作物植被による変動光の波形特性

鈴木 晴雄・田中 伸一*・藤目 幸廣・米谷 俊彦**

香川大学農学部・** 岡山大学資源生物科学研究所

* 現在, マルトモ株式会社

Waveform Characteristics of Fluctuating Light in Some Plant Canopies

Haruo SUZUKI,* Shinichi TANAKA,** Yukihiro FUJIME*
and Toshihiko MAITANI****Faculty of Agriculture, Kagawa University, Miki-cho, Kagawa 761-07, Japan****Research Institute for Bioresources, Okayama University,
Kurashiki 710, Japan****Present Address: Marutomo, Ltd.*

The actual effects of light fluctuations within plant canopies have not still been clarified. In this study, field and indoor experiments were conducted for the purpose of obtaining the characteristics of fluctuating light within six plant canopies.

(1) Light fluctuations under natural light within field-type plant canopies were investigated under various conditions and the following results were obtained. That is, ① The difference between bright and dark lights in light fluctuations showed a daily change almost proportional to the intensity of solar radiation. ② Light fluctuations were not obvious at various measured points in a citrus crown. ③ Light fluctuations developed markedly as planting density increased. ④ The difference was confirmed between the waveforms of fluctuating lights according to the kinds of plant canopies and considered to be caused by the kinetic energy of wind in plant canopies and the physical characteristics of the plant canopies.

(2) As a result of the wind tunnel experiment related to light fluctuations, the frequency bringing the spectral density of the fluctuating light within each plant canopy (height: about 20 cm) to a definite level or more were about 15 Hz in eggplants, sweet peppers, asparagus and garland chrysanthemums on the case of a wind velocity of 1.7 ms^{-1} . Also, it was about 11 Hz in the turnip canopy, and 6 Hz in welsh onion, of which the waveform showed a line spectrum. With respect to six plant canopies, there was no great difference in peak frequency between weak wind (1.7 ms^{-1}) and strong wind (2.5 ms^{-1}), and the peak frequencies of both cases were within a range of 1.5 Hz~5.0 Hz. The peak value of power spectra became large in proportion to an increase in wind velocity and this relation was also confirmed within the observed frequency range (Fig. 7).

(Received November 24, 1990)

1990年11月24日受付

緒 言

水田や畑地のような自然条件下における作物植被内では風によって茎葉が揺れるので、太陽の直達光(強光)と茎葉の陰による弱光の繰返しが生じる。この強弱光の反復、つまり変動光と作物生育との関連性についてはい

くつかの報告があるが^{4,6-8)}、変動光の生育への効果の有無についてはいまだ定説が得られていない。他方、変動光の一種である間欠光は、植物工場で省エネルギーなどのための実用的手段として検討されている。

しかし、茎葉の揺れに伴う変動光の様相や、各植被ごとの変動光の特徴など、変動光の実態についてはいまだほとんど明らかにされていないのが現状である。

これらのことから著者のうちの鈴木・田中⁹⁾は、数種の植被を対象とした室内実験によって各変動光を測定し、変動光波形のスペクトル解析から波形の周波数とピーク値が各植被ごとに特徴のあること等を明らかにした。

本研究では作物の本来の生育現場である圃場において変動光の実態をとらえることにし、変動光の波形を主に栽培条件、測定条件等から検討した。さらに、各変動光の比較のため風洞を用いた室内実験を行って、同一風速条件下での各植被による変動光を比較し、各作物固有の変動光波形を明確にすることにした。

実験方法

実験は1986年7月より1987年5月にかけて、香川大学農学部にて実施した。

1. 変動光測定センサー

植被内の変動光の測定は、センサーとして受感部径 4.5×4.5 mm のフォトダイオード（シャープ、SPD-511T）を使用し、その出力信号は電磁オシログラフ（横河北辰電機、Model 3655）にて記録した⁹⁾。同センサーの分光感度の範囲は約 440~1200 nm であり、応答時間は負荷抵抗 $0.02 \sim 3$ k Ω のときに $8 \sim 70$ μ S である。

また、同センサーを自然光下での広い光強度の範囲に適合するようフィルターにて調節した。約 90 klx までの範囲では十分な線形関係がみられている。

さらに、センサー周辺の温度変化が出力へ及ぼす影響をみるために、恒温器内（15°C~65°C）の電照下でセンサーを設置して出力の変化をみたが、温度係数の変化は認められなかった。

