

ハウスにおける日射量・照度・光合成有効光量子束密度の透過特性

細川桂子・吾郷裕之・鈴木晴雄

Relations between Transmissions of Global Solar Radiation, Illuminance and Photosynthetic Photon Flux Density in a Glass House

Keiko HOSOKAWA, Hiroyuki AGO and Haruo SUZUKI

Abstract

In this experiment, the solar radiation, illumination intensity, and photosynthetic photon flux density (quantum flux density) were measured in a glasshouse to clear the relationships among them. The measurements were conducted at 9:00, 12:00, and 15:00 daily from September 20, 2005 to September 9, 2006 at 25 points in a glasshouse and one point outside the glasshouse.

For the average transmission factors of the solar radiation, illumination intensity, and photosynthetic photon flux density at the 25 points in the glasshouse, the following relationship was observed at all three times of day: solar radiation > photosynthetic photon flux density > illumination intensity. For the average intensity of the light, all three types of light showed the following relationship: 12:00 > 9:00 > 15:00. For the relationship between the light in the glasshouse and the solar radiation conditions, the global solar radiation greatly impacted on the light in the glasshouse at all three times of day. For the average light intensity of the 25 points, high correlations were observed among all three types of light. As the sun altitude rose, the increase rate of solar radiation became smaller than that of illumination intensity and photosynthetic photon flux density.

In plant canopies with soybean, sunflower, and rice, the transmission factors of the solar radiation were greater than those of the other two types of light. With all types of plant and all types of light, the transmission factors were greater outside the glasshouse than in the glasshouse.

The experiment results indicated that the relationships among the three types of light in a glasshouse varied depending on the measurement times of day and measurement points. Therefore, light measurement under the same conditions was required in order to mutually convert among the types of light.

Key words : Glasshouse, Illumination intensity, Photosynthetic photon flux density, Solar radiation, Transmission.

1. はじめに

栽培現場での光の測定は、主に日射量や照度、光合成有効光量子束密度について行われているが、いずれの光を測定するかは目的によって異なる。さらに各光は互いに関係があるため、ある光から他の光へ変換することが行われている¹⁾。しかし、ハウスや植被内などにおいては、気象条件、時刻、測定点の位置などによって各光の強度と光質が変化するので、一律に変換するには問題がある。

そこで本実験では、各光の測定条件による特性を明確にするため、ガラスハウス内において各光の測定を行い、比較して検討を行った。

2. 実験方法

2.1 測定

実験は、香川大学農学部 (N34° 16' 17", E134° 7' 39") のガラス温室にて、2005年9月2日から2006年9月10日にかけて行った。

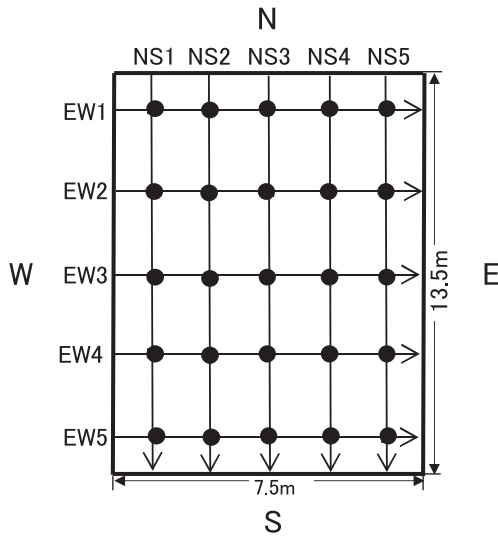


Fig. 1 Measuring points for global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density in a glasshouse. ● : Measuring point.

