

植生環境を介した広域蒸発散量分布の推定

Estimation of evapotranspiration distribution in a wide area
through evaluation of vegetation condition

申 士澈*・沢本正樹**

By Shachul SHIN and Masaki SAWAMOTO

The purpose of this study is to estimate evapotranspiration in a wide area using a correlation relationship between NDVI and evapotranspiration. Factors which control evapotranspiration can be considered that these are reflected by the vegetation condition. In order to grasp the vegetation condition at some point, NDVI calculated from NOAA-AVHRR data is utilized. A land cover classification is performed in Korean peninsula using a seasonal variation of the NDVI, and the relationship between NDVI and evapotranspiration is estimated for every land cover category. Then, the distribution of evapotranspiration can be estimated in Korean peninsula including North Korea where meteorological data are unavailable.

Keywords : NDVI, evapotranspiration, correlation relationship, vegetation condition

1. はじめに

蒸発散は水収支構成要素の一つであり、蒸発散の過程には大気・土壌・植生・水などの因子が複雑に関係している。流域の水収支の評価を行う場合には水収支の構成要素の長期間の観測値が必要であるが、蒸発散の観測方法としては確立されたものがないのが現状である。このため、気象要素による多くの推定法が提案されてきたが、これらの方法では広域面からの蒸発散量や流域内での空間的な分布などの推定は困難である。

近年、衛星リモートセンシングによる広域蒸発散量の推定がいくつか試みられているが、気象情報などの地上データを組み合わせたものが多く、地上データが全く得られない地域における適用は難しい。蒸発散を支配する因子には気温・風速・湿度などがあるが、その地点での植生環境はこれらの因子をよく反映していると考えられる。また、Running and Nemani¹⁾はiNDVIと年蒸発散量との間に比例関係があると報告している。このことに着目し、著者らは衛星データより得られる植生活性指標NDVIと流域蒸発散量との関連を調べてきた。今回は、この方法を朝鮮半島の全域に適用し、まず、地上データの得られる韓国内の蒸発散量とNDVIの関連を調べ、次に対象を朝鮮半島全域に広げ、蒸発散分布の推定を試みた。

* 学生員 工修 東北大学大学院 工学研究科

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

2. 対象流域

本研究では朝鮮半島の全域を対象としている。朝鮮半島の総面積は220,848km²であり、その中、韓国は98,477km²(44.6%)である。韓国の代表的な五つの流域、漢江、洛東江、錦江、梁山江、蟾津江を対象としてNDVIと蒸発散量の解析を行い、次に、衛星情報以外の情報が全く得られない北朝鮮に適用して、朝鮮半島の全域に対する蒸発散量を推定する。対象流域の概略的な位置と特性を図-1と表-1に示す。

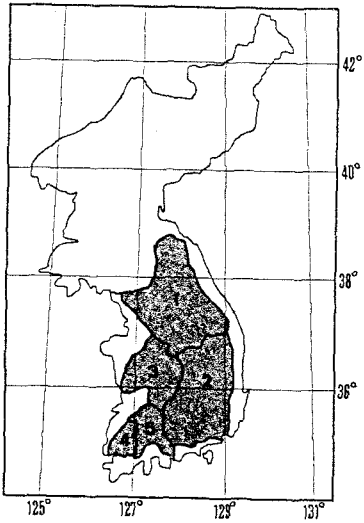


図-1 対象流域

表-1 各流域の特性

番号	流域名	面積(km ²)	流路延長(km)	平均標高(m)
1	漢江(Han Gang)	26,219	469.7	433
2	洛東江(Nakdong Gang)	23,852	525.7	287
3	錦江(Keum Gang)	9,886	414.4	234
4	梁山江(Yongsan Gang)	2,798	122.0	136
5	蟾津江(Sumjin Gang)	4,898	225.3	308

