

ランドサットTMデータのみを用いた重回帰式 による流域月蒸発散量の推定

Estimation of Monthly Catchment Area Evapotranspiration Using Landsat
TM Data Alone Based on Multiple Regression Equation

佐渡公明* ・ 魏 永芬**

By Kimiteru SADO and Yongfen WEI

The possibility and the reliability of using Landsat TM 7 bands' data only to estimate monthly evapotranspiration (ET) over catchment areas were investigated through the regression analysis between the values of ET calculated from Morton or Penman equation and the data from satellites. The results for the Tokoro and the Abashiri River basin clearly indicated that such an approach was possible and reliable for grassland, forest and water area, and of the total 7 bands examined, four bands which belong to the visible light, near infrared, intermediate infrared and thermal infrared zone were most contributive and important, in the estimation of ET by using Landsat TM data only.

Keywords: Landsat TM data, remote sensing, catchment area
evapotranspiration, multiple correlation coefficient

1. まえがき

広域蒸発散量の研究は、最近では水資源の有効利用、流域水収支、グローバルな熱収支、植生活動の定量的評価などの観点から関心が高まっている。しかし広域蒸発散量の推定のためには、多くのデータを必要とする。例えば、補完関係式を用いるとすれば、気温、湿度、風速、降水量、全天日射量、雲量、日照時間、気圧、アルベドなどの気象データや、標高、土地被覆、斜面の傾斜角と方位などのDTM（デジタル地形モデル）が必要である^{1), 2)}。衛星リモートセンシングデータは、広域の土地被覆分類、地表面温度や植生生活力度の推定に有効である。そこで、本論文では、常呂川、網走川両流域の実蒸発散量と可能蒸発散量を目的変数として、ランドサットTMデータのみを用いた回帰モデルの分析を行う。その結果、7バンドを説明変数とする重回帰モデルを用いることによって、森林、草地、水域の月蒸発散量の推定が可能であることを明らかにする。また、説明変数の数を、可視光域、近赤外域、中間赤外域そして熱赤外域から各1バンドずつ抽出した4バンドに減少することが可能であることを示す。

2. 対象流域について

北海道東部に位置する常呂川、網走川流域を研究対象にし、まず1989年5月19日と1991年8月29日のランドサットTMデータを用いて、教師付き分類法の中のマルチレベルスライス法により土地被覆分類を行った。その結果、流域総画素数は常呂川流域の場合34,003個、網走川流域の場合24,540個（1画素＝250m×250m）

* 北見工業大学工学部土木開発工学科（〒090 北見市公園町165）

** 中国鉄道部第一勘測設計院環境工程設計研究所（中国蘭州市城関区和政西街）

である。表-1に示すように、5月には両流域とも8つのカテゴリーに分類し、8月には水田の稲穂が実り水が排出されているため、水田の検出はできず7カテゴリーに分類した。両流域内には森林と草地在流域全体の大部分を占めており、各カテゴリーの分布状況はよく類似していることが示されている。

表-1 常呂川、網走川流域の土地被覆分類結果（割合％）

カテゴリー		街地	住宅地	草地	水田	畑	裸地	森林	水域	未分類	全体
常呂川流域	1989.5	0.26	3.76	22.98	0.33	6.20	1.25	56.97	0.08	8.17	100
	1991.8	0.23	3.06	20.70	0.00	4.98	2.33	64.90	0.04	3.76	100
網走川流域	1989.5	0.99	4.47	38.85	0.89	5.11	0.67	42.80	2.21	4.01	100
	1991.8	0.43	7.07	31.39	0.00	0.19	1.79	53.50	2.56	3.07	100

