

II-59

広域蒸発散量に及ぼす土地被覆の 影響について

北見工業大学 正員 佐渡公明

1. まえがき

従来水文学の分野において蒸発散の研究は降水、流出に比べそれほど活発ではなかった。しかし広域蒸発散については、最近の地球温暖化問題との関連で今後益々重要になってくると思われる。この広域蒸発散量の推定を考える場合、種々の土地被覆に適用できる蒸発散量の推定法を開発しなければならない。

本論文では、まずランドサットTMデータを用いて北見市の土地被覆分類を行い各カテゴリーのアルベドを推定し、市街地と住宅地の浸透域は正規化植生指標(NVI)を用いて推定する。次に、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式を用いる広域の月蒸発散量の推定法を述べる。最後に北見市の蒸発散量年変化を求め、土地被覆、土地開発、斜面方位及び市街地・住宅地の流出率の影響などを検討する。

2. 北見市の土地被覆分類¹⁾とNVIによる市街地、住宅地の浸透域推定

北見市の土地被覆分類を行うために、対象地域に積雪がなく雲量が0%の1989年5月19日のランドサットTMデータを用いることにした。土地被覆分類には教師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1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倍にし各カテゴリーに対する輝度レベルの範囲を決めた。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、得られた土地被覆分類を表1に示す。

NVIは、TMデータの3バンド(B3)、4バンド(B4)の値を用いて、 $NVI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$ で表わす。NVIの値は-1～1であるが、この最小値を0に最大値を255に1次変換(離散化)することもでき、この両者のNVIの平均値をカテゴリー毎に表1に示す。草地のNVIを100としたとき、市街地、住宅地のNVIはそれぞれ31、41%

表1 北見市の土地被覆分類とNVI

カテゴリー	土地被覆分類			NVI			平均 標高 (m)
	トレーニング エリア	画素数	割合 (%)	平均値 (-1～1)	平均値 (0～255)	草地に対す る割合(%)	
1. 市街地	駅前	9,050	7.1	-0.028	65	31	88.7
2. 住宅地	高栄東町	38,220	29.9	0.049	86	41	96.1
3. 草地	北見ゴルフ場	2,594	2.0	0.516	209	100	158.4
4. 畑	訓子府付近	7,365	5.7	0.429	186	89	136.8
5. 水田	端野	2,878	2.2	-0.018	68	32	76.3
6. 森林	若松ファミリーランド	36,076	28.2	0.281	147	70	158.0
7. 裸地	工業団地	19,681	15.4	0.018	77	37	97.1
8. 未分類	—	12,136	9.5	—	—	—	—
計	—	128,000	100.0				

Effect of Land Cover on Areal Evapotranspiration

by Kimiteru SADO

である。そこで、市街地に分類された画素には草地相当の浸透面積が31%含まれ、残り69%が屋根、道路等の不浸透面と仮定する。住宅地の場合は草地相当の浸透面が41%、不浸透面は59%と仮定する。

3. 広域の月蒸発散量計算―北見市の場合

対象地域内の北見アメダスと付近の境野、北見大和のアメダス観測所のデータを用いて、1976～88の13年間の月平均データにより標高に対する月平均気温・風速・水蒸気圧の回帰直線を求めた。月平均気圧については、網走の月平均海面気圧を用いて推定した。月平均の日射量と雲量は、北見アメダスの月平均日照率を用いて推定し、1画素毎の斜面全日射量を求めた。なお、地面からの反射日射量の計算に必要な地面反射率（アルベド）は、1画素毎に考慮すると非常に複雑になるので、全画素の平均値を用いた。

蒸発散量の推定は1画素(30*30m)毎に求める。しかし標高については、10×10=100画素を1メッシュとし、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。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2の3カ年平均値(1987年9月～1990年8月)を草地に対するアルベドとした。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2)より表3のように決定した。

表2 露場（草地）の月平均アルベド観測値

4月	5	6	7	8	9	10	11
0.24	0.22	0.22	0.20	0.19	0.24	0.27	0.34

表3 草地を1としたときのカテゴリー別アルベド

	4月	5	6	7	8	9	10	11
水田	0.44	0.47	0.59	0.76	1.29	1.06	0.88	0.79
森林	0.56	0.71	0.79	0.79	0.79	0.79	0.74	0.63
草地	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
畑	0.94	1.00	1.06	1.06	1.06	1.06	1.00	0.89
裸地	1.67	1.65	1.53	1.65	1.76	1.76	1.76	1.58

