

## 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

米 谷 俊 彦

植物群落上における運動量の垂直乱流輸送量は大気の運動を支配しているばかりでなく熱や水蒸気等の物理量の輸送、植物の揺れや倒伏等にも関係しているために極めて重要な環境要素の一つである。しかし正確な風速変動の測定が困難な上に解析処理が面倒なこともあり群落上における運動量の垂直乱流輸送量の直接測定が行なわれた例は数少ない。また、直接測定された幾つかの例 (Seo *et al.* 1972, Inoue *et al.* 1975) においても簡単な仮定のもとに種々の簡略化がなされている。この研究では三次元に組み合わせた超音波風速計を水田上の二高度に設置して風速変動を測定し運動量輸送量の直接測定を試みた。以下では二高度における輸送量の比較を行なうと共に群落上の接地気層における運動量輸送の特性について検討を行なう。

観測は1974年9月上旬に岡山県玉野市の児島湾干拓地にある岡山大学農学部附属農場の水田上で行なった。観測資料の集録処理には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。以下に観測方法および解析結果について述べる。

本研究に当たりつねに変わぬ御指導を贈わった当研究室の瀬尾琢郎教授に謝意を表したい。また、観測の準備及び観測の際に協力戴いた教養部大滝英治助教授ならびに当研究室の平岡直子氏に深く感謝する。又観測を行なうにあたり心よく観測場所を提供戴いた岡山大学農学部附属農場の三宅靖人氏に深謝の意を表する。

### 観測資料および解析方法

1974年9月上旬に岡山大学附属農場の水田のほぼ中央に6mの塔を立てその塔に測器を設置して観測を行なった。観測期間(9月6日~7日)の前半は曇って風が強く後半は風の穏やかな好天であったために中立から比較的幅広い不安定成層状態における資料を得ることができた。解析に用いたいずれの風向に対しても吹送距離は100m以上であった。この時期は出穂直後にあたり植被の高さは80~90cm程度であった。

水平風速測定用の二次元超音波風速計と垂直成分測定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1.2mと3m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  $u_x$  は東西方向の風速成分,  $u_y$  は南北方向の風速成分,  $w$  は垂直方向の風速成分である。また、風速の測定と併行して直径50ミクロンの銅コンスタンタン線の熱電対を用いて1.2mの高度で乾湿球温度  $T_d$ ,  $T_w$  の測定を行なった。超音波風速

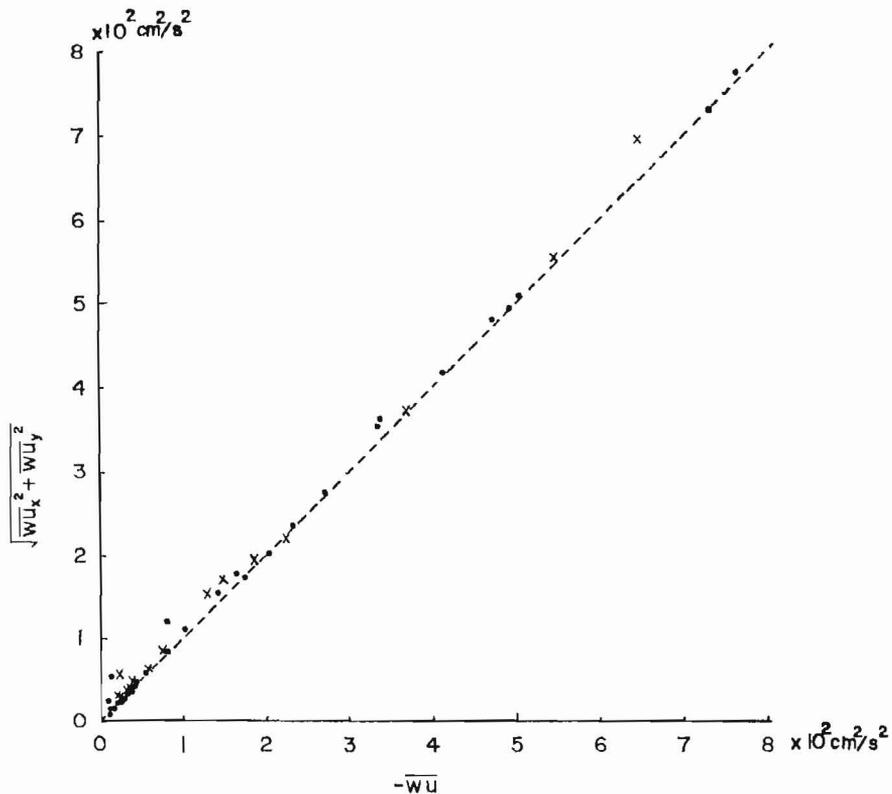
本研究の一部は昭和49年度科学研究費補助金奨励研究Aに依った。

計と湿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 R 510) に記録した。これらの信号は同時に4チャンネルのペン書き記録計にモニターされた。 $\overline{wT_d}$ ,  $\overline{wT_w}$  の計算は観測時にフラクスメータ (Seo *et al.* 1972) を用いてアナログ的に行なわれ2ペンの記録計に記録された。ここで—は時間平均を表わす。アナログテープを実験室に持ち帰り再生し、再生信号をオフラインデータ集録装置 (米谷, 瀬尾 1976) を用いて0.16秒毎にA/D変換しデジタルテープに格納した後解析処理がなされた。連続する記録を15分ないし30分毎に区切って基本統計量、結合確率密度分布及び周波数スペクトルが計算された。解析方法の詳細は前記の論文に記述されている。尚、結合確率密度分布の計算も基本統計量の計算と同様の手続きを用いて行なわれた。水田上の運動エネルギーの垂直輸送についての解析結果は別の論文 (Maitani 1977b) にまとめられている。ここでは運動量の垂直乱流輸送量に関係する幾つかの統計量について検討を行なう。

