

Potの土壤温度調節に関する研究

II Wagner potを用いた冬季における実験観測例

鈴木 晴雄, 長尾みどり, 上原 勝樹

STUDIES ON THE REGULATION
OF THE UNDERGROUND TEMPERATURE IN THE POTII Results of the Wagner Pot Experiment and its
Observation in Winter

Haruo SUZUKI, Midori NAGAO and Masaki UEHARA

Micrometeorological study was carried out for Wagner pots of four different conditions, i. e., the outer surface of the pot was coated with a black lacquer, covered with aluminum evaporated film, covered with soil by burying the pot in the ground and remained uncovered. In this paper the results obtained on a clear day (Dec. 27, 1974) are discussed.

The daily variation of the theoretical direct solar radiation was varied every direction of the pot wall. Especially, the variation in daily amounts of the theoretical direct solar radiation at each direction was remarkable as compared with that in early autumn. The amount at the S-wall of the pots was 2.08 times as much as that on flat land.

The feature of the distribution of soil temperature in each pot was substantially similar to that obtained in the previous experiments (observations) which were done in early autumn. In the present study, however, the soil in the three pots placed on the ground was partially frozen up in the early morning, mainly by low air temperature and no window. In the forenoon, the soil near the S-wall melted out more rapidly, compared with that near the E-wall.

The range of daily quantity of the soil was greatest in the black lacquered pot and the range value was 2.97 times as much as that in the uncovered control pot.

Wagner pot (1/2000 a) 壁面の Albedo を調節し、また Pot を埋設処理し、無処理の Pot を対照区として、Pot 壁面での日射量の分布、Pot 内土壤温度分布特性等について1975年12月27日に比較実験を行ない、冬季における Pot 栽培の地下環境について調べた。その結果次のことが得られた。

Pot 壁面での直達理論日射量の各方位における日変化は、それぞれの方位に特有なものであった。特に日総量では、Pot 壁面各方位間の差は冬季には大きく、南面は平地の 2.08 倍であった。

各 Pot 内土壤温度分布特性は、初秋の場合とほぼ同じ傾向であったが、地上設置 Pot 内土壤の昇温は、午前中土壤凍結のため、南面側が東面側に比して著しかった。

Pot 内中央部での地中熱交換量の日較差は、黒塗区が最高となり、無処理区の 2.97 倍であった。

I ま え が き

前報⁽¹⁾と同様に, Wagner pot (1/2000 a) の壁面の Albedo を調節し, また Pot の埋設処理をも行なって, 無処理 Pot を対照区として, Pot 壁面での日射量の分布, 各々 Pot 内の土壌温度分布特性等について比較実験を行ない, 冬季における検出を試みた. 1975年12月27日の観測結果概要を報告する. なお本報告は昭和50年6月19日開催の日本農業気象学会全国大会にて, その大要を発表した⁽²⁾.

II 実験観測の設備と方法

設備及び方法については前報に準じて実施し, 実験区は無処理区, 黒塗区, アルミ蒸着フィルム被覆区, 埋設区の4区を設けた.

III 実験結果並びに考察

1, Pot 壁面における日射量

本実験観測当日の, 1974年12月27日における Pot 壁面での直達理論日射量を計算により求めた. 即ち, Pot 壁面各方位での日射量 (Q) は, 太陽定数を1とすれば次式で与えられる.

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \cos h \cos (A-B) dt \tag{1}$$

ここで h : 太陽高度, A : 太陽方位, B : Pot 壁面各方位での偏角, t : 時間, t_1, t_2 : 日出及び日没の時刻. 上式により, 当日の理論日射量を求め, Fig. 1 に示した. この日の平地においては, 太陽の中心が天文学的地平線を出没する

