

気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用

2. 植物の揺らぎと群落上の乱流輸送特性への影響

The Interaction of Turbulent Air Flow
and Communities of Rice Plants and Red-pines
2. Characteristics of Turbulent Transport
over Canopies Caused by Plant Swaying

村上 智美*・原薦 芳信**・川村 隆一***・西沢 利栄****
Tomomi MURAKAMI, Yoshinobu HARAZONO, Ryuichi KAWAMURA
Toshie NISHIZAWA

1. まえがき

光合成活動を行なう植物は、大気中の二酸化炭素(CO_2)の重要な吸収源の一つである。地球温暖化が大きな問題となっている今日、植物による大気中の CO_2 の濃度変動や気候変動への寄与が重要視されているが、その役割については未知のことが多い。特に植物群落におけるガス吸収については充分な把握はなされておらず、この解明が陸上における広域的な CO_2 吸収量の推定精度向上に不可欠と考える。

接地境界層は、ほとんどの場合乱流状態にあって、風速や気温などの気象要素は空間的にも時間的にも複雑に変動している(竹内・近藤, 1981)。このような場で、植物群落内外の flux を評価する試みが精力的に行なわれ、平均的な微気象データに基づく評価と瞬時的データを利用した動的な評価とが研究されている。

平均的な flux 評価については前報(原薦ほか, 1990)

の他、平均風速と空気力学的パラメータの変化として、いくつか報告されている(谷ほか, 1955, 1956; 谷, 1960; 原薦・林, 1989; 原薦ほか, 1989, 1990)。一方、植物群落は気流の変動に伴って揺らぎ、その揺らぎが群落内外の気流にも作用することが多く、これが瞬間的な CO_2 , H_2O 等の輸送を変化させ、植物群落の CO_2 吸収量や蒸発散量の積算値にも影響を及ぼしていることが考えられる。植物群落の揺らぎ自体の測定結果はいくつか報告されているが(佐藤ほか, 1980; 米谷, 1981; 米谷・瀬尾, 1983; 林, 1987), この植物の揺らぎと群落上の乱流輸送との関係はまだ充分明らかにされていない。

本研究では群落構造を異にする水稻群落とアカマツ群落を対象として、植物群落上の風速変動や CO_2 , H_2O , 熱, 運動量 flux, ならびに風速変動に伴う植物の揺らぎを測定した。そして、種々の flux と風速変動や植物群落特有の揺らぎ、群落構造との関係に違いが認められたので報告する。なお、本論文中で

*筑波大学自然科学類(現:富士総合研究所・解析技術部) **農業環境技術研究所・気象管理科 ***筑波大学水理実験センター(現:科学技術庁防災科学技術研究所) ****筑波大学地球科学系

は CO_2 flux と運動量 flux について群落上の乱流輸送特性を示す。

2. 測定内容及び手法

2.1 水稻群落における測定

農業環境技術研究所 (NIAES) 内にある圃場のほぼ中央の水田において観測を行った。観測場所の詳細は前報 (原薦ほか, 1990) に示したとおりである。5月中旬に栽植密度18.3株/ m^2 でコシヒカリが移植された。圃場全体に水稻が栽培されており、6月中旬以降は圃場全体の草丈がほぼ均一な状態であった。

水稻群落直上における水平・鉛直方向の風速変動及び気温の変動の測定には、3次元超音波風速温度計(海上電機 WAT-310 スパン長10cm)を用いた。また、 CO_2 濃度の変動の測定には赤外線吸収式 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ガス変動計(アドバンストシステム E-009)を用いた。これらの感部は水稻群落上0.1mの高さに設置した。植物の揺らぎの測定には林(1987)が用いたものと同規格のひずみゲージ(共和電業 SKF-2089)と動ひずみ測定器(共和電業 DPM-600)を用いた。ひずみゲージは水稻の穂の付け根部分の稈に取り付け、揺らぎに伴う出力を記録した。

測定は出穂期、稔実期、刈り取り直前の3回に分けて実施した。測定日時は1989年8月10-11日、8月23-25日、9月6-11日であり、各々日射強度の日変化に対応させて8-12時間の測定データを記録した。

2.2 アカマツ群落における測定

測定対象としたアカマツ林も前報と同じである。筑波大学水理実験センター(ERC)のほぼ南に位置する南北約100m、東西約200mのアカマツ群落の中央付近に設置された鉄塔を利用して観測を行った。

観測は、アカマツの生理的機能の季節的变化を考慮して1988年10月31日-11月11日、1989年4月29日-5月6日と、7月20日-31日の3回行ったが、アカマツの揺らぎの測定は後者の2回のみである。それぞれ日射強度の日変化に対応させて8-16時間ずつ連続測定した。風速変動、 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 濃度変動の測定に用いた測器は水田で使用したものと同じであり、設置位置等は林ら(1989)や前報と同様である。

アカマツの揺らぎの測定には、水稻の場合と同じひずみゲージ(共和電業 KFE-5-C1)と動ひずみ測定器を用いた。ひずみゲージは長さ1.2m、直径6mmのグラスファイバーに接着し、3本のアカマツの高さ12.0m、11.45m、11.3mの位置の枝と各センサーとをロープで結んだ。アカマツの揺らぎ(水平方向の変位)の増大に伴ってグラスファイバーが上下に曲がり、ひずみゲージの出力が変化するので、これをアカマツの揺れとして記録した。これを付図に示す。

3. 解析方法

3.1 植物の揺らぎ、 CO_2 、運動量の変動量及び flux の定義

水平・鉛直方向の風速を u, w (m/s) とし、その平均値を \bar{u}, \bar{w} (m/s)、その変動成分をそれぞれ u', w' (m/s) とする。同様に CO_2 濃度 c (g/m³) についても平均値と変動成分に分け以下のように定義する。

$$u = \bar{u} + u' \quad (1)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2)$$

$$c = \bar{c} + c' \quad (3)$$

渦相関法(乱流変動法)による輸送量(flux)は、

$$\text{CO}_2 \text{flux} = \bar{c} \bar{w}, \quad (4)$$

$$\text{運動量 flux} = -\rho u' w' \quad (5)$$

として定義される。ここで ρ は空気密度であり、
は時間平均を意味する。

風速変動に伴う植物体の揺らぎについては、その変位をひずみゲージの出力として記録しているので、これを本論文中では以下のように定義し、以後揺らぎと称する。なお、グラスファイバーに接着したひずみゲージの出力と変位とは直線関係が認められており、オオムギの稈の変位とグラスファイバーの変異との対応もよいことが明らかにされている(林、1987)。

$$\delta = \bar{\delta} + \delta' \quad (6)$$

$\delta, \bar{\delta}, \delta'$ はそれぞれ動ひずみ計の出力の瞬間値、平均値、変動値を示す。

風速変動と植物の揺らぎとの関係を表す指標として、ここでは風速変動 u' と揺らぎの変動 δ' の積 $\delta' u'$

を用いることとした。結合確率密度関数 $P(\delta, u)$ を用いると $\delta' u'$ の平均値 $\bar{\delta}' \bar{u}'$ は共分散関数 $C_{\delta u}(\tau)$ となり以下のように表せる(日野, 1978; 中村ほか, 1984)。E は期待値である。

$$\begin{aligned}
 \bar{\delta}' \bar{u}' &= C_{\delta u}(\tau) \\
 &= 1/n \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})(u_i - \bar{u}) \\
 &= E[(\delta(t) - \bar{\delta})(u(t+\tau) - \bar{u})] \\
 &= \int \int (\delta(t) - \bar{\delta})(u(t+\tau) - \bar{u}) \\
 &\quad P(\delta, u) d\delta du \\
 &= E[(\delta - \bar{\delta})(u - \bar{u})] \\
 &= E[\delta u - \bar{\delta} u - \delta \bar{u} + \bar{\delta} \bar{u}] \\
 &= E[\delta u] - E[\bar{\delta} u + \delta \bar{u}] + \bar{\delta} \bar{u} \\
 &= E[\delta u] - \bar{\delta} \bar{u} \tag{7}
 \end{aligned}$$