3. ランドサットTMデータの回帰式による流域月蒸発散量の推定方法

土地被覆カテゴリー別に流域蒸発散量を推定し、また実蒸発散量と可能蒸発散量の違いが蒸発散量推定に及ぼす影響を調べる。そのために、カテゴリー別に、補完法の一つであるMorton式²⁾によって求めた1画素毎の月実蒸発散量推定値とPenman式による1画素毎の月可能蒸発散量推定値をそれぞれ目的変数とし、TMデータから得られる1画素毎の輝度値あるいは輝度値の変換値を説明変数として用いた。単回帰分析と重回帰分析を含む、次に示す4つのモデルの回帰分析を行った。

モデル 1： 蒸発散量とNDVIの単回帰関係 $E_i = a_1 N_i + C_1$ (1)

モデル 2： 蒸発散量と地表面温度の単回帰関係 $E_i = b_1 T_i + C_1$ (2)

モデル 3： 蒸発散量とNDVI、地表面温度の重回帰関係 $E_i = \alpha_1 N_i + \beta_1 T_i + C_1$ (3)

モデル 4： 蒸発散量と7バンドの重回帰関係 $E_i = \sum_{n=1}^7 \alpha_{1n} B_{1n} + C_1$ (4)

ここで、 E_i ：Morton式及びPenman式によるカテゴリー*i*に属する1画素毎の実蒸発散量及び可能蒸発散量計算値(mm/month)、 N_i ：TMデータから求めたカテゴリー*i*に属する1画素毎のNDVI値(正規化植生指標、-1～1)[ただし、 $NDVI = (B_4 - B_3) / (B_4 + B_3)$ 、 B_4 と B_3 はバンド4と3の輝度値(0～255)]、 T_i ：カテゴリー*i*に属する1画素毎の地表面温度(1989年5月については、グランドトルースによる実測の地表面温度とバンド6の変換式 $T_i = -22.49 + 0.2643B_{i6}$ を用い、1991年8月はバンド6の輝度値を用いた)、 i ：カテゴリー番号(常呂川、網走川両流域で*i*=1,...,8)、 a_1 、 b_1 ：回帰係数、 n ：バンド数、 B_{1n} ：カテゴリー*i*、バンド*n*の1画素毎の輝度値(0～255)、 α_1 、 β_1 、 α_{1n} ：偏回帰係数、 C_1 ：定数。

まずカテゴリー別の説明変数(観測日のTMデータ)と目的変数(観測日の属する月の月蒸発散量計算値)のデータを用意し、最小二乗法により回帰(偏回帰)係数と定数項を求めた。次に、その地域のカテゴリー*i*に属する画素の説明変数の値を得られた回帰式に代入し、その画素の推定蒸発散量を求めた。ただし、重回帰分析の際、説明変数が多いため、重回帰モデルに無駄な変数、すなわち蒸発散量の推定に寄与の小さい変数も含まれている可能性がある。したがって、本研究では重回帰分析の変数減少法³⁾による分析を行った。

4. 回帰分析結果と考察

4. 1 カテゴリー別のモデル1～4の比較

表-2は1989年5月19日のTMデータを用いた、両対象流域におけるMorton式による同月の実蒸発散量計算値を目的変数とした場合の、モデル1～4の4つの回帰モデルの相関係数を示している。いずれのカテゴリーにおいても、NDVIを説明変数とした場合のモデル1の相関係数(R_1)が水域を除いて(水域ではNDVIが負となり、植生活力度を表すNDVIの本来の意味が失われる)非常に小さく、相関が悪い。しかし、モデル2, 3, 4の場合には、相関係数(R_2, R_3, R_4)は説明変数の数を増加させるとともに大きくなっており、 $R_2 \leq R_3 < R_4$ の順である。このように、いずれのカテゴリーに対してもモデル4の重相関係数が一番大きく、8つのカテゴリー

