

II-45

ランドサットTMデータを用いた
広域蒸発散量の推定

北見工業大学 正員 佐渡公明

北見工業大学 正員 中尾隆志

北見工業大学 正員 内島邦秀

1. まえがき

水資源の有効利用や長期流出解析モデルへの導入等の観点から、蒸発散量の研究は最近多く見られるようになった。この蒸発散量推定の研究には次の2つの方向がある。1) 1地点において水蒸気の輸送現象としてあるいは熱収支的に蒸発散のメカニズムを追求し蒸発散量推定の精度を上げようとする研究、2) リモートセンシングを用いて広域蒸発散量を推定しようとする研究である。

本論分は2)に該当し、まずランドサットTMデータを用いて北見市の土地利用分類を行って各カテゴリに対しアルベドを推定する。蒸発散量の推定には補完関係式が使われる例が多いが、積雪があるときは使えない。ここでは、積雪期には小島の式、非積雪期には補完関係式の一種であるMorton式を用いて北見市の広域蒸発散量の月平均値を求め、蒸発散量の年変化を推定する。

2. ランドサット5号データによる北見市の土地利用分類

2.1 解析対象フルシーン 北見市を含む道東地域のフルシーン番号は、ランドサット5号の場合パス106、ロー30である。ランドサット5号が1984年3月1日に打ち上げられてから、このフルシーンについては1990年9月27日現在で104日間の観測データがある。このときの雲量を図1に示す。このフルシーンは釧路、帯広、北見、日高・大雪山脈を含む185×170Kmの広い範囲なので、雲量の小さい日が少ないことが分かる。104個のデータ中、雲量が0%は7個しかなく、雲量100%が35個ある。土地利用解析を行うには、対象地域に積雪がなく雲量は0%でなければならない。そこで、1989年5月19日のデータを用いることにした。この日のフルシーンを写真1に示す。この写真は本来カラー合成写真であるが、本論文集はカラー写真を掲載できないのでモノクロ写真で載せる。以後の写真についても同様である。

2.2 幾何補正 上記のフルシーンから対象地域の北見市を切り出す。それは北緯43°48′, 東経143°54′を中心とする間引き率1とした約14Km×11Kmの範囲であり、容量は1MBのフロッピーディスク2枚に7バンドが格納されており、ディスプレイに表示すると512pixel×400lineの画像になる。まず、この画像に幾何補正を行って普通の地形図のように輪郭が東西、南北方向に一致するようにする。幾何補正としてはアフィン変換を用いた。GCP(地上基準点)として表1に示す11地点を選定した。得られたアフィン変換式は次式である。

$$P = aX + bY + c \cdots (1)$$

$$L = dX + eY + f \cdots (2)$$

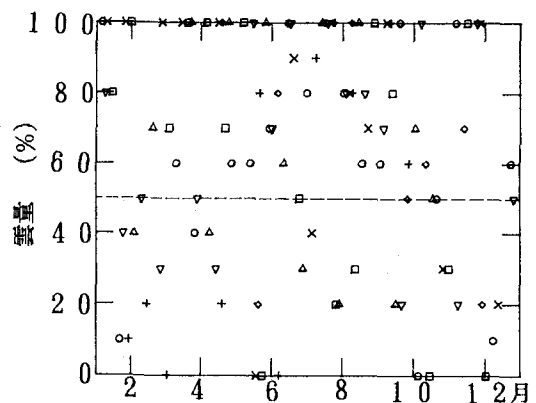


図1 1984.4.19~1990.9.27間の104日の雲量

a=-0.005711993 b=0.03470628 c=2612.590 d=-0.03442483 e=-0.005575241 f=171380.7

ここに、(P, L)は画像座標でpixel番号、line番号を表わす。(X, Y)は赤道と東経141°の経線との交点を原点とするUTM (ユニバーサル横メルカトル) 座標である。なお、表1に示す緯度、経度とX, Yの間の変換式については文献1)を参照願いたい。いま選定された11地点のGCPのUTM座標値を (X_i, Y_i) 、画像座標値を (P_i, L_i) , $i=1, \dots, 11$ とする。 i 点のGCPのUTM座標値 (X_i, Y_i) に対応する画像座標値 (P_i', L_i') は(1)、(2)式を用いて

$$P_i' = a X_i + b Y_i + c \dots (3)$$

$$L_i' = d X_i + e Y_i + f \dots (4)$$

である。計算値 (P_i', L_i') と測定値 (P_i, L_i) の絶対誤差は-2.98~1.76ピクセルとなり、RMS(Root Mean Square)誤差はピクセル、ラインに対しそれぞれ1.31, 0.55であった。いずれも誤差の絶対値が3ピクセル以内であり満足できると思われる。

