

冷温帯落葉広葉樹林における渦相関法によるフラックスの連続観測

Continuous energy flux measurements using an eddy covariance technique
at a cool-temperate deciduous broad leaved forest

小坂泉*1・野中翔平*2・大塚羽純*1・関崎良美*1・田口裕也*1・清水伸大*1・瀧澤英紀*1・阿部和時*1

Izumi KOSAKA*1, Shohei NONAKA*2, Hasumi OTSUKA*1, Yoshimi SEKIZAKI*1,
Yuuya TAGUCHI*1, Nobuhiro SHIMIZU*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

*2 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

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渦相関法によるフラックスの連続観測を実施し、熱フラックスの経年変化および熱収支インバランスについて調べた。測定は山頂 (標高 985m) に設置された 6 m の観測塔を用い、2012 年 7 月から 2015 年 8 月で行われた。その結果、熱フラックスは地表面の変化を反映した季節変化を示し、それらの傾向は毎年ほぼ同様であった。熱フラックスのピークについては、顕熱フラックスでは展葉前の 4 月もしくは 5 月にみられ、潜熱フラックスでは着葉期の 8 月にみられた。熱収支インバランスについては、顕熱および潜熱フラックスの和で表される熱の渦フラックスが有効エネルギーよりも大きくなる傾向を示した。

キーワード: 顕熱フラックス, 潜熱フラックス, 熱収支, インバランス, 渦相関法

Abstract: To investigate the inter-annual variation of heat fluxes and energy balance closure at a cool-temperate deciduous broad-leaved forest (dominated by *Fagus crenata*), continuous flux measurements were made at a tower located on the summit of Mt. Takahira (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 2012 to August 2015. The heat fluxes showed clear seasonal variations that reflected the changes of the ground surface, these trends were almost similar in every year. The maximum monthly average sensible heat flux was found in April or May, the maximum monthly average latent heat flux was found in August. The sum of turbulent fluxes of sensible and latent heat flux ($H+LE$) was greater than the available energy.

Keywords: sensible heat flux, latent heat flux, energy balance, imbalance, eddy correlation method

I はじめに

近年、森林-大気間の熱・水・CO₂ 交換量を精度高く測定できる渦相関法による連続測定が、世界各地で実施されている (例えば, 7)。この観測法の理論は水平で一様な地表面を仮定しているが、陸域生態系において、このような理想的な条件が十分に満たされることは少なく、特に日本の森林は一般に山地に多く、複雑な地形上に分布している。最近の研究では、複雑地形上の山地森林において渦相関法を適用し、NEE (Net ecosystem exchange; 生態系純生産量) および蒸発散量の季節変化やその年間収支について報告されている (例えば, 3, 8)。但し熱収支の視点では、純放射量 (R_n) と貯熱量 (G) の差が、渦相関法より求まる顕熱フラックス (H) と潜熱フラックス (LE) の和と釣り合わない熱収支インバランス問題がある。その要因につい

ては、Foken (1) によってレビューされているが、熱収支インバランスの詳細なメカニズムについては、未だ解明されておらず、複雑地形上だけでなく平坦地においても熱収支インバランスが発生することが報告されている (10)。森林地における群落レベルでの熱・水・CO₂ 交換量の長期モニタリングに関しては、現時点では渦相関法が最も有効であることは間違いないが、その場合、プラットホームとして樹高よりも高度の高い観測タワーが必要となる。筆者らは、渦相関法について、比較的標高の高い山地森林の山頂において適用可能であれば、樹高が比較的低いので高度の低い観測タワーでフラックス計測が実施できる可能性があるのではないかと考えている。

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が見渡せる標高 985m の山頂サイトに設置さ

れた6 mの観測塔を用いてフラックス計測を実施し、算出された H および IE より求められる熱収支インバランスの大きさを求め、既往の研究成果と対比し、その特徴を調べた。

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 (*F. crenata*) であり、その他の樹種としてミズナラ (*Quercus crispula*) などの落葉広葉樹が混在した平均樹高 15m 程度の 50~60 年生の二次林である。葉面積指数は着葉期において約 $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ である (6)。

