

## ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林における PAR と NIR の透過・反射特性

Reflectance and transmittance properties of photosynthetically active radiation and near-infrared radiation in a cool-temperate deciduous broad leaved forest dominated by *Fagus crenata*

野中翔平\*1・小坂泉\*2・浅香涉\*2・瀬戸萌子\*2・高松美月\*2・瀧澤英紀\*2・阿部和時\*2

Shohei NONAKA\*1, Izumi KOSAKA\*2, Wataru ASAKA\*2, Moeko SETO\*2, Mitsuki TAKAMATSU\*2,  
Hideki TAKIZAWA\*2 and Kazutoki ABE\*2

\*1 日本大学大学院生物資源科学研究科

Grad. Sch. Bioresource Sci., Nihon Univ., Fujisawa 252-0880

\*2 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、ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林において光合成有効放射量 (PAR) と近赤外線放射量 (NIR) の透過・反射特性を調べるため、2016年6月から9月において全天 PAR (PARi) と樹冠を透過した PAR (PARt) および NIR (NIRt) に加えて、樹冠を反射した PAR (PARref) と NIR (NIRref) を測定した。その結果、PAR の透過率および反射率はほぼ一定の傾向を示した。NIRt/PARt に対する PARi/PARt の比および NIRref/PARref に対する PARi/PARref の比が減少することから、NIR の透過率および反射率は、葉量の変化が少ない期間において減少することが示唆された。

**キーワード**：Beer-Lambert 法・NIR/PAR 法・透過光・反射光・地上観測

**Abstract**: To investigate the reflectance and transmittance properties of photosynthetically active radiation (PAR) and near-infrared radiation (NIR), we measured canopy-transmitted PAR and NIR (PARt and NIRt), incident PAR (PARi) and canopy-reflected PAR and NIR (PARref and NIRref) in a cool-temperate deciduous broad leaved forest dominated by *Fagus crenata* during June-September, 2016. The PAR transmittance and reflectance values remained approximately fixed. The ratio of PARi/PARt to NIRt/PARt and the ratio of PARi/PARref to NIRref/PARref decreased gradually. These results suggest that NIR transmittance and reflectance decreased gradually over the study period and that the leaf area fluctuated very little.

**Key-words**: Beer-Lambert law, NIR/PAR method, transmitted radiation, reflected radiation, ground-based measurement

## I はじめに

気候変動による気温上昇が森林生態系における炭素収支に与える影響が懸念される。斎藤ら (7) は、岐阜県高山市の落葉広葉樹林において、2046-2065 年は 2002-2007 年よりも展葉開始日の早期化および落葉終了日の晩期化するため、生態系純生産量が増加する予測を報告している。このことから、葉群フェノロジーに関する高精度の長期モニタリングは、炭素収支を評価する上で必要不可欠であると考えられる。既往の研究では、LAI (Leaf area index; 葉面積指数) の間接推定法の 1 つである PAR (Photosynthetically active radiation; 光合成有効放射量 400-700nm) の樹冠透過率を用いた Beer-Lambert 法により葉群フェノロジーを評価する機会が多い (例えば、Saigusa *et al.* (6))。近年、樹冠を透過した NIR (Near infrared radiation; 近赤外線放射量 700-1,000nm) と PAR の強度比から LAI を間接的に推定する NIR/PAR 法が新

たに開発された (4)。しかしながら、この手法に関する情報は極めて少ないため、様々なタイプの森林において、この手法を用いた観測事例を蓄積するとともに、従来の手法 (例えば、Beer-Lambert 法など) と比較・検証する必要があると考えている。

ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林である本観測地では、PAR の樹冠透過率を用いた Beer-Lambert 法と NIR/PAR 法による LAI の連側観測を 2014 年 4 月から実施しているが、2014 年と 2015 年の葉量の変化があまり見られない着葉期において、Beer-Lambert 法と NIR/PAR 法の相対的な葉面積の季節変化に若干違いが見られた (5)。そこで本研究では、この要因を明らかにするために、着葉期である 2016 年 6 月から 9 月において PAR と NIR の透過率および反射率の季節変化の特徴を調べた。

