

# 熱収支法と傾度法によるイネ、 ダイズ群落の乱流輸送量の比較

## Comparative Study of Turbulent Transfer over Rice and Soybean Fields by Means of Heat Budget and Gradient Methods

原 菌 芳信\*・野 口 伸一\*\*・宮 田 明\*・西 沢 利栄\*\*\*

Yoshinobu HARAZONO, Shin-ichi NOGUCHI,  
Akira MIYATA and Toshie NISHIZAWA

### I はじめに

大気 CO<sub>2</sub>濃度の上昇やそれに伴う温暖化が地球環境変化に及ぼす影響が問題となっている。中でも、光合成による CO<sub>2</sub>固定、水田からの CH<sub>4</sub>放出、林地や耕地における CH<sub>4</sub>や N<sub>2</sub>O の放出と吸収など、植物群落と大気とのガス交換は大気温暖化ガスの動態と密接に関係している。このため、大気—植物群落間の熱やガス交換の把握、すなわち、群落境界層におけるガスフラックスを自然状態で詳細に把握することが求められている（小川，1991）。

測器の発達により、顕熱、潜熱や CO<sub>2</sub>のフラックスは渦相関法により直接的測定が可能になったが（Ohtaki, 1984；大滝ほか，1987；Maitani and Ohtaki, 1987），CH<sub>4</sub>，N<sub>2</sub>O，NO，O<sub>3</sub>等の微量濃度ガスについては、2 高度における濃度差とその間の拡散速度から評価する（原菌ほか，1992b）。この場合、濃度差は直接測定できるが、拡散速度は傾度法や熱収支法により求めるのが一般的である（内嶋，1974；青木，1988；井上，1986，1988）。

傾度法と熱収支法は、それぞれに長所があるが、実際の植物群落における CO<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>O などの輸送量を評価する場合に、どのような気象条件でどの方法の適用性が高いかと言ったことや、大気—植物群落間の

ガス交換過程を特徴づける群落構造や植被面の状態が異なる場合にどの方法が望ましいかなどについては、十分明らかにされていない。

筆者らは、これまでに、水稻、アカマツ、ダイズなどの群落上で、異なる解析手法によるガスフラックスの測定を行ってきた（那須野ほか，1989；原菌ほか，1989，1990，1992a；村上ほか，1990；山田ほか，1992）が、各手法によるフラックス評価量が気象条件によって異なり、その差異が小さい場合と大きい場合とがあった。生育期間を通した長期にわたるフラックス測定では、適用可能な手法が限定される場合があり、統一的なフラックス評価のためには手法間の差異とその原因を明らかにする必要がある。

本研究では、水稻群落と陸稲群落において傾度法と熱収支法による同時観測を実施し、上述の問題点を明らかにするとともに、1990年度にダイズ群落で観測した結果を基に、傾度法と熱収支法により評価された CO<sub>2</sub>フラックスを比較し、それぞれの特徴と適用について検討する。

### II 接地境界層におけるフラックスの評価手法

#### 1) フラックス—勾配関係

植物群落と接地境界層（接地層）の気層との間の

\*農業環境技術研究所・気象管理科 \*\*筑波大学自然科学類（現 クボタ） \*\*\*筑波大学地球科学系（現 ケント州立大学）

エネルギーや水蒸気、CO<sub>2</sub>などの交換は、群落上の気流状態（風速や乱れの強さ）に強く支配される。接地層内部は、粗度層（Roughness sublayer）や自由対流層などいくつかに分けることができるが、大気が安定な状態と不安定な状態とで構造が異なるなど、区分と定義は様々である（近藤，1981）。本研究では近藤（1981）と Monteith and Unsworth（1990）に準拠した区分により、対象範囲を第1図のように、植物群落直上の強制対流層（粗度層）と自由対流層（慣性小領域）に限定して検討する。接地層では中立状態の場合に等フラックスとなり、フラックスは濃度勾配と拡散係数に比例する。物質のフラックスの場合次式で表される。

$$\text{Flux} = \alpha \left( k + K_c \right) \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

$\alpha$  は比例係数、 $k$  は物質の分子拡散係数、 $K_c$  は物質の乱流拡散係数、 $\partial C / \partial z$  は濃度勾配である。接地層のように乱れの発達した気層内では、 $k \ll K_c$  となり、 $k$  は無視できる（井上，1986）。測定高度  $z_1$ 、 $z_2$  で積分し、2 高度の濃度を  $C_1$ 、 $C_2$  とすると次式のようになる。

$$\text{Flux} = \alpha \cdot \frac{(C_2 - C_1)}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_c}} \quad (2)$$

次式の定義により拡散係数  $K_c$  を速度の次元を持つ拡散（輸送）速度  $Df$  に置き換えるとフラックスは(4)式の差分式で評価できることとなる。

$$\frac{1}{Df} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_c}$$

$$\text{Flux} = \alpha \cdot Df \cdot (C_2 - C_1) \quad (4)$$

$K_c$  や濃度勾配を実際に測定し、微分型の(1)式でフラックスを評価するのは困難であり、対象とする2高度（ $z_1$ 、 $z_2$ ）で濃度を測定し、差分式を用いるのが汎用性が高い。このため、拡散速度  $Df$  の評価が重要となる。 $Df$  を観測的に評価する方法としては、傾度法と熱収支法がある。実際には気象条件により、等フラックスや拡散係数一定等の仮定が成立しない場合があり、問題を含むこととなる。以下、評価法に含まれる問題点を検討するために、やや教科書的になるが、傾度法と熱収支法について示す。

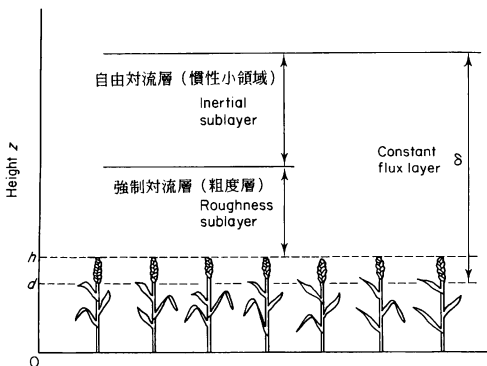
## 2) 傾度法（空気力学的方法）

広い均一な植物群落上や裸地面上などの接地層の風速分布は、大気が中立に近い状態の場合に次式の対数分布となる（近藤，1981）。

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left( \ln \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (5)$$

