

被覆資材の光透過率の異常値出現と気象条件

友光美帆・ポンサアヌティン ティーラサク・鈴木晴雄

Relations between Abnormal Transmission Values of Light beneath Covering Materials and Meteorological Conditions

Miho TOMOMITSU, Teerasak PONGSA-ANUTIN and Haruo SUZUKI

Abstract

Concerning typical films that are used as agricultural covering materials, we have studied their solar light transmittance, illumination transmittance, and photon transmittance. As for the period average transmittances of different types of light during the experiment period, all films showed more or less the same vertical relationship, except the light-selective purple-colored film. Materials with higher transparency had lower variation coefficients of transmittances. The same tendency as these results was observed when materials were placed horizontally and when they were placed on a slant. As for the occurrence of abnormal transmittance values, black polyethylene films with low transmittance had a higher occurrence of abnormal solar light transmittance values. As for illumination transmittance, films with high transmittance had a higher occurrence of abnormal values, and photon transmittance produced the same result. Abnormal values did not result from the measurement principle of light, but were largely influenced by the transmittance of films and solar light conditions.

From these experiments, we found that there was little difference between solar light transmittance, illumination transmittance, and photon transmittance, and that the occurrence of abnormal values was largely influenced by the time and period of measurements and light conditions.

Key words: Quantum flux density, Intensity of illumination, Transmission, Solar radiation.

緒 言

ハウス、トンネル、マルチフィルム等の農業用被覆資材は、施設栽培における作物の収量増と品質の向上に大きく寄与している。この被覆資材には遮光や光透過率の光学的特性以外に保温性、通気性、防霧性、透湿性などそれぞれ特性があり、作物の種類や栽培時期等によって使い分けられている。この特性の中で光の透過特性は、被覆資材において基本的かつ最も重要な要因である。

光透過特性に関して資材の日射透過率については、同じ資材であっても異なる透過率が報告^(1, 2, 3)されている。鈴木ら⁽⁴⁾はこれまでに、日射透過率測定について種々の実験を通じて透過率測定の基準化を提案し、さらに各透過率測定において透過率が100%を超えるなどの、いわゆる異常値の出現することを報告した。

この異常値の出現する日射の気象条件との関係を明らかにすることができれば、透過率をより客観的、かつ正

確に測定することができ、透過率測定の基準化に役立つものと考えられる。このことは、日射以外の照度や光量子の光要因についても同じである。

そこで本実験では数種の代表的資材を用いて、光要因としての日射量、照度、光合成有効光量子束の各要因を測定して、それらの異常値出現と気象条件との関係を明らかにすることを目的とした。

なお、異常値とは前述のように透過率が100%を超えた場合に加え、黒色ポリフィルム下によくみられる負の透過率の場合も、便宜的に異常値と定義した。しかし、実際には100%を超えない異常値や、負の透過率でなくともわずかに0%を超える異常値もありうる。また、朝夕のような日射強度の小さい時には透過率100%を超える場合もあり、また同じ性能の複数台の日射計による同時測定であっても、測定値にはタイムラグが生じ、異常値として出現する場合もある。

このように、異常値の原因は次元の異なる多数の要因

が考えられる。本論文では、透過率の異常値を扱うにあたり、正確な透過率測定法の確立を見据え、今回はそれらの原因による異常値をすべて含めて扱う立場とした。

実験方法

実験は2001年6月26日から2001年12月10日にかけて、香川大学農学部内の実験圃場（N34° 16' 17", E134° 7' 39"）にて行なった。

1. 供試資材

供試資材として、マルチ用で透過率が最も高い透明ポリエチレンフィルム (Tp_1)、最も低い黒色ポリエチレンフィルム (Bp)、光選択性の紫色ポリエチレンフィルム (Vp) と、遮光用の黒色寒冷紗 (Bc) の計4種類を選んだ。なお、栽培現場ではフィルムの多重被覆が行なわれていることから、透明ポリエチレンフィルムを2枚重ね (Tp_2) にした資材も用いた。各資材は約1ヶ月ごとに新しい資材に交換した。これら供試資材の各特性をTable 1に示した。

