

## 山地森林における風の流れが熱収支に与える影響

### The effect of air flow on the energy balance in a mountainous forest region

松井拓実<sup>\*1</sup>・小坂泉<sup>\*1</sup>・見上真也<sup>\*1</sup>・井刈晟平<sup>\*1</sup>・瀧澤英紀<sup>\*1</sup>・阿部和時<sup>\*1</sup>

Takumi MATSUI<sup>\*1</sup>, Izumi KOSAKA<sup>\*1</sup>, Sinya MIKAMI<sup>\*1</sup>, Zyouhei IGARI<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

**要旨：**本研究では、山地森林における風の流れと熱収支の関係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内、高平山山頂と中腹に設置された観測塔で風速、風向および気温の観測を行った。観測期間は2011年9月～2014年7月である。日中の平均風向は、冬季において山頂で北東、中腹で南西となったが、夏季において山頂で南から西、中腹で北東と逆転した。2014年5月の日中において、山頂の風向は南から西、中腹の風向は南でかつ、中腹と山頂の温位差の減少にともない中腹と山頂の風速差が増加する状況で、熱収支が釣り合わない場合が多く生じている傾向を示した。

**キーワード：**山地森林、風向、風速、温位、熱収支

**Abstract :** To investigate the relation of air flow and energy balance over a cool-temperate deciduous forest on a mountain, meteorological observations were made from towers located on the mid-slope and summit of Nihon University Forest in Minakami-machi, Tone-gun, Gunma, Japan. During the daytime, the wind was from the southwest at the mid-slope site and from the northeast at the summit in winter, while it was from the northeast at the mid-slope site and the south or west at the summit site in summer. During the daytime in May 2014, the energy balance closure was not good for 3 conditions : the wind speed at the mid-slope site was greater than that at the summit site, the wind direction at the summit site was from south to west and the wind direction at the mid-slope site was from south. In addition, the difference in the wind speed tended to increase as the difference in the potential temperature decreased.

**Keywords :** mountainous forest region, wind direction, wind speed, potential temperature, energy balance

#### I はじめに

近年、大気－森林間の熱・水・二酸化炭素交換の観測では、渦相関法が広く用いられている。しかし、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顕熱と潜熱の和と釣り合わない熱収支インバランス問題（例えば 1, 4, 6, 7）があり、Wilson *et al.* (9) は、渦相関法によって求まる顕熱と潜熱を過少に、もしくは有効エネルギーを過大に評価していることを報告している。現時点では、熱収支インバランスのメカニズムは解明されていないが（2, 8），その要因の一つに、山地における地形の起伏による特有な風の流れ（例えば、山谷風など）が考えられている（5）。小坂ら（3）は、本研究と同試験地において山頂と中腹で気象観測を実施し、山頂が中腹よりも高温でかつ中腹の風速が山頂のものより強い状況が、樹木の展葉する5月にみられることを示し、その風の流れが熱収支インバランスをもたらす可能性を示唆している。

そこで本研究では、山頂と中腹に設置された観測塔で得られた気象観測データ（風向、風速および気温）を用いて山頂と中腹の風向および風速の季節変化と、渦相関法により観測された熱収支データを比較し、山地森林における風の流れの特徴と熱収支の関係を明らかにすることを目的とする。

#### II 方法

1. 観測地概要 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、ブナ(*Fagus crenata*)、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サイト（標高 985m）および中腹サイト（標高 765m）で行われた。中腹サイトは採石場跡地で、比較的平坦である。中腹サイトから南西方向に谷地形が発達する。山頂サイトは高平山の山頂であり、その周辺において背丈の高い樹木は見られないが 1 m～2 m の草木が生えている。中腹サイ