日射量の測定は太陽電池型日射計（飯尾電機，S-SR2）を用いた。照度と光合成有効光量子束密度はそれぞれ照度計（ミノルタカメラ，T-1）と光量子センサー（タスコジャパン，TMS-870H）を用いた。なお，光量子について近年，光合成有効光量子束の使用が提言²⁾されているが，本報では光合成有効光量子束密度（photosynthetic photon flux density）を使用した。

測定は連日9時，12時，15時の各時間に行った。また光の測定は，ハウス内の各測点を順番に移動して測定した（Fig. 1）。各測点での測定時には，常にハウス外の露地でも同時に測定を行った。また，各測点では5回ずつ測定し，その平均値を測定値とした。各時刻の測定前後に，各光センサーの出力を露地設置のセンサーと比較して校正した。

次に，ハウス内各測点で透過率を測定している間に光強度は変化する。そこで各測点間での差異を補正するため，露地での測定値の5回平均値を基準とし，各補正を行った。

2.2 植被内の光透過率

露地とハウスにおける植被内の光透過率を比較するため，2006年6月6日から2006年9月12日にかけて各透過率の測定を行った。

供試植物としてダイズの‘中生枝豆’，ヒマワリの‘姫ヒマワリ’，イネの‘ヒノヒカリ’の計3種を用いた。植物は1/5000aのワグネルポット（プラスチック製，乳白

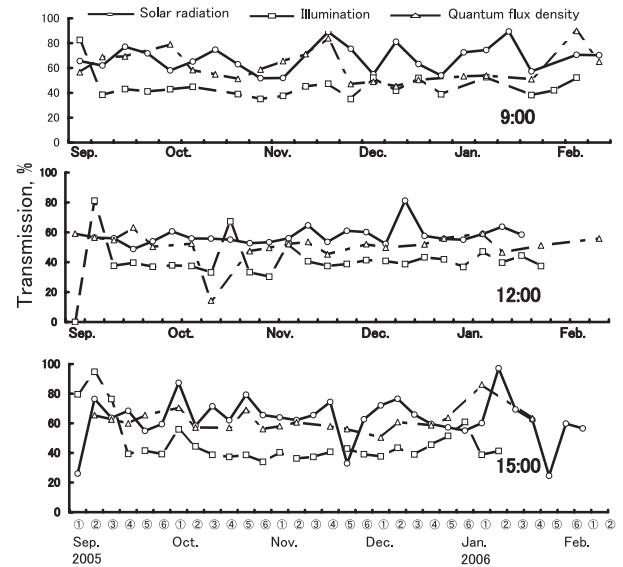


Fig. 2 Seasonal variations of transmission of global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density in the glasshouse from September 2 in 2005 to April 24 in 2006.

色）9個を用いて栽培し，各ポットは縦3個×横3個として互いに接触させて配置した。次に測定毎に台車上に各ポットを設置し，ハウス内と露地間を移動させ，同じ植被内での透過率を比較するようにした。

測定方法として日射量，照度，光合成有効光量子束密度の各光量を，露地とハウス内で5回ずつ測定し，その平均を測定値とした。植被内での測定として，台車中央部のポットの地表面とその上部（草高2分の1の高さ）で行った。植被外でもこれと同様にして測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 ハウス内光透過率

3.1.1 光透過率の推移

測定期間中（2005年9月2日—2006年2月10日）における，ハウス内の光透過率の推移をFig. 2に示した。

9時：Fig. 2によると，9時の日射透過率は期間中51.7～99.7%の範囲で推移した。照度透過率では35.1～85.7%であり，日射透過率と比べると全体的に20%程度低くなった。光量子透過率（光合成有効光量子束密度の透過率）は50.2～90.7%の範囲で推移し，照度透過率より高くなった。これら透過率が異なったのは，主に光センサー間の感度波長の違いによるとみられた。

9時では，日射透過率と比較して照度透過率では約20%低く，光量子透過率では約7%低くなった。

12時：日射透過率は48.8～81.2%で推移し、9時値と比較すると約10%低くなった。9時値より低かったのは、本実験のハウスが南北単棟であることでハウス骨材によって遮光程度が強くなったためであり、冬至における既報³⁾の結果と同様の傾向が示された。

