

冷温帯落葉広葉樹林における CO<sub>2</sub> フラックスの季節変化

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(日大生物資源)

**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 CO<sub>2</sub> フラックスの季節変化を明らかにすることを目的とし、群馬県利根郡みなかみ町の日本大学演習林の高平山山頂(36°48'N, 139°02'E, 標高 985m)に設置された観測塔でフラックス観測を行った。測定は渦相関法により 2013 年 1 月から 7 月で行われた。CO<sub>2</sub> フラックスは樹木の着葉状態により明瞭な季節変化を示した。積雪期である 1 月から 3 月中旬において CO<sub>2</sub> フラックスの変動は小さいが、樹木が展葉する 5 月中旬から下向き CO<sub>2</sub> フラックスは徐々に増加する傾向を示し、7 月で約 -18.0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> となった。着葉期における日中の CO<sub>2</sub> フラックスの変動は、顕熱フラックスと潜熱フラックスの和に対する潜熱フラックスの比と高い相関を示した。

**キーワード**：CO<sub>2</sub> フラックス、冷温帯落葉広葉樹、渦相関法、山地森林、ブナ

**Abstract** : To investigate the seasonal variation in CO<sub>2</sub> flux from a cool-temperate deciduous forest (dominated by *Fagus crenata*), continuous flux measurements were made from a tower located on the summit of Mt. Takahira (36°48'N, 139°02'E, 985 m.a.s.l) at Nihon University Forest in Minakami-machi, Tone-gun, Gunma, Japan. The measurements were conducted using an eddy correlation method from January to July in 2013. The monthly average CO<sub>2</sub> flux showed clear seasonal variations depending on the foliar condition. The variation in CO<sub>2</sub> flux was small from January to the middle of March under snow-covered conditions. The downward CO<sub>2</sub> flux increased gradually with foliation from the middle of May, and was approximately -18.0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in July. In the daytime, the variation in CO<sub>2</sub> flux was highly correlated with the ratio of the latent heat flux to the sum of the sensible heat flux and the latent heat flux during the growing season.

**Keywords** : CO<sub>2</sub> flux, Cool-temperate deciduous forest, Eddy correlation method, Mountainous forest region, *Fagus crenata*

## I はじめに

陸域における炭素循環を解明することは、地球温暖化など地球規模での気候変動が生態系に及ぼす影響などを把握するうえで重要である。特に、森林は陸域の約 30% を占めているため、陸面から大気への熱・水・CO<sub>2</sub> の移動に大きな影響を与える。近年、大気-森林間の熱・水・CO<sub>2</sub> 移動に関して、空間の平均的なフラックスを精度高く測定できる渦相関法による連続測定が、様々な気候帯の森林において実施されている(例えば、1, 3, 7)。

本研究で対象とした冷温帯落葉広葉樹林では、日本の冷温帯を代表する樹種であるブナ(*Fagus crenata*)が優占樹種である。Matsui *et al.* (5)は、気候変化シナリオに基づく 2090 年代のブナ林の分布予想モデルを用いて日本全国スケールで予測した結果、本州太平洋側などでは全滅、本州日本海側では減少することを報告している。今後、日本に生存するブナが気候変動による環境変化に対してどのように適応するかについて、その実態を長期的にモニタリングすることは重要であると考えられるが、国内でブナ林を対象とした研究事例は極めて少ない(4, 9)。

そこで本研究では、群馬県北部のブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林を対象に、山地森林の山頂に建設された観測塔において渦相関法によるフラックス観測を実施し、熱・水・炭素循環に関する長期的なモニタリングを開始した。但し熱収支の視点では、純放射量と貯熱量の差が、渦相関法より求まる顕熱と潜熱の和と釣り合わないインバランス問題があり、CO<sub>2</sub> フラックスにも影響を与えている可能性が指摘されているが(1), そのデータ補正に有効なプロトコルは、未だ確立されていない(7)。そのため、本試験地における CO<sub>2</sub> フラックスの定量的な解析は今後の検討事項とし、本稿では冬季から夏季にかけての CO<sub>2</sub> フラックスの季節変化を明らかにすることを目的とし、日中および夜間における CO<sub>2</sub> フラックスの特徴を調べた。

## II 方法

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コナラ(*Quercus serrata*)などの落葉広葉樹が混在している。測定

