

補完関係式による流域実蒸発散量年変化の推定

Estimation of Annual Change of Actual Catchment Area Evapotranspiration
Using Complementary Relationship Equation

佐渡 公明*, 児島 正洋**

By Kimiteru SADO and Masahiro KOJIMA

The purpose of this study is to estimate the annual changes of monthly evapotranspiration (ET) in a river basin by using Landsat TM data, complementary relationship equation, and digital terrain model (DTM). This method was applied to the Tokoro River basin and the composited basin, which is consisted of the Bibi, Shukubai and Toasa River basin, in Hokkaido.

It was shown that Brutsaert-Stricker equation was the most suitable among the complementary relationship equations for the estimation of ET, by comparing with the residual in annual mean water balance of Tokoro river basin.

Net radiation contribute to the formation of basic annual variation of ET and advection term increase the ET in winter in above two study basins.

Keywords : river basin evapotranspiration, complementary relationship equation, annual water balance, Landsat TM data, DTM

1. まえがき

本論文は、ランドサットTMデータ、国土数値情報標高データおよび補完関係式を用いて、流域規模の広域の月蒸発散量を推定する。また、この実蒸発散量の推定値と、降水量及び流出量の実測データを基に、流域水収支の年変化を推定する。研究対象流域は、北海道東部に位置する常呂川流域と中央部に位置する美々川等3流域（美々川、祝梅川、遠浅川）である。

常呂川流域については、国土数値情報標高データと重ね合わせができるように1画素を250m×250mとしてランドサットTMデータ(1989.5.19観測)から流域を切り出し、土地被覆分類を行う。この分類結果と月平均気象データを使い、補完関係式におけるPenman式とPriestley-Taylor式の組合せを変えて実蒸発散量を計算し、最適な補完関係式を求め、水収支年変化の推定を行う。また、美々川等3流域についてはランドサットTMデータ(1994.7.9観測)と国土数値情報標高データとを重ね合わせ、これから3流域を切り出すことにより、50m×50mを1画素とする衛星画像および標高画像を求める。次に流域の土地被覆分類と月平均気象データを用いて常呂川流域と同様に月実蒸発散量の平均値を求め、美々川等3流域の実蒸発散量年変化を推定する。

* 正会員 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090 北見市公園町165)

** 学生員 北見工業大学大学院 土木開発工学専攻 (〒090 北見市公園町165)

2. 補完関係式^{1)~4)}

補完法は、「実蒸発散量 E_a とPenmanの可能蒸発散量 E_{pen} は土壌水分の変化に対し補完しあい ($\delta E_a + \delta E_{pen} = 0$ 、一方が増えれば他方はその分だけ減る)、両者の和は可能蒸発量 E_{pt} の2倍に等しい」と仮定して、次の補完関係式を用いて実蒸発散量を推定する方法である。

$$E_a + E_{pen} = 2 E_{pt} \tag{1}$$

上式において、 E_{pen} と E_{pt} には修正を加えていないものと加えたものの2種類を検討し、以下にそれらの式を示す。移流項 M を考慮する場合は、純放射量 R_n に付加するものとする。

$$\text{Penman式: } E_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{f(u_2)}{L} (e_{sa} - e_a) \tag{2}$$

$$\text{修正Penman式: } E'_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \lambda} \frac{R_n}{L} + \frac{\lambda}{\Delta + \lambda} \frac{F}{L} (e_{sa} - e_a) \tag{3}$$

$$\text{Priestley-Taylor式: } E_{pt} = 1.26 \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{L} \tag{4}$$

$$\text{修正Priestley-Taylor式: } E'_{pt} = \phi \frac{R_n}{L} \tag{5}$$

ここで、特殊な記号のみを説明すると以下の通りである。

M : 移流項 $= 0.66B - 0.44R_n$, B : 有効長波放射量, $\zeta = (|e_{sa} - e_a|/6.11)^{0.12}$, T_a : 気温

