

## 韓国の蒸発散量空間分布の推定

Estimation of spatial distribution of evapotranspiration  
in Korea

申 士澈\*・多田 毅\*\*・風間 聡\*・沢本正樹\*\*\*

By Shachul SHIN, Tsuyoshi TADA, So KAZAMA and Masaki SAWAMOTO

NOAA-AVHRR data is used to obtain spatial distribution of evapotranspiration for 5 basins, about 69% of total area of Korea. Amounts of evapotranspiration of these basins are estimated by the Penman method, and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) calculated from NOAA-AVHRR data is utilized to estimate its spatial distribution. Because the NDVI value indicates the activity of vegetations and the NDVI histogram reflects the variation of evapotranspiration, its spatial distribution can be estimated using NDVI. This method will make possible to estimate that of North Korea where meteorological data are unavailable.

Keywords: NOAA-AVHRR, NDVI, evapotranspiration, spatial distribution

### 1. はじめに

最近、広域陸面における水文過程の解析と水資源量の実態把握の必要性が高まって来ている。韓国を例にとると、年平均降水量は1,200mmで日本の60%にすぎず、かつ、大半が雨期(7~8月)に偏在するため、季節によって水需要のアンバランスが著しく、水循環過程の解析は極めて重要である。水循環過程において蒸発散は降水とともに地表面の乾湿を決める重要な因子である。蒸発散は大気中における水蒸気の移動現象であるため、実蒸発散量を求めることは現在の時点では難しく、従来より数多くの方法が提案されてきている。たとえば、水蒸気の流れを直接とらえようとする空気力学的方法、蒸発散には熱エネルギーの消費が伴うことを利用した熱収支法、熱収支法の温度コウ配を温度-水蒸気圧曲線を用いて水蒸気圧コウ配におき変えたPenman法、また、気温だけを変数とするThorntwaite法などが提案されてきた。しかし、これらの方法は限られた地点の気象情報を用いた推定法として広域面からの蒸発散量や流域内での空間的分布の推定は困難であり、衛星リモートセンシングによる広域面の蒸発散量の推定方法が期待されるようになっている。

---

\* 学生員 工修 東北大学大学院 工学研究科

\*\* 学生員 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)

本研究では植生の活性度が蒸発散量とほぼ比例するというに着目して NOAA-AVHRRのデータから植物の活性度を示す指標として NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)を計算し、韓国の国土の約 69%を占める五つの流域で蒸発散分布を推定した。図-1は蒸発散量分布計算の流れ図である。

## 2. 対象流域

本研究では韓国の代表的な五つの流域、漢江(Han Gang),洛東江(Nakdong Gang), 錦江(Keum Gang), 荣山江(Yongsan Gang), 蟾津江(Sumjin Gang)を対象としている。表-1と図-2は各流域の特性と各観測所の位置を示している。

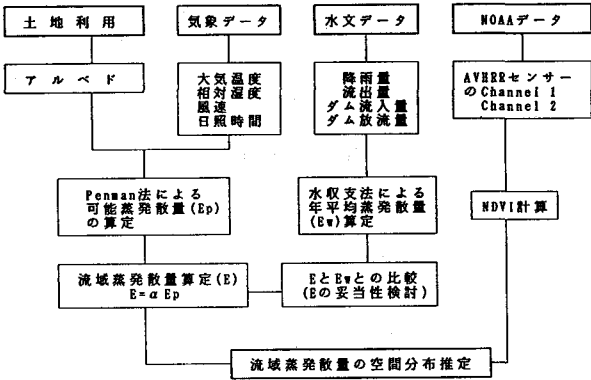


図-1 蒸発散分布計算の流れ図

表-1 各流域の特性

| 番号 | 流域名               | 面積(km <sup>2</sup> ) | 流路延長(km) | 平均標高(m) |
|----|-------------------|----------------------|----------|---------|
| A  | 漢江(Han Gang)      | 26,219               | 469.7    | 433     |
| B  | 洛東江(Nakdong Gang) | 23,852               | 525.7    | 287     |
| C  | 錦江(Keum Gang)     | 9,886                | 414.4    | 234     |
| D  | 荣山江(Yongsan Gang) | 2,798                | 122.0    | 136     |
| E  | 蟾津江(Sumjin Gang)  | 4,898                | 225.3    | 308     |

