

光学的手法を用いた葉面積指数の計測：スギ人工林 における補正係数の算出

鶴田，健二

九州大学大学院生物資源環境科学府 | 京都大学大学院農学研究科

野方，麻里

九州大学農学部附属演習林福岡演習林

篠原，慶規

九州大学大学院農学研究院

小松，光

京都大学白眉センター

他

<https://doi.org/10.15017/1448874>

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 95, pp.88-92, 2014-03-30. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

光学的手法を用いた葉面積指数の計測*

—スギ人工林における補正係数の算出—

鶴田健二^{1),2)}・野方麻里³⁾・篠原慶規⁴⁾・小松光⁵⁾・大槻恭一³⁾

葉面積指数は森林と大気間のガス交換に影響を及ぼす重要なパラメーターであり、その最も直接的な計測法は樹木葉の刈り取りに基づくものである。実際にはより簡便な光学的手法による計測事例が多いものの、光学的手法は直接的な方法に比べて葉面積指数を過小評価する傾向にあることが知られている。そこで本研究では、スギ人工林において刈り取り法と光学的手法により葉面積指数を計測し、光学的手法の補正係数を算定することを目的とした。刈り取り法に基づく葉面積指数は、刈り取り計測の結果を基に作成したアロメトリー式から、7.7と算定された。光学的手法に基づく葉面積指数の算定は、LAI-2000および全天空写真画像によるものを行い、葉面積指数はそれぞれ4.9、5.0と算定された。葉の集中度を表す補正係数 (Ω) は、どちらの方法を用いた場合でも0.64と算定された。

キーワード：アロメトリー式、葉面積、辺材面積、葉量、ガス交換

Leaf area index is an important parameter relating to gas exchanges between forest and the atmosphere. The most direct measurement is based on the clipping method, which is to harvest all leaf. Actually, the optical measurement method has been applied as a convenient technique, because the clipping method requires a huge amount of effort. However, many studies reported that values of leaf area index based on the optical measurement method underestimated. The correction coefficient has been used for correcting the underestimates. To examine the correction coefficient of the optical method in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forest, we measured leaf area index based on both the clipping method and the optical measurement method. Leaf area index based on the clipping method was calculated as 7.7 using the allometric equation established from leaf-area measurements. The optical measurement method was conducted using LAI-2000 and hemispherical photography. Leaf area index were 4.9 and 5.0 in the study site, respectively. Leaf area index measured by the optical method was underestimated by about 40%, compared with that based on the clipping method. The correction coefficient in this forest was estimated as 0.64.

Keywords : Allometric equation, Leaf area, Sapwood area, Leaf biomass, Gas exchange

1. 背景

葉面積指数は単位地表面積当たりの葉面積合計値であり、植生と大気間のガス交換に影響を及ぼす重要なパラメーターである。そのため、森林における水・炭素・窒素循環の各素過程がモデル化されたプロセスモデルの各種に組み込まれている (例えば、Law *et al.* 2004; Kumagai *et al.* 2006; Bond-Lamberty *et al.* 2009)。

葉面積指数の実測法には樹木葉の全量を刈り取るなどの直接的な方法と、群落内での光の減衰などを利用した間接的な方法がある (松山ほか 2003)。このうち最も直接的な方法は刈り取り法であるが、多大な労力を要するため、光

学的な仮定に基づく間接的な計測法の適用例が多い (例えば、Law *et al.* 2001; Scanlon *et al.* 2010; Kosugi *et al.* 2013)。しかし、光学的手法は直接的な方法に比べて葉面積指数を過小評価する傾向にあることが知られており (村上2002)、検討すべき計測上の課題も存在する。光学的手法の問題の一つに、光の減衰が葉の集中度の影響を受けることが挙げられる (Jones & Vaughan 2010)。これにより葉面積あたりの光の透過量が増え、実際の葉面積を過小評価してしまう。集中度の影響を補正してない場合は、実際の葉面積を50%程度過小評価することが報告されている (van Gardingen *et al.* 1999)。

そこで、九州大学福岡演習林のスギ人工林において刈り

* Tsuruta, K., Nogata, M., Shinohara, Y., Komatsu, H. and Otsuki, K., The correction coefficient for leaf area index measurement based on the optical method in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forest.

