京都府綾部市の地表における太陽光の光合成有効光量子束密度に対する赤色光, 緑色光, 青色光の比率と赤色光/遠赤色光比

浜本 浩^{†, ‡}・山崎敬亮

((独)農研機構近畿中国四国農業研究センター)

The spectral ratio of red, green, and blue photon fluxes to the total flux of photosynthetic photons and the ratio of red to far-red photon fluxes of sunlight at Ayabe, Kyoto

Hiroshi HAMAMOTO[†], and Keisuke YAMAZAKI

(NARO Western Region Agricultural Research Center, Ayabe, Kyoto, 623-0035, Japan)

Abstract

We used a portable spectroradiometer to measure solar photon flux densities in the spectral regions of 400-500 nm (B), 500-600 nm (G), 600-700 nm (R), and 700-800 nm (FR) throughout one year at Ayabe city, Kyoto (135°16'E, 35°17'N). The relationships between sun elevation and the respective ratios of the R, G, and B components to photosynthetic photon flux density (PPFD: 400-700 nm) were relatively constant when the sun elevation was higher than 20°. Under these conditions, the G/PPFD ratio was almost invariant at 0.35-0.36. The R/PPFD and B/PPFD ratios averaged 0.35 and 0.30, respectively, and varied within a wider range of ± 0.05 that depended on the weather. The relationship between sun elevation and the R/FR ratio was relatively constant when the sun elevation was higher than 15°, under which conditions it was almost always within the range of 1.0-1.2 regardless of the weather.

Key words: Portable spectroradiometer, Sun elevation, Weather.

キーワード: 携帯型分光放射計, 太陽高度, 天気

1. 諸 言

作物生育に対して栽培光源の分光分布が影響することはすでによく知られており, 光合成有効光量子束密度 (PPFD) に対する赤色光 (R: 波長 600~700 nm), 緑色光 (G: 波長 500~600 nm), 青色光 (B: 波長 400~500 nm) の比率 (R/PPFD 比率, G/PPFD 比率, B/PPFD 比率) や赤色光と遠赤色光 (FR: 波長 700~800 nm) の光量子束密度の比 (R/FR 比) が作物生育に影響することが多数報告されている。

R, G, B の対 PPFD 比率が作物の生育に影響したとする報告は, ホウレンソウ, ネギ (浜本・山崎, 2010), インゲン (Hanyu and Shoji, 2000), レタス, ホウレンソウ, シロガラシ, コムギ (Tibbitts *et al.*, 1983) などである。Mortensen and Stromme (1987) は

キク, トマト, レタスで R, G, B の対 PPFD 比率や R/FR 比の生育への影響について報告しており, Inada and Matsuno (1985) はイネ, トマト, イチゴにおいて R/B 比や R/FR 比が作物生育に影響することを示した。また, Yamazaki *et al.* (2000) はワケギのりん茎発達に R/FR 比が影響することを報告している。

作物の花成, 抽だいに対する影響についても報告がある。明期における青色光の割合がアサガオの花成に (山崎ら, 2000), 赤色光の割合がホウレンソウの抽だいに (石井ら, 2001; 山崎ら, 2003) それぞれ影響したと報告されている。R/FR 比についても, ハクサイ, ダイコンやホウレンソウの花成に影響するとした報告 (山崎ら, 1999) がある。

近年では作物の成分面での影響も検討されており, 光選択透過性の被覆資材を用いて R, G, B の対 PPFD 比率を変え, 作物生育や β カロテン, ビタミン C などの栄養成分の制御を行う試みがある (Liu *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2009)。

2011 年 11 月 28 日 受付, 2012 年 6 月 29 日 受理

[†]Corresponding Author: ham@affrc.go.jp

[‡]現在: (独)農研機構野菜茶業研究所

筆者らも光質変換フィルムによる赤色光増強が葉菜類の生育を促進するなど、被覆資材による栽培光環境の調節の利用可能性について報告しているが(浜本ら, 2008), 現在, 人工光を利用して作物生育に好適な光の波長バランスを調査し, 太陽光を栽培光源とするハウスや温室において, 被覆資材を利用して, これに近い光環境を得ることを検討している。

