岐阜における昼光の分光光子束の日および年変化

石井 征 亜・山 崎 敬 亮

岐阜大学農学部

Diurnal and Annual Variations in the Spectral Photon Flux
of Daylight at Gifu City

Yukitsugu ISHII and Keisuke YAMAZAKI

Faculty of Agriculture, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

(Received June 20, 2001)

Photon flux (PF) in the spectral regions of 300–400 nm (UV), 400–500 nm (B), 500–600 nm (G), 600–700 nm (R) and 700–800 nm (Fr) were observed almost daily with a spectroradiometer (LI-1800) at noon in from Jan. 2000 to Mar. 2001 at Gifu (lat. 35°25' N and long. 136°46' E). The spectral ratio of B/photosynthetic photon flux (PPF) and R/PPF on clear days changed reversibly during the morning and in the evening; variability was less during the daytime. Whereas G/PPF was almost constant during the whole studies period irrespective of fine or cloudy weather. The B/PPF ratio increased rapidly from 24.6% on the winter solstice to 27.1% on the vernal equinox. After reaching a peak of 27.3% on the first day of autumn, it decreased gradually from the autumnal equinox to the winter solstice. The seasonal changes in R/PPF showed opposite tendencies for B/PPF. This cycle of spectral photon flux probably assists plants in making a distinction between spring and autumn season. We found that the PPF as well as UV, B, G, R and Fr values were nearly equal in vernal equinox and autumnal equinox. The R/PPF ratio for the fine days was high and B/PPF was low in comparison with the cloudy days.

Keywords: annual variation, daily variation, daylight spectrum, photon flux, spectral ratio

2001 年 6 月 20 日受付

緒 言

光質が植物の光合成や光形態形成に何らかの影響を与えていると考えられるようになったのは、20 世紀に入ってからである。わが国は 1960 年代から約 20 年間にわたって、光選択性被覆資材の開発と各種作物への利用試験等が盛んに行われたが、その植物生産への応用に普遍性を見いだすことはできなかった (Inada, 1994)。

一方、農作物生産などにおいて研究の基礎となる太

陽放射の年変化はきわめて重要な課題となり、1979 年度より農林水産省の大型別枠研究「自然エネルギーの効率的利用技術に関する総合研究 (グリーンエネルギー計画)」の一環として、全天日射の波長組成を 3 年間を通じて連続観測する実験が、札幌、筑波および都城の 3 カ所で行われた。その報告の中で、Iwasaki et al. (1986)、Sakuratani (1986) および Oba and Kobayashi (1985) は太陽放射の波長組成が季節的・地理的に変化するという貴重なデータを示した。しかし、McCree (1972a, b, 1973) の光子束密度での計測が適切であるとの指摘 (Iwasaki et al., 1986) にもかかわらず、当

Corresponding author: Yukitsugu Ishii, fax: +81-58-293-2885, e-mail: yukitsug@cc.gifu-u.ac.jp

時はまだエネルギー単位で表す放射束密度でしか計測できなかった。また、その測定における波長帯分別には色ガラス製のカットオフフィルターを用いたため、隣接波長の影響を除去することが不可能であり、また、各波長幅も一定ではなく 100 nm ごとに B, G, R の幅を設定した場合は異なっている。

筆者らは、自然光下における植物の形態形成の解明とその応用に資するため、精密に分光光量子束を計測できるスペクトロラジオメーターを用いて、昼光の生理的有效波長域（光化学反応を通して植物の生理的過程に何らかの影響をもつ波長：300～800 nm）における波長別光量子束の日変化および年変化を測定し、新たな知見が得られたので報告する。

観測方法

2000 年 1 月から 2001 年 3 月にかけて岐阜大学敷地内（北緯 35°25′，東経 136°46′）において、天候に関わらず、正午の全天放射（ここでは昼光と呼ぶ）の波長組成をほぼ毎日計測した。