このように本実験で用いたセンサーは、変動光測定のための条件とされる分光感度、応答時間、直線性、温度係数においてとくに問題はないものと考えられた⁹⁾。

2. 圃場実験

変動光の経時変化を得るために、供試作物としてソラマメ（清水一寸）を1986年10月29日に播種した（株間 50 cm、条間 40 cm）。センサーの重量（1.02 g）による影響を減じるため植被内に高さ 30 cm、直径 5 mm の細い支柱を立て、変動光を測定した。圃場での測定はソラマメと同じく草本性のオオムギ、イグサ、タバコの各植被についても行った。

さらに木本性のミカン樹（22年生の温州、樹高 230 cm、樹冠周直径 350 cm）についても測定を行ったが、この場合、センサーは樹に直接設置した。測定点は樹の地際より主幹に沿って鉛直方向へ8点（約 25 cm 間隔）、および樹高の約 1/2 の高さ（130 cm）の東西と南北の各

方向におおの8点（約 40 cm 間隔）とし、1つの樹冠に計 24 点設けた。

次に変動光を栽植密度との関連でみるための供試作物として、ダイズ（白鳥）を1986年4月24日に播種した。栽植密度は標準区（株間 30 cm、条間 30 cm）、密植区（株間 15 cm、条間 30 cm）、疎植区（株間 45 cm、条間 30 cm）の3通りとした。測定には各区より標準的な生育をしているとみられる1株を選んで、各株の植被南面側と中央部のそれぞれ 30 cm 高にセンサーを設置し、全区で計 6 点の測定点とした。

これら植被内の光量を数少ないセンサーで測定する場合、センサーを移動させて測定するほうが、ある測定点に固定するよりもよりその群落の代表的な変動光が得られるといわれている⁹⁾。草丈の高いトウモロコシ群落のような場合は移動測定が適しているが、今回のような畦栽培の小規模な群落の場合は、センサーの移動測定が困難である。さらに移動装置の搬入によって群落構造そのものが大きく影響を受けるため、必ずしも移動測定が適しているとはいえない。そこで今回はセンサーを固定する後者の方法をとった。なお、文中でとくに明記しない場合は、測定しようとする高さにおける葉の直下にセンサーを置き、光変動が最大になるように水平方向の位置を微調整して波形を得たものである。

3. 室内実験

圃場では風向・風速が一定していない上に植被の種類や生育時期、栽植様式の相違等があるため、各植被内の変動光を同じ条件下で比較することは困難であると考えられる。そこで既報⁹⁾と同様にして、箱状の簡易な風洞装置（53 cm $\times$ 53 cm $\times$ 184 cm）を作成して、人工光源下（東芝、HID-400 W）にて測定を行った。なお、本装置での乱れは評価時間 4 秒の平均風速 1.5 ms⁻¹、 2.6 ms⁻¹ に対しておおの 6.2% と 6.9% 程度であった。

4. 変動光の解析

変動光の波形は電磁オシログラフに FFT モジュール（横河北辰電機、3659-20 A）を組み込んで、スペクトル解析を行った。センサーからの信号はローパスフィルターによって 50 Hz 以上の高周波成分を取り除いて、エリアシング現象を防ぐようにした。信号は A/D 変換器（14 ビット、サンプリング率 0.02 秒、サンプリング時間 4 秒）によってデジタル値に変換した。なお、信号のノイズ除去、信頼性向上等のために繰り返し測定して得られた 8 個のスペクトルの平均値を用いた。また、同モジュールによってサンプリング周波数は解析周波数バンドの 2.56 倍となっており、これはナイキストのサンプリング定理の条件を満たしている。また、FFT モジュ

ールではサンプル数は512点の固定であり、周波数分解能は1/200である。ウィンドウ関数としてはHanning関数を選択した。

実験結果および考察

1. 圃場における変動光

自然光下における植被内変動光の変化は、後述する風そのもののほかに、測定時刻、植被内の測定部位、栽植密度、植被の種類等によって異なるものと推測される。

(1) 経時変化：測定時刻の違いに関して、ソラマメ植被内変動光の経時変化をFig. 1に示した。なお、Fig. 1の上部に示した変動光は、草高約1/2の高さにおけるものであり、Fig. 1の下部は同時時間帯における日射量の変化である。

