

ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林における相対的な葉量が CO₂ フラックスに与える影響—2014 年と 2015 年のデータ比較—

The effects of relative leaf area on CO₂ flux in a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata* -A comparative study between 2014 and 2015-

野中翔平*¹・小坂泉*²・瀧澤英紀*²・阿部和時*²

Shohei NONAKA*¹, Izumi KOSAKA*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 (*Fagus crenata*) が優占する冷温帯落葉広葉樹林において、2014 年と 2015 年の展葉期における相対的な葉量が CO₂ フラックスに与える影響を明らかにするため、群馬県利根郡みなかみ町の日本大学演習林の高平山においてフラックス観測および林床において波長域の異なる 3 つの短波放射量の測定を実施した。その結果、2015 年 4～5 月における平均気温は 2014 年に比べ 1.5℃ 高くなり、2015 年の展葉日は、2014 年に比べて 7 日間早かった。2014 年と 2015 年の下向き CO₂ フラックスと PAR の関係を比較すると、展葉から 30 日間においては、両者に違いは見られなかった。一方、展葉後 31～60 日では、2015 年の相対的な葉量は 2014 年のものよりも多いため、2015 年における PAR の増加に対する下向き CO₂ フラックスは、2014 年に比べて増加する傾向を示した。

キーワード：Lambert-beer の法則、NIR/PAR 法、CO₂ フラックス、冷温帯落葉広葉樹林、ブナ

Abstract : We investigated the effects of relative leaf area after foliation on CO₂ flux in 2014 and 2015 in a cool-temperate deciduous broadleaf forest (dominated by *Fagus crenata*). Continuous flux measurements were taken at a tower located on the summit of Mt. Takahira in the Nihon University Forest in Minakami-machi, Tone-gun, Gunma, Japan. Additionally, we measured canopy-transmitted radiation using three types of wavelength sensors. Mean temperatures from April to May 2015 were higher than those in 2014. Leaf expansion in 2015 occurred seven days earlier than it did in 2014. Compared to the relationships between downward CO₂ flux and photosynthetically active radiation (PAR) in 2014 and 2015, these relationships showed no obvious differences over the 30 days after leaf expansion. At the same time, a decrease in CO₂ flux led to an increase in PAR over days 31 to 60 after leaf expansion in 2015. This relationship was more pronounced in 2015 than in 2014 because relative leaf area in 2015 was greater than that in 2014.

Keywords : lambert-beer law, NIR/PAR method, CO₂ flux, cool-temperate deciduous broadleaf forest, *Fagus crenata*

I はじめに

近年、気候変動による気温上昇が森林の生長や分布に与える影響が懸念されている。藤本 (3) によれば、気温が 1℃ 上昇する毎に開芽初期到達日が平均 3.4 日早まり、落葉樹の平均落葉日が平均 6.2 日遅れ、落葉樹の光合成期間が平均 10 日長くなると推定している。Black *et al.* (1) は、カナダの北方落葉樹林における事例として、20 世紀において最も強いエルニーニョイベントにより暖春だった 1998 年の二酸化炭素吸収量は、ほかの年のものに比べ増加したことを報告している。落葉樹林において、気温上昇は葉のフェノロジーだけでなく、二酸化炭素吸収量にも大きな影響を与えている。

本研究対象の冷温帯落葉広葉樹林では、日本の冷温帯を代表するブナ (*Fagus crenata*) が優占樹種であるが、松井ら (6) は気候変動に伴う気温上昇により本州のブナの分布確率が低下することを報告している。筆者らは、ブナが気候変動などの環境変化にどのように応答するかを現地観測に基づいて実証的に明らかにすることは重要であると考え、群馬県北部のブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林において熱・水・CO₂ 交換量の観測を行っている (4)。森林一大気間における熱・水・CO₂ 交換量を評価する上で重要なパラメータの一つである LAI (Leaf Area Index; 葉面積指数) の間接推定法について、林床に透過した光を用いるものや画像解析など、幾つか考案さ

