

新 制
農
658
京大附図

地目混在化地域の熱収支特性と 蒸発散量の算定に関する研究

大 上 博 基

地目混在化地域の熱収支特性と
蒸発散量の算定に関する研究

大 上 博 基

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 土地利用の異なる地表面における従来の熱収支・蒸発散研究	4
2.1 概説	4
2.2 地表面における放射収支と熱収支の概念	4
2.3 熱収支と蒸発散に関する従来の研究	6
2.4 農地の温度環境に関する従来の研究	14
2.5 結語	14
第3章 蒸発計蒸発量と蒸発位概念の役割と熱収支・蒸発散研究の課題	16
3.1 概説	16
3.2 蒸発散量推定のための基準蒸発量としての役割	20
3.2.1 蒸発量観測のネットワーク化と基準化への模索 ..	20
3.2.2 蒸発散算定式の検討ー蒸発位概念の展開ー	21
3.2.3 蒸発散算定のための基準蒸発量の検討	25
3.2.4 測定基準の設定と蒸発散算定法の確立	27
3.3 局地蒸発位としての役割	29
3.3.1 蒸発計の特性	29
3.3.2 移流効果と蒸発計蒸発量	37
3.3.3 蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割	40
3.4 結語	44
第4章 水田, 畑地, 裸地, アスファルト舗装面の放射収支・熱収支特性 と温度環境	47
4.1 概説	47
4.2 観測地と観測方法	48
4.2.1 観測地の概要	48

4.2.2	観測項目と観測方法	48
4.3	イネ生育にともなう水田の放射収支と熱収支の変化	52
4.4	作物の生育期間中を通した、水田、畑地、裸地の熱収支特性	57
4.5	水田、畑地とアスファルト舗装面における放射収支と熱収支の比較	61
4.6	水田、畑地、裸地における潜熱への分配率の比較	66
4.7	熱分配率と地温・表面温度・気温の関係	68
4.8	結語	74
第5章	地目混在化地域の農地における気温分布と熱収支特性	76
5.1	概説	76
5.2	観測地の概要と観測方法	76
5.3	水田と畑地における気温の水平・鉛直二次元分布	79
5.4	水田と畑地における吹送距離(Fetch)と熱分配特性の関係	86
5.5	結語	89
第6章	狭い地域における蒸発散量と蒸発計蒸発量の補完関係	90
6.1	概説	90
6.2	蒸発計蒸発量の役割と補完関係の検証	90
6.3	従来の補完関係式の適用	93
6.4	狭域の補完関係モデル—Seguin式の改良—	94
6.5	本モデルによる蒸発散量の算定	100
6.6	結語	101
第7章	結 論	103
	引用・参考文献	106
	謝 辞	121

第1章 緒 論

農村地域は、食糧や生活資材を生産し供給する場であることはいうまでもないが、国土保全、自然環境や生態系の維持という、生物にとって本質的に重要な役割を持つ場でもある。しかし今世紀後半、世界の農村地域は大きく変貌した。とくに先進工業国では、都市が巨大化する一方で、農村においても圃場整備、灌漑施設・大型機械の導入、農薬・化学肥料の投与などによって生産性が著しく向上し、生活様式の近代化も加わり、農地から都市へと土地利用の転換が進んだ。この変化は、地域の発展のためにはある程度必要ではあったが(山路,1992¹⁶⁷⁾、無秩序な開発により、スプロール、景観の変化に加え、ヒートアイランドに代表される温度環境の変化、水循環の変化、有機物の収支の変化などを引き起こし、自然生態系に大きな影響をもたらした。この反省点に立ち、近年欧米の先進国では、持続的開発の考え方で、農村における景域保全型、近自然型の農業へと大きく移行してきている(石光,1992⁴⁸⁾。このように、農村だけでなく地域全体としてのシステムを方向転換するための基盤作りは、日本でも早急な課題であるといつてよい。

都市化にともなう土地利用形態の変化は、近年地球上の気象環境を変化させている人為的要因の一つにもあげられている(気象庁,1989⁶⁸⁾。地表面の状態は、巨視的に見ると、様々な土地利用形態が小規模に混在したパッチワーク状になっている。そのため、各地区の気象条件が局所的な平衡状態を形成し、その積分効果が大規模な大気の流れに影響していくとされている(光田,1990⁸⁰⁾。すなわち、地表面の条件の変化はただちに広範囲に影響するのではなく、小規模な単位で進む。最初の局所的な変化は、主に接地気層(高さ方向数10m)において、新しい環境に対応した状態が生じると言われている。そこで、地表の条件別に熱収支特性がど

のようにして決まり、接地気層の気象条件がどのように成立するかを明らかにし、蒸発散量を正確に算定することは、現在の都市化の中で農地の果たす環境保全的役割を評価するうえでも、より大規模な気象環境の形成機構や水循環過程を検討するうえでも、基礎的かつ重要な課題のひとつである。

本研究は、熱収支・蒸発散に関するこれまでの研究成果と上で述べた研究課題を踏まえ、①土地利用別の熱収支特性と温度環境の違いを明らかにすること、②農地の持つ温度環境緩和機能を現場実験的に検証すること、③地目の混在した地域における熱収支特性を検討し蒸発散量の算定法を検討する、という三点を目的として行なうものである。また本研究では、実際の測定値の持つ物理的な意味が重要であるとする考え方から、現場での観測を行ない、対象とする物理現象を定性的に検討する実験的手法と、観測結果を利用して物理モデルを構築し、その再現性を検討する半理論的手法をとった。本論文は、その研究成果を取りまとめたものであり、次の内容で構成される。

第2章では、水田、畑地、裸地、舗装地など、土地利用の異なる地表面における従来の熱収支・蒸発散研究を概括し、その研究の結果もたらされた成果と課題を整理する。

第3章では、従来の蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割を概括・再検討し、蒸発計蒸発量と蒸発位概念によってもたらされた成果と課題を整理しながら、今後の蒸発散研究を展望する。

第4章では、第2章で整理した研究課題を踏まえ、互いに近接した水田、畑地(小麦、ジャガイモ)、灌漑裸地、非灌漑裸地、アスファルト舗装面を対象とし、同一気象条件下における熱収支に関する微気象観測を行ない、土地利用毎の放射収支と熱収支の特性および温度環境との関連を検討する。

第5章では、第4章で点的に検討した農地の熱収支特性と温度環境の特徴をいわば面的に拡張し、農地における空間2次元気温分布の測定結果

から、地目混在化地域にある農地の温度環境と熱収支の特徴を検討する。

第6章では、第3章で整理した蒸発計蒸発量の特徴すなわち蒸発散量と蒸発計蒸発量の補完関係を利用し、第5章で検討した移流の影響を受けるような地目の混在した地域の蒸発散量を算定する方法を検討する。

第7章では、本研究の結論を述べる。

第2章 土地利用の異なる地表面における 従来の熱収支・蒸発散研究

2.1 概説

熱収支は、地球科学・物理科学・生物科学などの基礎科学の分野や、地理学・気候学・水文学・農学・建築工学・土木工学などの応用科学や工学の分野において、あらゆるスケールでの地球上の自然現象、およびそれらと生物との関係を検討するための基礎として取り入れられてきた方法論(新井,1984²⁾)である。

従来の熱収支と蒸発散に関する研究は、様々なスケールの気象現象、水循環を明らかにすることを目的として展開されてきた。我が国における農業土木と農業気象関連の従来の研究の中で、その具体的な目的を概観すると、①蒸発散特性の検討、②蒸発散機構・輸送現象の解明、③灌漑計画の樹立、④水管理(水温を含む)技術の開発、⑤水循環における蒸発散量の把握、⑥温度環境形成機構の検討、⑦作物収量の検討、⑧低温被害の検討、⑨干拓地・低湿地の乾燥促進法の検討、⑩砂漠化機構の解明、などに大別できる。このうち①と②を目的とした研究は、基礎的な研究に属する。

本章では、放射収支と熱収支に関する概念を整理する。つぎに従来の研究のなかで、①～⑩を目的とした研究、さらに圃場レベルの温度環境に関する研究の成果と残された課題を整理する。

2.2 地表面における放射収支と熱収支の概念

Fig.2-1⁷⁵⁾に示すように、太陽から地球上に短波放射として伝達されたエネルギーは、そのうちの約50%が吸収される($(1-a)St$)。ここで、 St は全

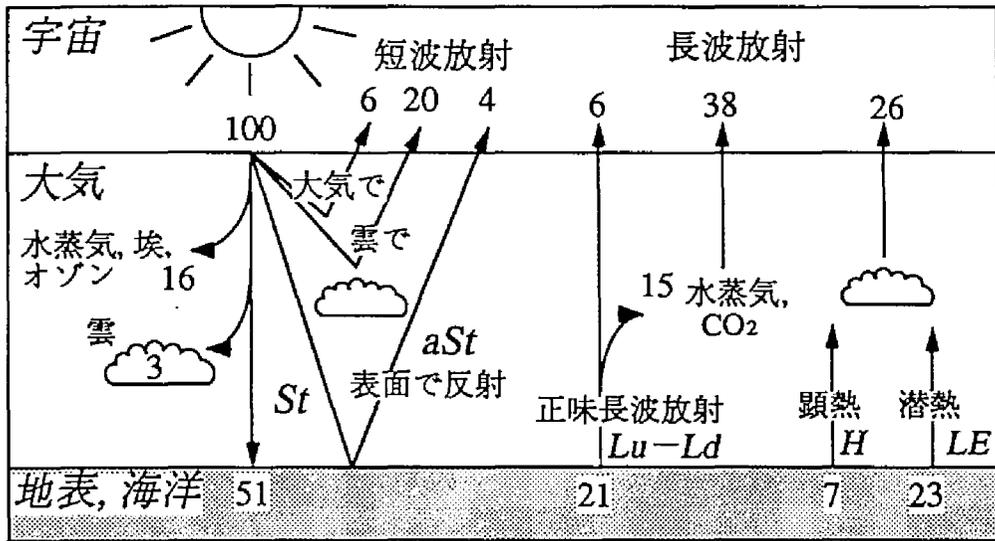


Fig.2-1 地球-大気系における年平均の放射収支と熱収支
(Linsley et al.,1982⁷³⁾より引用)

Annual distribution of solar energy in the earth-atmosphere system in percentage units.
(after Linsley et al., 1982⁷³⁾)

天日射量, a はアルベドである。また, 大気からは長波放射(Ld)が伝達される。これらの地表面に入射した放射エネルギー(R)は, 地表面から大気への長波放射(Lu), 水が蒸発散する際の相変化のために消費され, 水蒸気として大気中に拡散する潜熱(LE), 大気の温度を変化させ, 対流によって大気中に輸送される顕熱(H), 地表面から地中へ伝導によって輸送される地中熱flux(G), 水体や地中での貯熱の変化(ΔW), 植物の光合成エネルギー(P)などに分配される。ただしFig.2-1において, G と ΔW は年単位では無視できるため, また P は他項と比較して非常に小さいため, それぞれ省略した。

このような放射収支と熱収支は, 一般にそれぞれ次式で表される。

$$R = (1 - a)St + Ld \quad (2-1)$$

$$R = Lu + H + LE + G + \Delta W \quad (2-2)$$

ただし ΔW は、水面や森林など以外の表面では省略される。本研究では、純放射量($R_n=R-L_u$)を測定するため、(2-2)式を簡略化した次式；

$$R_n=H+LE+G+\Delta W \quad (2-3)$$

を適用することにする。ただし、土地利用別の放射収支・熱収支特性を詳細に比較する4.5では、後述する L_u を考慮した熱収支式を適用することにする。

地表面で吸収される放射エネルギーは、緯度、季節、地形、気象条件、地表面の性質などによって異なるが、その熱エネルギーへの分配形態も、気象条件や地表面の性質によって異なる。中でも潜熱と顕熱は、大気中に拡散して気象条件を形成し、その結果として地表面上における様々な自然現象を司る。この熱エネルギーへの分配形態の違いが、大気や海洋の複雑な運動の原動力となり、さらに、地球上に様々な気象条件をもたらしている。このように、地表面における放射収支・熱収支と気象環境は相互作用の関係にある。すなわち、巨視的な気象条件の中で地表面の性質に応じた微視的な放射収支・熱収支が成立し、その結果として形成された微視的な気象環境の積分効果が、より巨視的な気象環境を形成するといえる。第1章でも述べたように、各地区の気象条件が局所的な平衡状態を形成し、その積分効果が大規模な大気の流れに影響していくことになる。

2. 3 熱収支と蒸発散に関する従来の研究

蒸発散や大気中の輸送現象に関する研究は、枚挙にいとまがない。ここでは、日本の農業土木と農業気象に関連した分野において、地表面の熱収支特性を検討した屋外実験的研究を整理する。

このような研究例について、Table 2-1に、その研究目的(2.1の番号と対応)、対象地の土地利用、蒸発散量の測定方法、測定されたボーエン比ま

Table 2-1 我が国における従来の熱収支・蒸発散研究の目的と成果
Objects and results of the studies on heat budget and evapotranspiration in Japan

文献	目的	対象地の土地利用(PH; 草丈)	蒸発散量の測定方法	ボーエン比(β)または熱分配特性
Seo(1958) ¹³⁶⁾	①	自然状態の裸地		冬; $\beta=0.9\sim 1$, 夏; 1.4, 春・秋; 0.36
Uchijima(1961) ¹³⁷⁾	②	水田	ライシメータ	$ET_t \doteq R_{np}$, $E_w \doteq 0.91R_{nw}$ (ET_t , E_w ; 蒸散量, 水面蒸発量, R_{np} , R_{nw} ; 植被および水面の純放射量)
斎藤(1962) ¹³²⁾	②	広い麦畑	熱収支法(通風乾湿計)	$\beta=0.25$ (10:30~13:00平均)
岩切(1962) ⁵⁰⁾	④	水面(2m×2m×0.2m)	熱収支法(水温と気温・湿度)	
内嶋(1962) ¹³⁹⁾	②	水田(PH=0.85m)	熱収支法(気温・露点)	$\beta=0.07\sim 0.18$ (日平均)
斎藤ら(1962) ¹³¹⁾	②	広い水田(PH=0.8m)	熱収支法(通風乾湿計)	$\beta=0.28$ (日中平均)
新井(1962) ¹⁾	⑤	全国の水系	熱収支法(水温と気温・湿度)	冬; $\beta=0.7\sim 0.9$, 夏; 0.15~0.2, 春・秋; 0.4~0.8
中山ら(1965) ⁵⁵⁾	②④	約10km ² の水田	ライシメータ(1.8m×1.8m×0.45m)	植被上; $\beta=0.2\sim 0.3$, 植被下; 0.2以下, 負値
松田ら(1965) ⁷⁷⁾	①	18m×9mの水田	ライシメータ(深さ0.75m)	
岩切(1967) ⁵¹⁾	①	湿潤裸地	ライシメータ(0.5m×0.5m×0.7m)と 熱収支法(地温・気温)	β (熱収支法)=0~0.2, β' (ライシメータ)=-0.6(冬)~0.4(夏)
蒸発散研究 グループ(1967) ³³⁾	①③	広い水田	熱収支法(通風乾湿計)	$\beta=0.23$ (栽培全期間の平均)
神尾ら(1973) ⁵⁶⁾	①	10ha牧草地	熱収支法	正午頃, $\beta \doteq 0.1$ (8月), 0.5(10月), 平均で $LE \doteq 0.9R_n$
竹内ら(1976) ¹⁴⁹⁾	⑥	裸地, 湿田(PH=0.5m) 草地, 林地	土壌サンプリング	土壌面における日平均, $\beta=1.2$ (裸地), 0.04(湿田), 0.1(草地), 0.05(林地)
松田ら(1977) ⁷⁸⁾	⑥	高山の平坦な草地	熱収支法(気温・湿度)	$LE/R_n=0.63$, $H/R_n=0.32$ (7月29日4:00~30日4:00)
矢野ら(1979) ¹⁷¹⁾	①③	16m×20m落花生畑(LAI=9.87)	ライシメータ(径2m, 深さ1.5m)	Table 2-2参照
三浦ら(1981) ⁸²⁾	⑥	傾斜地の尾根と谷	熱収支法(通風乾湿計)	谷; $\beta=0.47$, 尾根; 0.80 (8月29日) 谷; $\beta=0.73$, 尾根(乾燥); 2.31 (11月10日)
小泉(1983) ⁶⁹⁾	⑥	裸地	熱収支法(通風乾湿計)	乾燥状態; $LE/R_n=0.5$, $H/R_n=0.2$ (午前), $LE=H$ (午後) 湿潤状態; $LE/R_n=0.5$ (日中)
本條ら(1984) ⁴³⁾	⑥	団地のコンクリート 公園の芝生	熱収支法	コンクリート; $\beta=0.66$, $LE/R_n=0.3$ 芝生 ; $\beta=0.49$, $LE/R_n=0.6$ (2ヶ所同時)

古藤田(1984) ⁷²⁾	①⑤	草地	ライシメータ(径2m, 深さ2m)と渦相関熱収支法	$\beta=0.64$ (春), 0.17(夏), 0.22(秋), 1.92(冬; 乾燥), ポーエン比の年変動; Fig.2-2参照
成田ら(1984) ⁸⁶⁾	⑥	アスファルト(0.3m×0.3m)	LE=0, Hは熱収支式の残差	熱伝導量への分配率の時間変動; Fig.2-3参照
新庄(1984) ¹³⁶⁾	③	茶畑中の裸地(約50m四方)	熱収支法(通風乾湿計)	$\beta=0.4$ (10月; 湿潤), 0.5(10月; 半乾燥), 2.5(12月; 乾燥)
大槻ら(1984a) ¹⁰⁵⁾	③⑤	水田, グラウンド, 山地流域	熱収支法(通風乾湿計)	蒸発散量の測定と蒸発位との比較
桜谷ら(1985) ¹³⁷⁾	⑦	4ha水田	ポット植えライシメータ	蒸発散量の測定と蒸発位との比較
大原ら(1985a) ¹⁰¹⁾	④	水田と水面 (各10m×60mまたは20m×30m)	ライシメータ(1m×1m×0.5m)と熱収支法(通風乾湿計)	輸送係数の検討
矢野ら(1986) ⁷²⁾	①	20m×16mの大豆畑	ライシメータ(径2m, 深さ1.5m)	蒸発散量とペンマン値の比較
神尾(1987) ⁷⁷⁾	⑨	低湿地のヨシと裸地	ライシメータ(1.8m×1.8m×2m)	ヨシ; ET/Epan=1.4, 裸地; 0.7
川島(1987a) ⁶⁴⁾	⑥	50m×25mのインゲン畑 (LAI=1.95)散水区と非散水区	熱収支法(通風乾湿計)	散水前, 中, 後の熱収支; Table 2-3参照
川島(1987b) ⁶⁵⁾	⑥	60m×25mの大豆畑(LAI=2.70) 散水区と非散水区	熱収支法(通風乾湿計)	散水前, 中, 後の熱収支; Table 2-3参照
Jahanbakhshら (1987a) ⁵²⁾	②	水田と水面 (各10m×60mまたは20m×30m)	ライシメータ(1m×1m×0.8m)と空気力学法	イネ生育期間中のポーエン比; Table 2-4参照
高市(1987) ¹⁴⁵⁾	⑧	12m×3mのソラマメ畑	空気力学式と熱収支式	夜間のLEを検討
大場(1988) ¹⁰⁰⁾	③	107m×65mのサツマイモ畑	熱収支法(通風乾湿計)	生育活発な期間における日中の β は, 0に近いか負値 日平均 LE/Rn=0.998(7/14), 1.083(8/10), 0.947(10/14)
原菌ら(1990) ³⁶⁾	⑥	建物の屋上, 140m ² トマト畑と 180m ² コンクリート	給水タンクの水消費量	両区の熱収支; Table 2-5参照
原菌ら(1992) ³⁷⁾	②⑩	半乾燥地の砂丘と植被(PH=1.2m)	熱収支法(通風乾湿計)	両区の熱収支; Table 2-6参照

* ポーエン比熱収支法をさす。渦相関熱収支法はここでは古藤田(1984)のみ

Table 2-2 砂丘地の落花生畑^{*}における日中(7:30~17:30)の熱収支($W m^{-2}$)と熱分配率(%)
(矢野ら,1979¹⁷⁾; Table 2より引用)

The mean heat budget components($W m^{-2}$) and their shares(%) in the bracket for peanuts field in a sand dune area for daytime(7:30~17:30). (after Yano et al., 1979¹⁷⁾)

Time	Rn	G	LE	H
August, 4	339.7 (100)	28.8 (8)	390.4 (115)	-79.5 (-23)
12	393.9 (100)	38.4 (10)	433.2 (110)	-79.7 (-20)
14	356.5 (100)	17.8 (5)	457.0 (128)	-118.3 (-33)
18	432.4 (100)	27.9 (6)	447.5 (104)	-43.0 (-10)
19	252.0 (100)	21.4 (7)	400.7 (137)	-129.1 (-44)
20	426.7 (100)	27.6 (6)	606.2 (142)	-207.1 (-48)
21	429.6 (100)	28.6 (7)	557.7 (130)	-156.7 (-37)
mean	381.7 (100)	27.2 (7)	470.4 (123)	-115.9 (-30)

* LAI=9.87 (August, 17)

Table 2-3 疎な植被(インゲン)^{*}と密な植被(大豆)^{*}における散水前, 中, 後の熱収支($W m^{-2}$)と熱分配率(%) (1984年9月3日, 1985年8月26日; 川島,1987a⁶⁴, b⁶⁵)より引用)

Heat budget components($W m^{-2}$) and their shares(%) in the bracket in the sparse(kidney bean)^{*} and dense vegetation(soybean) for splinkling field and control (non-splinkling) field before, during and after splinkling. (September, 3, 1984 and August, 26, 1985 : after Kawashima, 1987a⁶⁴, b⁶⁵)

	Rn	G	Gw**	LE	H
<i>Splinkling field (sparse vegetation)</i>					
before splinkling	560.5 (100)	45.7 (8)	—	461.7 (82)	53.1 (10)
during	585.3 (100)	14.9 (3)	24.3 (4)	533.3 (91)	12.8 (2)
after	540.2 (100)	21.2 (4)	—	525.0 (97)	-6.0 (-1)
<i>Non-splinkling field (sparse vegetation)</i>					
before splinkling	552.4 (100)	47.4 (8)	—	406.9 (74)	98.1 (18)
during	567.5 (100)	49.0 (9)	—	421.3 (74)	97.2 (17)
after	518.0 (100)	42.3 (8)	—	386.2 (75)	89.5 (17)
<i>Splinkling field (dense vegetation)</i>					
before splinkling	507.1 (100)	27.1 (5)	—	406.6 (80)	73.4 (15)
during	616.9 (100)	13.2 (2)	-11.4 (-2)	697.2 (113)	-82.1 (-13)
after	462.4 (100)	8.6 (2)	—	445.1 (96)	8.8 (2)
<i>Non-splinkling field (dense vegetation)</i>					
before splinkling	516.4 (100)	32.9 (6)	—	399.0 (78)	84.5 (16)
during	566.7 (100)	27.3 (5)	—	472.4 (83)	67.0 (12)
after	450.2 (100)	13.7 (3)	—	401.8 (89)	34.8 (8)

* canopy height=0.4, 0.9m, LAI=1.95, 2.70 for sparse and dense field respectively

** heat flux by percolation

Table 2-4 水田と水面における潜熱と顕熱への熱分配率(%)の月変化(日単位)
 (Jahanbakhsh-Asl et al., 1987a²²⁾; Table 2より引用)
 Daily shares of accumulated heat budget components (%) in paddy field and water surface.
 (after Jahanbakhsh-Asl et al., 1987a²²⁾)

	Paddy field				Water surface	
	LAI	PH(m)	LE	H	LE	H
June, 1984	0.8	0.4	75	25	66	34
July	2.7	0.7	108	-8	70	30
August	2.6	0.8	125	-25	71	29
June, 1985	0.5	0.2	75	25	71	29
July	1.8	0.5	109	109	84	16
August	3.0	0.7	165	-65	79	21

Table 2-5 屋上の植被(トマト)区と対象区(コンクリート面)における日中(6:00~18:00)
 の熱分配率(%) (原菌ら, 1990³⁶⁾; Table 3より引用)
 The shares of accumulated heat budget components (%) for vegetated (tomato) and control section
 for daytime(6:00~18:00) at rooftop. (after Harazono et al., 1990³⁶⁾)

Time	Vegetation					Control			
	PH(m)	Rn	G	LE	H	Rn	G	LE	H
June, 19	1.5	100	8	35	57	100	45	—	55
July, 28	1.8~2.0	100	18	53	29	100	62	—	38
August, 2		100	14	54	32	100	57	—	43
August, 8		100	12	57	31	100	59	—	41

Table 2-6 半乾燥地の砂漠と植被における熱分配率(%) (原菌ら, 1992³⁷⁾; Table 2より引用)
 The shares of accumulated heat budget components (%) for the dune and vegetation.
 (after Harazono et al., 1992³⁷⁾)

Time	Vegetation (October, 17, 1990)				Dune (October, 20, 1990)			
	Rn	G	LE	H	Rn	G	LE	H
0:00~ 7:00	-100	-78	-10	-12	-100	-60	-14	-26
7:00~17:00	100	20	70	10	100	29	-10	81

たは熱収支特性を整理する。また、これらの研究成果のうち、熱収支が詳細に検討されたものをFig.2-2~3とTable 2-2~6に整理する。

矢野ら(1979)¹⁷⁾は、砂丘地の落花生畑において、著しい移流現象を観測した(Table 2-2)。この現象は、実験畑地が狭く(16m×20m)周囲に裸地があったこと、砂丘地の地形が複雑であり蒸発散に対する風の影響が平坦地と異なること、畑地への灌漑が頻繁に行なわれたこと、植被が密であった(LAI≒10)こと、などが原因となって生じたものと考えられた。

また、Jahanbakhsh-Asl et al.(1987a⁵²⁾, b⁵³⁾は、水田とイネ植被のない裸水田の熱収支を比較し、植被が密で気温の高い8月に、水田における著しい移流効果を観測した(Table 2-4)。水田における移流現象をもたらす原因は、水田という極めて湿潤で温度の低い環境、蒸散作用を促進するイネの生理的特性、顕熱への変換面よりも潜熱への変換面の方が高い高度にあることによる拡散の効果、などの相乗効果によるものであると考察した。

川島(1987a⁶⁴⁾, b⁶⁵⁾は、畑地への散水による熱収支特性の変化と温度環境の変化を検討した。Table 2-3に示すように、散水によって地中熱fluxと顕熱fluxへの分配が減少し、潜熱fluxへの分配が増加したが、その効果は密な植被よりも疎な植被の方が大きかった。また、散水によって高度1.5mにおける気温の低下は約3℃に達したが、その効果には飛散した水滴による大気中での潜熱への変換も含まれるため、地表面の熱収支の変化のみによる効果は明かにされなかった。

原菌ら(1990)³⁶⁾は、屋上でロックウール培地を用いてトマトを栽培し、熱収支特性と温度環境をコンクリート区(対照区)と比較した(Table 2-5)。コンクリート区では、熱伝導への分配が、顕熱への分配と同等かそれ以上であった。植被区は狭かった(140m²)が、とくに潜熱への分配が卓越した結果はみられず、移流効果は観測されなかった。また、植被区の気温は、曇天日に対照区より約1℃低下したが、晴天日には低くならなかったとした。しかし、その気温の測定高度(1.0m)は群落内にあり、群落上の気温(高度2.0m)は、対照区よりも3℃前後低くなったことが示されている。

植被区直下の室温は、対照区直下の室温よりも約2℃低く維持された。

原菌ら(1992)³⁷⁾は、砂漠と植被における熱収支特性を比較した(Table 2-6)。9～15時におけるアルベドは、砂丘区が40%前後、植生区が15%前後であり、植生区における日中平均の純放射量は、砂丘区の約2.7倍であった。また砂丘区では、日中、大気から地表面への水蒸気輸送が移流現象として測定された。さらに、運動量輸送の鉛直分布を検討し、砂丘における日中の境界層が薄いため、鉛直方向よりも水平方向の輸送が卓越すること、そのような気流の特性が植生の発達を妨げ、砂漠化機構の一因を担っていると考察した。

古藤田(1984)⁷²⁾は牧草地のボーエン比の年変化をFig.2-2に示した。ボーエン比を算定するための潜熱はウェイイングライシメータにより測定し、顕熱は渦相関法で測定された。冬～春季のボーエン比が高く、夏～秋季のボーエン比が低く0に近いことがわかる。古藤田はこの原因として、冬季は降水が少なく地表面が乾燥していたのに対し、夏期は地表面が湿潤であった点をあげている。これ以外の原因に、ボーエン比の温度依存性があげられよう。Priestley & Taylor(1972)¹¹⁹⁾は、水面のボーエン比と水面温度の関係を整理し、温度が高くなるとボーエン比が小さくなる関係を

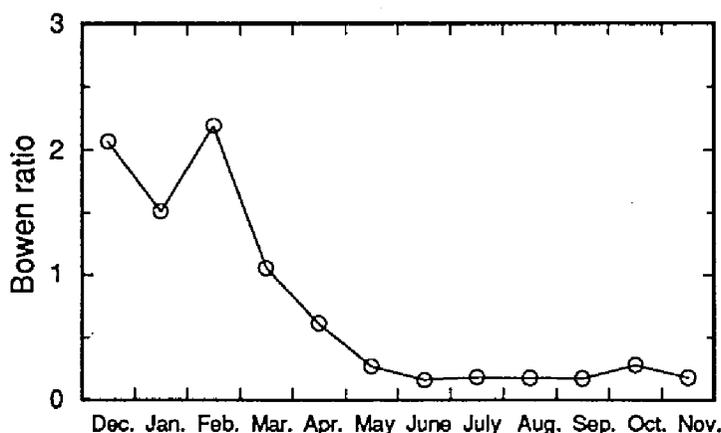


Fig.2-2 草地におけるボーエン比の月別変化(古藤田,1984⁷²⁾より引用)

Monthly variation of Bowen ratio for a grass land (after Kotoda,1984⁷²⁾)

示した。この関係は、ポーエン比(β)を(2-4)式で表すとき、湿潤表面におけるポーエン比(β_*)が(2-5)式で表されることから理論的にも説明できる。

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \quad (2-4)$$

$$\beta_* = \gamma \frac{T_s - T_a}{e_*(T_s) - e_a} \doteq \frac{\gamma}{\Delta} \frac{e_*(T_s) - e_*(T_a)}{e_*(T_s) - e_a} \leq \frac{\gamma}{\Delta} \quad (2-5)$$

ここで、 γ と Δ はそれぞれ乾湿計定数(=0.66hPa °C⁻¹)と飽和水蒸気圧勾配(hPa °C⁻¹)、 T と e は温度(°C)と水蒸気圧(hPa)であり、下添え字の $s, a, *$ はそれぞれ、表面、大気、飽和を表す。この性質は新井(1962)¹⁾が整理した水面における結果(Table 2-1)にもみられ、冬季に大きく夏期に小さい傾向が示されている。

成田ら(1984)⁹⁶⁾は、アスファルト舗装面における熱伝導の重要性に着目し、その分配率(G/R_n)をFig.2-3に示した。この結果から、アスファルトにおける熱伝導への分配は、朝大きく午後にかけて減少することがわかる。なお、アスファルト面での熱収支観測は例が少ない。

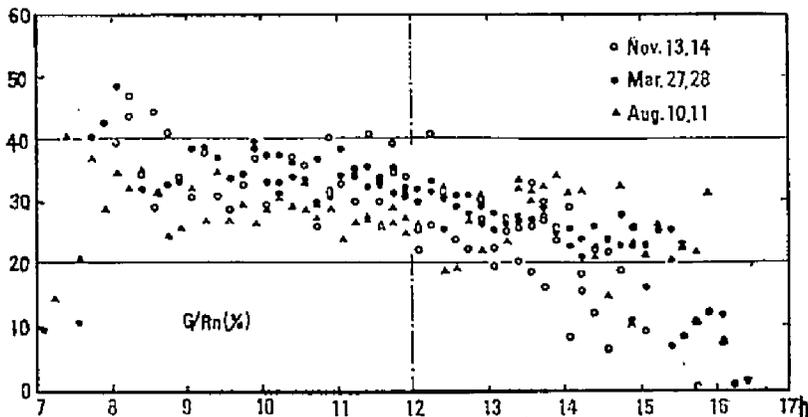


Fig.2-3 アスファルト舗装面における熱伝導への配分比(G/R_n)の経時変化
(成田ら,1984⁹⁶⁾より引用)

Distribution ratio of conductive heat flux to net radiation (G/R_n) on asphalt pavement during daytime. (after Narita et al., 1984⁹⁶⁾)

2. 4 農地の温度環境に関する従来の研究

ここでは、移流の影響を受ける条件下にある植生群落面、湿潤面、あるいは狭い農地で形成される温度環境に関する研究を対象を絞る。

数値実験的な手法では、乾燥地における移流効果が草地上の温度・湿度と蒸発散量に及ぼす影響(Philip,1959¹¹⁸⁾やRider et al.,1963¹²³⁾、熱源や冷源が周囲の環境に及ぼす影響(早川ら,1978⁴¹⁾,1984⁴²⁾、植生群落による気候緩和効果(神田ら,1990³⁸⁾)などが検討されてきた。

現場実験的な手法では、わずかに、乾燥地における移流効果の検討と関連し、温度分布と熱分配に関する圃場実験的研究が例としてあげられる。Brakke et al.(1978)¹⁰⁾は、非灌漑アルファルファ畑の風下に隣接する約100m×風下方向200mの灌漑アルファルファ畑において、水平方向4地点、鉛直方向6点の温度・水蒸気圧分布を測定し、風下方向4地点の蒸発散量を修正ボーエン比法で算定した。しかしながらこの研究は、局地移流と地域移流の機構とボーエン比を検討したものであり、乾燥地域で問題となる移流の影響を受ける農地の蒸発散量を正確に求めることが主目的であった。したがって、乾燥地域以外の地域における農地、とくに地目混在化地域にある農地とその周囲の温度環境、水平・鉛直方向の温度分布に関する圃場レベルでの検討は、極めて不十分であると言わざるを得ない。

2. 5 結 語

第1章でも述べたように、これからの熱収支・蒸発散研究において、地表の条件別に熱収支特性がどのようにして決まり、接地気層の気象環境がどのように形成されるかを明らかにし、蒸発散量を正しく算定することが、基礎的かつ重要な課題のひとつである。そのためには、同一気象条件下で土地利用の異なる地区において熱収支特性を検討することが必

要となる。また、本章で整理した研究目的①～⑩は、今後も重要な役割を持つと思われるが、これらの中でも接地気層における温度環境形成機構の検討は早急な課題であると思われる。

しかしながら、Table 2-1に整理したように、屋外実験的に同一気象条件下で土地利用別に熱収支特性と温度環境を検討した例は少ない。また、温度環境形成機構の検討を目的とした研究の成果は、主に熱収支特性と地温環境の関係を検討するにとどまっており、熱収支特性と気層の温度環境との関連は、“地表面の顕熱の増減に必ずしも応答しない(小泉)”，“熱収支の結果が直接温度環境に結びつかず、卓越風に対する露出度が傾斜地の温度環境形成機構を支配するもう一つの条件(三浦ら)”という結論であった。これらの結論は、複雑な地形や地目の混在した地域では、対象とする地表面の熱収支に加え、周囲の影響も大きな要因となることを示唆するものである。

本研究は、これらの課題を踏まえ、同一気象条件下で土地利用の異なる地区において、熱収支特性と温度環境に関する検討を行なう。また、農地における気温分布を空間2次元的に測定し、地目混在化地域にある農地の温度環境と熱収支の特徴を検討する。さらに、地目の混在した地域における蒸発散量の算定法を検討する。

第3章 蒸発計*蒸発量と蒸発位概念の役割と 熱収支・蒸発散研究の課題^{112) 113)}

3.1 概説

これまでに、様々な目的で様々な空間的・時間的スケールで、湖や貯水池などの広い水面からの蒸発量、灌漑用水量計画のための作物蒸発散量または蒸発散位、農地や山林地あるいは地域からの蒸発散量の推定が試みられてきた。蒸発散は現象的には古くから認識されていたものの、観測によって量的に検討され始めたのは17世紀後半といわれる(Brutsaert, 1982¹³⁾)。当時は、蒸発計を用いた水面蒸発量の測定と蒸発要因の検討が行われ、蒸発量が日射や風によって変動することが確かめられていた**。それ以来、個々様々な種類の蒸発計(Fig.3-1)が、蒸発散算定に利用され、蒸発散の機構を解明するための基礎的な観測機器として位置づけられてきた。そして、蒸発計による観測を中心とした蒸発散研究が進展する過程で蒸発散算定式が検討され、蒸発散理論が発展した。