Morton式³⁾やBrutsaert and Stricker式に代表される補完関係式は、積雪がある時期（1,2,3,12月）には使えない。積雪期には全カテゴリーが積雪で覆われるので、雪面蒸発量を与える次の小島の式⁴⁾を適用する。

1) 小島の式

$$E_{ac}=1.0\times10^{-3}u_1(e_{sa}-e_{a1})\times240=1.0\times10^{-3}u_1(1-Rh)e_{sa}\times240\cdots\cdots(1)$$

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)， e_{sa} ：気温に対する飽和水蒸気圧 (mb)， Rh ：相対湿度 (0～1)。

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。

非積雪期には次のMorton式を使うことにする。

2) Morton式

$$E_{ac}=2\phi\frac{(R_m+M)}{L}\times86.4-\left\{\frac{\Delta}{\Delta+\lambda}\frac{R_m}{L}+\frac{\lambda}{\Delta+\lambda}\frac{F}{L}(e_{sa}-e_a)\right\}\times86.4\quad(2)$$

$$\begin{aligned} R_m &= (1-\alpha)I-B, & B &= \varepsilon\sigma(T_a+273)^4\{1-\rho(0.707+e_a/158)\} \\ \rho &= 1+\{0.25-0.005(e_{sa}-e_a)\}C^2 \quad (\rho\geq1), & M &= 0.66B-0.44R_m \\ \phi &= \left\{1+\frac{\lambda}{\Delta}\frac{(0.5+0.5Rh+\lambda/\Delta)}{(Rh+\lambda/\Delta)}\right\}^{-1}+0.26, & F &= 22.0/\zeta(T_a\geq0) \\ \lambda &= \gamma+4\varepsilon\sigma(T_a+273)^3/F, & \zeta &= (|e_{sa}-e_a|/6.11)^{0.12} \end{aligned}$$

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), C : 雲量 (0~1), M : 移流項 (W/m^2), ϕ = エネルギー荷重係数, 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 : 蒸発の潜熱 (KJ/Kg) = $2501 - 2.4 T_a$ ($T_a \geq 0$)

市街地と住宅地の草地相当浸透域、草地、畑、水田、森林、裸地にたいする月蒸発散量計算には補完関係式をそのまま適用する。市街地と住宅地の不浸透域については、大部分が屋根と道路から構成されているので、流出率を0.9と仮定する。すなわち、降雨量の10%を遮断蒸発と扱う。この考え方は、文献5)にある道路、屋根の流出率がそれぞれ0.80~0.90、0.85~0.95という下水道の設計指針に基づいている。

4. 北見市の蒸発散量に及ぼす土地被覆の影響

北見市を例にとって、以下に広域蒸発散量に及ぼす土地被覆の影響について述べる。
蒸発散量は1画素毎に月単位で計算するので、各カテゴリに対し表1に示す画素数に相当する数の蒸発散量計算値が得られ、したがって各カテゴリ毎に月蒸発散量の平均値と標準偏差が求められるのである。

図1(a)、(b)は北見市における土地被覆別の蒸発散量年変化を、月蒸発散量の平均値と標準偏差を用いて表している。いずれのカテゴリも蒸発散量の平均値は、7月をピークとする左右ほぼ対象な年変化を示している。夏期に蒸発散量が大きいのは、全天日射量が効いて純放射量が大きくなるからと思われる。表3のアルベドと比較すると、アルベドが小さいカテゴリほど蒸発散量の平均値は大きいことが分かる。これはアルベドが小さいと、純放射量が増え、蒸発散に必要な熱エネルギーが増えるからである。住宅地と市街地の比較では、表1に示すように、住宅地の方が浸透面積が大きいので蒸発散量も大きくなっている。図1(b)の月蒸発散量の標準偏差では、全カテゴリを合計した全体的な場合は総数が多いので、バラツキを表す標準偏差は1桁大きくなっている。森林、草地、畑、水田では平均値が最大となる6、7月で標準偏差が一旦低下している面白い現象がみられる。これより植物の活力度の大きい時期には、どの葉面も蒸散作用を活発に行い、同一カテゴリ内の蒸散量の差は活力度の小さい時期よりむしろ小さいと推測される。しかし全体としては、平均値が大きいほど、標準偏差も大きくなっている。この特長をより分かりやすく表したのが、図