また日変化の計測は昼・夜時間の等しい春分と秋分および昼・夜時間の差異が最も大きい夏至と冬至近傍の晴天日に、薄明から薄暮まで 1 時間ごとに測定した。測定にはポータブル・リサーチ・スペクトロラジオメーター（LI-1800：LI-COR 社製）を用い、生理的有效波長域 300～800 nm について測定し、その波長域を 100 nm ごとに分けて 300～400 nm を紫外光（UV），400～500 nm を青色光（B），500～600 nm を緑色光（G），600～700 nm を赤色光（R），および 700～800 nm を遠

赤色光（Fr）とした。計測値は光量子束（PF： $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）で表し、波長 400～700 nm 間の PF を光合成有効光量子束（PPF）とした。計測は建物等の障害のない水平な場所で行い、同時に目測で雲量を判断し、全天の 1 割以下の雲量を快晴、2～8 割の雲量を晴天、9 割以上を曇りとした。

結果および考察

1. 快晴日における昼光の分光組成の日変化

太陽光の光合成有効光量子束（PPF）と 400～800 nm に占める B, G, R および Fr 成分の比率の日変化を Fig. 1 に示す。G の比率は、薄明・薄暮時の増減パターンが R の比率と似ているが、日中はほとんど変化しなかった。B の比率はいずれの季節でも薄明時に大きく、その後日の出とともに急激に減少した。正午に向かって緩やかに値が増し、ほぼ一定となった後、午後は再び緩やかに減少し、薄暮時に急激に増大した。これとは対照的に、R の比率は薄明時には低いレベルにあったが、その後、日の出とともに急激に増加し、日中はほぼ一定レベルで経過した後、日没時に増加し薄暮時に急激に減少した。薄明時には太陽高度が低いため、日射に占める散乱光の割合が高く、さらに、水平なセンサー面での直達光の反射率が高くなり、散乱光が高めに測定される可能性がある。こうしたことから薄明時には、B の比率が増加し R の比率が減少したと考えられる。その後、日の出とともに赤色光が増し、太陽高度が増すにつれ直達光のセンサーへの入射量が多くなるため、入射角度 30° 位まで赤色光が増して、その後一

Fig. 1 Diurnal variation in photosynthetic photon flux (PPF) of daylight on fine days and the ratios of blue (B), green (G) and red (R) components to PPF in the 4 days representing spring, summer, autumn and winter.

定となり、太陽高度が低くなるとともに薄暮時にも薄明時と同様な現象となる。

また夏至付近では、日中の各光質比率は1年を通して最も接近し、反対に冬至付近では、日中の各光質の比率差は最も大きい。

2. 晴天日と曇天日における昼光の分光組成

Table 1は立春、春分、立夏、夏至、立秋、秋分、立冬および冬至前後の晴天日と曇天日における各3日間の正午に測定した生理的有効波長域における光質のPFと光質相互間の比率を示す。春分と秋分の晴天日の生理的有効放射ならびに各波長帯の値はほぼ等しく、曇天日では春分より秋分の値が大きかった。PPFの値は晴天・曇天日ともに、夏至は冬至の約2倍であり、また季節に関わらず晴天日は曇天日の約3倍の値であった。

PPFに占める各光質の比率はR>G>Bの順であっ

た。なお、G/PPFは晴天・曇天に関わらず、35.3~35.7%とほぼ一定である。晴天日におけるB/PPFの値は立秋から徐々に冬至にかけて2.7%少なくなり、冬至から春分にかけて2.5%多くなるが、R/PPFの値は逆に立秋から冬至にかけて2.8%増大し、その後春分には2.7%減少している。このわずかな差が日長時間と温度以外に、短日植物と長日植物の花芽形成に影響してくるものと考えている(Ishii et al., 2001)。これに対して曇天日では、各PPFに対するB、G、Rの比率の季節による変化はいずれも1%以下である。また、Bの比率は散乱光が多くなるため晴天日よりわずかに高くなり、Rの比率は晴天日よりわずかに低くなる傾向がある。その結果、R/B比は晴天日の方が曇天日より大きくなる。R/Fr比は天候による変化があまり見られない。UVについては、曇天時に絶対値は減少するものの比率(UV/300~800 nm)では増す傾向にあった。

Table 1 Photon flux (PF) in various spectral regions of daylight and those ratios observed at noon of fine and cloudy days in the each season between Jan. 2000 and March 2001.