リーの中で、草地、森林、水域の重相関係数は0.7以上で、他のカテゴリーより相関の強いことが分かった。

次に、1989年5月19日のTMデータを用いたPenman式による同月の可能蒸発散量計算値を目的変数とし、上記と同様に両流域における回帰分析を行った。その結果を表-3に示す。表-2の実蒸発散量と比較して相関係数の差は小さい。また、その傾向は実蒸発散量の場合と非常に類似しており、 R_1 が非常に小さく、 $R_2 \leq R_3 < R_4$ の関係があり、草地、森林、水域の重相関係数が大きいことが分かる。表-4に常呂川流域の草地、森林、水域に対するモデル4の重回帰方程式を示す。

また、1991年8月29日のTMデータを用いた両流域における月実蒸発散量、月可能蒸発散量の場合の回帰分析も行ったところ、4つの回帰モデルの相関係数は、表-2、3の場合と同様に、草地、森林、水域の3つのカテゴリーに対する重相関係数が大きいことが示されている。

以上の結果から、いずれの場合においても、 R_1 が非常に小さく、 $R_2 \leq R_3 < R_4$ の関係があり、草地、森林、水域の重相関係数が約0.7以上と大きいことが得られた。したがって草地、森林、水域の月蒸発散量の推定にモデル4が最も妥当であることが明かである。草地、森林、水域以外のカテゴリーの場合、重相関係数が0.6以下と小さく、本回帰モデルによる月蒸発散量の推定は無理である。

次に、常呂川流域における草地、森林、水域を対象に、1989年5月のTMデータを用いてモデル4によって予測された蒸発散量と、Morton式で求めた実蒸発散量計算値との対応関係を図-1に示す。図中のRとRMSはそれぞれ重相関係数とRoot Mean Square誤差（平均二乗誤差の平方根）である。実線と破線は、それぞれ回帰直線と1:1直線を表している。いずれの場合においてもプロットされた点は大体1:1直線の両側に分布しており、直線から遠く離れた点が多くないと見られる。網走川流域の場合も含めると、実蒸発散量の計算値50~100mm/monthに対し、予測値のRMSは2.0~12.8mm/monthである。他方、両流域の可能蒸発散量の場合、Penman式による計算値90~170mm/monthに対し予測値のRMSは0.9~5.7mm/monthである。両者のRMS誤差はそれほど小さくなく、また可能蒸発散量推定のRMS誤差の方が小さい。1991年8月のTMデータを用いた場

表-2 四つの回帰モデルの相関係数
(1989.5, 目的変数: Mortonの月実蒸発散量)

カテゴリー	常 呂 川 流 域					網 走 川 流 域				
	データ数	R1	R2	R3	R4	データ数	R1	R2	R3	R4
市街地 住草地 水田 裸地 森林 水域	87	-0.01	0.19	0.19	0.35	242	-0.11	0.17	0.20	0.30
	1280	-0.07	0.18	0.18	0.22	1098	-0.26	0.21	0.30	0.40
	7813	-0.08	0.68	0.69	0.73	9553	-0.01	0.76	0.76	0.81
	113	-0.14	0.48	0.52	0.56	218	-0.26	0.13	0.39	0.43
	2108	-0.02	0.11	0.11	0.34	1254	-0.25	0.27	0.31	0.40
裸地 森林 水域	425	-0.29	0.50	0.54	0.62	165	-0.13	0.25	0.25	0.43
	19371	0.12	0.71	0.71	0.77	10504	0.12	0.65	0.65	0.72
	27	0.53	0.51	0.53	0.71	543	-0.59	0.04	0.60	0.74
全 体	31224	0.08	0.40	0.42	0.59	23557	-0.04	0.15	0.15	0.60

表-3 四つの回帰モデルの相関係数
(1989.5, 目的変数: Penmanの月可能蒸発散量)

