

ダイズ群落の空気力学的パラメータと運動量, CO₂の乱流輸送特性

Characteristics of Aerodynamic Parameters and Turbulent Transport of Momentum and CO₂ Over a Soybean Canopy

原 蘭 芳信*・山田 千絵**・西沢 利栄***

Yoshinobu HARAZONO, Chie YAMADA and Toshie NISIZAWA

I まえがき

地球規模の環境問題の多くは、大気中に微量に存在する赤外放射活性ガスの濃度増加による大気温暖化と、塩素系微量気体による成層圏オゾンの破壊、対流圏オゾン濃度増加による大気の酸化や酸性降下物により生じている(小川, 1991)。生物圏、特に陸上生態系は大気微量気体の局所的な発生源や吸収源を含むことから、陸上生態系における微量気体の動態が地球規模の環境問題と深く関係している。そして、大気中のCO₂やCH₄等の濃度上昇に関しては、植物群落と大気との間のガス交換過程の解明が重要となっている。

近年測定機器や観測手法の発達により、渦相関法を利用した植物群落上のCO₂ fluxの測定(Ohtaki, 1984a; 大滝ら, 1987)など、植物群落と大気とのガス交換の動態が明らかにされつつある(Ohtaki, 1984b, 1985; Maitani and Ohtaki, 1987 等)。しかし、CO₂以外の微量気体は絶対濃度が低いこと、発生源や吸収源の強度が植物の生育段階によって異なることなどのため、植物群落での動態は十分に把握されていない。これは、交換過程を特徴づける群落と大気との相互作用、すなわち、植物群落の生育

に伴う植被面の構造の変化と群落境界層の輸送特性の変化との関係の把握が十分でないことにもよる(Jones, 1983; 矢吹, 1985; Monteith, 1990)。

このようなことから、IGBPの中核プロジェクトであるIGAC(The International Global Atmospheric Chemistry Program)でも、生物圏と大気圏との交換過程の解明を目標とする「大気微量成分の変質及び生物圏との交換」が研究領域として設定されている(小川, 1991)。

本研究では、大気圏と生物圏とのガス交換過程解明の基礎的研究として、種々の植物群落における乱流輸送の特徴を観測事実に基づいて明らかにしようとして試みている。筆者らは、これまでに水稻群落やアカマツ群落における乱流輸送特性について報告した(原蘭ら, 1989, 1990; 村上ら, 1990)。今回は、広葉植物のダイズ群落について、生育初期から収穫期まで、運動量とオゾン(O₃)、二酸化炭素(CO₂)の乱流輸送特性を調べた。前報(山田ら, 1991)では主に測定についての詳細とO₃ fluxについて報告し、本報では植物群落の乱流輸送特性とCO₂ flux, 運動量 flux について報告する。

*農業環境技術研究所気象管理科 **筑波大学第一学群自然学類(現 日本電気株式会社) ***筑波大学地球科学系

II 測定対象及び測定方法

2.1 測定場所と対象作物

農林水産省農業環境技術研究所（茨城県つくば市観音台）内のダイズ畑（55×24m）を対象として観測を行った。圃場は一区画25×80m（20a）の畑が連続しており、200×400mの大区画毎に高さ約6mの防風林がある。測定対象の畑に隣接した圃場には、ダイズ、トウモロコシ等が栽培されていた。測定対象についての詳細は前報（山田ら，1991）を参照されたい。

2.2 測定項目と測定方法

植物の生長に伴うCO₂fluxや運動量fluxの季節変化を調べるため、1990年5月下旬からほぼ10日毎に2～5日間ずつ、9月下旬の収穫期まで観測を行った。測定項目は、群落上の風速の鉛直分布と熱収支解析に必要な気温、湿度、純放射強度、地中熱流、ならびに日射強度、CO₂、O₃ガス濃度である。ダイズ畑の中央よりやや風下側に設置した測定用ポール（牧野応用測器、高さ4m）を用いて、風速は5高度で、気温、湿度は2高度で測定した。CO₂濃度の測定には非分散型赤外ガス分析計（富士電機、ZFU）を用い、3高度のガスを1分毎に切り替えて測定した。観測毎の測器の配置や測定ならびに記録方法は前報（山田ら，1991）と同様である。

2.3 植物群落構造の測定

ダイズの群落構造を定量的に把握し、気象条件との関係を明らかにするために、ほぼ2週間毎にダイズの層別刈取り調査を行った。各サンプリング毎にダイズ8個体を供試し、地上10cm毎に層区分を行い、各層毎に葉面積・葉重・莖重（葉柄を含む）・子実重（さやを含む）などの空間分布を調べた。葉面積は自動葉面積計（林電工、AH）で測定し、電子式上皿天秤（Mettler、PJ300）で生重量を測定した。その後、約90℃で3～4日間乾燥させた後、乾物重量を測定した。

任意に抽出したダイズ畝5列の各5mの個体数と平均畝間を測定し、単位面積当りの個体密度を求めた。第一回の個体密度の計測は5月下旬に実施し、その後は7月下旬と9月上旬に計測した。

III 解析方法

3.1 空気力学的パラメータの解析

群落上の運動量fluxは風速の鉛直分布から傾度法によりバルク量として求めた。ガスfluxは、群落上2高度間の群落輸送速度とガス濃度勾配との積として求めた。計算手順は原菌ら（1989，1990）と同じであり、計算には10分平均値を用いた。なお、熱収支測定からボーエン比法により群落拡散速度ならびにCO₂fluxを求めたが、この結果との比較については別途報告の予定である。

傾度法による解析では、境界層の風速分布が(1)式対数分布に合致し、大気安定度がほぼ中立の場合について、まず地面修正量 d を求めた。 d を決定する場合、(2)式に測定5高度の高さ z と平均風速 u を代入し、 di の値を2mmずつ変化させながら繰返し計算を行い、直線回帰の相関係数が最も高くなった時の di を地面修正量とし、同時に回帰係数 a 、 b を求めた。粗度長 z_0 と摩擦速度 u_* は、回帰係数 a 、 b を用いて(3)、(4)式から求めた。ここで κ はカルマン定数で、 $\kappa=0.4$ の値を用いた。