被覆資材の分光透過率や反射率を算出する際には, 太陽光の分光分布による誤差が生じることが指摘されているが(足永ら, 2008), これは分光分布の変化が資材の光学特性に影響することを示している。したがって, 地表に届く太陽光の分光分布とその変動傾向を明らかにすることが, 光質制御のための被覆資材の開発や利用に際して重要と考えられる。

地表に届く太陽光の分光エネルギー分布については古くから調べられているが(例えば Shulgin, 1970), 作物が生理的応答をおこす波長域である波長 300~800 nm の光(桂, 1992; 石井・山崎, 2002)において, 波長組成を調査するには, エネルギーよりも光量子束密度で計測するのが適当として, 石井・山崎(2002)は岐阜市において太陽光の光量子束密度による R, G, B の対 PPFD 比率や R/FR 比などの日変化と年変化を調査した。同様に, Smith (1982)は英国レスター市において, 波長 400~800 nm における光量

子束密度で測定した日中, 夕刻の太陽光の分光分布を調査している。石井・山崎(2002)は晴天曇天別の太陽光の R, G, B の対 PPFD 比率や R/FR 比についても, データを数例示しているが, いずれも正午のデータについて調査したもので, 太陽高度が正午より低い朝夕における天気の影響については示していない。また, 直射光と散乱光では分光分布がかなり異なることから(Smith, 1982), 同じ晴天でも, 雲量や雲の位置などによって R, G, B の対 PPFD 比率や R/FR 比が変わる可能性がある。

そこで本研究では, 京都府綾部市の地表において, 天気別, 太陽高度別に太陽光の R, G, B の対 PPFD 比率や R/FR 比を調査し, 従来の報告よりもさらに詳細に検討した。本研究は, 農水省委託プロジェクト研究「生物の光応答メカニズムの解明と省エネルギー, コスト削減利用技術の開発」において実施した。

2. 測定および解析方法

京都府綾部市の近畿中国四国農業研究センター構内(東経 135 度 16 分, 北緯 35 度 17 分, 標高 60.5 m)において, 携帯型分光放射計(MS-720; 英弘精機)を用い, 全角 180°の開口角でセンサ部を天頂に向け, 日射スペクトルを測定した。2009 年 9 月から 2010

表 1 京都府綾部市上野町(東経135°16′, 北緯35°17′, 海拔60.5 m)における毎月20日の太陽高度

時刻	太陽高度(°)											
	月											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5:00	-	-	-	-	1.1	2.3	-	-	-	-	-	-
6:00	-	-	-	7.1	12.3	13.3	10.8	6.8	2.5	-	-	-
7:00	-	3.3	10.8	19.2	24.3	25.0	22.7	18.9	14.5	9.2	3.3	-
8:00	9.0	14.6	22.7	31.4	36.5	37.1	34.8	31.1	26.3	20.3	13.6	9.0
9:00	18.6	25.1	34.0	43.3	48.6	49.3	47.0	43.0	37.4	30.3	22.7	18.0
10:00	26.6	34.1	43.9	54.2	60.4	61.4	58.9	54.2	47.0	38.3	29.8	25.2
11:00	32.1	40.6	51.3	62.8	70.4	72.3	69.5	63.2	53.7	43.2	34.1	29.8
12:00	34.5	43.6	54.6	66.2	74.7	78.2	75.3	67.2	55.8	44.2	34.9	31.3
13:00	33.3	42.4	52.5	62.4	69.1	72.5	71.1	63.7	52.3	40.9	32.2	29.4
14:00	28.7	37.3	45.8	53.6	58.7	61.5	60.9	55.0	44.7	34.2	26.3	24.4
15:00	21.5	29.2	36.3	42.6	46.8	49.5	49.1	43.9	34.6	25.0	18.1	17.0
16:00	12.4	19.2	25.3	30.6	34.6	37.3	36.9	32.0	23.3	14.4	8.4	7.9
17:00	2.1	8.2	13.5	18.5	22.5	25.2	24.7	19.8	11.3	3.0	-	-
18:00	-	-	1.6	6.4	10.6	13.4	12.8	7.7	-	-	-	-
19:00	-	-	-	-	-	2.4	1.6	-	-	-	-	-

