

冷温帯落葉広葉樹林における LAI の季節変化

Seasonal variation in LAI from a cool-temperate deciduous broadleaved forest

野中翔平^{*1}・小坂泉^{*1}・川口美優^{*1}・瀧澤英紀^{*1}・阿部和時^{*1}

Shohei NONAKA^{*1}, Izumi KOSAKA^{*1}, Miyuu KAWAGUCHI^{*1}, Hideki TAKIZAWA^{*1} and Kazutoki ABE^{*1}

* 1 日本大学生物資源科学部

Coll. Bioresource Sci., Nihon Univ., Fujisawa 252-0880

要旨：本研究ではブナ (*Fagus crenata*) が優占する冷温帯落葉広葉樹林において葉面積指数 (LAI) の連続的かつ定量的な季節変化を明らかにすることを目的とし、群馬県利根郡みなかみ町の日本大学演習林の高平山 (36°48'N, 139°02'E, 標高 985m) にて、2013 年 7 月から 2014 年 8 月にかけて観測を行った。日射を用いた Lambert-beer の法則と NIR/PAR 法による 3 種類の異なる波長域の短波放射量を用いた間接推定法を行い、LAI を連続的に観測した。加えて、落葉期にはリタートラップ法による直接推定法、着葉期には LAI-2000 法による定量的な観測を行った。その結果、2013 年の落葉期においてリタートラップ法および日射透過法で推定された LAI の季節変化は、ほぼ同様であった。2014 年の着葉期において日射透過法、NIR/PAR 法および LAI-2000 法で推定された LAI は、それぞれ 3.69, 3.41 および 3.83 m² m⁻² となり、それらの平均値は 3.64 m² m⁻² となった。

キーワード：LAI, Lambert-beer の法則, NIR/PAR 法, 冷温帯落葉広葉樹, ブナ

Abstract : We investigated seasonal variation in LAI (Leaf Area Index) in a deciduous broadleaved forest (dominated by *Fagus crenata*) growing in a cool, temperate climate on Mt. Takahira of the Nihon University Forest in Minakami-machi, Tone-gun, Gunma, Japan (36°48'N, 139°02'E, 985 m a.s.l.). We measured LAI continuously from July 2013 to August 2014 using two indirect methods: the Lambert-Beer method, which estimates the ratio of solar radiation to transmitted solar radiation beneath the canopy, and the NIR/PAR method, which estimates the ratios of near infrared radiation (NIR) to photosynthetically active radiation (PAR) at three short wavelengths. We additionally measured LAI directly, using the leaf litter trap method during leaf-less periods, and the LAI-2000 plant canopy method during foliated periods. During the leaf-less period in 2013, the seasonal changes in LAI estimated by the litter trap and solar radiation transmission methods were similar. During the foliated period in 2014, the mean values of LAI estimated by the solar radiation transmission method, the NIR/PAR method, and the LAI-2000 method, were 3.69, 3.41, and 3.83 m² m⁻², respectively (average, 3.64 m² m⁻²).

Keywords : LAI, lambert-beer law, NIR/PAR method, cool-temperate deciduous broadleaved forest, *Fagus crenata*

I はじめに

樹木の葉は光合成と蒸散が行われる場であり、森林一大気間における熱・水・CO₂ 交換量を評価する上で重要なパラメータの一つとなる。森林における葉量は、単位面積あたりの葉の投影面積の総和（単位:m² m⁻²）で示され、葉面積指数 (Leaf Area Index, 以下 LAI) と呼ばれている。LAI の推定方法を大きく分けると、直接推定法と間接推定法がある。直接推定法には、刈り取り法とリタートラップ法がある。刈り取り法では木を切り倒し、葉を解体して葉面積を測定する。これらの方法は信頼度が高いものの、時系列変化が追えず重労働であり、搅乱が大きい（1, 2）。間接推定法とは、光や画像を用いて測定する方法であり、魚眼レンズで撮影された写真を画像

解析し開空度から推定する方法や、林内の光量の減衰率から求める Lambert-beer の法則、画像解析と光量の減衰率の両方から推定する LAI-2000 を用いる方法、衛星リモートセンシングによって推定する方法などがある。非破壊的であり比較的容易に LAI を推定できる。