照度透過率は期間中30.3～81.1%で推移したが、9時値と比較すると日射透過率と同様に12時の方が低く、約15%の低下であった。

光量子透過率は15.1～79.5%で推移し、9時値と比較すると日射透過率、照度透過率と同様に12時の方が低く、約5%の低下となった。

12時の各透過率の順位は、9時の場合と同様に日射透過率が最も高く、続いて光量子透過率、照度透過率の順となった。

15時：15時の日射透過率は24.5～97.2%、照度透過率では34.0～94.8%、光量子透過率では51.9～90.7%の範囲で推移した。12時値と比較すると日射透過率は約4%、照度透過率も約4%、光量子透過率は約6%増加した。各透過率は9時値と同様に12時値より高く、正午前後に低くなる傾向が示された。

これら15時の各透過率の順位は、全天日射透過率>光量子透過率>照度透過率となり、9時値、12時値と同じ順位となった。

3.1.2 期間平均値

測定期間中のハウス内全測点における時間帯別（9時、12時、15時）の日射量、照度、光合成有効光量子束密度を、期間の平均値、最大値、最小値、標準偏差、変動係数として表した（Fig. 3）。

Fig. 3によると、日射量の期間平均値は、12時値>9時値>15時値の順となり、次いで最大値、最小値、標準偏差、変動係数も同様の結果が得られた。9時値を基準

とすると、12時値はそれの約1.4倍、15時値は約0.4倍であった。同じ太陽高度であっても15時より9時の方が高くなったのは、9時から開始した移動測定時の太陽高度が15時に測定を開始したものよりも高くなるので、光強度も大きくなったとみられた。

次に照度は日射量の場合と同様に、12時値>9時値>15時値の順となった。12時値は9時値の約1.1倍、15時値は約0.6倍であり、日射量と比較すると測定時刻による差は若干小さくなった。

光合成有効光量子束密度では、日射量と同様に12時値>9時値>15時値の順となった。光合成有効光量子束密度の12時値は9時値の約1.2倍、15時値は約0.7倍であり、測定時刻による差は日射量より小さく、照度よりも大きくなった。

照度や光合成有効光量子束密度が日射量よりも測定時刻による差が小さかった。これは前二者のセンサーが後者の日射計より狭い波長域を対象としており、さらに照度と光合成有効光量子束密度のセンサーの測定範囲外の長波長域の量が朝夕には減少するためとみられた⁴⁾。従って9時や15時では、照度と光合成有効光量子束密度と日射量間の差は大きく生じた。

ハウス内光の時間帯別平均値は日射量、照度、光合成有効光量子束密度ともに、12時値>9時値>15時値の順となった。

以上のように各光の期間平均値について特徴が得られたが、期間中の最大値、最小値、標準偏差、変動係数の傾向についても期間平均値の場合とはほぼ同じであった。

3.2 ハウス内光の床面分布

ハウス床面での光分布は、日射、照度、光合成有効光量子束密度によって異なることが推測できる。そこで

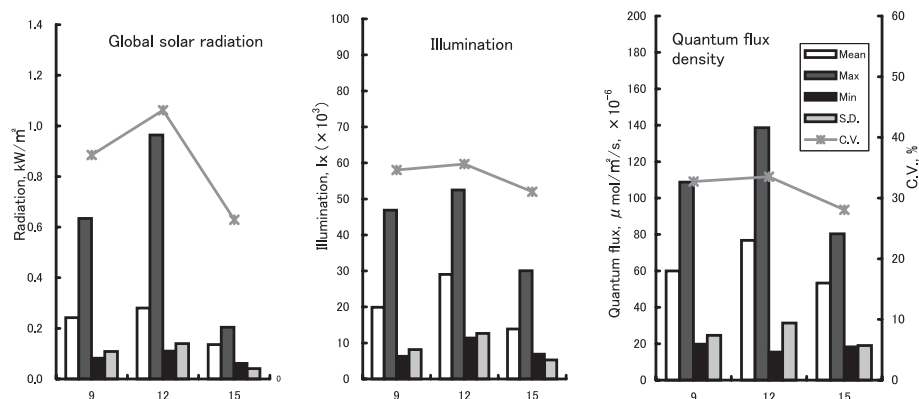


Fig. 3 Mean values of global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density in the glasshouse from September 20 in 2005 to April 24 in 2006.

