

NDVIを用いた蒸発散分布推定

Estimation of evapotranspiration distribution by using NDVI

多田 毅*・風間 聡**・沢本正樹***

By Tsuyoshi TADA, So KAZAMA and Masaki SAWAMOTO

The purpose of this paper is to develop a model for estimating the distribution of evapotranspiration over a wide area covered by forest. Vegetation index closely relates to evapotranspiration. Therefore the distribution of NDVI (Normalized Differences Vegetation Index) calculated from NOAA-AVHRR data is compared with the total evapotranspiration evaluated by the conventional method (Thornthwaite method). Correlation between evapotranspiration and NDVI is derived from multiple regression analysis in three basins. It is confirmed that evapotranspiration in a forest is propotional to NDVI. The distribution of evapotranspiration in the basin can be estimated from the correlation.

key words: evapotranspiration, NDVI, NOAA-AVHRR

1. はじめに

蒸発散量の把握は、水文学において水収支を解明するため不可欠であるだけでなく、エネルギー収支の面でも重要な因子である。しかし広域面からの蒸発散量を定期的かつ定量的に算定する方法は実験的にも理論的にも確立されていない。従来は気象資料を利用する推定法が利用されてきたが、観測地点が限られているため蒸発散量の分布を求めるのは困難である。また近年、微気象観測と精密な熱収支モデルによる推定や、それにリモートセンシングを組み合わせた方法等が試みられているが、やはり多くの測定点や多くのパラメータの同定が必要であり、広域に拡張するためには困難が予想される。特に筆者らは東北地方全体の水循環の概算を目標としており、実用的な作業量で極めて広い範囲の蒸発散量を推定する手法を開発する必要がある。そこで本研究は蒸発散量とその地域の植生との相関に着目し、NOAA衛星のAVHRRデータを用い、東北地方の3流域について、NDVI（植生指標）と蒸発散量との関係を統計的に考察する。そして衛星から得られるNDVIのみから蒸発散分布を推定することを試みる。

2. データセット

本研究で使用したデータは、NOAA-AVHRRセンサの物である。NOAA衛星のAVHRRセンサは物理分解能が良く

* 学生員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)
** 学生員 修(工) 東北大学大学院 工学研究科 (同上)
*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (同上)

(10bit)，地上分解能も比較的良く(1.1km)，回帰日数が短い(2回/日)ため積雪、植生などの地上観測と時系列解析に適している。本研究では東北大学理学部大気海洋変動観測研究センター地球観測衛星受信解析室においてデータベース化された0-TIDASとN-LAND画像データベースを利用した。冬季は東北地方にある対象流域の多くが積雪で覆われるため、本研究では4月から11月の晴天日を対象とした。

3. NDVIの季節変動

3.1 NDVIとは

広域の情報を瞬時に把握し、また定期的かつ容易にデータを収集整理するためには人工衛星データが有効である。そこで植生指標としてNDVI (Normalized Difference Vegetation Index) を用いる。植物の葉は可視光の赤色域を多く吸収し、近赤外を反射または透過する性質がある。そのため上空からみた場合、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ことが知られている。そこでAVHRRのChannel 1(可視)とChannel 2(近赤外)の差をとり、両チャンネルの合計で除すことで正規化し、NDVIとして定義された。

$$NDVI = (Ch. 2 - Ch. 1) / (Ch. 2 + Ch. 1) \quad (1)$$

この値と葉面積指数および光合成有効放射吸収量との相関関係が報告されており¹⁾²⁾、この値が大きいほど一画素の中での葉の密度、または各々の葉の中での葉緑素の密度が高いと考えられる。NDVIを高めるこの二つの要因を別個に観測することは出来ないが、後述するように両者はNDVIの季節変化に異なる影響を与える。

