

森林地における正規化植生指標と葉面積指数、 蒸発散の季節変化に関する研究

RELATIONSHIP OF SEASONAL VARIATIONS OF NORMALIZED DIFFERENCE
VEGETATION INDEX, LEAF AREA INDEX AND EVAPOTRANSPIRATION
IN DECIDUOUS FORESTS

戒信宏¹・西川敦²・近藤昭彦³・中北英一⁴・田中賢治⁵

Nobuhiro EBISU, Atsushi NISHIKAWA, Akihiko KONDOH, Eiichi NAKAKITA and Kenji TANAKA

¹農博 愛媛大学助教授 農学部生物資源学科 (〒790-8566 松山市樽味 3-5-7)

²理修 愛媛大学助手 農学部生物資源学科 (〒790-8566 松山市樽味 3-5-7)

³理博 千葉大学助教授 環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-13)

⁴工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵工博 京都大学助手 防災研究所水資源研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

地上観測の光量子計とアルベド計から得られる反射光量子量と反射日射量から計算される正規化植生指標 (NDVI) は、衛星リモートセンシングデータから得られる森林地の NDVI の季節変化とほぼ同じ変化を示すことが明らかになった。そこで、地上観測の NDVI の季節変化と蒸発散の対応関係を調べると、蒸発散量、ペンマンモンティース法の群落抵抗と NDVI との相関関係は強くなく、葉面積指数 (LAI) と NDVI との相関が高いことが見いだされた。これは、NDVI の値が数日、あるいは時間的な気象変化に左右されないことに起因している。しかし、14 日間毎の日最大蒸発散量、その時の群落抵抗とは高い相関を示した。このことから、NDVI の値は、季節変化する蒸発散量の最大値を規定するものと考えられた。

Key Words : 正規化植生指標、蒸発散量、季節変化、葉面積指数、群落抵抗

1. はじめに

地球温暖化、CO₂ 問題など近年の地球環境問題からんで広範囲の森林地の蒸発散量を推定する意義は、地球規模の水収支と熱収支を解明するために大きな意味を持つ。そのため衛星データを用いた広域蒸発散量の推定には多くの研究が存在する。これらの研究は3つの方法に大別される。それは、まず古藤田ら¹⁾のように広域の対象地に対し蒸発散量推定モデルを適用するために、衛星データを用いて対象とする区域の土地被覆分類を行うもので、その土地被覆分類ごとに蒸発散量推定モデルのモデルパラメータを決定し、蒸発散量の推定を行う。2つめは、多田ら²⁾が示しているように、正規化植生指標 (NDVI) と蒸発散量との直接的な関係から蒸発散量を推定する研究である。3つめは、NEMANI, R. R. ら³⁾、RUNNING, S. W. ら⁴⁾が示したような NDVI と蒸発散モデルのモデルパラメータとを関係づけて

NDVI の値からモデルパラメータを推定し、そのモデルを用いて蒸発散量を推定する方法である。しかし、衛星データから得られる NDVI とそのときの蒸発散量との関係は、衛星が観測する時の瞬間のものであり、そのため蒸発散量の推定には快晴時の衛星データしか使えない。つまり、衛星データからの蒸発散量の推定では、水文学的に重要な蒸発散量の連続的な推定値とその総量が得られない。これは、蒸発散量の季節変化を推定する上で重大な欠点である。

そこで本研究は、樋口・近藤ら^{5),6)}、樋口・西田ら⁷⁾が開発した地上観測による NDVI 推定法によって得られた連続的な NDVI の実測値と落葉広葉樹林の蒸発散量、さらに LAI-2000 で観測された葉面積指数、ペンマンモンティース法の群落抵抗との相関関係を検討して、NDVI の蒸発散に対する特性を解明することを研究目的とした。なお本研究は、琵琶湖プロジェクト (代表幹事; 田中賢治) の常設観測の成果の一部である。

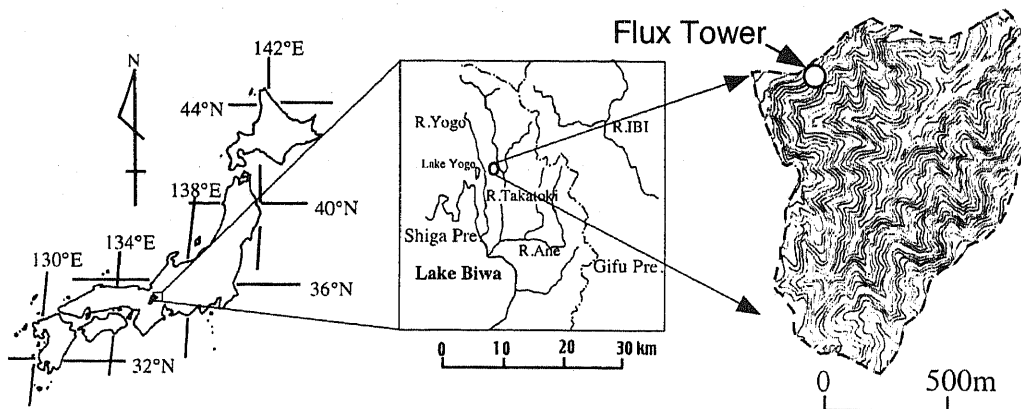


Fig. 1 Location of the experimental site.

