

ランドサットおよび標高データによる 広域蒸発散量算定システムの開発

Development of the Estimation Method of Areal
Evapotranspiration Using Landsat and Elevation Data

星 仰*・内田 諭*・古藤田一雄**・河村 武***

Takashi HOSHI, Satoshi UCHIDA, Kazuo KOTODA
and Takeshi KAWAMURA

I はじめに

地表面における水収支を考えると、得られる水分量としては降水、地表水の流入（河川、水路等を含む）そして地中水からの滲出が挙げられ、また失われる水分量としては蒸発散、地表水の流出、地中水への浸透が挙げられる。これらのうち蒸発散量は気象条件に加えて、地形・土壤および植生状態に依存する量であり、その広域分布の算定には対象地域全域にわたる情報が必要である。

地表面の情報を広域にわたって得るために、リモートセンシングデータを活用することが有効であると考えられる。古藤田ほか（1984）および石田・星（1985）はランドサットデータより土地利用を分類し、各土地利用毎に与えられたパラメータを用いて広域蒸発散量を算定する手法を示した。この方法は、平均的な気象条件を仮定しており、また地形の影響を考慮していないために、実蒸発散量の推定精度に問題が残っている。そこで、古藤田（1986）およびKotoda（1986）は蒸発散の算定に関する従来の方法を整理して、気象観測値をパラメータとして与え、また放射量を詳細に計算する実蒸発散量の推定法を提案した。そしてこの推定方法は他の方法と

の比較の結果、十分な精度を持つ推定方法であることが示されている。

本稿は、上述の古藤田の方法を基に開発した、蒸発散量の広域的分布を算定することが可能な計算システムについて説明したものである。システムの特徴は、土地利用をランドサット MSS データを用いて分類し、標高値を国土数値情報 1/4 メッシュ標高データから得ることによって、日本全国への適用を可能とした点、そして画像処理可能な周辺装置を用いて任意の形状の境界を持つ地域の分布量を示すことを可能とした点である。

以下、本システムの概要と蒸発散の計算式とを説明し、つぎに熊本市周辺を対象とした計算例を示し、最後に適用の可能性と今後の課題について述べる。

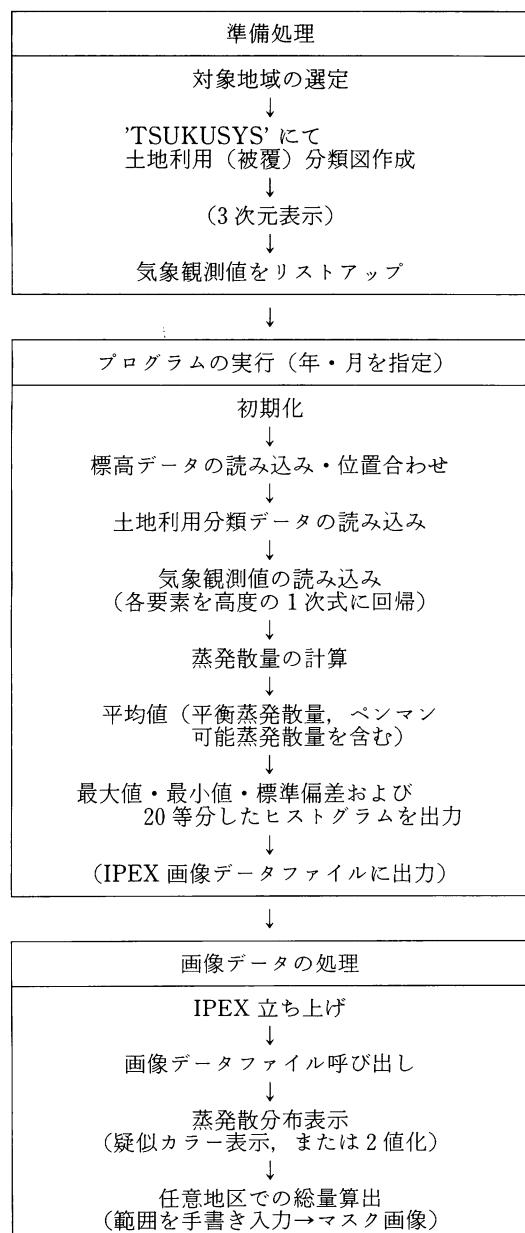
II 蒸発散量算定システム

1. 処理の概要

蒸発散の算定に関する処理は 3 段階に大別できる。第 1 段階は、対象地域の選定から土地利用分類データの作成、そして計算時に必要な気象観測値をリストアップする準備処理である。第 2 段階は、蒸発散計算プログラムの実行であり、第 3 段階は、第

* 筑波大学学術情報処理センター ** 筑波大学水理実験センター *** 筑波大学地球科学系

2段階で作成された蒸発散量の分布を表わす画像データのカラー表示や任意の範囲の蒸発散量の算定を行うことである。第1図は本システムの処理の流れの概要を示したものである。



