

## 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

## Energy balance non-closure at a cool-temperate deciduous broadleaf forest in a mountainous region

浅香涉<sup>\*1</sup>・小坂泉<sup>\*1</sup>・野中翔平<sup>\*2</sup>・瀬戸萌子<sup>\*1</sup>・高松美月<sup>\*1</sup>・瀧澤英紀<sup>\*1</sup>・阿部和時<sup>\*1</sup>Wataru ASAKA<sup>\*1</sup>, Izumi KOSAKA<sup>\*1</sup>, Shohei NONAKA<sup>\*2</sup>, Moeko SETO<sup>\*1</sup>,  
Mitsuki TAKAMATSU<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 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:** 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熱収支インバランスの特徴を明らかにするため、熱フラックスの連続観測を日本大学水上演習林内の山頂 (標高 985m) において 2016 年 1 月 1 日から 9 月 23 日の期間で実施した。その結果、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は、有効エネルギーよりも 18% 程度大きく算定された。風向が南西方向のとき有効エネルギーと熱の渦フラックスの関係における近似直線の傾きは、風向が北方向のものに比べて大きくなった。風向が北および南西方向での熱収支インバランスは、風速に対する摩擦速度の比の増加に伴い大きくなる傾向を示した。

**キーワード:** 熱収支・インバランス・渦相関法・渦フラックス・ブナ

**Abstract:** To investigate the characteristics of energy balance closure by the eddy covariance method at a cool-temperate deciduous broadleaf forest (dominated by *Fagus crenata*), continuous flux measurements were taken at a tower located on the summit (985 m.a.s.l) of Mt. Takahira in Nihon University Forest in Minakami-machi, Tone-gun, Gunma, Japan. The measurements were conducted from 1 January through 23 September 2016. The sum of sensible and latent heat fluxes overestimated the available energy by 18%. The slope of the regression line of eddy fluxes against available energy was greater for southwest winds than north winds. The energy balance non-closure for southwest winds and north winds were tended to increase as the ratio of the friction velocity to the longitudinal wind velocity increased.

**Key-words:** Energy balance, Imbalance, Eddy covariance method, Eddy fluxes, *Fagus crenata*

## はじめに

近年、森林など様々な地表面において渦相関法を用いた熱フラックスなどの長期連続測定が、世界各地で実施されている (例えば, Saigusa *et al.* (5))。それらの測定結果において、渦相関法より求まる熱の渦フラックス (顕熱フラックス ( $H$ ) と潜熱フラックス ( $LE$ ) の和) が、純放射量 ( $R_n$ ) と貯熱量 ( $G$ ) の差で表せる有効エネルギーより 10~30% も過小評価される熱収支インバランスが発生することが報告されているが (6)、その詳細なメカニズムについては、未だ解明されていない (2)。

小坂ら (3) 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 985 m の山頂サイトに設置された 6 m の観測塔を用いて渦相関法によるフラックス計測を実施しているが、本試験地で得られた熱の渦フ

ラックスは有効エネルギーよりも大きくなる傾向を示し、既往の研究結果とは逆の傾向を示した。そこで本研究では、本試験地における熱収支インバランスの特徴を明らかにするため、渦相関法で求められたフラックスデータを風向で場合分けし、風速や摩擦速度などが熱収支インバランスの大きさに与える影響について調べた。

## 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) である。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。平均樹高は 15m 程度であり、葉面積指数は着葉期において約 4 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> である (4)。

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，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）を水平・東向きに設置した。測定間隔は 10Hz であり，出力される 3 次元風速，気温および 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。解析期間は，2016 年 1 月 1 日から 2016 年 9 月 23 日である。

### 結果および考察

**1. 熱収支インバランス** 図 - 1 は，2016 年 1~9 月までの 30 分平均値を用いた有効エネルギー（ $R_n-G$ ）と顕熱および潜熱フラックスの和（ $H+IE$ ）で表せる熱の渦フラックスの関係を示したものである。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。近似直線の傾きを熱収支の充足率（closure ratio; CR）とすると，その値は 1.18 となった。このことは，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 18% 大きくなることを意味する。この傾向は，2014 年 4 月から 2015 年 8 月に得られたデータを用いて解析を行った結果（3）とほぼ同様であった。

**2. 風向の頻度分布** 図 - 2 は，試験地における相対的な風向のヒストグラムである。相対的な風向の頻度は 0~15° において最も高く，31% であった。北方向を示す風向（330~30°）のデータは，全体の 53% であった。次いで，風向が南西を示す 225° 付近で頻度が高く，225±30° の範囲に約 30% のデータが存在した。本試験地の風向は，北方向と南西方向に卓越することから，渦相関法で求められたフラックスデータを，北方向を示す風向（330~30°）と南西方向を示す風向（195~255°）で場合分けして解析する。

