

TERRA-ASTER データによる流域の LAI 測定

MEASUREMENTS OF LAI IN A WATERSHED USING TERRA-ASTER DATA

申龍熙¹・瀬口昌洋²・郡山益実²

Yonghee SHIN, Masahiro SEGUCHI and Masumi KORIYAMA

¹農修 鹿児島大学大学院連合農学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-24)

²正会員 農博 佐賀大学農学部 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1)

The aim of present study is to establish the method for LAI (leaf area index) measurement in a watershed using Terra-ASTER data. LAI is one of the most important land-area ecosystem parameters which characterize the quantity of vegetation distribution and its production capacity in a watershed, and the water balance and thermal environment there. A method for LAI measurement based on the absorption-dispersion process of visible and infrared spectrum in the vegetation canopy was presented. The difference between LAI calculated from Terra-ASTER data and that measured by a plant canopy analyzer in the study area was less than $\pm 20\%$. It was also shown that there was a big difference between the LAI distributions in a watershed calculated from Terra-ASTER data in summer and winter. The validity of the present method for LAI measurement was confirmed.

Key words : Plant canopy, LAI, ASTER, Reflectance, Electromagnetic wave

1. まえがき

植生の葉群密度を表す LAI (Leaf Area Index) は, 単位地表面積当たりの上方に存在するすべての葉 (片面) の総面積 (単位: m^2/m^2) で定義される¹⁾. LAI は, 陸域の植生の分布量や生産力などを評価したり, さらに流域の水収支や熱環境などを特徴付ける最も重要な陸域生態系パラメータの 1 つである. 特に近年, 砂漠化, 森林破壊, 温暖化など陸域環境の悪化に伴い, LAI のよりの確な測定法の確立が求められている.

現在, LAI の一般的な測定法には, 直接的方法と間接的方法がある. 前者には, 植生キャノピー内の葉を直接採取して葉面積を測定する刈取法²⁾や地面に設置されたリタートラップに落下した葉数から測定するリタートラップ法がある³⁾. また, 後者には, 全天写真を利用する方法⁴⁾やプラントキャノピーアナライザー (LI-COR 社, LAI-2000) のように光の吸収量から測定する光学的方法がある. 前者の直接的方法では, 後者の間接的方法に比して精度の高い測定値が得られるが, 測定には多くの時間や労力が費やされる. 逆に, 後者の間接的方法では, 前者の直接的方法に比して測定値の精度は劣るが, 測定が容易で, 効率的である. 例えば, LAI-2000 による測定値は, 直達光の影響を受けた場合, 過小評価となる⁵⁾.

上述の測定法は, いずれも小区域の群落や個々の樹木のキャノピーの測定を前提としたものである. しかし, 近年, より広域的な LAI 測定の要求の高まりとともに, 衛星セ

ンサー技術の発達やコンピューターのデータ処理能力の向上に伴い, 衛星リモートセンシング技術を活用した LAI の広域的測定法の開発が研究されてきた.

Price⁶⁾は, 植生キャノピー内の電磁波の 2 方向 (上下方向) 成分解析に基づき, Landsat-5 TM データ 3, 4 バンドから Arkansas 北東部の LAI を測定した. Fassnacht ら⁷⁾は, Landsat-5 TM データの各バンド比に基づく種々の植生指数 (VI) と LAI の観測データの関連性を定式化し, それに基づいて Wisconsin における LAI を測定した. 星ら⁸⁾も Landsat-5 TM データから求めた正規化植生指数 (NDVI) より広葉樹林の LAI を測定した. Price の方法は, 植生キャノピー内の電磁波の物理的過程に基づいたものであり, 算定式やその適用方法に煩雑さを伴うものの, 測定結果の合理性に優れている. しかし, その精度については, 十分な検証が行われていないため, 定かではない. 一方, Price 以外の上述の方法は, 衛星リモートセンシングデータから算出した VI と LAI の関係式に基づいて LAI を測定する方法である. しかし, VI と LAI の関係式は植生の種類, 季節, 地表被覆率の大小, バックグラウンドである土壌の種類などによって左右されるため, これらの種々の条件下で多くの関係式を予め設定する必要がある. また, LAI > 3 の場合, LAI に対する VI の感度は低くなるため^{9), 10)}, 葉群密度が高い場合には, LAI の測定値の精度は低下する. したがって, 一般に用いられている VI と LAI の関係式に基づく LAI の測定法は, 必ずしも精度の高い, 合理的な方法とは言えない.