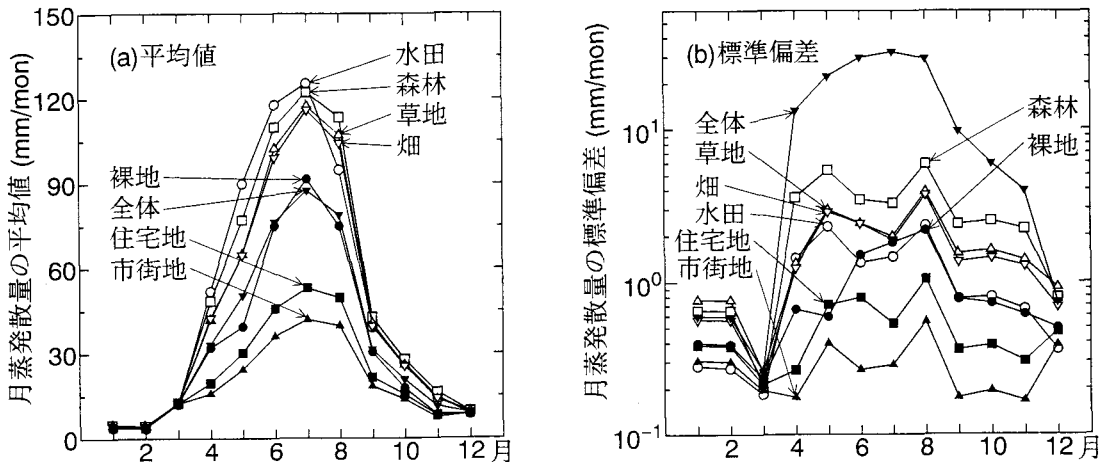


図1 北見市における土地被覆毎の蒸発散量年変化
(a)月蒸発散量の平均値、(b)月蒸発散量の標準偏差

2の月蒸発散量の平均値と標準偏差との相関図である。相関係数 R は0.732と良い相関である。

図3(a)、(b)は蒸発散量の季節変化に対する土地開発の影響を示している。図3、表4より、もしも北見市が開拓される前に全て森林であったと仮定すると、年蒸発散量が現状より174mm増え、流出率は現状よりかなり小さい16%であったことを示している。これは表3にあるように森林のアルベドが小さく蒸発に必要な熱エネルギーが増えるからである。年平均降水量は703mmを用いている。逆に市街地、住宅地以外の畑、裸地、草地、森林、水田が将来全て宅地開発された場合を想定すると、現状に比べ不浸透域が増えて年蒸発散量は151mm減り、流出率は22%増加する。標準偏差は開拓前、宅地造成後共にかなり減っている。これはカテゴリー数がそれぞれ1、2に減るからである。1、2、3、12月は全カテゴリーが積雪で覆われていると仮定しているので、土地開発の影響は現れていない。

図4(a)、(b)は蒸発散量の季節変化に対する斜面方位の影響を表している。もしも対象地域の斜面が傾斜角は変わらないで斜面方位が全て南向きと仮定すると、月蒸発散量の平均値は現状より1.1~2.8mm/mon増え、標準偏差も増加する。逆に斜面が全て北向きと仮定すると、平均値は現状より1.1~3.0mm/mon減少し、標準偏差も減少する。これは蒸発散量に影響する最も重要な気象要素が全天日射量であるからである。

これまでの計算では市街地・住宅地の流出率は全て0.9としてきた。図5(a)、(b)は蒸発散量の季節変化に対する市街地・住宅地の流出率 f の影響を表している。 f が増えると月蒸発散量の平均値は当然減る。しかし標準偏差が逆に増えているのは、全画素を見たとき市街地・住宅地というより小さな値の蒸発散量を持つ画素が多くなるからである。

最後に蒸発散量に対する標高の影響を調べる。カテゴリーの影響を除くことができる積雪期を対象に、雪面蒸発量に対する標高の影響を示したのが図6である。小島の式(1)において、相対湿度は網走の値を用いて計算区域内で一定としているので、雪面蒸発量は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、標高が高くなると雪面蒸発量は増加することになる。

表4 北見市の蒸発散量と流出率

	年蒸発散量 (mm/yr)	流出率 (%)
南向き* ¹	433.5	38.3
現状	419.4	40.3
北向き* ²	405.8	42.3
開拓前* ³	593.5	15.6
現状	419.4	40.3
宅地造成* ⁴	268.1	61.9

