

水田上の接地気層における運動量の 鉛直乱流輸送について(2)

米 谷 俊 彦

第1報(米谷 1977)では兎島湾干拓地にある岡山大学農学部付属農場の水田上の二高度に超音波風速計を設置して風速変動の観測を行ない、それらの資料を用いて運動量の直接測定を行なった。気層の安定度と運動量輸送特性についての解析結果から、中立成層状態で特に顕著な植被層特有の輸送機構のあることが示された。そこで、この論文では再び水田上の二高度に超音波風速計を設置して同様の観測を行ない、中立に近い成層状態における群落上の運動量輸送特性、運動量の鉛直フラックス収支について検討を行なってみた。

観測は1976年8月上旬に岡山大学農業生物研究所の圃場の水田上で行なった。観測資料の集録処理には前回同様微細気象観測用オフラインデータ集録装置(米谷・瀬尾 1976)を利用した。以下に観測の概要と解析結果について述べる。

なお、前報では垂直フラックス、垂直輸送量等の表現を用いた。しかし鉛直フラックス、鉛直輸送量等の表現が慣用されており適切と考え本論文においては表現を改めている。

本研究のとりまとめに種々ご教示いただいた京都大学教授山元龍三郎博士、光田寧博士、大阪府立大学教授伊藤昭三博士、ならびに本研究の実施に際し援助、助言をいただいた岡山大学教授瀬尾琢郎博士に対して深く感謝の意を表す。また観測の際に協力いただいた岡山大学教養部大滝英治助教および当時大学院生であった竹内敬二氏に感謝する。観測場所を快く提供いただいた本研究所の農場の方々にも深謝の意を表わす。

観測資料および解析方法

1976年8月上旬に農業生物研究所の水田上(植被の高さ約60cm)にステンレスのパイプを組み合わせて支柱を作り、その上に測器を設置して観測を行なった。観測期間中は曇り勝ちであったため、中立に近い状態における資料を得ることができた。また、南よりの風を選んだため吹送距離は大部分80~90m程度であった。

前回と同様に、水平風速測定用の二次元超音波風速計と鉛直成分用の一次元超音波風速計を三次元に組み合わせて地面上75cmと205cmに設置して、二高度における風速変動 u_x , u_y , w の測定を行なった。ここで u_x , u_y は直交する二方向の水平風速成分、 w は鉛直方向の風速成分である。また、風速の測定以外に銅コンスタンタン線で作った熱電対を用いて、1.2mの高度で乾湿球温度 T_d , T_w の測定を行なった。その内で超音波風速

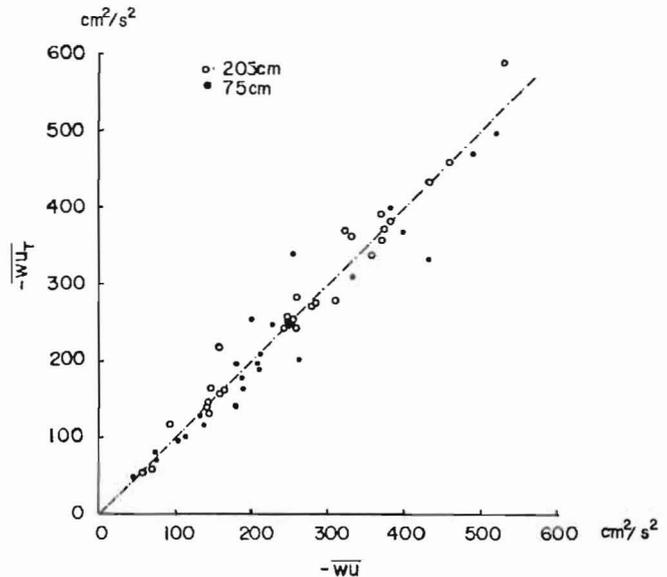
計と乾球温度計からの信号を7チャンネルのアナログテープレコーダ (TEAC R510) に記録した。また、安定度パラメータを評価するために $\overline{wT_d}$, $\overline{wT_w}$ の計算をフラックスメータを用いてアナログ的に行なった。アナログテープに記録したデータの集録処理法は前報 (米谷 1977) と全く同様である。運動量に関する統計量は15分毎に区切って計算を行った。観測期間中はほぼ中立に近い成層状態であったので、15分の観測時間でも統計的な誤差は比較的小さいと考えられる。

解析結果と考察

1. 運動量の鉛直乱流輸送量

運動量の鉛直乱流輸送量は三次元に組み合わせた超音波風速計によって測定された直交する水平風速成分 u_x , u_y と鉛直風速成分 w を用いて評価することができる。定常で水平方向に一様な状態を仮定すると、単位時間に単位面積を通して輸送される単位質量あたりの鉛直方向の運動量輸送量は \overline{uw} で表わされる。ここで、 u , w は一般流方向および鉛直方向の風速変動であり、 $\bar{(\quad)}$

