

複雑地形上に立地する落葉広葉樹林における乱流特性 Characteristics of wind turbulence over a deciduous broadleaved forest on complex terrain

芦葉弥生^{*1}・小坂泉^{*1}・中村貴雄^{*1}・雨松里美^{*1}・瀧澤英紀^{*1}・阿部和時^{*1}
Yayoi ASHIBA^{*1}, Izumi KOSAKA^{*1}, Takao NAKAMURA^{*1}, Satomi AMAMATSU^{*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： 複雑地形上に立地する落葉広葉樹林における乱流特性を明らかにするため、群馬県利根郡みなかみ町の日本大学水上演習林の山頂（36°48'N, 139°02'E, 標高 985m）において乱流変動観測を行った。超音波風速計を用いた取得データより、お互いに直交する3成分における風速の変動成分を算出した。本研究では、乱流の性質を表す指標として主風風速（ u ）に対する摩擦速度（ u_* ）の比（ u_*/u ）と、主風風速の標準偏差に対する鉛直風速（ w ）の標準偏差の比（ σ_w/σ_u ）を用いた。安定度が中立に近い条件において、 u_*/u および σ_w/σ_u は着葉期に大きく、落葉期に小さくなる傾向を示した。風向が南西方向のとき u_*/u は北方向でのものに比べ大きく、一方 σ_w/σ_u は北方向のものに比べ小さかった。 σ_w/σ_u は u_*/u の増加に伴い風向が南西方向のとき大きく、北方向では小さくなり、両者の関係は風向により異なった。

キーワード： 乱流特性、山地森林、複雑地形、落葉広葉樹林、風向

Abstract : To investigate the characteristics of turbulence components over a deciduous broadleaved forest, turbulence was measured continuously from a tower located on the summit of Mt. Takahira in Nihon University Forest, in Minakami-machi, Tone-gun, Gunma, Japan. We calculated fluctuating components of the three-dimensional wind velocity using the eddy covariance instrument. Moreover, we determined two turbulence characteristics: the ratio of the friction velocity (u_*) to the longitudinal wind velocity (u); the ratio of the standard deviation of vertical wind velocity (σ_w) to the standard deviation of the longitudinal wind velocity (σ_u). In near natural conditions, u_*/u and σ_w/σ_u tended to increase during foliated periods and to decrease during leafless periods. In addition, u_*/u was greater for southwest winds than north winds, while σ_w/σ_u was lower for southwest winds than north winds. The relationship between u_*/u and σ_w/σ_u was dependent on wind direction, and u_*/u was positively correlated with σ_w/σ_u of southwest winds but negatively correlated with σ_w/σ_u of north winds.

Keywords : Turbulence characteristics, mountainous forest region, complex terrain, deciduous broadleaved forest, wind direction

I はじめに

陸域生態系から大気への熱エネルギーの移動、水やCO₂などの物質の移動を担う乱流に関する研究は、全球のエネルギーおよび物質循環過程のメカニズムを解明する上で重要である。近年、大気—森林間の熱・H₂O・CO₂輸送の観測では、空間の平均的なフラックスを精度高く測定できる渦相関法が広く用いられている（9）。この観測法は水平で広い地表面において、風速や風向が安定している条件で使用される。しかし、日本の国土の約7割は森林で一般に山地に多く、山地は傾斜面で構成されている。このため、山地森林における乱流の特性を明らかにすることは、日本のような複雑な地形上に立地する森林における熱収支、水収支および炭素収支などを評価する際に、その精度向上に寄与すると考えられる。

そこで本研究では、複雑地形上の山地森林において乱

流観測を行い、大気安定度が中立に近い状態において、風向の違いや樹木の着葉・落葉に伴う地表面の変化が乱流の性質にどのような影響を与えるのかを、既往の平坦な地表面上での観測結果と対比して調べた。

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（*Fagus 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する50-60年生の二次林である。葉面積指数は約4 m² m⁻² である（6）。図-1aは調査地の地形図、図-1bは地形図上に描かれた山頂を通るA-Bラインの断面図を示す。山頂周辺では、2 m程度のブナ（*Fagus crenata*）が生育し、山頂から50m程度下がった南側斜面のみ、胸高直径が