第1図 蒸発散算定システムの処理の流れ

対象地域の空間的スケールは、計算単位メッシュの大きさにより規定される。ランドサット MSS データ1画素の地上での大きさは約80×80 mであり、また国土数値情報1/4メッシュの大きさは緯度方向に7.5秒、経度方向に11.25秒であり、これは北緯35度で約230×280 mである。ランドサットデータの画素の大きさは幾何補正を行った後に変化はするが、その代表的な大きさは数10 mである。本システムでは、国土数値情報標高データを内挿してランドサット幾何補正後データに位置合わせを行うことにしている。後述するリモートセンシング画像解析システムによってランドサットデータから土地被覆を分類できる領域の大きさの制限は512 ライン×500 カラムである。したがって、計算対象地域の面積の代表的な値は約10³ km²である。この値は、日本の流域の大きい河川の流域面積に比べて1桁小さい値である。

ランドサットデータを間引きして対象地域を切り出せば対象地域の面積を大きくすることが可能であるが、その場合には各画素の空間的代表性が低下するため計算精度が悪くなることが考えられる。また、対象地域の位置や形状の関係で1画面で処理できない場合には、対象地域を複数の部分地域に分割して計算すれば問題はない。

土地利用分類データは、筑波大学学術情報処理センター開発のリモートセンシング画像データ解析システム 'TSUKUSYS' (星, 1985) を用いた分類結果より得た。'TSUKUSYS'には画像データの分類のために、教師なし分類手法としてウォード法、セントロイド法、群平均法、メディアン法、最長距離法、最短距離法が用意されており、また教師付き分類手法として最大尤度法、判別分析法、ユークリッド距離法が用意されている。'TSUKUSYS'を活用することにより、ランドサットデータから土地被覆の分類を行い、それを対応する土地利用に置き換え土地利用分類データファイルが作成される。土地利用の分類項目数は、Kotoda (1986) に記載されている11項目であり、各項目の内容は第1表に示した通りである。蒸発散量の計算においては、おののの項目に対応したアルベド ρ および地中熱フ

第1表 土地利用分類項目

1 :	水面
2 :	都市（密集地域）
3 :	集落
4 :	森林（常緑）
5 :	森林（落葉）
6 :	果樹園
7 :	桑畠等
8 :	草地
9 :	水田
10 :	菜園
11 :	裸地

ラックスの係数 C_r の値が用いられている。

ここで対象地域の地形あるいは土地利用の分布を概観するために、標高データとランドサットデータ・土地利用分類データとを組み合わせて3次元表示が可能である。これは蒸発散量計算とは直接的関係はないが、対象地域の概況を視覚的に捉えられる点で有効である。

計算時に必要とする気象観測値は、観測地点の標高および気温、降水量、風速、相対湿度、日照時間の月間値である。これらは測候所以上の観測地点において得られており、実際の処理にて必要とする値は必ずしも対象地域内になくとも構わない。蒸発散量の計算を実行するためには最低1地点の気象観測値が存在すればよいが、その場合には対象地域全体が同一の値を持つことになり、起伏のあるような地域に対しては適当とは言えない。また、気象観測地点が2地点の場合でも特異値の影響を強く受けるため、3地点以上存在することが望ましいと考えられる。対象地域およびその周辺に適当な数の観測地点が存在しない場合には、アメダス観測点の値を用いることが可能である。ただし、アメダス観測点では上記の気象要素のうち相対湿度の観測値だけが欠如しているので、これを適当な方法で値を与える必要がある。