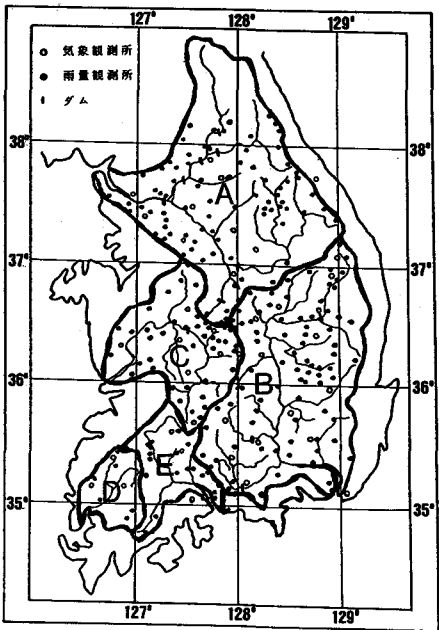


図-2 五つの対象流域

## 3. 蒸発散量の算定

飽和表面からの蒸発散量推定式には種々あるが、物理的な基礎を持つ推定法として最も有名で、広く一般に適用されている方法は Penman法である。Penman法は、当初水面蒸発量の推定法として提案されたが、後に植物で完全に覆われた地表面に十分に水が供給されている場合に失われる蒸発散量と定義された可能蒸発散量(potential evapotranspiration)の推定式として用いられるようになった。Penman法による可能蒸発散量Epは次の式で与えられる。

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e_a)$$

Ep : Penman法による可能蒸発散量(mm/d)

$$R_n = (1 - r) I_o (0.17 + 0.55 n / N) - 0.92 \sigma (t + 273)^4 (0.56 - 0.09 \sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9 n / N)$$

$$f(u)=0.26(1.0+0.537u)$$

$I_0$  : 大気外太陽放射 ( $J/m^2/d$ ),  $n/N$  : 日照率 (%)

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数 ( $5.68 \times 10^{-8} W/m^2/k^4/d$ )

$r$  : アルベド,  $t$  : 大気温度 ( $^{\circ}C$ )

$e_s$  : 空気の飽和水蒸気圧 (Hpa),  $e_a$  : 空気の水蒸気圧 (Hpa)

$u$  : 2mの地点での風速 (m/s),  $\Delta$  : 飽和水蒸気圧曲線の勾配 (Hpa/c)

$\gamma$  : 乾湿計定数 (Hpa/c)

ここで、いずれの流域でも60~70%が山地、12~20%が水田、6~17%が畑、その他が1~8%程度となり、アルベド  $r$  は Kotoda(1986)<sup>3), 4)</sup> によってそれぞれの土地利用の月平均アルベドの加重平均から得られた表-2の値を用いた。

表-2. 算定に用いた月平均アルベド

| 月      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| albedo | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.12 |

しかし、Penman法は乾燥条件下では湿度の低下、気温の上昇によって可能蒸発散推定値は実蒸発散量に比べて大きくなる。Penmanの蒸発散推定値は乾燥条件下では過大で評価される。韓国の場合には年平均降雨量の約70%が6月から9月に集中し、他の季節は比較的乾燥状態となる。

今回の研究では蒸発散量の空間分布を求めることに中心をおいて単純に経験定数を乗じて実蒸発散量 ( $E$ ) を求めることにする。ここでは 厳・丸山(1980)<sup>2)</sup> が韓国の錦江流域での水収支法によって求めた表-3の係数を使用することにする。この蒸発散量は図-3に示す。

表-3. 用いられた  $E$  と  $E_p$  の比

| 月       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $E/E_p$ | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.4 |

#### 4. 水収支との比較

自然流域におけるある期間の水収支式は、流域外からの地表水ならびに地下水の流入がないものとする次のように表わされる。

$$E_w = P - R \pm \Delta S$$

$E_w$  : 蒸発散量 (mm),  $P$  : 降雨量 (mm)

$R$  : 流出量 (mm),  $\Delta S$  : 貯留変動量 (mm)

比較的大きな流域の年間の水収支の長期間の平均貯留変化は0に近い。従って長期間の流出量及び降水量を正確に測定すると、比較

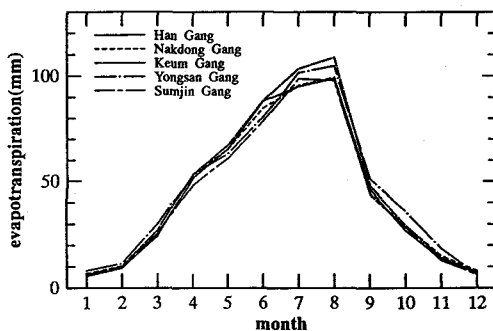


図-3 各流域の蒸発散量 ( $E$ )