Table 1 Meteorological variables with model number and manufacturer of instrumentation used

Meteorological variable	Manufacture	Model number	Hight (m)
Air temperature and RH	Campbell Scientific, Logan Utah, USA	HMP45C	24.0, 19.6
Net radiation	REBS, Seattle, WA, USA	Q*7	17.3
Albedo	Kipp & Zonen B.V., The Netherlands	CM-14	17.3
Soil heat flux	REBS, Seattle, WA, USA	HFT3	-0.02
PAR	PREDE Co. Ltd, Tokyo, JAPAN	PAR-01	17.1
Atmospheric pressure	Campbell Scientific, Logan Utah, USA	CS105	7.0
Surface temperature	TASCO JAPAN Co. Ltd., OSAKA, JAPAN	THI-500	20.0
Soil temperature	Campbell Scientific, Logan Utah, USA	107	-0.2, -0.1
Soil moisture	Campbell Scientific, Logan Utah, USA	CS615	-0.1 ~ -0.3
Precipitation	Campbell Scientific, Logan Utah, USA	TE525	15.1
Wind profile	Vector Instruments, N. Wales, UK	A100L2	25.2, 22.4, 19.6, 17.1, 10.0, 4.9
Wind Speed/Direction	Campbell Scientific, Logan Utah, USA	5103	26.5
Sensible heat flux	Campbell Scientific, Logan Utah, USA	CSAT3	26.5

2. 観測試験地概要

本試験地は、図-1に示すように琵琶湖の北部湖北地区を流れる高時川流域の滋賀県伊香郡余呉町上丹生磯見谷地区の落葉広葉樹林内にある。森林気象観測タワーは東経 136°12'43.1" 北緯 35°33'38.9" に位置する。観測している斜面は、標高約 400m~420m の南東向きで、斜面勾配は 30 度以上の急斜面である。観測斜面の森林植生は、高木にはイヌシデ、ケヤキなどの落葉広葉樹、低木にはヤブツバキ、ヤマボウシなどが見られる。観測タワー周辺の高木の樹高は、約 16m から 17m であり、また、斜面下部には一部スギの人工林がある。観測タワーは、約 26m で観測測器は表-1 に示すように、一般的な森林の熱収支観測ができるようになっている。観測は 1998 年 10 月から開始されているが、本研究の解析には 2000 年 4 月 24 日から 11 月末までのデータを用いた。

3. 観測原理

(1) ボーエン比法、ペンマンモンティース法

本研究では、蒸発散量の季節変化の推定にはボーエン比法を用いた。ボーエン比法は、森林樹冠上の境界層内の 2 高度の気温、湿度、純放射量と林地の地中熱流量の測定から蒸発散量を推定する方法である。ボーエン比とは顕熱輸送量と潜熱輸送量の比であり、ボーエン比と顕熱輸送量、潜熱輸送量の関係を表す式を次の(1)、(2)、(3)に示す(服部⁸⁾、塚本⁹⁾)。

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (1)$$

$$H = \frac{\beta(Rn - G)}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$\lambda E = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (3)$$

ここで、 β : ボーエン比、 H : 顕熱輸送量、 λE : 潜熱輸送量、 Rn : 純放射量、 G : 地中熱流量である。なお、森林での貯熱量、呼吸・光合成によって消費される量は他の熱収支項より微小なため無視することにする。

ボーエン比は、熱と水蒸気に対する拡散係数が等

しいと仮定すると式(4)で表される。

$$\beta = \gamma \frac{Td_1 - Td_2}{e_1 - e_2} \quad (4)$$

ここで、 Td_1, Td_2 : 樹冠上の2高度の気温(°C)、 e_1, e_2 : 2高度の水蒸気圧(hPa)、 γ : 乾湿計定数、 $\gamma = Cp/0.6221$ (hPa/°C)である。式(4)から、樹冠上の2高度の気温と湿度を測定することによりボーエン比が算定でき、さらに式(3)より蒸発散量を推定することができる。ボーエン比法の推定精度の良否は、熱の拡散係数と水蒸気の拡散係数が等しいと言う仮定が成立しているかどうか、あるいはボーエン比の算出に必要な気温勾配、湿度勾配が精度良く計測できるかどうかにより左右される。

本研究は、我¹⁰⁾が示した NDVI とペンマンモンテイス法の群落抵抗との関係も調べた。ペンマンモンテイス法は次の(5)式で示される。

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} + \frac{\rho C_p [e^* \{T(z)\} - e(z)] / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (5)$$