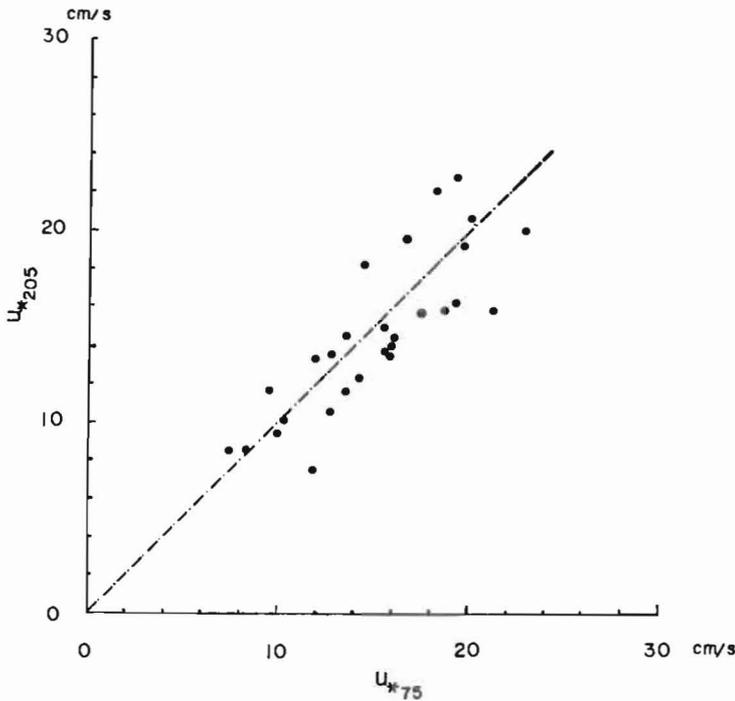
は時間平均を表わす。 $|\overline{uw}|$ と $|\overline{vw}|$ の大きさの比較等から、観測場所の一様性は今回の観測場所においても比較的良くみだされてきた。なお、 v は一般流に直角な方向の水平風速変動成分である。一方、しばしば運動量の輸送量の測定を行なう際に、ベクトル風速 U を用いずにスカラー風速 $U_T (\equiv \sqrt{u_x^2 + u_y^2})$ の変動値 u_T を用いることがある。そこで \overline{uw} と $\overline{u_T w}$ の比較を行ってみた。結果は第1図に示すとおりである。相当にばらつきが大きいものの系統的な相違はみられず、一対一の対応を示している。この結果も観測場所がほぼ一様であることを意味しているように思われる。



第1図 運動量輸送量 \overline{uw} と $\overline{u_T w}$ の比較

いものの系統的な相違はみられず、一対一の対応を示している。この結果も観測場所がほぼ一様であることを意味しているように思われる。

運動量輸送量から評価された摩擦速度 $u_* (\equiv \sqrt{-\overline{uw}})$ の75 cm と205 cm の値の比較を第2図に示す。前回同様にばらつきが幾分みられるものの、二高度での運動量輸送量には系統的な相違は見い出せない。そこで、以下では植物群落上の接地気層における特徴的な速度 u_* として二高度の u_* の平均値を用いることにする。



第2図 75 cm と 205 cm における摩擦速度 u_* の比較

2. 植物群落の空気力学的パラメータ

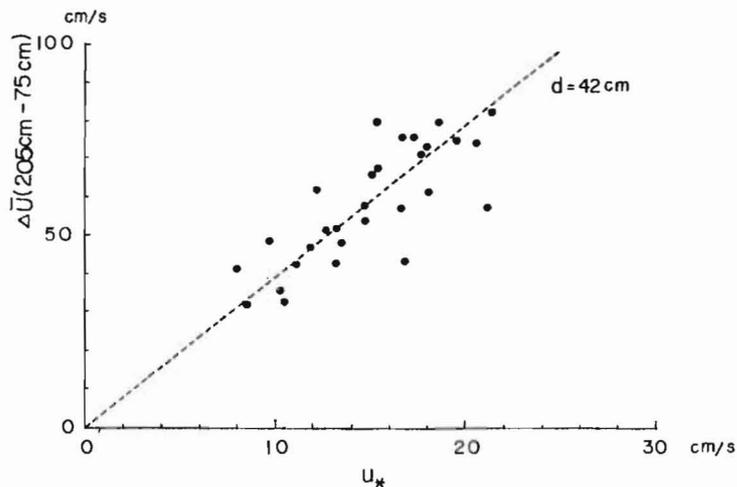
高度 z での平均風速 $\bar{u}(z)$ は中立状態では、次のような対数則に従うことが良く知られている。

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (1)$$

ここで κ はカルマン定数 (≈ 0.4) である。 z_0 は粗度長、 d は零面変位量であり、共に群落の性質を特徴づける空気力学的パラメータである。二高度 z_1, z_2 の平均風速差は

$$d\bar{u}(z_2-z_1) = \bar{u}(z_2) - \bar{u}(z_1) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z_2-d}{z_1-d} \quad (2)$$

で表わされる。従って (2) 式から $d\bar{u}(z_2-z_1), u_*, z_2, z_1$ を用いて d の値を決定することができる。更に d の値と一高度での平均風速がわかれば、(1) 式から z_0 を求めることができる。第3図に $d\bar{u}$ と u_* の関係を示す。(2) 式から予想されるように u_* の増加につれて $d\bar{u}$ が増加する傾向が認められる。同様に、第4図に 2.1 m での平均風速と u_* の関係を示す。平均風速の増加につれて摩擦速度 u_* が増加する傾向は、第(1)式に示すとおりである。第3図、第4図ともに比例関係を示しており、これらの関係から求めた平均的な z_0 および d の値はそれぞれ 8.3 cm, 42 cm である。しかし、図からも明らかなように、ばらつきが相当に大きい。これらのばらつきは主に畝に相対的な風向変化等の気象現象の相違、風速変化に伴う植被の揺れ、測定誤差等によっていると考えられる。ここでは