カテゴリー	常 呂 川 流 域					網 走 川 流 域				
	データ数	R1	R2	R3	R4	データ数	R1	R2	R3	R4
市街地 住草地 水田 裸地 森林 水域	87	-0.09	0.26	0.26	0.36	242	0.21	-0.16	0.25	0.42
	1280	0.03	-0.03		0.05	1098	0.25	-0.20	0.28	0.46
	7813	-0.07	-0.65	0.65	0.69	9553	0.01	-0.76	0.76	0.81
	113	0.01	0.34	0.34	0.52	218	0.24	0.16	0.24	0.51
	2108	0.05	-0.01	0.05	0.23	1254	0.18	-0.22	0.24	0.36
裸地 森林 水域	425	0.25	-0.49	0.51	0.60	165	0.12	-0.25	0.25	0.45
	19371	-0.11	-0.67	0.67	0.73	10504	0.11	-0.65	0.65	0.73
	27	-0.62	-0.72	0.72	0.79	543	0.57	-0.05	0.57	0.72
全 体	31224	0.50	-0.70	0.70	0.75	23557	0.38	-0.61	0.67	0.68

合にも、得られた両蒸発散量 表-4 常呂川流域の草地、森林、水域の重回帰方程式（モデル4、1989.5）
 の対応関係は図-1に示すもの
 とよく類似している。この結
 果から、草地、森林、水域の
 実蒸発散量および可能蒸発散
 量の推定にモデル4がよく適
 合していることが分かる。

4. 2 モデル4の回帰診断³⁾

ここで、モデル4の回帰診
 断を行うと次のようになる。

(a) 実蒸発散量	
草地	$E = 0.98B_1 + 0.62B_2 - 1.25B_3 - 0.14B_4 + 0.15B_5 + 0.97B_6 - 0.36B_7 - 138.56$
森林	$E = 1.71B_1 + 1.79B_2 - 2.62B_3 - 0.32B_4 + 0.40B_5 + 1.55B_6 - 0.87B_7 - 254.20$
水域	$E = -2.91B_1 + 2.82B_2 \quad \quad \quad -0.91B_6 \quad \quad \quad +2.32B_7 + 206.01$
(b) 可能蒸発散量	
草地	$E = -0.35B_1 - 0.29B_2 + 0.51B_3 + 0.07B_4 - 0.08B_5 - 0.41B_6 + 0.18B_7 + 181.41$
森林	$E = -0.66B_1 - 0.60B_2 + 0.97B_3 + 0.19B_4 - 0.16B_5 - 0.61B_6 + 0.36B_7 + 228.85$
水域	$E = \quad \quad \quad 0.39B_4 \quad \quad \quad -0.44B_7 + 121.72$

- a) 両流域における草地、森林、水域の3つのカテゴリーに対して、分散分析の結果、いずれの場合にも $F_0 \geq F_{n-p-1}(\alpha)$ 「 n : データ数、 p : 説明変数の個数、 α : 有意水準(1または5%)」が成り立つので、全ての回帰は有意で、それぞれの場合の説明変数は、全体として蒸発散量の予測に役立っていると判断できる。
- b) 誤差項の正規性を検討するために、これら3つのカテゴリーに対し、標準化残差を正規確率紙上にプロットした結果、プロットされた点が殆ど直線上にのっているので、正規分布に従っていると判断できる。図-2はその一例で、 e_i は標準化残差、 z_i はHazen plotによる非超過確率を持つ正規確率変数の値である。 e_1, z_{27} は、 $e_i, z_i, i=1, \dots, 27$ の54ヶ中の最小値、最大値である。
- c) モデル4の線形性の仮定を検討するため、図-3のような標準化残差と同定値の散布図を描いた。どの場合も同定値の大小に関わらず標準化残差がほぼ一様に分布しており、モデルの線形性の仮定が確認される。

