

感光フィルムによるスギ人工林内の相対光量子束密度の推定

國崎貴嗣*・菅原真司*

Estimating relative photon flux density within a Sugi (*Cryptomeria japonica*) stand by using light-sensitive films.

Takashi KUNISAKI and Shinji SUGAWARA

1. はじめに

樹木の更新動態を研究するにあたり、林内光量を正確に推定することは重要である。その中でも、林床植生の分布に関する光環境傾度分析では、統計解析を使用するために、林内光量を数十点以上の多地点で推定する必要がある。

林内光量、または林内光量指標値の推定では光量センサーや全天空写真を利用するのが一般的である（村岡，2003）。光量センサーでは任意の地上高において瞬間値、積算値を問わず精密に測定できる。しかし、センサーやデータロガーが高価であるため、移動しながらの瞬間値測定を除けば、多地点における同時測定で使用するのは容易でない。一方、全天空写真については魚眼レンズつきカメラが1台あれば撮影できるため、多地点の光量指標値を安価に推定できる。しかし、写真に太陽が写る晴天時やレンズに雨滴が付く雨天時には全天空写真にノイズが生じる。また、地表面や繁茂した林床植生内では、撮影者の身体が邪魔になるため、適切な光量指標値推定が困難である。このため、林床植生の分布に関する光環境傾度分析では、気象条件、地上高、林床植生の繁茂状態に左右されず、安価に多地点推定可能な媒体が望まれる。

最近、アゾ色素を含浸させて着色したセルロース・アセテートによる感光フィルム（OptLeaf R-2D，大成イーアンドエル）が発売された。この感光フィルム（以下、OptLeafとする）で推定した光量指標値については、積算光量子束密度（福島，1998；IBARAKI and

Received December 28, 2006

Accepted February 13, 2007

*岩手大学農学部農林環境科学科森林科学講座

NOZAKI, 2005), 積算日射量(秋山ら, 1999)との間に強い相関が認められることが報告されている。また, OptLeafはスライドマウントに挟み込める程度の小型であるため, 任意の地上高に設置できる上, 1枚100円前後と安価で使用できる。さらに, 大成イーアンドエル社によれば, 雨天時でも使用でき, 気温の違いに応じた検量線が春・秋用, 夏用, 冬用と3種類準備されているため, 季節に関係なく使用できるとされている。このように, OptLeafは林床植生の分布に関する光環境傾度分析で有効な媒体と期待されるが, その一方で, 同社によれば, 暗い林内や気温の低い冬季ではOptLeafの退色が進みにくいとの指摘が寄せられていると言う。しかし, 林内において季節を変えて測定した事例報告(秋山ら, 1999)が極めて少ないため, 気温・日照条件に応じた適切なOptLeafの設置方法は未だ明らかではない。

今回, 落葉広葉樹の混交したスギ人工林内において, 8月と11月に光量センサー, 全天空写真, OptLeaf(R-2D)を使用して光量または光量指標値を推定する機会を得た。本研究では, 光量センサーによる相対光量と全天空写真による天空率, および光量センサーによる相対光量とOptLeafによる相対光量との相関関係を比較し, OptLeafの光量推定値の安定性に及ぼす気温・日照条件の影響について若干の考察を試みた。

II. 調査地と方法

1. 調査地

調査地は, 岩手県雫石盆地から奥羽山脈への移行帯(39°40'N, 140°55'E)に位置する岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センター御明神演習林内の42年生スギ人工林である(図-1, 表-1)。調査地の標高は400~450mであり, 平均傾斜30度である。調査地から約3km離れた地点(標高230m)における気象観測資料(1990~2002年)によれば, 年平均気温9.2℃, 暖かさの指数74.1, 年平均降水量1,706mmである。

スギ人工林には, 亜高木層から林冠層にかけて, ミズナラ, ホオノキ, クリ, ミズキ, ハクウンボクなどの落葉広葉樹が多数繁茂しており(KUNISAKI and KUNISAKI, 2004), 着葉期と落葉期で林内(地上高1.5m)の光環境が異なる林分である(國崎, 2002)。