Spectral region (nm)	PF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)							
	Around Feb. 3	Vernal equinox	Around Apr. 5	Summer solstice	Around Aug. 3	Autumnal equinox	Around Nov. 7	Winter solstice
UV (300-400)	75.4 (32.0)	116.3 (30.3)	120.9 (34.6)	143.4 (50.6)	145.4 (47.4)	108.5 (50.1)	85.7 (30.3)	49.4 (22.4)
B (400-500)	330.6 (115.8)	441.8 (107.3)	495.3 (138.6)	517.0 (174.3)	539.6 (159.8)	429.2 (174.1)	371.5 (106.0)	232.3 (81.0)
G (500-600)	450.5 (148.6)	578.3 (139.8)	650.2 (181.6)	672.9 (221.7)	702.8 (202.3)	579.0 (223.3)	520.6 (134.2)	337.6 (103.5)
R (600-700)	494.1 (154.0)	607.7 (145.6)	686.6 (188.9)	709.7 (228.3)	736.1 (204.6)	620.1 (230.5)	570.0 (137.7)	380.3 (108.0)
Fr (700-800)	480.2 (144.0)	574.0 (137.6)	644.5 (180.5)	659.4 (214.6)	663.2 (193.2)	579.1 (211.8)	540.6 (129.0)	371.7 (103.3)
PPF (400-700)	1 275.2 (418.3)	1 627.8 (392.7)	1 832.1 (509.2)	1 899.5 (624.3)	1 978.5 (566.7)	1 628.3 (627.9)	1 462.1 (377.9)	950.2 (292.5)
PAI (300-800)	1 830.8 (594.4)	2 318.1 (560.5)	2 597.5 (724.2)	2 702.6 (889.6)	2 787.1 (807.3)	2 315.9 (889.7)	2 088.3 (537.2)	1 371.3 (418.2)
Ratio								
B/PPF (%)	25.9 (27.7)	27.1 (27.3)	27.0 (27.2)	27.2 (27.9)	27.3 (28.2)	26.4 (27.7)	25.4 (28.1)	24.6 (27.7)
G/PPF (%)	35.3 (35.5)	35.5 (35.6)	35.5 (35.7)	35.4 (35.5)	35.5 (35.7)	35.6 (35.6)	35.6 (35.5)	35.5 (35.4)
R/PPF (%)	38.8 (36.8)	37.3 (37.1)	37.5 (37.1)	37.4 (36.6)	37.2 (36.1)	37.6 (36.7)	39.0 (36.4)	40.0 (36.9)
UV/300-800 (%)	4.1 (5.4)	5.0 (5.4)	4.7 (4.8)	5.3 (5.7)	5.2 (5.9)	4.9 (5.6)	4.1 (5.7)	3.6 (5.3)
R/B	1.49 (1.33)	1.38 (1.36)	1.39 (1.36)	1.37 (1.31)	1.36 (1.28)	1.40 (1.32)	1.53 (1.30)	1.64 (1.33)
R/Fr	1.03 (1.07)	1.06 (1.06)	1.07 (1.05)	1.08 (1.06)	1.11 (1.06)	1.08 (1.09)	1.05 (1.07)	1.02 (1.05)

Figures show the average values of 3 fine days (open) and 3 cloudy days (parenthesized).

Fig. 2 Average spectral PF curves in the physiological wave range of daylight at noon on fine and cloudy days around the summer solstice of the year 2000.

