

植物体の揺れと植物群落内部における光量の変動の測定

米谷 俊彦

Measurements of Vibrations of a Rice Plant and Light Fluctuations within Plant Canopies

Toshihiko MAITANI

Light fluctuations and vibrations of plant were simultaneously measured within rice plant canopies, using the photo diode and strain gauge, respectively. They were compared with momentum fluxes measured over the plant canopies. Light fluctuations within the plant canopies were temporally intermittent and also spatially very variable. The standard deviations of light fluctuations within the plant canopies and culm strain rates of a rice plant were proportional to momentum fluxes observed above the plant canopies. This implies that standard deviations of light are directly proportional to those of culm strain rates of a plant, or square of wind velocity.

The light fluctuations were studied in the frequency domain, using spectral analysis. The spectrum of light had a maximum peak near 2 Hz and a significant portion of the spectral energy density in the high frequency range was above 2 Hz. They were not only caused by leaf movements due to vibration of plants but also by leaf flutters.

Key words: Light fluctuation, Plant vibration, Rice canopy, Momentum flux, Spectral analysis

結 言

植物群落内部における微気象環境の特性を明らかにすることは、植物の生育や成長、物質

生産の問題の解明のために極めて重要である。風速の変動に伴って生じる植物体の揺れの特性や揺れに関係する諸現象の研究は古くから行われている（例えば鈴木 1948, 井上 1955）。著者ら（例えば Maitani 1979, 佐藤ら 1980, 米谷 1981）は超音波風速計による風速変動の測定, 8 ミリビデオや歪ゲージによる植物体の揺れの測定を同時に行い, 両者の相互作用について調べてきた。また, 植物体の揺れと気圧変動（米谷・瀬尾 1983）, 花粉の飛散（米谷 1985）の関係についても研究を進めている。

植被の揺れに伴って群落内部の光量がしばしば時間的に変化することは, 定性的には良く知られた現象である。このような群落内部の光量の変動は, 光合成や熱収支をはじめとする多くの植物群落の諸反応とも関係するため極めて重要である。例えば, 光合成は光のエネルギーを化学エネルギーに変換する物理的な過程と, 炭酸ガスを固定する生化学的な過程からなっていることが知られている。それ故, 間欠的な光の点滅が植物の光合成に対するエネルギー効率を高める可能性が指摘されている（例えば Pollard 1970）。実験室における点滅のような規則的な変動とは異なっているが, 群落内部の光量の短周期の変動には色々な周期的な変動が重なっている。これらの光量の変動が作物の生育にどのような影響を及ぼすかについて調べることは興味深い。そのため, 幾人かの研究者によって群落内部の光量の変動に関する研究が報告されている（例えば Desjardins *et al.* 1973, 鈴木ら 1991）。これらの研究の多くは光量の変動特性や, 平均風速と光量に関するものである。したがって, 群落内部の光量の変動と, 植物体の揺れや群落上の運動量輸送量との直接的な関係についての研究は全く行われていない。

本論文においては, 植物の揺れに伴う群落内部での光量の変動の測定を行い, 同時に行った植物体の揺れや運動量輸送量の観測値の関係について若干の検討を試みた。以下では観測方法と解析結果について簡単に述べる。

本論文を作成するに際し, 有益なご助言を戴いた瀬尾琢郎岡山大学名誉教授, 木村和義教授, 圃場の使用を快く許可下さった農場の高見正夫氏に感謝します。

観 測 方 法

1984年8月下旬から9月上旬に岡山大学農業生物研究所のイネ群落（平均草高約75cm）で微気象の観測を実施した。この期間はイネの開花期に当たっており, 群落内外で多くの花粉の飛散が観測された。