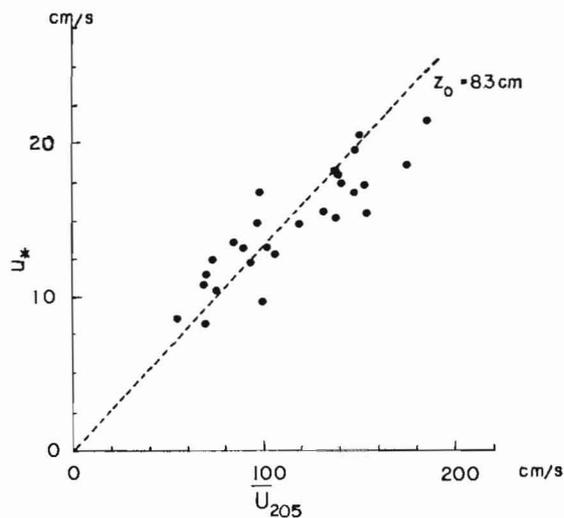


第3図 平均風速差 $\Delta \bar{u}$ と摩擦速度 u_* の間の関係

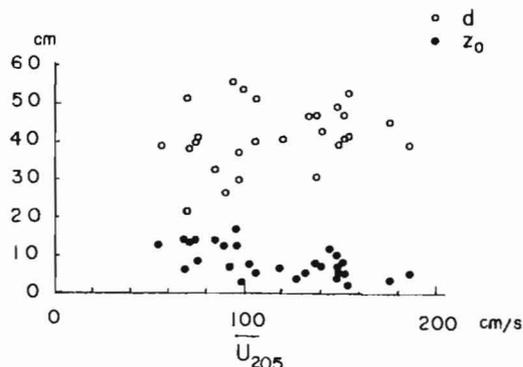
平均的な植被の高さが 60 cm であっても、 z_0 や d が時々刻々異なっていると仮定して 15 分毎の値を求めてみた。第 5 図に 210 cm での平均風速 \bar{u} と z_0 , d の関係を示す。 z_0 は風速と共に減少する傾向がみられるが、 d はばらつきが大きくて変化の傾向は明らかではない。

3. 植物群落上の乱流特性の高さによる依存性

前報では、運動量の輸送特性に関する研究を行ない、植被に近い気層において特に下降流に伴う運動量の間歇的な輸送が中立時に最も卓越していることが示された。そこで、中立成層状態における植被層近くの乱流特性についてさらに検討し、運動量輸送特性との関係について調べてみることにした。著者は別の論文 (Maitani 1978) で、群落上の乱流特性の高さに対する依存性を表現するために、植被の高さ H で無次元化し



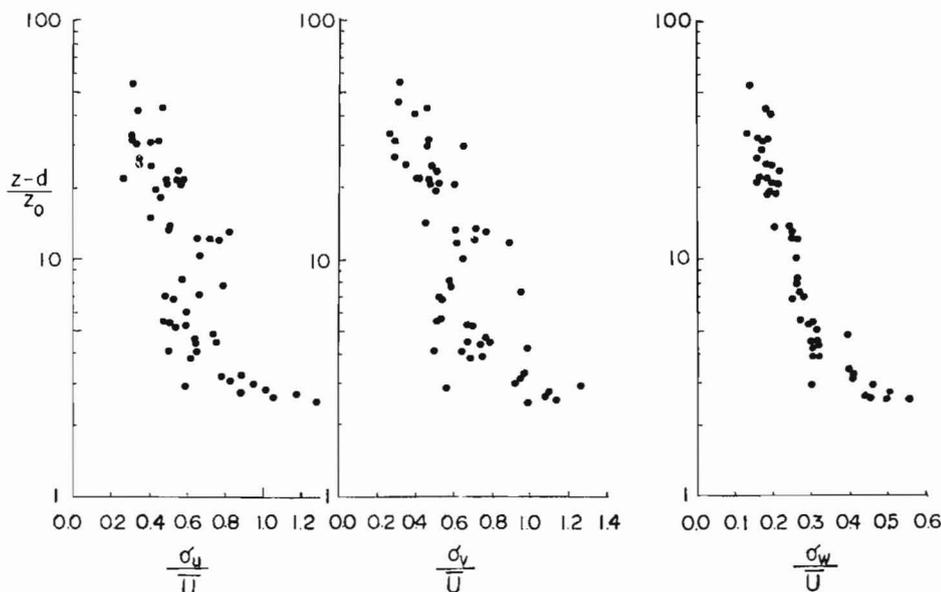
第4図 平均風速 \bar{u}_{205} と摩擦速度 u_* の間の関係



第5図 平均風速 \bar{u}_{205} と z_0 , d の間の関係

た高さ z/H を用いた。この z/H によっても、ある程度迄高さに対する依存性を表現できるものの、植被とは異なる表面上の乱流特性を比較するには必ずしも十分とはいえない。また、 H と z が一定であっても、群落を構成する植物の栽植密度や栽培様式によって表面状態が異なるばかりでなく、風向や風速等の気象条件によっても乱流構造が異なる可能性のあることが十分予想される。一方、植物群落のような荒い表面状態を特徴づけるパラメータとして、零面変位量と粗度長が用いられることは、前節の対数則の所で述べたとおりである。この対数則は植物群落のような荒い表面に於ける平均風速のプロファイルを記述するための特徴的な長さのスケールが $z-d$ と z_0 であることを示しているとも解釈できる。つまり、このことは特徴的な長さのスケールとして、単なる幾何学的な測定高度 z のかわりに植被の存在によって基準高度が d だけ変位していると考えて $(z-d)$ をとり、表面の荒さを決定するパラメータとして植被の高さ H のかわりに空気力学的なパラメータ z_0 を選んでいることを意味している。これら二つの長さのスケールから作られる無次元パラメータは $(z-d)/z_0$ であり、以下ではこのパラメータを用いて整理してみることとした。このパラメータは対数則のなり立つ場合には $e^{\frac{ku}{u_*}}$ に等しく、平均風速 \bar{u} と u_* の値から決定することができる。また、もし d および z_0 が一定な表面上であれば測定高度の増加と共に増加する。以下に風速変動の三成分と u, v, w の乱れの強さ、歪み度、尖り度と $(z-d)/z_0$ の間の関係を示す。