ここで、 $\bar{u}(z)$  は高さ  $z$  における水平方向の平均風速で、 $\bar{\phantom{x}}$  は時間平均を示す。 $u_*$  は摩擦速度で、 $z_0$  は粗度長、 $d$  は地面修正量である。 $\kappa$  はカルマン定数である。(5)式の風速分布は地表面の摩擦抵抗により生じ、気流は地表面に剪断応力（ $\tau$ ）を及ぼす。剪断応力は次式のように運動量フラックスとして定義され、下向きに輸送される（Oke, 1978）。

$$\tau = \rho \cdot K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (6)$$



第1図 本論で対象とする植物群落上の境界層の領域（Monteith and Unsworth（1990）より引用）

$K_m$ は運動量の乱流拡散係数、 $\partial \bar{u} / \partial z$  風速の鉛直勾配、 $\rho$  は空気密度である。(2)~(4)式と同様に  $Df_m$ を運動量の拡散速度、 $\bar{u}_1$ ,  $\bar{u}_2$ を高度  $z_1$ ,  $z_2$ の平均風速とし、この間で積分すると次式ようになる。

$$\tau = \rho \cdot Df_m \cdot (\bar{u}_2 - \bar{u}_1) \quad (7)$$

一方、次元解析から  $\tau$  は速度の2乗に比例し、任意の基準高度における摩擦速度  $u_*$  とは、 $u_*^2 = \tau / \rho$  の関係となり、 $Df_m$ は次式ようになる。

$$Df_m = \frac{u_*^2}{(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)} \quad (8)$$

風速分布が対数型の場合には、(5)式より、

$$u_* = \frac{\kappa (\bar{u}_2 - \bar{u}_1)}{\ln \{ (z_2 - d) / (z_1 - d) \}} \quad (9)$$

となり、 $Df_m$ は次式ようになる。

$$Df_m = \frac{\kappa^2 (\bar{u}_2 - \bar{u}_1)}{[\ln \{ (z_2 - d) / (z_1 - d) \}]^2} \quad (10)$$

傾度法で運動量以外のフラックスを求める場合、物質や熱の乱流拡散係数  $K_c$ 、 $K_h$ が運動量の乱流拡散係数  $K_m$ に等しく、物質や熱の拡散速度  $Df_c$ 、 $Df_h$ が運動量の拡散速度  $Df_m$ に等しいと仮定して(10)式を適用する。以後、 $Df_c = Df_h = Df_m$ を  $Df_g$ と表すことにする。大気状態が中立に近い乱流状態では(5)式が満たされ、この仮定が成り立つ。しかし、a：中立状態でない場合、b：等フラックスでない場合、c：乱流混合が弱い場合などに、フラックスを精度よく求めるには補正が必要となる。

Thom (1975) は、温度勾配が風速分布を変形させることによる運動量フラックスへの影響を、安定度関数  $\Phi_m$  と  $\partial \bar{u} / \partial z$  の積で、また熱や物質については  $\Phi_h$  と  $\Phi_c$  で補正し、補正関数  $Sf$  (11)式を半経験的に導き、(12)式でフラックスを補正することを示している。

$$Sf = (\Phi_m \cdot \Phi_c)^{-1} = (\Phi_m \cdot \Phi_h)^{-1} \quad (11)$$

$$Sf = (1 - 16 Ri)^{3/4} \quad (Ri < 0) \quad (12a)$$

$$Sf = (1 - 5 Ri)^2 \quad (0 \leq Ri < 0.2) \quad (12b)$$

$Ri$  は(13)式で定義されるリチャードソン数である。

$$Ri = \frac{g \times (\Delta T / \Delta z)}{\theta \times (\Delta \bar{u} / \Delta z)^2} \quad (13)$$

$\Delta T$ ,  $\Delta \bar{u}$ ,  $\Delta z$  は対象とする2高度間の温位差、風速差、高度差、 $g$  は重力加速度、 $\theta$  は2高度間の平均温位 (単位K) である。

Thom (1975) は(12)式は中立条件下で求めたフラックスを補正する関数であると述べており、(11)式を導出する過程でも、熱や物質のフラックスを摩擦温度や摩擦速度を用いた差分型で置き換え、実用的な適用を考慮したと理解される。本研究では(13)式の  $Ri$  を指標にし、補正式(12)を用いて  $Df$  を(14)式のように補正し、(12)式による補正の妥当性を検討した。ここで  $Df_{gc}$  は、傾度法により求めた値を補正したものである。

$$Df_{gc} = Df \cdot Sf$$

### 3) 熱収支法

任意の平面でのエネルギーや質量の交換及びエネルギー形態の変換を考える。この面が能動面であり、自然環境では植物群落の植被面、裸地表面、水面あるいは雪面が能動面となる。水平方向の移流がない定常状態の裸地面では、純放射フラックスを  $R_n$ 、顕熱フラックスを  $H$ 、潜熱フラックスを  $IE$ 、地中熱フラックスを  $G$  とすると、エネルギー収支は次式のようにになる。

$$R_n = H + IE + G \quad (15)$$

(15)式に拡散速度で定義される顕熱フラックスと潜熱フラックスを代入すると以下のようにになる。

$$R_n = Cp \cdot \rho \cdot Df_h \cdot (\theta_1 - \theta_2) + l \cdot \rho \cdot Df_w \cdot (q_1 - q_2) + G \quad (16)$$

ここで、 $\theta_1$ ,  $\theta_2$  は高度  $z_1$ ,  $z_2$  における温位、 $Df_h$ 、 $Df_w$  はそれぞれ熱と水蒸気の拡散速度であり、両者が等しい場合には、熱収支法による拡散速度  $Df_h (= Df_h = Df_w)$  は(17)式で求めることができる。乱流混合が激しい場合には上述の仮定が成り立つ。

$$Df_{fi} = \frac{Rn - G}{C_p \cdot \rho \cdot (\theta_1 - \theta_2) + l \cdot \rho \cdot (q_1 - q_2)} \quad (17)$$