風速と気温変動の測定には, スパン10cmの三次元超音波風速温度計（海上電機製 DAT390型）を群落上の95cmの高度に設置して行った。また, イネの茎の揺れを測定するために, イネの稈（高度55cm）に歪ゲージ（新興通信工業社製 B-FAE-8N-12）を接着して植物体の歪を測定した。歪ゲージによる植物体の揺れの測定法については, 米谷（1981）に記述されている。また, 群落内部の2高度（高度50cm, 65cm）にフォトダイオード（シャープ社製 SPD-511T）を設置して, 植被の揺れに伴う光量の変動の測定を行った。予備観測によって, センサーの設置高度や場所の僅かな違いによって, 光量の変動の様子が著しく異なることが分かった。この研究では, 場所の違いによる差異よりも, 光量の変動特性を調べることを主目的として, 少しの植被の揺れによっても光量に変化するような位置にフォトダイオードを設置

して観測を実施した。

幾つかの変動量の信号は7チャンネルのアナログデータレコーダーに記録した後、実験室に持ち帰り、オフラインデータ集録装置(米谷・瀬尾 1976)を用いて、各チャンネル毎秒12.5個の割合でA/D変換を行い、デジタル処理により統計計算を行った。フォトダイオードの出力は電圧信号であるが、農試電試式日射計で測定された日射量に比例していた。また、光量の変動の解析は、雲による光量の変動の起こらない晴天の期間のみのデータを用いて行った。なお、この観測期間には、イネ群落内外にDurhamの捕集器を設置して空中花粉の高度分布や経時変化の測定を行ったが、その結果については既に報告した(米谷 1985)。

解析結果と考察

1. 植物体の揺れと光量の変動の自記記録

イネ群落上の95cmにおける鉛直風速(w)、55cmにおけるイネの稈の歪(s)と光量(L)の変動の約40秒間の早送りの自記記録の一例をFig. 1に示す。群落上で下降気流に伴って風速が増加すると植物体が揺れ、群落内部の光量が変動していることが分かる。一般に風が強くなると植物体の稈が揺れるばかりでなく、葉も同時に揺れる。また、風速が弱まった後も植物体は固有振動を行うばかりでなく、稈の振動が微小になった微風時においても葉の揺れが継続する事が多く、群落内部の光量の変動が生じることが多かった。イネの稈や葉が1サイクルの変動をする場合にも、群落内部の光量は、群落の構造や葉の形状によって、高周波数や低周波数の変動を生み出すことがある。しかも、稈の固有振動の周期と葉の揺れの固有周期は一般に異なっている。したがって、イネの稈の歪(s)の変動の周期は約1秒であるが、群落内部の光量(L)には1秒より短周期の変動が数多く見られた。

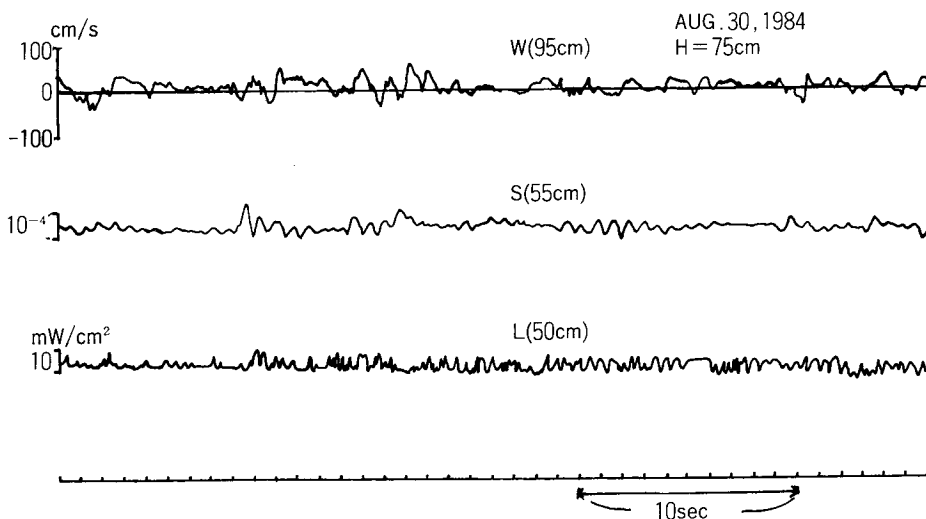


Fig. 1. Simultaneous record of vertical wind velocity (w) at 95 cm above plant canopies, culm strain of a rice plant (s) at 55 cm and light fluctuations (L) at 50cm within plant canopies.