3. NDVIによる地覆分類

3.1 NDVIとiNDVI

広域面において植生状態を概観的に把握するためには人工衛星 NOAAに搭載されている AVHRRが有効である。AVHRRのChannel 1は可視光の波長帯として植物のクロロフィルによりよく吸収される。それに対して、Channel 2は近赤外域としてクロロフィルの活性度が高いほどよく反射される性質がある。それで、次式がNDVI(Normalized Difference Vegetation Index)と定義されている。

$$NDVI = (Ch.2 - Ch.1) / (Ch.2 + Ch.1) \tag{1}$$

ここで、Ch.1はChannel 1の輝度、Ch.2はChannel 2の輝度である。

また、植物環境を定量的に評価するための指標として、iNDVI(integrated NDVI)も提案されている。これは次式により計算される。

$$iNDVI = \frac{\sum (NDVI_j \times d_j)}{\sum d_j} \tag{2}$$

ここで、NDVI_j : j番目のNDVI、d_j : j番目のNDVIに対応する観測日数

3.2 地覆分類

地覆分類はリモートセンシングの陸地への応用として最も典型的なものの一つである。本研究では、朝鮮半島程度の広い範囲で、概略的な分類を目標として、地覆ごとにより植物の量や活性度の違いから地覆状況の分類を試みた。この方法はすでに美濃³⁾によって調べられている。美濃は東日本において国土数値情報を用い、地覆条件ごとのNDVIとiNDVIの変化を調べた。その結果、水域の場合にはiNDVIの平均値が-0.2付近、都市域0.0付近、水田0.2付近、森林0.4付近の値が得られ、この結果から分類したものと国土数値情報と比較して見た結果、かなり高い精度で分類で

きることを報告している。1989年4月より11月までのNDVIからiNDVIを計算し、各地覆条件に対する閾値を適当に決めると朝鮮半島での概略的な地覆分類が可能になる。この方法の一つのメリットは常緑林と落葉林が区別できるということである。ここでは、4月に落葉林と常緑林のNDVIの差が大きくなるため、この性質から落葉林と常緑林を分類した。

本研究で選んだカテゴリーは、水域、都市域、水田、落葉林、常緑林、その他、とし、朝鮮半島全域の地覆分類を行った。前述の5大流域における結果を表-2に示す。結果を見ると、森林の割合が90%ぐらいを占めているが、これは、NDVIが水田より高いと森林となっているため、落葉林の場合に草地や畑、あるいは果樹園などが含んでいると思われる。しかし、数種の被覆で複雑に形成されているとしても、それぞれの植物量や活性度はその地点でのNDVIにより反映されるので、その地点での地覆条件に相当する植生環境がNDVIにより把握できる。

表-2 地覆分類の結果 単位:pixel,()は %

流域名	総pixel数	都市	水田	落葉林	常緑林	その他
漢江	22,072	374 (1.69)	1,571 (7.12)	20,077 (90.96)	48 (0.22)	2 (0.01)
洛東江	19,212	117 (0.61)	1,304 (6.79)	16,411 (85.42)	1,351 (7.03)	29 (0.15)
錦江	8,313	11 (0.13)	1,251 (15.05)	7,014 (84.37)	7 (0.08)	30 (0.36)
栄山江	2,458	14 (0.57)	758 (30.83)	1,545 (62.85)	134 (5.45)	7 (0.28)
蟾津江	4,068	0 (0.00)	279 (6.86)	3,320 (81.61)	441 (10.84)	28 (0.69)

4. 蒸発散量の推定

4.1 補完関係式による蒸発散量(Ea)の算定

飽和表面からの蒸発散量の推定法では種々あるが、これらは可能蒸発散量を推定する方法として、流域の実蒸発散量で換算するためには、流域の固有のパラメタや経験係数などの使用が不可欠である。Morton⁶⁾により提案された補完関係式は一般の地上観測資料から実蒸発散量を直接算定できる方法である。しかし、Mortonの補完関係式は非常に複雑であり、多くの経験係数が必要になっているため、後にBrutsaert and Stricker⁷⁾によりPriestly and Taylorの可能蒸発量とPenmanの可能蒸発散量を直接使える式が提案されたが、この式による蒸発散量は冬期に過少の傾向があるため、本研究ではこの式に冬期の純放射量に対して移流項を考慮した次式を用いた。

$$Ea = 2Ep - Epp \tag{3}$$

$$Ep = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G + M) \tag{4}$$

$$Epp = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G + M) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) (e_s - e_a) \tag{5}$$