- 1) 九州大学大学院生物資源環境科学府
Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka 812-8581
- 2) 現住所：京都大学大学院農学研究科
Present address: Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto 606-8502
- 3) 九州大学農学部附属演習林福岡演習林
Kasuya Research Forest, Kyushu University, Sasaguri, Fukuoka 811-2415
- 4) 九州大学大学院農学研究科
Faculty of Agriculture, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka 812-8581
- 5) 京都大学白眉センター
The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, Kyoto 606-8501

取り法と光学的手法により葉面積指数を計測し、光学的手法の補正係数を算定することを目的とした。まず、葉の刈り取りによる葉面積の計測を行った。この時、得られた葉面積データと樹木の相対成長を示す指標として胸高直径 (DBH) を用いて、葉面積のアロメトリー式も作成した。最後に、刈り取り法と光学的手法による葉面積指数計測値を比較解析することで、光学的手法の補正係数の算定を行った。本学術情報の今後の有効活用のため、葉面積に限らず樹木の諸特性データの記載も併せて行った。

2. 試験地および方法

2. 1. 試験地

本研究は、九州大学福岡演習林第9林班内の山の神試験地 (33°38'N, 130°31'E, 標高50m) において行った。本試験地の2000年～2004年の年平均気温は16.2°C、年平均降水量は1560mmである。本試験地は林齢約50年生、立木密度1100本/haのスギ人工林で覆われている。本試験地のスギは、福岡演習林の苗畑で生産された自家生産の飢肥杉苗が植林され、生長したものである。本試験地において、10m×10mの試験プロットを設置した。試験プロットに含まれたスギ11個体を供試木とした。

2. 2. 葉面積指数計測

2. 2. 1 刈り取り法

刈り取り法に基づく葉面積指数の算定のために、5個体の供試木の葉面積を以下の手順で計測した。まず、供試木を伐倒し、すべての葉を刈り取って計量した。本研究では当年枝と老年枝の葉は同様に扱った。供試木から一部の葉をサンプリングし、炉乾 (60°C, 48時間) 後、生重・乾重の関係式を作成した。次に、別の葉のサンプルを個体撮像素子 (CCD) タイプのスキャナ (Canon CanoScan 4400F) を用いて解像度300dpi、白黒2階調の設定で読み込み、画像処理ソフトウェア (ImageJ, <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>) を使用して葉面積を算出した。スギの葉は枝に螺旋するため、スキャナで読み込む際に一定方向にねじって平らになるように固定した。加えて、生重・乾重の関係式を使ってサンプル葉の乾重を推定し、乾重・葉面積の関係式を作成した。最後に、上述の二つの回帰式に対して、葉の刈り取りにより計測した各供試木のすべての葉の生重を入力することにより葉面積を算出した。なお、供試木の伐倒および葉の刈り取りは、2010年10月5日に行った。

得られた葉面積を基に葉面積指数 (m^2m^{-2}) を算定した。本研究では単位地表面積を試験プロット面積とし、葉の傾斜角を考慮せずに葉の片面の投影面積を葉面積とした。

2. 2. 2 光学的手法

光学的手法に基づく葉面積指数の算定は、プラント・キャノピー・アナライザー (LAI-2000, Li-Cor Inc., Lincoln, NE) を用いた計測および全天空写真の画像解析によるものを行った。LAI-2000の測定原理は、林冠における葉間隔