Fig. 2 は Table 1 の中の夏至前後 3 日間平均の晴天日と曇天日の正午における昼光の分光光量子束曲線を示す。300~800 nm の波長域におけるピークは晴天日では 680 nm 付近にあり、曇天日では約 750 nm であった。

晴天日と曇天日では、光強度の高低だけでなく波長組成にも違いが見られた。曇天日のピーク波長は晴天日に比べ長波長側に移行したが、PPF に対する B 比率については曇天日が高く、全太陽放射の青色化が認められた。

3. 昼光の分光組成の年変化

3.1 生理的有効波長域と光合成有効光量子束の変化およびその構成波長域 [(UV), B, G, R, Fr] の変化

Fig. 3 に 300~800 nm と各光質における PF 値の年変化を示す。これは天候に関わらず、観測した全データを月ごとに平均したものである。生理的有効放射をはじめ各光質の PF の季節変化には、3 月、5 月および 8 月の三つのピークが現れ、8 月に最大値を示した。光質間では R の強度は 1 年を通して最も高く、G および Fr がこれに続いている。Fr の値は冬季には R と同程度であるが、春分と秋分は G と同程度となり、8 月には G よりやや低く、秋分から冬至にかけて再び R に近づく。B は PPF 内の光質では最も強度が低かった。UV も緩やかなピークが三つあり、春分と秋分がほぼ同程度で、夏季に強度が高くなった。

Uchijima et al. (1981), Sakuratani et al. (1985) の関東地方の波長別エネルギーに関する報告では、6 月に

Fig. 3 Annual variation in PF of various spectral regions in daylight shown as monthly average between Jan. 2000 and March 2001.

エネルギーの減少が見られ、双頂型の年変化曲線になっており、梅雨の影響を受けたためとしている。本研究の調査結果から、各月の曇天割合は 1 月：21%，2 月：21%，3 月：31%，4 月：46%，5 月：19%，6 月：47%，7 月：25%，8 月：33%，9 月：38%，10 月：41%，11 月：35% および 12 月：28% であった。特に 6 月は 24 日の観測日のうち、雨または曇りの天気が 13 日あり、梅雨による PF の低下が見られ、4 月の低下も天候不順によるものである。地域の気候特性や年ごとの気候の特徴が強く影響するものと思われる。

Fig. 4 は、正午における昼光の PPF に対する B, G および R の比率の年変化を晴天日と曇天日に分けてプロットしたものである。G の比率は晴天日、曇天日に関係なく 1 年間ほとんど変化はなく、季節による影響は認められない。この傾向は雲の厚さの異なる梅雨時の観測結果にも現れている。春分~秋分間は B および R の比率はともに変動は少なく、ほぼ均一である。冬至期には B と R の比率の差が大きく、秋分から冬至にかけては B の比率が減少し、R の比率が増大するが、冬至から春分にかけて反対に B が増大し、R が減少する。この傾向は Table 1 から伺える。曇天日は雲の厚さや観測時の雲の流れなどにより PPF の観測値にばらつきを伴うが、晴天日と同様な季節的な光質変動が見られた。

ちなみに、晴天日の PPF に対する各光質の 1 日での最大比率は、B は 6 月 19 日の 27.7%，G は 1 月 18 日の

36.2%, R は 1 月 19 日の 41.2% であった。最小比率は、B は 1 月 19 日の 23.1%, G は 10 月 30 日の 35.1%, R は 6 月 19 日の 36.9% であった。各光質の最大比率と最小比率の変動差は B が 4.6%, G は 1.1%, R は 4.3% であった。したがって、B 比率と R 比率の最大差は冬至と夏至において現れる。桜谷らが 1980~1982 年の筑波での

Fig. 4 Annual variation in the respective ratio of B, G and R components to PPF on fine and cloudy days for the year 2000.

Fig. 5 Annual variation in relation between aerosol turbidity factor [R] and water vapor turbidity factor [W] at Tsukuba in the year 1982 (Sakuratani et al., 1985).

Numerals in the figure indicate the specific month of that year.