2009-2013 年各月 20 日の太陽高度の 5 年間平均, 国立天文台暦計算室のプログラム

<http://www.nao.ac.jp/koyomi/koyomix/koyomix.html> で算出

年 8 月にかけての 1 年間，月に 50 回前後測定したが，このとき，後述する 4 タイプの天気それぞれで，毎月日の出後と日の入り前 1 時間未満と正午前後のデータは必ず数日分測定し，その他の時間帯も測定日や測定時間に偏りができないよう配慮して測定した。

測定したデータは，測定時の天気ごとに，快晴（雲量 0～1），晴れ（雲量 2～8）直射光あり，晴れ直射光なし，曇雨天（雲量 9～10）の 4 タイプに分類した。直射光のあるなしは太陽が露出して物体の影が現れているか，太陽が雲に覆われて影ができないかで判断した。各天気の場合において得られた光量子密度のデータを R（波長 600～700 nm），G（同 500～600 nm），B（同 400～500 nm）の PPFD（同 400～700 nm）に対する比率と，R/FR（波長 700～800 nm）比にまとめ，これらが太陽高度によってどう変動するかについて解析した。

太陽高度は国立天文台ホームページ「こよみの計算」（<http://www.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi>）を用いて，測定時の年月日時刻，経緯度，標高データを入力して算出した。表 1 に測定地点における毎月 20 日の毎時太陽高度を算出して表示したが，概ね日の出後，日の入り前 1 時間程度で高度 10°，2 時間

程度で 20°になる傾向がみられる。

3. 結果および考察

3.1 R, G, B の対 PPFD 比率

R, G, B の対 PPFD 比率の調査結果については図 1 に示す。

快晴の場合，太陽高度約 20°に達するまでは，高度が増すにつれ，R/PPFD 比率と G/PPFD 比率は増し，B/PPFD 比率は低下した。高度 20°以上では R/PPFD 比率が 37%，G/PPFD 比率が 35%，B/PPFD 比率が 28%程度で安定した（図 1A）。太陽高度が低い場合，日射は散乱光の比率が多くなるが（大原，2002；石井・山崎，2002），散乱光は R/PPFD 比率が低く，B/PPFD 比率が高い（Smith，1982）。このため 20°を下回るような低太陽高度時は R/PPFD 比率が低く，B/PPFD 比率が高くなっていったと考えられる。

晴れで直射光がある場合も快晴の場合に近い傾向がみられたが，低太陽高度で R/PPFD 比率と B/PPFD 比率にばらつきが大きくなった（図 1B）。晴れで直射光がない場合は，G/PPFD 比率は他の場合に近い傾向を示したものの，R/PPFD 比率と B/PPFD 比率はばらつきが大きく，雲量の多い時（雲量 5～8）は R/PPFD 比率＞B/PPFD 比率，少ない時（同 2～4）は

図 1 京都府綾部市の地表における太陽高度と太陽光の R/PPFD 比率，G/PPFD 比率，B/PPFD 比率との関係
凡例カッコ内は雲量を示す

B/PPFD 比率 > R/PPFD 比率の傾向がみられた。R/PPFD 比率と B/PPFD 比率のばらつきは、太陽高度 15° 以下でより大きい傾向にあった (図 1C)。

