

冷温帯落葉広葉樹林における熱フラックスの季節変化

Seasonal variation in heat fluxes from a cool-temperate deciduous broadleaved forest

高木麻衣子^{*1}・小坂泉^{*1}・佐々木千鶴^{*1}・岡村源太郎^{*1}・滝澤英紀^{*1}・阿部和時^{*1}
Maiko TAKAGI^{*1}, Izumi KOSAKA^{*1}, Chizuru SASAKI^{*1}, Gentaro OKAMURA^{*1}, Hideki TAKIZAWA^{*1}
and Kazutoki ABE^{*1}

* 1 日本大学生物資源科学部

Coll. Bioresource Sci., Nihon Univ., Fujisawa 252-0880

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いて熱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 2012 年 7 月から 2014 年 8 月で行われた。熱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。潜熱フラックスは着葉期である 6 月から 10 月において顕熱フラックスを上回り、落葉後である 11 月から 5 月において顕熱フラックスを下回った。着葉期において、飽差が小さいときに群落コンダクタンスは大きい傾向を示した。

キーワード：顕熱フラックス、潜熱フラックス、冷温帯落葉広葉樹、渦相関法、山地森林

Abstract : To investigate the seasonal variation in heat fluxes from a cool-temperate deciduous broadleaved 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 July in 2012 to August in 2014. The monthly average heat fluxes showed clear seasonal variations depending on the foliar condition. Latent heat flux exceeded sensible heat flux from June to October (foliated period), was lower than sensible heat flux from November to May (leafless period). During the foliated period, canopy conductance was large when vapor pressure deficit was low.

Keywords : sensible heat flux, latent heat flux, cool-temperate deciduous broadleaved forest, eddy correlation method, mountainous forest region

I はじめに

陸域生態系における熱・水・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。近年、大気一植生間の熱・水・CO₂ 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, 10）。

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.* (8) は、気候変動に伴う気温上昇に対して 2090 年代の本州におけるブナ林の分布する確率が著しく低下することを報告している。しかしながら、本州のブナ林において群落レベルで大気一植生間の熱・水・CO₂ 交換を継続的に計測しているサイトは極めて少ない (4, 12)。

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、2012 年 7 月から山地森林の山

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ている (6)。但し熱収支の視点では、純放射量（以下 Rn ）と貯熱量（以下 G ）の差が、渦相関法より求まる顕熱フラックス（以下 H ）と潜熱フラックス（以下 IE ）の和と釣り合わない熱収支インバランス問題がある。本試験地における 2014 年 4 月から 8 月の熱収支インバランス率 $((H+IE)/(Rn-G))$ に関して、明瞭な季節変化はみられないが、その平均値は 1.2 程度となり、世界中の他の試験地と異なる傾向を示したため、現在、この原因について山地森林における風の流れと熱収支の関係について解析している (7)。このため、熱フラックスの定量的な解析は今後の検討事項とし、本稿では熱フラックスの季節変化の特徴を明らかにすることを目的とした。

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 ($36^{\circ}48'N$, $139^{\circ}02'E$, 標高 650-985m) で、優占樹種はブナ (*F. 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。測定は高平山の山頂 (標高 985m) に建設された 6 m 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 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析器 (EC150, Campbell) を設置し、10 分の測定間隔で出力される 3 次元風速、気温、 CO_2 濃度および H_2O 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、顯熱および潜熱フラックスを算出した。

$$H = \rho C_p \bar{w}' \theta' \quad (1)$$

$$IE = \rho C_p \bar{w}' q' \quad (2)$$

ここで、 H は水の気化潜熱 (J kg^{-1})、 ρ は空気の密度 (kg m^{-3})、 C_p は定圧比熱 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 w' は風速の鉛直方向の変動成分、 θ' は気温の変動成分、 q' は比湿の変動成分、 $\bar{\cdot}$ は時間平均を表す。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 (9) による座標変換および Webb *et al.* (11) 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ので省いた。観測塔の頂上に温湿度センサー (HMP155A, Vaisala) を設置し、気温、湿度を計測した。解析期間は 2012 年 7 月 6 日から 2014 年 8 月 30 日である。また、純放射量に関しては、2013 年 7 月 6 日から 2014 年 4 月 15 日までは高平山中腹の 6 m のタワーに設置された放射収支計 (CNR1, Kipp&Zonen)