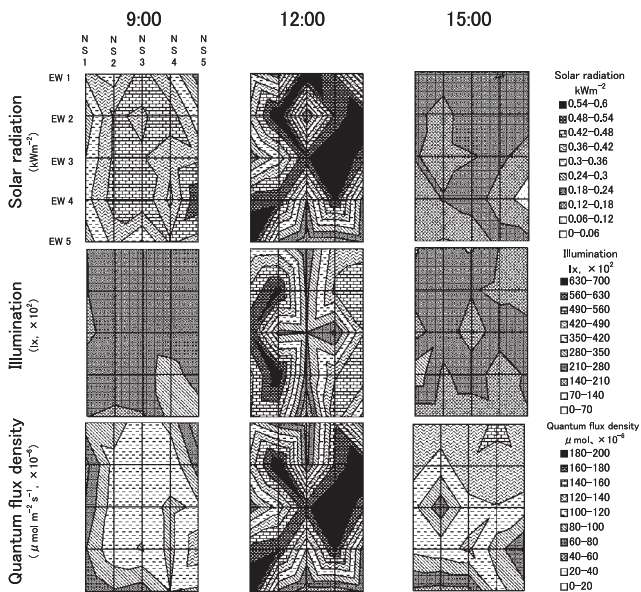


Fig. 4 Horizontal distributions of global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density in the glasshouse on clear days from September 20 in 2005 to April 24 in 2006.

Fig. 4に、期間中の快晴日における各光の床面分布を時間帯別に示した。

9時：日射量はハウス西側面(NS1-EW5)と北妻面(NS5-EW1)が低くなったが、全体的にはハウス中央付近が高く、局所的にはNS5・EW4の交点部が最も高くなった。照度の分布は日射量ほど明確でないが、ハウス南東部(NS5-EW5)が高くなった。光合成有効光量束密度では日射量と近似してハウス側面(NS1-EW5)と南妻面(NS5-EW5)が低く、全般的に中央部が高く、局所的にはNS3-EW4が最も高くなった。

このようにハウスの構造材による遮蔽下の透過光分布は、光の種類により異なった。

12時：太陽高度が最も高い12時では、一部を除いて各光ともに南北の中央部付近(NS3-EW5)が低くなった。中でも日射量はNS3-EW2が、照度は中央部が、光合成有効光量子束密度はハウス中央部の南北方向に沿って低く、これは明らかに南北棟ハウスの構造材による影響とみられた³⁾。

15時：各光分布を比較すると、全般的には日射量と照度は露地に比べて同程度の減衰であるが、光合成有効光量子束密度はそれらより比較的高かった。日射量は9時値と比べて0.2kW/m²程度低く、照度はほとんど差は無いが、光合成有効光量束密度は若干高かった。15時は9時とは太陽高度による差がほとんどなかったが、測定値では各光による特性が生じた。

以上、各光によって時間帯別に床面水平分布に差のあ

ることが明らかになった。

3.3 光透過率と気象条件

3.3.1 気象要因

前述(3.2)のように、各光は測定点によって差が生じた。これにはハウス構造材の他に測定時刻や天空状態も影響しているとみられる。そこで、天空状態を全天日射量、散乱比、雲量、太陽高度、太陽方位の計5要因で表し、光透過率との相関関係を求めた(Table 1)。

9時のハウス内各測定点(1~5)において、各光ともに散乱比以外のほぼ4要因間で相関関係がみられた。12時の場合、各光ともに全天日射量との間では相関関係がみられ、さらに日射量と照度は散乱比と雲量との間で相関関係がみられた。15時の場合、日射量は全天日射量と雲量との間で、照度では全天日射量との間でのみ相関関係がみられる傾向にあった。