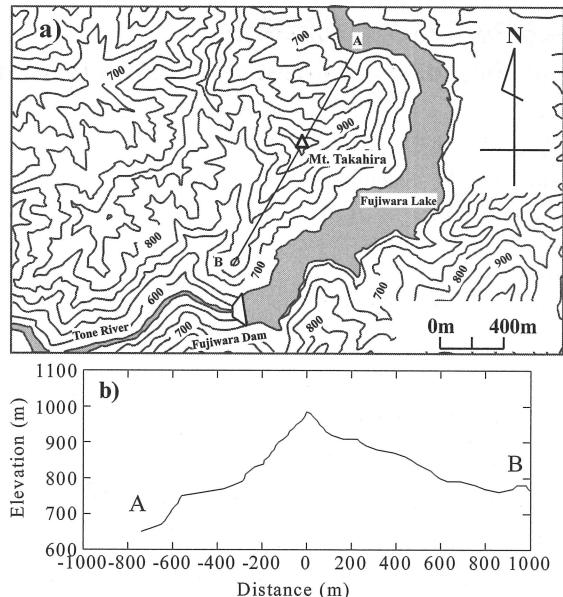


図-1. a) 観測サイトの位置を示した地形図およびb)
断面図

Fig.1 a) Topographical map showing the location of the summit site on Mt. Takahira. Numbers represent elevation (m) and purple lines indicate elevation changes of 50m. (b) Cross-sectional diagram along the A-B line representing changes in elevation as a function of distance from the summit site.

50~60cm程度で、樹高が15~20m程度のアカマツ(*Pinus densiflora*)が50m×50mに1~2本点在している。北側および南側斜面の平均傾斜角は、それぞれ約25°および約15°である。測定は同演習林の最高標高地點(高平山山頂、標高985m)に建設された6m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)を水平・東向きに設置し、10Hzの測定間隔で出力される3次元風速のデータをデータロガー(CR1000, Campbell)に記録させ、30分毎に平均値化したデータを使用した。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ので解析から除去した。さらに、風向が測器背面となる270±30°のデータについては、乱流の性質を論じるには不適と判断し解析から除去した。解析期間は2012年7月6日から2014年8月21日である。

本研究では、McMillen(5)による座標変換を行い、風速の3次元成分(u, v, w)は、各平均値($\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$)とその変動成分(u', v', w')の和とし、次式(1)で定義する。

$$u = (\bar{U} + u'), v = (\bar{V} + v'), w = (\bar{W} + w') \quad (1)$$

ここで、 u は主風風速($m s^{-1}$)、 v は回転後の座標平面上

で u に直交する成分の風速($m s^{-1}$)、 w は同座標平面上の法線成分の風速($m s^{-1}$)である。但し $\bar{V} = \bar{W} = 0$ であり、主風風速(\bar{U})のみ数値を持つ。

本研究では乱流の基本的な性質として、 u, v, w の変動成分の大きさとして標準偏差($\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$)を用いる。これらの変動成分の標準偏差は速度の次元を持つので、摩擦速度(u_*)に対する比で無次元化されたもの($\sigma_u/u_*, \sigma_v/u_*, \sigma_w/u_*$)を用いる。 $\sigma_u/u_*, \sigma_v/u_*, \sigma_w/u_*$ は、接地境界層内の乱れの強さを示し、大気安定度が中立な状態では、それぞれ2.7, 2.0, 1.2となる(4)。特に $\sigma_u/u_*, \sigma_w/u_*$ について、大気安定度の関数として経験式が提示されている(1)。本研究では、主風風速の乱れの強さと鉛直風速の乱れの強さの比($\sigma_w/u_* : \sigma_u/u_*$)、つまり主風風速の標準偏差(σ_u)に対する鉛直風速の標準偏差(σ_w)の比(σ_w/σ_u)を用いる。この指標により、例えば平坦地上と複雑地形上での乱流特性の比較において、主風風速の変動の大きさを1とした場合の、鉛直風速の変動の大きさの程度を表すと考えられる。次の指標として、主風風速に対する摩擦速度の比(u_*/u)で表されるバルク係数(C_M)を用い、以下の式(2)で算出する(4)。