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

$$\ln(z-di) = a \cdot u + b \quad (2)$$

$$u_* = \kappa / a \quad (3)$$

$$z_0 = \exp(b) \quad (4)$$

運動量flux τ は摩擦速度と空気密度 ρ の積として(5)式から求められ、(3)式の u_* を用いた場合、群落境界層における平均的なバルク量となる。一方、植物群落上のCO₂fluxは、(6)式で定義される群落上2高度 z_1 、 z_2 間の拡散速度 Df とCO₂濃度勾配 ΔCO_2 との積として(7)式から求められる。なお、 u_1 、 u_2 はガスサンプリングを行った2高度の風速である。また、群落境界層のバルク抵抗係数 Cd を(8)式から求めた。

$$\text{運動量 flux } (\tau) = \rho \cdot u_* \quad (5)$$

$$Df = \frac{\kappa^2 (u_1 - u_2)}{\{\ln(z_1 - d) - \ln(z_2 - d)\}^2} \quad (6)$$

$$CO_2 \text{ flux} = Df \cdot \Delta CO_2 \quad (7)$$

$$Cd = \frac{\tau}{\rho u^2} = \left(\frac{u_*}{u} \right)^2 \quad (8)$$

3.2 大気安定度についての検討

大気が中立状態でない場合には、(6)式で求められる輸送速度 Df がベクトル量とスカラー量とで異なり flux の算定に誤差が含まれる (Thom, 1971). 本解析では、大気安定度の指標には (9) 式で定義されるリチャードソン数 (Ri) を用い、風速分布が対数に近く大気安定度が中立に近い場合 ($|Ri| < 0.05$ の大気状態を近似的に中立とみなした) の測定結果のみを解析対象とした。

$$Ri = \frac{g \cdot (T_1 - T_2) / \Delta Z}{\theta \cdot ((u_1 - u_2) / \Delta Z)^2} \quad (9)$$

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 \quad (10)$$

ここで、 g は重力加速度、 T_1 、 T_2 は群落上 2 高度 Z_1 、 Z_2 の気温の 10 分間平均値であり、 θ は 2 高度間の平均温位 (単位 K) である。大気が中立でない場合に、 Ri などにより拡散速度 Df を補正する方法が報告されている (Thom, 1971; Denmead and Bradley, 1985)。予備的に Ri による補正を行った結果では、大気が不安定な場合に Df を過大評価する傾向が強かった。このため、本論文では補正は行わず、大気が中立状態と見なせる場合のみ flux を求めた。したがって、flux を計算できたのは全観測期間のうち約 70% であり、一日にわたる flux の日変化を把握できたのは、全観測日の約 1/4 であった。大気が中立でない場合の拡散速度 Df の算定については、同時観測した熱収支解析から求められる Df と比較検討し、別途報告する予定である。

IV ダイズの群落構造の季節変化

4.1 ダイズの生育状況

ダイズは 5 月 7 日に畝幅 60cm、平均株間約 10cm で 2 粒ずつ播種された。前作 (1989 年 10 月～1990 年 4 月) のコムギは 4 月中旬に成熟前の青刈り状態ですき込み、播種直前に窒素肥料 (N:P:K, 10:10:10) を元肥として 2 kg(N)/a で施肥し、追肥は行わなかった。発芽後は、除草を兼ねて土寄せを 2 回実施した。

発芽時の植物個体密度は 18 株/m² であったが、7 月

27 日には 17 株/m²、8 月 3 日は 16 株/m²、8 月 31 日は 15 株/m² と減少した。7 月上旬から開花結実しはじめたが、やや葉が過繁茂であった。8 月下旬以後群落上層でも落葉が始まった。

4.2 葉面積密度と群落構造の変化

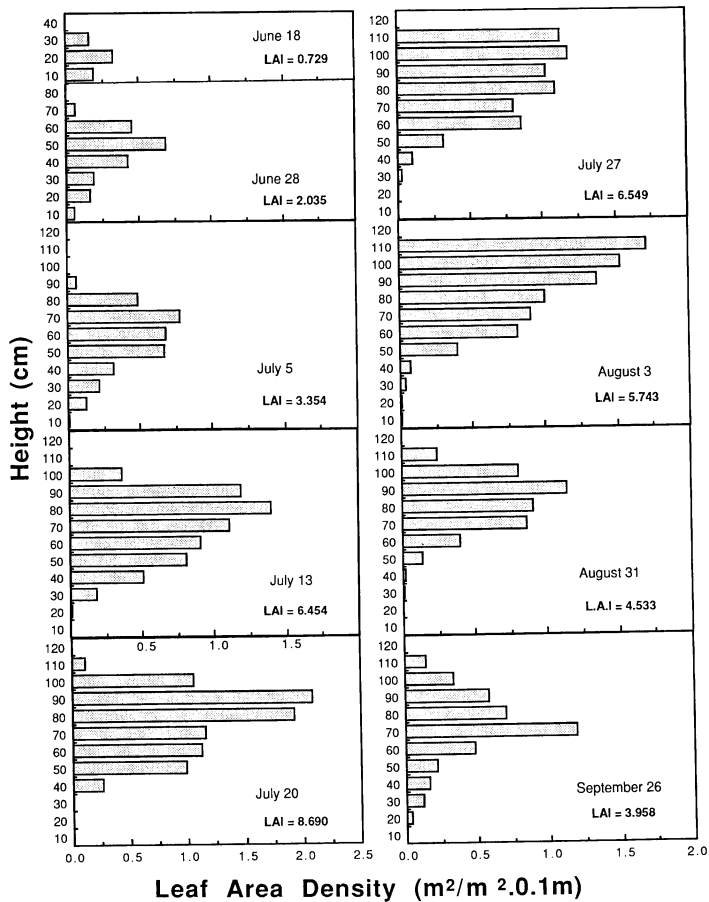
ダイズの生長に伴う葉面積密度 (LAD : Leaf Area Density) の変化を第 1 図に、各器官毎の乾物重量分布を表わす群落構造図の推移を第 2 図に示す。図中の LAI は葉面積指数 (Leaf Area Index) である。群落構造や LAI 、 LAD の変化は、後述の群落上の乱流輸送と密接に関係する。

播種 1 ヶ月後の 6 月上旬は、群落自体が低く (平均高さ約 25cm、植被率約 25%)、群落植被面に比べて地表面の占める割合の方が大きかった。6 月下旬以後、葉面積や草丈は 70cm に伸び植被率約 75% となった。7 月中旬には畑全体が植被で覆われ、土壌表面は見えず植被率 100% となったが、植被面は畝毎の凹凸が顕著であった。7 月 20 日には LAI は最大の 8.69 に達した。