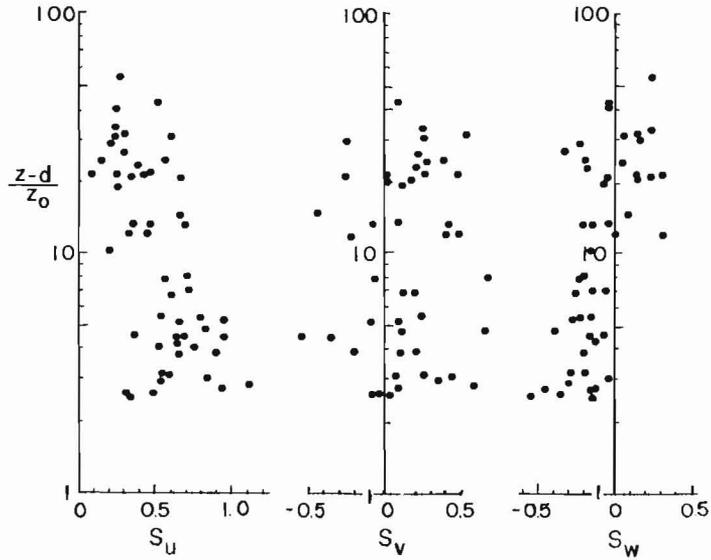
第6図は u, v, w の標準偏差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ を平均風速 \bar{u} で無次元化した乱れの強さ $\sigma_u/\bar{u}, \sigma_v/\bar{u}, \sigma_w/\bar{u}$ と $(z-d)/z_0$ の関係を示す。 $z=75\text{ cm}, 205\text{ cm}$ と固定しているにもかかわらず、 z_0 および d の値が変化しているために、 $(z-d)/z_0$ の値は2から50迄の範囲に広がっている。乱れの強さは $(z-d)/z_0 \approx 2\sim 3$ の所で最も大きい値を持ち $\sigma_u/\bar{u} \approx 1.2, \sigma_v/\bar{u} \approx 1.2, \sigma_w/\bar{u} \approx 0.5$ であり、 $(z-d)/z_0$ の増加と共に減少していることがわかる。これは植



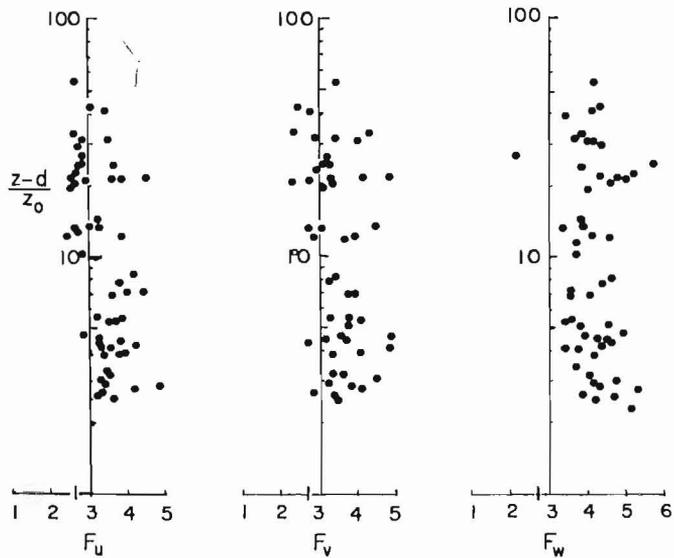
第6図 乱れの強さ $\sigma_u/\bar{u}, \sigma_v/\bar{u}, \sigma_w/\bar{u}$ と $(z-d)/z_0$ の間の関係

被直上での急速な平均風速の減少に比較して風速変動の減少の割合が小さいことを意味している。従来から植被上では z/H の値が小さくなるとともに乱れの強さが大きくなるという傾向が得られている。この傾向は測定高度が零面変位に近づけば近づくほど、または植被の粗度が大きくなればなるほど、乱れの強さが大きくなることと対応していると考えられる。

u, v, w 成分の歪み度 $S_u(≡\overline{u^3}/\sigma_u^3)$, $S_v(≡\overline{v^3}/\sigma_v^3)$, $S_w(≡\overline{w^3}/\sigma_w^3)$ の高さに対する依