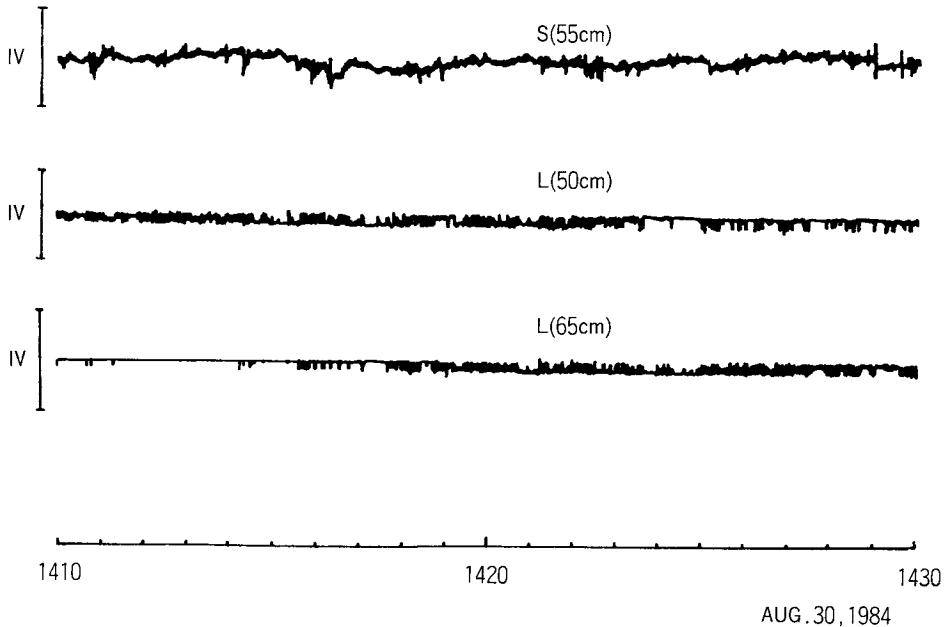


Fig. 2. Simultaneous record of strain of culm of a rice plant (S) at 55 cm and light fluctuations (L) at 50 cm and 65 cm.

Fig. 2 には、イネの稈の歪と、群落内部の二高度 (50cm, 65cm) における光量の変動の20分間の自記記録を示す。Fig. 1 に比べて記録紙の送りが遅いために、この自記記録の場合には、短周期変動の分離は不可能である。Fig. 2 の上段の記録から、植物体の稈の歪が絶えず変動しており、数10秒から数分毎に時々大きな変動が見られることがわかる。このような揺れの間欠性は、群落上における運動量輸送の間欠性と密接に関係する。以上のようなイネの稈や葉の揺れに伴って、高度50cm と65cm の光量に変動していた。光量は、最も日陰になった場合に対応する電圧の低い状態と、完全に陽の当たっている最も電圧の高い値の間で変動していた。65cm における光量 (L) は14時10分から14時18分頃までは完全に陽が当たっていた状態が大部分であって、時々日陰になっていた。その後、日陰になったり、陽が当たったりする状態がひんぱんに繰り返されている。14時24分頃にも光量の変動は激しかったが、時折完全に日陰になってしまう場合も見られた。50cm における光量は14時13分頃までは、ひんぱんに変化しており、その後は完全に陽が当たることが多くなったが、それでも植被の揺れによってしばしば間欠的に日陰になっていた。この例でも分かるように、群落内部の光量の変動は、イネの稈や葉の微妙な揺れの状態の変化によって大きく影響される。

