

## 冷温帯落葉広葉樹林における日中と夜間のNEEの年々変動

### Interannual variation in daytime and nighttime net ecosystem exchange from a cool-temperate deciduous broad leaved forest

阿久津瞳<sup>\*1</sup>・小坂泉<sup>\*1</sup>・小林昌平<sup>\*1</sup>・本崎樹<sup>\*1</sup>・瀧澤英紀<sup>\*1</sup>・阿部和時<sup>\*1</sup>  
Hitomi AKUTSU<sup>\*1</sup>, Izumi KOSAKA<sup>\*1</sup>, Shouhei KOBAYASHI<sup>\*1</sup>, Tatsuki HONZAKI<sup>\*1</sup>,  
Hideki TAKIZAWA<sup>\*1</sup> and Kazutoki ABE<sup>\*1</sup>

\* 1 日本大学生物資源科学部

Coll. Bioresource Sci., Nihon Univ., Fujisawa 225-0880

**要旨：**本研究はブナ (*Fagus crenata*) が優占する冷温帯落葉広葉樹林における NEE (Net ecosystem exchange ; 生態系純生産量) の年々変動を明らかにすることを目的とする。調査は 2012 年 7 月から 2014 年 8 月において、群馬県内の日本大学水上演習林内の山頂に建設された 6 m の観測タワーで行った。渦相関法をもとに、日中と夜間における NEE を算定した。日中における NEE は明瞭な季節変化を示し、樹木が展葉する 5 月中旬から負の値が増加した。そのピークは 6 月から 7 月で、最大  $-30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  程度であった。夏季後半における日中の NEE は、負の値から正の値に徐々にシフトする傾向がみられた。夜間における NEE は、着葉期である 5 月から 10 月では  $3 \sim 15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  とばらつきが大きいが、5 月から 8 月にかけてやや増加する傾向を示した。

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

**Abstract :** To investigate the inter-annual variation in NEE (Net ecosystem exchange) from a cool-temperate deciduous broad leaved 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. Daytime and nighttime NEE were calculated using an eddy correlation method from July in 2012 to August in 2014. Daytime NEE showed clear seasonal variations, and the negative value of daytime NEE increased gradually with foliation from the middle of May. The maximum value of daytime NEE indicated approximately  $-30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  from June to July. In the late summer, daytime NEE tended to shift from a negative value to a positive value. Nighttime NEE had much dispersion ( $3 \sim 15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) from May to October, however it tended to slightly increase from May to August.

**Keywords :** CO<sub>2</sub> flux, NEE, cool-temperate deciduous broad leaved forest, eddy correlation method, *Fagus crenata*

#### I はじめに

陸域生態系における炭素循環を解明することは、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。最近の研究では、世界各地の試験地で観測された NEE (Net ecosystem exchange ; 生態系純生産量) の年間量や季節変化について、気候帯や植生タイプで整理され（例えば、1, 4）、Bonan（2）は、将来的な気候変動に対して各森林帶で CO<sub>2</sub> が吸収もしくは放出されるかについて議論している。Matsui *et al.*（7）は、気候変動に伴う国内のブナ林の生存分布を予測し、本州では著しく減少する可能性があることを報告している。しかし、その変化は急激に起こるわけではないので、エルニーニョ現象等に代表される年々変動に対して森林がどのように応答するかを、正確な現地観測に

に基づき、実証的に明らかにする必要があると考える。

本研究では、観測事例の少ないブナ林において、森林群落レベルでの熱・水・CO<sub>2</sub> フラックス観測を実施し、長期的なモニタリングを開始した（6）。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顯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（10）。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行わず、本稿では、分布確率が著しく減少する可能性のあるブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林において観測された 2 年間の連続データに基づき、陸域生態系における炭素交換量の重要な指標である NEE を算定し、NEE の年々変動の特徴を明

らかにすることを目的とする。

## 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 ( $36^{\circ}48'N$ ,  $139^{\circ}02'E$ , 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する 50~60 年生の二次林であり、葉面積指数は約  $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  である (9)。測定は高平山の山頂 (標高 985m) に建設された 6 m の観測タワーで行われ、その観測塔の先端に 3 次元超音波風速温度計 (CSAT3, Campbell) および Open-Path 型  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  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、 $\text{CO}_2$  濃度および  $\text{H}_2\text{O}$  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  $\text{CO}_2$  フラックス、顯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 (8) による座標変換および Webb *et al.* (12) による密度補正を行った。今回の解析では、Foken and Wichura (5) 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ので省いた。夜間の  $\text{CO}_2$  フラックスは、大気の状態が安定になると、森林内の空気と森林上の空気の交換が不活発になり、土壤などから放出される  $\text{CO}_2$  の一部は、林内に  $\text{CO}_2$  が貯留し、地表面に沿って標高の低い方向へ流出する傾向があり、この移流がフラックスを過小評価してしまう可能性がある。このため、解析では  $u_* \geq 0.2 \text{ m s}^{-1}$  のデータを使用した (6)。解析期間は 2012 年 7 月 6 日から 2014 年 8 月 30 日である。NEE は樹冠上で測定された  $\text{CO}_2$  フラックスと、林内の  $\text{CO}_2$  貯留量を足すことで求められ、NEE を次式で算出した (3)。