## 解析結果と考察

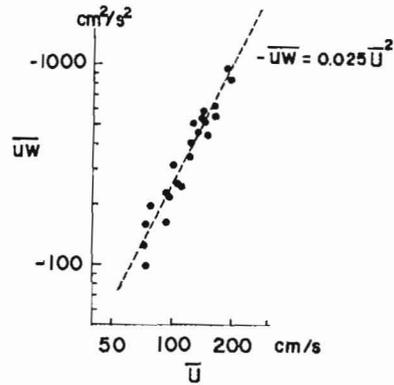
### 1. 運動量の垂直乱流輸送量

超音波風速計によって測定された水平風速成分  $u_x$ ,  $u_y$  と垂直成分  $w$  を用いて運動量の垂直乱流輸送量を評価することができる。定常で水平方向に一樣な状態を仮定すると、単



第1図 運動量輸送量の比較  
 ・印が1.2 m, ×印が3.0 mにおけるものである。

位面積を通して単位時間に輸送される単位質量あたりの垂直方向の運動量輸送量は  $\overline{uw}$  で表わされる。ここで  $u, w$  は夫々一般流方向及び垂直方向の風速変動である。解析結果によれば  $|\overline{uw}|$  が横方向の運動量の垂直輸送量の大きさ  $|\overline{wv}|$  の5倍以上であり、観測場所の一様性が比較的良くみだされていたことを示している。(ここで  $v$  は一般流に直交する水平風速変動である。) このことは二方向の運動量輸送量  $\overline{wu_x}$  と  $\overline{wu_y}$  を合成して得られる  $\sqrt{\overline{wu_x^2} + \overline{wu_y^2}}$  と  $|\overline{wu}|$  を比較することによっても示される(第1図)。各々の値は1.2mの高度で観測された中立に近い状態の資料から15分毎に区切って計算されたものである。わずかなバラツキがみられるものの良い一致がみられる。そこで以下では主に  $\overline{uw}$  を用いて運動量輸送量の議論がなされる。

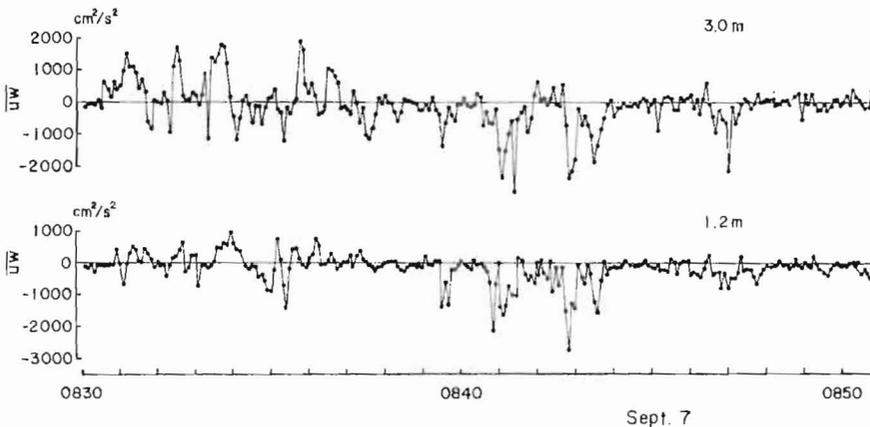


第2図 中立状態における1.2mでの平均風速と運動量輸送量との関係

二高度における風速差と  $u_*$  を用い安定度を考慮して決定された零面変位は約50cmであり Stanhill (1969) によって得られている経験式に従って植被の高さから評価された値とほぼ一致している。第2図には中立に近い場合の1.2mにおける  $\overline{uw}$  と  $\overline{u}$  の関係を示す。運動量輸送量の大きさは風速が強くなると増加し風速の2乗に比例していることがわかる。この場合、比例定数は0.025であり、この値と対数法則を利用して計算された粗度パラメータ  $z_0$  は約6cmである。

## 2. 二高度における運動量輸送量

第3図には風の弱い不安定な成層における1.2mと3.0mで測定された運動量輸送量の約20分間の時間変化を示す。前半の1/3の区間では上向きの輸送が認められるものの

