
- S<sub>A</sub>: 豚の有効放射面積 (m<sup>2</sup>)

また、豚の屋根内表面に対する形態係数 (φ<sub>ri-A</sub>) は次のように表せる。

$$\phi_{ri-A} = \frac{1}{S_A} \int_A \int_{ri} \phi_{ri-dA} dA = \frac{1}{S_A} \int_{ri} \int_A \frac{\cos(\beta_F) \cos(\beta_A)}{\pi d^2} dF dA \tag{6-2}$$

ここで

- φ<sub>ri-dA</sub>: 豚体表面上における微小面 (dA) の屋根内表面 (ri) に対する形態係数 (-)
- d: 屋根内表面上の微小面 (dF) と豚体表面上の微小面との距離 (m)
- β<sub>F</sub>: dF と dA を結ぶ直線と微小面 dF の法線とが作る角 (rad)
- β<sub>A</sub>: dF と dA を結ぶ直線と微小面 dA の法線とが作る角 (rad)

一方、屋根内表面の豚に対する形態係数 (φ<sub>A-ri</sub>) は次式で示される。

$$\phi_{A-ri} = \frac{1}{S_{ri}} \int_{ri} \int_A \phi_{A-dF} dF = \frac{1}{S_{ri}} \int_{ri} \int_A \frac{\cos(\beta_A) \cos(\beta_F)}{\pi d^2} dA dF \tag{6-3}$$

ここで

- φ<sub>A-ri</sub>: 屋根内表面の豚に対する形態係数 (-)
- φ<sub>A-dF</sub>: 屋根内表面上における微小面 (dF) の豚に対する形態係数 (-)

$S_{ri}$ : 屋根内表面の面積 (m<sup>2</sup>)

(6-2)式と(6-3)式から豚の屋根内表面に対する形態係数( $\phi_{ri-A}$ )は次式のようにも書き表せる。

$$\phi_{ri-A} = \frac{1}{S_A} \int_{ri} \phi_{A-dF} dF \quad (6-4)$$

立体角放射法則<sup>70,84)</sup>(図6-2)によれば、 $\phi_{A-dF}$ は次式で求めることができる。

$$\phi_{A-dF} = \frac{S'_A}{\pi r^2} \quad (6-5)$$

ここで $S'_A$ は、図6-2に示されているように、屋根内表面上における微小面(dF)を頂点とし豚体表面を底面とする錐体が、微小面(dF)を中心とする半径rの半球面によって切取られる面積( $S''_A$ )を半球底面に正射影した面積である。半球を正射影魚眼レンズとし、半球底面をフィルム面に相当させたものが立体角放射カメラ<sup>129)</sup>であり、このカメラによる写真撮影から $\phi_{A-dF}$ を求めることができる。

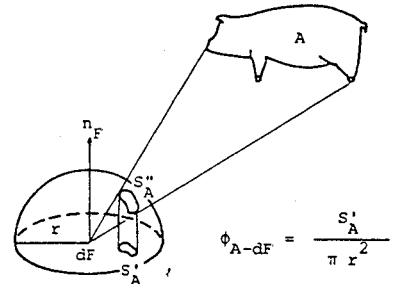


図6-2 立体角放射法則<sup>70,84)</sup>

A, n<sub>F</sub>, dF: 図6-1に同じ

r: dFを中心とする半球の半径

$S''_A$ : dFを頂点とし豚体表面を底面とする錐体が半球表面によって切取られる面積

$S'_A$ :  $S''_A$ を半球底面に正射影した面積

$\phi_{A-dF}$ : 微小面(dF)の豚(A)に対する形態係数

立体角放射カメラによる実測値( $\phi_{A-dF}$ )から $\phi_{ri-A}$ を求めるには、堀越<sup>130)</sup>および堀越と小林<sup>131)</sup>が人体の室内壁面に対する形態係数を求める際に行ったように、屋根内表面の多数の点に相当する位置から $\phi_{A-dF}$ を実測し、実測値を(6-4)式に基づいて数値積分する方法がある。しかし本章では、まず立体角放射カメラで実測できる微小面の豚に対する形態係数と微小面の立体モデルに対する形態係数が等しくなるような立体モデルを設定し、次にこの立体モデルを用いて(6-2)式から $\phi_{ri-A}$ を数理解析で算出する。なお、 $\phi_{A-dF}$ は豚(A)が放射体で微小面(dF)が受射体である場合の形態係数であるが、(6-4)式に示したように豚が受射体で屋根内表面(ri)が放射体である場合の $\phi_{ri-A}$ は $\phi_{A-dF}$ から求めることができる。したがって $\phi_{A-dF}$ に基づいて設定される立体モデルは豚が受射体の場合にも適用できる。

豚の立体モデルとしては球、円筒、楕円柱が考えられるが、これらの中から次の理由により円筒を採用する。

- ① 円筒の長さを豚の全長あるいは体長に相当させれば、円筒は豚のモデルとして概念的に捉えやすい。また、円筒の長さ方向が桁行方向のときと梁間方向のときで円筒の屋根内表面に対する形態係数は異なる。すなわち、形態係数に方向性がある。
- ② 球の場合には、形態係数に①のような方向性がない。
- ③ 豚体の形状からは円筒よりも楕円柱のほうがより適合すると思われるが、豚のモデルとして楕円柱を表示するパラメーターは4個(短軸、長軸、長さ、床面からの高さ)であるのに対して円筒のパラメーターは3個(径、長さ、床面からの高さ)であり、モデルとしては円筒のほうが簡単でかつ実用的であると考えられる。

(2) 微小面の円筒に対する形態係数

微小面の豚に対する形態係数と等価な円筒モデルを設定するために、微小面がそれぞれ側面壁、天井面・床面および正面壁・後面壁に位置する場合について、微小面(dF)の円筒(C)に対する形態係数( $\phi_{c-dF}$ )を求める式

を導いた。

(2-1) 微小面が側面壁に位置する場合

微小面が側面壁に位置する場合の微小面と円筒の位置関係を図 6-3 に示す。この場合、微小面の法線 ( $n_1$ ) は水平で、法線方向は円筒の長さ方向に対して直角である。

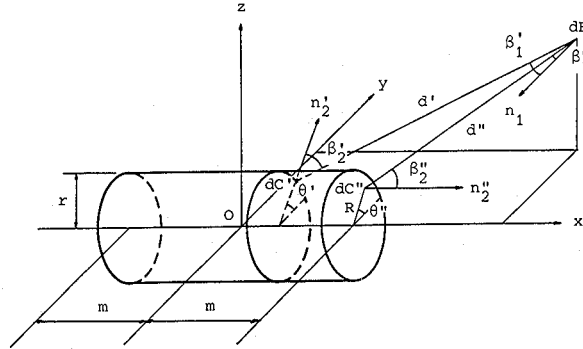


図 6-3 微小面と円筒の放射伝熱に関する位置関係 (微小面が側面壁に位置する場合)

- $r$ : 円筒の半径  $m$ : (円筒の長さ)/2
- $dF$ : 微小面
- $dC', dC''$ : それぞれ円筒側面, 円筒底面に位置する微小面
- $d', d''$ : それぞれ  $dF$  と  $dC'$ ,  $dF$  と  $dC''$  との距離
- $n_1$ :  $dF$  の法線方向
- $n_2', n_2''$ : それぞれ  $dC', dC''$  の法線方向
- $\beta_1, \beta_2'$ :  $dF$  と  $dC'$  を結ぶ線とそれぞれ  $dF, dC'$  の法線方向とが作る角
- $\beta_1, \beta_2''$ :  $dF$  と  $dC''$  を結ぶ線とそれぞれ  $dF, dC''$  の法線方向とが作る角
- $X, Y, Z$ : それぞれ  $dF$  の  $x, y, z$  座標
- $x$ :  $dC'$  の  $x$  座標
- $R$ : 円筒底面の中心と  $dC''$  との距離
- $\theta'$ :  $x-y$  平面と  $dC'$  の法線方向とが作る角
- $\theta', \theta_u'$ : それぞれ  $dF$  から見える円筒側面の範囲を  $\theta'$  で表したときの下限値と上限値
- $\theta''$ : 円筒底面の中心と  $dC''$  を結ぶ線が  $x-y$  平面と作る角

微小面 ( $dF$ ) の円筒側面 ( $C'$ ) に対する形態係数 ( $\phi_{C'-dF}$ ) および一方の円筒底面 ( $C''$ ) に対する形態係数 ( $\phi_{C''-dF}$ ) はそれぞれ(6-6), (6-7)式となる。

$$\phi_{C'-dF} = \int_{C'} \frac{\cos(\beta_1') \cos(\beta_2')}{\pi(d')^2} dC' = \frac{r}{2\pi} \int_{\theta=\theta_l}^{\theta=\theta_u} V_1(V_2 - V_3 + V_4 - V_5) d\theta' \quad (6-6)$$

$$\phi_{C''-dF} = \int_{C''} \frac{\cos(\beta_1'') \cos(\beta_2'')}{\pi(d'')^2} dC'' = \frac{X-m}{\pi} \int_{\theta''=0}^{\theta''=2\pi} \int_{R=0}^{R=r} \frac{V_6}{V_7} dR d\theta'' \quad (6-7)$$

ただし

$$V_1 = \frac{|Y \cos(\theta') + Z \sin(\theta') - r| |Y - r \cos(\theta')|}{U_1^2} \quad V_2 = \frac{X+m}{(X+m)^2 + U_1^2}$$

$$V_3 = \frac{X-m}{(X-m)^2 + U_1^2} \quad V_4 = \frac{1}{U_1} \tan^{-1} \left( \frac{X+m}{U_1} \right)$$



$$\begin{aligned}
 V_5 &= \frac{1}{U_1} \tan^{-1} \left( \frac{X-m}{U_1} \right) & V_6 &= R \{ Y - R \cos(\theta'') \} \\
 V_7 &= [(X-m)^2 + \{ Y - R \cos(\theta'') \}^2 + \{ Z - R \sin(\theta'') \}^2] & U_1 &= \sqrt{\{ Y - R \cos(\theta'') \}^2 + \{ Z - R \sin(\theta'') \}^2} \\
 \theta'_i &= \tan^{-1} \left( \frac{Z}{Y} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - R^2}}{R} \right) & \theta'_u &= \tan^{-1} \left( \frac{Z}{Y} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - R^2}}{R} \right)
 \end{aligned}$$

ここで、上式に用いられている記号の説明は図 6-3 に示してある。

微小面 (dF) の円筒 (C) に対する形態係数 ( $\phi_{c-df}$ ) は次のようになる。

$X < -m, X > m$  のとき

$$\phi_{c-df} = \phi_{c-df} + \phi_{c-df} \quad (6-8)$$

$-m \leq X \leq m$  のとき

$$\phi_{c-df} = \phi_{c-df} \quad (6-9)$$

(2-2) 微小面が天井面・床面に位置する場合

微小面が天井面・床面に位置する場合の微小面と円筒の位置関係は、図 6-3 において微小面の法線 ( $n_1$ ) が鉛直方向の場合である。

微小面 (dF) の円筒側面 (C') に対する形態係数 ( $\phi_{c-df}$ ) および一方の円筒底面 (C'') に対する形態係数 ( $\phi_{c-df}$ ) は(6-10)、(6-11)式となる。

$$\phi_{c-df} = \int_C \frac{\cos(\beta'_1) \cos(\beta'_2)}{\pi(d')^2} dC' = \frac{r}{2\pi} \int_{\theta'=\theta'_i}^{\theta'=\theta'_u} V_8 (V_9 - V_{10} + V_{11} - V_{12}) d\theta' \quad (6-10)$$

$$\phi_{c-df} = \int_C \frac{\cos(\beta''_1) \cos(\beta''_2)}{\pi(d'')^2} dC'' = \frac{X-m}{\pi} \int_{\theta''=0}^{\theta''=2\pi} \int_{R=0}^{R=r} \frac{V_{13}}{V_{14}} dR d\theta'' \quad (6-11)$$

ただし

$$\begin{aligned}
 V_8 &= \frac{\{ Y \cos(\theta') + Z \sin(\theta') - r \} \{ Z - r \sin(\theta') \}}{U_2^2} & V_9 &= \frac{X+m}{(X+m)^2 + U_2^2} \\
 V_{10} &= \frac{X-m}{(X-m)^2 + U_2^2} & V_{11} &= \frac{1}{U_2} \tan^{-1} \left( \frac{X+m}{U_2} \right) \\
 V_{12} &= \frac{1}{U_2} \tan^{-1} \left( \frac{X-m}{U_2} \right) & V_{13} &= R \{ Z - R \sin(\theta'') \} \\
 V_{14} &= [(X-m)^2 + \{ Y - R \cos(\theta'') \}^2 + \{ Z - R \sin(\theta'') \}^2] & U_2 &= \sqrt{\{ Y - R \cos(\theta'') \}^2 + \{ Z - R \sin(\theta'') \}^2}
 \end{aligned}$$

$Y \neq 0$  のとき

$$\theta'_i = \tan^{-1} \left( \frac{Z}{Y} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - R^2}}{R} \right) \quad \theta'_u = \tan^{-1} \left( \frac{Z}{Y} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - R^2}}{R} \right)$$

$Y = 0$  のとき

$$\theta'_i = \tan^{-1} \left( \frac{r}{\sqrt{Z^2 - R^2}} \right) \quad \theta'_u = \pi - \tan^{-1} \left( \frac{r}{\sqrt{Z^2 - R^2}} \right)$$

微小面 (dF) の円筒 (C) に対する形態係数 ( $\phi_{c-df}$ ) は次のようになる。

$X < -m, X > m$  のとき

$$\phi_{c-df} = \phi_{c-df} + \phi_{c-df} \quad (6-12)$$

$-m \leq X \leq m$  のとき

$$\phi_{c-df} = \phi_{c-df} \quad (6-13)$$

(2-3) 微小面が正面壁・後面壁に位置する場合

微小面が正面壁・後面壁に位置する場合の微小面と円筒の位置関係は、図 6-3 において微小面の法線 ( $n_1$ ) が水平で、法線方向が円筒の長さ方向の場合である。

微小面 ( $dF$ ) の円筒側面 ( $C'$ ) および一方の円筒底面 ( $C''$ ) に対する形態係数 ( $\phi_{c-df}$ ,  $\phi_{c''-df}$ ) は(6-14), (6-15)式となる。

$$\phi_{c-df} = \int_c \frac{\cos(\beta'_1) \cos(\beta'_2)}{\pi(d')^2} dC' = \frac{r}{2\pi} \int_{\theta'=\theta'_i}^{\theta'=\theta'_u} V_{15}(V_{16}-V_{17}) d\theta' \quad (6-14)$$

$$\phi_{c''-df} = \int_{c''} \frac{\cos(\beta''_1) \cos(\beta''_2)}{\pi(d'')^2} dC'' = \frac{(X-m)^2}{\pi} \int_{\theta''=0}^{\theta''=2\pi} \int_{R=0}^{R=r} \frac{R}{V_{18}} dR d\theta'' \quad (6-15)$$

ただし

$$V_{15} = Y \cos(\theta') + Z \sin(\theta') - r$$

$$V_{16} = \frac{1}{(X-m)^2 + U_3^2}$$

$$V_{17} = \frac{1}{(X+m)^2 + U_3^2}$$

$$V_{18} = [(X-m)^2 + \{Y - R \cos(\theta'')\}^2 + \{Z - R \sin(\theta'')\}^2]^2$$

$$U_3 = \sqrt{\{Y - r \cos(\theta')\}^2 + \{Z - r \sin(\theta')\}^2}$$

$Y \neq 0$  のとき

$$\theta'_i = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{Y}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - r^2}}{r}\right)$$

$$\theta'_u = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{Y}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - r^2}}{r}\right)$$

$Y = 0$  のとき

$$\theta'_i = \tan^{-1}\left(\frac{r}{\sqrt{Z^2 - r^2}}\right)$$

$$\theta'_u = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{r}{\sqrt{Z^2 - r^2}}\right)$$

微小面 ( $dF$ ) の円筒 ( $C$ ) に対する形態係数 ( $\phi_{c-df}$ ) は次のようになる。

$Y^2 + Z^2 > r^2$  のとき

$$\phi_{c-df} = \phi_{c'-df} + \phi_{c''-df} \quad (6-16)$$

$Y^2 + Z^2 \leq r^2$  のとき

$$\phi_{c-df} = \phi_{c'-df} \quad (6-17)$$

### (3) 円筒の設定法

豚のモデルとして円筒を設定するためには円筒の中心の位置、長さおよび半径を求める必要がある。

円筒の中心位置すなわち図 6-3 における原点 ( $O$ ) は前もって次のように設定する。すなわち中心位置は、豚の後幅の中心における全長方向の豚体断面において全長と腹深とをそれぞれ何等分かした交点とする。例えば全長を 8 等分、腹深を 6 等分した場合の例を図 6-4 に示す。円筒は豚の全長の範囲内にあるとし、全長の両先端は中心位置から除外する。したがって中心位置は図中において黒丸で示した 49 点である。このとき円筒の長さは中心位置が全長の中点より頭部側にあるときには中心位置から鼻部先端までの長さの 2 倍とし、中心位置が尻部側にあるときには中心位置から尾の付け根までの長さの 2 倍とする。このようにして設定したそれぞれの中心位置において、以下の方法で円筒の半径を求める。

円筒の半径は、立体角投射カメラによる実測値 ( $\phi_{\lambda-df}$ ) を微小面の円筒に対する形態係数 ( $\phi_{c-df}$ ) とし、カメラの撮影方向により微小面 ( $dF$ ) が側面壁に相当する場合には(6-6)~(6-9)式から、また微小面が天井面・床面に相当する場合には(6-10)~(6-13)式から、さらに微小面が正面壁・後面壁に相当する場合には(6-14)~

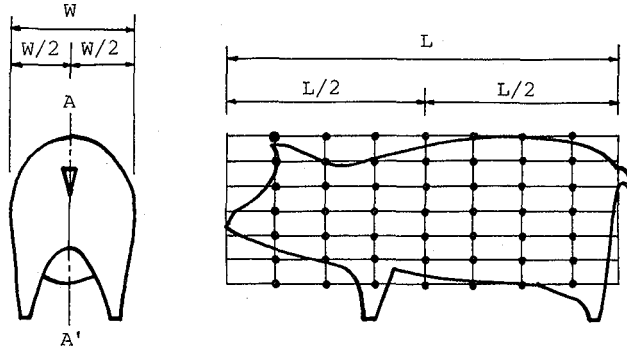


図6-4 円筒の半径を算定するために設定した円筒の中心位置 (A-A'断面において全長を8等分, 腹深を6等分した場合の例であり, 中心位置は黒丸で示した49点である.)  
L: 全長 W: 後幅

(6-17)式からそれぞれ反復法で求めることができる。なお、積分の計算はルジャンドル・ガウス法<sup>102)</sup>で行う。

豚体が完全な円筒であるならば、立体角放射カメラによる実測値から求められる円筒の半径はいかなる撮影位置においても一定である。しかし、豚体は複雑な形状であるため、円筒の半径は撮影位置によって異なることが予想される。そこで、撮影位置による円筒半径の変動すなわち変動係数が最小になる中心位置を豚と等価な円筒の中心位置とし、このときの円筒半径の平均値と円筒の長さを等価な円筒の半径および長さとする。

形態係数に関して豚と等価な円筒は側面壁、天井面、床面、正面壁および後面壁のそれぞれに対して設定することができるが、本章では床面を除いた4種類の壁面全体に対して1個の円筒を設定する。これは、本研究が畜舎内において上半球から入射する放射熱量を対象としているからである。なお、円筒設定の電算機プログラムは付録-3に示してある。

### 6.2.2 円筒の屋根内表面に対する形態係数

切妻屋根式畜舎内において桁行長と梁間長との中央すなわち舎内中央に円筒が位置するとき、円筒の長さ方向が桁行方向の場合と梁間方向の場合について円筒の屋根内表面に対する形態係数を求める式を導いた。これらの式は、円筒の矩形平面に対する形態係数を算出する式に基づいている。なお、本節において示す式の中で使用している記号は、それぞれの式に対応する図(図6-5~6-10)に説明してある。

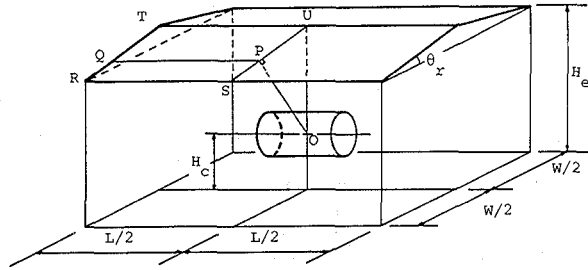
#### (1) 円筒の長さ方向が桁行方向の場合

図6-5に示すように、円筒の長さ方向が桁行方向の場合の円筒(C)の屋根内表面( $r_i$ )に対する形態係数( $\phi_{r_i-c}$ )は以下ようになる。ただし、 $H_e$ は軒高、 $W$ は梁間長、 $\theta_r$ は屋根傾角、 $H_c$ は床面から円筒中心までの高さである(図6-5参照)。

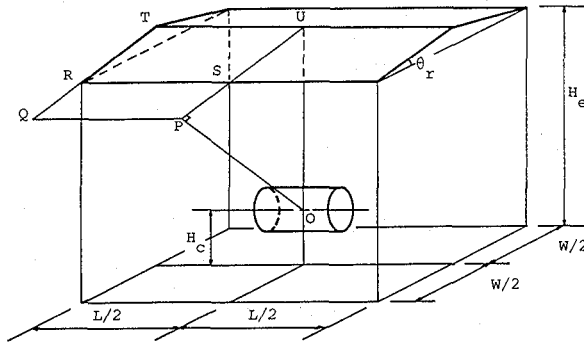
$$(a) \quad H_e - H_c \leq \frac{W}{2 \tan(\theta_r)} \text{ のとき} \quad \phi_{r_i-c} = 4(\phi_{r-c} + \phi_{R-c}) \quad (6-18)$$

$$(b) \quad H_e - H_c > \frac{W}{2 \tan(\theta_r)} \text{ のとき} \quad \phi_{r_i-c} = 4(\phi_{R-c} - \phi_{R-c}) \quad (6-19)$$

円筒の屋根内表面に対する形態係数( $\phi_{r_i-c}$ )は以下に示す水平矩形平面に対する形態係数( $\phi_{R-c}$ )から求めることができる。



$$(a) \quad H_e - H_c \leq \frac{W}{2 \tan(\theta_r)} : \phi_{ri-C} = 4 (\phi_{R'-C} + \phi_{R-C})$$



$$(b) \quad H_e - H_c > \frac{W}{2 \tan(\theta_r)} : \phi_{ri-C} = 4 (\phi_{R'-C} - \phi_{R-C})$$

図 6-5 切妻屋根式開放型畜舎内の中央に位置する円筒の屋根内表面に対する形態係数(1) (円筒の長さ方向が桁行方向の場合)

L: 桁行長 W: 梁間長 H<sub>c</sub>: 軒高 θ<sub>r</sub>: 屋根傾角

H<sub>c</sub>: 円筒中心の床面からの高さ

φ<sub>ri-C</sub>: 円筒の屋根内表面 (ri) に対する形態係数

φ<sub>R-C</sub>: 円筒の屋根内表面 (PQRS) に対する形態係数

φ<sub>R'-C</sub>: 円筒の屋根内表面 (PQTU) に対する形態係数

円筒と水平矩形平面が図 6-6 に示す位置関係にあるとき、円筒側面 (C') の水平矩形平面 (F) に対する形態係数 (φ<sub>r-c</sub>) を算出する次式を導いた。

$$\begin{aligned} \phi_{r-c} &= \frac{1}{2\pi r(r+2m)} \int_C \int_F \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi d^2} dF dC' \\ &= \frac{1}{4\pi^2(r+2m)} \int_{\theta=\theta_1}^{\theta=\theta_2} \int_{Y=0}^{Y=b} \frac{V_{19}}{V_{20}} (V_{21} - V_{22}) dY d\theta \end{aligned} \quad (6-20)$$

ただし

$$V_{19} = \{d_0 - r \sin(\theta)\} \{Y \cos(\theta) + d_0 \sin(\theta) - r\} \quad V_{20} = [\{Y - r \cos(\theta)\}^2 + \{d_0 - r \sin(\theta)\}^2]^{3/2}$$

$$V_{21} = (a+m) \tan^{-1} \left( \frac{a+m}{\sqrt{\{Y - r \cos(\theta)\}^2 + \{d_0 - r \sin(\theta)\}^2}} \right)$$

$$V_{22} = (a-m) \tan^{-1} \left( \frac{a-m}{\sqrt{\{Y - r \cos(\theta)\}^2 + \{d_0 - r \sin(\theta)\}^2}} \right)$$

Y ≠ 0 のとき

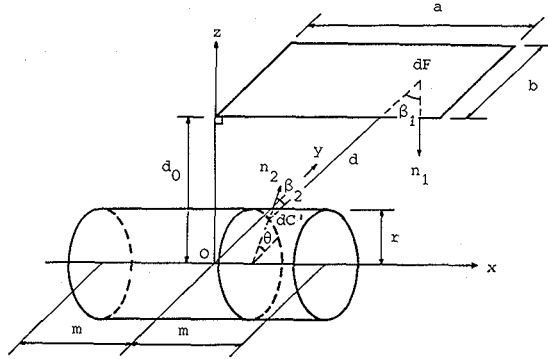


図 6-6 円筒側面と水平矩形平面との放射伝熱に関する位置関係

- a, b: それぞれ矩形平面の辺長
- r: 円筒の半径
- m: (円筒の長さ)/2
- dF: 矩形平面に位置する微小面
- dC': 円筒側面に位置する微小面
- d: dF と dC' との距離
- $n_1, n_2$ : それぞれ dF, dC' の法線方向
- $\beta_1, \beta_2$ : dF と dC' を結ぶ線とそれぞれ dF, dC' の法線方向とが作る角
- $d_0$ : 円筒の中心 (O) から矩形平面の一隅までの距離
- X, Y: それぞれ dF の x, y 座標
- x: dC' の x 座標
- $\theta$ : x-y 平面と dC' の法線方向とが作る角
- $\theta_l, \theta_u$ : それぞれ dF から見える円筒側面の範囲を  $\theta$  で表したときの下限値と上限値

$$\theta_l = \tan^{-1}\left(\frac{d_0}{Y}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{Y^2 + d_0^2 - r^2}}{r}\right) \qquad \theta_u = \tan^{-1}\left(\frac{d_0}{Y}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{Y^2 + d_0^2 - r^2}}{r}\right)$$

Y=0 のとき

$$\theta_l = \tan^{-1}\left(\frac{r}{\sqrt{d_0^2 - r^2}}\right) \qquad \theta_u = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{r}{\sqrt{d_0^2 - r^2}}\right)$$

次に、図 6-7 に示す位置関係にあるとき、一方の円筒底面 (C'') の水平矩形平面 (F) に対する形態係数 ( $\phi_{F-C''}$ ) を求める次式を導いた。

$$\begin{aligned} \phi_{F-C''} &= \frac{1}{2\pi r(r+2m)} \int_C \int_F \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi d^2} dF dC'' \\ &= \frac{1}{4\pi^2 r(r+2m)} \int_{R=0}^{R=r} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} R \{V_{23} + V_{24} - V_{25}(V_{26} + V_{27})\} d\theta dR \end{aligned} \quad (6-21)$$

ただし

$$\begin{aligned} V_{23} &= \tan^{-1}\left(\frac{b - R \cos(\theta)}{d_0 - R \sin(\theta)}\right) & V_{24} &= \tan^{-1}\left(\frac{R \cos(\theta)}{d_0 - R \sin(\theta)}\right) \\ V_{25} &= \frac{d_0 - R \sin(\theta)}{\sqrt{(a-m)^2 + \{d_0 - R \sin(\theta)\}^2}} & V_{26} &= \tan^{-1}\left(\frac{b - R \cos(\theta)}{\sqrt{(a-m)^2 + \{d_0 - R \sin(\theta)\}^2}}\right) \\ V_{27} &= \tan^{-1}\left(\frac{R \cos(\theta)}{\sqrt{(a-m)^2 + \{d_0 - R \sin(\theta)\}^2}}\right) \end{aligned}$$

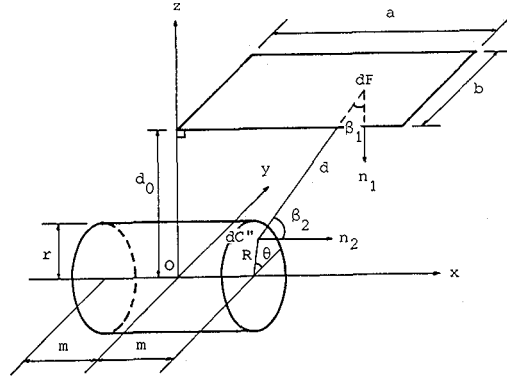


図 6-7 円筒底面と水平矩形平面との放射伝熱に関する位置関係

a, b, r, m, dF, d<sub>0</sub>, X, Y: 図 6-6 に同じ

dC'': 円筒底面に位置する微小面

d: dF と dC'' との距離

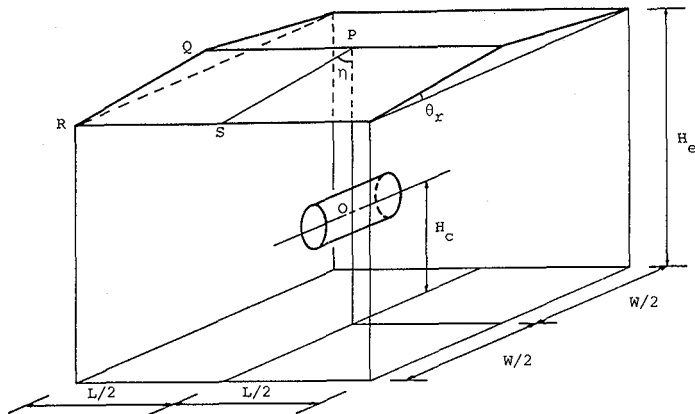
n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>: それぞれ dF, dC'' の法線方向

β<sub>1</sub>, β<sub>2</sub>: dF と dC'' を結ぶ線とそれぞれ dF, dC'' の法線方向とが作る角

R: 円筒底面の中心と dC'' との距離

θ: 円筒底面の中心と dC'' を結ぶ線が x-y 平面と作る角

円筒 (C) の水平矩形平面 (F) に対する形態係数 ( $\phi_{F-C}$ ) は次のようになる。ただし、a は円筒の長さ方向における矩形平面の辺長であり、m は円筒の中心から円筒底面までの長さすなわち円筒の長さの 2 分の 1 である (図 6-6, 6-7 参照)。



$$\phi_{ri-C} = 4 \phi_{R-C}$$

図 6-8 切妻屋根式開放型畜舎内の中央に位置する円筒の屋根内表面に対する形態係数 (2) (円筒の長さ方向が梁間方向の場合)

L: 桁行長 W: 梁間長 H<sub>c</sub>: 軒高 θ<sub>r</sub>: 屋根傾角

H<sub>c</sub>: 円筒中心の床面からの高さ

φ<sub>ri-C</sub>: 円筒の屋根内表面 (ri) に対する形態係数

φ<sub>R-C</sub>: 円筒の屋根内表面 (PQRS) に対する形態係数

$a > m$  のとき

$$\phi_{F-c} = \phi_{F-c} + \phi_{F-c} \quad (6-22)$$

$a \leq m$  のとき

$$\phi_{F-c} = \phi_{F-c} \quad (6-23)$$

(2) 円筒の長さ方向が梁間方向の場合

図 6-8 に示すように、円筒の長さ方向が梁間方向の場合の円筒 (C) の屋根内表面 (ri) に対する形態係数 ( $\phi_{ri-c}$ ) は、次式から求めることができる。

$$\phi_{ri-c} = 4\phi_{F-c} \quad (6-24)$$

円筒の屋根内表面に対する形態係数 ( $\phi_{ri-c}$ ) は以下に示す傾斜矩形平面に対する形態係数 ( $\phi_{F-c}$ ) から求めることができる。

円筒と傾斜矩形平面が図 6-9 に示す位置関係にあるとき、円筒側面 (C') の傾斜矩形平面 (F) に対する形態係数 ( $\phi_{F-c}$ ) を算出する次式を導いた。

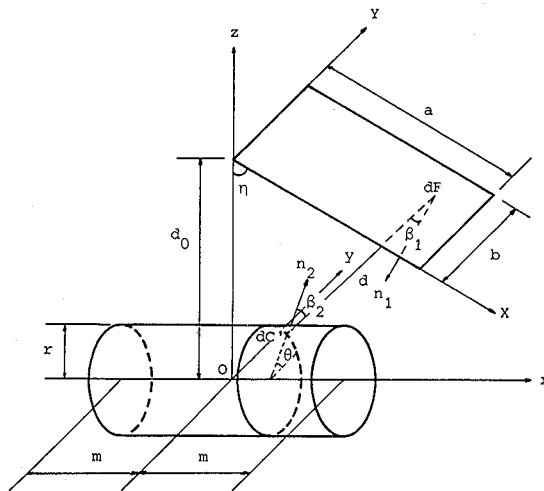


図 6-9 円筒側面と傾斜矩形平面との放射伝熱に関する位置関係

- a, b: それぞれ矩形平面の辺長
- r: 円筒の半径 m: (円筒の長さ)/2
- dF: 矩形平面に位置する微小面
- dC': 円筒側面に位置する微小面
- d: dF と dC' との距離
- $n_1, n_2$ : それぞれ dF, dC' の法線方向
- $\beta_1, \beta_2$ : dF と dC' を結ぶ線とそれぞれ dF, dC' の法線方向とが作る角
- $d_0$ : 円筒の中心 (O) から矩形平面の一隅までの距離
- $\eta$ : 円筒の中心を通る鉛直線 (z 軸) と矩形平面とが作る角
- X, Y: それぞれ dF の矩形平面上における X, Y 座標
- x: dC' の x 座標
- $\theta$ : x-y 平面と dC' の法線方向とが作る角
- $\theta_b, \theta_u$ : それぞれ dF から見える円筒側面の範囲を  $\theta$  で表したときの下限値と上限値

$$\begin{aligned} \phi_{r-c} &= \frac{1}{2\pi r(r+2m)} \int_C \int_F \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi d^2} dF dC' \\ &= \frac{1}{4\pi^2(r+2m)} \int_{\theta=\theta_1}^{\theta=\theta_2} \int_{Y=0}^{Y=b} \int_{X=0}^{X=a} \frac{V_{28}}{V_{29}} \{V_{30}(V_{31}-V_{32}+V_{33}-V_{34}) \\ &\quad + V_{35}(V_{36}-V_{37})\} dX dY d\theta \quad (6-25) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} V_{28} &= Y \cos(\theta) + Z \sin(\theta) - r & V_{29} &= \sqrt{\{Z/\tan(\eta)\}^2 + Z^2} \\ V_{30} &= Z\{Z - r \sin(\theta)\}/U_4^2 & V_{31} &= U_5/(U_4^2 + U_5^2) \\ V_{32} &= U_6/(U_4^2 + U_5^2) & V_{33} &= \frac{1}{U_4} \tan^{-1}\left(\frac{U_5}{U_4}\right) \\ V_{34} &= \frac{1}{U_4} \tan^{-1}\left(\frac{U_6}{U_4}\right) & V_{35} &= Z/\tan(\eta) \\ V_{36} &= 1/(U_4^2 + U_5^2) & V_{37} &= 1/(U_4^2 + U_5^2) \\ U_4 &= \sqrt{\{Y - r \cos(\theta)\}^2 + \{Z - r \sin(\theta)\}^2} & U_5 &= X \sin(\eta) + m \\ U_6 &= X \sin(\eta) - m & Z &= d_0 - X \cos(\eta) \end{aligned}$$

