

ラオスにおける簡易積算日照計を用いた光環境測定

Measurement of integrated light intensity by using simple recording film in Lao PDR

米田令仁^{*1}・木村健一郎^{*1}・Singkone XAYALATH^{*2}Reiji YONEDA^{*1}, Kenichiro KIMURA^{*1} and Singkone XAYALATH^{*2}

* 1 (研) 国際農林水産業研究センター

Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 1-1 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8686 Japan

* 2 ラオス森林科学研究センター

Forest Science Research Center, P.O. Box: 7174, Nongviengkham, Xaithany, Vientiane Capital, Lao PDR.

要旨: 熱帯季節林をもつラオスにおいて、フィルム式簡易積算照度計(オプトリーフ)について積算光合成有効放射量(PAR)とフィルムの色素の退色率の関係に関して調べた。PARの測定から、熱帯地域とされるラオスにおいても日長や最大PARの値が1年で変動し、気温の測定から平均気温も1年で変動していた。測定にもちいた赤フィルム(短期測定用)は、積算PARとの間に高い相関関係が確認された。6月、7月の測定では同じ積算PARでも日本国内で報告されている夏の調査結果よりも早く退色した。一方、12月に行った調査では積算PARに対して退色率は低く、日本の春や秋に行われた研究例に近い退色率であった。オプトリーフの退色率は気温に影響を受けると言われていることから、12月の調査の際は日中の最高気温が低かったためと考えられた。また、平均気温データを用いた検量線を作成した結果、積算PARで100mol m⁻²以下であれば高い精度で推定できると考えられた。今回の結果から、ラオス国内においてもオプトリーフを使用した光環境測定をおこなうことが可能であると考えられた。

キーワード: オプトリーフ, 積算照度, 平均気温

Abstract: Integrated light intensity was estimated by using simple recording film (Opto-Leaf System, Taisei E L, Japan) in tropical monsoon region, Lao PDR. Red film (R-3D; short term measurement) was selected and exposed under open site. Discoloring rate of the film, photosynthetic active radiation (PAR), temperature were measured. From measurement of PAR, the maximum PAR changed through a year. Mean temperature during the measurement period showed the highest in June and lowest in February. Discoloring rate of red film significantly related with integrated PAR and correlation coefficient (R^2) also showed high value (0.99). Present study showed that the red film in June and July in Laos discolored faster than conducted during summer in Japan. Discoloring rate of red film showed faster in June and July than that in December and February. It might be caused by temperature. From the relationship among the data set, we could develop the equation to estimate integrated PAR from mean temperature and discoloring rate when the integrated PAR is lower than 100mol m⁻². Present results indicated that light intensity might be estimated by simple recording film methods in Lao PDR.

Keywords: Opto-Leaf System, Integrated light intensity, mean temperature

I はじめに

林内の光環境は林分構造で大きく異なるだけでなく、時間的にも大きく変動する。こうした異なる光環境は林内に生育する植物の生存や成長に大きく影響を与える。そのため、林内にエンリッチメント植栽をおこなった結果、光環境の違いによって植栽苗の成長や生存が異なることが報告されている(4)。そのため、エンリッチメント植栽をおこなう際には林内の光環境を把握することが重要となる。

林内の光環境を測定する方法はいろいろあるが、一般的には光量子センサーとロガーを組み合わせ、林内に設置し測定

期間の日射量を測定する方法が用いられることが多い。この方法は測定点への日射量を測定できるだけでなく、木漏れ日の日射量や時間が明確に把握することができる。しかし、測定機器が高額であることから、多点で測定をおこなうことが難しい。魚眼レンズを用いて全天空写真を撮影することで求められる林冠の開空度を林内の光環境の指標にする研究例も多いが、この方法は日射量まで把握することが難しい。

そのため、林内への日射量を推定する方法が開発されてきた。光分解性のジアゾ化合物の特性を利用した日射量を推定する方法がFriend(3)によっておこなわれ、その後ジアゾ感光

紙による光環境測定がおこなわれてきた(2)。この方法は比較的安価で多点を測定することが可能になる方法であった。しかし、感光紙が雨に弱く、雨天での測定ができないという欠点があった。