$$M = 0.66Ln - 0.44Rn \tag{6}$$

ここで、 E_a : 流域蒸発散量(mm/d)
 E_p : Priestly and Taylorの可能蒸発量(mm/d)
 E_{pp} : Penmanの可能蒸発散量(mm/d)
 R_n : 純放射量(J/m²/d)
 G : 地中熱flux(J/m²/d)
 M : 移流項(J/m²/d)
 L_n : 短波放射収支(J/m²/d)
 Δ : 飽和蒸気圧曲線の勾配(Hpa/°C)
 γ : 乾湿計定数(Hpa/°C)
 e_s : 空気の飽和水蒸気圧(Hpa)
 e_a : 空気の水蒸気圧(Hpa)

計算時に必要とする気象観測値は気温・風速・相対湿度・日照時間などがあるが、これらは数地点分しか得られないことが通常であるので、できるだけ、気象要素を標高の関数で表し、その他の要素はその流域の平均値を用いることにして、カテゴリーごとの気象要素を計算した。気温の場合は、単純に-0.5°C/100mの高度による減率を考慮し、水蒸気圧がだいたい高度に反比例する性質を利用して標高ごとの相対湿度を求めた。また、風速の場合は、近藤ら⁴⁾によって推定された様々な地表面における粗度を適当に使い、対数関係により、カテゴリーごとの平均風速を推定した。この気象データを用い、1989年の韓国の五つの流域に対して地覆条件ごとの蒸発散量を算定した結果は図-2である。

4.2 NDVIによる蒸発散量(E)の推定

韓国のように森林が多い地域における蒸発散量はその地点での植物の量や活性度と強く相関があると考えられる。NDVIがその地点での植生環境をよく表現し、蒸発散を支配する因子はその点の植生条件に影響を及ぼしていることから、NDVIと蒸発散量との相関関係を用いると広域面での蒸発散分布が推定できる。既往の研究^{1), 2)}から韓国や東日本においてNDVIと蒸発散量とはほぼ比例関係があることが確認された。NDVIをある一定の値ごとに区切り、それぞれの値域に対応するpixel数を変数とする次の重回帰分析を地覆条件ごとで年間を通じて行うと各ランクでの平均NDVIに対応する蒸発散量が求められる。

$$E_a = e_1 p_1 + e_2 p_2 + \dots + e_n p_n \quad (7)$$

ここで、 E_a : 補完関係式からの蒸発散量(mm/mon)

e_i : NDVIに対応する蒸発散量(mm/mon)

p_i : 各ランクでのpixel数

n : ランク数

補完関係式から求めた蒸発散量(E_a)を目的変数、NDVIから得られる各ランクでのpixel数 p を説明変数とすると、 n 個の回帰係数 e が求められる。結局、あるpixelでのNDVIを衛星データから計算しておくと、そのNDVIに対応する e の値がその地点での蒸発散量になる。本研究では月単位の蒸発散量として目的変数が8個(4月～11月)であるため、ランク数 n は水田を除いては $n=4$ の場合が一番きれいな相関関係が得られた。水田の場合、4月～6月にはNDVIは低い、水面からの蒸発によって実蒸発散量は比較的大きくなるため、4月～6月、7月～11月で分けてNDVIと蒸発散量との相関を調べることにした。この場合、目的変数の減少によって、それぞれ $n=2$, $n=3$ の場合に