Izumi KOSAKA, Hideki TAKIZAWA, Shohei KOBAYASHI, Chizuru SASAKI, Takao NAKAMURA, Ryota KAKETANI, Kazutoki ABE (College of Bioresource Sciences, Nihon University, 1866 Kameino, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan) Seasonal variation in CO<sub>2</sub> flux from a cool-temperate deciduous forest in Japan

は高高山の山頂(標高 985m)に建設された 6m の観測塔で行われ、その観測塔の先端に超音波風速温度計(CSAT3, Campbell)および Open-Path 型 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 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、CO<sub>2</sub> 濃度および H<sub>2</sub>O 濃度のデータをデータロガー(CR1000, Campbell)に記録し、渦相関法により CO<sub>2</sub> フラックス、顕熱および潜熱フラックスを算出した。なお、各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(6) による座標変換および Webb *et al.* (8)による密度補正を行った。今回の解析では、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。

観測塔の頂上に光量子センサー(PAR-02, Prede)および温湿度センサー(HMP155A, Vaisala)を設置し、PAR (photosynthetically active radiation; 光合成有効放射量)および気温を計測した。解析期間は 2013 年 1 月 4 日から 7 月 31 日である。

### III 結果および考察

1. CO<sub>2</sub> フラックスの日変化 図-1(a)~(e)は、各月において同時刻の 30 分データを集計して月平均した CO<sub>2</sub> フラックス、PAR、気温、風速および摩擦速度(以下、 $u_*$ )の日変化を示したものである。図中の実線は月平均値、エラーバーはその標準偏差を示す。