#### 4) 傾度法と熱収支法の問題点の検討

傾度法、熱収支法ではそれぞれ(10)、(17)式を用いて拡散速度  $Dfg$  と  $Df_{fi}$  を求めるが、一般的な測器を用いた場合、 $(\theta_1 - \theta_2)$  や  $(q_1 - q_2)$  より  $(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)$  のほうが測定精度は高く、熱収支法では測器の器差が重要になる。一方、熱収支法は顕熱と潜熱の輸送量に基づいて  $Df_{fi}$  を評価することから、傾度法のような運動量輸送と物質輸送との相似性に関する問題は無視できるが、湿地や水田など湛水状態では貯熱項の評価精度に問題がある。水面では貯熱項の評価に起因する  $Df_{fi}$  の誤差は日中10%以上あり、夜間はさらに大きくなる (Denmead and Bradley, 1985)。また、夜間  $Rn - G$  が小さい場合や、2 高度間の気温差  $\theta_1 - \theta_2$  や湿度差  $q_1 - q_2$  が小さい場合など、測定精度の限界による評価精度の低下と  $Df_{fi}$  の発散をもたらす、強安定条件では  $Df_w \neq Df_h$  となるなど、適用不可能になる。このような状況は夜間や早朝のみならず、降雨中や霧の場合にも生じる。したがって、水面上の  $CH_4$  フラックスの測定や昼夜を通した連続測定には傾度法が必要となる。

傾度法については、従来より  $Dfg$  が日中過小評価となることが指摘され、大気安定度を変数とする関数による補正が試みられてきた (Bruntsaert, 1992) が、適用方法が煩雑であるなど、前述の Thom (1975) の補正が実用的な場合が多い。夜間大気が安定な場合の補正では、 $Dfg_c$  を小さく見積る傾向があり、大気が安定な場合の補正は必要ないとの見方もある (植田, 1992)。これは大気が安定な場合でも風速分布が対数型で  $Dfg$  を算定できる範囲では、乱流拡散が支配的との考え方による。これらの点をふまえて検討する。

### III 測定方法および解析方法

#### 1) 測定場所と対象作物の生育状況

1991年度の観測は、農業環境技術研究所 (つくば市観音台) 内の水田圃場と畑圃場で水稻と陸稲を対象として実施した。水田圃場は原菌ほか (1990) と

同じであり、圃場 (250m×400m) のほぼ中央の水田に観測点を設けた。水田には5月中旬にシナノモチ3号が栽培密度17.28株/m<sup>2</sup>で移植され、慣行の栽培方法で管理された。6月中旬以降は圃場全体の草丈がほぼ均一な状態となった。畑圃場は山田ほか (1992) と同じで、圃場 (200m×200m) の一区画 (20a) に5月上旬にキヨハタモチを平均畝間0.7mで条植えた。隣接した畑には、ダイズ、トウモロコシ等が栽培され、8月中旬～9月上旬に風上側のトウモロコシが陸稲の草丈より大きくなったが、それ以外の時期は陸稲の草丈が他の畑よりやや高い程度であった。畑圃場では十分な吹走距離を確保できないが、夏期の卓越風に対して吹走距離ができるだけ長くなるように観測用ポールを設定した。

稲の生育状況、及び群落の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、2週間～3週間毎に生育調査を行った。地上10cm 毎に層区分を行い、各層毎に葉 (同化器官) と茎・子実部 (非同化器官) とに分解し、葉面積、重さなどの空間分布を調べた。

#### 2) 測定方法・及び測定期間・測定項目

測定方法、測定項目、測器の設置高さ、記録方法などは、原菌ほか (1990)、山田ほか (1992) とほとんど同じである。主な変更点は、葉温と水田水温の測定を追加したことである。水温測定には白金抵抗測温体 (林電工) を、植被面の葉温測定には赤外放射温度計 (ミノルタ, 506C) を用いた。

CO<sub>2</sub>濃度測定用のガス吸引高さ気温・湿度測定高さは、水稻と陸稲の生長に合わせて変えたが、下方は植被面直上 (約5～10cm)、上方はその上70～80cmとした。これは、圃場面積が狭いため移流の影響をできるだけ少なくするためであり、設定高さが測定結果に及ぼす影響については後節で検討する。測定は1991年6月上旬から9月下旬の刈り取り直後まで連続的に行った。

#### 3) 空気力学的パラメータと拡散速度の算出

空気力学的パラメータや拡散速度は、測器の器差補正後の10分平均値から計算した。熱収支法による拡散速度も、器差補正後の10分平均値を用いた。

傾度法で拡散速度  $Dfg$  を求めるのに必要な、地面

修正量  $d$ 、粗度長  $z_0$  などの空気力学的パラメータの算定方法は原田ほか (1989, 1990, 1992) と同様である。まず、作図法 (谷, 1974) に準拠した繰り返し計算で、(5)式に最も合致する  $d$  を求め、その  $d$  を用いて  $z_0$ 、 $u_{*c}$  などを計算した。