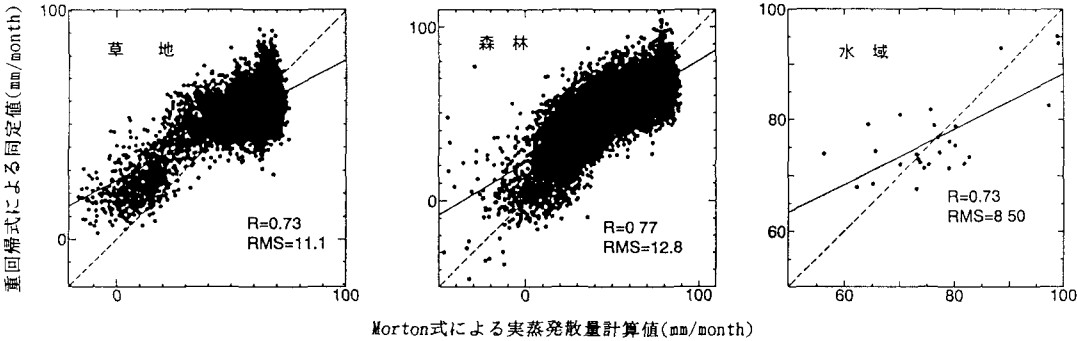


図-1 モデル4による実蒸発散量の同定値とMorton式による計算値の対応関係(常呂川流域、1989.5)

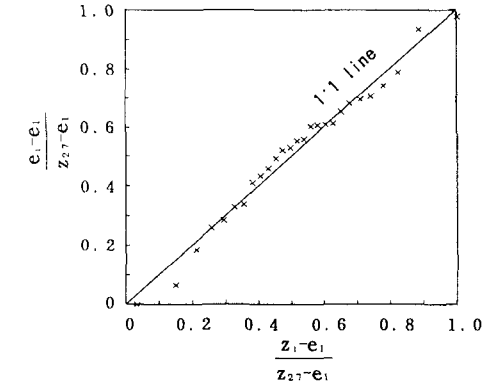


図-2 標準化残差の正規確率紙へのプロット
 (常呂川流域、水域の実蒸発散量、1989.5)

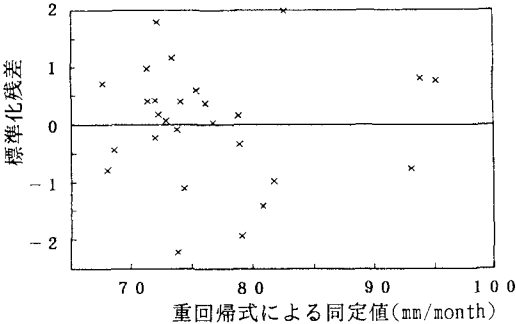


図-3 標準化残差と同定値の散布図
 (常呂川流域、水域の実蒸発散量、1989.5)

5. 説明変数7バンドの影響について

常呂川、網走川流域の草地、森林、水域に対するモデル4の場合について、蒸発散量と各バンドとの偏相関係数を表-5に示す。草地、森林に対するバンド6の偏相関係数は、他のバンドより著しく大きい。空白の箇所は、変数減少法により除去された説明変数に対応している。1991年8月29日のTMデータを用いた場合にも、これと同様の結果が得られた。このような傾向は、蒸発散量と地表面温度との間に強い単相関係を示している表-2、3にも表れている。したがって、草地、森林の蒸発散量の推定に際し、バンド6は非常に重要な因子であることが分かる。また、表-5では草地、森林に対し、Morton式による実蒸発散量の偏相関係数と、Penman式による可能蒸発散量の偏相関係数の符合は完全に逆である。同様のことが表-4の偏回帰係数の符合についても言える。この理由としては、実蒸発散量と可能蒸発散量が土壌水分の変化に追随するとき、一方が増えれば他方はその分だけ減少するという補完関係に起因していると考えられる^{1)、2)}。