測定は同演習林の最高標高地点(高平山山頂, 標高 985m) に建設された 6 m の観測塔で行われた。山頂周辺の平均傾斜角は約 24° と急峻であり、観測塔付近における樹木の平均樹高は 2 m 程度と低く、観測塔の上端での高さは山頂周辺にある樹木の樹高よりも高くなる。そのため、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) を水平・東向きに設置し、10Hz 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) に記録させ、渦相関法により H および IE を算出した。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 (5) による座標変換 (Double rotation) および Webb *et al.* (9) 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解析から除去した。これらにより約 67% データは消去された。解析期間は 2012 年 7 月 6 日から 2015 年 8 月 26 日である。熱収支を評価するため、2014 年 4 月 16 日に 6 m の観測塔の頂上に放射収支計 (NR01, Hukseflux) を設置し、上向き・下向き短波放射量および上向き・下向き長波放射量の 4 成分の測定値を用いて R_n を算出した。さらに G を計測するために、熱流計 (PHF-01, REBS) を深度 5 cm に設置した。

III 結果および考察

1. 風向の頻度分布 図-1 に a) 日中 (9:00~15:00) および b) 夜間 (21:00~3:00) における季節毎の風向の頻度分布を示す。図-1 において、上段から春 (3 月から 5 月)、夏 (6 月から 8 月)、秋 (9 月から 11 月) および冬 (12 月から 2 月) のデータを表している。図-1 a1)~b4) において、風向の頻度分布は北方向を示す風向 0° 付近にピークがみられた。春から秋における日中を示した図-1

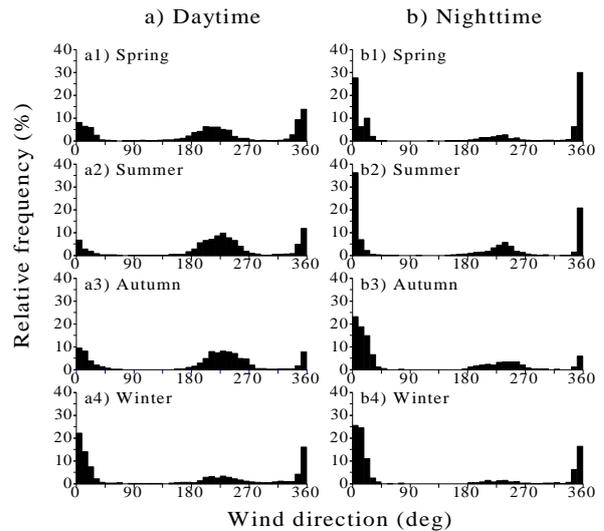
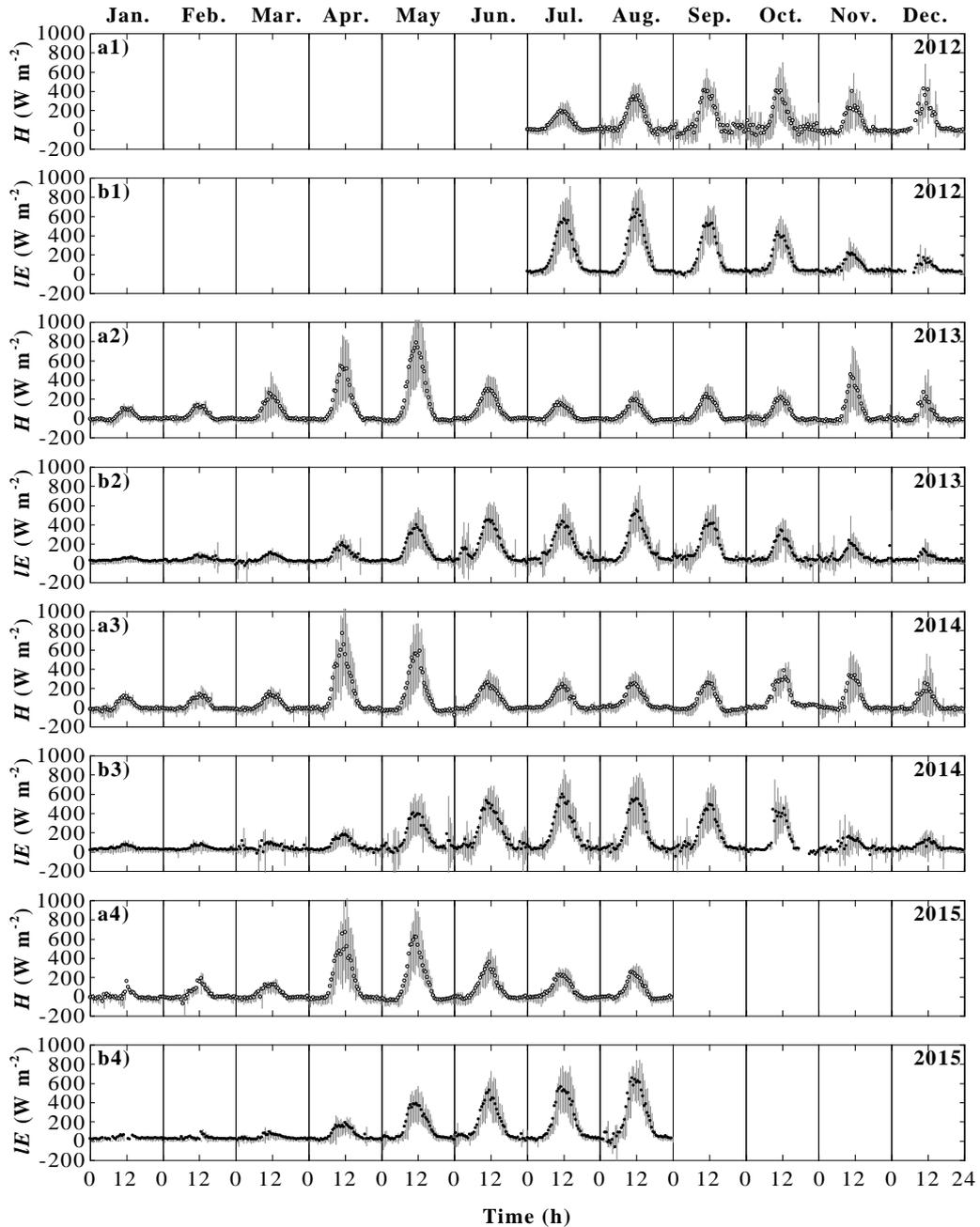