Y ≠ 0 のとき

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{Y}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - r^2}}{r}\right) \quad \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{Y}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{Y^2 + Z^2 - r^2}}{r}\right)$$

Y = 0 のとき

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{r}{\sqrt{Z^2 - r^2}}\right) \quad \theta_2 = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{r}{\sqrt{Z^2 - r^2}}\right)$$

次に、図 6-10 に示す位置関係にあるとき、一方の円筒底面 (C') の傾斜矩形平面 (F) に対する形態係数 ( $\phi_{r-c}$ ) を求める次式を導いた。

$$\begin{aligned} \phi_{r-c} &= \frac{1}{2\pi r(r+2m)} \int_C \int_F \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi d^2} dF dC' \\ &= \frac{1}{4\pi^2 r(r+2m)} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{R=0}^{R=r} \int_{X=m/\sin(\eta)}^{X=a} \frac{V_{38}}{V_{39}} (V_{40} + V_{41} + V_{42} + V_{43}) \\ &\quad dX dR d\theta \quad (6-26) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} V_{38} &= RU_8 \left\{ ZU_9 + \frac{ZU_8}{\tan(\eta)} \right\} & V_{39} &= U_7^2 \sqrt{\{Z/\tan(\eta)\}^2 + Z^2} \\ V_{40} &= \{b - R \cos(\theta)\} / \{U_7^2 + \{b - R \cos(\theta)\}^2\} & V_{41} &= R \cos(\theta) / \{U_7^2 + R^2 \cos^2(\theta)\} \\ V_{42} &= \frac{1}{U_7} \tan^{-1}\left(\frac{b - R \cos(\theta)}{U_7}\right) & V_{43} &= \frac{1}{U_7} \tan^{-1}\left(\frac{R \cos(\theta)}{U_7}\right) \\ U_7 &= \sqrt{\{X \sin(\eta) - m\}^2 + \{Z - R \sin(\theta)\}^2} & U_8 &= X \sin(\eta) - m \\ U_9 &= Z - R \sin(\theta) & Z &= d_0 - X \cos(\eta) \end{aligned}$$

円筒 (C) の傾斜矩形平面 (F) に対する形態係数 ( $\phi_{r-c}$ ) は次のようになる。ただし、a は円筒の長さ方向における矩形平面の辺長、m は円筒の中心から円筒底面までの長さ、 $\eta$  は円筒の中心を通る鉛直線 (z 軸) と矩形平面とが作る角である (図 6-9, 6-10 参照)。

a > m / sin( $\eta$ ) のとき



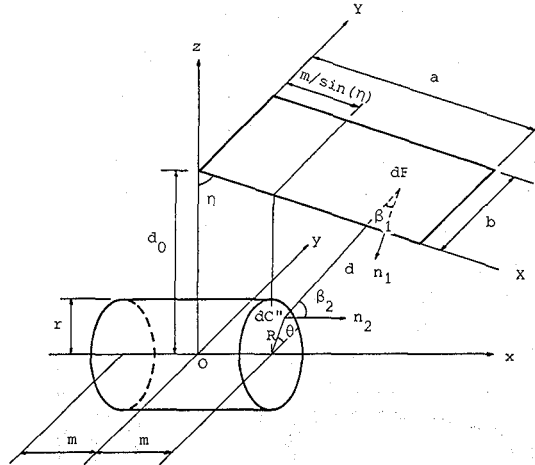


図 6-10 円筒底面と傾斜矩形平面との放射伝熱に関する位置関係

a, b, r, m, dF, d<sub>0</sub>, η, X, Y: 図 6-9 に同じ

dC'': 円筒底面に位置する微小面

d: dF と dC'' との距離

n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>: それぞれ dF, dC'' の法線方向

β<sub>1</sub>, β<sub>2</sub>: dF と dC'' を結ぶ線とそれぞれ dF, dC'' の法線方向とが作る角

R: 円筒底面の中心と dC'' との距離

θ: 円筒底面の中心と dC'' を結ぶ線が x-y 平面と作る角

$$\phi_{r-c} = \phi_{r-c} + \phi_{r-c} \tag{6-27}$$

a ≤ m / sin(η) のとき

$$\phi_{r-c} = \phi_{r-c} \tag{6-28}$$

なお、(6-20), (6-21), (6-25), (6-26)式の積分の計算はルジャンドル・ガウス法<sup>102)</sup>で行うことができる。さらに、舎内の中央以外に位置する円筒の屋根内表面に対する形態係数は、本節に示した計算方法と同様な方法で算出することができる。

### 6.3 円筒モデル設定のための測定方法

#### 6.3.1 供試豚

微小面の豚に対する形態係数を実測するために、立体角投射カメラで撮影した豚は剥製である。剥製は生体重が約 27 kg のデュロック種、約 65 kg のハンプシャー種および約 88 kg の交雑種（ランドレース種×ハンプシャー種）の3頭であり、体表面積はそれぞれ 0.72, 1.30, 1.58 m<sup>2</sup>であった。

供試豚の全長、体長、胸深、後幅および床面からの最大高さを表 6-1 に示す。これらの体尺寸法は、AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK-1982 (ASAE D321.1)<sup>132)</sup>および和田と野附<sup>121)</sup>が示した体重別の体尺寸法とほぼ同じであった。なお、豚の全長とは尾の付け根から鼻の先端までの水平距離であり、体長とは尾の付け根から耳の付け根までの水平距離である。

#### 6.3.2 立体角投射カメラによる形態係数の測定方法

微小面の豚に対する形態係数を測定するために用いた立体角投射カメラは、35 mm カメラ (Nikon F) に正射

表 6-1 供試豚の体尺寸法

体尺測定部位	27kg 豚	65kg 豚	88kg 豚
全 長 ( $L_1$ )	89.1	120.6	144.0
体 長 ( $L_2$ )	71.8	99.3	116.3
胸 深 ( $H_1$ )	24.1	32.6	35.7
後 幅 ( $W$ )	22.6	28.4	35.9
床面からの最大高さ ( $H_2$ )	45.3	56.4	70.5

- 1) 単位は cm である。
- 2) 体尺測定部位は下図のとおりである。

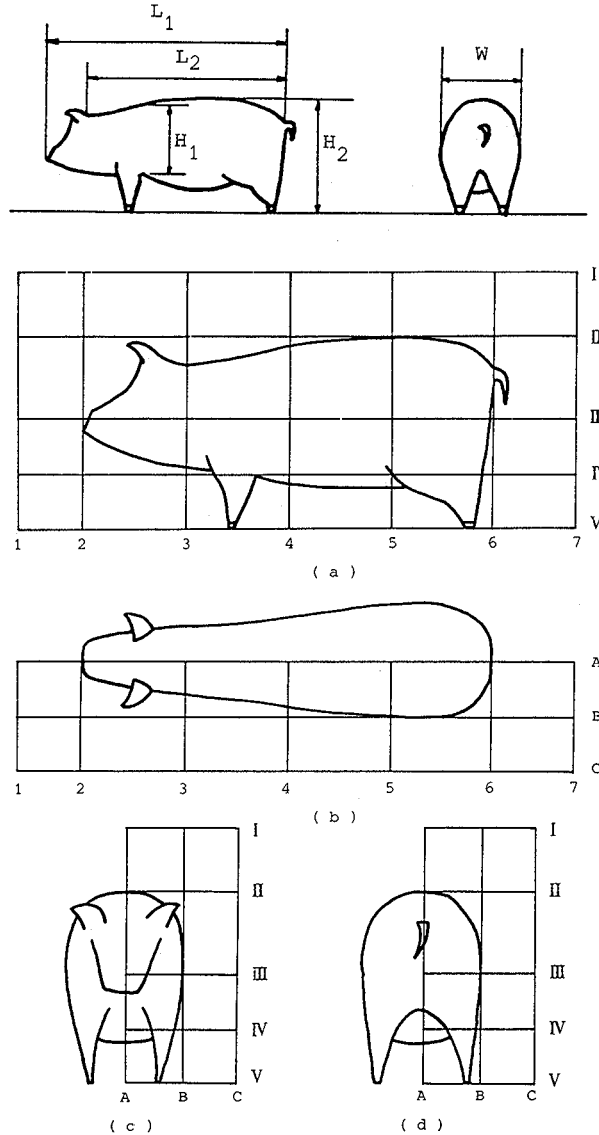


図 6-11 立体角投射カメラの撮影位置

- (a): 微小面が側面壁に位置する場合に相当
- (b): 微小面が天井面に位置する場合に相当
- (c): 微小面が正面壁に位置する場合に相当
- (d): 微小面が後面壁に位置する場合に相当

影魚眼レンズ (OP Fisheye Nikkor 10mm F5.6) を装着したものである。

豚の脇腹側, 頭部側, 尻部側から豚を撮影するときにはカメラは水平に設置し, 背部側から撮影するときにはカメラは下向きに設置した。カメラの撮影方向は撮影位置における微小面の法線方向であり, 脇腹側, 頭部側および尻部側からの撮影は微小面がそれぞれ側面壁, 正面壁, 後面壁に位置する場合に相当し, 背部側からの撮影は微小面が天井面に位置する場合に相当する。

図 6-11 に撮影位置を示す。図 6-11 において 4, III および A はそれぞれ全長, 胸深, 後幅の中心線であり, II は床面からの最大高さの線である。豚体は背の線を中心に左右対称と見なせるので, 図 6-11 に示したように撮影は豚体の片側半分を対象とし, 撮影位置は 1 頭につき 86 点である。図 6-11 に示した (a) は側面壁 (撮影位置 35 点), (b) は天井面 (撮影位置 21 点), (c) は正面壁 (撮影位置 15 点), (d) は後面壁 (撮影位置 15 点) にそれぞれ相当する。撮影位置は, 豚の後幅の中心における全長方向の断面において, 胸深の中央の位置における全長の中点を原点とした X-Y-Z 座標で表した。なお, 撮影したフィルム上における豚体の面積が小さくなりすぎないように豚体表面とカメラとの距離はいずれの場合にも約 50 cm 以下とし, その距離は同じ撮影方向内では一定とした。

撮影フィルム面に占める豚体面積の割合すなわち微小面の豚に対する形態係数は, マルティカラーデーターシステム (ナック社製, モデル 4200 E) で測定した。マルティカラーデーターシステムは撮影フィルム面の明度別の面積割合を自動計測するため, 背景と被写体である豚との明度を明確に区別する必要があった。このため豚は白色で塗装し, スタジオ室内壁面はすべて無反射黒色カーテンで覆った。また, 豚体に影が生じないように照明に注意を払った。

## 6.4 結果および考察

### 6.4.1 微小面の豚に対する形態係数

立体角投射カメラで撮影した写真の 1 例を図 6-12 に示す。図 6-12 は 65 kg 豚の場合であり, 円の面積に対する豚体面積の割合すなわち微小面の豚に対する形態係数 ( $\phi_{a-af}$ ) は 0.466 であった。なお, 図 6-12 は図 6-11(a)



図 6-12 立体角投射カメラの撮影例  
(被写体は 65 kg 豚である。)

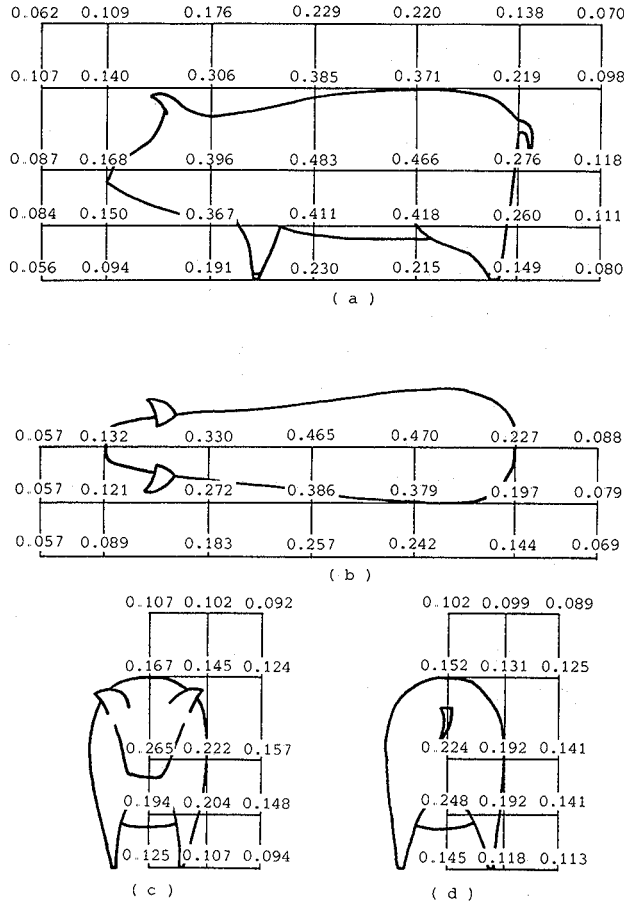


図 6-13 撮影位置における微小面の豚に対する形態係数 (65 kg 豚の場合)

に示したⅢ-5の位置から撮影した写真である。

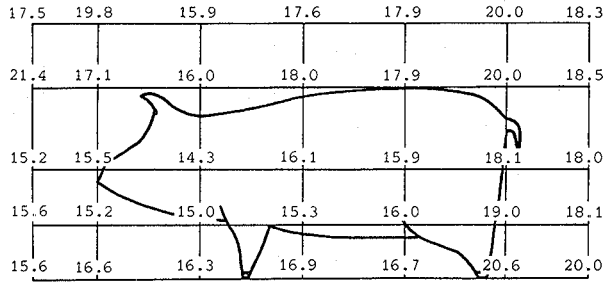
65 kg 豚の場合について、86点の撮影位置における  $\phi_{A-df}$  を図 6-13 に示す。図 6-13 において (a), (b), (c), (d) の撮影平面は、前述した撮影位置についての原点からそれぞれ 32.2, 28.5, 66.6, 82.3 cm 離れた位置であった。豚の全長を24等分し、腹深を8等分した交点を円筒の中心位置とし、それぞれの中心位置において図6-13 に示した各撮影位置の  $\phi_{A-df}$  から円筒の半径を計算した。

図 6-13 と同様に、27 kg 豚と 88 kg 豚の場合についても86個の  $\phi_{A-df}$  を得た。27 kg 豚については全長を18等分、腹深を8等分した交点を、また 88 kg 豚については全長を30等分、腹深を10等分した交点を円筒の中心位置として、65 kg 豚の場合と同様に  $\phi_{A-df}$  から円筒の半径を計算した。

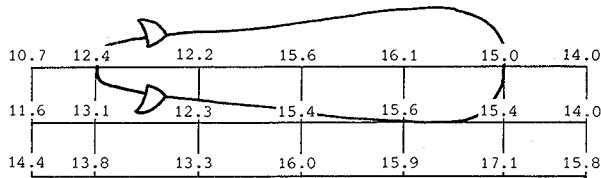
#### 6.4.2 形態係数に関して豚と等価な円筒

65 kg 豚の場合について、 $\phi_{A-df}$  から求めた円筒の半径を図 6-14 に示す。このときの円筒の中心位置 (図 6-3 における X-Y-Z 座標の原点) は後幅の中央における全長方向の豚体断面において、全長の midpoint よりも 5.0 cm だけ尻部側で、腹深の midpoint よりも 4.4 cm 下方側であった。また、円筒の長さは 110.6 cm であり、86個の円筒半径の平均値と変動係数はそれぞれ 15.7 cm と 14.2% であった。

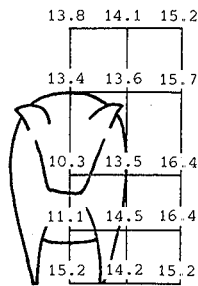
図 6-14 から、86点における円筒半径は 10.3~21.4 cm の範囲であり、豚体の脇腹から腿にかけての体表面が



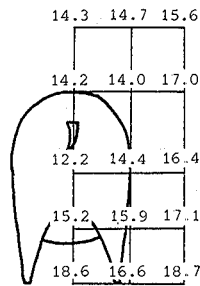
( a )



( b )



( c )



( d )

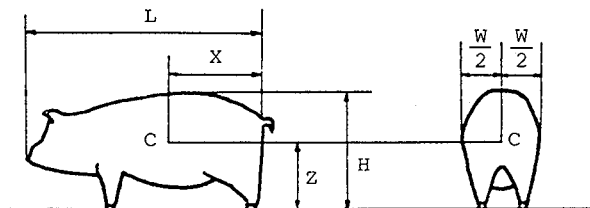
図6-14 形態係数に関して豚と等価な円筒の半径 (65kg 豚の場合)  
(円筒半径の単位は cm である.)

表6-2 形態係数に関して豚と等価な円筒

供試豚	円筒の中心位置		円筒半径 (cm)	円筒長 (cm)	円筒長	円筒長	円筒直径 後幅
	X/L	Z/H			全長	体長	
27kg豚	0.444	0.585	12.8	79.2	0.889	1.10	1.13
65kg豚	0.458	0.608	15.7	110.6	0.917	1.11	1.11
88kg豚	0.433	0.591	19.0	124.8	0.867	0.93	1.06

円筒の中心位置 (C) は下図のとおりである。

L: 全長 H: 床面からの最大高さ W: 後幅 X: 円筒の中心位置と尾の付け根との距離  
Z: 円筒の中心位置の高さ



良く見える位置において半径は大きい傾向にある。この傾向は、27 kg 豚および 88 kg 豚においても同様であった。

表 6-2 に、形態係数に関して豚と等価な円筒を豚の体重別に示す。円筒の中心位置は、全長 (L) に対する尾の付け根からの距離 (X) の比と豚の最大高さ (H) に対する床面からの高さ (Z) の比で示してある。また、全長と体長に対する円筒長の比および後幅に対する円筒直径の比も合せて示してある。なお、円筒半径は 86 個の平均値であり、円筒半径の変動係数は 27 kg 豚においては 15.0%，65 kg 豚においては前述したように 14.2%，88 kg 豚においては 12.7% であった。

表 6-2 から、3 種類の豚における円筒の中心位置は、尾の付け根からの距離が全長の約 0.45 倍であり、かつ床面からの高さが豚の最大高さの約 0.6 倍である。また、27 kg 豚、65 kg 豚および 88 kg 豚の円筒半径はそれぞれ 12.8, 15.7, 19.0 cm であり、体重 10 kg の増大に対して半径は約 1 cm 増加する。さらに、円筒の直径は後幅の約 1.1 倍である。

円筒の長さは 27 kg 豚において 79.2 cm, 65 kg 豚において 110.6 cm, 88 kg 豚において 124.8 cm であり、円筒の長さはそれぞれ全長の約 0.9 倍と体長の 0.9~1.1 倍である。

以上から、形態係数に関して豚と等価な円筒は豚の体尺寸法から容易に設定することができる。すなわち、円筒は尾の付け根から耳の付け根 (すなわち体長) にかけて水平に位置し、床面から円筒軸までの高さは豚の最大高さの約 60% であり、円筒の直径は後幅にほぼ等しい。

#### 6.4.3 豚の屋根内表面に対する形態係数

表 6-2 に示した 3 種類の円筒を形態係数に関して豚と等価な立体モデルとして用い、第 5 章で要因分析の対象とした 81 種類の畜舎において豚の屋根内表面に対する形態係数 ( $\phi_{ri-A}$ ) を求めた。計算結果の 1 例として 65 kg 豚の場合について、豚が桁行長と梁間長の中央すなわち舎内中央に位置し、豚の全長方向が桁行方向の場合 ( $\phi'_{ri-A}$ ) と梁間方向の場合 ( $\phi''_{ri-A}$ ) の形態係数を表 6-3 に示す。表 6-3 には、畜舎諸元 (桁行長, 梁間長, 軒高, 屋根傾角) および  $\phi'_{ri-A}$  と  $\phi''_{ri-A}$  との差異も合せて示す。

表 6-3 から、81 種類の畜舎において  $\phi'_{ri-A}$  と  $\phi''_{ri-A}$  はそれぞれ 0.088~0.456 と 0.090~0.465 の範囲である。豚の屋根内表面に対する形態係数は、軒高が 1.5 m と低く、かつ梁間長と桁行長がそれぞれ 17 m および 80 m と長いときには 0.5 に近づき、また軒高が 4.5 m と高く、かつ梁間長と桁行長がそれぞれ 3 m および 10 m と短いときには 0.1 以下になる。また、屋根傾角, 軒高, 梁間長が同じ畜舎において、桁行長が 45 m と 80 m のときの形態係数にはほとんど差がなく、形態係数は桁行長よりも軒高と梁間長によって大きく異ると言える。

梁間長が桁行長に等しいかあるいは桁行長よりも長い畜舎と No. 62 ( $\theta_c=35^\circ$ ,  $H_e=1.5$  m,  $W=17.0$  m,  $L=45.0$  m) の畜舎においては、 $\phi'_{ri-A}$  が  $\phi''_{ri-A}$  よりも大きい。これら以外の畜舎では、 $\phi'_{ri-A}$  は  $\phi''_{ri-A}$  よりも小さい。しかし、81 種類の畜舎において  $\phi'_{ri-A}$  と  $\phi''_{ri-A}$  との差異は最大で 0.039 であり、豚が舎内中央に位置するという条件で豚の屋根内表面に対する形態係数を考える際には、豚の向きを問題にする必要はないと言える。

以上のことは、27 kg 豚および 88 kg 豚においても同様であった。なお、27 kg 豚においては  $\phi'_{ri-A}$  と  $\phi''_{ri-A}$  はそれぞれ 0.085~0.453 と 0.087~0.462 の範囲であり、両者の差異は 0.035 以下であった。また、88 kg 豚においては  $\phi'_{ri-A}$  と  $\phi''_{ri-A}$  はそれぞれ 0.089~0.459 と 0.092~0.467 の範囲であり、両者の差異は 0.038 以下であった。

第 5 章の要因分析に供した放射熱量は、舎内中央の床面上 1.0 m に位置する微小水平面に下向きに入射する放射熱量であった。そこで 81 種類の畜舎において、舎内中央の床面上 1.0 m に位置する微小水平面の屋根内表面に対する形態係数 ( $\phi_{ri-P}$ ) およびこの形態係数と舎内中央に位置する豚の屋根内表面に対する形態係数 ( $\phi'_{ri-A}$ ,  $\phi''_{ri-A}$ ) との比率を表 6-4 に示す。第 5 章においては微小水平面に下向きに入射する放射熱量だけを考慮したため、微小水平面の屋根内表面と天空に対する形態係数は、微小水平面の上半球 (すなわち微小水平面の上方側空間) に

表 6-3 豚の屋根内表面に対する形態係数 (65kg豚の場合)

番号	畜舎諸元				形態係数		備考
	$\theta_r$	$H_e$	W	L	$\phi'_{r1-A}$	$\phi''_{r1-A}$	
1 (1)	5.0	1.5	3.0	10.0	0.285	0.302	0.017
2 (64)	5.0	1.5	3.0	45.0	0.291	0.314	0.023
3 (46)	5.0	1.5	3.0	80.0	0.291	0.314	0.023
4 (28)	5.0	1.5	10.0	10.0	0.403	0.399	-0.004
5 (10)	5.0	1.5	10.0	45.0	0.427	0.441	0.014
6 (73)	5.0	1.5	10.0	80.0	0.427	0.442	0.015
7 (55)	5.0	1.5	17.0	10.0	0.413	0.395	-0.018
8 (37)	5.0	1.5	17.0	45.0	0.455	0.461	0.006
9 (19)	5.0	1.5	17.0	80.0	0.456	0.465	0.009
10 (20)	5.0	3.0	3.0	10.0	0.150	0.159	0.009
11 (56)	5.0	3.0	3.0	45.0	0.163	0.182	0.019
12 (38)	5.0	3.0	3.0	80.0	0.163	0.183	0.020
13 (47)	5.0	3.0	10.0	10.0	0.298	0.295	-0.003
14 (2)	5.0	3.0	10.0	45.0	0.343	0.366	0.023
15 (65)	5.0	3.0	10.0	80.0	0.344	0.370	0.026
16 (74)	5.0	3.0	17.0	10.0	0.326	0.310	-0.016
17 (29)	5.0	3.0	17.0	45.0	0.400	0.414	0.014
18 (11)	5.0	3.0	17.0	80.0	0.403	0.421	0.018
19 (12)	5.0	4.5	3.0	10.0	0.091	0.094	0.003
20 (75)	5.0	4.5	3.0	45.0	0.109	0.122	0.013
21 (30)	5.0	4.5	3.0	80.0	0.110	0.124	0.014
22 (39)	5.0	4.5	10.0	10.0	0.215	0.214	-0.001
23 (21)	5.0	4.5	10.0	45.0	0.276	0.300	0.024
24 (57)	5.0	4.5	10.0	80.0	0.278	0.306	0.028
25 (66)	5.0	4.5	17.0	10.0	0.254	0.243	-0.011
26 (48)	5.0	4.5	17.0	45.0	0.350	0.368	0.018
27 (3)	5.0	4.5	17.0	80.0	0.354	0.377	0.023
28 (40)	20.0	1.5	3.0	10.0	0.283	0.298	0.015
29 (22)	20.0	1.5	3.0	45.0	0.291	0.314	0.023
30 (58)	20.0	1.5	3.0	80.0	0.291	0.314	0.023
31 (67)	20.0	1.5	10.0	10.0	0.381	0.365	-0.016
32 (49)	20.0	1.5	10.0	45.0	0.426	0.438	0.012
33 (4)	20.0	1.5	10.0	80.0	0.427	0.442	0.015
34 (13)	20.0	1.5	17.0	10.0	0.360	0.327	-0.033
35 (76)	20.0	1.5	17.0	45.0	0.452	0.455	0.003
36 (31)	20.0	1.5	17.0	80.0	0.456	0.463	0.007
37 (32)	20.0	3.0	3.0	10.0	0.148	0.156	0.008
38 (14)	20.0	3.0	3.0	45.0	0.163	0.182	0.019
39 (77)	20.0	3.0	3.0	80.0	0.163	0.183	0.020
40 (59)	20.0	3.0	10.0	10.0	0.279	0.271	-0.008
41 (41)	20.0	3.0	10.0	45.0	0.342	0.364	0.022
42 (23)	20.0	3.0	10.0	80.0	0.344	0.369	0.025
43 (5)	20.0	3.0	17.0	10.0	0.284	0.261	-0.023
44 (68)	20.0	3.0	17.0	45.0	0.397	0.407	0.010
45 (50)	20.0	3.0	17.0	80.0	0.402	0.418	0.016

(次頁へ続く)

表 6-3 (続き)

番号	畜舎諸元				形態係数		備考
	$\theta_r$	$H_e$	W	L	$\phi_{r1-A}$	$\phi'_{r1-A}$	
46 (51)	20.0	4.5	3.0	10.0	0.089	0.093	0.004
47 ( 6)	20.0	4.5	3.0	45.0	0.109	0.122	0.013
48 (69)	20.0	4.5	3.0	80.0	0.110	0.124	0.014
49 (78)	20.0	4.5	10.0	10.0	0.202	0.198	-0.004
50 (33)	20.0	4.5	10.0	45.0	0.275	0.298	0.023
51 (15)	20.0	4.5	10.0	80.0	0.278	0.305	0.027
52 (24)	20.0	4.5	17.0	10.0	0.224	0.209	-0.015
53 (60)	20.0	4.5	17.0	45.0	0.347	0.361	0.014
54 (42)	20.0	4.5	17.0	80.0	0.353	0.375	0.022
55 (79)	35.0	1.5	3.0	10.0	0.281	0.293	0.012
56 (34)	35.0	1.5	3.0	45.0	0.291	0.313	0.022
57 (16)	35.0	1.5	3.0	80.0	0.291	0.314	0.023
58 (25)	35.0	1.5	10.0	10.0	0.357	0.333	-0.024
59 (61)	35.0	1.5	10.0	45.0	0.425	0.435	0.010
60 (43)	35.0	1.5	10.0	80.0	0.427	0.441	0.014
61 (52)	35.0	1.5	17.0	10.0	0.313	0.274	-0.039
62 ( 7)	35.0	1.5	17.0	45.0	0.449	0.447	-0.002
63 (70)	35.0	1.5	17.0	80.0	0.455	0.460	0.005
64 (71)	35.0	3.0	3.0	10.0	0.146	0.153	0.007
65 (53)	35.0	3.0	3.0	45.0	0.163	0.182	0.019
66 ( 8)	35.0	3.0	3.0	80.0	0.163	0.183	0.020
67 (17)	35.0	3.0	10.0	10.0	0.260	0.249	-0.011
68 (80)	35.0	3.0	10.0	45.0	0.341	0.361	0.020
69 (35)	35.0	3.0	10.0	80.0	0.343	0.368	0.025
70 (44)	35.0	3.0	17.0	10.0	0.250	0.224	-0.026
71 (26)	35.0	3.0	17.0	45.0	0.393	0.400	0.007
72 (62)	35.0	3.0	17.0	80.0	0.401	0.416	0.015
73 (63)	35.0	4.5	3.0	10.0	0.088	0.090	0.002
74 (45)	35.0	4.5	3.0	45.0	0.109	0.122	0.013
75 (27)	35.0	4.5	3.0	80.0	0.110	0.124	0.014
76 ( 9)	35.0	4.5	10.0	10.0	0.188	0.184	-0.004
77 (72)	35.0	4.5	10.0	45.0	0.274	0.295	0.021
78 (54)	35.0	4.5	10.0	80.0	0.278	0.304	0.026
79 (36)	35.0	4.5	17.0	10.0	0.199	0.183	-0.016
80 (18)	35.0	4.5	17.0	45.0	0.343	0.354	0.011
81 (81)	35.0	4.5	17.0	80.0	0.352	0.372	0.020

1) L: 桁行長 (m) W: 梁間長 (m)  $H_e$ : 軒高 (m)  $\theta_r$ : 屋根傾角 (°)

$\phi_{r1-A}$ : 舎内中央に位置する豚の全長方向が桁行方向の場合における豚の屋根内表面に対する形態係数

$\phi'_{r1-A}$ : 舎内中央に位置する豚の全長方向が梁間方向の場合における豚の屋根内表面に対する形態係数

2) 括弧内の番号は直交配列表  $L_{81}(3^4)$  における実験番号である。

対する形態係数を 1 としたときの値であった。ここでは  $\phi_{r1-P}$  と  $\phi'_{r1-A}$ ,  $\phi''_{r1-A}$  とを比較検討するため、 $\phi_{r1-P}$  は微小水平面の上下面すなわち上半球と下半球を考慮したときの値に換算した。すなわち、表 6-4 の  $\phi_{r1-P}$  は微小水平面の上半球に対する形態係数を 0.5 としたときの値である。なお、微小水平面の屋根内表面に対する形態係数は、第 4 章の (4-19), (4-20) 式から求めた。

表 6-4 から、 $\phi_{r1-P}$  は 0.172~0.499 の範囲であり、軒高が低く、梁間長と桁行長が長くなると  $\phi_{r1-P}$  は大きくなり、軒高が高く、梁間長と桁行長が短くなると  $\phi_{r1-P}$  は小さくなる。これらの傾向は  $\phi_{r1-A}$  の場合 (表 6-3) と



表 6-4 微小水平面の屋根内表面に対する形態係数およびこの形態係数と体重が27, 65, 88kgの  
豚の屋根内表面に対する形態係数との比率

番号	$\phi_{ri-P}$	$\phi_{ri-P}/\phi_{ri-A}$			$\phi_{ri-P}/\phi_{ri-A}''$		
		27kg	65kg	88kg	27kg	65kg	88kg
1	0.473	1.72	1.66	1.60	1.62	1.57	1.53
2	0.474	1.69	1.63	1.57	1.55	1.51	1.48
3	0.474	1.69	1.63	1.57	1.55	1.51	1.48
4	0.493	1.24	1.22	1.21	1.26	1.24	1.22
5	0.497	1.18	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12
6	0.498	1.18	1.17	1.15	1.14	1.13	1.12
7	0.490	1.20	1.19	1.18	1.26	1.24	1.23
8	0.499	1.10	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08
9	0.499	1.10	1.09	1.09	1.08	1.07	1.07
10	0.291	1.99	1.94	1.89	1.89	1.83	1.79
11	0.300	1.89	1.84	1.80	1.69	1.65	1.62
12	0.300	1.88	1.84	1.80	1.69	1.64	1.61
13	0.435	1.49	1.46	1.45	1.50	1.47	1.45
14	0.464	1.37	1.35	1.34	1.29	1.27	1.26
15	0.464	1.36	1.35	1.33	1.27	1.25	1.25
16	0.442	1.38	1.36	1.34	1.44	1.43	1.41
17	0.486	1.22	1.22	1.21	1.19	1.17	1.17
18	0.487	1.22	1.21	1.20	1.17	1.16	1.15
19	0.177	2.01	1.95	1.90	1.95	1.88	1.84
20	0.197	1.82	1.81	1.77	1.66	1.62	1.59
21	0.197	1.82	1.79	1.76	1.64	1.59	1.58
22	0.351	1.66	1.63	1.61	1.67	1.64	1.62
23	0.408	1.49	1.48	1.46	1.38	1.36	1.35
24	0.409	1.49	1.47	1.46	1.36	1.34	1.33
25	0.377	1.51	1.48	1.47	1.58	1.55	1.54
26	0.460	1.33	1.31	1.31	1.26	1.25	1.25
27	0.462	1.32	1.31	1.30	1.24	1.23	1.22
28	0.472	1.73	1.67	1.61	1.64	1.58	1.55
29	0.474	1.69	1.63	1.57	1.56	1.51	1.48
30	0.474	1.69	1.63	1.57	1.55	1.51	1.48
31	0.478	1.28	1.25	1.24	1.33	1.31	1.29
32	0.497	1.18	1.17	1.16	1.15	1.13	1.13
33	0.497	1.18	1.16	1.15	1.14	1.12	1.12
34	0.445	1.26	1.24	1.23	1.38	1.36	1.34
35	0.498	1.11	1.10	1.09	1.10	1.09	1.09
36	0.499	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07
37	0.289	2.01	1.95	1.90	1.91	1.85	1.81
38	0.300	1.89	1.84	1.80	1.70	1.65	1.62
39	0.300	1.88	1.84	1.80	1.69	1.64	1.61
40	0.412	1.51	1.48	1.46	1.55	1.52	1.50
41	0.463	1.37	1.35	1.34	1.29	1.27	1.27
42	0.464	1.36	1.35	1.34	1.27	1.26	1.25
43	0.390	1.40	1.37	1.36	1.51	1.49	1.48
44	0.484	1.23	1.22	1.21	1.20	1.19	1.18
45	0.486	1.22	1.21	1.20	1.17	1.16	1.16