を用い、算出した。放射収支計 (NR01, Hukseflux) を新たに観測塔の頂上に 2014 年 4 月 16 日から設置し、10 分の測定間隔で出力されるデータをデータロガー (CR1000, Campbell) に記録し、純放射量を測定した。平均化時間は 30 分である。2014 年 6 月 1 日から TDR 土壤水分センサー (C-CS616, Campbell) を 10, 30, 60, 100cm の 4 カ所に埋め、土壤水分は 30 分の瞬間値を使用した。本研究では、Penman-Monteith 式の群落抵抗 (rc) の逆数を群落コンダクタンス (gc) とし、以下の式で算出した。

$$rc = \frac{ra\Delta(Rn - G) + \rho Cp(es(Ta) - ea)}{\gamma lE} - (1/\gamma + 1)ra \quad (3)$$

$$gc = 1/rc \quad (4)$$

ここで、 IE は潜熱フラックス (W m^{-2})、 $Rn-G$ は有効放射 (W m^{-2})、 rc は群落抵抗 (s m^{-1})、 ρ は空気の密度 (kg m^{-3})、 Cp は空気の定圧比熱 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 $es(Ta)$ は気温 (Ta) に対する飽和水蒸気圧 (hPa)、 ea は水蒸気圧 (hPa)、 ra は空気力学的抵抗 (s m^{-1})、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の傾き (hPa K^{-1})、 γ は乾湿計定数 (hPa K^{-1}) を表す。

III 結果および考察

1. 熱フラックスの日変化 図-1 (a) ~ (c) 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純放射量、潜熱フラックス、顯熱フラックスの日変化を示したものである。図中の点は月平均値、エラーバーはその標準偏差を示す。

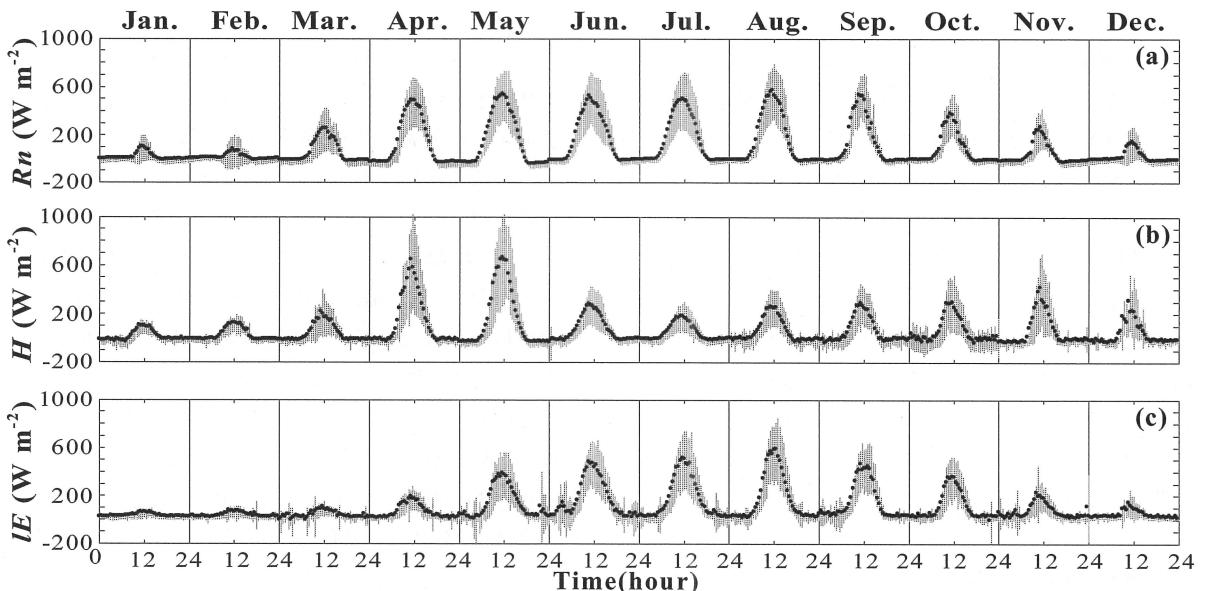


図-1. 月平均した (a) 純放射量 (Rn)、(b) 顯熱フラックス (H)、(c) 潜熱フラックス (IE) の日変化

Fig.1 Monthly average diurnal variation in half-hourly (a) net radiation(Rn)，(b) sensible heat flux(H) and (c) latent heat flux(IE)。In the figure the top and bottom of the vertical bars indicate the standard deviation. The dot shows the monthly average.