曇雨天では、R、G、B の対 PPFD 比率の太陽高度に伴う動向は快晴や晴れ直射光ありの場合に近いが、これらの場合に比べて B/PPFD 比率は高い数値に、R/PPFD 比率は低い数値になる傾向がみられた (図 1D)。

すべての場合を総合すると、R、G、B の対 PPFD 比率が比較的安定するのは太陽高度が約 20° 以上で、このとき G/PPFD 比率は $35\sim 36\%$ で変動が少なく、R/PPFD 比率は $35\pm 5\%$ 、B/PPFD 比率は $30\pm 5\%$ 程度の範囲で天気や雲量等によって変動しているとみられた。過去の研究では、G/PPFD 比率は太陽高度が低い朝夕を除いてほぼ一定で、数値も 35% 強とされている (遠山ら, 2001 ; 石井・山崎, 2002)。これは本研究で得られた傾向とほぼ等しい。一方、R/PPFD 比率と B/PPFD 比率については、石井・山崎 (2002) が岐阜市で年間通じて正午に計測した数値は概ねこの範囲に入っているが、遠山ら (2001) の東京都大手町で $11:00$ に周年計測した数値は、本研究の結果よりも、R/PPFD 比率 $40\sim 45\%$ と高く、B/PPFD 比率が $20\sim 25\%$ と低くなっており、地域差があるように思われる。Smith (1982) は空気中のエアロゾルが地表

に届く太陽光の R/PPFD 比率を増し、B/PPFD 比率を減少させることを指摘しており、遠山 (1999) は東京都大手町では千葉県八日市場市 (現在は匝瑳市) より高い R/B 比を計測したと報告している。エアロゾルの多いことが想定される大都市部や工業地帯では、地方都市や郊外よりも R/PPFD 比率が高く、B/PPFD 比率が低いことが予想される。

3.2 R/FR 比

R/FR 比の調査結果については図 2 に示す。

R/FR 比は天気にかかわらず $1.0\sim 1.2$ の範囲に入ることが多く、太陽高度との関係も、高度 15° 以上の場合あまり明確なものはなかった。数値は直射光のある快晴、晴れ直射光ありの条件下で比較的一定しており (図 2A, B)、散乱光が主体となる晴れ直射光なし、曇雨天の条件下ではばらつきがやや大きくなった (図 2C, D)。直射光のない場合はある場合と比べて、雲の量、厚さ等が数値変動に大きい影響をおよぼすことが推測される。特に晴れ直射光なしの場合は、数値が 1.3 程度になることも幾度かみられ、他の天気の場合よりもやや高い数値になる傾向があった (図 2C)。よって、晴天時には雲と太陽との位置関係によって、短時間で日平均や月平均の推移のような長期の変動以上に変化する可能性がある。

一方、太陽高度が 15° 以下になると、どの天気の

図 2 京都府綾部市の地表における太陽高度と太陽光の R/FR 比との関係
凡例カッコ内は雲量を示す

場合においても、R/FR 比が 1 を下回る場合がみられ、特に快晴時以外の 3 タイプの天気の場合、太陽高度 10°以下の場合で、その頻度は高くなる傾向がみられた(図 2B~D)。

過去の報告の調査例をみると、石井・山崎(2002)の岐阜における正午の調査で得られた数値も年間通じて 1.0~1.2 の範囲に入っており、本研究の太陽高度 15°以上の場合と大差ない。Holmes and Smith (1977)の調査は北緯 53 度で行われているが、日中は 1.0~1.3 の範囲で、朝夕の太陽高度が低い場合には 0.7 程度の数値が記録されており、本研究と同様の結果となっている。したがってこの程度の緯度による差はあまりないと考えられる。しかし、都心と郊外の差は R/FR 比についても存在する可能性がある。遠山(1999)は東京都大手町と千葉県八日市場市においてエネルギー比で R/FR 比を比較し、八日市場市より大手町で高い値になることを示している。