大気汚濁度指標の季節変化を調べた結果を Fig. 5 に示す。水蒸気混濁因子 [W] とエアロゾル混濁因子 [R] はループ状の季節変化を示しているが、このパターンはスウェーデン、スイス、東ドイツなどの北半球中・高緯度地帯の [W] と [R] の一般的な関係とかなり近いと言われている (Sakuratani et al., 1985)。Fig. 4 と Fig. 5 を比較して注目されることは、第 1 に B/PPF と [W]・[R] とが共に冬期に最小、夏期に最大となるパターンを描いていることである。第 2 に R/PPF は B/PPF と全く逆のパターンを示すことである。すなわち、水蒸気混濁因子 [W] とエアロゾル混濁因子 [R] が多い時期には短い波長の散乱が多くなるため、青色光が相対的に多くなるものと判断される。以上のことから [W] と [R] は青と赤色光比率の季節変化に深く関与しているものと考えられる。

3.2 光質の相対的变化

G 成分は 1 年を通してほとんど変動しないため、550 nm の PF を 1 として春分、夏至、秋分および冬至における分光光量子分布曲線を Fig. 6 に示した。夏至と冬至の曲線を比較すると、550 nm を境に明確に変化しており、B 領域では夏至、R および Fr 領域では冬至の値が高くなり、春分と秋分の値は概ねその中間に位置している。この結果は昼光の季節的な光質変動を明

Fig. 6 Relative spectral PF curves in the physiological wave range of daylight on fine days around vernal equinox, summer solstice, autumnal equinox and winter solstice of the year 2000.

The relative wavelength values were calculated when the PF at 550 nm for season was set at 1.

瞭に表している。一方、桜谷らの報告 (Sakuratani et al., 1985) では、波長帯を B: 396~475, G: 475~570, R: 570~715 nm とした場合の光合成有効放射 PPF に対する比率の最大値は、B で夏に、G は冬に、R は 4~5 月に見られる。本報告と異なる点は、特に G が 5 月に最低値を示し、しかもかなり季節変動する点と、R が冬に少なく 4~5 月に多くなる点である。この原因は、本報告の光量子束密度とは異なる放射束密度で表されていること、B, G, R の各波長幅が異なることによるものと考えられる。

Fig. 7 に晴天日における各月の 20 日近傍の UV 比

Fig. 7 Annual variation in the ratios of R/B, R/Fr and UV/300-800 nm on fine days around the 20th of each month in the year 2000.

Fig. 8 Seasonal changes in the relation between R/PPF and B/PPF on fine days.

Data was obtained from around the 20th of each month between Jan. 2000 and March 2001. Numerals in the figure indicate the specific month during this period.

率, R/B 比および R/Fr 比の年変化を示した。UV 比率は、3 月に急激に増大して 7 月にピークに達し、9 月以降は徐々に下降した。3 月には B が増大し、R が減少することから、この時期に R/B 比は大幅に低下し、9 月から緩やかに増加した。R/Fr 比は、年間を通じて 1~1.1 の範囲で変化し、8 月に最大値、2 月に最低値を示し、春から夏にかけて値が大きくなり、秋から冬にかけて小さくなる傾向があった。B と R に注目して、Fig. 7 とは別の表現方法として Fig. 8 に PPF に対する B と R の比率の相関関係を示した。その結果、両者は高い負の関係を示し、冬と春夏との線上間に秋の値が分布していることが判った。

理論上、太陽放射が大気層を通過して地表に到達する際、短波長域が長波長域に比べて散乱・反射・吸収が起こり易いので、変動するのは B が主体となる。その結果、PPF 内では G の値は年間を通じてほぼ一定であるため、B の量によって R の比率が変わることとなる。