δ と u との相互相関関数 $R_{\delta u}(\tau)$ は次式で定義される。

$$\begin{aligned}
 R_{\delta u}(\tau) &= E[\delta(t) u(t+\tau)] \\
 &= E[\delta u] \tag{8}
 \end{aligned}$$

したがって,

$$\bar{\delta}' \bar{u}' = R_{\delta u} - \bar{\delta} \bar{u} \tag{9}$$

ここで, u と δ とが独立で無関係ならば,

$$\begin{aligned}
 C_{\delta u} &= \int \int (\delta - \bar{\delta})(u - \bar{u}) P(\delta) P(u) d\delta du \\
 &= [\int (\delta - \bar{\delta}) P(\delta) d\delta] [\int (u - \bar{u}) P(u) du] \\
 &= 0 \tag{10}
 \end{aligned}$$

つまり, $C_{\delta u} \neq 0$ ならば両者にはなんらかの相関があることになる。鉛直風速についても同様に,

$$\begin{aligned}
 \bar{\delta}' \bar{w}' &= E[(\delta - \bar{\delta})(w - \bar{w})] \\
 &= R_{\delta w} - \bar{\delta} \bar{w} \tag{11}
 \end{aligned}$$

したがって, flux を求めたのと同様の処理により $\bar{\delta}' \bar{u}'$, $\bar{\delta}' \bar{w}'$ を求め, 風速と揺らぎとの相関を検討することができる。

3.2 植物の揺らぎ, CO_2 , 運動量の変動量及び flux の演算方法・定量化

風速, CO_2 濃度, 揺らぎを解析する場合には, A/D 変換におけるエリヤジングの影響とノイズを除去するために Low Pass Filter (Rockland, MODEL 1022F) を使用した。また, CO_2 flux, 運動量 flux,

ならびに δ と風速や乱れとの関係を調べるために変動成分の積 $\delta' w'$, $\delta' u'$ はアナログフラックス演算器 (海上電機 UDF03) を用いて求めた。アナログ演算器の場合, 平均化時間によって変動成分の値が変化するが, 本解析では平均化時間1000秒を基準とした。また, アナログフラックス演算器への入力信号は, 汎用型直流増幅器 (共和電業 DA-510B) を用いて出力レベルを合わせた後, 10Hz の Low Pass Filter をかけた。

風速変動, 運動量 flux, CO_2 flux と揺らぎ δ との関係を調べる場合には, アナライジングレコーダ(横河電機 MODEL 3655E) を用いてそれを時系列データとして出力した。アカマツや水稻が揺らぐ場合のそれぞれの固有振動数は, δ の時系列データのうち周期的に振動している部分について求めた。

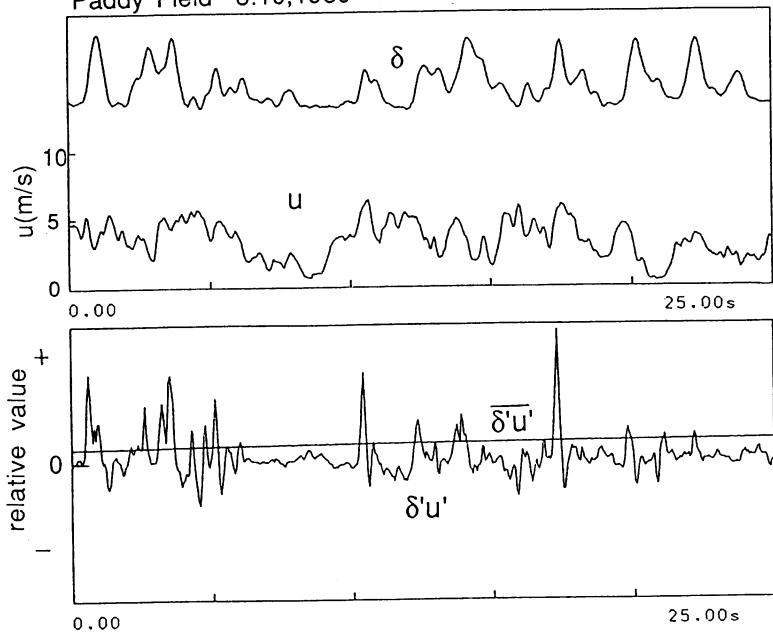
アカマツ群落や水稻群落の各生育ステージにおける平均的な CO_2 , 運動量 flux を求める場合には, まず, アナログフラックス演算器により平均化時間1000秒を基準にして求めた各 flux を A/D 変換器(DATA-PRO PAD-1000S) を用いて10秒毎に数値化し, 10分毎の移動平均値を求めた。このようにして求めた平均値は観測期間の10分毎の平均 flux となるので, これをそれぞれに対応する風速, 日射, 気温などと比較検討した。

4. 水稻群落における flux と気流変動・群落構造との関係

4.1 揺らぎと気流変動との関係

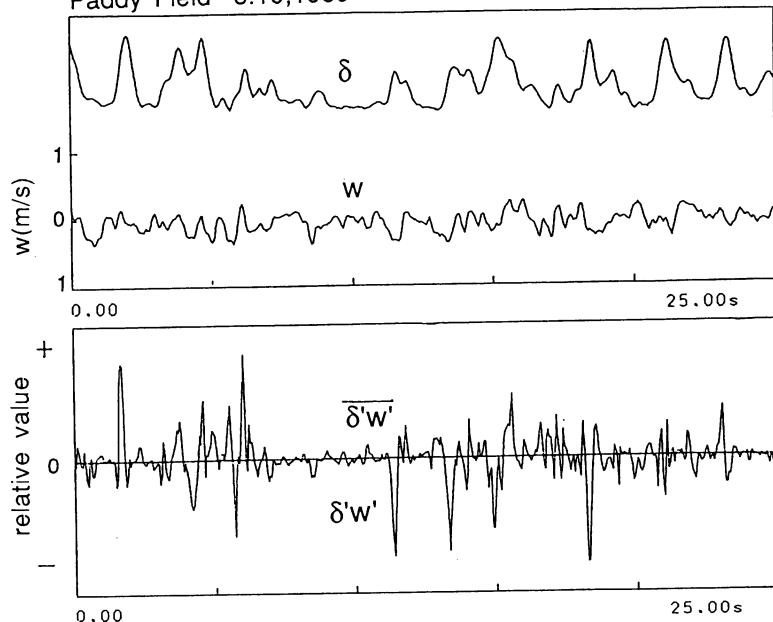
出穂期 (8月10日) における水稻の揺らぎ δ と水平方向の風速変動 u' 及びそれぞれの相関 (δ と u の共分散 $\bar{\delta}' \bar{u}'$) の経時変化を第1図に示す。図から明らかのように, 揺らぎと水平方向の風速変動とがよく対応している。5 m/s 程度の風速が持続すると, 稿が曲がったままの状態になり振動が不規則になるのが分かる。両者の相関 $\bar{\delta}' \bar{u}'$ は正の値であることから, 水平方向の風速変動に伴って揺らぎが生じていることが分かる。この時の揺らぎと鉛直方向の風速変動(w')との関係 (第2図) では, 揺らぎの振動数より鉛直風速の変動の振動数が高く, 両者の相関はほとんど 0 である。したがって, この時期の水稻の稭の揺ら