7 月下旬から 8 月上旬には、葉面積の大部分が群落上層に集中し、群落表面の凹凸は小さくなり葉層が平板状となった。第 1 図からは、平板状に分布する群落上層の葉群と、これにより大気と群落下層空間とが遮断されている様子がわかる。日射のほとんどは群落上層の葉層で吸収されるため、生育の遅れた草丈の低い群落下層のダイズは枯死し、この時期に前述のように個体密度の低下が顕著となった。

8 月中旬には平均草丈が最高の 120cm となったが、群落下層の葉の枯れ上がりによる葉面積の低下と、台風 11 号の通過 (1990 年 8 月 10 日) と台風 14 号の接近 (8 月 22 日) に伴う上層葉の部分的な損失減少がみられた。このため、群落表面は凹凸が顕著となり、群落下層の空間と群落上の大気とが再び連続した。群落構造図からは、葉面積指数の低下と、子実の占める割合が大きくなっている様子がわかる。

8 月下旬から 9 月上旬になると、群落上層を含む全体の葉が黄化し落葉量も増大した。9 月中旬以後は、葉は地上 70cm 付近に、子実は 40—50cm の層に多く分布し、群落上層は葉柄や茎が露出し、群落表面の凹凸や粗度は大きくなった。



第1図 ダイズの生長に伴う葉面積の空間分布（葉面積密度：LAD）の季節的推移

第3図に葉、茎（葉柄部分を含む）、子実（鞘を含む）の各器官毎のバイオマスの季節変化を示す。7月下旬から子実の生長が始まり、それに伴って葉の乾物重が減少して行く様子が理解できる。なお、8月10日の台風の通過により、ダイズの葉と子実の乾物重が減少しており、強風による被害を受けていることが明瞭である。

V 群落上の空気力学的パラメータの変化

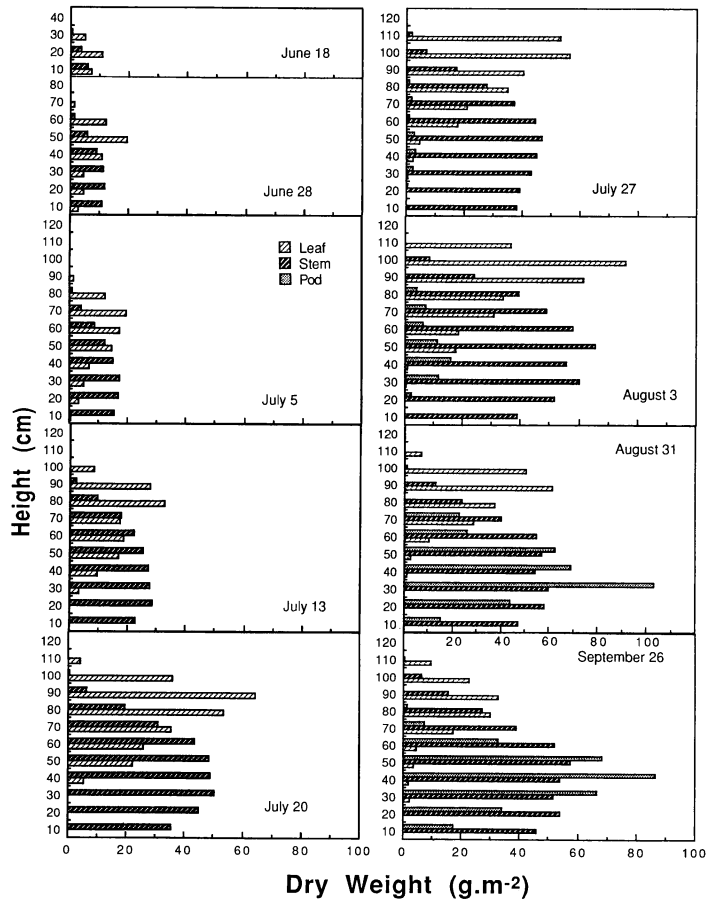
ダイズの生育時期毎に、群落上の風速の鉛直分布から粗度長 z_0 、地面修正量 d 、摩擦速度 u_* 、抵抗係数 C_d を求め、風速との関係を調べた。各パラメータは観測データの10分平均値毎に計算し、群落上の最

高測定点（3.0～3.2m）の平均風速を基に、平均風速順配列とした後、低風速から18～20データずつ区切り、平均値と標準偏差を求めた。

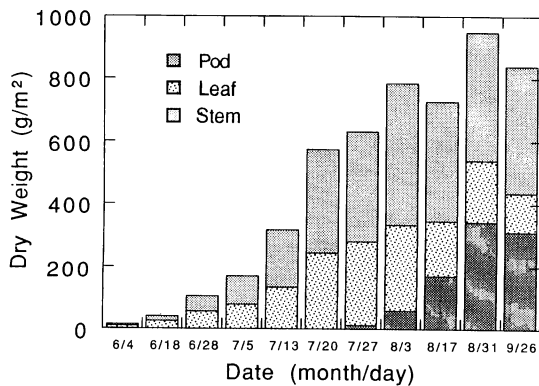
5.1 地面修正量と粗度長の変化

地面修正量 d と風速との関係を第4図に、粗度長 z_0 との関係を第5図に示す。横軸は群落上（3.0～3.2m）の平均風速、縦軸は空気力学的パラメータである。図中の各点は10分毎に求めた18～20個のパラメータ平均値と標準偏差を示しており、横軸方向の点の分布は観測期間の風速の出現頻度を表わす。