**3. 熱収支インバランスに与える影響** 図 - 3 は， $R_n-G$  と  $H+IE$  の関係であるが，風向で場合分けし，北方向を示す風向（330~30°）に限定したものを図 - 3 a) に，南西方向を示す風向（195~255°）に限定したものを図 - 3 b) に示す。図 - 3 a) における有効エネルギーと熱の渦

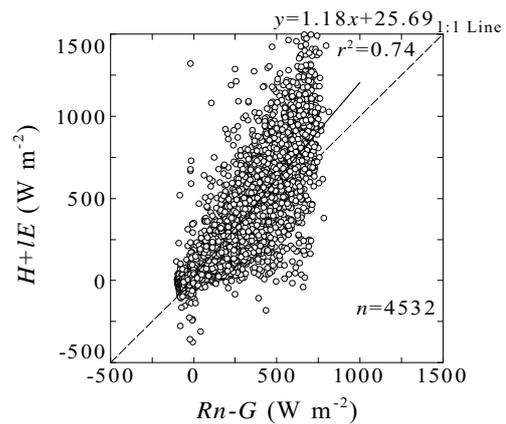


図 - 1 . 有効エネルギー（ $R_n-G$ ）と熱の渦フラックス（ $H+IE$ ）の関係

Fig.1 The sum of the instantaneous (30-min average) sensible and latent heat flux ( $H+IE$ ;  $y$  axis) as a function of the difference in instantaneous net radiation and ground heat flux ( $R_n-G$ ;  $x$  axis) for the period from 1 January through 23 September 2016. 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. ( $n = 4532$  observations)

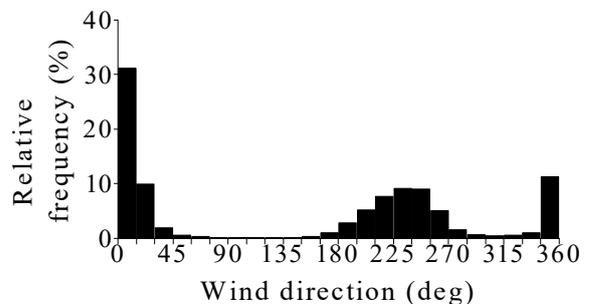


図 - 2 . 相対的な風向の頻度分布

Fig.2 Frequency distributions of wind direction data measured in degrees from north for the period from 1 January through 23 September 2016.

フラックスのデータは，1:1 ラインに対して下側に分布し，CR は 0.91 であった。図 - 3 b) において CR は 1.35 となり，風向が北方向のものに比べ 1.5 倍程度大きくなり，本試験地の CR は風向によって明瞭な違いを示した。この要因については，風向によって乱流の性質が異なること（1）や，斜面方位によって森林が受ける有効エネルギーの違いなどに起因するのではないかと考えている。

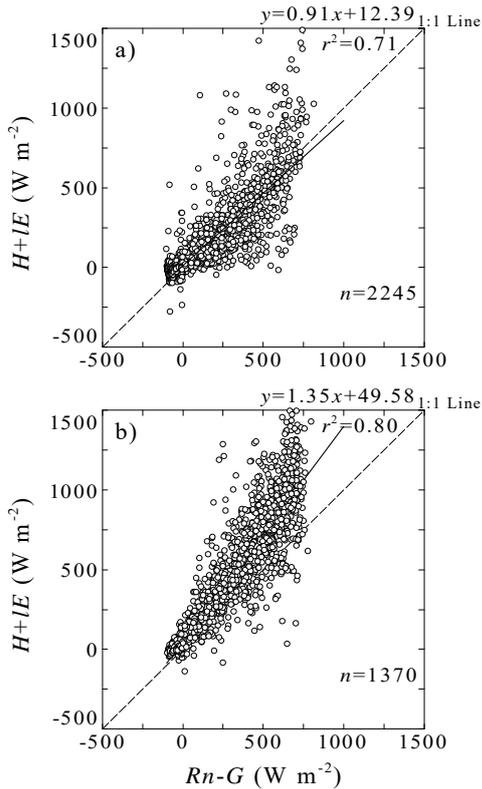


図 - 3 . 風向で場合分けした有効エネルギー ( $Rn-G$ ) と熱の渦フラックス ( $H+IE$ ) の関係

Fig.3 Plots of  $H+IE$  versus available energy( $Rn-G$ ). a) wind directions from  $330^{\circ}$ – $30^{\circ}$ from north and b) wind directions from  $195^{\circ}$ – $255^{\circ}$  from north. Solid and dotted lines in panels are the same as in Fig.1.

