

## 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

田中憲蔵・米田令仁 (森林総研)・Mohamad Alias Azani・Nik Muhamad Majid (Universiti Putra Malaysia)

**Abstract:** We tested traits and accuracy on the estimation of integrated light intensity by using simple recording film (Opt-leaf system, Taisei E & L Inc, Japan) in Malaysian tropical rainforest. We selected three kinds of commercially available films, which are orange (O-1D), red (R-3D) and yellow (Y-1W) color, for the study. All studied films were exposed for approximately one week under different light conditions such as open, gap and forest understory in May, July and September, 2009. Discoloring rate on the films and integrated photosynthetic active radiation (PAR) were recorded. Discoloring rate in all studied films significantly related with PAR and correlation coefficient ( $r^2$ ) also showed high value from 0.98 to 0.99. O-1D film showed rapid pigment degradation and completely degraded over 50 mol m<sup>-2</sup> of PAR. Therefore O-1D may be inadequate for the measurement at open area, because diurnal PAR sometimes reached approximately 50 mol m<sup>-2</sup>. In contrast, R-3D had moderate discoloring rate from a few mol m<sup>-2</sup> of PAR and had high significance between PAR and discoloring rate up to 230 mol m<sup>-2</sup> ( $r^2=0.99$ ). Y-1W showed the slowest discoloring rate among films and discoloration was not observed less than 50 mol m<sup>-2</sup> of PAR. Thus, it is better to expose over 2 to 8 weeks for accurate PAR estimation at dark understory condition, which suffered only less than 1 mol photon m<sup>-2</sup> per day.

**Key words:** Light intensity, film solarimeter, photosynthetic active radiation, tropical rainforest, Opt-leaf system

**要旨:** 熱帯雨林環境下で、フィルム式簡易積算日射計(オプトリーフシステム, 大成イーアンドエル)の測定精度とフィルム特性について調べた。調査は2009年の5月, 7月, 9月に, マレーシア熱帯林の異なる光環境下に3種類の感光性フィルム(オレンジ O-1D, 赤 R-3D, 黄 Y-1W)を設置し行った。設置箇所の光合成有効放射(PAR)はPARセンサーで記録した。フィルムは約1週間露光させ, 露光後の退色率と積算PARとの関係を調べた。測定期間の積算PARは最大230 mol m<sup>-2</sup>に達した。フィルムの退色はオレンジで最も早く, 約50 mol m<sup>-2</sup>で完全に退色したが, それ以下のPARでは退色率との相関係数が0.98と高かった。全天環境では, 1日で50 mol m<sup>-2</sup>に達する場合があります, 過退色に注意する必要がある。赤フィルムは, 50 mol m<sup>-2</sup>以下でも退色が検出でき, 積算PARが230 mol m<sup>-2</sup>に達しても退色率とPARに高い相関( $r^2=0.99$ )があった。一方, 黄フィルムはPARが50 mol m<sup>-2</sup>以下での退色が無く, 暗い林床では2から8週間の露光が必要と判断された。

**キーワード:** 積算照度, フィルム式簡易積算日射計, 光合成有効放射, 熱帯雨林, オプトリーフ

## I はじめに

森林の光環境は, 時間的空間的に大きく変動し, 樹木の分布や葉の光合成速度などに大きな影響を与える(8, 15)。そのため森林内の光環境の正確な推定は, 森林動態や炭素固定のモデル化にとって不可欠である(8)。特に, 構造が複雑で, 年中高温多湿な熱帯雨林では, 光環境が森林の高さなど空間位置で大きく異なり, 植物の生育や光合成生産に大きな影響を与えているため, 光環境の高精度な把握が重要である(6, 9, 12, 15)。

これまで, 様々な光環境の測定法が考案されてきたが, いずれも精度や費用などに一長一短があり, 調査目的などによって使い分けられてきた(11)。例えば, 魚眼レンズによる全天空写真やデジタル照度計による測定法では, 短時間に多数の点の測定が可能だが, 調査日の天候によってデータが大きくばらつく難点がある。さらにこれらの方法では, 実際に一日に入射する積算光量についての把握は難しい。また, 光量子センサーとロガーを組み合わせれば, 測定期間に入射する光量の定量化や木漏れ日