Paddy Field 8.10,1989



第1図 水稲の揺らぎ δ と水平風速変動 u' との関係 (1989. 8 .10)

Paddy Field 8.10,1989



第2図 水稲の揺らぎ δ と鉛直風速変動 w' との関係 (1989. 8 .10)

ぎは鉛直方向よりも水平方向の風速変動に対する依存性が高いといえる。この時期には、水稻の葉も稈もまだ上に向かって伸びておりそれは柔らかいため、水平方向の風速変動に伴って揺らぎが生じ易いものと考えられる。

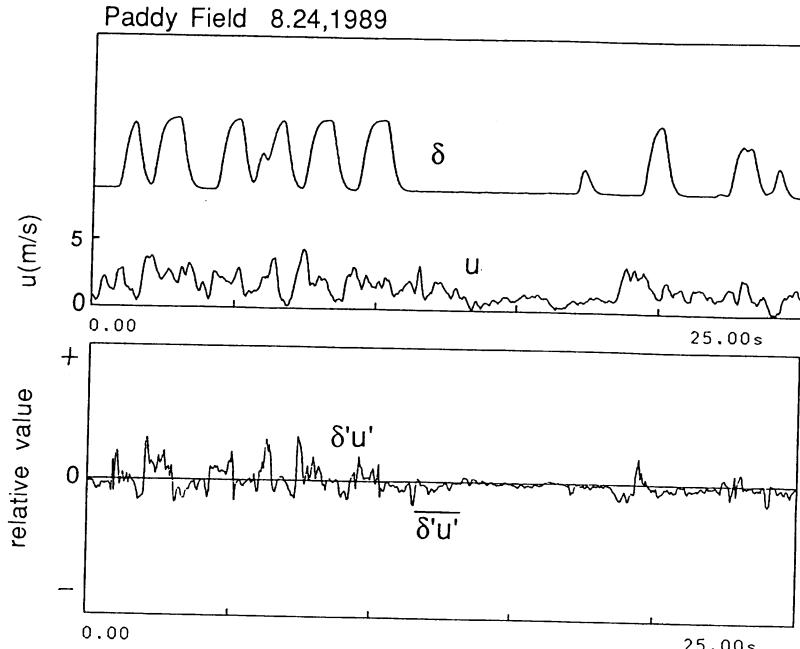
登熱期（8月24日）の δ の変動（第3図）は規則的で水稻の稈は周期的に揺らぎ、その平均振動数は0.6Hzである。この時期にも、傾いたままの状態が持続している時が見られるが、揺らぎ自体が緩やかな変化をしている。出穂期と異なり、水平方向の風速変動と揺らぎの変動との間にはあまり相関が認められない。この時期の穂は除々に重くなってきており（原薦ほか, 1990 第3図）、また、稈も比較的堅く、規則的な固有振動が生じ易い状態である。このため、気流による応力が加えられ一旦水稻が揺れ始めると、その後しばらくは稈の固有振動数が卓越する揺らぎになり、風速と揺らぎとの相関が小さくなると考えられる。鉛直方向の風速についても調べたが、 w と δ との相関（第4図）は出穂期と同様にほとんど認められない。

刈り取り直前（9月9日）には、風速が高い場合に群落全体が大きくうねり、穂波がみられるようになった。この時期は穂が重く垂れ下がり稈も葉も堅くなってしまっており、稈の曲げは伴わず根元から水稻全体が揺らぐ状態になっていた。本観測では、ひずみゲージを穂の直下の稈に取り付けたため、水稻が根元から揺らいでもそれをひずみの出力としてとらえることができなかった。結果的に、この時期における風速変動と揺らぎとの相関を明らかにすることはできなかった。

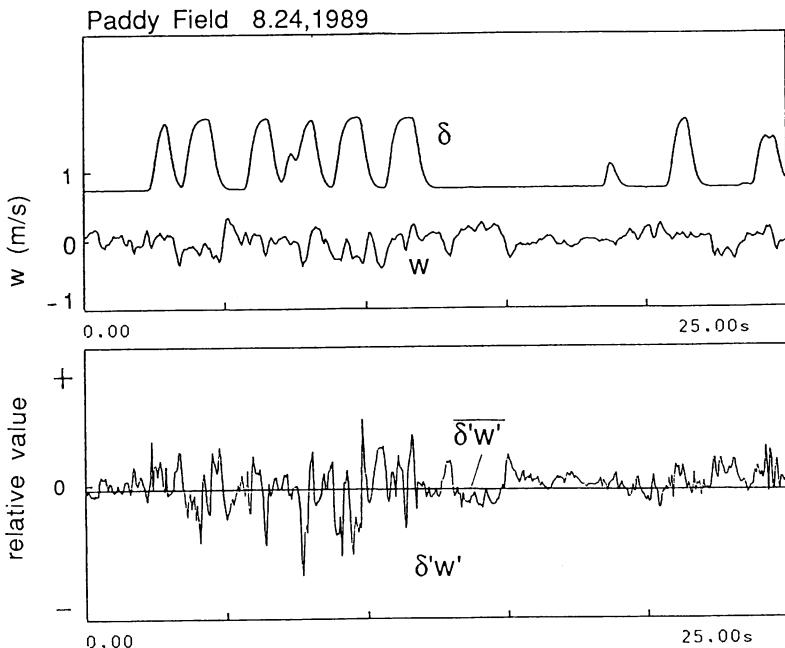
以上のように、穂の登熱にともなう群落構造の変化に従って植物の揺らぎに違いがみられた。これは谷（1960）が示しているように、同様な気流状態でも水稻の生長にともない稈の固有振動数が変化し、気流との共振振動数が異なった結果といえる。

4.2 平均風速と揺らぎの大きさ

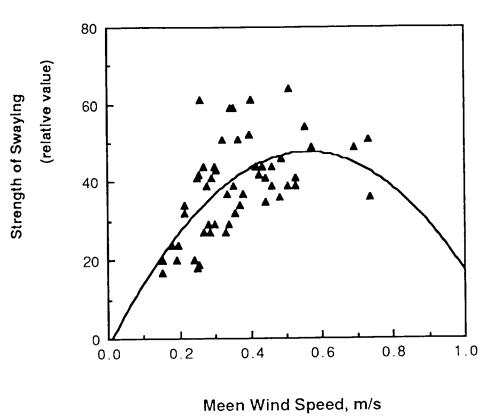
水稻の揺らぎの大きさと平均風速との関係について示したのが第5図である。前述のように水稻の揺らぎは瞬間的な気流変動によって生じることが多かったが、ある時間幅でみた場合の揺らぎの大きさ（振



第3図 水稻の揺らぎ δ と水平風速変動 u' との関係（1989. 8. 24）



第4図 水稻の揺らぎ δ と鉛直風速変動 w' との関係 (1989. 8 . 24)



第5図 水稻の揺らぎの大きさと平均風速 \bar{u} との関係 (1989. 8 . 24)

幅)は風の息毎に異なっていた。そこで観測期間中の風の息の平均時間を考え、群落上0.1mの高さの3分間の平均風速とその間の揺らぎの出力の極大値をプロットした。図は、水稻の固有振動が最も卓越した8月下旬の結果であり、縦軸は振幅に相当す