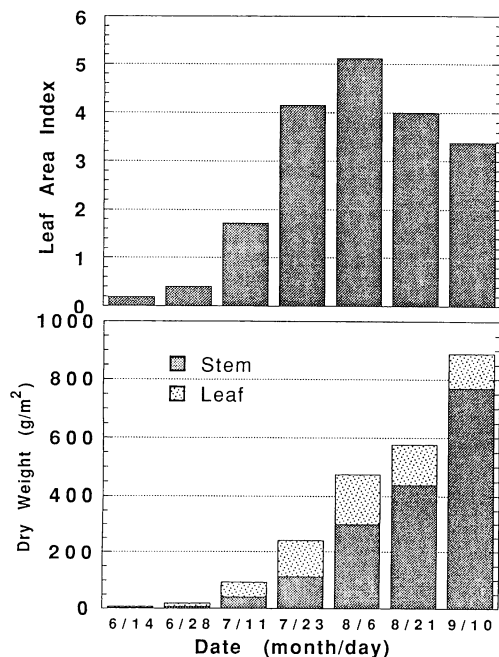
#### IV 結果及び考察

##### 1) 陸稲群落の拡散速度と気象条件

陸稲の葉面積指数と乾物重の変化を第2図に示す。7月中旬から下旬にかけて陸稲の生育速度が最も高く、8月上旬に葉面積指数は最大の5.1となった。

##### (1) 傾度法による群落拡散速度の風速依存性

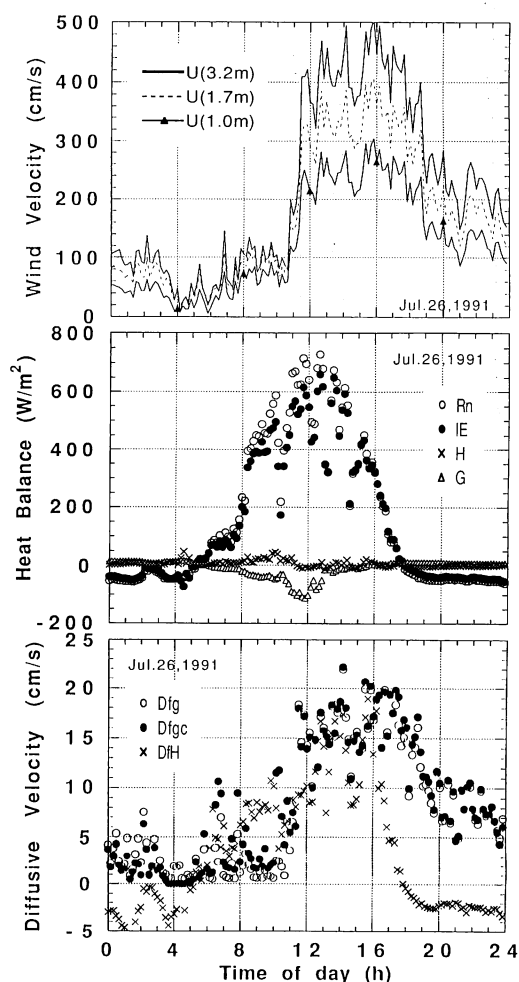
葉面積がほぼ最大となった7月下旬の、陸稲群落上の熱収支や拡散速度の測定結果を第3図 (7月26日)、第4図 (7月28日) に示す。図は上から、群落拡散速度に影響する群落上の風速分布 (3 高度の風速を表示した)、熱収支法による熱収支配分、群落拡散速度である。  $Dfg$  は傾度法による計算値、



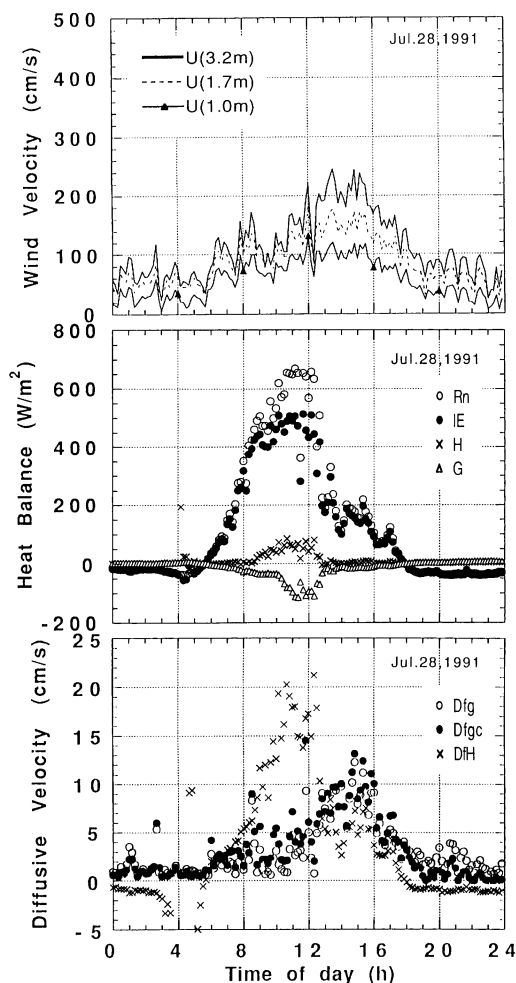
第2図 陸稲の生育に伴う葉面積指数と乾物重の変化

$Dfgc$  はリチャードソン数  $Ri$  を用いた(12)式による補正值、 $Df_{fi}$  は熱収支法による値を示している。

第3、4図は梅雨明け直後で、両日とも土壌水分、日射などが陸稲の生育に好ましい条件の結果である。両図の比較から、安定度補正しない拡散速度  $Dfg$  は、強風時ほど大きく、夜間も植被面高さの風速が  $1\text{ m/s}$  以上の場合 (7月26日) は  $Dfg$  が  $5\sim 10\text{ cm/s}$  となり、 $Dfg$  は風速依存性が高いことがわかる。26日11時以後の強風条件下では、 $Ri \approx 0$  と中立状態では



第3図 強風速時の陸稲群落上の風速分布、熱収支と群落拡散速度 ( $Dfg$  は傾度法、 $Dfgc$  は安定度補正した傾度法、 $Df_{fi}$  は熱収支法)



第4図 低風速時の陸稲群落上の風速分布，熱収支と群落拡散速度（記号は図3と同じ）

あるため，安定度補正した値  $Df_{gc}$  と無補正值  $Df_g$  はほとんど変わらないが，午前中の低風速条件下では，(12a) 式の補正を行うことにより  $Df_{gc}$  が  $Df_g$  の2～3倍の値となり，熱収支法による評価値  $Df_{fi}$  とほぼ同レベルとなっている。

28日は低風速で  $Df_g$  は低い値である。特に風速の低い午前中は安定度補正した  $Df_{gc}$  も低く，熱収支法による拡散速度  $Df_{fi}$  との差が大きい。これは熱収支配分に見られるように，潜熱輸送が大きいため植被

面の温度が上昇せず，低風速にもかかわらず温度勾配が小さく測定されたことによる。

## (2) 熱収支法による拡散速度の純放射依存性

熱収支法による拡散速度  $Df_{fi}$  を7月26日について見ると，午前と午後とで  $Rn$ ， $IE$ ， $H$  に大きい差異はみられないが， $Df_{fi}$  は午後が午前の約1.5倍となっており，風速増大による輸送量の増加が反映されている。しかし，日没に伴って  $Rn$  が急減すると高風速が持続しているにもかかわらず， $Df_{fi}$  は急に減少し強い放射依存性が認められる。

