

## 山岳域の冷温帯落葉広葉樹林における熱収支と風向の関連性

The relationship between wind direction and energy balance  
at a cool-temperate deciduous broadleaf forest in a mountainous region

両川光流\*1・小坂泉\*1・大越亮介\*1・黒澤理沙\*1・鎌田真友\*1・

高田名津海\*1・村田真純\*1・瀧澤英紀\*1・阿部和時\*1

Hikaru MOROKAWA\*1, Izumi KOSAKA\*1, Ryosuke OKOSHI\*1, Risa KUROSAWA\*1, Mayu KAMATA\*1,  
Natsumi TAKADA\*1, Masumi MURATA\*1, Hideki TAKIZAWA\*1 and Kazutoki ABE\*1

\* 1 日本大学生物資源科学部

College of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa 252-0880

**要旨:** ブナ(*Fagus crenata*)が優占する冷温帯落葉広葉樹林において、熱収支と風向の関連性を明らかにするため、日本大学水上演習林内の山頂(標高 985m)に設置された観測塔において、2017年1月1日から9月29日の期間でフラックスの連続観測を実施した。加えて、2 高度の気温差および水蒸気圧差より算定されるボーエン比( $\beta_{temp}$ )と、渦相関法で求められた顕熱および潜熱フラックス( $H$ および $\lambda E$ )より算定されるボーエン比( $\beta_{eddy}$ )を比較した。その結果、熱の渦フラックス( $H+\lambda E$ )と有効エネルギーのデータを回帰した直線の傾き(closure ratio;  $CR$ )は、風向によって異なり、風向が南西方向および北方向の  $CR$  の値は、それぞれ 1.24 および 0.84 となった。風向が南西方向の  $H$  および  $\lambda E$  は、風向が北方向のものよりも若干大きくなる傾向を示した。 $\beta_{temp}$  と  $\beta_{eddy}$  を比較したところ、風向による違いは見られず、概ね一致した。これらのことから、本試験地において渦相関法で求められた  $H$  および  $\lambda E$  は、比較的高い精度で測定されたことが示唆された。

**キーワード:** 熱収支, インバランス, 渦相関法, 渦フラックス, ボーエン比

**Abstract:** We investigated the relationship between wind direction and energy balance closure determined by the eddy covariance method at a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata*. Continuous flux measurements were conducted from a tower on the summit (985 m a.s.l.) of Mt. Takahira in Nihon University Forest in the Minakami region of Tone, Gunma Prefecture, Japan. Data were collected between January 1, 2017, and September 29, 2017. Additionally, we compared two Bowen ratios for this time period:  $\beta_{temp}$ , the ratio of air temperature differences to vapor pressure differences; and  $\beta_{eddy}$ , the ratio of sensible heat flux ( $H$ ) to latent heat flux ( $\lambda E$ ) determined by the eddy covariance method. The slope of the regression line describing the relationship of eddy fluxes ( $H + \lambda E$ ) to available energy (closure ratio,  $CR$ ) was dependent on wind direction. The  $CR$  values for southwesterly and northerly winds were 1.24 and 0.84, respectively.  $H$  and  $\lambda E$  were slightly greater for southwesterly winds than for northerly winds.  $\beta_{temp}$  and  $\beta_{eddy}$  were similar, with no significant difference in wind direction. These results suggest that  $H$  and  $\lambda E$  determined by the eddy covariance method were measured with relatively high accuracy at this site.

**Keywords:** Energy balance, Imbalance, Eddy covariance method, Eddy fluxes, Bowen ratio

## I はじめに

現在、大気-森林間の熱・水・二酸化炭素などの交換量を精度高く測定できる渦相関法が広く用いられている(5)。但し、熱収支の視点では、渦相関法によって求められる顕熱フラックス( $H$ )と潜熱フラックス( $\lambda E$ )の和と、純放射量( $Rn$ )と貯熱量( $G$ )の差で表される有効エネルギーが釣り合わない熱収支インバランス問題が、多くの試験地で発生しているが(6)、詳細なメカニズム等については

未だ解明されていない(2)。

本研究対象地である群馬県北部の日本大学水上演習林内において、ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林の山頂(標高 985m)に設置された 6m のタワーを用いて渦相関法によるフラックスの連続観測が実施されている(3)。浅香ら(1)の先行研究では、有効エネルギーと  $H$  と  $\lambda E$  の和の関係における両者の回帰直線の傾きは、風向が北方向のデータよりも南西方向のもので大きくなることを示して