3.2 NDVIの季節変動

1989年の滝ダム流域全体のNDVI平均値の変化を図-1に示す。本流域は大部分が広葉樹林で占められているため、NDVIは春から夏にかけて急激に増加し、落葉に伴い秋から冬にかけて減少している。さらに1989年の滝ダム流域のNDVIヒストグラムの季節変化を図-2、3に示す。この図から、平均値の変化からだけではわからない特徴がみられる。NDVIが春から夏にかけて増加してゆく時は、ヒストグラム全体が高い値の方に移動するのと同時にピークが徐々に鋭くなってゆく。逆に減少していく時は、ヒストグラムの形状は変わらずに鋭いピークを保ったまま全体が低い方に移動してゆく。この違いは以下の現象を反映していると考えられる。NDVIが増加してゆく過程は、まだ閉じていない樹冠が葉の面積の増加により徐々に閉じてゆくことと、ひとつひとつの葉が成熟してゆくことから成る。逆にNDVIが減少してゆく過程は、樹冠は閉じ切ったまま、葉の活性度が徐々に減少し、落葉で一気にピークが崩れることから成る。このようにNDVIのヒストグラムは植物の季節変化を良く反映する。

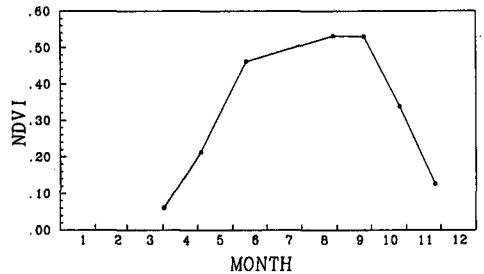


図-1 滝ダム流域のNDVI平均値

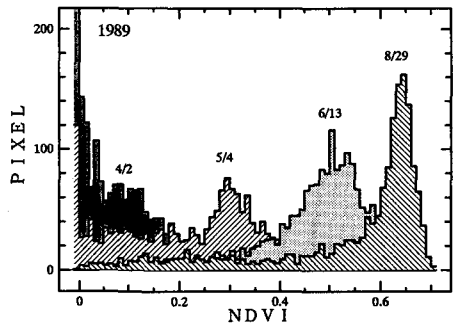


図-2 NDVIヒストグラムの季節変化

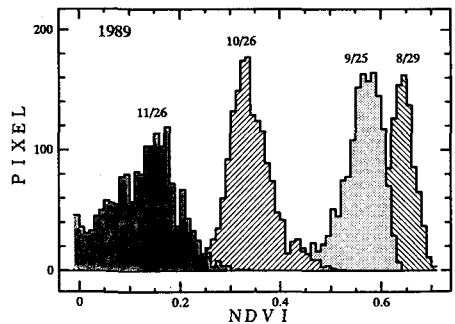


図-3 NDVIヒストグラムの季節変化

4. NDVIによる蒸発散量推定

4.1 NDVIと蒸発散の相関

蒸発散量を支配する因子には、気温、湿度、風速、地表面温度、日照時間、土壌水分、地表面の熱的性質等があるが、これらは全てその地域の植生に強く影響を与えており、また植物自身も、蒸発散量に影響を与えている。即ち、ある時点での植生の状態は、それまでのその地域における気象条件の履歴を反映している筈である。そこで、植生をパラメーターとして中、長期の蒸発散量を推定できることが予想される。したがって、NDVIを用いて蒸発散量を推定し得ることが期待できる。そこで、まず約2000km²のほぼ広葉樹林帯から成る滝ダム流域を対象とし、そこでのNDVIと蒸発散量との関係を調べ、蒸発散分布の推定を行なう。

4.2 対象流域

本節では、解析対象を只見川流域の滝ダムより上流の集水域1991.4km²とした。総画素数1657個、平均標高1010mで北緯37度10分に位置する。流域には集落は少なく、広葉樹89.1%、針葉樹9.5%、その他1.4%となっている。流域は大きく分けて東側の伊南川筋と西側の只見川筋とに分けられる。只見川筋は急峻な峡谷で人家は無いが、伊南川筋は標高の低い部分に平坦地域が見られ、ある程度の土地利用が行なわれている。

4.3 解析

本研究ではNDVIと蒸発散量との間に何らかの相関があると仮定し、既存の方法によって流域全体の蒸発散量を求め、NDVIを用いてその流域内での分布を推定する。またその過程においてNDVIと蒸発散量との関係を明らかにする。ただし先に述べた性質上、特定の日時ではなく一ヶ月程度の大きな変動を対象とする。

本研究では流域内の総蒸発散量を推定するためにThornthwaite法を使用した。Thornthwaite法は本来可能蒸発散量を推定するものであるが、日本において流域全体の実蒸発散量と良く一致することが野上³⁾によって指摘されている。またこの流域については風間⁴⁾により、Thornthwaite法で実蒸発散量を推定可能であることが確認されている。Thornthwaite法によって計算した1989～1991年の蒸発散量を図-4の実線に示す。