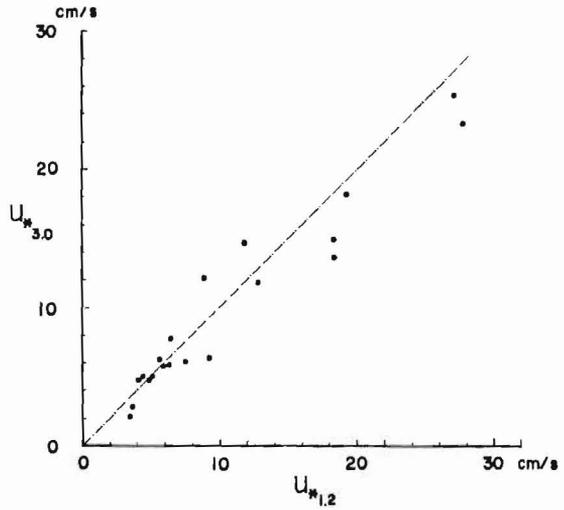


第3図 二高度における運動量輸送量の時間変化 (6秒毎の平均値をプロットしてある)。

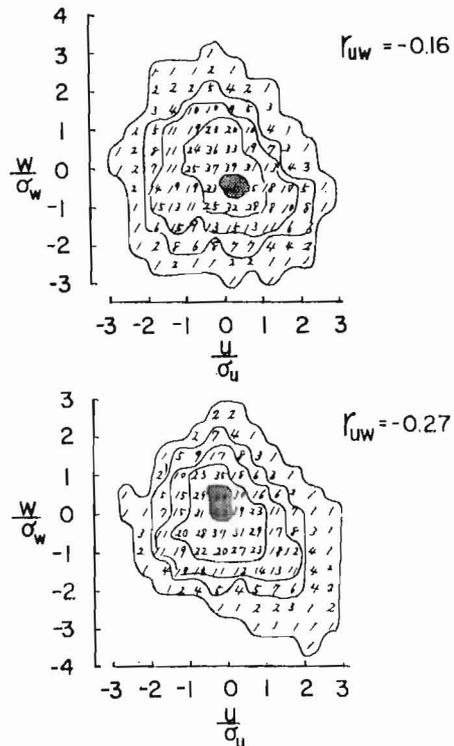
記録全体では下向きの運動量輸送が行なわれていることがわかる。二高度における運動量の輸送の短時間の变化は良く類似しており、また記録は比較的短時間に大きな下向きの輸送が行なわれていることを示している。このような間欠的な輸送は既に Mitsuta (1968) や Seo *et al.* (1972) 等、多くの研究者によって指摘されている現象である。この点については後にいくぶん詳しく議論される。第4図には30分毎に平均した運動量輸送量から評価された摩擦速度  $u_* = \sqrt{-\overline{uw}}$  の1.2mと3.0mの値の比較を示す。バラツキが大きいものの両者はほぼ対応していることがわかる。このことは植物群落上の接地気層においても運動量が高さによっては系統的に変化していないことを示している。このような運動量輸送量の高さによる不変性は Haugen *et al.* (1971) 等によって裸地上の気層で既に実験的に示されていることであるが、群落上のような荒い表面上でもなり立つと考えられる。従って、以下では植物群落上の接地気層における特徴的な速度として  $u_*$  を用いる。

### 3. 運動量輸送の特性

運動量の垂直輸送の特性を確率密度分布、スペクトル解析等を行なって更に詳細に調べてみた。解析を行なうために9月7日の8時30分から9時迄の30分間のデータを用いた。この期間における安定度パラメータ  $-\frac{z}{L}$  は1.2mで



第4図 1.2 m と 3.0 m における  $u_*$  の比較



第5図 水平風速変動  $u$  と垂直風速変動  $w$  間の結合確率密度分布  
上が3.0m, 下が1.2mにおけるものである (内部の数値は0.1%の単位で記入してある)。

0.28, 3.0m で0.99であり, 不安定成層状態にあった. ここで  $L$  はモニンオブコフの安定度長さと呼ばれる量であり,  $z$  としては地面からの高さから零面変位 ( $d=50\text{cm}$ ) を差し引いた値が用いられている.

二高度における水平風速変動  $u$  と垂直風速変動  $w$  の結合確率密度分布を第5図に示す. 運動量輸送量の下向き輸送に対応して二高度における相関係数  $r_{uw}$  は共に負で1.2m

では-0.27, 3.0mでは-0.16であり, 1.2mの方が相関が良いことがわかる. 二高度における分布を比較してみると3.0m

では第1, 第3象限を結ぶ線に対してほぼ対称であるのに反して1.2mでは分布の中心(黒い部分)が第2象限に移ると共に第4象限ではより広範囲に広がっている. このような二次元分布

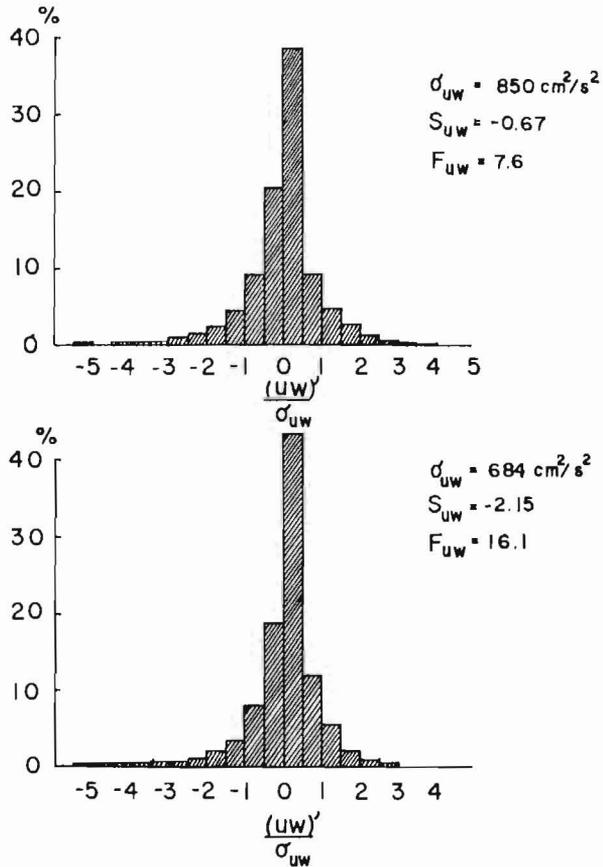
に対応して瞬間的な運動量フラックス  $uw$  の頻度分布は著しい負の歪みを示し平均値より少し大きい値に高い頻度を示している(第6図). ここで  $(uw)'$