その後、センサー、通信・計測・処理機器の進歩と普及を背景として、観測・記録の自動化と統一化が進められた。また測定精度の向上によって、蒸発散量の精密な実測や理論式による算定が可能になってきた。す

* 蒸発量測定機器には、パン(皿)、タンク、atmometer、濾紙蒸発計などがあり、また、蒸発散量測定を目的としたライシメータや土壌面蒸発量測定用のパン、タンクもある。本研究では、これらの中でも、古くから広範に用いられている清水を満たしたパンやタンクを対象を絞り、これらを"蒸発計"と称することにする。

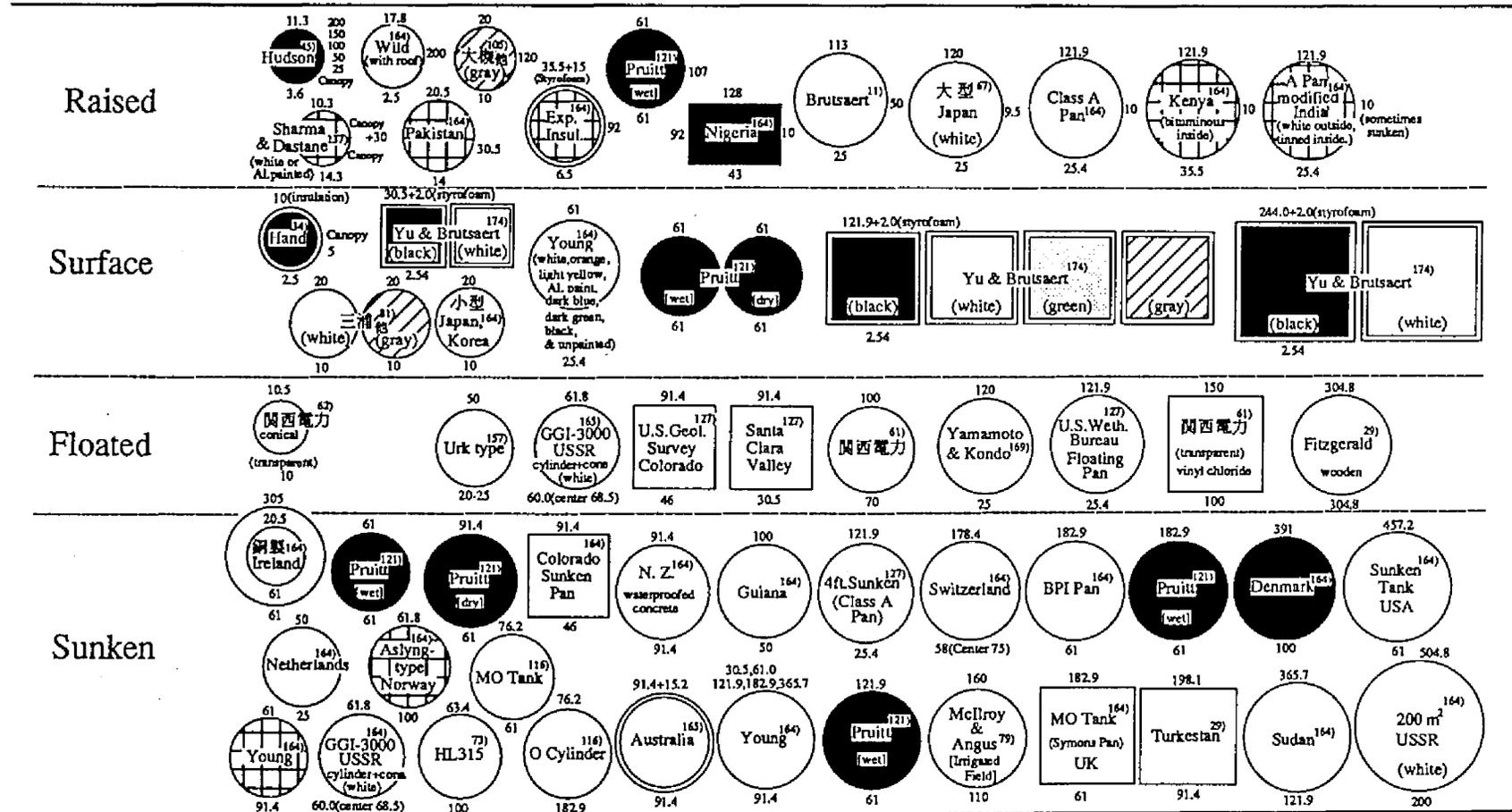
** 記録に残された蒸発量測定はPeraultに始まるといわれている。Halleyは、小さいパン蒸発計からの蒸発実験を行ない、蒸発は太陽日射と風によると考察した。また、Sedileauは蒸発計が小さいと蒸発量が大きいことを見いだした(Brutsaert, 1982)。ここに、水面の大きさの効果がすでに認識されていたことがわかる。

small ←

Size of Water Surface

→ large

17



凡例 直径 or 一辺 (cm)

(断熱材) 名称 (100)

スクリーン 使用者、国名 (地表面の乾湿) 設置高度 (cm)

(色) 深さ (cm)

Fig.3-1 従来の蒸発計の分類
Classification of pan evaporimeter

なわち、コンピュータ処理に馴染み、かつ物理的に明解な手段が発展する一方で、蒸発計の特性には様々な欠点があり、蒸発計蒸発量の意味が曖昧であるという理由で、蒸発計の必要性は次第に低下した。

しかし、蒸発計には、第一に安価で構造が簡単であること、第二に実測という現実的な手法であること、第三に水面という表面が乾湿条件での極限に位置し、理論的な扱いが容易であること、などの利点がある。また、蒸発計の設置地点と周囲の環境を考慮するという観測基準(例えばWMO,1966¹⁶⁴⁾)に従って測定された蒸発計蒸発量は、蒸発散算定のための基準値として現在でも利用されている。日本では、例えば水田用水量計画(中川,1967⁹³⁾)や流出解析(金子,1973⁵⁹⁾、高瀬ら,1978¹⁴⁶⁾,1986¹⁴⁷⁾など)のために、小型蒸発計蒸発量と蒸発散量の比(蒸発散比)が整理された。また逆に、従来から一般に欠点とされてきた特性は、設置地点の気象条件を確実に反映する特性として評価できる。

これまでに、蒸発計による蒸発散研究を整理・展望した例には、ASCE(1934^{129) 127) 143)}、WMO(1966¹⁶⁴⁾,1973¹⁶⁵⁾、ASCE(1973)⁹⁾、FAO(1975)²⁵⁾などがある。これらはいずれも、測定の基準化と蒸発散算定法の確立を目的としたものである。日本では、例えば伊藤(1968)²⁸⁾が、蒸発計を中心とした蒸発量観測の目的を工学的・理学的利用に分類して実態を整理し、蒸発散研究における観測の方向性を方法論的な立場で展望した。

本章では、蒸発計蒸発量の役割を再検討しながら、従来の蒸発散研究によってもたらされた成果と課題を概括し、今後の蒸発散研究を展望することに主題を置き、蒸発計を用いた研究の目的を、(1)蒸発散算定式、(2)蒸発散算定のための基準蒸発量^{*}、(3)蒸発計の特性、(4)移流効果、に分類して検討する。Fig.3-2に、蒸発計を用いた蒸発散研究の展開過程を整理してみた。従来の研究のほとんどは、上で述べたように(1),(2)の目的で行なわれてきた。蒸発計の特性を明らかにすることを目的とした研究(3)は、古くから(1),(2)に基礎的な資料を提供するために進められた。また一方で、その成果は、移流効果を検討するための研究(4)の重要な基

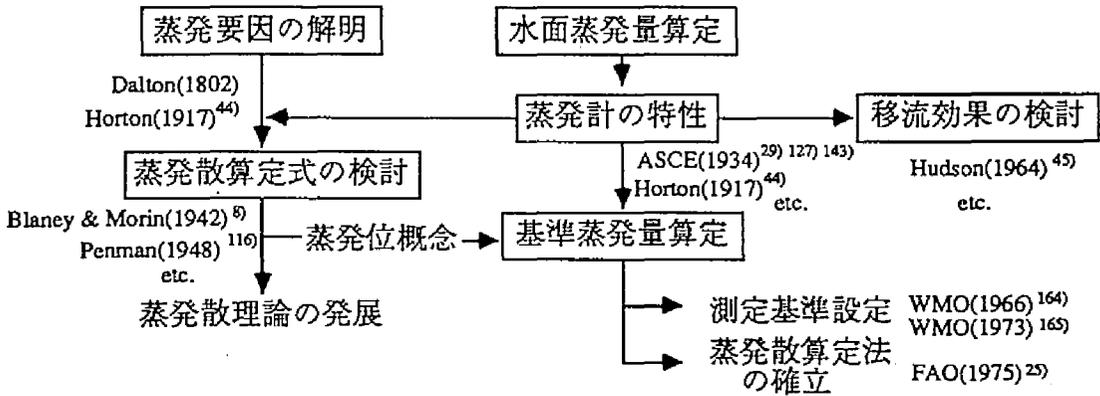


Fig.3-2 蒸発計を用いた蒸発散研究の展開 (研究の目的)

Progress in the study on evapotranspiration based on pan evaporation (purpose of study)

礎にもなった。(4)では、蒸発計の特性が利用され、蒸発計蒸発量を基準値として移流の影響を実験的に検討する研究と、あえて移流の影響を受けるように蒸発計を設置した研究が行なわれた。

本章3.2では、蒸発計による蒸発量観測の基準化と蒸発位概念**の発展過程と関連づけ、(1),(2)を目的とした研究の中で、蒸発計蒸発量の役割と課題を整理する。3.3では、まず蒸発計の特性((3)の研究)を整理する。次に、(4)を目的とした研究において蒸発計蒸発量が果たした役割と課題を整理し、今後の蒸発散研究を展望する。

* (前ページ), ** 蒸発散の算定法は、主として、基準となる蒸発(散)量(例えば、蒸発計蒸発量、蒸発散位; Thornthwaite, 1948¹⁵⁶⁾, 蒸散位; Penman, 1963¹¹⁷⁾, 蒸発位; Priestley & Taylor, 1972¹¹⁹⁾, 基準蒸発散量; FAO, 1975²⁵⁾)に作物係数や蒸発散比を乗じる方法として発展してきた。蒸発散位は、植生からの蒸散に作用する気孔抵抗を考慮する必要があるため、厳密な定義ができないとされている(樫根, 1980⁶⁷⁾, ICID, 1984⁴⁶⁾, 中川, 1989⁹²⁾, 桜谷, 1991¹³⁴⁾)のに対し、蒸発位は物理的に明確な概念とされている(樫根, 1980)。本研究では、便宜上、基準となる蒸発(散)量を基準蒸発量と称し、これに基づく蒸発散の取り扱いを蒸発位概念による取り扱いと称することにする。

3. 2 蒸発散量推定のための基準蒸発量としての役割

3. 2. 1 蒸発量観測のネットワーク化と基準化への模索

蒸発量観測の起源は17世紀後半に遡る。その後、気象観測のネットワークに組み込まれるようになったのは、19世紀後半から20世紀前半にかけてである。当初の主な目的は、農業、工業、電力用水管理のための貯水池や湖からの蒸発量調査であった。とくに、水の経済的利用が不可欠なUSA中部の乾燥地帯、旧USSR、オーストラリアなどでは、蒸発量観測が活発であった。USAでは、1889年に最も古い標準パンの一つであるColorado-sunken pan(コロラド埋設パン)、1915年にU.S.Weather BureauのClass A pan(A級パン)、1916年に主に西部の乾燥地でU.S.Bureau of Plant IndustryのBPIパンがそれぞれ定期的に使用開始され、1915年にU.S.Weather Bureau(現在National Weather Service)が蒸発観測のネットワークを設立した(Dale & Scheeringa,1977¹⁹⁾)。一方、日本では、気象官署が開設された1910年代後半に、銅製の小型蒸発計による観測が開始された。

蒸発計を用いた蒸発散研究は、蒸発計蒸発量を蒸発散量に変換する際に生じる問題点を解明することによって進展したとみられ、蒸発計の特性の解明にその鍵があったようである。この問題点を最初に指摘したのはHorton(1917)⁴⁾であろう。Hortonは、湖面蒸発量を算定するためには、地表に設置したパンは設置場所や形状で蒸発量が異なるため、水面に浮かべる方がよいとした。ただし、蒸発計は、枠の影響や水温差を補正する必要があるという難点を持つので、気象データがあれば計算値が望ましいとも指摘した。

当初、観測に用いられた蒸発計の形状、設置方法、周囲の環境は様々であった(Fig.3-1)ため、各地の測定値をそのまま水面蒸発量の算定に利用することは困難であった。そこで、測定結果から経験的に蒸発計の特性が検討され、観測方法の基準化を目的とした議論が展開した。

ASCEの灌漑水理特別委員会は、広い水面からの蒸発量算定を目的とし

たシンポジウムを1934年に開催し、蒸発量観測方法の基準を示し、観測所での実施を推奨した。Rohwer(1934)¹²⁷⁾は、5種類の蒸発計を用いたUSA西部、カナダ、メキシコ23地点での測定結果をもとに、蒸発計の特性、水面蒸発量への変換係数(蒸発比)、蒸発量と気象条件との関係を考察し、観測所での水温測定の必要性を強調した。さらに、蒸発計の設置場所と塗装色の重要性を主張し、その基準を提案した。ただし、設置場所には"周囲に障害物のない場所、貯水池蒸発量測定の場合は貯水池の条件を代表するような場所"、塗装については"無塗装かタールなどのコーティング"という程度の記述で、その理論的根拠は乏しく漠然とした基準に留められた。Follansbee(1934)²⁹⁾も、蒸発計の寸法と設置方法を考慮した係数の必要性を指摘した。このシンポジウムでは、蒸発小委員会(1934)¹⁴³⁾による討論の結果、標準蒸発計としてA級パンの採用を決定した。また討論では、USAやUSA領(当時)の観測地での膨大な結果を取り上げ、貯水池蒸発量や異なる蒸発計間の蒸発量差の要因が、細かく議論された。ただし、結果的には、蒸発計の特性をまだ断片的に評価した段階であり、その物理的意味の考察には至らなかった。しかしながら、蒸発量測定方法の統一を目的としつつ、それまでにおそらく個別には気付かれながらも大きく取り上げられなかった蒸発計の特性にメスをいれ、ある程度の観測基準を示したという点で、以後の蒸発散研究、蒸発位概念に与えた影響は大きい。

3. 2. 2 蒸発散算定式の検討—蒸発位概念の展開—

蒸発散算定式を必要とした目的の一つは、蒸発計蒸発量の測定が行なわれていない地域で、一般気象データから蒸発計蒸発量を推定することであった。

一方、蒸発位概念は、地球規模の気候分類、水循環の解析、作物栽培のための必要水量の把握等のために、地球上でのあらゆる自然現象を司る蒸発散を統一的に取り扱うことを目的として普及した。つまり蒸発位

概念は、一般気象要素を用いた簡便で合理的な蒸発散算定式の検討とともに展開した。蒸発位算定法は、蒸発計法と空気力学法を出発点とし、温度法、湿度法、放射法(平衡蒸発量型、直線回帰式)へと発展した(Veihmeyer,1964¹⁶²⁾, Tanner,1967¹⁵³⁾, ASCE,1973⁹⁾。ここでは、蒸発計蒸発量との関連において、その研究の展開を簡単に整理するが、各算定式の実用上の問題点*や蒸発位概念の総括的な取り扱いは他の機会に譲る。

蒸発散算定式の起源は、水面蒸発量(E)を表わしたDaltonのバルク型空気力学式；

$$E = f(e_w - e_a) \quad (3-1)$$

に遡る。ここで f は風速関数、 e_w 、 e_a は水面、大気の水蒸気圧である。ただし(3-1)式は、Daltonによって経験的に明らかにされた蒸発の機構を表現した式である。その後、Stelling(1882)らが風速関数を検討して次式を導き、(3-1)式を定式化した(Brutsaert,1982¹³⁾。

$$E = (A + Bu)(e_w - e_a) \quad (3-2)$$

ここで E は水面蒸発量($\text{mm } 2\text{h}^{-1}$)、 $A=0.0702$ 、 $B=0.00319$ 、 u は高度 7.5m の風速(km h^{-1})、 e の単位は mmHg である。さらに Horton(1917)は、蒸発計蒸発量 E ($\text{in. } 24\text{h}^{-1}$) を表わす次式を導いた。

$$E = \eta \{ (2 - \exp^{-m(u-\phi)}) e_w - e_a \}, \quad \rho = 10 \omega / \phi \quad (3-3)$$

ここで η は小さい水面について 0.4、 m は 0.2、 ϕ は蒸発計の枠による風速減衰量、 ω 、 ϕ はそれぞれ蒸発計の水面から枠の上端までの高さ水面の直径(in.)、 u は風速(miles h^{-1})、 e の単位は in.Hg である。

Yu & Brutsaert(1967)¹⁷⁴⁾ は、塗装色と大きさの異なる埋設式蒸発計(Fig.3-1)

* 例えば大槻(1989)¹⁰⁹⁾は、蒸発散量の算定法を整理し、いくつかの算定式について問題点をあげている。

蒸発量と水温の測定結果から、(3-2)式のAとBを求めた。以後、Dalton型の空気力学式は、熱収支式と組み合わせた混合式と輸送理論式に枝分れし、風速関数の検討と共に発展することになった。

温度法は、Blaney & Morin(1942)⁹⁾によって本格的に始まった。彼らは、月単位の水面蒸発量 E (in. month⁻¹)を次式で表した。

$$E = kT\zeta(114 - hu) / 100 \quad (3-4)$$

ここで k , T , ζ , hu はそれぞれ月別係数、月平均温度(°F)、年日照時間に対する月日照時間の割合(%), 月平均相対湿度(%)である。ただし、各パラメータは月毎の測定結果をもとに年平均値で取り扱い、(3-4)式は年単位の蒸発量算定式として用いられた。 k の年平均値は、まずA級パン蒸発量に関して実験的に求められ(0.0234)、湖面蒸発量の算定には、それに0.7(Rohwer,1934)を乗じた値が用いられた。

Hargreaves(1956)³⁸⁾は、(3-4)式に類似した月単位のA級パン蒸発量(in. month⁻¹)の算定式(3-5)を導き、これに作物係数を乗じる蒸発散量の算定方法を示した。

$$E = 0.38 i (100 - hu) (T - 32) / 100 \quad (3-5)$$

ここで、 i は12時間を1とした月別の日照時間の割合、 hu は正午頃の相対湿度(%), T は(3-4)式と同様である。

Blaney & Criddle(1950; from FAO,1975)は、(3-4)式を簡略化した次式を用いて蒸発散量(消費水量)を算定した。

$$E = kT\zeta / 100 \quad (3-6)$$

ここで k は、実験的に決定した消費水量作物係数である。またBlaney(1956)⁷⁾は、(3-6)式を用いてA級パンを、さらにこれに0.7を乗じて湖面蒸発量を算定した。ただしここでの k は、実験的に算定した月別の係数である。

Christiansen(1966)¹⁶⁾は、A級パン蒸発量 E (in. month⁻¹)を表わす次式を実験的に導いた。

$$E = 0.473 R_o C_T C_W C_H C_S C_M \quad (3-7)$$

ここで、 R_o は大気圏外放射量(in. month⁻¹)であり、 C_T, C_W, C_H, C_S, C_M はそれぞれ、月平均の温度、風速、湿度、日照時間に関するパラメータ、月別の係数である。また、(3-7)式の係数0.473を0.37に、 C_M を植生に関する月別の係数に置き換え、蒸発散量を算定した。

Christiansen(1968)¹⁷⁾とHargreaves(1968)³⁹⁾は、(3-7)式が広い範囲の気象条件に適用できるのに対して、蒸発計は多くの気象要素の影響を反映してしまうと評価し、計算式の有効性を主張した。これらの研究は、乾燥地の灌漑計画において、設置状況によって値が変動してしまう蒸発計よりも適当な指標を求めるのが目的であった。

一方で、Thornthwaite(1948)が、用語として"potential evapotranspiration"を用い^{*}、Penman(1948)¹¹⁰⁾の湿潤面蒸発量を表わす混合式とあいまって、蒸発位という概念が提案された。また、Penmanは、地中に埋めた水、土、牧草のタンク(cylinder O, MOタンク)を用いた蒸発量の測定結果から、水面蒸発量 E (mm d⁻¹)を表わす空気力学式(3-8)を導いた。

$$E = 0.26 (1+0.54u_2) (e_w - e_a) \quad (3-8)$$

ただし、 u_2 は高度2mの風速(m s⁻¹)、水蒸気圧 e の単位はhPaである。同時にPenmanは混合式を導いた。

蒸発位は、農学分野では、土壌水分や作物生育をパラメータとして蒸発散量を算定する際に必要な基準値となっている。また、水文学の分野でも、水循環における蒸発散量を算定するための指標として、重要な役割を担ってきた。すなわち、蒸発位が蒸発散量を算定するための基準値

* Thornthwaiteは、USA国内4地点における蒸発散位(ライシメータによる)と月平均気温 T_i の測定結果から、月単位の蒸発散位を T_i の関数で表わした。

として幅広く用いられ、蒸発散算定式の検討が進められるうちに、蒸発計は逆に基準蒸発量を算定するための測器として位置づけられてきたといえる。このような展開の中で、蒸発計による蒸発量測定の基準化と、蒸発計の特性の分析が進められた。

3. 2. 3 蒸発散算定のための基準蒸発量の検討

基準蒸発量を算定するための研究において、蒸発計蒸発量に対する従来の評価は、①有効な算定法、②適用に限界があり計算式の方が有効、③基準値とはなりえない、の3点に分けられる。ここでは、これらの評価を再検討する。

Pruitt & Jensen(1955)¹²⁰⁾は、灌漑実験用の作物畑に類似した観測場所に、BPIタンクを設置した。その結果、Blaney & Criddle法やThornthwaite法などの計算値よりも、畑地と同じ気象条件下で測定された蒸発計蒸発量の方が、灌漑畑からの蒸発散量の変動をよく反映したとしている。実験地に近接した気象観測所や、周囲を灌漑畑地に囲まれた実験灌漑地の中(Gray et al.,1955³¹⁾、鈴木ら,1958¹⁴⁴⁾、Thompson & Boyce,1966¹⁵⁹⁾、Dilley & Shepherd,1971²³⁾、Evans,1971²⁸⁾、Kristensen,1977⁷³⁾、Iruthayaraj,1978⁴⁷⁾、Hargreaves & Samani,1982⁴⁰⁾、矢野ら,1986¹⁷²⁾、Wright,1988¹⁶⁶⁾), または、実験地に類似した気象条件下(古藤田,1977⁷¹⁾、土屋ら,1978¹⁵⁷⁾、1981¹⁵⁸⁾、Dolan et al.,1984²⁴⁾)にA級パンなどの蒸発計を設置した場合に、広い水面からの蒸発量や圃場からの蒸発散量との間には高い相関が認められた。

このように、設置方法が考慮された蒸発計蒸発量は、蒸発散に関係する要因を総合的に反映しており(Weaver & Stephens,1963¹⁶³⁾、WMO,1973¹⁶⁵⁾、農林水産省,1982³⁹⁾)、与えられた気象条件での蒸発要求量を示す(Stanhill,1961¹⁴¹⁾)といえ、蒸発散量の良い指標として利用することができる。

これに対して、気象要素を用いた計算式の方が、蒸発計蒸発量よりも信頼性が高いとする見方も多い。これは、蒸発計の蒸発機構と熱交換特

性が、自然の水面、地表面や作物群落面のそれと異なるため、蒸発計蒸発量から蒸発散量を算定することは容易ではないという見解である (Budyko,1956¹⁴⁾, Hargreaves,1968, Lemon et al.,1957⁷⁴⁾, Tanner & Pelton, 1960¹⁵²⁾, Riley,1966¹²⁵⁾, Tanner,1967, Dagg,1969¹⁸⁾, 農林水産技術会議, 1973⁹⁸⁾, Fuchs,1973³⁰⁾, Dale & Scheeringa,1977, Shouse et al.,1980¹³⁹⁾, Arbin et al.,1984³⁾, 大槻ら,1984a¹⁰⁵⁾, 我ら,1987¹⁷³⁾, 三浦ら,1988⁸⁴⁾, 高瀬ら, 1989¹⁴⁸⁾).

Lemon et al.(1957)は、周囲の環境を十分に考慮して気象観測所に設置されたA級パン蒸発量が、圃場からの実蒸発散量の指標として最も感度が良好で、Penmanなどの計算値よりもよく一致すると評価した。しかし、蒸発散は、作物群落表面の粗度や反射特性、植物生理特性、土壤水分特性などを総合した結果であることを強調し、実蒸発散量とよく一致することに対する警鐘を鳴らした。Lemon et al.の問題提起は、蒸発計の問題に限定されず、蒸発散機構に関する研究が進展してゆく上で重要な意義を持つ。

また、蒸発計蒸発量が蒸発散量の基準値として適当であるとしても、従来のような線形関係に基づいて蒸発散量に変換するためには、パン係数、作物係数、あるいは作物・場所・乾燥湿潤条件別の経験定数 (Stanhill,1962¹⁴²⁾, McIlroy & Angus,1964⁷⁹⁾, Iruthayaraj,1978)をあらかじめ求めておくか、より理論的な根拠に基づく係数や関係式の検討が必要となる。さらに、特定地区における係数には独自性があり、係数の意味が不明であることも指摘されている(土屋ら,1978,1981, 近藤,1989⁷⁰⁾).

以上の検討結果から、蒸発計(蒸発量)に対する評価は次のようにまとめられる。蒸発計は、他の測定機器と比較して実測、コスト、普及性、気象環境の反映という点で優れている。したがって、とくに遠隔地や開発途上国での蒸発散研究では、蒸発計は有用な方法である (Stanhill,1961, Brutsaert,1965¹¹⁾, Yu & Brutsaert,1967, Cardon,1984¹⁵⁾). しかし、様々な要因を反映するという特性は、利点であると同時に欠点でもあるため、具

体的な目的や対象を踏まえて蒸発計を取り扱う必要がある。また、蒸発散算定のために様々な条件別の係数を必要とすることは、蒸発計蒸発量の物理的な意味が薄いことを示している。したがって、蒸発散量の基準値を算定するための方法としては、蒸発計の適用性が限定されると考えるべきであろう。

3. 2. 4 測定基準の設定と蒸発散算定法の確立

3.2.1で述べたASCE(1934)の測定基準に続いて、国際的な規模で測定基準が検討された。

まず、1957～1958年のIGY(国際地球観測年)を契機に、A級パン、GGI-3000パン、20m²タンクが、蒸発量観測のための標準測器として推奨された。なかでもA級パンは、WMOやIASHで適用され、最も一般的な蒸発計といえる。日本でも、1966年に小型蒸発計を廃止し、A級パンとほぼ同型の大型蒸発計に移行された(榎根, 1980)。

1962年には、WMOのCIMO(観測機器と観測方法に関する委員会)が、(a)蒸発量観測方法手引き、(b)国際標準的な蒸発計の推奨、(c)蒸発散研究における蒸発計の役割、(d)気象要素測定による蒸発計の代用可能性検討という目的で、蒸発量測定研究グループ(Gangopadhyaya et al.)を設立した。WMO(1966¹⁶⁾,1973)は、その成果をまとめ、蒸発計蒸発量の観測場所と方法の基準を詳細に示した*。また、12ヶ国で測定された各国独自の蒸発計とA級パンの蒸発量や、旧USSRでの20m²パン、GGI-3000パン、A級パンの蒸発量が比較され、それぞれの蒸発量の比や回帰式が整理された。さらに、A級パン蒸発量から湖面蒸発量を算定するために、Kohler et al.

* WMO(1966)が示した基準を要約すると、(i)観測所の広さは15m×20m以上、平坦で開けていること、(ii)観測所の地被はできるだけ周囲と同じにし、草を頻繁に刈り込む、(iii)コンクリートやアスファルトの上に蒸発計を置かない、(iv)蒸発計の塗装色は特定化の必要(内部と外部側面は白、外部底面は黒が適当)、(v)適度に水を交換する、などである。

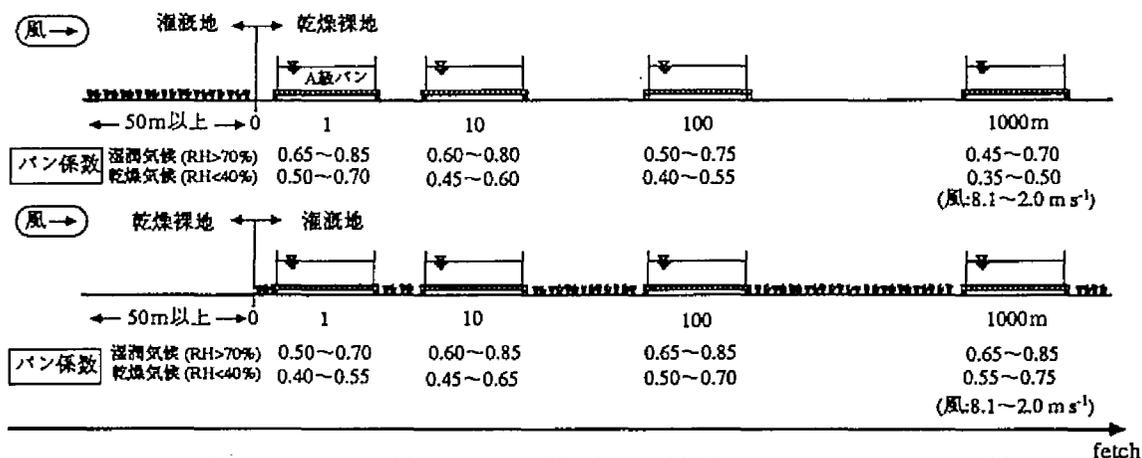


Fig.3-3 A級パンの設置地点(fetch),周囲の環境,気候条件別のパン係数

(FAO,1975²¹)のTable 18を整理)

Pan coefficients according to fetch, environments and climatic conditions
(Arrangements of Table 18 in FAO,1975²¹)

(1955; from Nordenson, 1963⁹⁷)が開発した方法が採用された。この方法は、蒸発計の設置高度の風速や蒸発計水温と気温の差などの関数として、蒸発比を空気力学的に補正するものである。WMO(1966)は、蒸発計法が湖面蒸発量の算定法として有用であると評価し、経験定数やKohler法を実証するためのデータの蓄積を促した。また、渦相関法や熱収支法などが汎用性に優れていることを付け加える一方、測定機器が普及するまでは、さし当って蒸発計に代わり得る方法はないとした。これらの研究成果により、標準化されたA級パン蒸発量を用いた水面蒸発量の算定法が、ある程度確立されたといえる*。ただし、この算定法は必ずしも簡便とはいえず、蒸発計の取扱難さが如実に現われたものと考えられる。

一方、灌漑用水量計画のための蒸発散算定法は、ASCE灌漑要水量委員会(Jensen,1973)とFAO(Doorenbos & Pruitt, 1975,1977)によってほぼ完成された**。ただし10日~1ヶ月程度の期間が対象である。また、Gupta et al.

* 短期間の蒸発散量や経時変化を検討する場合には、水体の熱貯留を考慮する必要がある。

** 日本の畑地灌漑計画における消費水量の決定方法(農林水産省構造改善局,1982⁹⁹)にも反映されている。

(FAO,1977)は、この算定法をコンピュータプログラム化した。FAOは、基準蒸発散量(ここでは広大な灌漑草地からの蒸発散量 ET_0)の算定法として、Blaney & Criddle, Makkink, Penman, 蒸発計の各方法を採用した。蒸発計法は以下のようなものである。実蒸発散量は、 ET_0 に作物係数を乗じて推定される。 ET_0 は、 $ET_0=k_p E_{pan}$ によって求められる。ここで、 k_p はパン係数であり、 E_{pan} はA級パンかコロラド埋設パンの蒸発量である。 k_p は、Pruitt(1960)¹²¹⁾やStanhill(1961)らによる様々な観測結果をもとにして整理されており、湿度、風速、蒸発計設置条件別に選択できる(Fig.3-3)。また、詳細な条件下における係数の修正法も示されている。FAOはたいていの蒸発計の設置環境を網羅して示したが、耕地がある程度一様に広がるような土地利用条件での場合に限定される。

3. 3 局地蒸発位としての役割

3. 3. 1 蒸発計の特性

蒸発計の特性に関する研究は、ASCE(1934)¹²⁷⁾による観測基準の模索を契機として、(1)、(2)の研究に基礎的な資料を提供するために展開した。前報で整理した測定基準と蒸発散算定法の確立はその成果のひとつである。

蒸発計蒸発量に影響を与える要因は、形状、塗装色、設置方法である。これらの要因が総合的に反映して、蒸発計は独自の放射収支と熱収支を形成する。

(1) 形状

形状の要因は、水面の大きさと壁面の影響に分類でき、その他スクリーンの有無による効果も検討された。

(i) 水面の大きさの効果

蒸発計を対象とした半理論的な研究は、Horton(1917)⁴⁴⁾が先駆的である。Hortonは、蒸発計を含む一般的な蒸発面を対象とし、風上端での蒸発量 E_0

(inches)と半径 x (feet)の水面からの蒸発量 E_x の関係を導いた。

$$E_x = E_0 \exp^{-m \eta x} \quad (3-9)$$

(3-3)式と同様に $\eta = 0.4$ である。 m ($0 \leq m \leq 1$)は風による水蒸気拡散抵抗を表わす係数で、大きさの異なる蒸発計による観測結果から、定常的な風の場合に $0.6 \sim 0.7$ である。しかし、 $x=3, 6\text{m}$ で、 E_x は E_0 のそれぞれ約 $1/10, 1/100$ に達するため、関数型に問題があった。

Yamamoto(1950)¹⁶⁸⁾は、理論的に、層流、乱流、および無風状態における水蒸気輸送式を導き、大きさの異なる吸水紙を用いた風洞実験により、これらの理論式が妥当であることを示した。また、Miller(1937)の実験結果を援用し、蒸発計水面の場合は、蒸発計の枠の影響*により Reynolds数 (ux/ν) $<10^4$ でも乱流となることを指摘し、水面の風方向の距離 x (cm)と風洞の風速 u (cm s^{-1})の関数として、蒸発計蒸発量 E (cm s^{-1})を次式で表した。

$$E = \{0.298 + 0.042u (ux/\nu)^{-0.2}\} (c_w - c_a) \quad (3-10)$$

ここで、 c_w と c_a はそれぞれ水面と大気の水蒸気量(g cm^{-3})、 ν は空気の動粘性係数($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)であり、右辺第一項は、自然対流による水蒸気拡散の効果を表す。

Halstead & Covey(1957)³³⁾は、移流理論の手法により、蒸発面の境界層の高さ Z_b を次式で表し**、蒸発面の大きさ(fetch) x が蒸発量に及ぼす影響を、数値実験で示した。

* 水面から枠上端までの高さは、重要な要因の一つであり、従来から各蒸発計の仕様にも定められてきた(例えば、A級パンについては 5.1cm ¹⁶⁹⁾)。Horton(1917)は、枠による風の減衰を考慮し、蒸発量が減少する効果を含む(3-3)式を導いた。(3-10)式は、(水面の高さが仕様通りであることを前提に)枠によって乱流が発生し蒸発量が増加する効果を含んだ。また、これら以外の研究でも、風速関数を実験的に導くことにより、この要因が考慮されたといえる((3-12), (3-13)式)。

$$Z_B = 0.45 x^{0.8}$$

(3-11)

これらの研究は、従来の経験的な蒸発散算定式に蒸発面積などの要因を組み込む必要性を示したものである。

WMO(1966)¹⁶⁴⁾は、数ヶ国の研究者が行なった観測結果を整理し、直径約450cmまでは蒸発量が変化するが、約360cmで影響は無視できるとした。一方、日本では、気象官署で観測に用いられてきた小型蒸発計が大型蒸発計に置き換えられる際、大きさの効果が議論された。上原(1958)¹⁶¹⁾や関西電力(1959)⁶¹⁾は、小型蒸発計が気象条件以外にfetchの影響を受けやすいため、大型蒸発計が望まれるとした。伊藤(1968)⁴⁹⁾は、小型蒸発計は熱効果が大きいため、何らかの蒸発量の指標以上の意味づけは困難であるとした。すなわち、小型蒸発計の欠点は、①空気力学特性が不安定、②境界層が発達、③壁面熱交換の項が大きいことにあるといえる。

これに対して、梶根(1980)⁶⁷⁾は、我が国のような湿潤地帯では蒸発散の年変動が小さいため、小型蒸発計による過去の蓄積資料も利用価値があるという見解を示した。これは、乾燥地で問題となる設置地点による変動が小さいので、ある観測地点で得られた結果に十分な代表性があるという意味であると考えてよい。