れているが、どの方法が最も適しているかについては、まだ確定されていない。

そこで本研究では、ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林において、樹冠を透過した波長域の異なる3種の短波放射量を用いた相対的な葉量の連続観測および渦相関法によるフラックス観測を実施し、2014年と2015年の展葉期における相対的な葉量の違いがCO₂フラックスに与える影響を明らかにすることを目的とした。

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(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。山頂には高さ 6m の気象観測塔を設置しており、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。

2. 光の計測 高平山の山頂に建設された気象観測塔周辺の樹高は 2m 程度であり、観測塔の高さ 6m の位置において遮るものはないため、高さ 6m の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、光合成有効放射量 (PAR_i) を計測した。2m の林床観測塔の先端に林床日射計 (CMP-3, KIPP&ZONEN) と、近赤外線放射量 (NIR) と光合成有効放射量 (PAR) の比から相対的な葉面積を計測する葉面積指数計測センサー (MIJ-15, 日本環境計測) を併設し、林床日射量 (St_{\downarrow})、林床近赤外線放射量 (NIR_t) および林床光合成有効放射量 (PAR_t) を計測した。 St_{\downarrow} については 10 分毎に測定を行い、データロガー (CR10X, Campbell) に記録した。 S_{\downarrow} 、 PAR_i 、 PAR_t および NIR_t については 10 秒毎に出力されるデータを 10 分平均した値をデータロガー (CR1000, Campbell) に記録した。

3. 葉量の推定 本研究では、以下に示す3つの指標により相対的な葉量を算定した。1つ目の指標である林床と樹冠上の日射量の比における負の対数値 (NLR_{St}) は、 LAI および PAI (Plant Area Index) とおおよそ比例関係があり、展葉やその後の樹木および葉の生長の相対量をあらわす指標として用いられ、Tanaka *et al.* (8) は以下の式を提示している。

$$NLR_{St} = -\ln\left(\frac{St_{\downarrow}}{S_{\downarrow}}\right) \quad (1)$$

また、 PAR についても同様の関係があるので、 PAR_i と PAR_t の比における負の対数値 (NLR_{PAR}) である次式を用い、2つ目の指標とした。

$$NLR_{PAR} = -\ln\left(\frac{PAR_t}{PAR_i}\right) \quad (2)$$

Kume *et al.* (5) は日積算値から求められた林床の NIR/PAR の対数と LAI の間には $R^2=0.97$ という高い相関関係があるという結果を示した。本研究では、3つ目の指標として林床の NIR/PAR の対数値 (LR_{NIRPAR}) を用いて、次式で示す。

$$LR_{NIRPAR} = \ln\left(\frac{NIR_t}{PAR_t}\right) \quad (3)$$

また、(1) ~ (3) 式で使用するデータは、大気上端日射量が正の場合のみとして、日積算値を用いて相対的な葉量を求めた。林床に設置した林床日射計および葉面積指数計測センサーについては、積雪による影響を受けるため、展葉前に再設した。解析期間は2014年においては4月17日から7月31日、2015年においては4月18日から7月31日である。

4. フラックス計測 高さ 6m の気象観測塔の先端に3次元超音波風速温度計 (CSAT3, Campbell) および Open-path 型 CO₂/H₂O 分析器 (EC150, Campbell) を設置し、10Hz の測定間隔で出力される3次元風速、気温、CO₂ 濃度および H₂O 濃度のデータをデータロガー (CR1000, Campbell) に記録させた。得られたデータを渦相関法により CO₂ フラックスを算出した。CO₂ フラックスの平均化時間は30分とし、その算定過程において McMillen (7) による座標変換および Webb *et al.* (9) による密度補正を行った。加えて Foken and Wichura (2) が提示した定常性の検査を行い、解析に不適なデータを取り除いた。降雨中およびその前後2時間のデータは、センサー感部の間の雨粒により、ノイズを含む可能性があるため省いた。解析期間は2014年と2015年共に4月1日から7月31日である。また、一般気象要素として、気温は観測塔の頂上に温度センサー (CS107, Campbell) を設置し、データロガー (CR1000, Campbell) に記録した。降水量は高平山山頂から北へ直線距離でおおよそ 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。解析期間は2013年12月1日から2015年7月31日である。