は  $(uw)' = uw - \overline{uw}$  で定義される変動成分である. 歪み度  $S_{uw} = \frac{(uw)'^3}{\sigma_{uw}^3}$  は1.2mと3.0m

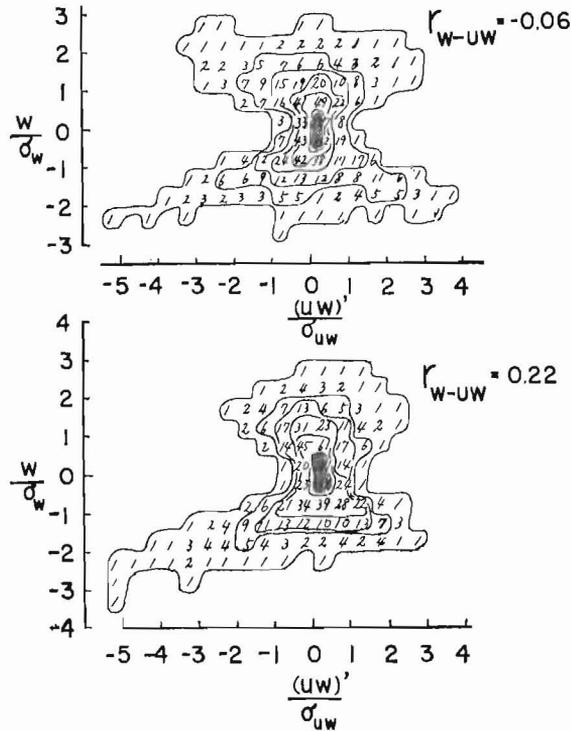
で夫々-0.67, -2.15である( $\sigma$ は標準偏差). 又, 尖り度  $F_{uw} = \frac{(uw)'^4}{\sigma_{uw}^4}$  は正規分布における3.0に比較して非常に大きく3.0mでは7.6, 1.2mでは

16.1にもなっている. このような負の歪み度と大きな尖り度

は運動量の下向き輸送が間欠的に行なわれていることを示している. 第7図に垂直速度  $w$  と瞬間的な運動量フラックス  $uw$  の二高度における結合確率密度分布を示す. いずれの高度でも  $w$  が0に近く  $(uw)'$  が0より少し正の位置(黒い部分)に最高の確率密度がみられる. 1.2mでは下向きの  $w$  と大きな負の  $(uw)'$  の値とが関係しており, 上向きの  $w$  に対応する  $(uw)'$  の負の値の密度は高いけれども下降流の場合のような  $(uw)'$  の大きい負の値は見られない. 一方3.0mの分布には1.2mの分布にみられる特徴が幾分残ってはいるものの下降流に伴う  $(uw)'$  の負の値をとる部分が減少し, 逆に上昇流に伴う  $(uw)'$  の負の大きい値が増加している. また3.0mの分布は1.2mのものに比較して全体的に大きく広がり, 特に  $(uw)'$  の正の領域が増加している. このような分布の特徴は  $w$  と  $uw$



第6図 瞬間的な運動量フラックスの確率密度分布  
上が3.0m, 下が1.2mにおけるものである.

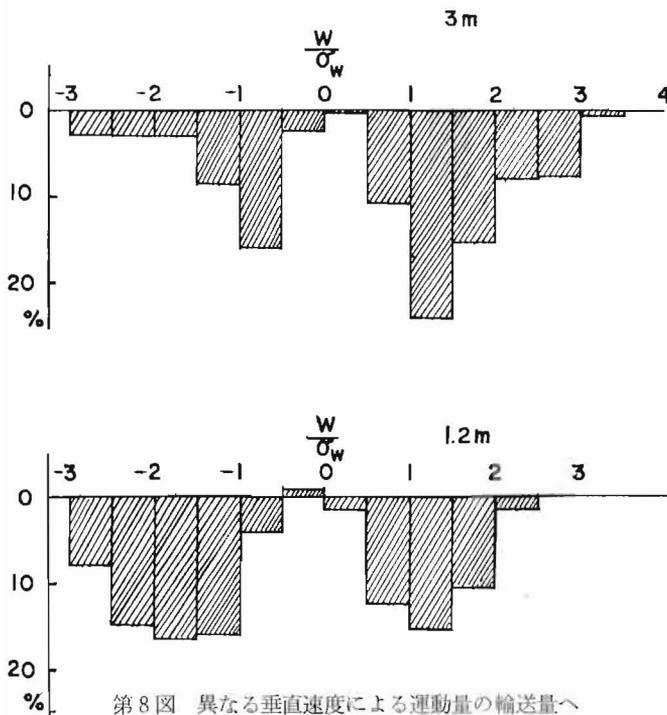


第7図 瞬時的な運動量フラックス  $uw$  と垂直速度  $w$  の間の結合確率密度分布

上が3.0 m, 下が1.2 m におけるものである。(図の中の数字は0.1%の単位で示している).