ハウスの各測点ごとの傾向は、本実験からは明確ではなかったが、各光による相関関係の特徴が示された。また日射量、照度、光合成有効光量子束密度は、各時刻において全天日射量の影響を大きく受けることが示された。

3.3.2 各光間関係

日射量、照度、光合成有効光量子束密度の各光は互いに強い相関関係があるものの、それぞれ波長感度特性が異なるので、一つの光から他の光への単純な変換には問題が生じる。そこで、ハウス内外における3光間の各関係を検討した(Fig. 5)。

日射量—照度： Fig. 5によると、日射量と照度間では9時、12時、15時ともにハウス内外で高い相関関係がみられた。露地と比べてハウス内では、照度の増加勾配は小さくなった。これはハウス内では直達日射量が遮られる程度が高いのに対し、他方の照度では高い感度を示す波長域の光が特に減少したためと考えられた。照度の増加勾配は、ハウス内外ともに12時値>9時値>15時値の順で大きく、太陽高度が高いほど勾配は大きくなった。

日射量—光合成有効光量子束密度： 日射量と光合成有効光量子束密度間の関係は、各時刻のいずれも高い相関関係がみられた。ハウス内では露地よりも光合成有効光量子束密度の増加勾配は小さくなった。これは前述の日射量—照度の場合と同様に、直達日射量が遮られることで光合成有効光量子束密度波長域の光が多く減少したためと考えられた。

光合成有効光量子束密度の増加勾配は、ハウス内外ともに12時値>9時値>15時値の順で大きく、照度と同様に太陽高度が高いほど勾配が大きくなった。この理由と

Table 1 Correlations between the light (global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density) and some factors (global solar radiation, ratio of sky solar radiation to global solar radiation, cloud amount, sun altitude and sun direction) at measuring points in the glasshouse from September 20 in 2005 to April 24 in 2006. Measuring points (1-5) were the same as in Fig. 1. * : Significant at 5% level, ** : Significant at 1% level.

		Solar radiation	Ratio	Cloud amount	Sun altitude	Sun direction
9:00	Solar radiation	1	**	**	**	**
		2	**	**	**	**
		3	**	**	**	**
		4	**	**	**	**
		5	**	**	**	**
	Illumination	1	**	**	**	**
		2	**	**	**	**
		3	**	**	**	**
		4	**	**	**	**
		5	**	**	**	**
12:00	Solar radiation	1	**	**	**	**
		2	**	*	**	*
		3	**	**	**	*
		4	**	**	**	*
		5	**	**	**	*
	Illumination	1	**	*	**	*
		2	**	**	**	*
		3	**	**	**	*
		4	**	**	**	*
		5	**	**	**	*
15:00	Solar radiation	1	**	**	**	**
		2	**	*	**	*
		3	**	**	**	*
		4	**	**	**	*
		5	**	**	**	*
	Illumination	1	**	*	**	*
		2	**	**	**	*
		3	**	**	**	*
		4	**	**	**	*
		5	**	**	**	*
Quantum flux density	1	**	*	**	*	
	2	**	**	**	*	
	3	**	**	**	*	
	4	**	**	**	*	
	5	**	**	**	*	

