

裸地・灌漑水田における蒸発散量空間分布の推定

Estimation of Spatial Distribution of Evapotranspiration at a Bare Field and an Irrigated Paddy Field

砂田憲吾*・内藤ゆう子**・田中賢治***

By Kengo SUNADA, Yuko NAITO and Kenji TANAKA

Spatial variation of surface heat and water fluxes should be reasonably integrated. In this paper, spatial distribution of evapotranspiration at a bare field and an irrigated paddy field are estimated. Based on a set of micro meteorological observations at the surface boundary layer on the fields, bulk transfer coefficients are estimated first. By using the data of field observation, distributions of soil moisture and surface temperature, and the estimated bulk transfer coefficients, evaporation from soil surface and evapotranspiration from paddy field are calculated. The results show that information of the distributed hydro - meteorological conditions is needed for more exact evaluation of the regional average evapotranspiration.

Keywords : evapotranspiration, spatial distribution, paddy field, bulk transfer coefficient

1. はじめに

広域地表面での水文現象の把握と評価のために、さまざまな地形上・土地利用上の不均一性を示す陸面からのフラックスを空間的に集約する方法の開発が必要とされている。地表面からの水・熱のフラックス推定についてはモデルを介して推定することになるが、現象により忠実なモデルは均質な地表面条件を仮定して構成されるのが通常である。直接的な課題としては、それらの地形・土地利用上の不均一性を個々の類似な地表面条件からのフラックスの合成として如何に表現するかという問題となる。その際まず、“一様（と思われるよう）な地表面条件下”では、その領域内でのフラックスの空間的な分布がどのようになるか、領域平均量からの推定値は分布推定量からの平均値とどのように違うか、用いたモデルは妥当かなどについて検討される必要がある。理論的には、たとえば仲江川ら¹⁾は、風速、気温の変動と土壌水分量の空間的な変動との共分散構造が対象とする領域で平均化された蒸発散量の推定に及ぼす影響を調べている。本稿では、仲江川らと同様な観点から、圃場裸地および水稻灌漑田において、実際に調査された土壌水分量や地表面温度の空間的な分布が圃場全体の平均蒸発散量に及ぼす影響を検討したので報告する。

* 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科
(〒400 甲府市武田 4-3-11)

** 学生員 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻
(〒400 甲府市武田 4-3-11)

*** 正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木システム工学専攻
(〒606-01 京都市左京区吉田本町)

2. 裸地における蒸発量の推定

2. 1 調査対象地と観測データの概要

調査対象地は琵琶湖プロジェクト共同観測の行われている滋賀県高月町の農地で、図-1に示すような耕地整理された水田地域の約420×700 m（田一枚は30×100 m）の範囲である。ここでは非灌漑期の10月（1994年）に実施された同プロジェクトの土壌水分データおよび地温・風速・気温データを用いて考察を行う。土壌水分データおよび地温データは図-1の範囲を一定のサンプリングメッシュ間隔（30×100 m）で観測したものである。風速・気温データは、集中観測田（図-1、No.92）においてサンプリング時間中に1分間隔で観測され、測定高度が地表面から1.2 mの高さでのデータを用いた。なお、土壌水分データは、直接サンプリング法・TDR法の2種類で測定を行っている。

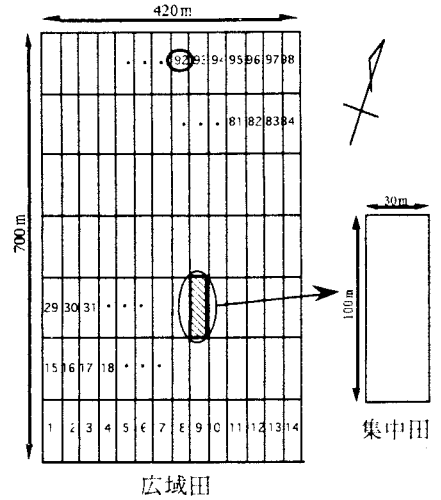


図-1 調査対象地

2. 2 蒸発モデル

土壌からの蒸発量の表示方法として近藤²⁾によって α 法、 β 法、 $h\beta^*$ 法の3方法が提案されている。これらは地表面の湿潤度を表すパラメータを導入した蒸発モデルであるが、本稿ではこの中でも物理的説明が比較的簡潔である $h\beta^*$ 法（式(1)に示す）を用いて蒸発量を推定することとする。