III 結果および考察

1. 一般気象要素 2013年12月~2014年2月および2014年12月から2015年2月における冬季の降水量は、それぞれ 419mm と 688mm であり、2015年の冬季におけ

る降水量は2014年のものより多かった。3月、4月および5月の平均気温は、2014年ではそれぞれ-0.2°C、5.3°Cおよび11.5°C、2015年ではそれぞれ0.9°C、6.8°Cおよび12.9°Cであり、2015年の春季における平均気温が2014年のものよりも高かった。

2. 相対的な葉量, 気温および CO₂ フラックスの経時変化 図-1は、a) $NLR_{S\downarrow}$, b) NLR_{PAR} , c) LR_{NIRPAR} , d) 日平均気温, e) CO₂ フラックスの経時変化を示す。図-1において、白点は2014年, 黒点は2015年を示す。図-1e) について、丸印は日中(10~14時)における1日平均値, 菱印は5日平均値を示す。本研究における展葉日

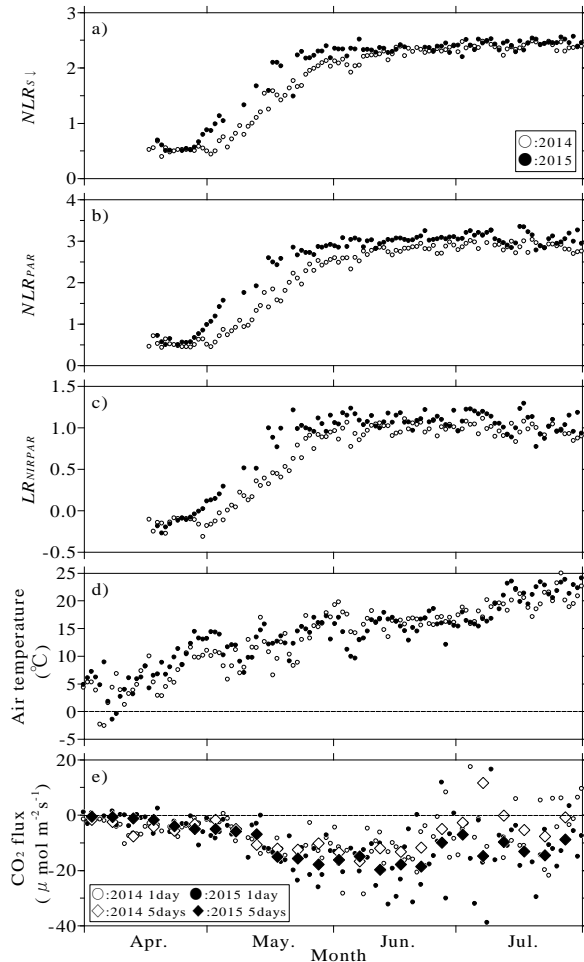


図-1. 2014年と2015年の4~7月における a) $NLR_{S\downarrow}$, b) NLR_{PAR} , c) LR_{NIRPAR} , d) 日平均気温 および e) CO₂ フラックスの経時変化

Fig. 1 Time series variation: a) $NLR_{S\downarrow}$; b) NLR_{PAR} ; c) LR_{NIRPAR} ; d) daily mean temperature; and e) CO₂ flux from April to July in 2014 and 2015. Open circles indicate each value in 2014. Filled circles indicate each value in 2015. Open diamonds represent the mean value over five days in 2014. Filled diamonds represent the mean value over five days in 2015.