28日は午前中は  $Rn$  が大きく午後  $Rn$  が急減したが，午前中の低風速にもかかわらず  $Df_{fi}$  は大きい値である。午後  $Rn$  の減少により  $Df_{fi}$  も急に低下しており，低風速条件では  $Df_{fi}$  が放射強度に大きく影響されることがわかる。そして，低風速，強日射条件で  $Df_{fi} > Df_{gc}$  となることから，潜熱輸送が大きく顕熱輸送が小さくなる条件，すなわち，ボウエン比が0に近いような条件では，安定度補正の効果が少なく  $Df_{gc}$  を過小評価する傾向である。

深夜から早朝の  $Df_{fi}$  は変動が大きく，群落上のフラックス評価に用いるのは困難である。日没後の場合も  $Df_{fi}$  は負の値となっている。これらは，前述の検討のように  $Df_w \neq Df_h$  となること，熱収支配分図に明らかのように，純放射，顕熱，潜熱，地中熱の各フラックスが小さく，ボウエン比が-1に近く，わずかな変化で  $Df_{fi}$  が負となったり，(17)式の値が発散する。

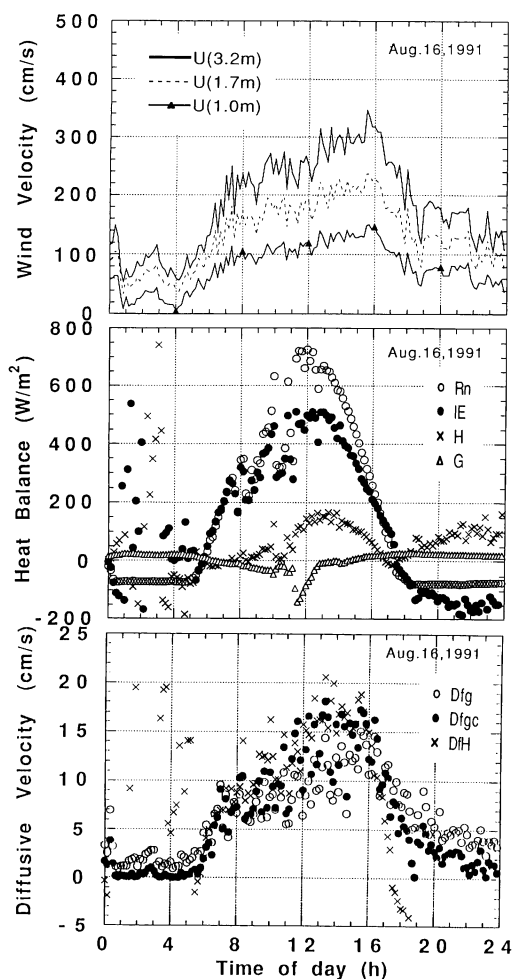
したがって，純放射強度の低い夜間には，熱収支法より傾度法がより安定した拡散速度の評価を与ええると言える。しかし，傾度法の安定度補正を含めた精度の検討が必要であり，後節で検討する。

## (3) 傾度法と熱収支法とが合致する場合

出穂期の結果を第5図に示す。8月16日は出穂後のため植被面の構造が7月下旬とは大きく異なり，7月より土壌がやや乾燥した条件での結果である。

1991年夏は降水量が多く，陸稲が水ストレスを受けた兆候は認められず，熱収支配分でも，純放射量が潜熱輸送量と顕熱輸送量とに分配されており，7月に比べて午後の顕熱輸送量の増加が顕著である。

日中は安定度補正した傾度法の拡散速度  $Df_{gc}$  と熱収支法による値  $Df_{fi}$  がほぼ同じである。晴天で，群



第5図 出穂期の陸稲群落上の風速分布，熱収支と群落拡散速度（記号は図3と同じ）

落上の風速が2～3 m/s程度で，純放射量が潜熱輸送量と顕熱輸送量に適度に分配されている場合には，安定度補正による傾度法と熱収支法とがほぼ同じ拡散速度を与えることがわかる。

しかし，夜間や早朝の拡散速度についてみると，7月の場合と同様に手法間に大きい差異がある。熱収支法により求めた拡散速度  $D_{fh}$  は，早朝には発散し日没後から夜間には負の値になるなど，利用不可能であることは，他の生育時期と同様である。また，(12)b式で補正した  $D_{fgc}$  を用いて求めた  $IE$  と  $H$  との

和は，第4図や第5図の夜間の熱収支の純放射量  $Rn$  と地中熱流量  $G$  の差を補償できない。このことは，(12)b式の安定度補正が過小評価となることを示す。

## 2) 水稻群落での傾度法と熱収支法の適用

### (1) 水田での測定状況

水田は畑地と異なり水体による貯熱があり，これと水温が熱収支に及ぼす影響は無視できない。特に，測定対象水田では長い吹走距離を確保できなかったため，乾湿球温度やガス濃度の測定高さを植被面直上と，その上約70cmの2高度としたが，これが熱収支に影響する可能性がある。測定は移植後から収穫期まで連続的に実施したが，ここでは6月下旬，8月上旬，9月上旬の代表的な結果を基に，熱収支法や傾度法で水稻群落の群落拡散速度を求める場合の問題点などを検討する。

なお，測定対象水田における水体への貯熱量  $Q_w$  は次式で10分毎の水温変化から求めた。

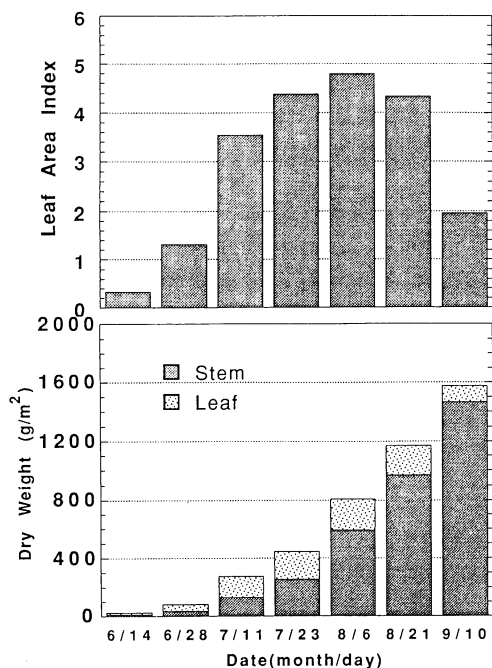
$$Q_w = C_w (\Delta T_w \cdot \delta + \Delta T_{wf} \cdot V_f) \quad (18)$$