$$E = \rho C_H U \beta^* [h q_{SAT}(T_s) - q] \quad \dots \quad (1)$$

ここで、領域全体（広域田：ここでは、マクログリッドと呼ぶ）の水文量平均値により算定された蒸発量を $\bar{E}$ 、地点（集中田、同サブグリッドと呼ぶ）の水文量から各々算定した蒸発量の積分を $\bar{\bar{E}}$ とすると(1)式より以下のようになる。

$$\bar{E} = \rho C_H \bar{U} \bar{\beta}^* [h q_{SAT}(\bar{T}_s) - q(\bar{T}_a)] \quad \dots \quad (2)$$

$$\bar{\bar{E}} = \frac{1}{A} \int \rho C_H \bar{U} \bar{\beta}^* [h q_{SAT}(T_s) - q(\bar{T}_a)] dA \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 ρ ：空気の密度(1気圧、20℃で1.20 kg/m³)、 C_H ：顕熱輸送のバルク輸送係数(実用的には、 $C_H \div C_E \div 0.0012$ ²⁾、95年の観測では $C_H=0.00138$ 、 $C_E=0.00165$ を得ている³⁾)、 h ：土壌の小空隙内の相対湿度($0 < h \leq 1$)、 β^* ： h の低下を考慮した蒸発効率、 $q_{SAT}(T_s)$ ：地表面温度(T_s)に対する飽和比湿(kg/kg)、 $q(T_a)$ ：気温(T_a)に対する比湿(kg/kg)、 U, T_a ：それぞれ代表高度（ここでは地上から1.2 m）における風速(m/s)、気温(℃)である。

2. 3 蒸発散量空間分布の推定

対象地域は広域な水田地域で土地利用状況が類似していると考えられ、風速、気温および相対湿度は、対象地域全体で一様と仮定する。また使用データは前後30分平均値を用いている。観測により得られた地温と体積含水率の分布状態を示せば例えば図-2のようになる。地温分布については対象地域全体の観測に2,3時間を要し、その間の温度変化が考えられたため時系列変化の補正を行っている。分布は領域全体平均値が約

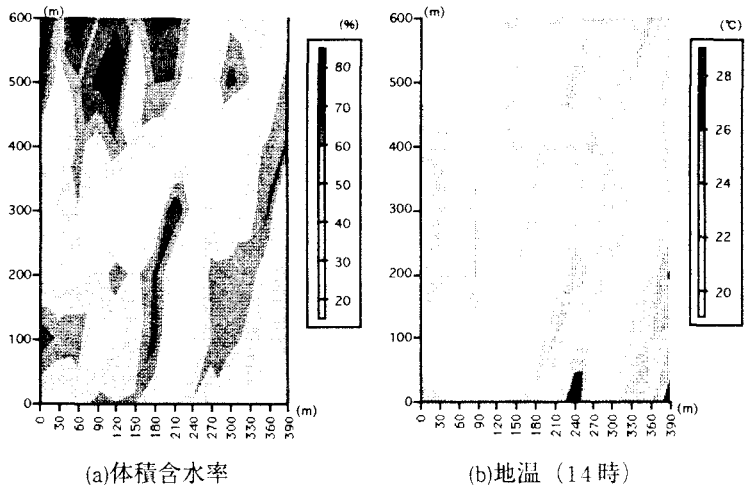


図-2 広域田における分布状態図（1994.10.13）

23.8℃、標準偏差は約1.25℃で変動の幅は比較的小さい。土壌水分量分布は領域全体平均で約57.4%、標準偏差約8.52%で全体的に高含水率状態で分布している。