現在では、この原理を利用しジアゾ色素を防水性のセルロース・アセテートに含浸させたフィルムが市販化されている。大成イーアンドエル社が開発したオプトリーフは日本国内での測定により、フィルムに含浸させた色素の分解と光合成有効放射量(Photosynthetic Active Radiation; PAR)の間に高い相関があることが確認され、圃場での測定だけでなく林内の光環境の計測に使われている(1, 6)。

日本国内での測定例は多くあるが、日本国外での測定例は田中ら(2010)のマレーシアでの研究例があるのみで報告例がない(5)。本研究では研究事例のないラオスにおいて、オプトリーフ・フィルムの退色率と積算 PAR の関係を明らかにし、フィルムの退色率から積算 PAR を推定する式を提示する。

II 方法

1. 調査地 本研究はラオス、首都ビエンチャンの郊外にあるラオス森林研究センター(Forest Science Research Center; FSRC)の敷地内(N 18° 16', E 102° 27')でおこなった。ビエンチャン周辺の平均気温は約 26 度で、気温差は大きく、4月の最高気温が約 35 度であるのに対し、12月の最低気温は約 16 度になり、熱帯地域でありながら温度差が見られる。また、平均年降水量は約 1600mm で、タイと同様に5月から10月にかけて雨期、11月から4月にかけて乾期がある。

2. 調査項目 実験には市販されているオプトリーフシステム(大成イーアンドエル社)の赤色フィルム(R-3D)を用いた。赤色フィルムは「短期測定用」とされ、測定期間の目安は3~7日間とされている。フィルムの最大吸光波長は赤フィルムで 521nm とされている。大成イーアンドエル社は赤色フィルムの他にオレンジ色フィルム(速反応タイプ)、黄色フィルム(長期測定用)があるが、本研究では赤色フィルムを用いた。オレンジ色フィルムは光に対する退色が早く、マレーシアでおこなわれた実験では裸地に設置した場合1日で完全に退色する場合があり、黄色フィルムは林内に設置した場合最長で8週間の露光が必要とされていることから(5)、本研究では赤色フィルムのみを使用した。フィルムを遮蔽のない全天環境下において、水平に設置したベニア台の上のせ固定し、ベニア台の中心に光合成有効放射センサー(日本環境計測社製 MIJ-14PAR)を設置し、5分ごとに光合成有効放射量(PAR)を記録した。オプトリーフのフィルムの退色は気温に影響されると報告されていることから、温湿度計(Onset 社 HOBO Pro v 2)を設置し、30分ごとに気温を記録した。

野外に設置する前に室内においてフィルムの露光前の透過率(D₀)を測定し、露光後透過率(D)を野外で測定した。測定にはオプトリーフ測定器(D-Meter, RYO-470)を使用した。オプトリーフの測定は設置後、朝 10 時頃、正午、15 時頃におこなった。測定は日長が長い6月、日長が短い 12 月、雨期で降水量の多い7月、乾期で降雨のない2月を選んだ。実験は2013年6月、12月、2014年7月、2015年2月に実施した。

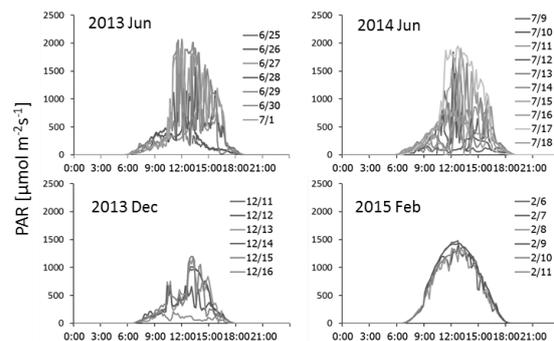


図-1 測定期間中の光合成有効放射量の日変化

Fig.1 Daily change of photosynthetic active radiation (PAR)