トと山頂サイトの標高差および水平距離はそれぞれ220m, 400mであり、両サイト間の平均勾配は約30°である（3）。

**2. 気象およびフラックス観測** 中腹サイトでは高さ6mの観測塔の頂上部に、山頂サイトでは3mの単管パイプの先端に風速計（AC750, Makino）、風向計（VF016, Makino）、温湿度センサー（HMP155A, Vaisala）を設置し、データロガー（中腹サイトではCR23X、山頂サイトではCR10X、共にCampbell）を用いて10分間隔で記録させた。山頂サイトは2012年9月から、より植物の影響を受けないように単管パイプを継ぎ足して観測高度を3m高くした。山頂サイトではOpen-path型ガスアナライザ（EC150, Campbell）、超音波風速温度計（CSAT3A, Campbell）をデータロガーに記録し、渦相関法により頑熱および潜熱フラックス（以下、*H*および*IE*）を算出した。また、2014年4月より観測塔の先端に放射収支計（NR01, Hukseflux）および深度5cmに熱流計（PHF-01, REBS）を山頂サイトに設置し、純放射量（以下、*Rn*）および貯熱量（以下、*G*）をモニターしている。

本研究では、中腹および山頂サイトの風向・風速は2011年9月から2014年8月の期間のデータを対象とし、風速のデータは0.2m s<sup>-1</sup>以上のものを解析に使用した。

### III 結果および考察

**1. 月平均風速および風向の季節変化** 図-1は、山頂サイトと中腹サイトにおける日中および夜間の月平均風速、風向の季節変化を示したものである。図-1において1)は山頂サイト、2)は中腹サイトを示し、a)は日中（9:00～15:00）、b)は夜間（21:00～3:00）の間の観測期間中すべてのデータをベクトル平均したものを示した。各月の風向は矢印で表し、北から南に向かって吹く場合は下向きの矢印となる。また風速は矢印の長さで示される。

図-1 a 1)における日中の風速の季節変化は、明瞭ではないが6月～9月にかけて減少する傾向がみられた。風向については、1月～5月および10月～12月では北東であるが、6月～9月において風向が変化し、南または西となった。図-1 a 2)における風速の季節変化は、図-1 a 1)と概ね類似する傾向を示した。風向については、1月～5月および10月～12月では南西方向であり、同時期の山頂のものに比べおよそ180°異なった。6月～9月には風向が北東となり、山頂と90°～180°程度異なった。山頂サイトと中腹サイトにおいて、冬季と夏季で風向が逆転した。

図-1 b 1)における夜間の風速は、明瞭な季節変化

を示し、秋から春にかけて増加し、3月で約2.4 m s<sup>-1</sup>とピークとなり、それ以降減少する傾向を示した。風向は北東であり、通年ほぼ同じ風向であった。図-1 b 2)中腹サイトの風速は、弱風で季節変化については不明瞭である。風向は北西～北の風であり、風向に季節変化はみられなかった。これらの結果は、小坂ら（3）が示した2011年9月～2012年8月の期間で得られた傾向とほぼ同様であり、本試験地の山頂と中腹の風向および風速の季節変化は、毎年ほぼ同じであると考えられる。

**2. 熱収支および山頂サイトと中腹サイトにおける風速の関係** 本研究では、*H*、*IE*、*Rn*および*G*を用い、(*H*+*IE*)/(*Rn*-*G*)の式で表される乱流フラックスと有効放射エネルギーの比を熱収支インバランス率(以下、*EBR*)と定義する。表-1は、2014年4月～8月における*EBR*を毎月に集計したものを示す。表-1において、本試験地における*EBR*は1.2～1.4程度となり、他のサイトと異なる傾向を示した。観測期間中において、5月の*EBR*が1.42と最も高く、熱収支が最も釣り合っていないかった。そこで本研究では2014年5月に着目し、風の流れと熱収支の関係性を調べた。

図-2は、2014年5月における日中（9:00～15:00）の山頂サイト（以下、*U<sub>top</sub>*）の風速と中腹サイト（以下、*U<sub>mid</sub>*）の風速の30分平均風速の関係を示し、*EBR*の値が0.2以上で0.4未満を灰色、0.4以上で0.6未満を黒色、0.6以上を白色で示す。図-2において1:1ラインに対して*U<sub>mid</sub>*側にやや多く分布し、全体の63%を占めている。また、*U<sub>mid</sub>*が*U<sub>top</sub>*より大きい場合、*EBR*の値が0.2～0.6であるデータは27%を占めている。