ほぼ全生育期間にわたって認められたことは、ダイズ群落上の地面修正量 d と粗度長 z_0 とは、一方が増大すると他方は減少し、風速に対する応答が逆位



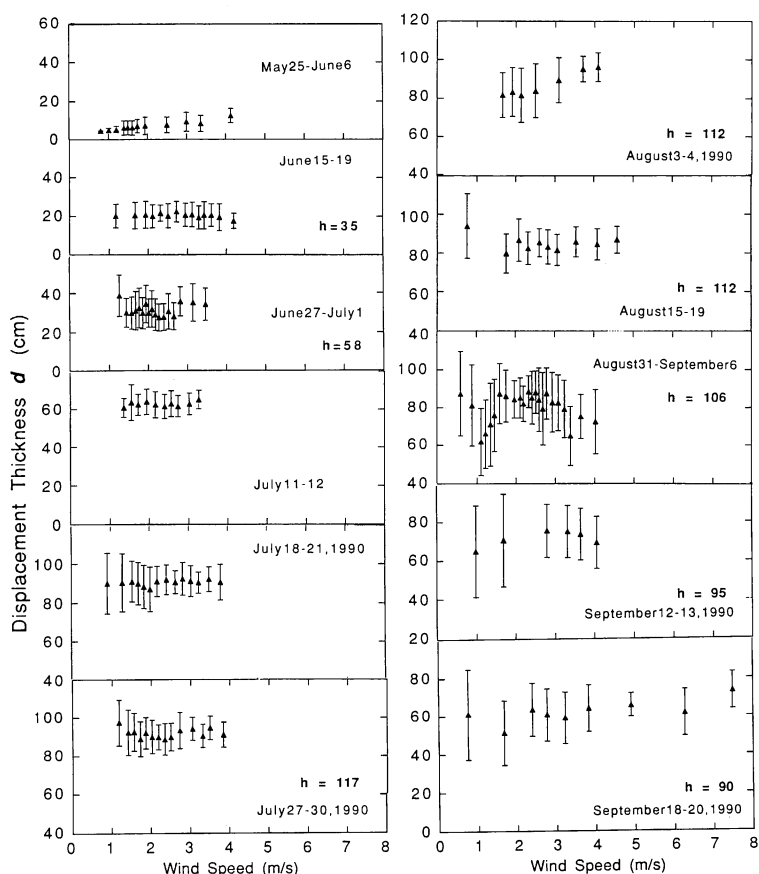
第2図 ダイズの生長に伴う群落構造の季節的推移



第3図 ダイズの地上部のバイオマス（葉、茎、子実）の生長の季節変化

相となることである。これは、水稻（井上ら，1954；原菌ら，1990）や赤松群落（原菌ら，1989）など、従来の研究と一致する結果である。以下に、生育時期毎の d 、 z_0 と風速との関係について特徴を示す。

ダイズの草丈が低く植物の占める割合が小さい6月上旬には、 d は風速 1 m/s の約 4 cm から風速 3 m/s の約 8 cm と、風速が高くなると d は増加し z_0 は低下した。低風速の場合、気流は畝間や株間の間隙を抜けているが植物全体が抵抗となって粗度が大きくなり、高風速では、ダイズの柔らかい葉が風にたびき気流はその上を越えて流れるため（畝間が死水域となる）、粗度が小さくなり抵抗を減らしたと考えられる。

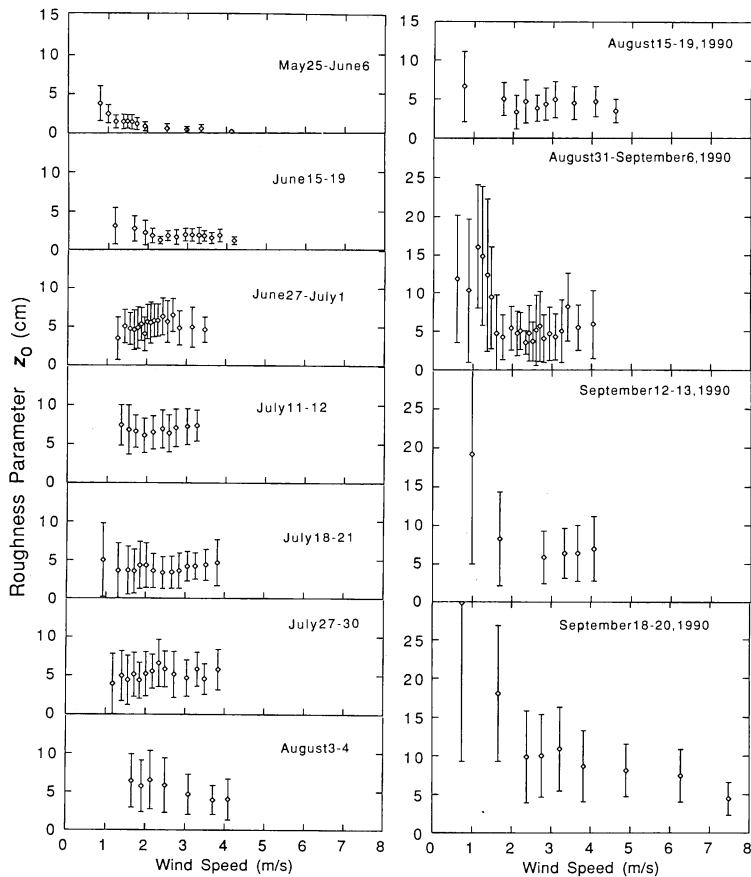


第4図 ダイズ群落の地面修正量 d と平均風速 u との関係の季節的推移
 h は植物高さ (cm)

6月中旬以後7月中旬までの期間では、ダイズの生育に伴って d は増加したが、 z_0 は7月11~12日に最も大きくなった。7月上中旬はダイズの生育が旺盛で、畝の凹凸が最も顕著であった時期に相当することから、植被面の凹凸が粗度を大きくしたと判断される。

7月下旬から8月上旬には、群落上層の葉面積が最大となり畝毎の凹凸は無く植被面が平面状になった。 d 、 z_0 と風速との関係は5月下旬の植物が非常に小さい時期と類似の傾向で、高風速時に z_0 が低下した。この時期には晴天が多く、日中は葉が立った状態が多く、低風速では植被面の葉の間に気流が入り込み、高風速では気流が植被面を越えるため、 d の増大と z_0 の減少とが生じたと考えられる。

9月上旬以後は、パラメータの標準偏差が大きい。これは、枯死や台風による落葉により群落上層の葉が減少し群落表面の凹凸が局所的に顕著となったこと、残っている茎や葉は強く、粗度の大きい部分が遍在することによる。地面修正量 d は8月中旬までの値に比べて70~80%に低下しており、群落内部にまで気流が侵入している。一方、粗度長 z_0 は、風速 2 m/s 以上では8月下旬までと同様の値であるが、それ以下の低風速域で大きい。上層に残っている葉や茎の分布が均一でなかったことから、風向や乱れ強度によって群落内部への気流の侵入程度が変化し、それに伴ってダイズも揺らぎ、約 1 m/s 付近で d の極小と z_0 の極大が生じたと考えられる。また、茎は群落上層にかなり分布しており、群落内に気流が深