したがって、周期性、広域性、同時性の優れている地球観測衛星データを用いたLAIの測定法を確立するためには、上述の各測定法が抱える問題点を解決しなければならない。また、近年、広く利用されてきたLandsat-5 TMセンサーの寿命により、その画像データに重大なノイズが発生しているため、それに代る新たな地球観測衛星センサーの画像データの利用が求められている。

本研究は、Landsat-5 TMデータに代り、TMデータの可視・近赤外波長域の各バンドに観測波長帯がほぼ対応し、かつその地表分解能30mより優れているTerra衛星のASTERデータ（地表分解能：15m）を用いたLAIの測定法の確立を目的とする。まず、Priceの方法⁶⁾にならい、2方向成分モデルすなわち植生キャノピー内における電磁波の上下方向成分の吸収・散乱過程や土壌-植生系反射スペクトル特性に基づいたLAI算定式とそのASTERデータへの適用法について検討する。次で提示された測定法による調査地点のLAIの測定結果とLAI-2000による観測値と比較、検討し、この測定法の精度を検証すると同時に、対象流域の夏季と冬季におけるLAIの測定結果について考察する。

2. 現地観測と衛星データ

(1) 観測地点及び方法

現地の土壌と植生キャノピーの分光反射率及びLAIを観測するために、図-1に示される佐賀県佐賀市及び小城市の市街近辺に4ヶ所の観測地点A、B、C、Dを設定した。地点Aは天山（標高：1,046m）の山裾の植林地で、その64%はスギ、ヒノキの針葉樹林である。また、地点B、Cは長崎自動車道を挟んだ自然林で、その大部分はクス、クヌギなどの広葉樹林である。一方、地点Dは森林公園内の芝地である。

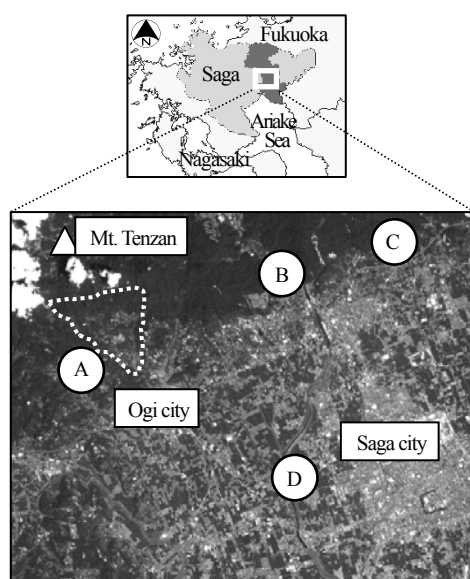


図-1 観測地点A、B、C、D及び対象流域(破線区域)の位置

土壌と植生キャノピーの分光反射率の観測は、2007年8月15日午前11時30分～午後2時の快晴時にスペクトルラジオメータ（LI-COR社、LI-1800）を用いて各観測地点で行われた。なお、分光反射率は、太陽光の標準白色板の分光反射エネルギーに対する対象物の分光反射エネルギーの比で算出された。特に林地での植生キャノピーの分光反射エネルギーの観測は、図-2に示されるように山腹地形を利用し、山腹斜面上方から植生キャノピーを見下ろせる位置にLI-1800を設置して行われた。

一方、LAIの現地観測は、ASTERデータの取得日（2007年8月18日）の前後2週間（2007年8月11日～8月25日）の間にLAI-2000を用いて観測地点で複数回行われた。なお、LAIの観測に際しては観測者の影響を避けるために、LAI-2000の魚眼レンズ部に270度のオープンキャップが取り付けられた。また、直達光により観測値の過少評価を避けるために、直達光の弱まる夕方や雲天の日に観測が行なわれた。