(次頁に続く)

表 6-4 (続き)

番号	$\phi_{T1-P}$	$\phi_{T1-P}/\phi_{T1-A}$			$\phi_{T1-P}/\phi_{T1-A}''$		
		27kg	65kg	88kg	27kg	65kg	88kg
46	0.175	2.01	1.97	1.92	1.97	1.88	1.86
47	0.197	1.84	1.81	1.77	1.66	1.61	1.60
48	0.197	1.82	1.79	1.76	1.64	1.59	1.58
49	0.330	1.68	1.63	1.62	1.70	1.67	1.64
50	0.408	1.50	1.48	1.47	1.39	1.37	1.36
51	0.409	1.49	1.47	1.46	1.36	1.34	1.33
52	0.331	1.51	1.48	1.47	1.61	1.58	1.57
53	0.458	1.33	1.32	1.31	1.28	1.27	1.26
54	0.461	1.32	1.31	1.30	1.24	1.23	1.23
55	0.471	1.74	1.68	1.62	1.66	1.61	1.56
56	0.474	1.69	1.63	1.57	1.56	1.51	1.48
57	0.474	1.69	1.63	1.57	1.55	1.51	1.48
58	0.452	1.29	1.27	1.25	1.37	1.36	1.34
59	0.497	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13
60	0.497	1.18	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12
61	0.386	1.26	1.23	1.23	1.42	1.41	1.39
62	0.496	1.11	1.10	1.10	1.12	1.11	1.10
63	0.499	1.10	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08
64	0.286	2.03	1.96	1.91	1.93	1.87	1.82
65	0.300	1.89	1.84	1.80	1.70	1.65	1.62
66	0.300	1.89	1.84	1.80	1.69	1.64	1.61
67	0.386	1.52	1.48	1.47	1.58	1.55	1.53
68	0.462	1.38	1.35	1.34	1.30	1.28	1.27
69	0.464	1.36	1.35	1.34	1.28	1.26	1.25
70	0.339	1.38	1.36	1.35	1.53	1.51	1.49
71	0.481	1.23	1.22	1.21	1.21	1.20	1.20
72	0.486	1.22	1.21	1.21	1.18	1.17	1.17
73	0.172	2.02	1.95	1.93	1.98	1.91	1.87
74	0.196	1.83	1.80	1.77	1.66	1.61	1.59
75	0.197	1.82	1.79	1.76	1.64	1.59	1.58
76	0.308	1.67	1.64	1.61	1.71	1.67	1.66
77	0.406	1.50	1.48	1.47	1.40	1.38	1.37
78	0.409	1.49	1.47	1.46	1.37	1.35	1.34
79	0.292	1.50	1.47	1.46	1.61	1.60	1.58
80	0.454	1.34	1.32	1.32	1.30	1.28	1.28
81	0.461	1.32	1.31	1.30	1.25	1.24	1.24

- 1)  $\phi_{T1-P}$  : 舍内中央の床面上 1.0m に位置する微小水平面の屋根内表面に対する形態係数  
 $\phi_{T1-A}$ ,  $\phi_{T1-A}''$  : 表 6-3 に同じ
- 2) 番号は表 6-3 における番号と同じである。

同じである。

前述したように豚の屋根内表面に対する形態係数は豚の向きによる差異が小さいことから、表 6-4 については  $\phi_{T1-A}$  と  $\phi_{T1-A}''$  を総括して検討する。

表 6-4 から、81種類の畜舎において  $\phi_{T1-A}$  に対する  $\phi_{T1-P}$  の比は 27kg 豚では 1.08~2.03, 65kg 豚では 1.07~1.97, 88kg 豚では 1.07~1.93 であり、すべての場合において 1 以上である。このように  $\phi_{T1-P}$  が  $\phi_{T1-A}$  よりも大きいことは、微小水平面と円筒との形状の差異、および床面から微小水平面までと床面から円筒までの高さの違いによることは自明である。

豚が大きくなるにつれて  $\phi_{r1-A}$  に対する  $\phi_{r1-P}$  の比は小さくなる傾向にある。これは、豚が大きくなるにつれて床面から円筒上端までの高さが 27 kg 豚では 39.3 cm, 65 kg 豚では 50.0 cm, 88 kg 豚では 60.6 cm (表 6-2 参照) と微小水平面の高さである 1 m に近づくためであると考えられる。また、屋根傾角が大きく、軒高が高く、そして梁間長と桁行長が短くなるにつれて  $\phi_{r1-A}$  に対する  $\phi_{r1-P}$  の比は大きくなり、これらと反対の場合にはその比は 1 に近づく傾向にある。

表 6-4 から豚体を微小水平面とほぼ見なせるのは, Nos. 9, 36, 63 すなわち軒高が 1.5 m, 梁間長が 17 m, 桁行長が 80 m のときであると言える。換言すれば, このような畜舎においては, 屋根内表面から微小水平面に入射する放射熱量は屋根内表面から豚体表面に入射する放射熱量と見なすことができる。

豚の屋根内表面・天空に対する形態係数 ( $\phi_{r1-A}$ ,  $\phi_{s-A}$ ) と微小水平面の屋根内表面・天空に対する形態係数 ( $\phi_{r1-P}$ ,  $\phi_{s-P}$ ) との比率を 3 種類の豚体重別に表 6-5 に示す。表 6-5 は, 81 種類の畜舎において求めた比率の平均値 (信頼率 95%) である。

表 6-5 豚の屋根内表面・天空に対する形態係数 ( $\phi_{r1-A}$ ,  $\phi_{s-A}$ ) と微小水平面の屋根内表面・天空に対する形態係数 ( $\phi_{r1-P}$ ,  $\phi_{s-P}$ ) との比率

供試豚	$\phi_{r1-P}/\phi'_{r1-A}$	$\phi_{r1-P}/\phi''_{r1-A}$	$\phi_{s-P}/\phi'_{s-A}$	$\phi_{s-P}/\phi''_{s-A}$
27kg豚	1.50±0.06	1.44±0.05	0.34±0.05	0.35±0.05
65kg豚	1.47±0.06	1.42±0.05	0.35±0.06	0.36±0.06
88kg豚	1.45±0.06	1.40±0.05	0.35±0.06	0.37±0.06

- 1) 比率は81個の平均値 (信頼率95%) である。
- 2)  $\phi'_{r1-A}$ ,  $\phi''_{r1-A}$ : 表 6-3 に同じ  $\phi_{r1-P}$ : 表 6-4 に同じ  
 $\phi'_{s-A}$ : 舎内中央に位置する豚の全長方向が桁行方向の場合における豚の天空に対する形態係数  
 $\phi''_{s-A}$ : 舎内中央に位置する豚の全長方向が梁間方向の場合における豚の天空に対する形態係数  
 $\phi_{s-P}$ : 舎内中央の床面上 1.0 m に位置する微小水平面の天空に対する形態係数

表 6-5 から, 3 種類の豚において微小水平面の屋根内表面に対する形態係数は豚の屋根内表面に対する形態係数の約 1.4~1.5 倍であり, 微小水平面の天空に対する形態係数は豚の天空に対する形態係数の約 0.3~0.4 倍である。なお, 豚の向きによる比率の差異は 5% 水準で有意でなかった。

第 5 章の要因分析に供した舎内放射熱量は第 4 章に示した (4-1) 式と (4-2) 式から算定したものであり, このとき用いた  $\phi_{r1-P}$  と  $\phi_{s-P}$  は微小水平面の上半球に対する形態係数が 1 であることを基準にしている。表 6-5 の比率を (4-1) 式と (4-2) 式に用いた形態係数と同じ基準で評価すると, 比率は表 6-5 に示した値の 2 倍になる。すなわち, 舎内中央の床面上 1.0 m に位置する微小水平面に下向きに入射する放射熱量を算定する際に用いた  $\phi_{r1-P}$  と  $\phi_{s-P}$  は, 体重が 27~88 kg の豚が舎内中央に位置するときの  $\phi_{r1-A}$  と  $\phi_{s-A}$  のそれぞれ約 2.8~3.0 倍と約 0.6~0.8 倍であると言える。

舎内中央に位置する豚に上半球から下向きに入射する放射熱量は, (4-1) 式と (4-2) 式における微小水平面の屋根内表面 ( $\phi_{r11-P}$ ,  $\phi_{r12-P}$ ) と天空 ( $\phi_{s-P}$ ) に対する形態係数を豚の屋根内表面と天空に対する形態係数 ( $\phi_{r11-A}$ ,  $\phi_{r12-A}$ ,  $\phi_{s-A}$ ) で置換えることにより算定できる。ただし, 豚に入射する直達日射量は微小水平面の場合と大きく異なるので, CLAPPERTON ら<sup>133)</sup>が提示した羊に入射する直達日射量の算定方法を用いて別途求める必要がある。

ここでは豚の放射熱負荷量を個々の畜舎に対して新たに算定することを行わず, 豚の放射熱負荷量に基づいた要因効果は微小水平面に基づいて得た要因分析結果から総括的に推定する。

前述したように, 第 5 章の分析に供した 81 種類の畜舎においては微小水平面と豚体表面に関する形態係数の間には総括的に次の関係が成立つ。

$$\phi_{ri-P} = (2.8 \sim 3.0) \phi_{ri-A} \quad (6-29)$$

$$\phi_{s-P} = (0.6 \sim 0.8) \phi_{s-A} \quad (6-30)$$

したがって、微小水平面に下向きに入射する放射熱量に基づいた第5章の要因効果推定値(表5-8, 5-10, 5-12, 5-14)は、豚の有効放射面積1m<sup>2</sup>当りに入射する放射熱量に基づいた場合の要因効果推定値を、屋根内表面から射出する放射熱量および屋根内表面で反射する放射熱量に関しては約2.8~3.0倍だけ過大評価し、また天空から直接到達する天空日射量と大気放射量に関しては約0.6~0.8倍だけ過小評価していると言える。なお、微小水平面に直接入射する直達日射量についての要因分析結果が豚体表面を基準にしたときよりも著しく過小評価であることは、微小水平面と豚体表面との形状的な差異から自明である。

第5章に示した寄与率(表5-7, 5-9, 5-11, 5-13)は、微小水平面に入射する放射熱量に及ぼす畜舎諸元の相対的な影響の度合いを表している。したがって、分散分析に供する放射熱量が豚体表面に基づいた場合においても畜舎諸元の相対的な影響の度合いや放射熱量を最小にする畜舎諸元の組合せは、豚体表面に直接入射する直達日射量の影響を除いて、微小水平面に基づいた場合とほぼ同じであると推察できる。

以上から、第5章に示した要因分析結果は、豚体表面に下向きに入射する放射熱量に基づいた場合の要因効果を定性的にはほぼ評価していると考えられるが、定量的には屋根内表面が関与する放射熱量を過大評価し、天空から直接到達する放射熱量を過小評価していると言える。

現存畜舎においては、畜舎周囲の地物、畜舎の外壁および隣合う豚などのために天空から個々の豚に直接入射する放射熱量は小さいと推察でき、天空から直接到達する放射熱量についての過小評価はそれほど問題にならないと考えられる。また、第5章の5.4.3節において指摘したように、現存畜舎内の放射熱環境を検討する際には屋根内表面からの長波長放射熱量だけを考慮すれば十分である。これらのことから、現存畜舎内の放射熱環境を豚の放射熱負荷量に基づいて評価するときには、微小水平面に基づいて得られた長波長放射熱量に関する要因効果を定性的にはそのまま適用し、定量的には約1/3倍して適用すれば良いと考えられる。

第5章に示した予測式((5-6)式)によれば、舎内中央の床面上1.0mに位置する微小水平面に下向きに入射する日中(9~17時)の長波長平均放射熱量は畜舎の諸元によって異なり、367~698 kcal/m<sup>2</sup>・hの範囲である。この範囲は、本節で述べた方法に基づいて豚体表面に下向きに入射する長波長放射熱量に換算すると豚の有効放射面積1m<sup>2</sup>当り184~287 kcal/hとなる。ここで下向き

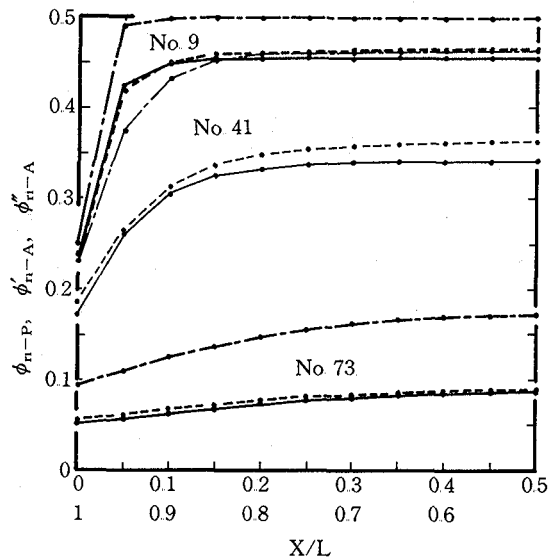


図6-15 切妻屋根式開放型畜舎の梁間長中央に位置する微小水平面と65kg豚の屋根内表面に対する形態係数の桁行方向の分布

X/L: 桁行長(L)に対する桁行の一端からの距離(X)の比

$\phi_{ri-P}$ : 床面上1.0mに位置する微小水平面の屋根内表面に対する形態係数(---)

$\phi'_{ri-A}$ : 全長方向が桁行方向の場合の豚の屋根内表面に対する形態係数(—)

$\phi''_{ri-A}$ : 全長方向が梁間方向の場合の豚の屋根内表面に対する形態係数(-·-·-)

Nos. 9, 41, 73: 表6-3 参照

の放射熱を受ける豚体表面積は有効放射面積のほぼ半分と考えると、下向き放射熱を受ける豚体表面の単位面積当りに入射する放射熱量は368～574 kcal/hとなる。したがって、上半球に対する平均放射温度は21.4～56.2℃である。この平均放射温度の変化範囲34.8℃は第3章に提示した肥育豚の呼吸数を指標とする暑熱環境評価温度((3-5), (3-6)式)では約3.5℃の変化範囲に相当する。また、暑熱環境評価温度の変化範囲3.5℃は気温が約5.0～5.8℃だけ変化することと同等である。換言すれば、畜舎諸元の選択を實際上可能な限り適切に行えば豚体に入射する長波長放射熱量を抑制することができ、その抑制効果は肥育豚の呼吸数反応で評価すると気温を約5～6℃降下させることに相当すると言える。

第5章と本章においては、微小水平面と豚が舎内の中央に位置する場合についてそれぞれ検討を行った。ここでは、舎内の中央以外に微小水平面と豚が位置するときの屋根内表面に対する形態係数( $\phi_{r1-P}$ ,  $\phi_{r1-A}$ )を65 kg豚の場合について、表6-3に示したNos 9, 41, 73の畜舎を例として図6-15と図6-16に示す。図6-15は梁間長の中央における桁行方向の $\phi_{r1-P}$ と $\phi_{r1-A}$ の分布であり、図6-16は桁行長の中央における梁間方向の分布である。なお、No. 9およびNo. 73の舎内中央における $\phi_{r1-P}$ と $\phi_{r1-A}$ は81種類の畜舎の中でそれぞれ最大値および最小値であり、No. 41はNo. 9とNo. 73の中間規模の畜舎である。

図6-15と図6-16から以下のことが総括的に言える。

- ① 桁行方向と梁間方向における $\phi_{r1-A}$ の変化は $\phi_{r1-P}$ の変化と同じ傾向である。
- ② 舎内の中央における $\phi_{r1-A}$ は舎内の外周縁部を除いた他の位置における $\phi_{r1-A}$ と大差がなく、このことは $\phi_{r1-P}$ についても同様である。
- ③ 舎内の外周縁部とは、桁行方向と梁間方向において畜舎の外周からそれぞれ桁行長と梁間長の0.1～0.2倍の位置までの範囲である。

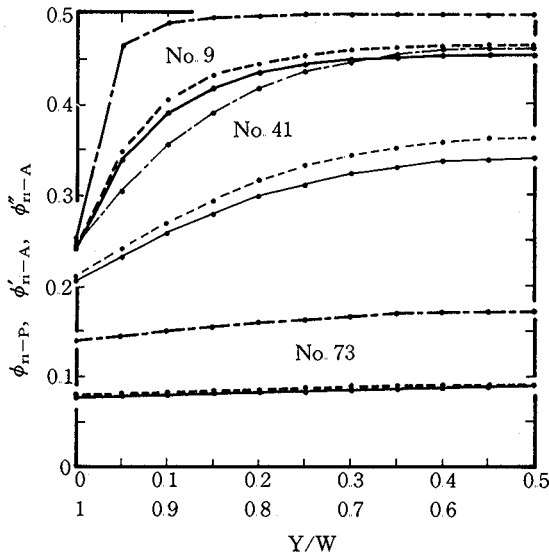


図6-16 切妻屋根式開放型畜舎の桁行長中央に位置する微小水平面と65 kg豚の屋根内表面に対する形態係数の梁間方向の分布

Y/W: 梁間長(W)に対する梁間の一端からの距離(Y)の比

他の記号および番号は図6-15に同じである。

- ④  $\phi_{r1-A}$ と $\phi_{r1-P}$ との差異は、舎内のいかなる位置においても小さい。

①～④は表6-3に示した他の畜舎においても、また27, 88 kg豚の場合についても同様の傾向であった。これらのことから、舎内の中央に位置する微小水平面や豚に基づいて明らかにした放射熱量に関する要因効果は、外周縁部を除いた舎内全体に対しても総括的に適用できると考えられる。

以上の結果は、豚が正姿勢で起立し、周囲には他の豚がいない条件の場合である。豚の屋根内表面に対する形態係数に及ぼす豚の姿勢や周囲の豚の影響については今後に残された問題である。

鶏や牛においても屋根内表面と天空に対する形態係数が明らかになれば本節と同様な解析法で第5章の要因分析結果を鶏や牛の放射熱負荷量で評価できるが、鶏や牛の形態係数についてもまた今後に残された問題である。

## 6.5 摘 要

第5章において微小水平面に下向きに入射する放射熱量に基づいて得た畜舎諸元（屋根の熱貫流抵抗，屋根内外表面の日射吸収率・放射率，地表面の種類，桁行長，梁間長，軒高，桁行方位，屋根勾配）の要因効果を家畜の体表面に入射する放射熱量に基づいて評価するために，豚（豚は平坦な床に正姿勢で起立し，周囲には他の豚はいないものとする）を対象として，放射伝熱における形態係数に関して豚と等価な円筒モデルを設定し，円筒モデルの屋根内表面・天空に対する形態係数と微小水平面の屋根内表面・天空に対する形態係数を比較検討した。次いで，豚体表面に入射する放射熱量に及ぼす畜舎諸元の要因効果を微小水平面に基づいて得た要因分析結果から推定した。なお，供試豚は生体重が27, 65, 88 kgの剝製であり，1頭につき86点の位置において立体角投射カメラで供試豚を撮影したフィルムから微小面の豚に対する形態係数を実測し，この実測値を用いて数理解析により円筒モデルの半径，長さ，中心位置を設定した。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 形態係数に関して豚と等価な円筒の半径は27 kg豚，65 kg豚および88 kg豚においてそれぞれ12.8, 15.7, 19.0 cmであり，円筒の長さはそれぞれ79.2, 110.6, 124.8 cmであった。また，3種類の豚とも円筒の中心位置は，後幅の中央における全長方向の豚体断面において，尾の付け根からの距離が全長の約45%であり，床面からの高さが豚の最大高さの約60%であった。
- (2) 第5章の要因分析に供した81種類の畜舎（桁行長が10, 45, 80 m，梁間長が3, 10, 17 m，軒高が1.5, 3, 4.5 m，屋根傾角が5, 20, 35度の諸元を組合せたもの）において，桁行長と梁間長との中央すなわち舎内中央に位置する豚の全長方向が桁行方向の場合，豚の屋根内表面に対する形態係数は27 kg豚においては0.085～0.453, 65 kg豚においては0.088～0.456, 88 kg豚においては0.089～0.459であった。
- (3) 同様に，豚の全長方向が梁間方向の場合，豚の屋根内表面に対する形態係数は27 kg豚においては0.087～0.462, 65 kg豚においては0.090～0.465, 88 kg豚においては0.092～0.467であった。
- (4) 81種類の畜舎において，舎内中央の床面上1.0 mに位置する微小水平面の屋根内表面に対する形態係数と天空に対する形態係数（微小水平面の上半球に対する形態係数は0.5を基準にしている）は，それぞれ舎内中央に位置する27～88 kg豚の屋根内表面に対する形態係数と天空に対する形態係数の約1.4～1.5倍と約0.3～0.4倍であった。これらの比率は，第5章における形態係数の基準（微小水平面の上半球に対する形態係数を1としている）に従うと約2.8～3.0倍と約0.6～0.8倍になる。
- (5) したがって，第5章に示した微小水平面に入射する放射熱量に基づいた要因分析結果は，豚体表面に下向きに入射する放射熱量に及ぼす畜舎諸元の相対的な影響の度合いや豚の放射熱負荷量を最小にする畜舎諸元の組合せについてはほぼ同じ評価をしているが，定量的には屋根内表面が関与する放射熱量を約2.8～3.0倍だけ過大評価し，天空から直接到達する放射熱量を約0.6～0.8倍だけ過小評価していると言える。
- (6) 第3章に示した肥育豚の呼吸数を指標とした暑熱環境評価温度，第5章の要因分析結果から得た舎内放射熱量の予測式および本章での解析結果から，舎内中央の床面に位置する豚の体表面に下向きに入射する日中の長波長平均放射熱量は畜舎の諸元によって異なり184～287 kcal/m<sup>2</sup>・hの範囲であり，この変化範囲は豚の呼吸数反応で評価すると気温が約5～6°Cの変化に相当すると言える。
- (7) 舎内の中央に位置する微小水平面や豚の屋根内表面に対する形態係数は，舎内の外周縁部（桁行方向と梁間方向において畜舎の外周からそれぞれ桁行長と梁間長の0.1～0.2倍の位置までの範囲）を除いた他の位置における形態係数と大差がなかった。このことから，舎内の中央に位置する微小水平面や豚に入射する放射

熱量に及ぼす畜舎諸元の影響は、外周縁部を除いた舎内全体にも総括的に適用できると言える。

- (8) 豚の全長方向が桁行方向の場合と梁間方向の場合における豚の屋根内表面に対する形態係数の差異は、舎内の中央だけでなく、他の位置においても小さかった。このことから、舎内の放射熱環境を検討する際には豚の向きを問題にする必要はないと考えられる。なお、周囲に他の豚がいるときの豚の屋根内表面・天空に対する形態係数、豚の姿勢による形態係数の差異、豚の有効放射面積および鶏や牛の形態係数についての検討は今後に残された問題である。

## 第7章 結 論

畜舎内の暑熱環境を家畜の生理反応で評価する温熱指標を提示することおよび畜舎内の家畜に入射する放射熱量を可能な限り小さくする畜舎諸元を提示することを目的として、まず夏季における開放型畜舎内の放射熱環境の実態を明らかにし、次に肥育豚を供試家畜として家畜の生理反応（呼吸数、直腸温度、心拍数）に及ぼす放射熱の影響と生理反応を指標とした暑熱環境の評価について検討した。さらに、畜舎内の放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響を数値解析し、この影響を家畜の放射熱負荷量で評価するために放射伝熱に関する家畜の形態係数について肥育豚を対象として検討した。本研究で得られた主要な結果は以下のとおりである。

- (1) わが国の温暖地の夏季において日中における現存畜舎内の気温の平均値は約 27～34℃であり、舎内中央の微小水平面以下向きに入射する全波長放射熱量の平均値は、約 400～500 kcal/m<sup>2</sup>・h（全波長放射熱量に占める短波長放射熱量の割合は約 2% 以下である）である。

舎内の放射熱量に及ぼす屋根外表面の日射吸収率と屋根の熱貫流抵抗の影響は大きく、熱貫流抵抗の小さい屋根において屋根外表面の日射吸収率を小さくすることは舎内の放射熱量を減じるために有効である。また、舎内の放射熱量に及ぼす畜舎形状、特に屋根形状の影響も大きい。この点についての詳細な検討は今後に残された問題である。

- (2) 気温が 30℃ と 35℃ でそれぞれ相対湿度が 40, 60, 80% の暑熱環境に肥育豚を感作したときの呼吸数の応答は直腸温度の応答よりも速く、呼吸数の変化幅は直腸温度の変化幅よりも大きい。また、気温が 30℃ で相対湿度が 60% の環境条件における放射熱の照射は呼吸数の増加と直腸温度の上昇を助長し、放射熱の影響は気温が 35℃ あるいはそれ以上の気温条件における影響とほぼ同じであり、放射熱の照射終了後においても呼吸数と直腸温度に及ぼす放射熱の影響は残存する。一方、心拍数に及ぼす気温、湿度および放射熱の影響は顕著でない。

これらのことから、暑熱環境を評価する生理反応としては 3 種類の生理反応の中で呼吸数をもっとも便利な指標であるが、平衡状態に達するまでの呼吸数にはばらつきが大きいことに留意すべきである。また、暑熱環境において肥育豚の熱ストレスを緩和するためには放射熱量を小さくすることが重要である。

- (3) 肥育豚の呼吸数を指標として暑熱環境を一元的に評価する暑熱環境評価温度を次式のように提示した。

$$EET = at_d + bt_w + ct_{mr}$$

ただし

$$a = 0.6 \sim 0.7 \quad b = 0.2 \sim 0.3 \quad c = 0.1$$

$$a + b + c = 1$$

ここで EET,  $t_d$ ,  $t_w$  および  $t_{mr}$  はそれぞれ暑熱環境評価温度 (°C)、乾球温度 (°C)、湿球温度 (°C) および平均放射温度 (°C) であり、 $a$ ,  $b$ ,  $c$  は重みである。ただし、上式は乾球温度 24.2～30.4℃、湿球温度 22.3～26.6℃、風速 0.1～1.2 m/s、平均放射温度 23.3～87.8℃（放射熱量 376～827 kcal/m<sup>2</sup>・h）、呼吸数 22～215 回/分の条件で

得たものであり、広範囲の温熱環境に対する一般的な環境評価温度については今後に残された問題であると同時に、他の家畜についても上式と同様な環境評価温度の提示が望まれる。

(4) 夏季の畜舎内における放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響を定量的に解析するために、代表的な畜舎型式である切妻屋根式開放型畜舎を対象として気象条件と畜舎諸元（畜舎の形状的な要素の他に、建築材料の熱特性値や畜舎周囲の地表面の種類なども含める）をパラメーターとした舎内放射熱量（舎内の微小水平面に下向きに入射する短波長放射熱量と長波長放射熱量）の理論的な算定式を提示した。パラメーターは以下のとおりである。

#### ①気象条件

- 直達日射量
- 天空日射量
- 大気放射量
- 気温
- 絶対湿度
- 風速

#### ②畜舎条件

- 桁行方位
- 桁行長
- 梁間長
- 軒高
- 屋根勾配
- 屋根外表面の日射吸収率
- 屋根外表面の放射率
- 屋根内表面の日射吸収率
- 屋根内表面の放射率
- 屋根葺材の熱伝導抵抗・熱容量

#### ③地表面条件

- 地表面の日射吸収率
- 地表面の放射率
- 地表面の蒸発比
- 地表層土壌の熱伝導抵抗・熱容量

計算値と実測値の比較検討の結果によれば、舎内長波長放射熱量の算定式は妥当である。また、舎内短波長放射熱量の算定式については計算値と実測値の変動の傾向はほぼ対応しているが、定量的には畜舎周囲の建物や雲による日射量の変化の影響を十分に評価していないことが問題として残されている。しかしながら、現存畜舎内においては全波長放射熱量に占める短波長放射熱量の割合が小さいことから、短波長放射熱量も含めて舎内放射熱量の算定式は舎内放射熱量に及ぼす畜舎諸元の影響を解析するために使用可能である。

(5) 快晴・無風の暑熱日において、切妻屋根式開放型畜舎の舎内中央の床面上1.0mに位置する微小水平面に下向きに入射する短波長・長波長放射熱量（9～17時の平均値と最大値）に及ぼす畜舎諸元の影響、舎内放射熱量の予測式および舎内の放射熱量を最小にする畜舎諸元は以下のとおりである。

#### (5.1) 舎内短波長放射熱量について

舎内短波長平均放射熱量に有意な影響を及ぼす因子は、影響の度合いの大きい順に ① 梁間長、② 軒高、③ 桁行方位、④ 屋根勾配、⑤ 屋根内表面の日射吸収率、⑥ 桁行長、⑦ 地表面の種類である。全変動の約68%はこれらの因子によるものであり、特に全変動の約54%は梁間長と軒高によるものである。有意を示した要因変動の寄与率の合計は約68%であることから本分析で取上げなかった要因効果の中に有意な影響を及ぼす要因効果が残されている可能性があるが、この点については今後に残された問題である。

舎内短波長放射熱量は要因効果推定値（表5-8、5-10参照）の加減演算だけで次式から予測できる。

$$Q_{mn} = [\overline{F_{4,n4}} + \overline{F_{6,n6}} + \overline{F_{7,n7}} + \overline{F_{10,n10}} + \overline{F_{11,n11}} + \overline{F_{8,n8}} \times \overline{F_{9,n9}} - 440.6] \pm 35.2$$

$$Q_{mx} = [\overline{F_{6,n6}} + \overline{F_{7,n7}} + \overline{F_{8,n8}} \times \overline{F_{9,n9}} + \overline{F_{10,n10}} \times \overline{F_{11,n11}} - 669.2] \pm 113.9$$



ここで

$Q_{mn}$ : 舍内短波長平均放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$Q_{mx}$ : 舍内短波長最大放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$\overline{F_{4,n4}}, \overline{F_{6,n6}}, \overline{F_{7,n7}}, \overline{F_{10,n10}}, \overline{F_{11,n11}}$ : それぞれ屋根内表面の日射吸収率, 地表面の種類, 桁行長, 桁行方位, 屋根勾配の主効果の要因効果推定値 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$\overline{F_{8,n8} \times F_{9,n9}}, \overline{F_{10,n10} \times F_{11,n11}}$ : それぞれ梁間長と軒高, 桁行方位と屋根勾配との交互作用の要因効果推定値 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$n4, n6 \sim n11$ : 因子の水準

舍内短波長平均放射熱量を最小にする畜舎諸元は以下のとおりである。

- ① 梁間長は軒高が4.5mのときには17m以上であり, 軒高が3mのときには10m以上である。また, 軒高が1.5mのときには梁間長は3m以上である。
- ② 桁行方位は東一西である。
- ③ 屋根傾角は20度以下である。
- ④ 屋根内表面の日射吸収率は0.9以上である。
- ⑤ 桁行長は45m以上である。
- ⑥ 畜舎周囲の地表面は草地, 裸地, コンクリートの中で裸地である。

舍内短波長最大放射熱量を最小にする畜舎諸元は ①屋根内表面の日射吸収率は関係しないこと, および ②地表面は裸地あるいはコンクリートであること以外は上述した短波長平均放射熱量の場合と同じである。

#### (5.2) 舍内長波長放射熱量について

舍内長波長平均放射熱量に有意な影響を及ぼす因子は, 影響の度合いの大きい順に ①屋根外表面の日射吸収率, ②梁間長と軒高, ③屋根勾配, ④屋根の熱貫流抵抗, ⑤屋根内表面の放射率, ⑥地表面の種類, ⑦屋根内表面の日射吸収率, ⑧屋根外表面の放射率, ⑨桁行方位であり, 全変動の約90%はこれらの因子によるものである。

舍内長波長放射熱量は要因効果推定値 (表5-12, 5-14 参照) の加減演算だけで次式から予測できる。

$$Q'_{mn} = [-2\overline{F_{1,n1}} + \overline{F_{3,n3}} + \overline{F_{4,n4}} + \overline{F_{6,n6}} - \overline{F_{8,n8}} + \overline{F_{10,n10}} \\ + \overline{F_{11,n11}} + \overline{F_{1,n1} \times F_{2,n2}} + \overline{F_{1,n1} \times F_{5,n5}} + \overline{F_{1,n1} \times F_{8,n8}} \\ + \overline{F_{8,n8} \times F_{9,n9}} - 2541.4] \pm 20.1$$

$$Q'_{mx} = [-2\overline{F_{1,n1}} + \overline{F_{3,n3}} + \overline{F_{4,n4}} + \overline{F_{6,n6}} - \overline{F_{8,n8}} + \overline{F_{11,n11}} \\ + \overline{F_{1,n1} \times F_{2,n2}} + \overline{F_{1,n1} \times F_{5,n5}} + \overline{F_{1,n1} \times F_{8,n8}} \\ + \overline{F_{8,n8} \times F_{9,n9}} - 2110.3] \pm 23.0$$

ここで

$Q'_{mn}$ : 舍内長波長平均放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$Q'_{mx}$ : 舍内長波長最大放射熱量 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$\overline{F_{1,n1}}, \overline{F_{3,n3}}, \overline{F_{4,n4}}, \overline{F_{6,n6}}, \overline{F_{8,n8}}, \overline{F_{10,n10}}, \overline{F_{11,n11}}$ : それぞれ屋根の熱貫流抵抗, 屋根外表面の放射率, 屋根内表面の日射吸収率, 地表面の種類, 梁間長, 桁行方位, 屋根勾配の主効果の要因効果推定値 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

