

ランドサットデータによる土地利用区分と 広域蒸発散量算定手法の開発に関する研究

Study on the Estimation Method of Regional Evapotranspiration
Using Land Classification Map Obtained from Landsat Data

古藤田一雄*・甲斐 憲次****・中川 慎治*・吉野 正敏*
星 仰**・武田 要***・関 利孝****

Kazuo KOTODA, Kenji KAI, Shinji NAKAGAWA, Masatoshi M. YOSHINO,
Takashi HOSHI, Kaname TAKEDA and Toshitaka SEKI

1 はじめに

広域水資源の開発・管理等を有効適切に進めるには、流域の降雨・積雪量、蒸発散量、流出量等を定量的に評価し、その水系の水収支特性を明らかにして、合理的な水資源管理予測手法を確立する必要がある。

流域のこれらの水文諸要素のうち、蒸発散は、地形・地質や土壌などの土地条件のほか、日々の気象条件の影響を大きく受ける。さらに植物の活動にも関連するため、その分布や生長状態にも大きく依存する。したがって、上述したような地表面の特性とその分布を明らかにすることは、広域蒸発散量推定の際重要な前提条件となる。

蒸発散量の推定法は、従来から種々の方法が提案されている(古藤田, 1982)。毎日の実蒸発散量を最も精確に測定する方法は、重量秤量式の大型ライシメータを利用して測定する方法で、この測定値を参照して、地域の蒸発散量を推定できる。比較的草丈の短い植物からの実蒸発散量は、ウェイングライシメータ(古藤田, 1980)で精確に測定することができる。しかし、大形の植物に対しても、このような測定装置を流域内に数多く設置しようとする場合には、必ずしも容易ではない。

水面や平坦で湿った裸地あるいは均一で短い草地からの蒸発散量推定に対しては、種々の理論式や半経験式が提案されている(Brutsaert, 1982)。しかしながら、これらの諸法は、様々な地表面特性を有する広い地域からの蒸発散量を推定しようとする場合には、算出に必要な観測データの収録・処理などに多人の労力や時間を要する。

最近、人工衛星や航空機によるリモートセンシングデータを利用して、広域蒸発散量を推定しようとする試みが、Rosema *et al.* (1978), Soer (1980), Carlson *et al.* (1981), Schumugge and Gurney (1982) らによって、なされている。これらの方法は、従来の地上観測法に比べ、同時に測定した広領域の観測値を、コンピューターによって短時間で処理できるところに、最大の特色がある。しかしながら、上述の諸法には、わが国では適用が困難であると思われる静止衛星による日中の最高表面温度と夜間の最低表面温度の観測値を必要としたり、実際に蒸発散量を算出する場合大きな問題となる風速の観測値をどの様にして求め、これを計算式に組入れるのか等、問題点も少なくない。

本研究は、以上のような諸点を考慮した、より効率的かつ定量的な広域蒸発散量の算定手法を

* 筑波大学水理実験センター ** 筑波大学学術情報処理センター *** (財)リモート・センシング技術センター
**** 科学技術庁資源調査所 ***** 筑波大学水理実験センター(現 気象庁産業気象課) (1984年6月4日受理)

開発することを目的として、平衡蒸発型の蒸発散量算定モデルを提示し、関東地方を実験地域に選び検討を試みた。

II 解析方法

1) 地表面熱収支

蒸発・凝結の現象は、これにともなって必ず熱の交換が行なわれるので、地表面の熱収支方程式は、蒸発散量算定のための物理的基礎を与える。一般に、植被層をも考慮した地表面の熱収支は、次式で与えることができる。

$$R_n = H + \lambda E + G + \lambda_p F_p + B_p + A_v \quad (1)$$

ここに、 R_n は正味放射束密度、 H は顕熱流束密度、 E は蒸発速度、 λ は蒸発・凝結の潜熱、 G は地中熱流束、 $\lambda_p F_p$ は植物の同化・呼吸にともなう単位面積当りの比熱流束 (λ_p は同化・呼吸に対する熱交換係数)、 B_p は植被層の単位地表面積当りの貯熱量変化、 A_v は移流による比熱流束である。