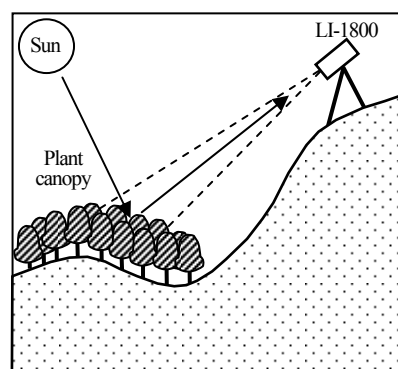


図-2 森林の植生キャノピーの分光反射率観測方法の概念図

(2) 衛星データと対象流域

今回使用された衛星データは、NASAのTerra衛星ASTERセンサーにより観測された佐賀県、長崎県の一部を含むPath：113、Row：106の画像データである。なお、利用したBand2、3の観測波長帯は、それぞれ0.63-0.69 μm 、0.76-0.86 μm である。購入したASTERデータのデータプロダクトはレベル1Aのため、GCP（Ground Control Point）データを用いて幾何補正を行った。一方、測定の対象流域は、図-1に示されるように、天山山系を源とし、小城市内を流下して嘉瀬川に合流する祇園川の上流域（面積流域：12km²）である。この流域の約80%は林地、残りの約20%は田畑や宅地となっている。

3. LAIの測定法

(1) 2方向成分モデル

植生のキャノピー内の電磁波の吸収・散乱過程は複雑なため、一般にその過程は2方向（上下方向）成分モデルで表される^{11), 12)}。このモデルは、土壌面を完全に覆つ

ている植生キャノピー内の電磁波の伝達過程を図-3 に示されるように鉛直下向き成分 I と鉛直上向き成分 J で表す。

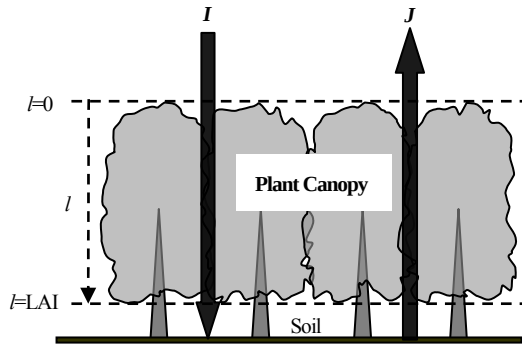


図-3 2方向成分モデルの概要

この場合、 I と J の間には、次式の連立微分方程式が成立する。

$$\frac{dI}{dl} = -\alpha I + \beta J \quad \frac{dJ}{dl} = \alpha J - \beta I \quad (1)$$

ここで、 α は吸収係数、 β は散乱係数、 l は植生キャノピーの上端から下端方面への層厚であり、下端で $l=LAI$ とする。 $\beta^2 - \alpha^2 = c^2$ とするとき、(1)式の一般解は次式となる。

$$I = a_1 e^{-cl} + a_2 e^{cl} \quad J = a_3 e^{-cl} + a_4 e^{cl} \quad (2)$$

ここで、 $a_1 \sim a_4$ は任意定数である。境界条件として、次式を設定する。

$$\begin{aligned} l=0 & \dots\dots\dots I(0)=1 \\ l=LAI & \dots\dots\dots J(LAI)=R_s I(LAI) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 R_s は地表の土壌反射率である。また、植生キャノピー表面の反射率を R とし、さらに $LAI=\infty$ すなわち LAI が十分に大きい場合、 $R=R_\infty$ とするとき、 R は(2)、(3)式により次式で表される⁶⁾。なお、 $I(0)=1$ のため、 $R=J(0)$ となる。

$$R = (R_\infty + \frac{D}{R_\infty}) \frac{1}{D+1} \quad D = \frac{R_s - R_\infty}{(\frac{1}{R_\infty}) - R_s} e^{-2cLAI} \quad (4)$$

(2) 測定法

ASTER センサーにより観測される i バンドの反射率 S_i と i バンドの地表面の反射率 R_i の間には、次式が成り立つ。

$$S_i = \tau_i R_i + \sigma_i \quad (5)$$

ここで、 τ_i 及び σ_i は、それぞれ i バンドの大気透過率及び大気反射率である。また、 S_i と i バンドの ASTER データ BN_i の間には、次式が成り立つ⁶⁾。

$$S_i = \gamma_i BN_i + \delta_i \quad (6)$$

ここで、 γ_i 及び δ_i は、それぞれ i バンドの ASTER センサーのキャリブレーションパラメータにより決まる定数である。さらに、(4)式を i バンドに関して表すと、次式となる。

$$R_{si} = \frac{\{(R_{\infty i} - R_i)/R_{\infty i} \cdot e^{2c_i LAI} + (R_i R_{\infty i} - 1)\} \cdot R_{\infty i} / (R_i R_{\infty i} - 1)}{(R_{\infty i} - R_i)/(R_i - 1/R_{\infty i}) \cdot e^{2c_i LAI} + 1} \quad (7)$$