2. 調査方法

1) 竹杭の設置

2006年7月, 調査地斜面の上部・中部・下部に, 地上高1.3mの竹杭を6m間隔で16本ずつ計48本設置した(図-1)。また, スギ林の斜面下部から600~700m離れた疎開地(天空率70%)にも地上高1.3mの竹杭1本を設置した。

2) 8月の光量測定

著者らが保有する光量子センサーは, 疎開地設置分を含めて11個と少ない。それゆえ, 光量測定地点を選択するため, まず2006年8月2日の晴天下において, 林内の竹杭48本すべての先

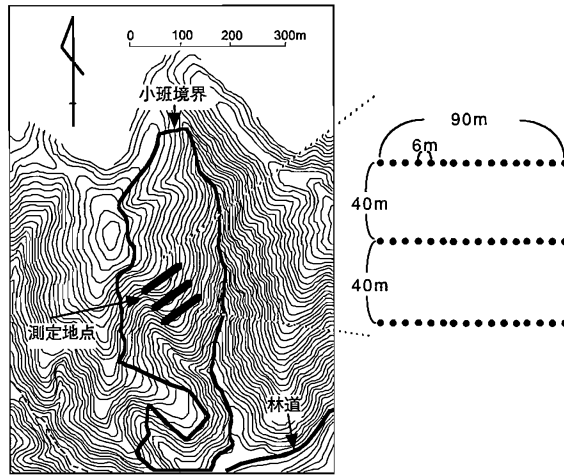


図-1. 調査地の位置と地形.

枠内の極細線は等高線を示す。また、枠外の黒丸は竹杭の設置間隔を示す。

表-1. 2005年における調査地の概要

	本数密度 (本・ha ⁻¹)	胸高断面積合計 (m ² ・ha ⁻¹)	平均胸高直径 (cm)	上層木平均樹高 (m)
スギ	2468	46.28	14.0	16.7
広葉樹*	1486	9.16	7.7	-
合計	3954	55.44	-	-

*胸高直径3cm以上

端で全天空写真を撮影した。具体的には、フィッシュアイコンバーター (FC-F8, Nikon) 付きのデジタルカメラ (COOLPIX950, Nikon) を伸縮式ポールに固定し、地上高1.4mの位置でレンズを鉛直上向きにして撮影した。INOUE *et al.* (2002) を参考に、露出をプログラムオート、画質をBASICモード、画像サイズをVGAサイズに設定した。また、撮影枚数は竹杭当たり1枚である。撮影した全天空写真画像をコンピュータに転送し、フリーウェアの画像解析ソフトLIA for Win32 ver.0.373 (山本, 1998) を用いて天空率 (INOUE *et al.*, 2002) を算出した。天空率 (%) はweighted opennessと呼ばれる林冠疎開度の指標の1つである (INOUE *et al.*, 2004)。推定した天空率から、各斜面位置で最大、最小値を含むように10本ずつ、計30本の竹杭を選択した。

次に、2006年8月8日11時から8月14日11時の7日間、選択した竹杭30本の先端にスライドマウントに挟んだOptLeafを1枚ずつ設置した。疎開地の竹杭の先端にも、同期間にOptLeaf1枚を設置した。OptLeafに基づく光量指標値 (積算光量子量) については、簡易分光光度計 (T-METER THS-470, 大成イーアンドエル) を用いて、設置前と回収後にOptLeafの退色度

を計測し、取扱説明書に従って推定した。退色度から積算光量子量に換算する検量線については、夏用のものを用いた。

光量子センサー (IKS-27, 小糸工業) を、斜面上部では8月15日11時から17日11時まで、斜面中部では8月11日11時から13日11時まで、斜面下部では8月8日11時から10日11時まで設置し、光量子束密度 (以下、PFDとする) を1分間隔で2日間連続測定した。なお、光量子センサーについては、OptLeafを装着した竹杭から20cm程度離れた地点に別の竹杭を設置し、その先端に光量子センサーを装着した。