渦相関法で得られる CO<sub>2</sub> のフラックスは、鉛直上向き

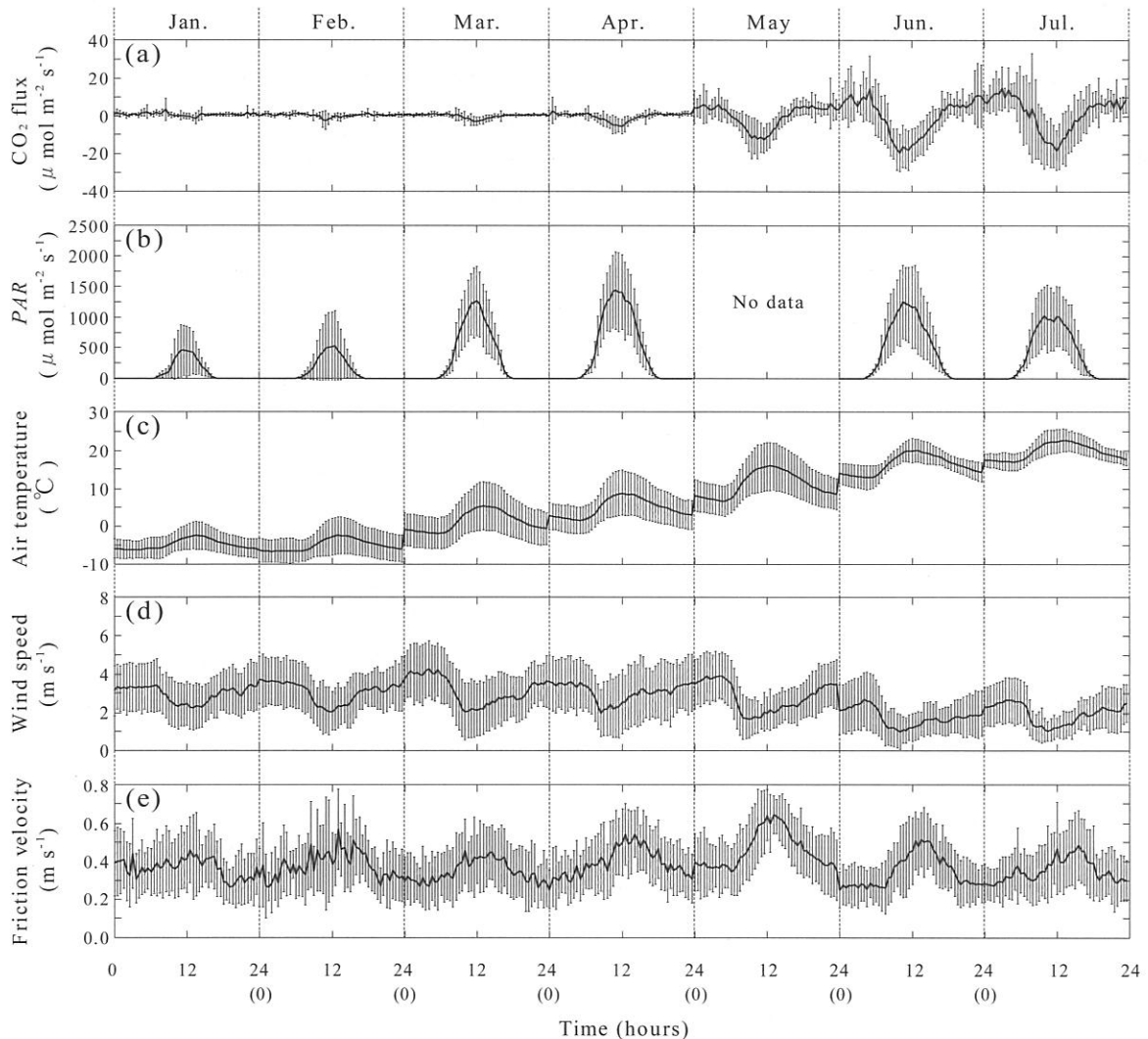


図-1. 月平均した(a)CO<sub>2</sub> フラックス, (b)光合成有効放射量(PAR), (c)気温, (d)風速および(e)摩擦速度( $u_*$ )の日変化

Fig.1 Monthly average diurnal changes in half-hourly (a) CO<sub>2</sub> flux, (b) photosynthetically active radiation(PAR), (c) air temperature, (d) wind speed and (e) friction velocity( $u_*$ ) from January to July in 2013. In the figure the top and bottom of the vertical bars indicate the standard deviation. The bold line shows the monthly average.

を正にとるため、正の値は森林群落から大気へのCO<sub>2</sub>の放出を、負の値は大気から森林群落への吸収を表している。図-1 (a)において、積雪期である1月から3月のCO<sub>2</sub>フラックスは、日中に若干負の値となるが、その変動幅は全体的に小さい。消雪期である4月のCO<sub>2</sub>フラックスは、日中において下向きに変化する傾向が多少みられた。樹木の展葉期となる5月から6月にかけて日中の下向きCO<sub>2</sub>フラックスは増大する傾向を示した。5月、6月および7月における下向きCO<sub>2</sub>フラックスの月平均値のピークは、それぞれ約-12.6 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、約-17.8 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> および約-18.0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> となり、7月で最も大きくなった。夜間における月平均CO<sub>2</sub>フラックスは、5月では約5.0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> となり、6月と7月では10.0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 程度となった。

図-1 (b)において、日中におけるPARのピークは1月から4月にかけて増加する傾向を示した。6月における日中のPARのピークは、7月のものに比べやや高い。5月については、測器の不具合によりPARのデータを取得できなかった。図-1 (c)における気温は明瞭な季節変化を示した。月平均気温は、積雪期の1月と2月において0°C以下となったが、3月から7月にかけて徐々に上昇する傾向がみられ、7月における日中の気温のピークは23°C程度となった。図-1 (d)における風速は、各月ともほぼ同様な日変化を示し、日中に弱く、夜間に強くなる傾向がみられた。3月から7月における風速は、午前5時頃から午前9時頃にかけて減少し、日中から夜間にかけて緩やかに増加する傾向を示した。図-1 (e)におけるu<sub>s</sub>は、日中に大きく、夜間に小さくなる傾向がみられ、風速の日変化のパターンと逆の傾向を示した。u<sub>s</sub>の分布範囲は0.2~0.6 m s<sup>-1</sup>程度であるが、5月における日中のu<sub>s</sub>は、他の月のものに比べやや大きい。

2. 日中におけるCO<sub>2</sub>フラックスの季節変化 図-2(a)~(d)は、降水量、CO<sub>2</sub>フラックス、顕熱フラックスと潜熱フラックスの和に対する潜熱フラックスの比(以下、IE/(H+IE))および気温の季節変化を示す。図-2(b)~(d)において、日中(10:00~14:00)の30分データを平均したものを灰点、そのデータを1週間平均したものを丸印で示し、エラーバーはその標準偏差を示す。

図-2において、日中における下向きCO<sub>2</sub>フラックスは、気温の上昇により3月後半から4月中旬にかけて、若干増加する傾向がみられるが、4月中旬から4月下旬において減少する傾向がみられた。これは、この期間において気温が約8°C、急激に低下したことが影響していると考えられる。5月初旬において気温が約11°Cから約19°Cに上昇した後、下向きCO<sub>2</sub>フラックスとIE/(H+IE)