の間の相関係数が1.2 m では0.22, 3.0 m では $-0.06$ になっていることからも知ることができる。第8図には垂直速度の大きさによる運動量輸送量への寄与の割合をパーセントで示すフラックスと垂直速度の間の関係を示している。3.0 m では上昇流に伴って大きい運動量の輸送が行なわれている。不安定成層中でこのように上昇流に伴って大きい運動量の輸送が行なわれる傾向は McBean (1974) が裸地上で得ている結果と対応している。一方、植被に近い1.2 m では不安定成層にもかかわらず寄与の割合が逆になっており、下降流に伴って大きい運動量の輸送が行なわれていることを示している。このような下降流に伴う大きい運動量の輸送は植被に近い気層において運動エネルギーが下向きに輸送されている (Maitani 1976b) こととも関連して群落上の乱流構造の特徴の一つと考えられる。群落上の乱流特性については別の論文において詳細に議論を行なう予定である。

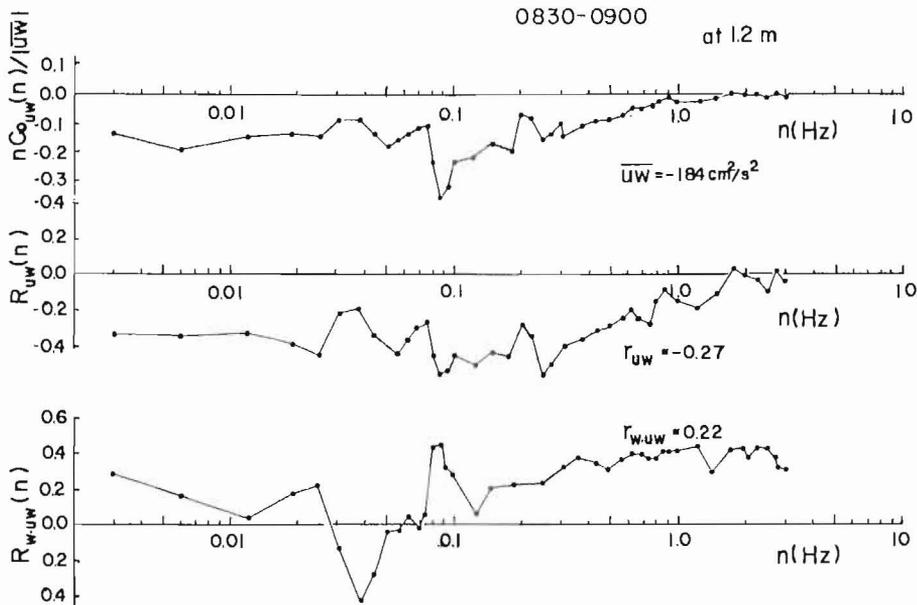
周波数領域における特性を調べるために Tukey (Blackman and Tukey 1958) の方法によってスペクトル解析を行なった。ここで  $Co_{uw}(n)$  はコスペクトル,  $S_u(n)$ ,  $S_w(n)$  は夫々  $u$ ,  $w$  のパワースペクトルである。解析を行なったほぼ全周波数領域にわたって運動量は下向きに輸送されており0.1 Hz 付近で最も大きい輸送が行なわれていることがわかる(第9図)。  $u$  と  $w$  の間の周波数毎の相互相関係数  $R_{uw}(n) \left( \equiv \frac{Co_{uw}(n)}{\sqrt{S_u(n)S_w(n)}} \right)$  は低周波



第8図 異なる垂直速度による運動量の輸送量への寄与の割合  
上が3.0 m, 下が1.2 mにおけるものである。

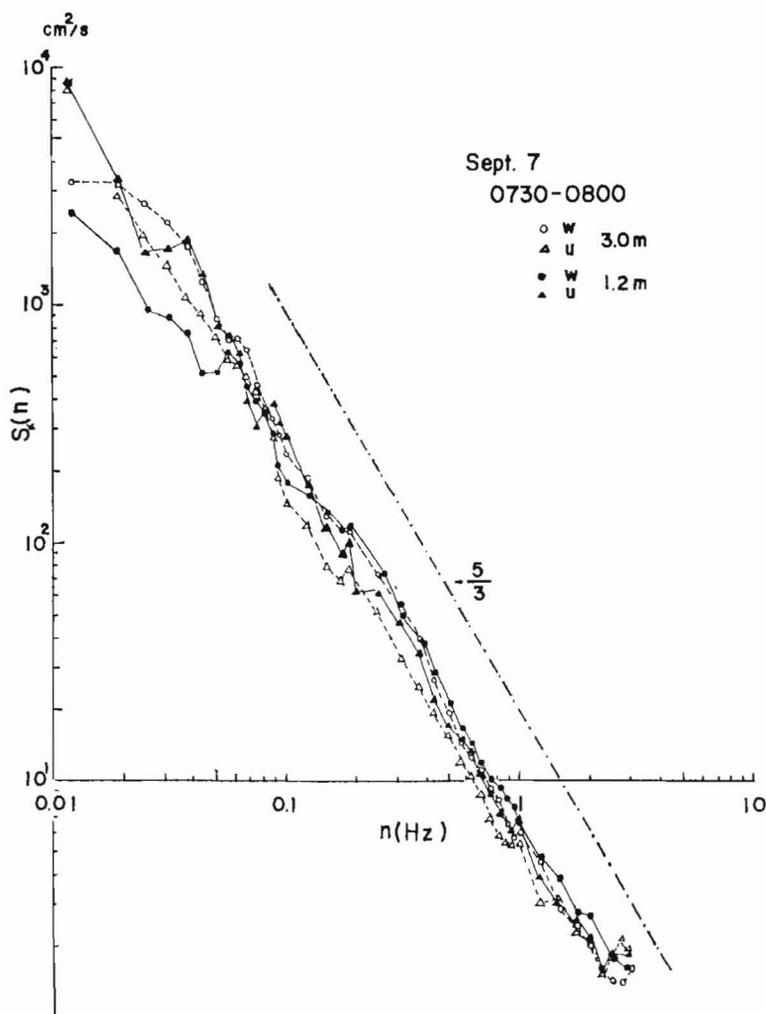
数域で $-0.3 \sim -0.5$ であり、周波数が増加するにつれて0に近づいている。同様に周波数毎の相関係数 $R_{w,uw}(n)$ は $0.1 \text{ Hz}$ より低周波数域では正又は負の値をとり $w$ のスペクトルの値が大きくなる $0.1 \text{ Hz}$ 以上で正の値をとるようになる。高周波数帯では $R_{w,uw}(n)$ の値は一般に下の高度の方が相関係数が大きくなる傾向がみられた。この傾向は先に述べた $r_{w,uw}$ が下の高度で大きくなっていることと対応しているように思われる。