本研究対象の冷温帯落葉広葉樹林では、日本の冷温帯を代表するブナ (*Fagus crenata*) が優占樹種であるが、Matsui *et al.* (9)は気候変動に伴う気温上昇により本州のブナの分布確率が低下することを報告している。筆者らは、ブナが気候変動などの環境変化にどのように応答するかを長期的にモニタリングすることは重要であると考え、群馬県北部のブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林において熱・水・CO₂ 交換量の観測を行っている(5)。そ

ここで本研究では、直接推定法であるリタートラップ法および間接推定法である LAI-2000 法を用いて、対象林における熱・水・CO₂ 交換量を評価するうえで必要となる量的な LAI の推定を行った。更に、林内を透過する日射量と全天日射量の比を用いる Lambert-beer の法則（以下、日射透過法）と、近赤外線放射量（以下、NIR）と光合成有効放射量（以下、PAR）の比を用いる NIR/PAR 法（6, 7）を適用し、3種類の異なる波長域の短波放射量のデータを自記記録することで、本試験地における連続的な LAI の季節変化を明らかにすることを試みた。

II 方法

観測地は群馬県利根郡みなかみ町の日本大学水上演習林（36°48'N, 139°02'E, 標高 650-985m）で、優占樹種はブナ (*Fagus crenata*) であり、その他の樹種としてミズナラ (*Quercus crispula*), コナラ (*Quercus serrata*) などの落葉広葉樹が混在している。本研究では4つの方法を用いて LAI の測定を行った。

1. 日射透過法 高平山の山頂に建設された観測塔周辺の平均樹高は 2m 程度であり、観測塔の高さ 6m の位置において遮るものはないため、6m の観測塔の先端に日射計 (CMP-3, KIPP&ZOZEN) を設置し、全天日射量（以下 S_{\downarrow} ）を計測した。山頂の観測塔から水平距離で西へ 100m 程度離れた地点に設置された 2m の観測塔にも同種の日射計を設置し、林床日射量（以下 $S_{\downarrow t}$ ）を計測した。この地点において、魚眼レンズを装着させて撮影した全天空写真を解析ソフト CanoPon2 (<http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>, 2009/02/27) を用いて推定された林冠開空度は、ブナが着葉した状況で 20% 程度であった。林床にはササなどの草本が若干ある程度で、LAI の推定において下層植生の影響は含まれない。測定間隔は 10 分毎に行い、データロガー (CR10X, Campbell) に記録し、大気上端日射（以下 $S_{0\downarrow}$ ）>0 の場合のデータを選択した。 $S_{0\downarrow}$ は以下の式を用いて算出した（4）。

$$S_{0\downarrow} = I_{00} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \cos\theta \quad (1)$$

$$\cos\theta = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cosh \quad (2)$$

ここで I_{00} は太陽定数 (=1365W m⁻²), θ は天頂角, φ は緯度, δ は太陽の赤緯, d は太陽の南中からの時角, d と d_0 は太陽・地球間の距離とその平均値を表す。それらの日積算値を用いて Lambert-beer の法則（3）より、式（1）から LAI の推定を行った。

$$\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = -k \cdot LAI \quad (3)$$

I / I_0 は相対照度であり、本研究では $S_{\downarrow t} / S_{\downarrow}$ とした。 k は吸光係数である。吸光係数は群落の幾何学的構造（葉の

傾き、大きさなど）、葉の光吸収率、太陽高度などによって変化する。（3）式は群落に入り込んだ光が葉に吸収されて指数関数的に減衰することを示している（3）。解析期間は 2013 年 7 月 9 日から 2014 年 8 月 29 日である。

2. NIR/PAR 法 NIR は 700-1000nm の波長域の光であり、葉面にて透過・反射が起こる。PAR は 400-700nm の波長域光のことであり、葉面にて吸収・透過・反射が起こる。NIR/PAR 法の大きな利点として、樹冠を透過した林床光のみで LAI を推定できることがあげられる。Kume et al. (7) は林床における NIR/PAR 比と LAI には高い相関が見られるという結果を示した。 $S_{\downarrow t}$ を測定するための日射計を設置している林床観測塔に葉面積指數計測センサー (MIJ-15, 日本環境計測) を併設し、樹冠を透過した NIR（以下、 NIR_t ）および PAR（以下、 PAR_t ）を計測し、10 秒毎に出力されるデータを 10 分平均した値をデータロガー (CR1000, Campbell) に記録した。また、 $S_{0\downarrow} > 0$ の場合のデータのみを使用し、LAI を算出する際には、日積算値を用いて行った。久米（6）によれば、NIR/PAR 法に用いる NIR や PAR の値は、太陽の位置関係によって林冠の特性が平均化され、その場所固有の光環境を安定的に示すため、日積算値が最も適しているとされる。一方、林床における NIR/PAR の瞬間値は、実際の植生構造は複雑で、入射する放射特性も気象や太陽高度、地形によって大きく変化するため、天候や林冠と太陽の位置関係によって大きく変化すると言われている。解析期間は 2014 年 4 月 17 日から 8 月 29 日である。