## II 方法

1. 観測地概要 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内高平山 (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する平均樹高 15m の二次林である。山頂周辺の樹高は 2m 程度であるため、高さ 6m の気象観測塔を設置し、樹冠上における気象観測を実施している。山頂の気象観測塔から水平距離で西へ 100m 程度離れた地点に、高さ 2m の林床観測塔 (下層植生の影響は含まない) を設置している。山頂周辺と林床観測塔周辺の構成樹種に大きな違いはない。

2. 観測項目 2m の林床観測塔の先端に NIR と PAR を計測する葉面積指数計測センサー (MIJ-15, 日本環境計測) を設置し、透過 NIR (NIRt) および透過 PAR (PARt) を計測した。気象観測塔の上端に放射収支計 (NR01, Huxseflux) を設置し、下向き短波放射計により全天日射量 ( $S_{\downarrow}$ ) を計測した。光量子センサー (PQS-1, KIPP&ZONEN) を併設し、全天 PAR (PARi) を計測した。加えて、2016 年 6 月 28 日から林床観測塔に設置した葉面積指数計測センサーと同じものを 6m の高さにセンサー部分を真下に向けて設置し、反射 NIR (NIRref) および反射 PAR (PARref) を計測した。これらのデータは、10 秒毎に測定され、10 分平均した値がデータロガー (CR1000, Campbell) に記録された。また、2016 年 4 月 6 日、6 月 28 日、8 月 24 日および 9 月 23 日においてプラント・キャノピー・アナライザー (LAI-2000, Li-Cor) を用いて LAI の測定値を求めた。降水量は高平山山頂から北へ直線距離でおよそ 6 km 離れた藤原 AMeDAS (36°52'N, 139°04'E, 標高 700m) のデータを使用した。

3. 解析方法 10 分毎の大気上端における日射量 ( $S_{0\downarrow}$ ) を以下の式により算出した (3)。

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

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

ここで  $I_{00}$  は太陽定数 ( $=1.365 \text{ W m}^{-2}$ ),  $d$  と  $d_0$  は太陽・地球間の距離とその平均値,  $\theta$  は天頂角,  $\varphi$  は緯度,  $\delta$  は太陽の赤緯,  $h$  は太陽の南中からの時角を表す。観測されたそれぞれのデータは,  $S_{0\downarrow} > 0$  のものを日積算し, その比を用いることで, 日変化の平均化を行った。また, 日積算  $S_{\downarrow}$  が日積算  $S_{0\downarrow}$  の 45% 以上である日を晴天日, 45% 未満である日を曇天日として分けた。さらに,  $S_{0\downarrow} > 0$  の間に降水量が 0.5mm 以上あった日を降雨日として, 解析から除いた。解析期間は透過光については 2016 年 4 月 1 日から, 反射光については 6 月 29 日から 10 月 9 日までである。

### III 結果および考察

1. 日変化 図-1 は晴天日である 7 月 20 日と曇天日である 7 月 21 日の a) PARi, b) PAR の透過率, c) PAR の反射率, d) NIRt/PARt および e) NIRref/PARref の日変化を示す。黒印は 10 分平均値, 破線は日平均値を表す。図-1 より, 反射光については晴天日の方が, 透過光については曇天日の方が, 日平均値からの差異が小さいように見える。このことから, 透過光については曇天日, 反射光については晴天日に着目して解析する。

2. 葉面積の季節変化 図-2 は, 2016 年 4 月から 10 月における a) Beer-Lambert 法および b) NIR/PAR 法により求められた相対的な葉面積と c) LAI-2000 による LAI の測定値の経時変化を示す。白印は晴天日, 黒印は曇天