図-1 (a)において、 Rn からみると、夏季に最大値約500(W m^{-2})を示し、冬季に最小値約100(W m^{-2})を示した。これは、季節により入射する日射量、太陽高度が変化することが影響していると考えられる。

図-1 (b), (c)において、 IE と H を比較すると、6月に IE が H を上回り、11月に H が IE を上回ることが分かった。これは、夏季は蒸散が盛んに行なわれ、秋から冬にかけて落葉に伴い蒸散が行われなくなったことを示している。積雪期である1, 2月における Rn , IE および H の変動幅は全体的に小さい。

2. 潜熱フラックスの熱収支に占める割合の季節変化

図-2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(以下、 $IE/(H+IE)$)の季節変化を示す。

図-2において $IE/(H+IE)$ は、夏季に高く、冬季に低くなる明瞭な季節変化を示した。 $IE/(H+IE)$ の最大値は7, 8月頃でおよそ0.77となり、その最小値は4月頃でおよそ0.19となった。潜熱フラックスの占める割合は夏季でピークとなり、落葉に伴い減少し、冬季の $IE/(H+IE)$ は0.2~0.4程度で推移した。葉が展葉する5月頃から潜熱フラックスの占める割合は大きくなり、その後の $IE/(H+IE)$ は0.6~0.8程度で推移した。

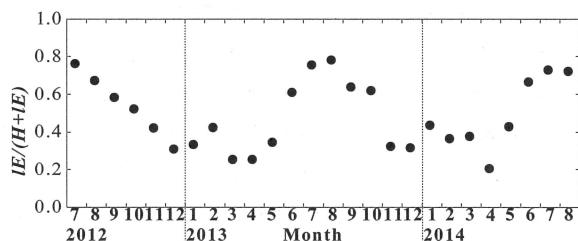


図-2. 潜熱フラックスと顕熱フラックスの和に対する潜熱フラックスの比($IE/(H+IE)$)の季節変化

Fig.2 Seasonal variation in daytime mean the ratio of the latent heat flux to the sum of the sensible heat flux and the latent heat flux ($IE/(H+IE)$).

3. 群落コンダクタンスと一般気象の季節変化

図-3は、2014年4月17日から8月30日までの群落コンダクタンスと一般気象の季節変化を示す。図-3において、上から(a)降水量の日積算量、(b) Rn 、(c)気温、(d)飽差、(e) $IE/(H+IE)$ 、(f)群落コンダクタンス(gc)、(g)土壤水分を示している。土壤水分は4深度あり、実線が深度10cm、点線が深度30cm、長点線が深度60cm、2点鎖線が深度100cmを表し、6月1日から測定を開始した。但し、6月24日から27日の4日間は測器不良のためデータが欠測している。図-3 (b)