F : 水蒸気輸送係数 $= \begin{cases} 22.0/\zeta & (T_a \geq 0) \\ 22.0 \times 1.15/\zeta & (T_a < 0) \end{cases}$, R_h : 相対湿度, $\lambda = \gamma + 4\sigma(T_a + 273)^3/F$

ϕ : エネルギー荷重係数 $= \left\{ 1 + \frac{\lambda}{\Delta} \frac{0.5 + 0.5R_h + \lambda/\Delta}{R_h + \lambda/\Delta} \right\}^{-1} + 0.26$, $f(u_2) = 0.26(0.5 + 0.372u_2)$

u_2 : 地上2mの高さの風速

Mortonの補完関係式¹⁾は、式(3)と移流項を考慮した式(5)を式(1)の E_{pen} と E_{pt} に適用している。また、Brutsaert-Stricker式²⁾(B-S式)は、式(2)と(4)を式(1)の E_{pen} と E_{pt} に適用している。

3. 常呂川流域の水収支

3.1 土地被覆分類と実蒸発散量年変化

1989年5月19日観測のランドサットTMデータと国土数値情報250m標高メッシュデータを重ね合わせて得られた、250m×250mを1画素とする常呂川流域のTM画像を用いて土地被覆分類を行った。

月平均気温、風速、水蒸気圧は、標高に対する回帰直線を求め、1画素毎に推定した。月平均気圧については、網走の海面気圧に対する標高による推定式を用いた。

月平均の全天日射量と雲量は流域全体で一定とし、斜面日射量を考慮した。月平均のアルベドについては、草地に対する実測値と、カテゴリー別アルベドの草地に対する比率⁴⁾より表-1のように決定した。月別流域平均降水量はティーセン法を用いて求めた。別途実施した北見市の土地被覆分類結果から、草地、市街地、住宅地のNDVIを求め、それらの比率から、市街地の浸透面、不浸透面をそれぞれ31%、69%と仮定し、同様に住宅地の場合は浸透面、不浸透面をそれぞれ41%、59%と仮定した。なお、NDVIによる浸透面、不浸透面積率の算定についての検証は実測データがないので行わなかったが、この方法の根拠については4.1で述べる。また不浸透面の流出率は0.9と仮定した。

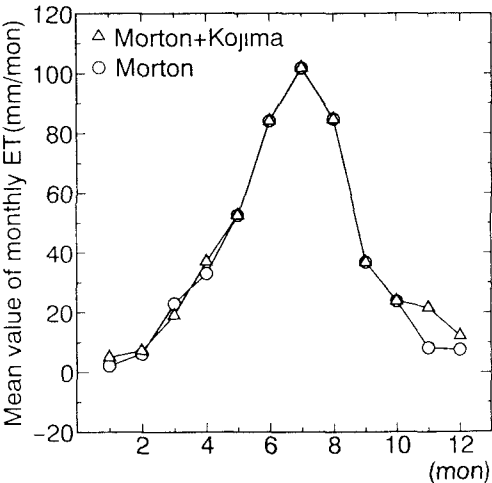


図-1 常呂川流域の平均実蒸発散量の年変化

以上のデータより、1)Morton式のみ、2)積雪期は小島の

表-1 カテゴリー別のアルベド

式、非積雪期はMorton式の2つの場合について1画素毎に月実蒸発散量を計算した。ただし、月平均気温が負の場合は積雪ありとした。図-1は常呂川流域の1989年5月19日の土地被覆分類結果を用いたときの月平均実蒸発散量の年変化を表している。2つの実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季節変化をしている。

月	4	5	6	7	8	9	10	11
市街地	0.40	0.36	0.35	0.33	0.33	0.42	0.48	0.54
住宅地	0.33	0.31	0.30	0.29	0.28	0.35	0.40	0.45
草地	0.24	0.22	0.22	0.20	0.19	0.24	0.27	0.34
水田	0.11	0.10	0.13	0.15	0.25	0.25	0.24	0.27
畑	0.23	0.22	0.23	0.21	0.20	0.25	0.27	0.30
裸地	0.40	0.36	0.34	0.33	0.33	0.42	0.48	0.54
森林	0.13	0.16	0.17	0.16	0.15	0.19	0.20	0.21
水域	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.10	0.13	0.18