$C_w$  は水の熱容量， $\Delta T_w$  は10分間の水温変化， $\delta$  は水深， $V_f$  は流出量， $\Delta T_{wf}$  は流入水温と流出水温との差である。水深は浅く， $\Delta T_w$ ， $\Delta T_{wf}$  は小さい値で， $V_f \approx 0$ であったことから，以下の図中では地中熱流量  $G$  に含めた。また，ボウエン比法で顕熱量  $H$  と潜熱量  $IE$  を求めたところ，日中は植被面直上の気温がその上方より低い場合に  $Rn < IE$  となり，夜間は植被面直上で気温の逆転が生じた場合に  $H$  と  $IE$  とが発散した。このような状況は相当の頻度で出現したことから，図中には日射量  $Rs$  と  $Rn$ ， $G$  のみを示した。

### (2) 水稻が小さい時期の結果

水稻の生育に伴う葉面積指数と乾物重の変化を第6図に示す。生育後期の茎重は稈や子実重を含む。

水稻が小さく水面が大部分を占める時期（6月26日）の日射  $Rs$ ，純放射  $Rn$ ，地中熱量  $G$ ，および，3高度の気温と水温の日変化を第7図に示す。植被面高さは約35cmで葉面積指数  $LAI$  は1.32であった。この日は，梅雨の間の晴天日で，最大日射量は950  $W/m^2$ ，その時の純放射量は750  $W/m^2$ ，地中熱流



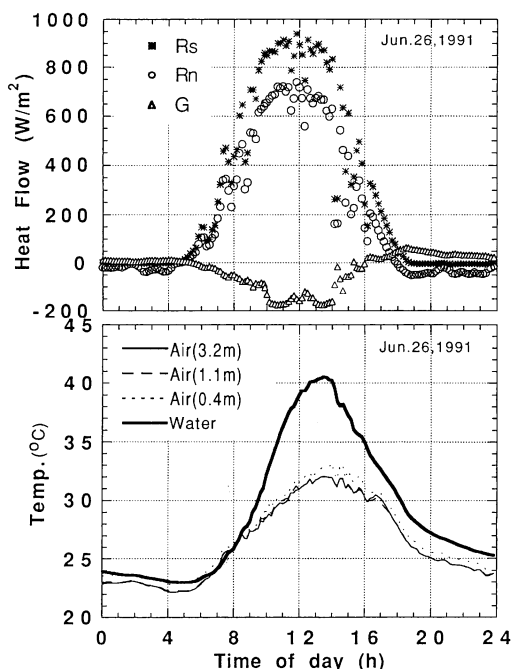
第6図 水稻の生育に伴う葉面積指数と乾物重の変化

量は最大で $200\text{W}/\text{m}^2$ であった。

日射のほとんどが水面に到達し、水温の急上昇をもたらした。水温と日射の日変化には大きい時間遅れが認められず、水面が熱収支の能動面であることがわかる。水温は気温より最大約 $7^\circ\text{C}$ 高くなり、灌漑水の流入流出量は少なかったことから、夜間も水温が気温より高く維持された。

最も水面に近い下端の気温が他の気温より1日中高く、夜間でも温度勾配は植被面がその上層より高いという状況が生じた。これは、下端の気温測定点は水面から40cmの高さで、水温の影響を受けたことによると考えられる。

この場合、大気安定度 ( $R_i$ ) は夜間を含め常に不安定状態となり、一般に言われているような夜間の安定状態と異なる状況が生じた。これは、気温の測定高さが水面に近すぎ、群落境界層の特性を反映しない温度勾配が測定されたと見るべきである。境界層の厚さや輸送特性が日中と夜間とで異なることは



第7図 生育初期の水稻群落上の日射  $R_s$ 、純放射  $R_n$ 、地中熱流  $G$  と群落上3高度の気温と水温の日変化

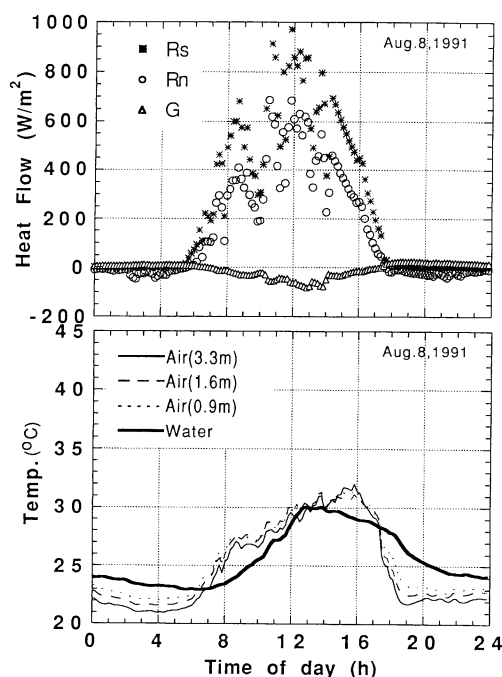
原菌ほか (1992c) にも現われており、測定位置を境界層の厚さや風速の鉛直勾配に合わせることが重要となる。生育初期の水稻群落においては、水面から離れた測定高さでの温度勾配を用いて、傾度法の大気安定度補正を行うことが重要である。

### (3) 8月上旬の微気象と測定結果

葉面積指数が最大となった8月上旬の日射量や純放射量の日変化を、気温と水温の日変化とあわせて第8図に示す。水稻の葉や茎により吸収されたり遮蔽される日射量が増大し、水面への直達日射量は減少する。このため、水温の上昇程度がゆるやかとなり、位相も気温の上昇より遅れた。これは植被面が熱収支の能動面となっていることを示す。

日中植被面直上の気温とその上の気温とは大差なく、日中安定状態になる場合も見られた。これは、水稻の蒸散が活発で葉温が低下したことによる。葉面積指数は4以上であり、その大部分は植被面付近の20cmの層に分布する。前述のように気温測定点が植