さらに、2006年8月17日の曇天日に、選択した竹杭30本の先端で全天空写真を撮影した。デジタルカメラについては8月2日の設定に加え、露出補正値を-2.0 (8月2日では0) にして撮影した。画像解析方法は8月2日と同じである。

以上のようにデータ数が $n=30$ になるように計画したが、斜面中部の測定期間中に、同一地点における光量子センサー1個とOptLeaf1個がツキノワグマにより破壊された。そのため、斜面の中部・上部で測定地点が9地点ずつとなり、データ数は $n=28$ となった。

3) 11月の光量測定

基本的に8月の光量測定と同じ手順で実施した。以下、各項目について8月と異なる点を補足する。

光量子センサーが2006年10月時点で12個になったため、10月27日の曇天下において、竹杭48本すべての先端で全天空写真 (露出補正値-2.0) を撮影し、天空率を推定した。天空率の値に基づき、各斜面位置で11本ずつ、計33本の竹杭を選択した。

OptLeafについては、2006年11月7日11時から11月13日11時の7日間、選択した竹杭33本の先端に設置した。なお、フィルムの退色度から積算光量子量に換算する検量線については、冬用のものを用いた。

光量子センサーについては、斜面上部では2006年11月7日11時から9日11時まで、斜面中部では11月11日11時から13日11時まで、斜面下部では11月14日11時から16日11時まで設置した。

全天空写真については、2006年11月16日の曇天下において撮影した。

以上のようにデータ数が $n=33$ になるように計画したが、11月10日に、センサー1個が再びツキノワグマにより破壊されたため、中部・下部で10地点ずつとなった。そのため、データ数は $n=31$ となった。

4) 12月の光量測定

冬季におけるOptLeafでの光量推定値の安定性を調べるため、11月より気温の低い12月に補足的な測定をおこなった。2006年12月5日6時 (日の出前) から12月16日18時 (日の入り後) までの12日間、盛岡市内の住宅において、日当たりの良いベランダ2ヶ所と日当たりの悪い車庫1ヶ所に光量子センサーを1個ずつ設置し、1分間隔でPFD ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) を測定した。そして、各光量子センサーの隣接部 (およそ30cm四方) にスライドマウント付きのOptLeafを

10枚ずつ設置した。OptLeafを毎日、日没後に回収し、光量推定に必要な吸光度を測定した後、再び同じ場所に配置した。各光子センサーによるPFDFについても、夜間にデータロガーから回収し、各測定日の日没までの積算値を集計した。

3. 解析方法

1) 林内光量に関する相関分析

林内光量に関する解析では、任意の地点の光量を疎開地の光量で除した値の百分率を相対光量とした。そして、OptLeafによる1週間の積算値に基づく相対光量をRLI (%)、光子センサーによる2日間の積算値に基づく相対光量をrPFDF (%) と呼び、全天空写真に基づく天空率WO (%) と比較した。具体的には、8月 (n=28)、11月 (n=31)、および8月と11月を合わせたデータ (n=59) について、RLIとrPFDFとの相関、およびWOとrPFDFの相関関係をSpearmanの順位相関係数を用いて分析した。

2) 12月における相対光量の時間変動

住宅で12月に測定した光量については、最も積算PFDFの高い地点 (ベランダ2) の光量に対する他の地点 (ベランダ1, 車庫) の光量の百分率を相対光量とした。そして、任意の日の日没までの積算PFDFをIPFD ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$), IPFDに基づく相対光量をrIPFD (%), OptLeafによる任意の日の日没までの積算光量をILI ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$), ILIに基づく相対光量をRILI (%) と呼ぶ。解析では、地点別にIPFDとILIとの関係を調べた。また、ベランダ2におけるIPFDとrIPFD, RILIとの関係をベランダ1と車庫で比較した。