表-1. 2014年および2015年の6~7月における3つの手法による葉の相対量の平均値

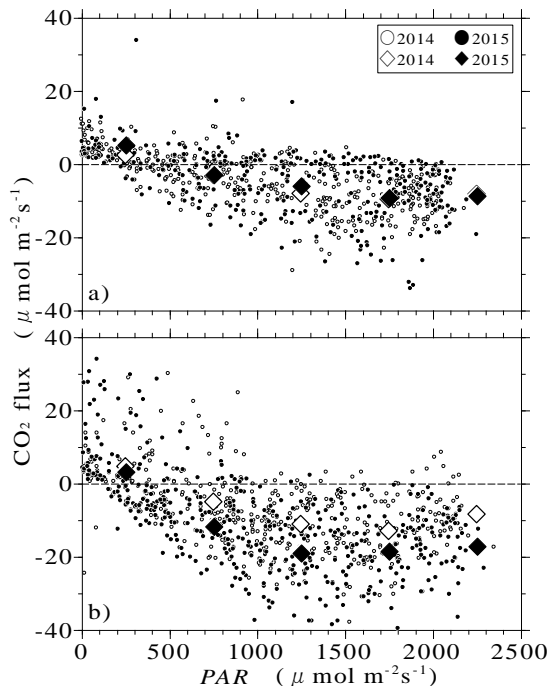
Table 1 Mean relative leaf area using three different methods from June to July in 2014 and 2015.

Year	$NLR_{S\downarrow}$	NLR_{PAR}	LR_{NIRPAR}
2014	2.30	2.80	0.97
2015	2.38	3.03	1.07

は、a) ~c) の3つの方法全てにおいて最低値から3日以上連続で上昇傾向が見られた日とした。その結果、2014年および2015年の展葉日は、それぞれ5月3日と4月26日となり、2015年の方が7日間早く展葉した。2014年と2015年の4~5月における平均気温は、それぞれ8.4°Cと9.9°Cであった。展葉日の違いは、2015年の4~5月における平均気温が、2014年のものよりも1.5°C高かったことが要因の1つであると考えられる。

図-1では、2014年と2015年の展葉日が7日間異なり、2014年と2015年の5月における相対的な葉量は明らかに異なるが、展葉直後の5月上旬において、2014年と2015年の下向きCO₂フラックスのデータに明瞭な違いは見られない。しかし、6月以降では、2015年の下向きCO₂フラックスは、2014年のものに比べ大きくなる傾向を示した。表-1は、2014年および2015年の6~7月における3つの手法による相対的な葉量の平均値を示した。表-1より、いずれの手法においても2015年の相対的な葉量が2014年のものを上回る結果となった。6~7月における平均日積算日射量および平均気温は、2014年では18.97 MJ m² day⁻¹および17.9°C、2015年では18.29 MJ m² day⁻¹および17.5°Cであり、両年において6~7月の日射量および気温に明瞭な違いは見られなかった。これらのことから、展葉がほぼ終了する6月以降において、2015年の下向きCO₂フラックスが2014年のものに比べ増加した要因として、日射量や気温の影響よりも、2015年の相対的な葉量が2014年のものを上回った影響が大きいと考えられる。

3. CO₂ フラックスと PAR の関係 図-2は2014年および2015年において、展葉後の日数を揃えたCO₂フラックスとPARの関係を示す。図-2a)は展葉日から30日間、図-2b)は展葉後31~60日におけるデータを示している。白印は2014年, 黒印は2015年を示し, 丸印は30分平均値, 菱印はPARが500 μmol m⁻² s⁻¹毎に区別したCO₂フラックスの平均値を示す。図-2a)において、PARの増加により下向きCO₂フラックスが増加する関係が見られるが、2014年と2015年のデータに明瞭な違いは見られない。このことは、展葉が早い場合と遅い場合でも、展葉速度はあまり変わらないことを意味す



図一 2. a) 展葉日から 30 日間, b) 展葉後 31~60 日における CO₂ フラックスと PAR の関係

Fig. 2 The relationship between PAR and CO₂ flux: a) 30 days from leaf expansion; and b) 31 to 60 days after leaf expansion. *Open circles* indicate half-hourly data in 2014. *Filled circles* indicate half-hourly data in 2015. *Open diamonds* represent mean values divided into PAR values every 500 μmol m⁻² s⁻¹ in 2014. *Filled diamonds* represent mean values divided into PAR values every 500 μmol m⁻² s⁻¹ in 2015.