ここに λ : 蒸発潜熱、 E : 蒸発散量、 R_n : 純放射流量、 G : 地中熱流量、 ρ : 大気密度、 C_p : 空気の定圧比熱、 $e(z)$: 高さ z の水蒸気圧、 $e^* \{T(z)\}$: 気温 $T(z)$ の時の飽和水蒸気圧、 $T(z)$: 高さ z の気温である。ここで空気力学的抵抗の計算は次の(6)式により算出する。

$$r_a = \frac{1}{\kappa^2 u(z)} \left(\ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2 \quad (6)$$

ここに z : 高さ、 κ : カルマン定数、 u : 風速、 z_0 : 粗度長、 d : 地面修正量、 h : 植生高である。 z_0 と d は、観測タワーの風速プロファイルのデータから推定した月別の値を用いた。

(2) 現地観測の NDM の推定法

光量子計とアルベド計による定点観測により、可視(PAR)領域、および近赤外(NIR)域の反射量、反射率が計算できる。本研究では、光量子計を観測タワーの17.1mの高さに設置し観測した。

$$\rho PAR = PAR \downarrow / PAR \uparrow \quad (7)$$

$$NIR \downarrow = Rs \downarrow - PAR \downarrow \quad (8)$$

$$NIR \uparrow = Rs \uparrow - PAR \uparrow \quad (9)$$

$$\rho NIR = NIR \uparrow / NIR \downarrow \quad (10)$$

ここで、 ρ : 各波長域での反射率、 Rs : 全短波放射、 PAR : 可視光、 NIR : 近赤外光、 \downarrow : 下向き、 \uparrow : 上向きを示す。光量子計は可視光を、アルベド計は全短波放射を観測する。短波放射(0.15~3 μ m)は、紫外線(0.15~0.4 μ m)、可視(0.4~0.7 μ m)、近赤外(0.7~1.5 μ m)、および中間赤外(1.5~3 μ m)

の各波長領域までまたがるが、このうち紫外線はオゾン層で吸収され、中間赤外はエネルギー的に少ない上、水蒸気の吸収帯が多い。近似的に式(8)、式(9)では短波放射量と可視光の差分は近赤外光に等しいと見なした(樋口・近藤ら⁵⁾、樋口・近藤ら⁶⁾、樋口・西田ら⁷⁾)。

この可視領域と近赤外領域の反射率から、リモートセンシング分野でよく用いられる植生指標が算出できる。本研究では、その中でよく用いられる正規化植生指標(NDVI)を算出した。算出式は次の式(11)で表される。

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho PAR}{\rho NIR + \rho PAR} \quad (11)$$

また、NDVI は反射率からだけでなく反射量からも求めることができる。反射量からの NDVI を求める式は、式(12)で表される。

$$NDVI = \frac{NIR \uparrow - PAR \uparrow}{NIR \uparrow + PAR \uparrow} = \frac{Rs \uparrow - 2PAR \uparrow}{Rs \uparrow} \quad (12)$$

本研究では、秋の観測時、測定値にばらつきのない反射量から NDVI 値を推定した。

(3) 葉面積指数(LAI)計測法

測定機器は、LAI-2000(LI-COR 社製)で、490nm以下の波長域を扱う。この波長域の葉群は、反射、透過が極めて小さく、キャノピー内の散乱光の影響を押さえることができる。また、5つの角度における光吸収を同時測定することにより、植物群落の葉面積指数(LAI)及び平均葉群傾斜角を計測する。LAI-2000で計測されたLAIは実際の値と異なる¹¹⁾が、葉面積指数の季節変化をみるためのLAI-2000の測定値でも、本研究は葉面積指数LAIの季節変化を示していると思なした。LAIの測定箇所は、観測タワー周辺の3から4カ所で、LAI-2000の測定方法は、まず林外で基準光を測定し、それから群落内の各測定地点に行き3回ほど測定をして、その平均値をLAI値とした。また、LAI-2000は、すべての光を遮断する物体を計測する。このため、枝や幹も葉として計測するため、落葉期の観測値を用いてその他の値を補正した。

4. 衛星データの解析

本研究では、衛星データから NDVI の季節変化を求めるために Landsat-5 の TM データを用いた。衛星画像の歪みを直すために、25,000分の1の数値地図により衛星画像を幾何補正し、解析画像を作成した。解析画像の範囲は、観測タワーの位置する斜面

Table 2 List of Landsat TM images

	Mar.	Apr.	May	Jun.	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
1984						14Aug.			
1986		14Apr.						14Oct.	
1987			19May	4Jun.	29July				11Nov.
1989			31May						
1991									22Nov.
1992	13Mar.								
1995					28July				17Nov.
1996		25Apr.						20Oct.	3Nov.
1997		12Apr.						21Oct.	
1998	30Mar.			18Jun.					
2000		4Apr.							