瞬間的な運動量のフ



第9図  $u$  と  $w$  の間のコスペクトル, 相互相関係数  $R_{uw}(n)$  および  $w$  と  $uw$  の間の相互相関係数  $R_{w,uw}(n)$

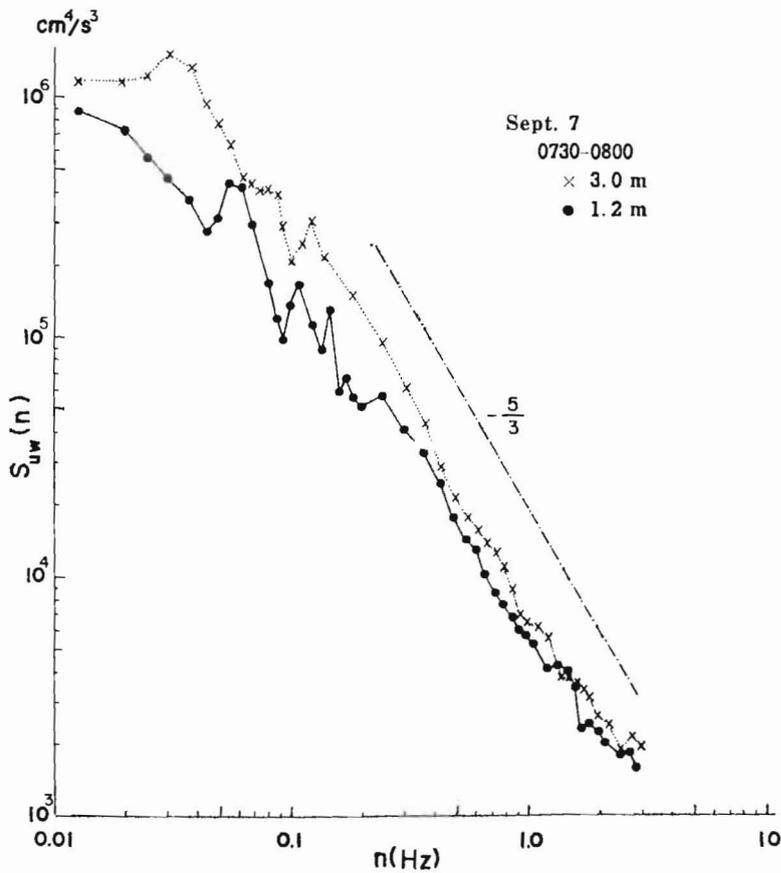
ラックス  $uw$  の変動のパワースペクトルが周波数と共にどのように変化するかを調べてみた。第 10 図、第 11 図は先に用いた期間とは少し異なる 9 月 7 日の 7 時 30 分から 8 時のものである。風が弱い不安定な成層状態にあり 1.2 m と 3.0 m における  $u$  と  $w$  のパワースペクトルはすべて  $-5/3$  乗に従って周波数と共に減少している。この場合に  $uw$  のパワ



第 10 図 二高度における  $u$  と  $w$  のパワースペクトル

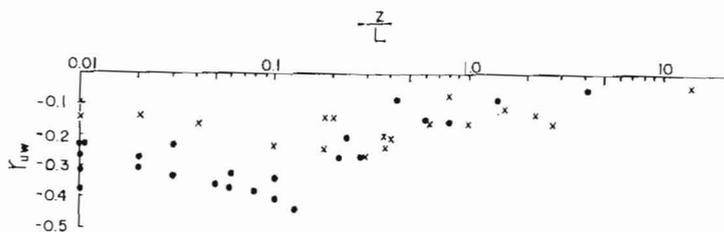
ースペクトル  $S_{uw}(n)$  も高周波数帯で  $-5/3$  乗に従って減少しているように見える (第 11 図)。この結果は潮岬の裸地上における風速変動の解析を行なった Mitsuta (1968) によって指摘されている結果と一致している。一方、井上と真木 (1976) の次元解析の結果によれば  $-7/3$  乗則が予想されており、その相異が何に基づくのか更に検討することが必要と思われる。

以上に述べてきたように植物群落上の接地気層においては運動量が下向きに、しかも間



第11図 二高度における  $uv$  のパワースペクトル

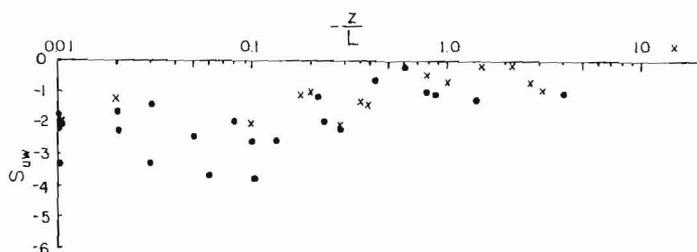
欠的に輸送されていることは明らかである。そこで、以下では気層の不安定度によって輸送特性がどのように影響を受けるかを調べてみた。第12図には相関係数  $r_{uw}$  と  $-\frac{z}{L}$  の関係を示す。バラツキが大きいものの中立に近い状態 ( $-\frac{z}{L} < 0.1$ ) における  $-0.2 \sim -0.4$  の値から不安定度が増加するにつれて相関が悪くなり0に近づいて行く傾向があることがわかる。 $\frac{\sigma_u}{u_*}, \frac{\sigma_w}{u_*}$  が  $(-\frac{z}{L})^{1/3}$  に比例して増加する不安定領域では  $r_{uw}$  は  $(-\frac{z}{L})^{-2/3}$  と共に変