いる。

そこで本研究では、風向の違いが熱収支インバランスの大きさに与える影響を明らかにすることを念頭におき、渦相関法により新たに取得したフラックスデータを用いて、風向別の  $H$  および  $\lambda E$  にどのような違いがあるかを検討しながら、それらの測定精度について考察する。

## II 方法

測定は、群馬県利根郡みなかみ町に位置する日本大学水上演習林内の高平山山頂(36°48'N, 139°02'E, 標高985m)に設置された高さ6mの観測塔で行われた。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する平均樹高15mの二次林であるが、山頂周辺の地形は斜面勾配が急な円錐形を呈し、山頂付近の樹高は2m程度と低いため、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。この観測塔の先端に Open-path 型ガスアナライザー(EC150, Campbell)および超音波風速温度計(CSAT3, Campbell)を水平・東向きに設置し、10Hzで出力される3次元風速、気温、H<sub>2</sub>O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  $\lambda E$  を算出した。各フラックスの平均化時間は30分とした。詳細なフラックスの算定や解析方法については小坂ら(3)を参照されたい。観測塔の頂上に放射収支計(NR01, Hukseflux)を設置し、上向き・下向きの短波放射量および長波放射量の4成分の測定値を用いて  $R_n$  を算出した。熱流計(PHF-01, REBS)を深度5cmに設置し、 $G$  を計測した。解析期間は2017年1月1日から2017年9月29日である。

本研究では、測定された熱の渦フラックスの精度を検討するため、以下の(1)式および(2)式より算定されるボーエン比( $\beta$ )を用いた。観測塔の6mおよび3mの高さに温湿度センサー(HMP155, Vaisala)を設置し、各高度で測定された気温( $T_2$ ,  $T_1$ )および水蒸気圧( $e_2$ ,  $e_1$ )の差を用いて、(1)式よりボーエン比を算出した。

$$\beta_{temp} = \gamma (T_1 - T_2) / (e_1 - e_2) \quad (1)$$

ここで、 $\beta_{temp}$  は気温差および水蒸気圧差から求めたボーエン比、 $\gamma$  は乾湿計定数(0.667 hPa K<sup>-1</sup>)、 $T_1$  および  $T_2$  は3m および 6m 地点の気温(K)、 $e_1$  および  $e_2$  は3m および 6m 地点の水蒸気圧(hPa)を表す。また、渦フラックスを用いたボーエン比( $\beta_{eddy}$ )は(2)式より算出した。

$$\beta_{eddy} = H / \lambda E \quad (2)$$

$\beta_{temp}$  と  $\beta_{eddy}$  を用いた解析では、温湿度センサーを2017年4月に設置したため、解析期間を2017年4月6日から2017年9月29日とした。

## III 結果および考察

1. 熱収支インバランス 表-1は、2016年および2017年の1~9月における熱の渦フラックス( $H+\lambda E$ )と有効エネルギー( $R_n-G$ )の関係について、全方位、風向を北方向および南西方向に限定したものを示す。CR(Closure ratio)は熱の渦フラックスと有効エネルギーのデータを回帰した直線の傾きであり、本研究では熱収支の充足率(CR)とし、Intercept および  $R^2$  は、その直線の切片および決定係数である。本研究におけるCRは、全方位では1.09、北方向(風向330~30°)では0.86、南西方向(風向195~255°)では1.24となり、全方位では  $H+\lambda E$  は  $R_n-G$  の約9%大きくなり、南西方向に限定した場合のCRは、北方向のものより1.4倍程度大きい結果となった。この傾向は、浅香ら(1)とほぼ同様であった。このことから、本試験地におけるCRは風向によって系統的に異なることが示された。

2. 熱の渦フラックスの経時変化 図-1は、 $H$  および  $\lambda E$  の経時変化を示す。各点は、30分平均のフラックスデータを日中平均(10~14時)し、月ごとに設定した  $R_n$  の閾値で選別したものである。 $R_n$  の閾値は、4月では400、5月では450、6月では500、7月では400、8月では400、9月では350(W m<sup>-2</sup>)とし(4)、これらを上回る  $R_n$  が測定された日時のみを解析対象とした。 $H$  は白点で、 $\lambda E$  は黒点で示し、5日平均した  $H$  および  $\lambda E$  は、それぞれ白色および黒色の菱形で示す。図-1において、展葉期(5月下旬頃)を境に  $H$  と  $\lambda E$  の大小関係が逆転し、それ以降では  $\lambda E$  が  $H$  を上回る傾向を示した。このことから、 $H$  と  $\lambda E$  の季節変化は地表面の変化を反映していることが示された。