の測定を基本としている。LAI-2000は、魚眼レンズを通過してきた光に対して490nm以上の波長を遮蔽するフィルターを有しており、320–490nmの光のみ測定する。これにより、空は明るく、葉群は真黒と区別できるようになっている。林冠から入射する日射が単位面積 F を通過することに光量が $1/e^{KF}$ (K : 吸光係数) ずつ減少することを利用し (Welles and Norman 1991)、15° の幅を持つ5つの天頂角における葉間隔を求め、林外の基準光に対する林内の測定光の光量の減衰などから葉面積指数を推定する。計測にあたり、林冠上の参照データが必要となる。本研究は2台のLAI-2000を同期させるデュアルモードで計測を行い、1台は林内、もう1台は露場において計測を行った。計測は、林内への直達日射の散乱による影響を防ぐため、曇天日の3日間 (2010年6月7日、8月2日、9月28日) を選び、試験プロットの四隅で3回ずつ計測を行った。

全天空写真の撮影は、フィッシュアイコンバータ (FC-E8) を装着したデジタルカメラ (Nikon COOLPIX990, 3.43M Pixels) を用いて行った。まず林外で撮影して露出を固定し、三脚を用いて水平に設置した状態で撮影を行った。撮影した写真はJPEG形式でパソコンに取り込んだ後、光環境計算ソフトウェア (Gap Light Analyzer: Frazer *et al.* 1999) を用いて二値化などの画像処理を行い、天頂角0°～60°の範囲の葉面積指数を算定した。なお、二値化の閾値は130に設定した。撮影は曇天日の2010年7月10日に、試験プロットから約10m離れた隣接プロット (10m×10m) においてランダムに40地点で行った。本試験地は同時期に植林された一斉林であり、スギの立地に大きな偏りはないため、隣接プロットにおける計測値は試験プロットの参照値として用いることが可能だと考えられる。

2. 3. 葉面積指数の補正方法

実際の葉面積指数 (LAI) は、葉面積指数の計測値 (LAI_e) と葉の集中指数 (Ω) によって関連付けられ、次式で表される (Law *et al.* 2001; Jones & Vaughan 2010)。

$$LAI = \frac{LAI_e}{\Omega} \quad (1)$$

本研究では、刈り取り法に基づく葉面積指数に対して、LAI-2000を用いた計測値を補正する Ω の算出を行った。この時、LAI-2000を用いた計測値は3日間の平均値を使用した。

3. 結果と考察

各サンプルの葉の生重と乾重は、表1の通りとなった。葉の乾重と葉面積は、表2の通りとなった。スキャナで読み込んだ葉の画像の一例を図1に示した。以上のデータと葉の全生重のデータから、各供試木の葉面積は表3のように算定された。

DBHと葉面積には高い相関関係が認められ、葉面積 (A_{L_tree}) をDBHから推定するアロメトリー式は、DBHが19.9～32.2 cmの範囲において、

$$A_{L_tree} = 0.0052DBH^{2.7983} \quad (R^2 = 0.93) \quad (2)$$

なる式で表された。ここで、DBHおよび A_{L_tree} の単位は、それぞれcm、 m^2 である。この式に試験プロット内の全供試木のDBHデータを入力することで、試験プロットの葉面積指数は表4のように算定された。ここで算定された値は、只木(1976)によって取りまとめられた刈り取り法に基づくスギ人工林126林分の計測値の範囲内であった。

LAI-2000および全天空写真画像に基づく葉面積指数は表4の通り算定された。LAI-2000を用いた葉面積指数計測値は、刈り取り法に基づくものに比べて約37%の過小評価となった。全天空写真画像に基づく葉面積指数計測値も刈り取り法に基づくものに比べて37%の過小評価となった。LAI-2000と刈り取り法の比較を行った石井(2007)によると、LAI-2000を用いた葉面積計測値はスギ人工林において約24%、ヒノキ人工林において約39%過小することを報告している。本研究では、全天空写真画像に基づく葉面積指数計測値もLAI-2000を用いた場合と同等の過小評価をすることが確認された。