第12図 相関係数  $r_{uw}$  と  $-\frac{z}{L}$  の関係

・印が1.2 m, ×印が3.0 m におけるものである。

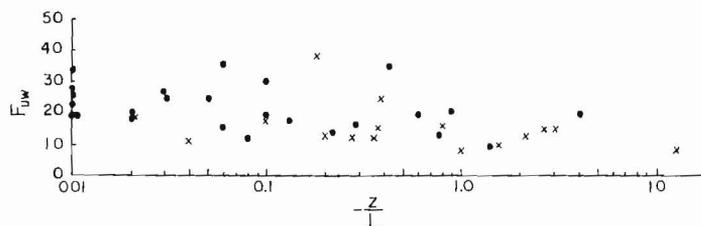
化すると予想される。ここで  $\sigma_u, \sigma_w$  は  $u, w$  の標準偏差である。このような結果は、Garatt (1975) のまとめた結果と良く対応している。瞬間的な運動量のフラックス  $uw$  が負の歪みを持つことは先に述べた。この負の歪みが安定度と共にどのように変化するかを第 13 図に示す。相関係数と同様にバラツキが大きいものの  $-\frac{z}{L} < 0.1$  では  $-4 \sim -1$



第 13 図 瞬間的な運動量フラックスの歪み度  $S_{uw}$  と  $-\frac{z}{L}$  の関係

・印が 1.2 m, ×印が 3.0 m におけるものである。

の値を持ち不安定度が増加するにつれて 0 に近づいている。この傾向は値が異なるものの  $u$  と  $w$  の相関にみられる傾向と良く対応している。また、不安定度が増加すると  $S_{uw}$  が正の歪みを持つ場合もあることが注意される。第 14 図に  $uw$  の尖り度  $F_{uw}$  と  $-\frac{z}{L}$  の関係を示す。 $F_{uw}$  は正規分布の場合の 3 に比較するとはるかに大きく中立時には 20~30 の値を持ち不安定度が増加するにつれて幾分減少する傾向がみられる。このことは風速シャワーの最も大きい中立時に大きい負の歪み度と大きな尖り度がみられ、この状態で運動量が下向きに最も間欠的に輸送されていることを示している。不安定度が増加するにつれて間



第 14 図 瞬間的な運動量フラックスの尖り度  $F_{uw}$  と  $-\frac{z}{L}$  の関係

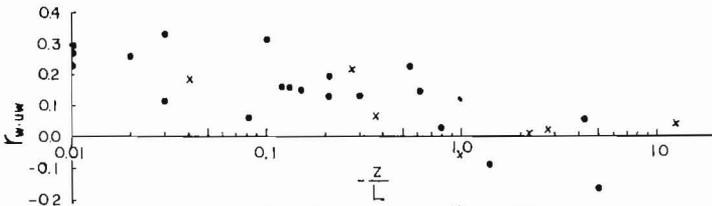
・印が 1.2 m, ×印が 3.0 m におけるものである。

第 1 表 種々の表面状態における歪み度と尖り度

観測場所	植被の高さ	測定高度	$-\frac{z}{L}$	歪み度 $S_{uw}$	尖り度 $F_{uw}$
水田上	80—90 cm	1.2 m, 3.0 m	0.0—0.43	-1.9	24.0
小麦畑上	80 cm	1.5 m	0.07—0.41	-2.1	18.5
イ草畑上	115 cm	1.7 m	0.02—0.07	-2.1	23.8
草地上*	4—8 cm	2 m	0.0—0.63	-1.3	16.1
裸地上	…	1.5 m	0.0	-1.6	11.6
松林中	500—600 cm	4.0 m	…	-4.4	53.9

\* McBean (1974) のデータ

欠性は幾分緩和されるように思われる。種々の表面状態における  $S_{uw}$  と  $F_{uw}$  の値を第 1 表に示す。群落上における値は裸地上と群落内部の値の中間にあり植被の高さに相対的な高度が関係していると考えられる。この点については別に詳しく論じる予定である。次に下降流と上昇流の輸送量への寄与の割り合いを示すパラメータの一つである垂直速度  $w$  と  $uw$  の間の相関係数  $r_{w,uw}$  と安定度パラメータ  $-\frac{z}{L}$  の関係を第 15 図に示す。  $r_{w,uw}$