2. 3 土地利用分類 土地利用分類を行う範囲を原画像から切り出すにあたって、1)切り出し範囲ができるだけ大きくなるように、2)四隅の緯度、経度が丸められた数字になるように、3)原画像の範囲外をできるだけ少なく含むように、以上を考慮して図2に示す輪郭線と平行になっている太い実線の長方形範囲(地形図に適合している)を切り出した。四隅の緯度、経度は、左上N43°51'00", E143°48'30", 左下N43°45'50", E143°48'30", 右上N43°51'00", E143°57'30", 右下N43°45'50", E143°57'30"である。面積は12×9.5Kmであり、ディスプレイ上では400pixel×320lineである。図2の斜めに傾いた大きな長方形の範囲は、幾何補正する前の画像(約14×11Km)である。地形図適合の新画像においては、各画素の持つ輝度値はニアレストネイバー法により旧画像からリサンプリングした。土地利用分類には、教師データ(トレーニングデータ)付き分類手法の中のセル分類法を用いた。分類項目は表2に示す7つのカテゴリーに分類した。各カテゴリーに対しトレーニングエリアのバンド1~4のスペクトル輝度データを用いて、閾値を標準偏差の4

表1 GCP一覧表

地点名	緯度	経度	X	Y
1 北五線と西三号の交差点 (緑が丘)	43°49'18.8"	143°52'42.2"	4855630.4	731437.6
2 T型交差点 (高栄西町十丁目)	43°48'19.7"	143°51'34.8"	4853751.8	729990.9
3 池の中央(常盤公園)	43°47'15.5"	143°53'27.1"	4851858.6	732573.5
4 国道39号線の曲がり角 (東相内町)	43°48'02.8"	143°49'02.0"	4853118.5	728599.2
5 国道39号線の曲がり角 (市民会館前)	43°47'50.9"	143°53'43.8"	4852983.7	732908.5
6 交差点(東陵公園の角)	43°48'58.0"	143°53'46.3"	4855035.7	732891.9
7 T型交差点(南岡)	43°45'40.8"	143°54'11.1"	4848974.7	733659.2
8 T型交差点 (若松カミラント手前)	43°45'20.1"	143°55'33.2"	4848397.7	735517.5
9 北見・上仁頃間の 曲がり角(昭和)	43°51'17.4"	143°52'18.2"	4859285.9	730739.9
10 橋の中央(北見大橋)	43°48'45.2"	143°55'36.8"	4854727.8	735389.7
11 橋の中央(若松大橋)	43°47'48.2"	143°54'54.8"	4852874.8	734502.3