Fig. 1 (上部) によると、測定開始の9時から16時にかけてかなりの時間帯に大きな振幅を持つ変動光がみられる。強光-弱光間の差は、90 klx に及ぶ箇所もあり、後述するように周期はきわめて短い。他方の日射量の変化は、比較的晴天であったことから終日滑らかであった。両者を比較すると、変動光の強光と弱光間差は日射量の変化にほぼ沿っており、すなわち、日射強度が大きくなるほど、強弱光差も大きくなる傾向にあった。

(2) 測定部位：植被内の任意の位置における変動光の差異を詳細に検出するには、目的とする位置へセンサーを設置すればよいのであるが実際にはセンサーとリード線の重量が植被の振動を抑制するため困難である。そこで、前述(実験方法2.)したように木本性のミカン樹にセンサーを等間隔に取り付け、変動光を測定した。

Fig. 2はミカン樹の樹冠内鉛直方向における変動光の一測定例である。各波形は測定の位置によって異なっ

Fig. 1 Diurnal variations of fluctuation of light in a canopy of broad beans at a 43 cm plant height with solar radiation on April 13, 1987. Fluctuations in light was measured at the south-side of the canopy, at a 22 cm height.

ているが、各測定点間(C₁-C₈)に共通した特徴はあまりない。樹冠の上部(C₁-C₃)では変動光は一部認められるが顕著ではない。中部のC₄の光の変動は最も顕著であるが、下部のC₅-C₇に移ると変動光はわずかしき認められない。地表面に近いC₈では再び変動光が現れ、C₄について顕著な変化となった。これらは植被内各測定点での風速条件も関連するが、主にセンサーの設置箇所が関係するものと考えられ、設置箇所が陰の場合(C₁, C₅, C₆, C₇)と日向の場合(C₂, C₃)、それにその中間の場合(C₄, C₈)とに区別される。

上記は樹冠内鉛直方向の一測定例ではあるが、変動光の生じている箇所は多くはなかった。なお、これらの傾向は樹冠の東西および南北方向においても同じであった。

(3) 栽植密度：ダイズ畑における変動光を栽植密度との関係で示したのがFig. 3である。測定時に卓越風向側の株南側(Fig. 3の上部)をみると、全体的に密植区では他の2区に比べて光強度(klx)の変動は大きく、強弱光波形の振動数(Hz)も高い傾向にある。疎植区では密植区に比べて波形は不明瞭であり、振動数は少ない傾向にある。これは1疎植区では株に受ける風圧が密植の場合よりも大きいことから、株全体が大きく揺れることによって、結局、測定対象とした個葉による変動光が密植の場合ほどの頻度でセンサーに到達しなかったことが

Fig. 2 Vertical profiles of fluctuations of light in a citrus crown on January 27 at 2:25 p.m., 1987. The measured points from C₁ to C₈ were at the center of the crown. C₁: 210 cm height, C₂: 185 cm, C₃: 160 cm, C₄: 135 cm, C₅: 110 cm, C₆: 85 cm, C₇: 60 cm, C₈: 35 cm. *: Wind velocity.

Fig. 3 Fluctuations of light in various planting densities of soybeans at a 55 cm height on July 24 at 2:32 p.m., 1987. Light sensors were set up at a 30 cm height on the south-side the canopy, and in the center of the canopy, respectively. S denotes sparse planting (Intrarow spacing 45 cm $\times$ Interrow space 30 cm), C the control (30 cm $\times$ 30 cm), D the dense planting (15 cm $\times$ 30 cm). *: Mean wind velocity at measured time.