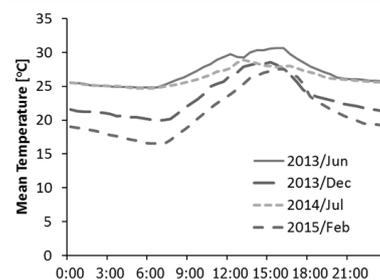


図-2 測定期間中の平均気温の日変化

Fig.2 Daily change of mean temperature

III 結果と考察

1. 光合成有効放射量(PAR)と気温の日変化 図-1に測定をおこなった2013年6月、12月、2014年7月、2015年2月のPARの日変化を示す。6月、7月は最大PARの値が2000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達し、日積算PARは6月で10.7~30.4 mol m^{-2} 、7月で5.5~33.1 mol m^{-2} であった。最大PARは高い値を示したものの、雨期である6月、7月では雲が多く快晴の日はなく、雨の日では日積算PARは10 mol m^{-2} を下回り低い値を示した。12月の最大PARの値は約1200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ を示し、日積算PARは3.3~14.9 mol m^{-2} であった。乾期が始まった12月ではまだ雲が多く、一日を通して快晴の日が見られず、直射光が達しても今回測定した中で一番低い最大PAR値を示した。2月の最大PARの値は1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達し、日積算PARは27.4~31.2 mol m^{-2} であった。ラオスでは2~4月は乾期で降

雨が見られない月であり、測定時に快晴であったことから、低い最大 PAR でも日積算 PAR は雨期に近い値を示した。日射が確認された時間は測定期間で異なり、PAR の値が1 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上の値を示したのは6月の測定では 5:25~19:15、7月の測定では 5:40~19:10、12月の測定では 6:30~17:50、2月の測定では 6:30~18:30 であった。このように、熱帯地域とは言え、ラオスでは年間に昼間の長さは変化し、最大 PAR も変動することが明らかになった。

図-2に測定をおこなった2013年6月、12月、2014年7月、2015年2月の平均気温の日変化を示す。2013年6月の平均気温が 27.0°C、最低気温が約 24.2°Cで、最高気温は約 31.5°Cを示し、1日の温度差は少なかった。2014年7月は平均気温が 26.3°C、最低気温が約 24.6°Cで、最高気温は約 29.8°Cを示し、2013年6月の測定結果と同様に1日の温度差は少なかった。2013年12月の平均気温が 23.2°C、最低気温が約 19.9°Cで、最高気温は約 28.8°Cを示し、2015年2月の平均気温が 21.0°C、最高気温が 26.7°C、最低気温が 17.0°Cを示し一日の温度差が約 10°Cあった。

表-1 赤色フィルムの各測定時の積算 PAR と退色率の回帰係数

Table 1 Coefficients of the regressions between integrated PAR and discoloring rate of red film. $a = ax^2 + bx + c$ a : discoloring rate ($\log_{10}(D/D_0 \times 100)$), x : integrated PAR

measurement	a	b	c	R^2
2013. Jun.	-0.00001	-0.0035	1.9989	0.9961
2013. Dec.	0.000004	-0.0029	1.9973	0.9914
2014. Jul.	-0.00002	-0.0003	1.9978	0.9932
2015. Feb.	-0.000007	-0.0025	1.9977	0.9954

2. フィルムの退色率と積算 PAR の関係 赤色フィルムは積算 PAR の増加と共に退色した。赤色フィルムは測定前の D-Meter の値 D_0 は約 2.0 を示し D 値が 0.54 を示すまで測定することができたが、0.54 以下の数値を検出することができなかった。退色が早かった7月では D 値が 0.54 を示した際の積算 PAR は 114 mol m^{-2} であった。今回の測定で1日の積算 PAR が約 33 mol m^{-2} であったことから、全天で測定をするのであれば3日以内にフィルムを回収する必要があると考えられる。また曇りの場合、もしくは積算 PAR が数 mol m^{-2} しかない林内に設置する場合は約1週間露光する必要があると考えられた。

フィルムの退色率と積算 PAR の関係を図-3に示す。オプティーフのマニュアルによると、赤色フィルムの退色率を調べる際には露光前後の値 (D/D_0) ではなく、対数を用いた $\log_{10}(D/D_0 \times 100)$ で求めるとされている。各測定期間におけるフィルムの退色率は積算 PAR との間に高い相関関係が見ら