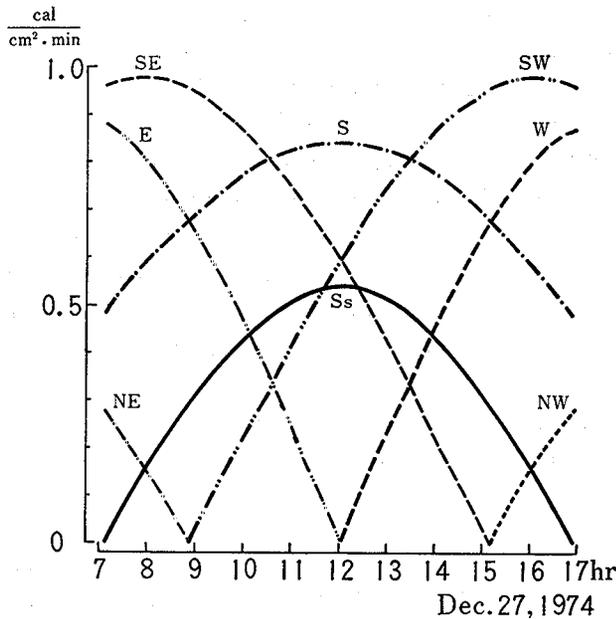


Fig. 1. Diurnal variation of solar radiation in each direction at the pot wall. Ss: Soil surface of the pot. Other symbols show each direction.

ものを基準とすると, 日出は7時8分, 日没は16時52分で, 日照時間は9時間43分であった. なお, 当日の実測水平面到達全日射量は 197 cal/cm²·day, 日照時間 8.2 時間であった.

Fig. 1 にみられるように, Pot 壁面各方位ごとの日射量は, それぞれの方位で日出, 日没が異なることもあって, 方位別に特有であるのが一目りょう然である. 南面は平地と同じく正午を中心に対称であり, しかも正午には最高値を示

して平地の場合の1.57倍にも及んでいる。なお日出・日没は平地と同時刻である。北面においては直達理論日射量は0であったが、実際には散乱光が存在している。東面では日出は平地と同時刻であり、日没は正午であるが、最高値は日出時に出現している。これは平地の正午での値の1.64倍に達している。北東面も日出は平地と同時刻であるが、日没は東面より約3時間12分早まって8時48分頃で、最高値の出現は日出時で平地の1/2程度である。南東面でも日出は平地と同時刻であるが、日没は東面より3時間12分も遅れ約15時12分であった。

西面側の各方位では、東面側での各曲線を正午を中心に対称としたものになっている。

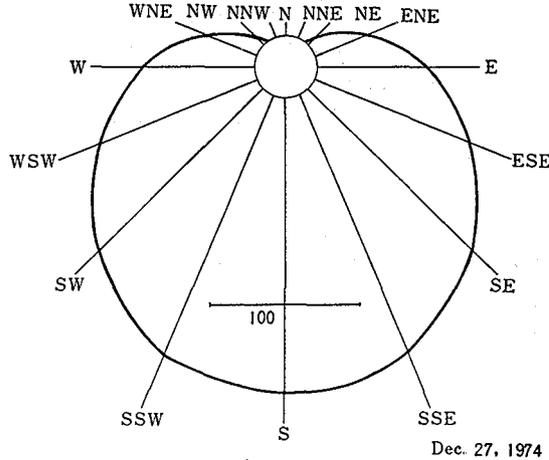


Fig. 2. Distribution of daily amounts of solar radiation in each direction at the pot wall.

Pot壁面各方位における日総量 (Fig. 2) は、西南西面 (東南東面) から南にかけては平地を上まわり、平地を100とすると、南面208, 南南西 (南南東) 面, 192, 南西 (南東) 面, 155, 西南西 (東南東) 面, 115であった。それに対し、西 (東) 面から北面にかけてはいずれも平地を下まわり、西 (東) 面, 75, 西北西 (東北東) 面, 36, 北西 (北東) 面, 8で、北北西面, 北面, 北北東面は0であった。南面附近は平地の約2倍もの日射量となり、前報の初秋の場合が0.6倍程度であるのに対してかなり異なるものとなった。即ち、1日間の太陽高度の変化による以外に、季節によりPot各壁面における日射による受熱の様相は変化することになる。

2. Pot内の土壤温度

(1) 土壤温度の日変化

各Pot内全土壤温度平均値 (全測点での平均) の日変化 (Fig. 3) と、Potの1/2 H (-13.5 cm) における中央部と壁面より1 cm内側の東西南北の各地点での日変化 (Fig. 4) を図に示した。なお当日は平均気温4.2°C, 最高気温10.0°C, 最低気温-2.8°Cで晴天であった。