第8図 生育旺盛な時期の水稲群落上の日射  $R_s$ , 純放射  $R_n$ , 地中熱流  $G$  と群落上3高度の気温と水温の日変化

被面に近いため、気温より低下した葉面近傍の空気を吸い込み、低い値が測定されたと考えられる。

一方、夜間は密な植被により水面の放射冷却が抑えられ、水温が高く維持されている。このため、植被面付近の気温がその上層より高い逆転の温度勾配となり、大気安定度  $R_i$  は夜間でも負となり不安定状態となる。

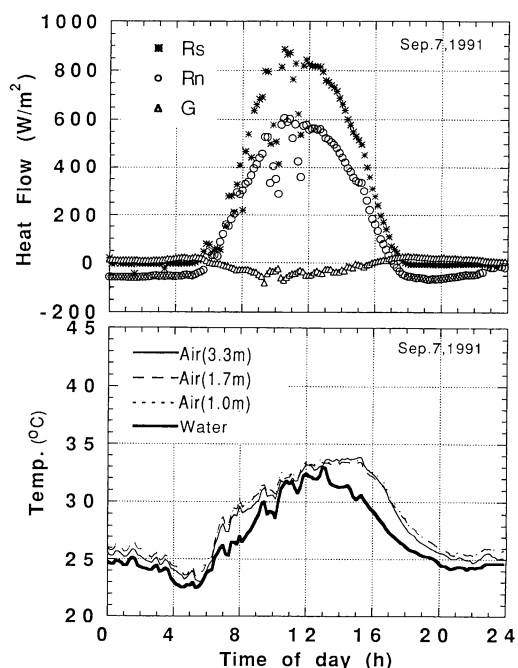
1992年夏季に、より広い水稲群落で同様の測器配置で観測を行ったが、植被面付近の気温とその上層の気温との関係は1991年度の観測と同様であった。放射温度計で測定した日中の葉温は気温より低く、日中は蒸散により植被面温度が低下し、植被面直上での気温も低くなったことを確認した。

水稲の生育が活発な時期に、下端の測定高さが植被面に近すぎることが日中の低い気温をもたらした主要な原因であり、通風乾湿計の設置位置には十分な検討が必要である。より広い圃場を用い高い2高度で測定することが望まれる。本結果は Monteith

and Unsworth (1990) が指摘しているように、植被面近傍の粗度層における測定がフラックスを求める場合に有効でないことを示しており、吹走距離が短い場合の測定下限についての示唆を与える。

### 3) 9月上旬の微気象と測定結果

第9図は9月6日の日射量  $R_s$ , 純放射量  $R_n$ , 地中熱流量  $G$  の日変化, および気温・水温の日変化である。日射量の最大値は  $800 \text{ W/m}^2$  を越えており6月下旬と同程度であるが、水温の日変化の振幅は6月より小さい。この時期には、水稲群落の頂部は止め葉と穂で占められ、水面への直達日射は最も少ない。植被面直上とその上方の2高度の気温の日変化では、日中不安定状態、夜間安定状態となる頻度が増加し、水稲の蒸散や水温が植被面付近の気温に及ぼす影響が小さくなった。しかし、一日全体の大気安定度  $R_i$  の日変化は、一般的な境界層での値やその日変化とは異なっており、下端の気温測定点の高さが問題となった。



第9図 穂実期の水稲群落上の日射  $R_s$ , 純放射  $R_n$ , 地中熱流  $G$  と群落上3高度の気温と水温の日変化

LAI が小さい時期には、気温が水温にかなり影響を受けていることが分かった。従って、大気安定度を考える際、水温の影響が直接及ばない位置の気温を使う必要がある。また、繁茂した水稻のように蒸散量の多い群落では、植被面から離れた高さと乾湿球温度を測定する必要がある。

## V 傾度法と熱収支法による評価精度の検討

### 1) 熱収支法によるフラックスの評価

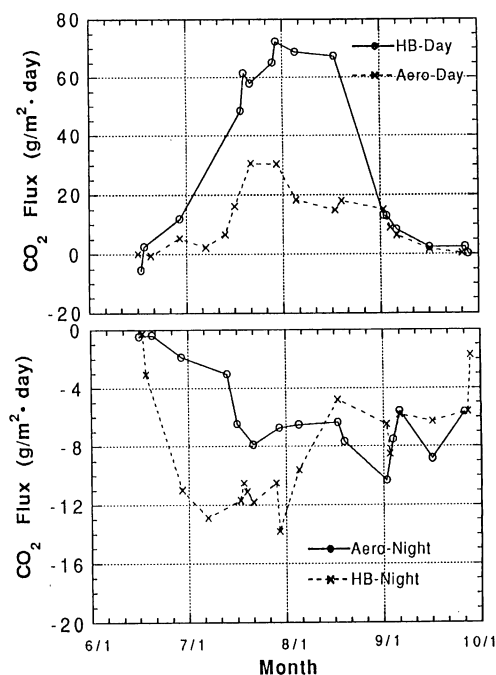
熱収支法が適用できない気象条件の場合に、傾度法によりフラックスを求めることとし、その場合にどのような補正が最も確からしい値を与えるかを、1990年度のダイズ群落での観測結果と、1991年度の陸稲群落での観測結果から検討した。いずれも10分平均データを用いて計算した結果である。

3節で検討した観測条件がよい場合について、熱収支法で求めたダイズ群落の栄養成長期の日中の  $\text{CO}_2$  フラックスの日積算量は、実測の乾物増加量と合致した(原菌ほか, 1991)。このことから、観測条件のよい場合に熱収支法により求めた日レベルのフラックスはかなりの精度を持つと考えてよい。そこで、傾度法による拡散速度を日レベルで、条件のよい場合の熱収支法と比較し、傾度法に必要とされる大気安定度補正について検討する。