る。

平均風速の増大に伴って振幅が増大し、その後低下する傾向が認められる。最大振幅となる風速を調べるために、風速との間の関係を次式のようにまとめると、

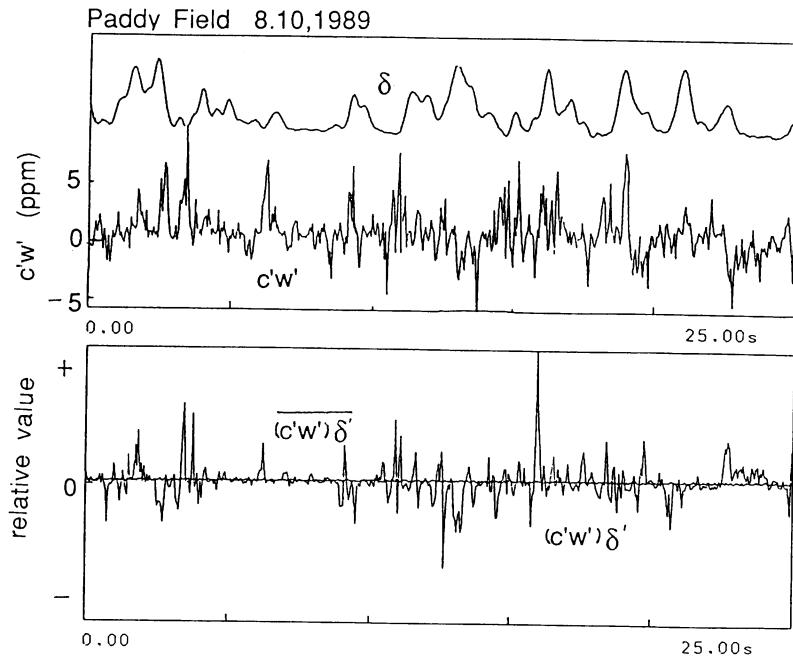
$$\delta = a(\bar{u} - b)^2 + c \quad (12)$$

$b = -0.560$ となった(相関係数は $R = 0.62$, $N = 55$, 1%誤差で有意)。したがって、群落直上(約0.1m上)の平均風速が約0.56m/sまでは風速の増大とともに、水稻の揺らぎも大きくなるが、それ以上の風速になると揺らぎは抑制されることが分かる。

4.3 揺らぎと flux との関係

植物の揺らぎが群落上の flux に及ぼす効果を調べるために、出穂期の水稻の稈の揺らぎと CO_2flux との関係を第6図に示した。揺らぎ (δ) と CO_2flux ($\overline{c'w'}$), 及び両者の相関を調べるために $(\overline{c'w'})\delta$ も示してある。

揺らぎの変動と CO_2flux の変動とを比較してみると、揺らぎのある時に CO_2flux の変動の振幅が若干大きくなっている傾向がみられるが、 CO_2flux の変動



第6図 水稻の揺らぎ δ と CO_2flux ($\overline{c'w'}$) との関係 (1989. 8. 10)

の振動数は水稻の揺らぎのそれに比べて非常に高く、 $(\overline{c'w'})\delta$ はほとんど 0 であり相関は認められない。図には示さなかったが、登熟期においても同様であった。

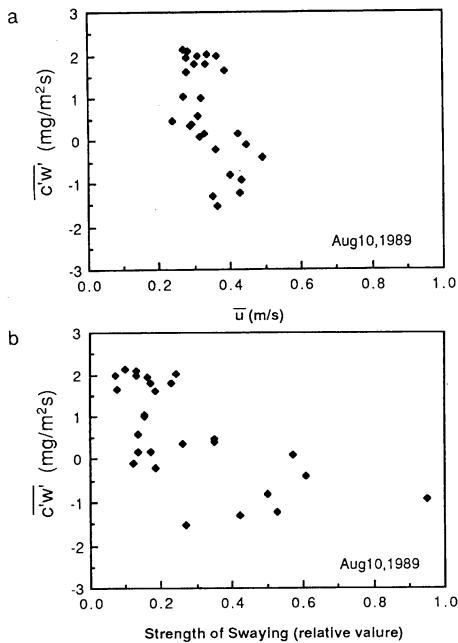
flux 鉛直方向の気流変動に依存するが、前述のように水稻の揺らぎと鉛直方向の風速変動との相関は認められなかつたので、瞬間的な CO_2flux の大きさと揺らぎとに明瞭な関係が現れなかつたと考えられる。

そこで、水稻の揺らぎの大きさが平均的な flux に及ぼす影響を、水稻群落上の 3 分間平均 CO_2flux とその間の平均風速との関係、flux と揺らぎの最大振幅との関係に分けて調べた。第 7, 8 図に出穂期、登熟期の平均風速と CO_2flux 及び、揺らぎの最大振幅と CO_2flux との関係をそれぞれ示す。図中の各点が 3 分間平均 CO_2flux とその時の平均風速、およびその時の揺らぎの大きさである。負符号は下向きの flux で光合成による吸収であり、正符号は呼吸による放出である。

出穂期の測定時における風速範囲は狭く、群落上

高さ 0.1m での平均風速は約 0.2—0.5m/s であるが、稈はよく揺らいだ。 CO_2flux は -1.6 — $2.2\text{mg/m}^2\text{s}$ と呼吸と光合成の両方に分布しているが、光合成時に u の増大に伴い $\overline{c'w'}$ がやや増加する傾向が見られる程度で、 u との関係は顕著ではない。一方、 δ と CO_2flux との関係では、稈の揺らぎの増大にともなって下向きの flux が大きくなる傾向が認められる。上向きの flux では δ との関係が顕著ではないが、呼吸の場合には、群落内外の拡散速度以上に植物体や地面からの放出量が制限因子となっているため、 δ の増大にともなう変化が小さいと考えられる。図 7 a, b の比較から、稈が水平方向の気流変動に対応して揺らぐ場合には、同一風速でも揺らぎが大きい方が CO_2flux を増大させる傾向が認められる。

登熟期においては、揺らぎと CO_2flux との関係は、始めは揺らぎの増大にともなって flux も増大するが、それ以上揺らぎが大きくなても flux は増加せず、出穂期ほど揺らぎの効果が顕著ではない。一方、この場合には、平均風速の増大につれて下向きの CO_2flux が増加する傾向が認められる。風速の増大にと



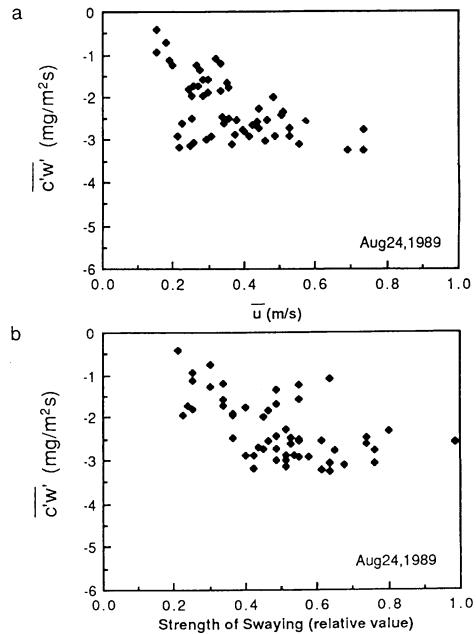
第7図 a. 水稻群落上の平均風速 \bar{u} とCO₂fluxの関係
b. 水稻の稈の揺らぎの大きさとCO₂fluxの関係
(1989. 8. 10)