$$NEE = Fc + Fs \quad (1)$$

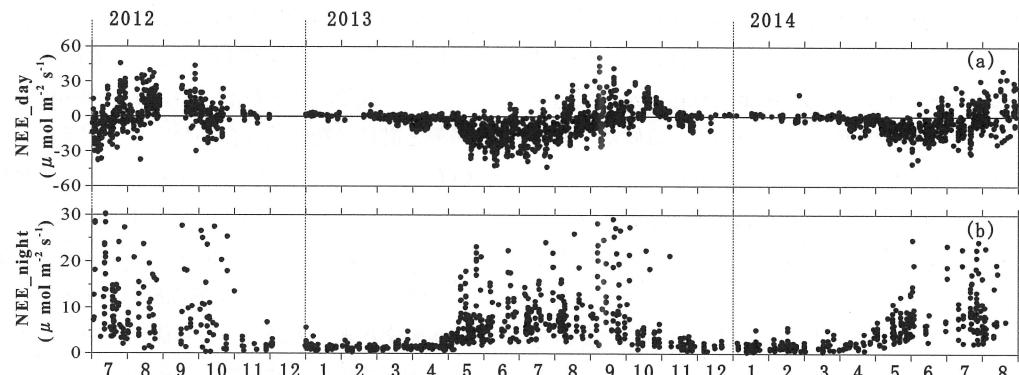


図-1. a) 日中における NEE, (b) 夜間における NEE の季節変化 (2012/7~2014/8)

Fig.1 Seasonal changes in half-hourly (a) daytime NEE, (b) nighttime NEE from July in 2012 to August in 2014.

ここで、 $Fc$  はタワー上で測定されたフラックスで、 $Fs$  は 30 分間での  $\text{CO}_2$  貯留変化量である。本研究において、 $Fs$  は次式によって求めた (3)。

$$Fs = \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot \Delta z \quad (2)$$

ここで、 $\Delta t$  は時間 (sec) を表し、 $\Delta c$  は  $\text{CO}_2$  濃度、 $\Delta z$  は  $\text{CO}_2$  フラックスの測定高度であり、本研究において  $\Delta z$  は、観測タワーの高度 6 m を用いて算出した。渦相関法で得られる  $\text{CO}_2$  のフラックスは、鉛直上向きを正にとるため、正の値は森林群落から大気への  $\text{CO}_2$  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。

## III 結果および考察

**1. NEE の季節変化** 図-1 は、2012 年 7 月から 2014 年 8 月における (a) 日中 (10:00~14:00) および (b) 夜間 (21:00~3:00) の NEE の季節変化を示す。日中における NEE は、明瞭な季節変化を示し、5 月から 7 月にかけて  $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以下に多く分布し、最大で  $-30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  程度となった。夏季後半における日中の NEE は、負の値から正の値に徐々にシフトする傾向がみられた。冬季における日中の NEE は、 $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  付近の値をとり、その変動は少ない。

夜間における NEE は、着葉期の 5 月から 10 月下旬における  $3 \sim 15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  とばらつきが大きく、明瞭なピークは見られないものの、5 月から 8 月にかけてやや増加する傾向を示した。1~3 月の積雪期における夜間の NEE は、気温の低下と積雪の影響からその変動は少なく、 $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  付近になる季節変化がみられた。

**2. 日中における NEE と気象要素の季節変化** 図-2 (a) ~ (d) は、降水量、日中平均気温、顯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、 $\lambda E/(H + \lambda E)$ ) および日中における NEE の季節変化を示す。図-2 (a) は 1 日の積算降水量を示して