第7図 歪み度 S_u, S_v, S_w と $(z-d)/z_0$ の間の関係



第8図 尖り度 F_u, F_v, F_w と $(z-d)/z_0$ の間の関係

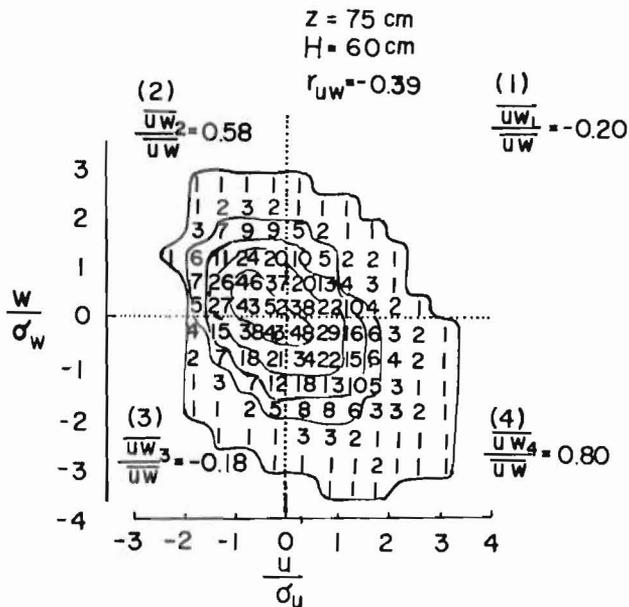
存性を示す(第7図)。 u 成分では $(z-d)/z_0$ のすべての値に対して正の歪みを示し、 $(z-d)z_0 \approx 2 \sim 3$ 付近での 1.0 から $(z-d)/z_0$ の増加と共に 0 近くまで減少している。 v 成分については $(z-d)/z_0$ に対する依存性は認められない。 w 成分は $(z-d)/z_0 < 10$ で負、 $(z-d)/z_0 > 10$ では 0 か正の値をとっている。 これらの結果は前の論文 (Maitani 1978) で、 z/H に対して示した数種類の群落上での平均的な傾向と一致している。 特に、 u, w の歪み度は後に示す運動量輸送過程にも密接に関係しており、植被層近傍で顕著な特性を示す。

u, v, w 成分の尖り度 $F_u(= \overline{u^4}/\sigma_u^4)$, $F_v(= \overline{v^4}/\sigma_v^4)$, $F_w(= \overline{w^4}/\sigma_w^4)$ の高度分布を第8図に示す。 u, v 成分の尖り度は、ここで得られた $(z-d)/z_0 < 10$ の範囲では 3 より大きく、 $(z-d)/z_0$ の増加と共に減少し、 $(z-d)/z_0 > 10$ では 3 のまわりでばらついている。 一方、 w 成分ではほとんどすべて 3 より大きく $(z-d)/z_0$ に対する依存性は明瞭ではない。

4. 植物群落上の運動量輸送特性

前節に示した群落上での風速変動の乱流特性に関係して、運動量輸送特性にもいくつかの特徴がみられる。 第9図に $z=75$ cm における u, w の二次元結合確率密度分布を示す。

前報 (米谷 1977) に示した水田上 120 cm の高度で $z/H=1.5$ における分布に類似しており、 u, w は負の相関を示し相関係数は -0.39 である。 また、 u の正の歪みと w の負の歪みに対応して、第2象限に比べて第4象限側に広がった分布を示している。 このような分布に対応して、第1象限から第4象限までの各象限での運動量輸送量への寄与の割り合いは、全輸送量を 1.0 とすると、それぞれ $-0.20, 0.58, -0.18, 0.80$ となっている。 第2象限と第4象限が運動量輸送量に正の寄与をし、第4象限と第2象限の比 $\overline{w u_4}/\overline{w u_2}$ をと

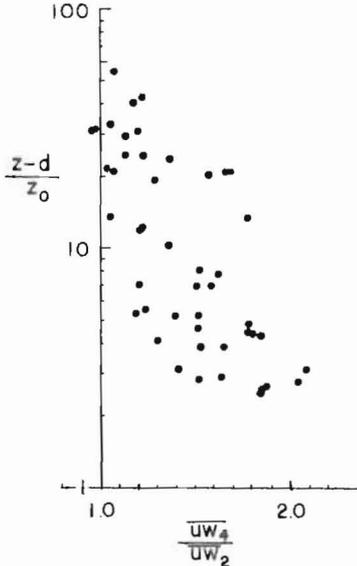


第9図 水平風速変動 u と鉛直風速変動 w の二次元結合確率密度分布 (数値は 0.1% の単位で示されている)

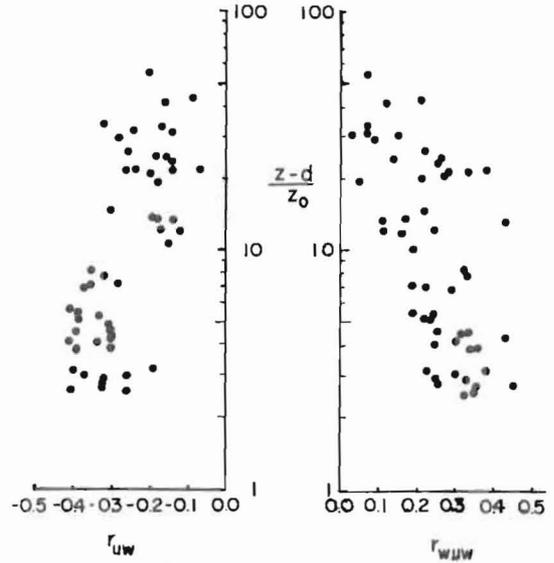
ると約 1.4 になっている。つまり、下降流 ($w < 0$) で平均風速より強い風 ($u > 0$) の場合の方が、上昇流 ($w > 0$) で平均風速より弱い風 ($u < 0$) の場合より 4 割程度多くの運動量を下向きに輸送していることになる。 また、第1象限と第2象限の和 ($= 0.38$) は上昇流による全輸送量への寄与を表わし、第3および第4象限の和は下降流による寄与を表わしている。 上昇流による寄与の割り合いに比べて、下降流による寄与の割り合いが 1.5 倍

程度大きくなっており、前報の結果と一致している。

つぎに運動量輸送に正の寄与をする第2象限と第4象限の輸送量の比 $\overline{uw}_4/\overline{uw}_2$ と $(z-d)/z_0$ の間の関係を第10図に示す。この比は1.0より大きく、 $(z-d)/z_0=3$ 付近ではその比の値は20に近い値をとる場合もあり、 $(z-d)/z_0$ の増加と共に減少する傾向に