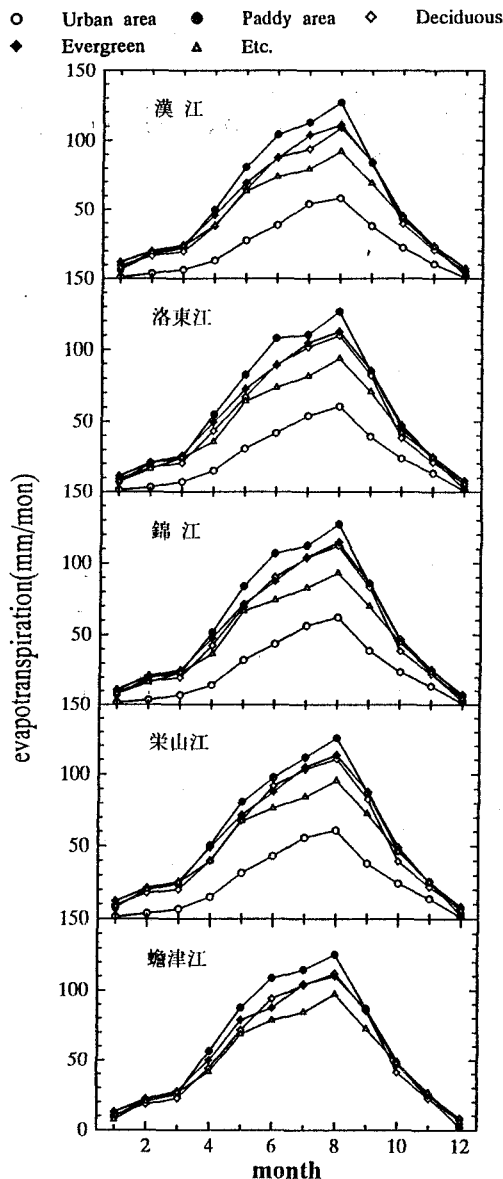


図-2 補完関係式による蒸発散量(Ea)

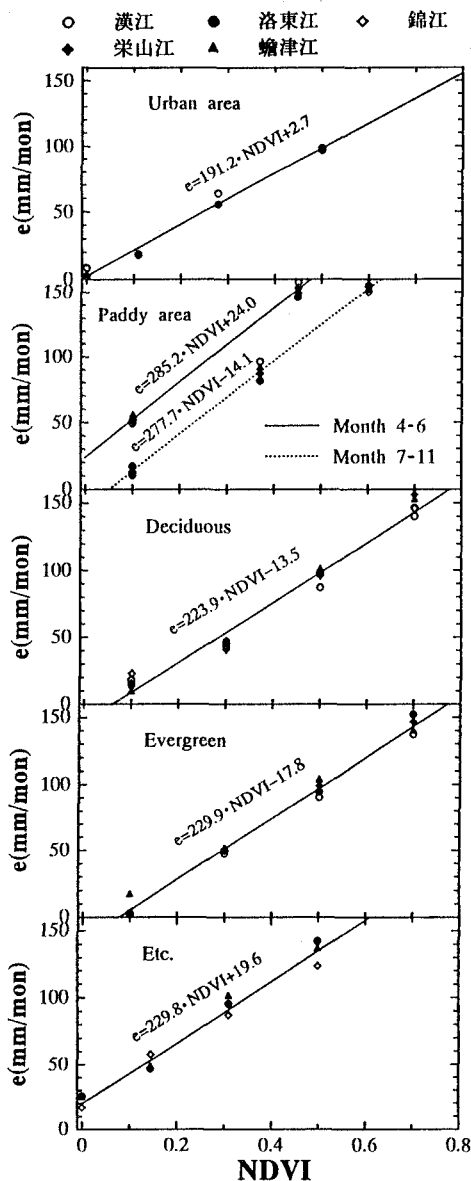


図-3 NDVIと蒸発散量(e)との関係

よい結果が得られた。五つの流域から得られた地覆条件ごとのNDVIと蒸発散量(e)との関係を示したものが図-3であり、この図からほぼ比例関係があることがわかる。この結果から得られた回帰直線式を用いた朝鮮半島での1989年7月の蒸発散分布を図-4に示した。五つの流域における地覆条件ごとの各pixel当の蒸発散量の和を同じ地覆の総pixel数で割って得られた蒸発散量(E)と補完関係式からの蒸発散量(Ea)との関係を示したものが図-5であり、約±10%以内の誤差でNDVIから蒸発散量を求めることができる。

5. まとめ

本研究では、韓国の五つの流域から得られたNDVIと蒸発散量との関係を用い、朝鮮半島全域における1989年の蒸発散分布の推定を試みた。この方法は蒸発散量を支配する因子が植生指標によく反映されているという仮定から開発された方法であり、この仮定は韓国や日本のような森林が