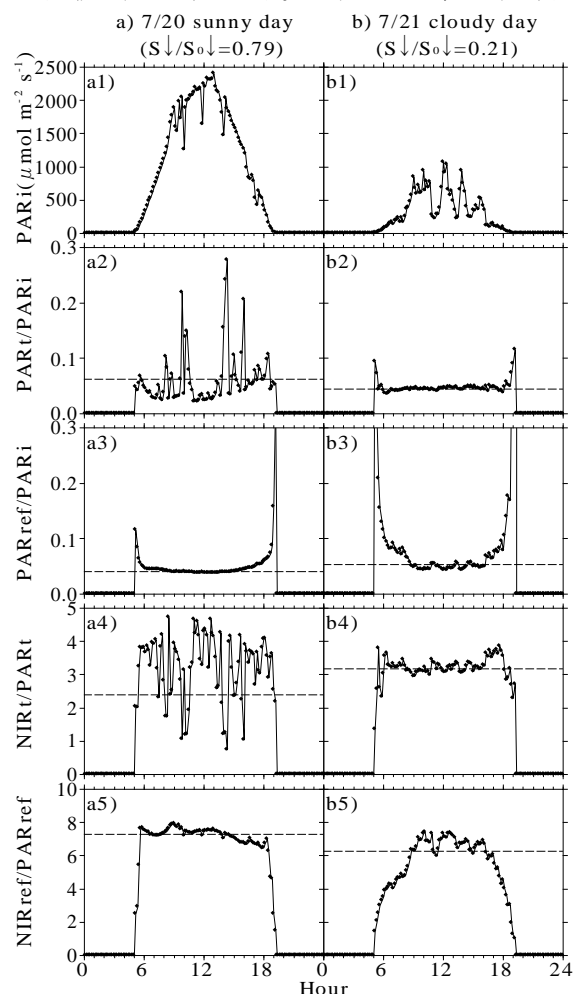


図-1. a) 晴天日と b) 曇天日における 1) PARi, 2) PAR の透過率, c) PAR の反射率, d) NIRt/PARt および e) NIRref/PARref の日変化

Fig.1 Daily variation in a) PARi, b) PAR transmittance, c) PAR reflectance, d) NIRt/PARt, and e) NIRref/PARref. Filled diamonds indicate 10-min mean values. Dashed lines represent daily mean values.

日、破線は6月から9月における平均値を表す。図-2より、2016年における展葉は4月下旬頃に開始し、6月初旬頃に終了したと考えられる。また、葉面積が安定している6月から9月に注目すると、LAI-2000によるLAIの測定値は平均4.0程度を示し、大きな変化は見られなかった。しかしながら曇天日ではBeer-Lambert法の値はほぼ一定、NIR/PAR法の値は緩やかに減少する傾向を示した。この傾向は、2014年および2015年のものと同様であった(5)。

**3. PARの透過・反射の季節変化** 図-3は、6月から9月におけるPARのa)透過率およびb)反射率の経時変化を示す。白印は晴天日、黒印は曇天日、破線はa)においては曇天日における月平均値、b)においては晴天日における月平均値を表す。図-3a)より、PARの透過率は、晴天日より曇天日の方がばらつきは小さく、6月から9月にかけて0.05程度でほぼ一定の傾向を示し

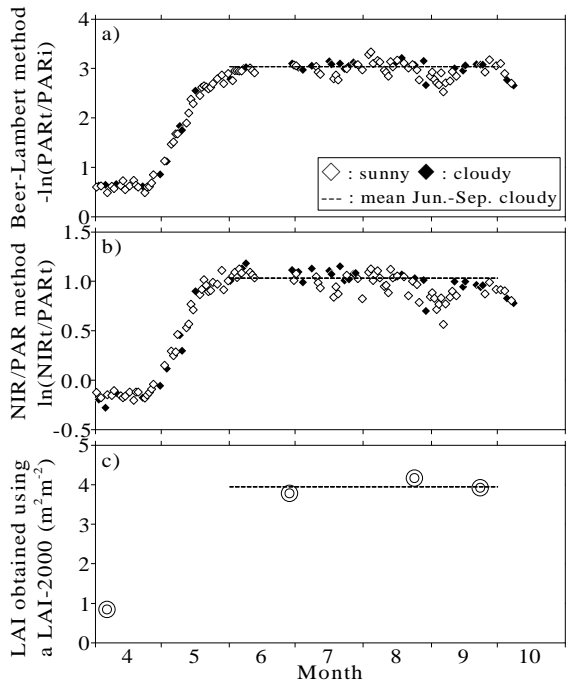


図-2. 2016年4月から10月におけるa) Beer-Lambert法、b) NIR/PAR法によって求められた相対的な葉面積およびc) LAI-2000によるLAIの測定値の経時変化

Fig.2 Time series variation in a) relative leaf area obtained using the Beer-Lambert law, b) relative leaf area obtained using the NIR/PAR method, and c) LAI obtained using a LAI-2000 plant canopy analyzer during April-October, 2016. Open diamonds indicate sunny days. Filled diamonds indicate cloudy days. Dashed lines represent mean values on cloudy days during June-September.