$$C_M = \frac{u_*^2}{u^2}, \sqrt{C_M} = \frac{u_*}{u} \quad (2)$$

本研究では、 u_*/u を大気中の物質の輸送効率を示す指標と考え、この値に対する主風風速の変動成分の標準偏差に対する鉛直風速の変動成分の標準偏差の比(σ_w/σ_u)の変動を風向ごとに比較する。

III 結果および考察

1. 風向の頻度分布 図-2に季節ごとに集計した風向の頻度分布を示す。全てのデータを白棒で、大気が中立に近い条件($|z-d|/L < 0.05$)のものを黒棒で示した。ここで、 z は測定高度、 d は地面修正量、 L はモニン-オブコフの安定度スケールである。地面修正量 d は、植生群落の高さの0.7倍程度になることが知られているので(3)、山頂周辺の平均植生高2m×0.7である1.4mと仮定した。また、日射量が0より大きいときを日中(Daytime)、0のときを夜間(Nighttime)とした。図-2では、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)のデータを集計したものを表している。図-2の全てのデータにおいて、風向の頻度分布は北方向を示す風向0°付近にピークをもち、中立に近い条件でも同様であった。日中と夜間の風向分布を比較すると、春から秋にかけての日中を示した図-2a, 2bおよび2cにおいて風向225°付近に第2のピークがやや顕著にみられた。冬季のデータで

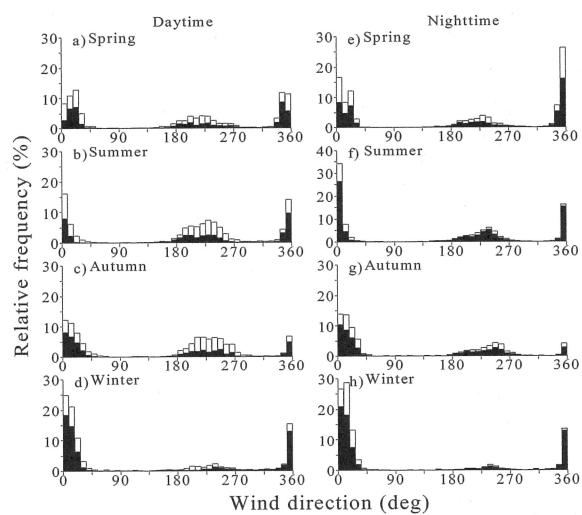


図-2. 日中と夜間における季節毎の風向の頻度分布

Fig.2 Frequency distributions of wind direction data measured in degrees from north. Spring measurements were taken from March through May; summer measurements were taken from June through August; autumn measurements were taken from September through November; and winter measurements were taken from December through February. Daytime was defined by short wave radiation $> 0 \text{ W m}^{-2}$, while nighttime was defined by short wave radiation $= 0 \text{ W m}^{-2}$. White bars represent all data, and black bars represent near neutral conditions ($|z-d|/L < 0.05$).

ある図-2d および 2h では、図中の約 90%以上のデータが風向 330°~30°に集中して分布し、日中と夜間において風向の分布形状に違いはみられなかった。

2. u^*/u および σ_w/σ_u の季節変化 図-3a, 3b に近中立時のデータを 2ヶ月移動平均した u^*/u および σ_w/σ_u の季節変化を示す。図-2において、頻度の高い 2 方向の風向に着目し、南西方向を示す風向 (180° - 240°) のデータを白丸印、北方向を示す風向 (330° - 30°) のデータを黒丸印で示した。