3. リタートラップ法 リタートラップ法は、調査木の落葉を採取しておき時期を遡って LAI を推定する非破壊的方法である。しかしながら、この方法は落葉樹および落葉期にしか使えない（3）。落葉期において林床観測塔の近くに円形のリタートラップ（採取面積: 0.5m²）を 1 台設置し、リター葉重量から LAI を求めた。リタートラップ設置期間は 2013 年 9 月 25 日から 12 月 6 日であり、10 月 28 日、11 月 16 日、12 月 6 日の計 3 回リターの回収を行った。12 月 6 日時点で落葉は完了していたので、リタートラップを撤去した。

4. LAI-2000 法 着葉期において、プラントキャノピーナライザー (LAI-2000, Li-COR) を用いて LAI を求めた。測定日は 2014 年 5 月 23 日、6 月 27 日、7 月 19 日、8 月 10 日の計 4 回である。

また、温度センサー (CS107, Campbell) を高平山山頂の観測塔 6 m の先端に設置し、2013 年 7 月 9 日から 2014 年 8 月 29 日にかけて観測を行った。

III 結果および考察

1. 吸光係数の算出

図-1 は、リタートラップ法お

より LAI-2000 法で推定された LAI と $-\ln(S_t/S_d)$ の関係を示す。2013 年 9月 25 日の S_t/S_d のデータについては、日射計のケーブルの断線により、取得できなかった。 k を推定する際、落葉期後半では着葉量が減少し、幹枝の影響を大きく受ける可能性が考えられるため、2013 年 11 月 16 日および 12 月 6 日のデータを除外した。図-1において、リタートラップ法によるデータは 2013 年 10 月 28 日の 1 点のみとなった。図-1における実線は、LAI と $-\ln(S_t/S_d)$ の近似直線を示す。近似直線の傾きは吸光係数 k を表す。図-1 の近似直線において、決定係数 (R^2) は 0.81 と高い相関を示し、 k の傾きは 0.64 となった。丸山ら (8) によれば、0.55~0.70 と推定しており、本研究で得られた値とおおむね一致した。よって、本研究において k は 0.64 とした。

2. NIR/PAR 法の LAI 推定式について KUME *et al.* (7) は $NIRt/PARt$ と LAI には式(4)の関係があることを見出している。

$$LAI = 2.80 \cdot \ln\left(\frac{NIRt}{PARt}\right) + 0.69 \quad (4)$$

(4) 式は、ミズナラとダケカンバが優占する冷温帯落葉広葉樹林で推定されたものであるため、本研究対象のブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林に適用できるかを検討する。図-2 は、 $NIRt/PARt$ と LAI-2000 による LAI との関係を示す。算出方法は、1 日積算をした $NIRt$ と $PART$ を用いる方法と、10 分値における $NIRt$ と $PART$ を用いて 10 分毎に比率を算出し、それらの 1 日平均と標準偏差を示す方法をとった。図-2 における黒丸は日積算値における $NIRt/PARt$ の値、白丸は日平均値における $NIRt/PARt$ の値、エラーバーは日平均値における標準偏差を示す。図中の曲線は (4) 式による値を示す。

図-2において、日積算値における $NIRt/PARt$ を示す黒点と、その 1 日平均値を示す白点は、(4) 式の曲線と重なる場合があり、エラーバーもその曲線にかかっていることがみてとれる。図示しないが、測定された $NIRt/PARt$ の日積算値を (4) 式に代入して推定された LAI と、LAI-2000 法によって得られた LAI を比較したところ、両者の近似直線は $y=1.06x$ を示し、 R^2 は 0.78 となり、比較的高い相関を示し、概ね一致した。そのため、本研究において (4) 式で LAI をおよそ推定可能であると判断し、NIR/PAR 法では (4) 式を用いて LAI の推定を行った。