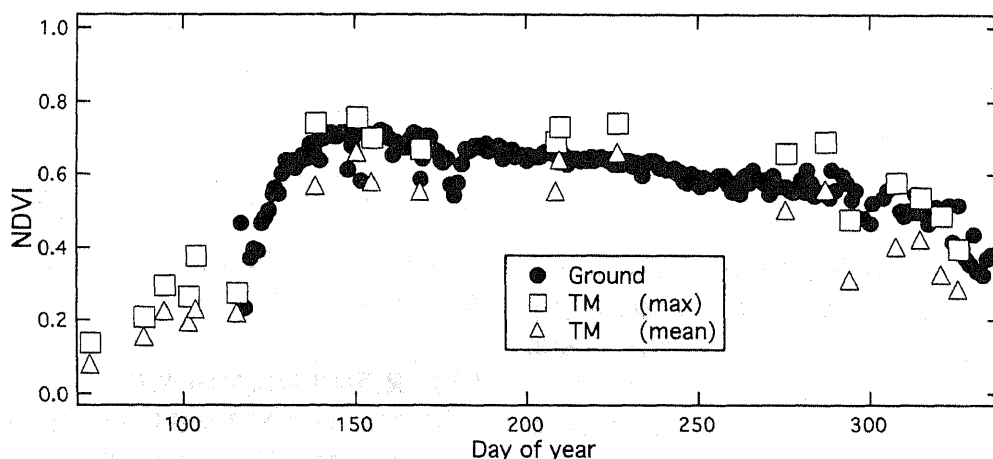


Fig. 2 Comparison between NDVI of TM data and NDVI of the ground observation.

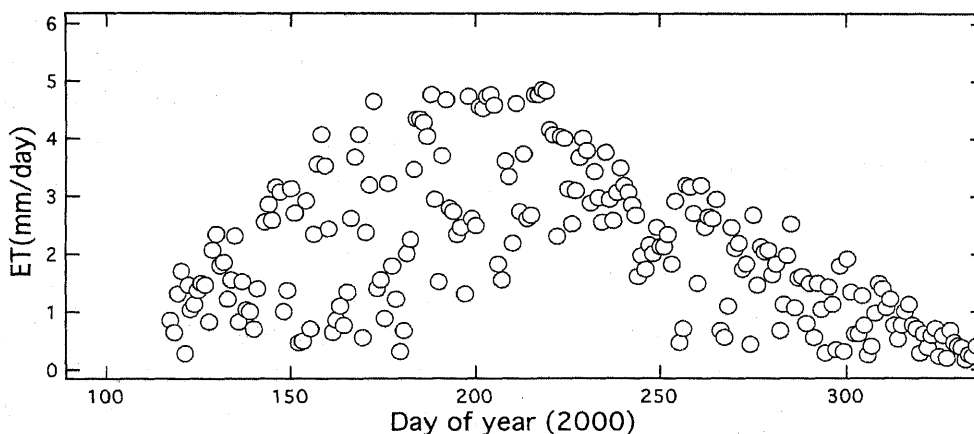


Fig.3 Seasonal variation of evapotranspiration using Bowen ratio method.

の範囲を7×9ピクセルの大ききで切り取り、この範囲のNDVIを求めた。表-2に使用したTMデータの観測日を示す。TMデータは1984年~2000年の20シーンを使った。ここで画像の幾何補正、画像処理はTNTmips6.4(Microimage社)を用い、衛星データの大気補正、斜面地形補正は行っていない。

5. 解析結果及び考察

まず、地上観測から得られるNDVIと衛星データ

からのNDVIとを比較した。その結果を図-2に示す。地上観測のNDVIは、8:00から16:00までの時間平均値を平均して1日の値とした。この結果より、衛星から求めたNDVI(最大値、平均値)と地上観測のNDVIとの対応関係が非常によいことがわかる。地上観測のNDVIデータは2000年の季節変化を示しており、衛星データは2000年のデータは1シーンしかなく2000年のNDVIの季節変化を示しているわけではない。しかし、この図-2の適合の良さから地上観測によるNDVIは衛星からのNDVIを十分