ここで簡単のため、 $\lambda_p F_p$ 、 B_p 、 A_v をまとめて、次式で表わすことにする。

$$\Delta M = \lambda_p F_p + B_p + A_v \quad (2)$$

通常、 $\lambda_p E_p$ および B_p は、他の熱収支項に比べて小さいので、日単位の熱収支を計算するような場合には、無視されることが多い (Budyko, 1956; Brutsaert, 1982)。

また、有効エネルギー (Q_n) を次式で定義する。

$$Q_n = H + \lambda E \quad (3)$$

上式は、 ΔM が無視できる場合には、次式で示すことができる。

$$Q_n = R_n - G \quad (4)$$

R_n は、地上観測によって直接測定することができるが、広域蒸発散量を算定するような場合には、この方法は実用的ではない。そこで、地表面に到達した全短波放射束 R_s 、同じく下向きの長波放射束 $L\downarrow$ および地表面の温度 T_s の観測値から R_n を求める次式を本研究では用いることにした。

$$R_n = (1 - a_s) R_s + \epsilon (L\downarrow - \sigma T_s^4) \quad (5)$$

ここで a_s はアルベド、 ϵ は射出率、 σ は Stefan-

Boltzmann の定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) で、 T_s の単位は絶対温度 (K) である。

ϵ は、物体により異った値をとるが、地表面を構成する通常の物体では、ほぼ 1 に近い値をとるものが多く、本研究では $\epsilon = 0.98$ とした。 a_s は地表面の状態および太陽高度に大きく依存する。本研究では、ランドサットデータを利用して、土地利用区分を行ない、その結果を基にしてそれぞれに対応する a_s を与えることにした。 R_s および $L\downarrow$ は、地上の気象観測によって得た値を使用する。

T_s は熱赤外線センサーを搭載した静止衛星によって観測できる。わが国では、気象衛星“ひまわり”(GMS) および合衆国の NOAA や TIROS-N などが、観測をしているが、ひまわりの Scanning Radiometer (SR) の解像度は 6~7 km で、本研究のような目的に対しては、利用困難である。そこで、現段階では、 T_s は地上観測値による推定値で与えることにした。地中熱流束 G は、種々の推定法があるが、本研究では、最も簡便な次式を利用して算定することにした。

$$G = a_r \cdot R_n \quad (6)$$

ここで、 a_r は地表面の状態によって異なる比例係数で、本研究では、土地利用区分ごとに、その平均的な値を与えた。

2) 蒸発式

Priestley and Taylor (1972) は、平衡蒸発理論を発展させて、次式で与えられるような可能蒸発式を提出した。

$$E = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{J}{J + \gamma} \right) Q_n \quad (7)$$

ここで、 γ は乾湿計定数、 J は次式で定義される飽和蒸気圧曲線の温度 T における勾配 ($J = de^*/dT$) である。

$$\frac{es^* - ea^*}{T_s - T_a} = J \quad (8)$$

ただし、 $e^* = e^*(T)$ 、 $ea^* = e^*(T_a)$ 、 $es^* = e^*(T_s)$ は、それぞれ温度 T 、気温 T_a 、および表面温度 T_s に対する飽和水蒸気圧を示す。

(7) 式の α の値は、自然界において移流が最も少ないと考えられる海洋のような、広大な湿潤面に

おける観測結果では、日平均値で $\alpha=1.26$ が、得られている (Priestley and Taylor, 1972)。これに対して、 $\alpha=1$ の場合の蒸発量は、一般に平衡蒸発量と呼ばれている。筑波大学水理実験センターの草地における観測結果では、表面が濡れている場合には、 α の値は、1 から 1.26 の間の値をとることが見出された (Nakagawa, 1983)。

これに対して、地表面が乾燥しているような場合は、 α は 1 よりも小さい値をとることが考えられる。このような条件下での蒸発散量を観測して Davies and Allen (1973) は、次のような実験式を提示した。

$$\alpha = a [1 - \exp(-b\theta/\theta_f)] \quad (9)$$

ここに、 θ は地表下 5 cm における体積水分率、 θ_f は圃場容水量における体積水分率で、 a 、 b は経験定数である。Davies and Allen (1973) は砂質ロームに対する、 a 、 b の値として、それぞれ 1.26 および 10.563 を得ている。