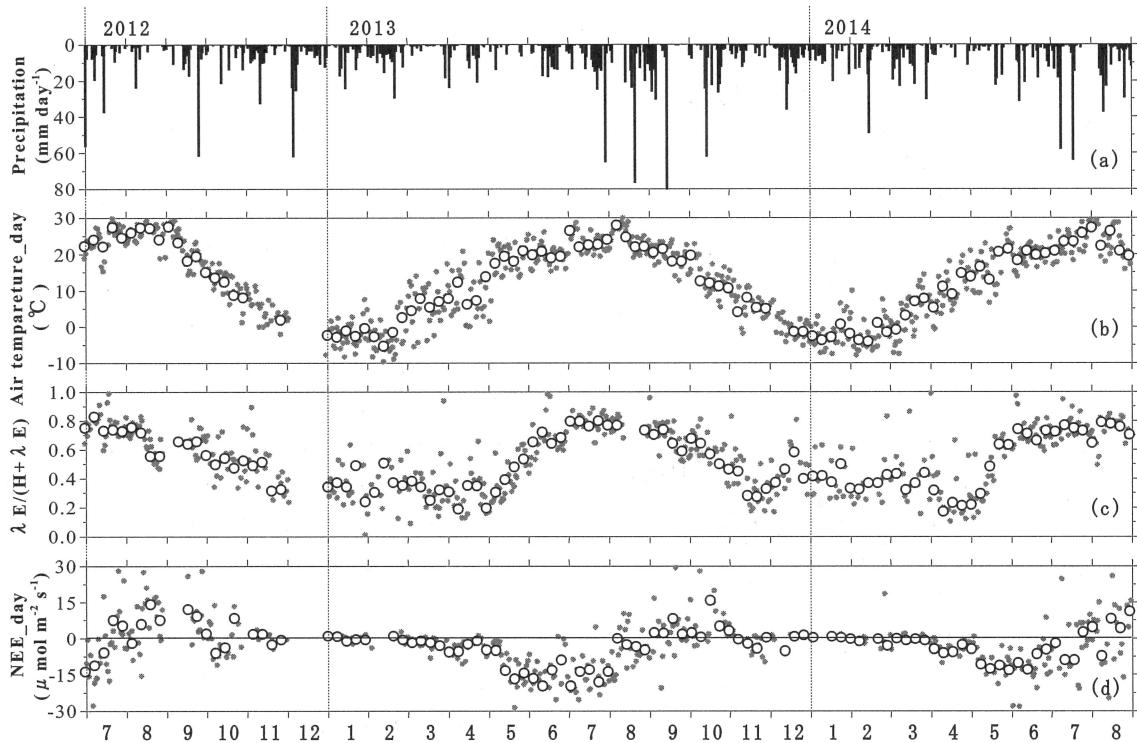


図-2. (a) 降水量, (b) 日中における平均気温, (c) 潜熱フラックスと顯熱フラックスの和に対する潜熱フラックスの比 ( $\lambda E/(H+\lambda E)$ ) および (d) 日中における NEE の季節変化

Fig.2 Seasonal changes in (a) daily precipitation, (b) daytime mean air temperature, (c) daytime mean the ration of the latent heat flux to the sum of the sensible heat flux and the latent heat flux ( $\lambda E/(H+\lambda E)$ ) and (d) daytime mean NEE. Gray dots indicate the daytime (between 1000 and 1400h) mean values. White circles indicate weekly mean values.

おり、(b)～(d)においては、日中(10:00～14:00)の30分データを平均した値を灰点、そのデータを1週間平均した値を丸印で示す。図-2(a)に示す降水量の各月の積算値は、2012年では7月195mm、8月51mm、2013年では7月155.5mm、8月267mm、2014年では7月204.5mm、8月193.5mmであった。図-2(b)に示す日中の平均気温は明瞭な季節変化を示した。平均気温は冬季の12月から2月において0°C以下となったが、3月から8月のピークにかけて、徐々に上昇する傾向がみられ、展葉期である5月頃には20°C程度となり、8月におけるピークは28°C程度であった。図-2(c)における $\lambda E/(H+\lambda E)$ は、葉が芽吹きはじめる5月頃から上昇し、6月から7月にかけてピークとなり、徐々に下降する季節変化がみられた。図-2(d)における日中のNEEは、5月初旬から潜熱の割合が大きくなるとともに、NEEの負の値も増加し、気温がピークとなる8月以前の6月から7月にかけてピークとなった。その後、徐々に負の値から正の値になる季節変化がみられた。

年度別に着葉期におけるNEEを比較すると、2012年および2014年の8月におけるNEEの値は、両者とも正の値になっているが、2013年は負の値であることがわか

る。また、2012年8月における降雨積算量の51mmや、2014年7月下旬から8月初旬にかけての13日間の無降雨の期間など、降水量が減少すると潜熱の割合が減少する傾向を示した。

**3. 日中におけるNEEと $\lambda E/(H+\lambda E)$ の関係** 図-3は、5月～8月の期間において日中の(a)  $\lambda E/(H+\lambda E)$ および(b) NEEの1週間平均を示したもので、2013年のものを黒丸、2014年のものを白丸で示した。