3.3 総合考察

地表に届く太陽光の分光分布は、太陽高度が 10~30°以上であればほぼ一定するといわれる(Smith, 1982; 稲田, 1984)。しかし、実際には季節による変化があるとする報告もいくつかある(たとえば遠山ら, 2001)。また、本研究では天気による変化もあることがわかった。

遠山ら(2001)や石井・山崎(2002)は、地表に届く太陽光について、夏季は青色成分が増し、冬季は赤色成分が増しており、この比率の変化から植物は季節の変化を読み取っていると推測している。夏季と冬季では日中に達する太陽高度が異なり、夏季は冬季より高い高度に達するが、本研究でも、快晴や晴れ直射光ありの条件下に限ると、太陽高度が増すにつれ、若干 B/PPFD 比率が増し、R/PPFD 比率が減る傾向がみられ、上記の仮説を裏付けるように思われる。しかし、晴れ直射光なしや曇雨天のデータからはこの傾向が明確にみられない。特に、晴れ直射光なしの条件下では、遠山ら(2001)や石井・山崎(2002)の報告では指摘されていない、B/PPFD 比率が R/PPFD 比率よりも大きくなる現象がしばしばみられている。B/PPFD 比率や R/PPFD 比率には、雲の動きに伴うような短時間の変動が大きいことがうかがえる。もし、植物が地表に届く太陽光の分光分布の変動から季節変化を認識するのであれば、短時間の大きな変動に敏感に反応しないような機構を持つ必要があるだろう。

生育や品質調節のため、被覆資材によって被覆下の分光分布を調節しようという場合、資材開発や利用にあたっては、短時間における太陽光の分光分布の変動への対処が困難なため、日の出、日の入り前

後を除いた、日中の平均的な地表に届く太陽光の R、G、B の対 PPFD 比率や R/FR 比を基準にして、透過率等を選択するのが現実的であろう。本研究の結果からは、概ね R/PPFD 比率が 35%、G/PPFD 比率が 35%、B/PPFD 比率が 30%、R/FR が 1.1 程度の分布になる。ただし、過去の研究結果も総合すると、郊外、地方都市の場合は本研究に近い傾向が予測されるものの、大都市部の場合は地表に届く太陽光の R、G、B の対 PPFD 比率や R/FR 比の傾向が若干異なる可能性が考えられる。具体的にどの程度の差が存在するかなど、正確な傾向を把握するには、立地条件の異なる測定地点での調査を比較する必要があるが、現状ではまだ十分な数の測定例がなく、今後調査が進むことが期待される。

4. 摘 要

京都府綾部市において、地表に届く太陽光の光合成有効量子束密度(PPFD)に対する赤色光(R)、緑色光(G)、青色光(B)の比率(R/PPFD 比率、G/PPFD 比率、B/PPFD 比率)や赤色光と遠赤色光(FR)の量子束密度の比(R/FR 比)について、天気別、太陽高度別に検討した。携帯型分光放射計を用い、1 年を通じて日時を変えながら地表に届く太陽光の分光分布を測定し、太陽高度ごとの R/PPFD 比率、G/PPFD 比率、B/PPFD 比率と、R/FR 比について解析した。R、G、B の対 PPFD 比率が比較的安定するのは太陽高度が約 20°以上で、このとき G/PPFD 比率は 35~36% で変動が少なく、R/PPFD 比率は 35±5%、B/PPFD 比率は 30±5%程度の範囲で、天気や雲量等によって変動しているとみられた。R/FR 比は太陽高度 15°以上で比較的安定し、数値は天気にかかわらず 1.0~1.2 の範囲に入ることが多かった。

引用文献

- 足永靖信・伊藤大輔・藤本哲夫, 2008: 建築窓ガラス用フィルムの分光特性に関する調査. 日本建築学会技術報告集, **14**, 487-490.
- 浜本 浩・植野耕造・山崎敬亮, 2008: 紫外線に可視光に変える光質変換被覆資材が葉根菜類の生育に及ぼす影響. 農業気象, **64**, 81-86.
- 浜本 浩・山崎敬亮, 2010: 蛍光灯光源のグロースチャンバにおける光の RGB 比を変えた条件下での葉根菜類の生育. 日本生物環境工学会 2010 年大会講演要旨, 234-235.
- Hanyu, H., and Shoji, K., 2000: Effects of blue light and red light on kidney bean plants grown under combined radiation from narrow-band light sources. *Environ. Control Biol.*, **38**, 13-24.