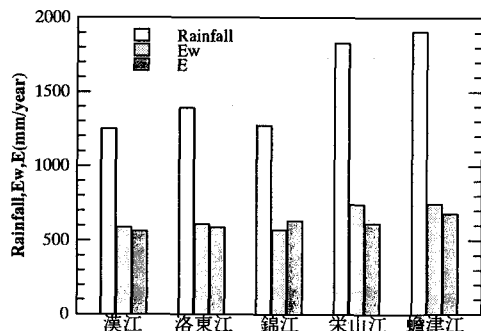


図-4  $E$  と  $E_w$  との比較

的正確な蒸発散量が求められる。本対象流域にはいくつかのダムがあり、ここでは次の式から年平均蒸発散量を求める。

$$E_w = P - R$$

$$R = \Sigma (\text{ダムの流入量} - \text{ダムの放流量}) + \text{流域出口での流量}$$

水収支から求められた年平均蒸発散量( $E_w$ )と流域蒸発散量( $E$ )との比較は図-4 である。この結果を見ると五つの流域で求められた蒸発散量( $E$ )は比較的妥当な値と考えられる。

### 5. 空間分布の推定

植物の葉は可視域の波長帯をよく吸収し、近赤外域の波長帯を反射または透過する性質がある。そのため上空から見た場合、両波長の輝度差と樹冠で吸収される光線量とが正の相関を示すと予想される。そこで次の式をNDVIと定義する。

$$NDVI = \frac{(ch.2 - ch.1)}{(ch.2 + ch.1)}$$

ここで、ch.1はChannel 1(可視域)の輝度、ch.2はChannel 2(近赤外域)の輝度である。

NDVIが高いほど植物の活性度が高く、植物量が多いことを意味する。図-5は各流域の1989年4月から11月までのNDVIの平均値である。漢江の場合は9月、他の流域では6月に雲がかかっている部分が多いため、NDVIの平均値が低くなってこの月のデータを除いて解析を行った。このNDVIと蒸発散量との間には正の相関があることが只見川流域で確かめられている<sup>1)</sup>。特にNDVIのある各ランクのヒストグラムは蒸発散量の変化をよく反映している。そこで、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画素数を変数とした次の式から蒸発散の空間分布がわかる。

$$E = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^n e_i p_i$$

$E$  : 流域の平均蒸発散量(mm/mon)

$e$  : 各画素での蒸発散量(mm/mon)

$P$  : 総画素数

$p$  : 各段階の画素数

$n$  : NDVIの分割数

年間の $E$ と $p$ の組を与え、回帰分析することで、 $n$ 個のNDVI値域に対応した $n$ 個の $e$ が求められる。ある画素のNDVIがわかれば、そのNDVIに対応する $e$ の値がその地点での蒸発散量となる。