2. 測定方法

測定は、日射量、照度、光合成有効光量子束を短時間内で測定するところの瞬時測定と、終日の変化を測定する連続測定の2通りとした⁽⁵⁾。

瞬時測定：資材を木製枠 (105cm×105cm) に展張し、2台の日射計 (飯尾電機, S-SR2) で透過日射量を測定した。測定の手順は、最初に被覆下と無被覆下状態における全天日射計の出力を5回づつ記録して各々の全天日射量とし、次に両日射計の受感部を黒塗したディスク (径7cm) にて遮蔽し、散乱日射量を求めた。直達日射量は全天日射量 - 散乱日射量として求めた。測定は連日、12時から14時の間に行なった (以降、瞬時測定と記述)。なお、被覆下の日射計は、資材と日射計受感部との距離を10cmに保ち、日射計からみた資材の視野角が120°以上になるようにした^(2, 4, 5, 6)。

また測定は、資材を水平にした場合 (以降、水平設置と記述) と、法線透過率を求めるために資材を太陽光線

に直角に正対するように設置した場合 (傾斜設置) とで行なった。資材と太陽間の傾斜角は、測定時の太陽高度に基づいて設定した。また、測定装置の設置面付近からの反射日射が日射計に及ぼす影響を極力小さくするために、資材を展張したフレームの周囲を暗幕で囲んだ。

本実験では日射量の他に、照度計 (MINOLTA, T-1; タスコジャパン, DX-200) と光量子計 (タスコジャパン, TMS-870H4) により、被覆資材内外の照度と光合成有効光量子束を測定した。これらのセンサーは、被覆下では日射計の近傍に設置し、資材の傾斜設置と水平設置の場合の測定を行なった。

連続測定：日中、被覆資材内外の日射量の測定を、8時から16時まで1分間隔にて行なった (連続測定と記述)。被覆資材を瞬時測定の場合と同様に木枠に展張し、水平に設置した。木枠は2枚使用し、1枚は透明ポリエチレン (Tp_1) を常時設置し、あとの1枚は透明ポリエチレン2枚 (Tp_2)、黒色ポリエチレン (Bp)、紫色ポリエチレン (Vp)、寒冷紗 (Bc) の各種を数日毎に交換して設置した。日射計出力はロガー (横河電機, TYPE2423) にて記録した。

実験結果及び考察

1. 光透過率の期間平均値

各資材の日射透過率については季節による差は小さく、つまり太陽高度による差は小さいことが報告されている⁽²⁾。そこでここでは、実験期間中の瞬時測定による各資材の全天日射透過率 (以降、日射透過率)、照度透過率、光合成有効光量子束の透過率 (以降、光量子透過率と記述) を比較するために、期間平均値とその変動係数を、Fig. 1に示した。

期間平均値：水平設置の場合についてみると、日射透過率は、 Tp_1 (89.8%) > Tp_2 (82.3%) > Bc (55.8%) > Vp (52.9%) > Bp (3.3%) の高低関係となっており、ほぼ既報⁽⁵⁾ の場合と同様な傾向が得られた。これに対して、照度透過率では、 Tp_1 (85.1%) > Tp_2 (78.3%) > Bc (54.1%) > Vp (21.1%) となり、順位そのものは日射透過率と同様であるが、透過率は全般に低下しており、特に紫色ポリエチレン Vp は半分以下に低下した。これは、同フィルムが可視光域の透過率を低くする波長選択性のためである。なお、黒色ポリエチレンは測定困難であり、また事実上、透過率はほぼ0に近い。光合成有効光量子束では、 Tp_1 (86.5%) > Tp_2 (79.1%) > Bc (53.3%) > Vp (20.0%) > Bp (1.1%) となり、照度透過率の場合と同様となった。

このように、各光要因を通じて紫色ポリエチレン以外はほぼ同じ高低関係が示された。

次に傾斜設置の場合についてみると、いずれの透過率

Table 1 Test covering materials.