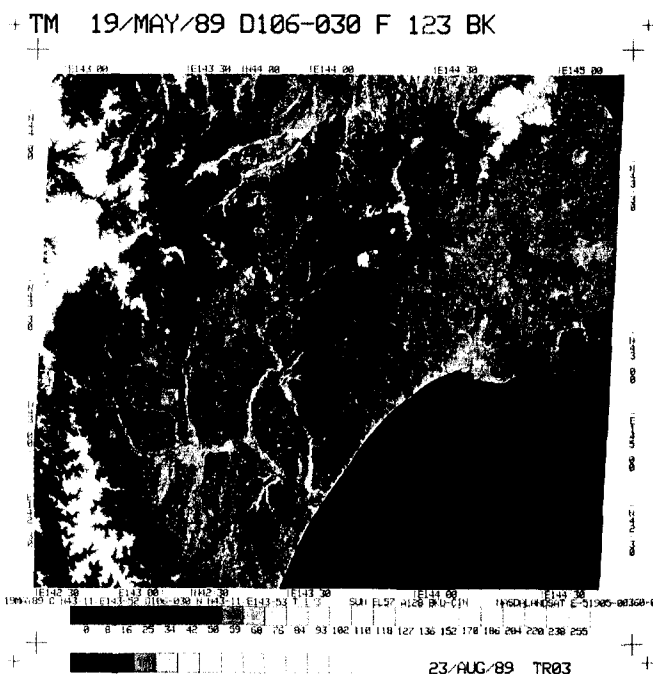


写真1 LANDSAT/TM D106-030 道東 1989.5.19,9:36撮影

倍にして、各カテゴリーに対する輝度レベルの範囲を決めた。これにより、ある画素がどのカテゴリーのスペクトル輝度分布に入っているかを捜すのである。複数のカテゴリーに重複する画素については、最短距離のカテゴリーに分類した。以上の結果、得られた土地利用分類を写真2に示す。凡例にある各カテゴリーの濃度値と、各カテゴリーの面積割合は表2の通りである。

左上以外の四隅が三角形の形で未分類になっているのは、図2と比較すれば分かるが、原画像からはみ出している部分である。面積割合は住宅地が最も多く次いで森林、裸地の順である。5月19日のデータであるから、畑は秋まき小麦と思われ、たまねぎ畑は裸地にいられて裸地の面積が多くなっていると思う。常呂川本川と無加川も写っているのであるが、カテゴリーとして水域を取るだけの面積がなく、これらの河川は水田または未分類となっている。

3. 北見市の蒸発散量推定

3. 1月平均気象データ 図2に示す太線の長方形範囲12×9.5Kmが、北見市における月平均蒸発散量推定の対象地域である。この対象地域の気象データは、北見のアメダス観測所（標高H＝84m）があるだけである。そこで、北見市より直線距離にして約22Km離れた境野（H＝190m）と約38Km離れた北見大和（H＝325m）の両アメダス観測所のデータも用いた。以上3カ所における1976～88の13年間の月平均データを用いて、標高H(m)に対する月平均気温T_a(°C)、月平均風速u(m/s)、月平均水蒸気圧e_a(mb)の回帰直線を表3のように求めた。アメダスでは湿度を観測していないので、水蒸気圧の計算には、現地の気温と近くの網走の相対湿度を用いた。これより平均気温減率は-0.42°C/100mとなる。気温の相関係数rは2月のr＝-0.225を除いてr＝-0.709～-0.999；風速はr＝0.939～0.998；水蒸気圧は2月のr＝-0.439を除いてr＝-0.829～-0.998である。月平均気圧p(mb)については、網走の月平均海面気圧p_s(mb)を用いて次式で推定した²⁾。

$$p = p_s \cdot \{ (288 - 0.0065H) / 288 \}^{5.256}$$
..... (5)

月平均の全天日射量Iと雲量C（0～1）は、北見アメダスの日照率n／Nを用いて次式で推定し、簡単のために対象地域で一定とする。



表2 土地利用分類の教師データと面積割合

	トレーニングエリア	濃度値	画素数	割合
1.市街地	駅前	0(真っ黒)	9,050	7.07%
2.住宅地	高栄東町	35	38,220	29.88
3.畑	訓子府付近	70	7,365	5.75
4.裸地	工業団地	105	19,681	15.38
5.草地	北見ゴルフ場	140	2,594	2.03
6.森林	若松ファミリーランド付近	175	36,076	28.18
7.水田	端野	210	2,878	2.25
8.未分類		255(真っ白)	12,138	9.48
計			128,000	100.00



$$I/I_0 = a + b n / N \cdots \cdots (6)$$

$$C = 1 - n / N \cdots \cdots (7)$$

ここに、 I_0 ：大気圏外の水平面全天日射量、 a 、 b ：網走で得られた回帰係数、 n ：月平均日照時間、 N ：月平均日照時間である。

3. 2 標高メッシュデータとアルベド

図2に示す蒸発散量推定の対象地域は、ディスプレイ上 $400 \times 320 = 128,000$ 画素あり、最終的には蒸発散量を1画素毎に求める。しかし標高については、 $10 \times 10 = 100$ 画素を1メッシュとして、1メッシュの中心の標高を地形図から読みとって、これをそのメッシュ内100画素の標高とした。すなわち、合計で $40 \times 32 = 1280$ メッシュに対応する1280個の標高データを準備した。この標高データは40～310 mの範囲にわたっている。

月平均アルベドについては、対象地域内に位置する北見工大寒地気象観測システムの露場(草地)で観測した、表4の3年平均値(1987年9月～1990年8月の平均値)を用いた。