$\overline{F_{1,n1} \times F_{2,n2}}, \overline{F_{1,n1} \times F_{5,n5}}, \overline{F_{1,n1} \times F_{8,n8}}, \overline{F_{8,n8} \times F_{9,n9}}$ : それぞれ屋根の熱貫流抵抗と屋根外表面の日射吸収率, 屋根内表面の放射率, 梁間長との交互作用および梁間長と軒高との交互作用の要因効果推定値 (kcal/m<sup>2</sup>·h)

n1~n6, n8~n11: 因子の水準

舎内長波長平均放射熱量を最小にする畜舎諸元は以下のとおりである。

(a) 屋根外表面の日射吸収率が0.2以下の場合

- ① 屋根葺材は亜鉛鉄板であり, 屋根外表面の放射率は0.9以上 (すなわち屋根外表面は一般的な白色塗装面), 屋根内表面の日射吸収率と放射率はそれぞれ0.55以下と0.2以下 (すなわち屋根内表面は金属光沢面) である。
- ② 軒高は4.5m以上と高いほうがよく, かつ梁間長は3m以下と短いほうがよい。
- ③ 屋根傾角は5度以下である。
- ④ 畜舎周囲の地表面は草地, あるいは裸地である。
- ⑤ 桁行方位は東一西, あるいは南一北である。
- ⑥ 桁行長は関係しない。

(b) 屋根外表面の日射吸収率が0.55以上の場合

- ① 屋根葺材は亜鉛鉄板と厚さ15mm以上の発泡ポリスチレンである。
- ② 屋根外表面の放射率は0.9以上 (すなわち屋根外表面は一般的な塗装面) である。
- ③ 屋根内表面の日射吸収率は0.55以下 (すなわち屋根内表面は明色あるいは白色) である。
- ④ 厚さ15mm程度の発泡ポリスチレン断熱材を用いた屋根では屋根内表面の放射率は0.55以下 (すなわち屋根内表面は光沢面) であり, 厚さ30mm以上の発泡ポリスチレンを用いた屋根では屋根内表面の放射率は関係しない。
- ⑤ 軒高と梁間長, 屋根傾角, 畜舎周囲の地表面, 桁行方位および桁行長については(a)と同じである。

舎内長波長最大放射熱量を最小にする畜舎諸元は桁行方位が関係しないこと以外は上述した長波長平均放射熱量の場合と同じである。

上述した舎内放射熱量の予測式は設計の立場からは安全側にあり, 十分に有効である。特に, 直達日射が舎内に到達しない限り, 現存畜舎内の放射熱量の予測は長波長放射熱量の予測式だけを適用すれば実用上は十分である。なお, 屋根形状が切妻屋根に類似したモニター屋根やセミモニター屋根の畜舎においても上述の要因分析結果はほぼ適用できるが, 屋根形状が切妻屋根と大きく異なるかまぼこ屋根の畜舎を対象にした要因分析は今後に残された問題である。

(6) 放射伝熱に関する豚 (豚は平坦な床に正姿勢で起立し, 周囲には他の豚はいないものとする) の形態係数と等価な円筒モデルは豚の尾の付け根から耳の付け根 (すなわち体長) にかけて水平に位置し, 床面から円筒軸までの高さは豚の最大高さの約60%であり, 円筒の直径は後幅にほぼ等しい。

上述の円筒を豚の立体モデルとして用いて豚の屋根内表面・天空に対する形態係数について検討した結果, (5) に述べた微小水平面に入射する放射熱量に基づいた要因分析結果は豚の放射熱負荷量に及ぼす畜舎諸元の相対的な影響の度合いや放射熱負荷量を最小にする畜舎諸元の組合せについてはほぼ同じ評価をしているが, 定量的には屋根内表面が関与する放射熱量を約2.8~3.0倍だけ過大評価し, 天空から直接到達する放射熱量を約0.6~0.8倍だけ過小評価している。このことから, 舎内中央の床面に位置する豚の体表面に下向きに入射する日中の長波長平均放射熱量は畜舎の諸元によって異なり184~287 kcal/m<sup>2</sup>·hの範囲である。この長波長放射熱量の変化範囲

は豚の呼吸数反応から評価すると気温が約5~6°Cの変化に相当する。また、舎内の中央に位置する微小水平面や豚に入射する放射熱量に基づいた要因分析結果は外周縁部を除いた舎内全体にも総括的に適用できる。なお、周囲に他の豚がいるときの豚の屋根内表面・天空に対する形態係数、豚の姿勢による形態係数の差異および鶏や牛の形態係数などについては今後に残された問題である。

## 謝 辞

本研究は昭和52年から開始したものであり、本研究の開始当初から本論文の取りまとめに至るまで、筑波大学・相原良安教授には懇切丁寧な御指導を終始賜った。また、筑波大学・江崎春雄教授、同・清水寛一教授、同・小中俊雄教授および同・吉崎繁教授には本論文の御校閲をいただき、貴重な御指導と御助言を賜った。ここに謹んで深謝の意を表する次第である。

次に、長期間にわたり御指導と御協力をいただいた筑波大学・山口智治講師に深く謝意を表する。また、動物用人工気象室での実験に際して御指導と御協力をいただいた農林水産省畜産試験場・宍戸弘明氏（現農林水産省北海道農業試験場）、同・山岸規昭氏（現農林水産省北海道農業試験場）、同・人工気象室関係諸氏および全農飼料畜産中央研究所・大兼政雄二氏に謝意を表する。

測定畜舎の御提供をいただいた池田清、大村茂、松本弘の諸氏に謹んで謝意を表するとともに、香川大学農学部付属農場での測定に際し種々の御便益をいただいた香川大学・大島光昭助教授（現名古屋大学）、同・上田博史助教授、同・大松潔技官および同・農学部付属農場関係諸氏に謝意を表する。

マルチカラーデータシステムの使用について御便益をいただいた筑波大学・安仁屋政武講師および表面温度測定用熱電対箔の使用法について御教示をいただいた農林水産省北海道農業試験場・片山秀策氏に謝意を表する。また、測定に御協力をいただいた阿部敏光、岩瀬秀一、佐藤薫、川添さつき、増田幸雄、松本城二の諸氏（香川大学農学部卒業生）に感謝する。

最後に、昭和56年度には文部省内地研究員として筑波大学農林工学系において本研究を実施する機会が与えられたこと、また昭和52、54、57、58年度には本研究に対して文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)が交付されたことを記し、ここに関係各位にお礼を申し上げる。さらに、本研究における計算には筑波大学学術情報処理センター計算機システム FACOM M-200 および香川大学計算センター FACOM 230 の電子計算機を使用したことを付記し、両センターの関係各位にお礼を申し上げる。

## 参 考 文 献

- 1) BIANCA, W. (1968): Thermoregulation; In E. S. E. HAFEZ (Ed) Adaptation of Domestic Animals, Lea & Febiger, 97-118.
- 2) 山本禎紀 (1981): 家畜と環境; 清水寛一他(編) 畜産学, 文永堂, 97-111.
- 3) BIANCA, W. (1976): The significance of meteorology in animal production, International Journal of Biometeorology, 20, 139-156.
- 4) KLEIBER, M. (1975): The Fire of Life, R E Krieger Publishing Company, 297-332
- 5) ESMAY, M. L. (1978): Principles of Animal Environment, AVI Publishing Company, 1-166
- 6) 三村 耕・森田琢磨 (1980): 家畜管理学, 養賢堂, 11-140.
- 7) BOND, T. E., C. F. KELLY and H. HEITMAN (1958): Improving livestock environment in high temperature areas, Journal of Heredity, 49, 75-79.
- 8) FUQUAY, J. W. (1981): Heat stress as it affects animal production, Journal of Animal Science, 52, 164-174.
- 9) AMES, D. R. and D. E. RAY (1983): Environmental manipulation to improve animal productivity, Journal of Animal Science, 57, 209-220
- 10) 森田琢磨(編) (1978): 環境とその制御; 内藤元男(監修) 畜産大事典, 養賢堂, 697-770.
- 11) 日本建築学会(編) (1978): 建築設計資料集成 1—環境, 丸善, 97-134.
- 12) 黒崎順二・園田立信 (1981): 九州の家畜と環境 (風土的考察), 畜産の研究, 35, 180-186.
- 13) HAHN, G. L. (1981): Housing and management to reduce climatic impacts on livestock, Journal of Animal Science, 52, 175-186.

- 14) 森野一高(監修)(1970): Hand Book 畜産施設, 酪農技術普及学会, 33-148.
- 15) BECKETT, F. E. (1965): Effective temperature for evaluating or designing hog environments, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **8**, 163-166.
- 16) LEE, D. H. K. (1965): Climatic stress indices for domestic animals, *International Journal of Biometeorology*, **9**, 29-35.
- 17) 西 安信 (1981): 人体と環境との熱交換; 中山昭雄(編) 温熱生理学, 理工学社, 33-72.
- 18) HARRIS, D. L., R. R. SHRODE, I. W. RUPEL and R. E. LEIGHTON (1960): A study of solar radiation as related to physiological and production responses of lactating Holstein and Jersey cows, *Journal of Dairy Science*, **43**, 1255-1262.
- 19) SEATH, D. M. and G. D. MILLER (1946): The relative importance of high temperature and high humidity as factors influencing respiration rate, body temperature, and pulse rate of dairy cows, *Journal of Dairy Science*, **29**, 465-472.
- 20) SHRODE, R. R., F. R. QUAZI, I. W. RUPEL and R. E. LEIGHTON (1960): Variation in rectal temperature, respiration rate, and pulse rate of cattle as related to variation in four environmental variables, *Journal of Dairy Science*, **43**, 1235-1244.
- 21) WILLIAMS, J. S., R. R. SHRODE, R. E. LEIGHTON and I. W. RUPEL (1960): A study of the influence of solar radiation on physiological responses of dairy cattle, *Journal of Dairy Science*, **43**, 1245-1254.
- 22) BIANCA, W. (1962): Relative importance of dry- and wet-bulb temperatures in causing heat stress in cattle, *Nature*, **195**, 251-252.
- 23) INGRAM, D. L. (1965): The effect of humidity on temperature regulation and cutaneous water loss in the young pig, *Research in Veterinary Science*, **6**, 9-17.
- 24) 三村 耕・山本禎紀・伊藤敏男・住田正彦・新谷勝弘・藤井宏融(1971): 家畜の体感温度に関する研究 I. 乳牛の体感温度, *日本畜産学会報*, **42**, 493-500.
- 25) ROLLER, W. L. and R. F. GOLDMAN (1969): Response of swine to acute heat exposure, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **12**, 164-169, 174.
- 26) 辰巳 博・加藤道弘・野附 巖・宍戸弘明・渡辺利夫・増満洲市郎(1969): 乳牛の生理機能を指標とした高温環境における温湿度の総合評価について, *日本畜産学会報*, **40** (学会号), 41.
- 27) 山本あや・山本禎紀(1983): 乳牛におよぼす日射の体感温度表示について, *家畜の管理*, **19**, 21-23.
- 28) 山本禎紀(1983): 産卵鶏におよぼす風速の体感温度表示について, *日本畜産学会報*, **54**, 711-715.
- 29) 山本禎紀・伊藤敏男・伊藤久孝・松本千秋・三村 耕(1975): 産卵鶏の体感温度に関する研究, *日本畜産学会報*, **46**, 161-166.
- 30) 山本禎紀・所 和暢・富島信行・伊藤敏男・三村 耕(1971): 家畜の体感温度に関する研究 II. 豚の体感温度, 特に育成豚の生理反応におよぼす温・湿度の影響, *日本畜産学会報*, **42**, 609-616.
- 31) 山本禎紀・山岸規昭・津田恒之(1967): めん羊の呼吸数におよぼす乾球温度と湿球温度の影響, *日本畜産学会報*, **38**, 299-304.
- 32) 山本禎紀(1971): 家畜環境生理学における温熱的環境の評価の問題, *日本獣医師会雑誌*, **24**, 447-483.
- 33) 山本禎紀・津田恒之(1966): 家畜の環境生理に関する二, 三の問題, *生物環境調節*, **4**, 34-39.
- 34) BERRY, I. L., M. D. SHANKLIN and H. D. JOHNSON (1964): Dairy shelter design based on milk production declines as affected by temperature and humidity, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **7**, 329-331.
- 35) BUFFINGTON, D. E., A. C. AROCHO, G. H. CANTON, D. PITT, W. W. THATCHER and R. J. COLLIER (1981): Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **24**, 711-714.
- 36) INGRAHAM, R. H. (1974): Discussion on the influence of environmental factors on reproduction of livestock; In *Livestock Environment—Proceedings of the International Livestock Environment Symposium*, *American Society of Agricultural Engineers*, 55-61.
- 37) OLIVEIRA, J. L. and M. L. ESMAY (1982): Systems model analysis of hot weather housing for livestock, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **25**, 1355-1359.
- 38) 谷 信輝(1967): 夏季の乳牛舎内気候, *農業気象*, **23**, 87-88.
- 39) THOMAS, C. K. and R. M. ACHARYA (1981): Note on the effect of physical environment on milk production in

- Bos indicus*×*Bos taurus* crosses, Indian Journal of Animal Science, **51**, 351-356
- 40) 武田京一 (1963) : 体感気候と不快指数, 気象集誌, **41**, 348-354.
  - 41) HAHN, G. L. (1969) : Predicted versus measured production differences using summer air conditioning for lactating dairy cows, Journal of Dairy Science, **52**, 800-802
  - 42) HAHN, G. L. (1976) : Rational environmental planning for efficient livestock production, Biometeorology, **6**, 106-114
  - 43) HAHN, G. L. and D. D. OSBURN (1969) : Feasibility of summer environmental control for dairy cattle based on expected production losses, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **12**, 448-451.
  - 44) HAHN, G. L. and D. D. OSBURN (1970) : Feasibility of evaporative cooling for dairy cattle based on expected production losses, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **13**, 289-291, 294
  - 45) RANNFELT, C. A. and D. KROESKE (1974) : Pig housing in warm climates, World Animal Review, **10**, 24-30.
  - 46) ANSELL, R. H. (1981) : Extreme heat stress in dairy cattle and its alleviation—a case report; In J. A. CLARK (Ed.) Environmental Aspects of Housing for Animal Production, Butterworths, 285-306.
  - 47) KELLY, C. F., T. E. BOND and H. HEITMAN (1954) : The role of the thermal radiation in animal ecology, Ecology, **35**, 562-569.
  - 48) MACFARLANE, W. V. (1981) : The housing of large mammals in hot environments; In J. A. CLARK (Ed.) Environmental Aspects of Housing for Animal Production, Butterworths, 259-284.
  - 49) McDOWELL, R. E. (1972) : Improvement of Livestock Production in Warm Climates, W. H. Freeman and Company, 520-531.
  - 50) SMITH, W. K. (1981) : Poultry housing problems in the tropics and subtropics; In J. A. CLARK (Ed.) Environmental Aspects of Housing for Animal Production, Butterworths, 235-258.
  - 51) BOND, T. E., C. F. KELLY and N. R. ITTNER (1954) : Radiation studies of painted shade materials, Agricultural Engineering, **35**, 389-392.
  - 52) BOND, T. E., C. F. KELLY, S. R. MORRISON and N. PEREIRA (1967) : Solar, atmospheric, and terrestrial radiation received by shaded and unshaded animals, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **10**, 622-625, 627.
  - 53) GARRETT, W. N., T. E. BOND and N. PEREIRA (1967) : Influence of shade height on physiological responses of cattle during hot weather, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **10**, 433-434, 438
  - 54) GIVENS, R. L. (1965) : Height of artificial shades for cattle in the southeast, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **8**, 312-313.
  - 55) KELLY, C. F. and T. E. BOND (1958) : Effectiveness of artificial shade materials, Agricultural Engineering, **39**, 758-759, 764.
  - 56) KELLY, C. F. and N. R. ITTNER (1948) : Artificial shades for livestock in hot climates, Agricultural Engineering, **29**, 239-242, 250.
  - 57) KELLY, C. F., T. E. BOND and N. R. ITTNER (1950) : Thermal design of livestock shades, Agricultural Engineering, **31**, 601-606
  - 58) DALE, A. C. and H. GIESE (1953) : Effect of roofing materials on temperatures in farm buildings under summer conditions, Agricultural Engineering, **34**, 168-177.
  - 59) PARKER, B. F. (1963) : Heat transmission characteristics of sloped roofs exposed to solar radiation, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **6**, 1-2, 5.
  - 60) BOND, T. E., S. R. MORRISON and R. L. GIVENS (1969) : Influence of surroundings on radiant heat load of animals, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **12**, 246-248
  - 61) HODGES, T. O. and E. L. FARMER (1968) : Some effects of building construction on comfort and breeding efficiency of dairy bulls, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, **11**, 250-253.
  - 62) 岡本昌三・向井彰夫 (1965) : 暖地向き乳牛舎の構造と設備に関する調査, 九州農試年報昭和40年度, 78-84
  - 63) 渡辺 要 (1969) : 防寒・防露・防暑計画; 建築学体系編集委員会 (編) 建築学体系22—室内環境計画, 彰国社, 291-399.
  - 64) 皆川秀夫・立花一雄 (1982) : 畜舎に及ぼす日射負荷について, 農業施設学会大会講演要旨, 5-6.

- 65) NEUBAUER, L. W. and R. D. CRAMER (1966): Solar radiation control for small exposed houses, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **9**, 194-195, 197.
- 66) NEUBAUER, L. W., R. D. CRAMER and M. LARAWAY (1964): Temperature control of solar radiation on roof surfaces, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **7**, 432-434, 438.
- 67) 梅千野 晃・浜口典茂 (1983): 西壁に列植した樹木の日射遮へい効果Ⅱ, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 633-634.
- 68) NEUBAUER, L. W. (1969): Toward cooler buildings, *Agricultural Engineering*, **50**, 80-81.
- 69) NEUBAUER, L. W. and R. D. CRAMER (1968): Effect of shape of building on interior air temperature, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **11**, 537-539.
- 70) 渡辺 要(編) (1974): *建築計画原論Ⅰ*, 丸善, 119-310.
- 71) GRIFFIN, J. G. and T. H. VARDAMAN (1971): Effects of radiant heat on market-size broiler chicks grown in a cyclic high temperature environment, *Poultry Science*, **50**, 459-463.
- 72) REECE, F. N., J. W. DEATON and F. W. HARWOOD (1976): Roof insulation and its effect on broiler chicken mortality in hot weather, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **19**, 733-735.
- 73) TODD, A. C. E. and L. J. DANIELS (1968): The influence of housing on the performance of growing pigs in a sub-tropical environment, *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*, **7**, 285-288.
- 74) CLAYTON, J. T. and L. L. BOYD (1971): The effect of mass insulation on roof and ceiling temperatures and the radiant heat exchange of a spherical flux calorimeter, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **14**, 64-68.
- 75) 襄輪雅好・山口智治・相原良安 (1980): 畜舎内の放射熱環境に関する研究 (Ⅰ) 夏期における開放型畜舎の屋根の熱貫流抵抗と舎内放射熱量について, *農業施設*, **10**(1), 31-39.
- 76) BRAUD, H. J. and G. L. NELSON (1962): Forced convective cooling of inclined metal-roof surfaces, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **5**, 38-41, 45.
- 77) BALDWIN, B. A. and D. L. INGRAM (1968): The influence of hypothalamic temperature and ambient temperature on thermoregulatory mechanisms in the pig, *Journal of Physiology*, **198**, 517-529.
- 78) EGBUNIKE, G. N. and T. I. DEDE (1980): The influence of short-term exposure to tropical sunlight on boar seminal characteristics, *International Journal of Biometeorology*, **24**, 129-135.
- 79) INGRAM, D. L. (1964): The effect of environmental temperature on body temperatures, respiratory frequency and pulse rate in the young pig, *Research in Veterinary Science*, **5**, 348-356.
- 80) JOHNSON, H. D. and W. J. VANJONACK (1976): Effects of environmental and other stressors on blood hormone patterns in lactating animals, *Journal of Dairy Science*, **59**, 1603-1617.
- 81) TIDWELL, A. L. and J. L. FLETCHER (1951): The effect of summer environment on the body temperature and respiration rate of swine, *Journal of Animal Science*, **10**, 523-532.
- 82) 相原良安・山口智治・襄輪雅好 (1977): 畜舎壁体内通気層の伝熱特性に関する研究 (Ⅱ) 屋根壁体内通気層の日射断熱効果について, *農業施設*, **7**(2), 3-10.
- 83) 守安虎治 (1957): *空気調整工学*, 技報堂, 79.
- 84) 渡辺 要(編) (1965): *建築計画原論Ⅱ*, 丸善, 1-121.
- 85) 渡辺 要(編) (1965): *建築計画原論Ⅲ*, 丸善, 52-67, 259-283.
- 86) NEUBAUER, L. W. and R. D. CRAMER (1965): Shading devices to limit solar heat gain but increase cold sky radiation, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **8**, 470-472, 475.
- 87) HAHN, L., N. F. MEADOR, G. B. THOMPSON and M. D. SHANKLIN (1974): Compensatory growth of beef cattle in hot weather and its role in management decisions; In *Livestock Environment—Proceedings of the International Livestock Environment Symposium*, *American Society of Agricultural Engineers*, 288-295.
- 88) 畜産施設研究会(編) (1972): *牛舎の設計*, 朝倉書店, 79-111.
- 89) INGRAM, D. L. and K. F. LEGGE (1969): The effect of environmental temperature on respiratory ventilation in the pig, *Respiration Physiology*, **8**, 1-12.
- 90) ROBINSON, K. and D. H. K. LEE (1941): Reactions of the pig to hot atmospheres, *Proceedings of the Royal Society of Queensland*, **53**, 145-158.
- 91) 玉虫文一・富山小太郎・小谷正雄・安藤鋭郎・高橋秀俊・久保亮五・長倉三郎・井上 敏(編) (1971): *岩波理化学事典*, 岩波書店, 285.

- 92) 鎌田寿彦・中村 孝・野附 巖・森田琢磨 (1983): 豚の耐暑性について; 森田琢磨(研究代表者) 生理指標による熱環境下における豚産肉性のモニタリング, 昭和57年度科学研究費補助金(総合研究A) 研究成果報告書, 66-72.
- 93) SHISHIDO, H. (1977): On the changes of respiratory rate and its mean process during panting of chickens, *Japanese Poultry Science*, **14**, 153-161.
- 94) STOMBAUGH, D. P. and W. L. ROLLER (1977): Temperature regulation in young pigs during mild cold and severe heat stress, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **20**, 1110-1118.
- 95) INGRAM, D. L. (1964): The effect of environmental temperature on heat loss and thermal insulation in the young pig, *Research in Veterinary Science*, **5**, 357-364.
- 96) BIANCA, W. (1962): Tolerance to severe heat and the behaviour of respiratory minute volume in cattle, *Nature*, **195**, 1208-1209.
- 97) 野附 巖・鎌田寿彦・森田琢磨 (1983): モニターに関する試論; 森田琢磨(研究代表者) 生理指標による熱環境下における豚産肉性のモニタリング, 昭和57年度科学研究費補助金(総合研究A) 研究成果報告書, 73-80.
- 98) HEITMAN, H., C. F. KELLY and T. E. BOND (1958): Ambient air temperature and weight gain in swine, *Journal of Animal Science*, **17**, 62-67.
- 99) 鈴木憲三・荒谷 登 (1979): 日射量計算式の開発, 日本建築学会論文報告集, 第279号, 97-105.
- 100) 空調設備基準委員会・第2小委員会標準気象データ分科会 (1974): 標準気象データに関する研究, 空気調和・衛生工学, **48**, 603-625.
- 101) 木村建一 (1970): 建築設備基礎理論演習, 学献社, 56-57, 281-289.
- 102) 山内二郎・宇野利雄・一松 信 (1972): 電子計算機のための数値計算法Ⅲ, 培風館, 280-331.
- 103) SPARROW, E. M. (1963): A new and simpler formulation for radiative angle factors, *Journal of Heat Transfer*, **85**, 81-88.
- 104) 尾島俊雄・森山正和 (1978): 地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第2報 地表面熱収支の計算法と実測, 日本建築学会論文報告集, 第265号, 93-103.
- 105) 内田秀雄 (1965): 湿り空気と冷却塔, 葦華房, 8.
- 106) 新編農業気象ハンドブック編集委員会(編) (1977): 新編農業気象ハンドブック, 養賢堂, 70-284.
- 107) 松尾 陽 (1977): 動的熱負荷計算法(1)-(2), 空気調和・衛生工学, **51**, 1109-1116, 1209-1216.
- 108) 松尾 陽・横山浩一・石野久彌・川元昭吾 (1980): 空調設備の動的熱負荷計算入門, 日本建築設備士協会, 7-101.
- 109) 東京天文台(編) (1980): 理科年表, 丸善, 曆 37.
- 110) 宇田川光弘・木村建一 (1978): 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, 第267号, 83-90.
- 111) 斎藤平蔵 (1974): 建築気候, 共立出版, 97.
- 112) 香川大学農学部気象月表 (1977~1981).
- 113) 田口玄一 (1976): 実験計画法(上), 丸善, 1-50, 339-355.
- 114) 応用統計ハンドブック編集委員会(編) (1982): 応用統計ハンドブック, 養賢堂, 194-317, 666-684.
- 115) 中央畜産会 (1973): 鶏舎標準設計図, 中央畜産会.
- 116) 中央畜産会 (1977): 乳用牛舎標準設計図, 中央畜産会.
- 117) 中央畜産会 (1977): 鶏舎標準設計図, 中央畜産会.
- 118) 野見山敬一・増満洲市郎・竹原 誠・深江義忠 (1981): 酪農家における防暑法の実態調査, 家畜の管理, **17**, 37-42.
- 119) 石井尚一 (1978): 糸酪式暖地牛舎について, 農業施設, **8**(2), 65-68.
- 120) 磯田和男・大野 豊(監修) (1971): FORTRANによる数値計算ハンドブック, オーム社, 129-135.
- 121) 和田 忠・野附 巖 (1971): 家畜姿態の寸法の決定, 農業施設, **2**(1), 45-61.
- 122) BOND, T. E. and C. F. KELLY (1955): The globe thermometer in agricultural research, *Agricultural Engineering*, **36**, 251-255, 260.
- 123) BOND, T. E. and D. B. LASTER (1975): Influence of shading on production of midwest feedlot cattle, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **18**, 957-959.
- 124) PONCE, H. R., W. W. THATCHER, D. E. BUFFINGTON, C. J. WILCOX and H. H. V. HORN (1977): Physiological and

- production responses of dairy cattle to a shade structure in a subtropical environment, *Journal of Dairy Science*, **60**, 424-430.
- 125) DUNKLE, R. V. (1963): Configuration factors for radiant heat-transfer calculations involving people, *Journal of Heat Transfer*, **83**, 71-76.
- 126) HORIKOSHI, T. and Y. KOBAYASHI (1977): Configuration factors between a rectangular solid as a model of the human body and rectangular planes, for evaluation of the influence of thermal radiation on the human body I Calculation of configuration factors for the rectangular solids, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 253, 91-102.
- 127) HORIKOSHI, T. and Y. KOBAYASHI (1978): Configuration factors between a rectangular solid as a model of the human body and rectangular planes, for evaluation of the influence of thermal radiation on the human body II Characteristics of configuration factors for the rectangular solids, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, No. 267, 91-101.
- 128) PERRY, R. L. and E. P. SPECK (1962): Geometric factors for thermal radiation exchange between cows and their surroundings, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **5**, 31-33, 37.
- 129) 渡辺 要 (1939): 立体角投射写真機の考案とその応用(第1報), *建築学会論文集*, 第13号, 351-359.
- 130) 堀越哲美・宮原英男・小林陽太郎 (1978): 人体と矩形面との間の形態係数および人体の有効ふく射面積に関する研究 1. 算出理論と椅座着衣の場合の実測, *日本建築学会論文報告集*, 第268号, 109-119.
- 131) 堀越哲美・小林陽太郎 (1982): 人体と矩形面との間の形態係数および人体の有効ふく射面積に関する研究 第2報 椅座裸体の場合の実測と考察, *日本建築学会論文報告集*, 第322号, 92-100.
- 132) American Society of Agricultural Engineers (1982): Dimensions of livestock and poultry; In *Agricultural Engineers Yearbook*, American Society of Agricultural Engineers, 393-399.
- 133) CLAPPERTON, J. L., J. P. JOYCE and K. L. BLAXTER (1965): Estimates of the contribution of solar radiation to the thermal exchanges of sheep at a latitude of 55° north, *Journal of Agricultural Science*, **64**, 37-49.

## A Study on Thermal Radiation Environment in an Open-type Livestock Barn

Masayoshi MINOWA

### Summary

The level of the critical temperature that induces reduction of productivity in domestic animals and fowls is known to vary with environmental conditions. In hot environments, however, it has been estimated to range from 24° to 27°C for most adult domestic animals. When domestic animals are raised in mild and warm-climate areas during summer, the animals are exposed to heat stress if only by the high temperature generated in an open-type livestock barn. The radiant heat incident on domestic animals from the opening of a barn or from the interior walls further increases this heat stress. Since a substantial decrement of air temperature within a barn is impossible unless a cooling system is introduced, it is important to reduce radiation-induced heat stress to the lowest possible level.

The purpose of the present study is to formulate a thermal index that permits evaluation of hot environments in a barn from the physiological reactions of domestic animals and to propose various barn factors (including architectural elements of a barn, thermal properties of building materials and ground surface conditions in the vicinity of a barn) that are associated with minimization of the radiant heat incident on domestic animals in an open barn. In this study an attempt was made to carry out the following.



- (1) Explication of the actual conditions of radiant heat environments in an open barn during summer.
- (2) Determination of a thermal index on the basis of the physiological reactions to radiant heat under a high temperature condition, using swine as experimental animals.
- (3) Formulation of a method for calculating the amounts of short-wave and long-wave radiant heat in an open barn.
- (4) Quantitative evaluation of the effects of various barn factors on the amount of radiant heat in an open barn during summer, presentation of a useful equation for estimating the amount of radiant heat in an open barn, and clarification of various factors that can minimize the amount of radiant heat.
- (5) Determination of the configuration factors of domestic animals in relation to radiant heat interchange using swine as experimental animals, and evaluation of the radiant heat environments in an open barn on the basis of the amount of radiant heat load in domestic animals.

An outline of the present study follows.

1. The thermal conditions were examined in three kinds of open barns and one kind of closed barn in a warm-climate area during summer. The mean daytime temperature in the barns ranged from 27° to 34°C. The mean value of the downward radiant heat incident upon an infinitesimal plane in the center of the barns ranged from approximately 400 to 500 kcal/m<sup>2</sup>·h. The absorptivity of the exterior surface of the roof for solar radiation and the resistance of the roof to heat transmission had a significant effect on the amount of radiant heat within the barns. It was found that the amount of radiant heat in a barn can be effectively reduced by diminishing the absorptivity of the exterior surface of a roof that has low resistance to heat transmission.

2. The respiratory rate, rectal temperature and heart rate were measured in fattening pigs exposed to an air temperature of 30° or 35°C with 40%, 60% or 80% relative humidity and a radiant heat of 570 or 880 kcal/m<sup>2</sup>·h under an air temperature of 30°C with 60% humidity. Irradiation of radiant heat induced remarkable increases in the respiratory rate and rectal temperature. The radiant heat incident on these pigs was found to exert an effect identical to the effect of temperature conditions above 35°C. Of the three physiological reactions, the respiratory rate was considered to be the most convenient index for evaluating the thermal environments in the form of physiological reaction.

The respiratory rate was further examined in fattening pigs exposed to the radiant heat of 376–827 kcal/m<sup>2</sup>·h (the mean radiant temperature ( $t_{mr}$ ): 23.3–87.8°C) under the following: dry-bulb temperature ( $t_d$ )=24.2–30.4°C, wet-bulb temperature ( $t_w$ )=22.3–26.6°C and air velocity=0.1–1.2 m/s. As a result, the thermal index, “Environmental Evaluation-Temperature (EET)”, which expresses comprehensively the thermal environments by the respiratory rate was formulated as,

$$EET = at_d + bt_w + ct_{mr}$$

where  $a=0.6-0.7$ ,  $b=0.2-0.3$ ,  $c=0.1$  and  $a+b+c=1$ . However, the general environmental evaluation-temperature in an expansive area was not formulated in the present study.

3. A method for theoretical calculation of the amounts of short-wave and long-wave downward radiant heat incident on an infinitesimal plane in a barn was proposed using a gabled open barn which is a typical type of livestock barn. Comparison between the calculated values and measured values

supported the practical validity of this method in calculating the amount of long-wave radiant heat in the barn. Regarding the short-wave radiant heat in the barn, although the calculated and measured patterns were generally very close, the method was found to still contain some problems related to precise estimation of the effects of buildings around the barn and variations in solar radiation caused by clouds.

4. Using the calculation method mentioned above, a numerical simulation of radiant heat in the gabled open barn was attempted on a windless, clear, hot day in order to quantify the effects of the architectural characteristics on the amount of radiant heat in the barn during summer and to determine various barn factors for minimization of radiant heat in the barn. Factorial analysis was performed on the amounts of short-wave and long-wave radiant heat, which were obtained by simulations, incident on an infinitesimal plane at 1 m above the floor in the center of the barn.

The results disclosed the interrelation between the amount of radiant heat and factors that significantly influence radiant heat in the barn.

An equation was proposed for estimating the short-wave radiant heat in the barn only by addition and subtraction of the estimated values of factorial effects. By using this equation, the following factors that minimize the amount of short-wave radiant heat in the barn were identified. (1) The width of the barn is above 17 m when the height of the eaves is 4.5 m, above 10 m when the eaves' height is 3 m and above 3 m when the eaves' height is 1.5 m. (2) The orientation of the barn is east-west. (3) The roof is slanted at angles below  $20^\circ$ . (4) The absorptivity of the interior surface of the roof for solar radiation is above 0.9. (5) The length of the barn is above 45 m. (6) The barn is surrounded by bare ground.

Furthermore, an equation for estimating the amount of long-wave radiant heat in the barn was also proposed by addition and subtraction of the estimated values of factorial effects. Using this equation, factors that minimize the amount of long-wave radiant heat in the barn were identified as follows. (A) When the absorptivity of the exterior surface of the roof exceeds 0.55: (1) Roofing materials consist of a galvanized iron sheet and foam polystyrene with a thickness above 15 mm. (2) The emissivity of the exterior surface exceeds 0.9. (3) The absorptivity of the interior surface of the roof is below 0.55. (4) When a roof has the foam polystyrene approximately 15 mm thick, the emissivity of the interior surface is below 0.55. The emissivity of a roof with a foam polystyrene above 30 mm in thickness scarcely influences the amount of long-wave radiant heat in the barn. (5) The eaves' height should be as high as possible and preferably be above 4.5 m. (6) The width of the barn should be as narrow as possible and preferably be under 3 m. (7) The roof is sloped at angles below  $5^\circ$ . (8) The barn is surrounded by a grass-land or bare ground. (9) The orientation of the barn is either east-west or north-south. (10) The length of the barn plays no part in the amount of long-wave radiant heat. (B) When the absorptivity of the exterior surface of the roof is below 0.2: (1) The roof is covered by a galvanized iron sheet. (2) The emissivity of the interior surface is below 0.2. (3) The same remarks as (A) apply to the emissivity of the exterior surface, absorptivity of the interior surface, height of the eaves, barn width, roof slope, ground surface condition around the barn, barn orientation and barn length.