れた。赤色フィルムの退色率と積算 PAR の関係は二次関数で近似でき、いずれの月も相関係数は 0.99 以上の高い値を示した(表-1, 図-3)。販売元である大成イーアンドエル社が提示している検量線は一次関数を用いているのに対して、田中からは二次関数による近似式のほうが高い相関関係があることを報告している(5)。本研究でも二次関数で示した近似式のほうが高い相関関係が見られたが、一次関数で得られる近似式の相関係数は 0.9801 から 0.9934 を示し高い相関関係が確認された。

今回使用した赤色フィルムでは積算 PAR に対して退色する速さがそれぞれ異なった(表-1, 図-3)。今回ラオスで実施した測定の結果、12月、2月の測定で得られた検量線は大成イーアンドエル社が提示している日本の春・秋の推定式と夏の推定式の間を傾きを示した(図-3)。また、ラオスで6月7月に実施した測定で得られた検量線では日本の夏の測定で得られている検量線のよりも早く退色した。感光性フィルムは気温が高いと早く退色するとされていることから、平均気温の変化が退色の早さに影響していると考えられた。

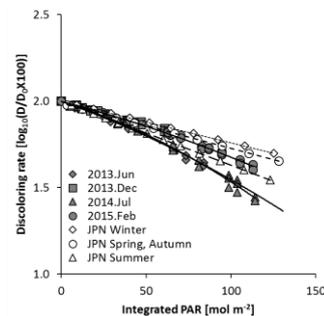


図-3 積算 PAR とフィルム退色率の関係. 本研究および日本国内の検量線を示す

Fig.3 Relationship between integrated PAR and discoloring rate of the red film in present results and in Japan

3. 検量線の作成 フィルムの退色反応は化学反応であることから、温度に依存すると言われている(1)。そのため、秋山らは気温を考慮に入れた式(1)~(3)に示される検量線を開発した(1)。

$$a = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

$$a = a_1T^2 + a_2T + a_3 \quad (2)$$

$$b = b_1T^2 + b_2T + b_3 \quad (3)$$

a : 退色率 ($\log_{10}(D/D_0 \times 100)$), x : 積算 PAR, T : 平均気温, a_i , b_i ($i = 1, 2, 3$) および c : 回帰係数

測定によって得られる a , b , c と平均気温 T から秋山らの式

(2)と(3)を用いて、 a_i ($i=1\sim3$), b_i ($i=1\sim3$)を求めた。求められた a_i , b_i の結果を表-2に示す。

表-2 フィルム退色率と積算 PAR に関するキャリブレーション・パラメーター

Table 2 Calibration parameter for relationship between discoloring rate and integrated PAR.

$$a = a_1T^2 + a_2T + a_3, b = b_1T^2 + b_2T + b_3 \quad T: \text{mean temperature}$$

Film	a_1	a_2	a_3	R^2
Red (R-3D)	-2.0×10^{-7}	8.0×10^{-6}	8.0×10^{-5}	0.39

Film	b_1	b_2	b_3	R^2
Red (R-3D)	-5.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	-2.6×10^{-3}	0.83

観測期間の平均気温に対応する検量線を用いることにより、フィルムの退色率および積算 PAR を求めることが可能になる。今回の測定から得られた a_i ($i=1\sim3$), b_i ($i=1\sim3$)の値を式(1)に入れることで、平均気温 21 から 27°C までの検量線の係数を求め、検量線も示すことができた(表-3, 図-4)。

表-3 式(2)および(3)から求めた式(1)の係数

Table.3 Estimated coefficients of regression of equation 1 from equations 2 and 3