表-1. 風向別の熱収支の充足率(CR)

Table 1 Closure ratio (CR; slope of the regression line of eddy fluxes against available energy), intercept of linear regression and its determination coefficient ( $R^2$ )

Measurement period	Wind direction	CR	Intercept (W m <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup>	Reference
2016.1/1~9/23	All	1.18	25.69	0.74	浅香ら(2017)
	North	0.91	12.39	0.71	
	Southwest	1.35	49.58	0.80	
2017.1/1~9/29	All	1.09	10.42	0.76	This study
	North	0.86	3.05	0.74	
	Southwest	1.24	16.53	0.80	

All: wind directions from 0~360°; North: wind directions from 330~30° from the north; Southwest: wind directions from 195~255° from the north

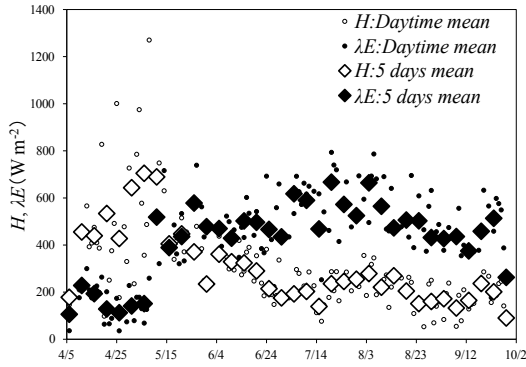


図-1. 顕熱フラックス( $H$ )および潜熱フラックス( $\lambda E$ )の経時変化  
Fig. 1 Time series of sensible heat flux ( $H$ ) and latent heat flux ( $\lambda E$ ).

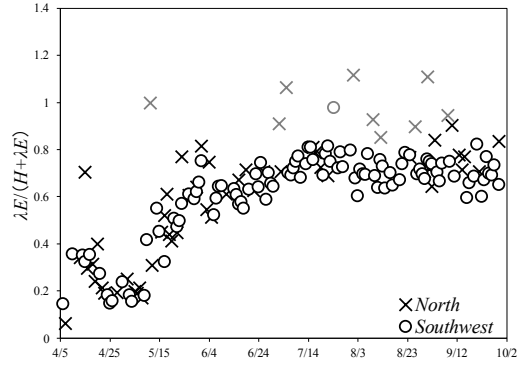


図-3. 熱の渦フラックス( $H+\lambda E$ )に対する  $\lambda E$  の比率 ( $\lambda E/(H+\lambda E)$ )の経時変化  
Fig. 3 Time series of the ratio of latent heat flux ( $\lambda E$ ) to the sum of sensible heat flux ( $H$ ) and latent heat flux ( $\lambda E$ ).

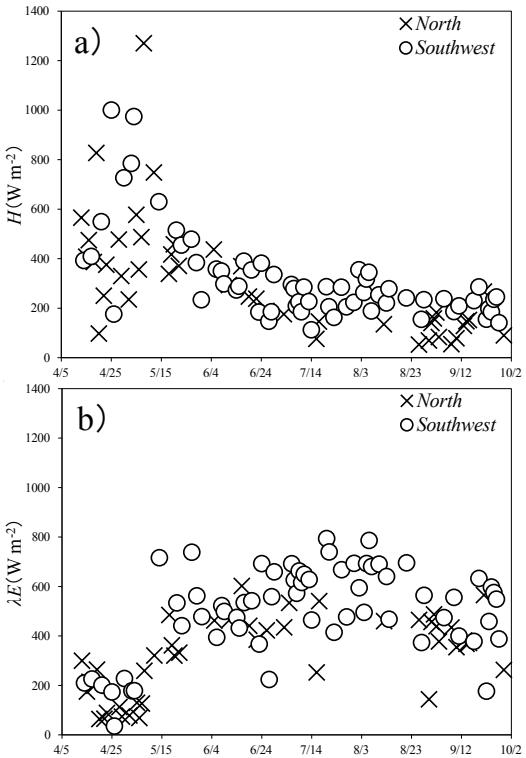


図-2. 風向別の a) 顕熱フラックス( $H$ )および b) 潜熱フラックス( $\lambda E$ )の経時変化  
Fig. 2 Time series of a) sensible heat flux ( $H$ ) and b) latent heat flux ( $\lambda E$ ).