Apart from the above factors, there may still be some other factors that may be closely associated with the amount of short-wave radiant heat in a barn. These are problems left for future analysis.

5. On the premise that the thermal environment in a barn should be analyzed from the physiological and productive reactions of domestic animals, the results of the preceding factorial analysis should be evaluated in terms of the intensity of radiant heat load in these animals. Photographs of three stuffed pigs (27, 65 and 88 kg in live-weight) which kept a four-footed standing posture on a flat floor were taken. These photographs were analyzed mathematically in order to determine dimensions for cylinders to be used as models of these pigs. Cylinders equivalent in radiant-interchange configuration factors to the respective stuffed pigs were built. When placed horizontally, the length of the cylinder was the same as the distance from the base of the ears to the base of the tail of the stuffed pigs. The distance from the floor to the central axis of the cylinder in the length direction was approximately 60% of the highest point of the back. The diameter was approximately equal to the maximum width of the pigs' body.

Using these cylinders as three-dimensional models of pigs, configuration factors related to the interior surface of the roof and the sky for pigs placed in the center of the barn were calculated by mathematical analysis. These factors obtained were then compared with the configuration factors related to the interior surface of the roof and the sky for the infinitesimal plane at 1 m above the floor in the center of the barn. This comparison revealed that the previous factorial analysis produced almost similar results for the effects of architectural elements on the amount of radiant heat load in pigs and for the combination of architectural elements that minimize the amount of radiant heat load. Quantitatively, however, the amount of radiant heat from the interior surface of the roof was found to have been overestimated by approximately 2.8 to 3.0 times and the amount of radiant heat transmitted directly from the sky to have been underestimated by approximately 0.6 to 0.8 times. This indicated that the mean values of daytime long-wave downward radiant heat incident on a pig placed in the center of the gabled open barn varied with the architectural elements and ranged from 184 to 287 kcal/m<sup>2</sup>·h in a hot climate. When evaluated by the respiratory rate of fattening pigs, this range of variation was estimated to correspond to a temperature change of approximately 5–6°C. The factorial analysis results based on the amount of radiant heat incident on an infinitesimal plane in the center of the barn or on a pig were found to be applicable to the entire area or space of the barn excluding the outer periphery of the barn.

Further studies are needed for evaluating the effect of the coexistence of other pigs or the effect of postural changes of pigs on the configuration factors related to the interior surface of the roof and the sky.

## 付録-1 用語の説明 (五十音順)

## (1) 温湿指数 (temperature-humidity index)

温熱環境に対する人間の快適感を乾球温度と湿球温度で表した指標。わが国では不快指数と呼んでいる。

$$THI = 0.72(t_d + t_w) + 40.6$$

$$THI = 0.99 t_d + 0.36 t_p + 41.5$$

ここで

THI: 温湿指数 (-)       $t_d$ : 乾球温度 (°C)       $t_w$ : 湿球温度 (°C)       $t_p$ : 露点温度 (°C)

## (2) 温湿日照指数 (temperature-humidity-sunshine index)

温湿指数に日照の影響を加味した指数。次式で求められる。

$$THSI = \frac{0.75 S [THI]_3 + (24 - 0.75 S) [THI]_9}{24}$$

ここで

THSI: 温湿日照指数 (-)      S: 日照時間 (h)

$[THI]_3$ : 午後3時の温湿指数 (-)       $[THI]_9$ : 午前9時の温湿指数 (-)

## (3) 温熱指標 (thermal index)

温熱環境に対する総合的な体感を温熱環境要因 (気温, 湿度, 風速, 放射熱) のうちの2つ以上の要因で一次的に表した尺度。

## (4) 形態係数 (angle factor, configuration factor, geometrical factor, shape factor, view factor)

任意の位置にあって向かい合う完全拡散性の2つの面において、面1から発散する放射熱量のうち面2の単位面積に直接入射する放射熱量の割合。本論文では、面1が放射面で面2が受射面のときの形態係数は“ $\phi_{1-2}$ ”と表記し、これを“面2の面1に対する形態係数”と呼ぶ。

## (5) 形態係数測定機 (mechanical shape factor integrator)

放射面上の点要素から見た受射体の輪郭をトレースする機械。その輪郭線が点要素を取り囲む仮想の半球と交わる線を半球の底面に投影し、半球底面の面積に対する投影面積の比率が求める形態係数になる。

## (6) シェイド (shade)

放射熱、特に太陽から直接到達する日射を遮断するための簡単な建造物 (主として屋根と支柱だけから成る) で、経済的な日除け方法の一種。

## (7) 蒸発比 (evaporative ratio)

最大可能な蒸発散量に対する実際の蒸発散量の比。

## (8) 直散分離法 (separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface)

水平面全日射量を直達日射量と天空日射量に分離する方法。数種類の方法があるが、宇田川と木村が提示した方法は、茨城県館野の高層気象台で観測された法線面直達日射量から求めた水平面直達日射量と、それと同時に観測された水平面全日射量との関係を統計的に求めて  $\sin(h)$  ( $h$ : 太陽高度) の範囲別に関係式を導き、これを用いて一般の水平面全日射量から直達日射量を求めるものである (関係式については文献110) を参照)。

## (9) 熱ストレス (heat stress)

生体の恒常性 (homeostasis) を維持するために、熱的環境に対して生体が示す局所的あるいは全身的な体温調節反応。

## (10) 不快感指数 (discomfort index)

体表面からの顕熱放熱量と潜熱放熱量を考慮した体感指標。

$$I_D = \frac{E_1 - E}{E_1 - E_0} \times 100$$

ここで

$I_D$ : 不快感指数 (%)

$E$ : ある条件での空気のエンタルピー (kcal/kg')

$E_0$ : 体に接した空気のエンタルピー (kcal/kg')

$E_1$ : もっとも快適な条件での空気のエンタルピー (kcal/kg')

## (11) 放射熱負荷量 (radiant heat load)

ある物体が周囲から受ける放射熱量。

## 付録-2 切妻屋根式開放型畜舎内の微小水平面に下向きに入射する放射熱量を計算する電算機プログラム

```

C                                00000010
C                                00000020
C                                00000030
C                                ***00000040
C                                ***          THE THERMAL RADIATION ENVIRONMENT          ***00000050
C                                ***          WITHIN OPEN-TYPE LIVESTOCK BARNs          ***00000060
C                                ***          ***00000070
C                                *****00000080
C                                00000090
C                                00000100
000001  C          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)          00000110
C                                00000120
000002  C          REAL*8 AI(20),XI(20)          00000130
C                                00000140
000003  C          REAL*8 PX(31),PY(31),FRI1P(31,31),FRI2P(31,31),FSP(31,31),          00000150
&          TRP(31,31),RLP(31,31),SRP(31,31),TRPD(31,31),RLPD(31,31),          00000160
&          SRPD(31,31),TRPMX(31,31),RLPMX(31,31),SRPMX(31,31),          00000170
&          FRIP(31,31),SHADP(31,31)          00000180
C                                00000190
000004  C          REAL*8 TA(60),TGS(60),TGB(60),TRO1(60),TRO2(60),TRI1(60),          00000200
&          TRI2(60),TSAR01(60),TSAR02(60),TSARI1(60),TSARI2(60),          00000210
&          DSRH(60),SSRH(60),ARH(60),DSRR01(60),DSRR02(60),SH(60),          00000220
&          SA(60),CA(60),VRO1(60),VRO2(60),VILM1(60),VILM2(60),          00000230
&          VINP1(60),VINP2(60),QG(60)          00000240
C                                00000250
000005  C          REAL*8 FGSRO1(60),FGSRO2(60),FGSRI1(60),FGSRI2(60),FGBR01(60),          00000260
&          FGBR02(60),FGBR11(60),FGBR12(60),FSGB(60)          00000270
C                                00000280
000006  C          REAL*8 RT(10),RA0(10),RAI(10)          00000290
C                                00000300
000007  C          INTEGER*4 IGBD(60)          00000310
C                                00000320
000008  C          CHARACTER*72 TITLE          00000330
C                                00000340
C                                00000350
000009  C          DATA TA/ 26.7, 26.5, 26.2, 26.0, 25.8, 25.6, 25.4, 25.3,          00000360
&          25.1, 25.0, 24.9, 25.0, 25.1, 26.0, 26.8, 27.8,          00000370
&          28.8, 29.6, 30.4, 31.1, 31.7, 32.2, 32.7, 33.1,          00000380
&          33.5, 33.9, 34.2, 34.4, 34.5, 34.3, 34.1, 33.7,          00000390
&          33.3, 32.8, 32.3, 31.6, 30.8, 30.1, 29.4, 29.0,          00000400
&          28.6, 28.3, 28.0, 27.8, 27.6, 27.3, 27.0, 26.9,          00000410
&          0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0./          00000420
C                                00000430
C                                00000440
000010  C          DATA AI/ 0.0176140071, 0.0406014298, 0.0626720483, 0.0832767416,          00000450
&          0.1019301198, 0.1181945320, 0.1316886384, 0.1420961093,          00000460
&          0.1491729865, 0.1527533871, 0.1527533871, 0.1491729865,          00000470
&          0.1420961093, 0.1316886384, 0.1181945320, 0.1019301198,          00000480
&          0.0832767416, 0.0626720483, 0.0406014298, 0.0176140071/          00000490
C                                00000500
000011  C          DATA XI/ 0.9931285992, 0.9639719273, 0.9122344283, 0.8391169718,          00000510
&          0.7463319065, 0.6360536807, 0.5108670020, 0.3737060887,          00000520
&          0.2277858511, 0.0765265211, -0.0765265211, -0.2277858511,          00000530
&          -0.3737060887, -0.5108670020, -0.6360536807, -0.7463319065,          00000540
&          -0.8391169718, -0.9122344283, -0.9639719273, -0.9931285992/          00000550
C                                00000560
C                                00000570
000012  C          DATA DSRHMX,SSRHMX,ARHMX,DSR1MX,DSR2MX,TAMX,TGS MX,TGBMX,TRO1MX,          00000580
&          TRO2MX,TRI1MX,TRI2MX,FGS01M,FGS02M,FGS11M,FGS12M,FGB01M,          00000590
&          FGB02M,FGB11M,FGB12M/ 20*0./          00000600
C                                00000610
C                                00000620
000013  C          DATA PI/ 3.1415926536/          00000630
C                                00000640
C                                00000650
000014  C          READ(5,500) M,ID,OLA,OLO          00000660
000015  C          READ(5,505) AG,EG,ARO,ERO,ARI,ERI          00000670
000016  C          READ(5,535) XL,YW,ZH,RAZ,RAN,PZ,NX,NY          00000680
000017  C          READ(5,510) AH,ER          00000690
000018  C          READ(5,510) CHCRO,CHCRI          00000700
000019  C          READ(5,515) TS,TE,TD          00000710
000020  C          READ(5,520) TITLE          00000720
000021  C          READ(5,525) NR          00000730
C                                00000740
000022  C          DO 10 I=1,NR          00000750
000023  C          READ(5,530) RT(I),RA0(I),RAI(I)          00000760
000024  C          10 CONTINUE          00000770
C                                00000780

```

```

000025 500 FORMAT(2I5,2F10.0) 00000790
000026 505 FORMAT(6F10.0) 00000800
000027 510 FORMAT(2F10.0) 00000810
000028 515 FORMAT(3F10.0) 00000820
000029 520 FORMAT(A72) 00000830
000030 525 FORMAT(I5) 00000840
000031 530 FORMAT(3D20.9) 00000850
000032 535 FORMAT(6F10.0,2I5) 00000860
C 00000870
C 00000880
C 00000890
000033 WRITE(6,600) 00000900
000034 WRITE(6,605) M, ID,OLA,OLO 00000910
000035 WRITE(6,610) AG,ARO,ARI,EG,ERO,ERI 00000920
000036 WRITE(6,615) XL,YW,ZH,RAZ,RAN 00000930
000037 WRITE(6,620) AH,ER 00000940
000038 WRITE(6,625) CHCRO,CHCRI 00000950
000039 WRITE(6,630) 00000960
000040 WRITE(6,635) 00000970
000041 WRITE(6,640) PZ 00000980
000042 WRITE(6,645) TITLE 00000990
C 00001000
C 00001010
000043 DO 20 I=1,NR 00001020
000044 J=I-1 00001030
000045 WRITE(6,650) J,RT(I),RAO(I),RAI(I) 00001040
000046 20 CONTINUE 00001050
C 00001060
C 00001070
000047 600 FORMAT(1H1,25X,82(1H*)/1H ,25X,5(1H*),72X,5(1H*)/1H ,25X,82H***** 00001080
& THE THERMAL RADIATION ENVIRONMENT WITHIN OPEN-TYPE LIVESTOCK BARO 00001090
& NS *****/1H ,25X,5(1H*),72X,5(1H*)/1H ,25X,82(1H*)) 00001100
C 00001110
000048 605 FORMAT(1H0,5X,12H*** DATE ***,10X,16H*** LATITUDE ***,10X,17H*** L00001120
& ONGITUDE ***/1H ,I10,1H.,I2,16X,F10.5,6H (DEG),11X,F10.5,6H (DEG))00001130
C 00001140
000049 610 FORMAT(1H0,5X,53H*** RADIANT PROPERTIES OF THE RESPECTIVE SURFACES00001150
& ***/1H ,38X,6HGROUND,10X,12HOUTSIDE ROOF,10X,11HINSIDE ROOF/1H ,100001160
& 0X,18HSOLAR ABSORPTIVITY,F16.3,F22.3,F21.3/1H ,18X,10HEMISSIVITY,F00001170
& 16.3,F22.3,F21.3) 00001180
C 00001190
000050 615 FORMAT(1H0,5X,35H*** SPECIFICATIONS FOR THE BARN ***/1H ,15X,6HLENO00001200
& GTH,15X,5HWIDTH,9X,11HEAVE-HEIGHT,15X,7HAZIMUTH,15X,16HROOF INCLIN00001210
& ATION/1H ,10X,F10.3,4H (M),6X,F10.3,4H (M),6X,F10.3,4H (M),8X,F10.00001220
& 3,6H (DEG),15X,F10.3,6H (DEG)) 00001230
C 00001240
000051 620 FORMAT(1H0,5X,33H*** AIR AND GROUND CONDITIONS ***/1H ,10X,28HDAI00001250
& Y MEAN ABSOLUTE HUMIDITY,10X,17HEVAPORATIVE RATIO/1H ,15X,F10.5,3X00001260
& ,7H(KG/KG),15X,F7.2) 00001270
C 00001280
000052 625 FORMAT(1H0,5X,79H*** CONVECTIVE HEAT-TRANSFER COEFFICIENT AT ROOF 00001290
& SURFACE (KCAL/M2.HR.DEG-C) ***/1H ,10X,15HOUTSIDE SURFACE,10X,14HI00001300
& NSIDE SURFACE/1H ,11X,F10.3,14X,F10.3) 00001310
C 00001320
000053 630 FORMAT(1H0,20X,80H*** DSRH DIRECT SOLAR RADIATION AT HORIZONT00001330
& AL SURFACE (KCAL/M2.HR.) ***/1H ,20X,80H*** SSRH SKY SOLA00001340
& R RADIATION AT HORIZONTAL SURFACE (KCAL/M2.HR.) ***/1H ,20X00001350
& ,80H*** ARH ATMOSPHERIC RADIATION AT HORIZONTAL SURFACE 00001360
& (KCAL/M2.HR.) ***/1H ,20X,80H*** DSRRO DIRECT SOLAR RADIATION00001370
& AT OUTSIDE-ROOF SURFACE (KCAL/M2.HR.) ***/1H ,20X,80H*** TA00001380
& AIR TEMPERATURE (DEG-C) 00001390
& ***/1H ,20X,80H*** TGS SUNNY GROUND SURFACE TEMPERATURE 00001400
& (DEG-C) ***/1H ,20X,80H*** TGB SHADY GROU00001410
& ND SURFACE TEMPERATURE (DEG-C) ***/1H ,20X,800001420
& 0H*** TRO OUTSIDE-ROOF SURFACE TEMPERATURE (D00001430
& EG-C) ***/1H ,20X,80H*** TRI INSIDE-ROOF SURFACE TEM00001440
& PERATURE (DEG-C) ***) 00001450
C 00001460
000054 635 FORMAT(1H ,20X,80H*** FGSRO CONFIGURATION FACTOR FOR OUTSIDE-ROO00001470
& OF SURFACE TO SUNNY GROUND ***/1H ,20X,80H*** FGSRI CONFIGUR00001480
& ATION FACTOR FOR INSIDE-ROOF SURFACE TO SUNNY GROUND ***/1H ,20X00001490
& ,80H*** FGBRO CONFIGURATION FACTOR FOR OUTSIDE-ROOF SURFACE T00001500
& SHADY GROUND ***/1H ,20X,80H*** FGBRI CONFIGURATION FACTOR F00001510
& OR INSIDE-ROOF SURFACE TO SHADY GROUND ***/1H ,20X,20H*** 100001520
& ROOF 1,57X,3H***/1H ,20X,20H*** 2 ROOF 2,57X,3H***) 00001530
C 00001540
000055 640 FORMAT(1H0,10X,24H*** THE POSITION OF PZ,F10.2,10H (M) ***) 00001550
C 00001560
000056 645 FORMAT(1H0,10X,23H*** ROOF MATERIAL ( ,A72,8H ) ***/1H,15X, 00001570
& 28H*** RESPONSE FACTORS ***/1H ,25X,12HTRANSMISSION,15X,10HABS00001580
& ORPTION/1H ,42X,15HOUTSIDE-SURFACE,6X,14HINSIDE-SURFACE) 00001590
C 00001600
000057 650 FORMAT(1H ,10X,I7,3D20.9) 00001610

```

```

C
C
000058 NXD=NX+1
000059 NYD=NY+1
000060 XD=XL/DFLOAT(NX)
000061 YD=YW/DFLOAT(NY)
C
000062 SPX=XD/(3.*XL)
000063 SPY=YD/(3.*YW)
C
C
000064 ITS=IDINT(10.*TS)
000065 ITE=IDINT(10.*TE)
000066 ITD=IDINT(10.*TD)
C
000067 NTD=IDINT(1.*(TE-TS)/TD)
000068 SPT=T0/(3.*(TE-TS))
C
C
000069 NNR=NR-1
C
000070 RPI=PI/180.
000071 ROLA=RP I*OLA
000072 RRAZ=RP I*RAZ
000073 RRAN=RP I*RAN
C
000074 RAZR1=RRAZ
000075 RAZR2=RRAZ-PI
C
000076 SOLA=DSIN(ROLA)
000077 COLA=DCOS(ROLA)
000078 SRAZ=DSIN(RRAZ)
000079 CRAZ=DCOS(RRAZ)
000080 SRAN=DSIN(RRAN)
000081 CRAN=DCOS(RRAN)
000082 TRAN=SRAN/CRAN
000083 SRAZR1=DSIN(RAZR1)
000084 CRAZR1=DCOS(RAZR1)
000085 SRAZR2=DSIN(RAZR2)
000086 CRAZR2=DCOS(RAZR2)
C
000087 VF1=0.5*(1.+CRAN)
000088 VF2=0.5*(1.-CRAN)
000089 FSRO=VF1
000090 FSRI=VF2
000091 FGRO=VF2
000092 FGRI=VF1
C
000093 VY=0.5*YW
000094 VZ=ZH+VY*TRAN
000095 RX1=0.
000096 RX2=XL
000097 RY1=0.
000098 RY2=VY
000099 RY3=YW
000100 RZ1=ZH
000101 RZ2=VZ
C
000102 SAR=XL*DSQRT(VY*VY+(VZ-ZH)**2)
C
C
C
***** CONFIGURATION FACTOR FOR INSIDE-ROOF (FRIRI) *****
C
000103 CALL CFRR(AI,XI,PI,XL,YW,CRAN,FRIRI)
000104 SFRIRI=FRIRI*FRIRI
C
000105 WRITE(6,655) FRIRI
C
C
***** ABSCISSA AND ORDINATE OF P (PX,PY) *****
C
***** CONFIGURATION FACTOR FOR P TO INSIDE ROOF *****
C
***** AND TO THE SKY *****
C
000106 CALL PCFXY(PI,XL,YW,ZH,PZ,NXD,NYD,XD,YD,SRAN,CRAN,TRAN,PX,PY,
& FRI1P,FRI2P,FRIP,FSP)
C
000107 WRITE(6,660)
000108 CALL MATPRT(NXD,NYD,FRIP)
C
000109 WRITE(6,665)
000110 CALL MATPRT(NXD,NYD,FRI1P)
C
00001600
00001610
00001620
00001630
00001640
00001650
00001660
00001670
00001680
00001690
00001700
00001710
00001720
00001730
00001740
00001750
00001760
00001770
00001780
00001790
00001800
00001810
00001820
00001830
00001840
00001850
00001860
00001870
00001880
00001890
00001900
00001910
00001920
00001930
00001940
00001950
00001960
00001970
00001980
00001990
00002000
00002010
00002020
00002030
00002040
00002050
00002060
00002070
00002080
00002090
00002100
00002110
00002120
00002130
00002140
00002150
00002160
00002170
00002180
00002190
00002200
00002210
00002220
00002230
00002240
00002250
00002260
00002270
00002280
00002290
00002300
00002310
00002320
00002330
00002340
00002350
00002360
00002370
00002380
00002390
00002400

```

— 118 —

```

C      ***** SOLAR RADIATION, ATMOSPHERIC RADIATION *****
000111 C      CALL SJN(M, ID, PI, R, DS, ET)
000112      RDS=RPI*DS
000113      SDS=DSIN(RDS)
000114      CDS=DCOS(RDS)
C
000115      EA=0.51+2.1*DSQRT(AH/(AH+0.622))
C
000116      DO 30 I=50,285,5
000117      CALL TMJ(I, J, TM)
000118      CALL SOLAR(RPI, OLO, SRAN, CRAN, SRAZR1, CRAZR1, SRAZR2, CRAZR2, TM, ET,
&      R, SOLA, COLA, SDS, CDS, VSH, VSA, VCA, VDSRH, VSSRH, VDSR01,
&      VDSR02)
000119      SH(J)=VSH
000120      SA(J)=VSA
000121      CA(J)=VCA
000122      DSRH(J)=VDSRH
000123      SSRH(J)=VSSRH
000124      DSRR01(J)=VDSR01
000125      DSRR02(J)=VDSR02
C
000126      ARH(J)=4.88*EA*((273.16+TA(J))/100.)*.4
C
C      ***** CONFIGURATION FACTOR FOR ROOF SURFACE TO GROUND *****
000127 C      IF(VSH.EQ.0.) GO TO 5
000128 C      CALL PSG(XL, YW, ZH, TRAN, SRAZ, CRAZ, VSH, VSA, VCA,
&      GX1, GX2, GX3, GX4, GX5, GX6, GY1, GY2, GY3)
C
000129      SAGB=XL*(DABS(GY3-GY2)+DABS(GY2-GY1))
C
000130 C      CALL CFRG(AI, XI, PI, RX1, RX2, RY1, RY2, RZ1, RZ2, GX1, GX2, GX3, GX6,
&      GY1, GY2, FG1R01, FG1R11)
000131 C      CALL CFRG(AI, XI, PI, RX1, RX2, RY1, RY2, RZ1, RZ2, GX6, GX3, GX4, GX5,
&      GY2, GY3, FG2R01, FG2R11)
000132 C      CALL CFRG(AI, XI, PI, RX1, RX2, RY2, RY3, RZ2, RZ1, GX1, GX2, GX3, GX6,
&      GY1, GY2, FG1R02, FG1R12)
000133 C      CALL CFRG(AI, XI, PI, RX1, RX2, RY2, RY3, RZ2, RZ1, GX6, GX3, GX4, GX5,
&      GY2, GY3, FG2R02, FG2R12)
C
000134      IF(GY2.GT.GY1) GO TO 135
000135      FG1R01=0.
000136      FG1R11=0.
000137      FG1R02=0.
000138      FG1R12=0.
000139      SAGB=XL*DABS(GY3-GY2)
000140      GO TO 145
C
000141      135      IF(GY3.GT.GY2) GO TO 145
000142      FG2R01=0.
000143      FG2R11=0.
000144      FG2R02=0.
000145      FG2R12=0.
000146      SAGB=XL*DABS(GY2-GY1)
C
000147      145      FGBR01(J)=FG1R01+FG2R01
000148      FGBR02(J)=FG1R02+FG2R02
000149      FGBR11(J)=FG1R11+FG2R11
000150      FGBR12(J)=FG1R12+FG2R12
C
000151      FGSR01(J)=FGR0-FGBR01(J)
000152      FGSR02(J)=FGR0-FGBR02(J)
000153      FGSR11(J)=FGR1-FGBR11(J)
000154      FGSR12(J)=FGR1-FGBR12(J)
C
000155      FSG3(J)=1.-(FGBR01(J)+FGBR02(J)+FGBR11(J)+FGBR12(J))
&      *SAR/SAGB
C
000156      GO TO 30
C
000157      5      FGSR01(J)=FGR0
000158      FGSR02(J)=FGR0
000159      FGSR11(J)=FGR1
000160      FGSR12(J)=FGR1
000161      FGBR01(J)=0.
000162      FGBR02(J)=0.
000163      FGBR11(J)=0.

```



```

000164          FGBR12(J)=0.                                00003220
C                                                       00003230
000165          FSGB(J)=1.                                00003240
C                                                       00003250
000166          30 CONTINUE                                00003260
C                                                       00003270
C          ***** GROUND-SURFACE-TEMPERATURE ***** 00003280
C                                                       00003290
000167          CALL  GRIS(TA,DSRH,SSRH,ARH,AH,AG,EG,ER,TGS,QG,IGSD) 00003300
000168          CALL  GRIB(TA,DSRH,SSRH,ARH,TGS,FSGB,AH,AG,EG,ER,TGB,IGBD) 00003310
C                                                       00003320
C          ***** SOL-AIR TEMP. FOR ROOF SURFACE USED TEMP. FACTOR ***** 00003330
C                                                       00003340
C          VOA=FSRO+(1.-AG)*FGRO                            00003350
000169          VOA=FSRO+(1.-AG)*FGRO                            00003360
000170          VOE=FSRO+(1.-EG)*FGRO                            00003370
000171          VIA=1.-(1.-ARI)**2*SFRIRI                      00003380
000172          VIE=1.-(1.-ERI)**2*SFRIRI                      00003390
000173          VIAA=ARI/VIA                                    00003400
000174          VIEE=ERI/VIE                                    00003410
000175          VI=1.-ERI*FRIRI-(1.-ERI)*SFRIRI              00003420
000176          VII=VI/VIE                                      00003430
000177          VIVA=FSRI+(1.-AG)*FGRI+(1.-ARI)*FRIRI*(FSRI+(1.-AG)*FGRI) 00003440
000178          VIVE=FSRI+(1.-EG)*FGRI+(1.-ERI)*FRIRI*(FSRI+(1.-EG)*FGRI) 00003450
C          VI11=ERI*FRIRI                                     00003460
000179          VI11=ERI*FRIRI                                     00003470
000180          VI1=1.-(1.-ERI)*SFRIRI                         00003480
000181          VI2=VI1/VI11                                    00003490
000182          VI3=VI1/VIE                                    00003500
000183          VI4=VI11/VIE                                    00003510
000184          VI5=VIE/(4.88*ERI*VI11)                       00003520
C          DO 40 I=50,285,5                                  00003530
C          CALL  TMJ(I,J,TM)                                  00003540
000185          DO 40 I=50,285,5                                  00003550
000186          CALL  TMJ(I,J,TM)                                  00003560
000187          CALL  RHC(TM,ERO,RHCRO)                        00003570
000188          CALL  RHC(TM,ERI,RHCRI)                        00003580
000189          AHCRO=CHCRO+RHCRO                              00003590
000190          AHCRI=CHCRI+VII*RHCRI                          00003600
C          ATA=4.88*((273.16+TA(J))/100.)***4                00003610
000191          ATA=4.88*((273.16+TA(J))/100.)***4                00003620
000192          ATGS=4.88*EG*((273.16+TGS(J))/100.)***4        00003630
000193          ATGB=4.88*EG*((273.16+TGB(J))/100.)***4        00003640
C          VRO1(J)=ARO*(DSRR01(J)+(1.-AG)*FGSR01(J)*DSRH(J)+VOA*SSRH(J)) 00003650
C          +ERO*(VOE*ARH(J)+FGSR01(J)*ATGS+FGBR01(J)*ATGB) 00003660
000194          VRO1(J)=ARO*(DSRR01(J)+(1.-AG)*FGSR01(J)*DSRH(J)+VOA*SSRH(J)) 00003670
C          +ERO*(VOE*ARH(J)+FGSR01(J)*ATGS+FGBR01(J)*ATGB) 00003680
000195          VRO2(J)=ARO*(DSRR02(J)+(1.-AG)*FGSR02(J)*DSRH(J)+VOA*SSRH(J)) 00003690
C          +ERO*(VOE*ARH(J)+FGSR02(J)*ATGS+FGBR02(J)*ATGB) 00003700
C          TSAR01(J)=TA(J)+(VRO1(J)-ERO*ATA)/AHCRO           00003710
000196          TSAR01(J)=TA(J)+(VRO1(J)-ERO*ATA)/AHCRO           00003720
000197          TSAR02(J)=TA(J)+(VRO2(J)-ERO*ATA)/AHCRO           00003730
C          VILM1(J)=(1.-AG)*(FGSRI1(J)+(1.-ARI)*FRIRI*FGSRI2(J))*DSRH(J) 00003740
C          +VIVA*SSRH(J)                                       00003750
000198          VILM1(J)=(1.-AG)*(FGSRI1(J)+(1.-ARI)*FRIRI*FGSRI2(J))*DSRH(J) 00003760
C          +VIVA*SSRH(J)                                       00003770
000199          VILM2(J)=(1.-AG)*(FGSRI2(J)+(1.-ARI)*FRIRI*FGSRI1(J))*DSRH(J) 00003780
C          +VIVA*SSRH(J)                                       00003790
000200          VINP1(J)=VIVE*ARH(J)+(FGSRI1(J)+(1.-ERI)*FRIRI*FGSRI2(J))*ATGS 00003800
C          +(FGBR11(J)+(1.-ERI)*FRIRI*FGBR12(J))*ATGB 00003810
000201          VINP2(J)=VIVE*ARH(J)+(FGSRI2(J)+(1.-ERI)*FRIRI*FGSRI1(J))*ATGS 00003820
C          +(FGBR12(J)+(1.-ERI)*FRIRI*FGBR11(J))*ATGB 00003830
000202          TSARI1(J)=TA(J)+(VIAA*VILM1(J)+VIEE*VINP1(J)-VII*ERI*ATA)/AHCRI 00003840
000203          TSARI2(J)=TA(J)+(VIAA*VILM2(J)+VIEE*VINP2(J)-VII*ERI*ATA)/AHCRI 00003850
C          40 CONTINUE                                        00003860
C          DO 50 I=1,NNR                                      00003870
C          J=48+I                                            00003880
000204          DO 50 I=1,NNR                                      00003890
000205          J=48+I                                            00003900
000206          DSRH(J)=DSRH(I)                                00003910
000207          SSRH(J)=SSRH(I)                                00003920
000208          ARH(J)=ARH(I)                                  00003930
000209          DSRR01(J)=DSRR01(I)                            00003940
000210          DSRR02(J)=DSRR02(I)                            00003950
000211          TA(J)=TA(I)                                    00003960
000212          TGS(J)=TGS(I)                                  00003970
000213          TGB(J)=TGB(I)                                  00003980
000214          TGB(J)=TGB(I)                                  00003990

```

—120—

```

000215          TSAR01(J)=TSAR01(I)          00004030
000216          TSAR02(J)=TSAR02(I)          00004040
000217          TSARI1(J)=TSARI1(I)          00004050
000218          TSARI2(J)=TSARI2(I)          00004060
000219          VR01(J)=VR01(I)              00004070
000220          VR02(J)=VR02(I)              00004080
000221          VILM1(J)=VILM1(I)            00004090
000222          VILM2(J)=VILM2(I)            00004100
000223          VINP1(J)=VINP1(I)            00004110
000224          VINP2(J)=VINP2(I)            00004120
C
C          ***** OUTSIDE AND INSIDE ROOF SURFACE TEMPERATURE *****
C
000225          DO 60 IRTD=1,50              00004130
C
000226          DO 70 I=50,285,5             00004140
000227          CALL TMJ(I,J,TM)             00004150
000228          IF(J.GT.NNR) GO TO 25         00004160
000229          CALL PARA(J,K)               00004170
000230          J=K                            00004180
C
000231          25  QT01=0.                   00004190
000232          QT02=0.                       00004200
000233          QA01=0.                       00004210
000234          QA02=0.                       00004220
000235          QT11=0.                       00004230
000236          QT12=0.                       00004240
000237          QAI1=0.                       00004250
000238          QAI2=0.                       00004260
C
000239          DO 80 II=1,NR                 00004270
000240          JJ=J-II+1                     00004280
000241          QT01=QT01+TSARI1(JJ)*RT(II)  00004290
000242          QT02=QT02+TSARI2(JJ)*RT(II)  00004300
000243          QA01=QA01+TSAR01(JJ)*RAO(II) 00004310
000244          QA02=QA02+TSAR02(JJ)*RAO(II) 00004320
000245          QT11=QT11+TSAR01(JJ)*RT(II)  00004330
000246          QT12=QT12+TSAR02(JJ)*RT(II)  00004340
000247          QAI1=QAI1+TSARI1(JJ)*RAI(II)  00004350
000248          QAI2=QAI2+TSARI2(JJ)*RAI(II)  00004360
C
C          VT01=TA(J)+(VR01(J)+QT01-QA01)/CHCRO 00004370
C
000249          VT01=TA(J)+(VR01(J)+QT01-QA01)/CHCRO 00004380
C
000250          IF(IRTD.NE.1) GO TO 35        00004390
000251          VTR01=0.5*(TA(J)+TSAR01(J))  00004400
000252          GO TO 45                        00004410
000253          35  VTR01=TR01(J)              00004420
C
000254          45  TTR01=VT01-4.88*ERO*((273.16+VTR01)/100.)**4/CHCRO 00004430
000255          IF(DABS(TTR01-VTR01).LT.0.02) GO TO 55 00004440
000256          VTR01=0.5*(TTR01+VTR01)       00004450
000257          GO TO 45                        00004460
C
000258          55  TR01(J)=0.5*(TTR01+VTR01)  00004470
C
000259          VT02=TA(J)+(VR02(J)+QT02-QA02)/CHCRO 00004480
C
000260          IF(IRTD.NE.1) GO TO 65        00004490
000261          VTR02=0.5*(TA(J)+TSAR02(J))  00004500
000262          GO TO 75                        00004510
000263          65  VTR02=TR02(J)              00004520
C
000264          75  TTR02=VT02-4.88*ERO*((273.16+VTR02)/100.)**4/CHCRO 00004530
000265          IF(DABS(TTR02-VTR02).LT.0.02) GO TO 85 00004540
000266          VTR02=0.5*(TTR02+VTR02)       00004550
000267          GO TO 75                        00004560
C
000268          85  TR02(J)=0.5*(TTR02+VTR02)  00004570
C
C          VX1=VIAA*VILM1(J)+VIEE*VINP1(J)  00004580
000269          VX2=VIAA*VILM2(J)+VIEE*VINP2(J) 00004590
000270
C
000271          VQX=QT12-QAI2+VX2              00004600
000272          VI2R=VI2+VQX+QT11-QAI1+VX1    00004610
C
000273          CALL TRIAL2(ERI,CHCRI,TA(J),VI3,VQX,VTR12) 00004620
C
000274          ATRI2=4.88*ERI*((273.16+VTR12)/100.)**4 00004630
000275          VTRA=CHCRI*(VTR12-TA(J))       00004640