式(1)より、 Ω の値は0.64と算定された。石井(2007)によると、スギ林とスギ林では Ω の値はそれぞれ0.76、0.61、宇都木ほか(2001)によると、ヒノキ林では0.54と報告されており、本研究で得られた Ω の値はその範囲内であった。本試験地においてLAI-2000を用いて葉面積指数の絶対値の算定を行う場合、 Ω を用いて計測値の補正を行うことが有効であることが分かった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、九州大学農学部附属演習林の井上一信氏、長澤久視氏、扇大輔氏、山内康平氏、大崎繁氏には樹木の伐倒と搬出をしていただきました。九州大学農学部附属演習林流域環境制御学研究室のメンバーには、供試木の葉の刈取りを快く引き受けていただきました。本研究は独立行政法人科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究課題「荒廃人工林の管理による流量増加と河川環境の改善を図る革新的な技術の開発」の一部として行われたものです。また、本稿に対して二人の査読者の方々には有益なご意見をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

表1. サンプルの葉の生重と乾重

個体番号	葉番号	生重(g)	乾重(g)
1	1	8.3	3.5
	2	28.2	11.3
	3	19.2	7.8
3	1	94.0	34.4
	2	18.7	8.4
	3	104.7	40.0
	4	7.5	3.3
	5	38.5	16.9
4	1	5.2	2.3
	2	18.9	8.2
	3	30.2	13.4
6	1	8.7	3.6
	2	23.6	10.2
	3	33.6	14.0
7	1	13.8	6.2
	2	21.8	10.0
	3	32.7	14.5

表2. サンプルの葉の乾重と葉面積

個体番号	葉番号	乾重(g)*	葉面積(cm^2)
1	1	1.2	34.2
	2	0.4	12.4
	3	0.8	24.7
3	1	2.1	62.6
	2	0.6	19.9
	3	1.5	47.0
4	1	0.4	14.6
	2	0.9	31.8
	3	1.1	37.4
6	1	0.7	22.3
	2	1.7	52.3
	3	0.4	15.3
7	1	0.8	26.2
	2	0.6	16.7
	3	1.1	34.9

*乾重は表1の生重-乾重の関係式から推定した推定値

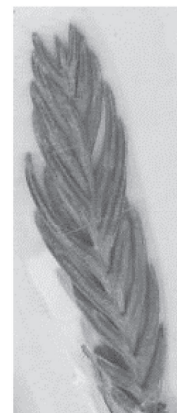


図1. スキャナで読み込んだ供試木の葉の一例。

表3. 供試木の葉面積およびその他の諸特性

個体番号	DBH (cm)	樹高 (m)	辺材幅 (cm) ^a	心材幅 (cm) ^b	辺材面積 (cm ²)	心材面積 (cm ²)	葉の乾重量 (kg)	葉面積 (m ²)	相対通道面積 ^c (m ² /cm ²)
1	31.5	22.7	3.3	12.5	292.4	486.9	31.3	92.1	0.31
2	32.0	21.9	3.2	12.9	285.5	518.7	—	—	—
3	23.6	20.3	2.3	9.5	153.9	283.5	13.7	40.1	0.26
4	32.2	19.7	1.9	14.2	180.9	633.5	24.2	71.1	0.39
5	35.1	22.5	2.8	14.8	279.5	688.1	—	—	—
6	19.9	18.3	1.8	8.2	99.8	211.2	6.3	18.6	0.19
7	21.5	20.0	1.8	9.0	111.4	251.6	10.6	31.3	0.28
8	32.5	22.3	2.3	14.0	218.2	611.4	—	—	—
9	36.9	23.4	2.9	15.6	304.9	764.5	—	—	—
10	31.5	22.8	2.5	13.2	236.1	543.3	—	—	—
11	21.4	19.4	1.9	8.8	116.4	243.3	—	—	—