図-2のような分布を用いて各水田一枚すなわちサブグリッドごとの蒸発量を計算し、その分布を示せば例えば図-3のようになる。この分布から(3)式により $\bar{E}$ を、また、領域全体での平均水文量を用いて(2)式により $\bar{E}$ を求めれば、表-1のようになる。表中の σ は $\bar{E}$ の標準偏差を示す。図-3と図-2を比較すると計算蒸発量の分布は土壌水分分布より、地温の分布に類似していることがわかる。これは土壌水分が比較的飽和に近い状態だったために、蒸発量が土壌水分に依存せず、風速や気温、地温等に支配されているためと考えられる。特に、表-1において14時推定値が13時推定値よりも大きい値を取っているのは、気温や地温等の温度下降の影響よりも風速の変動による影響が大きかったためと考えられる。また $\bar{E}$ と $\bar{E}$ とでは若干 $\bar{E}$ の方が大きい値を示したが、当初予想したような差は生じなかった。これは地温の分布の変動が小さかったことや、土壌水分が湿潤状態であったためと考えられる。今回は気温・風速等の微気象データを一様として与えたが、風速や気温と土壌水分の空間的な変動の共分散構造を考える上では今後は気温・風速等に分布を与えて検討する必要がある。

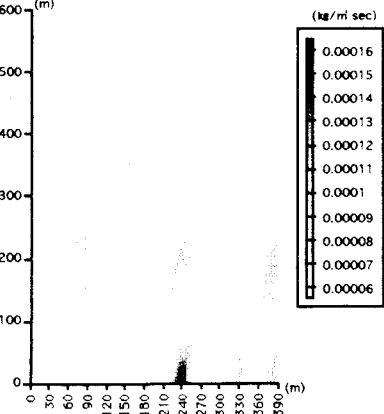


図-3 計算蒸発散量の分布状態図 (1994.10.13 14:00 推定値)

表-1 蒸発量計算結果(1994.10.13)

時刻	$\bar{E}$	$\bar{E}$	σ
13:00	6.71E-05	6.73E-05	1.22E-05
	164.43	165.04	29.93
14:00	9.10E-05	9.13E-05	1.61E-05
	223.15	223.75	39.40
15:00	5.42E-05	5.44E-05	1.18E-05
	132.87	133.45	29.02

※単位 上段:(kg/m² sec) 下段:潜熱フラックス(W/m²)

3. 灌漑水田における蒸発散量空間分布の推定

3. 1 調査対象地と観測データの概要

調査対象地は前述と同様、琵琶湖プロジェクト共同観測の行われている滋賀県高月町の広域水田地域(図-1)であるが、'96年の同プロジェクトでは初の夏期観測を試みたことから、ここでは灌漑期における水稻(植生高約70cm~100cm)の影響を考慮した蒸発散量空間分布の推定および、地表面温度分布が領域平均蒸発散量に与える影響の検討を目的とする。気温・風速等の微気象データは、集中観測田で観測された10分平均値および一部比較のために30分平均値を用いて検討を行う。顕熱・潜熱フラックスは観測データを使ってボーエン比法により推定を行っている。前述と同範囲における空間分布データについては、蒸発散分布に地温の分布が影響を及ぼしていたことから地表面温度の観測と、さらに植生による影響を考慮し葉面温度の観測を行うこととした。また土壌水分観測は排水中の集中観測田のみで行っている。

3. 2 単層モデル法⁴⁾による蒸発散量の推定

(a) バルク輸送係数 C_H と蒸発効率 β の推定方法

まず、田一枚全体を単層と考える単層モデル法の考え方を適用し、集中観測田での田一枚全体のバルク輸送係数 C_H および、蒸発効率 β を推定する。ここで、顕熱や水蒸気のフラックスは次式のように表される。

$$H = c_p \rho C_H U (T_H - T) \cdots \cdots (4)$$

$$E = \rho \beta C_H U [q_{SAT}(T_E) - q] \cdots \cdots (5)$$

c_p, ρ :それぞれ空気sの定圧比熱と密度($c_p=1005J/kg/K$ 、1気圧、30℃で $\rho=1.165 kg/m^3$)、 C_H :顕熱のバルク輸送係数、 β :蒸発効率、 U, T, q :それぞれ植生上の代表高度(ここでは、植生高より2.4 m)での風速(m/s)、気温(℃)、比湿(kg/kg)、 T_H, T_E :それぞれ顕熱、水蒸気フラックスに対して有効な地表面温度(℃)である。しかし T_H, T_E は、どのような温度になるか不明なため、近藤⁴⁾にならい $T_H = T_E = T_s$ とする有効地表面温度 T_s を導入し、前述のように微気象観測値を用いて(4)式よりバルク輸送係数 C_H を求め、得られた C_H を