一方、Sharma & Dastane(1969)¹³⁷⁾は、気象観測所のA級パンと綿花群落面に設置した小型缶蒸発計を用い、綿花畑蒸発散の算定を試みた。蒸発散との相関は小型缶蒸発計の方が高く、経済的で簡便な小型缶の実用性が強調された。この結果から、小型蒸発計は、調査対象となる地表面への設置が簡単で、設置地点の微気象条件をよく反映するという利点を持つといえる。すなわち、狭い地表面や植生群落面の微気象を検討する目的に適しているといえる。

** (前ページ) Elliou(1958)²⁷⁾やMunro & Oke(1975)⁹⁰⁾は、測定結果から半理論的にそれぞれ、 $Z_B = 0.35 x^{0.8} Z_0^{0.2}$ (熱輸送の内部境界層)、 $Z_B = 0.1 x^{0.8} Z_0^{0.2}$ (運動量輸送の内部境界層)を導いた。ここで Z_0 は粗度長である。

(ii) 壁面での放射収支・熱収支の効果

Riley(1966)¹²⁵⁾やYu & Brutsaert(1967)¹⁷⁴⁾は、底側面を断熱材で包んだ蒸発計を用いてこの要因を分析した。

Rileyによると、A級パンからの蒸発に寄与する底側面での熱輸送効果は、日単位で28%にのぼった。

Yu & Brutsaertは、底側面を断熱した蒸発面積の異なる8種類の浅い(2.54cm)矩形パンを用いて試験した。Dalton型の空気力学式における水蒸気輸送係数； $f(u)=A+Bu$ を検討したところ、各パンのAとBには大差がなかった。この結果から、浅いパンの場合は、枠による拡散効果の減衰を無視できるといえる。さらに、Yu & Brutsaertは、蒸発計の底側面での熱輸送を無視した熱収支式を解き、実験的に乾湿計定数を逆算した。乾湿計定数は、蒸発面積が大きくなるとともに減少し、約240cm四方のパンの場合は、通風乾湿計の湿球温度計についての値($\cong 0.66\text{hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)に近かった($0.71\text{hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)。

Morton(1965)⁸⁶⁾は、Kohler et al.(1955 from Nordenson,1963⁹⁷⁾らの分析結果に従ってA級パンの熱収支を検討し、底側面での顕熱、放射輸送を考慮した混合式を次式で表わした。

$$\begin{aligned}
 e_*(T_w) + p\left(\frac{r_L K_R}{f(u)} + r_H K_H\right)T_w \\
 = p \frac{r_S(1-a)St + K_R T_e + K_R(r_L-1)T_a}{f(u)} + pr_H K_H T_a + e_a \quad (3-12)
 \end{aligned}$$

ここで、 T, e は温度($^\circ\text{F}$)と水蒸気圧(in.Hg)，添え字の $*, w, a, e$ はそれぞれ飽和，水面，大気，大気射出を表わす。 p は大気圧(in.Hg)， St は全天日射量(in. month⁻¹)， a は水面のアルベドである。 K_H は顕熱輸送係数($=0.00034 ^\circ\text{F}^{-1}$)， K_R は放射輸送係数($=0.125\text{in. month}^{-1} ^\circ\text{F}^{-1}$)， $f(u)$ は輸送係数(in. month⁻¹)であり，A級パンの枠上部における風速 u (miles d⁻¹)から実験的に，

$f(u)=500(0.6+u/100)$ が導かれた。 r_L, r_H, r_s はそれぞれ蒸発面積に対する長波放射, 顕熱輸送, 日射吸収に寄与する面積の比であり, $r_L=r_H=2$ と仮定し, 実験的に $r_s=1.08$ が導かれた。

この式から, 右辺を既知として表面の水蒸気圧 $e_*(T_w)$ が解かれ, Dalton型の空気力学式に代入してA級パン蒸発量が算定された。算定結果は, 壁面熱輸送を考慮しない混合式よりも測定値とよく一致した。

Thom et al.(1981)¹⁵⁾は, A級パン蒸発量; A_{pan} (mm d^{-1})をPenman型の混合式(3-13)で表わした。

$$A_{pan} = \frac{\Delta(\xi Rn - \Delta W) + r_H \gamma f_p(u_2)(e_*(T_a) - e_a)}{\Delta + r_H \gamma} \quad (3-13)$$

ここで, $Rn, \Delta W, \Delta$ は, 草地の純放射量(mm d^{-1}), 水体貯熱量(mm d^{-1}), 飽和水蒸気圧曲線の勾配($\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)である。また, ここでの γ は乾湿計定数($0.66\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)である。 $f_p(u_2)$ はパン水面における輸送係数($\text{mm d}^{-1}\text{hPa}^{-1}$)であり, 高度2mの風速 u_2 (m s^{-1})を用いて実験的に $f_p(u_2)=0.12(1+1.35u_2)$ が導かれた。 ξ はパンと草地の日純放射量の比であり, 実験的に $\xi=1.31$ が導かれた。 r_H はパンに関する顕熱と潜熱の輸送係数の比であり, A級パンの形状を考慮して $r_H=2.1$ (Kohler et al.,1955とMorton,1965はそれぞれ $r_H=2.5, 2$)を適用した。

(iii) スクリーンの効果

標準的な装備ではないが, 鳥獣の害を避けるために, 針金製のスクリーンを水面上に取付ける場合がある。日本の小型蒸発計に取付けられている放射状のスクリーンはその一例であるが, 他国では格子状のものが多い。

スクリーンによって, 水面への放射エネルギーが減少し, 拡散が減衰するため, 蒸発量は減少する(WMO,1966, Dagg,1969¹⁸⁾)。基準蒸発量を測定する目的の場合には, スクリーンのない標準状態との比が予め調査されている。例えばA級パン(インド)とAslyngパン(ノルウェー)については

各々、1.14、1.22である(WMO,1966).

(2) 塗装色

蒸発計のアルベドは、水面のアルベドよりむしろ底側面のものに近い^{*}ため、塗装色は重要な要因である。従来の蒸発計の塗装色は、黒、白、アルミなど様々であり、無塗装も多い(Fig.3-1)。塗装色を検討した研究を総括すると、"放射特性に影響するため、特定しておく必要がある"という点では一致している。しかし、"内部と外部側面は白、外部底面は黒(WMO,1966¹⁶⁴⁾"、"浅い水深をもつ底が黒っぽい水面からの蒸発を推定するためには、大型パンの白色塗装は不適當(山本・近藤,1968¹⁷⁰⁾"、"ケニヤの蒸発計は、内部は日射の吸収をよくするためにアスファルト塗装、外部は側面での放射吸収を小さくするためにアルミ塗装(Dagg,1969)"など、一定の基準はない。ただし、蒸発計の利用目的によって、塗装色が選択できることは確かであろう。

Yu & Brutsaert(1967)は、大きさの異なる蒸発計毎に、内部塗装色とほぼ無関係な風速関数を実験的に導いた。また、黒色蒸発計は大きい蒸発計ほど蒸発量が多く、白色蒸発計は逆に小さいものほど蒸発が多かった。さらに、白色・黒色蒸発計の蒸発量の差と日射量の間、高い相関性が得られた。この特性は、Halkias et al.(1955)³²⁾のLivingston atmometerにも利用された。

Sharma & Dastane(1969)¹³⁷⁾は、白とアルミ塗装の小型缶蒸発量と綿花畑の蒸発散量を比較し、ほぼ同じ程度の相関性を得た。

三浦ら(1980)⁸¹⁾は、白色と灰色の小型パン(各アルベド0.72、0.20)を用いた測定結果から、両者の日蒸発量と水温(7:00~18:00の平均)の関係を一つの関係に整理し、蒸発計蒸発量は水温によって決まるとした。ただし、蒸発量と水温は互いに因果関係にあるため、この関係は、同一地点に塗

* 水の存在が白と黒のアルベド差を拡大させるともいわれる(Brunt,1952 from Yu & Brutsaert,1967).

装色のみ異なる蒸発計を設置した場合に限られる。

(3) 設置方法

設置方法は、(i)地中に埋設、水面に浮かべる、地表面又は作物群落面、表面上に上げる、という設置形態によって分類され(Fig.3-1)、蒸発量は、(ii)設置地点の乾湿条件、(iii)設置地点の環境によって影響される。設置形態のうち、水面に浮かべる方法は、水面蒸発量の測定を目的としたものである。しかし、筏などの費用が高いこと、強風条件では波による水の出入りがあること、維持管理が簡単でないことなどの欠点がある。ここでは、設置3形態を設置高度の影響としてまとめる。

(i) 設置高度の影響

Pruitt(1960)¹²¹⁾は、高度のみが異なる蒸発計(直径・深さ61cm、水面の高度7.6, 61, 107cm)を周囲と同じ草地の観測所に設置し、短い草地の蒸発散量と比較した。蒸発散量に対するパン係数は、設置3形態についてそれぞれ1.09, 0.95, 0.82で、低い方が蒸発散との相関が高かった。Sharma & Dastane(1969)は、綿花群落面と群落上30cmの2高度に缶蒸発計を設置した。後者は前者の約1.2倍であり、蒸発散との相関は前者の方が高かった。Dagg(1969)は、A級パンと埋めたケニヤ蒸発計(スクリーンなし)を比較し、年単位の両者の比が約1.2という結果を得た。この原因は、上げた蒸発計(A級パン)が日射と移流の影響を受けやすいためであると考えられた。しかし、McIlroy & Angus(1964)⁷⁹⁾は、地上に上げた蒸発計はごく周囲の影響をあまり受けないため、牧草地(草丈約10cm)の外でも蒸発散とよく一致するとした。ただし、両者が一致するもう一つの原因として、上げた蒸発計が灌漑作物と同様に移流の影響を受けやすいことも考えられる。これらの研究の論点は、蒸発計蒸発量は周囲の乾湿条件の影響を受けることと、高い高度では乱流による水蒸気拡散が大きくなること(Riley,1966)、に要約できる。

その他、Hudson(1964)⁴⁵⁾、Hand(1964)³⁴⁾、Davenport & Hudson(1967a²⁰⁾、b²¹⁾、大槻ら(1984a)¹⁰⁵⁾が、複数高度に蒸発計を設置し観測を行なった。設

置高度の異なるそれぞれの蒸発計の役割は次章で検討する。

(ii) 設置地点の乾湿条件

Pruitt(1960)は、湿潤な草地と乾燥した裸地で蒸発計蒸発量を測定した。各地表面上に設置した同種類の蒸発計のパン係数は、それぞれ0.95, 0.75であったが、蒸発散との相関性は同程度であった。Dale & Scheeringa (1977)¹⁹⁾は、地表面の乾湿条件別に、蒸発量に対する蒸発面積の影響(大小の蒸発計や広い水面など)を検討した。

これらの検討結果から、高度が表面に近く、水面面積が小さい蒸発計ほど、設置地点の乾湿条件を敏感に反映するといえる。また、乾湿条件を反映した蒸発計蒸発量は、蒸発散算定のための汎用的な基準蒸発量としては問題があるとされてきたが、局地蒸発位(Munn,1970⁸⁹⁾、Dale & Scheeringa,1977)と考えることにより、設置地点の微気象条件の指標としての意義を持つ。

(iii) 設置地点の環境

設置地点の影響は、移流効果の研究と関連が深い。これまでにまとめた水面の大きさ、設置高度、設置地点の乾湿条件の効果を含め、次項でまとめる。

(4) 総合的考察

形状、塗装色、設置方法の影響など蒸発計の特性を総合した検討は、ASCEのRohwer(1934)に始まった。Rohwerは様々な観測結果を整理し、これらの影響を経験的に評価した。米国農務省のYoung(1945 from WMO, 1966)は、カリフォルニアにおける湖面蒸発量の正確な算定を目的として、埋設式蒸発計の大きさ、全面の塗装色(8種類を無塗装と比較)、スクリーンの影響を実験的に検討した。Pruitt(1960)は、灌漑畑の蒸発散量と蒸発計蒸発量を比較した。実験には、水面の大きさ、設置高度、設置地点の乾湿条件を変えた8種類の蒸発計が用いられた。これらのパン係数にはばらつきが認められるが、蒸発散量と個々の蒸発計蒸発量の相関は高い。

すなわち、灌漑畑と同じ気象条件下にある蒸発計蒸発量は、何らかの機構でその気象条件を反映し、蒸発散のよい指標となる。これは、蒸発散算定のための基準蒸発量を測定する場合には、設置環境を一定に維持する必要があることを実証したものである。WMO(1966, 1973¹⁶⁵)は、従来の測定結果に基づく蒸発計の特性を分析し、観測の基準を整理した。

これまでの検討をまとめると、蒸発計周囲の高温乾燥大気からの局所的な移流や蒸発計自身の構造に起因する放射収支と熱収支の特性が、広大な自然表面と異なる蒸発計の特性であるといえる。このいわば当然の特性を認識するまでの過程は、扱いやすい蒸発計に対する誤った認識によるものであり、蒸発散測定のための精密機器やより合理的な算定式が普及した現在にいたっては、今日的意義はないという認識もある。しかし、その過程は、蒸発散メカニズムや移流効果の検討と蒸発位概念の展開に重要な役割を果たしたと考えられる。

3. 3. 2 移流効果と蒸発計蒸発量

移流効果は大きく2種類に分類され^{*}、規模の大きい地域移流(regional advection)^{**}や、隣接した性質の異なる地表面から風が吹く場合に生じる局地移流(local advection)^{***}などの用語で呼ばれている。現象的には Horton(1917)が早くから認識し、Tanner(1957)¹⁵¹が機構を解説した。実験的には、乾燥地に隣接する灌漑地での熱収支測定や温度分布測定による検討が展開し(Dyer & Crawford, 1965²⁶), Rosenberg, 1969¹²⁸, Rosenberg &

* Rijks(1971)¹²⁴やBrakke et al.(1978)は、灌漑畑内数地点で熱収支測定を行ない、地域移流と局地移流を分離した。Brakke et al.は、地域移流は風速と正の相関性があり、局地移流は風速よりむしろ風上端からの距離に関係することを見いだした。

** large-scale advectionとも呼ばれる(Rosenberg et al., 1983¹³⁰)。oasis effectはそのひとつである。

*** fetch effect, leading edge effectや、clothesline effect(Oke, 1978¹⁰⁴)などがある。また地域・局地移流以外に within-canopy advection(Ritchie & Burnett, 1971¹²⁶), Hanks et al., 1971, Kanemasu & Arkin, 1974⁶⁰)もある。

Verma,1978¹²⁹⁾, Hanks et al.,1971³⁵⁾, Brakke et al.,1978¹⁰⁾, 理論的には, 大気の運動方程式とエネルギー方程式を解くことによって, 温度分布などが数値実験的に表現された(Elliott,1958, de Vries,1959²²⁾, Philip,1959¹¹⁸⁾, Rider et al.,1963¹²³⁾, Rao et al.,1974¹²²⁾, 早川ら,1978⁴¹⁾, 1984⁴²⁾など). ここでは, 蒸発計による移流効果の研究に焦点を絞り, 移流効果に関する一般的研究の整理は別の機会に譲る.

この研究には, 移流効果を実験的に調査したものと, 蒸発散への移流の影響を検討したものがある. はじめに述べたように, 前者では, あえて移流の影響を受けるように蒸発計が取り扱われ, 後者では, 蒸発計蒸発量をあくまでも蒸発散量の基準値と位置づけようとしている点で異なる. しかし, いずれにしてもこれらの研究は, 安価で簡便な蒸発計の利点と, 設置地点の気象環境を反映する特性を利用したものである.

移流効果を実験的に考察した例として, アフリカの乾燥地における一連の研究(Hudson,1964, Hand,1964,Thompson & Boyce,1966¹⁵⁵⁾, Davenport & Hudson,1967a,b)がある. Fig.3-4に, 観測結果の概要を整理する. 実験地は, いずれも乾燥地に囲まれた広大な灌漑地区であり, とくにHudsonらの場合は, 卓越風方向10数kmにわたって灌漑畑や乾燥休閑地が連続するため, 移流効果を調査するには極めて理想的な条件であった.

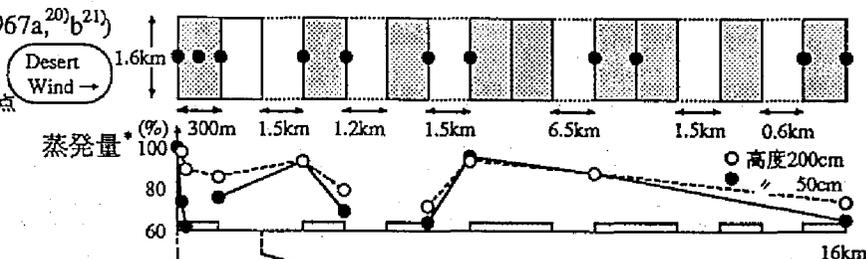
Fig.3-4に整理された結果を要約すると, 風上端から灌漑畑内50~60mの区域で蒸発量が20~30%減少し(fetch effect), 10数km風下の灌漑畑内(fetchの等しい風下地点で比較した場合)で10%減少した(地域移流)といえる. ただし, Thompson & Boyceの測定結果には, 局地移流が現われなかった. これは, 実験地の周囲が実験地と同様の作物畑(隣接していたのは非灌漑畑)であったためと, 高度1mに設置された蒸発計が, 作物群落面(草丈1m未満)よりむしろ広い範囲の乾湿・温度環境を反映したためであると推察できる. また, Davenport & Hudsonは, 高度2mの蒸発計の局地移流が, 高度50cmなどの蒸発計のものよりも小さいことを示した.

大槻ら(1984a)は, 水田地帯や集落の地表面上と高度1.2mにおいて蒸発

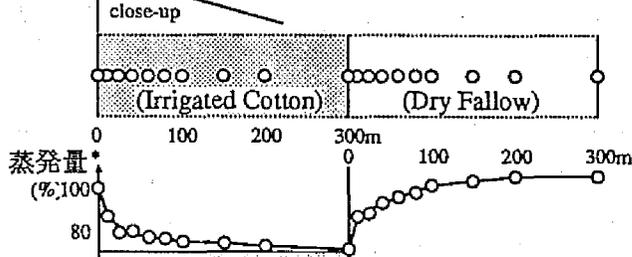
Hudson(1964)⁴⁵⁾

Davenport & Hudson(1967a,²⁰⁾ b²¹⁾

Sudan, Gezira
 ● 25,50,100,150,200cm
 5高度の鉛直分布測定地点
 (Hudson Type Pan)



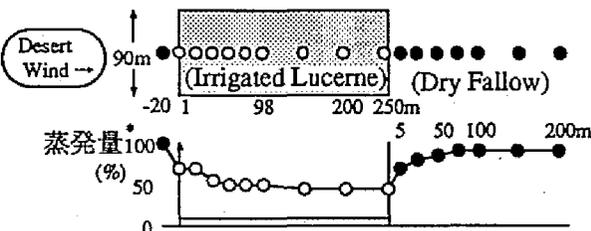
○ 60~70cm(灌漑地の群落高)
 1高度測定地点
 (Hudson Type Pan)



Hand(1964)³⁴⁾

Sudan, Khartoum

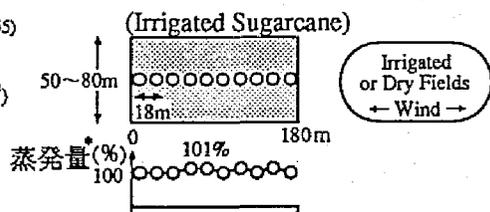
○ 群落上
 ● 地表面上5cm
 (Hudson modified)



Thompson & Boyce(1966)¹⁵⁵⁾

South Africa
 Sugar Assoc. Exper. Farm (0.8km²)

○ 高度100cm (Hudson Type Pan)
 草丈<100cm



FAO(1975)²⁵⁾***

(Table 18をもとに作図)

高度10cm (Class A Pan)
 ○ 乾燥気候(RH<40%)
 ● 湿潤気候(RH>70%)

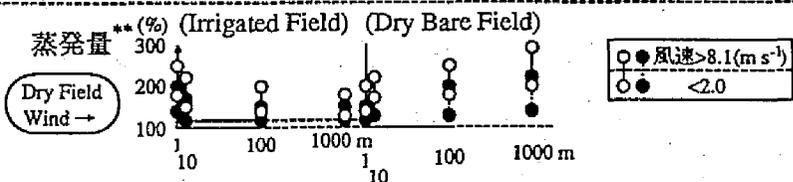


Fig.3-4 蒸発計を用いた移流効果の観測地概況と蒸発量の水平分布

- * 風上の蒸発計蒸発量を100%とした各地点の百分率.
- ** 広大な灌漑草地からの蒸発散量を100%.
- *** 様々な測定資料をまとめたもの.

Representation of observational sites of advection effect by
 pan evaporimeter and horizontal profiles of pan evaporation.

計蒸発量を測定し、前者は地表面の局所的な乾湿条件を、後者はより広い水平範囲の地表の乾湿条件を反映したものと考察した。関西電力(1960)⁶²⁾は、小さい蒸発計を貯水池に浮かべ、貯水池蒸発量の局所性を検討したが、結果的には、蒸発計への移流の影響を検討したものといえる。

これらの研究は、移流の影響を受けやすい小型蒸発計を利用した点に特徴があり、蒸発計蒸発量の水平・鉛直分布を局地蒸発位の分布と考えたものであるといえる。

Lemon et al.(1957)⁷⁴⁾, Evans(1971)²⁸⁾, Iruthayaraj(1978)⁴⁷⁾, Malek(1987)⁷⁶⁾らは、気象観測所の蒸発計は、あくまでも蒸発散量の基準値を示すものとしながら、蒸発位の計算値よりも移流による蒸発散への影響を鋭敏に反映すると評価した。これはすでに述べた蒸発計の利点である。

3. 3. 3 蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割

蒸発計の特性に関する研究と移流効果に関する研究の成果は、蒸発計蒸発量に二つの役割があることを示唆した。一つは、3.2で述べた基準蒸発量としての役割であり、いま一つは、本節で述べた局地蒸発位としての役割である。

この二つの役割を統合する概念の一つに補完関係がある。Table 3-1に、従来の研究に見られる蒸発計蒸発量と蒸発散量の関係を、補完関係の観点から整理してみた。このように、両者の間に何らかの形の補完的な関係が成立することは、従来の観測結果からも明らかである。

補完関係は、Bouchet(1963)⁹⁾が、ある地点における蒸発位と蒸発散量の間に対称関係(symetrie)が成立するとして、初めて明らかにしたものである。その後、Morton(1965,1969⁸⁷⁾,1983⁸⁸⁾などが広域蒸発散算定法として確立し、Brutsaert & Stricker(1979)¹²⁾や大槻ら(1984 a, b¹⁰⁶⁾, c¹⁰⁷⁾がこれを利用して検討を行なった。

Mortonは、補完関係を次式で表現した。

Table 3-1 蒸発計蒸発量(E_{pan})と蒸発散量(ET)の補完的關係
Complementary relationships between pan evaporation(E_{pan}) and evapotranspiration(ET)

Reference	場所, 気候	蒸発散測定地の規模と土地利用	関係式	Time scale	蒸発計の種類	蒸発計の設置条件
Horton(1917) ⁴¹⁾ *	US Weather Bureauの年報データによる		$E/E_p=2.3$ E, E_p ; 乾燥地と水面の境界, フェッチ十分の水面での蒸発量	日中平均	E が E_{pan} に相当	
Army & Ostle(1957) ⁹⁾	USA, Montana州 Great Plainsの半乾燥気候	大規模非灌漑小麦畑	$ET+0.6E_{pan}=622.1(\text{mm})$	生育全期	BPIパン	観測所. 詳述なし
Pruitt(1960) ¹²¹⁾	USA, Washington州 灌漑実験所	一区画約500m ² が広がる灌漑clover畑	$ET=0.95E_{pan}(\text{wet})$ $=0.75E_{pan}(\text{dry})$ $=0.97E_p$ E_p ; Penman式	5ヶ月平均	61cm埋式タンク	周囲芝生の観測所($E_{pan}(\text{wet})$)と広大な裸地($E_{pan}(\text{dry})$)
Stanhill(1962) ¹⁴²⁾	Israel, 周囲砂漠のGilatと灌漑地のBeit Shean Valley	約1haの灌漑綿花畑	$ET+E_{pan}=1.6\sim 2.0E_p$ E_p ; 灌漑地域のA級パン	生育全期	スクリーン付きA級パン	各実験地風上
41 Hand(1964) ³⁴⁾ *	Sudan, Khaltoum 乾燥熱帯地	ET測定なし	$E_{pan}(\text{dry})/E_{pan}(\text{wet})=2.2$ $E_{pan}(\text{wet})$; 灌漑地250m風下 $E_{pan}(\text{dry})$; 灌漑地の風上	日単位	10cm蒸発皿(Hudson型改良)	約2.5ha灌漑alfalfa 周囲乾燥休閑地
Hudson(1964) ⁴⁵⁾ * Davenport & Hudson(1967a ²⁰⁾ b ²¹⁾ *	Sudan, Gezira 乾燥熱帯地	ET測定なし	$E_{pan}(\text{dry})/E_{pan}(\text{wet})=1.4$ $E_{pan}(\text{wet})$; 灌漑地300m風下 $E_{pan}(\text{dry})$; 灌漑地の風上	日単位	11.3cm蒸発皿(Hudsonパン)	16km灌漑綿花畑と乾燥休閑地の連続. 周囲砂漠
Iruthayaraj(1978) ⁶⁷⁾	India, Tamil Nadu農大 湿潤地圃場	水田	$ET+E_{pan}=2E_p$ ET ; ボット測定, E_p ; 気象観測所のA級パン	乾燥期平均	10.3cm缶	稻植被頂部
三浦ら(1981) ⁵³⁾	日本, 五条吉野	数10m規模の尾根と谷	$ET+E_{pan}=1.7E_p$ ET ; 熱収支測定, E_p ; Penman式	日中平均	20cm小型パン	乾燥尾根と湿潤な谷
大槻ら(1984a) ¹⁰⁵⁾	日本, 京都, 彦根, 五条吉野	数10~100m規模の水田, 運動場, 尾根と谷	$ET+E_{pan}=2E_p$ ET ; 熱収支測定, E_p ; 平衡蒸発量	のべ12日 日中統計	20cm小型パン	各地表面
上堂ら(1989) ⁵⁴⁾	日本, ハウスと圃場	4m×8mの試験ダイズ畑,	$ET+E_{pan}=2.1E_p$ ET ; 自動給水装置, E_p ; Penman式(気象台)	11日間平均	20cm小型パン(水位50mm)	ダイズ植被頂部

* 蒸発散量の測定は行なわれていないが, 乾燥地と湿潤地の蒸発(散)量の差が, E_{pan} の差に反映されたと考えることができる。

$$ET + E_p = 2 E_{p_0} = E_{p_0}' \quad (3-14)$$

ここで ET は蒸発散量, E_p は蒸発位である. E_{p_0} は広い水面からの蒸発量または湿潤条件での蒸発位, E_{p_0}' は乾燥条件での蒸発位である. Brutsaert & Strickerは, E_p と E_{p_0} に各々Penman式とPriestley & Taylor式を適用した.

Seguin(1975)¹³⁵⁾は, 境界層の輸送理論を援用し, Fig.3-5に示すような模式図^{*}を用いて, より理論的な観点から補完関係の機構を検討した. 対象としたのは, 広い(km単位)地表面からの蒸発散量と, その中にある湿潤で局所的な表面(数m単位)における蒸発散位の関係であった. ここで, 局所的な湿潤面は, 周囲の地表面と乾湿条件のみが異なるとする. Z_0 は粗度長である. Z_b は局所的な湿潤面の中心における内部境界層の上限の高さであり, 広い地表面の内部境界層の下部に相当する. Z_a は広大な地表面の内部境界層の上限の高さである. T と e は温度と水蒸気圧であり, 添え字はそれぞれの高度に対応する. また, T_0, e_0 と T_{0*}, e_{0*} は, それぞれ広い地表面と湿潤面の高度 Z_0 における温度と水蒸気圧である.

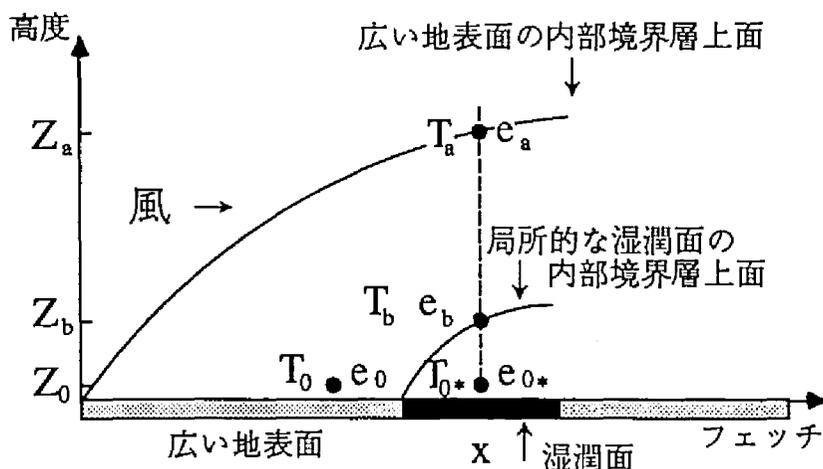


Fig.3-5 広い地表面とそこにある局所的な湿潤面における内部境界層の模式図(Seguin,1975を加筆して引用)

Schematic representation of internal boundary layers over the large surface and the local wet surface (adapted from Seguin,1975).

Seguinは、 $Z_0 \sim Z_a$, $Z_0 \sim Z_b$ における水蒸気輸送係数をそれぞれ $f(Z_a)$, $f(Z_b)$ とし、 ET (広い地表面からの蒸発散量)と Ep (局所的な湿潤面からの蒸発量=蒸発位)をそれぞれ次式で表した。

$$ET = \frac{f(Z_a)}{\gamma} (e_0 - e_a) \quad (3-15)$$

$$Ep = \frac{f(Z_b)}{\gamma} (e_{0*} - e_b) \quad (3-16)$$

ただし、

$$f(Z) = \rho C_p \kappa u_* / \ln\{(Z-d)/Z_0\} \quad (3-17)$$

である。ここで、 γ は乾湿計定数、 ρ と C_p は空気の密度と定圧比熱、 κ はカルマン定数、 u_* は摩擦速度、 d は地面修正量である。また、 Ep と Ep_0 をPenman型の混合式で表わした。これらの式と、地表面と湿潤面それぞれの表面温度の違いを考慮した熱収支式を連立させ、Seguinは次の補完関係式を導いた。

$$Ep - Ep_0 = \left(\frac{f(Z_b)}{f(Z_a)} - 1 \right) (Ep_0 - ET) \quad (3-18)$$

Seguinの式の特徴は、空気力学式を用いて関係式を誘導した点、 $f(Z_a)$ や $f(Z_b)$ を導入して対象地の大きさを考慮した点、及び Ep と Ep_0 をPenman型の混合式で表わした点にある。しかし、 Ep と Ep_0 の決定には実測の困難な気象要素が必要であり、混合式の妥当性は検討されていない。また、実際にはMorton式でも広域の水収支結果と経験的によく一致するため、Seguinの式はこれまで適用されることがなかった

ところで、この補完関係式における Ep と Ep_0 は、これまでに整理してき

* (前ページ) 地表面が植被である場合には、地面修正量が高度の基準点となる。

た蒸発計蒸発量が持つ二つの役割に相当している。すなわち、Table 4-1における E_{pan} が、(4-1)、(4-2)式における E_p に相当し、 E_{p_0} または $E_{pan}(wet)$ が、 E_{p_0} に相当する。したがって蒸発計蒸発量は、補完関係の観点から、地目の混在した地域において各地区の蒸発散量を算定し熱的特性を評価するために、現実的で重要な役割を果たしうると期待できる。

3. 4 結 語

本章では、蒸発計蒸発量の役割を再検討しながら、従来の蒸発散研究によってもたらされた成果と課題を概括し、今後の蒸発散研究を展望することを目的として、蒸発計を用いた蒸発散研究の展開を研究目的別に整理した。

古来、蒸発計蒸発量は、蒸発散機構の解明や蒸発散算定のための基準蒸発量として位置づけられてきた。これらの蒸発散研究において、蒸発計蒸発量が果たした役割と残された課題は、次のように整理される。

蒸発計蒸発量は、Dalton式を始めとする水面蒸発量の算定式や、蒸発散機構を考慮した理論的な蒸発散算定式を検討するための研究において、基準蒸発量としての重要な役割を果たしてきた。また、水文学における水循環の定量化や農学における灌漑用水計画のために、重要な役割を果たしてきた。これらの研究が進展する過程では、蒸発計の形状や設置地点によって蒸発量が大きく変動することが問題であった。そこで、ある地点で測定された蒸発計蒸発量を利用し、広い空間の蒸発位(基準蒸発量)を算定する汎用的な方法を確認するために、測定の基準と蒸発散算定方法が検討されてきた。その研究成果として、基準蒸発量としての蒸発計の役割はほぼ達成された。

ところで、基準蒸発量を基礎とする今後の蒸発散研究において、全球的規模での気候分類や水循環の解析、植物が生育するための用水量の統一的な把握が、重要な課題の一つに挙げられる。蒸発散測定のための

精密機器や、コンピュータ処理に適し、一般気象要素から算定できる合理的な方法が普及した現在、国際的な規模で様々な気象的・地理的条件下の蒸発散量を算定するためには、基準蒸発量としての蒸発計蒸発量の役割は、実験的にも理論的にも限界があると思われる。様々な補正を必要とする蒸発散算定法は、それを暗示したものでもある。

しかし、蒸発計の特性を踏まえた測定基準と蒸発散算定法は、様々な研究の成果をよく反映してまとめられているため、狭い地域を対象とする蒸発散研究や、気象観測設備の不十分な遠隔地や開発途上国での蒸発散研究において、より理論的で合理的な算定方法を補完する役割が残されることになる。

次に、移流効果の検討を目的とした研究において、蒸発計蒸発量が果たした役割と残された課題は、次のように整理される。

これらの研究では、蒸発計蒸発量が設置地点の局所的な気象条件を鋭敏にかつ確実に反映するという特性を利用し、局地蒸発位としての役割が強調された。局地蒸発位の検討を基礎とする今後の蒸発散研究において、空間的に小さい規模の気象環境とその面的分布の検討が、重要な課題の一つに挙げられよう。とりわけ日本のように、土地利用形態が複雑に改変されてゆく状況のもとでは、互いに隣接する土地利用の異なる地表面の温度や乾湿条件を検討することが重要な課題となる。また、近年進歩しつつある空中探査技術(例えば川島,1991⁶⁶)により、地表面の様々な特性の検討が進展する過程では、地上における気象特性の実測情報が不可欠となる。このような研究の進展のために、局地蒸発位としての蒸発計蒸発量は、重要な役割を果たすと期待できる。

しかしながら、これまでの研究において、測定された蒸発計蒸発量に対する説明は、現象論的な段階にとどまっていた。したがって、従来から物理的な意味が薄いと考えられてきた蒸発計蒸発量に対し、実用上の立場から一歩踏み込んだ理論的な支持が待たれているように思われる。そこで、例えば補完関係は、蒸発計蒸発量の持つ二つの役割を統合し、

蒸発位と蒸発散の面的分布を表現する概念であり，これらの研究課題のために有用な一手法として利用できると考えられる．

本研究では，第6章において，狭い地域の蒸発散量を算定するために，蒸発計蒸発量を用いた補完関係の実用化を試みる．

第4章 水田，畑地，裸地，アスファルト 舗装面の放射収支・熱収支特性と 温度環境¹¹⁴⁾

4. 1 概 説

土地利用の変化は熱収支特性に影響を及ぼし，温度環境の形成に重要な役割を果たす。第1，2章で本研究の目的として述べたように，地表の条件別に熱収支特性がどのようにして決まり，接地気層の気象条件がどのように成立するかを明らかにし，蒸発散量を正しく算定することは，現在の都市化の中で農地の果たす環境保全的役割を評価するうえでも，より大規模な気象環境の形成機構や水循環過程を検討するうえでも，基礎的かつ重要な課題のひとつである。

ただし，同一気象条件下において実験的に土地利用別の温度環境の違いを検討する場合，各地区の温湿度環境は，その土地利用特有の値を示すものではなく，相互の地区における移流の影響の結果であると考えられる必要がある(中野・黒田,1989⁹⁴⁾)。このような観点から中野らは，各地表面が十分に広い場合を想定し，水田，畑地，樹園地，林地，市街地における熱収支特性と表面温度を，数値実験的に評価した。

しかし，実際の土地利用形態，なかでも日本の都市近郊のように様々な地目の混在するような場合には，各地区相互の影響は不可避であると思われる。したがって，個々の地区における熱収支特性と温度環境，またそれらが相互に及ぼし合う影響を，様々な地目を対象とした屋外実験によって実際に把握しておくことは，本研究を進めるうえで不可欠な手法であり，数値実験によって実際の現象を再現する場合にもその有為性を検証するための貴重な資料となる。

そこで本章では、互いに近接した水田、畑地(小麦, ジャガイモ), 灌漑裸地, 非灌漑裸地, アスファルト舗装面を対象とし, 測定機器の設置位置と高度に注意して熱収支に関する微気象観測を同時に行ない, 土地利用毎の放射収支と熱収支の特性を検討する. また, 都市化の中で温度環境の形成に農地が果たす役割を評価するために, 土地利用別の熱収支特性を尺度として温度環境の違いを検討する.