Pot内全体土壤温度の日変化においては各処理効果が明確である。すなわち夜間から早朝にかけては、埋設のNo. 4が最も高温で2°C~3°Cに保たれ、地上設置のNo. 1, No. 2, No. 3よりほぼ2.5°C以上高温に保たれた。地上設置Pot間においてはほとんど温度差がなく、壁面処理効果は夜間にはみられなかった。そして気温より常に約3°C高く経過しており、2時以後8時迄はほぼ0°Cで、土壤凍結が生じた。日中では各処理による効果が現われた。壁面のAlbedoの低いNo. 2において最も高く、最高で15.8°Cを示し、No. 1は12.5°C, No. 4は9.8°C, Albedoの高いNo. 3で最も低く、8.8°Cを示した。

これらのPot全体土壤温度は、次のようなFourier級数で表わすことができた。

$$y = a_0 + a_1 \sin(\theta t + \epsilon_1) + a_2 \sin(2\theta t + \epsilon_2) + a_3 \sin(3\theta t + \epsilon_3) + \dots \quad (2)$$

ただし、 a_0 は観測値の平均値で $a_1, a_2, a_3, \dots, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots$ は夫々1日, 1/2日, 1/3日,週期波の振幅および位相である。実際には、上式の初めの4項ほどで、日変化の状態はほぼ完全に示される。

No. 1~No. 4の各Pot内全体土壤温度は次のようになった。

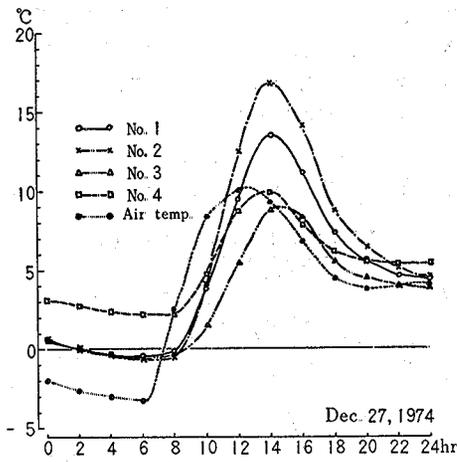


Fig. 3. Diurnal variation of average soil temperature in the pot.

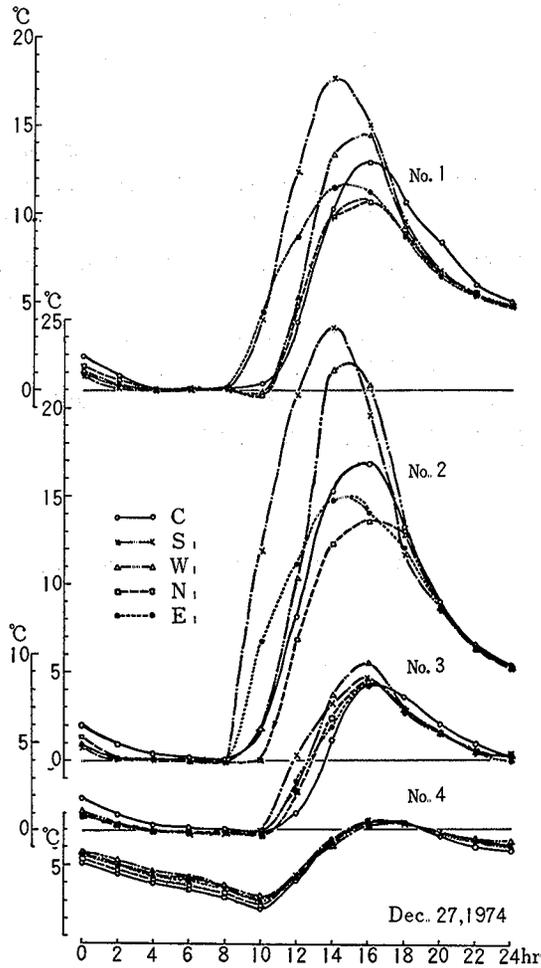


Fig. 4. Diurnal variation of soil temperature. C: Center of the soil of the pot. Other symbols show each direction.