図-3aにおいて、 u^*/u の季節変化については、南西方向を示す風向 (180° - 240°) で明瞭であり、6月～8月の着葉期に大きく、12月～3月の落葉期に小さくなる傾向が見てとれる。北方向を示す風向 (330° - 30°) の u^*/u については、南西方向を示す風向 (180° - 240°) のものに比べ、季節変化がやや不明瞭で、その変動幅は小さい。このことは、着葉期の風向 (180° - 240°) において樹木の展葉により地表面の粗度の影響が強く表れたと考えられる。近藤 (4) によれば、 C_M は次式で算出される。ここで、 k はカルマン定数 (0.4), z_0 は風速に対する粗度であ

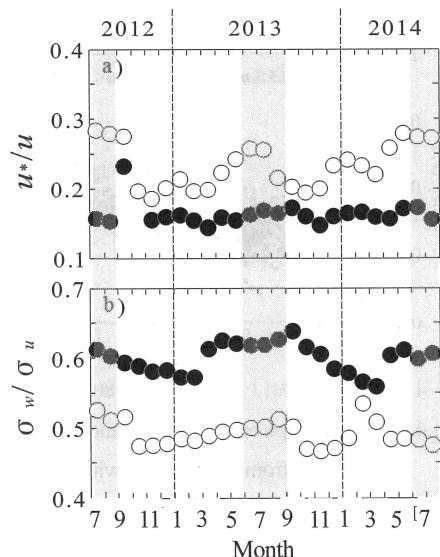
図-3. 2ヶ月移動平均した a) u^*/u , b) σ_w/σ_u の季節変化

Fig.3 Seasonal changes in 2-month moving average of a) u^*/u and b) σ_w/σ_u from July 2012 to August 2014. White circles represent wind direction data from 180° - 240° from north, and black circles represent wind direction data from 330° - 30° from north.

$$C_M = \frac{k^2}{\{\ln[(z-d)/z_0]\}^2} \quad (3)$$

る。 z_0 は植生群落の高さの 0.1 倍程度になることが多いため (3), z_0 を植生群落の高さ $2 \text{ m} \times 0.1$ である 0.2 m と仮定しすると、 C_M は 0.016 程度と算定される。この値を平坦な地表面上での基準値と想定すると、 u^*/u は約 0.13 となる。図-3a における u^*/u の平均値は、風向 180°-240°では 0.23、風向 330°-30°では 0.16 であった。本試験地の u^*/u を上述した基準値と比較すると、風向 180°-240°では基準値よりも 1.8 倍程度大きいが、風向 330°-30°では基準値に近くなつた。

図-3b における σ_w/σ_u は、北方向を示す風向 (330°-30°) で明瞭であり、着葉期に大きく、落葉期で小さくなる傾向を示した。一方、南西方向を示す風向 (180°-240°) の σ_w/σ_u の変動幅は小さく、図-3a で示された u^*/u の季節変化の傾向と異なつた。図-3b における σ_w/σ_u の平均値は、風向 330°-30°では 0.60、風向 180°-240°では 0.49 となり、北方向を示す風向 (330°-30°) で σ_w/σ_u は大きくなる傾向を示した。既往研究において、Foken (1) が提示した σ_w/u^* および σ_w/u^* の大気安定度の関数を用いた経験式より、近中立時の σ_w/σ_u を推定すると、約 0.48 となる。また、Panofsky and Dutton (7) で示された 9 つの平坦な地表面上における観測結果を平均すると約 0.52 と算定される。本研究では、平坦な地表面上の σ_w/σ_u の基準値を 0.5 前後と仮定する。本試験地で観測された σ_w/σ_u を平坦な地表面上の基準値と比べると、