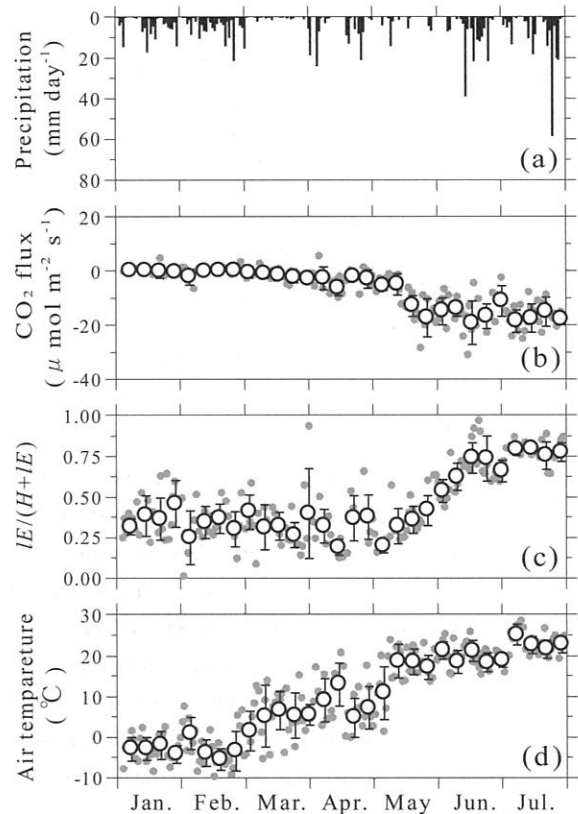


図-2. (a)降水量, (b)CO<sub>2</sub>フラックス, (c)潜熱フラックスと顕熱フラックスの和に対する潜熱フラックスの比(IE/(H+IE))および(d)気温の季節変化

Fig.2 Seasonal changes in (a) daily precipitation, (b) daytime mean CO<sub>2</sub> flux, (c) daytime mean the ratio of the latent heat flux to the sum of the sensible heat flux and the latent heat flux (IE/(H+IE)) and (d) daytime mean air temperature from January to July in 2013. Gray dots indicate the daytime (between 1000 and 1400h) mean values. White circles indicate weekly mean values during the daytime. Error bars represent standard error.

の急激な増加がみられた。これは樹木の開葉とともに、光合成の活性により森林群落のCO<sub>2</sub>の吸収速度が増加し、HよりもIEに分配される割合が徐々に増加したためだと考えられる。6月初旬において、IE/(H+IE)は増加する傾向がみられるが、下向きCO<sub>2</sub>フラックスはやや減少する傾向がみられた。比較的まとまった降雨が連続する6月中旬以降において、CO<sub>2</sub>フラックスの変動はIE/(H+IE)と高い相関を示した。

3. 夜間におけるCO<sub>2</sub>フラックスと気温の関係 図-3は、夜間(21:00~03:00)における気温とCO<sub>2</sub>フラックスの関係を示す。図-3において、u<sub>s</sub>が0.2 m s<sup>-1</sup>未満のものを+印、u<sub>s</sub>が0.2 m s<sup>-1</sup>以上のものを灰点で示す。図-3にお

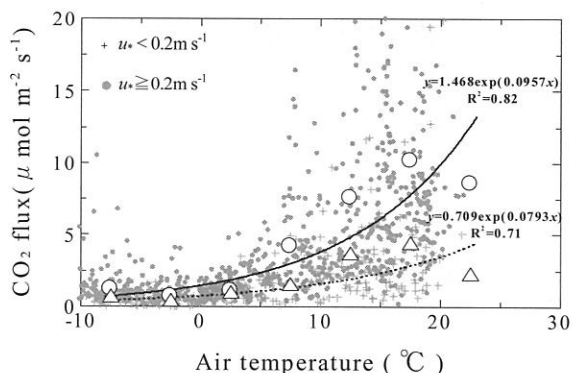


図-3. 夜間(21:00-03:00)における気温と CO<sub>2</sub> フラックスの関係

Fig.3 Relationship between air temperature and CO<sub>2</sub> flux during the nighttime (between 2100 and 0300h) from January to July in 2013. Gray dots and cross marks are using a half-hourly data. White circles: average value of CO<sub>2</sub> flux at each air temperature class using  $u_* \geq 0.2 \text{ m s}^{-1}$  data. White triangles: average value of CO<sub>2</sub> flux at each air temperature class using  $u_* < 0.2 \text{ m s}^{-1}$  data. Solid line shows the fitted curve for white circle data. Dotted line shows the fitted curve for white triangle data.