$$y_1 = 4.35 - 6.28 \sin(\theta + 38^\circ 08') + 1.72 \sin(2\theta + 22^\circ 15') + 0.52 \sin(3\theta - 90^\circ) \quad (3)$$

$$y_2 = 5.48 - 8.08 \sin(\theta + 40^\circ 04') + 2.49 \sin(2\theta + 25^\circ 26') + 0.75 \sin(3\theta - 90^\circ) \quad (4)$$

$$y_3 = 3.03 - 4.47 \sin(\theta + 29^\circ 57') + 1.10 \sin(2\theta - 1^\circ 33') + 0.17 \sin(3\theta - 90^\circ) \quad (5)$$

$$y_4 = 4.95 - 3.36 \sin(\theta + 41^\circ 53') + 1.17 \sin(2\theta + 50^\circ 11') + 0.55 \sin(3\theta - 90^\circ) \quad (6)$$

Pot 1/2 H における各地点の日変化においても、各区の温度変化の特性がよく現われた。即ち 0~8h、及び 18~24h には地上設置 Pot 内各地点間にはほとんど差がみられなく、Pot 中央部においてわずかに高温であったが、4~8h には他の地点とほぼ同一となった。

当実験圃場に隣接した露場における観測値によると、当時はほぼ無風であったが、百葉箱内気温は 0~7h まで氷点下であったので、Pot からの放熱が促進され、その結果、東西南北及び中央ともに土壤凍結が生じ、地上設置 Pot はすべて 0°C 付近ではほぼ直線状態の推移となった。No. 4 には終日土壤凍結はみられなく、埋設地附近の耕地と同じ土壤温度の日変化を示したものと考えられる。初秋における傾向と異なって早朝には E₁ における温度の急上昇は、土壤凍結によりあまりみられず、むしろ S₁ での温度上昇が生じていた。これはこの時期の南面では平地の 2 倍の日射量 (Fig. 2) を受けることから、肯定できる。そして No. 2 においては 14 時を境としてようやく S₁ より W₁ が優れる日変化となり、結局、W₁ において相当な高温を示した初秋における結果とは大きな差異となった。冬季の太陽高度の低さ、日照時間の短かさ、外気温の低さが、Pot よりの放熱を促進し、大きく関与したものと考えられる。

(2) 土壤温度の昼夜別平均・日平均・日較差

各処理区の土壤温度の 昼夜別平均・日平均・日較差を Table 1 に示した。なお、それらはそれぞれ各 Pot 内中央値

Table 1. Average temperature in day and night, the daily mean temp. and diurnal range of soil temp. (°C)

	Depth (cm)	Day		Night		Mean		Range	
		C*	A**	C	A	C	A	C	A
No. 1	0	7.5	8.0	0.5	0.2	4.0	4.1	16.3	17.0
	-1	6.8	6.9	0.9	1.0	3.8	4.0	15.2	15.6
	-13.5	6.3	7.3	2.7	2.3	4.5	4.8	12.8	12.8
	-27	6.4	7.1	3.6	3.1	5.1	5.1	10.6	10.4
No. 2	0	8.7	8.9	0.8	0.4	4.8	4.7	17.7	19.5
	-1	7.8	8.8	1.6	1.3	4.7	5.0	16.5	18.6
	-13.5	9.2	10.3	3.1	2.6	6.2	6.5	16.8	17.8
	-27	8.6	9.3	3.9	3.2	6.3	6.3	13.7	14.3
No. 3	0	6.3	5.3	0.0	0.9	3.2	3.4	13.6	13.3
	-1	4.7	4.6	1.1	1.0	2.9	2.8	10.0	10.3
	-13.5	3.7	4.1	2.3	1.9	3.0	3.0	8.2	8.7
	-27	4.2	5.0	3.1	2.6	3.7	3.8	7.4	8.0
No. 4	0	8.2	8.3	0.9	0.4	4.5	4.4	15.5	16.0
	-1	6.5	6.7	2.0	1.7	4.3	4.2	11.6	12.0
	-13.5	5.2	5.4	5.0	5.4	5.1	5.4	4.9	4.4
	-27	5.6	5.7	6.5	6.7	6.1	6.2	2.2	2.4

* Temperature in the center of the soil of the pot.