Symbol	Use	Raw materials			
Tp_1	Mulch	Polyethylene	0.02mm thick	Transparent	16.1gm ⁻²
Tp_2	Mulch	Polyethylene		($Tp_1 \times 2$)	
Bp	Mulch	Polyethylene	0.02mm thick	Black	18.2gm ⁻²
Vp	Mulch	Polyethylene	0.02mm thick	Violet	21.7gm ⁻²
Bc	Shade	Vinylon	#600	Black	50.1gm ⁻²

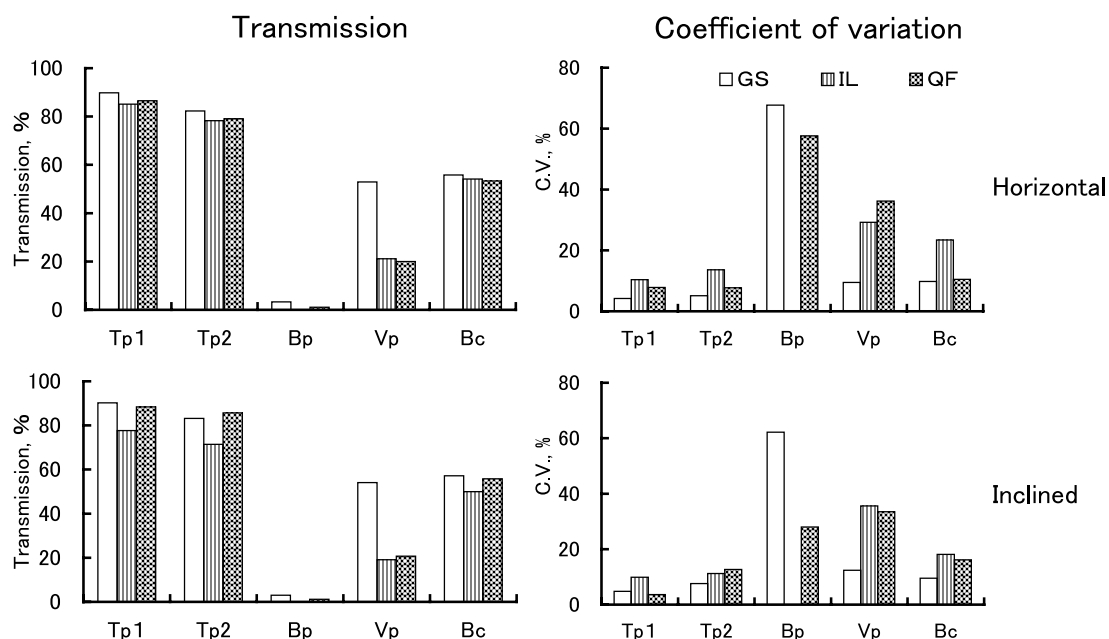


Fig. 1 Average values and C.V. of the transmission of covering materials from Jun. 16 to Nov. 30 in 2001. Covering materials Tp_1 , Tp_2 , Bp, Vp and Bc are the same as those described in Table 1. GS: Global solar radiation, IL: Illumination, QF: Quantum flux density. Horizontal: The materials were horizontally, Inclined: Materials inclined at an angle vertical to the solar beam.

の高低関係も水平設置の場合と変わらなかった。ただ、照度透過率について傾斜設置では、水平設置の場合よりも各資材は2%から7%ほど低くなった。

変動係数：被覆資材の日射透過率には時間によるバラツキがある。既報⁽⁴⁾によると、それを変動係数で表した結果、変動係数は被覆資材の透過率を特徴づける要因であることが明らかになった。そこで、ここでも変動係数を用いて検討した。

水平設置の場合、全体的に変動係数のフィルム間順位は、期間平均値の場合とは逆の順位となった。すなわち、期間平均値では最も小さい黒色ポリが最も高い変動係数を示し、期間平均値の最も高い透明ポリ1枚(Tp_1)が最も低い変動係数となり、この傾向は傾斜設置の場合も同様であった。黒色ポリの場合には、フィルムを展張した枠部などからの透過光による影響が大きいためである⁽⁴⁾。