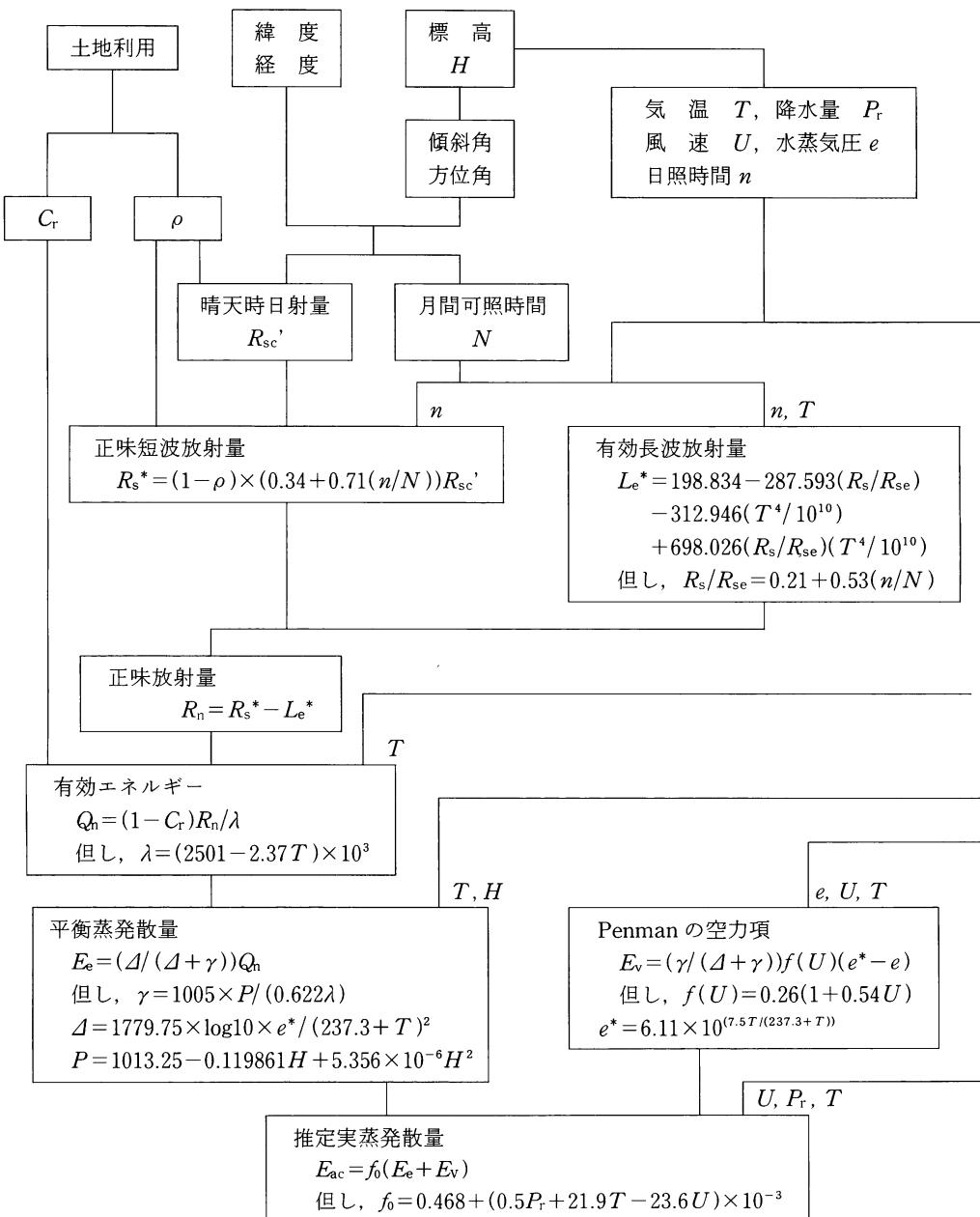
蒸発散量は1月を単位として計算される。計算の内容を順に説明すると、初期化が行われた後、標高データ・土地利用分類データ・気象観測値が順次読み込まれて処理される。気象観測値は数地点分しか

得られないことが通常であるので、ここでは各要素を高度に対して1次式で回帰して高度の1次関数の形を用いた。ただし、相対湿度は水蒸気圧に換算してから回帰式を求めた。こうして、蒸発散量を計算する際に必要な各気象要素の値は、メッシュ毎に標高値から得られることになる。蒸発散量はメッシュ単位で計算されるが、その詳細は次節にて示す。メッシュ毎に計算された蒸発散量から、全域の平均値・最大値・最小値・標準偏差が計算され、最大値から最小値までを20等分したヒストグラムが 출력される。同時に、平衡蒸発散量およびベンマン可能蒸発散量の全域の平均値の計算を行っている。また、メッシュ毎に計算された蒸発散量の分布状態を分析することができるよう、蒸発散量の大きさを濃度値に置き換えた画像データとして出力できるように設計されている。

出力された画像データの処理には、ハードウェアとしてFIVIS (Fujitsu Integrated Visual Information System) を用い、ソフトウェアとしてメーカー開発の画像処理ルーチン IPEX (Image Processing Expert System) を利用することにした。IPEX を利用することにより、コマンドを入力するだけの対話型処理で蒸発散量の分布の特徴を抽出することができる。例えば、分布の全域的性状を見るには疑似カラー表示あるいは適当なしきい値による二値化が有効である。疑似カラー表示とは、画素の濃度値に対応して指定した色を与える表示方法であり、蒸発散の分布の対象地域内の地域差を見るのに適している。二値化とは、しきい値によって区切られた範囲の濃度値を持つ画素だけをON、その他をOFFとして画像を表示する方法であり、蒸発散量の大きい（小さい）地区を抽出して示す場合に適している。また、任意の境界で囲まれた範囲を手書き入力することにより、その区域内の分布を見ることができる。メニューとしては、ヒストグラムの表示および統計量計算（最大値、最小値、平均値、分散、標準偏差）があり、平均値に区域の画素数をかければ区域全体の蒸発散量を求めることができる。

2. 蒸発散量の計算

蒸発散量の計算の流れは第2図に示した通りであ



第2図 蒸発散量計算の流れ図

り、図の上方から下方へと計算が進められる。計算に際して各気象要素の値は前述のように高度の関数値として得られている。図中晴天時日射量の計算式

が示されていないが、これは藏田・岡田（1984）の計算式に従っており、直達日射量・天空日射量・地表面反射による日射量の3成分の和を日出から日没

までシンプソンの公式により積分を行っている。縦線の横に記されている記号は、その下のブロック内の計算で使用される気象要素を表している。図に示されていない各記号の意味は以下の通りである。 C_t , ρ は前節で述べたようにおのの地中熱フラックスの係数とアルベドである。 R_s は全日射量、 R_{se} は大気圈上界での太陽放射量、 λ は蒸発における潜熱、 γ は乾湿計定数、 Δ は飽和水蒸気圧の温度に対する勾配 ($=de^*/dT$) である。 P は気圧であり、ここでは標準大気を高度の2次式で近似したものを、そして e^* は飽和水蒸気圧であり、Tetens の実験式を用いている。また、 f および f_0 は経験式より得た変換係数であり、ペンマンの可能蒸発散量とは実蒸発散量の計算において $f_0=1$ とおいた場合の値である。