の把握は可能であるが, 測定器具が高価なため多点での測定には向かない(11)。

これらの方法に加え, ジアゾ感光紙を用いた光環境の測定方法が古くから用いられてきた(4)。この方法は, 光分解性のジアゾ化合物の特性を利用し, 青焼き複写機などに用いられるジアゾ感光紙を何枚か重ねて冊子状の照度計を作り, 露光後何枚目まで感光したか観察することで照度を求める(2)。この手法は, 比較的安価に, 多点を測定することが出来るため野外での測定に向いている。しかし, 感光紙が水に弱い雨天で測定不能な点, 予め光量子センサーでキャリブレーションが必要な点, さらに目で透過枚数を判断するため, 精度を上げるにはある程度の訓練が必要であるなど難点もあった(1, 2, 3)。一方, この原理を利用し, ジアゾ色素を含浸させた防水性のセルロース・アセテートフィルムの開発も行なわれ, 一般に市販されるようになっている(1)。これらの市販フィルムは日本での試験測定から積算光合成有効放射(PAR)と高い相関を示すことがわかっており, 圃

場や森林での光環境の測定に使われている(1, 5)。この方法の欠点として、フィルムの退色が化学反応であるため、測定温度に依存して大きく検量線が変化することが上げられるが、日本での調査結果からは光合成有効放射量と退色率に高い相関があり、おおむね8度から25度程度の温度内ならば高い測定精度が得られることがわかっている(1)。しかし、測定温度が高い場合にはフィルムの感光特性などに不明な点が残されていた(1)。

この研究では、高温多湿な熱帯林環境でフィルム式簡易積算日射計による光環境測定が可能か検証するために、市販の感光性フィルムの退色率と積算光合成有効放射の関係や感光特性などを3種類のフィルムを対象に調べたので報告する。

## II 材料と方法

調査はマレーシアセランゴール州のAyer Hitam保護林内の様々な光環境下で行った。調査地の林分は、攪乱後に成立した先駆種による二次林と、フタバガキ科樹木が残る択伐残存林からなっている(7)。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製)の3種類のフィルム、オレンジ(O-1D)、赤色(R-3D)、黄色(Y-1W)を用いた。フィルムの最大吸収波長は、黄色468nm、赤色521nm、オレンジが492nmである。

フィルムは2009年5月、7月、9月の3度、調査地に設置した。設置場所は、遮蔽のない全天環境(1ヶ所)、ギャップ(3ヶ所)、林内(3ヶ所)であった。フィルムは水平なベニヤ板(30×20cm)の上に、各種類3枚ずつホッチキスで貼り付け、板の真ん中にはPARセンサー(小糸製)を置き2分ごとに照度を記録した。フィルムの露光前透過率(D0)と、露光後透過率(D)を野外でオプトリーフ測定器(T-METER, THS-470)を用いほぼ毎日記録した。なお、T-METERは、470nmに最大吸収波長を持つ青色の発光ダイオードをフィルムに当て、光透過量をフォトダイオードで測定する仕組みになっている。

フィルム退色率は、黄色とオレンジについては、退色率= $D/D_0 \times 100$ で、赤色については、退色率= $\text{Log}_{10}(D/D_0 \times 100)$ で求めた。退色率の計算後、積算PARとの関係について検討した。

## III 結果と考察

**1. PARと気温の日変化** PARは全天環境で最大2000  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ に達し、日積算PARも45  $\text{mol m}^{-2}$ を超える日があった(図-1)。これに対し林内は非常に暗く、木漏れ日が無い場合は10  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ 程度、木漏れ日が当たっても50~100  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ 程度の光しか到達せず、日積

算PARも1  $\text{mol m}^{-2}$ 以下と低かった。林縁部の最高気温は約33度、最低気温は22度であったが、全天環境では40度に達することもあった。今回のデータは、これまで東南アジア熱帯雨林域で報告されている気温やPARの日変化と比べて、大きな違いは見られず、典型的な測定環境であったと考えられた(10, 13, 16)。