第5図 ダイズ群落の粗度長 z_0 と平均風速 u との関係の季節的推移

く侵入する場合でも茎や幹の露出により粗度は大きくなくなったと考えられる。

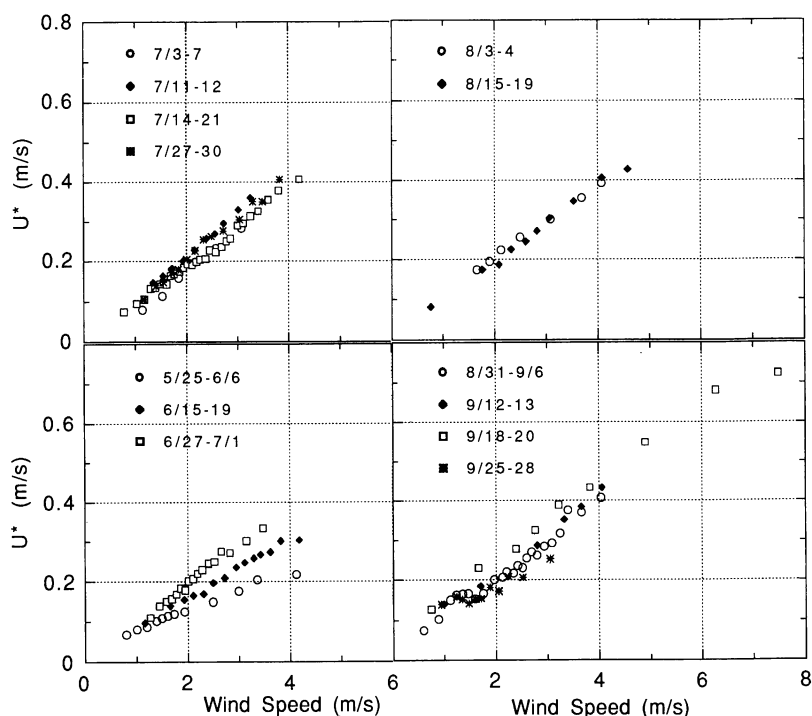
5.2 摩擦速度の変化

植物の生長や群落構造の変化に伴う、摩擦速度の変化を第6図に示す。各測定時期毎に摩擦速度と風速の関係としてまとめた。

ダイズ群落上の摩擦速度は、風速にほぼ比例して増加する結果であるが、風速との比 u_*/u やその直線性は、生育時期により若干異なる。生育初期には風速約 3 m/s 以下で勾配 u_*/u は小さく、ダイズの生育に伴って勾配が増加し、7月中旬に最大値となった。この時は群落密度が最大に達する直前であったが、粗度長は生育期間を通じて最も大きかった。 u に

対する u_* の直線性も風速約 3 m/s 以下の低風速域では高い。ダイズの生育に伴う u_*/u の増大は、草丈や葉面積指数の増大と共に群落の粗度としての機能が増していることを示している。このことは、植物が存在することによって裸地面状態より乱流拡散による鉛直方向の運動量 flux が増加し、植物群落の生育に伴って大気と群落とのガス交換が促進されることを示す。7月中旬以後8月中旬には、 d や z_0 等のパラメータの変化と同様に、 u_*/u にも大きい変化は認められない。この時期は、前述のように、葉面積が群落上層に集中し、植被面が均一な層状となったことによると考えられる。

u_* と u との関係を詳細にみると、生育初期には風



第6図 ダイズ群落の摩擦速度（バルク値）と平均風速との関係の季節的推移

速約3.5m/s以上で、 u_* は風速 u に比例して増加しなくなる傾向であるが、生育中期以後の u_*/u は風速約4 m/s程度でも風速約3.5m/s以下の値とほぼ同等である。7、8月には約3.5m/s以上の高風速条件はほとんど観測されなかったため、高風速域での u_*/u の挙動は明確に把握できなかった。

水稻の場合、穂ばらみ期以前は風速約3 m/s以上で u_*/u が低下し、高風速域で葉が風になびいて抵抗を減じる様子を明かにした（原菌ら，1990）。しかし出穂以後は、この臨界風速は高風速側へ移行し、水稻葉が堅くなるにつれて臨界風速は増大した。

水稻の生育に伴う u_*/u の変化と、ダイズのそれとを比較すると、生育初期には風速3.5m/s程度で柔らかいダイズ葉が風になびいて抵抗を減じたこと、9月中下旬には u_* が風速約7 m/s以上で頭打ちの傾向を示したことなどから、植被面が風になびいて抵抗を減らす臨界風速は、水稻の場合と同様に、ダイズ葉

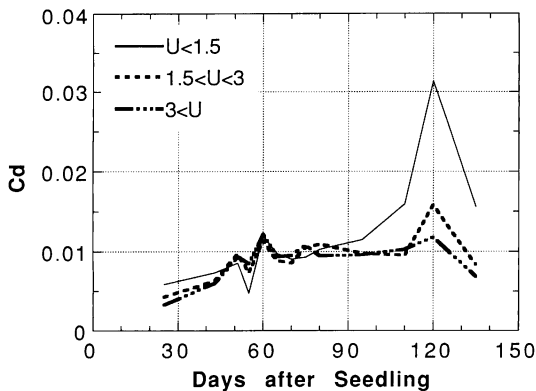
が堅くなるにつれて高風速側へ移行したと推測される。

9月には、低風速域で u_*/u がそれ以前の時期より大きくなった。これは落葉により植被面の粗度が増加したことによると考える。特に、風速約1.5m/s以下の低風速域で u_*/u が増大していることは、群落上層の落葉に伴う表面粗度増大の効果と考えて間違いない。

ダイズの生育後期に粗度長や摩擦速度が増大することは、穂波の発生などにより水稻のそれらに生じた影響とは異なった様相である。これは、水稻の稔実に伴う群落構造の変化がダイズなど広葉植物群落の場合と異なることに起因する特徴と判断される。

5.3 抵抗係数の変化

群落上の摩擦速度と風速との比 u_*/u から、(8)式によりバルク値としての抵抗係数が求められる。前述のようにダイズ群落上の u_*/u はダイズの生育時期や風速により若干変化したので、ここでは各時期毎の