2. 光量および植物体の歪みの標準偏差と運動量輸送量の関係

この観測期間中に得られた群落上の95cm における単位質量当たりの運動量輸送量 (u_*^2) と、イネの稈の歪の標準偏差 σ_s の間の関係を Fig. 3 に示す。ここで、 u_* は摩擦速度と呼ばれ $u_*^2 = -\overline{wu}$ で定義される量であり、 u は水平風速の変動成分である。Fig. 1, 2 に見られるよ

うに、植物体の稈の歪や光量には周期1秒程度の変動が卓越しているので、これらの量と運動量輸送量の関係を検討するために、30秒間毎に区切って標準偏差や共分散の計算が行われた。図中の個々の点は、群落上で超音波風速温度計で測定された鉛直風速(w)と水平風速変動(u)、およびイネの稈の歪(s)の測定値の30秒間のデータから計算された値である。ばらつきがかなり大きいものの、 $\sigma_s \propto u_*^2$ の関係が認められる。植物体の変位が植物体の歪に比例することは既に確かめられている(佐藤ら 1980)。したがって今回の結果も植物体の変位が運動量輸送量に比例することを示しており、従来から得られている結果と一致している(たとえば米谷 1981)。

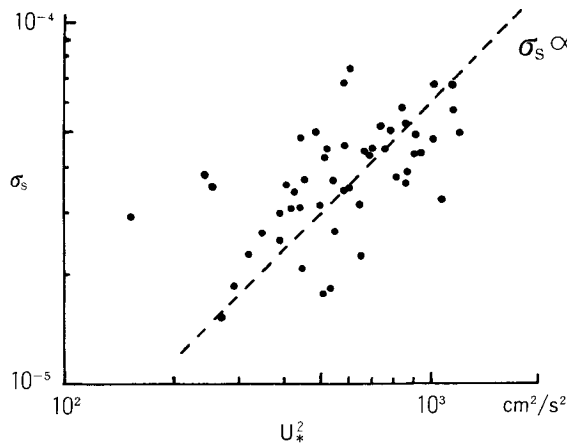


Fig. 3. Relationship between standard deviation of culm strain rate of a rice plant (σ_s) at 55 cm and momentum flux (u_*^2) at 95 cm.

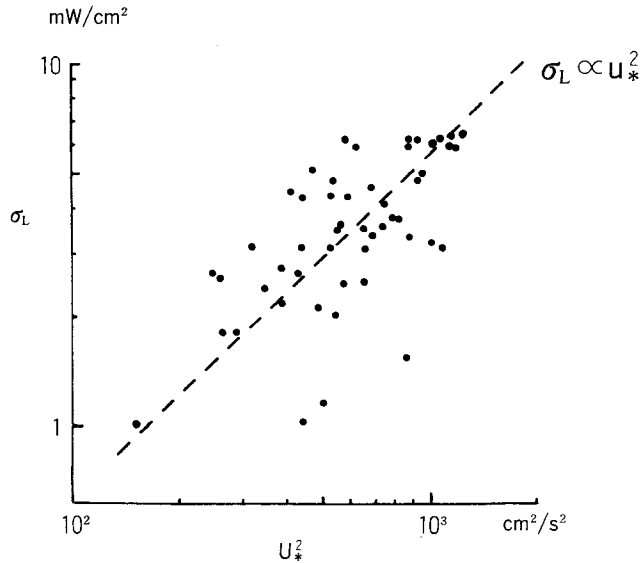


Fig. 4. Relationship between standard deviation of light fluctuations (σ_L) at 50 cm within plant canopies and momentum flux (u_*^2) at 95 cm.