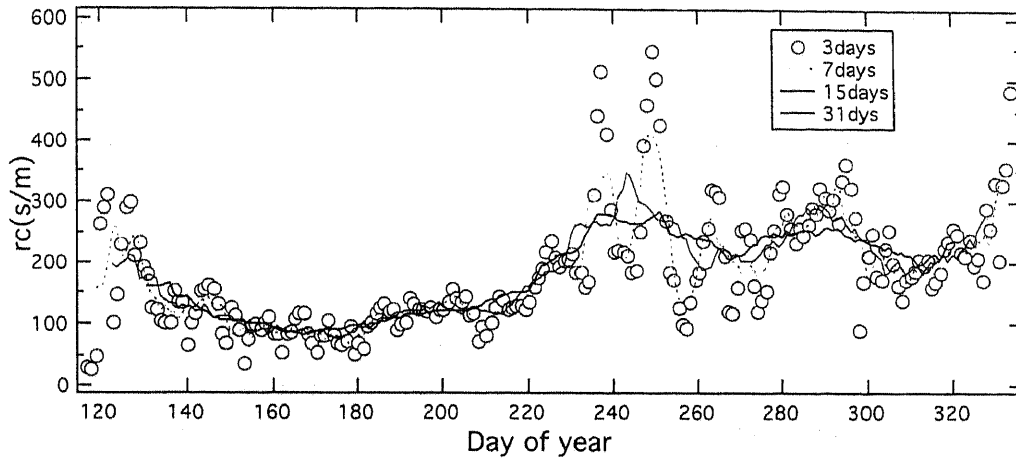


Fig. 4. Seasonal variation of canopy resistance

に反映していると考えてよいと考えられる。

次に、観測タワーで行われている熱収支観測からボージェン比法の蒸発散量、LAI-2000 による LAI の値との関係を調べた。また同時にペンマンモンテース法の群落抵抗との関係も検討した。蒸発散量、ペンマンモンテース法の群落抵抗、LAI の季節変化を図-3、4、5 示す。さらに、LAI、蒸発散量、群落抵抗と NDVI との相関関係を図-6、7、8 に示す。群落抵抗は、日々の変動が大きいため、3日、7日、15日、31日の移動平均した値を示した。これを見ると NDVI は LAI の値との相関が高かったが、蒸発散量、群落抵抗（移動平均したもの）との相関は悪い。この理由を考えると、NDVI と LAI とはバイオマス量を示す衛星データの NDVI と同様に季節変化における相関が強く、蒸発散量は、NDVI の値が数日、あるいは時間的な気象条件には影響されず、一方蒸発散量は日単位でそのときの気象条件、たとえば日射量、気温、湿度、風速などに大きく影響されるためであると言える。また、群落抵抗の季節変化は、2000年の夏期から秋期に土壌が乾燥し、その影響を受けているように思われ、一方 NDVI の値にはそのような影響は見られず、それが原因と思われた。しかしながら図-7から NDVI と蒸発散量

は、最大値に関係があるように見える。そこで、観測期間中の14日毎の日蒸発散量の最大値と NDVI の関係を調べた。それを図-9に示す。また、最大値を示す日のペンマンモンテース法の群落抵抗との関係も調べた。その結果を図-10に示す。この結果、相関係数は0.88と0.79と高い相関が得られた。このことから NDVI は蒸発散量でなく、ある期間内の蒸発散量の最大値を規定するものと考えた方がよいことがわかる。つまり、NDVI の値 そのものは蒸発散量の大小でなく、バイオマスの量、あるいは葉面積との関係があるため、可能最大日蒸発散量のような値の大きさを決定しているものと考え方が妥当であることが明らかになった。

6. まとめ

本研究は、衛星データで植生の状態を表す指標としてよく用いられる NDVI を森林気象タワーを用いて地上観測して、その季節変化と森林の蒸発散量の関係を明らかにした。その結果は以下の通りである。

- 1) 樋口、西田⁷⁾らの NDVI の地上観測法による推定値は、森林地において TM データから得られる NDVI の季節変化を十分に示していることが明らかになった。

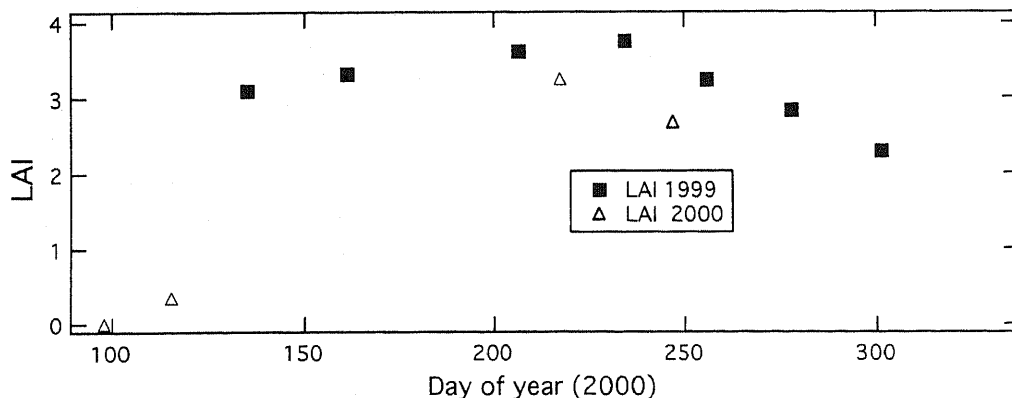


Fig. 5. Seasonal variation of LAI.

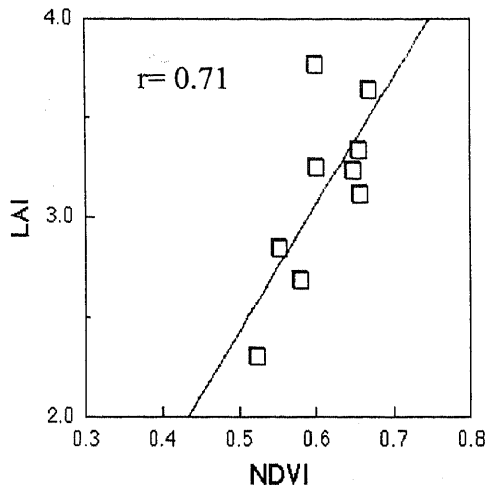


Fig. 6. Relationship between NDVI and LAI.