そこで*U<sub>mid</sub>*が*U<sub>top</sub>*より大きい場合について、山頂サイトの風向（以下、*WD<sub>top</sub>*）と中腹サイトの風向（以下、*WD<sub>mid</sub>*）が、どのような関係にあるかを次節で調べる。

**3. 山頂サイトと中腹サイトにおける風向の関係** 図-3 a)は図-2における*U<sub>mid</sub>*が*U<sub>top</sub>*より大きい場合での*WD<sub>top</sub>*と*WD<sub>mid</sub>*の関係を示す。風向は360°で表し、北を0°とし時計回りに360°で表した。凡例は図-2と同様である。図-3 b), c)は、それぞれ山頂、中腹の頻度分布図であり、*EBR*の値が0.6以上のものである。図-3 b 1), 図-3 c 1)は*EBR*の値で場合分けし、*EBR*の値が0.2以上で0.4未満を灰色、0.4以上0.6未満を黒色で示した。

図-3 b), 図-3 c)より、2014年5月の風向は山頂サイトで北東（45°付近）、中腹サイトで西（270°付近）に多く分布している。しかし、図-3 b 1), 図-3 c 1)に着目すると、*WD<sub>top</sub>*は南西（255°付近）、*WD<sub>mid</sub>*は南付近（180°付近）に多く分布し、両サイトともに

概ね同じ方向であった。 $U_{mid}$  が  $U_{top}$  より大きい場合において、熱収支インバランスが多く生じている風の流れは、高平山の南西方向に位置する中腹サイトから斜面に沿って吹き上げる場合である可能性が考えられた。

**4. 山頂サイトと中腹サイトにおける温位差と風速差の関係** 図-4は、図-3において示したデータについて山頂サイトと中腹サイトの温位差（以下、 $\Delta\theta$ ）と風速差（以下、 $\Delta U$ ）の関係を示した。凡例は図-2と同様である。図-4において、 $\Delta\theta$  に関係なく  $\Delta U$  が増加するものと、 $\Delta\theta$  の減少に伴い  $\Delta U$  が増加するものに大きく2つに分かれ、後者のデータの多くは、EBRの値が0.2以上で0.6未満のデータ（灰色および黒色）であることがみてとれる。山頂サイトよりも中腹サイトの風速が大きくなる場合において、山頂サイトが中腹サイトよりも高温になるにつれて EBR が低くなるケースが多く生じることが示された。このことは、4月下旬に雪解けが終わり、5月上旬に樹木が展葉する本試験地のような山地森林において、日中の  $H$  および IE や  $CO_2$  フラックスを評価する際に、渦相関法によって得られるフラックスデータを解釈する前提条件を検討するための1つの指標となる可能性があることを示唆する。

#### 引用文献

- (1) BARR, A.G., MORGESTEN, K., BLACK, T.A., McCaughey, J.H. and NESIC Z. (2006) Surface energy balance closure by the eddy-covariance method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the  $CO_2$  flux. Agric For Meteorol **140** : 322-337
- (2) FOKEN, T. (2008) The energy balance closure problem

- an overview. Ecol Appl **18** : 114-130
- (3) 小坂泉・小林将大・瀧澤英紀 (2013) 山地森林斜面における山谷風の特性. 関東森林研究 **64**(2) : 45-48
- (4) LEUNIG, R., VAN GORSEL, E., MASSMAN, W.J. and ISAAC, P.R. (2012) Reflections on the surface energy imbalance problem. Agric For Meteorol **156** : 65-74
- (5) 宮崎真・山本晋 (2001) 热収支インバランス研究報告. 天気 **48** : 711-713
- (6) TANAKA, H., HIYAMA, T., KOBAYASHI, N., YABUKI, H., ISHII, Y., DESYATKIN, R. V., MAXIMOV T. C. and OHAT T. (2008) Energy balance and its closure over a young larch forest in eastern Siberia. Agric For Meteorol **148** : 1954-1967
- (7) TURNIPSEED, A.A., BLANKEN, P.D., ANDERSON, D.E. and MONSON, R.K. (2002) Energy budget above a high-elevation subalpine forest in complex topography. Agric For Meteorol **110** : 177-201
- (8) 渡辺力・神田学 (2002): LSE による熱収支インバランス問題に対する検討 (第2報) 水平一様な植生キヤノピー層を含む中立接地面層における検討. 水文・水資源学会誌, 15, pp. 253-263.
- (9) 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, BE., KOWALSK, A., MEYERS, T., MONCRIEFF, J., MONSON, R., OECHEL, W., TENHUNEN, J., VALENTIN, R. and VERMA, S. (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites. Agric For Meteorol **113** : 223-243