(9)式で示された定数 a 、 b の値は、土壌の性質に依存して、異った値をとるものと考えられるので、Davies and Allen (1973) が得た値を、そのまま適用することは、若干の問題があるが、表面が非常に乾燥した場合には α が 1 よりも小さい場合があることも考慮する必要がある。

3) 蒸発散量の算定方法

地表面からの蒸発散量 (平衡蒸発量) は、移流がなく、かつ、水不足がないものと仮定すると、前述したように、 $\alpha=1$ とした(7)式によって算出できる。さらに $\lambda_p F_p$ および B_p が、他の熱収支項に比べて無視できれば、 $\Delta M=0$ とおけるので、(7)式の Q_n は(4)式の値を代入することによって求められる。

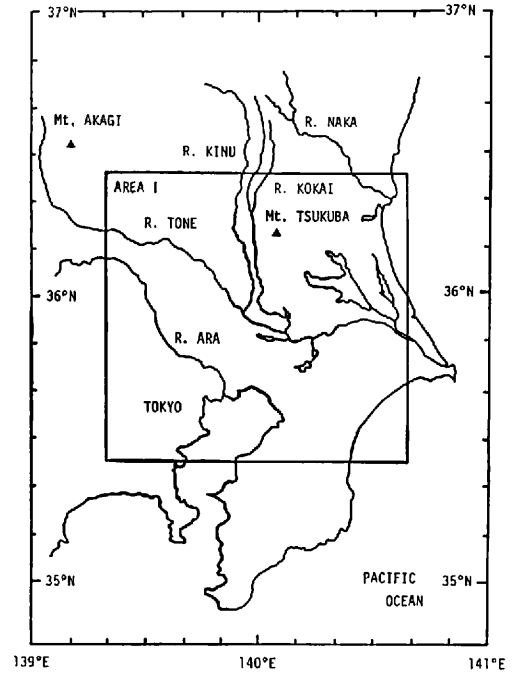
実際の計算に際しては、 Δ 、 λ および r は次のようにして計算した。

$$\Delta = 0.4476 + (0.3030669 + 0.000493 T_s + 0.000023 T_s^2) T_s \quad (\text{mb} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (10)$$

$$\lambda = (2501 - 2.37 T_s) \times 10^3 \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (11)$$

$$r = C_p \cdot P / (0.622 \lambda) \quad (\text{mb} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (12)$$

ここで、 T_s は表面温度 ($^\circ\text{C}$)、 C_p は空気の比熱 ($\equiv 1005 \text{ J kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)、 P は大気圧 ($\equiv 1013 \text{ mb}$)



第1図 広域蒸発散量算定対象地域

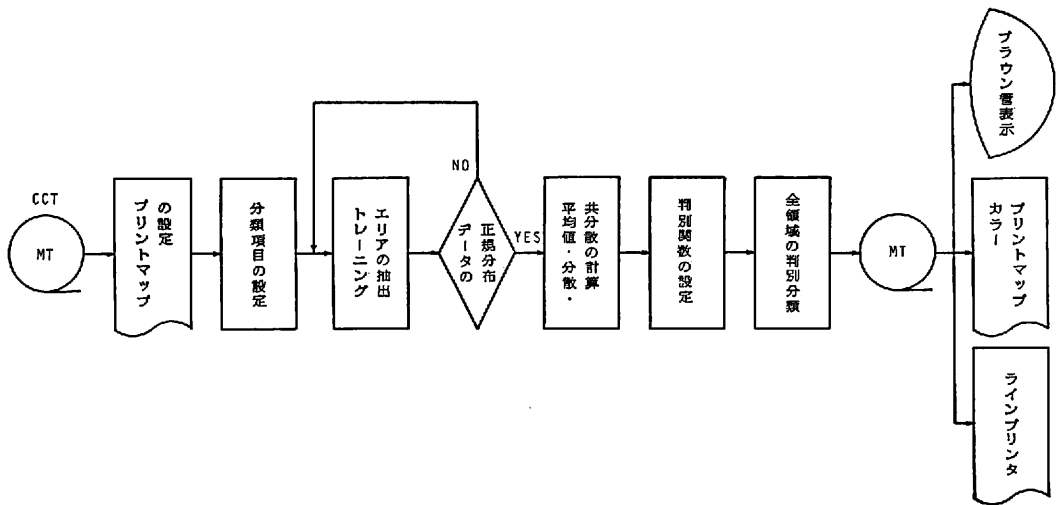
で、 C_p 、 P はその値の変動が小さいので定数で与えた。 T_s は、本研究ではアメダス等による地上気象観測網のデータを利用して与えることにしたが、将来、より解像度の良い静止衛星による観測が実施されれば、これらの観測値の利用も考えられる。