冬期は積雪のためアルベドが大きくなっている。上記観測地を草地に対するアルベドとし、それ以外の各カテゴリーのアルベドは、草地を1として文献3)より表5のように決定した。

3. 3 Morton式と小島の式による蒸発散量推定

Morton式やBrutsaert and Stricker式に代表される蒸発散量推定のための補完関係式においては、地表面が飽和しているときの蒸発散量はペンマンの蒸発散能に等しい。ペンマンの蒸発散能は、植物で覆われた地表面に十分な水供給がある場合

の蒸発散量であり、積雪がある冬期間には使えない。したがって補完関係式も積雪がある時期には使えず、冬期間の北海道にMorton式を使用している文献4)は、適用範囲を広げすぎていると思われる。それならば積雪があるときはどうするかというと、以下に述べる小島の式⁵⁾が適当であると考えている。本論分では、月平均気温が負となる冬期間(1, 2, 3, 12月)は、積雪ありとして小島の式を用い、それ以外の月はMorton式を使うことにする。

1) Morton式²⁾

$$E_{ac} = 2 \phi \frac{(R_m + M)}{L} \times 86.4 - \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \lambda} \frac{R_m}{L} + \frac{\lambda}{\Delta + \lambda} \frac{F}{L} (e_{sa} - e_a) \right\} \times 86.4 \quad (8)$$

$$R_m = (1 - \alpha) I - B, \quad B = \epsilon \sigma (T_a + 273)^4 \{1 - \rho (0.707 + e_a/158)\}$$

$$\rho = 1 + \{0.25 - 0.005 (e_{sa} - e_a)\} C^2 \quad (\rho \geq 1), \quad M = 0.66 B - 0.44 R_m$$

表3 気温、風速、水蒸気圧の標高に対する回帰直線

月	$T_a = a + bH$		$u = c + dH$		$e_a = e + fH$	
	a	b	c	d	e	f
1	-10.3	-0.0016	0.886	0.0023	1.91	-0.0004
2	-10.1	-0.0010	0.886	0.0023	1.97	-0.0004
3	-2.39	-0.0092	0.945	0.0023	3.39	-0.0016
4	4.85	-0.0049	1.044	0.0022	6.04	-0.0020
5	10.6	-0.0036	1.021	0.0025	9.25	-0.0024
6	15.1	-0.0042	0.766	0.0022	14.0	-0.0033
7	18.7	-0.0045	0.631	0.0019	18.3	-0.0049
8	20.3	-0.0042	0.555	0.0019	20.2	-0.0046
9	14.9	-0.0041	0.479	0.0027	13.3	-0.0037
10	8.44	-0.0045	0.757	0.0025	7.99	-0.0025
11	1.28	-0.0041	0.852	0.0020	4.68	-0.0012
12	-4.79	-0.0049	0.810	0.0020	2.88	-0.0012

表4 露場(草地)の月平均アルベド観測値

1月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.87	0.77	0.63	0.24	0.22	0.22	0.20	0.19	0.24	0.27	0.34	0.71

表5 草地を1としたときの土地利用分類別アルベド

	1月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
市街地	1.60	1.60	1.58	1.67	1.65	1.59	1.65	1.76	1.76	1.76	1.58	1.60
住宅地	1.30	1.30	1.32	1.39	1.41	1.35	1.47	1.47	1.47	1.47	1.32	1.25
畑	0.80	0.80	0.84	0.94	1.00	1.06	1.06	1.06	1.06	1.00	0.89	0.80
裸地	1.60	1.60	1.58	1.67	1.65	1.53	1.65	1.76	1.76	1.76	1.58	1.60
草地	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
森林	0.48	0.50	0.53	0.58	0.71	0.79	0.79	0.79	0.79	0.74	0.63	0.50
水田	0.80	0.75	0.53	0.44	0.47	0.59	0.76	1.29	1.06	0.88	0.79	0.75

$$\phi = \left\{ 1 + \frac{\lambda}{\Delta} \frac{(0.5 + 0.5Rh + \lambda/\Delta)}{(Rh + \lambda/\Delta)} \right\}^{-1} + 0.26, \quad F = \begin{cases} 22.0/\zeta & (T_a \geq 0) \\ 22.0 \times 1.15/\zeta & (T_a < 0) \end{cases}$$

$$\lambda = \gamma + 4\epsilon\sigma(T_a + 273)^3/F, \quad \zeta = (|e_{sa} - e_a|/6.11)^{0.12}$$