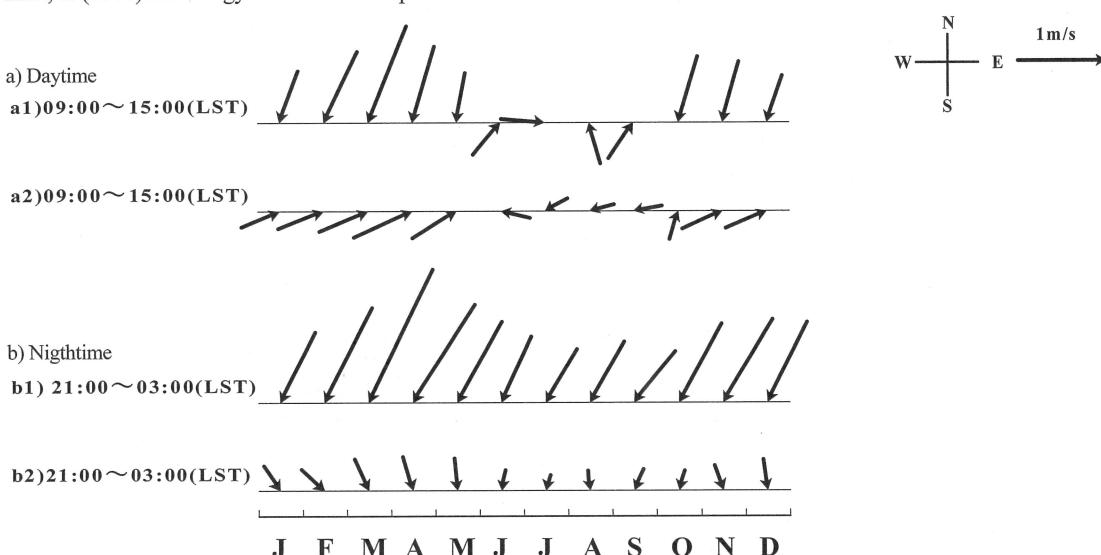


図-1. 1) 山頂サイトと 2) 中腹サイトにおける風速・風向の季節変化

Fig.1 Seasonal changes in monthly wind vectors at 1) the summit site and 2) the mid-slope site.

表-1. 月毎の熱収支インバランス率(EBR)

Table 1 Linear regression slope (EBR) for the surface available energy ( $Rn-G$ ) and sum of the sensible heat flux and latent heat flux ( $H+LE$ ) for 5 months in 2014.

Month	EBR	$R^2$	n
Apr.	1.15	0.71	273
May	1.42	0.78	701
Jun.	1.26	0.81	670
Jul.	1.18	0.80	751
Aug.	1.37	0.76	633

$R^2$ , coefficient of determination; n, number of data.