た。PARの反射率は、曇天日より晴天時の方がばらつきは小さく、6月から9月にかけて0.04程度でほぼ一定の傾向を示した。以上より、6月から9月におけるPARの透過率および反射率は、明瞭な季節変化を示さず、ほぼ一定であることが見てとれる。

**4. NIR/PARの季節変化** 図-4は、6月から9月におけるNIR/PARのa)透過比およびb)反射比の経時変化を示す。白印は晴天日、黒印は曇天日を表す。図-4a)より、NIRとPARの透過比は、晴天日と曇天日においてばらつきは見られるものの、緩やかな減少傾向が見られた。図-4b)より、NIRとPARの反射比は、曇天日より晴天日の方がばらつきは小さく、図-4a)と同様に減少傾向が見られた。NIRとPARの透過比および反射比については、PARの透過・反射率の季節変化が見られないことから(図-3参照)、NIRの透過・反射量の季節変化が影響を与えている可能性が考えられる。

図-5は、6月から9月におけるa) NIRt/PARtとPARi/PARtの比およびb) NIRref/PARrefとPARi/PARrefの比の経時変化を示す。白印は晴天日、黒印は曇天日を表す。図-5a)より、NIRt/PARtとPARi/PARtの比は、晴天日より曇天日の方がばらつきは小さく、6月から9月にかけて緩やかな減少傾向が見てとれる。図-5b)よりNIRref/PARrefとPARi/PARrefの比は、曇天日より晴天日の方がばらつきは小さいが、図-5a)のものよりもや

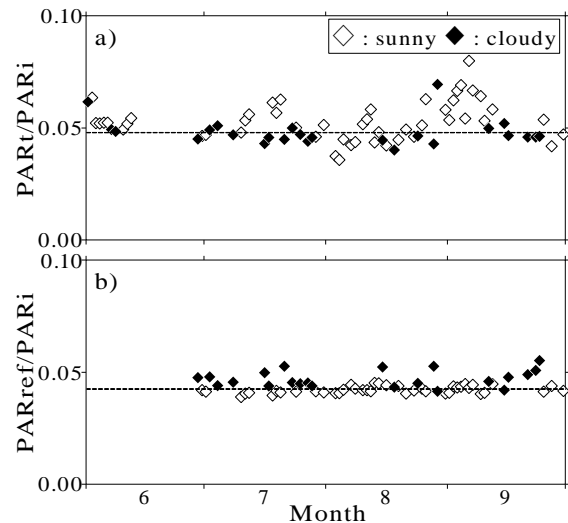


図-3. 2016年6月から9月におけるPARのa)透過率およびb)反射率の経時変化

Fig.3 Time series variation in PAR a) transmittance and b) reflectance during June-September, 2016. Open diamonds indicate sunny days. Filled diamonds indicate cloudy days. Dashed lines represent mean values on a) cloudy days and b) sunny days.

や明瞭な減少傾向が見てとれる。また、 $NIR_t/PAR_t$  と  $PAR_i/PAR_t$  の比および  $NIR_{ref}/PAR_{ref}$  と  $PAR_i/PAR_{ref}$  の比はそれぞれ、 $NIR_t/PAR_i$  および  $NIR_{ref}/PAR_i$  を表す。樹冠

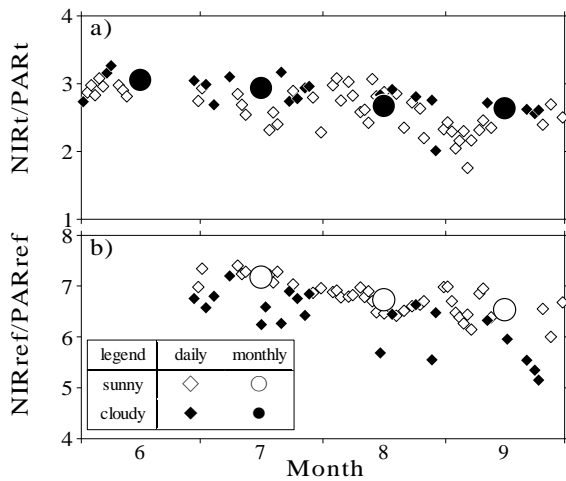


図-4. 2016年6月から9月における NIR と PAR の a) 透過比および b) 反射比の経時変化

Fig.4 Time series variation in a)  $NIR_t/PAR_t$  and b)  $NIR_{ref}/PAR_{ref}$  during June-September, 2016. Open diamonds indicate cloudy days. Filled diamonds indicate sunny days. Open circles represent monthly mean values on sunny days. Filled circles represent monthly mean values on cloudy days.