大きいと思われる。

標準区における変動光の波形は密植区と疎植区の間の変化を示している。なお、標準区ではダイズの固有振動数とほぼ一致したためか矩形の波形が多く出現し、この波形はグレインソルガムとパレイショでの測定例¹⁰⁾によく類似している。株の中央部 (Fig. 3 の下部) になると、1 株当りの茎葉の密度が株南側の場合ほど区間差がなかったとみられ、顕著な変化は現れていない。

(4) 各植被: 畑地に栽培されている数種の植被内変動光の波形変化を Fig. 4 に示した。なお、一般に変動光の波形は光透過率の低い茎葉下で強光-弱光間差が明確になるが、穂のような極細の苞毛のある場合は不明瞭になることが推測できる。すなわち、オオムギでは、穂付近 (70 cm) の変化はあまり顕著でないが、下部の 40 cm になると明確になり、強光-弱光の差は 60 klx にも及んだ。イグサでも強光-弱光間差は大きいですが、オオムギの場合ほど明確でない。これには使用したセンサーの受感部の径 (4.5 $\times$ 4.5 mm) に比べて、イグサの茎径 (約 1 mm) が小さかったことも関係していると考えられる。

タバコでは草高が異なる 2 株の測定であるが、ともに変動が明白で、草高 26 cm のほうが同 40 cm の場合よりも強光-弱光間差が小さい傾向にあった。なお、これらと関連して植被内の高さごとの変動光を測定した唯一の例

Fig. 4 Fluctuations of light in some field-type plant canopies on May 6, 1987. Plant height of barley was 85 cm; rush, 65 cm; tobacco, 45 cm (C-1) and 31 cm (C-2). *: Measured height, **: Wind velocity at plant height.

としてトウモロコシ群落があるが¹⁾、それによると地表面に近くなるほど強光の持続時間が少なくなり、また、スペクトル解析から波形の卓越周波数も低下している。今回の結果との違いは、畦栽培ではトウモロコシ群落ほど密植でなかったことがあるので、さらに密植栽培にするとトウモロコシ群落の場合と同じ傾向になるものと推測している。

以上、おのおの場合における波形の特徴はみられたが、植被ごとに波形の異なる基本的な原因は、個々の植被を形成する葉の形態とそれらの光学的特性、力学特性、群落構造¹⁾、群落内の運動量輸送機構³⁾、植被の振幅特性などの複合要因に起因しているものと考え⁹⁾。

2. 室内実験による変動光

前述してきたように、測定条件と植被の種類等によって変動光の波形には特徴がみられたが、圃場では測定時の気象条件、とくに風速が異なるために同一条件下での作物ごとの特徴を厳密には比較できない。そこで、各植被の風速条件をなるべく等しくするために、室内に設置した風洞実験装置において変動光を比較した。

(1) 時間軸波形: 風速を 1.7 ms⁻¹ と 2.5 ms⁻¹ に設定し、それぞれを弱風と強風の場合とした条件で、各植被による変動光の波形を測定した (Fig. 5)。供試した 6 種の作物は、草高がいずれも 20 cm に近いものを選び出した。測定は、植被内の 10 cm 高において行った。

弱風の場合、比較的変動周期が短く変化が大きいのはナスとピーマンで、ネギやカブではほとんど変化がな

Fig. 5 Fluctuations of light in some plant canopies under the artificial light in 1987. Measured height of the light was 10 cm, and of wind velocity was at the plant height. Eggplant, 25 cm height; sweet pepper, 24 cm; asparagus, 17 cm; welsh onion, 15 cm; turnip, 17 cm; garland chrysanthemum, 17 cm.

い。アスパラガスやシュンギクでは、中程度の変化がみられている。強風になると、各植被ともに全体的に変動幅が大きくなり、周期も短くなる傾向にあった。また、弱風の場合よりも強風下のほうが波形が明瞭である。

この弱風と強風の場合の傾向は既報⁹⁾で用いた6種の作物（ソラマメ、ダイズ、トウモロコシ、イネ、ゴボウ、ニンジン）の場合にも認められており、他の作物についても同じ傾向があるものと推測できる。

次に強風下のナスとピーマンの波形は他の5種に比べて振幅は大きく明瞭となるが、ネギとシュンギクでは振幅は小さい。アスパラガスとカブでは前2者の中間的な変化といえる。ただ、アスパラガスについては他の5種のように曲線が1次的に変化しているのではなく、さらに2次的に変動している。これは変動光を直接生じさせる葉の揺れ以外に、アスパラガスの場合は葉の周期に比較的に類似した植被全体の揺れが重なっていたためであろう。