次に、運動量輸送量 u_*^2 と群落内部の光量の変動の標準偏差 σ_L の関係を Fig. 4 に示す。この図においても、個々の点は30秒間毎に区切って得られたデータを用いて計算されたものである。相変わらずばらつきが大きいものの、光量の標準偏差 σ_L が u_*^2 に比例する傾向が認められる。これらの結果は、風速の増加に伴って植被がより激しく揺れ、群落内部の光量の変動が大きくなること、そして光量の変動が風速自体よりは、風速の2乗に比例して増加することを示している。また、光量の変動とイネの稈の歪みの標準偏差が比例関係にあることは言うまでもない。

3. 光量のスペクトル解析

次に群落内部の光量の周波別の特徴を調べるために、Tukey の方法によってスペクトル解析を行った (Blackman and Tukey 1958)。群落上の95cmにおける平均風速が約1 m/s の場合、群落内部の50cmにおける光量のパワースペクトル ($nS_L(n)$) を Fig. 5 に示す。

群落内部の光量のパワースペクトルは低周波数側では値が小さく値がほぼ一定である。植物体の揺れの固有周期の2倍に対応する2 Hz 付近で最大のピークを持っている。この結果は植物体の1サイクルの固有振動によって、光量は2回明暗を繰り返すことに対応している。また、パワースペクトルにはさらに高周波数側にかなり大きなエネルギー密度が認められる。

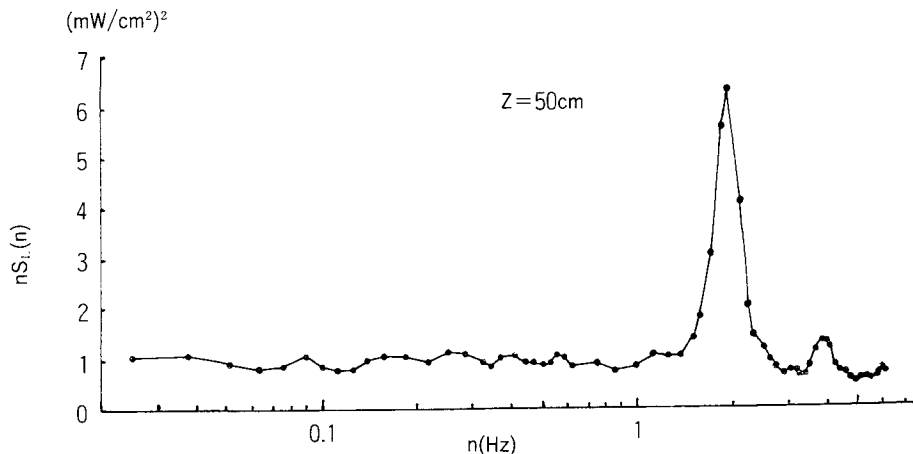


Fig. 5. Power spectrum ($nS_L(n)$) of light fluctuations at 50 cm.

これは既に良く知られている運動量輸送量のコスペクトルや、歪のパワースペクトルが1 Hz よりも高周波数側で急速に減少する傾向とは異なっている。このスペクトルの例では、揺れのエネルギーが特定の周波数に集中していた。一方、この観測とは別に行ったコムギ群落内における光量のスペクトルでは、低周波数に長周期のトレンドに伴うエネルギー密度の最大が見られ、固有周期よりも高い周波数にもかなりの高いエネルギー密度があることを示していた。群落内部の光量の高周波数成分には、一個の植物体の茎の揺れのみならず、葉の揺れや別の植物体の揺れの影響などが複合的に影響することがある。Desjardins *et al.* (1973) は、約2 mの草高のトウモロコシ群落内部の20cm高度で、風速が強い場合には、5 Hz 付近