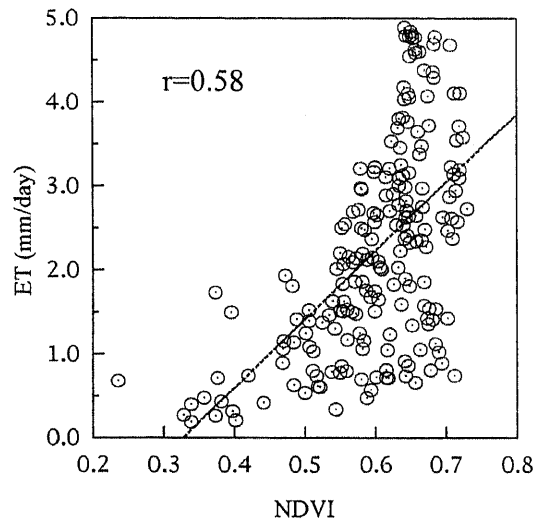


Fig. 7. Relationship between NDVI and evapotranspiration using Bowen ratio method.

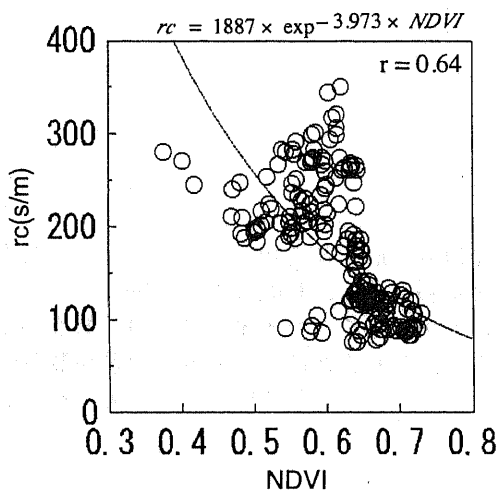


Fig. 8. Correlation between NDVI and canopy resistance of Penman-Monteith method.

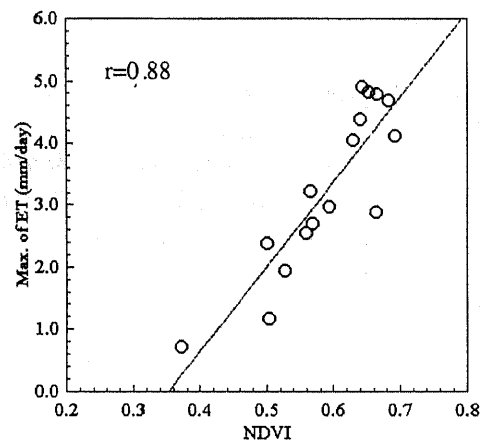


Fig. 9. Correlation between NDVI and maximum of evapotranspiration in 14 days periods from April to November.

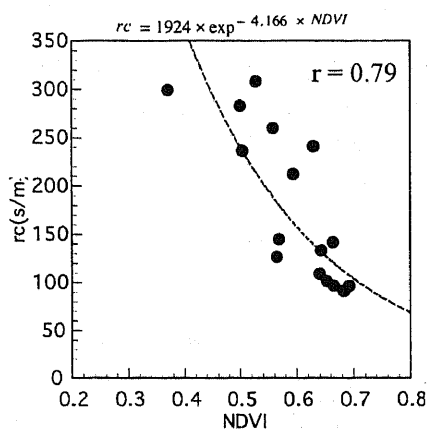


Fig. 10. Correlation between NDVI and canopy resistance.

2) 蒸発散量、ペンマンモンテース法の群落抵抗と地上観測の NDVI との関係を検討した結果、その相関関係は良くなく、その理由は NDVI が

数日あるいは時間的な気象条件の変化に左右されないことによると考えられた。また、従来の研究から言われている衛星データからの NDVI と同様に LAI と NDVI の相関は高いことが認められた。

3) しかしながら、14 日間毎の最大日蒸発散量とそのときのペンマンモンテース法の群落抵抗との相関係数は高く、NDVI の値は、蒸発散量の最大値の上限を規定すると考えられた。

今後、本研究で明らかになった NDVI と蒸発散量の関係を用いて、衛星データから得られる流域全体の NDVI の季節変化を用いて、試験地を含む流域全体の蒸発散量分布の季節変化の解明に向けて研究を進展させる予定である。