III. 結果と考察

8月データ、11月データ、8月と11月を合わせたデータセットいずれにおいても、RLIとrPFDF, WOとrPFDFとの間には有意な正の相関が認められた (表-2)。8月データで相関係数が最も高かったのは、RLIとrPFDFとの関係であった。 $r_s=0.89$ と相関が強いことから (表-2, 図-2), OptLeafに基づく8月のRLIは光量指標値として極めて有効であると考えられる。一方、11月データで相関係数が最も高かったのは、WOとrPFDFとの関係であった (表-2)。WOとrPFDFとの関係に比べ、任意のRLI (横軸の値) に対するrPFDFのレンジは大きかった

表-2. rPFDFとの間のSpearmanの順位相関係数

	8月 (n=28)	11月 (n=31)	8月+11月 (n=59)
RLI	0.89**	0.63**	0.86**
WO	0.58*	0.78**	0.88**

rPFDF, 光子センサーのデータに基づく相対光量; RLI, OptLeafのデータに基づく相対光量; WO, 全天空写真から推定した天空率.

* $p < 0.01$; ** $p < 0.001$.

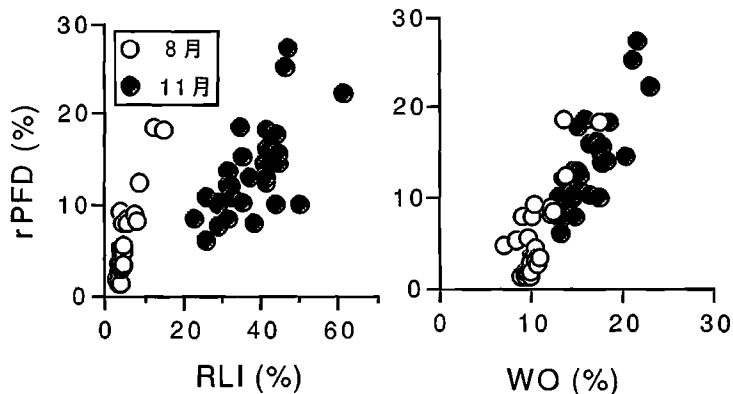


図-2. 8月と11月におけるrPFDとRLI, WOとの関係.

rPFDは光量子センサーのデータに基づく相対光量を, RLIはOptLeafのデータに基づく相対光量を, WOは全天空写真から推定した天空率を示す。

(図-2)。また, 8月と11月を合わせたデータでは, RLIとrPFD, およびWOとrPFDとの相関係数はそれぞれ0.86, 0.88とほぼ同じであるものの(表-2), RLIとrPFDとの関係は8月と11月のデータで明らかに分離していた(図-2)。これらのことから, OptLeafに基づく11月のRLIは, 光量指標値として, WOよりも有効であるとは言いがたい。

寒冷な気温条件がOptLeafの退色に影響する可能性が考えられたため, 12月に測定したIPFDとILIとの関係を調べた(図-3)。その結果, 日当たりの良いベランダ, 日当たりの悪

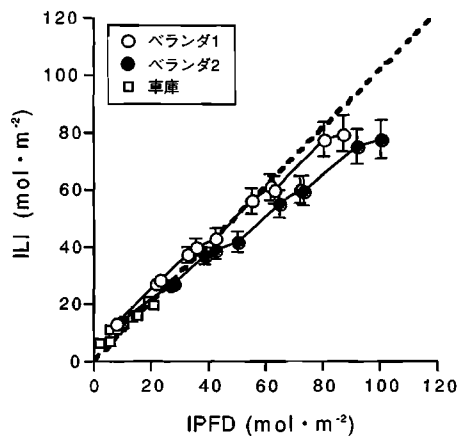


図-3. 12月におけるIPFDとILIとの関係.