(5)、(6)式より

$$BN_{si} = \frac{BN_{\infty i} + \frac{(1/R_{\infty i} - q_i)(BN_i - BN_{\infty i})e^{2c_i LAI}}{1/R_{\infty i} - (p_i BN_i + q_i)}}{1 + \frac{p_i(BN_i - BN_{\infty i})e^{2c_i LAI}}{1/R_{\infty i} - (p_i BN_i + q_i)}} \quad (8)$$

ここで、 $p_i = \gamma_i / \tau_i$ 、 $q_i = (\delta_i - \sigma_i) / \tau_i$ である。可視波長域、近赤外波長域において $1/R_{\infty i} \gg q_i$ 、 $p_i BN_i \gg q_i$ すなわち $R_{\infty i} \approx p_i BN_{\infty i}$ のため、 LAI と BN_{si} との関係は次式となる⁶⁾。

$$BN_{si} = \frac{BN_i (e^{2c_i LAI} - R_{\infty i}^2) + BN_{\infty i} (1 - e^{2c_i LAI})}{1 - R_{\infty i}^2 e^{2c_i LAI} - BN_i R_{\infty i}^2 (1 - e^{2c_i LAI}) / BN_{\infty i}} \quad (9)$$

ここで、 BN_{si} 及び $BN_{\infty i}$ は、それぞれ i バンドの R_s 及び R_∞ に対応する ASTER データである。

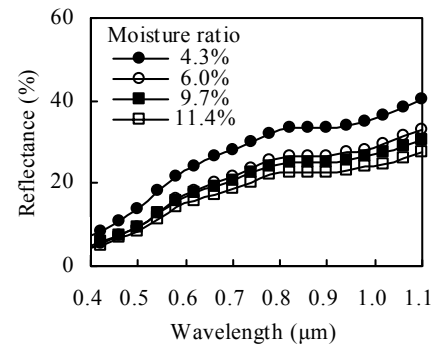


図-4 種々の土壌含水比におけるマサ土の分光反射率曲線

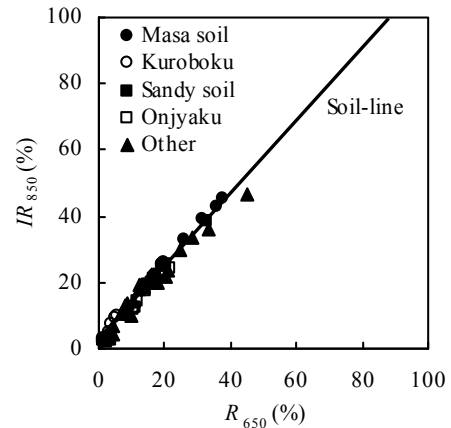


図-5 九州の土壌における R_{650} と IR_{850} の関係及び Soil-line

ところで、地表の土壌反射率は、一般に土壌の種類と含水量によって大きく異なる¹³⁾。佐賀県北部の山地に広く分布するマサ土 (佐賀県佐賀市富士町) の含水比の増加に伴う分光反射率曲線の変化を示すと、図-4 となる。図示されるように、分光反射率曲線は含水比の増加に伴って全体的に低下する。しかし、このような土壌の分光反射率について、可視波長 650nm の分光反射率 R_{650} と近赤外波長 850nm の分光反射率 IR_{850} を図示した場合、図-5 に示