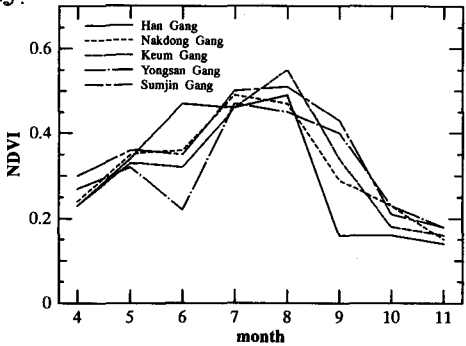


図-5 1989年のNDVI平均値

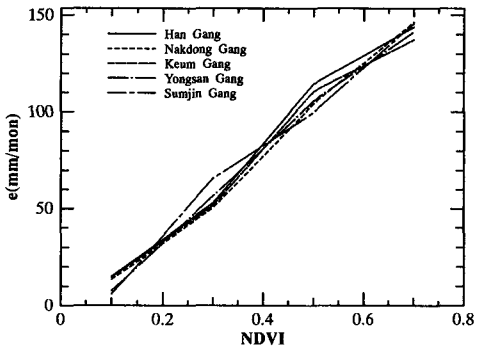


図-6 NDVIとeの対応

図-7 漢江流域の蒸発散分布

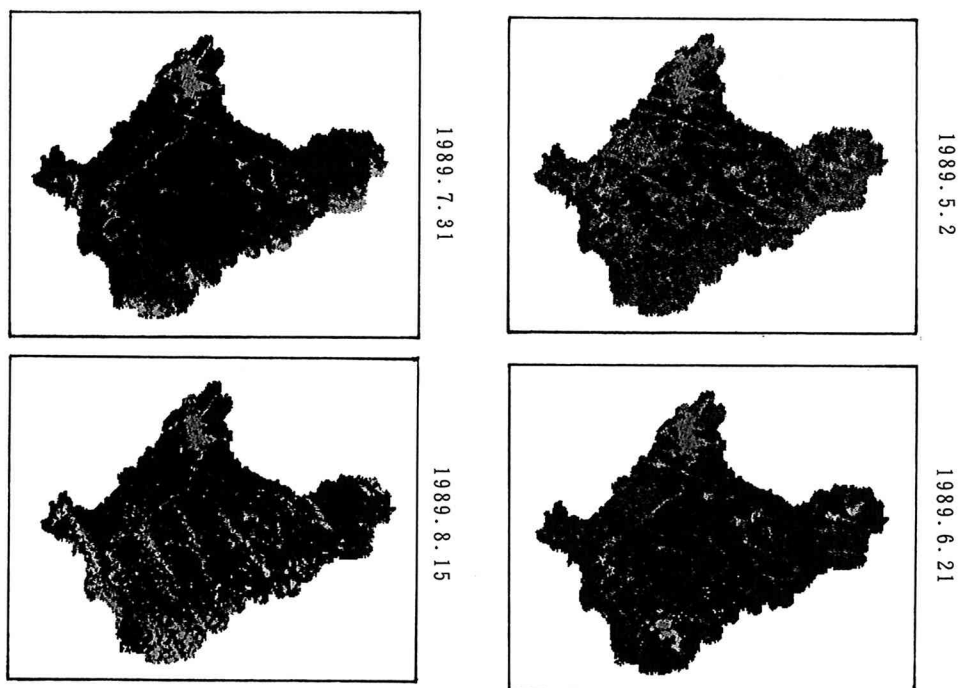
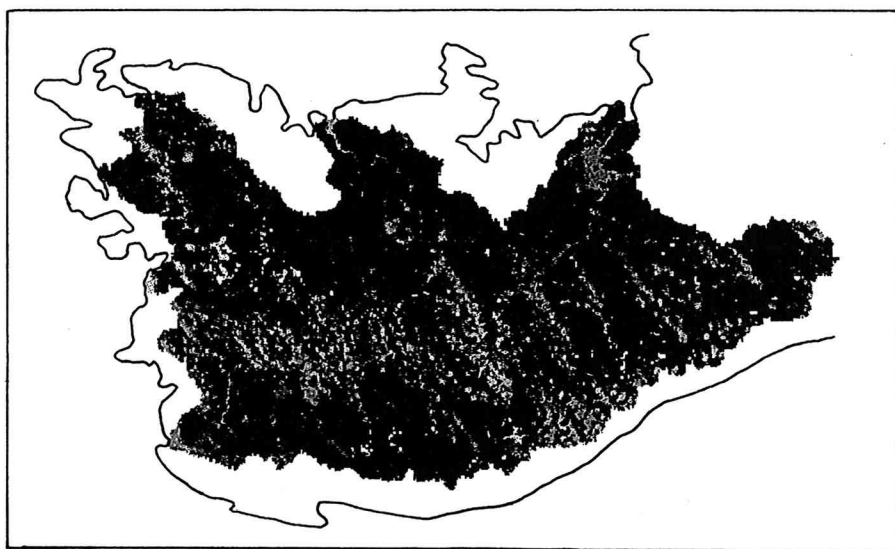


図-8 1989年8月15日の五つの流域の蒸発散分布



ここで、EはPenman法によって求められた流域の蒸発散量であり、現在のデータの数では分割数  $n=4$  の場合が最も妥当な結果を与えることがわかった。各流域のNDVIに対応する  $e$  の値は図-6である。漢江流域の1989年の蒸発散分布は図-7であり、各流域の1989年8月の蒸発散分布を合わせたものが図-8である。

## 6. まとめ

以上、1989年の NOAA衛星データから韓国の五つの流域に対して蒸発散量とその空間分布を計算した。今回使ったPenman法による可能蒸発散量に一定の経験定数を乗じる方法は適切でないことは指摘されてきたが、今後湿潤状態だけでなく乾燥状態にも適用可能な流域蒸発散量の推定モデルの開発によって解決されるだろう。以上の結果より、韓国の流域に対してもNDVIのヒストグラムが蒸発散量とほぼ比例していることがわかって、この関係から広域の蒸発散量の空間分布推定ができることがわかった。今回は流域内の土地被覆状態に関係なく、NDVIと蒸発散量との相関を仮定したが、今後、NOAA衛星データを用いて地覆分類を行い、Penman法でのアルベドにもそれぞれの被覆状態に対するアルベドを適用し、被覆状態毎にNDVIと蒸発散量との相関を調べることによって、精度を上げることが望まれる。

将来には気象情報の整備されていない地域への適用として北朝鮮の蒸発散量を NOAAデータから求め、韓半島全域に対する蒸発散量の空間分布を推定したい。

謝辞：本研究で用いられた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。なお、本研究に当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。ここに感謝を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 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推定，水文・水資源学会誌，Vol.7，No.2，1994.
- 2) 厳柄鉉・丸山利輔：水収支による錦江(韓国)流域の季別蒸発散量の推定，農土論集，88，pp.8-14，1980.
- 3) 内田 諭・星 仰：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) Kotoda, K. : Estimation of River Basin Evapotranspiration, Environmental Research Center Paper, Univ. Tsukuba, Vol.8, pp.1-92, 1986.