ここに、

E_{ac} : 実蒸発散量(mm/d), R_m : 純放射量 (W/m^2), α : アルベド, I : 全天日射量 (W/m^2), B : 有効長波放射量 (W/m^2), ϵ : 射出率=0.92, σ = ステファン・ボルツマン定数, T_a : 気温 ($^{\circ}C$)
 ρ : 大気長波放射量/快晴時の大気長波放射量, e_a = 水蒸気圧 (mb), e_{sa} : 気温に対する飽和水蒸気圧 (mb), C : 雲量 (0~1), M : 移流項 (W/m^2), ϕ = エネルギー荷重係数, Rh : 相対湿度 (0~1), Δ : 気温飽和水蒸気圧曲線の勾配 (mb/ $^{\circ}C$), γ : 乾湿計定数 (mb/ $^{\circ}C$), λ : 熱輸送係数 (mb/ $^{\circ}C$), F : 水蒸気輸送係数 ($W/(m^2 \cdot mb)$), ζ : 安定係数

$$L : \text{蒸発の潜熱 (KJ/Kg)} = \begin{cases} 2501 - 2.4T_a & (T_a \geq 0) \\ 2835 - 2.1T_a & (T_a < 0) \end{cases}$$

2) 小島の式⁵⁾

$$E_{ac} = 1.0 \times 10^{-3} u_1 (e_{sa} - e_{a1}) \times 240 = 1.0 \times 10^{-3} u_1 (1 - Rh) e_{sa} \times 240 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 E_{ac} : 雪面上の蒸発量 (mm/d), u_1 : 雪面上1mの高さの風速 (m/s), e_{a1} : 雪面上1mの高さの水蒸気圧 (mb)。なお、雪面温度の月平均値は月平均気温に等しいと仮定している。

3) 蒸発散量の推定値

小島の式を用いた1月の1メッシュ毎の平均雪面蒸発量を写真3に示す。相対湿度は網走の値を用いて一定としているので、式(9)より雪面蒸発量は、標高による風速と飽和水蒸気圧の変化のみで決まってくる。標高が高くなると、風速は増加し気温は減少する。このとき、風速の増加割合が飽和水蒸気圧の減少割合より大きいので、標高の高い森林で蒸発量が大きく、標高の低い市街地や住宅地で蒸発量が小さいことが示されている。蒸発量の最大値、平均値、最小値はそれぞれ 6.5, 4.3, 3.4mm/月である。

写真4は、Morton式(8)を用いて得られた7月の1画素毎の平均蒸発散量を示す。アルベドの小さい水田や森林で蒸発散量が多く、アルベドの大きい市街地や裸地で蒸発散量が小さいことが分かる。アルベドが小さいと、純放射量が増し、蒸発散に必要な熱エネルギーが増えるのである。市街地と住宅地では、表5より住宅地の方がアルベドが小さいので蒸発散量が多い。常呂川本川は水田に分類されており、蒸発散量も大きくなっている。蒸発散量の最大値、平均値、最小値はそれぞれ 126.5, 107.6, 89.9mm/月である。最大値と最小値の差は36.6mm/月と