Morton式のみ、Morton+小島の式の年合計値は、それぞれ465.0mm/yr,487.2mm/yrである。

3.2 水収支年変化の推定

流域の水収支を考えると、水収支式は次式で表される。

$$\frac{dS}{dt} = P - q - E_a \quad \text{.....(6)}$$

ここで、S：流域の地表及び地下における貯留高、t：時間、P：当該流域の降水量、q：当該流域からの流出高=Q/A、Q：当該流域の流量、A：当該流域の流域面積、E_a：当該流域からの実蒸発散量である。

研究対象とした常呂川流域は、北海道東部のオホーツク 表-2 常呂川流域の水収支(1976年7月～1988年6月)

海側に位置し、流域面積1930km²、流路延長120kmである。水年の始めとして夏の渇水期7月をとることにする。1976年7月～1988年6月にわたる12年間の水文年について、常呂川流域の各年毎の水収支を求めたのが表-2である。流域平均降水量は13雨量観測所の値を使ってティーセン法で求め、流量は河口でのデータがないため、流域面積の98.3%を占める上川沿の流量年表より求めた。この表のP-qの平均値が常呂川流域の年平均実蒸発散量である。この年平均実蒸発散量を補完関係式で計算するために、式(2)～(5)を用いて移流項を考慮するかしないかに区別し

水文年	年降水量P (mm/yr)	年流出量 (m ³ /s)	年流出高q (mm/yr)	P-q (mm/yr)
S51.7～S52.6	758.7	30.91	505.1	253.6
S52.7～S53.6	823.9	28.1	459.2	364.7
S53.7～S54.6	788.3	29.34	479.4	308.9
S54.7～S55.6	940.1	33.76	553.2	387.0
S55.7～S56.6	770.4	27.54	450.0	320.4
S56.7～S57.6	797.7	27.94	456.5	341.2
S57.7～S58.6	706.9	19.58	319.9	387.0
S58.7～S59.6	692.4	24.39	399.6	292.8
S59.7～S60.6	569.4	15.27	249.5	319.9
S60.7～S61.6	816.2	24.53	400.8	415.4
S61.7～S62.6	686.7	18.87	308.3	378.4
S62.7～S63.6	776.3	21.82	357.5	418.8
計	9127.0		4939.0	4188.1
平均	760.5		411.5	349.0

て実蒸発散量を計算した結果が図-2である。図-1、2の式の組合せに対し得られた年平均実蒸発散量を表-2に示す。なお、表中の(2)～(5)は式の番号である。また、実蒸発散量への影響が大きい純放射量と移流項の年変化を図-3に示す。