謝 辞：最後に本研究は、名古屋大田中隆文先生から一部 LAI の測定値のデータの提供を受けている。現地観測では、当時徳島大工学部吉田弘先生、および愛媛大農学部学

生の山中新一君には多くの援助を受けた。また文部科学省科学研究費補助金（琵琶湖プロジェクト）、京大防災研究所一般共同研究、千葉大 CEReS 共同研究の援助を受けている。観測には、琵琶湖プロジェクト関係者、余呉町役場、地元の協力を得ている。衛星データは、「衛星データ所有：米国政府」、「衛星データ提供：SpaceImaging_/宇宙開発事業団」である。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 古藤田一雄・甲斐謙次・中川慎治・吉野正敏・星仰・武田 要・関 利孝：ランドサットデータによる土地利用区分と広域蒸発散量算定手法の開発に関する研究，筑波大学水理実験センター報告 No.8, 57-66, 1984
- 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推定，水文・水資源学会誌 7 (2)，114-119, 1994
- 3) NEMANI, R. R. and RUNNING, S.W.: Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data, J. Appl. Met. 28, 276-284, 1989
- 4) RUNNING, S.W., NEMANI, R.R., PETERSON, D.L., BAND, L.E., POTTS, D.F., PIERCE, L.L., and SPANNER M.A. : Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation, Ecology 70(4), 1090-1101, 1989
- 5) 樋口篤志・近藤昭彦・池田正一・黒子裕史：草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係 I.各土地被覆での地表面フラックスの季節変化，水文・水資源学会 13(2)，124-136, 2000a
- 6) 樋口篤志・近藤昭彦：草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係 II.衛星から得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性と地表面フラックスの関係，水文・水資源学会 13(2)，137-147, 2000b
- 7) 樋口篤志・西田顕郎・飯田真一・新村典子・近藤昭彦：PGLIERC (Preliminary Global Imager experiment at Environmental Research Center) : その概要について，日本水文学会誌 30(2)，81-91, 2000
- 8) 服部重昭：蒸発散量推定式の誘導過程の解説と林分への適用における問題点，林試研報 332, 139-165, 1985
- 9) 塚本良則編：森林水文学文永堂出版，東京，53-102, 1992
- 10) 戒信宏：NDVI を用いた山林地流域の蒸発散量推定，第 2 回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ，125-133, 2000
- 11) 太田岳史：積雪が存在する森林空間での水・熱輸送特性に関する研究、平成 7 年度～平成 9 年度科学研究補助金（基盤研究(B)(1)）研究成果報告書，1-18, 1998

RELATIONSHIP OF SEASONAL VARIATIONS OF NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX, LEAF AREA INDEX AND EVAPOTRANSPIRATION IN DECIDUOUS FORESTS

Nobuhiro EBISU¹, Atsushi NISHIKAWA², Akihiko KONDOH³, Eiichi NAKAKITA⁴
and Kenji TANAKA⁵

¹Dr. of Agr., Associate Professor, Faculty of Agriculture, Ehime University (Tarumi 3-5-7, Matsuyama 790-8566, Japan)

²M. of Sci., Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Ehime University (Tarumi 3-5-7, Matsuyama 790-8566, Japan)

³Dr. Ph., Associate Professor, Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University (Yayoi 1-33, Inage, Chiba 263-8522, Japan)

⁴Dr. Eng., Associate Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University (Yoshida-Honmachi, Sakyo, Kyoto 606-8501, Japan)

⁵Dr. Eng., Assistant Professor, Water Resources Research Center, D.P.R.I., Kyoto University (Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan)

Key Words : NDVI, Evapotranspiration, Seasonal variation, LAI, Penman-Monteith method

1. INTRODUCTION

Estimation of evapotranspiration(ET) at wide forest areas is important for clarifying global water balance and heat balance in global climate changes and water resources problems. Many researches of estimating ET using satellite data in wide regions have focused on the problems for meteorologists, hydrologists and forest ecologists. There are three types for the method of studies; the first method type is using the ET model and the land cover classification of the wide areas carried out by satellite data and the second type is estimating ET using the relationship between the satellite data and ET data. The third method type is studying of relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and parameters of ET models as presented by Nemani, R. R. and Running, S.W.(1989).

However, the relationship between NDVI from satellite data and ET is only the instantaneous result at the time the satellite observes a study area. It is difficult to obtain the continuous ET and the total amount of ET using satellite data in clear sky days. This is an important defect in estimating the seasonal variations of ET at the forested areas.

The objectives of this study are to examine the

three relationship of NDVI by the ground observation method (Higuchi, A. and Nishida, K. et al., 2000). Specifically, we (1) examine seasonal relation between NDVI and ET, (2) and seasonal variation between NDVI and canopy resistance and (3) test NDVI and the leaf area index (LAI) using LI-COR LAI-2000 Plant Canopy Analyzer at the deciduous broad-leaved forests.