** Average temperature of all direction containg the center value.

(C) と、全面値 (同一水平面に設けた各測点測定値の平均値, A) とで表わした。

昼間平均値は全面値でみると、No. 2 > No. 1 > No. 4 > No. 3 の順序で、Pot 壁面 Albedo の最も小さい No. 2 が最も高温であった。そして、No. 2 以外は Pot 内地表面に向かうほど昇温するが、No. 2 では 1/2 H に最高を示した。

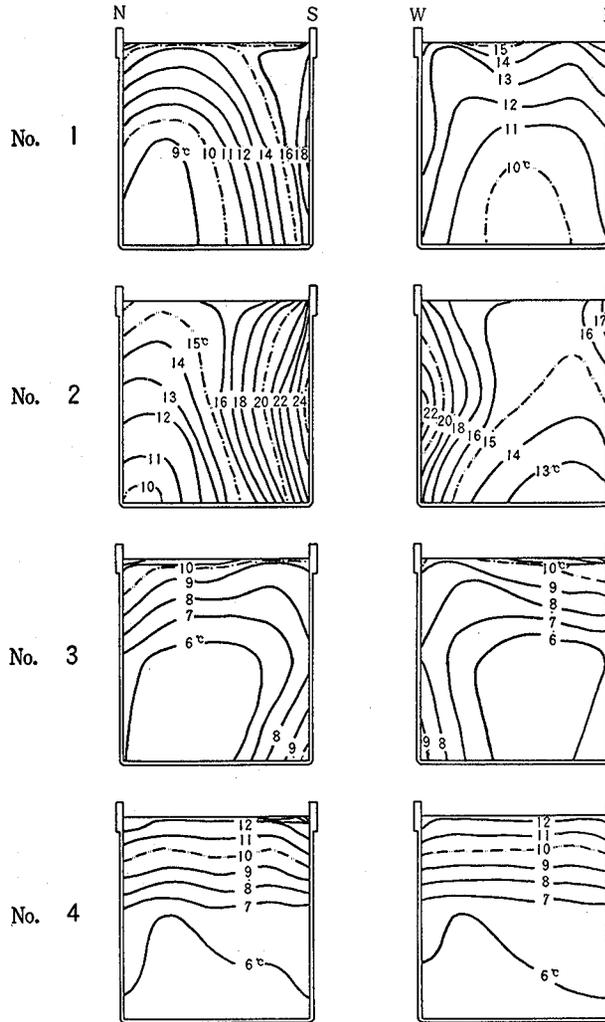
夜間平均では各区ともに Pot 内地表面に向かうほど土壌温度は低下し、夜間の放熱の様相が示された。また Pot 内地表面から Pot 底までの平均を求めると、No. 1, 1.7°C, No. 2, 1.9°C, No. 3, 1.6°C, No. 4, 3.6°Cであった。

以上の傾向から日平均では、Pot 内地表面に向かうほど温度は低下した。日較差は Pot 内地表面に向かうほど大で、日中最も温度の上昇する No. 2 が最も大となった。

中心値と全面値の温度差は、Pot 内土壌温度の昼夜における平均的地中熱伝導の様相を示している。

(3) 土 壌 温 度 分 布

各 Pot における14時のN-S垂直断面、W-E垂直断面の模様を Fig. 5 に示した。なおこの時刻には太陽高度25°43′



14:00 Dec. 27, 1974

Fig. 5. Vertical distribution of soil temperature.

方位+30°38′であった。

即ちこの時刻には凍結も消失しており、各壁面処理効果が出現した。14時における Pot 内土壌温度の平均値（全測定値平均）は No. 1～No. 4 までそれぞれ 13.5°C, 16.8°C, 8.8°C, 9.9°C となり、Pot 内の土壌温度の分布及び変化も各 Pot の壁面処理に基づいたものとなった。地上設置 Pot では、壁面からの日射の受熱による温度分布の特性がみられ