III 熊本市周辺地域を対象とした計算例

1. 対象地域の概要

土地利用分類の基礎資料としては、1981年3月5日に抽出されたランドサットMSS画像データ(Path-121, Row-37)を使用した。これより、熊本市およびその周辺の北緯32度42分21.9秒、東経130度39分8.0秒から北緯32度51分41.8秒、東経130度50分13.2秒の範囲をライン数512、カラム数500の画像データとして切り取り、これを対象地域とした。本地域の地形を概観すると、南西部は白川および緑川の沖積地の標高10m以下の低平な地域である。中央部から北東部にかけては標高数10mの台地状の地域で、北西部と南東部が標高300~400mの山地となっている。熊本市街地は台地状の部分の末端を中心に広がっている。第3図は画像データのカラー合成図を3次元表示したものであり、図の中央からの距離40km、水平からの角度30°で南南西の方角から見ており、垂直方向の拡大率は3.5である。また、本地域内において必要な気象観測値が得られる観測地点は熊本地方気象台(標高38m)の1地点であるので、近傍に位置する人吉測候所(標高147m)および阿蘇山測候所(標高1143m)における観測値を合わせて用いることにした。

2. 土地利用の分類結果

土地利用の分類は、ランドサットMSSのバンド4~7の4バンドの画像データにセントロイド法を適用して、地形図を参照しながら何度かの試行を繰り返して行った。分類項目のうち、常緑林と落葉林、あるいは果樹園、桑畠、菜園等を識別することは難しい。その理由の1つに山の陰等の影響で同じ土地利用種内での分光特性の広がりが大きくなっていることが挙げられる。そこで今回は、'TSUKUSYS'において分類できる最大の項目数である20項目にまず分類し、それを第1表に示した11種類に再分類を行った。

分類の結果、水田が最も卓越しており約24.3%を占めている。ついで、果樹園(19.0%)・菜園(17.5%)の構成比率が高くなっているが、これは、対象地域において山地部の南側斜面を中心にみかん園が広く見られる点と台地状の部分を中心に近郊野菜園が多く存在する点に対応しているものと思われる。また、都市域と集落域の構成比率はそれぞれ2.2%, 7.3%となっている。

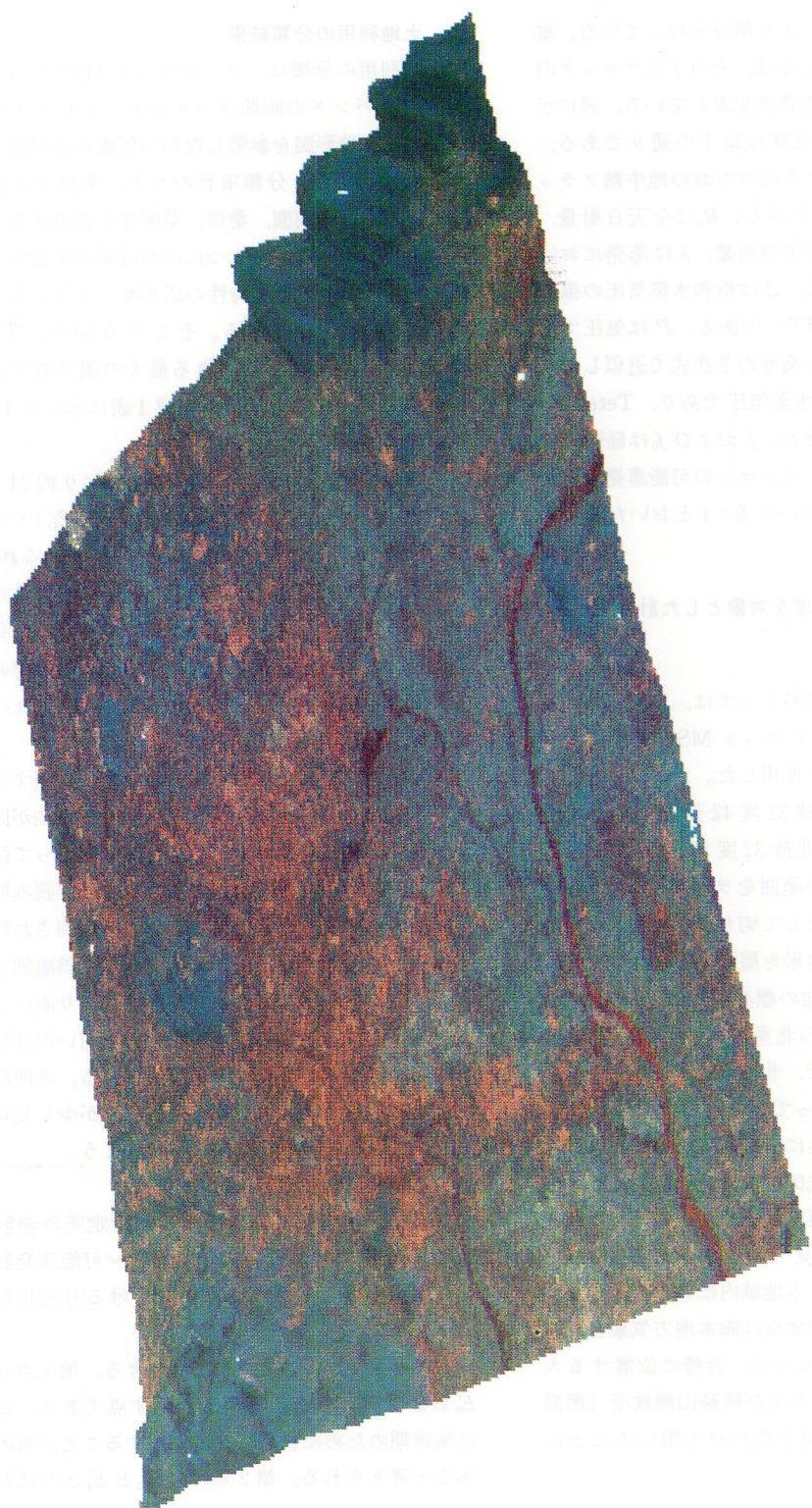
第4図は都市または集落域そして水田に関する分布を示したものである。図より、熊本市街地が図のほぼ中央部に広がり、そこから周辺に向かって数本の帯状を成して集落域が伸びている様子が読み取れる。樹木に囲まれた集落が集落として識別され難い点や堤防の陰の部分の一部が集落として誤識別されている点が指摘できるが、判別率はかなり高いと思われる。水田に関しては、白川、緑川沿いの沖積地を中心に広がっている様子が読み取れる。北西部の山地中に誤識別されたと思われる部分が少し見られるが、全体的な判別率は高いと言えよう。