(5)式に用いることで蒸発効率 β を推定する。ここでは T_c は葉面温度 T_c と地表面温度 T_g に関する温度と考え、それらの観測値を用いてそれぞれの重みを変えて以下のように仮定した。また、風速等の微気象データは、観測データの変動の影響を考え10分平均値と30分平均値を与え、比較・検討を行った。

$$T_{e1} = \frac{T_c + T_g}{2} \dots\dots (6)$$

$$T_{e2} = \frac{4T_c + T_g}{5} \dots\dots (7)$$

$$T_{e3} = \frac{T_c + 4T_g}{5} \dots\dots (8)$$

(b) 推定結果および考察

微気象データとして図4に集中観測田で観測された気温と風速の10分平均観測値の時系列変化を示す。図4によると気温は上昇・下降傾向を示し、風速はある変動幅内での変化を示している。ここでは蒸発

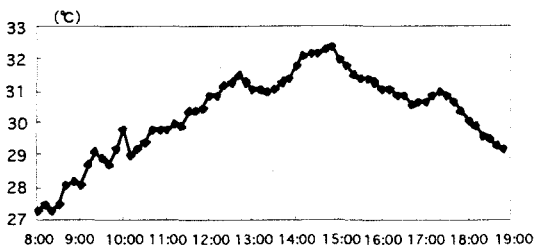


図4 (a) 気温Taの時系列変化(1996.7.30)

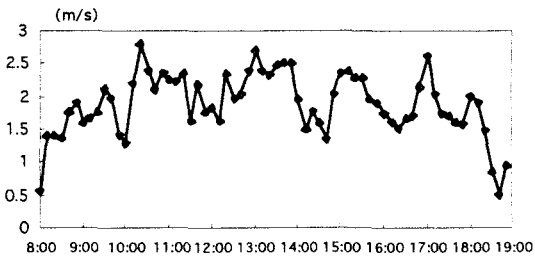
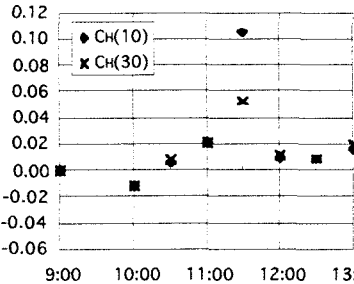
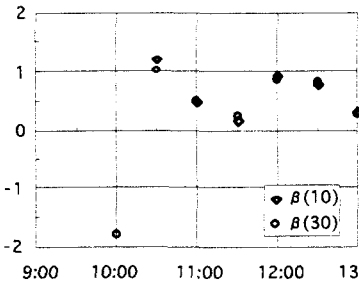


図4 (b) 風速Uの時系列変化(1996.7.30)

散量の空間分布特性を求めることを目的としているため、これらの微気象観測値については地表面および葉面温度の広域田観測が行われた9:00~13:00間のデータを使用してバルク輸送係数 C_H 、蒸発効率 β の推定を行っている。まず、図5に10分平均データと30分平均データによるバルク輸送係数と蒸発効率を、図6に T_e の設定によるバルク輸送係数と蒸発効率を示す。図5によるとバルク輸送係数、蒸発効率ともに10分と30分で類似の傾向を示している。これは、10分平均データと30分平均データに予測したよりもデータ変動による差異が生じなかったためと考えられる。また蒸発効率 β は、 C_H を用いて求めているため、 C_H のばらつきが β に影響していると考えられる。図6(b)によれば、 $0 \leq \beta \leq 1$ を考えると T_e として葉面温度に重みをつけた場合は β の値を過小評価し、逆に地表面温度に重みをつけた場合は過大評価をしていることが考えられる。