た。特に Albedo の最も低い No. 2 においてはそれが顕著で、N-S 垂直断面の南側、Pot の 1/2 H に最高の 24°C で、北側は約 10°C 低い温度となった。また、No. 1 では南側が 18°C で、北側との温度差は約 8°C であったが、Albedo の最も高い No. 3 では南側が 7°C で、その温度差はほとんどなかった。No. 4 は埋設処理により、W-E 垂直断面においても顕著な方位別特性は見られなかった。地上設置の No. 1, No. 2, No. 3 とともに W-E 垂直断面では、太陽方位側の W 側が高温であった。

地上設置 Pot にあつては冬季においても、かなり温度分布の特徴が明確であり、Pot 壁面の太陽方位側があたかも一般耕地における地表面のように日射を受熱することになり、特に No. 2 の N-S 断面をみると壁面南側が一般耕地の地表面のごとく、そして壁面北側は地下数 10 cm の深さに相当するものである。しかし、これも No. 3 の温度分布にみられるように Albedo の調節により分布の傾度を大きく緩和できる。すなわち、No. 4 に近似される埋設附近の耕地に、より相似させることができ、冬季においてもアルミ蒸着フィルムの壁面における被覆効果が得られた。

(4) 地中熱交換量

各 Pot 内における地中熱交換量を、初秋の場合と同様に、土壤中に単位面積の底を有し、地温日変化の消失する層までの、深さ H の垂直土壤中のある部分に、 dh なる微小柱を考え、 t_1, t_2 時におけるその温度を θ_1, θ_2 とし、単位容積の土壤の熱容量を C 、 t_1, t_2 時における土壤柱の熱量を U_1, U_2 とすれば、

$$U_2 - U_1 = CH(H_2 - H_1) \quad (7)$$

$$H_2 = \frac{1}{H} \int_0^H \theta_2 dh, \quad H_1 = \frac{1}{H} \int_0^H \theta_1 dh$$

Table 2. Daily variation of heat quantity (difference to diurnal mean value) in the soil ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Plot	Time	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
No. 1		-38	-49	-59	-62	-62	-41	23	93	93	61	28	14
No. 2		-49	-59	-66	-70	-72	-49	54	130	120	80	38	12
No. 3		-22	-31	-39	-43	-43	-37	0	45	65	50	30	18
No. 4		-11	-16	-22	-27	-31	-20	15	37	32	24	15	10

から求め、Table 2 に示した。

これによると地中熱量の最大は、No. 1 では 15 時頃、No. 2 と No. 4 では 14 時頃、No. 3 では 16 時頃に現われており、最小はいずれの Pot においても 8 時に現われている。そして、No. 1 ~ No. 4 までの各 Pot における地中熱量の日較差は、それぞれ 155, 202, 108, 68 $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ で、No. 4 が最も小さく、No. 2 で最大となった。また No. 2, No. 3, No. 4 は、No. 1 のそれぞれ 130, 70, 44% を示しており、即ち、初秋の観測結果とほぼ同様の傾向が得られた。なお冬季の場合、最小値の出現時刻が秋の場合より 2 時間遅れているのは、土壤凍結の他、日出時刻の遅れによるところが大きい。

(5) 地中含水量

各 Pot 内土壤の含水率を、熱乾法によって求めた。得られた値を、Pot 内中央部の 0, -13.5, -27 cm 各地点の平均で示すと、No. 1 から No. 4 までそれぞれ、16.5, 16.3, 16.0, 20.1% であり、地上設置 Pot 間においては明確な差はみられなかった。Pot 内地中含水量の動態については、測定の困難がともなうが、その温度、並びに根の生理に及ぼす影響が大きいことから、今後、詳細に調べる必要がある。

本実験観測に御協力下さった故宮川秀夫教官の御冥福をお祈り申し上げるとともに、本報告の御校閲をいただいた宮本硬一教授に感謝の意を表します。

引用文献

- (1) 鈴木晴雄, 宮川秀夫, 西岡みどり: Pot の土壌温度調節に関する研究 I Wagner pot を用いた初秋における実験観測例, 香川大農学報, 29(1), 35-44 (1977).
- (2) 上原勝樹, 宮川秀夫, 鈴木晴雄, 西岡みどり: ワグナーポットの土壌温度コントロールについて(2) 一冬季における測定例一, 昭和50年度日本農業気象学会大会講演要旨, 63, (1975).

(1978年5月31日 受理)