IPFDは光量子センサーで測定した任意の日没までの積算光量子束密度を, ILIはOptLeafで推定した任意の日没までの積算光量子束密度を示す。丸と四角は平均を, エラーバーは標準誤差を示す。また, 太い破線は1:1の線を表す。

表-3. 光量測定期間における気象観測値の平均±標準偏差

	8月8～17日	11月7～16日	12月5～16日
気象観測地点*	雫石	雫石	盛岡
観測日数(日)	10	10	12
日平均気温(°C)	25.1±0.8	7.5±2.5	1.5±1.6
1mm以上の降水量のあった日数(日)	3	9	4
日照時間(時間)	4.6±3.3	1.8±2.3	3.1±2.5

*OptLeafを設置した地点から最も近い気象庁の気象台, 測候所

い車庫に関係なく、極めて強い正の相関関係が認められた ($r_s = 0.989 \sim 0.991$, $p < 0.005$)。12月の測定期間の日平均気温(平均±標準偏差)は $1.5 \pm 1.6^\circ\text{C}$ であり、11月の測定期間の $7.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$ よりも平均で 6°C も低かった(表-3)。これらのことから、気温の低さは、単独で、OptLeafによる光量推定値の安定性を悪くする要因ではないと考えられる。

12月におけるrIPFDとRILIの時間的推移を比較したところ(図-4)、日当たりの良いベランダではrIPFD、RILIともにはほぼ安定した値が得られた。日当たりの悪い車庫でもrIPFDは安定していた。しかし、車庫でのRILIは、最も日当たりの良いベランダ2のIPFDが $40 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ までは、大きく変動した。このことから、疎開地の積算PFFDがあまり高くない段階では、OptLeafによる林内光量推定値の安定性は良くないと推察される。

OptLeafを設置した8月8日～17日では平均日照時間 4.6 ± 3.3 時間、1mm以上の日降水量があった日数は設置期間9日のうち3日であった(表-3)。一方、11月7日～16日では平均日照時

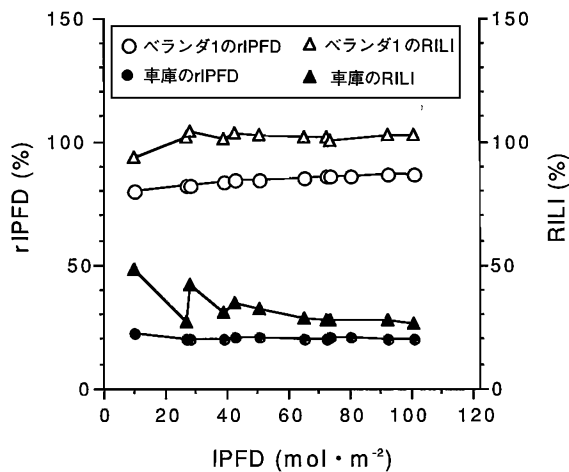


図-4. 12月におけるベランダ2のIPFDとrIPFD, RILIとの関係。

IPFDは光量子センサーで測定した任意の日の日没までの積算光量子束密度を、rIPFDはIPFDに基づく相対光量を、RILIはILI (OptLeafで推定した任意の日の日没までの積算光量子束密度)に基づく相対光量を示す。

間 1.8 ± 2.3 時間、1mm以上の日降水量があった日数は設置期間10日のうち9日であった。このように、11月の設置期間では雨もしくは曇りの状態が極めて長く、日照時間が短かった。こうした日照条件を反映し、8月の疎開地におけるOptLeafでの推定積算光量は、 $201.9 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ であったに対し、11月には $30.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ と顕著に低くなったと考えられる。

以上のことから、11月であっても、十分な日照時間を確保できる場合には、OptLeafに基づくRLIは光量指標値として有効になると推察される。

本研究ではOptLeaf (O-2D) の最適な設置方法を明らかにすることはできなかった。ただ、積算PPFDが $5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下の場合、OptLeaf推定値の安定性は悪い(福島, 1998)。また、一般に林冠閉鎖した森林内の林床の相対光量は5%かそれ以下となる(加藤・小見山, 1999; 石田, 2000; 國崎, 2004)。これらのことから、林内の積算PPFDを $5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上確保できるように、少なくとも疎開地のOptLeafについては現地で積算光量を推定し、 $100 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ を超えるまで、設置し続けるのが望ましい。