4. 2 観測地と観測方法

4. 2. 1 観測地の概要

観測は, 北海道深川市音江町字広里にある(財)北海道農業近代化コンサルタントで実施した. 観測地は, 北緯 $43^{\circ} 43'$, 東経 $142^{\circ} 04'$, 標高49mにあり, 石狩川中流部に広がる水田地帯に位置し, 四方を水田, 畑地, 宅地, 工場, 道路などで囲まれている. 本観測地では, すでに1984~1985年に, 水温の形成機構に関する研究^{101) 102) 103)}と水田の蒸発散機構に関する研究^{104) 52) 53)}が行なわれた.

観測期間は, 1986~1992年の6~8月であり, 1990~1991年には手動測定を含めた集中観測を実施した. 1990年の観測地概況をFig.4-1に示し, 各年における対象地目とその配置を模式的にFig.4-2に整理する.

作物の植栽密度は, イネは, 28, 33, 18, 18.5株/m²(1986, 1987~1989, 1990~1991, 1992年), 1987年の小麦は約250茎/m²(7月31日), ジャガイモは, 4.8, 5.3, 5.7, 4.4株/m²(1988, 1989, 1990~1991, 1992年)であった.

灌漑裸地(1990年のみ)では, 降雨日を除く毎日18:00~19:00に, スプリンクラーによって約3mm散水した. 畑地は全て非灌漑とした.

4. 2. 2 観測項目と観測方法

観測項目, 測定機器の名称, 測定機器の設置地点, 設置高度をTable 4-1に整理する. なお1992年における観測方法の詳細は第5章で述べる.

自動測定項目は、データロガーによって1時間平均値として印字記録された。データロガーTR2723とTR2724はGP-IBを介し、CHINO AAはRS232Cを介し、パーソナルコンピュータにより自作ソフトで制御された。

通風乾湿計は自作のもので、構造は第5章で述べる。水田蒸発散量の測定に用いた有底ライシメータは、100cm×100cm、深さ50cmの鉄製で、周囲の水田と同様にイネを生育させ、水位変化によって日蒸発散量を測定した。水田株間蒸発量の測定に用いたライシメータは、100cm×100cm、深さ20cmの鉄製で、30cm×10cmの間隔で直径4cmのパイプの中にイネを生育させるものである。土壌水分サクションの測定に用いたテンシオメータは、圧力指針付きのもの(1987~1991年)と圧力変換器付きのもの(1992年)である。また、各区の微気象を詳細に比較するための集中観測で用いた赤外放射温度計は、射出率を0.95とした。蒸発計は、灰色に塗装されたプリキ製の小型パン(直径20cm、深さ10cm)を用い、白色断熱板の

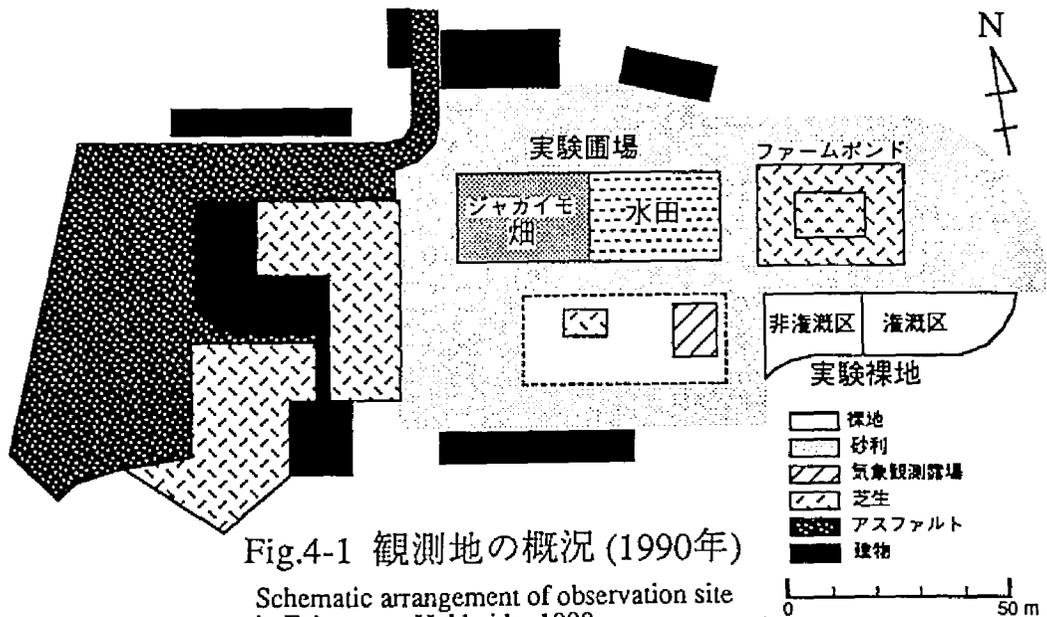


Fig.4-1 観測地の概況 (1990年)
Schematic arrangement of observation site
in Fukagawa, Hokkaido, 1990

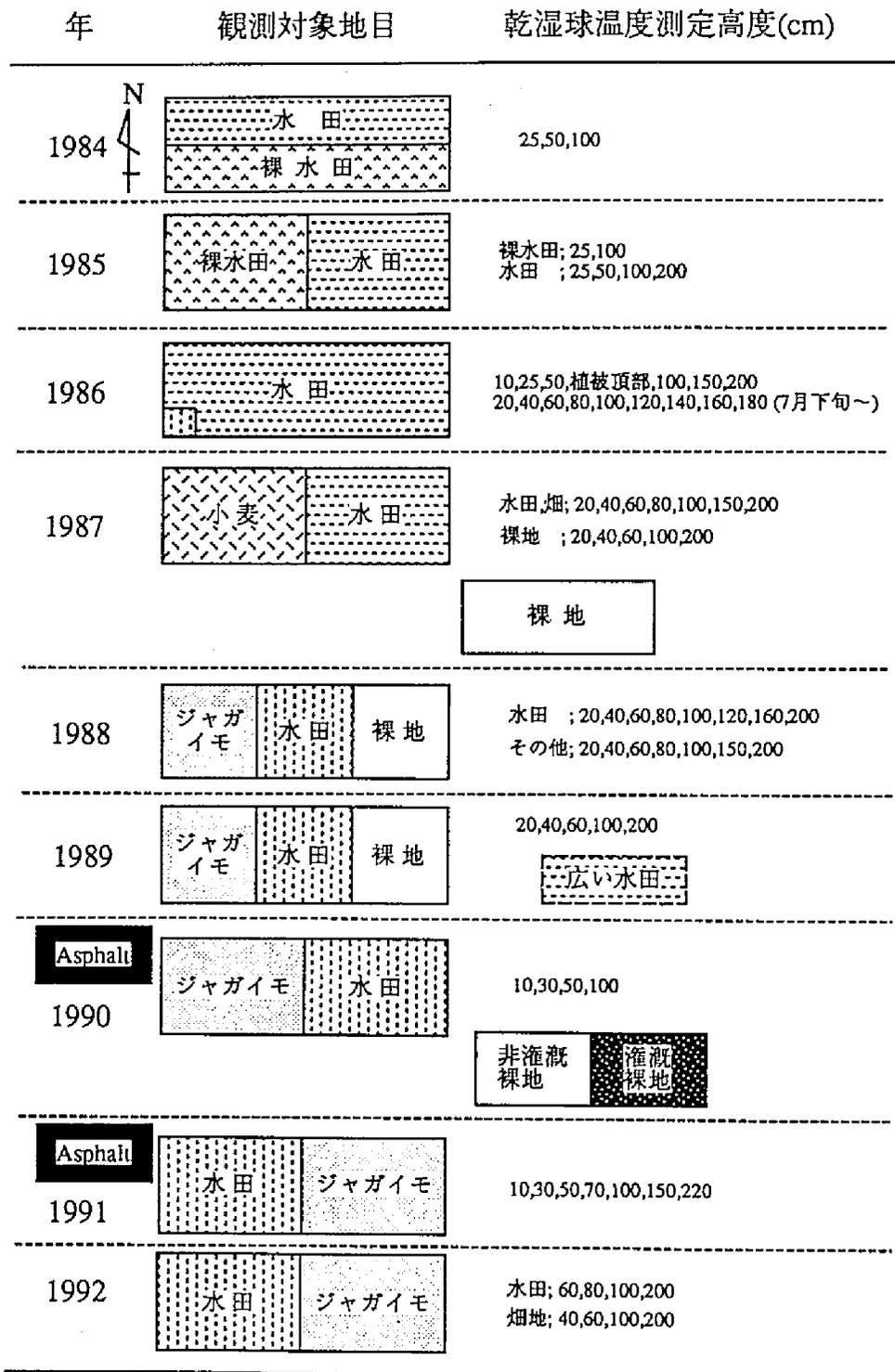


Fig.4-2 農地の微気象観測における対象地目とその配置 (深川;1984~1992年)

Land category and its arrangement for micrometeorological observation at Fukagawa, 1984~1992

Table 4-1 観測項目, 観測機器, 観測地点と高度 (深川, 1986~1992)
Elements, instruments, points and heights of observation at Fukagawa in 1986~1992

Elements of observation	Instruments	Observation points	Heights of instrument above the ground (m)
Automatic observation : recorded as 1h averaged or instantaneous data by data logger (TR2723, TR2724, SOLACⅢ, CHINO AA and IDL-3200)			
Solar radiation	Solarimeter(MS-42, 61 or 62)	typical site or Paddy field (in 1986)	3.0 or 4.0
Precipitation	Tipping-bucket rain recorder	typical site	
Wind speed	Cup anemometer (AF750)	Paddy ('86, '87, '89), Bare ('90) and Potato field ('88, '91, '92)	0.5, 1.0 and 2.0(~'91), 0.4, 0.6, 1.0 and 2.0('92)
Wind direction	Wind vane (VF016)	same as Wind speed ('88~'92)	2.0
Reflected solar radiation	Solarimeter(MS-61, 62, 100), and/or Albedo meter(MR-22)	near the center of individual area	1.0~1.5 above the surfaces *
Net radiation	Net radiometer(CN-11)	near the center of individual area	1.0~1.5 above the surfaces *
Heat conduction	Heat flow plate(CN-81)	under the sensor of Net radiation in individual area	-0.03 and/or -0.05 (~'91), -0.075 and -0.2 ('92)
Air temperature and Water vapor pressure	Thermocouple thermometer and Aspirated psychrometer	near the center of individual area **	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 and 1.8 near the surfaces, 0.2, 0.4 etc. above the surfaces *
Soil temperature	Thermocouple thermometer	some places in individual area	-0.03, -0.05, -0.1
Asphalt temperature	Thermocouple thermometer	Asphalt area	-0.03, -0.05
Water temperature	Thermocouple thermometer	some places in paddy field	about 0.03
Manual observation (observed at 9:00~10:00 every day without any comment)			
Evapotranspiration	Lysimeter(water level)	near the center of paddy field	
Evaporation between plants	Lysimeter(water level)	near the center of paddy field	
Pan evaporation	Large pan(water level)	typical site	
Precipitation	Rain measuring glass	typical site	
Pan evaporation	Small pan(water volume)	near the center of individual area	near the surface, 50 and 100cm above the surface
Soil water suction	Tensiometer(pressure meter)	3 places in cropped and bare fields	-0.05, -0.1, -0.2
Soil water content ***	by sampling	some places in bare fields	about 0~-0.03
Surface temperature ***	Infrared thermometer(IT-330)	near the center of individual area	
Air temperature and Water vapor pressure***	Assmann psychrometer	near the center of individual area	near the surfaces and 0.1 or 0.2 above the surfaces
Plant and canopy height ****	Rule	5 spots in vegetated fields	
LAI ****	by sampling	3 spots in vegetated fields	
Dry matter production ****	by sampling	3 spots in vegetated fields	

* This height was changed as the crop grew.

** On asphalt area, they were observed at the point about 15m from east edge.

*** These elements were observed every two or three hours as intensive observation.

**** observed every week

上に載せて各区の中央に設置した。設置高度は、植被区では作物の群落面を基準、非植被区では地面を基準とし、0, 50, 100cm^{*}とした。

作物生育状況の測定方法は以下の通りである。

草丈；水田と畑地内3～10地点で、各地点において3～5株を予め測定用に決めておき、土壌面(畝立てしたジャガイモについては、畝の底部)から最も長い葉先までの長さを測定した。ただし、出穂後のイネは穂先までの長さとしたが、これは作物学でいう草丈とは異なる。

群落高；草丈測定用と同じ固体の自然状態の高さを測定した。

LAI(葉面積指数)；圃場内3地点から1株ずつ採取し、1株のうち茎3本より葉を全て採取して葉面積を測定。その葉の乾燥重と残りの葉の乾燥重から1株の葉面積に換算し、植栽密度から1m²あたりの葉面積(LAI)に換算した。

4. 3 イネ生育にともなう水田の放射収支と熱収支の変化

水田や畑地では、作物の生育に伴って熱収支特性が変化することはいうまでもない。1986年の水田における観測結果から、Fig.4-3(a,b)にイネの生育状況とアルベドの変化を示す。ただし、当年の水田への施肥料が過剰であったことに加え、LAIの測定に際し黄変した葉も含めたために、LAIが通常の水田(最大時期で3～4といわれる)よりも著しく大きくなった。また前述のように、草丈は穂先までの長さとしたために出穂後も増加した。以上の理由で、出穂期前後のLAIと草丈は異常な値を示しているが、移植後の相対的な生育変化を示したものとして記録する。イネ植被が疎な期間のアルベドは0.1前後であり、水面のアルベドに近い。植被が密に

* 第6章で述べるように、水田と畑地では、高度の基準を地面修正量の位置にとる必要がある。ただし、蒸発計蒸発量は日射の条件に大きく依存するため、本実験では作物群落に蒸発計が下半分程度隠れる高さを基準とした。また、作物の成長に合わせて蒸発計の設置高度を変えた。

なり草丈が高くなるにつれて、アルベドは0.2前後に達する。その時期は、*LAI*が4前後、草丈が約50cmに達したところである。また、8月後半からの減少傾向は、植被の色が黄変したことによる変化と考えられる。

Fig.4-4(a~f)に、イネの生育に伴う熱収支特性の変化を示す。ここで適用した熱収支式は、純放射量(*R_n*)で表した(2-3)式である。ただし*G*は、深度5cmの測定値*G_s*で代用した。Δ*W*は、

$$\Delta W = C_w d_w (T_{w3}^{t+\Delta t} - T_{w3}^{t-\Delta t}) / 2\Delta t \quad (4-1)$$

で求めた。*C_w*、*d_w*、*T_{w3}*は、水の熱容量(4.18 J cm⁻³ K⁻¹)、水田水深(cm)、水田水温である。上添え字の *t*+Δ*t*と *t*-Δ*t*は *T_{w3}*の測定時刻であり、

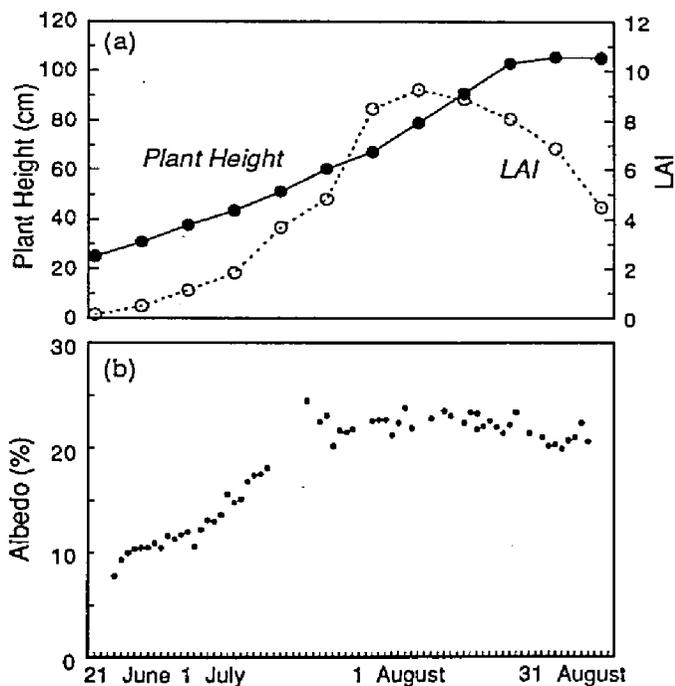


Fig.4-3 水田における(a)イネの生育(草丈, *LAI*; 葉面積指数)と (b)アルベドの変化(深川, 1986年)

Seasonal variations of (a) plant height and *LAI*; leaf area index and (b) albedo in the paddy field at Fukagawa, 1986

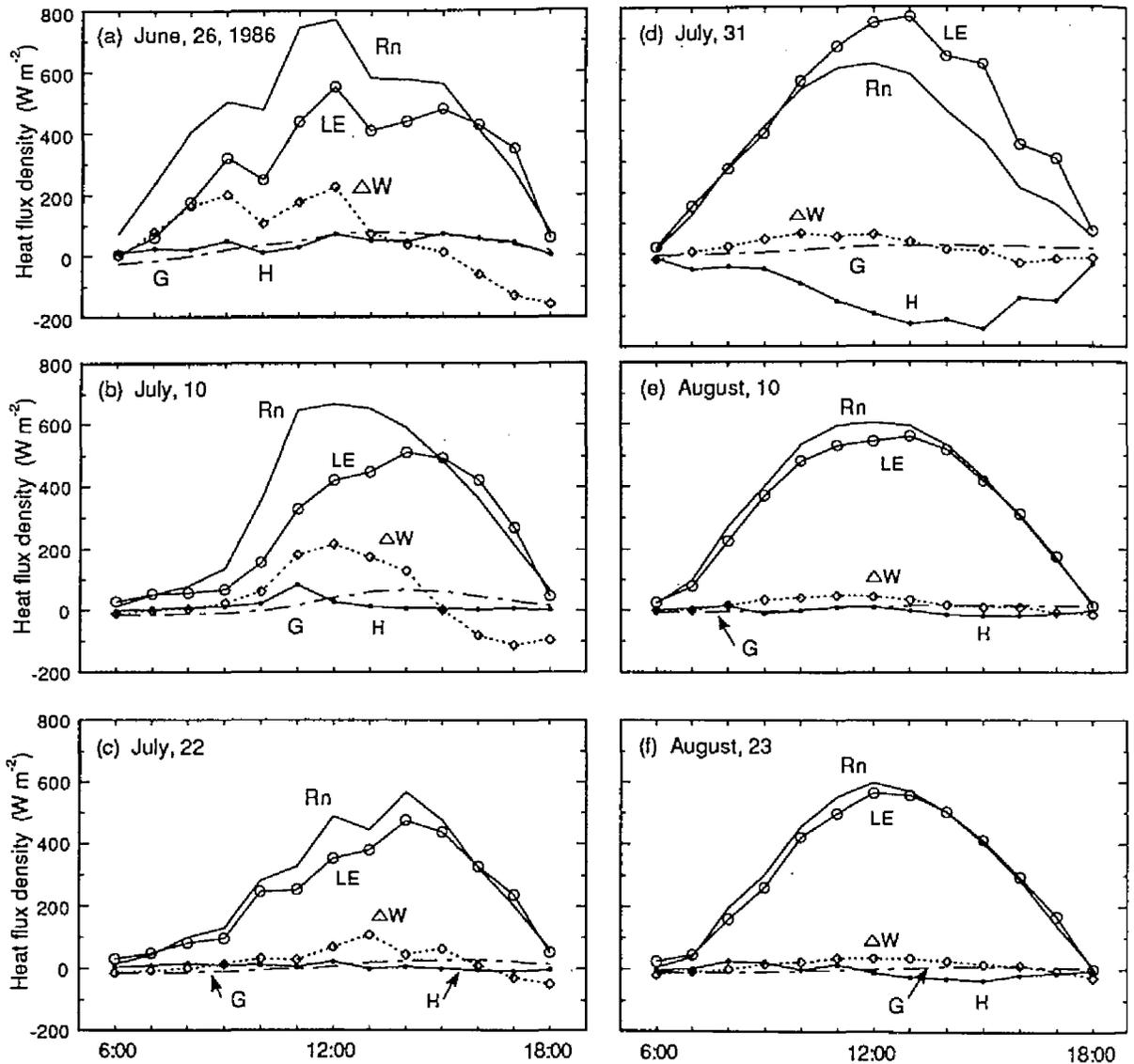


Fig.4-4(a)~(f) 生育期別の水田における熱収支成分の日中変化

(Rn; 純放射, LE; 潜熱, ΔW ; 水体貯熱変化量, H; 顕熱,
G; 地中熱伝導, 1986年6~8月)

Diurnal courses of the heat balance at different growth stage in paddy field,
Fukagawa, Hokkaido, June~August, 1986 (Rn; net radiation, LE; latent heat flux,
 ΔW ; change of heat storage in water body, H; sensible heat flux, G; soil heat flux).

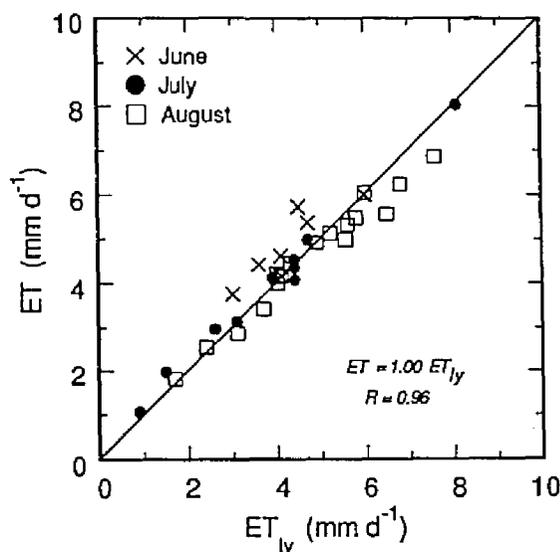


Fig.4-5 ライシメータで測定した水田蒸発散量(ET_{Ly})とボーエン比熱収支法で算定した水田蒸発散量(ET)の比較 (1986年6月22日～8月29日)

Comparison between daily values of measured evapotranspiration by lysimeter (ET_{Ly}) and the corresponding estimates of evapotranspiration by means of heat balance method (ET) in paddy field at Fukagawa, June, 22~August, 29, 1986.

$\Delta t=1\text{hr.}$ とした*。また、 H と LE の算定はボーエン比法を適用し、熱と水蒸気の拡散係数が等しいとした。

ここで、ボーエン比法の妥当性を検討するため、ボーエン比熱収支法で求めた蒸発散量(ET)と、ライシメータで実測した蒸発散量(ET_{Ly})を比較する(Fig.4-5)。ただし、降雨日の結果は除外した。両者は生育期間を通してほぼ一致しており、相関係数は0.96であった。この結果から、本実験圃場の場合には、ボーエン比法による熱収支の検討方法は妥当であるといえる**。

* 放射量や温度などの測定値は、正時から正時までの1時間平均値として記録された。そのため、時刻 t における貯熱変化量は、前後1時間の温度変化が滑らかであると仮定して、本式を適用した。

** 4.4および4.5では、この圃場を分割した小さい圃場の熱収支特性を検討するが、温度と水蒸気圧の勾配を測定する高度を地表面付近にとることにより、ボーエン比法を妥当な方法として用いることにする。

Fig.4-4に示す結果は好天日の例であり、イネの生育期間を考慮して約10日毎に選んだものである。純放射量が正值をとる6:00~18:00において、熱収支成分の日中変化を示した。以下に、生育6期間毎に、水田の熱収支特性を整理する。ただし前述の理由で、止葉期以降のLAIと出穂期以降の草丈の値が異常であると思われるが、ここでは参考値として示しておく。

(a) 生育初期(6月26日；草丈32cm, LAI=0.6)

水体への貯熱は、早朝から正午前まで増加している。とくに早朝は、潜熱とほぼ同量の熱が、水中に吸収されたといえる。しかし、午後から貯熱は減少し、15:00以降は熱の供給源になっている。これとほぼ同時に、潜熱は純放射量を上回っている。地中熱伝導は、日中一貫して正值をとり、午後に極大となっている。また、顕熱への分配は地中熱伝導とほぼ同量となっている。夕方の顕熱の一部は、水体からの放熱によると考えられる。この時期の熱収支特性は、イネの生育状況を考慮すると、水面の熱収支特性に類似していると考えられる。また、Fig.4-3に示したアルベドも水面にもものに近い値であった。

(b) 分けつ盛期(7月10日；草丈=45cm, LAI=2.2)

各成分の変化傾向は(a)のものと類似している。水体への貯熱は、熱収支の中でまだ重要な位置を占めているが、(a)よりも午前中における増加が緩やかである。これは、イネ植被による日射エネルギーの遮断・吸収によると考えられる。顕熱は、午前中わずかに正值で、午後は0か負の値をとっている。15:00以降は、潜熱への分配が卓越していることがわかる。

(c) 節間伸長期(7月22日；草丈=57cm, LAI=4.4)

草丈とLAIが、急激に増加した期間である。水体への貯熱変化が減少し、日中を通して、潜熱への分配が大きくなっている。地中熱伝導への分配はきわめて小さく、顕熱はほぼ0に近い。これらの点が、(b)までと著しく異なる特徴である。また、アルベドが0.2前後に達したのもこの時期であった。

(d) 止葉期(7月31日；草丈=69cm, LAI=8.6)

LAIが急激に増加した直後、日中平均気温が29℃であった日の例である。潜熱への分配がきわめて大きく、午前中から純放射量を上回っている。また、顕熱が日中を通して大きく負の値をとっている。これは、温度の高い大気による、規模の大きい移流の影響を受けた結果であると考えられる。さらに、地中熱伝導と水体貯熱変化量は非常に小さい。これは、密度の高いイネ植被によって、水面でのエネルギーの入出力がほとんどなくなったことによる。

(e) 出穂期(8月10日；草丈=86cm, LAI=8.9)

LAIは、この時期を極大点として、以後減少するが、出穂のために草丈は伸長し続ける。純放射量のほとんどが潜熱に分配されており、地中熱伝導と水体貯熱変化量はほぼ無視できる。このような熱収支特性は、水田特有のものであると考えられる。

(f) 乳熟期(8月23日；草丈=104cm, LAI=7.6)

LAIが減少したが、熱収支の傾向は(e)と類似している。

以上の結果から、水田は、(a)~(b)では夕方、(c)~(f)では日中を通して、熱の吸源になっているといえる。水田とその他の土地利用地区における熱収支特性は、(d)~(e)などの時期に顕著な差を生じると考えられる。

4. 4 作物の生育期間中を通した、水田、畑地、裸地の熱収支特性

本節では、水田、畑地、裸地における熱収支に関する観測結果から、6~8月の熱収支特性を整理する。1987年の観測結果(Table 4-2)は、裸地でも測定を行なった好天日のものである。1988年の観測結果(Table 4-3)は、乾湿計の不備であった日の結果は除外し、好天日のものを可能なかぎり旬別に整理した。ここで検討の対象とした時間帯は、主として純放射量が正の時間帯である。畑地での栽培作物は、1987年は小麦、1988年はジャガイモであった。

Table 4-2 水田, 小麦畑, 裸地における日中の熱収支
Heat balance on paddy, wheat and bare field in the daytime
(at Fukagawa 6:00~17:00 or 18:00, June, 25~27, July, 19 and 25, August, 1 and 18, 1987)

	Plant height (cm)	LAI	ET* (mm d ⁻¹)	Rn	G _s	ΔW (W m ⁻²)	LE	H	Suction (hPa)**
<i>June, 25~27</i>									
Paddy	35.9	0.72	6.15(6.57)	401.7	34.5	30.1	320.3	16.8	
Wheat	26.8	0.61	5.08	354.9	25.8		264.1	64.9	631.0
Bare			0.14	327.4	24.4		7.2	295.8	270.0
<i>July, 19</i>									
Paddy	66.2	4.22	6.07(6.30)	378.5	20.4	24.9	316.2	17.0	
Wheat	40.6	0.57	5.15	382.7	30.6		267.9	84.3	25.1
Bare			5.36	378.5	34.1		279.1	65.4	70.0
<i>July, 25</i>									
Paddy	74.6	4.91	5.92(6.20)	363.1	18.5	16.9	308.7	19.0	
Wheat	48.0	0.54	5.99	381.2	25.8		311.7	43.7	63.1***
Bare			4.77	392.1	26.3		247.8	117.9	55.0
<i>August, 1</i>									
Paddy	84.8	4.64	5.89(6.80)	347.5	5.3	18.0	308.0	16.2	
Wheat	50.2	0.55	5.02	362.0	23.1		262.4	76.5	7.9
Bare			4.99	392.1	26.3		260.9	96.6	70.0
<i>August, 18</i>									
Paddy	95.3	3.63	5.47(6.50)	318.4	2.5	13.7	309.7	-7.5	
Wheat	53.1	0.34	4.45	317.7	19.6		251.3	45.9	100.0
Bare			1.75	292.1	26.6		99.0	166.5	113.3

* ET was estimated by heat budget method with Bowen ratio and measured by lysimeter in paddy field in the bracket.

** It was measured by tensiometers with indicator in bare field and with strain gauge in wheat field at a depth of 10cm.

*** at a depth of 5cm

Table 4-3 水田, ジャガイモ畑, 裸地における日中の熱収支
Heat balance on paddy, potato and bare field in the daytime
(at Fukagawa 6:00~20:00, June, 22~27, 6:00~18:00, July, 18~31, August, 1~2, 7~8 and 18~19, 1988)

	Canopy height (cm)	LAI	ET* (mmd ⁻¹)	Rn	G _s	ΔW (W m ⁻²)	LE	H	Suction (hPa)**
<i>June, 22~27</i>									
Paddy	33.6	0.76	6.31(5.48)	342.3	0	29.3	285.9	27.1	
Potato	22.0	0.33	4.88	353.0	11.5		254.7	86.9	213.8
Bare(dry)			4.64	363.7	33.1		243.0	87.7	418.3
Bare(wet)***			6.68	428.8	30.6		354.4	43.8	95.0
<i>July, 18~20</i>									
Paddy	59.6	6.00	5.45(6.37)	353.6	5.9	24.6	283.9	39.1	
Potato	50.2	1.58	5.40	328.3	3.9		282.0	42.4	725.0
Bare(dry)			3.58	310.2	26.9		177.4	105.8	461.7
<i>July, 21~31</i>									
Paddy	62.5	6.46	4.88(6.15)	315.8	3.4	27.3	255.7	29.4	
Potato	50.9	2.71	4.72	293.6	2.8		247.7	43.2	795.5
Bare(dry)			3.06	279.3	23.5		162.1	93.7	481.0
<i>August, 1,2,7 and 8</i>									
Paddy	66.0	10.10	4.78(6.08)	279.7	0	23.8	248.3	7.7	
Potato	42.3	3.26	4.16	266.7	9.8		215.7	41.2	450.0
Bare(dry)			2.88	243.3	29.5		148.3	65.5	578.0
Bare(wet)****			5.03	314.2	12.8		257.7	43.7	55.0
<i>August, 18~19</i>									
Paddy	82.3	7.21	6.41	328.0	0	26.6	328.7	-27.3	
Potato	34.3	1.10	5.99	352.9	19.4		304.9	28.7	590.0
Bare(dry)			3.42	302.6	26.7		177.2	98.6	687.0

* ET was estimated by heat budget method with bowen ratio and measured by lysimeter in paddy field in the bracket.

** It was measured by tensiometers with indicator at a depth of 10cm.

, * Soil was wet as it had rained the day before on June, 22(***) and on August, 7~8(****).