2. 透過率と日射条件

日射透過率は日々の気象条件、特に日射条件によって大きく影響を受ける。ここでは照度、光合成有効光量子束についても日射条件(全天日射量、散乱比、太陽高度、雲量)との関連を、重回帰分析で求めた。なお、重回帰分析はステップワイズ法を用いた。また、各説明変数の単位の違いによる影響をなくすため、選択された変数の係数は標準偏回帰係数にて表した(Table 2)。

日射量：水平設置の場合、各フィルムでは日射量が共通して選択され、さらに透過率の低い黒色ポリでの係数が最も大きくなった。次に散乱比も紫色ポリ以外で共通要因となり、これも黒色ポリでの係数が大となった。重相関係数は総じて透過率の高いフィルムほど低くなった。傾斜設置では日射量はいずれのフィルムでも選択されず、散乱比か太陽高度のいずれかの変数が大多数であり、一定した傾向はみられなかった。

この水平設置と傾斜設置間の比較についてはこれまでも行われている^(2,4)。いずれも観測期間の相違や説明変数の相違によって一律に比較できないが、傾斜設置の方が選択される要因が少なかった。これは、少しの要因によって透過率の高低が影響を受けることを示している。

照度：水平設置の場合、黒色ポリ(欠測)以外は太陽高度のみが選択され、重相関係数は透過率が低い資材ほど係数は高くなった。傾斜設置では太陽高度はわずか寒冷紗のみに選択され、他の資材では他の要因が選択されたが一定した傾向はない。なお、傾斜設置の方が選択された要因の多いのは既報⁽²⁾でも報告されている。

光合成有効光量子束：水平設置ではすべての資材で太陽高度が選択され、黒色ポリ以外の資材では計4要因が選択された。傾斜設置では全体的に選択された要因は減少したが、透明2枚以外は、各資材ともに全天日射量が選択された。

Table 2 Standard partial regression coefficients regarding the relations between the transmission of solar radiation, illumination and quantum flux density beneath covering materials and four meteorological factors. Measurements were at 12:30 to 13:30 from Jun. 16 to Nov. 30 in 2001.

Treatment	Covering material ^z	Solar radiation	Ratio ^y	Sun altitude	Cloud amount	Coefficient ^x	
Global solar radiation	Horizontal	Tp ₁	0.240	0.100	-0.170	0.210	0.190
		Tp ₂	0.557	0.460		0.311	0.425
		Bp	0.757	0.911			0.535
		Vp	0.470				0.453
		Bc	0.509	0.263		0.270	0.407
	Inclined	Tp ₁			-0.320		0.303
		Tp ₂		-0.430			0.381
		Bp			0.358		0.316
		Vp		-0.524			0.509
		Bc		-0.209	-0.150		0.200
Illumination	Horizontal	Tp ₁			0.253	0.205	
		Tp ₂			0.390	0.363	
		Bp	-	-	-	-	-
		Vp			0.493	0.474	
		Bc			0.461	0.440	
	Inclined	Tp ₁		-0.310			0.273
		Tp ₂		-0.280			0.238
		Bp	-	-	-	-	-
		Vp				-0.407	0.382
		Bc	-0.240	-0.220	0.100	-0.050	0.270
Quantum flux density	Horizontal	Tp ₁	-0.290	-0.240	0.040	0.080	0.320
		Tp ₂	0.120	0.210	0.050	-0.120	0.340
		Bp			0.601	0.586	
		Vp	0.009	-0.446	0.014	0.427	0.205
		Bc	0.220	0.020	-0.030	0.180	0.300
	Inclined	Tp ₁	-0.585	-1.032			0.505
		Tp ₂			0.307		0.261
		Bp	0.300				0.250
		Vp	0.399		0.239		0.422
		Bc	0.378				0.343

z: Covering materials are the same as in Table 1.

y: Ratio of sky solar radiation to global solar radiation.

x: Multiple regression coefficient is adjusted for the degrees of freedom.