図 - 4 は 図 - 3 で示した関係と同様のものであるが、風速で場合分けし、風速が  $1\text{ m s}^{-1}$  未満のものを黒点で、風速が  $1\text{ m s}^{-1}$  以上で  $3\text{ m s}^{-1}$  未満のものを十字で、風速が  $3\text{ m s}^{-1}$  以上のものを白点で示す。北方向を示す風向( $330 \sim 30^{\circ}$ )に限定した図 - 4 a)において、弱風時のデータは、ばらつきが大きく明瞭な関係はみられないが、風速が  $3\text{ m s}^{-1}$  以上のものは、1:1 ラインよりも下側に分布する傾向がみとれる。南西方向を示す風向( $195 \sim 255^{\circ}$ )に限定した図 - 4 b)では、弱風時のデータは、1:1 ラインに対して上側に分布する場合が多くみられ、風速が  $3\text{ m s}^{-1}$  以上のデータは少ないが、1:1 ライン付近でみられ、全体的に下方に分布するように見える。このことから、本試験地において比較的風速が強い場合、風向が南西方向では熱収支が比較的釣り合う傾向を示すと考えられる。

図 - 5 は 図 - 3 で示した関係と同様のものであるが、摩擦風速 ( $u^*$ ) で場合分けし、 $u^*$  が  $0.3\text{ m s}^{-1}$  未満のものを黒点で、 $u^*$  が  $0.3\text{ m s}^{-1}$  以上で  $0.5\text{ m s}^{-1}$  未満のものを十字で、 $u^*$  が  $0.5\text{ m s}^{-1}$  以上のものを白点で示す。北方向を

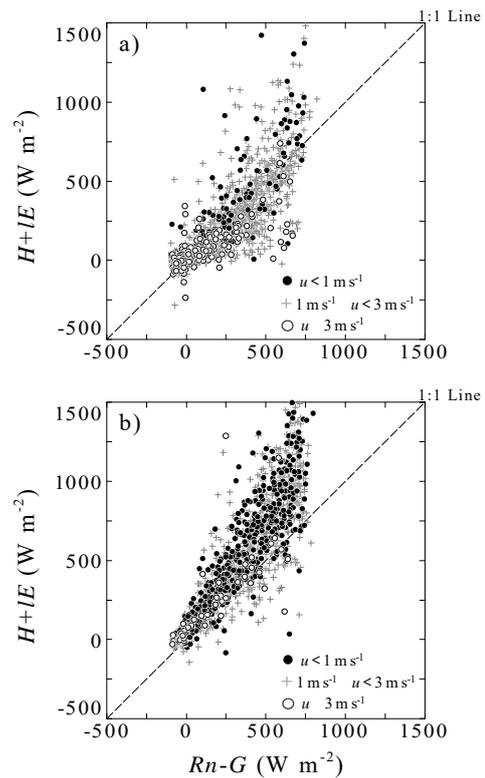


図 - 4 . 風速 ( $u$ ) で場合分けした有効エネルギー ( $Rn-G$ ) と熱の渦フラックス ( $H+IE$ ) の関係

Fig.4 a) and b) panels are the same as in Fig.3. The data were differentiated with longitudinal wind velocity ( $u$ ).

示す風向( $330 \sim 30^{\circ}$ )に限定した図 - 5 a)では、全体的にばらつきが大きいものの、 $u^*$  が  $0.3\text{ m s}^{-1}$  未満のデータは、1:1 ラインよりも下側に多く分布する傾向がみとれる。南西方向を示す風向( $195 \sim 255^{\circ}$ )に限定した図 - 5 b)では、図 - 5 a)と同様にデータの分布にばらつきがみられるが、 $u^*$  が  $0.3\text{ m s}^{-1}$  未満のものは下側に、 $u^*$  が  $0.5\text{ m s}^{-1}$  以上のものは上側に比較的まとまって分布する。これらのことから、北方向を示す風向よりも南西方向を示す風向において、 $u^*$  の増加に伴い熱収支インバランスは大きくなる傾向を示すと考えられる。

図 - 6 は 図 - 3 で示した関係と同様のものであるが、風速に対する摩擦速度の比 ( $u^*/u$ ) で場合分けし、 $u^*/u$  が  $0.2$  未満のものを黒点で、 $u^*/u$  が  $0.2$  以上で  $0.3$  のものを灰点で、 $u^*/u$  が  $0.3$  以上で  $0.5$  未満のものを十字で、 $u^*/u$  が  $0.5$  以上のものを白点で示す。北方向を示す風向( $330 \sim 30^{\circ}$ )に限定した図 - 6 a)において、 $u^*/u$  が  $0.2$  未満のデータは、1:1 ラインよりも下側に比較的まとまって分布する傾向がみられる。 $u^*/u$  が  $0.2$  以上で  $0.3$  のデータについては、ややばらつきがみられるものの、1:1 ライン付近でみられる場合が多いようにみとれる。