図-2 a)および b)は、 $H$  および  $\lambda E$  の経時変化を風向別に凡例を変えて示し、風向を北方向および南西方向に限定したデータは、それぞれ×印および白丸で示す。図-2 a) および b) において、風向別の  $H$  と  $\lambda E$  の季節変化に違いはあまり見られなかったが、南西方向の  $H$  と  $\lambda E$  は、北方向のものに比べ若干大きくなる傾向が見てとれる。その要因として、斜面方向に起因する  $Rn$  のばらつきが

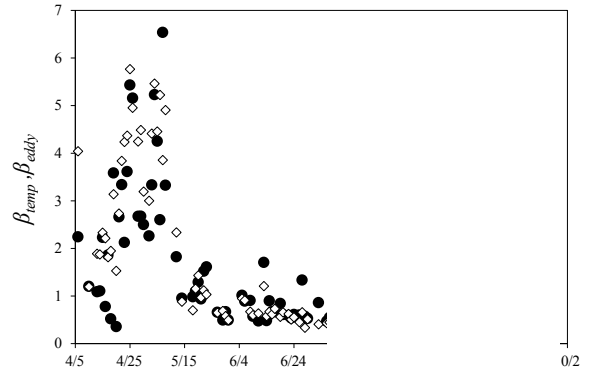


図-4. 2種類のボーエン比( $\beta_{temp}$ ,  $\beta_{eddy}$ )の経時変化  
Fig. 4 Time series of two Bowen ratios,  $\beta_{temp}$  and  $\beta_{eddy}$ .

考えられる。山頂の観測塔において水平に設置した放射収支計で計測された  $Rn$  に比べ、南西斜面と北側斜面が受ける  $Rn$  は局所的にそれぞれ、大きくあるいは小さくなった可能性がある。その影響を受けた  $H$  と  $\lambda E$  が、南西斜面と北側斜面をそれぞれフットプリントとする値として山頂で計測され、一方  $Rn$  は山頂で計測された値を用いて  $CR$  を算出したため、表-1で示した風向による  $CR$  の違いも計算上生じたと考えられる。斜面方向に起因する  $Rn$  のばらつきの検証は、今後の課題とする。

図-3は、熱の渦フラックス( $H+\lambda E$ )に対する  $\lambda E$  の比率( $\lambda E/(H+\lambda E)$ )を示す。風向を北方向に限定したデータを×印で、風向を南西方向に限定したデータを白丸で示している。前日や当日の降雨によって遮断蒸発による影響が想定されるデータは灰色で示している。図-3において、風向別の  $\lambda E/(H+\lambda E)$  の季節変化に違いはあまり見られず、その比率は概ね同程度であった。図-2 a)および b)において、 $H$  と  $\lambda E$  の大きさは風向によって異なることを示したが、 $H$  と  $\lambda E$  への分配比率に関しては、風向に

よる違いは少ないことが示された。

**3. 2種類のボーエン比の比較** 図-4は、2種類のボーエン比の経時変化を示す。 $\beta_{temp}$ を黒丸で、 $\beta_{eddy}$ を白色の菱形で示している。図-4において、 $\beta_{temp}$ および $\beta_{eddy}$ は、4月初旬から4月下旬にかけて増加し、その後展葉が終了する5月下旬にかけて減少し、それ以降では多少ばらつきは見られるが0.4前後を示し、2種類のボーエン比は概ね同様の季節変化を示した。

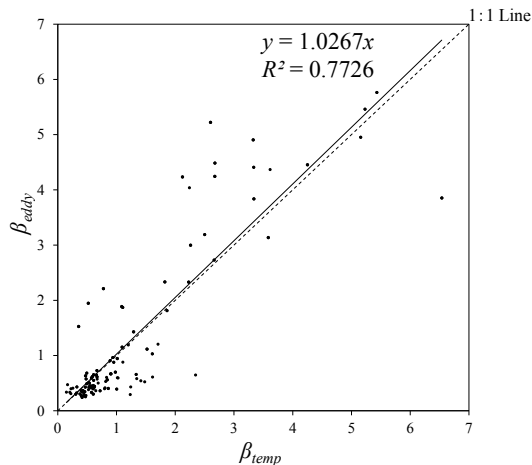


図-5. 2種類のボーエン比( $\beta_{temp}$ ,  $\beta_{eddy}$ )の比較  
Fig. 5 Comparison of  $\beta_{temp}$  and  $\beta_{eddy}$ .