このように資材の水平設置又は傾斜設置によって選択される要因の異なることが明らかとなった。

3. 異常値の出現頻度

実験期間中における日射透過率、照度、光合成有効光量子束についての異常値出現頻度を、Table 3に表した。

日射透過率: Table 3によると、全天日射透過率の水平設置の場合、黒色ポリ (Bp) のみに異常値が出現し、全観測日数87日のうち33日、すなわち全期間の37.5%が

異常値となった。この理由には、同資材の透過日射量が微少であることから、相対的に日射計ガラスドームによる反射の影響が大きいことによると考えられた^(2,7)。

傾斜設置の場合でも、黒色ポリにおける異常値出現率は高いが、その水平設置の場合に比べても8%低い。これは1年間継続測定による結果⁽⁵⁾とも一致している。傾斜設置の透明ポリ1枚 (Tp₁) にも異常値がわずかに測定されたが、これも同じ結果が得られている。

照度透過率: 水平設置の場合、透明ポリ1枚と2枚間

Table 3 Appearance days of abnormal transmission values from Jun. 16 to Nov. 30 in 2001. The values were by instantaneously measurement between 12:30 to 13:30 during experimental period.

Transmission		Horizontal		Inclined	
		Number of days	Percentage (%)	Number of days	Percentage (%)
Global solar radiation	Tp ₁	0	0	1	1.1
	Tp ₂	0	0	0	0
	Bp	33	37.5	26	29.5
	Vp	0	0	0	0
	Bc	0	0	0	0
Illumination	Tp ₁	6	6.9	2	2.3
	Tp ₂	5	5.7	3	3.4
	Bp	—	—	—	—
	Vp	1	1.1	1	1.1
	Bc	1	1.1	1	1.1
Quantum flux density	Tp ₁	4	4.6	6	6.9
	Tp ₂	2	2.3	15	17.2
	Bp	0	0	0	0
	Vp	0	0	0	0
	Bc	0	0	0	0

の差は僅差で、紫色ポリと寒冷紗は約1%であった。傾斜設置になると、透明ポリの1枚と2枚の異常値出現頻度は半分程度に減じ、既報⁽⁵⁾と同様の傾向が得られた。紫色ポリと寒冷紗は設置方法による変化はみられなかった。なお、黒色ポリは測定困難のため値は得られていない。

このように照度透過率では光透過性の高いフィルムに異常値がみられた。

光量子透過率：異常値が出現したのは、水平設置と傾斜設置を通じて透明ポリ (Tp₁, Tp₂) のみである。また傾斜設置の方が水平設置よりもわずかに異常値は多くなっている。他方、他のフィルムでは異常値は認められないことから、本実験で供試したフィルムの測定例からは、光合成有効光量子束の異常値は透過率の大きいフィルムに多いことが明かになった。この傾向も既報⁽⁵⁾と同じであるが、原因の詳細はフィルムの波長特性との関係において究明する必要がある。

4. 異常値と気象条件

4.1 日射計の種類

日射計の測定原理の違いによる異常値の出現を連続測定により比べた。Fig. 2は、実験期間中2日間における代表的な日射の経過を示したもので、黒色ポリ内外の日射量である。使用した日射計Aは農試電試型であり、検

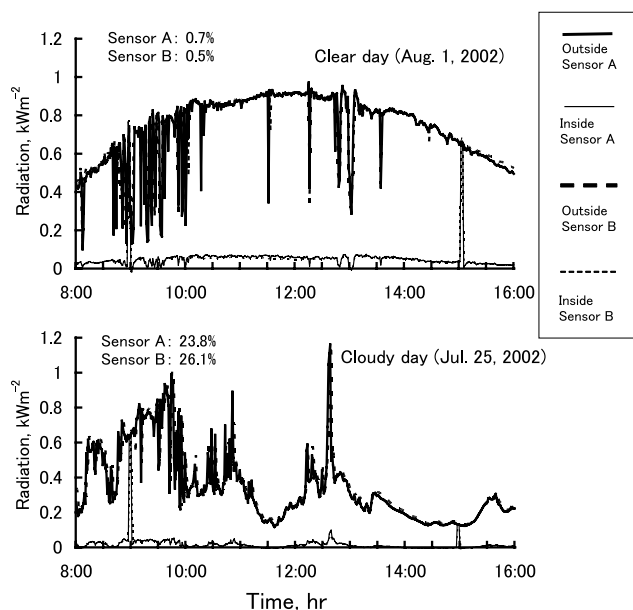


Fig. 2 Diurnal variations of solar radiation by two sensors at open field and in the house.