* 1 : 全画素を南向きと仮定

* 2 : 全画素を北向きと仮定

* 3 : 全画素が森林の場合

* 4 : 市街地、住宅地以外の全画素が住宅地に開発された場合

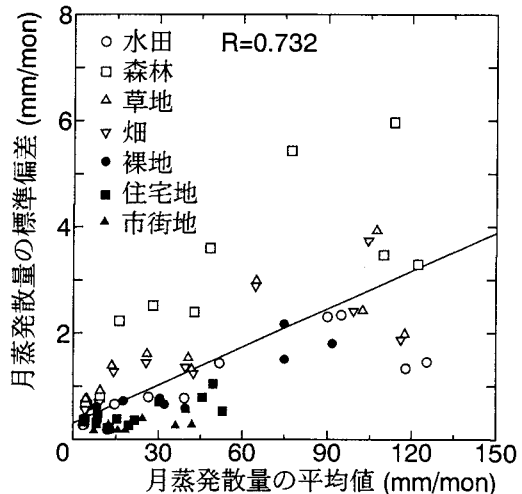


図2 土地被覆毎の月蒸発散量の平均値と標準偏差との相関

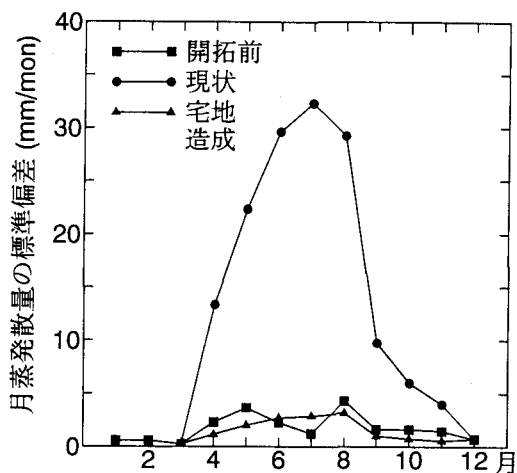
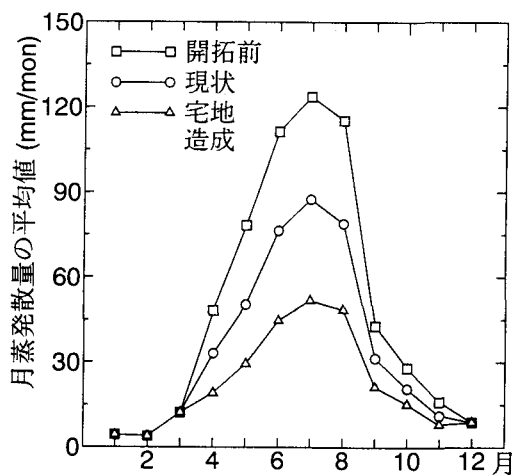


図3 (a)、(b) 月蒸発散量の平均値、標準偏差に対する土地開発の影響

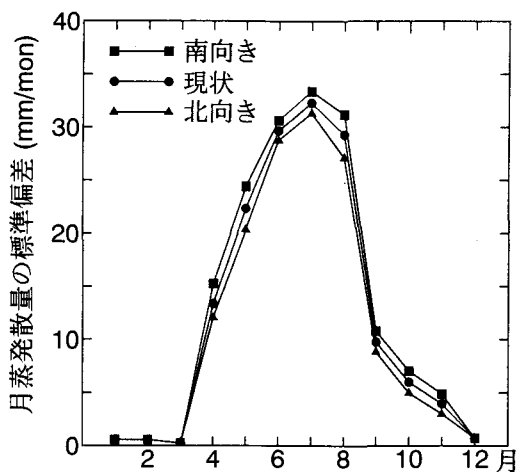
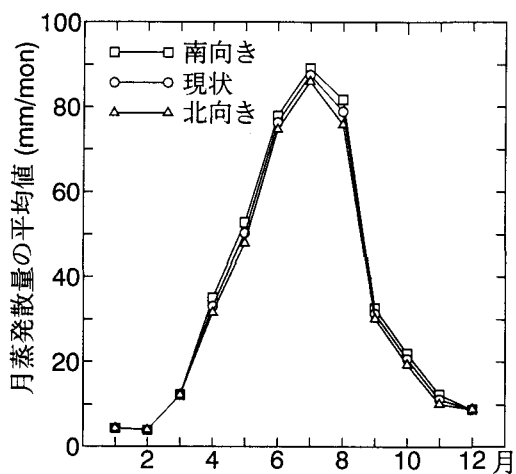