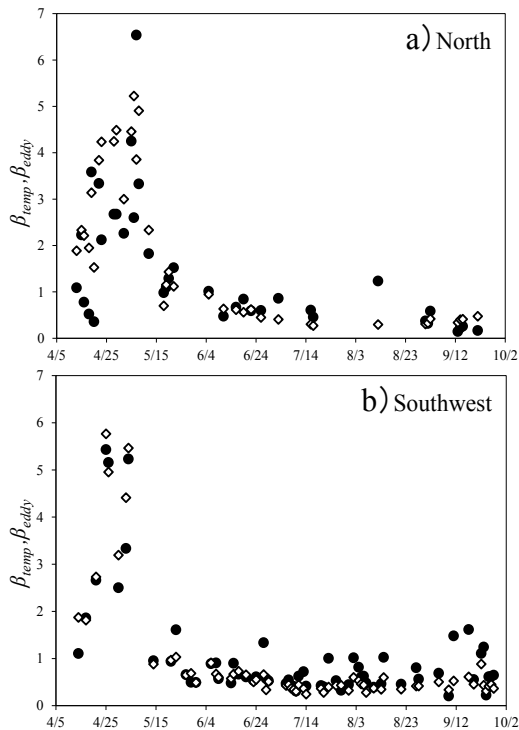


図-6. 風向別のボーエン比( $\beta_{temp}$ ,  $\beta_{eddy}$ )の経時変化  
Fig. 6 Time series of  $\beta_{temp}$  and  $\beta_{eddy}$  for a) wind directions from 330–30° from the north and b) wind directions from 195–255° from the north.

図-5は、 $\beta_{temp}$ と $\beta_{eddy}$ の比較を示す。図中の実線、回帰式および決定係数( $R^2$ )は両者を回帰したものであり、点線は1:1ラインを示す。 $\beta_{temp}$ と $\beta_{eddy}$ のデータは1:1ライン付近に比較的多く分布し、回帰直線の傾きは1.0267であり、両者の関係においてもやや高い相関が見られる。 $\beta_{temp}$ と $\beta_{eddy}$ に多少ばらつきは見られるが、両者ともにタワー周辺の熱環境を比較的高い精度で測定していると考えられる。図-6は、図-4と同様のものであるが、風向で場合分けをし、北方向に限定したものを図-6 a)、南西方向に限定したものを図-6 b)に示す。図-6 a)およびb)の $\beta_{temp}$ と $\beta_{eddy}$ は、風向による違いは見られず、概ね一致した。

これらの結果をまとめると、本試験地において渦相関法で求められた  $H$  および  $\lambda E$  は、比較的高い精度で測定されていると考えられる。

#### 引用文献

- (1) 浅香渉・小坂泉・野中翔平・瀬戸萌子・高松美月・瀧澤英紀・阿部和時 (2017) 山岳域の冷温帯落葉性広葉樹林における熱収支インバランスについて. 関東森林研究 68: 193-196
- (2) FOKEN, T. (2008) The energy balance closure problem: an overview. Ecol. Appl. 18: 1351-1367
- (3) 小坂泉・野中翔平・大塚羽純・関崎良美・田口裕也・清水伸大・瀧澤英紀・阿部和時 (2016) 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. 関東森林研究 67: 77-80
- (4) 小栗秀之・檜山哲哉(2002)都市二次林における  $CO_2$ ・熱フラックスの季節変化. 水文・水資源学会誌: 264-278
- (5) 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., 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
- (6) WILSON, K., ALLEN, G., FALGE, E., AUBINET, M., BALDOCCHI, D., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C., CEULEMANS, R., DOLMAN, H., CHRIS, F., GRELLER, A., IBROM, A., LAW, B. E., KOWALSKI, A., MEYERS, T., MONCRIEFF, J., MONSON, R., OECHEL, W., TENHUNEN, J., VALENTINI, R., VERMA, S. (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites. Agric. For. Meteorol. 113: 223-243