図-1. 日中と夜間における季節別の風向の頻度分布

Fig.1 Frequency distributions of wind direction data measured in degrees from north. 1) Spring (from March through May); 2) summer (from June through August); 3) autumn (from September through November); and 4) winter (from December through February). a) Daytime data collected between 0900 to 1500h, while b) nighttime data collected between 2100 to 0300h.

a1), a2) および a3) では南西方向を示す風向 225° 付近に第 2 のピークがやや顕著にみられた。本試験地では風向 0° 付近および風向 225° 付近の 2 方向を中心とした風がみられる。これは、本試験地の東側には武尊山、北西側には谷川岳や朝日岳など、標高 2,000m 前後の連山に周辺を囲まれていることや、利根川上流域において北から南西方向に発達した谷地形などの影響を受けているためだと考えられる。

2. 熱フラックスの日変化 図-2 は、2012 年 7 月から 2015 年 8 月までの各月における同時刻の 30 分データを集計して月平均した a) H および b) IE の日変化を示したものである。図中の白点は H 、黒点は IE のデータを示し、エラーバーはその標準偏差を示す。上段から 2012 年、2013 年、2014 年および 2015 年を表している。図-2 a1)~a4) における H について、そのピークは消雪期で展葉する前の 4 月および 5 月でみられ、その値は 600 W m^{-2} 程度となり、着葉期である 6~8 月で 200 W m^{-2} 程度となった。図-2 b1)~b4) における IE について、そのピークは着葉期の 8 月で多くみられ、その値は 600 W m^{-2} 程度となった。 IE の季節変化は、積雪期後半の 3 月から展葉がほぼ終了する 6 月にかけて徐々に増加する傾向を示し、そのピークを示した 8 月から落葉期である 11 月にかけて徐々に減少する傾向を示した。積雪期である 1~2 月における H および IE の



図ー2. 2012年7月から2015年8月において月平均した a) 顕熱フラックス(H), b) 潜熱フラックス(IE)の日変化

Fig.2 Monthly average diurnal changes with 30-min interval a) sensible heat flux(H), b) latent heat flux(IE) from July 2012 to August 2015. White circles indicate the monthly average diurnal change in sensible heat flux. Black circles indicate the monthly average diurnal change in latent heat flux. In the figure the top and bottom of the vertical bars indicate the standard deviation.

変動幅は、他の月のデータに比べ全体的に小さい。山頂で計測された H および IE は、地表面の変化を反映した季節変化を示し、その傾向は毎年ほぼ同様であった。

3. 熱収支インバランス 図ー3に2014年4月から2015年8月までの30分平均値を用いた有効エネルギー ($Rn-G$) と顕熱および潜熱フラックスの和 ($H+IE$) で表される熱の渦フラックスの関係を示し、図中の実線、回帰式、決定係数 (r^2) は両者を回帰したもので、点線は1:1のラインを

表す。図ー3において、渦相関法で算定された熱の渦フラックスの方が有効エネルギーよりも大きくなる傾向がみられた。近似直線の傾き ($(H+IE)/(Rn-G)$) を熱収支インバランス率 (EBR) と定義すると、その値は1.22となった。表ー1に Wilson *et al.* (10) で報告された FLUXNET のサイトで報告された EBR の最小値、最大値および平均値を示す。本試験地における EBR は、既往のものよりも大きいことがわかり、既往の研究で報告されている渦相関法で得ら