図4 (a)、(b) 月蒸発散量の平均値、標準偏差に対する斜面方位の影響

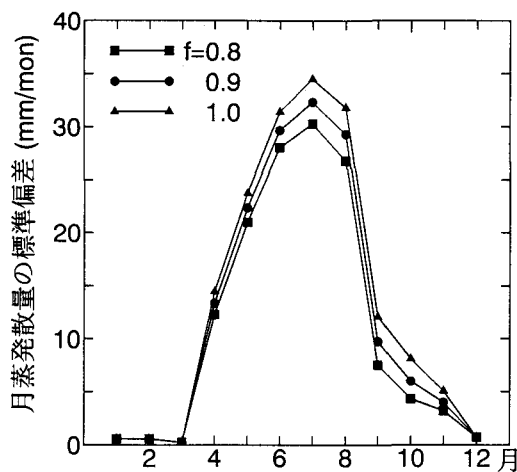
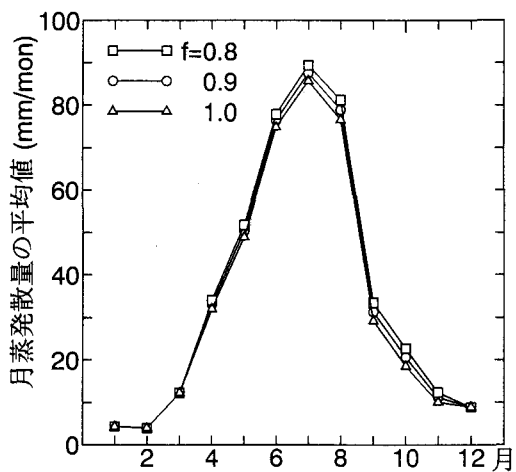


図5 (a)、(b) 月蒸発散量の平均値、標準偏差に対する市街地・住宅地の流出率の影響

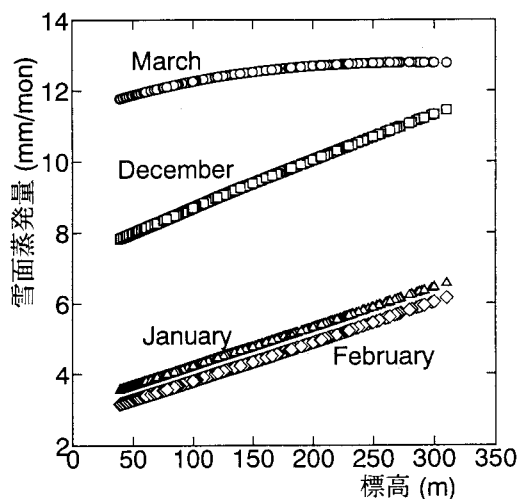


図6 冬期の雪面蒸発量に対する標高の影響

5. 結論

本論分では北見市を対象に広域蒸発散量の推定を行い、蒸発散量に対する土地被覆の影響を述べてきたが、得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) 北見市における土地被覆別の蒸発散量年変化を、月蒸発散量の平均値、標準偏差の形で推定できた。特にアルベドの小さい水田、森林、草地、畑で蒸発散量が大きく、不浸透面を有する市街地と住宅地で蒸発散量が小さい結果となった。
- 2) 月蒸発散量の標準偏差は、月蒸発散量の平均値及びカテゴリー数の増加と共に増えることが分かった。
- 3) 蒸発散量年変化に対する土地開発の影響を、開拓前、現状、宅地造成という3ケースで明らかにした。
- 4) 蒸発散量年変化に対する斜面方位の影響及び市街地・住宅地の流出率の影響を示した。
- 5) 冬期の雪面蒸発量は夏期の蒸発散量に比べ値は小さいが、標高の増加と共に増えることが明らかになった。

市街地と住宅地を浸透域、不浸透域に区別するのにここではNVIを用いた。今後はさらに改良してランドサットTMの1～7バンドを用いた多重回帰式を得るために、航空写真とそれから得られた1/2500地形図をグランドトゥースとして用いることを検討している。

参考文献

- 1) 佐渡公明他: ランドサットTMデータを用いた広域蒸発散量の推定, 土木学会北海道支部論文報告集, No. 47, pp. 453～458, 平成3年.
- 2) Kotoda, K.: Estimation of river basin evapotranspiration, Environmental Research Center Papers, Univ. Tsukuba, No. 8, pp. 24～26, 1986.
- 3) Morton, F. I.: Estimating evapotranspiration from potential evaporation: practicality of an iconoclastic approach, J. Hydrology, vol. 38, pp. 1～32, 1978.
- 4) 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.
- 5) 建設省: 下水道施設設計指針と解説, 日本下水道協会, pp. 40～44, 昭和50年.