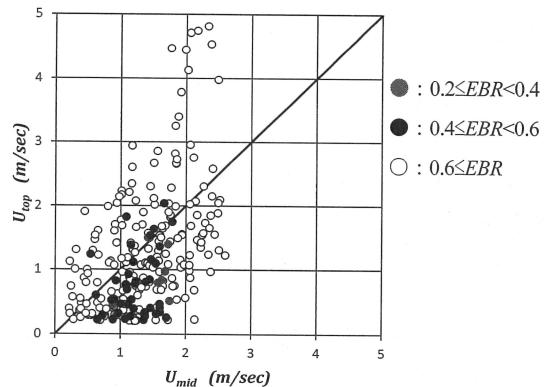


図-2. 日中における山頂サイトと中腹サイトの風速の関係

Fig.2 Relationships between half hourly wind speed at the summit site ( $U_{top}$ ) and that at the mid-slope site ( $U_{mid}$ ) during the daytime (0900-1500h) in May 2014.

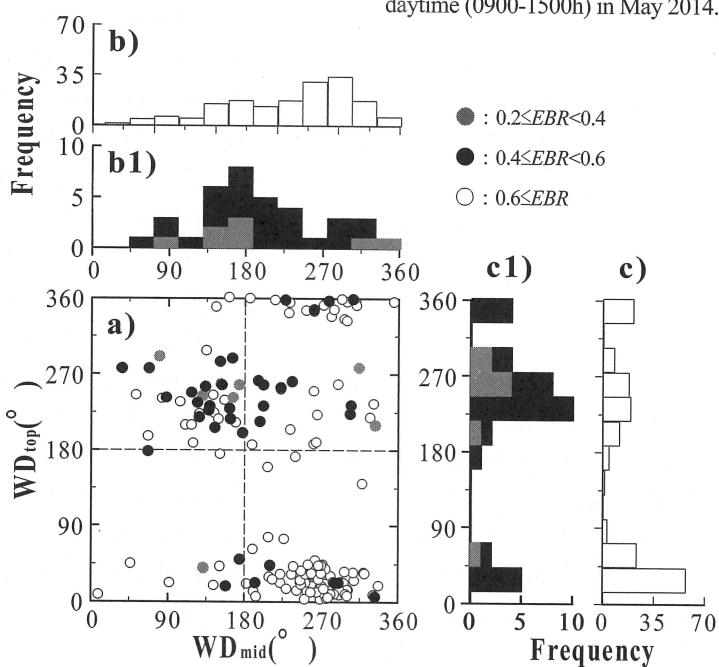


図-3. 日中(9:00~15:00)における山頂サイトと中腹サイトの風向の関係、およびそれぞれの頻度分布  
b) 中腹サイト, c) 山頂サイト, 1)  $0.2 \leq EBR < 0.6$

Fig.3 Relationships between half hourly wind direction at the summit site ( $WD_{top}$ ) and that at the mid-slope site ( $WD_{mid}$ ) during the daytime (0900-1500h) in May 2014.

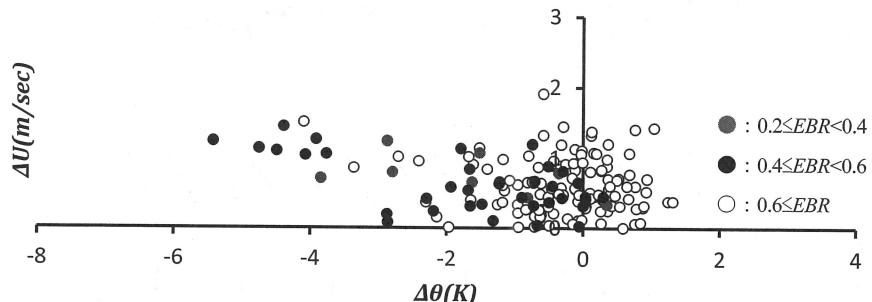


図-4. 日中(9:00~15:00)における山頂サイトと中腹サイトの温位差(Δθ)と風速差(ΔU)の関係

Fig.4 Relationship between the difference in the potential temperature ( $\Delta\theta$ ) and the difference in the wind speed ( $\Delta U$ ) during the daytime (0900-1500h) in May 2014.  $\Delta\theta$ , difference in the potential temperature between mid-slope site ( $\theta_{mid}$ ) and summit site ( $\theta_{top}$ );  $\Delta U$ , difference in the wind speed between mid-slope site ( $U_{mid}$ ) and summit site ( $U_{top}$ ).