各地区の熱収支特性を比較し、それぞれの特徴を列挙する。

①水田では、ほとんどの熱エネルギーは潜熱に分配され、その分配率は日中平均で90%以上であり、8月下旬には100%を越えて大気中の顕熱を吸収していることがわかる。この特徴は、4.3(d)で検討したものと同一である。

②Table 4-2から、水田における熱収支のもう一つの特徴は、イネが生育するとともに地中熱伝導量(ここでは G_s)と水体貯熱変化量(ΔW)への分配が減少することであるといえる。この特徴も、4.3で検討したものと同一である。ただし、Table 4-3においては、 G_s の欠測が多かったこと、 ΔW はフロートに付けた温度計で測定した水面温度から算定したものであることという理由で、 G_s と ΔW の値の信頼性はやや薄い。

③畑地の熱分配特性は、植被がまだ疎である期間は裸地のものに近く、作物が生育するとともに潜熱への分配が増加していることがわかる。しかし、水田での潜熱への分配と比較すると、生育盛期でも畑地の方が分配率は小さい。潜熱への分配率は、生育初期で75~80%、生育盛期で80~90%である。

④裸地の熱分配特性は、土壌表面付近の水分によって異なる。Table 4-3では、深度10cmの土壌水分サクションが100hPa未満の場合を、便宜上湿潤状態として区別した。潜熱への分配率は、湿潤状態で80~90%、乾燥状態で60~70%である。Table 4-2では、乾燥状態の潜熱への分配率が2~37%である。1988年における乾燥・湿潤状態での裸地の平均熱分配は、ボーエン比 β で表すと、それぞれ $\beta=0.51$ 、 0.16 であった。Table 2-1に整理したように、従来の裸地におけるボーエン比の測定結果は、乾燥状態で $0.4\sim 2$ (小泉,1983⁶⁹⁾、夏期に 1.4 、春期に 0.36 (Seo,1958¹³⁰⁾、湿潤状態では 0.5 以下(小泉)、夏期に 0.1 、その他の季節は 0.2 (岩切,1967⁵¹⁾)などである。したがって本研究の測定結果は、従来の知見とほぼ一致している。また、地中熱伝導量は、湿潤状態の方が小さいことがわかる。

水田、畑地、裸地における熱収支特性について、作物の生育期間中を

通して概観した。前節と本節の検討結果から、このような土地利用の違いによる熱収支特性の違いは、作物が十分に生育し植被が密となった夏の好天日にとくに顕著に現われるといえる。

4. 5 水田、畑地とアスファルト舗装面における放射収支と熱収支の比較

都市部の代表的な土地利用形態の一つとしてアスファルト舗装面をとりあげ、農村部における代表的な土地利用である水田、畑地の放射収支・熱収支特性と比較する。アスファルト舗装面における放射収支・熱収支特性に関する実験的研究は、極めて例が少ない。成田ら(1984)⁹⁶⁾は、30cm四方、厚さ5cmのアスファルトのブロックを用い、熱収支の測定を行なった。浅枝ら(1991)⁹⁾は、3m四方、厚さ30cmのアスファルトとコンクリートの舗装区を設置し、主に放射収支の測定を行なった。

地表面における放射収支式は、

$$R_n = (1-a)St + L_d - L_u \quad (4-2)$$

で表される。ここで R_n は純放射量、 St は全天日射量、 a はアルベド、 L_d は大気からの長波放射量、 L_u は地表面からの長波放射量である。

Fig.4-6(a~c)に、表面温度等の毎時測定結果をもとに、水田、畑地、アスファルト面における放射収支成分の日変化を示す。なお、イネとジャガイモの群落高はそれぞれ88.9cm、52.6cm(7月31日測定)であった。また、アスファルト面では7月30日13:24から8分間散水を行なった。畑地とアスファルト面の R_n 、 St 、 aSt はそれぞれ測定値である。 L_u は、赤外放射温度計で測定した表面温度 T_s から $L_u = \epsilon \sigma T_s^4$ で求め、 L_d は、雲の種類と雲量の測定を行なわなかったため(4-2)式の残差で求めた。ここで ϵ は射出率(0.95として T_s を測定)、 σ はStefan-Boltzmann定数である。また、水田では R_n を測定しなかったため、(3-3)式の残差でこれを求めた。

日平均のアルベド a は、水田と畑地で0.19、アスファルト面(乾燥)で0.13であった。アスファルト面の長波有効放射量($Ld-Lu$)は、水田と畑地のものと比較するとそれぞれ日中(5:00~17:00)で約10倍、7倍、日平均で約3倍であった。したがって、アスファルト面は水田と畑地よりも太陽放射をよく吸収するが、表面温度が高いために表面からの長波放射量が多い。その結果、アスファルト面の純放射量は、夜間(18:00~4:00)で水田と畑地の1.45, 1.55倍(負値)、日中でともに0.84倍(0.66St), 日平均で0.79倍(0.57St)であった。

次に、地表面における熱収支式は、

$$Q = 4 \varepsilon \sigma T_a^3 (T_s - T_a) + H + LE + G \quad (4-3)$$

で表される。ここで Q は等温純放射量(Monteith, 1973⁸⁵)で、与えられた気象条件における外部条件, "有効入力放射量(たとえば近藤, 1989⁷⁰)"であり、

$$Q = (1-a)St + Ld - \varepsilon \sigma T_a^4 \doteq Rn + 4 \varepsilon \sigma T_a^3 (T_s - T_a) \quad (4-4)$$

で表される。ここで T_a は気温である。(4-3)式左辺第一項は、表面からの熱放射成分に相当する。

水田、畑地、アスファルト面における熱収支成分の日変化をFig.4-7(a~c)に示す。ただし、水田における地中熱伝導と水温の測定は行なわなかったが、生育段階を考慮するとFig.4-4(d~e)の特徴を示すと考えられるため、水体貯熱変化量と地中熱伝導 G は無視することにした。畑地の G は、深さ3cmでの測定値 G_3 の測定値で代用した。アスファルト面では、表面付近の層における貯熱変化が無視できないと考えられるため、 G は、 G_3 と深さ3cmまでの層の貯熱変化量 ΔS_{0-3} より、

$$G = G_3 + \Delta S_{0-3} \quad (4-5)$$

$$\Delta S_{0-3} = c \rho_{as} d_{as} [\{ (T_s + T_{as3}) / 2 \}^{t+\Delta t} - \{ (T_s + T_{as3}) / 2 \}^{t-\Delta t}] / 2 \Delta t \quad (4-6)$$

で求めた。ここで、 c と ρ はアスファルトの比熱と密度であり、それぞれ $c=0.92(\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1})$ と $\rho_{as}=2.23(\text{g cm}^{-3})$ を用いた⁶⁵⁾。 d_{as} はアスファルト層厚(3cm)である。 T_{as3} と T_s は深さ3cmのアスファルト舗装層中温度と表面温度である。上添え字の $t+\Delta t$ と $t-\Delta t$ は T_s と T_{as3} の測定時刻であり、 Δt は(4-1)式で用いたものと同じく $\Delta t=1\text{hr.}$ とした。 LE と H はボーエン比法で求めたが、18:00~3:00の期間はボーエン比法が適用できないため($Rn-G<0$ だから) $LE=0$ および $H=0$ とし、残差を $D=Rn-G$ とした。この残差は、イネやジャガイモの葉面での結露に用いられたと考えられるが、その測定は本実験方法では困難であった。また、アスファルト面の潜熱は、散水実験中の13:00~14:00以外は0とした。

水田では、潜熱、顕熱、熱放射成分への分配は、日中平均で Q のそれぞれ95.3, 5.0, -0.3%であった。畑地では、潜熱、顕熱、地中熱伝導、熱放射成分への分配は、日中平均で Q のそれぞれ73.7, 16.4, 9.7, 0.2%であった。アスファルト面では、顕熱、熱伝導、熱放射成分への分配は、日中平均で Q のそれぞれ52.0, 26.1, 19.7%であり、夜間(18:00~24:00)には、顕熱が負の値、熱放射が正の値をとった。しかし、実測した表面温度は気温よりも高かったため、顕熱は表面から大気中へ流れていたことになる。この矛盾の原因には、アスファルトの熱容量を過小評価した可能性と、熱流板による測定上の問題点が考えられ、熱収支特性をより明確にするためには、解決しなければならない問題点である。

以上の結果から、アスファルト面の熱収支の特徴は、熱伝導(貯熱)への分配が早朝に高く正午前に極大に達することと、それに対して顕熱は増加して午後に極大に達し、夕方にかけて大量の顕熱が放出されること、また熱放射が夜間も多いことであるといえる。ここで明らかにされた熱伝導の特性は、成田ら(1984)⁹⁶⁾の実験結果(Fig.2-3)とも一致する。

ところで、蒸発散(潜熱)によって温度を低下させる機能を持たない地表面には、アスファルト舗装面以外の主なものとして、乾燥地の砂地面があげられる。原圃ら(1992)³⁷⁾による、半乾燥地の砂丘と植生地の放射収支・

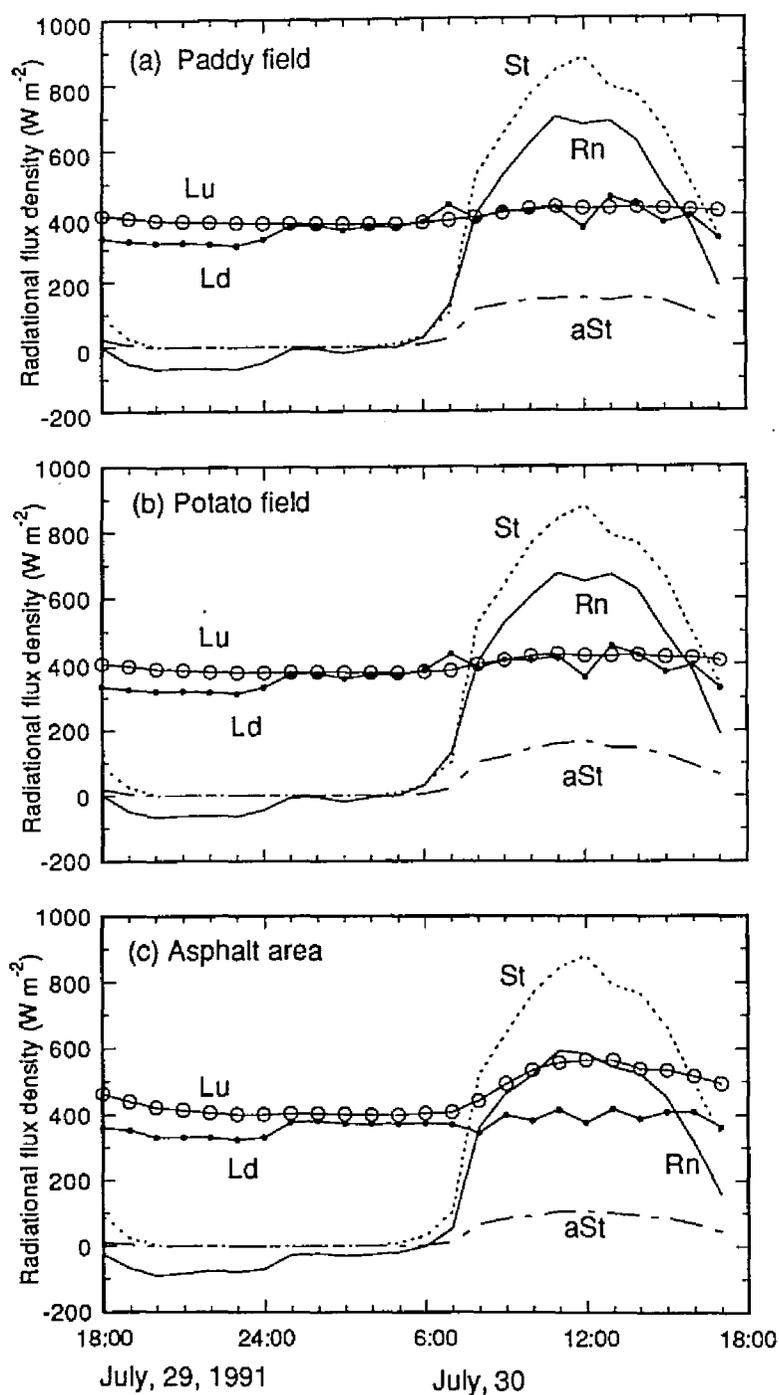


Fig.4-6 (a)水田, (b)非灌漑ジャガイモ畑, (c)アスファルト舗装面における放射収支の日変化 (St; 全天日射, aSt; 反射日射, Ld; 大気からの長波放射, Lu; 地表面からの長波放射, Rn; 純放射, 1991年7月29~30日)

Daily courses of the radiation balance for (a)paddy field, (b)non-irrigated potato field and (c)asphalt area, Fukagawa, Hokkaido, 29-30, July, 1991 (St; solar radiation, aSt; reflected solar radiation, Ld; downward long-wave radiation, Lu; upward long-wave radiation and Rn; net radiation).

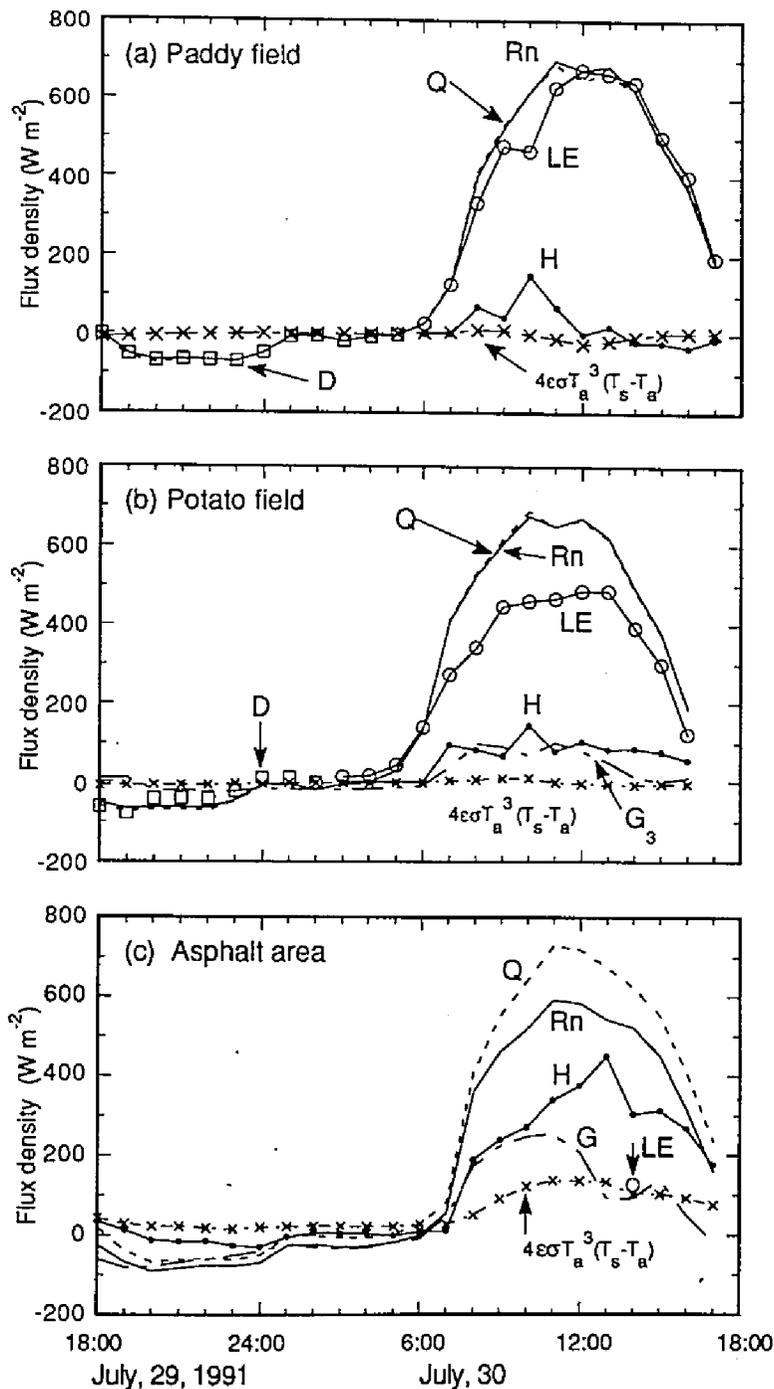


Fig4-7 (a)水田, (b)非灌漑ジャガイモ畑, (c)アスファルト舗装面における熱収支の日変化 (Q等温純放射, Rn純放射, G₃;深度3cmの地中熱伝導, G;アスファルト舗装面の熱伝導, LE;潜熱, H;顕熱, $4\epsilon\sigma T_a^3(T_s-T_a)$;熱放射成分, D;残差項, 1991年7月29~30日)

Daily courses of the heat balance for (a)paddy field, (b)non-irrigated potato field and (c)asphalt area, Fukagawa, Hokkaido, 29-30, July, 1991 (Q; isothermal net radiation, Rn; net radiation, G₃; soil heat flux 3cm deep, G; heat conduction on the surface of asphalt, LE; latent heat flux, H; sensible heat flux, $4\epsilon\sigma T_a^3(T_s-T_a)$; thermal radiation component and D; residual).

熱収支の測定結果と比較すると、砂地面とアスファルト舗装面における放射・熱収支特性の大きな違いは、表面で吸収される全放射エネルギーである純放射量の絶対量の差にあるといえる。したがって、顕熱と熱伝導への分配比に大きな差がない(原菌らの結果は日中で8:3; Table 2-6)にもかかわらず、アスファルト舗装面の方が、地表付近の温度を上昇させる機能に勝れていると考えられる。以上の検討結果から、アスファルト舗装面や非灌漑裸地が熱の貯留・供給の場となっているのに対し、農地は蒸発散によって熱を消費し、とくに水田は周囲の熱も吸収する場となっていることが示された。

4. 6 水田、畑地、裸地における潜熱への分配率の比較

次に、同一気象条件下における土地利用別の熱分配特性を比較し、土壌表面の水分状態と植生の有無による影響を検討する。なお、4.4で熱収支特性の検討に用いたように、本論では $100LE/(LE+H)=100/(1+\beta)$ を潜熱への分配率(%)と称することにする。ただし β はボーエン比である。すでに述べたように、地表面の熱収支特性は地表面付近の温度環境の形成に大きな影響を及ぼし、潜熱への分配率は、その影響を検討するための指標の一つであると考えられることができる。

1989年の観測結果から、Fig.4-8(a,b)に、水田、ジャガイモ畑、非灌漑裸地における日中(6:00~18:00または19:00)の潜熱への分配率と土壌水分(9:00)の経日変化を示す。潜熱の計算には、水田ではライシメータで測定した蒸発散量を、畑地と裸地ではボーエン比熱収支法を用いた。図に示す期間は、降雨後で日中の日射量の安定した好天期間であった。作物の生育状況は、7月26日にはイネとジャガイモの群落高がそれぞれ62.6, 26.7cm, LAIが7.3, 4.5であり、8月2日にはイネとジャガイモの群落高がそれぞれ75.8, 15.9cm, LAIが7.4, 1.7であった。

3地区の潜熱への分配率の特徴は以下のように整理できる。水田では

100%以上であり、大気中の顕熱を吸収して蒸発散が行なわれたことを示している。これは、4.4と4.5で整理した植被の密な水田の熱収支特性である。また、とくに本実験圃場のように狭くかつ地目の混在する地域にある水田において、出現の可能性が高い特性であるといえる。畑地では、生育盛期には100%前後であったが、7月後半の葉茎黄変期には急激に60%前後まで低下し、裸地に近い熱分配特性を示している。裸地では徐々に低下して60%前後に到達している。また、その変化は、降雨後の土壌水分サクシヨンの増加とよく一致している。これに対して畑地では、潜熱への分配率の変化は土壌水分の変化よりむしろ、作物植被の生育状況と関係して変化すると考えてよい。これは、生育の活発なジャガイモの根

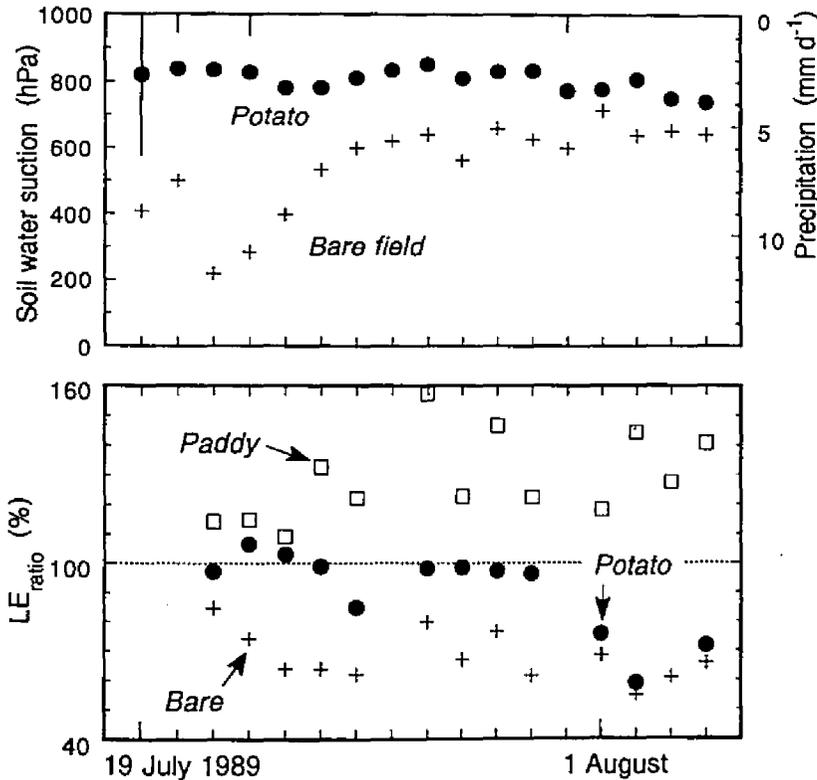


Fig.4-8 (a)土壌水分(深度10cm)と(b)潜熱への分配率; (LE_{ratio}) の経日変化 (□; 水田, ●; ジャガイモ畑, +; 非灌漑裸地, 1989年7月19日~8月4日)

Variations of (a) soil water suction at the depth of 10cm and (b) distribution ratio to LE (LE_{ratio}) (□; Paddy, ●; Potato and +; non-irrigated bare field at Fukagawa, on 19 July~4 August 1989)

が、深度10cmより深い層の水分を吸引して蒸散していたことを示している。ただしこの特性は、湿潤気候の場合に限られるであろう。

4. 7 熱分配率と地温・表面温度・気温の関係

前節で熱分配特性を整理した期間について、水田、畑地、裸地の表面温度と気温の経時変化をFig.4-9(a,b)とFig.4-10(a,b)に示す。Fig.4-10(b)には、アスファルト舗装面の表面温度も示した。それぞれに示す期間は、土壤の水分状態が湿潤から乾燥へ移行し、かつジャガイモ植被の生育がまだ活発であったと思われる期間(Fig.4-9)と、土壤は乾燥し、かつジャガイモ植被の成長が停止したと思われる期間(Fig.4-10)に当たる。気温の測定高度は、水田、畑地、裸地においてそれぞれ40, 60, 100cmであり、地表面または群落面を基準とするといずれも30~40cmの高度に相当する。

また、4.4で水田、畑地、アスファルト舗装面における放射・熱収支特性を詳細に検討した期間について、各区の表面温度と気温の経時変化をFig.4-11(a,b)に示す。この場合の気温の測定高度は、表面上10cmである。ジャガイモの生育状況は、4.4で示したように群落高が52.6cmであり、生育の最盛期であったといえる。また、両日の畑地の土壤水分サクシオンは、前日2日間の降雨(総雨量48.9mm)により、それぞれ40, 50hPaであった。

なお、本実験地の場合、表面上10~40cmの気温はその表面での熱収支特性の影響を大きく受けたものと考え、土地利用別の地区における気温比較の対象として取り扱った。

表面温度の変動は、日射量の変動によく追従している。水田では、日変動、とくに日中の変動が小さく、日射量の多い正午頃でも30℃以下に抑えられている。畑地では、水田と裸地の中間的な温度環境が形成されているといえるが、Fig.4-11では水田に近い約27℃以下、Fig.4-9では35℃以下に抑えられているのに対し、Fig.4-10では40℃前後に達している。こ

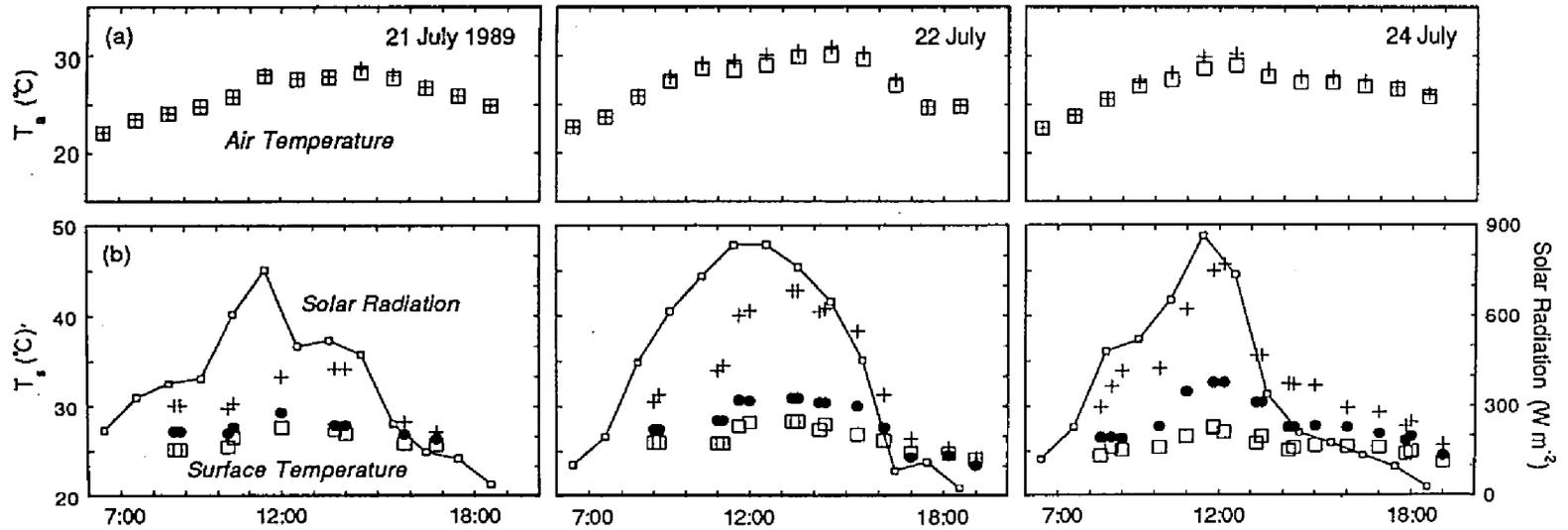


Fig.4-9 水田(□), ジャガイモ畑(●), 非灌漑裸地(+)における (a)気温(表面上30~40cm)と (b)表面温度, 全天日射量の経時変化 (1989年7月21, 22, 24日)

Diurnal variations of (a) air temperature (30~40cm above each surface) and (b) surface temperature and solar radiation on the paddy(□), potato(●) and non-irrigated bare(+) fields at Fukagawa on 21, 22 and 24 July 1989

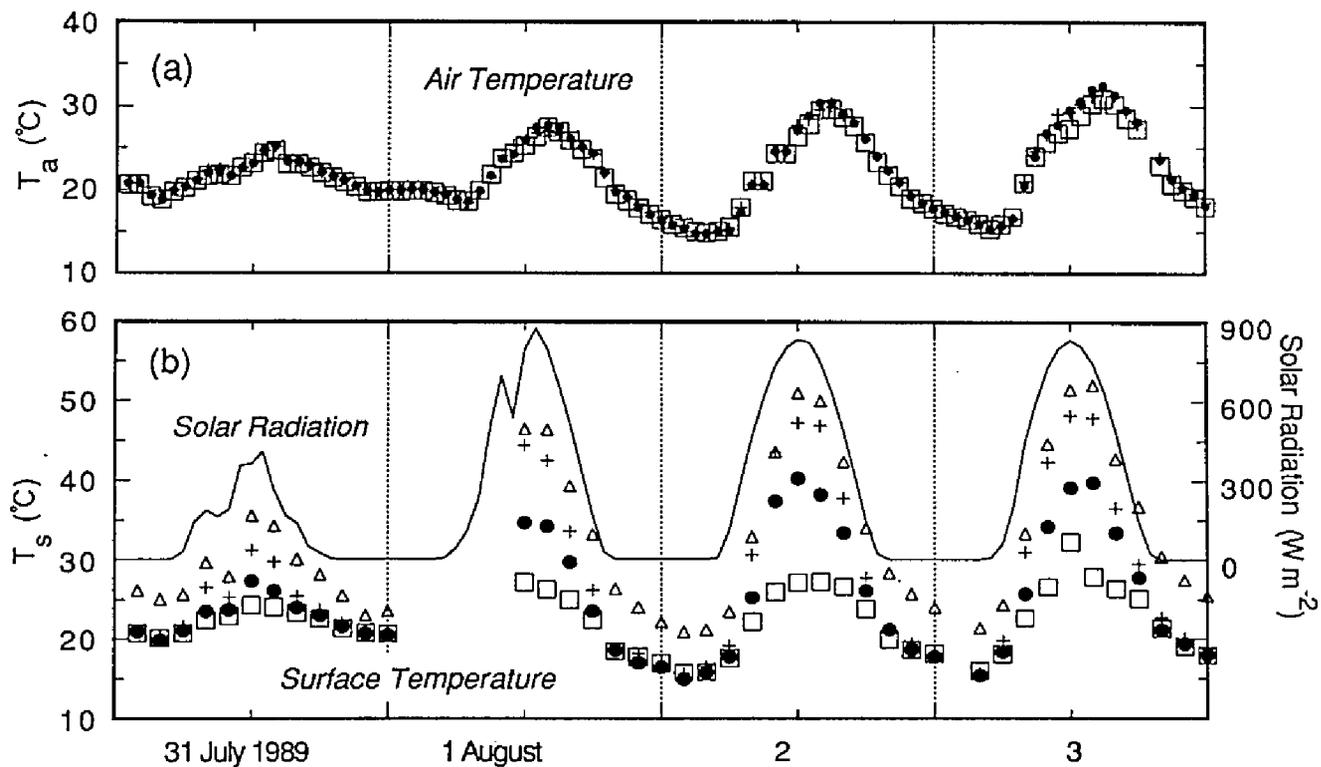


Fig.4-10 (a)水田(□), ジャガイモ畑(●), 非灌漑裸地(+)における気温(表面上30~40cm)と(b)同3地区とアスファルト舗装面(△)における表面温度, 全天日射量の経時変化(1989年7月31日~8月3日)

Daily variations of (a) air temperature(30~40cm above each surface) and (b) surface temperature and solar radiation on the paddy(□), potato(●), non-irrigated bare(+) fields and asphalt area(△) at Fukagawa on 31 July~3 August 1989

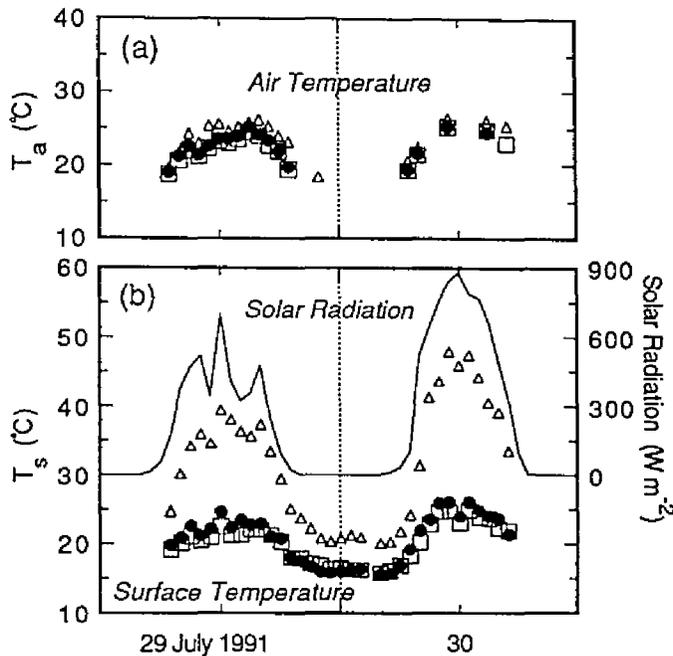


Fig.4-11 水田(□), ジャガイモ畑(●), アスファルト舗装面(△)における
(a)気温(表面上10cm)と (b)表面温度, 全天日射量の経時変化
(深川, 1991.7.29~30)

Daily variations of (a)air temperature(10cm above each surface) and (b)surface temperature and solar radiation on paddy(□), potato(●) and asphalt area(△) at Fukagawa, July, 29~30, 1991.

これは、日射条件の類似した7月22日(Fig.4-9), 8月2日(Fig.4-10), 7月30日(Fig.4-11)などを比較すると明らかである。畑地の温度環境の変化は、植被の生育状況の変化によると考えられる。すなわち、Fig.4-8に示した熱分配特性との関係において考察すると、蒸散が活発に行なわれ潜熱への分配の大きかった期間には表面温度が低く抑えられ、生育が停止し潜熱への分配が減少するにつれて表面温度が上昇したと考えることができる。同様の関係が裸地の温度環境にも見られ、土壌水分が多く潜熱への分配が大きかった期間には表面温度が35~45°Cであったが、乾燥が進み潜熱への分配が減少するにつれて50°C前後まで上昇している。裸地の表面温度は、土壌水分の変化に関係している。アスファルト舗装面の表面温度の特徴は、日射量の多い正午頃に50°Cを越え、乾燥した裸地よりも高温

になる点と、夜間から早朝にかけて、他の3地区ではほとんど温度が等しく気温近くまで低下するのに対し、5℃前後高く保持されている点である。とくに乾燥裸地との差は、最高温度の出現する時間帯よりも最低温度の出現する時間帯において顕著である。この特徴は、4.4で検討したアスファルト舗装面の熱収支特性と関連させると、高温環境は顕熱と放射熱の効果として現われるといえる。

各区における気温の違いは表面温度よりも小さいが、水田よりも乾燥裸地の方が日中最高2.3℃高く、アスファルトの方が日中最高3.1℃、夜間最高3.8℃高かった。また、蒸散が減少した畑地の気温は、水田よりも裸地の気温に近かった。

次に、土地利用別の温度環境の違いをより詳細に検討するために、1990年の観測結果から、各区域における微気象項目、潜熱への分配率、温度環境の経時変化をFig.4-12(a~f)に整理する。ただし、7月22日は雨天で十分な測定を行なわなかったため除外した。潜熱への分配率(c)と表面上20cmの気温(d)はアスマン乾湿計による。また、期間中のイネとジャガイモの平均群落高はそれぞれ75cm、50cmであった。

潜熱への分配率については、概して水田で最も大きく、100%前後かそれ以上の頻度が高かった。また、非灌漑畑地と灌漑裸地では70~100%、非灌漑裸地では最も小さく10~70%であった。とくに日射量の多い正午前後に土地利用別の差が顕著に現われ、水田、畑地または灌漑裸地、非灌漑裸地の順で潜熱への分配が大きかった。ただし、前日にそれぞれ3.6mm、16.6mmの降雨があった7月19日と23日は、日射量が多い時間帯でも、非灌漑裸地と他の地区との差が小さくなった。灌漑裸地と非灌漑裸地における差は、(b)に示すように含水比20~30%付近を境界とした地表面水分の差によってもたらされたといえる。

表面温度の経時変化(e)は、日射量の変動(a)とほぼ相似であり、アスファルト舗装面、非灌漑裸地、灌漑裸地、畑地、水田の順に表面温度が高かった。また、日射量が多い時間帯には、各区の差が顕著に現われた。

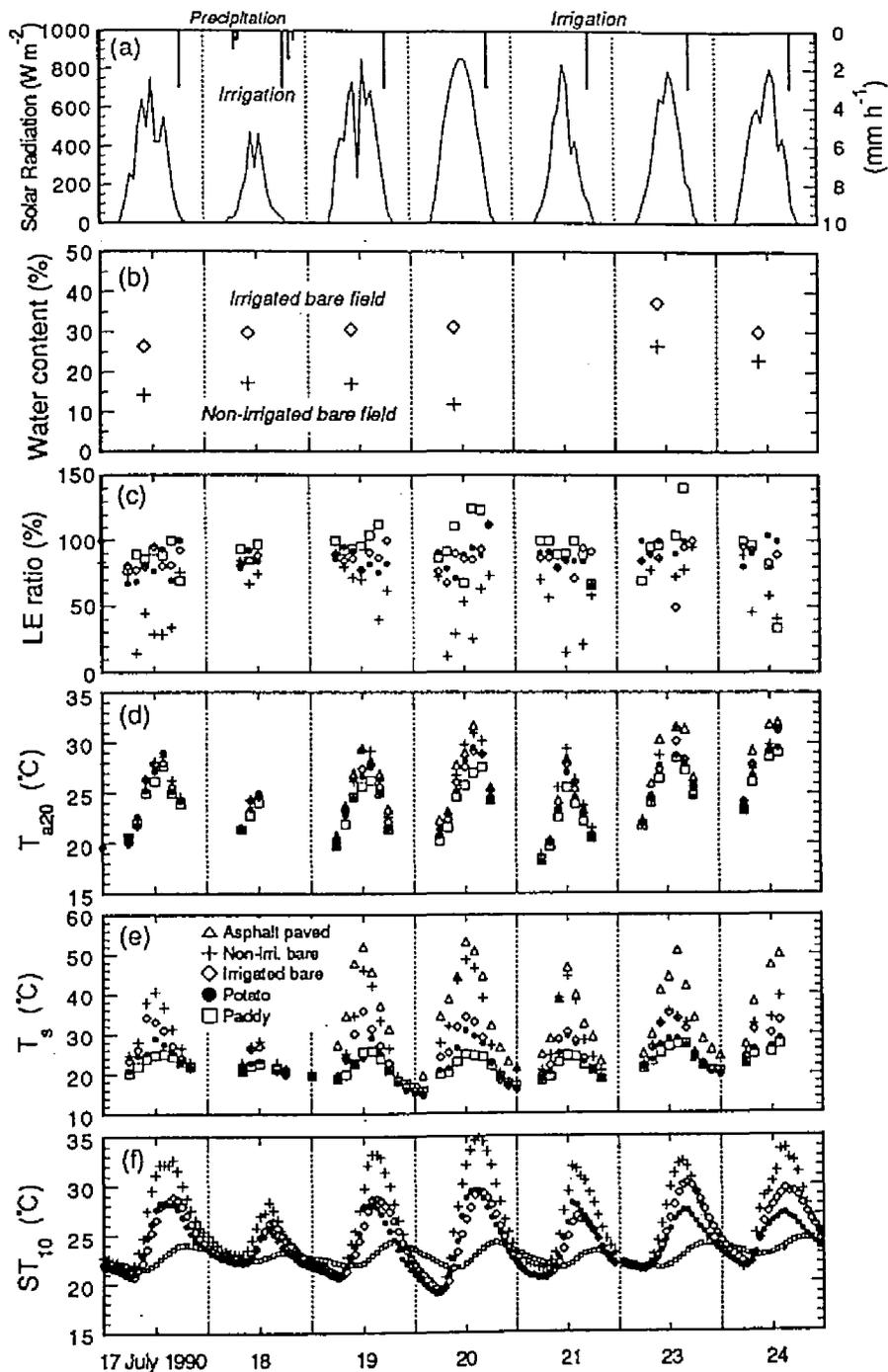


Fig.4-12 (a)全天日射量, 降水量と灌漑水量, (b)裸地における地表~3cm深の含水比, 各区における (c)潜熱への分配率, (d)表面上20cmの気温, (e)表面温度, (f)10cm深の地温の経時変化 (□; 水田, ●; ジャガイモ畑, ◇; 灌漑裸地, +; 非灌漑裸地, △; アスファルト, 1990年7月17~21, 23, 24日)

Daily variations of (a)solar radiation and precipitation or irrigation, (b)water content 0-3cm deep, (c)distribution ratio to latent heat flux, (d)air temperature 20cm above surface, (e)surface temperature and (f)soil temperature 10cm deep for the paddy (□), non-irrigated potato (●), irrigated (◇), non-irrigated bare (+) fields and asphalt area (△) at Fukagawa on 17-21, 23 and 24 July 1990

非灌漑裸地の表面温度は正午頃には50℃に達し、アスファルト舗装面ではさらに高く50℃を越えた。また夜間から早朝にかけて、他の地区の表面温度がほぼ等しくなったが、アスファルト表面温度は他地区よりも高かった。これに対して、水田では日中の変動がほとんどなく、正午頃でも約27℃以下であった。畑地と灌漑裸地においても、最高温度がそれぞれ30℃、35℃程度に抑えられた。

深さ10cmの地中温度(f)は、表面温度に見られた特徴と類似しているが、土地利用別にピークのずれが認められる。土地利用毎の地中における熱移動形態の違いは、十分に明らかにされていない問題であるが、その検討は別の機会に譲る。