出方法はヒートシンク型である。他方のBは太陽電池型であり、検出方法は量子型である。

Fig. 2によると、2日間ともにセンサーAとセンサーB各々のハウス内外日射量の経時変化からは、ハウス内の方がハウス外よりも日射量が高い等の異常値の発生はほとんどみられていない。晴天日の8月1日(雲量4.0)は0.7%と0.5%の僅差であり、曇天日の7月25日(雲量9.0)でも2.4%と2.6%となった。雲量が多くなると異常値発生頻度は高くなったが、センサー間の差は小さかった。

またFig. 3は、実験期間中の連続測定による連日8時から16時までの異常値出現頻度(測定間隔1分)を示したものである。これによると、 $20分 \leq X < 50分$ の異常値出現率は農試電試型(Sensor A)の方が太陽電池型日射計(Sensor B)より若干多い程度であるが、明確な差は得られていない。

今回の日射透過率の異常値には、日射計の測定原理の違いによる差は小さくみられたが、今後、詳細な実験的検討が必要である。

4.2 気象条件

瞬時測定：瞬時測定による異常値出現の状況を、黒色ポリフィルムについて日射透過率の場合を、全天日射、雲量、太陽高度との関連から求めた。異常値出現はこれまでの結果⁽⁴⁾から日射量の変動による影響が大きいため、各々を日射の変動係数との関係から示した(Fig. 4)。

水平設置の場合について日射量との関係(Fig. 4のa)

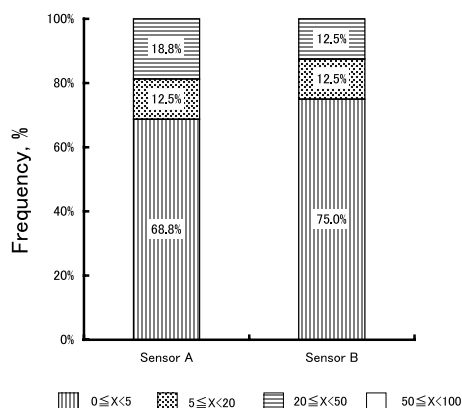


Fig. 3 Frequency of abnormal transmission values beneath black PE film, measured by two types of solarimeter from Jul. 17 to Aug. 2 in 2002. Explanatory notes (X) were the total minutes of abnormal values per day.