### 2) 熱収支法と傾度法によるダイズ群落の $\text{CO}_2$ フラックス

ダイズ群落における  $\text{CO}_2$  フラックスを日中と夜間に分けて積算した結果を第10図に示す。傾度法によるフラックスはリチャードソン数  $Ri$  が  $|Ri| < 0.05$  の場合についてのみフラックスを求め、安定度補正を行わなかった場合である。熱収支法による10分毎のフラックスは同一条件でも傾度法の結果より変動が大きかった。そこで、日中や夜間の積算フラックスを求める場合、60分移動平均値が  $-5 < \text{CO}_2 \text{ flux} < 20 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  の範囲の場合のみ積算した。したがって日平均値を求めるのに用いたデータ数は熱収支法が約30%少ない。

日中のフラックスを傾度法(Aero)と熱収支法(HB)で比較すると、生育初期と9月以降はAeroとHBとの差はそれほど大きくない。梅雨期にはHB



第10図 熱収支法と傾度法(無補正)によるダイズ畑の  $\text{CO}_2$  フラックスの比較(上日中、下夜間)

による値が大きく変動したが、梅雨明け後気温が上昇し大気が不安定になると、AeroとHBとの差は増大し、7月下旬にHB/Aeroは約2、晴天日が続いた8月中旬のHB/Aeroは約3.5となった。

一方、夜間の  $\text{CO}_2$  フラックスについて同様に見ると、梅雨期まではHBによるフラックスが大きい、それ以後の両者の値には日中ほど大きい差異は認められない。7月は特に熱収支法による夜間のフラックスに変動が大きく、やや過大評価になったと考えられる。夜間大気が安定な場合にThom (1975)による(12)b式を用いた安定度補正を行うと、8月下旬以後の夜間はほとんどフラックスが0に近い値となる。8月後半以後の夜間のフラックスはAeroがHBよりやや大きい傾向であるが、弱安定の場合には傾度法により求めた  $Df$  を無補正で用いる方が妥当と判断される。

これらのことから、夜間や雨天日などのフラックス測定には傾度法を用いることがよく、晴天日で日

中大気が不安定な場合には熱収支法がよい結果をもたらすと言える。

## VI まとめ

水稻群落と陸稲群落において、傾度法と熱収支法により群落拡散速度を求め、測定上の問題点や、大気安定度による補正について比較検討した。

両手法により求めた群落拡散速度は、晴天で群落上の風速が2～3 m/s程度で、純放射量が潜熱と顕熱とに分配されるような場合に合致した。

純放射量が高い場合には、熱収支法が比較的安定した拡散速度を与え、これを用いたダイズ群落のCO<sub>2</sub>フラックスは乾物重から求めたフラックスとほぼ合致した。逆に、夜間など純放射量が低い場合には、熱収支法による拡散速度は負の値となったり発散し、フラックスの評価には使えない。

傾度法による拡散速度は日中過小評価となり、大気安定度補正が必要である。この場合、用いる温度勾配が群落境界層を代表することが重要であり、水面に近い高さでの測定値や植被面近傍（粗度層）での測定値の適用は望ましくない。

大気が弱安定の場合、傾度法による拡散速度は安定度補正しないほうが、実態に近い。

## 謝 辞

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」の一部として実施した。

観測に使用した圃場の管理と生育調査には、農業環境技術研究所業務科職員諸氏の協力を得た。また、測定では土谷彰男科技庁特別研究員の協力を得、データ整理には松原ひろみさんの助力を得た。これらの方々に関係各位にお礼申し上げる。

## 文 献

青木正敏 (1988)：光合成と呼吸の測定法。日本農業気象学会関東支部編：『農業気象の測器と測定法』農業技術協会，273—315。

井上君夫 (1986)：蒸発散量の測定法 (VIII) —空気力学的方法による蒸発・蒸発散の測定。農業気象，42，61—63。

井上君夫 (1988)：熱収支。日本農業気象学会関東支部編：『農業気象の測器と測定法』農業技術協会，171—199。

植田洋匡 (1992)：気体フラックス測定法研究会。講演内容 (国環研，1992/2/14)

内嶋善兵衛 (1974)：耕地上での拡散・輸送現象，耕地の熱収支。新編農業気象ハンドブック編集委員会編：『農業気象ハンドブック』養賢堂，116—163。

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。

近藤純正 (1981)：『大気境界層の科学』東京堂出版，219p。

谷信輝 (1974)：微気象の測定法。新編農業気象ハンドブック編集委員会編：『農業気象ハンドブック』養賢堂，748—758。

那須野正明・林陽生・原蘭芳信・西沢利栄 (1989)：群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答3。赤松群落内外の乱流輸送について。水理実験センター報告，No.13，113—122。

原蘭芳信・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。

原蘭芳信・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。

原蘭芳信・土谷彰男・山田千絵 (1991)：ダイズ群落における熱収支法によるCO<sub>2</sub>ガスフラックスと生育量の比較。1991年度農業気象学会講演要旨，38—39。

原蘭芳信・山田千絵・西沢利栄 (1992a)：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.16，13—25。

原蘭芳信・宮田 明・小川利紘・文字信貴 (1992b)：温室効果気体フラックスの微気象学的測定による評価研究。第2回 IGAC シンポジウム報告集，35—38。

原蘭芳信・申建友・劉新民・李勝功 (1992c)：中国内モンゴル東部の砂丘の秋季の微気象特性。農業気象，47，

217—224.

- 村上智美・原藺芳信・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.
- 山田千絵・原藺芳信・岡野通明・西沢利栄 (1992) : 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—12.
- Brutsaert, Wilfried (1992) : Stability correction functions for the mean wind speed and temperature in the unstable surface layer. *Geophy. Res. Letters*, **19**, 469—472.
- Denmead, O. T. and Bradley, E. F. (1985) : Flux-gradient relationships in a forest canopy. *The Forest-Atmosphere Interaction*, eds. Hutchison, B. A. and Hicks, B. B., D. Reidel Publishing, 421—442.
- 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. and Unsworth, M. H. (1990) : *Principles of Environmental Physics (2nd ed.)*. Edward Arnold, London, 291p.
- Ohtaki, E. (1984) : Application on an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. *Boundary - Layer Met.*, **29**, 85—107.
- Oke, T. R. (1978) : *Boundary Layer Climate*. Methuen and Co Ltd, London, 371p.
- Thom, A. S. (1975) : Momentum, mass and heat exchange of plant communities. J. L. Monteith ed. : *Vegetation and the Atmosphere*, Academic Press, London, 57—109.