```

```

000276      VCT=VI3*ATRI2+VTRA      00004840
000277      VCQ=VCT-VQX            00004850
C
000278      IF(VCQ.LT.0.) VCQ=DABS(VCQ) 00004860
C
000279      VVE=100.*(VI5*VCQ)**0.25 00004880
000280      VI2L=VI2*(VI3*ATRI2+VTRA)-VI4*ATRI2 00004890
&          +CHCRI*(VVE-(273.16+TA(J))) 00004900
C
000281      IF(DABS(VI2L-VI2R).LT.0.01) GO TO 95 00004910
000282      CALL TRIAL1(ERI,CHCRI,TACJ),QAI2,QT12,VI2,VI3,VI4,VI5, 00004920
&          VX2,VI2R,VTRI2,VVE) 00004930
C
000283      95 TRI2(J)=VTRI2          00004940
000284      TRI1(J)=VVE-273.16      00004950
C
000285      70 CONTINUE              00004960
C
000286      DO 90 I=1,NNR            00004970
000287      J=I+48                    00004980
000288      TR01(I)=TR01(J)          00004990
000289      TR02(I)=TR02(J)          00005000
000290      TRI1(I)=TRI1(J)          00005010
000291      TRI2(I)=TRI2(J)          00005020
C
000292      IF(IRTD.EQ.1) GO TO 105  00005030
000293      IF(DABS(TRI1(27)-DTRI1).LT.0.01) GO TO 115 00005040
C
C      ***** SOL-AIR TEMP. FOR ROOF SURFACE NOT USED TEMP. FACTOR ***** 00005050
C
000294      105 DO 100 I=50,285,5    00005060
000295      CAL_ TMJ(I,J,TM)          00005070
000296      ATRO1=4.88*ERO*((273.16+TR01(J))/100.)*4 00005080
000297      ATRO2=4.88*ERO*((273.16+TR02(J))/100.)*4 00005090
000298      ATRI1=4.88*ERI*((273.16+TRI1(J))/100.)*4 00005100
000299      ATRI2=4.88*ERI*((273.16+TRI2(J))/100.)*4 00005110
C
000300      TSAR01(J)=TA(J)+(VR01(J)-ATRO1)/CHCRO 00005120
000301      TSAR02(J)=TA(J)+(VR02(J)-ATRO2)/CHCRO 00005130
C
000302      TSARI1(J)=TA(J)+(VIAA*VILM1(J)+VIEE*VINP1(J) 00005140
&          -VI3*ATRI1+VI4*ATRI2)/CHCRI 00005150
000303      TSARI2(J)=TA(J)+(VIAA*VILM2(J)+VIEE*VINP2(J) 00005160
&          -VI3*ATRI2+VI4*ATRI1)/CHCRI 00005170
C
000304      100 CONTINUE              00005180
C
000305      DO 110 I=1,NNR            00005190
000306      J=48+I                    00005200
000307      TSAR01(J)=TSAR01(I)      00005210
000308      TSAR02(J)=TSAR02(I)      00005220
000309      TSARI1(J)=TSARI1(I)      00005230
000310      TSARI2(J)=TSARI2(I)      00005240
C
000311      DTRI1=TRI1(27)          00005250
000312      60 CONTINUE              00005260
C
C      ***** THERMAL RADIATION AT POINT *P* ***** 00005270
C
000313      115 VIAP=(1.-ARI)/VIA    00005280
000314      VIEP1=(1.-ERI)/VIE      00005290
000315      VIEP2=VIEP1*FRIRI      00005300
C
000316      CALL DIMO(NXD,NYD,TRPD)  00005310
000317      CALL DIMO(NXD,NYD,RLPD)  00005320
000318      CALL DIMO(NXD,NYD,SRPD)  00005330
000319      CALL DIMO(NXD,NYD,TRPMX)  00005340
000320      CALL DIMO(NXD,NYD,RLPMX)  00005350
000321      CALL DIMO(NXD,NYD,SRPMX)  00005360
C
000322      KK=1                      00005370
C
000323      DO 120 I=ITS,ITE,ITD     00005380
C
000324      CALL TMJ(I,J,TM)          00005390

```

000325	C	CALL SPF(KK,NTD,SPT,SPC)	00005650
000326		CALL DAILY(KK,DSRH(J),SPC,DSRHD)	00005660
000327		CALL DAILY(KK,SSRH(J),SPC,SSRHD)	00005670
000328		CALL DAILY(KK, ARH(J),SPC, ARHD)	00005680
000329		CALL DAILY(KK,DSRR01(J),SPC,DSR01D)	00005690
000330		CALL DAILY(KK,DSRR02(J),SPC,DSR02D)	00005700
000331	C	CALL DAILY(KK,TA(J),SPC,TAD)	00005710
000332		CALL DAILY(KK,TGS(J),SPC,TGSD)	00005720
000333		CALL DAILY(KK,TGB(J),SPC,TGBD)	00005730
000334		CALL DAILY(KK,TR01(J),SPC,TR01D)	00005740
000335		CALL DAILY(KK,TR02(J),SPC,TR02D)	00005750
000336		CALL DAILY(KK,TRI1(J),SPC,TRI1D)	00005760
000337		CALL DAILY(KK,TRI2(J),SPC,TRI2D)	00005770
000338	C	CALL DAILY(KK,FGSR01(J),SPC,FGS01D)	00005780
000339		CALL DAILY(KK,FGSR02(J),SPC,FGS02D)	00005790
000340		CALL DAILY(KK,FGSRI1(J),SPC,FGSI1D)	00005800
000341		CALL DAILY(KK,FGSRI2(J),SPC,FGSI2D)	00005810
000342		CALL DAILY(KK,FGBR01(J),SPC,FGB01D)	00005820
000343		CALL DAILY(KK,FGBR02(J),SPC,FGB02D)	00005830
000344		CALL DAILY(KK,FGBRI1(J),SPC,FGBI1D)	00005840
000345		CALL DAILY(KK,FGBRI2(J),SPC,FGBI2D)	00005850
000346	C	CALL MAX(DSRHMX,DSRH(J))	00005860
000347		CALL MAX(SSRHMX,SSRH(J))	00005870
000348		CALL MAX(ARHMX,ARH(J))	00005880
000349		CALL MAX(DSR1MX,DSRR01(J))	00005890
000350		CALL MAX(DSR2MX,DSRR02(J))	00005900
000351	C	CALL MAX(TAMX,TA(J))	00005910
000352		CALL MAX(TGSMX,TGS(J))	00005920
000353		CALL MAX(TGBMX,TGB(J))	00005930
000354		CALL MAX(TR01MX,TR01(J))	00005940
000355		CALL MAX(TR02MX,TR02(J))	00005950
000356		CALL MAX(TRI1MX,TRI1(J))	00005960
000357		CALL MAX(TRI2MX,TRI2(J))	00005970
000358	C	CALL MAX(FGS01M,FGSR01(J))	00005980
000359		CALL MAX(FGS02M,FGSR02(J))	00005990
000360		CALL MAX(FGS1M,FGSRI1(J))	00006000
000361		CALL MAX(FGS12M,FGSRI2(J))	00006010
000362		CALL MAX(FGB01M,FGBR01(J))	00006020
000363		CALL MAX(FGB02M,FGBR02(J))	00006030
000364		CALL MAX(FGB11M,FGBRI1(J))	00006040
000365		CALL MAX(FGB12M,FGBRI2(J))	00006050
	C		00006060
	C	***** THE DECISION FOR SUNNY OR SHADY POSITION OF P *****	00006070
	C		00006080
000366	C	CALL SHADOW(XL,YW,ZH,PX,PY,PZ,NXD,NYD,TRAN,SRAZ,CRAZ, & SH(J),SA(J),CA(J),SHADP)	00006090
	C		00006100
	C		00006110
000367		ATR11=4.88*ERI*((273.16+TRI1(J))/100.))**4	00006120
000368		ATR12=4.88*ERI*((273.16+TRI2(J))/100.))**4	00006130
	C		00006140
000369		RSRRI1=VIAP*VILM1(J)	00006150
000370		RLRRI1=VIEP1*VINP1(J)+VIEP2*((1.-ERI)*FRIRI*ATR11+ATR12)	00006160
	C		00006170
000371		RSRRI2=VIAP*VILM2(J)	00006180
000372		RLRRI2=VIEP1*VINP2(J)+VIEP2*((1.-ERI)*FRIRI*ATR12+ATR11)	00006190
	C		00006200
	C		00006210
000373		DO 130 K=1,NYD	00006220
000374		DO 130 L=1,NXD	00006230
	C		00006240
000375		SRP(L,K)=SHADP(L,K)+DSRH(J)+FSP(L,K)+SSRH(J) & +FR11P(L,K)+RSRRI1+FR12P(L,K)+RSRRI2	00006250
	C		00006260
000376		RLP(L,K)=FSP(L,K)*ARH(J)+FR11P(L,K)*(RLRRI1+ATR11) & +FR12P(L,K)*(RLRRI2+ATR12)	00006270
	C		00006280
000377		TRP(L,K)=SRP(L,K)+RLP(L,K)	00006290
	C		00006300
	C		00006310
000378		SRPD(L,K)=SRPD(L,K)+SPC*SRP(L,K)	00006320
000379		RLPD(L,K)=RLPD(L,K)+SPC*RLP(L,K)	00006330
000380		TRPD(L,K)=TRPD(L,K)+SPC*TRP(L,K)	00006340
	C		00006350
000381		CALL MAX(SRPMX(L,K),SRP(L,K))	00006360
	C		00006370
	C		00006380
	C		00006390
	C		00006400
	C		00006410
	C		00006420
	C		00006430
	C		00006440
	C		00006450

```

000382          CALL MAX(RLPMX(L,K),RLP(L,K))          00006460
000383          CALL MAX(TRPMX(L,K),TRP(L,K))          00006470
C
000384 130 CONTINUE          00006480
C
C          00006490
C          00006500
000385          WRITE(6,670) TM          00006510
000386          WRITE(6,675) DSRH(J),SSRH(J),ARH(J),TA(J),TGS(J),TGB(J)          00006520
000387          WRITE(6,680) FGSRO1(J),FGBR01(J),FGSRI1(J),FGBRI1(J),DSRR01(J),          00006530
&          TR01(J),TRI1(J)          00006540
000388          WRITE(6,685) FGSRO2(J),FGBR02(J),FGSRI2(J),FGBRI2(J),DSRR02(J),          00006550
&          TR02(J),TRI2(J)          00006560
C          00006570
C          00006580
C          00006590
000389          IF(SH(J).LE.0.) GO TO 125          00006600
C          00006610
C          00006620
000390          WRITE(6,690)          00006630
000391          CALL MATPRT(NXD,NYD,SRP)          00006640
000392          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,SRP,SRPMN)          00006650
000393          WRITE(6,695) SRPMN          00006660
C          00006670
000394 125 WRITE(6,700)          00006680
000395          CALL MATPRT(NXD,NYD,RLP)          00006690
000396          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,RLP,RLPMN)          00006700
000397          WRITE(6,695) RLPMN          00006710
C          00006720
000398          WRITE(6,705)          00006730
000399          CALL MATPRT(NXD,NYD,TRP)          00006740
000400          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,TRP,TRPMN)          00006750
000401          WRITE(6,695) TRPMN          00006760
C          00006770
C          00006780
000402          KK=KK+1          00006790
C          00006800
C          00006810
000403 120 CONTINUE          00006820
C          00006830
C          00006840
000404          WRITE(6,710) TS,TE,TD          00006850
000405          WRITE(6,675) DSRHD,SSRHD,ARHD,TAD,TGSD,TGBD          00006860
000406          WRITE(6,680) FGS01D,FGB01D,FGS11D,FGB11D,DSR01D,TR01D,TRI1D          00006870
000407          WRITE(6,685) FGS02D,FGB02D,FGS12D,FGB12D,DSR02D,TR02D,TRI2D          00006880
C          00006890
000408          WRITE(6,690)          00006900
000409          CALL MATPRT(NXD,NYD,SRPD)          00006910
000410          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,SRPD,SRPDMN)          00006920
000411          WRITE(6,695) SRPDMN          00006930
C          00006940
000412          WRITE(6,700)          00006950
000413          CALL MATPRT(NXD,NYD,RLPD)          00006960
000414          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,RLPD,RLPDMN)          00006970
000415          WRITE(6,695) RLPDMN          00006980
C          00006990
000416          WRITE(6,705)          00007000
000417          CALL MATPRT(NXD,NYD,TRPD)          00007010
000418          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,TRPD,TRPDMN)          00007020
000419          WRITE(6,695) TRPDMN          00007030
C          00007040
C          00007050
000420          WRITE(6,715) TS,TE,TD          00007060
000421          WRITE(6,675) DSRHMx,SSRHMx,ARHMx,TAMx,TGSMx,TGBMx          00007070
000422          WRITE(6,680) FGS01M,FGB01M,FGS11M,FGB11M,DSR1MX,TR01MX,TRI1MX          00007080
000423          WRITE(6,685) FGS02M,FGB02M,FGS12M,FGB12M,DSR2MX,TR02MX,TRI2MX          00007090
C          00007100
000424          WRITE(6,690)          00007110
000425          CALL MATPRT(NXD,NYD,SRPMX)          00007120
000426          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,SRPMX,SRPXMN)          00007130
000427          WRITE(6,695) SRPXMN          00007140
C          00007150
000428          WRITE(6,700)          00007160
000429          CALL MATPRT(NXD,NYD,RLPMX)          00007170
000430          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,RLPMX,RLPXMN)          00007180
000431          WRITE(6,695) RLPXMN          00007190
C          00007200
000432          WRITE(6,705)          00007210
000433          CALL MATPRT(NXD,NYD,TRPMX)          00007220
000434          CALL OVAME(NXD,NYD,SPX,SPY,TRPMX,TRPXMN)          00007230
000435          WRITE(6,695) TRPXMN          00007240
C          00007250
000436          WRITE(6,720)          00007260

```

```

C
000437 DO 140 I=50,285,5 00007270
000438 CAL_ TMJ(I,J,TM) 00007280
000439 WRITE(6,725) TM,TA(J),DSRH(J),SSRH(J),ARH(J),QG(J), 00007290
& TGS(J),TGB(J),TR01(J),TR02(J),TRI1(J),TRI2(J), 00007300
& IRTD,IGSD,IGED(J) 00007310
000440 140 CONTINUE 00007320
C 00007330
C 00007340
C 00007350
000441 655 FORMAT(1H0,10X,58H*** CONFIGURATION FACTOR BETWEEN INSIDE-ROOF 500007360
&URFACES ( ,D12.5,8H ) *** ) 00007370
C 00007380
000442 660 FORMAT(1H0,10X,61H*** CONFIGURATION FACTOR FOR P TO INSIDE ROOF 00007390
&1 AND 2 *** ) 00007400
C 00007410
000443 665 FORMAT(1H0,10X,55H*** CONFIGURATION FACTOR FOR P TO INSIDE ROOF 00007420
&1 *** ) 00007430
C 00007440
000444 670 FORMAT(1H0,5X,11H***** TIME,F8.2,7H ***** ) 00007450
C 00007460
000445 675 FORMAT(1H ,16X,4HDSRH,11X,4HSSRH,12X,3HARH,48X,2HTA,12X,3HTGS,12X,00007470
&3HTGB/1H ,5X,3D15.5,35X,3F15.3) 00007480
C 00007490
000446 680 FORMAT(1H ,14X,6HFGSR01,9X,6HFGBR01,9X,6HFGSR11,9X,6HFGBR11,9X,6HD00007500
&SRR01,31X,4HTR01,11X,4HTR11/1H ,5X,5D15.5,20X,2F15.3) 00007510
C 00007520
000447 685 FORMAT(1H ,14X,6HFGSR02,9X,6HFGBR02,9X,6HFGSR12,9X,6HFGBR12,9X,6HD00007530
&SRR02,31X,4HTR02,11X,4HTR12/1H ,5X,5D15.5,20X,2F15.3) 00007540
C 00007550
000448 690 FORMAT(1H0,30X,65H***** SHORT-WAVE RADIATION DISTRIBUTION (KCA00007560
&L/M2.HR.) ***** ) 00007570
C 00007580
000449 695 FORMAT(1H0,80X,20H***** OVERALL MEAN,D20.5,8H ***** ) 00007590
C 00007600
000450 700 FORMAT(1H0,30X,64H***** LONG-WAVE RADIATION DISTRIBUTION (KCAL00007610
&/M2.HR.) ***** ) 00007620
C 00007630
000451 705 FORMAT(1H0,30X,63H***** ALL-WAVE RADIATION DISTRIBUTION (KCAL/00007640
&M2.HR.) ***** ) 00007650
C 00007660
000452 710 FORMAT(/1H0,15X,29H***** DAILY MEAN VALUE FROM,F10.2,10H HR. 00007670
& TO,F10.2,16H HR. (INTERVAL,F7.2,8H HR. ),8H *****/) 00007680
C 00007690
000453 715 FORMAT(/1H0,15X,26H***** MAXIMUM VALUE FROM,F10.2,10H HR. 00007700
&F10.2,16H HR. (INTERVAL,F7.2,8H HR. ),8H *****/) 00007710
C 00007720
000454 720 FORMAT(/1H0,20X,76H***** WEATHER CONDITIONS AND ROOF TEMPERATUR00007730
&ES FROM 5 HR. TO 4 HR. *****//1H ,3X,2HTM,6X,2HTA,8X,4HDSRH,8X,400007740
&HSSRH,9X,3HARH,9X,3HQGS,5X,3HTGS,5X,3HTG3,4X,4HTR01,4X,4HTR02,4X,400007750
&HTR11,4X,4HTR12,3X,4HIRTD,3X,4HIGSD,3X,4HIGBD//) 00007760
C 00007770
000455 725 FORMAT(1H ,F5.1,F8.3,4D12.5,6F8.3,3I7) 00007780
C 00007790
C 00007800
000456 STOP 00007810
000457 END 00007820
C 00007830
C **** CONFIGURATION FFACORS OF INSIDE-ROOFS (CFRR) **** 00007840
C 00007850
000458 SUBROUTINE CFRR(A,X,PI,VL,VW,VC,CFRIRI) 00007860
C 00007870
000459 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) 00007880
000460 REAL*8 A(20),X(20) 00007890
C 00007900
000461 VCS=VC*VC 00007910
000462 VWS=VW*VW 00007920
000463 S=0. 00007930
C 00007940
000464 DO 10 J=1,20 00007950
000465 CYR=0.5*A(J) 00007960
000466 VYR=0.5*(1.+X(J)) 00007970
000467 VYR1=1.-VYR 00007980
000468 VY1=VW*VYR1 00007990
000469 VY2=VYR-2.*VCS 00008000
000470 VY3=VYR*VYR+4.*(1.-VYR)*VCS 00008010
000471 VY4=DSQRRT(VY3) 00008020
000472 VY5=VW*VY4 00008030
000473 VY6=VWS*VYR1*VYR1*(1.-VCS) 00008040
000474 VY7=VW*(VYR/(2.*VC)+VYR1*VC) 00008050
000475 VY8=VW*(-VYR1)*(VCS-0.5) 00008060
C 00008070

```

```

000476      DO 10 K=1,20      00008080
000477      CXR=0.5*A(K)      00008090
000478      VXR=0.5*(1.+X(K))  00008100
000479      VX1=1.-VXR      00008110
000480      VX2=2.*VL*VC*VXR  00008120
000481      VX3=VL*VXR*(2.*VCS-1.) 00008130
000482      VX4=VL*VXR1*(2.*VCS-1.) 00008140
000483      VX5=DSQRT(VY6+(VL*VXR)**2) 00008150
000484      VX6=DSQRT(VY6+(VL*VXR1)**2) 00008160
000485      VAT1=VX1/VY1      00008170
000486      VAT2=VX2/VY1      00008180
000487      VAT3=VX1/VY5      00008190
000488      VAT4=VX2/VY5      00008200
000489      VAT5=VY7/VX5      00008210
000490      VAT6=VY8/VX5      00008220
000491      VAT7=VY7/VX6      00008230
000492      VAT8=VY8/VX6      00008240
000493      AT1=DATAN(VAT1)  00008250
000494      AT2=DATAN(VAT2)  00008260
000495      AT3=DATAN(VAT3)  00008270
000496      AT4=DATAN(VAT4)  00008280
000497      AT5=DATAN(VAT5)  00008290
000498      AT6=DATAN(VAT6)  00008300
000499      AT7=DATAN(VAT7)  00008310
000500      AT8=DATAN(VAT8)  00008320
000501      S=S+CXR*CXR*(AT1+AT2+VY2*(AT3+AT4)/VY4-VX3*(AT5+AT6)/VX5 00008330
000502      & -VX4*(AT7+AT8)/VX6) 00008340
C      00008350
C      00008360
000503      CFRIRI=S/(2.*PI) 00008370
C      00008380
C      00008390
000504      RETURN      00008400
000505      END      00008410
C      00008420
C      ***** TERRESTRIAL MEAN RADIUS, DECLINATION AND EQUATION ***** 00008430
C      ***** OF TIME - SUBROUTINE ***** 00008440
C      00008450
000506      SUBROUTINE SUN(M, ID, PI, R, DS, ET) 00008460
000507      DOUBLE PRECISION FID, D, W, W2, W3, R, DS, ET, PI 00008470
C      00008480
000508      FID=DFLOAT(ID) 00008490
000509      GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12), M 00008500
C      00008510
000510      1 D=FID 00008510
000511      GO TO 15 00008520
000512      2 D=31.+FID 00008530
000513      GO TO 15 00008540
000514      3 D=60.+FID 00008550
000515      GO TO 15 00008560
000516      4 D=91.+FID 00008570
000517      GO TO 15 00008580
000518      5 D=121.+FID 00008590
000519      GO TO 15 00008600
000520      6 D=152.+FID 00008610
000521      GO TO 15 00008620
000522      7 D=182.+FID 00008630
000523      GO TO 15 00008640
000524      8 D=213.+FID 00008650
000525      GO TO 15 00008660
000526      9 D=244.+FID 00008670
000527      GO TO 15 00008680
000528      10 D=274.+FID 00008690
000529      GO TO 15 00008700
000530      11 D=305.+FID 00008710
000531      GO TO 15 00008720
000532      12 D=335.+FID 00008730
000533      15 W=2.*PI*D/366. 00008740
000534      W2=2.*W 00008750
000535      W3=3.*W 00008760
C      00008770
000536      R=1.000104D0-0.1675382D-1*DCOS(W-0.5596336D-1) 00008780
&      -0.1149089D-3*DCOS(W2-0.1636872D0) 00008790
&      +0.6182268D-5*DCOS(W3-0.1993716D0) 00008800
C      00008810
000537      DS=0.3522133D0-23.24763D0*DCOS(W+0.153231D0) 00008820
&      -0.3368908D0*DCOS(W2+0.2070988D0) 00008830
&      -0.1852646D0*DCOS(W3+0.6201293D0) 00008840
C      00008850
000538      ET=-0.2786409D-3+0.1227715D0*DCOS(W+1.498311D0) 00008860
&      -0.1654575D0*DCOS(W2-1.261546D0) 00008870
&      -0.535383D-2*DCOS(W3-1.1571D0) 00008880

```

```

000539 RETURN 00008890
000540 END 00008900
C ***** DIMENSION-ELEMENT NUMBER AND TIME - SUBROUTINE ***** 00008910
C 00008920
000541 SUBROUTINE TMJ(M,N,T) 00008930
000542 DOUBLE PRECISION T 00008940
C 00008950
000543 IF(M.GE.240) GO TO 5 00008960
000544 T=DFLOAT(M)/10. 00008970
000545 N=1+M/5 00008980
000546 RETURN 00008990
C 00009000
000547 5 L=M-240 00009010
000548 T=DFLOAT(L)/10. 00009020
000549 N=1+L/5 00009030
000550 RETURN 00009040
000551 END 00009050
C 00009060
C ***** SOLAR RADIATION - SUBROUTINE ***** 00009070
C 00009080
000552 SUBROUTINE SOLAR(RPI,OLO,SRAN,CRAN,SRAZR1,CRAZR1,SRAZR2,CRAZR2, 00009090
& TM,ET,R,SOLA,COLA,SDS,CDS,SH,SA,CA,DSRH,SSRH, 00009100
& DSRRO1,DSRRO2) 00009110
000553 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) 00009120
C 00009130
000554 RST=RPI*((TM+ET-12.)*15.+OLO-135.) 00009140
000555 SST=DSIN(RST) 00009150
000556 CST=DCOS(RST) 00009160
C 00009170
000557 SH=SOLA*SDS+COLA*CDS*CST 00009180
C 00009190
000558 IF(SH.GT.0.) GO TO 5 00009200
C 00009210
000559 SH=0. 00009220
000560 SA=0. 00009230
000561 CA=0. 00009240
000562 DSRH=0. 00009250
000563 SSRH=0. 00009260
000564 DSRRO1=0. 00009270
000565 DSRRO2=0. 00009280
C 00009290
000566 RETURN 00009300
C 00009310
C 00009320
000567 5 CH=DSQRT(1.-SH*SH) 00009330
000568 SA=CDS*SST/CH 00009340
000569 CA=(SH*SOLA-SDS)/(CH*COLA) 00009350
C 00009360
000570 PE=1.-0.3*SH**0.33333333 00009370
000571 PEC=PE**(1./SH) 00009380
000572 VPEC=1164.*PEC/(R*R) 00009390
C 00009400
000573 DSRH=VPEC*SH 00009410
000574 SSRH=1396.8*(1.-PEC)*(1.-PE)*SH/(1.-1.4*DLOG(PE)) 00009420
C 00009430
000575 VR1=CA*CRAZR1+SA*SRAZR1 00009440
000576 VR2=CA*CRAZR2+SA*SRAZR2 00009450
000577 V1=SH*CRAN 00009460
000578 V2=CH*SRAN 00009470
C 00009480
000579 DSRRO1=VPEC*(V1+V2*VR1) 00009490
000580 DSRRO2=VPEC*(V1+V2*VR2) 00009500
C 00009510
000581 IF(DSRRO1.LE.0.) DSRRO1=0. 00009520
000582 IF(DSRRO2.LE.0.) DSRRO2=0. 00009530
C 00009540
000583 RETURN 00009550
000584 END 00009560
C ***** THE POSITION OF THE SHADOW GROUND ***** 00009570
C 00009580
000585 SUBROUTINE PSG(XL,YW,ZH,TRAN,SRAZ,CRAZ,SHJ,SAJ,CAJ, 00009590
& GX1,GX2,GX3,GX4,GX5,GX6,GY1,GY2,GY3) 00009600
000586 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) 00009610
C 00009620
000587 VT=SHJ/DSQRT(1.-SHJ*SHJ) 00009630
000588 GL1=ZH/VT 00009640
000589 GL2=(ZH+0.5*YW*TRAN)/VT 00009650
C 00009660
000590 VS=SAJ*CRAZ-CAJ*SRAZ 00009670
000591 VC=CAJ*CRAZ+SAJ*SRAZ 00009680
C 00009690

```



```

000592      GX1=GL1*VS      00009700
000593      GX2=XL+GL1*VS 00009710
000594      GX3=XL+GL2*VS 00009720
000595      GX4=GX2      00009730
000596      GX5=GX1      00009740
000597      GX6=GL2*VS  00009750
C          00009760
000598      GY1=GL1*VC  00009770
000599      GY2=0.5*YW+GL2*VC 00009780
000600      GY3=YW+GL1*VC 00009790
C          00009800
000601      RETURN     00009810
000602      END        00009820
C          00009830
C          00009840
C          00009850
C          00009860
000603      SUBROUTINE CFRG(AI,XI,PI,RX1,RX2,RY1,RY2,RZ1,RZ2,GX1,GX2,GX3,GX4, 00009870
&          GY1,GY2,GFGRO,GFGRI) 00009880
000604      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) 00009890
000605      REAL*8      AI(20),XI(20) 00009900
C          00009910
000606      R1=RX2-RX1    00009920
000607      R2=RY2-RY1    00009930
000608      R5=RZ2-RZ1    00009940
000609      AR=DABS(R1)*DSQRT(R2*R2+R5*R5) 00009950
C          00009960
000610      SGY1=GY1     00009970
000611      SGY2=GY2     00009980
C          00009990
000612      GY11=GY1    00010000
000613      GY22=GY2    00010010
C          00010020
C          00010030
000614      IF(RZ1.EQ.RZ2) GO TO 5    00010040
000615      GY=(RY1*RZ2-RY2*RZ1)/R5  00010050
C          00010060
000616      IF(RZ1.GT.RZ2) GO TO 15    00010070
000617      IF(GY.LE.GY1) GO TO 5      00010080
000618      IF(GY.GT.GY1.AND.GY.LT.GY2) GO TO 25 00010090
000619      GO TO 35                    00010100
000620      25 GY1=GY                    00010110
000621      GO TO 5                    00010120
000622      35 IF(GY.GE.GY2) GO TO 45  00010130
C          00010140
000623      15 IF(GY.GE.GY2) GO TO 5    00010150
000624      IF(GY.GT.GY1.AND.GY.LT.GY2) GO TO 55 00010160
000625      GO TO 65                    00010170
000626      55 GY2=GY                    00010180
000627      GO TO 5                    00010190
000628      65 IF(GY.LE.GY1) GO TO 45  00010200
C          00010210
000629      5 CALL CFRGS(AI,XI,PI,RX1,RX2,RY1,RY2,RZ1,RZ2,GX1,GX2,GX3,GX4, 00010220
&          GY1,GY2,AR,GF2) 00010230
C          00010240
000630      GFGRI=GF2                    00010250
C          00010260
000631      GO TO 75                    00010270
C          00010280
000632      45 GFGRI=0.                  00010290
C          00010300
C          00010310
000633      75 GY1=GY11                  00010320
000634      GY2=GY22                      00010330
C          00010340
C          00010350
000635      IF(RZ1.EQ.RZ2) GO TO 85    00010360
C          00010370
000636      IF(RZ1.GT.RZ2) GO TO 95    00010380
000637      IF(GY.LE.GY1) GO TO 85    00010390
000638      IF(GY.GT.GY1.AND.GY.LT.GY2) GO TO 105 00010400
000639      GO TO 115                    00010410
000640      105 GY2=GY                     00010420
000641      GO TO 125                    00010430
000642      115 IF(GY.GE.GY2) GO TO 125 00010440
C          00010450
000643      95 IF(GY.GE.GY2) GO TO 85   00010460
000644      IF(GY.GT.GY1.AND.GY.LT.GY2) GO TO 135 00010470
000645      GO TO 145                    00010480
000646      135 GY1=GY                     00010490
000647      GO TO 125                    00010500

```

```

000648      145 IF(GY.LE.GY1) GO TO 125
C
000649      125 CALL CFRGS(AI,XI,PI,RX1,RX2,RY1,RY2,RZ1,RZ2,GX1,GX2,GX3,GX4,
&          GY1,GY2,AR,GF22)
C
000650      GFGRO=DABS(GF22)
C
000651      GO TO 155
C
000652      85 GFGRO=0.
C
000653      155 GY1=SGY1
000654      GY2=SGY2
C
000655      RETURN
000656      END
C
C
C      SUBROUTINE CFRGS
C
C
000657      SUBROUTINE CFRGS(AI,XI,PI,RX1,RX2,RY1,RY2,RZ1,RZ2,GX1,GX2,GX3,GX4,
&          GY1,GY2,AR,GF2)
C
000658      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000659      REAL*8 AI(20),XI(20)
C
000660      R1=RX2-RX1
000661      R2=RY2-RY1
000662      R3=RZ1*RZ1
000663      R4=RZ2*RZ2
000664      R5=RZ2-RZ1
000665      G1=GX2-GX1
000666      G2=GX3-GX2
000667      G3=GX4-GX3
000668      G4=GX1-GX4
000669      G5=GY2-GY1
000670      V1=RY2-GY1
000671      V2=RY1-GY1
000672      V3=RY2-GY2
000673      V4=RY1-GY2
000674      V5=RX1-GX1
000675      V6=RX1-GX2
000676      V7=RX1-GX3
000677      V8=RX1-GX4
000678      V9=RX2-GX1
000679      V10=RX2-GX2
000680      VV1=V1*V1
000681      VV2=V2*V2
000682      VV3=V3*V3
000683      VV4=V4*V4
C
000684      S1=0.
000685      S2=0.
000686      S3=0.
000687      S4=0.
000688      S5=0.
C
000689      DO 20 I=1,20
000690          AX=0.5*AI(I)
000691          X=0.5*(1.+XI(I))
000692          VXX=R1*X
000693          VYY=R2*X
000694          VZ=(R5*X+RZ1)**2
C
000695      DO 20 J=1,20
000696          AXX=0.5*AI(J)
000697          XX=0.5*(1.+XI(J))
C
000698          VX1=(VXX-G1*XX+V5)**2
000699          D1=(VX1+VV1+R4)/(VX1+VV2+R3)
000700          SX1=DLOG(D1)
C
000701          VX2=(VXX-G2*XX+V6)**2
000702          VY2=(V1-G5*XX)**2
000703          VVY2=(V2-G5*XX)**2
000704          D2=(VX2+VY2+R4)/(VX2+VVY2+R3)
000705          SX2=DLOG(D2)
C
000706          VX3=(VXX-G3*XX+V7)**2
000707          D3=(VX3+VV3+R4)/(VX3+VV4+R3)