- Holmes, M. G., and Smith, H., 1977: The function of phytochrome in the natural environment. I. Characterization of daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism. *Photochem. Photobiol.*, **25**, 533–538.
- 稲田勝美, 1984: 太陽放射. 光と植物生育. 養賢堂, 東京, pp. 20–29.
- Inada, K., and Matsuno, A., 1985: Interactions among spectral components of radiation in the growth responses of rice, tomato and strawberry. *Jpn. J. Crop Sci.*, **54**, 403–412.
- 石井征亜・山崎敬亮, 2002: 岐阜における昼光の分光光量子束の日および年変化. 生物環境調節, **40**, 207–213.
- 石井征亜・田中初奈・山崎敬亮・禿 泰雄, 2001: 長日植物(ホウレンソウ)の花芽形成に人工光の光質が及ぼす影響. 園芸学会雑誌, **70** 別 1, 280.
- 桂 直樹, 1992: 光測定の実際. 光バイオインダストリー((社)照明学会編). オーム社, 東京, pp.182–198.
- Liu, S., Hikosaka, S., Goto, E., and Uchida, T., 2009: Growth and quality of spinach (*Spinacia oleracea* L.) and chingensai (*Brassica campestris* L.) grown under different photo-selective covering materials. *Abstracts of the 6th international symposium on light in horticulture*, 78.
- Mortensen, L. M., and Stromme, E., 1987: Effects of light quality on some greenhouse crops. *Scientia Hort.*, **33**, 27–36.
- 大原源二, 2002: 栽培適地・適土壌の判定. 研究成果(農林水産技術会議事務局編), **396**, 7–18.
- Shulgin, I. A., 1970: 太陽放射. 太陽光と植物(内嶋善兵衛訳). 東京大学出版会, 東京, pp. 46–99.
- Smith, H., 1982: Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **33**, 481–518.
- Tibbitts, T. W., Morgan, D. C., and Warrington, I. J., 1983: Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide, and tungsten halogen lamps at equal PPFD. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, **108**, 622–630.
- 遠山隆文, 1999: 作物生育調節を目的とした光質選択性被覆資材. 植物の化学調節, **34**, 283–293.
- 遠山隆文・石井征亜・禿 泰雄・岡部勝美, 2001: 太陽光の光質の季節変化と植物生育への影響. 植物の生長調節, **36**, 202–207.
- 山崎博子・大井 龍・濱野 恵・大和陽一・三浦周行, 1999: 赤色光/遠赤色光比がハクサイ, ダイコンおよびホウレンソウの花成に及ぼす影響. 園芸学会雑誌, **68** 別 1, 101.
- Yamazaki, H., Oi, R., Hamano, M., Yamato, Y., and Miura, H., 2000: Inhibition of bulb development of *Allium wakegi* Araki by covering with far-red-intercepting film in summer. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.*, **69**, 250–254.
- 山崎敬亮・石井征亜・禿 泰雄・田中逸夫, 2000: 光質および光強度がアサガオの花芽形成に及ぼす影響. 生物環境調節, **38**, 39–46.
- 山崎敬亮・石井征亜・杉本善彦, 2003: 光質がホウレンソウの生殖生長に及ぼす影響. 園芸学会雑誌, **72** 別 2, 175.
- Yan, Q., Liu, H., Chen, R., Song, S., and Sun, G., 2009: Effects of different shading-net on growth and quality of flowering chinese cabbage. *Abstracts of the 6th international symposium on light in horticulture*, 79.