次に、表面上20cmの気温(d)を比較する。この結果から、土地利用別の気温も、表面温度に見られた特徴と類似しているといえる。アスファルト面の気温は水田の気温より最高4.7℃、畑地の気温より最高2.2℃高かった(7月20日14時)。

以上の検討結果から、灌漑と植生の存在により、温度環境が緩和されることが示された。また、非灌漑畑地が灌漑裸地よりも低温に抑えられていることから、温度の上昇を緩和する効果は、とくに植生において高いと評価できる。

4. 8 結 語

本章では、同一気象条件下において、土地利用別の熱収支特性と温度環境の違いを明らかにした。この点が本研究の特徴でもある。実験によって得られた知見は、以下のように要約される。

1) イネ生育全期間において水田の熱収支特性を検討した結果、水田は、

* この効果は、いうまでもなく植被状況に大きく支配される。したがって、ここで対象としたジャガイモ畑の群落高が50cmであり生育盛期にあったことも、この効果をもたらした大きな要因である。

とくに節間伸長期以降、熱の吸源としてはたらくことが示された。この現象は、第2章で整理した従来の熱収支結果にもみられ、夏期高温時の灌漑農地における移流効果として検討されてきたものである。また、この結果から、水田は周囲の温度環境を緩和する役割を持つことが示唆される。

2) アスファルト舗装面の長波有効放射量は、日中で水田の約10倍、畑地の約7倍、日平均で両者の約3倍であった。アスファルト面の純放射量は、夜間で水田の1.45倍(負値)、畑地の1.55倍(負値)、日中で両者の0.84倍、日平均で両者の0.79倍であった。

3) アスファルト舗装面での熱伝導への分配量は、日中で畑地の2.8倍、夜間で9.5倍(負値)であった。顕熱への分配量は、日中、水田の11.0倍、畑地の3.3倍であった。

4) 非灌漑畑地や水田では、表面温度の日変動が小さく、正午頃でも畑地で約30℃、水田で約27℃であった。とくに水田では、温度の上昇が抑制される傾向がみられた。また、灌漑した裸地では最高表面温度が約35℃以下に抑えられた。これに対して、非灌漑裸地では正午頃50℃に達し、アスファルト舗装面では50℃を越えた。

5) 夜間には、水田、畑地、両裸地の表面温度はほとんど等しく、気温近くまで低下するのに対し、アスファルト舗装面ではそれらよりも5℃前後高く保持された。アスファルト舗装面と乾燥裸地における表面温度環境の差は、最高温度の出現する時間帯よりも最低温度の出現する時間帯において顕著であった。

6) アスファルト舗装面における表面上20cmの気温は、水田の気温より最高4.7℃、畑地の気温より最高2.2℃高かった。

これらの測定結果から、灌漑と植生の存在により温度環境が緩和されること、また、温度の上昇を緩和する効果はとくに植生において高いことが示された。

第5章 地目混在化地域の農地における気温分布と熱収支特性¹¹⁹⁾

5.1 概説

前章では、土地利用条件別の地表面における熱収支特性と温度環境の違いを検討し、いわば点的な比較から、農地が熱の吸源としてはたらくことや、周囲の温度環境を緩和する役割を持つことが示唆された。これは経験的にもよく知られた現象であるといえるが、とくに地目の混在した地域では、農地が地域の居住者にとって重要な役割を果たすと考えられるため、その役割を圃場レベルの規模で実験的に明確に検証しておく必要がある。また同時に、その役割を担う水循環とエネルギー循環の特性を明かにする必要がある。しかしながら第2章で述べたように、乾燥地域以外の地域における農地、とくに地目混在化地域にある農地とその周囲の温度環境、水平・鉛直方向の温度分布に関する圃場レベルでの検討は、従来極めて不十分であった。

そこで本章では、周囲をアスファルト舗装面などに囲まれた水田と畑地において、水平・鉛直方向の気温分布を整理し、農地の温度環境緩和効果および周囲からの移流の影響を、いわば面的なとらえ方で検証する。また、水田と畑地における風下方向3地点の熱分配特性を比較し、地目混在化地域にある狭い農地における熱収支特性の検討を試みる。

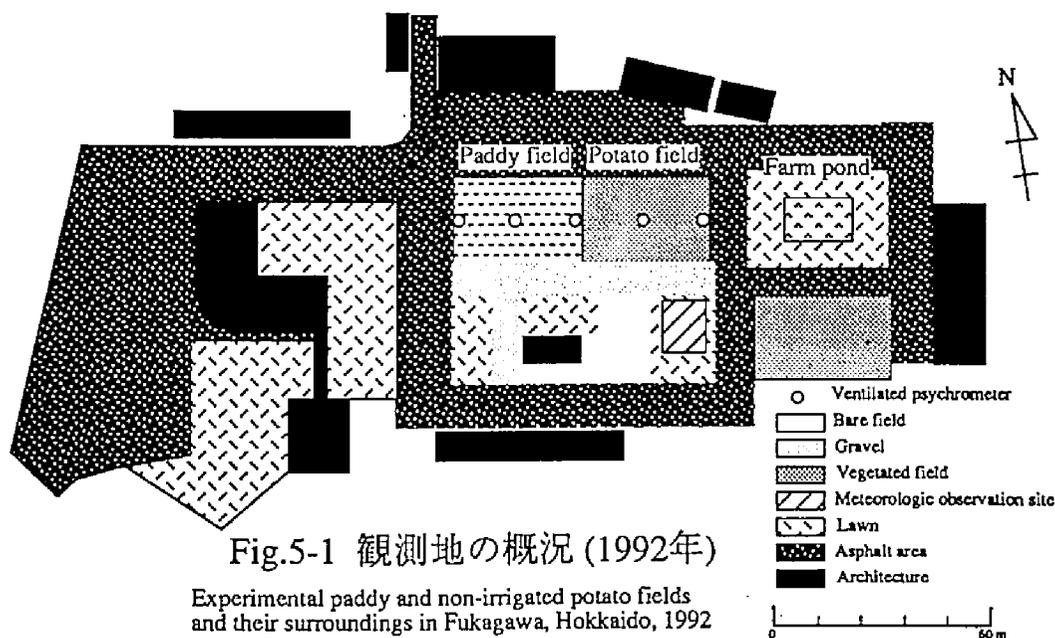
5.2 観測地の概要と観測方法

本章で検討に供する観測結果は1992年のものである。4.2で記述しなかった事項についてここで整理する。観測の対象とした水田と非灌漑ジャ

ガイモ畑(各30m×20m, ほぼ西東方向にこの順で隣接)は, その周囲をアスファルト舗装道路で囲まれた(Fig.5-1). また, ジャガイモ畑の東端には, 大豆が2列栽培された. 本章に関連した観測期間は1992年の7月下旬~8月であった.

通風乾湿計は自作で多点式のもの(三浦ら,1986⁸³⁾を参考)であり, 1992年に用いたものはFig.5-2に示すような構造である. 乾球温度のみの測定もこれに準じた方法をとった. 乾湿計と熱電対温度計は観測期間直前に製作し, 温度計は予め室内での自家検定により, $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内の偏差に収まるものを使用した. なお, 1986~1991年に用いた通風乾湿計もほぼこれと同型であったが, 多点通風筒の内径が20mmで, 温度センサーが通風方向と直角に取付けられた点が異なっていた.

通風乾湿計の配置をFig.5-3に示す. これらのうち, 水田の西端と東端のものは, 水田内にイネ1列分入った地点にある. 畑地の東端のものは, 大豆の作物列の東側に接した点にある.



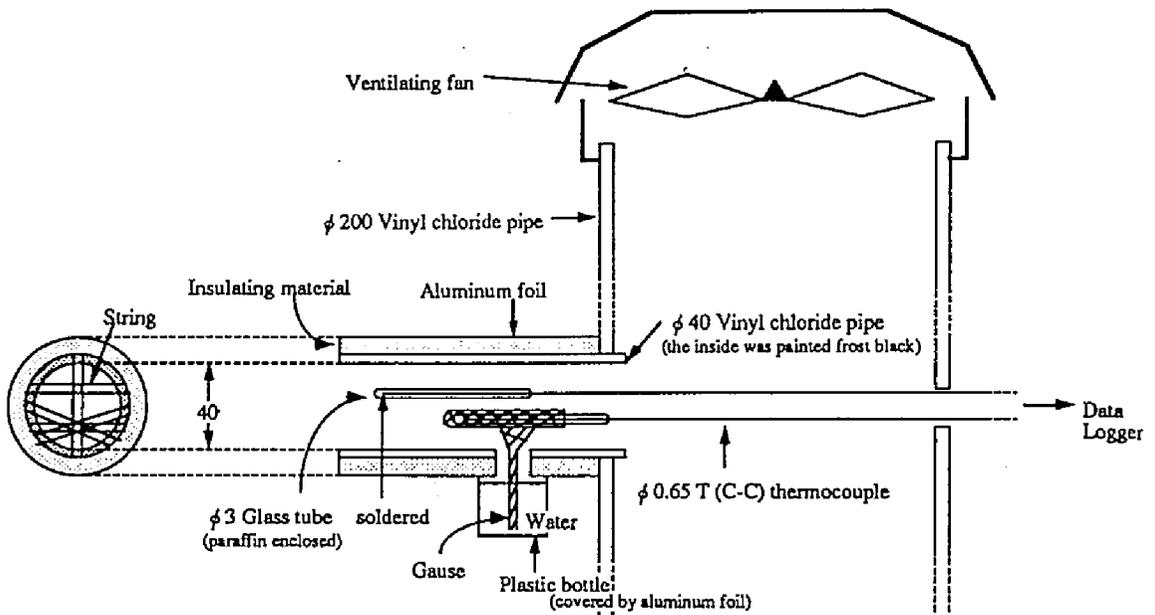


Fig.5-2 多点式通風乾湿計の構造【単位: mm】 (深川, 1992年)

Diagrammatic cross section of the "multi-pointed type" aspirated psychrometer [unit: mm]
(at Fukagawa, July ~ August 1992)

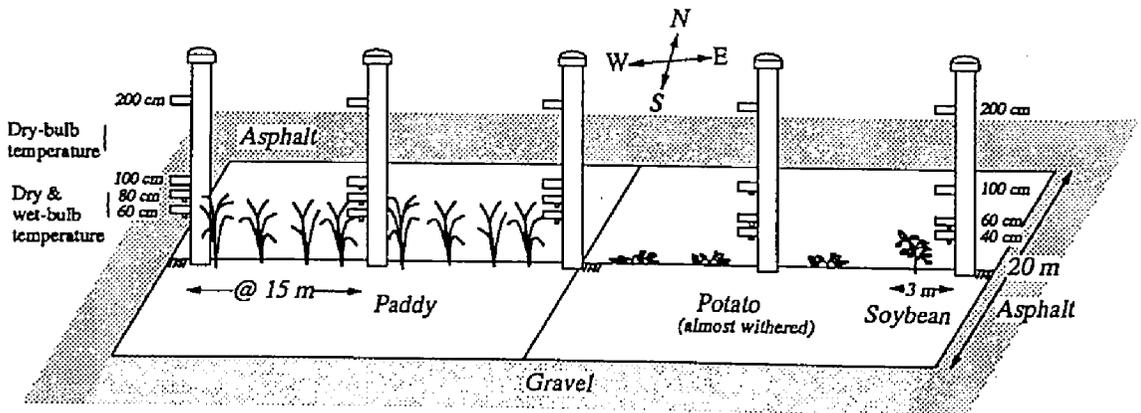


Fig.5-3 実験水田およびジャガイモ畑における通風乾湿計の配置

(作物の生育状況は1992年8月27日頃のもの, 深川, 1992年)

Schematic arrangement of the aspirated psychrometers in the paddy and the non-irrigated potato fields (The growing stage of vegetations was that on 27 August 1992, Fukagawa, 1992)

乾球温度20点と湿球温度12点は、1台のデータロガー(IDL-3200)に接続した。温度への変換は、端子板温度を用いた外部接点補償による。データロガーは、RS-232Cを介してパーソナルコンピュータ(PC-9801F)と接続され、付属のソフトで制御された。測定は正時より5分毎に行ない、瞬時データとして磁気ディスクに保存した。その他の測定項目は、2台のデータロガー(TR2723)を用い、前正時～現正時の1時間平均値として記録された。データロガーは、GP-IBを介し、ノート型パソコン(PC-9801NS)によって自作のソフトで制御された。

ここで解析に用いたのは、気温の高い晴天日(1992年7月28～29日、8月4～5日、26～28日)の観測結果である。なお、7月末のイネの群落高は約50cm、ジャガイモは約45cm、大豆は約30cm、8月末のイネの群落高は約65cm、大豆は約50cmであり、ジャガイモの葉茎は活発な生育を終えてしおれていた。また8月下旬以降、水田は落水された。

5. 3 水田と畑地における気温の水平・鉛直二次元分布

Fig.5-4(a)(b)に、8月27日毎正時の水田と畑地における気温分布を等温線で示す。これらの図は、水田の西端を0m地点として水平方向は乾湿計の設置された5点、鉛直方向は60cm～200cmを20cm間隔に8点とった各格子点における温度をもとに、0.2℃間隔に描いたものである。したがって、群落高が約65cmの水田では60cmの高度が主となる熱交換面付近に最も近いが、葉茎のほとんどしおれたジャガイモ畑では同高度が熱交換面よりも高い高度に当たることに注意を要する。また、乾湿計で測定されていない高度の温度は、その前後の格子点において著しい温度差のない場合がほとんどであったため(高度100cm～200cmの温度差は最高0.6℃)、単純に内挿によって与えた。併記した風向は正時の値であるが、風速は前正時からの1時間平均値である。

ここでは便宜上、1日を夜間～日の出前、早朝、正午前、午後、夕方、

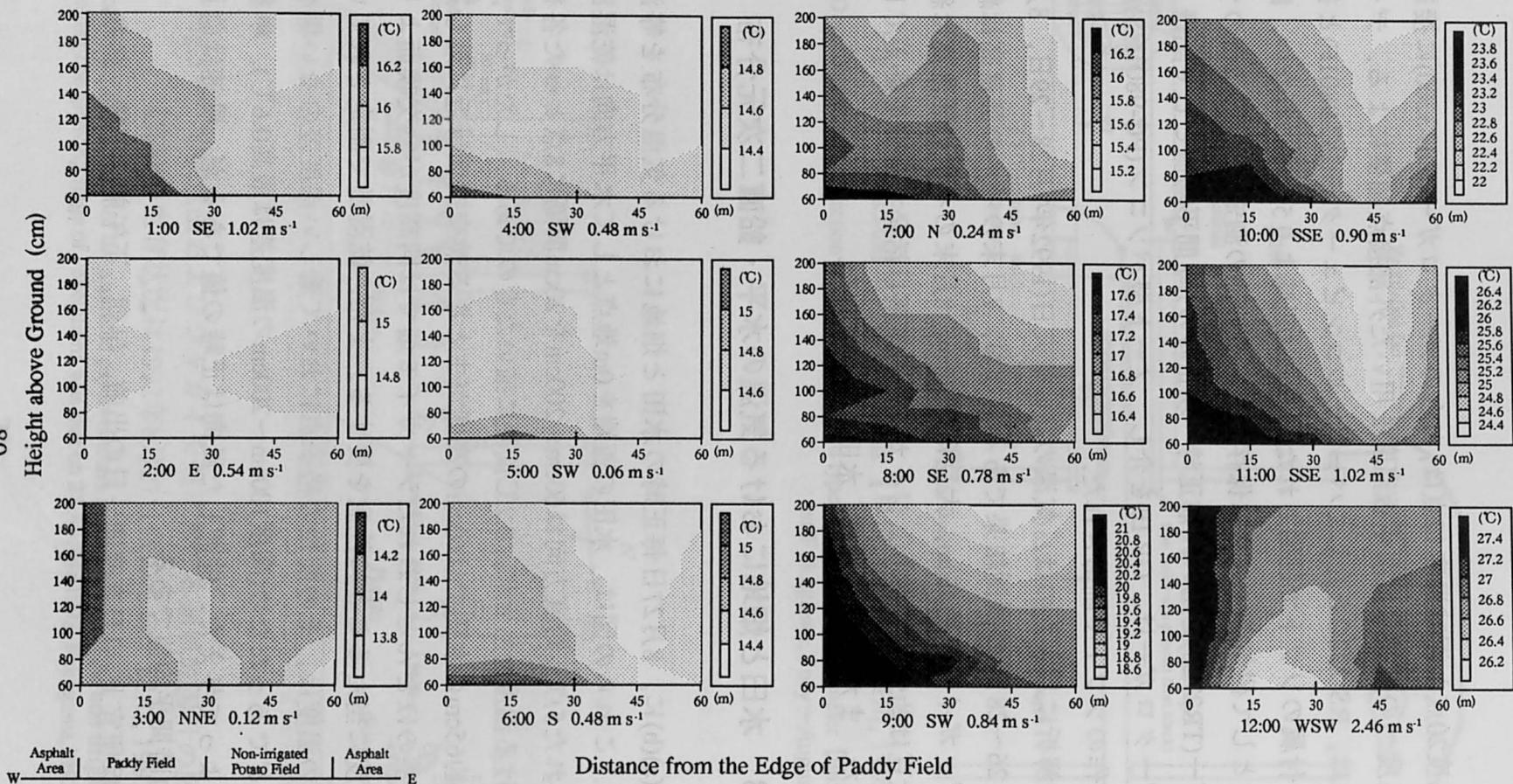


Fig.5-4(a) 水田と畑地における2次元気温分布(1992年8月27日1:00~12:00)

The two dimensional profiles of air temperature (isothermal contours) in the paddy field and the non-irrigated paddy field at 1:00~12:00 on 27 August 1992

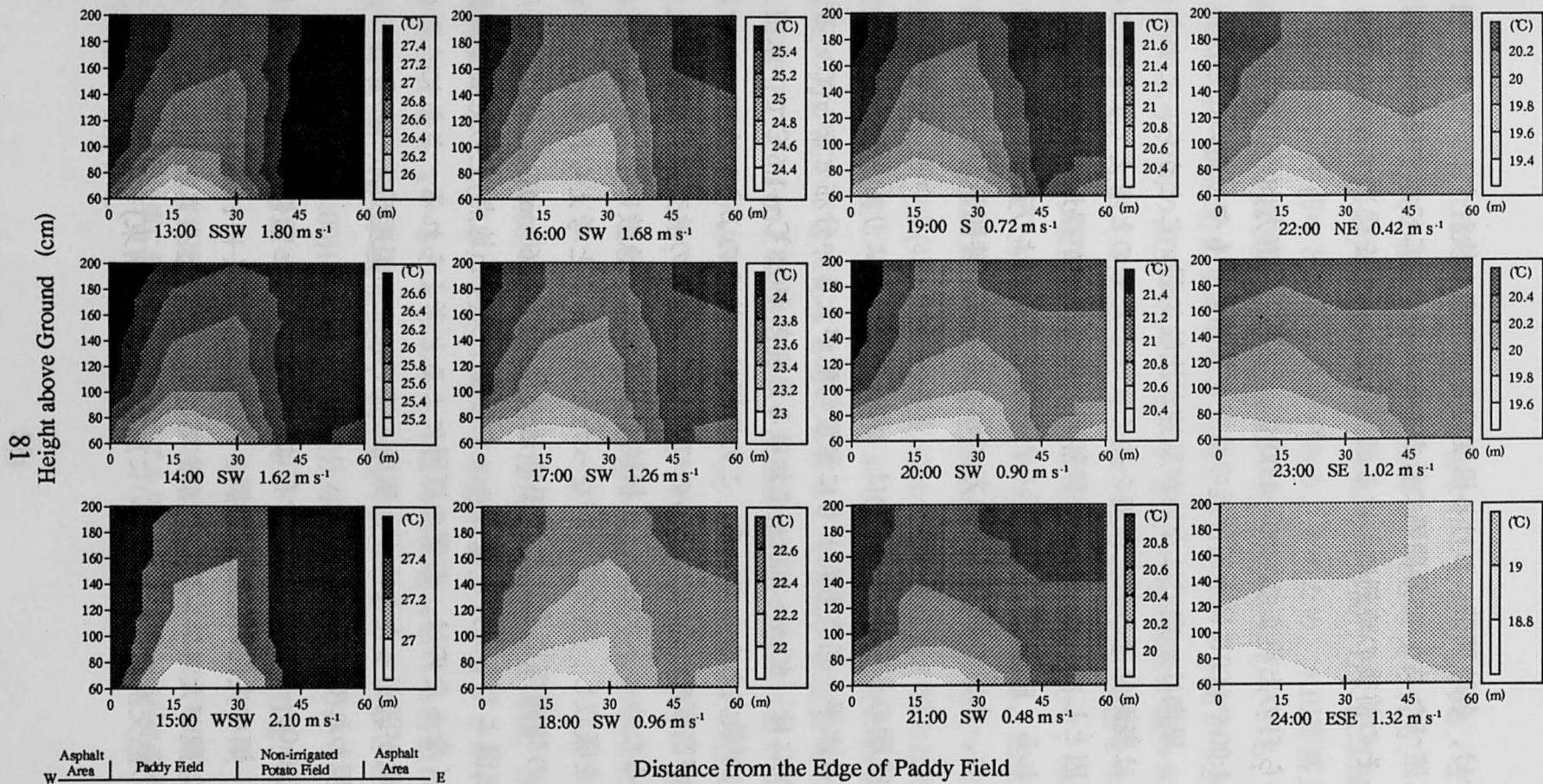


Fig.5-4(b) 水田と畑地における2次元気温分布(1992年8月27日13:00~24:00)

The two dimensional profiles of air temperature (isothermal contours) in the paddy field and the potato field at 13:00~24:00 on 27 August 1992

夜間に分け、各時間帯における温度分布の特徴を検討する。また、測定はすでに述べたように5分間隔で行なわれたが、ここに示す毎正時の測定結果は、その前後の時刻における温度分布の形態を代表するものであった。

夜間から日の出前まで(1:00~4:00)は、水平・鉛直方向の温度勾配は小さいが、1:00や4:00には水田付近の温度が周囲よりもやや高いことがわかる。また、風向は一定ではないが風速が比較的弱いことから、これらの温度分布は表面付近の温度環境を強く反映したものと考えてよい。この現象の原因として、水田の密な群落面の表面温度が裸地よりも高いことが考えられる。Fig.4-10~12に示した水田と畑地および裸地の表面温度を比較すると、水田の表面温度の方がわずかに高い時間帯が夜間に確認できる。

日の出後朝のうち(5:00~9:00)は、水田上が周囲よりも温度が高く、全体としては水平・鉛直方向ともに温度勾配が大きい分布となっている。とくに9:00には、60cm~200cmにおける温度差が 0.8°C ~ 1.6°C で、水田上(15m地点)が最大となっている。この原因は、前述のように水田における熱交換面が高度60cm付近にあるのに対して、畑地の熱交換面がより低い高度にあるためと、水田のイネ植被が、日の出後急激に増加する放射エネルギーを吸収し、熱交換を行なったためであると考えられる。したがって、この時間帯における水田群落高付近(高度60cm)の気温は、高度200cmの気温よりも上昇が激しい。また畑中央(45m地点)上の気温が周囲よりも低くなったのは、前者の原因によると考えられる。さらに、この時間帯も風が弱かったためか、風向の違いによる温度分布への影響は、明確には現われていない。

正午前(10:00~11:00)の温度分布は、9:00のものと類似した特徴を呈しているが、畑中央部の低温が強調されている。とくに11:00には、水平方向の温度勾配が大きい点に特徴があるといえる。これらの原因は、主として前述の熱交換面の高さの違いに加え、風向(南南東)を考慮すると風上

にある大豆植被による冷却の影響も含まれると考えられる。また、弱風のために水平方向の温度勾配がより強調されたと考えられる。

午後(12:00~16:00)の温度分布は、水田の群落高付近に低温部が現われている点に、午前中と異なる特徴がある。そのため、水田群落上(0~30m地点)では、高い高度の温度の方が高い逆転勾配を呈している。また、風向(南南西~西南西)を考慮すると、風上のアスファルト面から水田へ至るまでの水平方向の温度勾配が大きく、顕熱の移流現象が現われていることがわかる。これらの現象は、アスファルト面が熱の湧源となり、水田のイネ植被が熱の吸源となっていることを示すものであり、水田が風下の気温を低下させた効果を示したものであるといえる。鉛直方向のこの効果は、群落面上約140cmの高度200cm以上にまで及んでいることがわかる。また、畑中央(45m地点)の高度60cm付近に高温部が現われた原因は、水田の群落面温度よりも作物がしおれて裸地に近い状態にある畑地表面温度の方が高いことにあると考えられる。さらに、温度分布の形態が著しく変化した11:00と12:00において水田群落付近の気温に差がなく、以後もほとんど変化がみられないことから、上述の論点がより明かとなる。この時間帯において、15:00には領域内の温度勾配が、水平・鉛直方向ともに小さかった。この原因は比較的強い風による大気の混合にあったと考えられる。

夕方(17:00~19:00)の温度分布は、12:00以降のものと同様、水田上で逆転勾配を示している。また、風向を考慮すると、アスファルト面と畑地が熱源となっていることがわかる。この時間帯における特徴は、風向に対して約3mの幅の大豆植被が、弱い熱の吸源となっていることである。

夜間(20:00~24:00)は、夕方の温度分布と類似したものから、徐々に温度勾配の小さい分布へと変化している。しかし放射収支(Fig.5-5)を考慮す

* ここでの作物生育状況に類似した時期の表面温度測定結果(たとえばFig.4-10)を引用すると、水田は正午頃に最高でも30℃以下であり、葉茎の黄変したジャガイモ畑では40℃前後まで上昇した。

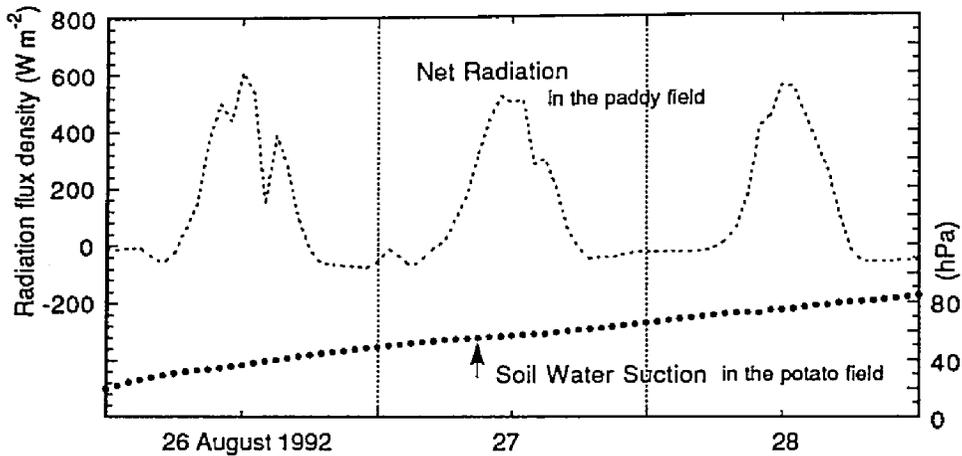


Fig.5-5 水田における純放射量と畑地の深度20cmにおける
 土壤水分サクシヨンの経時変化(1992年8月26～28日)

The daily variations of net radiation in the paddy field and soil water suction at the depth of 20 cm in the potato field on 26-28 August 1992

ると、夜間の水田群落面は、昼間の特徴として考察したような温度上昇を抑制する表面ではなく、長波放射によって熱を放出する表面となっている。このはたらきは、水田に限らず、畑地とアスファルト面でも同様である。すなわち、熱交換(冷却)面の高度が水田では60cm付近であるのに対し、畑地ではより低い高度にあることが、夜間の温度分布を特徴づけたといえる。また、日の出直後の温度分布と比較して温度の高低がほぼ逆になっていることから、このことが明確になる。

次に、8月28日の午後(13:00～21:00)の温度分布をFig.5-6に示す。これらの温度分布は、27日の温度分布と異なる特徴を持つと思われるために示すものであり、水田と畑地における温度分布の特徴についてさらに深い検討を加える。ここに示した毎正時の観測結果は、1時間平均の温度分布の形態と類似したものであった。この日には、日中の温度勾配が逆転せず、夕方16:00～17:00にはほぼ水平方向のみの温度勾配となる中立状態を経て、18:00以降水田と大豆の上で逆転勾配が形成された。なお、午後から

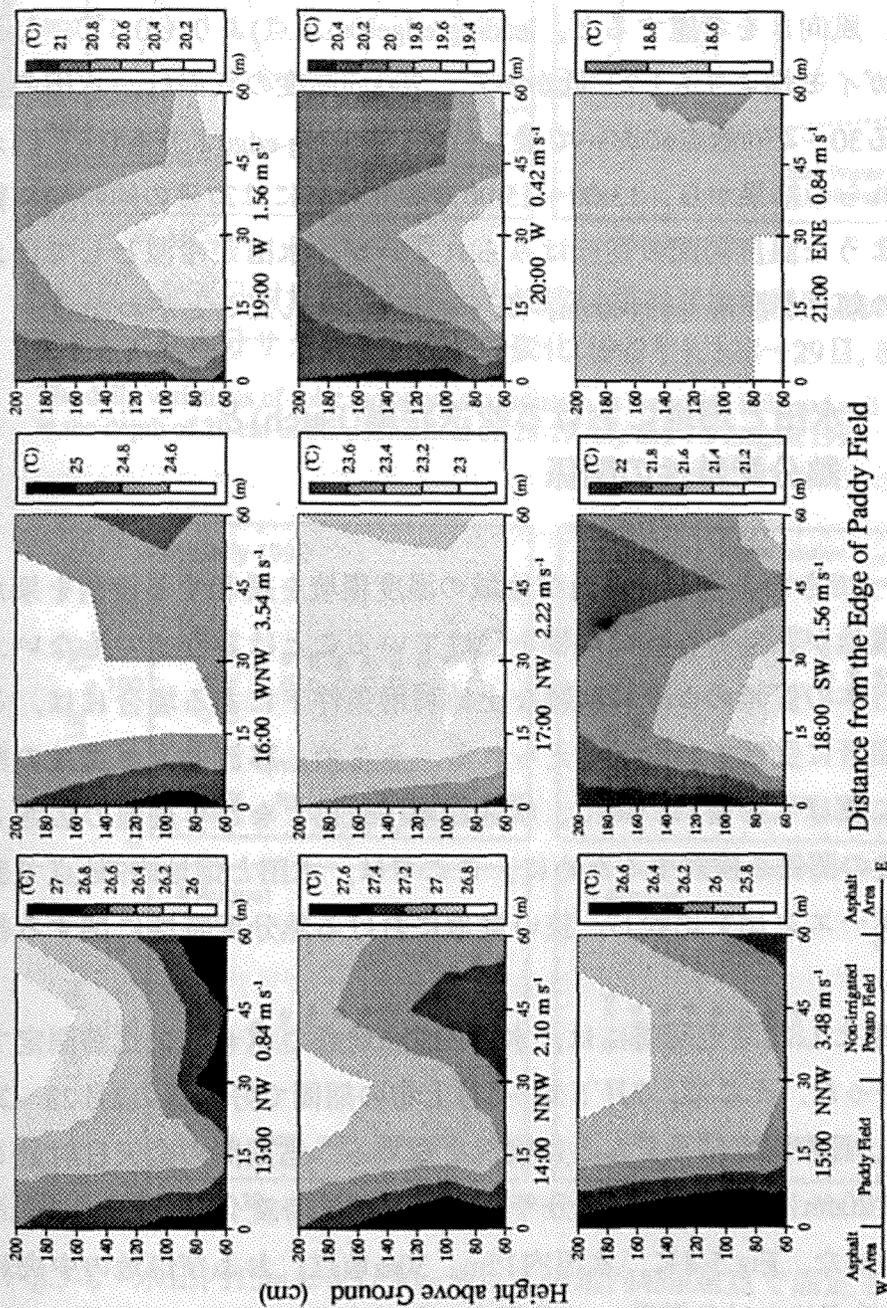


Fig.5-6 水田と畑地における2次元気温分布(1992年8月28日13:00~21:00)

The two dimensional profiles of air temperature (isothermal contours) in the paddy field and the paddy field at 13:00~21:00 on 28 August 1992

夕方までの間で5分毎の観測結果に温度の逆転が観測されたのは、13:00～15:00における数回であった。13:00の温度分布を例にとると、水田の群落高に近い高度60cmにおいて、水田の中央部に当たる15m地点の気温が最も低く、風向きを考慮すると、leading edge(0m地点)よりも0.5℃、しおれたジャガイモ畑よりも1.2℃低かった。200cm高度の気温は、水田の風下に当たる30～45m地点において最も低く、leading edgeよりも0.8℃低かった。これらの結果から、13:00～15:00の温度分布には27日の同時刻に観測されたような温度勾配の逆転はみられないが、水田が冷源としてはたらく、その効果が群落上約100cm、風下10数mに及んだことがわかる。

5. 4 水田と畑地における吹送距離(Fetch)と熱分配特性の関係

5.3で述べてきたように、農地が地域の温度環境を緩和する役割を果たすとき、農地が顕熱の移流の影響を受けていることは言うまでもない。とくに、日本の農地のように複雑な土地利用条件下にある場合には、この影響を顕著に受けられていると考えられる。そこで、移流効果が農地の熱分配特性に及ぼす影響について、吹送距離(Fetch)すなわち農地の広さと熱分配特性の関係を検討するために、ここでは、水田と畑地内3地点で測定されたボーエン比を比較し、狭い農地における熱分配特性に関する検討を試みる。

5.3で対象とした測定期間には、水田内30m地点のボーエン比が測定できていなかった。そこで、7月下旬～8月上旬の期間で好天日の7月28～29日、8月4～5日の測定結果をもとに検討を進める。当期間の全天日射量と畑地の深度20cmにおける土壌水分サクシヨンの経時変化は、Fig.5-7に示すようであった。Fig.5-8に、水田内15m、30m地点、および畑地の中央に当たる45m地点における潜熱への分配率の経時変化を示し、各時刻における風向を16方位の記号で併記した。潜熱への分配率(LE_{ratio})は、各時刻前

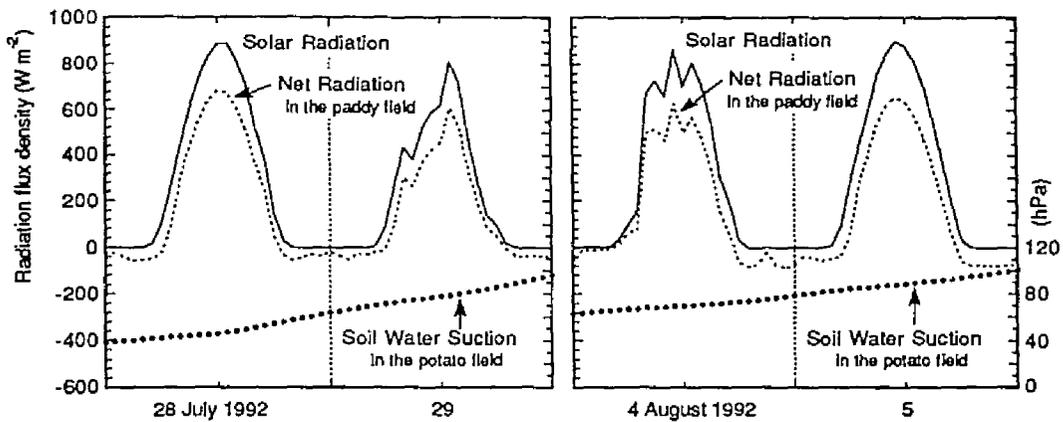


Fig.5-7 全天日射量および水田の純放射量と畑地の深度20cmにおける
土壌水分サクシヨンの経時変化(1992年7月28~29日, 8月4~5日)

The daily variations of solar radiation, net radiation in the paddy field and soil water suction at the depth of 20 cm in the potato field on 28-29 July and 4-5 August 1992