第7図 ダイズ群落の抵抗係数の季節的变化

抵抗係数 C_d を風速1.5m/s以下, 1.5—3 m/s, 3 m/s以上の風速条件毎に区分して比較した。これを第7図に示す。

播種後約50日（6月下旬）までは、低風速時の抵抗係数 C_d が高風速条件より大きく、また、発芽直後の植物の小さい時期ほど風速による C_d の差が大きい。この時期の植被率は約25%から約75%であり、植被率が小さい場合ほど低風速の気流が畝間や株間の空隙など群落の凹部に侵入し易く、植物が抵抗として作用したことがわかる。

播種約60日後に C_d は極大値となり、その後やや低下し、ほぼ一定のまま約95日頃（8月上旬）まで経過している。この時期は C_d の値が風速によらずほぼ同じであり、風速増加に伴う群落上層の変形や気流自体の変化が少なかったことがわかる。8月中下旬の台風などによる群落上層の落葉が始まると、低風速で C_d は再び増大し、9月中旬に最大となった。生育後期における C_d の変化は、ダイズ群落上層の落葉により群落下層へ気流が侵入し易くなったこと、落葉に伴い植被面の凹凸が顕著となり、さらに、葉柄や茎、幹などが植被面に露出し粗度を大きくしたこと等により生じたと考えられる。ダイズの生育に伴う C_d の変化は、摩擦速度 u_* のみならず、地面修正量 d 、粗度長 z_0 などの変化とよく対応しており、植物群落の存在自体が気流に影響し、flux を変化させていることがわかる。

VI ダイズ群落上の CO_2 flux

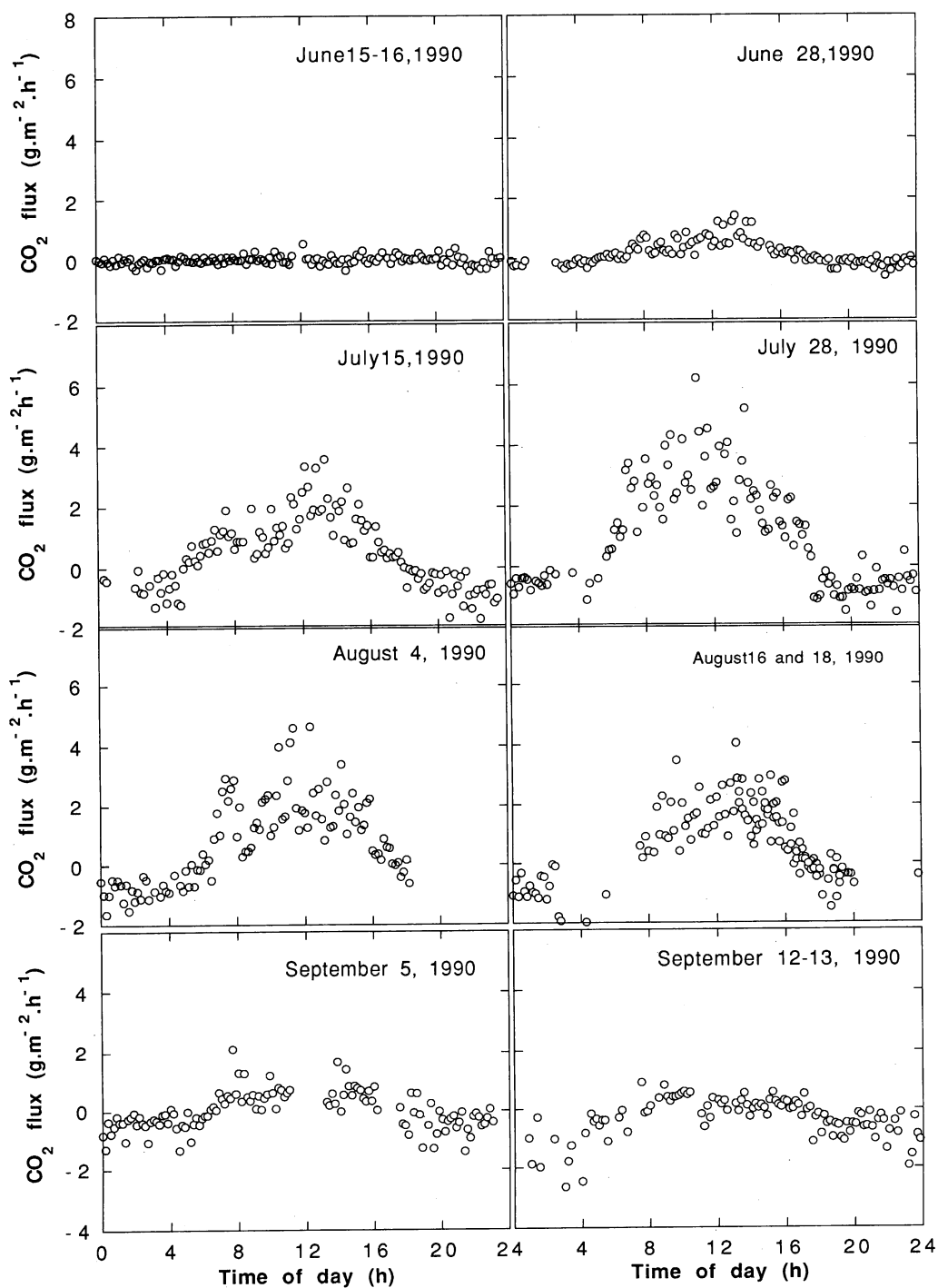
(7)式からダイズ群落上の CO_2 flux の日変化を求め、第8図にダイズの生育時期毎に示した。図中の点は10分平均値毎に傾度法で求めた群落境界層の輸送速度 D_f と濃度勾配との積である。図中の点の無い時間帯の大部分は、大気安定度が中立状態ではなく、傾度法で求めた D_f が適用できないと判断し、flux を計算しなかった部分である。

図では下向きの CO_2 flux を正の値として示した。光合成による CO_2 吸収のように植物が sink となる場合に正の値となる。逆に負の値の場合は下から上向きの CO_2 flux であり、地面や植物が CO_2 の source となっている場合に相当する。以下、下向きの CO_2 flux を吸収 flux と呼ぶ。