2. THE STUDY AREA AND METHODS

(1) Site characteristics

The study area is located at Yogo town of north Shiga prefecture in Japan. Fig. 1 shows the map of the study area. The terrain is a steep slope over 30 degrees to the southeast direction. The type of vegetation around the tower is a deciduous broad-leaved forest, except for valley. The coniferous trees of Sugi (*Cryptomeria japonica D.DON.*) exist at the valley of the study area. The forest canopy exhibits two layers. The upper one, between 10-17m at the time of this experiment, consists of a dense vegetation layer of branches and broad leaves (*Carpinus tschonoskii Maxim.*, *Zelkova serrata Makino*, etc.). The lower one (0 -10m) mainly consists of low trees (*Camellia*

japonica L., Benthamidia japonica Hara. etc.).

(2) Meteorological measurements

The forest meteorological observation tower (the scaffold tower 26.5m above the surface and about 10m above the canopy) is located at the deciduous broad-leaved forest in the Takatoki River watershed (136°12'43.1" E, 35°33' 38.9" N, elevation 420 m). Microclimatic instruments are shown **Table 1**. Continuous measurements of sensible heat fluxes, Bowen ratio, energy budget, wind profile and wind direction have been performed since October 1998. The analysis of the study used the data from April 2000 to November 2000.

(3) NDVI measurements

NDVI is calculated by satellite data from

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

where NIR is the near-infrared and RED is the visible red band.

However, estimating of NDVI on the ground observation requires photosynthesis active radiation (PAR) meter and albedo meter by Higuchi's method (2000). NDVI was measured using PAR and albedo data at about 17m height of the observation tower. Equation of NDVI on the ground observation is

$$\rho PAR = PAR \uparrow / PAR \downarrow, NIR \downarrow = R_s \downarrow - PAR \downarrow,$$

$$NIR \uparrow = R_s \uparrow - PAR \uparrow, \rho NIR = NIR \uparrow / NIR \downarrow \quad (2)$$

$$NDVI = (\rho NIR - \rho PAR) / (\rho NIR + \rho PAR)$$

where ρ is reflectance of each wave length, PAR is the photosynthesis active radiation by photo quantum sensors, R_s is the solar radiation, \uparrow is the upward radiation and \downarrow is the downward radiation. In this study, the NDVI was determined not from reflectance but from reflective radiance of PAR and solar radiation, which made the dispersion of the NDVI ranges low. This equation is as the following:

$$NDVI = (NIR \uparrow - PAR \uparrow) / (NIR \uparrow + PAR \uparrow) \quad (3)$$

$$= (R_s \uparrow - 2PAR \uparrow) / R_s \uparrow$$

The seasonal variation of NDVI used in this study was calculated by daily means of the NDVI values from 8:00 to 16:00.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The satellite data consist of 20 Landsat TM scenes from 1984 to 2000 (**Table 2**). Comparison between NDVI of satellite data and NDVI of the ground observation was examined using 7*9 pixels images of the study area. Relationship of seasonal variations of the NDVI is shown in **Fig.2**. There are good agreements between the NDVI of TM data and the maximum

and average of NDVI on the ground observation from April (DOY 100) to November (DOY 350). The seasonal variations of the NDVI of TM data in 2000 are not indicated here. However, the result shows general similarity between the two seasonal variations. Several relationship were investigated between NDVI, ET and Leaf area index (LAI). Seasonal variations of ET based on Bowen ratio method and of the canopy resistance based on Penman-Monteith method are shown in **Fig.3** and **Fig.4**. Estimates of canopy resistance were indicated by moving average of 3days, 7days, 15days and 31days, because the daily fluctuations of estimating canopy resistance were big. Seasonal measurements of LAI using LAI2000 are shown in **Fig.5**. There was a good correlation ($r=0.71$) between NDVI from the ground observation and LAI (**Fig.6**), but there was not a good correlation ($r=0.58$) between NDVI from the ground observation and ET (**Fig.7**), and neither was between NDVI and canopy resistance (**Fig.8**) of Penman-Monteith method ($r=0.64$). With these results, it was considered that ET depends on daily meteorology range and NDVI depends on the leaf area of vegetation, the density of canopy biomes and the activation of biomes.

However, there was a good agreement on the correlation between NDVI and maximum of ET (**Fig.9**, $r=0.88$), the canopy resistance (**Fig.10**, $r=0.79$) in 14 days periods from April to November. Therefore, the seasonal variation of the NDVI gives an upper limit of maximum ET in these observation periods.

4. CONCLUSIONS

- 1) NDVI using Higuchi's method on the ground observation is similar to NDVI from TM data in the seasonal variation.
- 2) ET using Bowen ratio method, canopy resistance of Penman-Monteith method and NDVI on the ground observation is not in good agreements of the correlation.
- 3) However, the maximum ET is related to the NDVI on the ground observation for 14 days periods. It was considered that the values of NDVI accord with an upper limit of maximum ET in this study.

ACKNOWLEDGEMENT: This work was supported by NASADA (National Space Development Agency, Japan) and USA Government for Landsat TM data. Funding was provided by the MEXT, JAPAN, the DPRI, Kyoto University and CERS, Chiba University. We thank Dr. Takafumi Tanaka, Dr. Hiromu Yoshida, Mr. Shinichi Yamanaka and Yogo town office for the observation.