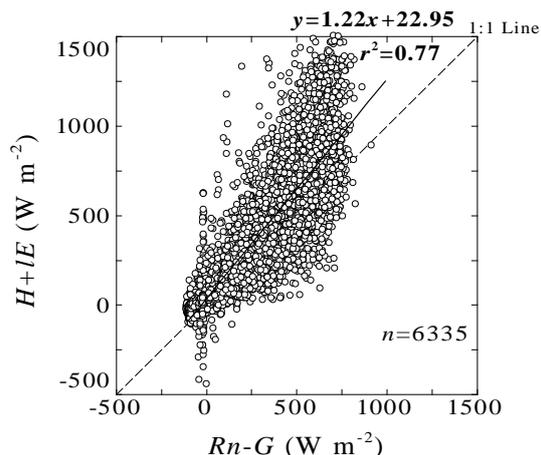


図-3. 有効エネルギー ($Rn-G$) と熱の渦フラックス ($H+IE$) の関係

Fig.3 Relationship between available energy (net radiation Rn –ground heat flux G) and turbulent fluxes (latent heat IE and sensible heat H) for the period from April 2014 to August 2015. The solid line depicts the best fit line estimated from least squares linear regression, and the dashed line depicts the 1:1 relationship. The equations correspond to the slope, intercept, and coefficient of determination (r^2) of the regression. Data are 30-min averages. ($n = 6335$ observations)

表-1. 熱収支インバランス率(EBR)の比較

Table 1 Linear regression slope (EBR) for the surface available energy ($Rn-G$) and sum of the sensible heat flux and latent heat flux($H+IE$).

	Slope	Intercept ($W m^{-2}$)	r^2
<i>This study</i>			
All data	1.22	22.95	0.77
<i>FLUXNET sites</i> (Wilson <i>et al.</i> 2002)			
Minimum	0.55	-32.9	0.64
Maximum	0.99	36.9	0.96
Mean	0.79	3.74	0.86

れる熱の渦フラックスが有効エネルギーよりも小さくなる傾向とは逆の傾向を示した。この原因については、現時点ではわからないが、本試験地において、風向が北および南西方向のほぼ2方向に限られていることや、日中において風速は弱い、逆に摩擦速度が大きくなること(4)などが、本試験地の熱収支インバランスに影響を与えている可能性もあると考えている。

引用文献

- (1) FOKEN, T. (2008) The energy balance closure problem: an overview. *Ecol Appl* **18** : 1351–1367
- (2) FOKEN, T. and WICHURA, B. (1996) Tools for quality

assessment of surface-based flux measurements. *Agric For Meteorol* **78** : 83–105

- (3) KOMINAMI, Y., JOMURA, M., DANNOURA, M., GOTO, Y., TAMAI, K., MIYAMA, T., KANAZAWA, Y., KANEKO, S., OKUMURA, M., MISAWA, N., HAMADA, S., SASAKI, T., KIMURA, H. and OHTANI, Y. (2008) Biometric and eddy-covariance-based estimates of carbon balance for a warm-temperate mixed forest in Japan. *Agric For Meteorol* **148** : 723–737

- (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 CO_2 フラックスの季節変化. *関東森林研究* **65** : 181–184

- (5) MCMILLEN, R. T. (1988) An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol* **43** : 231–245

- (6) 野中翔平・小坂泉・川口美優・瀧澤英紀・阿部和時 (2015) 冷温帯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

- (7) 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_2 flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. *Agric For Meteorol* **148** : 700–713

- (8) SHIMIZU, T., KUMAGAI, T., KOBAYASHI, M., TAMAI, K., IIDA, S., KABEYA, N., IKAWA, R., TATEISHI, M., MIYAZAWA, Y. and SHIMIZU, A. (2015) Estimation of annual forest evapotranspiration from a coniferous plantation watershed in Japan (2): Comparison of eddy covariance, water budget and sap-flow plus interception loss. *J Hydrol* **552** : 250–264

- (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

- (10) WILSON, K., ALLEN, G., FALGE, E., AUBINET, M., BALDOCCHI, D., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C., CEULEMANS, R., DOLMAN, H., CHRIS, F., GRELLE, A., IBROM, A., LAW, B. E., KOWALSKI, A., MEYERS, T., MONCRIEFF, J., MONSON, R., OECHEL, W., TENHUNEN, J., VALENTINI, R. and VERMA, S. (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric For Meteorol* **113** : 223–243