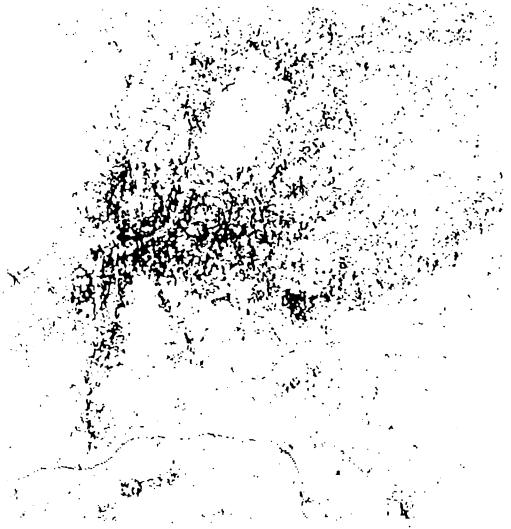
3. 蒸発散量の計算結果

対象地域全域に渡って平均した推定実蒸発散量 E_{ac} 、平衡蒸発散量 E_e そしてペンマン可能蒸発散量 E_p の計算結果として、1985年における月変化を第5図に示す。

図よりまず以下の2点が指摘できる。第1点は、 E_e および E_p が6月に極小値を示す点であり、これは梅雨期のために日照時間が低下することが原因であると考えられる。第2点は、 E_{ac} と E_e との比を見

第3図 対象地域のカラー合成図の3次元表示
(D=40 km, $\theta=22.5^\circ$, $\phi=30^\circ$, M=3.5)





CITY &
SETTLEMENT



PADDY FIELD

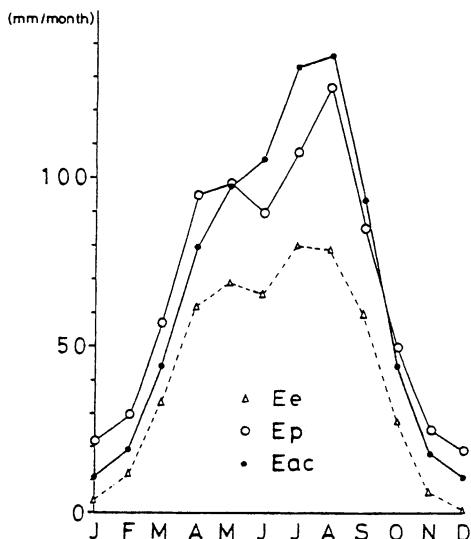
第4図 セントロイド法によって分類された都市・集落域と水田の分布

ると、春期（3～5月）においては比の値が相対的に大きく（0.71～0.78）、秋期（9～10月）においては比の値が相対的に小さく（0.63～0.64）なる様子が見られる点である。このことは、春期には日照