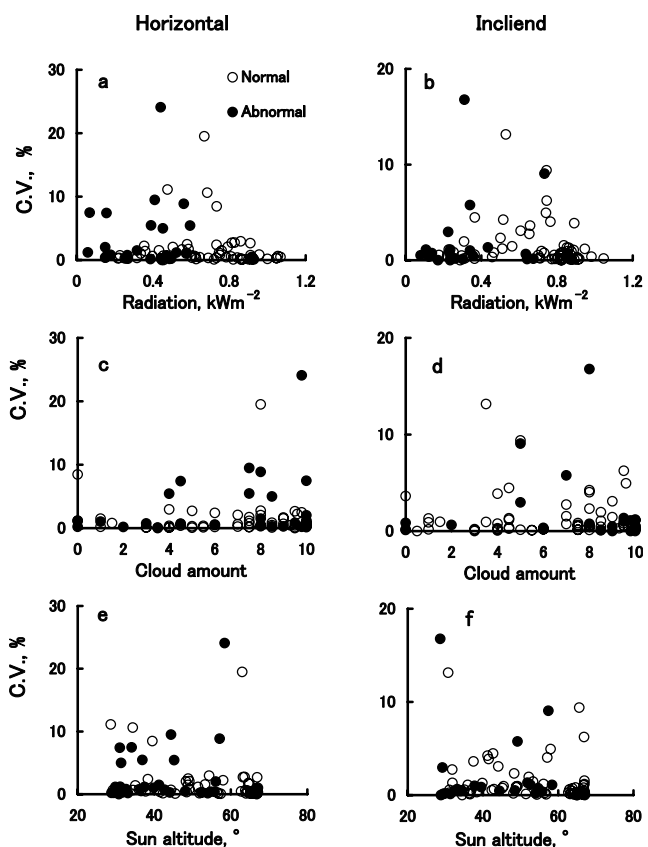


Fig. 4 Relations between fluctuations (C.V.) of solar radiation at the measuring time and some factors from Jun. 16 to Nov. 30 in 2001. Open circles denote the C.V. for normal transmission values of covering material Bp. Dotted circles were the ones for the transmission value which including abnormal data.

は、日射量 0.5kWm^{-2} を超えるとそれまでの異常値から正常値の出現が目立つようになり、また、日射変動との関係は不明であった。傾斜設置の場合 (b), 0.35kWm^{-2} 以上で日射変動が大きくなって正常値に転ずるように

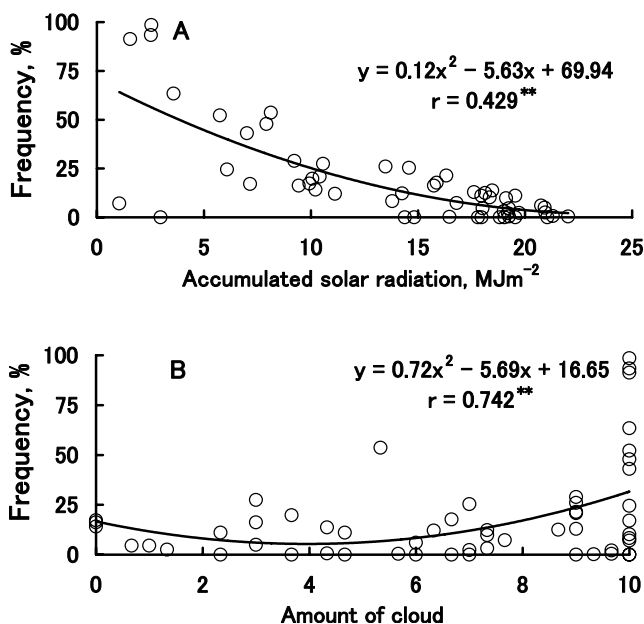


Fig. 5 Relations between frequency of abnormal transmission values and accumulated solar radiation, amount of cloud beneath black PE film from Jun. 16 to Nov. 30 in 2001. Accumulated solar radiation was from 8:00 to 16:00.

なった。

雲量との関係で水平設置 (c) は、雲量が多くなるにつれて異常値出現も高くなるが、傾斜設置 (d) では明確な傾向は得られなかった。

太陽高度との関係では水平設置の場合 (e)、太陽高度約30度から70度の間は明確な傾向は得られず、傾斜設置 (f) でも同様であった。

以上のように要因ごとにみた場合、異常値出現の状況は必ずしも明確ではなかった。

連続測定：次に日射透過率の異常値出現割合を日積算日射量と雲量との場合 (黒色ポリ下の日中 (8時から16時)) をFig. 5に示した。

Fig. 5によると、日積算日射量との関係 (Fig. 5のA) では、積算日射量が大きくなるにつれて異常値出現率は下がる関係にあり、積算日射量 20MJm^{-2} を超えると異常値出現率は6%以下にまで下がった。

雲量との関係 (B) では、雲量0~10のいずれもが異常値出現率は約10%以上となった。ただし、雲量10の場合には、異常値が多く集中した。

正常値と異常値の出現率：日射、照度、光量子密度の各透過率について、異常値の出現した日のグループと、出現しなかった日のグループに分類し、出現の有無に影響を及ぼした要因を明かにするため、判別関数を求めた。なお、ここでは比較的高割合で判別出来た場合のみをTable 4に示した。

Table 4 Discriminant analysis of light transmission beneath some covering materials from Jun. 16 to Nov. 30 in 2001.