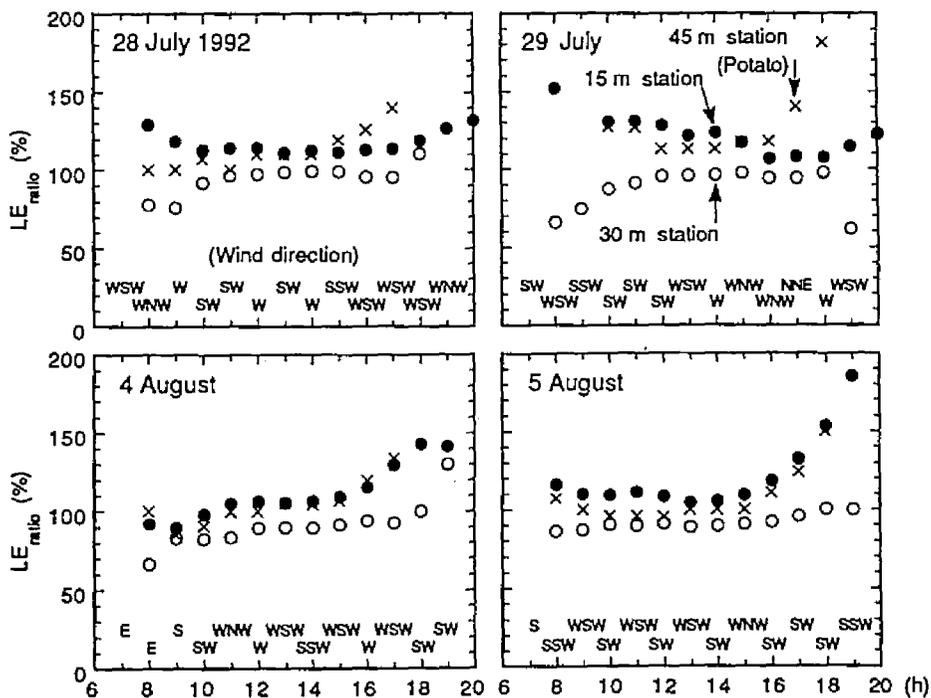


Fig.5-8 水田内15mおよび30m地点と畑地内45m地点で測定された潜熱
への分配率(LE_{ratio})の日中変化(1992年7月28~29日, 8月4~5日)

The diurnal variations of the distribution ratios of latent heat flux (LE_{ratio}) at 15 m and 30 m stations in the paddy field and at 45 m station in the potato field on 28-29 July and 4-5 August 1992

後30分における乾湿球温度の1時間平均値より求められた。図中において、朝夕の時間帯に示されていないいくつかの結果は、温度勾配が逆転し湿球温度勾配が小さいために、潜熱への分配率が極端に100%を越えた($\beta \equiv -1$)結果であったので、ここではそれらを省略した。

Fig.5-8から、水田においては15m地点における潜熱への分配率が、30m地点のものより大きいといえる。昼間に100%を越える潜熱への分配率は、顕熱の移流の影響を受けたことを示すものである。畑地における潜熱への分配率は、水田における2地点のものの中間的な値をとっているが、夕方はそれらよりも大きいこともあり、むしろ水田15m地点の値に近いといえる。

次に、Fetchとこれらの潜熱への分配率($LE_{nu.0}$)の関係を検討する。期間中はほぼ西寄りの風であった。西風の条件下では、0m地点がleading edgeとなり、水田内15m地点の方が30m地点や45m地点よりもFetchが短いといえる。この場合、従来の研究結果を援用して各地点における潜熱への熱分配率を推察すると、Fetchの短い地点の方が局地移流の影響を受けやすいため、 $LE_{nu.0}$ が大きくなると考えられる(たとえばBrakke et al., 1978¹⁰)。Fig.5-8に示した結果からは、水田内においてはこの推察が当てはまるものの、畑地を含めると上での推察と異なる結果になっている。この原因として、水田と畑地の熱分配特性が異なるという要因も考えられる。しかし、本実験圃場の形状を考えると、期間中は南西～西北西の風がほとんどであるとはいえ、南西の風であればどの地点でもFetchはほとんど等しくなる。また、3地点の風上の環境には大きな差がないといえる。したがってこの場合、各地点における $LE_{nu.0}$ の差が明確に生じないことになる。またほぼ西風が吹く場合でも、Fetch=15, 30, 45mの3地点では $LE_{nu.0}$ の違いが定性的に明確に現われなかったとも考えられる。たとえば、Brakke et al.の実験地は、乾燥地域にあるため移流の影響も現われやすかったと考えられるが、Fetch=10mと65mの2地点でそれが明確に表された。

以上の検討結果から、本実験圃場におけるFetchと $LE_{nu.0}$ の関係は、定性

的に説明するに至らなかった。すなわち、3地点での $LE_{m_{i0}}$ がしばしば100%を越えたことから、本実験圃場は移流の影響を受け熱の吸源としてはたらいことは明らかであったが、その面的な分布は現われなかった。本実験圃場のようなスケールの場合、圃場の縁部数 m 以内は別として、圃場の内部はほぼ一様に移流の影響を受けるといえる。

5. 5 結 語

本観測実験では、水平・鉛直方向の気温と水蒸気圧分布を測定し、地目混在化地域の農地における2次元の気温分布と熱収支特性の分布を検討した。また、農地の持つ温度環境緩和的役割を圃場レベルの規模で実験的に検証した。従来の研究では、このような農地における実験的な検討は極めて不十分であった。実験によって得られた知見は、以下のように要約される。

1) 水田と畑地における2次元気温分布の測定結果から、1日を通して、高度200cmまでの気温は、地表面の温度環境と熱収支特性を強く反映したものであると考えられた。

2) 日中、農地内部は周囲(風上となる地域で、アスファルト舗装地や建物、裸地、芝地など)よりも気温が低く、正午前から気温の水平勾配が大きくなった。午後は、水田群落面が熱の吸源となり、気温分布の逆転現象が見られた。これらは、周囲からの顕熱の移流を表すものである。

3) 気温分布の逆転にかかわらず、日中水田は冷源としてはたらい、その効果が群落上約100cm、風下10数mに及んだ。

4) 水田と畑地内3地点での $LE_{m_{i0}}$ がしばしば100%を越えたことから、本実験圃場は移流の影響を受け熱の吸源としてはたらいことは明らかであった。しかし、その面的な分布は明らかにならず、本実験圃場におけるFetchと $LE_{m_{i0}}$ の関係は、定性的に説明するに至らなかった。

第6章 狭い地域における蒸発散量と 蒸発計蒸発量の補完関係^{110) 111)}

6.1 概説

本章では、従来の研究成果をもとに第3章で整理した蒸発計蒸発量の特性、すなわち蒸発散量と蒸発計蒸発量の補完関係を利用し、地目の混在した地域の蒸発散量を算定する方法を検討する。

第3章で述べたように、補完関係による蒸発散量の算定法は、従来、広域の長期蒸発散量算定法として水文学的な観点で確立された半経験的なモデルであった。したがって、モデルの理論的な妥当性は十分に示されていない。また、Seguin(1975)¹³⁹⁾は境界層の輸送理論を援用し、Fig.3-5に基づいてより理論的な観点から補完関係の機構を検討したが、導かれた関係式は実用化されていない。さらに、補完関係式を空間的・時間的に小さい規模に適用する試みは未だなされていないが、日本のように地目の混在した地域では、狭い地域の蒸発散量を求める必要性が大きい。

このような背景から、本章では、まず狭い灌漑および非灌漑裸地において、日単位の蒸発量と蒸発計蒸発量の間には補完的な関係が成り立つことを示す。次に、Seguinが導いたフェッチを考慮した補完関係式を狭い地域に適用できるように工夫し、その妥当性を実験資料によって検討する。解析には、4.2で整理した方法で1989～1990年に観測した結果を用いる。

6.2 蒸発計蒸発量の役割と補完関係の検証

まず観測結果から、蒸発計蒸発量の役割を検証する。Fig.6-1(a,b)に、

水田，ジャガイモ畑，非灌漑裸地に設置した蒸発計蒸発量を比較する。地表面または群落面の蒸発計蒸発量($Epan$)は高度100cmのもの($Epan_{100}$)よりも土地利用別の差が大きい。後者は，設置地点の土地利用によらずほぼ一定といってよい。この結果， $Epan$ は地表面付近の局所的な微気象条件を鋭敏に反映し， $Epan_{100}$ はより大きい空間スケールの気象条件を反映していると考えられる。この特性は，第3章で整理されたものと一致する。

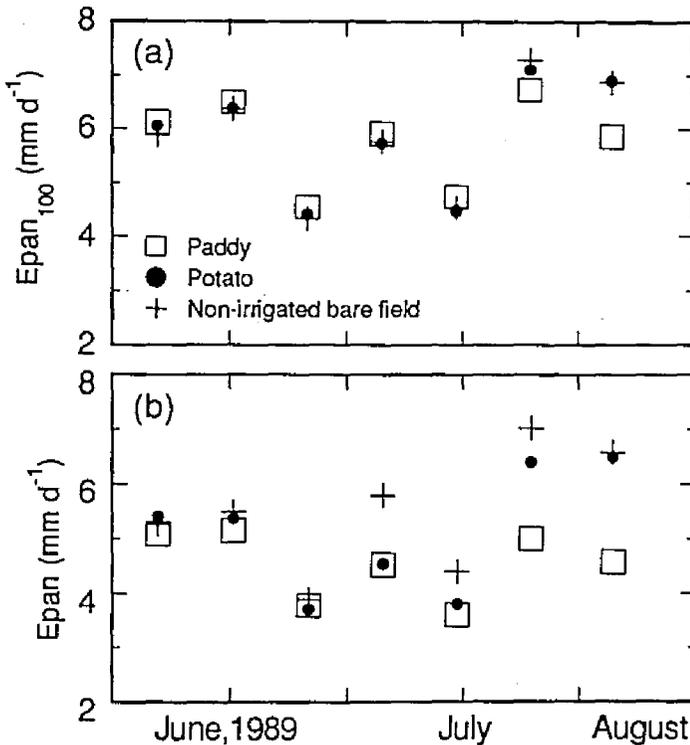


Fig.6-1 土地利用別の(a)高度100cmの蒸発計蒸発量($Epan_{100}$)と
(b)地表面と群落面の蒸発計蒸発量($Epan$)の旬平均経時変化
(□; 水田, ●; ジャガイモ畑, +; 非灌漑裸地; 深川, 1989.6~8)

Seasonal variations of evaporation from (a)raised pans 100cm over the surface($Epan_{100}$) and (b)surface pans($Epan$) under the different land-use at Fukagawa, June~August, 1989

* 広い仮想的な湿润面からの蒸発量，または，実験圃場よりも広い空間スケールにおける蒸発位に相当する。

次に、本実験地の狭い灌漑および非灌漑裸地において、日単位の蒸発量と蒸発計蒸発量の間に関係が成り立つことを示す。Fig.6-2に、灌漑および非灌漑裸地における日単位の蒸発量(E_{bs})と蒸発計蒸発量($Epan$)を、9:00に測定した土壌水分サクシヨンとの関係で比較する。ただし、Fig.6-1の結果から、 $Epan_{100}$ は与えられた気象条件下における蒸発量の基準値を表わすと考えられるため、 E_{bs} と $Epan$ は $Epan_{100}$ との比で示した。サクシヨンが増大するにつれて蒸発量は減少し、その変化を補完するように蒸発計蒸発量が増加する関係が認められる。しかし、従来の広い地域を対象とした補完関係では蒸発散と蒸発散位がほぼ完全な対象関係で示された(例えばSolomon,1967¹⁴⁰)のに対し、Fig.6-2の対象関係は不完全なものである。

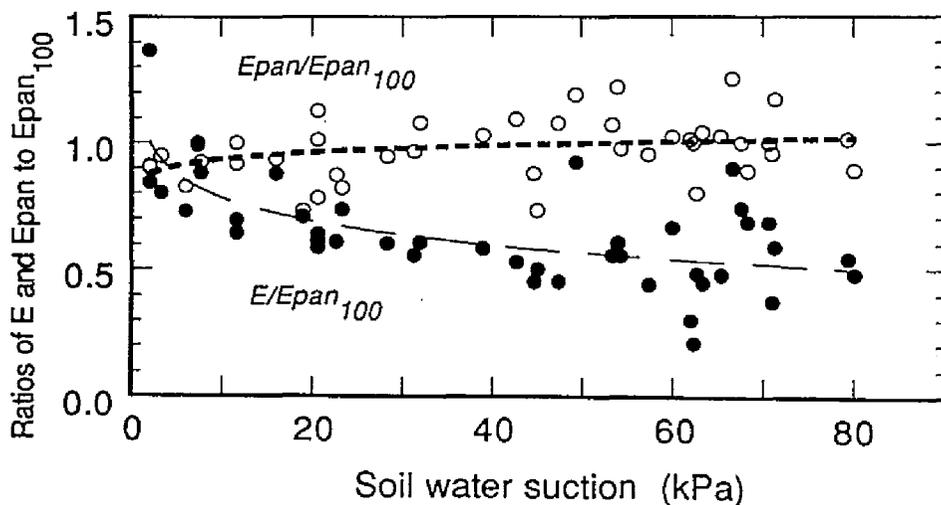


Fig.6-2 非灌漑裸地における土壌水分サクシヨン(深度10cm)と裸地面蒸発量(E_{bs})、蒸発計蒸発量($Epan$)の関係
(高度100cmの蒸発計蒸発量 $Epan_{100}$ との比で比較；深川, 1990.6.11~8.9)

Relationships between soil water suction at the depth of 10cm and ratios of evaporation from bare surface(E_{bs}) and pan evaporation($Epan$) to raised pan evaporation($Epan_{100}$) in the non-irrigated bare field at Fukagawa, June, 11~August, 9, 1990

6. 3 従来の補完関係式の適用

ここで、従来のMorton型の補完関係式；

$$ET = 2.52E_{eq} - E_{pan} \quad (6-1)$$

による算定蒸発散量と熱収支法による実測蒸発散量(ただし水田はライシメータによる)を比較する(Fig.6-3). ただし E_{eq} は平衡蒸発量である. なお、後述する結果との比較のため、灌漑裸地と非灌漑裸地は1990年6~8月の好天日の測定結果を、水田と畑地は植被の密な1989年7月21~30日の測定結果を用いた.

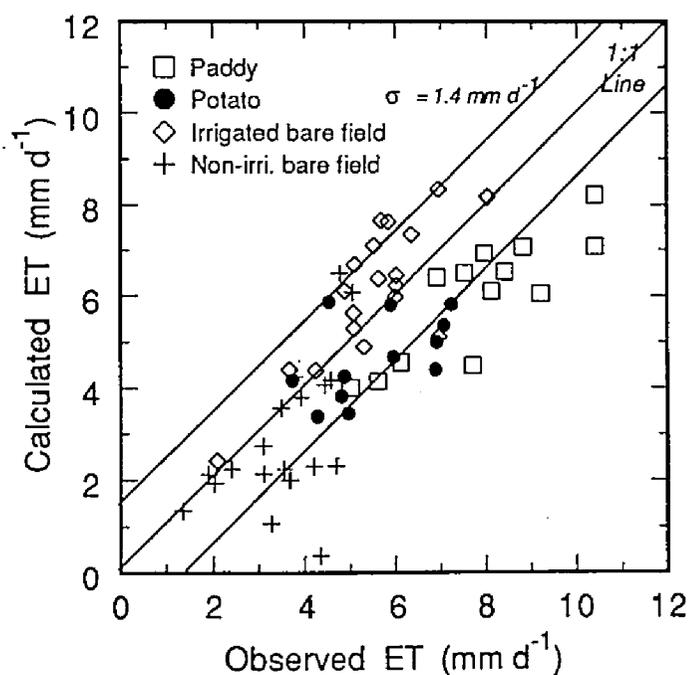


Fig.6-3 従来型の補完関係式(6-1)による算定蒸発散量と実測蒸発散量の比較(□; 水田, ●; ジャガイモ畑: 1989.7.21~30, ◇; 灌漑裸地, +; 非灌漑裸地: 1990.6.11~8.8)

Comparison between the observed evapotranspiration and calculated by the previous type eq.(6-1) at Fukagawa, July, 21~30, 1989 and June, 11~August, 8, 1990

算定値と測定値の標準偏差は 1.4mm d^{-1} であった。また、両者の関係は1:1の直線から離れている。これはFig.6-2に示された不完全な対象関係と関連している。したがって、狭い圃場の場合は、従来の補完関係では十分に説明できないと考えられる。

6. 4 狭域の補完関係モデル—Seguin式の改良—

そこで、対象地の大きさが考慮されたSeguin式をもとにし、Fig.3-5における湿潤面を蒸発計の水面に置き換え、狭域蒸発散量を算定するための実用的なモデルを検討する。まず、Fig.3-5の $Z_b \sim Z_a$ における水蒸気輸送係数を $f(Z_{a-b})$ とすると、(3-15)式は次のように書き換えられる。

$$ET = \frac{f(Z_{a-b})}{\gamma} (e_b - e_a) \quad (6-2)$$

また、 Ep_0 は次式で表される。

$$Ep_0 = \frac{f(Z_a)}{\gamma} (e_{0*} - e_a) \quad (6-3)$$

ここで、 $f(Z_a)$ は(3-17)式より次式で表される。

$$f(Z_a) = \frac{f(Z_{a-b}) f(Z_b)}{f(Z_{a-b}) + f(Z_b)} \quad (6-4)$$

(3-16)、(6-2~4)式を解くと、Seguinの(3-18)式と同型の次式が導かれる。

$$Ep - Ep_0 = \frac{f(Z_b)}{f(Z_{a-b})} (Ep_0 - ET) \quad (6-5)$$

*(前ページ) Penman式による計算値は、地表面の乾湿条件、圃場毎の差がほとんどなかったため、 ETp に $Epan$ を適用した。

ここで,

$$\frac{f(Z_{a-b})}{f(Z_b)} = \frac{\ln \{(Z_b-d)/Z_0\}}{\ln \{(Z_a-d)/(Z_b-d)\}} \equiv \alpha \quad (6-6)$$

とおくと, 次の蒸発散算定式が得られる.

$$ET = (1 + \alpha) E_{p0} - \alpha E_p \quad (6-7)$$

次に, E_p を蒸発計蒸発量(E_{pan})で置き換える. ただしこの場合には,

① 境界層上限の温度(T_a)と水蒸気圧(e_a), および蒸発計水面付近の温度(T_{0*})と水蒸気圧(e_{0*})は地表面の乾湿条件によらず一定である.

② 蒸発計の水面と周囲の地表面の粗度長が等しい.

という仮定が前提となる.

まずFig.6-4に, 灌漑および非灌漑裸地の高度1, 20cmにおける温度と水蒸気圧の鉛直分布を示す. この結果から, 灌漑裸地と非灌漑裸地における高度20cmの温度と水蒸気圧の差は, 高度1cmの差よりも小さく, それぞれの裸地の内部境界層の上限付近ではさらに差が小さいと考えられる. したがって T_a と e_a は, 地表面の乾湿条件によらず一定と見なすことができる. Fig.6-5に, 灌漑および非灌漑裸地における表面の蒸発計水面温度(T_{pan0})と表面温度(T_s)の経時変化を示す. T_s と比較すると T_{pan0} は, 表面の乾湿状態によってほとんど差がないことがわかる. これらはFig.3-5の Z_0 における温度 T_{0*} を示すものではないが, T_{0*} は表面の乾湿条件による差が極めて小さいと考えられる. また, e_{0*} は T_{0*} における飽和水蒸気圧にほぼ近いと見なせるため, e_{0*} も表面の乾湿条件による差は極めて小さいと考えられる. 以上の結果から①の妥当性はほぼ示される. 次に, 裸地の粗度長は数mm単位, 水田や畑地では数cm単位である(竹内・近藤, 1981¹⁵⁰)が, 蒸発計水面は蒸発計の枠が付いた狭い水面であるため, その粗度長は自然水面のそれよりも大きく水田や畑地に近いとも想像される. 実際の粗度長の測定は困難であるため仮定②の妥当性は未解明であるが,

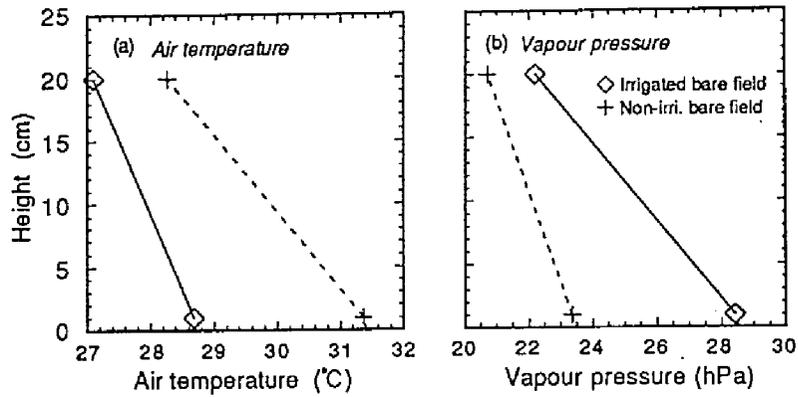


Fig.6-4 灌漑裸地と非灌漑裸地の高度1, 20cmにおける(a)温度profileと(b)水蒸気圧profileの比較 (◇; 灌漑裸地, +; 非灌漑裸地; 深川, 1990. 7.17~21, 12:00)

Profiles of (a)temperature and (b)vapour pressure at the height of 1 and 20cm on the irrigated and non-irrigated bare field at Fukagawa, 12:00, July, 17~21, 1990

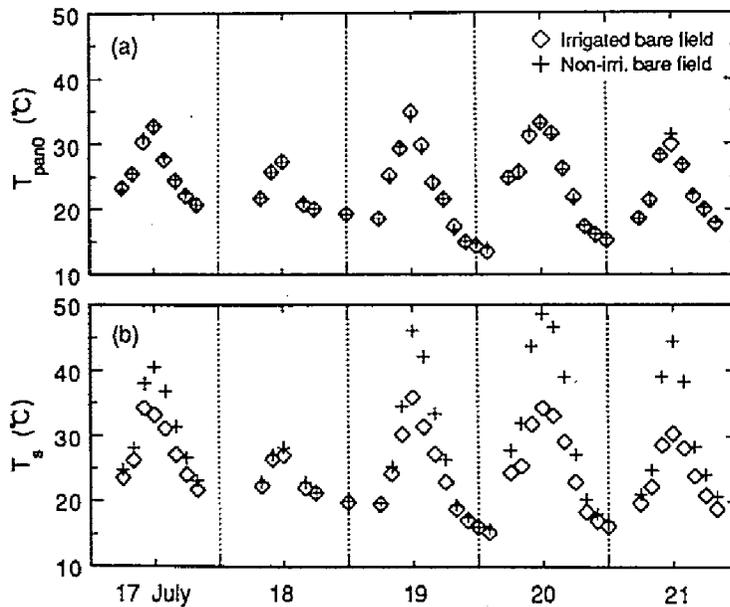


Fig.6-5 灌漑裸地と非灌漑裸地における(a)蒸発計の水面温度(T_{pan0})と(b)表面温度(T_s)の経時変化 (◇; 灌漑裸地, +; 非灌漑裸地; 深川, 1990.7.17~21)

Daily variation of (a)water surface temperature of the surface pan; T_{pan0} and (b)surface temperature; T_s for irrigated and non-irrigated bare field at Fukagawa, July, 17~21, 1990

本論ではこの仮定に従ってモデルの展開を進める。

表面の乾湿状態の差で(6-7)式を微分すると、右辺第一項は乾湿条件によらず定数だから、次式が得られる。

$$\alpha = -dET/dE_{pan} \quad (6-8)$$

よって、裸地における α は灌漑裸地と非灌漑裸地の蒸発量の差とそのときの蒸発計蒸発量の差から算定できる。ここでは、1990年6～8月の非灌漑裸地が乾燥した23日間の測定結果から、 α の平均値は1.6となった。

次に、Fig.3-5と(6-6)式における境界層の厚さ Z_b と Z_a を、観測結果と従来の理論の双方より決定する。

23日間の裸地における高度1, 2mの日中平均風速*は、それぞれ1.85, 2.09(m s⁻¹)であった。これより粗度長 Z_0 は、風速の対数分布則に従って外挿して求めると(Monteith, 1973⁸⁵), $Z_0=0.77$ cmとなる。この長さは、一般に土壌の代表値とされる0.1～1.0cm(竹内・近藤, 1981¹⁵⁰)の中間にあたる。

また、地面修正量 d を高度の基準とした内部境界層の厚さ Z_a-d は、フエッチを x とすると、

$$Z_a-d=0.1x^{0.8}Z_0^{0.2} \quad (6-9)$$

で表される(Munro & Oke, 1975⁹⁰)。本実験において、灌漑・非灌漑裸地における蒸発量測定地点 $x=15$ m(卓越風を考慮)と $Z_0=0.77$ cmを代入すると、 $Z_a=33$ cmとなる。また、裸地では $d=0$ であるから、 $Z_0=0.77$ cm, $Z_a=33$ cm, $\alpha=1.6$ を(6-6)式に代入すると $Z_b=8$ cmとなる**。

次に、水田と畑地の α を算定する。ただし、作物群落面における α は作物の生育状況で刻々変化するため、植被の密な一定期間の測定結果を

* 粗度長を求めるためには、内部境界層内で風速を測定する必要がある。本実験では、灌漑裸地と非灌漑裸地の粗度の差が小さいと見なし、両者の境界地点で風速を測定した。この地点は、卓越風(南東)の風上100m以上、粗度の差が小さいと思われる地表面が広がる。そこで粗い近似ではあるが、高度2m以下では風速が対数分布していると思なした。

用いて検討を進める。水稻とジャガイモ畑(1989年7月21日～7月30日)の平均群落高 h はそれぞれ61.0cm, 30.2cmである。群落面における Z_0 と d は、それぞれ次式で表わされるとする(Monteith,1973)。

$$Z_0 = 0.13h \quad (6-10)$$

$$d = 0.63h \quad (6-11)$$

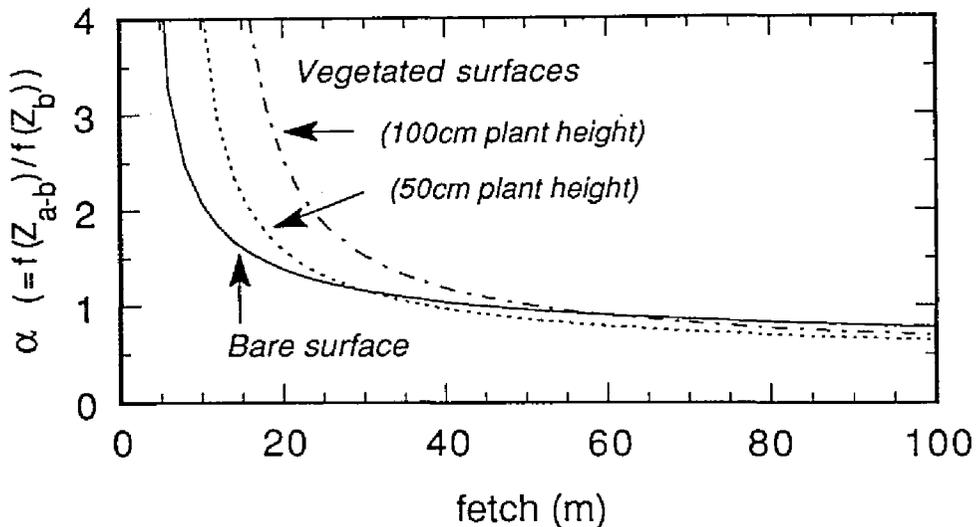


Fig.6-6 小型蒸発計の設置地点のfetchと(6-6)式における係数 α の関係

Relationships between the fetch at the spot where the pan evaporimeter is settled and coefficient α in eq.(6-6).

** (前ページ) 蒸発計と同じ大きさの水面中央における内部境界層の厚さは(6-9)式で求めると数mmとなる。しかし、蒸発計の水面は蒸発計の枠に囲まれているために、自然水面の内部境界層とは異なると考えられる。ここで得られた Z_0 は、蒸発計形状などの影響を含む見かけの内部境界層厚さといえる。

また、裸地の結果を用いて $Z_b = h + 8$ (cm) とし、 Z_a は(6-9)式で与える(卓越風の風向を考慮して $x = 14$ m). これらを(6-6)式に代入すると、 $\alpha = 2.8$ (水田), 2.0 (畑地) と算定される。

以上の試験結果から、本実験圃場の α が得られたので、より一般的な場所に適用できるよう、あるいは本実験の位置づけを明確にするために、 α と蒸発計設置地点のフェッチ (x) の関係を検討した。その方法は(6-6)式と(6-9)式による。まず、 x と Z_b を与えて(6-9)式で Z_a を求める。 Z_b は、裸地では8cm、群落高50cmの作物では58cm、100cmの作物では108cmとする。群落面の d は(6-11)式で与える。これらを(6-6)式に代入して α を求める。すると α は、フェッチと群落高の関数として Fig.6-6 のように表わされる。

次に、 E_{p_0} の表現方法を検討する。既述のように、従来型のモデルは、半理論的で簡便な平衡蒸発量に係数1.26を乗じた Priestley & Taylor 型の蒸発散位を適用してきた。様々な観測結果から、 E_{p_0} が Priestley & Taylor の蒸発散位で表されることは確かめられているが、気象条件別の平衡蒸発量係数の散らばりは無視できない(例えば Nakagawa, 1984⁹¹⁾)。一方、本実験では、 $E_{pan_{100}}$ を広い範囲の気象条件を反映する蒸発量と評価した。そこで E_{p_0} は、

$$E_{p_0} = C E_{pan_{100}} \quad (6-12)$$

と表現されるとする。この関係を(6-7)式に代入すると、

$$ET = (1 + \alpha) C E_{pan_{100}} - \alpha E_{pan} \quad (6-13)$$

が得られ、Fig.6-7に示すようにして係数 C は実験的に決定される。すなわち、 $C = 0.84$ (水田), 0.86 (畑地), 0.87 (灌漑裸地), 0.84 (非灌漑裸地) であった。

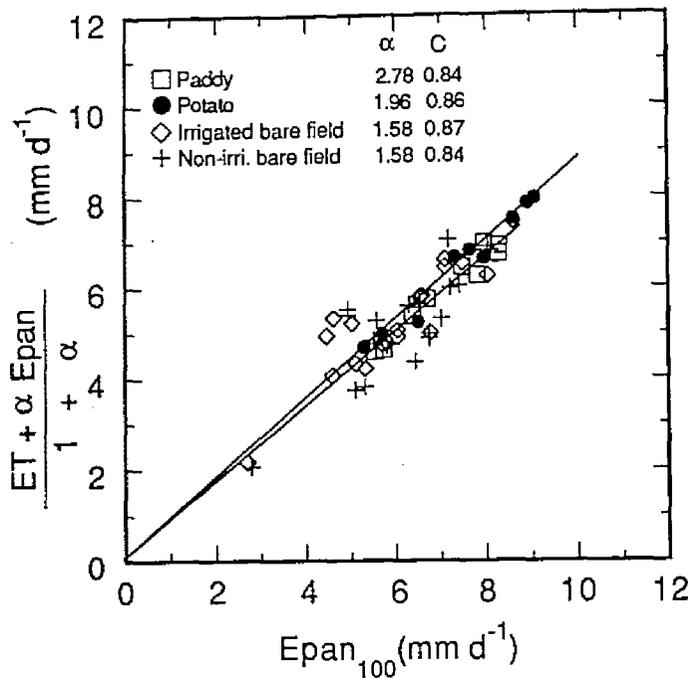


Fig.6-7 (6-13)式による係数Cの決定(□; 水田, ●; ジャガイモ畑: 1989.7.21~30., ◇; 灌漑裸地, +; 非灌漑裸地: 1990.6.11~8.8)

Determination of coefficient C from eq.(6-13) at Fukagawa, July, 21~30, 1989 and June, 11~August, 8, 1990

6. 5 本モデルによる蒸発散量の算定

Fig.6-7に示した土地利用別のCの値を用いて, (6-13)式により蒸発散量を算定した値と測定値を比較したのがFig.6-8である. 算定値と測定値との標準偏差は 1.3mm d^{-1} であった.