時間が長くなっているが蒸発散量に直接的に影響を与える気温が相対的に低く、秋期にはこの逆となる環境の相違に対応しているものと考えられる。以上の2点はいずれも従来から指摘されている点であり、定性的にモデルの妥当性を示すものであろう。

一方夏期において E_{ac} が E_e , E_p に比べて大きな値を取り、 f_0 が1より大きくなっている様子が見られる。これは f_0 の式から明らかかのように気温が高く降水量が多いためである。ちなみに、6月と7月の対象地域全域の平均降水量はおのおの495.2 mmと451.9 mmである。この値は熊本市周辺においてはいずれも平年値を少し上回る程度であり、とりわけ大きい値ではない。降水量の多かった例として、大きな被害を出した1982年7月には平均降水量は1176.0 mmに達しており、この月の f_0 の値は1.57である。

f_0 の値は通常1より少し小さい程度であるとされているが、ここで得られた値が現実と乖離しているかどうかは比較すべき実測値がないので判断できない。ただ、 f_0 の式の各係数が筑波大学水理実験センターでの測定値より決定されており、この点に問題



第5図 推定蒸発散量の月変化（1985）

がある可能性が考えられる。しかし、月々の変化パターンが定性的に良く表わされており、この式のままでも少なくとも蒸発散量の分布の大小関係や時間変化を分析する上では有効な結果が得られるものと思われる。

第2表は1980年から1986年までの蒸発散量と降水量の年間値を示したものである。表より、蒸発散量の経年変動は降水量の変動に比べて小さく、その結果蒸発散量の降水量に対する比率が年によって大きく異なっていることがわかる。すなわち、比較的少雨の年には降水量の約40%が蒸発散し、残りの約60%が流出または地中へ浸透するのに対し、多雨年には流出・浸透率が約75%に達している。ただし、蒸発散量の経年変動は相対的には小さいものの、その最大値と最小値との差は約12%あり、この値は水収支を考える上で無視できない量であると思われる。

蒸発散量の分布の出力例として、ラインプリンターに出力した計算結果を第6図に示す。第6図には1985年1月および1985年7月の例が示されている。図中ヒストグラムは、最大値と最小値の間を20等分しており、各階級値の左側に記されている数字は構成比(%)である。また両月に対応する蒸発散量の分布を疑似カラー表示したものが第7図(1月)および第8図(7月)である。これらはおののおのの月の蒸発散量の値を独立に用いて、相対的に値の小さい部分を青く、大きい部分を赤くするようなカラー分布に置き換えたものである。

図に現われている各月の分布の特徴を挙げると以下の通りである。まず、1月は7月に比べて太陽高度が低いために、山の北側斜面での値が南側斜面で

の値に比べて顕著に小さくなる様子が見られる。ことに1月には、地表面からの長波放射量が入射する短波放射量を上回り正味放射量が負となる部分も見られる。また、水田からの蒸発散量に着目すると、1月には集落部分よりは少し大きい程度の値であり全体の中でも大きい方ではないが、7月には最も大きい値を持つ地域の1つであることがわかる。

このように地形や土地利用種の違いが季節による蒸発散量の分布形態に変化を生じさせる。そこで、各月の蒸発散量のヒストグラムを見ると、1月には狭い範囲に大部分が集まっているのに対し、7月には幾つかのピークが認められる。値域、すなわち最大値と最小値との差、に対する標準偏差の比を計算してみると、1月は0.090となり、7月は0.249となっている。このことから、土地利用種の違いが蒸発散量に与える影響は夏期においてことに顕著であることがわかる。

IV 適用の可能性と今後の課題

前章の結果より、本蒸発散量算定システムはかなりの精度で広域蒸発散量が算定可能であることが示された。近似式の各係数と適用対象範囲の点に課題が残るもの、全国同一基準のしかも入手の容易な資料を用いて $10^3 \sim 10^4 \text{m}^2$ の区域を単位として $10^1 \sim 10^3 \text{km}^2$ の広域の蒸発散量の分布が簡便な処理で得られることの有効性は評価できるものと思われる。ことに、過去の気象データを用いて長期間の変化を再現することが可能な点が、水循環や水管理の問題に対して有意な情報を与えることが考えられる。

さらに、本システムの特徴の1つとして、土地利

第2表 年間蒸発散量と降水量の変化(cm/year)

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
E_e	47.06	49.09	49.38	49.57	49.11	50.29	48.54
E_p	71.93	76.03	76.24	76.23	76.31	80.51	77.58
E_{ac}	71.56	71.08	73.92	74.72	72.07	79.36	73.01
P	285.08	175.82	232.01	219.01	178.65	231.57	179.75
E_{ac}/P	0.251	0.404	0.319	0.341	0.403	0.343	0.406

注) E_e は平衡蒸発散量、 E_p はベンマン可能蒸発散量、 E_{ac} は実蒸発散量、 P は降水量。

ESTIMATED EVAPOTRANSPIRATION (UNIT : MM/MONTH)