6.1 生育初期の CO_2 flux の特徴

6月中旬の CO_2 flux は昼夜共に非常に小さく、日変化はほとんど見られない。これは摩擦速度が低い値であったように、大気と群落との物質輸送能力が小さいことと、 CO_2 濃度勾配が小さいことによる。日中の CO_2 吸収 flux は小さく、6時から18時に $0.1 - 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ であるが、時々上向きの flux も観測されている。夜間は土壌や植物の呼吸による上向きの flux（負の値）が21時から4時に観測され、間欠的に $0.1 - 0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ の値である。6月15—16日の場合、日積算 flux はわずかであるが下向きで、この時期もダイズ群落が CO_2 の sink となっている。ダイズ地上部のバイオマスは最大値の5%以下と小さいこと（第3図）は、植物の呼吸による CO_2 放出より土壌からの CO_2 放出が多いことを示唆するが、夜間の上向き flux が小さいことは、土壌からの CO_2 放出自体も少ないことを示している。

日中、顕著な下向き flux を観測できなかった理由としては、この時期ダイズは草丈35cm, $LAI = 0.73$ と小さく、光合成による単位土地面積あたりの CO_2 吸収速度が小さかったことが挙げられる。日中の光合成による CO_2 固定速度と土壌からの放出速度とがほぼ釣り合った場合、見かけ上 flux は0となる。しかし、上述のように土壌からの CO_2 放出速度は小さいと判断されることから、この時期は光合成速度自



第8図 ダイズ群落上における CO₂flux の日変化の季節的推移

体が低いため、群落レベルの CO_2 flux に顕著な日変化が認められなかったと結論される。

6月下旬になると、日中の CO_2 flux は下向きで、日射強度にほぼ対応した変化を示し、夜間は上向き flux となり、日変化が明瞭となった。日中下向きの CO_2 flux は、13時頃最大値となり約 $1.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ である。日没の約20時以後 CO_2 flux は上向きとなり、植物と土壌の呼吸による CO_2 放出が認められる。6月28日の日積算 CO_2 flux は、約 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ であった。

6月中旬以後、日中の CO_2 吸収 flux は毎日に増大し、また、夜間の上向き flux も増大した。これらは、ダイズの地上部バイオマス増大（第3図）とよく対応している。

6.2 生育中期の CO_2 flux

7月中旬になると日中の下向き CO_2 flux はさらに増大し、最大約 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ となった。夜間の上向き CO_2 flux も最大約 $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ となり、植物のバイオマス増大と温度の上昇に伴う植物体と土壌の呼吸速度の増加が顕著となった。

7月28日の CO_2 吸収 flux は、日中の10分間平均値の最大値が約 $6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、日積算値は約 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ となり、ともにダイズ育成期間中最大となった。ダイズ群落の高レベルの光合成活性は8月上旬まで持続している。

ダイズの葉面積指数は7月20日頃に最大値となり、その後は第2図に示されるように、群落下層で枯れ上がりが生じ減少した。しかし、7月下旬から8月上中旬までのダイズ群落は、群落上層に光合成活性の比較的高い葉が密集した葉面積密度分布（第1図）であり、このような LAD 分布型は植物葉による日射吸収が高いと予想され、高い群落光合成速度に寄与したと考えられる。

CO_2 吸収 flux は、午後、日射強度の減少に伴って低下したが、日没の18時頃まで下向きの吸収 flux であった。日没後、 CO_2 flux は負の値となり、夜間はほぼ一定の $-1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ で推移した。負の flux は、植物群落から大気への CO_2 輸送であり、植物や土壌微生物の呼吸による CO_2 放出のため、ダイズ群落直上の CO_2 濃度は夜間周辺の大気よりも上昇した（前

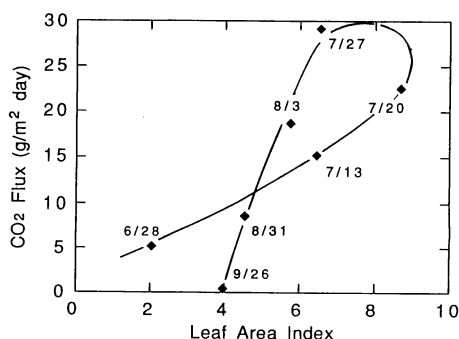
報第3図、山田ら、1991）。

CO_2 flux と群落直上の CO_2 濃度は、日射強度によく対応して変化し、特に午前中には濃度低下が顕著であった。早朝から午前中の風速が $2 - 2.5 \text{ m/s}$ で風速変動が小さい場合でも、 CO_2 濃度は正午頃まで低下していたことから、この時期、群落直上の CO_2 濃度が低下したのは、逆転層の消滅や風速増大による拡散より、植物の光合成による吸収によって生じたと結論される。

6.3 生育後期の CO_2 flux

8月中旬以後は栄養生長期から生殖成長期へ移り、子実の肥大に伴って葉や茎の成長は停止し、葉面積指数は大きく減少した。日中の CO_2 flux は最大で約 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 程度であるが、8月中旬から日積算値は低下し始め、光合成活性の低下が認められる。夜間の上向き flux は7月中旬から8月中旬までは大きい変化は認められない。

9月上旬になると、日中の CO_2 吸収 flux は最大値が $3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下に低下し、9月中旬以後はさらに低下し最大値が約 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下となった。低風速条件下でのダイズ群落の抵抗係数（第7図）は、9月中旬が最も大きく、次に9月上旬が大きい。大気から群落への運動量輸送量はダイズの生育後期が最大となったが、 CO_2 輸送に関しては7月下旬以後減少のみであった。同時に測定した O_3 flux は、8月中旬以後も大きい減少は認められず、逆に摩擦速度や抵抗係数と同様な増加傾向が見られた（前報第11図、山田ら、1991）。 O_3 flux と CO_2 吸収 flux との差異



第9図 ダイズ群落における日積算 CO_2 吸収 flux と葉面積指数との関係

は、ダイズの光合成活性の減退、すなわち CO_2 固定機能の低下によるものであることを示している。吸収 flux の日変化の振幅が小さいことも、 CO_2 固定機能の低下を裏付けるものといえる。

6.4 ダイズの CO_2 固定機能の季節的变化

ダイズ群落における CO_2 flux を CO_2 固定機能との関係で把握するために、葉面積指数 (LAI) と CO_2 吸収 flux の日積算値との関係を第9図に示した。生育中期までは、葉面積指数 (LAI) の増加に伴い日積算 CO_2 吸収 flux は増加し、7月下旬に最大値となった後、急激に減少している様子が認められる。同じ葉面積指数で日積算吸収 flux の値が異なるのは、植物体の老化に伴う光合成活性、すなわち植物の CO_2 固定機能の低下を示すものである。