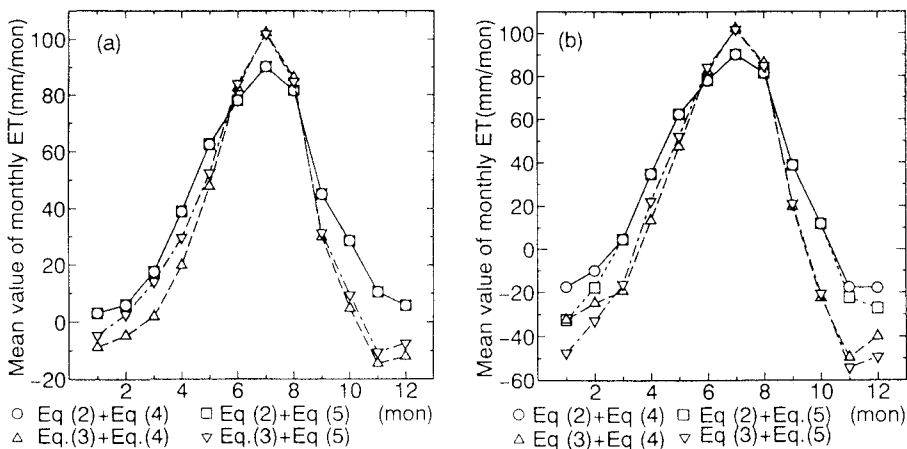


図-2 常呂川流域の平均実蒸発散量の年変化

(a)移流項を考慮した場合、(b)移流項を考慮しない場合

表－3 常呂川流域における各種補完関係式による年平均実蒸発散量

	Morton	Morton+小島	移流項を考慮した場合				移流項を考慮しない場合			
			(2)+(4)	(2)+(5)	(3)+(4)	(3)+(5)	(2)+(4)	(2)+(5)	(3)+(4)	(3)+(5)
実蒸発散量 (mm/yr)	465.0	487.2	468.6	468.6	336.0	388.7	340.7	303.6	164.1	146.8

図-3から分かるように、移流項は積雪期の実蒸発散量にのみ影響し、移流項を考慮することで冬期の実蒸発散量は大きくなるが、夏期の実蒸発散量は変化しない。また、純放射量の年変化と実蒸発散量の年変化が似ていることが図-2、3から分かる。これは純放射量が実蒸発散量年変化に大きく寄与し、顕熱フラックスの寄与が小さいことを意味する。

表-3の中で、水収支から得られた年平均実蒸発散量349.0mm/yrに最も近い年平均実蒸発散量の計算式は、移流項を考慮しない場合の式(2)と(4)の組合せである。これは、B-S式である。

さらに式(6)を差分式に変形し、n年間の水文年にわたって、月単位(Δt=1ヶ月)で総和をとると、次式が得られる。

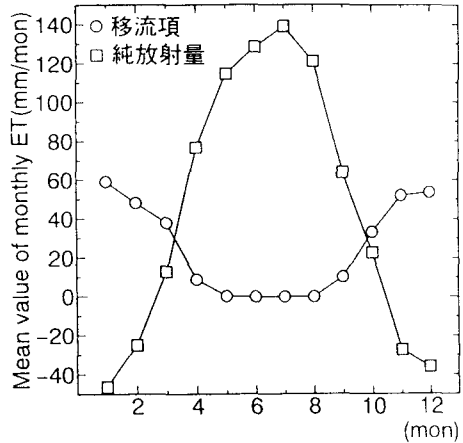
$$\sum_{i=1}^{12} (\bar{P}_i - \bar{q}_i - \bar{E}_i) \Delta t = \sum_{i=1}^{12} \Delta \bar{S}_i, \dots\dots(7)$$

ここで、添字 i は月を表し、上付きーはn年間の水文年 についての平均値を表す。 $\bar{P}_i$ 、 $\bar{q}_i$ の実測値、B-S式の実蒸発散量 $\bar{E}_i$ 、および式(7)より得られる $\Delta \bar{S}_i$ より、常呂川流域の水収支年変化の平均値を求めた結果が表-4である。年平均蒸発散量340.7mm/yrは、年平均降水量の44.8%を占める。各月平均貯留高変化の和は本来0であるが、8.3mm/yrの誤差で年平均降水量の1.1%と小さく、常呂川流域についてはB-S式が実蒸発散量の計算には適していると言える。

9月～3月の期間、流域貯留高は増加し、1月が降雪のため最大の貯留高増加量を示している。他方、4月～8月の貯留高は減少し、特に4月が融雪出水のため最大の貯留高減少量を示している。これは積雪寒冷地を流れる河川の特長である。

表－4 常呂川流域の水収支年変化の平均値
(1976年7月～1988年6月の平均値)