3. LAI の季節変化 図-3 は、a) 1 日平均気温、b) 4 つの方法における LAI の季節変化を示す。図-3 における黒丸はリタートラップ法によって推定された LAI、白丸は LAI-2000 法によって推定された LAI、白ダイヤは日射透過法に

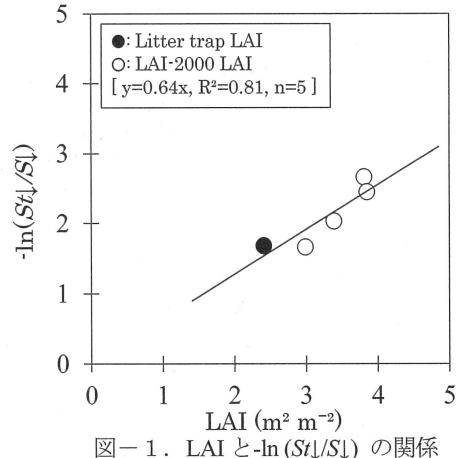


図-1. LAI と $-\ln(S_t/S_d)$ の関係
Fig.1 Relationship between LAI and $-\ln(S_t/S_d)$

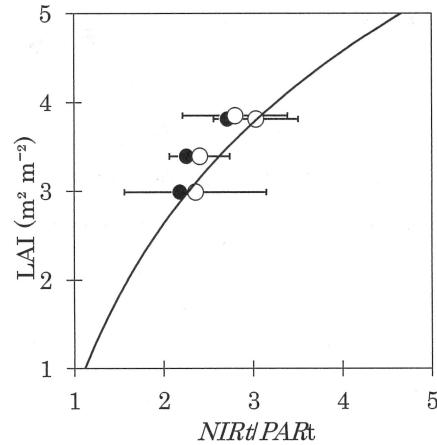


図-2. NIRt/PARt と LAI の関係と (4) 式との比較
Fig.2 Relationship between $NIRt/PARt$ and LAI, and comparison with (4) method. Filled circles indicate $NIRt/PARt$ used daily total $NIRt$ and $PART$. Open circles indicate daily mean $NIRt/PARt$, and horizontal line indicate the standard deviations. The curving line indicates (4) equation.

よって推定された LAI、黒ダイヤは NIR/PAR 法によって推定された LAI を示す。図-3 より、2013 年は 9 月上旬に落葉が開始し、11 月上旬には落葉が終了した。また、2014 年 5 月上旬に展葉が開始し、6 月中旬には展葉が終了した。2014 年の着葉期において日射透過法、NIR/PAR 法および LAI-2000 法で推定された LAI は、それぞれ 3.69, 3.41 および $3.83 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ となり、それらの平均値は $3.64 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ となった。図-3 における気温と LAI は、同様の季節変化を示した。また、それぞれの方法によって推定された LAI の季節変化はおおよそ一致した。

しかし、2014 年の 8 月において日射透過法と NIR/PAR 法による LAI の推定値に 0.5 度程の差が生じた。図-2 で示したように、LAI-2000 法で得られた LAI は、NIR/PAR 法である (4) 式を用いて推定されたものよりも、若干大きくなる場合があり、(4) 式では LAI を若干過小に