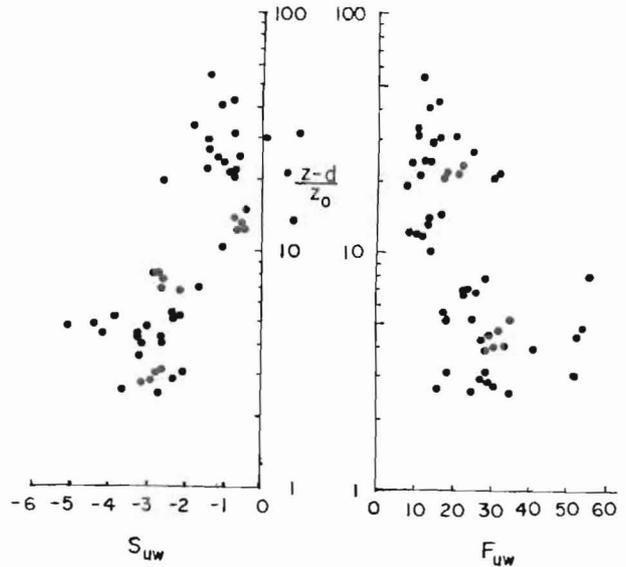
第10図 第4象限と第2象限の運動量輸送量の比 $\overline{uw}_4/\overline{uw}_2$ と $(z-d)/z_0$ の間の関係



第11図 運動量輸送量に関する無次元量である相関係数 r_{uw} , r_{wuw} と $(z-d)/z_0$ の関係

あり、 $(z-d)/z_0 \approx 20 \sim 30$ 近くで1.0に近づいている。このことは、植被近傍での u 成分の正の歪み、 w 成分の負の歪みに関係して、下降流による輸送が特に顕著なことを表わしている。

第11図は運動量輸送量に関する無次元量として、 u と w の相関係数 $r_{uw} (\equiv \overline{uw}/\sigma_u\sigma_w)$ 、 w と wu の相関係数 $r_{wuw} (\equiv \overline{wuw}/\sigma_w\sigma_{uw})$ を示す。 u と w の相関係数は $(z-d)/z_0=3$ 付近での $-0.4 \sim -0.3$ の値から $(z-d)/z_0$ の増加と共に $-0.3 \sim -0.1$ の値まで幾分増加している。これは二高度で u_* が一定



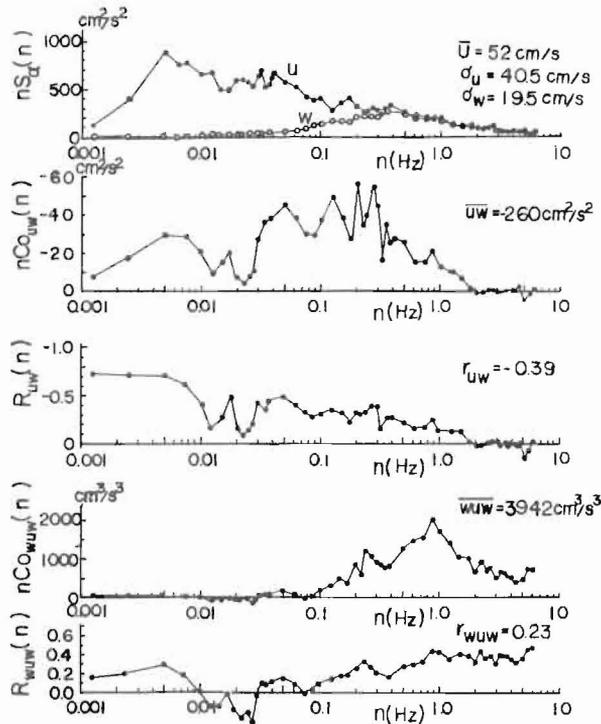
第12図 運動量輸送量に関する無次元量である uw の歪み度 S_{uw} および尖り度 F_{uw} と $(z-d)/z_0$ の間の関係

になっているので、 σ_u , σ_w が高度方向に増加していることに対応している。 w と uw の相関係数は前報にも述べたように、運動量輸送量への鉛直速度の寄与を示すパラメータであるばかりでなく、運動量の鉛直輸送量の鉛直フラックスに関係する量でもある。 $2 < (z-d)/z_0 < 50$ の範囲ではすべて正の値をとり、下向き鉛直速度による寄与が大きいという結果に対応している。また、同時にこの結果は運動量輸送量の鉛直フラックス (\overline{wuw}) が上向きになっていることを示している。これは Wyngaard *et al.* (1971) が以前に、切り株畑上の比較的滑らかな観測場所で中立時に得ている 0 または小さい下向き輸送とは異なっている。この相違は $(z-d)/z_0$ の値が Wyngaard *et al.* (1971) の場合には、今回の観測の場合より 10 倍程度大きいことによっていると考えられる。

第 12 図には瞬間的な輸送量 uw の分布の歪み度 $S_{uw}(\equiv \overline{uw^3}/\sigma_{uw}^3)$ と尖り度 $F_{uw}(\equiv \overline{uw^4}/\sigma_{uw}^4)$ を示す。 uw の歪み度は u と w の分布の歪みが特に顕著な $(z-d)/z_0=10$ 以下で負の大きい値を示し、高さとともに歪みが小さくなる傾向を示している。同様の傾向は uw の尖り度の分布にもみられ、 $(z-d)/z_0$ の値が小さい時に尖り度が正規分布の場合の 3 よりはるかに大きく、 $(z-d)/z_0$ の増加とともに減少している。これらのことは下向き輸送が極めて間歇的に行なわれていることを示している。