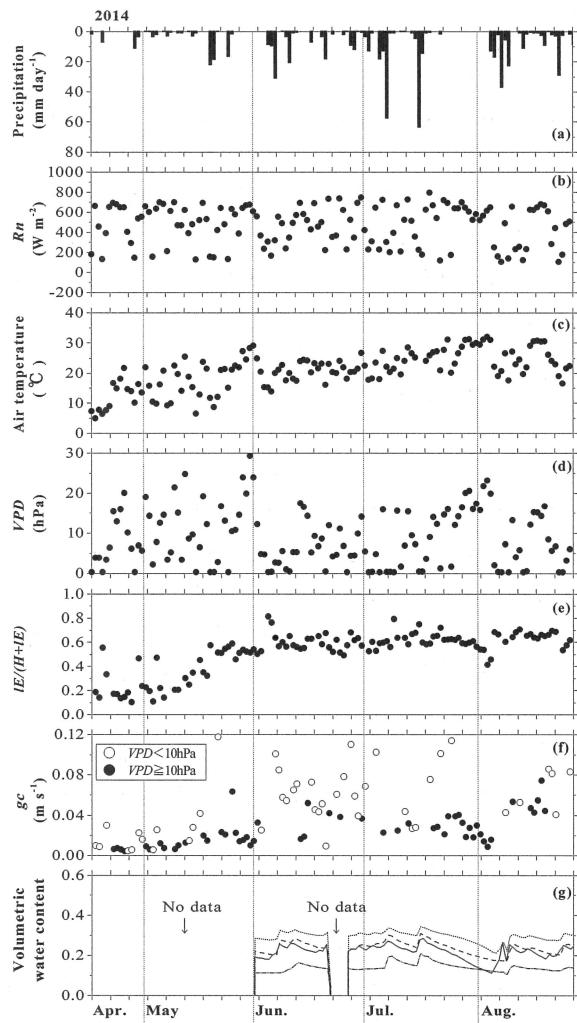


図-3. (a) 降水量、(b) 純放射量、(c) 気温、(d) 饱差、(e) 潜熱フラックスと顕熱フラックスの和に対する潜熱フラックスの比、(f) 群落コンダクタンス、(g) 土壤水分の季節変化

Fig.3 Seasonal variations in (a) daily precipitation, (b) net radiation, (c) air temperature, (d) vapor pressure deficit(VPD), (e) the ratio of the latent heat flux to the sum of the sensible heat flux and the latent heat flux($IE/(H+IE)$), (f) canopy conductance (gc) and (g) volumetric water content.

～(f)において、日中(10:00～14:00)の30分データを平均したものを黒点で示す。図-3 (f)についてのみ、飽差が10hPa未満のものを白点、飽差が10hPa以上のものを黒点で示した。

図-3 (a)において、この期間中の降水量は628.5(mm)だった。また、7月25日～8月6日までの13日間が無降雨期間であった。図-3 (b)において、 Rn は無降雨時では、約600(W m^{-2})前後、梅雨の6～7月で

は、ばらつきが大きくなつた。図-3 (c)において、気温は、4月中旬では10°C以下で低くが、6月では20°C前後を示し、7月および8月では20~30°Cの間を推移した。図-3 (d)において、飽差は Rn と同様でばらつきが大きいが、無降雨期間が継続すると 20hPa 以上を示し、降雨があると小さくなる傾向を示した。図-3 (e)における $IE/(H+IE)$ は4月と5月初旬は0.2程度を示し、展葉に伴い上昇し、6月~8月では0.6~0.8程度を示した。図-3 (f)において、展葉前の5月初旬までの gc は飽差の大小によらず小さいが、着葉期である6月以降では飽差が10hPa以下で比較的低い場合に、 gc は0.04 m s⁻¹以上の大きいものが多くみられた。図-3 (g)で示した土壤水分は、降雨に対応して変動していた。

無降雨期間が継続した7月25日から8月6日までの13日間において、気温、飽差は上昇し、 $IE/(H+IE)$ 、 gc 、土壤水分は減少する傾向がみられた。夏季に無降雨期間が長く続くことで飽差が上昇し、土壤水分が減少し、気孔の開閉に抑制がかかることによって $IE/(H+IE)$ は、13日間の最終日である8月6日において、0.48まで低下したと推測する。その後の降雨により、 $IE/(H+IE)$ は0.7程度まで増加していることから、降雨の影響が大きいと考えられる。もう一つの要因としてブナの根の分布と土壤水分の関係があると考えられ、(5)によるとブナの根は深度1m前後、水平方向に多く分布することを示している。そのため、深度1m程度の表層の土壤水分を使って蒸散していると想定され、無降雨期間が継続すると表層の土壤水分が減少し、根系の吸水が制限される可能性があると考えている。

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) FOKEN, T. and WICHURA, B. (1996) Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric For Meteorol **78** : 83-105
- (3) HIRATA, R., SAIGUSA, N., YAMAMOTO, S., 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) Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. Agric For Meteorol **148** : 761-775
- (4) 石田祐宣・伊藤大雄・松浦友一朗 (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** : 18-25
- (5) 刈住昇 (2010) 最新樹木根系図説各論. 誠文堂新光社, 東京 : 1101 pp
- (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)冷温帶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
- (7) 松井拓実・小坂泉・見上真也・井戸辰平・瀧澤英紀・阿部和時 (2014) 山地森林における風の流れが熱収支に与える影響. 第4回関東森林学会大会講演要旨集 : 38
- (8) 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
- (9) MCMILLEN, R. T. (1988) An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. Boundary-Layer Meteorol **43** : 231-245
- (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 CO₂ flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. Agric For Meteorol **148** : 700-713
- (11) 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
- (12) 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** : 253-267