III. 広域蒸発散量の算定

1) 研究対象地域

広域蒸発散量の研究対象地域として、関東平野の中央部、すなわち東京を含む、利根川水系の中下流部を選定した。第1図に示されている AREA I (北緯 $35^\circ 25' 00''$ 、同 $36^\circ 25' 00''$; 東経 $139^\circ 20' 00''$ 、同 $140^\circ 40' 00''$ の経・緯度線で囲まれた地域) が、その対象地域で、総面積は $13,315 \text{ km}^2$ である。地域の東北部には八溝山地の一部 (加波山 708m, 筑波山 876m)、西北部は足尾山地の山麓部を含むが、大部分の地域は標高 100m 以下である。

地表被覆 (land cover) を区分するための、リ



第2図 CCTデータの解析手順

第1表 土地利用の分類基準

No.	分類項目	分類基準
0	その他	雲および分類不能地域
1	水域	河川・湖沼・海洋（必要に応じて、淡水域、海域に分ける）
2	都市域	建築物の密度が高く、コンクリート・アスファルト面が優占する地域
3	森林	常緑樹林、落葉樹林（必要に応じて両者を細分する）
4	乾田・草地	湿田と畑の中間の土壤水分を有する農地
5	準都市域	宅地に植物・裸地が混在している地域
6	湿田	水稻を栽培し、土壤水分の多い農地
7	畑	麦・野菜等を栽培し、水田・草地に比べ乾燥している農地

モートセンシングデータは、1982年10月22日9時頃関東地方上空に飛来した、ランドサット4号（path-row；115-35）のCCT（Computer Compatible Tape）データを使用した。CCTは宇宙開発事業団によって位置補正をほどこされたもので、有料で入手することができる。

2) ランドサットデータの解析方法

解析に使用したCCTのバンドは4つで、それぞれの波長域は、バンド4（0.5～0.6 μ m、緑色）バンド5（0.6～0.7 μ m、赤色）、バンド6（0.7～0.8 μ m、近赤外線）、バンド7（0.8～1.1 μ m 近赤外線）である。バンド8（10.4～12.1 μ m、熱赤外線）は、故障中のため、本研究では使用しなかった。

第2図は、ランドサットデータの解析手順をフ

ローチャートで示したものである。以下、手順に従って、簡単な説明をする。

①対象地域の設定 カラーグラフィック・ディスプレイ管に表示されたランドサット画像の目標となる数地点を選び、地図上で読んだ緯度、経度の値と比較して、座標値の幾何学補正をした後、計算および最終出力としてプリントマップする地域を設定した。このAREA Iの地域内に含まれるランドサットデータは、1バンド当り約358万ピクセルとなった。したがって、4バンドでは、総計約1432万個のデータを扱うということになり膨大な計算量となる。そこで、オリジナルデータを1/16に間引し、1バンド当り約22.38万個のデータ数にして以後の処理を行なった。

②土地利用の分類項目 土地利用の分類項目や

分類基準は、国土地理院（1974）の土地利用図式適用規定などによって、すでに定められているが、本研究は、蒸発散量の推定を目的とした土地利用区分としたため、国土地理院の分類と若干異っている。土地利用区分の項目数は、何回かの試行をくりかえした後、最終的には、第1表に示すような項目に分類した。

③土地利用区分 クラスタ分析の手法を適用した後、それを参照しながら、最尤法(maximum likelihood method)によって、判別・分類を行ない(星, 1981), しきい値は0.1をとった。