もなう光合成の増加は矢吹(1985)によっても明らかにされている。この時期には平均風速の増大にともない揺らぎは増大するため(第5図), 揺らぎにともなうfluxの増大は風速増大の効果と複合しており、揺らぎのみの影響を分離することができない。しかし、出穂期と登熟期におけるfluxと風速や揺らぎとの関係を比較すると、登熟期における規則的な稈の揺らぎがfluxに及ぼす効果には頭打ちの傾向が顕著であり、揺らぎがfluxに増大させることはないとみられる。このことは、登熟期の群落抵抗係数(u_*/\bar{u})²が出穂期より小さいこと(原薦ほか, 1990 前報)ともよく対応している。

5. アカマツ群落におけるfluxと気流変動・群落状態との関係

5.1 揺らぎと気流変動との関係

アカマツの胸高直径や高さ、枝張りの状態は個々に異なることから、個々の木毎に固有の振動周期を



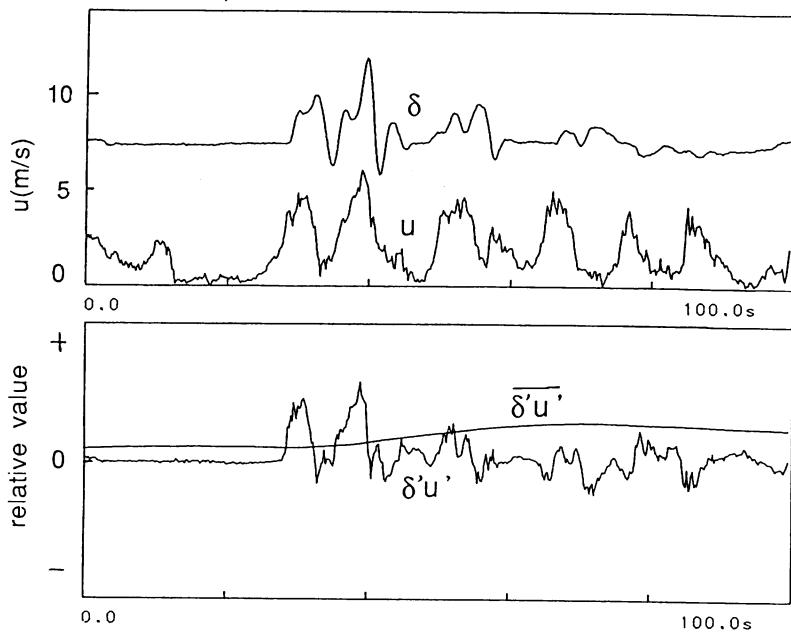
第8図 a. 水稻群落上の平均風速 \bar{u} とCO₂fluxの関係
b. 水稻の稈の揺らぎの大きさとCO₂fluxの関係
(1989. 8. 24)

持つと考えられる。観測中の目視観察の結果でも、同一風速で揺らぐ木と揺らがない木がみられた。

まず、瞬間的な揺らぎと風速変動との関係を調べた。ひずみ計を用いて測定したアカマツの幹の揺らぎ(δ)と群落上約1mの高さの水平、鉛直方向の風速(u, w)、及びそれぞれの共分散($\delta u', \delta w'$)を第9図と第10図に示す。この時には平均風速が高く変動も大きかったことから、大部分のアカマツに揺らぎが生じた。

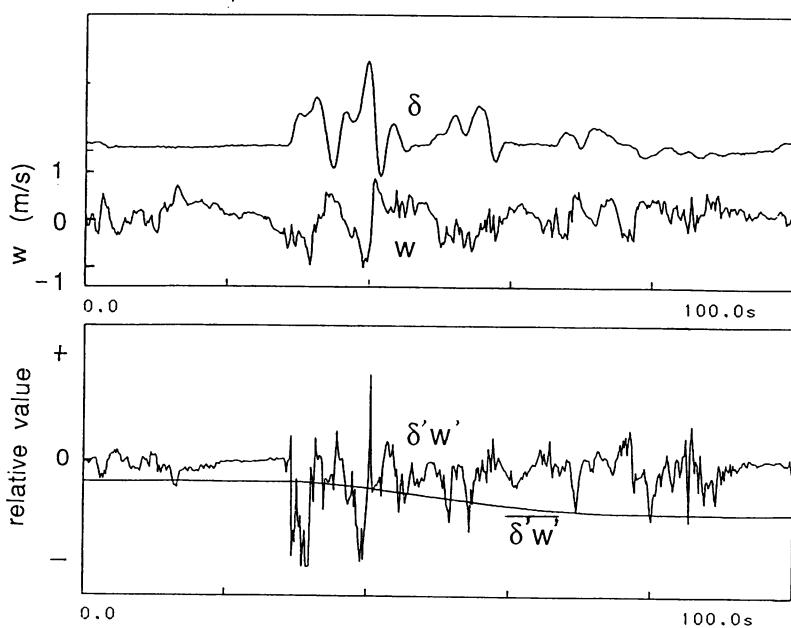
第9図から、水平方向の風速 u が急増する場合に揺らぎはじめている。この時には δ と u の変動とが非常によく対応している。この場合の δ の振動数は約0.25Hzで、これがアカマツ樹の平均的な固有振動数と考えられる。 u の変動周期は約8秒であり、 u の約1/2の振動周期でアカマツが揺らぐことが分かる。 u の変動周期が9—10秒と長くなるとアカマツの揺らぎは小さくなる。この時の u の変動周期はアカマツの固有振動周期の2.5倍程度であることから、この場

ERC 7.24, 1989



第9図 アカマツの揺らぎ δ と水平風速変動 u' との関係 (1989. 7. 24)

ERC 7.24, 1989



第10図 アカマツの揺らぎ δ と鉛直風速変動 w' との関係 (1989. 7. 24)

合、 u の変動はアカマツの揺らぎを打ち消すように働いたことが分かる。

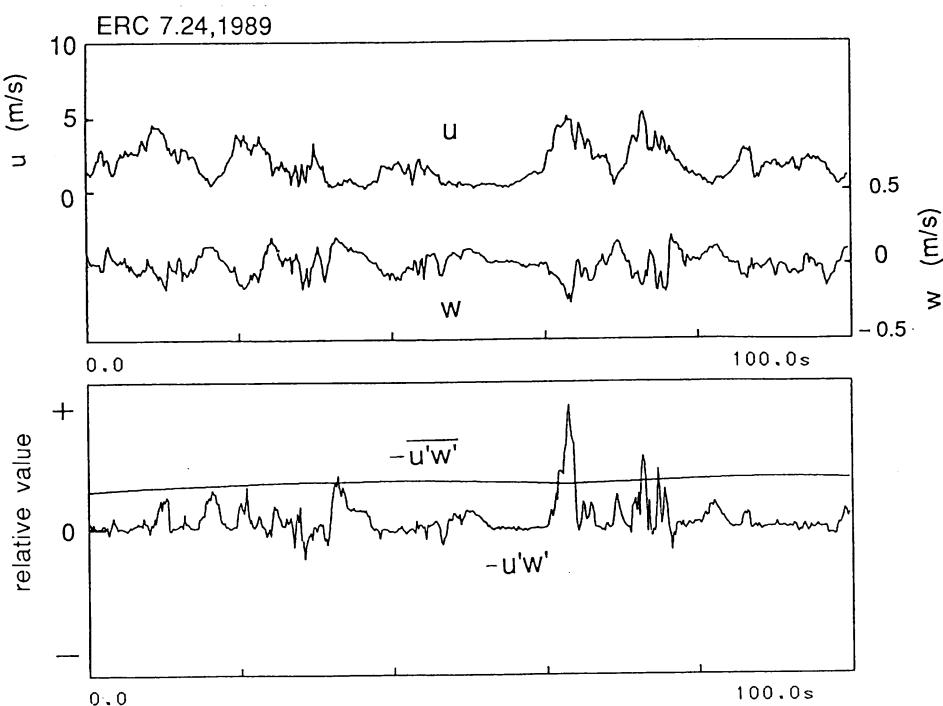
また、高風速が数秒間続いている場合には、一旦揺れたアカマツ樹がそのまま傾いた状態でしばらく元の位置に戻らず、なびいたままの状態の変位が記録されている。