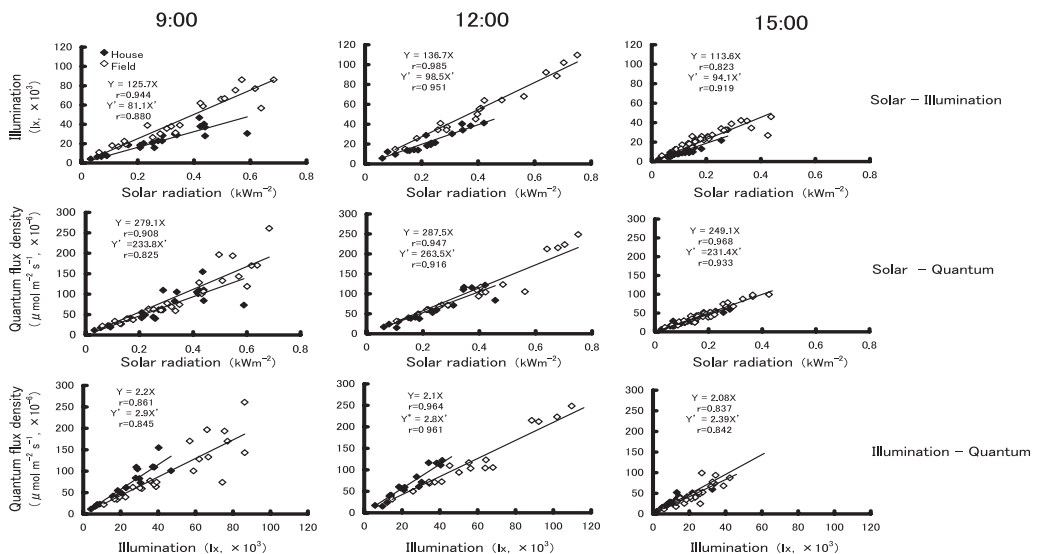


Fig. 5 Relations between global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density at the field and in the glasshouse from September 20 in 2005 to April 24 in 2006.

して、光合成有効光量子束密度は太陽光の波長分布のピーク付近を中心とした波長域（400～700nm）であるので、広い波長域を対象とする日射量（0.3～4.0 μ m）と比べて、日射強度が強まる時間帯ほど光合成有効光量子束密度がより増加したためと考えられた。

照度—光合成有効光量子束密度： 照度と光合成有効光量子束密度間は、ハウス内外のいずれの場合も高い相関関係がみられた。露地よりもハウス内で照度の増加勾配が小さくなったが、これは前述（3.3.2）のように、照度と光合成有効光量子束密度では波長感度が異なり、しかも照度の波長感度が高い波長がハウス内で少なかったためと考えられた。

光合成有効光量子束密度の増加勾配は、露地およびハウス内ともに9時値>12時値>15時値の順で大きく、午前中は勾配が大きくなる傾向にあった。

以上、3光間の関係はハウス内外と時間帯によって異なる傾向が示された。

3.4 植被内の光透過率

3.4.1 期間中の推移

露地とハウスにおけるダイズ、ヒマワリ、イネ群落内（1/2H）の各光透過率の推移を、Fig. 6に示した。Fig. 6の上段は各光透過率の推移を表し、下段は各光透過率の露地—ハウス間差の推移である。

Fig. 6についてダイズ（a）では、期間中、露地の日射透過率が最も高く経過し、次にハウスの日射量、露地

の光合成有効光量子束密度が続いた。照度透過率はさらに低く経過し、露地よりもハウスが若干低かった。光量子透過率は露地とハウスともに低く経過した。

ヒマワリの場合（b）、ダイズとは群落構造や生育ステージ等が異なるので直接比較できないが、露地の日射量が最も高かった。照度透過率と光量子透過率の傾向は明確でなかった。

イネ（c）では、7月上旬の生育初期における各光の差は明確でなかった。8月になると、日射透過率は露地とハウスともに顕著に高くなったが、照度透過率と光量子透過率の傾向は明確でなかった。

次に露地—ハウス間差を比較すると、ダイズ（d）では7月上旬から中旬までは、日射透過率は露地での優位が目立ったが、その後は照度透過率と光量子透過率ともに一定した傾向はみられなかった。

ヒマワリ（e）ではほぼ全期間中、日射透過率は露地での優位がみられた。8月になると露地の照度透過率が一時的に日射透過率より優位となったが、8月中旬にはハウスが優位となった。この傾向は光量子透過率の場合も同様であった。