YEAR : 1985 MONTH : 1
 LATITUDE : 32 D 42 M 21.9 S LONGITUDE : 130 D 39 M 8.0 S
 LATITUDE : 32 D 51 M 47.8 S LONGITUDE : 130 D 50 M 13.2 S
 LLN : 512 CCN: 500 DX : 34.65 M DY : 34.24 M MESH : 0.11866E+04 SQUARE METERS

MEAN= 11.33 MAX = 20.28 MIN = -0.25 SD = 1.84 EXCLD= 514
 EE : 4.14 EP : 21.99 PRECIPITATION : 21.64

↓
 MAX+
 0.01I
 0.05I
 0.28I
 0.65I
 1.13I*
 2.67I**
 10.54I*****
 12.48I*****
 33.25I*****
 7.49I*****
 23.39I*****
 5.33I****
 1.25I*
 0.65I
 0.31I
 0.18I
 0.07I
 0.04I
 0.01I
 0.01I
 MIN+

(JAN)

MAX+
 6.25I*****
 0.59I
 34.25I*****
 3.04I***
 2.06I**
 19.09I*****
 2.02I**
 3.56I***
 0.71I
 0.18I
 0.06I
 0.03I
 17.21I*****
 0.27I
 5.38I****
 1.90I*
 0.95I
 0.00I
 2.22I**
 0.02I
 MIN+

(JUL)

ESTIMATED EVAPOTRANSPIRATION (UNIT : MM/MONTH)

YEAR : 1985 MONTH : 7
 LATITUDE : 32 D 42 M 21.9 S LONGITUDE : 130 D 39 M 8.0 S
 LATITUDE : 32 D 51 M 47.8 S LONGITUDE : 130 D 50 M 13.2 S
 LLN : 512 CCN: 500 DX : 34.65 M DY : 34.24 M MESH : 0.11866E+04 SQUARE METERS

MEAN= 132.82 MAX = 156.09 MIN = 82.67 SD = 18.29 EXCLD= 514
 EE : 80.34 EP : 107.63 PRECIPITATION : 451.91

第6図 蒸発散量計算結果の出力例（1985年1,7月）

用の変化や気象要素の値を仮想して計算することが可能である点が挙げられる。第3表は土地利用の変化を仮想した場合の計算結果を示したものである。すなわちここでは、森林を全て裸地に水田を全て集落地に転用された場合を仮想して、1985年の1月、4月、7月の各月に対して計算を行った結果を示している。

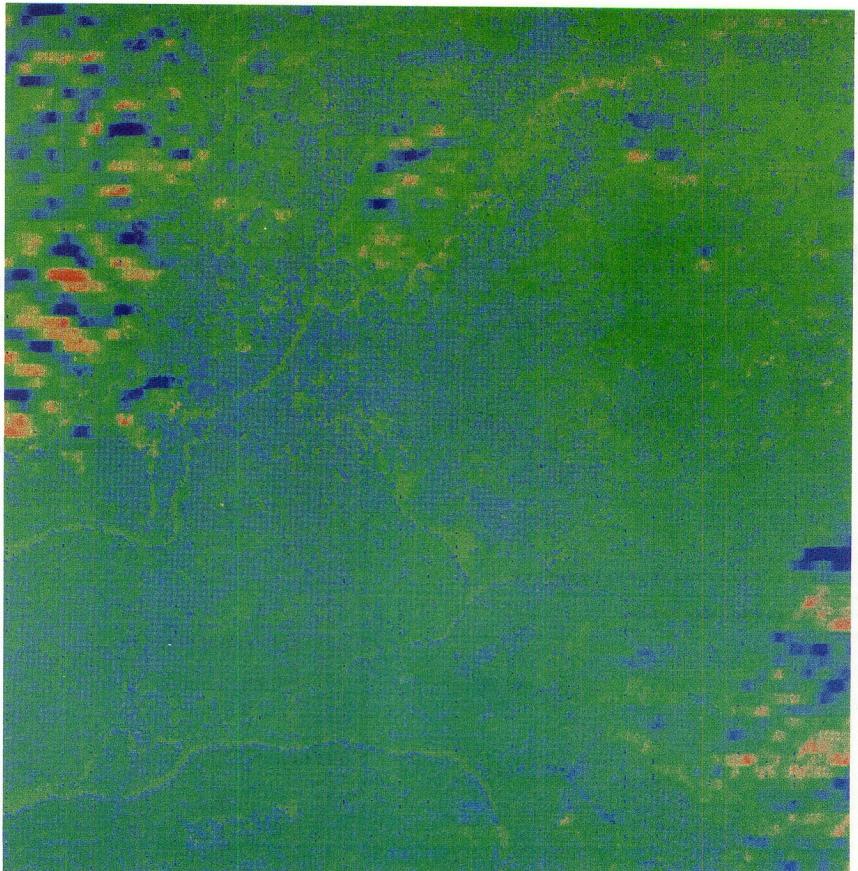
表より上述のような土地利用の転用が行われた場合には、蒸発散量が20%程度低下するという計算結果が示されている。すなわち、低下分に相当する量が流出・浸透量に加わることが予想される。水循環の機構は単純ではないが、本システムは土地利用の改変が水循環に与える影響を評価するための1つの有力な手段であると言えよう。