されるように、両者の関係は土壌の種類や含水比の大小に関わらず、Soil line と呼ばれる一本の直線で表される¹⁴⁾。

このような Soil line の関係は、図-6 に示されるように土壌面の露出した裸地における 2 バンド（可視波長域）の ASTER データ BN_{s2} と 3 バンド（近赤外波長域）の ASTER データ BN_{s3} の間でも見られ、次式で表される。

$$BN_{s3} = a'BN_{s2} + b' \quad (10)$$

ここで、 $a'=0.9$ 、 $b'=2.0$ である。

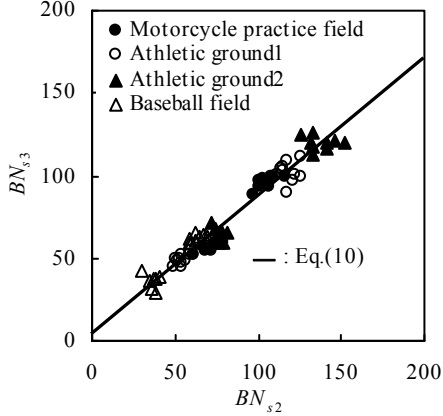


図-6 ASTER データの BN_{s2} と BN_{s3} の関係

したがって、本研究で用いた ASTER データの場合、(9)、(10)式より、 BN_{s2} と BN_{s3} の間に、次式が成り立つ。

$$\frac{BN_{s3}(e^{2c_3LAI} - R_{\infty 3}^2) + BN_{\infty 3}(1 - e^{2c_3LAI})}{1 - R_{\infty 3}^2 e^{2c_3LAI} - BN_{s3}R_{\infty 3}^2(1 - e^{2c_3LAI})/BN_{\infty 3}} = \frac{a' \cdot \frac{BN_{s2}(e^{2c_2LAI} - R_{\infty 2}^2) + BN_{\infty 2}(1 - e^{2c_2LAI})}{1 - R_{\infty 2}^2 e^{2c_2LAI} - BN_{s2}R_{\infty 2}^2(1 - e^{2c_2LAI})/BN_{\infty 2}} + b'}{1} \quad (11)$$

さらに、上式を整理すると、

$$(A_3C_2 - a'A_2C_3 - b'C_3C_2)(b_3b_2)^{LAI} + (B_3C_2 - a'A_2D_3 - b'C_2D_3)b_2^{LAI} + (A_3D_2 - a'B_2C_3 - b'C_3D_2)b_3^{LAI} + (B_3D_2 - a'B_2D_3 - b'D_3D_2) = 0 \quad (12)$$

ここで、 $A_i=(a_i-d_i)d_i$ 、 $B_i=(d_i-ae_i)d_i$ 、 $C_i=(a_i-d_i)e_i$ 、 $D_i=d_i-ae_i$ 、 $a_i=BN_{si}$ 、 $b_i=e^{2c_i}$ 、 $d_i=BN_{\infty i}$ 、 $e_i=R_{\infty i}^2$ 、 $i=2,3$ である。

したがって、(12)式にパラメータを代入し、LAI を未知数とする方程式を解くことにより、LAI が求められる。

(3) 測定法の検証

図-7 は、観測地点を含んだ区域における 2007 年 8 月 18 日収録された ASTER データの BN_2 と BN_3 をプロットしたものである。点 (BN_2, BN_3) の大部分は、(10)式の直線の上方に分布する。また、葉群密度が高いほど、 BN_2 は低下し、逆に BN_3 は増大する。したがって、図中の頂点 A は、葉群密度の最も高い地点のデータである。そこで、いま(9)式より、各 LAI に対する BN_2 、 BN_3 を算出し、図-7 に対応する点 (BN_2, BN_3) の散布図を求めると、図-8 となる。なお、(9)式のパラメータは、現地観測や実験及び ASTER データから求められた。すなわち、LAI

の大きい植生キャノピー (LAI=6.5) の分光反射率の現地観測データにより $R_{\infty 2}=0.07$ 、 $R_{\infty 3}=0.48$ 、図-7 の点 A の BN_2 、 BN_3 を参考に $BN_{\infty 2}=38$ 、 $BN_{\infty 3}=155$ 、また、(10)式より $a'=0.9$ 、 $b'=2.0$ 、さらに、実験により $c_2=0.6$ 、 $c_3=0.2$ とした。