	Situation of film	Linear discriminant function	Correct discrimination
Global solar radiation beneath film Bp	Horizontal	$Z = 15.73G + 7.85R - 11.66$	84.0%
	Inclined	$Z = 9.33G + 0.32C - 6.54$	78.0
Illumination beneath film Tp ₁	Horizontal	$Z = 7.92G - 3.46R - 0.32S + 14.10$	90.0
Quantum flux density beneath film Tp ₂	Inclined	$Z = 0.08S - 3.05$	66.7

G: Global solar radiation, R: Ratio of sky solar radiation to global solar radiation, C: Amount of cloud, S: Sun altitude.

Table 4によると、日射量透過率の水平設置下（黒色ポリ）の判別では、全天日射量と散乱比が選択されて正判別率は84%となった。傾斜設置では、先の散乱比に替わって雲量が選択されて正判別率は若干下がった（78%）。この散乱比が雲量にとって替わった詳細な機構は不明であるが、いずれも全天日射量について日射状態を示す要因となった。

照度透過率では水平設置の場合（透明ポリ1枚）の判別式が得られている。選択された要因は全天日射量、散乱比、太陽高度の3要因となり、正判別率は90%に達した。

光合成有効光量子束の透過率では、傾斜設置の場合に判別式が得られた。選択された要因は太陽高度のみとなり、正判別率は66.7%となった。

以上、日射、照度、光量子を同一条件で測定した結果、各条件下の透過率に及ぼす要因の異なることが明らかとなった。

摘 要

本実験は、農業用被覆資材の代表的フィルムを用いて、日射透過率、照度透過率、光量子透過率の異常値出現と気象条件との関係について検討した。実験期間中の期間平均透過率は、いずれの透過率も光選択性の紫色ポリ以外はほぼ同じ高低関係であった。また透過率の変動係数は透明性が増す資材ほど低く、これらの結果は水平設置と傾斜設置も同じ傾向であった。

異常値の出現頻度については、日射透過率では透過率の低い黒色ポリフィルムに異常値が高かった。照度透過率では透過率の高いフィルムほど異常値が高くなり、光量子透過率の場合も同じ結果となった。異常値の出現原因は測定原理によるのではなく、フィルムの光透過率の高低と日射条件によることが大きかった。

本実験から、日射透過率、照度透過率、光量子透過率間の基本的差異は小さいこと、異常値出現については、測定の時間と時期など光条件による影響が大きいものと考えられた。

引 用 文 献

- (1) Pollet, I.V. and Pierters, J.G.: Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials. *Agricultural and Forest Meteorology*, **93**, 149–152 (1999).
- (2) 土屋淳子, デュムロンキティキューレ スラボン, 鈴木晴雄: 農業用被覆資材における日射透過率の長期変化. 香川大学農学部学術報告, **50**, 57–68 (1998).
- (3) 中沢文男: 農業用フィルムの反射および透過特性に及ぼす入射角の影響. 生物環境調節, **11**, 37–40 (1973).
- (4) 鈴木晴雄, 大呂 肇: 農業用被覆資材の日射透過率に及ぼす日射条件の影響. 日本砂丘学会誌, **39**, 20–26 (1992).
- (5) 安藤真美, 鈴木晴雄, ティーラサク ポンサアヌ ティン, 奥田延幸, 松井年行: 農業用被覆資材の日射透過率と測定条件. 日本砂丘学会誌, **51**, 13–26 (2004).
- (6) 日本農業気象学会編: 農業気象の測器と測定法. pp. 228–229. 農業技術協会, 東京 (1997).
- (7) 友光美帆, 鈴木晴雄: 被覆資材の日射透過率測定における異常値出現と気象条件. 中国・四国の農業気象, **15**, 54–55 (2002).

(2007年10月31日受理)