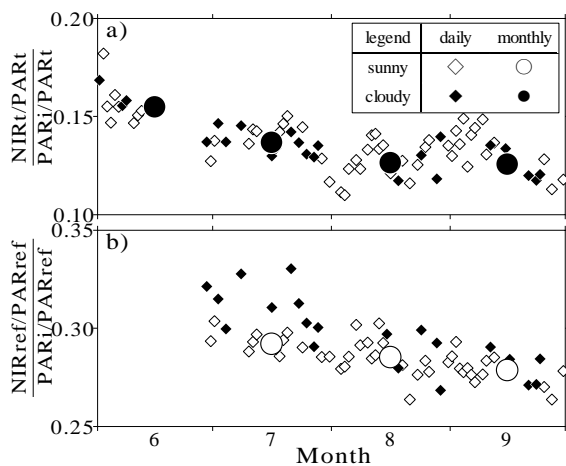


図-5. 2016年6月から9月における a)  $NIR_t/PAR_t$  と  $PAR_i/PAR_t$  の比および b)  $NIR_{ref}/PAR_{ref}$  と  $PAR_i/PAR_{ref}$  の比の経時変化

Fig.5 Time series variation in a) the ratio of  $PAR_i/PAR_t$  to  $NIR_t/PAR_t$  and b) the ratio of  $PAR_i/PAR_{ref}$  to  $NIR_{ref}/PAR_{ref}$  during June-September, 2016. Open diamonds indicate cloudy days. Filled diamonds indicate sunny days. Open circles represent monthly mean values on sunny days. Filled circles represent monthly mean values on cloudy days.

上の日積算した  $NIR/PAR$  比は天候の影響を受けず、 $0.82 \pm 0.06$  程度であるため (4), 図-5は  $NIR$  の透過率および反射率を間接的に示している。このことから、 $NIR$  の透過率および反射率は、6月から9月にかけて緩やかに減少する傾向があると考えられる。栗屋ら (1) は、6月から9月にかけてブナ林における  $NIR$  (770-790nm) の透過係数が減少することを示し、Kodani *et al.* (2) は同じ時期においてブナ樹冠上の  $NIR$  (841-876nm) の反射係数が減少することを示している。 $NIR$  の波長域が若干異なるが、本観測地の  $NIR$  の透過・反射率の季節変化は、既往研究と同じ傾向を示した。以上のことから、葉量の変化が少ない着葉期において、ブナ林における  $NIR$  の吸収量が増加する可能性が考えられ、 $NIR/PAR$  法で求められた相対的な葉面積に若干の季節変化が生じたのではないかと考えている。

#### 引用文献

- (1) 栗屋善雄・田中邦宏・澤田治雄・鷹尾元 (1999) ブナ林の透過スペクトルの季節変化—測定方法と季節変化の概要—. 東北森林科学会誌 **4**(1) : 1-7
- (2) KODANI, E., AWAYA, Y., TANAKA, K. and MATSUMURA, N. (2002) Seasonal patterns of canopy structure, biochemistry and spectral reflectance in a broad-leaved deciduous *Fagus crenata* canopy. For Ecol Manage **167** : 233-249
- (3) 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
- (4) 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
- (5) 野中翔平・小坂泉・大塚羽純・清水伸大・関崎良美・田口裕也・瀧澤英紀・阿部和時 (2016) 落葉広葉樹林における波長域の異なる3種の短波放射量を用いた葉面積指数の推定. 第127回日本森林学会大会学術講演集 : 165 pp
- (6) SAIGUSA, N., YAMAMOTO, S., MURAYAMA, S., KONDO, H. and NISHIMURA, N. (2002) Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. Agric For Meteorol **112** : 203-215
- (7) 斎藤琢・永井信・村岡裕由 (2014) 陸域生態系の炭素収支の現状診断と将来予測—リモートセンシングの利用—. 日本生態学会誌 **64** : 243-252