```

```

000708          SX3=DLOG(D3)                                00011320
C                                                       00011330
000709          VX4=(VXX-G4*XX+V8)**2                    00011340
000710          VY4=(V3+G5*XX)**2                       00011350
000711          VVY4=(V4+G5*XX)**2                      00011360
000712          D4=(VX4+VY4+R4)/(VX4+VVY4+R3)           00011370
000713          SX4=DLOG(D4)                              00011380
C                                                       00011390
000714          VX5=(V6-G2*XX)**2                        00011400
000715          VX6=(V10-G2*XX)**2                      00011410
000716          VX7=(V9+G4*XX)**2                       00011420
000717          VX8=(V5+G4*XX)**2                       00011430
000718          VU=(VYY-G5*XX+V2)**2                    00011440
000719          VVU=VU+VZ                                 00011450
000720          D5=((VX5+VVU)*(VX7+VVU))/((VX6+VVU)*(VX8+VVU)) 00011460
000721          SX5=DLOG(D5)                              00011470
C                                                       00011480
000722          AA=AX*AXX                                 00011490
000723          S1=S1+AA*SX1                              00011500
000724          S2=S2+AA*SX2                              00011510
000725          S3=S3+AA*SX3                              00011520
000726          S4=S4+AA*SX4                              00011530
000727          S5=S5+AA*SX5                              00011540
C                                                       00011550
000728          C 20 CONTINJE                             00011560
C                                                       00011570
000729          S=R1*(G1*S1+G2*S2+G3*S3+G4*S4)+R2*G5*S5 00011580
000730          GF2=S/(4.*PI*AR)                          00011590
C                                                       00011600
000731          RETURN                                    00011610
000732          END                                       00011620
C          ***** RADIANT HEAT-TRANSFER COEFFICIENT - SUBROUTINE ***** 00011630
C                                                       00011640
000733          SUBROUTINE RHC(TM,X,Y)                    00011650
000734          DOUBLE PRECISION TM,X,Y,TF                00011660
C                                                       00011670
000735          IF(TM.GT.6.5) GO TO 5                     00011680
000736          TF=1.1                                     00011690
000737          GO TO 45                                   00011700
C                                                       00011710
000738          5 IF(TM.GT.10.) GO TO 15                   00011720
000739          TF=1.2                                     00011730
000740          GO TO 45                                   00011740
C                                                       00011750
000741          15 IF(TM.GT.15.5) GO TO 25                 00011760
000742          TF=1.3                                     00011770
000743          GO TO 45                                   00011780
C                                                       00011790
000744          25 IF(TM.GT.20.) GO TO 35                 00011800
000745          TF=1.2                                     00011810
000746          GO TO 45                                   00011820
C                                                       00011830
000747          35 TF=1.1                                  00011840
C                                                       00011850
000748          45 Y=4.88*X*TF                             00011860
C                                                       00011870
000749          RETURN                                    00011880
000750          END                                       00011890
C          ***** PARAMETER (J) CONTROL = SUBROUTINE ***** 00011900
C                                                       00011910
000751          SUBROUTINE PARA(I,J)                       00011920
C                                                       00011930
000752          GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12), I    00011940
C                                                       00011950
000753          1 J=49                                     00011960
000754          RETURN                                    00011970
000755          2 J=50                                     00011980
000756          RETURN                                    00011990
000757          3 J=51                                     0002000
000758          RETJRN                                    0002010
000759          4 J=52                                     0002020
000760          RETJRN                                    0002030
000761          5 J=53                                     0002040
000762          RETURN                                    0002050
000763          6 J=54                                     0002060
000764          RETJRN                                    0002070
000765          7 J=55                                     0002080
000766          RETURN                                    0002090
000767          8 J=56                                     0002100
000768          RETURN                                    0002110
000769          9 J=57                                     0002120

```

—130—

```

000770          RETURN                                00012130
000771      10 J=58                                00012140
000772          RETJRN                                00012150
000773      11 J=59                                00012160
000774          RETURN                                00012170
000775      12 J=60                                00012180
000776          RETJRN                                00012190
C                                                    00012200
000777          END                                  00012210
C                                                    00012220
C          ***** INSIDE ROOF SURFACE TEMP. USED TRIAL-ERROR METHOD (1) ***** 00012230
C                                                    00012240
000778          SUBROUTINE TRIAL1(ERI,CHCRI,TA,@AI2,@TI2,VI2,VI3,VI4,VI5,VX2, 00012250
&          VI2R,VTRI2,VVE)                          00012260
000779          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)            00012270
C                                                    00012280
C                                                    00012290
000780          IRI=0                                  00012300
000781          XL=VTRI2                               00012310
000782          VTRI2=VTRI2+0.01                      00012320
000783          XU=VTRI2                               00012330
C                                                    00012340
000784      5  ATRI2=4.88*ERI*((273.16+VTRI2)/100.)*4 00012350
000785          VTRA=CHCRI*(VTRI2-TA)                00012360
C                                                    00012370
000786          VVE=100.*(VI5*(VI3*ATRI2+VTRA-@TI2+@AI2-VX2))*0.25 00012380
000787          VI2L=VI2*(VI3*ATRI2+VTRA)-VI4*ATRI2 00012390
&          +CHCRI*(VVE-(273.16+TA))                00012400
C                                                    00012410
000788          IF(DABS(VI2L-VI2R).LT.0.01) RETURN 00012420
000789          IF(IRI.EQ.1) GO TO 25                  00012430
000790          IF(VI2L.GT.VI2R) GO TO 15             00012440
000791          XL=VTRI2                                00012450
000792          VTRI2=VTRI2+0.01                      00012460
000793          XU=VTRI2                                00012470
000794          GO TO 5                                00012480
C                                                    00012490
000795      15  VTRI2=0.5*(XU+XL)                      00012500
000796          IRI=1                                  00012510
000797          GO TO 5                                00012520
C                                                    00012530
000798      25  IF(VI2L.GT.VI2R) GO TO 35             00012540
000799          XL=VTRI2                                00012550
000800          VTRI2=0.5*(XU+XL)                      00012560
000801          GO TO 5                                00012570
C                                                    00012580
000802      35  XU=VTRI2                                00012590
000803          VTRI2=0.5*(XU+XL)                      00012600
000804          GO TO 5                                00012610
C                                                    00012620
000805          END                                  00012630
C                                                    00012640
C          ***** INSIDE ROOF SURFACE TEMP. USED TRIAL-ERROR METHOD (2) ***** 00012650
C                                                    00012660
000806          SUBROUTINE TRIAL2(ERI,CHCRI,TA,VI3,VQX,VTRI2) 00012670
000807          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)            00012680
C                                                    00012690
C                                                    00012700
000808          IRI=0                                  00012710
000809          VTRI2=J.                                00012720
C                                                    00012730
000810      5  ATRI2=4.88*ERI*((273.16+VTRI2)/100.)*4 00012740
000811          VTRA=CHCRI*(VTRI2-TA)                00012750
000812          VR=VI3*ATRI2+VTRA                    00012760
C                                                    00012770
000813          IF(DABS(VQX-VR).LT.1.0-10) RETURN 00012780
C                                                    00012790
000814          IF(IRI.EQ.1) GO TO 25                  00012800
000815          IF(VR.GT.VQX) GO TO 15                 00012810
000816          XL=VTRI2                                00012820
000817          VTRI2=VTRI2+5.                        00012830
000818          XU=VTRI2                                00012840
000819          GO TO 5                                00012850
C                                                    00012860
000820      15  VTRI2=0.5*(XU+XL)                      00012870
000821          IRI=1                                  00012880
000822          GO TO 5                                00012890
C                                                    00012900
000823      25  IF(VR.GT.VQX) GO TO 35                 00012910
000824          XL=VTRI2                                00012920
000825          VTRI2=0.5*(XU+XL)                      00012930

```

```

000826          GO TO 5                                00012940
C                                                       00012950
000827          35  XU=V TRIZ                          00012960
000828          VTRI 2=0.5*(XU+XL)                    00012970
000829          GO TO 5                                00012980
C                                                       00012990
000830          END                                    00013000
C                                                       00013010
C          ***** SUNNY GROUND-SURFACE TEMP.          ***** 00013020
C                                                       00013030
C                                                       00013040
000831          SUBROUTINE GRTS(TA,DSRH,SSRH,ARH,AH,AG,EG,ER,TGS,QG,IGSD) 00013050
C                                                       00013060
000832          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)              00013070
000833          REAL*8  TA(60),DSRH(60),SSRH(60),ARH(60),Q(10),RC(10),RCC(10), 00013080
&              QG(60),TGS(60)                        00013090
C                                                       00013100
000834          DATA Q/ 10*-1.D2/                    00013110
000835          DATA RC/ -8.82961861D-3, -4.63759441D-2, -6.41383147D-2, 00013120
&              -6.45401276D-2, -5.73707334D-2, -4.75476480D-2, 00013130
&              -3.75590859D-2, -2.86582680D-2, -2.13476336D-2, 00013140
&              -1.56718964D-2/                        00013150
000836          DATA RCC/ 9.95994261D-1, 9.60767693D-1, 8.84827154D-1, 00013160
&              7.74131382D-1, 6.42599125D-1, 5.05929919D-1, 00013170
&              3.77762121D-1, 2.67489009D-1, 1.79615882D-1, 00013180
&              1.14374886D-1/                        00013190
000837          DATA TGC/ 25./, GTSAD/ -5.14/, CHCG/ 5.3/ 00013200
C                                                       00013210
C                                                       00013220
000838          ASH=AH/(1.+AH)                          00013230
000839          TCM=CHCG/(0.93*(0.24+0.441*AH))        00013240
C                                                       00013250
C                                                       00013260
000840          DO 10 I=1,50                          00013270
C                                                       00013280
000841          DO 20 J=50,285,5                       00013290
000842          CALL TMJ(J,K,TM)                        00013300
000843          SQ=0.                                    00013310
C                                                       00013320
000844          DO 30 L=1,10                            00013330
000845          Q(L)=RC(L)*GTSAD+RCC(L)*Q(L)            00013340
000846          30  SQ=SQ+Q(L)                          00013350
C                                                       00013360
000847          IF(I.NE.1) GO TO 5                    00013370
C                                                       00013380
000848          CALL RHC(TM,EG,RHCG)                    00013390
000849          AHCG=CHCG+RHCG                           00013400
000850          GTSA=TA(K)+(AG*(DSRH(K)+SSRH(K)) 00013410
&              +EG*(ARH(K)-4.88*((273.16+TA(K))/100.))**4)/AHCG 00013420
000851          GO TO 15                                00013430
C                                                       00013440
000852          5  IN=1                                  00013450
000853          GTSA=TA(K)+(AG*(DSRH(K)+SSRH(K)) 00013460
&              +EG*(ARH(K)-4.88*((273.16+TGS(K))/100.))**4)/CHCG 00013470
C                                                       00013480
000854          15  GTSAD=G TSA-TGC                    00013490
000855          QG(K)=0.464120277D1*G TSA+SQ           00013500
C                                                       00013510
000856          IF(I.NE.1) GO TO 25                    00013520
000857          TGS(K)=0.5*(TA(K)+G TSA)               00013530
C                                                       00013540
C                                                       00013550
000858          25  GZ=373.16/(273.16+TGS(K))          00013560
000859          GY=GZ-1.                                  00013570
000860          GX=-7.90298*GY+5.02808*DLG10(GZ)-1.3816D-7*(10.**((11.344* 00013580
&              (GY/GZ))-1.))+8.1328D-3*(10.**((-3.49149*GY)-1.)) 00013590
000861          PS=760.*10.**GX                          00013600
000862          SG=0.622*PS/(760.-0.377*PS)            00013610
C                                                       00013620
000863          TGG=TA(K)+(AG*(DSRH(K)+SSRH(K)) 00013630
&              +EG*(ARH(K)-4.88*((273.16+TGS(K))/100.))**4) 00013640
&              -(QG(K)+580.*ER*TCM*(SG-ASH))/CHCG 00013650
C                                                       00013660
C                                                       00013670
000864          IF(DABS(TGG-TGS(K)).LT.0.02) GO TO 45  00013680
C                                                       00013690
000865          IF(IN.EQ.1) GO TO 35                   00013700
C                                                       00013710
000866          TGS(K)=0.5*(TGS(K)+0.5*(TGG+TGS(K)))  00013720
000867          IN=IN+1                                   00013730
000868          GO TO 25                                00013740

```

— 132 —

```

C
000869 35 TGS(K)=0.5*(TGG+TGS(K))
000870 IN=IN+1
000871 GO TO 25
C
000872 45 TGS(K)=0.5*(TGG+TGS(K))
C
C
000873 20 CONTINUE
C
000874 IF(I.EQ.1) GO TO 55
C
000875 IGSD=I
C
000876 IF()ABS(QG1-QG(11)).LT.0.01) RETURN
C
000877 55 QG1=QG(11)
C
000878 10 CONTINJE
C
000879 END
C
C ***** SHADY GROUND-SURFACE TEMPERATURE *****
C
000880 SUBROUTINE GRTB(TA,DSRH,SSRH,ARH,TGS,FSGB,AH,AG,EG,ER,
& TGB,IGBD)
C
000881 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000882 REAL*8 TA(60),DSRH(60),SSRH(60),ARH(60),TGS(60),TGB(60),TG(60),
& FSGB(60),QG(60),Q(10),RC(10),RCC(10)
000883 INTEGER*4 IGBD(60)
000884 DATA Q/ 10*-1.D2/
000885 DATA RC/ -8.82961861D-3, -4.63759441D-2, -6.41383147D-2,
& -6.45401276D-2, -5.73707334D-2, -4.75476480D-2,
& -3.75590859D-2, -2.86582680D-2, -2.13476336D-2,
& -1.56718964D-2/
000886 DATA RCC/ 9.95994261D-1, 9.60767693D-1, 8.84827154D-1,
& 7.74131382D-1, 6.42599125D-1, 5.05929919D-1,
& 3.77762121D-1, 2.67489009D-1, 1.79615882D-1,
& 1.14374886D-1/
000887 DATA TGC/ 25./, GTSAD/ -5.14/, CHCG/ 5.3/
C
C
000888 ASH=AH/(1.+AH)
000889 TCM=CHCG/(0.93*(0.24+0.441*AH))
C
000890 DO 10 II=50,285,5
C
000891 CALL TMJ(II,KK,TM)
C
000892 IF(KK.LE.11.OR.KK.GE.41) GO TO 5
C
000893 VDSRH2=DSRH(KK-2)
000894 VDSRH1=DSRH(KK-1)
000895 VDSRH=DSRH(KK)
000896 DSRH(KK-2)=0.
000897 DSRH(KK-1)=0.
000898 DSRH(KK)=0.
C
000899 GO TO 15
C
000900 5 TGB(KK)=TGS(KK)
000901 IGBD(KK)=0
000902 GO TO 10
C
000903 15 DO 20 I=1,50
C
000904 DO 30 J=50,285,5
000905 CALL TMJ(J,K,TM)
000906 SQ=0.
000907 DO 40 L=1,10
000908 Q(L)=RC(L)*GTSAD+RCC(L)*Q(L)
000909 40 SQ=SQ+Q(L)
C
000910 IF(K.EQ.KK.OR.K.EQ.(KK-1).OR.K.EQ.(KK-2)) GO TO 95
000911 FSGBK=1.
000912 GO TO 105
C
000913 95 FSGBK=FSGB(K)
C
000914 105 IF(I.NE.1) GO TO 25

```

```

000915 C CALL RHC(TM,EG,RHCG) 00014560
000916 AHCG=CHCG+RHCG 00014570
000917 G TSA=TA(K)+(AG*(DSRH(K)+FSGBK*SSRH(K)) 00014580
& +EG*(FSGBK*ARH(K)-4.88*((273.16+TA(K))/100.))**4) 00014590
& /AHCG 00014600
000918 GO TO 35 00014610
000919 25 IN=1 00014620
000920 G TSA=TA(K)+(AG*(DSRH(K)+FSGBK*SSRH(K)) 00014630
& +EG*(FSGBK*ARH(K)-4.88*((273.16+TG(K))/100.))**4)/CHCG 00014640
000921 C 35 GTSAD=G TSA-TGC 00014650
000922 QG(K)=0.46412027701*G TSA+SQ 00014660
000923 C IF(I.NE.1) GO TO 45 00014670
000924 C TG(K)=0.5*(TA(K)+G TSA) 00014680
000925 C 45 GZ=373.16/(273.16+TG(K)) 00014690
000926 GY=GZ-1. 00014700
000927 GX=-7.90298*GY+5.02808*DL0G10(GZ)-1.3816D-7*(10.**((11.344* 00014710
& (GY/GZ))-1.))+8.1328)-3*(10.**(-3.49149*GY)-1.) 00014720
000928 PS=760.*10.**GX 00014730
000929 SG=0.622*PS/(760.-0.377*PS) 00014740
000930 C TGG=TA(K)+(AG*(DSRH(K)+FSGBK*SSRH(K)) 00014750
& +EG*(FSGBK*ARH(K)-4.88*((273.16+TG(K))/100.))**4) 00014760
& -(QG(K)+580.*ER*TCM*(SG-ASH))/CHCG 00014770
000931 C IF(DABS(TGG-TG(K)).LT.0.02) GO TO 65 00014780
000932 C IF(IN.EQ.1) GO TO 55 00014790
000933 TG(K)=0.5*(TG(K)+0.5*(TGG+TG(K))) 00014800
000934 IN=IN+1 00014810
000935 GO TO 45 00014820
000936 C 55 TG(K)=0.5*(TGG+TG(K)) 00014830
000937 IN=IN+1 00014840
000938 GO TO 45 00014850
000939 C 65 TG(K)=0.5*(TGG+TG(K)) 00014860
000940 C 30 CONTINUE 00014870
000941 C IF(I.EQ.1) GO TO 75 00014880
000942 C IF(DABS(QG1-QG(11)).LT.0.01) GO TO 85 00014890
000943 C 75 QG1=QG(11) 00014900
000944 C 20 CONTINUE 00014910
000945 C 85 TGB(KK)=TG(KK) 00014920
000946 DSRH(KK-2)=VDSRH2 00014930
000947 DSRH(KK-1)=VDSRH1 00014940
000948 DSRH(KK)=VDSRH 00014950
000949 IGBD(KK)=I 00014960
000950 C DO 50 IQ=1,10 00014970
000951 Q(IQ)=-1.D2 00014980
000952 C 50 CONTINUE 00014990
000953 C 10 CONTINUE 00015000
000954 C RETURN 00015010
000955 C END 00015020
C ***** ABSCISSA AND ORDINATE OF P ***** 00015030
C ***** CONFIGURATION FACTOR FOR P TO INSIDE ROOF ***** 00015040
C ***** AND TO SKY ***** 00015050
000956 C SUBROUTINE PCFXY(PI,VL,VW,VHE,VZ,NXD,NYD,XD,YD,VTS,VTC,VTT, 00015060
& X,Y,CFPR1,CFPR2,CFPR12,CFPSK) 00015070
000957 C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) 00015080
000958 C REAL*8 X(31),Y(31),CFPR1(31,31),CFPR2(31,31),CFPSK(31,31), 00015090
& CFPR12(31,31) 00015100
C 00015110
C 00015120
C 00015130
000959 C V1=VHE-VZ 00015140
000960 C V2=V1/VTS 00015150

```

```

000961      V3=V1/VTT      00015370
000962      V4=0.5*VW/VTC+V2      00015380
C      00015390
000963      DO 20 J=1,NYD      00015400
000964      Y(J)=YD*DFLOAT(J-1)      00015410
000965      VD1=Y(J)+V3      00015420
000966      VD2=(VW-Y(J))+V3      00015430
C      00015440
000967      DO 20 K=1,NXD      00015450
000968      X(K)=XD*DFLOAT(K-1)      00015460
000969      VX=VL-X(K)      00015470
000970      CALL CFPR(PI,VD1,VTC,VTS,V4,X(K),CF11)      00015480
000971      CALL CFPR(PI,VD1,VTC,VTS,V4,VX,CF12)      00015490
000972      CALL CFPR(PI,VD1,VTC,VTS,V2,X(K),CF13)      00015500
000973      CALL CFPR(PI,VD1,VTC,VTS,V2,VX,CF14)      00015510
000974      CALL CFPR(PI,VD2,VTC,VTS,V4,X(K),CF21)      00015520
000975      CALL CFPR(PI,VD2,VTC,VTS,V4,VX,CF22)      00015530
000976      CALL CFPR(PI,VD2,VTC,VTS,V2,X(K),CF23)      00015540
000977      CALL CFPR(PI,VD2,VTC,VTS,V2,VX,CF24)      00015550
000978      CFPR1(K,J)=CF11+CF12-CF13-CF14      00015560
000979      CFPR2(K,J)=CF21+CF22-CF23-CF24      00015570
000980      CFPR12(K,J)=CFPR1(K,J)+CFPR2(K,J)      00015580
000981      20 CFPSK(K,J)=1.-CFPR12(K,J)      00015590
C      00015600
000982      RETURN      00015610
000983      END      00015620
C      00015630
C      *** CONFIGURATION FACTOR OF P TO INSIDE ROOFS - SUBROUTINE ***      00015640
C      *** SUBROUTINE NAME = CFPR ***      00015650
C      00015660
000984      SUBROUTINE CFPR(PI,D,CT,ST,XL,B,CF)      00015670
000985      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)      00015680
C      00015690
000986      S1=XL*XL+D*D-2.*XL*D*CT      00015700
000987      SS1=DSQRT(S1)      00015710
000988      S2=(D*ST)**2+B*B      00015720
000989      SS2=DSQRT(S2)      00015730
000990      S3=XL*CT-D      00015740
000991      S4=XL-D*CT      00015750
000992      SAT1=B/SS1      00015760
000993      SAT2=S4/SS2      00015770
000994      SAT3=D*CT/SS2      00015780
000995      SAT4=B/D      00015790
000996      AT1=DATAN(SAT1)      00015800
000997      AT2=DATAN(SAT2)      00015810
000998      AT3=DATAN(SAT3)      00015820
000999      AT4=DATAN(SAT4)      00015830
001000      CF=(S3*AT1/SS1+B*CT*(AT2+AT3)/SS2+AT4)/(2.*PI)      00015840
C      00015850
001001      RETURN      00015860
001002      END      00015870
C      00015880
C      ***** THE DICISION FOR SUNNY OR SHADY POSITION OF P *****      00015890
C      00015900
001003      SUBROUTINE SHADOW(XX,YY,ZZ,PX,PY,PZ,NXD,NYD,      00015910
&      TRAN,SRAZ,CRAZ,SHJ,SAJ,CAJ,SHADP)      00015920
C      00015930
001004      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)      00015940
001005      REAL*8 PX(31),PY(31),SHADP(31,31)      00015950
C      00015960
C      00015970
001006      Z1=ZZ-PZ      00015980
001007      Z2=Z1+YY*TRAN*0.5      00015990
C      00016000
C      00016010
001008      IF(SHJ.LE.0.) GO TO 65      00016020
C      00016030
001009      SQHS=DSQRT(1.-SHJ*SHJ)      00016040
001010      THS=SHJ/SQHS      00016050
C      00016060
001011      V1=Z1/THS      00016070
001012      V2=Z2/THS      00016080
001013      V3=V2-V1      00016090
C      00016100
001014      CAA=CAJ*CRAZ+SAJ*SRAZ      00016110
001015      SAA=SAJ*CRAZ-CAJ*SRAZ      00016120
001016      TAA=SAA/CAA      00016130
C      00016140
001017      V4=V1*CAA      00016150
001018      V5=YY+V4      00016160
001019      V6=(CAA+0.5*YY/V3)/SAA      00016170

```





—136—

```

001070      RETURN
001071      END
C
C      ***** WEIGHTS FOR SIMPSON FORMULA - SUBROUTINE *****
001072      SUBROUTINE SPF(I,J,X,Y)
001073      DOUBLE PRECISION X,Y,EV1,EV2
C
001074      IF(I.EQ.1) GO TO 5
C
001075      IF(I.EQ.J) GO TO 5
C
001076          EV1=DFLOAT(I)/2.
001077          EV2=DFLOAT(I/2)
C
001078      IF(EV1.GT.EV2) GO TO 15
C
001079          Y=4.*X
001080      RETURN
C
001081      5      Y=X
001082      RETURN
C
001083      15     Y=2.*X
001084      RETURN
C
001085      END
C
C      ***** DAILY MEAN (SIMPSON FORMULA) - SUBROUTINE *****
001086      SUBROUTINE DAILY(I,X,Y,Z)
001087      DOUBLE PRECISION X,Y,Z
C
001088      IF(I.EQ.1) GO TO 5
C
001089          Z=Z+X*Y
001090      RETURN
C
001091      5      Z=0.
001092          Z=Z+X*Y
001093      RETURN
C
001094      END
C
C      ***** OVERALL MEAN CALCULATION (SIMPSON FORMULA) *****
001095      SUBROUTINE OVAME(M,N,X,Y,A,VM)
001096      DOUBLE PRECISION X,Y,VM,S,C
001097      REAL*8 A(31,31)
C
001098      VM=0.
C
001099      DO 10 K=1,N
001100          S=0.
C
001101          DO 20 L=1,M
001102              CALL SPF(L,M,X,C)
001103              S=S+C*A(L,K)
001104          20 CONTINUE
C
001105              CALL SPF(K,N,Y,C)
001106              VM=VM+C*S
001107          10 CONTINUE
C
001108      RETURN
001109      END
C
C      ***** SETTING ZERO VALUE IN DIMENSIONS - SUBROUTINE *****
001110      SUBROUTINE DIMO(M,N,X)
001111      REAL*8 X(31,31)
C
001112      DO 10 J=1,N
001113          DO 10 I=J,M
C
001114              X(I,J)=0.
001115          10      X(J,I)=X(I,J)
C
001116      RETURN
001117      END

```

```

00016990
00017000
00017010
00017020
00017030
00017040
00017050
00017060
00017070
00017080
00017090
00017100
00017110
00017120
00017130
00017140
00017150
00017160
00017170
00017180
00017190
00017200
00017210
00017220
00017230
00017240
00017250
00017260
00017270
00017280
00017290
00017300
00017310
00017320
00017330
00017340
00017350
00017360
00017370
00017380
00017390
00017400
00017410
00017420
00017430
00017440
00017450
00017460
00017470
00017480
00017490
00017500
00017510
00017520
00017530
00017540
00017550
00017560
00017570
00017580
00017590
00017600
00017610
00017620
00017630
00017640
00017650
00017660
00017670
00017680
00017690
00017700
00017710
00017720
00017730
00017740
00017750
00017760
00017770
00017780
00017790

```

```

C
C ***** MAXIMUM VALUE - SUBROUTINE *****
C
001118 SUBROUTINE MAX(X,Y)
001119 DOUBLE PRECISION X,Y
C
001120 IF(X.GE.Y) RETURN
001121 X=Y
001122 RETURN
C
001123 END

```

```

00017800
00017810
00017820
00017830
00017840
00017850
00017860
00017870
00017880
00017890
00017900

```

付録-3 形態係数に関して豚と等価な円筒の半径, 長さ, 中心位置を求める電算機プログラム

```

C
C ***** THE OPTIMUM CENTER-POSITION OF AN EQUIVALENT CYLINDER *****
C ***** DATA SET NAME = OCPCY *****
C
000001 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000002 REAL*8 X(100),Y(100),Z(100),CF0(100),CR(100),OR(100),CX(50),
        CZ(50),CL(50),COEF(50,50),EQCR(50,50)
C
000003 INTEGER*4 ID(100)
C
000004 WRITE(6,600)
C
000005 READ(5,500) NC
C
000006 DO 10 I=1,NC
000007 READ(5,510) X(I),Y(I),Z(I),CF0(I),ID(I)
000008 10 WRITE(6,610) I,X(I),Y(I),Z(I),CF0(I),ID(I)
C
000009 READ(5,520) SL,SH,NX,NZ
C
000010 WRITE(6,620) SL,SH
C
000011 NX1=NX+1
000012 NZ1=NZ+1
000013 NCX=(NX1+1)/2
000014 NCZ=(NZ1+1)/2
C
000015 DX=SL/DFLOAT(NX)
000016 DZ=SH/DFLOAT(NZ)
C
000017 CALL PARA(NC,NNC)
000018 CALL PARA(NX1,NNX1)
000019 CALL PARA(NZ1,NNZ1)
C
000020 OPCOVA=100.
C
C
000021 DO 20 I=1,NX1
000022 ICX=I-NCX
000023 CX(I)=DFLOAT(ICX)*DX
C
000024 IF(1.GE.NCX) GO TO 5
000025 CL(I)=2.*DFLOAT(I-1)*DX
000026 GO TO 20
C
000027 5 CL(I)=2.*DFLOAT(NX1-I)*DX
C
000028 20 CONTINUE
C
000029 DO 30 I=1,NZ1
000030 ICZ=I-NCZ
000031 30 CZ(I)=DFLOAT(ICZ)*DZ
C
000032 WRITE(6,630)
000033 CALL OUTPRT(NX1,NNX1,CX)
C
000034 WRITE(6,640)
000035 CALL OUTPRT(NZ1,NNZ1,CZ)
C
000036 WRITE(6,650)
000037 CALL OUTPRT(NX1,NNX1,CL)
C
C

```

```

00000010
***00000020
***00000030
00000040
00000050
00000060
00000070
00000080
00000090
00000100
00000110
00000120
00000130
00000140
00000150
00000160
00000170
00000180
00000190
00000200
00000210
00000220
00000230
00000240
00000250
00000260
00000270
00000280
00000290
00000300
00000310
00000320
00000330
00000340
00000350
00000360
00000370
00000380
00000390
00000400
00000410
00000420
00000430
00000440
00000450
00000460
00000470
00000480
00000490
00000500
00000510
00000520
00000530
00000540
00000550
00000560
00000570
00000580
00000590
00000600
00000610
00000620
00000630
00000640
00000650
00000660

```

```

000038      DO 40 I=1,NZ1      00000670
000039          COEF(1,I)=0.    00000680
000040          COEF(NX1,I)=0.  00000690
000041          EQCR(1,I)=0.    00000700
000042      40      EQCR(NX1,I)=0. 00000710
      C      00000720
      C      00000730
000043      DO 50 J=1,NZ1      00000740
000044      DO 50 I=2,NX      00000750
      C      00000760
000045          DO 60 K=1,NC    00000770
000046              PX=X(K)-CX(I) 00000780
000047              PZ=Z(K)-CZ(J) 00000790
      C      00000800
000048          GO TO (15,25,35), ID(K) 00000810
      C      00000820
000049      15      CALL EQRCY1(PX,Y(K),PZ,CFO(K),CL(I),CR(K)) 00000830
000050          GO TO 60      00000840
      C      00000850
000051      25      CALL EQRCY2(PX,Y(K),PZ,CFO(K),CL(I),CR(K)) 00000860
000052          GO TO 60      00000870
      C      00000880
000053      35      CALL EQRCY3(PX,Y(K),PZ,CFO(K),CL(I),CR(K)) 00000890
      C      00000900
000054      60      CONTINUE    00000910
      C      00000920
      C      00000930
000055          CALL COVASR(NC,CR,COVA,CRAV) 00000940
      C      00000950
000056          COEF(I,J)=COVA    00000960
000057          EQCR(I,J)=CRAV    00000970
      C      00000980
000058          IF(COVA.GE.OPCOVA) GO TO 45 00000990
000059              IOP=I          00001000
000060              JOP=J          00001010
000061              OPCX=CX(I)     00001020
000062              OPCZ=CZ(J)     00001030
000063              OPCL=CL(I)     00001040
000064              OPCOVA=COVA    00001050
000065              OPCRAV=CRAV    00001060
      C      00001070
000066      DO 70 L=1,NC      00001080
000067      70      OR(L)=CR(L)  00001090
      C      00001100
      C      00001110
000068      45      IF(I.EQ.NCX.AND.J.EQ.NCZ) GO TO 55 00001120
000069          GO TO 50      00001130
      C      00001140
000070      55      WRITE(6,660) I,J,CX(I),CZ(J),CL(I) 00001150
000071          CALL OUTPRT(NC,NNC,CR) 00001160
      C      00001170
000072          WRITE(6,670) CRAV,COVA 00001180
      C      00001190
000073      50 CONTINUE    00001200
      C      00001210
      C      00001220
000074          WRITE(6,680)      00001230
000075          CALL MATPRT(NX1,NZ1,COEF) 00001240
      C      00001250
000076          WRITE(6,690)      00001260
000077          CALL MATPRT(NX1,NZ1,EQCR) 00001270
      C      00001280
      C      00001290
000078          WRITE(6,700)      00001300
      C      00001310
000079          WRITE(6,660) IOP,JOP,OPCX,OPCZ,OPCL 00001320
000080          CALL OUTPRT(NC,NNC,OR) 00001330
      C      00001340
000081          WRITE(6,670) OPCRAV,OPCOVA 00001350
      C      00001360
      C      00001370
      C      00001380
000082      500 FORMAT(I5)      00001390
000083      510 FORMAT(4F10.0,I5) 00001400
000084      520 FORMAT(2F10.0,2I5) 00001410
      C      00001420
      C      00001430
000085      600 FORMAT(1H1,30X,69H***** THE OPTIMUM CENTER-POSITION OF AN EQUIVALENT CYLINDER *****//1H,5X,20H*** INPUT DATA ****//1H,12X,3HN00001440
&0.,19X,1HX,19X,1HY,19X,1HZ,9X,11HCF-OBSERVED,11X,9HDIRECTION//) 00001450
      C      00001460
      C      00001470