る気温と CO<sub>2</sub> フラックスの関係では、気温の上昇にともなって上向き CO<sub>2</sub> フラックスが緩やかに増加する傾向がみとれるが、ばらつきが大きい。そのため、気温について 5°C ごとに区分けしてまとめた平均 CO<sub>2</sub> フラックスを用い、 $u_* \geq 0.2 \text{ m s}^{-1}$  のものを丸印で、 $u_* < 0.2 \text{ m s}^{-1}$  のものを三角印で示し、それぞれの指数近似曲線および近似式を示した。図-3 において、夜間における上向き CO<sub>2</sub> フラックスは  $u_*$  による影響を受け、 $u_* \geq 0.2 \text{ m s}^{-1}$  の場合には、気温の上昇に伴い上向き CO<sub>2</sub> フラックスの増加がみられるが、 $u_* < 0.2 \text{ m s}^{-1}$  の場合には、気温上昇による上向き CO<sub>2</sub> フラックスの増加はあまりみられない。この結果は、埼玉県川越市の概ね平坦な地形における落葉広葉樹林(コナラ林)で測定された結果(10)と同様であり、樹木や土壌などから放出される CO<sub>2</sub> が林内に貯留し、林外への CO<sub>2</sub> の放出量が減少したと考えられる。

#### 引用文献

(1) BALDOCCHI, D., FALGE, E., GU, L., OLSON, R., HOLLINGER, D., RUNNING, S., ANTHONI, P., BERNHOFER, C., DAVIS, K., EVANS, R., FUENTES, J., GOLDSTEIN, A., KATUL, G., LAW, B., LEE, X., MALHI, Y., MEYERS, T., MUNGER, W., OECHEL, W., PAW, UKT., PILEGAARD, K., SCHMID, HP., VALENTINI, R., VERMA, S., VESALA, T., WILSON, K. and WOFSY, S.

(2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bull. Am Meteorol. Soc.*: **82**, pp.2415-2434

(2) FOKEN, T. and WICHURA, B. (1996) Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. For. Meteorol.*: **78**, pp.83-105

(3) HIRATA, R., SAIGUSA, N., YAMAMOTO, S., OHTANI, Y., IDE, R., ASANUMA, J., GAMO, M., HIRANO, T., KONDO, H., KOSUGI, Y., LI, SG., NAKAI, Y., TAKAGI, K., TANI, M. and WANG, H. (2008) Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. *Agric. For. Meteorol.*: **148**, pp.761-775

(4) 石田祐宣・伊藤大雄・松浦友一郎 (2009) 白神山地フラックスタワーの概要と気象概況 (2008年7月~10月). *白神研究*: **6**, pp.18-25

(5) MATSUI, T., YAGIHASHI, T., NAKAYA, T., TAODA, H., YOSHINAGA, S., DAIMARU, H. and TANAKA, N. (2004) Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. *J. Veg. Sci.*: **15**, pp.605-614

(6) MCMILLEN, RT. (1988) An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol.*: **45**, pp.231-245

(7) SAIGUSA, N., YAMAMOTO, S., HIRATA, R., OHTANI, Y., IDE, R., ASANUMA, J., GAMO, M., HIRANO, T., KONDO, H., KOSUGI, Y., LI, SG., NAKAI, Y., TAKAGI, K., TANI, M. and WANG, H. (2008) Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO<sub>2</sub> flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. *Agric. For. Meteorol.*: **148**, 700-713

(8) WEBB, EK., PEARMAN, GI. and LEUNING, R. (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Q J R Meteorol. Soc.*: **106**, pp.85-100

(9) YASUDA, Y., SAITO, T., HOSHINO, D., ONO, K., OHTANI, Y., MIZOGUCHI, Y. and MORISAWA, T. (2012) Carbon balance in a cool-temperate deciduous forest in northern Japan: seasonal and interannual variations, and environmental controls of its annual balance. *J. For. Res.*: **17**, pp.253-267

(10) 安田幸生・渡辺力・大谷義一・岡野通明・中山敬一 (1998) 落葉広葉樹林上における CO<sub>2</sub> フラックスの季節変化. *水文学会誌*: **11**, pp.575-585