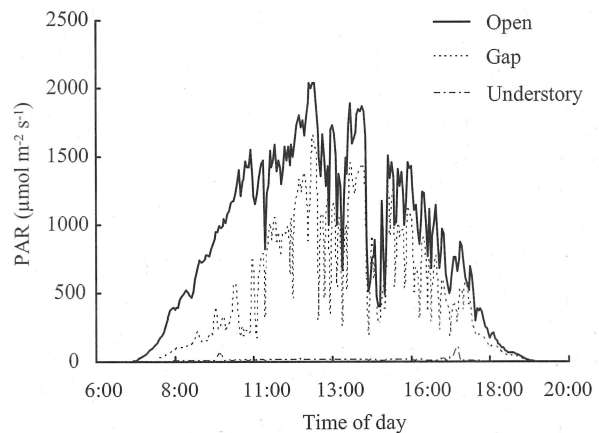


図-1. 全天、ギャップ、林床におけるPARの日変化例  
Fig-1. Diurnal changes on PAR at open, gap and understory

**2. フィルム透過率と積算PARの関係** T-METERで測定したフィルム透過率と積算PARの関係はフィルムの種類で大きく異なった(図-2)。オレンジフィルムは、

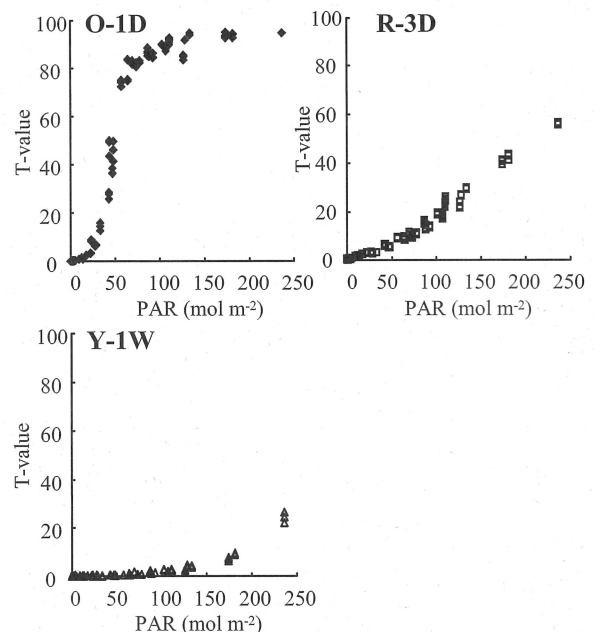


図-2. フィルム透過率(T-value)と積算PARの関係  
Fig-2. Relationship between integrated PAR and transmittance of the films (T-value).

数 mol m<sup>-2</sup> 以下では透過率に変化がほとんど無いが、50 mol m<sup>-2</sup> 付近で急激に透過率が上昇した。赤色フィルムは 200 mol m<sup>-2</sup> を超えてもほぼ直線的に透過率が上昇することが分かった。黄色フィルムは 50 mol m<sup>-2</sup> まではほとんど透過率に変化が見られず、230 mol m<sup>-2</sup> を超えても透過率は 20%程度で、かなり強度に露光してもフィルム色素の分解が進まないことがわかった。いずれのフィルムも測定を行った 5月、7月、9月間では透過率と積算 PAR の関係に有意な違いは見られなかった。

3. フィルムによる退色率と積算 PAR の関係 各フィルムの退色率と積算 PAR には高い相関が見られ、熱帯雨林環境でも積算光量の推定が可能であることが分かった (表-1, 図-3)。オレンジフィルムは、積算 PAR が 50 mol m<sup>-2</sup> 以下では直線的に退色率が低下し、PAR との相関係数も 0.98 と高い値を示した。しかし、50 mol m<sup>-2</sup> を超えると色素が完全に退色し、PAR との間に有意な相関が見られなくなった。このことから、オレンジフィルムで測定を行う際には、50 mol m<sup>-2</sup> 以上の露光を避ける必要があると考えられた。全天環境下では、一日の積算 PAR が 50 mol m<sup>-2</sup> を超える場合もあり (16)、使用の際には過度の露光に注意する必要があると考えられた。また、積算 PAR が数 mol m<sup>-2</sup> しかない場合にもフィルム退色が