NDVIの季節変化と蒸発散量の変化とを比較すると、NDVI値と蒸発散量とのあいだには正の相関があることが予想される。また、NDVIヒストグラム

が植物の季節変化を良く反映することもわかった。そこでNDVIの値が近い画素同士は蒸発散量も近い値をとると仮定し、NDVIヒストグラムの各段階の画素数(面積に比例する)に、そのNDVIに対応する蒸発散量を掛け合わせ、それらの合計が流域全体の蒸発散量と一致する、という次式を仮定する。

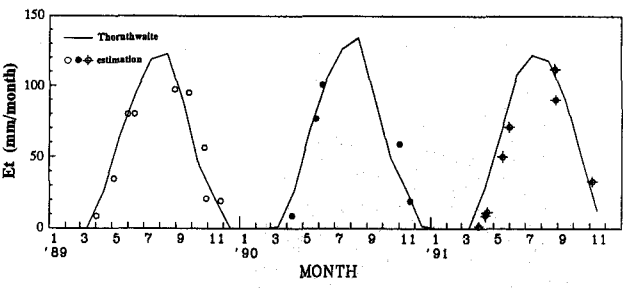


図-4 滝ダム流域の蒸発散量

$$E = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^n e_i p_i \quad (2)$$

- E : 流域全体の平均蒸発散量 (mm/月)
- P : 総画素数
- e_i : i 段階のNDVIが持つ 1 画素あたりの蒸発散量 (mm/月)
- p_i : i 段階の画素数
- n : NDVIの段階数

ここでEはThornthwaite法から、pは衛星データから求められる。
Eとpの組を複数用意し、最小自乗法によりn個の係数eを決定できる。これは言い替えば、この流域す

なわち広葉樹林が卓越する地域でのNDVIと蒸発散量との関係を求めたことになる。任意の地点のNDVIが判ればそのNDVIに対応する e の値がその地点での推定蒸発散量となる。従って衛星から得られるNDVIの分布をもとに蒸発散分布を推定することが可能である。

ヒストグラムの分割数 n は結果の精度を左右するため、慎重に決める必要がある。NDVIと蒸発散量との対応を細かく知るためには n は可能な限り大きくしたい。しかし重回帰分析を行う際、独立変数の数を多くすると、それに見合った多くのデータを用意しないと物理的な意味を失ってしまう。またNDVIと蒸発散量とが一对一に対応するという仮定の限界もある。したがっていたずらに n を大きくすることは無意味である。

4.4 結果

今回は1989年のデータから快晴時のものを7シーン選び出し、NDVI 0.2毎($n=4$)として e を計算した。結果を図-5に示す。この図より、蒸発散量とNDVIはほぼ比例関係にあることがわかる。この関係を1989年6月13日のNDVI画像に適用して算出した6月の月平均蒸発散量を図-6に示す。また1989年の係数 e を用いて、1989, 1990, 1991年の流域平均蒸発散量を推定したものを図-4に併せて示す。誤差の絶対値の平均は12.3 (mm/月)であった。係数決定に使用した1989年が最も誤差が少ないと予想したが、結果は年度による差は見られなかった。これは、月単位程度のおおまかな年変動を議論しているからである。1989, 1990年の春から夏にかけては良く合っているが、秋期に過大に見積られる傾向がみられる。1991年の4月から6月の推定値が低い値を示すのは、薄い雲による影響である。雲によってNDVIは大きく減少するためである。NDVIから求めた流域全体の蒸発散量とThornthwaite法で求めたものの対応を図-7に示す。