この結果から, 本論の補完関係式; (6-13)式は, 従来型のもの; (6-1)式よりも蒸発散量を概ねよく算定できるといえる. ただし, フェッチが小さい場合には, Fig.6-6に示すように α 値が大きく変化するため, 算定精度が低くなる. この影響は, 本実験圃場の蒸発散量を算定した結果にも

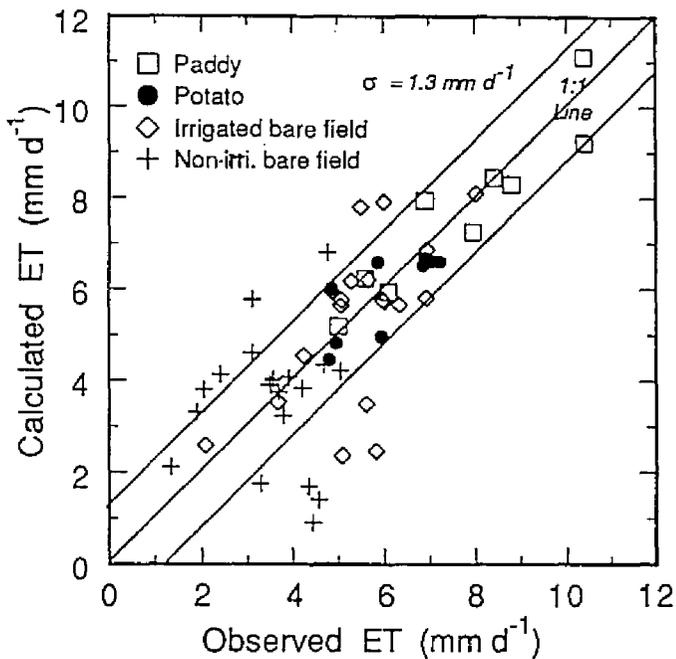


Fig.6-8 補完関係式(6-13)式による算定蒸発散量と実測蒸発散量の比較
 (□; 水田, ●; ジャガイモ畑: 1989.7.21~30., ◇; 灌漑裸地,
 +; 非灌漑裸地: 1990年6月11日~8月8日)

Comparison between the observed evapotranspiration and calculated from eq.(6-13)
 at Fukagawa on 21~30 July 1989 and on 11 June~8 August 1990

現われたと考えられる。またFig.6-6から、蒸発散量を算定する地域のフェッチが約30m以上あれば、本法によって高い算定精度が得られるといえる。

6. 6 結 語

様々な土地利用の地域が隣接する場合、水循環の一要素として、作物栽培のための必要水量として、あるいは気象環境を形成する重要な過程

として、それぞれの狭い地域からの蒸発散量を求める必要性が生じる。

本章では、狭い地域の蒸発散量を算定するためにSeguinの式を改良し、その妥当性を実験資料によって検討した。改良した点は、地域の内部境界層の下部と局所的な湿潤面の内部境界層の上部を一致させたこと、局所的な湿潤面からの蒸発量を蒸発計蒸発量で置き換えたこと、広い湿潤面からの蒸発量を高い高度の蒸発計蒸発量($E_{pan,100}$)を用いて表わしたこと、及び実験資料を利用して関係式のパラメータを決定したことである。

従来のフェッチを考慮しない補完関係式は狭い地域の蒸発散量を十分に算定できなかったのに対し、本論で用いた補完関係式は概ねよく算定できた。また、フェッチが30m以上あれば、本法による算定精度はより高くなると期待できる。

ただし、 E_{p_0} の算定方法は今後の課題である。また、より明確なモデルの検討のためには、対象とする地域(圃場)と蒸発計水面の内部境界層における精密な風、温度、水蒸気圧分布の測定が必要となるであろう。

第7章 結 論

本研究は、熱収支・蒸発散に関するこれまでの研究成果と研究課題を踏まえ、①土地利用別の熱収支特性と温度環境の違いを明らかにすること、②農地の持つ温度環境緩和機能を現場実験的に検証すること、③地目の混在した地域における熱収支特性を検討し蒸発散量の算定法を検討すること、という三点を目的として行なった。また本研究では、実際の測定値の持つ物理的な意味が重要であるとする考え方から、屋外で観測を行ない、対象とする物理現象を定性的に検討する実験的手法と、観測結果を利用して物理モデルを構築し、その再現性を検討する半理論的手法をとった。すなわち、本研究の特徴は、同一気象条件下で土地利用別の地区における熱収支特性と温度環境を実験的に検討した点にある。本研究で得られた結果は以下のように要約できる。

第1章では、我々の生活空間や農村空間における問題点を気象環境の保全という観点からとらえ、農村地域がもつ環境保全的役割を評価することと、その役割を担う水循環とエネルギー循環の特性を明らかにすることの重要性、すなわち本研究の発端について述べた。

第2章では、様々な性質の地表面における従来の熱収支・蒸発散研究を概括し、その研究の結果もたらされた成果と課題を整理した。その結果、地目の混在した地域における熱収支特性と温度環境に関する実験的研究が不十分であった。そこで、土地利用の異なる地区において熱収支特性と温度環境の違いをまず点的にとらえ、さらにその面的な分布を検討することが必要であるとし、本研究の方向づけを行なった。

第3章では、従来の蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割を概括・再検討し、蒸発計蒸発量と蒸発位の概念によってもたらされた成果と課題を整理しながら、今後の蒸発散研究を展望した。蒸発計蒸発量の役割

は、蒸発散算定のための基準蒸発量と、移流を受ける地域や狭い地域における局地蒸発位として役割が考えられた。これまでの研究において、測定された蒸発計蒸発量に対する説明は現象論的な段階にとどまっていたため、蒸発計蒸発量は物理的な意味が薄いと考えられてきた。そこで、設置地点の気象環境を確実に反映するなどの利点を利用し、実用上の立場から一步踏み込んだ理論的な支持を試みた。その結果、補完関係は、蒸発計蒸発量の持つ二つの役割を統合し、蒸発位と蒸発散の面的分布を表現する概念として、本研究における第三の目的のために利用できるであろうと考えた。

第4章では、本研究第一の目的で、第2章で整理した研究課題を踏まえ、互いに近接した水田、畑地(小麦、ジャガイモ)、灌漑裸地、非灌漑裸地、アスファルト舗装面を対象とし、同一気象条件下における熱収支に関する微気象観測を行ない、土地利用毎の放射収支と熱収支の特性、および温度環境とそれらの関係を検討した。その結果、農地、とくに水田が熱の吸源としてはたらくことが示され、周囲の温度環境を緩和する役割を持つことが示唆された。アスファルト舗装面では、水田と畑地と比較し、熱伝導への分配量が日中、夜間(負値)ともに卓越し、顕熱への分配量が日中卓越することが示された。また、日中の水田では、温度の上昇が抑制される傾向がみられた。夜間には、水田、畑地、灌漑・非灌漑裸地の表面温度はほとんど等しく、気温近くまで低下するのに対し、アスファルト舗装面ではそれらよりも高く保持された。このことから、都市空間における夜間の高温が、一つには地表面の性質によるものであることが示唆された。さらに、灌漑と植生により温度環境が緩和されること、温度の上昇を緩和する効果はとくに植生において高いことが示された。

第5章では、本研究における第二、三の目的で、第2章で整理した研究課題を踏まえ、水平・鉛直方向の気温と水蒸気圧分布を測定し、地目混在化地域の農地における2次元の気温分布と熱収支特性の分布を検討した。また、農地の持つ温度環境緩和的役割を実験的に検証した。その結

果、正午前から、農地内部とその周囲(アスファルト舗装地や裸地など)との間における気温の水平勾配が大きくなり、午後は、水田上で気温分布の逆転現象が見られた。これらは、周囲から農地への顕熱の移流を表すものであった。また、気温分布の逆転如何にかかわらず、日中の水田は冷源としてはたらし、その効果が群落上約100cm、風下10数mに及んだ。また、本実験水田と畑地内における熱収支特性(潜熱への分配率)の面的な分布、すなわちFetchと潜熱への分配率の関係は、定性的に説明するに至らなかった。

第6章では、本研究における第二の目的で、第3章で整理した蒸発計蒸発量の特性、すなわち蒸発散量と蒸発計蒸発量の補完関係を利用し、地目の混在した地域の蒸発散量を算定する方法を検討した。その結果、従来のFetchを考慮しない補完関係式は狭い地域の蒸発散量を十分に算定できなかったのに対し、本論で用いた補完関係式は概ねよく算定できた。

以上が本研究の概要である。しかし、本研究はまだ基礎的な段階にあり、今後の研究課題も多く残された。それらを下に整理して、本論文を締めくくることとする。

本研究では、農地の持つ温度環境緩和効果を実験的に検証したが、理論による数値実験的な検証などにより、定量的な評価も行なっておく必要がある。そして本研究の成果が、都市化における農地の気象環境緩和効果の評価に対する一助となれば幸いに思う次第である。また、地目の混在した地域の蒸発散量を算定する方法としての補完関係を、本研究と異なる地域に適用してその有効性を確かめておく必要がある。最後に、本研究は湿潤地域である日本の地目混在化地域の農地を対象として展開されたが、さらに、乾燥地域で強い移流の影響を受けるような灌漑地、あるいは砂漠化の問題を抱える地域において、水循環とエネルギー循環の特性に関する検討へと発展させることができれば幸いである。

引用・参考文献

- 1) 新井正(1962)：いろいろな水体上の月平均ポウエン比の分布., 農業気象, Vol.18, No.2, pp.22-30
- 2) 新井正(1984)：地理学における熱収支研究., 地理学評論, Vol.57(Ser.A), No.9, pp.601-610
- 3) Arbin,M., Salih,A. & Sendil,U.(1984)：Evapotranspiration under extremely arid climates., J. Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol.110, No.IR3, Paper 19141
- 4) Army,T.J. & Ostle,B.(1957)：The association between free-water evaporation and evapotranspiration of spring wheat under the prevailing climate conditions of the plains area of Montana., Proc. Soil Sci. Soc. Am., Vol.21, pp.469-472
- 5) 浅枝隆, 永沼崇彦, 鈴木水弘, 塩崎修男(1991)：都市域の温暖化における舗装の蓄熱効果., 水工学論文集, Vol.35, pp.591-595
- 6) ASCE ed. Jensen,M.E.(1973)：Consumptive use of water and irrigation water requirements., ASCE, New York, P.74-80, P.215
- 7) Blaney,H.F.(1956)：Evaporation from free water surfaces at high altitudes., J. Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol.82, No.IR3, Paper 1104
- 8) Blaney,H.F. & Morin,K.V.(1942)：Evaporation and consumptive use of water empirical formulas., Trans., Amer. Geophys. Union, Vol.23, pp.76-83
- 9) Bouchet,R.J.(1963)：Evapotranspiration reele et potentielle: Signification climatique., Assemblee generale de Berkley, AIHS, Publ., No.62, pp.134-142
- 10) Brakke,T.W., Verma,S.B. & Rosenberg,N.J.(1978)：Local and regional components of sensible heat advection., J. Appl. Meteorol., Vol.17, pp.955-963
- 11) Brutsaert,W.(1965)：Evaluation of some practical methods of estimating evapotranspiration in arid climates at low latitudes., W.R.R., Vol.1, No.2, pp.187-191

- 12) Brutsaert, W. & Stricker, H. (1979) : An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration., W.R.R., Vol.15, No.2, pp.443-450
- 13) Brutsaert, W. (1982) : Evaporation into the atmosphere., D.Reidel Pub. Com., Dordrecht, P.26-28, P.33
- 14) Budyko, M.I. (1956) : 地表面の熱収支(内嶋善兵衛訳), 河川水温調査会, P.58-60
- 15) Cardon, D. (1984) : Utilisation du bac classe A dans l'estimation de l'evapotranspiration potentielle dans le Nordeste du Bresil., ICID, Conference of "Crop water requirements", INRA, Paris, (作物用水量, 北海道農業土木コンサルタント訳), pp.129-140
- 16) Christiansen, J.E. (1966) : Estimating pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. in "Method for estimating evapotranspiration", ASCE Irrigation and Drainage Specialty Conference, Las Vegas, Nev., pp.193-234
- 17) Christiansen, J.E. (1968) : Pan evaporation and evapotranspiration., J. Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol.94, No.IR2, Paper 5988
- 18) Dagg, M. (1969) : Factors affecting the use of evaporation pan data in East Africa., East Afr. Agric. and Forestry, Vol.35, No.2, pp.203-210
- 19) Dale, R.F. & Scheeringa, K.L. (1977) : The effect of soil moisture on pan evaporation., Agric. Meteorol., Vol.18, pp.463-474
- 20) Davenport, D.C. & Hudson, J.P. (1967 a) : Local advection over crops and fallow I . Changes in Evaporation rate along a 17-km transect in the Sudan Gezira., Agr. Meteorol., Vol.4, pp.339-352
- 21) Davenport, D.C. & Hudson, J.P. (1967 b) : Local advection over crops and fallow II . Meteorological observations and Penman estimates along a 17-km transect in the Sudan Gezira., Agr. Meteorol., Vol.4, pp.405-414
- 22) de Vries, D.A. (1959) : The influence of irrigation on the energy balance and the climate near the ground., J. Meteorol., Vol.16, pp.256-270
- 23) Dilley, A.C. & Shepherd, W. (1971) : Potential evaporation from pasture and

- potatoes at Aspendale., Agric. Meteorol., Vol.10, pp.283-300
- 24) Dolan, T.J., Hermann, A.J., Bayley, S.E. & Zoltek, Jr. J. (1984) :
Evapotranspiration of a Florida, U.S.A., freshwater wetland., J. Hydrol.,
Vol.74, pp.355-371
- 25) Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. (1975, 1977) : Crop Water Requirements.,
Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome
- 26) Dyer, A.J. & Crawford, T.V. (1965) : Observations of the modification of the
microclimate at a leading edge., Q. J. Roy. Meteorol. Soc., Vol.91, pp.345-348
- 27) Elliott, W.P. (1958) : The growth of the atmospheric internal boundary layer.,
Trans. Am. Geophys. Union, Vol.39, No.6, pp.1048-1054
- 28) Evans, G.N. (1971) : Evaporation from rice at Griffith, New South Wales.,
Agric. Meteorol., Vol.8, pp.117-127
- 29) Follansbee, R. (1934) : Evaporation from water surfaces., Symp. "Evaporation
from reservoir surfaces", Trans. ASCE, No.99, pp.704-715
- 30) Fuchs, M. (1973) : The Estimation of Evapotranspiration. in "Arid Zone
Irrigation", Ed. by Yaron, B. et al., Springer-Verlag, New York, P.245-246
- 31) Gray, H.E., Levine, G. & Kennedy, W.K. (1955) : Use of water by pasture
crops., Agric. Engin., Vol.36, pp.529-531
- 32) Halkias, N.A., Veihmeyer, F.J. & Hendrickson, A.H. (1955) : Determining
water needs for crops from climatic data., Hilgardia, Vol.24, No.9, pp.207-233
- 33) Halstead, M.H. & Covey, W. (1957) : Some meteorological aspects of
evapotranspiration., Soil Sci. Soc. Am. Proc., Vol.21, pp.461-464
- 34) Hand, D.W. (1964) : Advective effects on evaporating conditions as hot dry air
crosses irrigated lucerne., Emp. J. Exp. Agric., Vol.32, No.128, pp.263-273
- 35) Hanks, R.J., Allen, L.H. & Gardner, H.R. (1971) : Advection and
evapotranspiration of wide-row sorghum in the Central Great Plains.,
Agron. J., Vol.60, pp.538-542
- 36) 原 蘭芳信, 池田英男(1990) : 屋上での簡易養液栽培による室内熱環境

- への影響., 農業気象, Vol.46, No.1, pp.9-17
- 37) 原菌芳信, 申建友, 劉新民, 李勝功(1992): 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, Vol.47, No.4, pp.217-224
- 38) Hargreaves, G.H.(1956): Irrigation requirements based on climatic data., J. Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol.82, No.IR3, Paper 1105
- 39) Hargreaves, G.H.(1968): Consumptive use derived from evaporation data., J. Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol.94, No.IR1, Paper 5863
- 40) Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A.(1982): Estimating potential evapotranspiration., ASCE, Vol.108, No.IR3, pp.225-230
- 41) 早川誠而(1978): 地表-接地気層-大気系における物質とエネルギーの輸送に関する研究(I)-熱源のスケールが流れおよび温度環境に及ぼす影響-, 農業気象, Vol.34, No.3, pp.109-118
- 42) 早川誠而, 元田雄四郎, 坂上務(1984): 地表-接地気層-大気系における物質とエネルギーの輸送に関する研究(III)-局地冷源による内部境界層の特徴., 農業気象, Vol.40, No.1, pp.47-54
- 43) 本條毅, 高倉直(1984): 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響(1)実測に基づく熱収支的解析., 農業気象, Vol.40, No.3, pp.257-261
- 44) Horton, R.E.(1917): A new evaporation formula developed., Engineering News-Record, Vol.78., pp.196-199
- 45) Hudson, J.P.(1964): Evaporation under hot dry conditions - Changes across ten miles of cotton and fallow in the Sudan., Empire Cotton Growing Rev., Vol.41, pp.241-254
- 46) ICID(1984): Conference of "Crop water requirements", INRA, Paris, (作物用水量, 北海道農業土木コンサルタント訳), P.790
- 47) Iruthayaraj, M.R.(1978): Relationship between the evapotranspiration of rice and the evaporation of evaporimeters., Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae, Vol.27, pp.123-126
- 48) 石光研二(1992): ドイツの農村計画., "農村計画学", 8.1, 農業土木学会

- 編, pp.234-240
- 49) 伊藤昭三(1968)：蒸発量観測の現状と将来展望., 電力気象連絡会彙報, Vol.17, pp.125-134
- 50) 岩切敏(1962)：宮崎における浅い湛水の水溫・熱収支項の年変化について., 農業気象, Vol.17, No.4, pp.7-11
- 51) 岩切敏(1967)：南九州における裸地面蒸発について., 農業気象, Vol.23, No.4, pp.1-8
- 52) Jahanbakhsh-Asl,S., Otsuki,K. & Maruyama,T.(1987 a)：Analysis of heat and water movement through a rice plant canopy by two layer model
—Fundamental studies on evapotranspiration in paddy fields(Ⅱ)—., Trans., JSIDRE, No.130, pp.25-31
- 53) Jahanbakhsh-Asl,S., Mitsuno,T., Otsuki,K. & Maruyama,T.(1987 b)：Mechanism of latent and sensible heat flux partitioning in the rice plant canopy
—Fundamental studies on evapotranspiration in paddy fields(Ⅲ)—., Trans., JSIDRE, No.132, pp.11-19
- 54) 上堂秀一郎, 玉井虎太郎, 岩崎芳典(1989)：ダイズの蒸発散比に及ぼす草冠の高さの影響., 愛媛大学農学部紀要, Vol.34, No.1, pp.93-101
- 55) 蒸発散研究グループ(1967)：水田の蒸発散., 農業気象, Vol.22, No.4, pp.149-157
- 56) 神尾彪, 林堯(1973)：牧草畑の蒸発散., 農土論集, No.44, pp.8-12
- 57) 神尾彪(1987)：ヨシの蒸発散量—植生によるヘドロ地盤の乾燥に関する研究—., 農土論集, No.128, pp.47-53
- 58) 神田学, 日野幹雄(1990)：大気—植生—土壌系モデル(NEO SPAM)によるシミュレーション(2)植生の気候緩和効果の数値実験, 水文・水資源学会誌, Vol.3, No.3, pp.47-55
- 59) 金子良(1973)：農業水文学, 共立出版, 東京, P.156
- 60) Kanemasu,E.T. & Arkin,G.F.(1974)：Radiant energy and light environment of crops., Agric. Meteorol., Vol.14, pp.211-225

- 61) 関西電力株式会社(1959)：三浦貯水池における蒸発量の観測. 第1部, 電力気象連絡会彙報, Vol.9, pp.173-186
- 62) 関西電力株式会社(1960)：三浦貯水池における蒸発量の観測. 第2部 微細気象観測から蒸発量を算定する方法について., 電力気象連絡会彙報, Vol.10, pp.6-23
- 63) 河村武(1964)：熊谷市の都市温度の成因に関する二, 三の考察., 地理学評論, Vol.37-10, pp.30-34
- 64) 川島茂人(1987 a)：夏期高温時における散水が植被の疎な植物群落の微気象に与える効果－散水が耕地微気象に与える効果に関する研究(I)－, 農土論集, No.128, pp.55-65
- 65) 川島茂人(1987 b)：夏期高温時における散水が植被の密な植物群落の微気象に与える効果－散水が耕地微気象に与える効果に関する研究(II)－, 農土論集, No.130, pp.33-42
- 66) 川島茂人(1991)：農業気候資源評価へのリモートセンシング手法の利用－リモートセンシングによる熱環境, 熱収支, 蒸発散の評価－, 気象研究ノート, 第171号, pp.119-125
- 67) 榎根勇(1980)：水文学, 大明堂, 東京, P.98
- 68) 気象庁編(1989)：異常気象レポート'89 近年における世界の異常気象と気候変動－その実態と見通し－(IV)
- 69) 小泉隆(1983)：接地気層の気温変化に及ぼす地表面熱収支の影響., 地理学評論, Vol.56, No.8, pp.567-578
- 70) 近藤純正(1989)：平衡蒸発量と地表面蒸発., 水文水資源学会誌, Vol.2, No.2, pp.25-32
- 71) 古藤田一雄(1977)：気候学的資料を用いた湖面蒸発量の推定法., 筑波大学水利実験センター報告, No.1, pp.53-65
- 72) 古藤田一雄(1984)：草地の熱収支と蒸発散., 地理学評論, Vol.57(Ser.A), No.9, pp.611-627
- 73) Kristensen, K.J.(1977)：A comparison of some methods for estimation of

- potential evaporation., *Nordic Hydrology*, Vol.10, pp.239-250
- 74) Lemon,E.R., Glaser,A.H. & Satterwhite,L.E.(1957) : Some aspects of the relationship of soil, plant, and meteorological factors to evapotranspiration., *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol.21, pp.464-468
- 75) Linsley,R.K.Jr., Kohler,M.A. & Paulhus,J.L.H.(1982) : *Hydrology for engineers.*, McGraw-Hill, P.10
- 76) Malek,E.(1987) : Comparison of alternative methods for estimating ETp and evaluation in the Bajgah area, Iran., *Agric. For. Meteorol.*, Vol.39, pp.185-192
- 77) 松田松二, 市村一男, 中山敬一, 山本雄二郎(1965) : 水稻の蒸散量に関する研究., *農電研究所報*, No.6, pp.43-56
- 78) 松田松二, 森下一男, 辰巳修三(1977) : 温度環境と熱収支系—黒部川源流域の自然・水資源・保全に関する総合調査研究(I)—., *農土論集*, No.68, pp.1-8
- 79) McIlroy,I.C. & Angus,D.E.(1964) : Grass, water and soil evaporation at Aspendale., *Agr. Meteorol.*, Vol.1, pp.201-224
- 80) 光田寧(1990) : 森林の伐採による気候変化., *土木学会誌別冊増刊「地球環境とシビルエンジニア」*, Vol.75, pp.39-42
- 81) 三浦健志, 三野 徹, 丸山利輔, 四方田穆(1980) : 日射量と地温・気温・計器蒸発量との関係—傾斜地における温度環境形成機構に関する研究(II)—., *農土論集*, No.89, pp.1-6
- 82) 三浦健志, 三野 徹, 丸山利輔, 四方田穆(1981) : 傾斜地の熱収支構造—傾斜地における温度環境形成機構に関する研究(III)—., *農土論集*, No.95, pp.1-6
- 83) 三浦健志, 四方田穆, 三野徹(1986) : 畑地用水計画のための熱収支法による蒸発散量計測システム, *農土誌*, Vol.54, No.12, pp.21-23
- 84) 三浦健志, 四方田穆(1988) : 熱収支法による大豆畑からの蒸発散量の推定, *農土誌*, Vol.56, No.7, pp.37-44
- 85) Monteith,J.L.(1973) : *Principles of environmental physics.*

- ([生物環境物理学] ., 佐伯敏郎・及川武久訳, 共立出版), P.144
- 86) Morton,F.I.(1965) : Potential evaporation and river basin evaporation.,
Proc. ASCE, Vol.91, No.HY6, pp.67-97
- 87) Morton,F.I.(1969) : Potential evaporation as a manifestation of regional
evaporation., Water Resources Research, Vol.5, No.6, pp.1244-1255
- 88) Morton.F.I.(1983) : Operational estimates of areal evapotranspiration and
their significance to the science and practice of hydrology., J. Hydrol., Vol.66,
pp.1-76
- 89) Munn,R.E.(1970) : Biometeorological Methods., Academic Press, New York
- 90) Munro,D.S. & Oke,T.R.(1975) : Aerodynamic boundary-layer adjustment
over a crop in neutral stability., Boundary-Layer Meteorol., Vol.9, pp.53-61
- 91) Nakagawa,S.(1984) : Study on evapotranspiration of pasture.,
Environmental Research center papers, No.4, Tsukuba Univ., TP.87
- 92) 中川慎二(1989) : 蒸発散, 気象研究ノート, 第167号, pp.31-45
- 93) 中川昭一郎(1967) : 水田用水量調査計画法, 畑地農業振興会
- 94) 中野芳輔, 黒田正治(1989) : 土地利用形態と熱的環境の評価.,
九大農学芸誌, Vol.43, No.1・2, pp.69-75
- 95) 中山敬一, 市村一男, 山本雄二郎, 松田松二(1965) : 水稲田の気象環境.,
農電研究所報, No.6, pp.1-34
- 96) 成田健一, 関根毅, 徳岡利一(1984) : 都市地表面物質の熱特性—アスフ
ァルト舗装面における熱収支の研究—, 地理学評論, Vol.57(Ser.A),
No.9, pp.639-651
- 97) Nordenson,T.J.(1963) : Appraisal of seasonal variation in pan coefficients.,
Assemblee generale de Berkeley., AIHS, Pub.l., No.62, pp.279-286
- 98) 農林省農林水産技術会議編, 内藤文男(1973) : 畑地かんがい, 農林技術
出版社, P.3-37
- 99) 農林水産省構造改善局(1982) : 土地改良事業計画設計基準, 計画・畑
地灌漑, P.32-34

- 100) 大場和彦(1988)：南九州におけるサツマイモ畑の蒸発散., 農業気象, Vol.44, No.2, pp.91-99
- 101) 大原芳夫, 大槻恭一, 滝沢一喜, 丸山利輔(1985 a)：水稻水田の熱収支とその水温推定法－水田の水温と水管理に関する研究(I)－, 農土論集, No.119, pp.21-27
- 102) 大原芳夫, 大槻恭一, 滝沢一喜, 丸山利輔(1985 b)：水稻の生育に伴う水温変化とその推定－水田の水温と水管理に関する研究(II)－., 農土論集, No.123, pp.33-40
- 103) 大原芳夫, 大槻恭一, 滝沢一喜, 丸山利輔(1985 c)：石狩川水系における圃場の水管理－水田の水温と水管理に関する研究(III)－., 農土論集, No.125, pp.95-101
- 104) Oke, T.R.(1978)：Boundary Layer Climates., Methuen & Co LTD, London, (境界層の気候, 斎藤直輔, 新田尚 訳, 朝倉書店), P.118-125
- 105) 大槻恭一, 三野徹, 丸山利輔(1984 a)：計器蒸発量, 蒸発散位と実蒸発散量の関係－実蒸発散量推定に関する研究(I)－, 農土論集, No.111, pp.95-103
- 106) 大槻恭一, 三野徹, 丸山利輔(1984 b)：水収支法と補完関係式による流域蒸発散量の比較－実蒸発散量推定に関する研究(II)－, 農土論集, No.112, pp.17-23
- 107) 大槻恭一, 三野徹, 丸山利輔(1984 c)：気象資料から推定したわが国の蒸発散量－実蒸発散量推定に関する研究(III)－, 農土論集, No.112, pp.25-32
- 108) Otsuki, K., Jahanbakhsh-Asl, S. & Maruyama, T.(1987)：Energy distribution of the rice plant canopy－Fundamental studies on evapotranspiration in paddy fields(I)－., Trans., JSIDRE, No.130, pp.17-23
- 109) 大槻恭一(1989)：講座 蒸発散(その8)－蒸発散量の推定法－, 農土誌, Vol.57, No.11, pp.65-71
- 110) Oue, H., Otsuki, K. & Maruyama, T. (1990)：A complementary relationship

between actual evapotranspiration and pan evaporation in a small area.,
The 1990 Western Pacific Geophysics Meeting, EOS, Transactions,
American Geophysical Union, Vol.71, No.28, P.871

- 111) 大上博基, 大槻恭一, 大原芳夫, 丸山利輔(1992 a) : 補完関係による蒸発散量算定法の狭域への適用., 農土論集, No.161, pp.45-60
- 112) 大上博基, 丸山利輔(1992 b) : 蒸発散算定のための蒸発計蒸発量-蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割(I)-, 農土論集, No.162, pp.143-150
- 113) 大上博基, 丸山利輔(1992 c) : 局地蒸発位としての蒸発計蒸発量-蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割(II)-, 農土論集, No.162, pp.151-159
- 114) 大上博基, 田頭秀和, 大槻恭一, 丸山利輔(1993) : 水田, 畑地, 裸地, アスファルト舗装面における熱収支特性と温度環境, 農土論集, No.164
- 115) 大上博基, 丸山利輔(1993) : 農地における2次元気温分布とフェッチ効果-地目混在化地域の農地が持つ微気候学的役割-, 農土論集, 投稿準備中
- 116) Penman,H.L.(1948) : Natural evaporation from open water, bare soil and grass., Proc. Royal Soc. London, Ser.A, Vol.193, pp.120-146
- 117) Penman,H.L.(1963) : Vegetation and Hydrology, Technical Communication No.53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, P.34
- 118) Philip,J.R.(1959) : The theory of advection: I ., J. Meteorol., Vol.16, pp.535-547
- 119) Priestley,C.H.B. & Taylor,R.J.(1972) : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters., Mon. Weather Rev., Vol.100, pp.81-92
- 120) Pruitt,W.O. & Jensen,M.C.(1955) : Determining when to irrigate., Agr. Eng., Vol.36, pp.389-393
- 121) Pruitt,W.O.(1960) : Relation of consumptive use of water to climate., Trans. Am. Soc. Agr. Eng., Vol.3, No.1, pp.9-13,17
- 122) Rao,K.S., Wyngaard,J.C. & Cote,O.R.(1974) : Local advection of momentum, heat, and moisture in micrometeorology., Boundary-Layer

- Meteorol., Vol.7, pp.331-348
- 123) Rider,N.E., Philip,J.R. & Bradley,E.F.(1963) : The horizontal transport of heat and moisture - A micrometeorological study., Q. J. Royal Meteorol. Soc., Vol.89, pp.507-531
- 124) Rijks,D.A.(1971) : Water use by irrigated cotton in Sudan. III. Bowen ratios and advective energy., J. Applied Ecology, Vol.8, pp.643-663
- 125) Riley,J.J.(1966) : The heat balance of class A evaporation pan., Water Resources Research, Vol.2, No.2, pp.223-226
- 126) Ritchie,J.T. & Burnett,E.(1971) : Dryland evaporative flux in a subhumid climate. II .Plant influences., Agron. J., Vol.63, pp.56-62
- 127) Rohwer,C.(1934) : Evaporation from water surfaces., Symp. "Evaporation from different types of pans", Trans. ASCE, No.99, pp.673-703
- 128) Rosenberg,N.J.(1969) : Seasonal patterns in evapotranspiration by irrigated Alfalfa in the Central Great Plains., Agron. J., Vol.61, pp.879-886
- 129) Rosenberg,N.J. & Verma,S.B.(1978) : Extream evapotranspiration by irrigated alfalfa., J. Appl. Meteorol., Vol.17, pp.934-941
- 130) Rosenberg,N.J., Blad,B.L. & Verma,S.B.(1983) : Microclimate— The Biological Environment— ., A Wiley-Interscience Publ., New York, P.229-233
- 131) 斎藤隆幸, 井上栄一, 磯部誠之, 堀部淑子(1962) : 水稻圃場の微気象の観測と2, 3の解析., 農業気象, Vol.18, No.1, pp.11-17
- 132) 斎藤隆幸(1962) : 植物群落内部の蒸散量及び拡散係数の高度分布に対する熱収支法の適用., 農業気象, Vol.17, No.3, pp.17-21
- 133) 桜谷哲夫, 堀江武(1985) : 作物の蒸発散に関する研究(1)水田蒸発散の季節・品種別特性と簡易推定法., 農業気象, Vol.41, No.1, pp.45-55
- 134) 桜谷哲夫(1991) : 耕地の蒸発散と土壌水分の研究., 気象研究ノート, 第171号, pp.19-27
- 135) Seguin,B.(1975) : Influence de l'evapotranspiration regionale sur la mesure locale d'evapotranspiration potentielle., Agric. Meteorol., Vol.15, pp.355-370

- 136) Seo, T.(1958) : A micrometeorological study of thermal exchange at the earth's surface(3)., Research Report Kochi Univ., Vol.7, No.21
- 137) Sharma,H.C. & Dastane,N.G.(1969) : Assessing evapotranspiration with can evaporimeters., Annals of Aridzone, Vol.8, pp.23-26
- 138) 新庄彬(1984) : 段々裸地への熱収支法の適用結果について—地温分布解析からみた蒸発量の検討—., 農土論集, No.114, pp.77-89
- 139) Shouse,P., Jury,W.A. & Stolzy,L.H.(1980) : Use of deterministic and empirical models to predict evapotranspiration in an advective environment., Agron. J., Vol.75, pp.994-998
- 140) Solomon,S.(1967) : Relationship between precipitation, evaporation, and runoff in tropical-equatorial regions., Water Resources Research, Vol.3, No.1, pp.163-172
- 141) Stanhill,G.(1961) : A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data., Israel J. Agr. Res., Vol.11, pp.159-171
- 142) Stanhill,G.(1962) : The control of field irrigation practice from measurements of evaporation., Israel J. Agr. Res., Vol.12, pp.51-62
- 143) Sub-Committee on Evaporation(1934) : Evaporation from water surfaces., Symp. "Standard equipment for evaporation stations.", Trans. ASCE, No.99, pp.716-718
- 144) 鈴木重義, 福田仁志(1958) : 蒸発散位の計器蒸発量による一算出法., 農業気象, Vol.13, No.3, pp.81-85
- 145) 高市益行(1987) : 冬季の夜間におけるソラマメ葉の熱収支について., 農業気象, Vol.43, No.2, pp.113-120
- 146) 高瀬恵次, 丸山利輔(1978) : 水収支法による季別流域蒸発散量の推定., 農土論集, No.76, pp.1-6
- 147) 高瀬恵次, 佐藤晃一(1986) : 水収支法による造成農地蒸発散特性の検討—造成農地の水循環に関する研究(I)—, 農土論集, No.121, pp.1-7
- 148) 高瀬恵次, 佐藤晃一(1989) : 水田転換畑における大豆の蒸発散量.,

- 農土誌, Vol.57, No.9, pp.33-37
- 149) 竹内篤雄, 島通保(1976) : 地況の地表面日射量および地温に与える影響について, 京大防災研究所年報, No.19B, pp.351-370
- 150) 竹内清秀, 近藤純正(1981) : 大気科学講座1 地表に近い大気, 東京大学出版会, P.21, P.180
- 151) Tanner,C.B.(1957) : Factors affecting evaporation from plants and soils., J. Soil Water Conserv., Vol.12, pp.221-227
- 152) Tanner,C.B. & Pelton,W.L.(1960) : Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman., J. Geophys. Res., Vol.65, No.10, pp.3391-3413
- 153) Tanner,C.B.(1967) : Measurement of evapotranspiration. in "Irrigation of agricultural lands" Ed.by Hagan,R.M., Haise, M.R. & Edminister,T.W., Agronomy Monograph No.11, Amer. Soc. Agron., P.567
- 154) Thom,A.S., Thony,J.L. & Vauclin,M.(1981) : On the proper employment of evaporation pans and atmometers in estimating potential transpiration., Quart. J. R. Meteorol. Soc., Vol.107, pp.711-736
- 155) Thompson,G.D. & Boyce,J.P.(1966) : Daily measurements of potential evapotranspiration from fully canopied sugarcane., Agr. Meteorol., Vol.4, pp.267-279
- 156) Thornthwaite,C.W.(1948) : An approach toward a rational classification of climate., Geograph. Rev., Vol.38, pp.55-94
- 157) 土屋 巖, 白井邦彦(1978) : 霞ヶ浦の湖面蒸発の算定について., 国立公害研研究報, No.6, pp.23-31
- 158) 土屋 巖, 白井邦彦, 増田啓子, 河合崇欣, 植田洋匡, 佐橋謙(1981) : 湖面蒸発量の研究., 国立公害研研究報, No.20, pp.43-67
- 159) Uchijima, Z.(1961) : On characteristics of heat balance of water layer under paddy plant cover., Bull. Nat. Inst. Agr. Sci. Ser.A, No.8, pp.243-265
- 160) 内嶋善兵衛(1962) : 植物群落内の微気象に関する研究(1) 植被層内の

- 乱流拡散係数について., 農業気象, Vol.18, No.1, pp.1-9
- 161) 上原勝樹(1959) : 大型水面自記蒸発計の試作について., 農業気象,
Vol.14, No.1, pp.19-21
- 162) Veihmeyer,F.J.(1964) : Handbook of applied hydrology., Section 11,
Ed.by V.T.Chow, McGraw-Hill, New York
- 163) Weaver,H.A. & Stephens,J.C.(1963) : Relation of evaporation and potential
evapotranspiration., Trans. ASAE, Vol.6, No.1, pp.55-56
- 164) WMO ed. Gangopadhyaya,M. et al.(1966) : Measurement and Estimation of
Evaporaion and Evapotranspiration., Technical Note No.83, WMO-No.201,
TP 105, Geneva
- 165) WMO ed. Hounam,C.E.(1973) : Comparison between pan and lake
evaporation., Technical Note No.126, WMO-No.354, TP 52, Geneva
- 166) Wright,J.L.(1988) : Daily and seasonal evapotranspiration and yield of
irrigated alfalfa in southern Idaho., Agron. J., Vol.80, pp.662-669
- 167) 山路永司(1992) : 土地利用計画の課題., "農村計画学", 3.1, 農業土木
学会編, pp.38-45
- 168) Yamamoto,G.(1950) : Investigation of evaporation from pans.,
Trans. American Geophysical Union, Vol.31, No.3, pp.349-356
- 169) Yamamoto,G. & Kondo,J.(1964) : Evaporation from lake Towada.,
J. Meteorological Soc. Japan, Vol.42, No.2, pp.85-96
- 170) 山本義一, 近藤純正(1968) : 湖面蒸発の季節変化について., 電力気象
連絡会彙報., Vol.18, pp.87-103
- 171) 矢野友久, 長智男(1979) : ウェイイングライシメータによる落花生の
日蒸発散量の測定—砂丘地における蒸発散について(Ⅱ)—., 農土論集,
No.84, pp.7-13
- 172) 矢野友久, 小谷佳人(1986) : 砂丘地における大豆の蒸発散量について.
農土論集, Vol.126, pp.25-30
- 173) 戎信宏, 青柳泰夫, 小川滋, 藤本幸司(1987) : 山地小流域における蒸発

散の特性に関する基礎的研究(I). スギ・ヒノキ幼齢林分の蒸発散量について., *Bulletin of Ehime Univ. Forest*, No.24, pp.71-83

174) Yu,S.L. & Brutsaert,W.(1967) : Evaporation from very shallow pans., *J. Appl. Meteorol.*, Vol.6, pp.265-271

謝 辞

本研究を行なうに当たって、京都大学農学部かんがい排水学研究室・丸山利輔教授には、研究の方向づけから取りまとめに至るまで終始懇切なるご指導を賜るとともに、研究環境への多大なるご配慮を賜った。本研究のための屋外観測に際し、(財)北海道農業近代化コンサルタント理事長・大原芳夫博士には、多大なるご支援とご指導を賜った。研究の方向づけについては、岡山大学農学部・三野徹教授に貴重なご指導を賜った。鳥取大学乾燥地研究センター・大槻恭一助教授には、実際の屋外観測におけるご指導とご協力に加え、研究のご指導も賜った。岡山大学農学部・三浦健志助教授には観測方法と研究のご指導を賜った。さらに、屋外観測においては、(財)北海道農業近代化コンサルタント・滝沢一喜氏、青山照夫氏、半澤幸博氏はじめ社員の皆様、京都大学農学部・堀野治彦助手、同大学院名村伸氏、田頭秀和氏(現農工研)から、ご協力とご支援を賜った。京都大学農学部かんがい排水学研究室・渡邊紹裕助教授、岡崎利江前事務官をはじめ大学院生と専攻生諸氏には、ご協力とご支援を賜った。参考文献の収集に当たっては、愛媛大学農学部・高瀬恵次助教授をはじめ、多数の大学と研究機関の皆様よりご協力とご支援を賜った。

また、本研究の一部は、農業土木学会第7回富士岡研究奨励金(研究課題「地表面の微気象形成に及ぼす土地利用形態変化の影響」、共同研究者;大槻恭一、田頭秀和)、および文部省科学研究費補助金(奨励研究A、課題番号02760140、04760166)の助成を受けて遂行された。第3章における文献探査の一部は、文献情報データベースBiosis Previews 1969-1989(Biosis Abstract Inc.)によって行なった(検索キーワード"evaporation" & "advection", "pan evaporation" & "evapotranspiration", "potential evaporation" & "pan")。

最後に、本研究を取りまとめるにあたり、石川県農業短期大学・加納利博教授、橋本岩夫助教授には、多大なご便宜を賜った。

記して、関係各位に心より感謝の意を表し、厚くお礼申し上げます。