このように、運動量輸送には群落上に特有の性質がいくつかみられることがわかった。さらに、運動量輸送量の周波数毎の輸送特性を調べるためにスペクトル解析を行なった結果について示す(第 13 図)。測定高度 75 cm で平均風速 52 cm/s の場合の測定結果である。この図から群落上の典型的なスペクトルの相互関係を知ることができる。上から順に u , w のパワー

スペクトル $S_u(n)$, $S_w(n)$, u と w の間のコスベクトル $nCo_{uw}(n)$, u と w の周波数毎の相関係数 $R_{uw}(n)(\equiv Co_{uw}(n)/\sqrt{S_u(n)S_w(n)})$, w と uw の間のコスベクトル $nCo_{wuw}(n)$, w と uw の間の周波数別の相関係数 $R_{wuw}(n)(\equiv Co_{wuw}(n)/\sqrt{S_w(n)S_{uw}(n)})$ を示して



第 13 図 運動量輸送量に関するスペクトルの一例

$S_u(n)$, $S_w(n)$; u と w のパワースペクトル

$Co_{uw}(n)$; u と w の間のコスベクトル

$R_{uw}(n)$; u と w の間のスペクトル相関係数

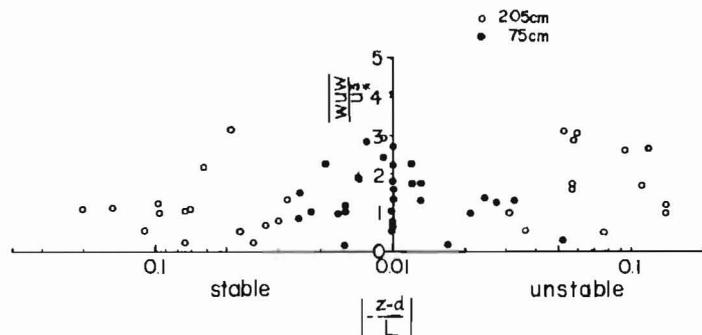
$Co_{wuw}(n)$; w と uw の間のコスベクトル

$R_{wuw}(n)$; w と uw の間のスペクトル相関係数

いる。ここで n は周波数を示す。風速変動のうち u 成分は w 成分にくらべて圧倒的に大きいエネルギーを持ち、低周波数域 ($0.04 \text{ Hz} - 0.1 \text{ Hz}$) で寄与が大きいものに対して、鉛直速度 w は 0.1 Hz 以上でエネルギーに大きく寄与する部分のあることがわかる。これらの u と w のスペクトルの形に対応して運動量輸送量への寄与を表わすコスベクトル $nCo_{uw}(n)$ は 0.02 Hz 付近にギャップを持ち、これより低周波数部分の寄与は u 成分に関係し、それより高周波数部分では w 成分の増加に伴っていることがわかる。 1.0 Hz 以上の高周波数側では u, w のパワースペクトルの減少ばかりでなく u, w 成分の間の相関が小さくなっていることに対応して、コスベクトルは減少している。 0.02 Hz 付近のコスベクトルの特徴はスペクトル相関係数 $R_{uw}(n)$ にもみられるが、物理的な原因は明らかではない。第 13 図の下段には運動量輸送量の鉛直フラックスへの寄与を表わすコスベクトル $nCo_{www}(n)$ と w と uw の相関係数 $R_{www}(n)$ が示されている。著しい特徴は運動量輸送量の鉛直フラックスに寄与する周波数が 0.1 Hz より高周波数側にあり、その向きが上向きになっていることである。このピークは w 成分のパワースペクトルのピークに対応しており、 $nCo_{www}(n)$ には u 成分に対応するようなピークは全くみられない。 w と uw の相関係数は $0.01 \sim 0.03 \text{ Hz}$ 付近で負の値をとる以外は正の値をとり、 1.0 Hz 以上では 0.4 以上の相関係数をもっている。また、 $R_{www}(n)$ の形は前報 (米谷 1977) に示した植被層近くの結果にも良く対応している。

5. 運動量の鉛直輸送量の鉛直フラックスとその発散

前節でも示した運動量の鉛直輸送量の鉛直フラックス \overline{wuw} を u_*^3 で無次元化した \overline{wuw}/u_*^3 と安定度パラメーター $(z-d)/L$ の関係を示す (第 14 図)。ここで、 L はモニ



第 14 図 無次元運動量輸送量の鉛直フラックス \overline{wuw}/u_*^3 と $(z-d)/L$ の関係

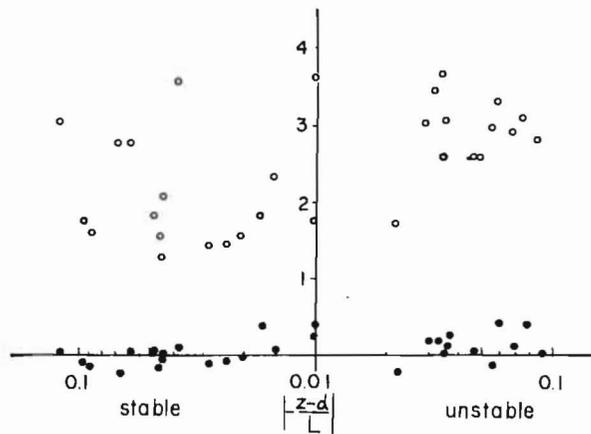
ソオブコフの安定度長である。解析した $(z-d)/L$ の範囲は極めてせまく、 $(z-d)/L < 0.1$ の範囲のものが大部分であるが、中立状態 $(z-d)/L = 0$ をはさんで安定、不安定の両側で鉛直フラックスの向きは変わらず共に正であり、その値の安定度に対する依存性は小さく、 $2 \sim 4$ の範囲にある。これらの結果は Wyngaard *et al.* (1971) の結果とその値のオーダは一致しているものの、符号が反対になっている。先にも述べたように $(z-d)/z_0$ の値の相違によって、このような不一致が生じたものと考えられる。Shaw (1977) は群落内