ほとんど見られなかったことから、特に暗い林床では、正確な光環境の把握のため数日間の露光が必要になると思われる。

赤色フィルムの退色率と PAR の関係は、二次関数で良く近似でき、相関係数も 0.99 と非常に高かった。また、積算 PAR が 4 mol m<sup>-2</sup> 前後から退色が見られ、PAR が 230 mol m<sup>-2</sup> に達しても良く近似できた。このことから、全天環境における 3日~5日間程度の測定にも使用できると考えられた。また、積算 PAR が一日数 mol m<sup>-2</sup> しかない林内で測定する場合は、数日間の露光を行うことで精度が上がると考えられた。

黄色フィルムの退色率と PAR の関係も、二次関数で良く近似でき、相関係数も 0.99 と高かった。しかし、積算 PAR が 50 mol m<sup>-2</sup> 以下では、フィルムがほとんど退色せず、日積算 PAR が 1 mol m<sup>-2</sup> 前後の熱帯雨林林床の光環境 (15) を精度良く推定するためには、2から8週間の露光が必要と考えられた。また PAR が 230 mol m<sup>-2</sup> を超えても、大きく退色しなかったことから全天環境でも 1週間以上使用できると考えられた。

表-1. 各フィルムの積算 PAR と退色率(DR)の回帰係数  
Table 1. Coefficients of the regressions between integrate PAR and discoloring of the films (DR). O-1 D; DR = aPAR + b, R-3 D and Y-1 W; DR = aPAR<sup>2</sup> + bPAR + c.

Film type	a	b	c	r <sup>2</sup>
O-1D	-1.7621	102.67	-	0.98
R-3D	-0.00002	-0.0013	1.9771	0.99
Y-1W	-0.0012	-0.015	99.401	0.99

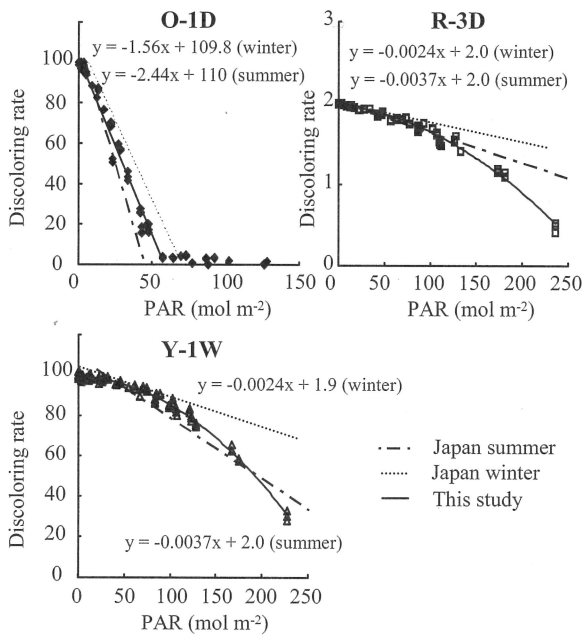


図-3. マレーシアと日本における退色率と積算 PAR の関係。

Fig-3. Relationship between integrate PAR and discoloring of the films among study sites.

4. 日本で測定されたフィルム退色率との違い 今回得られた退色率と積算 PAR の関係は、東京で得られた夏と冬の値 (オプトリーフマニュアル) と比べ大きく異なっていた (図-3)。すべてのフィルムが日本の冬に比べすばやく退色し、特に赤色フィルムで顕著であった。感光性フィルムの退色過程は温度依存性が高く、気温が高いと早く退色することがわかっている (1)。今回のすばやい退色は、日本の冬 (測定気温 9~10°C) や夏 (測定気温 27~30°C) に比べ、熱帯林の測定気温 (約 33°C) が高かったためと考えられた。しかし、オレンジや黄色フィルムでは、熱帯林での測定より日本の夏の方がすばやい退色が見られることもあり、湿度など温度以外の環境条件の影響も今後考慮する必要があるかもしれない。また、赤色と黄色フィルムでは、オプトリーフマニュアルにあるような直線回帰ではなく二次関数による回帰を