O_3 flux は8月中旬以後もそれ以前と大差のないレベルであり (山田ら, 1991)、一方、 CO_2 flux は8月中旬以後最盛期の約1/2となり、 O_3 flux との間に大きい差異がみられる。植物の CO_2 固定機能が低下した8月中旬以後の O_3 flux は、摩擦速度の推移と似た傾向を示し、生理的活性の衰退とは逆に、9月以後落葉に伴って低風速域での摩擦速度が増大したこととよく対応する。水稻の場合、大部分の生育時期に CO_2 flux と O_3 flux とがほぼ比例した (原菌・小林, 1990) が、ダイズでは生育最盛期にのみ CO_2 flux と O_3 flux とに弱い比例関係が認められた。このような差異は、水稻では止め葉や穎等の光合成活性が生育後期まで比較的高く維持されるが、畑作物のダイズの場合生殖成長に移行する頃から光合成活性が顕著に低下したため生じたと考えられる。

ダイズの生育期間を通した群落上の運動量輸送、 CO_2 flux、 O_3 flux の観測結果を比較すると、植物群落自体の持つ運動量や物質の輸送機能は、群落の物理的形状により変化することがわかり、詳細には群落表面の粗度や群落構造によって異なるが、大略的には群落のバイオマス量にほぼ比例していることがわかった。したがって、群落が一定の規模と構造を持つまで生長した後は、各物質に対する植物の生理的固定機能の強さにより、それぞれの flux が異なると結論される。

VII まとめ

ダイズの生育期間を通じて、群落上の運動量 flux、 CO_2 flux、 O_3 flux を観測し、気流条件や群落構造との関係を検討した。

ダイズは7月下旬に葉面積指数が最大となり、植被面がほぼ均一となった。群落上の摩擦速度と抵抗係数は、7月上旬まではダイズの生長と共に増加したが、それ以後は8月中旬まで大きい変化はなかった。

8月中旬以後、低風速時に地面修正量の低下と粗度の増大が生じ、摩擦速度と抵抗係数が増加した。これらは、群落上層の落葉により、植被面の凹凸が顕著となったことに起因しており、群落構造の変化が flux に影響することを明らかにできた。

ダイズ群落における日中の CO_2 吸収 flux は、7月下旬の葉面積指数が最大となる頃まで増大し、その後は急激に減少した。一日全体の CO_2 収支では、葉面積指数が約0.8以上となった頃から、植物による吸収が土壌呼吸を含めた放出を上回り、大気 CO_2 の sink となった。生育が旺盛な7月下旬には日積算吸収量は最大の $30\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ となった。 CO_2 吸収 flux と葉面積指数や O_3 flux との関係から、生育中期以後の吸収 flux の減少はダイズの CO_2 固定機能の低下によるものであることを明らかにできた。

ダイズの群落構造と flux の経時変化の比較から、大気と植物群落との間の運動量や物質の輸送機能は、群落表面の粗度や群落の凹凸によって異なり、運動量輸送量は群落のバイオマス量にほぼ比例していることがわかった。

本研究は、科学技術庁地球科学技術特定調査研究「地球温暖化の原因物質の全球的挙動とその影響に関する観測研究」、ならびに、農林水産省一般別枠研究「地球環境変化に伴う農林水産生態系の動態解明と予測技術の開発」により実施した。観測では岡野通明博士 (現、森林総研)、筑波大学生瀬戸陽子氏の協力を得た。データ解析では宮田明、土谷彰男両研究員の協力を得た。また、ダイズの栽培管理ならびに生育調査には農業環境技術研究所業務科の方々の協

力を得た。これらの方々と関係機関に厚くお礼申し上げる。

文 献

- 井上栄一, 谷 信輝, 今井和彦(1954): 耕地風の測定, 農業気象, 農技研報, **10**, 105-108.
- 大滝英治・瀬尾琢朗・松井哲司(1987): 二酸化炭素変動計の開発, 天気, **34**, 3-14.
- 小川利紘(1991): IGAC について, 第 1 回 IGAC シンポジウム報告集, 1-2.
- 原菌芳信・林陽生・那須野正明・鳥谷均(1989): 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, 筑波大学水理実験センター報告, No.13, 105-112.
- 原菌芳信・村上智美・及川武久(1990): 気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用 1. 植物群落構造の差異がフラックスや群落抵抗係数に及ぼす影響, 筑波大学水理実験センター報告, No.14, 1-14.
- 原菌芳信・小林和彦(1990): 水稻の生育に伴うオゾンフラックスの変化, 1990年度農業気象学会講演要旨, 92-93.
- 村上智美・原菌芳信・川村隆一・西沢利栄(1990): 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, 筑波大学水理実験センター報告, No. 14, 15-29.
- 矢吹万寿(1985): 『植物の動的環境』, 朝倉書店, 東京, 200p.
- 山田千絵・原菌芳信・岡野通明・西沢利栄(1991): ダイズ群落上の乱流輸送特性, 筑波大学水理実験センター報告, No.16, 1-11.
- Denmead, O. T. and Bradley, E. F. (1985): Flux-gradient relationships in a forest canopy. *The Forest-Atmosphere Interaction*, eds. Hut-chison, B. A. and Hicks, B. B., D. Reidel Publishing, 421-442.
- Jones, H. G. (1983): *Plants and Microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge, 323p.
- Maitani, T. and Ohtaki, E. (1987): Turbulent transport processes of momentum and sensible heat in the surface layer over a paddy field. *Boundary-Layer Met.*, **40**, 283-293.
- Monteith, J. L. (1990): *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 291p.
- Ohtaki, E. (1984a): Application on an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. *Boundary-Layer Met.*, **29**, 85-107.
- Ohtaki, E. (1984b): The budget of carbon di-oxide variance in the surface layer over vegetated fields. *Boundary-Layer Met.*, **29**, 251-261.
- Ohtaki, E. (1985): On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. *Boundary-Layer Met.*, **32**, 25-37.
- Thom, A. S. (1971): Momentum, mass and heat exchange of plant communities, in *Vegetation and the atmosphere*, ed. by J. L. Monteith, Academic Press, London, 57-109.