5月から6月にかけては、 $\lambda E/(H+\lambda E)$ の増加に伴い、つまり潜熱の占める割合が大きくなるとともに、NEEの負の値が増加する傾向がみられる。2013年と2014年のNEEを比較すると、2014年では負から正の値へシフトする時期が6月後半であり、2013年のものに比べ早いことがみてとれる。7月から8月において、 $\lambda E/(H+\lambda E)$ は0.7程度であり、概ね一定であるのに対し、NEEの負の値が徐々に減少する傾向を示した。この傾向は、アメリカ北部の広葉樹混交林での報告(II)と同様であった。本試験地は、土層厚の少ない山頂付近であり、優占樹種であるブナの根系は深度1m程度において水平方向に多く分布するため、表層の土壤水分の影響を受けた可能性や、潜熱の占める割合が大きい夏季において、蒸散が盛んに

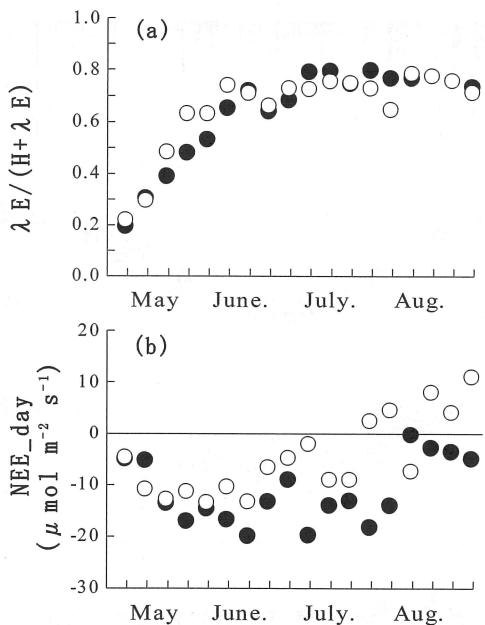


図-3. 5月～8月における1週間平均した(a)  $\lambda E/(H+\lambda E)$  , (b) 日中のNEEの季節変化

Fig.3 Seasonal changes in weekly average (a)  $\lambda E/(H+\lambda E)$  and (b) daytime NEE from May to August. Black circles, 2013; White circles, 2014.

行なわれているにもかかわらず、光合成の活性が低下した可能性があると考えられる。

#### 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, U. K. T., PILEGAARD, K., SCHMID, H. P., 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** : 2415-2434
- (2) BONAN, G.B. (2008) Forests and climate change : forcings, benefits of forests. Science **320**: 1444-1449
- (3) CARRARA, A., JANSSENS, I., YUSTE, J.C. and CEULEMANS, R. (2004) Seasonal changes in photosynthesis, respiration and NEE of a mixed temperate forest. Agric For Meteorol **126** : 15-31
- (4) FALGE, E., TENHUNEN, J., BALDOCCHI, D., AUBINET, M., BAKWIN, P., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C., BONNEFOND, J.M., BURBA, G., CLEMENT, R., DAVIS, K.J., ELBERS, J.A., FALK, M., GOLDSTEIN, A.H., GRELLÉ, A., GRANIER, A., GRÜNWALD, T., GUMUNDSSON, J., HOLLINGER, D., JANSSENS, I.A., KERONEN, P., KOWALSKI, A.S., KATUL, G., LAW, B.E., MALHI, Y., MEYERS, T., MONSON, R.K., MOORS, E., MUNGER, J.W., OECHEL, W., KYAW, T.P.U., PILEGAARD, K., RANNIK, Ü., REBMANN, C., SUYKER, A., THORGEIRSSON, H., TIRONE, G., TURNIPSEED, A., WILSON, K. and WOFSY, S. (2002) Phase and amplitude of ecosystem carbon release and uptake potentials as derived from FLUXNET measurements. **113** : 75-95
- (5) FOKEN, T. and WICHURA, B. (1996) Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric For Meteorol **78** : 83-105
- (6) 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) 冷温带落葉広葉樹林におけるCO<sub>2</sub>フラックスの季節変化. 関東森林研究 **65** : 181-184
- (7) 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** : 605-614
- (8) MCMILLEN, R. T. (1988) An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain . Boundary-Layer Meteorol **43** : 231-245
- (9) 野中翔平・小坂泉・川口美優・瀧澤英紀・阿部和時 (2015) 冷温带落葉広葉樹林におけるLAIの季節変化. 関東森林研究 **66** : 107-110
- (10) SAIGUSA, N., YAMAMOTO, S., HIRATA, R., OHTANI, Y., IDE, R., ASANUMA, J., GAMO, M., HIRANO, T., KONDO, H., KOSUGI, Y., LI, S.G., 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
- (11) SCHMID, H. P., SU, H.B., VOGEL, C. S. and CURTIS, P. S. (2003) Ecosystem-atmosphere exchange of carbon dioxide over a mixed hardwood forest in northern lower Michigan. J Geophys Res **108** (D14) :4417
- (12) 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