Mean T (°C)	a	b	c	Mean T (°C)	a	b	c
21	-2.0×10^{-7}	-2.7×10^{-3}	2	28	-1.3×10^{-5}	-3.7×10^{-3}	2
22	-8.0×10^{-7}	-2.8×10^{-3}	2	29	-1.6×10^{-5}	-3.9×10^{-3}	2
23	-1.8×10^{-6}	-2.9×10^{-3}	2	30	-2.0×10^{-5}	-4.1×10^{-3}	2
24	-3.2×10^{-6}	-3.1×10^{-3}	2	31	-2.4×10^{-5}	-4.3×10^{-3}	2
25	-5.0×10^{-6}	-3.2×10^{-3}	2	32	-2.9×10^{-5}	-4.5×10^{-3}	2
26	-7.2×10^{-6}	-3.4×10^{-3}	2	33	-3.4×10^{-5}	-4.7×10^{-3}	2
27	-9.8×10^{-6}	-3.5×10^{-3}	2	34	-3.9×10^{-5}	-5.0×10^{-3}	2

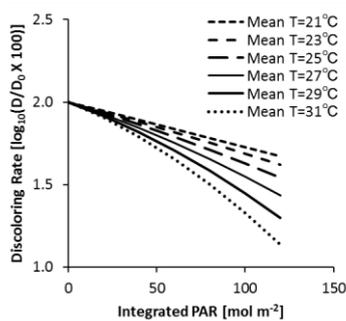


図-4 オプトリーフ赤色フィルムによる気温別の推定積算 PAR の検量線

Fig.4 Calibration curves to estimated integrated PAR from discoloring rate of the red film under different temperature

今回、得られた式で推定した積算 PAR は 100 mol m²を超えると実測値よりも高い値を示し、実測値よりも 20%高い値を示したものもあった。そのため、今回の推定式では積算 PAR

が 100 mol m²を超えるものを推定する場合は過剰な PAR 値を示す可能性が高い。今回の結果では、積算 PAR が 100 mol m²を超えた際のフィルム退色率は 1.5 以下を示したが、これは赤色フィルムの D 値が 0.7 以下になった時であった。この時にはほぼ色素が消え D 値のばらつきが大きくなり、0.54 以下の測定値が得られなかった。このため、積算 PAR が 100 mol m²を超えると測定の精度が落ちることが考えられる。今回の測定から、1日の積算 PAR が約 33 mol m²であったことから、本結果の推定式を用いる場合は、裸地での測定では2~3日でフィルムを回収することが望ましく、平均気温が高くなる場合は退色が早くなるので(図-4)、2日以内に回収することが望ましい。推定される PAR の値の精度を高めるためには、フィルムが退色しすぎることを避けるために、積算 PAR が 100 mol m²以下になるように設置することが望ましいと考える。

IV おわりに

以上の結果から、ラオスにおいても感光性フィルムを用いた光環境の測定が可能であると言える。本研究では秋山ら(1)の推定式を用いて気温の変化に対応する検量線を作成したが、更にデータを集積し検量線を改良していく必要があると考える。

本研究は(研)国際農林水産業研究センター交付金プロジェクト「インドシナ農山村における農家経済の持続的安定性の確立と自立度向上」の一環でおこなわれた。ラオス森林科学研究センターの各位には試験区設定の許可と設定の補助をしていただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

引用文献

- (1) 秋山侃・酒井徹・賈書剛・篠田成郎・富久尾歩(2000) フィルム式簡易積算日射計による群落内光環境計測法の検討. 写真測量とリモートセンシング. **39**: 13-18
- (2) 安藤貴(1983) ジアゾ感光紙による林内日射量の測定. 林試研報. **323**: 19-27
- (3) FRIEND, D.T.C. (1961) A simple method of measuring integrated light value in the field. Ecology **42**: 577-580
- (4) KENZO, T., YONEDA, R., MATSUMOTO, Y., AZANI, M.A., MAJID, N.M. (2008) Leaf photosynthetic and growth responses on four tropical tree species to different light conditions in degraded tropical secondary forest, Peninsula Malaysia. JARQ **42**: 299-306
- (5) 田中憲蔵・米田令仁・Mohamad Azani Alias・Nik Muhamad (2010) 熱帯林におけるフィルム式簡易積算日射計を用いた光環境測定. 関東森林研究 **61**: 137-140
- (6) 福島成樹(1998) 簡易積算日射計フィルムを用いたスギ林の林内光環境の測定. 日林論 **109**: 289-290