の高周波数まで光量の変動が存在することを報告している。また、鈴木・田中（1990）は風洞を用いた室内実験によって、植被高が20cmのイネの植被内10cmの高度で30Hzまでの変動光が観測されること、そしてスペクトルの最大値が風速の増大につれて大きくなることなどを報告している。これらの測定資料は、本研究におけるイネ群落とは草高も群落構造も異なる条件下で行われているため直接的な比較は不可能である。しかし、いずれにしろ、群落内部では光量の変動には、1 Hzを遥かに超える高周波数変動が含まれることは事実である。また、このような植被層内の高周波数の変動光は、実験室における点減光のように単独に起こる現象ではない。植物群落では、風速変動、植物体の揺れ、群落内部の炭酸ガス、水蒸気の鉛直輸送なども光量の変動と同時に起こる。風速の変化に対応して群落内部で複合的に生じるこれらの諸現象が、作物の光合成を始めとする生理作用や生育にどのように影響するかを明かにすることは、今後に残された興味ある課題であろう。

摘 要

イネ群落における微気象観測の一部として、植物体の揺れと群落内部（イネの草高75cm）の光量の変動の同時測定を試みた。植物体の揺れの測定には歪ゲージを、光量の変動の測定にはフォトダイオードを用いた。以下に得られた2、3の結果について述べる。

風速の増加に伴って運動量輸送量が増大し、植被の揺れが激しくなると、群落内部の光量が間欠的にしかも短周期に変動した。イネの稈の歪と群落内部の光量の変動の標準偏差 σ_s 、 σ_L は、共に運動量輸送量 u_*^2 に比例して増加した。このことは、群落内部の光量の変動の標準偏差が、植物体の歪もしくは植物体の変位の標準偏差に比例して増加することを意味している。

群落内部の光量のパワースペクトルの最大となる周波数は、植物体の揺れの固有周期の2倍に対応する2 Hz付近であったが、それより高周波数側にもかなりのエネルギー密度が存在していた。これらの高周波数成分は、一個体の植物体の揺れや葉の揺らぎばかりでなく、複数の植物体の影響が複合的に重なって生じたものと思われる。

今回は植物体の揺れと光量の変動の測定を試験的に行った結果の報告である。今後は種々の植物群落において、生育段階に応じて群落内部のいろいろな高度にセンサーを設置して、さらに詳細な観測を行うことが必要と思われる。

キーワード：光量の変動、植被の揺れ、イネ群落、運動量輸送、スペクトル解析

引 用 文 献

- Blackman, R.B. and Tukey, J.W. 1958. The measurement of power spectra. 207pp. Dover, New York.
 Desjardins, R.L., Sinclair, T.R. and Lemon, E.R. 1973. Light fluctuations in corn. Agron. J. 65: 904-908.
 井上栄一. 1955. 穂波の研究（2）穂波のスペクトル. 農業気象 11: 87-89.
 Maitani, T. 1979. An observational study of wind-induced waving of plants. Boundary-Layer Meteor. 16: 49-65.
 米谷俊彦. 1981. 小型の台風7912号通過時の倉敷における水稻の揺れの観測. 農業気象 36: 251-255.

- 米谷俊彦, 1985, 水稻群落における空中花粉, 風速変動と植物体の揺れの観測, 農業気象 41: 241-246.
- 米谷俊彦・瀬尾琢郎, 1976, 微細気象観測用オフラインデータ集録装置について, 農学研究 55: 215-232.
- 米谷俊彦・瀬尾琢郎, 1983, 小麦畑における風速, 気圧変動と植物体の揺れの測定, 農業気象 39: 165-171.
- Pollard, D.F.W. 1970. The effect of rapidly changing light on the rate of photosynthesis in largetooth aspen (*Populus grandidentata*). Can. J. Bot. 48: 823-829.
- 佐藤 勉・米谷俊彦・大滝英治, 1980, 歪計による植物体の揺れの測定, 農業気象 36: 103-107.
- 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.
- 鈴木晴雄・田中伸一・藤目幸擴・米谷俊彦, 1991, 作物植被による変動光の波形特性, 生物環境調節 29: 65-72.
- 鈴木清太郎, 1948, 農業物理学, 286頁, 養賢堂, 東京.