```

```

000086 610 FORMAT(1H ,I15,4F20.5,I20) 00001480
C 000087 620 FORMAT(1H0,5X,9H*** SL =,F10.5,9H CM *** ,10X,9H*** SH =,F10.5, 00001490
&9H CM ***) 00001500
C 000088 630 FORMAT(1H0,5X,23H*** ABSCISSA OF X ***) 00001510
C 000089 640 FORMAT(1H0,5X,23H*** ORDINATE OF Z ***) 00001520
C 000090 650 FORMAT(1H0,5X,28H*** LENGTH OF CYLINDER ***) 00001530
C 000091 660 FORMAT(1H0,5X,32H*** EQUIVALENT RADII (I,J) = (,I5,1H,,I5,14H) 00001540
&(CX,CZ) = (,D15.5,1H,,D15.5,6H) ***/1H ,5X,26H*** LENGTH OF CYLI 00001550
&NDER (,D15.5,6H) ***) 00001560
C 000092 670 FORMAT(1H0,5X,21H*** AVERAGE OF RADII,D15.5,1H,,5X,24HC0EFFICIENT00001570
& OF VARIATION,D15.5,5H ***) 00001580
C 000093 680 FORMAT(1H0,5X,35H*** COEFFICIENTS OF VARIATION ***) 00001590
C 000094 690 FORMAT(1H0,5X,34H*** AVERAGE EQUIVALENT RADII ***) 00001600
C 000095 700 FORMAT(1H0,5X,125H***** THE CENTER-POSITION AND RADII OF AN EQUI00001610
&VALENT CYLINDER WHEN A COEFFICIENT OF VARIATION BECOMES TO BE MINI00001620
&MUM *****/) 00001630
C 000096 STOP 00001640
C 000097 END 00001650
C *** AN AVERAGE AND A COEFFICIENT OF VARIATION - SUBROUTINE *** 00001660
C 000098 SUBROUTINE COVASR(N,R,CO,AV) 00001670
C 000099 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) 00001680
C 000100 REAL*8 R(100) 00001690
C 000101 FN1=DFLOAT(N) 00001700
C 000102 FN2=DFLOAT(N-1) 00001710
C 000103 S=0. 00001720
C 000104 SS=0. 00001730
C 000105 DO 10 I=1,N 00001740
C 000106 S=S+R(I) 00001750
C 000107 10 SS=SS+R(I)*R(I) 00001760
C 000108 AV=S/FN1 00001770
C 000109 VA=(SS-S*S/FN1)/FN2 00001780
C 000110 SD=DSQRT(VA) 00001790
C 000111 CO=SD/AV 00001800
C 000112 RETURN 00001810
C 000113 END 00001820
C ***** OUTPUT OF RADII - SUBROUTINE ***** 00001830
C 000114 SUBROUTINE OUTPRT(N,NN,R) 00001840
C 000115 REAL*8 R(100) 00001850
C 000116 DO 10 I=1,NN 00001860
C 000117 IE=8*I 00001870
C 000118 IS=IE-7 00001880
C 000119 IEE=MINO(N,IE) 00001890
C 000120 WRITE(6,600) (J,J=IS,IEE) 00001900
C 000121 10 WRITE(6,610) I,(R(J),J=IS,IEE) 00001910
C 000122 600 FORMAT(1H0,5X,8(5X,I3,7X)) 00001920
C 000123 610 FORMAT(1H ,I5,8D15.5) 00001930
C 000124 RETURN 00001940
C 000125 END 00001950
C ***** SUBROUTINE - PARA ***** 00001960
C 00002000 00002010
C 00002020 00002020
C 00002030 00002030
C 00002040 00002040
C 00002050 00002050
C 00002060 00002060
C 00002070 00002070
C 00002080 00002080
C 00002090 00002090
C 00002100 00002100
C 00002110 00002110
C 00002120 00002120
C 00002130 00002130
C 00002140 00002140
C 00002150 00002150
C 00002160 00002160
C 00002170 00002170
C 00002180 00002180
C 00002190 00002190
C 00002200 00002200
C 00002210 00002210
C 00002220 00002220
C 00002230 00002230
C 00002240 00002240
C 00002250 00002250
C 00002260 00002260
C 00002270 00002270
C 00002280 00002280

```

— 140 —

```

C
000126 SUBROUTINE PARA(N,M) 00002290
C 00002300
000127 DOUBLE PRECISION FN1,FN2 00002310
C 00002320
C 00002330
C 00002340
000128 M=N/8 00002350
000129 FN1=DFLOAT(M) 00002360
000130 FN2=DFLOAT(N)/8. 00002370
000131 IF(FN2.NE.FN1) M=M+1 00002380
000132 RETURN 00002390
C 00002400
000133 END 00002410
C 00002420
C 00002430
C ***** OUTPUT MATRIX - SUBROUTINE ***** 00002440
C 00002450
000134 SUBROUTINE MATPRT(M,N,X) 00002460
C 00002470
000135 REAL*8 X(50,50) 00002480
C 00002490
C 00002500
000136 K=MAX0(M,N) 00002510
000137 L=MIN0(M,N) 00002520
C 00002530
000138 J1=0 00002540
000139 5 J2=J1+1 00002550
000140 J1=J1+8 00002560
000141 J3=MIN0(K,J1) 00002570
C 00002580
000142 WRITE(6,100) (J,J=J2,J3) 00002590
000143 100 FORMAT(1H0,5X,8(5X,I3,7X)) 00002600
C 00002610
000144 DO 10 I=1,L 00002620
000145 IF(M.GE.N) GO TO 15 00002630
000146 WRITE(6,200) I,(X(I,J),J=J2,J3) 00002640
000147 GO TO 10 00002650
C 00002660
000148 15 WRITE(6,200) I,(X(J,I),J=J2,J3) 00002670
C 00002680
000149 200 FORMAT(1H ,I5,8D15.5) 00002690
C 00002700
000150 10 CONTINUE 00002710
C 00002720
000151 IF(J1.LT.K) GO TO 5 00002730
C 00002740
C 00002750
000152 RETURN 00002760
000153 END 00002770
C ***** EQUIVALENT RADIUS OF CYLINDER - N01. ***** 00002780
C 00002790
000154 SUBROUTINE EQRCY1(SX,SY,SZ,CF0,SL,SR) 00002800
C 00002810
000155 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) 00002820
000156 REAL*8 GA(20), GX(20) 00002830
C 00002840
000157 DATA GA/ 0.0176140071, 0.0406014298, 0.0626720483, 0.0832767416, 00002850
& 0.1019301198, 0.1181945320, 0.1316886384, 0.1420961093, 00002860
& 0.1491729865, 0.1527533871, 0.1527533871, 0.1491729865, 00002870
& 0.1420961093, 0.1316886384, 0.1181945320, 0.1019301198, 00002880
& 0.0832767416, 0.0626720483, 0.0406014298, 0.0176140071/ 00002890
C 00002900
000158 DATA GX/ 0.9931285992, 0.9639719273, 0.9122344283, 0.8391169718, 00002910
& 0.7463319065, 0.6360536807, 0.5108670020, 0.3737060887, 00002920
& 0.2277858511, 0.0765265211, -0.0765265211, -0.2277858511, 00002930
& -0.3737060887, -0.5108670020, -0.6360536807, -0.7463319065, 00002940
& -0.8391169718, -0.9122344283, -0.9639719273, -0.9931285992/ 00002950
C 00002960
000159 DATA PI/ 3.1415926536/ 00002970
C 00002980
C 00002990
000160 X=DABS(SX) 00003000
000161 Y=DABS(SY) 00003010
000162 Z=DABS(SZ) 00003020
C 00003030
000163 SR=1. 00003040
000164 SLM=SL/2. 00003050
000165 X1=X-SLM 00003060
000166 X2=X+SLM 00003070
000167 AT1=DATAN(Z/Y) 00003080
000168 DSR=DSQRT(Y*Y+Z*Z) 00003090

```

```

000169      L=0
C
000170      5 V1=DSQRT(Y*Y+Z*Z-SR*SR)/SR
000171      AT2=DATAN(V1)
000172      TU=AT1+AT2
000173      TL=AT1-AT2
000174      T1=0.5*(TU-TL)
000175      T2=0.5*(TU+TL)
000176      C1=SR/(2.*PI)
000177      S1=0.

C
000178      DO 20 I=1,20
000179          A1=T1*GA(I)
000180          VT=T2+T1*GX(I)
000181          VC=DCOS(VT)
000182          VS=DSIN(VT)
000183          V2=Y-SR*VC
000184          V3=Z-SR*VS
000185          V4=Y*VC+Z*VS-SR
000186          V5=V2*V2+V3*V3
000187          V6=DSQRT(V5)
000188          V7=X2*X2+V5
000189          V8=X1*X1+V5
000190          VAT1=DATAN(X2/V6)
000191          VAT2=DATAN(X1/V6)
000192      20 S1=S1+A1*V2*V4*(X2/V7-X1/V8+(VAT1-VAT2)/V6)/V5

C
000193      CFC1=C1*S1

C
000194      IF(DABS(X).LE.SLM) GO TO 75

C
000195      S2=0.
000196      DO 30 J=1,20
000197          A2=PI*GA(J)
000198          VTT=PI*(1.+GX(J))
000199          VCC=DCOS(VTT)
000200          VSS=DSIN(VTT)

C
000201      DO 40 I=1,20
000202          A3=0.5*SR*GA(I)
000203          VTR=0.5*SR*(1.+GX(I))
000204          VX1=-VTR*VCC
000205          VX2=(Z-VTR*VSS)**2
000206          S2=S2+A2*A3*VTR*X1*VX1/((X1*X1+VX1*VX1+VX2)**2)

C
000207      40 CONTINUE
000208      30 CONTINUE

C
000209      CFC2=S2/PI
000210      GO TO 85

C
000211      75 CFC2=0.
000212      85 CFC=CFC1+CFC2

C
000213      IF(DABS(CFC-CFO).LT.0.0001) RETURN

C
000214      IF(L.NE.0) GO TO 25

C
000215      IF(CFC.GT.CFO) GO TO 15
000216          SR1=SR
000217          SR=SR+20.
000218          SR2=SR

C
000219      IF(DSR.GT.SR) GO TO 5

C
000220          SR2=DSR

C
000221      15 SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)
000222      L=1

C
000223      IF(DABS(DSR-SR).LT.0.01) GO TO 500

C
000224          GO TO 5
000225      25 IF(CFC.GT.CFO) GO TO 35
000226          SR1=SR
000227          SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)

C
000228      IF(DABS(DSR-SR).LT.0.01) GO TO 500

C
000229          GO TO 5
000230      35 SR2=SR

```

```

00003100
00003110
00003120
00003130
00003140
00003150
00003160
00003170
00003180
00003190
00003200
00003210
00003220
00003230
00003240
00003250
00003260
00003270
00003280
00003290
00003300
00003310
00003320
00003330
00003340
00003350
00003360
00003370
00003380
00003390
00003400
00003410
00003420
00003430
00003440
00003450
00003460
00003470
00003480
00003490
00003500
00003510
00003520
00003530
00003540
00003550
00003560
00003570
00003580
00003590
00003600
00003610
00003620
00003630
00003640
00003650
00003660
00003670
00003680
00003690
00003700
00003710
00003720
00003730
00003740
00003750
00003760
00003770
00003780
00003790
00003800
00003810
00003820
00003830
00003840
00003850
00003860
00003870
00003880
00003890
00003900

```

— 142 —

```

000231          SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)
000232          GO TO 5
000233 C      500 SR=1000.
C
C
000234          RETURN
000235          END
C
C      ***** EQUIVALENT RADIUS OF CYLINDER - NO.2 *****
C
000236          SUBROUTINE EQRCY2(SX,SY,SZ,CFO,SL,SR)
C
000237          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000238          REAL*8 GA(20),GX(20)
C
000239          DATA GA/ 0.0176140071, 0.0406014298, 0.0626720483, 0.0832767416,
&                0.1019301198, 0.1181945320, 0.1316886384, 0.1420961093,
&                0.1491729865, 0.1527533871, 0.1527533871, 0.1491729865,
&                0.1420961093, 0.1316886384, 0.1181945320, 0.1019301198,
&                0.0832767416, 0.0626720483, 0.0406014298, 0.0176140071/
C
000240          DATA GX/ 0.9931285992, 0.9639719273, 0.9122344283, 0.8391169718,
&                0.7463319065, 0.6360536807, 0.5108670020, 0.3737060887,
&                0.2277858511, 0.0765265211,-0.0765265211,-0.2277858511,
&                -0.3737060887,-0.5108670020,-0.6360536807,-0.7463319065,
&                -0.8391169718,-0.9122344283,-0.9639719273,-0.9931285992/
C
000241          DATA PI/ 3.1415926536/
C
C
000242          X=DABS(SX)
000243          Y=DABS(SY)
000244          Z=DABS(SZ)
C
000245          SR=1.
C
000246          SLM=SL/2.
000247          X1=X-SLM
000248          X2=X+SLM
000249          DSR=DSQRT(Y*Y+Z*Z)
000250          L=0
C
000251          IF(Y.NE.0.) GO TO 150
C
000252          165 VZR=SR/DSQRT(Z*Z-SR*SR)
000253          TL=DATAN(VZR)
000254          TU=PI-TL
000255          GO TO 155
C
000256          150 AT1=DATAN(Z/Y)
000257          5 V1=DSQRT(Y*Y+Z*Z-SR*SR)/SR
000258          AT2=DATAN(V1)
000259          TU=AT1+AT2
000260          TL=AT1-AT2
C
000261          155 T1=0.5*(TU-TL)
000262          T2=0.5*(TU+TL)
000263          C1=SR/(2.*PI)
000264          S1=0.
C
000265          DO 20 I=1,20
000266          A1=T1*GA(I)
000267          VT=T2+T1*GX(I)
000268          VC=DCOS(VT)
000269          VS=DSIN(VT)
000270          V2=Y-SR*VC
000271          V3=Z-SR*VS
000272          V4=Y*VC+Z*VS-SR
000273          V5=V2*V2+V3*V3
000274          V6=DSQRT(V5)
000275          V7=X2*X2+V5
000276          V8=X1*X1+V5
000277          VAT1=DATAN(X2/V6)
000278          VAT2=DATAN(X1/V6)
000279          20 S1=S1+A1*V3*V4*(X2/V7-X1/V8+(VAT1-VAT2)/V6)/V5
C
000280          CFC1=C1*S1
000281          IF(DABS(X).LE.SLM) GO TO 75
000282          S2=0.
C

```



```

000283      DO 30 J=1,20                      00004720
000284          A2=PI*GA(J)                  00004730
000285          VTT=PI*(1.+GX(J))             00004740
000286          VCC=DCOS(VTT)                 00004750
000287          VSS=DSIN(VTT)                 00004760
C
000288      DO 40 I=1,20                      00004770
000289          A3=0.5*SR*GA(I)                00004780
000290          VTR=0.5*SR*(1.+GX(I))         00004790
000291          VX1=Y-VTR*VCC                   00004800
000292          VX2=Z-VTR*VSS                 00004810
000293          S2=S2+A2*A3*VTR*X1*VX2/((X1*X1+VX1*VX1+VX2*VX2)**2) 00004820
C
000294      40 CONTINUE                       00004830
000295      30 CONTINUE                       00004840
C
000296          CFC2=S2/PI                    00004850
C
000297          GO TO 85                       00004860
C
000298      75 CFC2=0.                        00004870
C
000299      85 CFC=CFC1+CFC2                 00004880
C
000300          IF(DABS(CFC-CF0).LT.0.0001) RETURN 00004890
C
000301          IF(L.NE.0) GO TO 25             00004900
000302          IF(CFC.GT.CF0) GO TO 15         00004910
000303              SR1=SR                     00004920
000304              SR=SR+20.                  00004930
000305              SR2=SR                     00004940
C
000306          IF(DSR.GT.SR) GO TO 500       00004950
C
000307              SR2=DSR                    00004960
C
000308          GO TO 15                       00004970
C
000309      500 IF(Y.NE.0.) GO TO 5            00004980
000310          GO TO 165                       00004990
C
000311      15  SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)           00005000
000312          L=1                            00005010
C
000313          IF(DABS(DSR-SR).LT.0.01) GO TO 550 00005020
C
000314          IF(Y.NE.0.) GO TO 5            00005030
000315          GO TO 165                       00005040
C
000316      25 IF(CFC.GT.CF0) GO TO 35         00005050
000317          SR1=SR                         00005060
000318          SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)           00005070
C
000319          IF(DABS(DSR-SR).LT.0.01) GO TO 550 00005080
C
000320          IF(Y.NE.0.) GO TO 5            00005090
000321          GO TO 165                       00005100
C
000322      35  SR2=SR                         00005110
000323          SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)           00005120
C
000324          IF(Y.NE.0.) GO TO 5            00005130
000325          GO TO 165                       00005140
C
000326      550 SR=1000.                       00005150
C
000327          RETURN                          00005160
C
000328          END                              00005170
C
C          ***** EQUIVALENT RADIUS OF CYLINDER - NO.3 ***** 00005180
C
000329          SUBROUTINE EQRCY3(SX,SY,SZ,CF0,SL,SR) 00005190
C
000330          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)        00005200
000331          REAL*8 GA(20),GX(20)            00005210
C
000332          DATA GA/ 0.0176140071, 0.0406014298, 0.0626720483, 0.0832767416, 00005220
& 0.1019301198, 0.1181945320, 0.1316886384, 0.1420961093, 00005230
& 0.1491729865, 0.1527533871, 0.1527533871, 0.1491729865, 00005240
& 0.1420961093, 0.1316886384, 0.1181945320, 0.1019301198, 00005250

```

— 144 —

```

&          0.0832767416, 0.0626720483, 0.0406014298, 0.0176140071/ 00005530
000333 C          DATA GX/ 0.9931285992, 0.9639719273, 0.9122344283, 0.8391169718, 00005540
&          0.7463319065, 0.6360536807, 0.5108670020, 0.3737060887, 00005550
&          0.2277858511, 0.0765265211, -0.0765265211, -0.2277858511, 00005560
&          -0.3737060887, -0.5108670020, -0.6360536807, -0.7463319065, 00005570
&          -0.8391169718, -0.9122344283, -0.9639719273, -0.9931285992/ 00005580
000334 C          DATA PI/ 3.1415926536/ 00005590
000335 C          X=DABS(SX) 00005600
000336 C          Y=DABS(SY) 00005610
000337 C          Z=DABS(SZ) 00005620
000338 C          SR=1. 00005630
000339 C          SLM=SL/2. 00005640
000340 C          X1=X-SLM 00005650
000341 C          X2=X+SLM 00005660
000342 C          XX1=X1*X1 00005670
000343 C          XX2=X2*X2 00005680
000344 C          L=0 00005690
000345 C          S S1=0. 00005700
000346 C          DO 20 I=1,20 00005710
000347 C          A1=PI*GA(I) 00005720
000348 C          VT=PI*(1.+GX(I)) 00005730
000349 C          VC=DCOS(VT) 00005740
000350 C          VS=DSIN(VT) 00005750
000351 C          DO 30 J=1,20 00005760
000352 C          A2=0.5*SR*GA(J) 00005770
000353 C          VTR=0.5*SR*(1.+GX(J)) 00005780
000354 C          VX1=(Y-VTR*VC)**2 00005790
000355 C          VX2=(Z-VTR*VS)**2 00005800
000356 C          S1=S1+A1*A2*VTR/((XX1+VX1+VX2)**2) 00005810
000357 C          30 CONTINUE 00005820
000358 C          20 CONTINUE 00005830
000359 C          CFC1=XX1*S1/PI 00005840
000360 C          YZ=Y*Y+Z*Z 00005850
000361 C          RR=SR*SR 00005860
000362 C          IF(YZ.LE.RR) GO TO 500 00005870
000363 C          IF(Y.NE.0.) GO TO 505 00005880
000364 C          VZR=SR/DSQRT(Z*Z-RR) 00005890
000365 C          TL=DATAN(VZR) 00005900
000366 C          TU=PI-TL 00005910
000367 C          GO TO 510 00005920
000368 C          505 AT1=DATAN(Z/Y) 00005930
000369 C          YZR=YZ-RR 00005940
000370 C          V1=DSQRT(YZR)/SR 00005950
000371 C          AT2=DATAN(V1) 00005960
000372 C          TL=AT1-AT2 00005970
000373 C          TU=AT1+AT2 00005980
000374 C          510 T1=0.5*(TU-TL) 00005990
000375 C          T2=0.5*(TU+TL) 00006000
000376 C          C1=0.5*SR/PI 00006010
000377 C          S2=0. 00006020
000378 C          DO 40 I=1,20 00006030
000379 C          A3=T1*GA(I) 00006040
000380 C          VIT=T2+T1*GX(I) 00006050
000381 C          VCC=DCOS(VIT) 00006060
000382 C          VSS=DSIN(VIT) 00006070
000383 C          V2=(Y-SR*VCC)**2+(Z-SR*VSS)**2 00006080
000384 C          V3=Y*VCC+Z*VSS-SR 00006090
000385 C          40 S2=S2+A3*V3*(1./(XX1+V2)-1./(XX2+V2)) 00006100
C          00006110
C          00006120
C          00006130
C          00006140
C          00006150
C          00006160
C          00006170
C          00006180
C          00006190
C          00006200
C          00006210
C          00006220
C          00006230
C          00006240
C          00006250
C          00006260
C          00006270
C          00006280
C          00006290
C          00006300
C          00006310
C          00006320
C          00006330

```

000386	CFC2=C1*S2	00006340
000387	GO TO 515	00006350
000388	500 CFC2=0.	00006360
000389	515 CFC=CFC1+CFC2	00006370
000390	IF(DABS(CFC-CF0).LT.0.0001) RETURN	00006380
000391	IF(L.NE.0) GO TO 25	00006390
000392	IF(CFC.GT.CF0) GO TO 15	00006400
000393	SR1=SR	00006410
000394	SR=SR+20.	00006420
000395	SR2=SR	00006430
000396	GO TO 5	00006440
000397	15 SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)	00006450
000398	L=1	00006460
000399	GO TO 5	00006470
000400	25 IF(CFC.GT.CF0) GO TO 35	00006480
000401	SR1=SR	00006490
000402	SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)	00006500
000403	GO TO 5	00006510
000404	35 SR2=SR	00006520
000405	SR=SR1+0.5*(SR2-SR1)	00006530
000406	GO TO 5	00006540
000407	END	00006550

## 香川大学農学部紀要

- 第1号 幡 克 美：アカマツ材の成分並びにパルプ化に関する研究 (1955年3月)
- 第2号 内 藤 中 人：植物成長ホルモンに関する植物病理学的研究 特に植物病原菌に及ぼす影響について (1957年10月)
- 第3号 松 沢 寛：アオムシコマユバチの生態に関する研究 (1958年3月)
- 第4号 梶 明：和紙原料の醗酵精練に関する研究 (1959年3月)
- 第5号 森 和 男：傾斜地蜜柑園経営の構造分析 (1960年3月)
- 第6号 玉 置 鷹 彦：ガラク並びに池泥の研究 (1960年3月)
- 第7号 上 原 勝 樹：傾斜地開発利用に関する物理気象の研究 (1961年3月)
- 第8号 桑 田 晃：オクラとトロロアオイとの種間交雑およびそれらより育成された種々の雑種ならびに倍数体に関する研究 (1961年9月)
- 第9号 中 潤三郎：甘藷の生育過程に関する作物生理学的研究 (1962年3月)
- 第10号 齊 藤 実：香川県及び北愛媛県の地質について (1962年3月) (英文)
- 第11号 小 杉 清：グラジオラスの生産と開花に関する研究 (1962年9月) (英文)
- 第12号 吉 良 八 郎：貯水池の滞砂に関する水理学的研究 (1963年2月)
- 第13号 野 田 愛 三：禾穀類の根軸に関する研究 (1963年3月)
- 第14号 川 村 信一郎：豆類のデンプンの研究 (1963年3月) (エスペラント文)
- 第15号 浅 野 二 郎：種子の耐塩性を中心とした海岸地帯におけるアカマツおよびクロマツ林の成立に関する研究 (1963年3月)
- 第16号 山 中 啓：乳酸菌のペントース・イソメラーゼに関する研究 (1964年8月) (英文)
- 第17号 葦 沢 正 義：香川県における葡萄の旱害に関する研究 (1964年3月)
- 第18号 谷 利 一：カキ炭疽病の病態生理学的研究, とくに罹病果実の病徴発現にあずかるペクチン質分解酵素の役割 (1965年3月)
- 第19号 樽 谷 隆 之：カキ果実の貯蔵に関する研究 (1965年3月)
- 第20号 狩 野 邦 雄：ラン種子の発芽培地に関する研究 (1965年3月) (英文)
- 第21号 山 本 喜 良：コモンベッチおよびその近縁種の雑種に関する研究 (1965年3月)
- 第22号 中 広 義 雄：鶏における飼料の消化率測定法に関する研究 (1966年10月)
- 第23号 井 上 宏：ナツダイダイの果実発育に関する研究, とくに水腐病の発生機構を中心として (1967年3月)
- 第24号 宮 辺 豊 紀：異常乳の生成と塩類均衡とくにカゼイン磷酸カルシウムに関する研究 (1967年8月) (英文)
- 第25号 十 河 村 男：樹皮リグニン及び樹皮フェノール類に関する研究 (1971年9月)
- 第26号 大 島 光 昭：赤クローバーサイレージ中の窒素栄養源に関する研究 (1971年11月) (英文)
- 第27号 辰 巳 修 三：林木葉部中におけるカルシウムの化合形態とその生理に関する基礎的研究 (1974年11月)
- 第28号 樽 谷 勝：ブドウの葉脈黄変による早期落葉の研究 (1974年12月)
- 第29号 倉 田 久 男：カボチャ・スイカの性の分化におよぼす日長および温度の影響に関する研究 (1976年3月)
- 第30号 鎌 田 萬：中小河川治水計画に適用する計画降雨の合理的算定法に関する研究 (1976年6月)
- 第31号 山 本 弘 幸：エンバク冠さび病の抵抗性発現機構に関する研究 (1978年3月)
- 第32号 岡 本 秀 俊：テントウムシの摂食の生態に関する実験的研究 (1978年3月)
- 第33号 山 崎 徹： $\alpha$ -ヒドロキシフェニル並びにシリンギルリグニンに関する研究 (1978年9月) (英文)
- 第34号 市 川 俊 英：イネを加害する4種の同翅亜目頸吻群昆虫の配偶行動に関する研究 (1979年2月) (英文)
- 第35号 吉 田 博：農業生産共同組織の展開・構造・運営に関する研究 (1980年3月)

- 第36号 一色 泰：鶏盲腸の栄養生理学的研究 (1980年3月)
- 第37号 中條 利明：富有カキ果実の發育ならびに品質に及ぼす温度条件に関する研究  
(1982年2月)
- 第38号 五井 正憲：温帯花木の花芽形成ならびに開花調節に関する研究 (1982年2月)
- 第39号 松井 年行：和三盆糖の食品学的研究 (1982年2月)
- 第40号 藤目 幸擴：ハナヤサイ類の花らい形成並びに發育の温度条件に関する研究  
—特に異常花らいについて— (1983年2月)
- 第41号 西山 壮一：カンガイ用管水路における空気混入流の水撃作用に関する研究 (1983年2月)
- 第42号 真山 滋志：エンバク冠さび病の抵抗性発現におけるアベナルミンの役割 (1983年10月)  
(英文)
- 第43号 門谷 茂：海洋堆積物中のアミノ酸の初期続成過程に関する研究 (1983年10月)
- 第44号 一井 真比古：水稻育種における再生莖形質の選抜指標としての効用に関する研究 (1984年11  
月) (英文)
- 第45号 片岡 郁雄：ブドウ果実の着色に関する研究  
—とくにアブシジン酸による着色の制御について— (1986年10月)
- 第46号 鈴木 晴雄：畑地栽培におけるフィルムマルチと植被が地温に及ぼす影響に関する農業気象  
学的研究 (1986年10月)
- 第47号 蓑輪 雅好：開放型畜舎内の放射熱環境に関する研究 (1986年10月)
- 第48号 藤田 政之：サツマイモ塊根組織のチトクロム P-450 系酵素に関する研究 (1986年10月)

## Memoirs of Faculty of Agriculture, Kagawa University

- No. 1 Katsumi HATA: Studies on the Constituents and Pulping of "Akamastu" (*Pinus densiflora* SIEB et ZUCC) Wood (March, 1955)
- No. 2 Nakato NAITO: Phytopathological Studies Concerning Phytohormones with Special Reference to Their Effect on Phytopathogenic Fungi (October, 1957)
- No. 3 Hiroshi MATSUZAWA: Ecological Studies on the Branconid Wasp, *Apanteles glomeratus* (March, 1958)
- No. 4 Akira KAJI: Studies on the Retting of Plant Fiber Materials for Japanese Paper Manufacture (March, 1959)
- No. 5 Kazuo MORI: An Analytical Study on the Structure of the Mandarin Orange Growing Orchard Farm in a Sloping Land Region (March, 1960)
- No. 6 Takahiko TAMAKI: Studies of Garaku Paddy Soil and Reservoir Deposits (March, 1960)
- No. 7 Masaki UEHARA: Physical and Meteorological Studies on the Cultivation and Utilization of Slope Land (March, 1961)
- No. 8 Hikaru KUWADA: Studies on the Interspecific Crossing between *Abelmoschus esculentus* MOENGH and *A. Manihot* MEDIC and the Various Hybrids and Polyploids Derived from the Above Two Species (September, 1961)
- No. 9 Junzabro NAKA: Physiological Studies on the Growing Process of Sweet Potato Plants (March, 1962)
- No. 10 Minoru SAITO: The Geology of Kagawa and Northern Ehime Prefectures, Shikoku, Japan (March, 1962) (in English)
- No. 11 Kiyoshi KOSUGI: Studies on Production and Flowering in Gladiolus (September 1962) (in English)
- No. 12 Hachiro KIRA: Hydraulic Studies on the Sedimentation in Reservoirs (February, 1963)
- No. 13 Aizo NODA: Studies on the Coleorhiza of Cereals (March, 1963)
- No. 14 Sin'itiro KAWAMURA: Studoj pri Ameloj de Legumenoj (March, 1963) (in Esperanto)
- No. 15 Jiro ASANO: A Study on the Formation of Pine Forests on Seaside Areas, giving due Consideration to the Salt Resistance of the Seeds (March, 1963)
- No. 16 Kei YAMANAKA: Studies on the Pentose Isomerases of Lactic Acid Bacteria (August, 1963) (in English)
- No. 17 Masayoshi ASHIZAWA: Studies on the Drought Damage of Grape Trees in the Region of Kagawa Prefecture (March, 1964)
- No. 18 Toshikazu TANI: Studies on the Phytopathological Physiology of Kaki Anthracnose, with Special Reference to the Role of Pectic Enzymes in the Symptom Development on Kaki Fruit (March, 1965)
- No. 19 Takayuki TARUTANI: Studies on the Storage of Persimmon Fruits (March, 1965)
- No. 20 Kunio KANO: Studies on the Media for Orchid Seed Germination (March, 1965) (in English)
- No. 21 Kiyoshi YAMAMOTO: Studies on the Hybrids among the *Vicia sativa* L. and its Related Species (March, 1966)
- No. 22 Yoshio NAKAHIRO: Studies on the Method of Measuring the Digestibility of Poultry Feed (October, 1966)
- No. 23 Hiroshi INOUE: Studies on the Fruit Development of Natsudaidai (*Citrus Natsudaidai* HAYATA), with Special Reference to Water Spot Injury (March, 1967)
- No. 24 Toyoki MIYABE: Studies on the Production and the Salt Balance in Relation to Calcium Phosphocaseinate of Abnormal Milk (August, 1967) (in English)
- No. 25 Muraō SOGO: Studies on the Bark Lignin and Bark phenolic Compounds (September, 1971)
- No. 26 Mitsuki OHSHIMA: Studies on Nutritional Nitrogen from Red Clover Silage (November, 1971) (in English)
- No. 27 Shuzo TATSUMI: Fundamental Studies of the Chemical Forms of Calcium and Their Metabolisms in the Tree Leaves (November, 1974)
- No. 28 Masaru KURATANI: Studies on the Early Summer Defoliation of Grape Vines Caused by Veinyellowing (December, 1974)
- No. 29 Hisao KURATA: Studies on the Sex Expression of Flowers induced by Day-length and Temperature in Pumpkin and Watermelon (March, 1976)
- No. 30 Takashi KAMADA: Studies on the Rational Estimation of Rainfall for Design Flood (June, 1976)
- No. 31 Hiroyuki YAMAMOTO: Study on the Mechanism of Resistance Expression in the Crown Rust Disease of Oat (March, 1978)
- No. 32 Hidetoshi OKAMOTO: Laboratory Studies on the Food Ecology of Aphidophagous Lady Beetles (Coleoptera: Coccinellidae) (March, 1978)

— iv —

- No. 33 Toru YAMASAKI: Studies on *p*-Hydroxyphenyl- and Syringyl Lignins (September, 1978) (in English)
- No. 34 Toshihide ICHIKAWA: Studies on the Mating Behavior of the Four Species of Auchenorrhynchous Homoptera which Attack the Rice Plant (February, 1979) (in English)
- No. 35 Hiroshi YOSHIDA: A Study of the Development, Structure and Management of Co-operative Groups (March, 1980)
- No. 36 Yutaka ISSHIKI: Nutritional and Physiological Studies on the Function of Ceca in Chickens (March, 1980)
- No. 37 Toshiaki CHUJO: Studies on the Effects of Thermal Conditions on the Growth and Quality of Fruits of Fuyu Kaki (February, 1982)
- No. 38 Masanori GOI: Studies on the Flower Formation and Forcing of Some Ornamental Trees and Shrubs in East Asia (February, 1982)
- No. 39 Toshiyuki MATSUI: Food Chemical Studies on Wasanbon-to Sugar (Japanese traditionally refined sugar) (February, 1982)
- No. 40 Yukihiro FUJIME: Studies on Thermal Conditions of Curd Formation and Development in Cauliflower and Broccoli, with Special Reference to Abnormal Curd Development (February, 1983)
- No. 41 Souichi NISHIYAMA: Studies on the Water Hammer of the Air-entrained Flow in Irrigation Pipe Lines (February, 1983)
- No. 42 Shigeyuki MAYAMA: The Role of Avenalumin in the Resistance of Oats to Crown Rust (October, 1983) (in English)
- No. 43 Shigeru MONTANI: Early Diagenesis of Amino Acids in Marine Sediments (October, 1983)
- No. 44 Masahiko ICHII: Studies on the Utility of Ratoon Traits of Rice as the Indicator of Agronomic Characters in Breebing (November, 1984) (in English)
- No. 45 Ikuo KATAOKA: Studies on the Coloration of Grape Berries with Special Reference to the Regulation of Color Development by Abscisic Acid (October, 1986)
- No. 46 Haruo SUZUKI: Agrometeorological Studies on the Effect on Soil Temperature, of Film Mulching and Canopy in the Upland Mulching Culture (October, 1986)
- No. 47 Masayoshi MINOWA: A Study on Thermal Radiation Environment in an Open-type Livestock Barn (October, 1986)
- No. 48 Masayuki FUJITA: Studies on Cytochrome P-450-Dependent Mixed Function Oxygenase in Sweet Potato Root Tissue (October, 1986)

昭和61年10月28日印刷 昭和61年10月31日発行

香川県木田郡三木町  
香川大学農学部

印刷所 大学印刷株式会社

広島市中区十日市町二丁目1-15  
電話 広島 231-4231 番(代)