次に、これまでの統計的変数減少法とは別に、TM7バンドの波長帯域を考慮した変数減少を考えてみる。表-6(a)、(b)は1989年5月19日の網走川流域の草地、森林の場合の7バンドの相関マトリックスを示している。バンド1、2、3の間の相関係数が非常に高く、バンド5、7の間の相関も高く、またバンド4は他のバンドとの相関が低くなっている。同様に、同じ観測日の常呂川流域の草地、森林、水域のカテゴリーの7バンドの相関マトリックス、さらに観測日1991年8月29日の両流域の3つのカテゴリーの7バンドの相関マトリックスからも、上記と非常に類似している結果が得られた。表-7に7バンドの位置する電磁波波長帯域を示しているが、同じ波長帯域にあるバンド間の相関は良く、波長帯域をまたがるバンド間の相関は悪いことになる。そこでランドサットTM7バンドデータを表-7に示すように、各波長帯域から1バンドずつ選択してCase1～6の組合せを考えた。

Case1～6に属している4つのバンドを説明変数にし、Morton式による1画素毎の実蒸発散量を目的変数にして、上記と同様に草地、森林、水域に対し重回帰分析を行った。表-8は1989年5月19日観測の網走川、常呂川両流域の草地、森林における、6ケースの重相関係数を示している。4バンドを用いた場合の重相関係数と、7バンド全部を用いて得られた重相関係数の差は0.02～0.09と、小さいと見られる。また、観測日1991年8月29日の両流域の草地、森林、水域の場合においても、上記と同じような結果が得られた。したがって、これら3つのカテゴリーの月実蒸発散量を推定する際、より少ない4つのバンドを用いても良いと考えられる。また、得られた6つのケースに属しているそれぞれのバンドの偏相関係数については、例として

表-5 網走川、常呂川流域における草地、森林および水域の7バンドの偏相関係数(1989.5)

	カテゴリー	実 蒸 発 散 量							可 能 蒸 発 散 量						
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
網走川 流 域	草 地	0.243		-0.275	-0.157	0.063	0.693	-0.144	-0.234		0.277	0.169	-0.069	-0.694	0.147
	森 林	0.234	0.413	-0.302	-0.132	0.032	0.632	-0.058	-0.229	-0.146	0.304	0.182	-0.017	-0.632	0.042
	水 域	0.384	0.303	-0.174	-0.459	-0.203	0.260	0.146	-0.372	-0.304	0.192	0.458	0.155	-0.257	-0.133
常呂川 流 域	草 地	0.173	0.056	-0.219	-0.129	0.113	0.678	-0.147	-0.131	-0.055	0.190	0.136	-0.128	-0.606	0.151
	森 林	0.311	0.153	-0.306	-0.155	0.127	0.640	-0.126	-0.275	-0.118	0.259	0.207	-0.118	-0.594	0.118
	水 域	-0.418	0.328			-0.438		0.482				0.381			-0.466

表-6 網走川流域の7バンドの相関マトリックス(1989.5)

(a) 草地

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
B1	1.000	0.902	0.870	-0.050	-0.075	-0.187	0.106
B2		1.000	0.913	0.199	0.088	-0.139	0.141
B3			1.000	-0.058	0.239	0.016	0.353
B4				1.000	0.109	-0.064	-0.226
B5					1.000	0.721	0.876
B6						1.000	0.751
B7							1.000

(b) 森林

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
B1	1.000	0.968	0.966	0.441	0.014	-0.412	0.053
B2		1.000	0.974	0.544	0.119	-0.351	0.140
B3			1.000	0.452	0.158	-0.343	0.200
B4				1.000	0.278	-0.025	0.149
B5					1.000	0.542	0.954
B6						1.000	0.546
B7							1.000

常呂川流域の森林の場合を表-9に示すが、どのケースについてもバンド6が一番大きく、バンド4が一番小さい。草地についても同様のことが言える。一方、水域については、一例として網走川流域の場合を表-10に示すが、可視光域の3バンドとバンド4の偏相関係数の絶対値が大きく、反対にバンド5、7の絶対値がより小さい。したがって、水域の月実蒸発散量に対する偏相関は、草地、森林の場合と異なり、可視光域のバンドとバンド4の偏相関が大きく、バンド5、7の偏相関は小さいことになる。