月	$\bar{P}$, (mm/mon)	$\bar{E}$, (mm/mon)	$\bar{q}$, (mm/mon)	$\Delta \bar{S}$, (mm/mon)
7	86.6	90.3	24.5	-28.2
8	100.3	81.6	27.3	-8.6
9	97.4	38.9	33.1	25.4
10	83.4	12.0	34.1	37.3
11	50.9	-17.5	28.7	39.7
12	46.4	-17.6	21.5	42.5
1	46.9	-17.4	15.1	49.2(Max)
2	33.7	-9.8	12.6	30.9
3	44.9	4.7	20.7	19.5
4	40.9	35.0	95.0	-89.1(Min)
5	69.5	62.5	65.3	-58.3
6	59.6	78.0	33.6	-52.0
計	760.5mm/yr 100.0 %	340.7 44.8	411.5 54.1	8.3 1.1



図－3 純放射量と移流項の年変化

4. 美々川等3流域(美々川、祝梅川、遠浅川流域)の実蒸発散量年変化

4.1 住宅地、市街地の不浸透面積率

雨水の浸透面積、不浸透面積が共存する画素を、不浸透面積 S_1 と浸透面積 S_2 に分離できたとすると、その画素のNDVIの加重平均は次式となる。

$$\overline{NDVI} = \frac{S_1 \times NDVI_1 + S_2 \times NDVI_2}{S_1 + S_2} \quad \cdots(8)$$

ここで、 $NDVI_1$ 、 $NDVI_2$ はそれぞれ不浸透面積、浸透面積の正規化植生指標である。 $NDVI_1$ は $NDVI_2$ に比べ小さく無視でき⁵⁾、 $NDVI_2$ の代表としてある植生の正規化植生指標 $NDVI_g$ を用いると、式(8)は式(9)になる。

$$\frac{S_2}{S_1 + S_2} = \frac{\overline{NDVI}}{NDVI_g} \quad \cdots(9)$$

$$\frac{S_1}{S_1 + S_2} = 1 - \frac{\overline{NDVI}}{NDVI_g} \quad \cdots(10)$$

式(9)、(10)がそれぞれ浸透面積率、不浸透面積率を表す。すなわち、ある画素の浸透面積率は、植生のNDVIに対するその画素のNDVIの比で表される。

上述の方法の検定のために不浸透面積率の250mメッシュデータを作成した。以下にその手順を示す。

地形図より不浸透域と考えられる道路、橋、家屋などを塗りつぶす。次に空中写真を利用して地形図から判断できない不浸透域の割り出しをする。さらに、道路幅の測定、不浸透域の確認等のために現地調査を行う。そして、地形図上で不浸透域を塗りつぶし、計算で面積を出せるものは算出し、困難なものはスキャナー入力で面積を求めた。最後に、250mのメッシュ内における不浸透域の面積の割合を求めデータ化した。

美々川等3流域の土地被覆分類結果より市街地、住宅地だけから構成されるメッシュの不浸透面積率データを用い(1メッシュは5画素×5画素から成る)、浸透面積率が0.7以上のデータを削除して、市街地、住宅地の平均浸透面積率はそれぞれ0.41、0.50と得られた。次に、同一メッシュ内において1画素毎にNDVIを計算し、平均値を求めると-1~1の範囲では、市街地は0.02452、住宅地は0.06711となり、0~255の値に変換すると71,82である。このNDVIの平均値を用いて、式(9)より様々な植生について浸透面積率を計算した結果が表-5である。なお、表中の草地、牧草地、草地+牧草地、森林、全植生のNDVIの平均値(0~255)はそれぞれ180,161,166,222,206である。

表-5 各植生に対する市街地・住宅地の浸透面積率(%)

	草 地	牧草地	草地+牧草地	森 林	全植生
市街地	39	44	43	32	34
住宅地	46	51	49	37	40

ことにした。よって、市街地には浸透面が43%含まれ、残り57%が不浸透面となる。また、住宅地の場合は浸透面、不浸透面をそれぞれ49%、51%とした。

4.2 美々川、祝梅川、遠浅川流域の実蒸発散量年変化

研究対象とした美々川は北海道中央部に位置し、流路延長18.9km、流域面積55.9km²でウトナイ湖に注ぐ川である。祝梅川は千歳川の支流で流域面積は34.2km²、遠浅川は安平川の支流で流域面積は64.3km²である。