本研究を遂行するにあたり、岩手大学農学部青井俊樹教授には、光量子センサーの購入に際し多大なるご協力をいただいた。岩手大学森林動態制御研究室の皆さんには調査を手伝っていただいた。ここに記して深甚なる謝意を表す。本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号16780109, 17380086)を使用して行われた。

引用文献

- 秋山侃・酒井徹・富久尾歩・賈書剛・篠田成郎(1999) フィルム式簡易積算日射計による林内光環境の計測. 日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集: 23-26.
- 福島成樹(1998) 簡易積算日射計フィルムを用いた林内光環境の推定法—フィルムの退色と光量子量の関係—. 日林論 109: 289-290.
- IBARAKI, Y. and NOZAKI, Y. (2005) Estimation of light intensity distribution in a culture vessel. *Plant Cell, Tiss. Org. Cult.* 80 :111-113.
- INOUE, A., YAMAMOTO, K., MIZOUE, N. and KAWAHARA, Y. (2002) Estimation of relative illuminance using digital hemispherical photography. *J. For. Plann.* 8: 67-70.
- INOUE, A., YAMAMOTO, K., MIZOUE, N. and KAWAHARA, Y. (2004) Calibrating view angle and lens distortion of the Nikon fish-eye converter FC-E8. *J. For. Res.* 9 : 177-181.
- 石田仁(2000) 光環境が温帯林主要樹種の更新樹の分布と伸長成長に及ぼす影響. 富山県林技セ研報 13: 1-96.
- 加藤正吾・小見山章(1999) プナ林の上層木がもたらす散光環境と下層木の分布. 日生態誌 49: 1-10.

- 國崎貴嗣 (2002) 落葉広葉樹の混交した針葉樹人工林における林内光量子束密度の推定. 岩大演報 33 : 1-10.
- 國崎貴嗣 (2004) 岩手県鶯宿地方のアカマツ人工林における亜高木層の落葉広葉樹の密度の違いが林床のクマイザサ, 稚樹の密度に及ぼす影響. 日林誌 86 : 258-264.
- KUNISAKI, T. and KUNISAKI, K. (2004) Stratification process for a mixed species stand of *Cryptomeria japonica* and deciduous broad-leaves in northern Japan. Bull. Iwate Univ. For. 35 : 1-13.
- 村岡裕由 (2003) 植物にとっての光環境の評価. (種生物学会編 「光と水と植物のかたち」 319pp), 215-228, 文一総合出版, 東京.
- 山本一清 (1998) LIA for Win32 (LIA32) ver.0.373ユーザーマニュアル. 9pp.

要 旨

光量センサーによる相対光量 (rPPFD) と感光フィルムによる相対光量 (RLI) との相関関係を比較し, RLI推定値の安定性に及ぼす気温・日照条件の影響について検討した。8月データでは, RLIとrPPFDとの間に強い相関関係が認められた。しかし, 11月データでは弱い相関であった。疎開地の積算光量が $40 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下とあまり高くない段階では, RLI推定値の安定性は良くないと推察される。

Summary

We examined the correlations between within-stand light indices (rPPFD measured by light sensor and RLI measured by light-sensitive film) in a closed and stratified plantation of *Cryptomeria japonica* and deciduous hardwood species located in northern Japan. For data obtained in August, there was a strongly positive correlation between the RLI and the rPPFD. In contrast, there was a weakly positive correlation between the RLI and the rPPFD in November. There were few fair days during the measurement period in November. Additional measurements revealed that the RLI varied according to the cloudy condition of integrated PFD $\leq 40 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$. In conclusion, the RLI cannot be accurately estimated if the measurements are conducted during cloudy periods such that integrated PFD $\leq 40 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$.