表-7 4波長帯域から1バンドずつ抽出する6通りの組み合わせ

波長帯域	バンド	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
可視光域	1	○	○				
	2			○	○		
	3					○	○
近赤外域	4	○	○	○	○	○	○
中間赤外域	5	○		○		○	
	7		○		○		○
熱赤外域	6	○	○	○	○	○	○

表-8 常呂川、網走川流域の草地、森林の6ケースの重相関係数(1989.5)

Case		1	2	3	4	5	6	バンド
網走川流域	草地	0.78	0.78	0.79	0.79	0.79	0.79	0.81
	森林	0.68	0.69	0.65	0.66	0.63	0.63	0.72
常呂川流域	草地	0.70	0.70	0.70	0.70	0.71	0.71	0.73
	森林	0.72	0.73	0.70	0.72	0.68	0.69	0.77

表-9 常呂川流域の森林の場合(1989.5) 6ケースの各バンドの偏相関係数

Case	1	2	3	4	5	6
Band 1	0.35	0.38				
Band 2			0.27	0.31		
Band 3				0.15	0.19	
Band 4	-0.02	-0.05	-0.04	-0.12	0.03	-0.02
Band 5	-0.27		-0.26		-0.20	
Band 6	0.66	0.68	0.64	0.66	0.62	0.63
Band 7		-0.34		-0.31		-0.25

表-10 網走川流域の水域の場合(1989.5) 6ケースの各バンドの偏相関係数

Case	1	2	3	4	5	6
Band 1	0.59	0.58				
Band 2			0.56	0.57		
Band 3					0.42	0.44
Band 4	-0.46	-0.54	-0.48	-0.50	-0.40	-0.48
Band 5	-0.15			0.07	-0.07	
Band 6	0.23	0.21	0.08	0.18	-0.06	
Band 7						0.11

6. 結論

本論文は、ランドサットTMデータのみを説明変数とする回帰モデルを用いて、常呂川、網走川流域の5、8月の月蒸発散量を推定した。その結果を以下に要約する。

- 1) ランドサットTM7バンドデータを説明変数とするモデル4を用いて、両流域の草地、森林、水域の月実蒸発散量および可能蒸発散量をRMS誤差が0.9~12.8(mm/month)の範囲で推定できた。
- 2) 目的変数が草地、森林、水域の月実蒸発散量と可能蒸発散量の場合に、相関係数の差は小さいが、偏回帰係数と偏相関係数の符号は逆である。
- 3) 草地、森林、水域に対する蒸発散量の重回帰式において、説明変数の数が可視、近赤、中間赤外そして熱赤外域から各1バンドずつ抽出した4バンドの場合の重相関係数は、7バンド全てを用いた場合の重相関係数との差が小さく、蒸発散量の予測にはどちらを使っても良い。
- 4) 草地、森林、水域以外のカテゴリー(市街地、住宅地、水田、畑、裸地)に対する蒸発散量の場合、重相関係数は0.6以下であり、TMデータのための重回帰式による予測は無理である。

参考文献

1) 佐渡公明: 衛星データを用いた広域蒸発散量の推定, 水文・水資源学会誌, Vol. 7, No. 4, pp. 315~324, 1994.
2) Morton, F.I.: Estimating evapotranspiration from potential evaporation: practicality of an iconoclastic approach, J. Hydrol., Vol. 38, pp. 1~32, 1978.
3) 田中 豊他: パソコン統計解析ハンドブック II 多変量解析編, 共立出版, pp. 1~70, 1984.
4) Wei, Y.F. and K. Sado: Estimation of Areal Evapotranspiration Using Landsat TM Data Alone, Proc. 15th Asian Conference on Remote Sensing, Bangalore, India, pp. P-4-1~P-4-6, 1994.