全体的にみると、 w の変動には周期性はみられないが、第10図から、アカマツが揺らぎ始めたときの w の変動周期は u の場合と同様に約8秒で、揺らぎとの対応が非常によいことが分かる。その後の w には周期的な変動はみられないが、 δ とは比較的よく対応している。

δ と u の相関は正の値であることから、揺らぎが水平方向の風速変動に依存していることが分かる。また、鉛直方向の風速変動と揺らぎとの相関 $\delta'w'$ は負の値であることから、アカマツの場合気流が群落内に吹き込むときに大きい揺らぎとなることが分かる。

第9図、第10図を比較すると、水平方向の風速は同程度であっても、鉛直方向の風速が小さく、吹き込みが弱い場合にはアカマツの揺れは小さい。このことから、アカマツ群落の揺らぎは水稻群落とは異なり、鉛直方向の風速への依存性も高く、水平、鉛直方向の気流が共にアカマツの揺らぎに大きく作用するものと考えられる。これは、群落構造と樹間部表面の凹凸の大きさの差異によると考えられる。揺らぎが持続している場合の δ と w との対応をみると、揺らぎにより w が引き起こされることも考えられる。

水稻群落の場合と同様に、群落直上の3分間平均水平風速と揺らぎの大きさ（最大振幅）との関係、および鉛直方向風速の3分間毎の最大値（変動幅）とその間の揺らぎの大きさとの関係を調べたが、双方とも、風速の増加と揺らぎの増大との直接的関係は認められなかった。よって、アカマツの場合、樹木の揺らぎが発生するかどうかは風速変動に依存するが、揺らぎの大きさは平均風速や鉛直風速の変動



第11図 アカマツ群落における水平、鉛直方向の風速変動 u' 、 w' と運動量 flux (1989. 7. 24)

の大きさには依存しないと言える。

5.2 アカマツの揺らぎと flux

第11図に群落上 1 m の高さの水平方向の風速 (u)、鉛直方向の風速 (w)、及び両者の変動成分から求めた摩擦速度の 2 乗 ($-\bar{u'w'}$)、及びその瞬時値 ($-u'w'$) を示す。この $-\bar{u'w'}$ と空気密度 ρ との積が運動量 flux となる。また、 $\bar{u'w'}$ は 2 風速の相関の指標となる。以下、ここでは $-\bar{u'w'}$ を運動量 flux と呼ぶことにする。

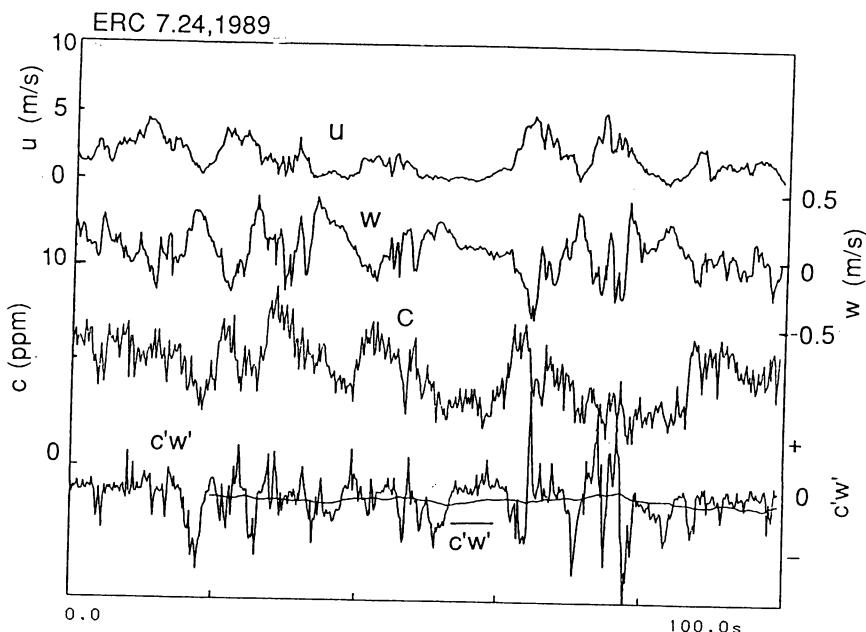
図から、水平方向の風速が高い時に鉛直下向きの風速が高くなり、水平方向の風速が弱まると鉛直上向き風速となる傾向がみられる。アカマツ群落上の鉛直風速 w の変動は水平風速 u の変動に依存しており、 $-\bar{u'w'}$ が正の値になることが多く、運動量が下向きに大きく輸送されることが分かる。

この時の CO_2 濃度の変動と CO_2 flux を第12図に示す。 CO_2 濃度変動は周期約 0.8 秒の定常的な高周波成分と、水平方向の風速が強まり鉛直下向きの風速が卓越する時に CO_2 濃度が急に高くなり、その後ゆっくりと低下していく低周波成分（周期 10—20 秒）と

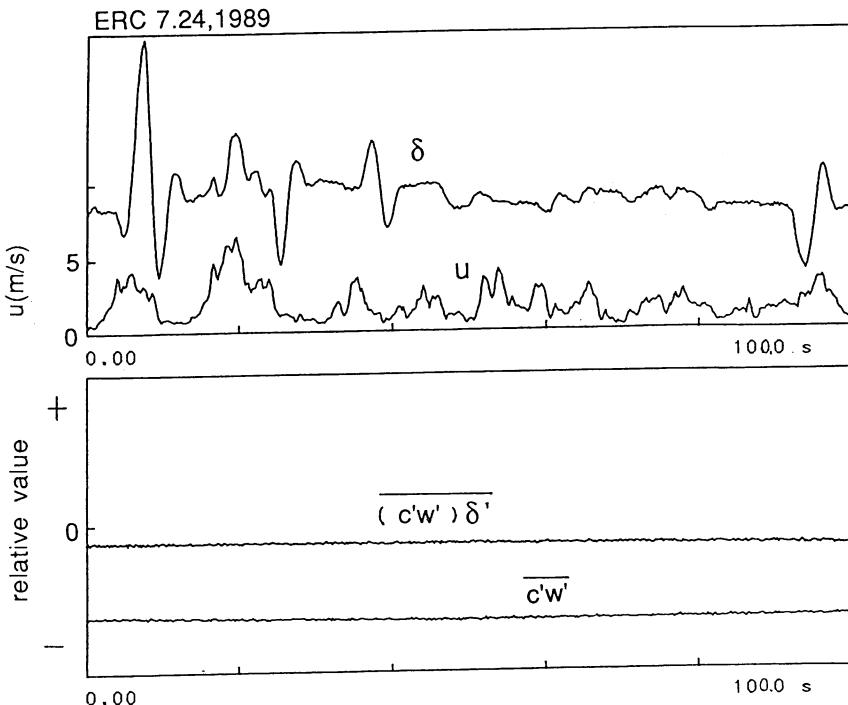
が重なっている。日中の群落内部や近傍の CO_2 濃度は群落上の大気濃度よりも低く（例えば矢吹, 1985），風速、特に鉛直下向きの風速が強まると、 CO_2 濃度の高い空気が群落内部に向かって輸送されるために、植被面の CO_2 濃度が一時的に急増し、第11図に示されるような間欠的な濃度変動が観測されると考えられる。その後、植物による吸収などのため CO_2 濃度は除々に低下し、低周波の変動となっている。また、 CO_2 flux ($\bar{c'w'}$) は連続的に下向きであり、 CO_2 が群落内部に取り込まれていることが分かる。