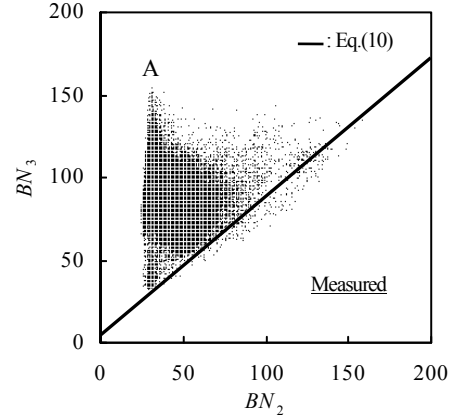


図-7 対象流域の ASTER データの点 (BN_2, BN_3) の散布図

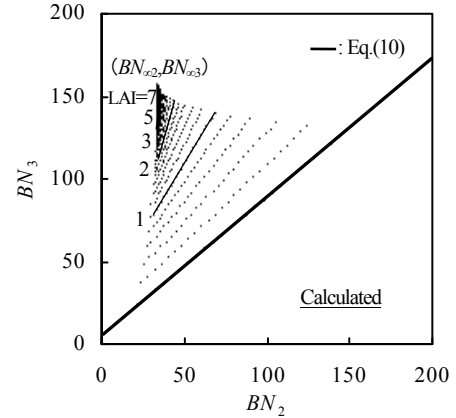


図-8 (9)式から算出した各 LAI に対する点 (BN_2, BN_3) の散布図

図示されるように、図-7 と図-8 の点 (BN_2, BN_3) の散布図の性状は、概ね一致している。しかし、LAI が 1 以下に低下するに伴って、図-8 の散布図では図-7 のそれよりも裾野を拡大する傾向がある。これは LAI の低下に伴って 2 方向成分モデルの前提条件、すなわち土壌の植生キャノピーによる完全被覆の条件が満たされなくなるためと考えられる。したがって、(9)式の十分な適用性を確保するためには、ほぼ LAI ≥ 2 を満たすことが必要であると推察される。

さらに(12)式による LAI 測定法の適用性を検証するための基礎データを取得するために、2007 年 8 月 9 日、佐賀大学農学部圃場で LI-1800 を用いて、種々の LAI に対するクヌギのキャノピーの分光反射エネルギー $L_k(\lambda)$ の観測を行った。図-9 に、(13)式により観測時間の経過による太陽放射エネルギーの変化を補正した $L_k(\lambda)$ の分光反射エネルギー $L'_k(\lambda)$ の曲線を示した。

$$L'_k(\lambda) = L_k(\lambda) \frac{W_0(\lambda)}{W(\lambda)} \quad (13)$$

ここで、 $W_0(\lambda)$ は太陽の南中時の標準反射板の分光反射エネルギー、 $W(\lambda)$ は $L_k(\lambda)$ 観測時の標準反射板の分光反射エネルギーである。 $L'_k(\lambda)$ は LAI の増加に伴い可視波長域で減少する傾向が見られる。

ところで、 i バンドの ASTER データ BN_i (相対輝度) とその絶対放射輝度 I_i の間には、次式の関係がある¹⁵⁾。

$$I_i = e_0 + e_1 BN_i \quad (14)$$

ここで、 e_0 及び e_1 は ASTER センサーのオフセットとゲインに関する係数で、 BN_2 に対しては $e_0 = -0.1$, $e_1 = 0.0708$, BN_3 に対しては $e_0 = -0.1$, $e_1 = 0.0862$ である¹⁵⁾。なお、これらの単位は $[\text{mW cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}]$ である。