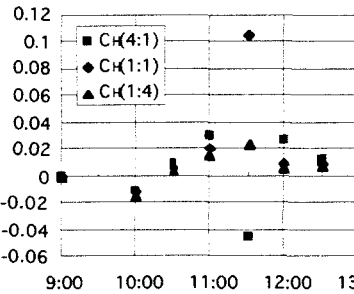


(a) C_H

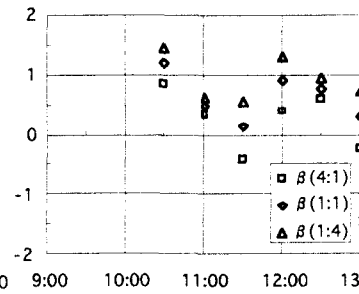


(b) β

図5 10分平均データと30分平均データを用いた C_H 、 β



(a) C_H



(b) β

図6 T_e の設定を変えた C_H 、 β の推定
(図中の()内は $(T_c : T_g)$ の重みを表す)

えられる。図6(b)によれば、 $0 \leq \beta \leq 1$ を考えると T_e として葉面温度に重みをつけた場合は β の値を過小評価し、逆に地表面温度に重みをつけた場合は過大評価をしていることが考えられる。

蒸発効率の求め方や T_e の設定等に課題も残るが、以上のような考察からここでは、 C_H 、 β ともに10分平均データと T_e に(6)式を採用して求めた値のうち、妥当と思われる値の平均を取り $C_H=0.0125$ 、 $\beta=0.7035$ を採用することとする。これらを用いて集中観測田における蒸発散量を推定し実測値と比較したところ、推定値 $E=2.03E-04 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$ ($=493.4 \text{ W/m}^2$)、実測値 $E=2.45E-04 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$ ($=594.4 \text{ W/m}^2$)となっている。

(c) 広域田における蒸発散量の推定

対象地域内の土地利用状況はほぼ類似していると考え気温や風速等は集中観測田での測定値を一樣に与える。また広域田の地表面温度および葉面温度は温度上昇による変動を考慮して、集中田における時系列変化を用いて補正を行い、図-7に示すような分布となった。11時換算温度において葉面温度では領域全体平均値30.36℃、標準偏差0.81℃、地表面温度では領域全体平均値31.57℃、標準偏差2.02℃となっている。この各々の田における温度測定値に(6)式を採用して求めた T_e と(b)で求めたバルク輸送係数および蒸発効率を用いて広域田における蒸発散量を(5)式より推定すると図-8のようになる。これらの分布を利用して地点平均蒸発散量 $\bar{E}$ を、また広域田すなわちマクログリッドでの領域平均値を用いて領域平均蒸発散量 $\bar{E}$ をそれぞれ算定する。

$$\bar{E} = \bar{\rho} \bar{\beta} \bar{C}_H \bar{U} [q_{SAT}(\bar{T}_e) - \bar{q}] \quad \dots (9)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{A} \int \bar{\rho} \bar{\beta} \bar{C}_H \bar{U} [q_{SAT}(T_e) - \bar{q}] \quad \dots (10)$$

算定結果は表-2のようになり、 $\bar{E}$ と $\bar{E}$ とでは約2%の差が生じた。これは蒸発散量の分布の標準偏差が大きく有効地表面温度の変動が大きかったためと考えられる。特に対象地域内に含まれた休耕田等の裸地では、地表面温度が高かったために推定蒸発量が過大評価されてしまい、これらの扱いは今後の課題である。

3. 3 Penman-Monteith 式による蒸発散量の推定

従来、蒸発散量の推定式としてペンマン-モンテith式(以下P-M式とする)がよく用いられる。ここでは、集中観測田における田一枚全体の空気力学的抵抗と群落抵抗を推定し、それを用いて広域田における蒸発散量を推定することを試みた。