次に、 CO_2 flux に及ぼすアカマツの揺らぎの影響について検討する。第13図に 7 月 24 日の 13 時頃のアカマツの揺らぎ (δ)、 CO_2 flux ($\bar{c'w'}$)、及び揺らぎと CO_2 flux の共分散 ($\bar{c'w'}\delta'$) を示す。 CO_2 flux は 100 秒以上連続して負の値であり、 CO_2 が群落内に吸収されている。また、flux と揺らぎとの共分散も連続的に負である。したがって、アカマツ群落においては揺らぎと CO_2 flux とは相関が高く、水稻群落に比べて揺らぎが特質輸送に深く関係していることが分かる。

そこで次に、同様な光条件下で揺らぎがみられな



第12図 アカマツ群落における水平、鉛直風速と CO_2 濃度、 CO_2 flux の時系列変動（1989. 7. 24）



第13図 アカマツの揺らぎ δ と CO_2 flux の時系列変動 (1989. 7. 24)

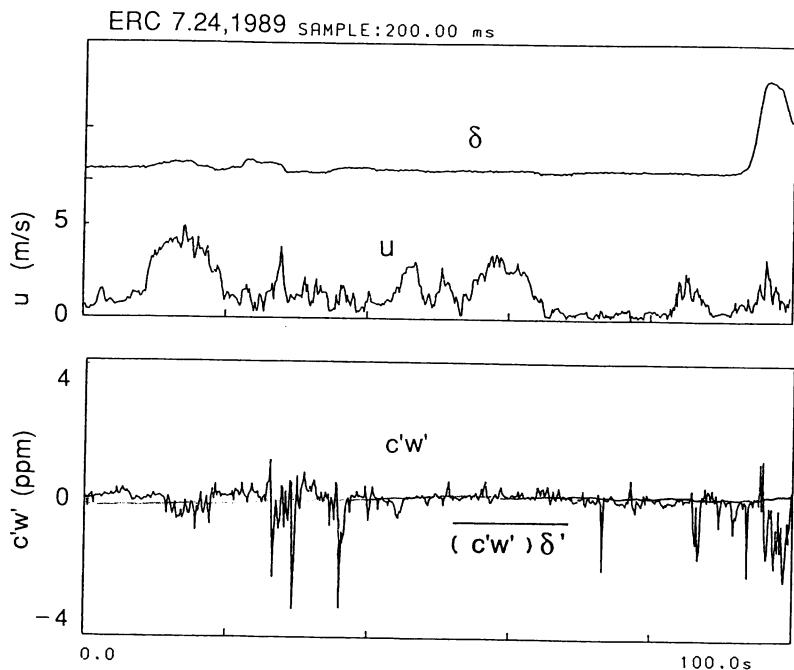
い場合の CO_2 flux と揺らぎとの関係について調べた。結果を第14図に示す。水平、鉛直方向の風速はある程度変動しているにもかかわらず、 CO_2 濃度と鉛直風速の変動成分の積 $c'w'$ は小さく、その時間平均である flux $\overline{c'w'}$ 、および flux と揺らぎとの相関 $(\overline{c'w'})\delta'$ はほとんど 0 である (flux $\overline{c'w'}$ は煩雑を避けるために図示していない)。第13、14図にみられるように、アカマツが揺らぐ場合と揺らがない場合の CO_2 flux と δ との相関に大きい差があることから、アカマツではその揺らぎが物質輸送を増大させる可能性が大きいことが分かる。

そこで、さらに、揺らぎの大きさと flux との関係を調べたのが第15図である。この時の日射強度は $270 - 400 \text{ W m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であった。ばらつきがみられるものの全体的には、揺らぎが大きくなると下向きの CO_2 flux が大きくなる傾向が認められる。また、先に述べたように、揺らぎの大きさと鉛直風速 w の変動との間に顕著な相関がみられなかったことから、アカマツ

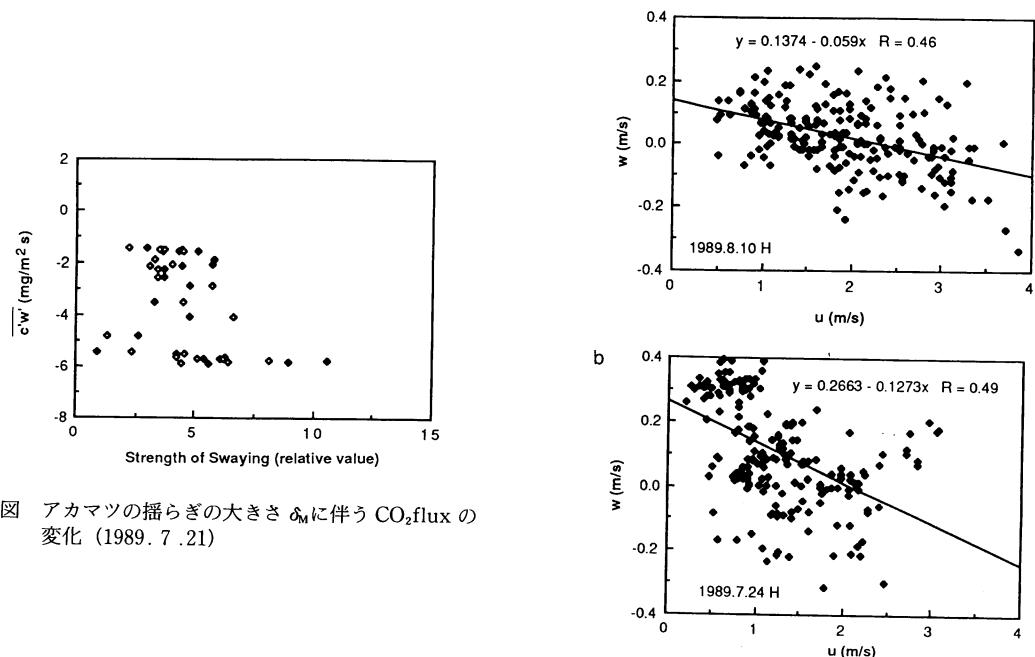
群落においては幹が大きく揺らくほど flux は増大する傾向にあることがわかる。

6. 水稲群落とアカマツ群落における乱流輸送特性の検討

出穂期から登熟期においては、水稲の揺れと CO_2 flux との相関はほとんど認められなかつたが、アカマツの場合には、水稲よりも揺らぎと flux との相関が高かつた。また、アカマツ群落上の風速変動の周期は水稲群落のそれよりも長かつた。これらのこととは、群落構造と気流との相互作用で形成される群落境界層内の乱流構造、すなわち渦スケールの差異が影響していると考えられる。そこで、両群落上の鉛直風速 (w) と水平方向の風速 (u) をプロットし、両者の比 (w/u) を求めて比較した (第16図)。 w/u はアカマツ群落の方が水稲群落の約 2 倍の大きさとなつたことから、水稲群落上の渦に比べてアカマツ群落上の渦が鉛直方向に大きいと考えられる。



第14図 アカマツの揺らぎ δ と CO₂flux の時系列変動 (1989. 7. 24)



第15図 アカマツの揺らぎの大きさ δ_M に伴う CO_2flux の変化 (1989. 7. 21)