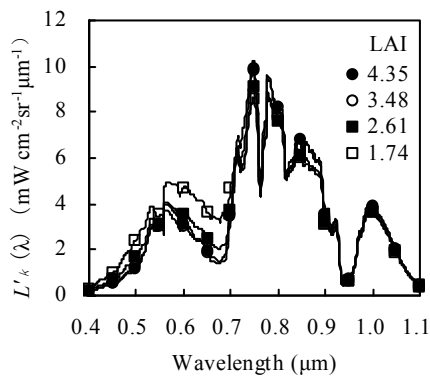


図-9 クヌギの種々の LAI に対する分光反射エネルギー曲線

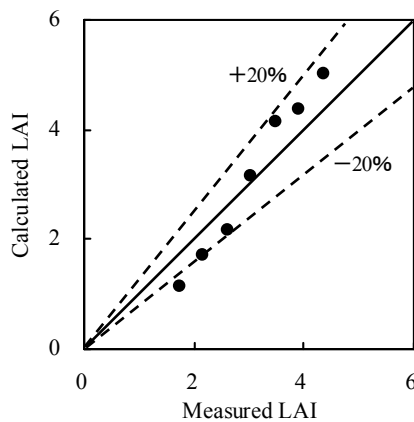


図-10 刈取法によるクヌギの LAI の測定値と計算値の比較

したがって、(12)式の適用性を実験データで検証するために、刈取法により測定した LAI と図-9 に示したクヌギの $L'_k(\lambda)$ より BN_2 , BN_3 に対応する相対輝度を(14)式より算出し、それらの値を(12)式に適用して挟撃法により算出した LAI の計算値を比較すると、図-10 となる。図示されるように、計算値は LAI>3 の場合、測定値より大きく、逆に LAI<3 の場合、測定値より小さい。しかし、全体的に両者の差異は比較的小さく、ほぼ±20%以内である。このような LAI の測定値と計算値の差異は、本来、LAI の変化に依存するパラメータ c を一定値に設定して計算を行ったことに起因すると推察される。

4. 結果及び考察

図-11 は、2007 年 8 月 18 日収録された ASTER データの BN_2 , BN_3 を(12)式に適用し、挟撃法により算出された観測地点 A, B, C, D (図-1) 内の 14 地点における LAI 測定値と LAI-2000 による観測値を比較したものである。図示されるように、両者の差異は、ほぼ±20%の範囲内である。しかし、1 地点のデータについては、-20%より大きな誤差が見られる。これは、現地地形が急斜面であったために、キャノピーアナライザーのセンサーが水平に保持できず、測定値に誤差が生じたためと考えられる。したがって、ここで提示した方法を用いて ASTER データより比較的精度良く LAI の測定が可能と考えられる。なお、(12)式中のパラメータは、2. (3) で使用した値を適用した。また、ここでは簡易大気補正法の 1 つである histogram minimum method¹⁶⁾により大気補正されたデータを用いて解析した。

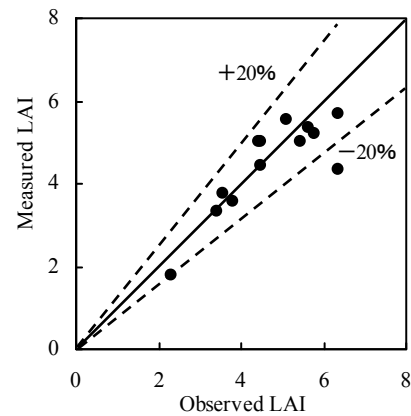


図-11 14 地点における LAI-2000 による LAI の観測値と ASTER データによる測定値の比較

図-12 は、夏季 (2007 年 8 月 18 日) 及び冬季 (2008 年 1 月 9 日) に収録された ASTER データの BN_2 , BN_3 を(12)式に適用し、挟撃法により算出された対象流域 (図-1) の LAI 分布画像である。なお、(12)式中のパラメータは、2007 年 8 月 18 日の ASTER データについては 2. (3) で使用した値を適用したが、2008 年 1 月 9 日の ASTER データについては、現地観測や ASTER データから $R_{x2}=0.07$, $R_{x3}=0.48$, $BN_{x2}=38$, $BN_{x3}=155$, $a'=0.9$, $b'=2.0$, $c_2=0.3$, $c_3=0.1$ とした。また、ASTER データの大気補正には、上述の histogram minimum method を適用した。図示されるように、対象流域の LAI 分布は夏季と冬季で大きく異なる。すなわち、LAI は、夏季では 3.0~7.0 の範囲に、また冬季では 1.0~4.0 の範囲に多く分布し、夏季と冬季の対象流域の LAI 平均値は、それぞれ 4.5 および 2.2 である。このような夏季と冬季の LAI 分布の差異は、両季節の林地における葉群密度や代謝活性の差異が大きく反映したものと考えられる。したがって、両季節の LAI 分布の差異は、対象流域の蒸発散や流出などの水循環過程においても少なからず影響を及ぼしていると推察される。