④出力 土地利用区分図の最終出力は、インクジェット方式のカラー・プロッタ(星・柴田, 1982)に、1/30万の縮尺で出力させた。

⑤蒸発散量の計算 蒸発散量は土地利用によって区分された各分類項目ごとに、それぞれのパラメータが与えられたサブルーチン・プログラムで計算して求めた。計算は、関東地方の夏の典型的な晴天日を想定して、第2表に示すような地表面温度とパラメーター a_s , a_r の値を設定し、表面に到達した全短波放射量 $R_s=180 \text{ Wm}^{-2}$ ($371 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$), 下向き長波放射量 $L_{\downarrow}=400 \text{ Wm}^{-2}$ ($824 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$) を与え、 $\alpha=1.0$ として、各土地利用区分ごとの蒸発散量(平衡蒸発量)を算出した。

以上のランドサット CCT その他のデータの計算および画像解析は、すべて筑波大学学術情報処

第2表 関東地方の夏季の土地利用区別日平均表面温度(T_s), アルベド(a_s)および地中熱流量係数(a_r)

No.	土地利用区	T_s °C	a_s	a_r
1	水域	25.0	0.06	0.20
2	都市域	32.0	0.40	0.35
3	森林	25.0	0.15	0.08
4	乾田・草地	26.0	0.18	0.10
5	準都市域	30.0	0.30	0.30
6	湿田	25.0	0.15	0.05
7	畑	27.0	0.20	0.20

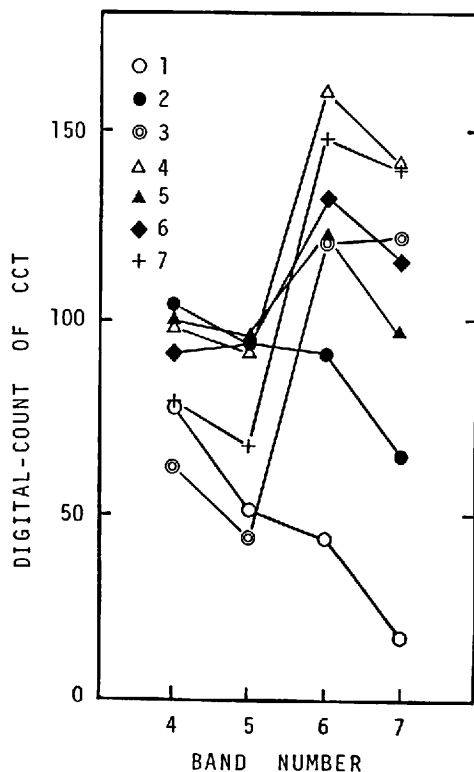
理センターの FACOM M-200 大型計算機と、リモートセンシング画像処理システム(TSUKU SYS)を利用して行った。

IV 結果および考察

1) 地表面のスペクトル特性

第3表は、ランドサットデータ(CCTカウント)を正規化した後の、各土地利用区分ごとの平均値および標準偏差値を示したものである。第3図は同じく、土地利用区分ごとの分光特性を示している。

各分類項目の分光特性は、細部では多少の差異がみられるが、これまでの報告(例えば、二宮ほか, 1981)と大差のない結果が得られた。すなわち、①水域では、放射輝度(CCTカウント)が他の土地利用地区に比べて、全波長域にわたって



第3図 各種地表面の分光特性

第3表 土地利用区分別・波長帯別放射輝度 (CCTカウント)* の平均値, 標準偏差

No.	帯域 項目	バンド 4		バンド 5		バンド 6		バンド 7	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1	水域	77.1	6.1	51.0	4.7	43.5	12.6	17.6	6.7
2	都市域	104.0	5.8	94.9	7.1	91.8	6.3	65.6	6.3
3	森林	63.6	6.2	44.3	8.0	120.8	26.7	121.9	29.3
4	乾田・草地	98.2	8.2	92.0	11.1	160.1	17.3	141.6	14.3
5	準都市域	101.1	7.0	97.0	11.9	121.4	12.9	98.0	13.9
6	湿田	92.9	12.6	94.2	20.4	133.8	21.3	116.4	21.0
7	畑	79.6	15.4	68.3	20.9	148.1	26.4	140.8	26.8