イネ（f）では、全期間を通じて一定した傾向は各光ともになかった。ダイズ、ヒマワリと異なって、光量子透過率は露地での優位が顕著となった。

以上、光透過率の中では各植被とも日射透過率が最も高い傾向を示した。露地—ハウス間では、いずれの光も露地内の植被の方がハウス内植被よりも明確に高い透過

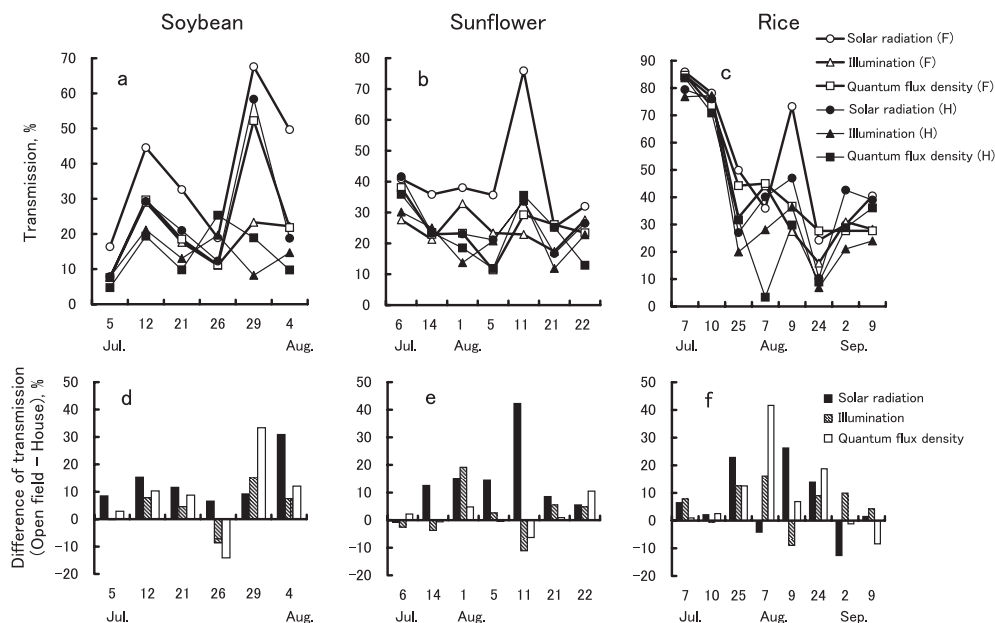


Fig. 6 Transmissions of global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density within three plant canopies from July 5 in 2006 to September 9 in 2006. F : Open field, H : House.

率となった。

3.4.2 光透過率の順位

植被内の各透過率は、日射量、照度、光合成有効光量子束密度によって異なっている。そこで、各光間の差を明確にするために、測定期間中における各透過率の順位を求め、Fig. 7に示した。

ダイズ： Fig. 7によると露地の場合、日射透過率1位の比率は約100%であり、これは全天日射の波長範囲の中で400~700nmを植被がよく吸収したからである。他方の照度、光合成有効光量子束密度もこの波長範囲を対象としているが、700nm以上の近赤外放射はほとんど無関係のため、結果として日射量の透過率が高くなったとみられた⁴⁾。

ハウス内の日射量透過率1位は80%まで大幅に減少したが、照度透過率では露地の7%から約55%に上昇した。光量子透過率1位の割合は、露地(14%)よりも増加(28%)した。

ヒマワリ： 露地の日射透過率1位の比率は約70%と高く、照度透過率1位は約22%、光量子透過率1位は13%程度であった。ハウス内になると日射透過率1位はわずかに上昇したが(78%)、照度透過率は55%まで上昇し、光量子透過率も露地(14%)の2倍(27%)まで上昇した。ダイズとの違いは、主に葉層の位置など群落構造の違いに起因すると考えられた。

イネ： 露地の場合、日射透過率の順位1位は約80%と高く、照度透過率1位は19%、光量子透過率1位約38%となった。しかし、ハウス内では日射透過率1位の比率は約70%と減少したが、照度透過率1位は反対に37%程度に上昇し、光量子透過率1位は約30%とわずかに減少した。