夏季（2007年8月18日）のLAI分布



冬季（2008年1月9日）のLAI分布

図-12 ASTER データを用いて測定された対象流域の夏季と冬季のLAI分布

5. まとめ

本研究では、ASTER データを用いた植生キャノピー内の電磁波の吸収・散乱過程に基づく、流域スケールの LAI 測定法とその適用性について、検討、考察した。その結果、(9)式より求めた点 (BN_2 , BN_3) の散布図は、ASTER データから求めた散布図の性状をほぼ示した。また、クスギのキャノピーの分光反射エネルギーの観測値を(12)式に適用して算出した LAI と刈取法により測定した LAI との比較の結果、両者の差異はほぼ±20%の範囲内であった。さらに、(12)式に基づいた LAI 測定法により、ASTER データから求めた観測地点（14 地点）の LAI の測定値と LAI-2000 による観測値の差異も、ほぼ±20%の範囲内であった。これらの結果より、提示された LAI 測定法の有用性が確認された。さらに、この LAI 測定法により、ASTER データを用いて測定された対象流域の夏季と冬季のLAI分布は、大きく異なった。この差異は、両季節の林地における葉群密度や代謝活性の差異が大きく反映したものと考えられた。

引用文献

- 1) 藤原靖, 長谷川宏一, 島村雄一, 泉岳樹, 松山洋: 葉面積指数の直接測定法において作業プロセスの違いとそれらの組

み合わせが測定値に及ぼす影響—スギ人工林における事例解析, 水文・水資源学会誌, Vol.18, pp.603-612, 2005.

- 2) Clough, B.F., Ong, J.E., Gong, G.W.: Estimating leaf area index and photosynthetic production in canopies of the mangrove *Rhizophora apiculata*. *Marine Ecology Progress Series*, Vol.159, pp.285-292, 1997.
- 3) Chason, J.W., Baldocchi, D.D., Huston, M.A.: A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agric. For. Meteorol.*, Vol.57, pp.107-128, 1991.
- 4) 松山洋, 藤原靖, 島村雄一, 泉岳樹, 中山大地: 全天写真から得られる葉面積指数とプラントキャノピーアナライザーによる実測値との比較, 地学雑誌, Vol.112, pp.411-415, 2003.
- 5) 山本晴彦, 鈴木義則, 早川誠而: 透過光による葉面積指数診断, 農業技術体系作物編(追録第16号), 農文協, 東京, pp.27-33, 1994.
- 6) Price, J. C.: Estimating leaf area index from satellite data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.22, pp.272-281, 1993.
- 7) Fassnacht, K. S., Gower, S. T., MacKenzie, M. D., Norman, J. M., and Lillesand, T. M.: Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forests using the landsat thematic mapper. *Remote sensing of Environment*, Vol.61, pp.229-245, 1997.
- 8) 星直弥, 龍原哲, 阿部新行: Landsat TMデータを用いた落葉広葉樹天然林における葉面積指数の推定, 日林誌, Vol.83, pp.315-321, 2001.
- 9) 瀬口昌洋: Landsat 5号TMデータによる流域の植生分布量調査, 水工学論文集, Vol.38, pp.777-782, 1994.
- 10) Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R.: Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco. *Agricultural Water Management*, Vol.79, pp.1-27, 2006.
- 11) Asrar, G. (Ed.): Theory and applications of optical remote sensing, John Wiley & Sons, pp.299-308, 1989.
- 12) 近藤純正編者: 水環境の気象学—地表面水収支・熱収支—, 朝倉書店, pp.212-214, 1994.
- 13) Huete, A. R.: A soil adjusted vegetation index(SAVI). *Remote Sensing Environment*, Vol.25, pp.295-309, 1988.
- 14) 瀬口昌洋, 渡辺潔, 林稔人: リモートセンシングによる流域の土壌及び植生情報の収集に関する基礎的研究, 水工学論文集, Vol.35, pp.237-242, 1991.
- 15) 布和敷斯尔, 高田雅之: リモートセンシングとGIS技術の環境分野への応用, 衛星リモートセンシング・セミナー in 北海道, 衛星リモセン地域応用成果報告, pp.37-42, 2005.
- 16) Campbell, J. B.: Introduction to remote sensing, *The guilford press*, pp.273-277, 1987.

(2008.9.30 受付)