これらの室内実験による観測波形の異なる理由も、前述(1.)の圃場の場合と同様のものと思われる。

(2) スペクトル解析: Fig. 5に示した各植被内変動光の高周波数成分の時間変動をより定量化して比較するために、繰返し測定(1回の測定時間は4秒で8回測定)して得られた平均的な変動光についてスペクトル解析を行った(Fig. 6)。なお、Fig. 6のx軸は観測波形の周波数を、y軸は出力電圧による対数振幅のパワーを示している。

Fig. 6によると、弱風の場合は出現した周波数の-70 dB以上のスペクトル密度をもつ周波数帯は各植被とも0 Hzより15 Hzまでの比較的狭い範囲である。各範囲

(高周波数端の周波数)はナス(14.3 Hz)、ピーマン(14.5 Hz)、アスパラガス(15.3 Hz)、シュンギク(14.3 Hz)は15 Hz程度の周波数域であり、カブはそれらよりわずかに小さく(11.2 Hz)、ネギでは線スペクトル状(5.6 Hz)である。強風になると、ナス、ピーマン、シュンギクは30 Hzを越え、アスパラガス、ネギ、カブも20 Hzを越えて波形出現の範囲が広がった。

この弱風と強風の場合の傾向は、既報⁹⁾で用いた6種によってもほぼ同様にみられたが、ただ今回のネギによる弱風と強風の場合の周波数の差は顕著といえる。

次に各観測波形をピーク値とピーク周波数から比較する。すなわち、ピーク値(Fig. 6中のa)についてみると、弱風下ではネギ(-64.7 dB)以外は-43.7 dB~-50.0 dBの範囲であった。強風下でも各傾向は弱風の場合と変わらないが、6種とも弱風下の場合より若干ピーク値は下がった。既報⁹⁾の6種の場合でもゴボウとニンジンは下がる傾向にあったが、他の4種では逆にピーク値は上がり、作物の種類による差がみられた。

ピーク周波数(Fig. 6中のb)については、弱風下の各植被は1.5~5.0 Hz、強風の場合は1.5~4.0 Hzであり、これは既報⁹⁾の場合(1.5~3.5 Hz)と同様であり、全体的に各植被とも周波数は大きくなかった。各植被ごとの弱風の場合と強風の場合との差も小さく(0~1.0 Hz)、ピーク周波数は供試した風速域ではほとんど変化はないものといえる。

上記の1.7 ms⁻¹と2.5 ms⁻¹の場合の波形変化をさらに他の風速段階に広げてみると、Fig. 7のようになる。なお、ここではx軸には風速を、y軸には-70 dB以上のスペクトル波形出現の高周波数端の周波数とピーク値

Fig. 6 Power spectra of fluctuation of light in some plant canopies. “a” is the peak and “b” the peak frequency, and so on. Powers are on a log scale.

Fig. 7 Relations between wind velocity and fluctuation of light in some plant canopies. Open circles denote the relation between wind velocity and frequency of fluctuation of light, solid circles the relation between wind velocity and the peak. Solid line and broken lines denote significance at the 5% level, chain line insignificant at the 5% level.

Fig. 8 Relations between wind velocity and frequency of fluctuation of light.

を示した。また、各直線の中で実線と一点鎖線は有意 (5% 水準) を、破線は有意でない場合を示す。

Fig. 7 によると、全般的に周波数とピーク値とも風速にほぼ比例している。すなわち、ナス科のナスとピーマン、カブ (アブラナ科)、シュンギク (キク科) ではないずれも風速と明確な関係がみられており、ナスとカブ、ピーマンとシュンギクでは各風速段階に対する周波数、およびピーク値の互いの関係直線は、比較的よく近似しているといえる。アスパラガスではピーク値、ネギではピーク値と周波数が風速と一定の関係になかった。

(3) 草高と波形: 上述のように変動光の波形を各植被の草高が 20 cm 前後の場合に限ってみてきた。しかし、他方、波形は植被の発達による構造変化によっても変わるものと推測される。そこで、前記 6 種の草高に伴う波形の特徴を求めた。

Fig. 8 には先の Fig. 7 に記した周波数と風速との関係を、各草高ごとに示した。なお、いずれの直線もすべて 5% 水準で有意であった。

すなわち、周波数は各植被とも風速と明確な比例関係にあり、風速が増大するほど周波数も広がる関係にあった。植被ごとの違いは明確ではなく、測定サンプル数の少ないピーマンとネギを除いて、いずれも各直線に草高による順位はみられていない。