部で運動量の鉛直輸送量の鉛直フラックスが下向きになることを示唆しており、今回群落上で得られた下向きのフラックスは群落内部まで及んでいると予想される。

水平方向が一様で定常な状態での運動量輸送量の無次元収支式は、次のように書くことができる (たとえば Wyngaard *et al.* (1971) 参照)。

$$\frac{\kappa(z-d)}{u_*^3} w^2 \frac{d\bar{u}}{dz} - \frac{\kappa(z-d)}{u_*^3} \frac{g}{T} \bar{u}\bar{\theta} + \frac{\kappa(z-d)}{u_*^3} \frac{d\overline{wuw}}{dz} + \frac{\kappa(z-d)}{u_*^3} \frac{\overline{w\Delta p}}{\rho dz} + \frac{\kappa(z-d)}{u_*^3} \frac{u\Delta p}{\rho dz} = 0 \quad (3)$$

ここで g は重力の加速度, T は平均温度, θ は温度変動, ρ は空気の密度, p は静圧変動であり, 式の中の微分形は差分形で近似している。第一項は風速シャーによる生成項, 第二項は運動量輸送量の垂直フラックスの発散項であり, 第三項は浮力による生成または損失項, 残りの2項は静圧力と風速変動の間の相互作用を表わす項である。この観測で測定された項は第三項までであり, 圧力変動を含む項は測定されなかった。得られた結果は第15図に示されるように, 風速シャーによる生成項が圧倒的に大きく, 発散項は1割程度にすぎず, また, 浮力による生成項も中立成層近くでは極めて小さかった。従って, 中立成層状態では圧力を含む項がシャー生成項とほぼバランスしていると予想される。これらの結果は Wyngaard *et al.* (1971) の結果と一致している。



第15図 運動量輸送量の収支式中の風速シャーによる生成項 $\frac{\kappa(z-d)}{u_*^3} w^2 \frac{d\bar{u}}{dz}$ (○印) および運動量輸送量の鉛直フラックスの発散項 $\frac{\kappa(z-d)}{u_*^3} \frac{d\overline{wuw}}{dz}$ (●印) と $(z-d)/L$ の関係

摘 要

第1報 (米谷 1977) 同様, 水田上の二高度に超音波風速計を設置して風速変動の観測を行ない, 運動量の直接測定を行なって中立成層状態における群落上の輸送特性, 運動量輸送量の収支について, さらに検討を行なった。得られた結果のうち, 主なものを以下に示す。

1) 第1報同様, この観測においても二高度における運動量輸送量には系統的な相違はみられず, 一様性も比較的良くみたまされていることが確かめられた。

2) 中立成層状態で平均風速が対数則に従うと仮定して, 運動量輸送量と平均風速から評価された粗度長 z_0 および零面変位量 d の平均値はそれぞれ 8.3 cm, 42 cm であり, 植

被の高さ(約 60 cm)から推定されるものと矛盾していない、しかし、15 分毎に求めた値は相当に大きなばらつきを示しており、 z_0 は平均風速の増加と共に減少する傾向がみられた。

3) 無次元高さ $(z-d)/z_0$ と風速変動の三成分 u, v, w の乱れの強さ、歪み度、尖り度の関係をみると $(z-d)/z_0 < 10$ で乱れの強さが大きく、分布が正規分布から離れる傾向を示す等の顕著な群落特有の乱流特性がみられた。これらの群落特有の乱流特性は $(z-d)/z_0$ の増加と共に消失する傾向にあった。

4) 風速変動の植被上での特性に対応して、運動量の $(z-d)/z_0$ に対する特性も変化し、植被に近づくにつれて下降流に伴う間歇的な運動量の輸送が行なわれていることが示される。

5) この観測で得られた運動量輸送量の鉛直フラックス \overline{uw} の向きはすべて上向きであり、Wyngaard *et al.* (1971) の切り株畑上で得られた結果とは異なっているものの、Shaw (1977) の群落内部での測定結果とはその向きが一致している。おそらく、 \overline{uw} は $(z-d)/z_0$ が 100 程度の値で次第に 0 に近づき、それ以上の高度では 0 または負に変わることも予想される。したがって、この程度の高さまでは植被の影響が及んでいると考えられる。また、輸送に寄与する周波数帯は 0.1 Hz 以上にあり、運動量輸送量のコスベクトルよりも高周波数側にあり、鉛直風速成分の影響が特に著しいことがわかる。

6) 運動量輸送量の収支式について調べた結果によれば、風速シヤーによる生成項が運動量の鉛直輸送量の鉛直フラックスの発散項に比較して大きく、圧力変動と風速変動の相互作用による項の大きいことが予想される。これらの結果は Wyngaard *et al.* (1971) の結果とも一致している。

文 献

- 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. 1977. 水田上の接地気層における運動量の垂直乱流輸送について. 農学研究 56: 119-131.
- Maitani, T. 1978. Downward transport of turbulent kinetic energy in the surface layer over plant canopies, *Boundary-Layer Meteorol.* 14: 571-584.
- Shaw, R. H. 1977. Secondary wind speed maxima inside plant canopies. *J. Appl. Meteor.* 514-521.
- Wyngaard, J. C., Coté, O. R. and Izumi, Y. 1971. Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress and heat flux. *J. Atmos. Sci.* 28: 1171-1182.