3.3 光質の年変化が花芽形成に及ぼす影響

植物生育の光環境として、昼の長さ (時間) を考慮に入れなければならない。岐阜では夏至での昼の長さは 14 時間 34 分、冬至では 9 時間 46 分である。夏季は B の強度が冬季より大きいばかりではなく、昼の長さも長いので B の 1 日あたりの総 PF は冬季より約 3.3~3.7 倍も多い。一方 R の強度は B, G に比べていずれのシーズンでも大きく、夏季の日総量は冬季の 2.9~3.2 倍となる。このように、夏季と冬季では植物の受ける昼光の光質バランスおよび各光質の積算光量子量は大きく異なる。

このような昼光 PF の光質バランスおよび各光質の積算光量子量の季節変動を、植物は感知しているのではないかと筆者らは考えている。筆者らは、短日植物であるアサガオの花芽形成には、温度や日長時間以外に、その生育時期に多く含まれる太陽光の B の影響が大きかったことを示した (Yamazaki et al., 2000)。また、長日植物であるハウレンソウの花芽形成では、その生育時期に太陽光に多く含まれる R の影響を強く受ける結果を示した (Ishii et al., 2001)。アサガオとハウレン草の花芽誘導に対する波長依存性のパターンは非常に対照的である。光質の季節変化が日長反応植物に与える花芽分化への影響につき、普遍性の可否について実験中である。また、花芽分化に及ぼす環境要因を光環境に限って述べるならば、太陽光質が季節的・地理的条件に依存して変動し、日長時間との相関

の中で花芽分化に作用しているものと考えている。日本での植物生育と昼光光質の関係を考察するため、同じスペクトル分析装置を用いて、昼光の波長組成を岐阜（北緯 35°）、沖縄（北緯約 26°）と札幌（北緯 43°）で、同時に計測中である。

本原稿の取りまとめにあたり、本研究に資料提供を頂いた農業技術研究機構・九州沖縄農業研究センター室長大場和彦氏、貴重な御助言を頂いた元鳥取大学教授稲田勝美氏に感謝申し上げる。

文 献

- Inada, K. 1994. Is the covering of colored plastic films effective to the crop production? —Result compilation on the utilization research of photo-selective covering materials for 20 years —(I). *Agric. Hortic.* **69**: 986-990.
- Ishii, Y., Tanaka, H., Yamazaki, K., Kamuro, Y. 2001. Effect of quality of light on flower-bud formation of long-day plant, spinach. *Proc. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* **70**: 279.
- Iwasaki, T., Okuyama, T., Sakuratani, T. 1986. Climatic estimation of photosynthetically active radiation (PAR) in Kanto and Tokai districts. *Bull. Natl. Inst. Agro-Environ. Sci.* **1**: 1-35.
- McCree, K. J. 1972a. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* **9**: 191-216.
- McCree, K. J. 1972b. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* **10**: 443-453.
- McCree, K. J. 1973. The measurements of photosynthetically active radiation. *Sol. Energy* **15**: 83-87.
- Oba, K., Kobayashi, K. 1985. Spectral characteristics of solar radiation at Miyakonojo. In "Seasonal and Geographical Changes of Solar Radiant Energy" (ed. by AFFRC Secretariat). MAFF, Tokyo, p 168-175.
- Sakuratani, T., Iwasaki, T., Okuyama, T., Uchijima, Z. 1985. Spectral characteristics of solar radiation at Tsukuba. In "Seasonal and Geographical Changes of Solar Radiant Energy" (ed. by AFFRC Secretariat). MAFF, Tokyo, p 154-167.
- Sakuratani, T. 1986. Diurnal and seasonal changes in solar spectral radiation at Kannondai, Tsukuba. *Bull. Natl. Inst. Agro-Environ. Sci.* **1**: 37-50.
- Uchijima, Z., Sakuratani, T., Okuyama, T. 1981. Solar radiation climatology in southern part of Kanto district. *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.* **A27**: 91-145.
- Yamazaki, K., Ishii, Y., Kamuro, Y., Tanaka, I. 2000. Effects of quality and intensity of light on flower-bud formation in morning glory (*Pharbitis nil* Choisy). *Environ. Control in Biol.* **38**: 39-46.