(a) 空気力学的抵抗 r_a および群落抵抗 r_c の推定

ペンマン-モンテith式では、バルク輸送係数の代わりに空気力学的抵抗 r_a と群落抵抗 r_c を用いる。従って(4)式および(5)式は次のように表される。

$$H = c_p \rho \frac{T_H - T}{r_a} \quad \dots (11)$$

$$E = \rho \frac{q_{SAT}(T_e) - q}{r_a + r_c} \quad \dots (12)$$

単層モデルと同様に新たな地表面温度 T_e を導入し、 $T_H = T_E = T_e$ として(11)式より r_a を、求めた r_a を用いて(12)式より r_c を求める。 T_e には(6)式を用い、気温や風速等の使用データは広域田での観測が行われた9:00~13:00間の10分平均値を用いる。

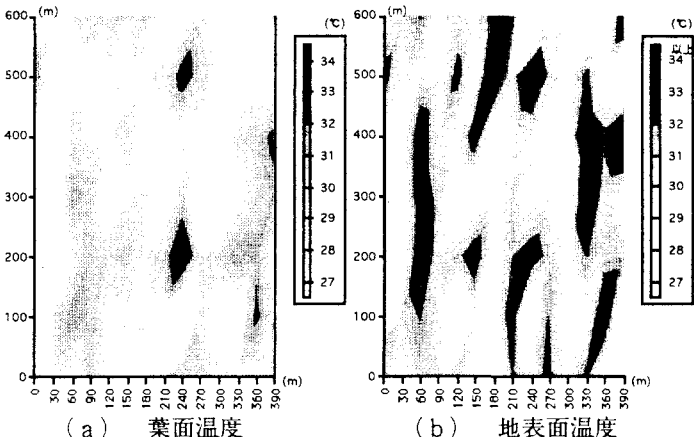


図-7 観測温度の分布状態図 (1996.7.30 11:00 換算温度)

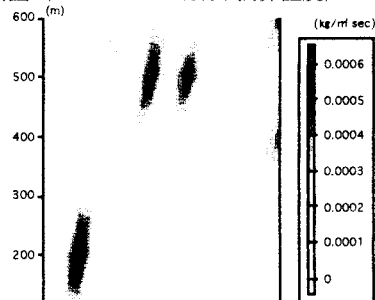


図-8 計算蒸発散量の分布状態図 (1996.7.30 11:00 推定値)

表-2 単層モデル法による蒸発散量計算結果

時刻	$\bar{E}$	$\bar{E}$	σ
10:00	9.41E-05	9.67E-05	2.86E-05
	228.57	234.75	69.37
11:00	2.07E-04	2.12E-04	5.29E-05
	503.68	515.03	128.37
12:00	2.09E-04	2.13E-04	4.58E-05
	507.09	516.87	111.24

※単位 上段:(kg/m² sec) 下段:潜熱フラックス(W/m²)

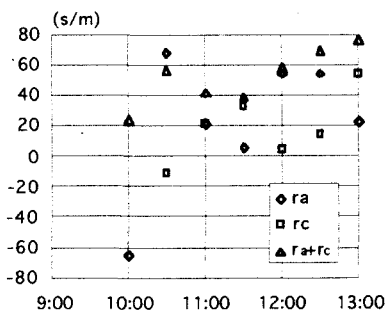


図-9 r_a と r_c の推定

集中観測田における空気力学的抵抗と群落抵抗を推定した結果を図-9に示す。 r_a を用いて r_c を求めているため r_a のばらつきが r_c に影響を及ぼしているが、 r_a+r_c の値はほぼ一定値となる傾向を示していると考えられる。したがってここでは集中観測田における空気力学的抵抗 r_a と群落抵抗 r_c としてこれらの推定値の平均をとり、 $r_a=23.28s/m$ 、 $r_c=64.21s/m$ を採用することとする。これらの値を用いて集中観測田における蒸発散量を推定し、実測値と比較すると推定値は実測値よりもやや小さめの値となっており、今後の検討を要する。