第16図 水稻群落 (a) とアカマツ群落 (b) の水平風速 u と鉛直風速 w との関係

このような違いは、群落の広さ、高さ、その粗さなどの表面状態の違いにより生じると考えられる。アカマツは水稻に比べて樹高が高く、水稻が最も高かった時期と比較しても約13倍の群落高さを持つ。また、水稻はほぼ均一に整然と植えられ、その群落高さに局所的な違いはみられないが、アカマツ群落は自然林で、その密度や樹高に局所的なばらつきがあり植被面にはかなりの凹凸がみられた。このような違いが群落上の気流に大きく作用し、アカマツ群落の乱流規模を大きくし、また、水稻群落上に比べて水平スケールよりも鉛直方向に発達した渦を生じさせたものと考えられる。

水稻群落上においては渦スケールが小さく、鉛直方向の変動幅が小さいために、水平方向の流れに対して鉛直方向の変動周期が短く、エネルギーも小さい。このため、鉛直風速変動が水稻の稈の揺らぎに作用するまでに至らず、水稻の揺らぎは水平方向の風速に大きく依存したといえる。また、アカマツ群落上の渦スケールは水稻より大きく、水平、鉛直方向にある程度の幅を持っている。そして、それぞれの変動周期がアカマツの固有振動周期と比較的近い場合に、アカマツは双方の風速に依存して揺らぎ、乱流の規模も水稻より大きいものとなり flux も増大したと考えられる。このようなアカマツ群落と気流との相互作用の結果、アカマツ林における flux と揺らぎとの間の相関は水稻に比べて高い結果となったと考えられる。

7. まとめ

水稻群落とアカマツ群落において、風速変動や植物の揺らぎ、CO₂濃度変動、群落構造の経時変化などの測定を行ない乱流輸送について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 水稻の生育に伴う群落構造の変化により、稈の揺らぎ方に違いが認められた。特に出穂前、登熟期、刈り取り前で、大きく異なる。
- 2) 水稻の揺らぎは主に水平方向の風速変動により引き起こされ、揺らぎの大きさは平均風速に依存した。
- 3) 出穂期の水稻群落では、稈の揺らぎが CO₂flux を

増大させるが、登熟期は水稻の周期的な揺らぎが flux を増加させるような影響は顕著でなかった。

4) アカマツの揺らぎは水平、鉛直両方向の風速変動に依存し、揺らぎの大きさは平均風速には影響されない。

5) アカマツの揺らぎは風速依存性が低く、CO₂flux は群落の揺らぎにより増大した。

本研究における測器の借用や観測の実施にあたり、谷口真人技官をはじめ筑波大学水理実験センターの皆様にご協力頂きました。また、観測には鳥谷均・那須野正明・廣田雅之・斎藤嘉一氏の協力を得ました。水稻の栽培管理やサンプリングには農業環境技術研究所業務科の方々の協力を得ました。これらの方々に感謝致します。

引用文献

- 佐藤 勉・米谷俊彦・大滝英治 (1980) : 歪計による植物の揺れの測定、農業気象、36, 103-107.
- 竹内清秀・近藤純正 (1981) : 大気科学講座1, 地表に近い大気、東京大学出版、226p.
- 谷 信輝 (1960) : 耕地上の風速の測定結果について、農業気象、16, 89-93.
- 中村隆英・新家健精・美添泰人・豊田 敬 (1984) : 統計入門、東京大学出版、東京、276p.
- 林 陽生・那須野正明・原薙芳信・鳥谷 均 (1989) : 群落外環境の変化に対するアカマツ群落の動的応答、1. アカマツ群落内外の温度場の特徴、水理実験センター報告、13, 97-103.
- 林 陽生 (1987) : 2次元歪センサーを利用した穂揺れの測定、水理実験センター報告、11, 105-109.
- 原薙芳信・林 陽生 (1989a) : 植物群落の空気力学的パラメータの特徴、農業気象学会1989年度大会講演要旨、96-67.
- 原薙芳信・林 陽生・那須野正明・西沢利栄 (1989b) : 群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答 2. 赤松群落の乱流輸送に関する空気力学的パラメータの特徴、水理実験センター報告、13, 105-112.
- 原薙芳信・村上智美・及川武久 (1990) : 気流変動と植物群落の相互作用 1. 植物群落構造の差異がフラッターカスや群落抵抗係数に及ぼす影響、水理実験センター報告、14, 1-14.
- 日野幹雄 (1977) : スペクトル解析、朝倉書店、東京、300

p.

米谷俊彦(1981)：小型の台風7921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。

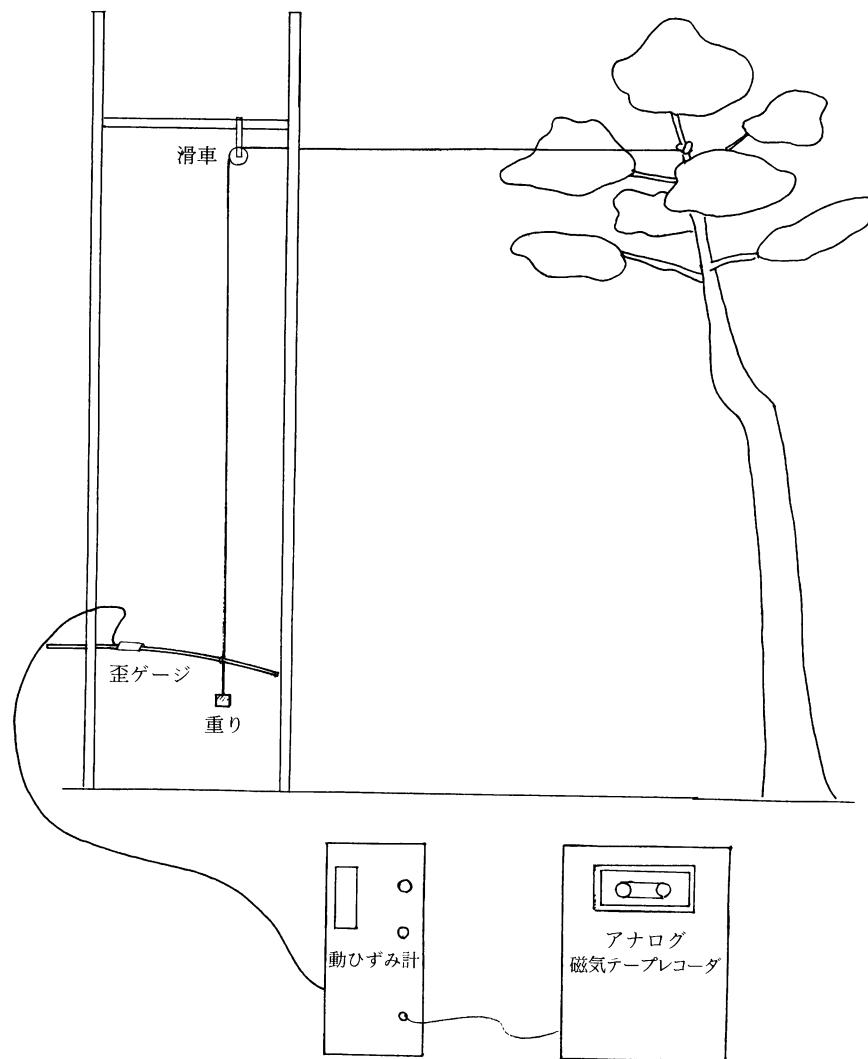
米谷俊彦・瀬尾琢朗(1983)：小麦畠における風速、気圧

変動と植物の揺れの測定、農業気象、39、165—

171。

矢吹万寿(1985)：植物の動的環境、朝倉書店、東京、

200p.



付図 アカマツの揺らぎの測定