このようにダイズ、ヒマワリ、イネ群落下では植被の種類、ハウスの内外によって透過率順位が入れ替わり、植被と光の種類による透過率の特性が示された。

4. 結 論

ハウスにおける日射量、照度、光合成有効光量子束密度の分布は、時間と気象条件によってそれぞれ異なることが明らかになった。ハウス内外の植被内における各光透過率を比較した結果、ダイズ、ヒマワリ、イネともに日射透過率が照度、光合成有効光量子束密度の透過率よりも高い傾向にあった。植被内の透過率を露地とハウス間でみると、各透過率ともに露地の方が高く推移した。各光間の換算について、McCree⁵⁾はいずれも一律の換算係数を提示している。本実験から、各光間の関係はハ

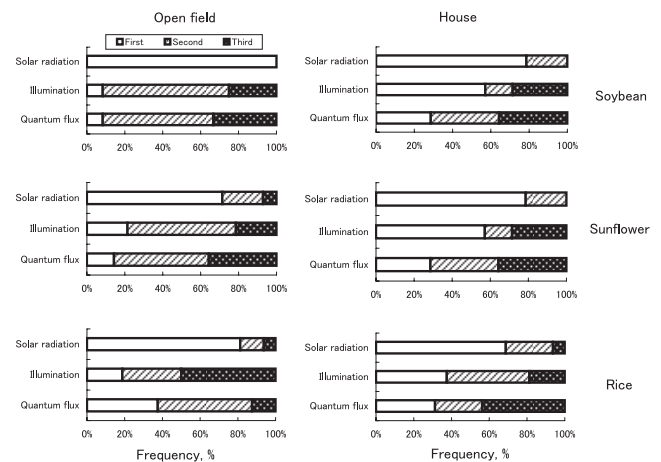


Fig. 7 Frequency of the transmission order of global solar radiation, illumination and photosynthetic photon flux density from July 5 in 2006 to September 9 in 2006.

ウスと植被の内外、時刻、気象条件によって異なることが明らかになったことから、換算にあたっては各条件を詳細に検討することが必要と考えられた。

要 約

本実験は、日射量、照度、光合成有効光量子束密度間の関係を明らかにするため、ガラスハウスと露地とで測定を行った。測定は2005年9月20日から2006年9月9日にかけて、ハウス内25点と露地の1点で行った。1日の測定時刻は9時、12時、15時とした。

ハウス内25点平均における日射量、照度、光量子透過率の期間推移は、9時、12時、15時ともに、日射透過率>光量子透過率>照度透過率の順となった。光強度の時間帯別の平均値では各光ともに、12時値>9時値>15時値の順となった。

ハウス内の各光と日射条件との関係では、各時間帯ともに全天日射量による影響が大きくなった。ハウス内全点平均の光強度において、3光間にはいずれも高い相関関係がみられた。時間帯別では、太陽高度が高くなるにつれて日射量の増加の割合は照度、光量子よりも小さくなった。

植被内の光透過率は、ダイズ、ヒマワリ、イネともに日射透過率が優位であり、また各植被、各光ともにハウス内よりも露地での透過率が優位に経過した。

本実験結果から、ハウス内の3光間の関係は、ハウス内外、測定時刻、測定地点によって異なるので、光間の相互の変換を行うには、それら各条件を詳細に検討する必要がある。

引用文献

- 1) 濱寄孝弘：照度（日照），日射量，光合成有効放射量の違い．東北の農業気象，41，33-36（1997）．
- 2) 荒川 修．塩崎雄之輔・菊池卓郎：リンゴ樹幹内における相対照度，相対光合成有効光量束密度および相対日射量の比較．園芸学会雑誌68（2）．297-301（1999）．
- 3) Kozai, T., Goudriaan, J. and Kimura, M : Light transmission and photosynthesis in greenhouses, Pudoc, Wageningen, 99（1978）．
- 4) 村岡裕由・可知直毅：光と水と植物のかたち 植物生理生態学入門．文一総合出版，東京（2003）．
- 5) McCree, K. J. : Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, 10, 443-453（1972）．
(2010年11月8日受理)