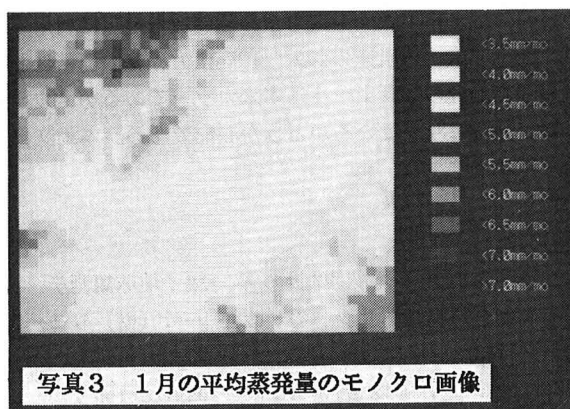


写真3 1月の平均蒸発量のモノクロ画像

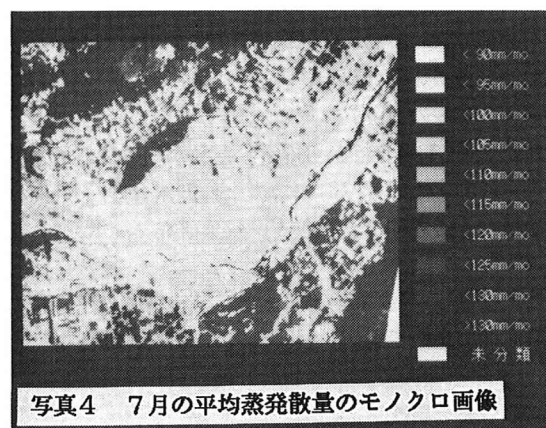


写真4 7月の平均蒸発散量のモノクロ画像

なる。

最後に、図3は北見市の蒸発散量の年変化であり、各月の最大値、平均値、最小値をそれぞれ□、○、△の記号で示している。7月のピーク値を中心にほぼ左右対称のグラフとなっており、1989年の寒地気象観測露場における著者らの計算値⁶⁾と同じ傾向である。5～8月に蒸発散量が大きいのは、全日射量が効いて純放射量が大きくなるからであると思われる。平均蒸発散量を合計すると1年間で492.9mmとなるが、これは北見アメダスの年平均降水量 703mmの70.1%になり、かなり大きな損失雨量である。最小蒸発散量の場合には、年平均降水量の55.3%の損失雨量となる。

4. 結論

本論分で得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) ランドサットTMデータを用いて、広域蒸発散量計算に必要な北見市の土地利用区分が求められた。
- 2) 積雪寒冷地の蒸発散量の年変化を推定するには、積雪期には雪面上の蒸発散量算定式、非積雪期には補完関係式を適用するのがよい。
- 3) 補完関係式としてMorton式、雪面の蒸発量算定式として小島の式を用いて、北見市の月平均蒸発散量を求め、年平均蒸発散量は493mmと得られた。
- 4) 北見市の蒸発散量の年変化は、夏期に大きく冬期に小さく、7月をピークとするほぼ対称形となる。

本研究は始めて間もないので改良すべき点が多々ある。それらを列挙すると、ランドサットTMセンサーの6バンドから地表面温度を求め蒸発散量推定に利用する、日射量の直散分離を行い傾斜面日射量を推定する、Morton式への風速の導入、10Km四方程度の面積における気象要素の標高に対する回帰直線の精度。なお、本論分の写真1～4は本来カラーであるが、カラー写真は掲載できないということでモノクロ写真にした。鮮明に写っているかどうか心配である。本論文集もカラー写真を掲載できるよう前向きに検討して頂きたい。

参考文献

- 1) 宇宙開発事業団 地球観測センター編：地球観測データ利用ハンドブック—ランドサット編・改訂版一、(財)リモート・センシング技術センター、pp.6-3～6-5、昭和61年。
- 2) Morton, F.I.: Estimating evapotranspiration from potential evaporation—practicality of an iconoclastic approach, J. Hydrol., vol.38, pp.1～32, 1978.
- 3) 内田諭他：ランドサットおよび国土数値情報標高データを用いた広域蒸発散量の算定、写真測量とリモートセンシング, vol.26, No.4, pp.13～23, 1987.
- 4) 大槻恭一他：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(3)—, 農土論集, No.112, pp.25～32, 1984.
- 5) 小島賢治：融雪機構と熱収支, 気象研究ノート, No.136, pp.1～38, 1979.
- 6) 佐渡公明他：蒸発散量推定値と蒸発計実測値の比較, 土木学会北海道支部論文報告集, No.46, pp.281～286, 平成2年。

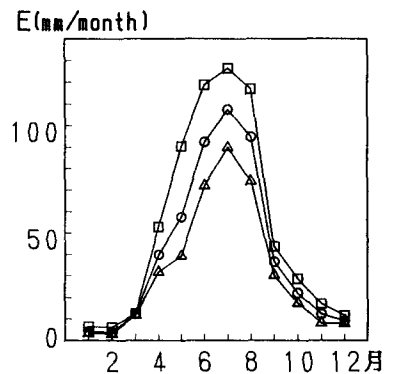


図3 北見市の蒸発散量年変化