^a 成長錐で採取したコアを基に計測した実測値。

^b 樹皮込みの胸高直径から幹半径を求め、幹半径から辺材幅を差し引いて求めた値。

^c 相対通道面積 (Huber value) は、葉面積 (m²) / 辺材面積 (cm²) で表される。

表4. 刈り取り法と光学的手法による葉面積指数(LAI)の計測値およびLAIの過小評価率

	刈り取り法	LAI-2000				全天空写真 画像
		1回目	2回目	3回目	平均値	
LAI (m ² m ⁻²)	7.7	5.1	4.8	4.7	4.9	5.0
過小評価率 ^a	—	34%	38%	39%	37%	35%

^a 過小評価率は、(1-LAI-2000によるLAI計測値/刈り取り法によるLAI実測値)×100として計算される。

引用文献

- Bond-Lamberty B, Peckham SD, Gower ST, Ewers BE (2009) Effects of fire on regional evapotranspiration in the central Canadian boreal forest. *Global Change Biol* 15: 1242-1254
- Frazer GW, Ganham CD, Lertzman KP 1999. Gap light analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, Simon Fraser University, British Columbia, and the Institute of ecosystem studies, Millbrook, New York.
- 石井孝(2007)衛星データを用いた森林の葉面積指数推定および炭素固定量の算定と水収支解析への応用. 早稲田大学博士論文.
- Jones HG, Vaughan RA 2010. Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications. Oxford University Press, Oxford.
- Kosugi Y, Takanashi S, Ueyama M, Ohkubo S, Tanaka H, Matsumoto K, Yoshifuji N, Ataka M, Sakabe A (2013) Determination of the gas exchange phenology in an evergreen coniferous forests from 7 years of eddy covariance flux data using an extended big-leaf analysis. *Ecol Res* 28: 373-385
- Kumagai T, Ichie T, Yoshimura M, Yamashita M, Kenzo T, Saitoh TM, Ohashi M, Suzuki M, Koike T, Komatsu H (2006) Modeling CO₂ exchange over a Bornean tropical rain forest using measured vertical horizontal variations in leaf-level physiological parameters and leaf area densities. *J Geophys Res* 111: D10107
- Law BE, Van Tuyl SV, Cescatti A, Baldocchi DD (2001) Estimation of leaf area index in open-canopy ponderosa pine forests at different successional stages and management regimes in Oregon. *Agric Forest Meteorol* 108: 1-14
- Law BE, Turner D, Campbell J, Sun OJ, Van Tuyl S, Ritts WD, Cohen WB (2004) Disturbance and climate effects on carbon stocks and fluxes across Western Oregon USA. *Global Change Biol* 10: 1429-1444
- 松山洋・藤原靖・島村雄一・泉岳樹・中山大地 (2003) 全天空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* 112: 411-415
- 村上茂樹 (2002) スギ・ヒノキ人工林におけるLAIと蒸発散の林齢依存性およびその水源林管理への応用の可能性. *水文・水資源学会誌* 15: 461-471
- Scanlon TM, Kustas WP (2010) Partitioning carbon dioxide and water vapor fluxes using correlation analysis.

Agric Forest Meteorol 150: 89-99

只木良也(1976)森林の現存量 - とくにわが国の森林の葉量
について - . 日林誌 58: 416-423

宇都木玄・荒木眞岳・川崎達郎・石塚森吉 (2001) ヒノキ
人工林における葉面積指数の季節変化の推定. 日林誌
83: 359-362

van Gardingen PR, Jackson GE, Hernandez-Daumas S,
Russell G, Sharp (1999) Leaf area index estimates
obtained for clumped canopies using hemispherical
photography Agric Forest Meteorol 94: 243-257

Welles JM, Norman JM (1991) Instrument for indirect
measurement of canopy architecture. Agronomy
Journal 83: 818-825

(2013年10月15日受付 : 2014年1月27日受理)