(b) 蒸発散量の推定

(a)で求めた空気力学的抵抗 r_a と群落抵抗 r_c を用いて広域田における蒸発散量を(12)式より推定すればその分布は図-10のようになる。前述同様、気温・風速等のデータは、一様と仮定して与えている。さらに推定した蒸発散量の分布を用いた地点蒸発散量の積分値 $\bar{E}$ と領域平均蒸発散量 $\bar{E}$ を求めると表-3のように単層モデル法を用いたときと同様に $\bar{E}$ が若干大きい値をとる傾向が見られた。図-7と図-9を比較するとP-M法で求めた蒸発散量の方が若干低い値となり、P-M法では毎時における広域田の蒸発散量を推定する際に変化する値は T_e のみで温度上昇による影響が分布に現れていると考えられる。

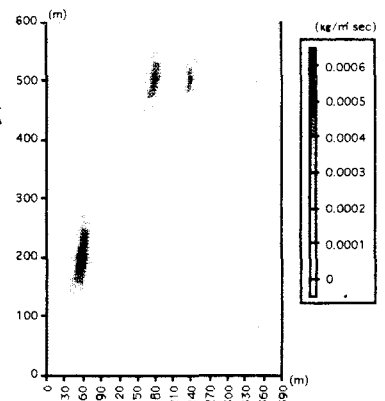


図-10 P-M法による蒸発散量の分布図 (1996.7.30 11:00 推定値)

表-3 P-M法による蒸発散量計算結果

時刻	$\bar{E}$	$\bar{E}$	σ
10:00	1.33E-04	1.37E-04	4.04E-05
	323.15	331.88	98.08
11:00	1.68E-04	1.72E-04	4.27E-05
	407.22	416.41	103.78
12:00	2.06E-04	2.10E-04	4.52E-05
	500.47	510.12	109.79

※単位 上段:(kg/m² sec) 下段:潜熱フラックス(W/m²)

4. おわりに

風速が一様の仮定のもとで、圃場裸地および水稻灌漑田において実際に調査された土壌水分量や地表面温度の空間的な分布が圃場全体の平均蒸発散量に及ぼす影響を調べた。放射の少ない晩秋季で、なお高含水率の土壌水分状態での蒸発量は領域平均量からの推定と分布推定量の平均値とがほぼ等しいこと(0.6%程度の差)が得られた。さらに、1mの植被を示す盛夏の灌漑水田において、用いた2つの蒸発散モデルの場合とも領域平均量と分布量の平均値とはかなり類似した値(2%程度の差)が得られ、両推定式の結果に大きな違いがなく、領域平均値の方が過大に見積もられるという傾向も同様であった。また表1~3のように同一土地利用地内の蒸発散量分布の変動幅も得られた。数値は必ずしも確定的ではないが、類似の地表面での平均化の範囲や蒸発散推定の精度の考慮に参考となる。本研究での結果を踏まえ、今後は、比較的単純なパッチ状の土地利用条件をもつ地域において、地表面物理量と共に風速や気温などの大気側の物理量の分布についての効果的な観測を試み、同様の検討を行うことを考えている。

【謝辞】貴重な微気象観測のデータを提供された芝浦工業大学の菅和利教授、およびデータ整理に協力された山梨大学学生の坂本国秀君に深く感謝の意を表わします。また、本研究の一部は、平成8年度文部省科学研究費の補助(重点領域研究(課題番号:08241108)および基盤研究(C)(課題番号:07650593)いずれも研究代表者:砂田憲吾)を受けて行われたもので、記して感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 仲江川敏之・沖 大幹・虫明功臣:サブグリッドスケールの物理量分布を考慮したマクログリッド蒸発量の算定、水工学論文集、第38巻、pp.167-172、1994。
- 2) 近藤純正:裸地面蒸発の季節変化(1)モデル、水文・水資源学会誌、Vol.7、No.5、pp.378-385、1994
- 3) 琵琶湖プロジェクト'95報告・'95飛行船観測中間報告と今後の展望、pp.99-106、1996
- 4) 近藤純正:水環境の気象学・地表面の水収支・熱収支、pp.208-231、朝倉書店、1994