* 数値は正規化した後の値である

第4表 30万分の1土地利用区分図の判別効率

		1 水域	2 都市域	3 森林	4 乾田・草地	5 準都市域	6 湿田	7 畑
1	水域	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	都市域	0.0	91.7	0.0	0.0	8.3	0.0	0.0
3	森林	0.0	0.0	68.6	7.7	0.0	2.4	21.3
4	乾田・草地	0.0	0.0	0.0	88.1	2.4	7.1	4.2
5	準都市域	0.0	1.8	0.0	1.8	75.1	19.6	1.8
6	湿田	0.0	0.0	0.5	14.2	14.7	61.9	8.6
7	畑	0.0	0.0	21.6	6.2	0.6	10.5	61.1

小さく、かつ波長が大きくなるほど、すなわちバンド4, 5, 6, 7の順に輝度が小さくなっている。これに対して②乾田・草地, 畑, 湿田や森林などの農林地域は、バンド4, 5に比べて、バンド6, 7の値が著るしく大きくなっている。これは、近赤外域において植物の葉が高い反射率を有することから、植物の存在が反映されているものと考えられる。

③都市域は、バンド4, 5, 6, 7の順に値が小さくなって行くが、それぞれの値は水域の値よりも大きい。④準都市域は、都市域と農林地域の中間の値を示し、両者の中間的な性格を有する地域であることがわかる。

2) 分類の判別効率

第4表は、土地利用区分(1/30万図幅)の判別効率を示したもので、水域, 都市域および乾田・草地は、それぞれサンプル単独で80%以上の効率となっている。判別効率があまり良くないのは、

湿田と畑で、いずれも60%程度の値となっている。前者は乾田・草地, 準都市域と競合しているが、これは湿田がこれらの地域と細かく入り組んでいる結果を反映したものと考えられる。また後者は、森林と競合しているが、これは畑に栽培された作物が、森林の特性とやや類似しているものがあつたためと考えられる。

第4図は、カラー・プロッターで出力したリモートセンシングによる土地利用区分図を示したものである。これを、国土地理院(1983)が、1/5万地形図に図示されている土地利用を基にして作成した1/20万図幅の土地利用図と照合してみた結果細部では若干の差異はあるものの、きわめて良く一致することが判った。

3) 蒸発散量

土地利用区分ごとにまとめた、それぞれのピクセル数, 面積 (km²), 面積百分率 (%), 日蒸発散量 (mm/day) および面積蒸発散量 (m³/day)

第5表 土地利用区分別の夏季の平均日蒸発散量（平衡蒸発量）の推定値〔30万分の1 関東地方〕

No.	土地利用区分	ピクセル数	面積 km ²	百分率 %	蒸発散量	
					mm/day	m ³ /day
1	水域*	27,204	1,608	12.1	3.21	3.165×10 ⁶
2	都市域	8,354	497	3.7	0.43	0.212 "
3	森林	25,611	1,524	11.4	3.20	4.881 "
4	乾田・草地	27,572	1,640	12.3	2.84	4.656 "
5	準都市域	41,587	2,474	18.6	1.20	2.959 "
6	湿田	49,932	2,970	22.3	3.31	9.825 "
7	畑**	43,742	2,602	19.5	2.30	5.982 "
	合計	223,822	13,315	100.0	—	31.680 "
	陸地からの蒸発散量	196,798	11,707	—	2.44	28.515 "

*水域は、河川・湖沼のほか、海洋も含む

**裸地も含む

が、第5表にまとめられている。

この結果から、最も広い面積を占めるのは湿田で、全面積中の22.3%を占めている。次いで広い面積を占めるのは畑（19.5%）で、以下準都市域（18.6%）、草地・乾田（12.3%）となっている。都市域の占める面積は、全地域の3.7%と算定された。単位面積当りの日蒸発散量は、最も多い地域は湿田からの3.31 mm/dayで、次いで水域 3.21mm/day、森林3.20mm/dayの順になっている。水域からの蒸発量は、河川・湖沼と海洋からのを区分していないので、これを全地域から除外し、陸地だけからの蒸発散量についてみると、全陸地からの平均蒸発散量は2.44mm/dayとなり、その総量は 28.5×10^6 m³/dayと見積られる。これは毎秒当りの水量に換算すると約300 m³となる。