行うことで高い精度が得られることも分かった。

#### IV おわりに

以上の結果から、高温多湿な熱帯雨林環境でも感光性フィルムによる積算 PAR の推定が可能であることが明らかになった。ただし、使用するフィルムの特性や露光条件などに注意する必要もあった。今回調べた3種類のフィルム特性を簡単にまとめると以下ようになる。退色が早いオレンジ(O-1 D)では、約  $50 \text{ mol m}^{-2}$  以上の露光環境では使用できず、特に全天では1日で完全に退色する危険性がある。しかし、PAR が  $50 \text{ mol m}^{-2}$  以下では退色率との相関係数が 0.98 と高い利点もあった。赤色フィルム(R-3 D)は、 $50 \text{ mol m}^{-2}$  以下でも退色が検出でき、さらに積算 PAR が  $230 \text{ mol m}^{-2}$  に達しても退色率と PAR に高い相関( $r^2=0.99$ )が見られるため全天、林内ともに使用できる。一方、黄色フィルム(Y-1 W)は、PAR が  $50 \text{ mol m}^{-2}$  以下での退色がほとんど検出できない。そのため熱帯林の暗い林床では2から8週間以上露光が必要で、短期測定に不向きであると考えられた。

#### 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測定法の検討. 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) 遠藤良太・石川敏雄. (1994) 複層林における光環境の測定—色素フィルムを用いた簡易積算全天日射計と照度計の比較—. 日林論. **105**: 437-438.
- (4) FRIEND, D. T. C. (1961) A simple method of measuring integrated light value in the field. Ecology. **42**: 577-580.
- (5) HIKOSAKA, K., NAGASHIMA, H., HARADA, Y., HIROSE, T. (2001) A simple formulation of interaction between individuals competing for light in a monospecific stand. Funct. Ecol. **15**: 642-646.
- (6) KENZO, T., ICHIE, T., YONEDA, R., WATANABE, Y., NINOMIYA, I. and KOIKE, T. (2006) Changes in photosynthesis and leaf characteristics with height from seedlings to mature canopy trees in five dipterocarp species in a tropical rain forest. Tree Physiol. **26**: 865-873.
- (7) 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.

- (8) KIMMINS, J. P. (1997) Forest Ecology. A foundation for sustainable management. 596pp., Prentice Hall, New Jersey.
- (9) KIRA, T., SHINOZAKI, K., HOZUMI, K. (1969) Structure of forest canopies as related to their primary productivity. Plant Cell Physiol. **10**: 129-142.
- (10) KUMAGAI, T., KURAJI, K., NOGUCHI, H., TANAKA, Y., TANAKA, K., SUZUKI, M. (2001) Vertical profiles of environmental factors within tropical rainforest, Lambir Hills National Park, Sarawak, Malaysia, J. For. Res. **6**: 257-264.
- (11) PEARCEY, R., MOONEY, H. A., RUNDEL, P. W. (1989) Physiological ecology: field methods and instrumentation. 457pp., Chapman and Hall, New York.
- (12) RICHARDS, P. W. (1996) The tropical rainforests: an ecological study. 600pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- (13) TANI, M., NIK, A. R., OHTANI, Y., YASUDA, Y., SAHAT, M. M., KASRAN, B., TAKANASHI, S., NOGUCHI, S., YUSOP, Z., WATANABE, T. (2003) Characteristics of energy exchange and surface conductance of tropical rain forest in Peninsular Malaysia. In: Pasho Ecology of a Lowland Rain Forest in Southeast Asia, 73-88, Springer, Tokyo, Japan.
- (14) WHITMORE, T. C. (1998) An introduction to tropical rain forests. 282pp., Oxford Univ. Press, Oxford, UK.
- (15) YODA, K. (1974) Three-dimensional distribution of light intensity in a tropical rain forest of west Malaysia. Jpn. J. Ecol. **24**: 247-254.
- (16) 米田令仁・松本陽介・田中憲蔵・AZANI, M. A.・MAJID, N. M. (2005) 裸地植栽における脆弱な熱帯樹種のための人工遮蔽物の試作. 森林立地. **47**: 119-123.