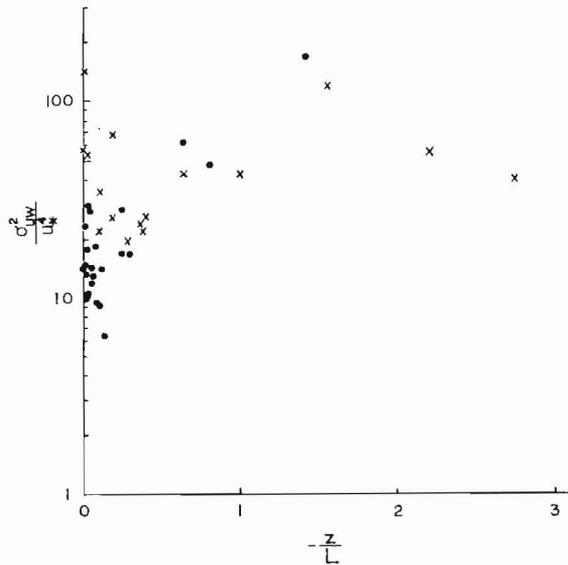


第 15 図 相関係数  $r_{w,uw}$  と  $-\frac{z}{L}$  との関係

・印が 1.2 m, ×印が 3.0 m におけるものである。

は  $-\frac{z}{L}=0.01$  近くで 0.2~0.3 の値を持ち不安定になるにつれて 0 に近づき  $-\frac{z}{L}=1.0$  付近で 0 になり  $-\frac{z}{L}>1.0$  では負の値をとるようになる。このことは中立近くでは下降流に伴う運動量の下向き輸送が上昇流による輸送よりも卓越し不安定度が增加するにつれて上昇流に伴う運動量の下向き輸送が大きくなることを意味している。

第 16 図には  $uw$  の標準偏差の 2 乗を  $u_*^4$  で無次元化した値と  $-\frac{z}{L}$  の間の関係を示す。この量は運動量輸送量  $\overline{uw}$  の測定値の統計的不確かさを示すパラメータの一つである (たとえば Maitani 1977a)。バラツキが極めて大きいものの、中立時の 10 近くの値から不安定度が增加するにつれて 100 程度の値迄増加している。このような傾向は不安定度が增加すると  $u$  と  $w$  の間の相関が悪くなることと関係して  $uw$  の評価値の統計的不確かさが著しく増大することを意味している。同様の傾向は Kansas のデータを整理した Wyngaard (1973) によっても指摘されている。又、運動量の輸送にみられる諸特性は顕熱輸送の場合には極めて異なっており、輸送機構が両者の間で著しく相異していることが見出されている。この点については別の機会に議論がなされる。



第 16 図 無次元量  $\frac{\sigma_{uw}^2}{u_*^4}$  と  $-\frac{z}{L}$  との関係

・印が 1.2 m, ×印が 3.0 m におけるものである。

## 摘 要

植物群落上における運動量の垂直輸送の特性を調べるために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った。資料の集録処理にはオフラインデータ集録装置を用い統計計算をデジタル形式で行なった。得られた結果のうちの主なものを以下に示す。

(i) 運動量の輸送量の短周期の変動は群落上の二高度で類似しており、平均の運動量輸送量が高さによって系統的には相異していないことが確かめられた。

(ii) 水平風速変動  $u$  と垂直風速変動  $w$  の間の相関係数  $r_{uw}$  は中立時の  $-0.2 \sim -0.4$  近くの値から不安定度が增加するにつれて 0 に近づく傾向を示した。このような傾向は運動量輸送量の統計的な不確かさが不安定度の増大と共に増大することを意味している。

(iii) 瞬間的な運動量フラックスの分布は著しい負の歪みを示すと共に大きな尖りを示した。このような特異な分布は中立成層で最も顕著であり、不安定度が増大するにつれてその特異性が減少する傾向が認められた。これらの結果と関連して植被に近い気層においては下降流に伴う運動量の間欠的な輸送が卓越していることが示された。

(iv) 瞬間的な運動量フラックス  $uw$  の変動のパワースペクトルが高周波数領域で  $-5/3$  乗に従って周波数と共に減少しているという結果が得られた。この結果は Mitsuta (1968) の裸地上における観測結果とは一致するものの井上と真木 (1976) の次元解析の結果とは一致していない。今後更に詳細な検討が必要と思われる。

## 文 献

- Blackman, R. B. and Tukey, J. W. 1958. *The Measurement of Power Spectra*. Dover, New York.
- Haugen, D. A., Kaimal, J. C. and Bradley, E. F. 1971. An experimental study of Reynolds stress and heat flux in the atmospheric surface layer. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 97: 168-180.
- Inoue, K., Uchijima, Z., Horie, T. and Iwakiri, S. 1975. Studies of energy and gas exchange within crop canopies (10). *J. Agric. Met (Tokyo)*, 31(2): 71-82.
- 井上栄一・真木太一. 1976. 乱流輸送量変動のスペクトル. *農業気象* 32(2): 63-65.
- Garatt, J. R. 1975. Limitations of the Monin-Obukhov similarity theory for turbulent transfer of momentum in unstable conditions in the atmospheric surface layer. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 101: 169-172.
- Maitani, T. 1977a. Some turbulence characteristics in the surface layer over a wheat field. *Ber. Ohara Inst. Landw. Biol. Okayama Univ.* 17 (1) (in press).
- Maitani, T. 1977b. Vertical transport of turbulent kinetic energy in the surface layer over a paddy field. (submitted to *Boundary-Layer Meteorol.*)
- 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(4): 215-232.
- McBean, G. A. 1974. The turbulent transfer mechanism: A time domain analysis. *Quart. J. R. Met. Soc.* 100: 53-66.

- Mitsuta, Y. 1968. Some results of direct measurements of momentum flux in the atmospheric boundary layer by sonic anemometer. *J. Met. Soc. Japan, Ser. II*, 46 : 29-35.
- Seo, T., Ohtaki, E. and Maitani, T. 1972. A measuring system of turbulent transport and its field test over a barley field. *Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ.*, 15 : 133-146.
- Wyngaard, J.C. 1973. On surface-layer turbulence. *Workshop on Micrometeorology* : 101-148.