る。図一 2b) では、PAR の増加に対して下向き CO₂ フラックスが図一 2c) のものよりも増加する傾向を示し、PAR が 1,000 μmol m⁻² s⁻¹ 以上では 2015 年の下向き CO₂ フラックスが 2014 年のものに比べて明らかに大きい傾向が見てとれる。この要因として、まず展葉後 31~60 日において、2015 年の相対的な葉量が 2014 年のものに比べ大きいことが影響していると考えられる (図一 1 a), b) および c)。その他に日中の CO₂ フラックスに影響を与える要素として、日射量、気温などが考えられるが、2014 年および 2015 年の展葉から 31~60 日における平均日積算日射量は、19.05 MJ m⁻² day⁻¹ および 19.23 MJ m⁻² day⁻¹ であり、両者に明瞭な差は見られなかった。しかし、この期間において PAR が 1,000 μmol m⁻² s⁻¹ 以上での平均気温は、2014 年では 16.1°C、2015 年では 15.0°C であり、両者を比較すると 2014 年の方が 2015 年よりも 1.1°C 高くなった。気温が高くなると土壌呼吸が増加し、日中の CO₂ フラックスに影響を与えることが想定されるため、同じ

期間において摩擦速度が 0.2 m s⁻¹ 以上での夜間 (21~3 時) の CO₂ フラックスの平均値を求めると、2014 年では 9.32 μmol m⁻² s⁻¹、2015 年では 8.24 μmol m⁻² s⁻¹ となった。この期間において、夜間の CO₂ フラックスを土壌呼吸と仮定しても、2014 年と 2015 年の日中の CO₂ フラックスの違いを土壌呼吸の影響によるものであると説明することは難しいと考えられる。以上のことから、本サイトにおける日中の下向き CO₂ フラックスは、展葉開始時期の違いや日射量および気温の影響よりも、相対的な葉量の影響を受けることが示唆された。

引用文献

- (1) BLACK, T. A., CHEN, W. J., BARR, A. G., ARAIN, M. A., CHEN, Z., NESIC, Z., HOGG, E. H., NEUMANN, H. H. and YANG, P. C. (2000) Increased carbon sequestration by a boreal deciduous forest in years with a warm spring. *Geophys Res Lett* **27**: 1271-1274.
- (2) FOKEN, T. and WICHURA, B. (1996) Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric For Meteorol* **78**: 83-105
- (3) 藤本征司 (2008) 気温変動が暖温帯域の樹木の葉フェノロジーに与える影響の予測. *保全生態学研究* **13**: 75-87
- (4) 小坂泉・瀧澤英紀・小林昌平・佐々木千鶴・中村貴雄・掛谷亮太・阿部和時 (2014) 冷温帯落葉広葉樹林における CO₂ フラックスの季節変化. *関東森林研究* **65**: 181-184.
- (5) 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.
- (6) 松井哲哉・田中信行・八木橋勉・小南裕志・津山幾太郎・高橋潔 (2009) 温暖化にともなうブナ林の適地の変化予測と影響評価. *地球科学* **14** No.2: 165-174
- (7) MCMILLEN, R.T. (1988) An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol* **43**: 231-245
- (8) TANAKA, K., TANTASIRIN, C. and SUZUKI, M. (2011) Interannual variation in leaf expansion and outbreak of a teak defoliator at a teak stand in northern Thailand. *Ecol Appl* **21**: 1792-1801
- (9) WEBB, E.K., PEARMAN, G.I. and LEUNING, R. (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Q J R Meteorol Soc* **106**: 85-100