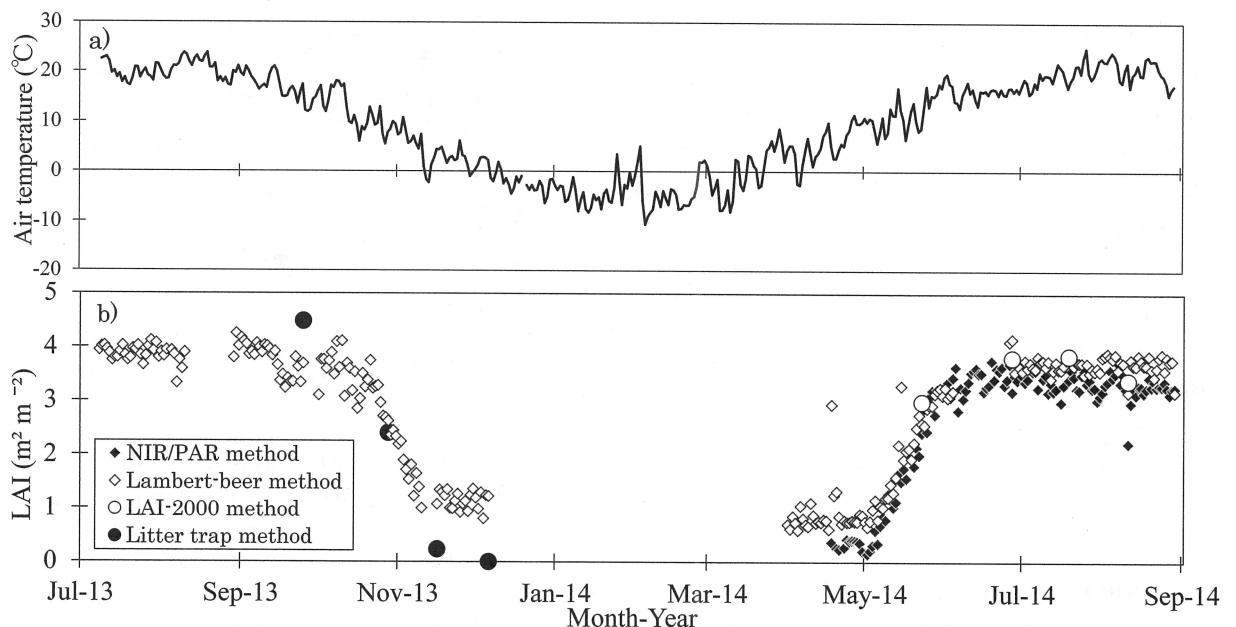


図-3. 2013年7月から2014年8月までの a) 1日平均気温と b) 4つの方法による LAI の季節変化

Fig.3 Seasonal variation in a) daily mean air temperature, and b) LAI for 4 methods from July 2013 to August 2014

評価する可能性が考えられる。しかし、今回得られたデータの個数は少ないため、測定されたデータのみで $NIRt/PARt$ と LAI の関係から回帰式を得ることは難しいことから、今後もデータの蓄積を続け、(4) 式の検討を行う必要があると考えている。

IV まとめ

本研究では、冷温落葉広葉樹林における熱・水・ CO_2 交換量を評価するうえで必要となる連続的かつ量的な LAI を 4 つの方法を用いて推定した。その結果、2013 年の落葉期においてリタートラップ法および日射透過法で推定された LAI の季節変化は、ほぼ同様であった。2014 年の着葉期において日射透過法、NIR/PAR 法および LAI-2000 法で推定された LAI は、それぞれ 3.69, 3.41 および $3.83 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ となり、それらの平均値は $3.64 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ となった。今回の測定期間において、これらの方法によって推定された LAI の季節変化は概ね一致した。また、林床光のみで LAI を推定できる NIR/PAR 法は有効であると考えられ、NIR/PAR 法を用いた多地点での移動観測データを蓄積し、面的に平均的な LAI の推定方法について検討していく予定である。

引用文献

- (1) CHASON, J.W., BALDOCCHI, D.D. and HUTSON, M.A. (1991) Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf-area. Agric For Meteorol **57** : 107-128
- (2) 長谷川宏一・尾身洋・比留間祐太・熊谷聰・山本遼介・泉岳樹・松山洋 (2013) 複数の方法によるスギの葉面積指数の推定—熊本県阿蘇地方を事例に—. 地学雑誌 **122**(5) : 875-891
- (3) 平野高司 (2009) 生物環境気象学. 文永堂出版, 東京 : 108-109
- (4) 近藤純正 (1994) 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—. 朝倉書店, 東京 : 55-58
- (5) 小坂泉・瀧澤英紀・小林昌平・佐々木千鶴・中村貴雄・掛谷亮太・阿部和時 (2014) 冷温帶落葉広葉樹林における CO_2 フラックスの季節変化. 関東森林研究 **65** : 181-184.
- (6) 久米篤 (2013) シリーズ森をはかるその 52—空を背景にして葉量の変化をはかる—. 森林科学 : 日本林学会会報 **68** : 39-40
- (7) KUME, A., NASAHARA, N.K., NAGAI, S. and MURAOKA, H. (2011) The ratio of transmitted near-infrared radiation to photosynthetically active radiation (PAR) increases in proportion to the absorbed PAR in the canopy. J Plant Res **124** : 99-106
- (8) 丸山幸平・山田昌一・中沢迪夫 (1968) ブナ林の生態学的研究 17. ブナ天然林光合成総生産量の試算. 79回日林講 : 286-288
- (9) MATSUI, T., YAGIHASHI, T., NAKAYA, T., TAODA, H., YOSHINAGA, S., DAIMARU, H. and TANAKA, N. (2004) Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. J Veg Sci **15** : 605-614