美々川等3流域についてはランドサットTMデータ(1994.7.9観測)と国土数値情報250m標高メッシュデータとの重ね合わせを考慮して、1メッシュを5×5画素として流域を切り出し、3流域の土地被覆分類を行った。

3流域において、1985~1994の10ヶ年の月平均データを用いて、標高と海岸線からの距離に対する月平均気温、風速、水蒸気圧、降水量の重回帰直線を求め、1画素毎の月平均気温、風速、水蒸気圧、降水量を推定した。月平均気圧については、苫小牧の海面気圧を用いて標準大気に対する標高と海岸線からの距離によ

る推定式を用いた。月平均の全天日射量と雲量は霧の影響を受ける地域と受けない地域に分け、前者は苫小牧のものを、後者については全天日射量は早来南、雲量は千歳空港のものをを用いて推定した。また、斜面日射量及び月平均アルベドの求め方は、常呂川流域と同様である。

常呂川流域と同様に、Morton式のみ、Morton+小島の式、移流項の考慮の有無による式(2)～(5)の組合せの10通りで、1画素毎に実蒸発散量を計算した。純放射量が実蒸発散量の年変化に大きな影響を及ぼし、特にPenman式を用いた組合せのときにこの傾向が現れている。また、各種補完関係式で計算された実蒸発散量の年合計値を表-6に示す。この結果より、同じ計算式の組合せでも移流項の考慮により125～212mm/yrの増加となっている。今後は、常呂川流域と同様に水収支年変化の推定を行い、どの組合せが適しているかを検討する必要がある。

表－6 美々川等3流域の各種補完関係式による年平均実蒸発散量

	Morton	Morton+小島	移流項を考慮した場合				移流項を考慮しない場合			
			(2)+(4)	(2)+(5)	(3)+(4)	(3)+(5)	(2)+(4)	(2)+(5)	(3)+(4)	(3)+(5)
実蒸発散量 (mm/yr)	535.6	581.2	459.0	459.0	423.0	471.2	330.0	302.5	253.9	249.3

5. 結論

- 本研究において得られた結果は以下の通りである。
- 1)常呂川流域の年平均水収支の推定を行った結果、実蒸発散量の推定にはBrutsaert-Stricker式が適しており、年平均実蒸発散量は340.7mm/yrと得られた。
 - 2)常呂川流域の水収支年変化を推定でき、9月～3月の流域貯留高は増加し（降雪により1月が最大）、4月～8月の貯留高は減少（融雪出水により4月が最大の減少量）することが分かった。
 - 3)美々川等3流域において、草地+牧草地のNDVIに対する比率より求めた市街地、住宅地の不浸透面積率が、グランドトールスによる不浸透面積率とほぼ等しくなった。
 - 4)常呂川流域、美々川等3流域ともに、純放射量が実蒸発散量の年変化に大きな影響を与え、移流項は冬期の蒸発散量を増加させることが確認された。

謝辞

本研究は北海道開発局の研究助成を受けて遂行された。また、各種データの作成にあたり、北海道開発コンサルタントの援助を受けた。ここに記して感謝する。

参考文献

1)Morton, F.I.: Estimating evapotranspiration from potential evaporation : practicality of an iconoclastic approach, J. Hydrology, Vol.38, pp.1-32, 1978.

2)Brutsaert, W. and Stricker, H.: An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration, Water Resour. Res., Vol.15, No.2, pp.443-450, 1979.

3)大槻恭一・三野徹・丸山利輔: 水収支法と補完関係式による流域蒸発散量の比較－実蒸発散量推定に関する研究(Ⅱ)－, 農土論集, No.112, pp.17-23, 1984.

4)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.

5)向井幸男: MESSRとそのデータ処理ならびに利用について, (財) リモート・センシング技術センター, 28pp., 1988.(未発行)