第3表 土地利用変化を仮想(森林→裸地、水田→集落)した場合の蒸発散量
 (上が現況、下が仮想状況を表す)

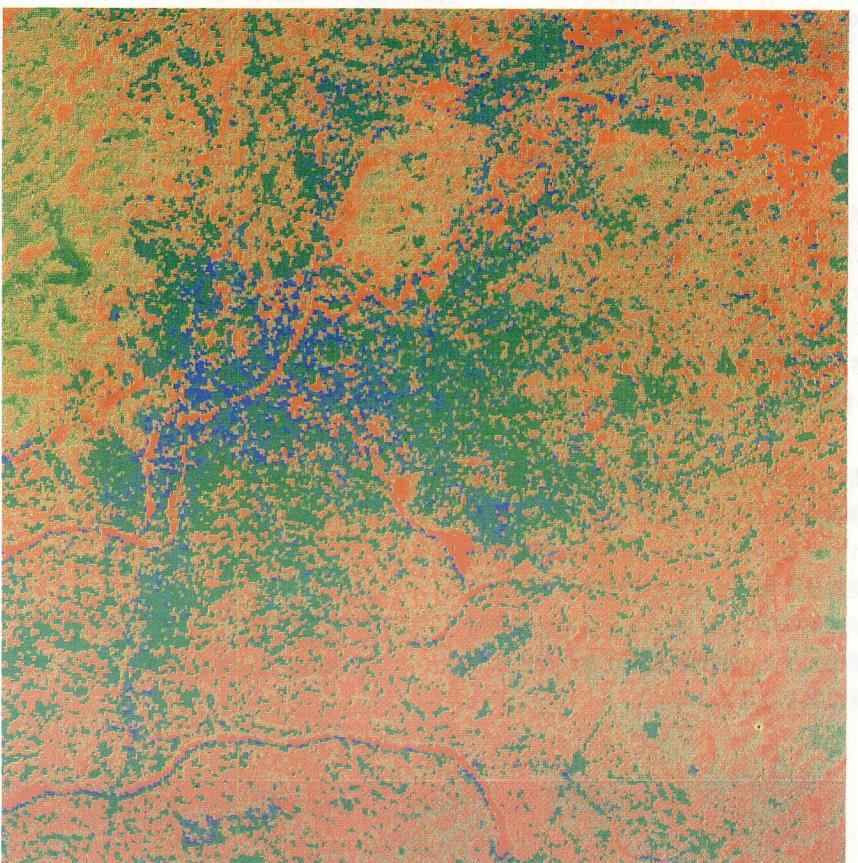
	JAN	APR	JUL
E_e	4.14	62.14	80.34
E_p	21.99	95.29	107.63
E_{ac}	11.33	79.77	132.82
s. d.	1.84	10.67	18.29
E_e	0.97	45.55	61.12
E_p	18.82	78.70	88.41
E_{ac}	9.70	65.89	109.11
s. d.	1.68	8.71	15.79

注) 単位は mm/month、値は 1985 年のもの。

E_e , E_p , E_{ac} は第2表参照。s. d. は E_{ac} の標準偏差。



第7図 推定実蒸発散量の分布（1985年1月）



第8図 推定実蒸発散量の分布（1985年7月）

以上本システムの有効性を述べたが、実用に際しては幾つかの課題が残されている。その1つには、既述の近似式の係数決定の問題が挙げられる。他の1つには、我国の場合には冬期に雪または氷で地表面が覆われる地域が広く分布するが、その場合の算定方法が未解決である点が挙げられる。また、土地利用の分類においては常緑林、落葉林、果樹園、桑畠、菜園等の識別が難しい点も問題である。今後は、より信頼度を高めるために多くの地域で実測値と比較して各係数を検討し、またランドサット画像データの分光特性の直接的な利用を検討することが必要であると考えられる。

付 記

本研究は、筑波大学学内プロジェクト「リモートセンシングによる土地及び水文情報の解析」（代表者：河村武）の昭和61年度の成果の一部をまとめたものである。また、計算には筑波大学学術情報処理センターの計算機システムを使用させていただいた。ここに関係者各位に謝意を表したい。

文 献

- 石田智之・星 仰（1985）：LANDSAT 画像データによる広域蒸発散量の算定、日本写真測量学会年次学術講演会論文集、95-100.
- 藏田憲次・岡田益己（1984）：『環境工学入門』サイエンスハウス、156 p.
- 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（1984）：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、筑波大学水理実験センター報告、No. 8, 57-64.
- 古藤田一雄（1986）：恋瀬川流域蒸発散量の推定、昭和60年度研究報告「恋瀬川流域における水循環機構の解明」、筑波大学水理実験センター、21-165.
- 星 仰（1985）：リモートセンシング画像データ解析システム—TSUKUSYS—、筑波大学学術情報処理センター.
- Kotoda, K. (1986) : Estimation of river basin evapotranspiration. *Environmental Research Center Papers, Univ. Tsukuba*, No. 8, 1-92.