多い地域においては実際の現象と大きな差がないと考えられる。

NDVIを用いると朝鮮半島での概略的な地覆状況が把握でき、北朝鮮のような地形情報が全く得られない地域においても有効であると思われる。また、NDVIと蒸発散との関係から気象情報や水文情報が得られない地域においても衛星データだけで蒸発散量を容易に推定することができる。本研究では1989年のデータだけを使って相関関係を求めたが、年を増やしてより多くのデータを用いることにより、さらに精度を上げることが期待される。

謝辞：本研究に用いられたNOAAデータは東北電力と東北大学との共同研究の一環として受信したものである。関係者各位に感謝します。本研究の実施にあたり文部省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)と河川整備基金の補助を得た。また、公表にあたり小川基金の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

1. 申 士澈・多田 毅・風間 聡・沢本正樹：韓国の蒸発散量空間分布の推定，水工学論文集，第38巻，pp.161～166，1994.
2. 多田 毅・風間 聡・沢本正樹：NDVIを用いた広葉樹林帯の蒸発散分布の推定，水文・水資源学会誌，Vol.7，No.2，pp.114～119，1994.
3. 美濃 憲・風間 聡・沢本正樹：iNDVIを用いた環境評価について，環境システム研究，Vol.21，pp.40～45，1993.
4. 近藤純正・山沢弘実：局地風速と現実複雑地表面の粗度，天気，30，pp.25～33，1983.
5. Kotoda, K. : Estimation of river basin evapotranspiration, Environmental Research Center Paper, Univ.Tsukuba, Vol.8, pp.1～92, 1986.
6. Morton, F. I. : Estimating evapotranspiration from potential evaporation : practically of an iconoclastic approach, J.Hydrol., 38, pp.1～32, 1978.
7. Brutsaert, W. and Stricker, H. : An advection - aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration, Water Resour.Res., 15, pp.443～450, 1979.
8. Running, S.W. and Nemani, R.R. : Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates, Remote Sens. Environ., 24, pp.347～367, 1988.

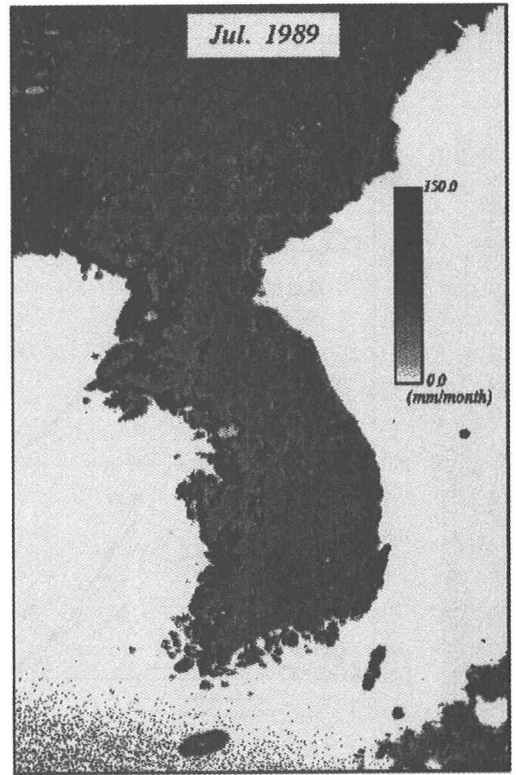


図-4 1989年7月の蒸発散量の分布

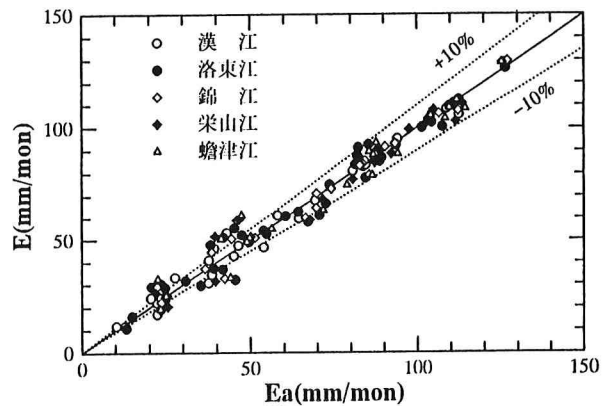


図-5 E(NDVI)とEa(補完関係式)との比較