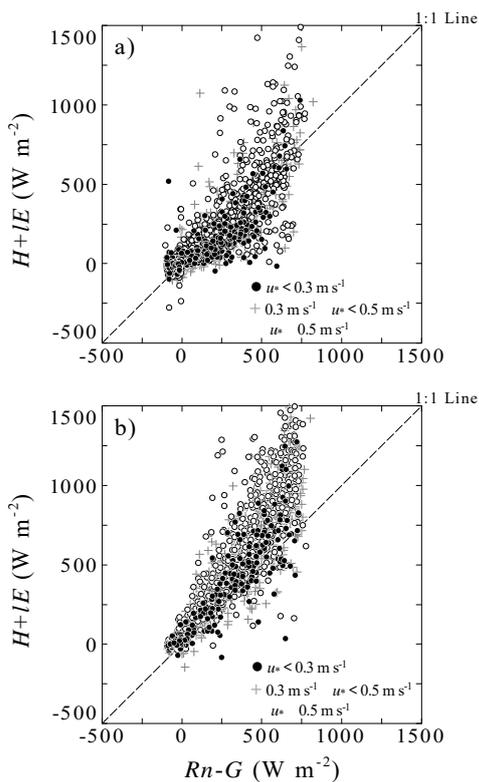


図 - 5 . 摩擦速度 ( $u^*$ ) で場合分けした有効エネルギー ( $Rn-G$ ) と熱の渦フラックス ( $H+IE$ ) の関係  
 Fig.5 a) and b) panels are the same as in Fig.3. The data were differentiated with friction velocity ( $u^*$ ).

$u^*/u$  が 0.5 以上のデータの多くが、1:1 ラインより上側に分布する。南西方向を示す風向(195 ~ 255°)に限定した図 - 6 b)では、 $u^*/u$  が 0.2 未満のデータについては、 $Rn-G$  と  $H+IE$  が 250  $W m^{-2}$  以下では、1:1 ライン付近に分布する傾向がみられる。 $u^*/u$  が 0.5 以上のデータについては、数点を除けば、ほとんどの場合で 1:1 ラインより上側に分布する。以上のことから、本試験地では、 $u^*/u$  が大きくなる(比較的風速が強く、 $u^*$ が小さい場合から、比較的風速が弱く、 $u^*$ が大きくなる)につれて、熱収支インバランスは大きくなることが示された。

#### 引用文献

- (1) 芦葉弥生・小坂泉・中村貴雄・雨松里美・瀧澤英紀・阿部和時 (2015) 複雑地形上に立地する落葉広葉樹林における乱流特性. 関東森林研究 66 : 293-296
- (2) FOKEN, T. (2008) The energy balance clouser 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) 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

(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. 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

(6) 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

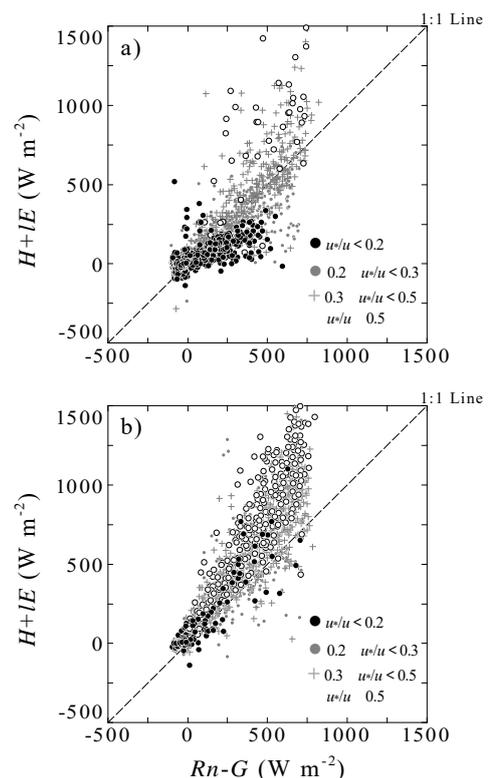


図 - 6 . 風速に対する摩擦速度の比 ( $u^*/u$ ) で場合分けした有効エネルギー ( $Rn-G$ ) と熱の渦フラックス ( $H+IE$ ) の関係

Fig.6 a) and b) panels are the same as in Fig.3. The data were differentiated with the ratio of the friction velocity to the longitudinal wind velocity ( $u^*/u$ ).