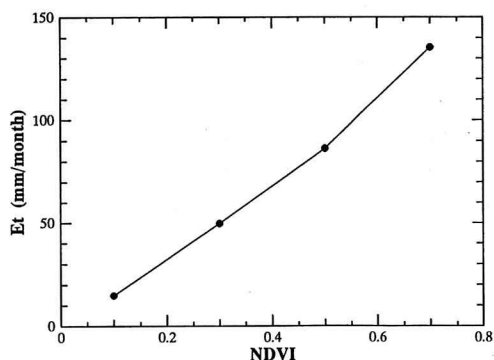


図-5 NDVIと蒸発散量との関係

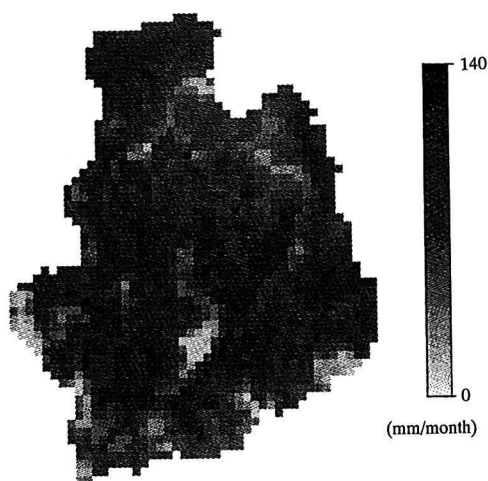


図-6 滝ダム流域の蒸発散分布(1989年6月13日)

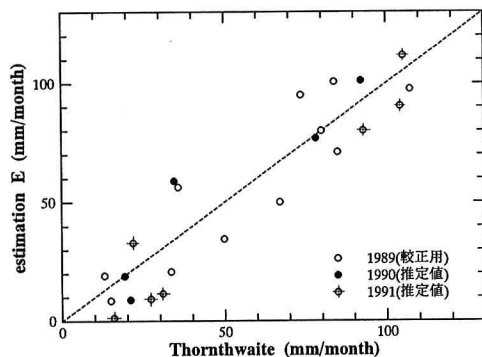


図-7 今回の方法の精度

5. 他の流域への適用

5.1 解析法

滝ダム流域と同様の解析を、湯田ダム、釜房ダムという2つの流域について行った。前節における滝ダム流域での解析の結果、年単位の気候変動が結果に与える影響が少ないことが判った。そ

ここで雲によるデータ不足を補うため、1989年から1991年までの3年間のデータを一括して扱い、各々の流域について1セットずつ、NDVIと蒸発散量の関係を計算した。これによって、'89～'91年の平均的な傾向が得られる。湯田、釜房に加え、比較のため滝ダム流域についても同様に3年分を一括して計算した結果を示した。また、各流域の実蒸発散量は滝ダム流域と同様、Thornthwaite法を用いて推定した。

各流域におけるNDVIと蒸発散量との関係を図-8に示す。また、NDVIから求めた流域全体の蒸発散量とThornthwaite法で求めたものの対応を図-9に示す。重相関係数は滝ダム流域が0.921、湯田ダム流域が0.868、釜房ダム流域が0.879であった。

5.2 湯田ダム流域

岩手県・北上川水系、流域面積582km²、総画素数481個、平均標高469m、北緯38度10分。広葉樹と針葉樹との混合林である。

この流域では、NDVIと蒸発散量とが、きれいな比例関係ではない。このような傾向を示す理由として、第一に、雲等による誤差が考えられる。しかしNDVIからの蒸発散量推定値の精度を他の流域と比較すると最も相関係数が低いが、特に悪いという程ではない。従って用いたデータの質は他の流域と比較して特に劣るものではない。次に考えられるのは、データセットの季節の片寄りである。この流域は秋期に雲が多く、本研究で用いたデータは春のものが際立って多い。そのため秋期のデータを多く含む他流域とは異なる特性が現れたと考えられる。さらに、この結果はある程度この流域の特徴、主に樹種の違いを反映していると思われる。この流域は他の2流域と比較すると針葉樹林の占める割合が大きいため、NDVIの季節変動パターンが広葉樹林中心の流域とは異なってくる。これについては、現在NDVIの季節変化を用いて地覆を分類する手法を開発中である。

この流域も雲が多く、夏期のNDVIが低い値を示す傾向がある。雲の混在率が最も少ない1990年のデータのみを用いて解析すると比例関係に近づくのだが、春期のデータに片寄っているため、信頼性は低いと思われる。今後さらに多くのデータを収集し確認する必要がある。

5.3 釜房ダム流域

宮城県・名取川水系、流域面積195km²、総画素数160個、平均標高473m、北緯39度20分。広葉樹が主であるが、滝ダム流域より針葉樹の割合は多い。若干開発が進んでおり、下流域の一部(流域面積の数%)に土地利用がみられる。