V あとがき

ランドサットデータによって土地利用区分をし、これに平衡蒸発型の蒸発散式を適用して、広域蒸発散量を推定する方法が提示された。

この蒸発散算定モデルは、観測の困難な風速や水蒸気圧のデータを必要としないところに特色がある。このことは、ペンマン法が風速や水蒸気圧のデータを必要とし、熱収支ポエニ比法が水蒸気圧のデータを必要とするのに対して、本方法は

そのようなデータを必要としないため、風速や水蒸気圧のデータが得られない地域では、蒸発散算定の有力な手段となることを示している。

しかしながら、精度の良い実蒸発量を推定するためには、種々の地表面に対するパラメータ α の値が正しく定められなければならない。現在の段階では、この α の性格については十分明らかにされていないとは言えない。種々の地表面における α の振舞いやその特性の解明は、今後の課題と考えられる。

謝 辞

本研究をまとめるにあたっては、学術情報処理センターの石田智之技官および同研究生の長峰克己氏の協力を得た。ここに感謝いたします。また、本研究は、科学技術庁科学技術振興調整費の一部を使用した。記して謝意を表します。

文 献

- 建設省国土地理院（1974）：2万5千分の1土地利用図図式適用規程。
- 建設省国土地理院（1983）：関東地方土地利用図（縮尺20万分1）。
- 古藤田一雄（1980）：ライシメーター蒸発散量とエネルギー収支法による蒸発散量の比較。筑波大学水理

- 実験センター報告, 4号, 1-9.
- 古藤田一雄 (1982) : 耕地における水収支. 土壌の物理性, 45号, 14-17.
- 古藤田一雄・甲斐憲次・中川慎治・黒坂裕之・吉野正敏・武田要・関利孝 (1984) : 航空機による地表面温度の遠隔測定と地表面熱収支. 筑波の環境研究, 8号, 113-120.
- 星 仰 (1981) : リモートセンシングデータの画像処理システム, 第7回リモートセンシングシンポジウム, 45-48.
- 星 仰・柴田猛 (1982) : カラー・プロッタによる LANDSAT 画像の全体図出力. 日本写真測量学会昭和57年次学術講演会発表論文集, 117-120.
- 二宮泰・田中総太郎・杉村俊郎・木村宏・中山裕則・関典嗣 (1981) : 20万分の1 地表分類 LANDSAT 地図の製作に関する研究. 地図, 19, 1-13.
- Brutsaert, W. (1982) : *Evaporation into the atmosphere*. D. Reidel Pub. Co., 299 p.
- Budyko, M. I. (1956) : *The heat balance of the earth's surface*. Gidro Meteor. Izd., Leningrad.
- 内島善兵衛訳 (1959) : 『地表面の熱収支』 河川水温調査会, 181 p.
- Carlson, J. N., Dodd, J. K., Benjamin, S. G. and Cooper, J. N. (1981) : Satellite estimate of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. *J. Appl. Meteorol.*, 20, 67-87.
- Davies, J. A. and Allen, G. D. (1973) : Equilibrium, potential and actual evaporation from cropped surface in southern Ontario. *J. Appl. Meteorol.*, 12, 649-657.
- Nakagawa, S. (1983) : Study on evapotranspiration from pasture. Doctor of Science Thesis, Inst. Geoscience, Univ. Tsukuba, 141 p.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972) : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weath. Rev.*, 100, 81-92.
- Rosema, A., Bijleveld, J. H., Reiniger, P., Tassone, G., Blyth, K. and Gurney, R. J. (1978) : TELL-US, a combined surface temperature, soil moisture and evaporation mapping approach. *Proc. 12th ERIM Symp. on Remote Sensing of Environm.* Manila, 2267-2276.
- Schumugge, T. and Gurney, R. (1982) : Evapotranspiration and remote sensing. *The First U. S. - Japan Evapotranspiration and Snowpack Properties Research Project Meeting*, Tokyo, 15 p.
- Soer, G. J. R. (1980) : Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. *Remote Sens. Env.*, 9, 27-45.