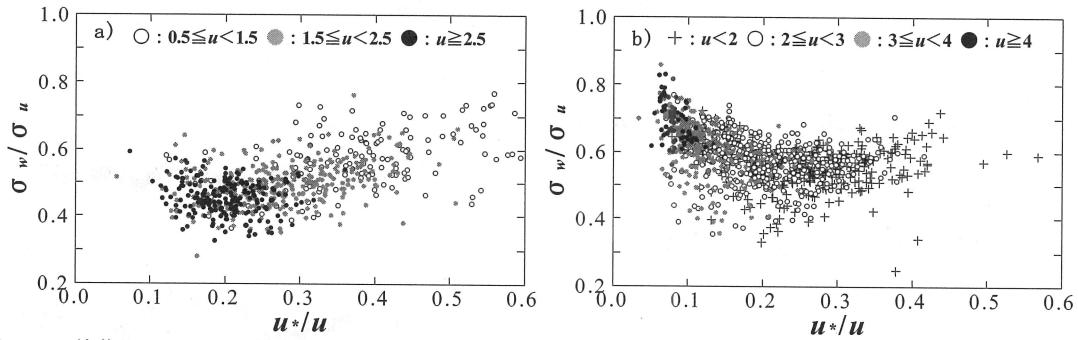


図-4. 着葉期における a) 風向 180°-240°および b) 風向 330°-30°の u^*/u と σ_w/σ_u の関係

Fig.4 Relationships between σ_w/σ_u and u^*/u during foliated periods measured every 30 min for a) wind directions from 210°-240° from north and b) wind directions from 330°-30° from north.

風向 180° - 240°では基準値に近くなり、風向 330° - 30°では基準値の 1.2 倍程度大きくなつた。

3. u^*/u と σ_w/σ_u の関係 本節の解析では、風向による地形や植生状況の差異が比較とする指標に及ぼす影響を比較するため、着葉期の日中のデータのみを解析に用いる。なお、試験地における展葉終了と落葉開始時期に関する報告（4）より、着葉期は6月から8月の3か月間とした。図-4a, 4b に、南西方向を示す風向（180°-240°）および北方向を示す風向（330°-30°）の u^*/u と σ_w/σ_u の関係を示す。

図-4において、風速の強弱で場合分けし、弱風から強風の順に十字、白色、灰色、黒色で示す。風向 180° - 240°に限定した図-4a において、 u^*/u の増加に伴い σ_w/σ_u も大きくなる傾向が見てとれる。 u^*/u と σ_w/σ_u は、弱風時で大きく、強風時で小さくなる傾向を示した。風向 330° - 30°に限定した図-4b では、ばらつきは大きいが、 u^*/u の増加に伴い σ_w/σ_u は減少する傾向が見てとれる。 u^*/u は弱風時で大きく、強風時で小さくなり、図-4a の風向 180° - 240°のものと同じ傾向を示したが、 σ_w/σ_u は弱風時で小さく、強風時で大きくなり、南西方向のものと異なつた。平坦な地表面上の σ_w/σ_u の基準値を 0.5 前後と仮定すると、風向 180° - 240°における σ_w/σ_u は風向 330° - 30°のものに比べ基準値に近いことが見てとれる。Park and Park (8) は、複雑地形上において近中立時の u^*/u の分布範囲は 0.15~0.25 になることを報告している。本試験地では、風向 180° - 240°において強風時の u^*/u の分布範囲は、Park and Park (8) の結果と概ね一致した。一方、風向 330° - 30°において強風時の σ_w/σ_u および u^*/u については、平坦な地表面上での基準値(0.5 および 0.13)から乖離する傾向を示した。これは、風向 330° - 30°の強風時では、一段スケールの大きな流域界を粗度とする乱流の影響により、境界層の発達が緩やかとなり、観測塔周辺における地表面の粗度の影響が反映されず、

σ_w/σ_u および u^*/u は小さくなつた可能性もあると考えている。

引用文献

- (1) FOKEN, T. (2008) Micrometeorology. Springer, Berlin : 307 pp
- (2) FOKEN, T. and WICHURA, B. (1996) Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric For Meteorol **78** : 83-105
- (3) 平野高司 (1997) 農学・生態学のための気象環境学. 丸善, 東京 : 62-69
- (4) 近藤純正 (1994) 水環境の気象学—地表面の水收支・熱収支-. 朝倉書店, 東京 : 350 pp
- (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) 冷温帶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) PANOFSKY, H. A. and DUTTON, J. A. (1984) Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications. Wiley-Interscience, New York : 397pp
- (8) PARK, M. S. and PARK, S. U. (2006) Effects of topographical slope angle and atmospheric stratification on surface-layer turbulence. Boundary-Layer Meteorol **118** : 613-633
- (9) 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