釜房ダム流域におけるNDVIと蒸発散量との関係をみると、ほぼ比例関係にあることがわかる。NDVIからの蒸発散量推定値の精度は湯田ダム流域と同程度である。滝ダム流域と比較すると、同じNDVIに対して蒸発散量が多い傾向がある。これは、植生の差が、気温の差ほどは大きくないことが原因である。年間を通じて釜房ダムの方が滝ダムより3～5℃程度気温が高いため、Thornthwaite法により求められる蒸発散量は多く見積もられている。しかしNDVIの値には、蒸発散量程の差がみられないため、このような結果となる。

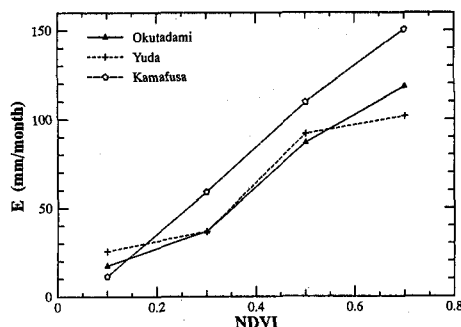


図-8 NDVIと蒸発散量との関係

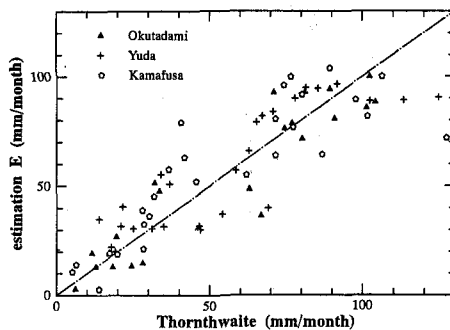


図-9 流域毎の精度

全般に滝ダム流域より釜房ダム流域の方が雲が少ないため、より植生の状態を正確に反映していると思われる。しかし以上3流域を比較すると、滝ダム流域の精度が最も良い。これは、滝ダム流域内の樹種が一定であり、開発も進んでいないためと思われる。

6. おわりに

今回はNDVIと蒸発散量との関係を全季節を通じて一組だけ計算したが、特定の季節にデータが片寄ったための誤差が無視できないと考えられる。さらに今後は係数 e を毎年、各季節毎に別個に決定することでより精度の高い分布推定を行なう予定であるが、そのためには、夏の快晴時のデータが非常に少ないため、雲の除去法を検討する必要がある。

NDVIと蒸発散量との関係は、地域および樹種により変化するため、東北地方全体といった広範囲に一律に適用することはできない。しかし、地覆分類に基づく中規模の解析を複数行うことで、より広範囲をカバーできることが期待される。さらに、実蒸発散量の検証も地覆毎に最適な手法を用いることで、より多種の地覆に適用可能となるであろう。

謝辞

本研究において貴重なデータの提供をいただいた電源開発(株)、東北電力(株)、そして建設省東北地方建設局に感謝します。また本研究で用いているNOAAデータは東北大学と東北電力との共同研究の一環として受信されたものである。本研究の実施に当り文部省科学研究費補助金及び河川整備基金の補助を受けた。また、本研究の公表に当り小川基金の援助を受けた。併せて謝意を表明します。

参考文献

- 1) Sellers.P.J (1985) : Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, Int.J.REMOTO SENSING, Vol. 6, pp.1335-1372.
- 2) Sellers.P.J (1987) : Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration II, Remote Sensing of Environment, Vol. 21, pp.143-183.
- 3) 野上道夫: 暖かさの指数と流域蒸発散量-気候値メッシュデータによる解析-(1990), 地学雑誌, Vol. 99, No. 6, pp.144-156.
- 4) 風間聡・沢本正樹・Jirayoot Kittipong (1992) : 滝ダム流域における融雪期の積雪深モデル, 水工学論文集, 第36巻, pp.611-616.
- 5) 美濃憲・風間聡・沢本正樹 (1993) : 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.
- 6) 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, 投稿中
- 7) 近藤純正・渡辺力 (1991) : 広域陸面の蒸発-研究の指針-, 日本気象学会誌「天気」, Vol. 38, No. 11, pp.19-30.
- 8) Compton J.Tucker (1985) : African Land-Cover Classification Using Satellite Data, Science, Vol. 227, No. 4685, Jan., pp.369-375
- 9) M.S.Rasmusset (1992) : Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from AVHRR, Int.J.REMOTO SENSING, Vol. 13, No.18, pp.3431-3442.