このように、変動光のスペクトル周波数領域とパワースペクトルのピーク値に違いがみられた。今回の 6 種の植被においては既報⁹⁾ の場合と同様に、変動光の波形が植被の種類、植被の大きさ、風速等によって異なる傾向

が得られたが、おのおの植被によって相違のあることは、前述 (1.) したように植被構造のような物理的環境、植被の揺れに関する物理的特性、植被体の光学的特性等の諸要因がそれぞれ植被ごとに異なっていることによるものと考えている。

以上、圃場での観測から、変動光波形は植被の種類他に測定条件と栽植様式によって特徴のあることが明らかになった。すなわち、変動光波形の振幅は測定時の日射強度と関連すること、また栽植密度によって波形の振動数が異なることなどである。風速条件が等しい室内実験からも、各変動光波形の特徴が種々検出できたが、個々の植被の波形成立の機構は未解明となった。波形に係わる要因は、植被内・外の風、植被の物理的特性等複雑である。今後は波形に係る個々の要因を明らかにする必要があるものと考えている。

要 約

耕地における植被内の変動光については、十分に明らかにされていないのが現状である。本研究では、圃場条件下と室内実験によって、各変動光波形の特徴について比較検討した。得られた結果は下記のごとくである。

(1) 圃場の植被層における自然光下の変動光について、種々の条件で検討した。それによると、①変動光の強光と弱光間の差は、日射強度にほぼそった日変化を示した。②ミカンの樹冠内では、変動光の発生している個所は多くなかった。③栽植密度が増大するに従い、変動光は顕著に現れた。④植被の種類によって変動光の波形

に差異がみられ、その原因として植被内の風の運動エネルギーと植被の物理的特性等によるものと考えられた。

(2) 変動光に関する風洞実験から、各植被(約20 cm高)の変動光のスペクトル密度が一定のレベル以上になる周波数は、風速 1.7 ms^{-1} の場合、ナス、ピーマン、アスパラガス、シュンギクは15 Hz程度、カブは11 Hz程度であり、ネギは約6 Hzの線スペクトル状であった。6種の植被についてピーク周波数は弱風 (1.7 ms^{-1}) と強風 (2.5 ms^{-1}) の場合ともに大差はなく、いずれも1.5~5.0 Hzであった。ピーク値は風速の増大につれて比例して大きくなった。一定のレベル以上のスペクトル密度を持つ周波数域が風速とともに高周波数域へ広がる傾向もみられた。

文 献

- 1) DESJARDINS, R. L., T. R. T. SINCLAIR, and E. R. LEMON. 1973. Light fluctuations in corn. *Agron. J.* **65**: 904-908.
- 2) IMPENS, I., R. LEMEURE, and R. MOERMANS. 1970. Spatial and temporal variation of net radiation in crop canopies. *Agr. Meteorol.* **7**: 335-337.
- 3) MAITANI, T. 1979. An observational study of wind-induced waving of plants. *Boundary-Layer Meteorology* **16**: 49-65.
- 4) MCCREE, K. J. and R. S. LOOMIS. 1969. Photosynthesis in fluctuating light. *Ecology* **50**: 422-428.
- 5) NORMANN, J. M. and C. B. TANNER. 1969. Transient light measurements in plant canopies. *Agron. J.* **61**: 847-849.
- 6) SAGER, J. C. and G. WALTER, Jr. 1980. Reevaluation of published data on the relative photosynthetic efficiency of intermittent and continuous light. *Agr. Meteorol.* **22**: 289-302.
- 7) 鈴木晴雄. 1979. 自然光の変動が作物の生育におよぼす影響. 香大農学報 **31**: 7-13.
- 8) 鈴木晴雄・神島義和・宮本硬一. 1983. 強弱光の反復が作物の生育におよぼす影響(II). 農業気象 **39**: 97-101.
- 9) 鈴木晴雄・田中伸一. 1990. 数種の植被内における変動光. 農業気象 **46**: 87-92.
- 10) 良田文明. 1984. 各種作物の群落内強弱光の実態と強弱光処理が作物の生育に及ぼす影響. 昭和59年度香川大学農学部卒業論文, pp. 63.