

長大斜面上の森林で算定されるフラックスと座標変換の関係

小坂 泉・瀧澤英紀(日大生物資源)

要旨：長大な斜面上でかつ、樹冠凹凸の大きなタイ北部の熱帯季節林の樹冠上で取得した乱流データを用いて、乱流の性質が座標変換によりどのように変化するかについて解析を行った。その結果、鉛直風速の標準偏差について、座標変換したものは(σ_w)変換していないもの(σ_z)に対して、吹き上げ風では常に大きく、吹き下げ風では常に小さくなる。座標変換した場合、鉛直風速の標準偏差と主風風速の標準偏差の比(σ_{u_2}/σ_w)は吹き上げ角度によって変動する。 σ_{u_2}/σ_w の変化率は吹き上げ角度が負の方で大きくなることから、乱流の性質は吹き上げ風と吹き下げ風で異なることがわかった。

キーワード：山地斜面、吹き上げ・吹き下げ風、乱流変動成分、座標変換

Abstract : The turbulence measurements were carried out on a mountain slope with inhomogeneous canopy of hill evergreen forest in Northern Thailand. We analyzed what the characteristics of the fluctuating components of turbulence changes with coordinate rotation. It found that the standard deviation of the fluctuating component of vertical wind velocity after the coordinate rotation(σ_w) is bigger than its standard deviation before the coordinate rotation(σ_z) in case of upslope flows, (σ_w) is smaller than (σ_z) in case of downslope flows. The ratio of standard deviation of the fluctuating component of horizontal wind velocity to standard deviation of the fluctuating component of vertical wind velocity after the coordinate rotation (σ_{u_2}/σ_w) change according to the coordinate rotation angle in the u_1 - z plane. The change rate of σ_{u_2}/σ_w is larger in the case of the minus of the coordinate rotation angle in the u_1 - z plane.

Keywords : Mountain slope, Upward and downward winds, Fluctuating component of turbulence, Coordinate rotation

I はじめに

大気-森林間の熱・水・CO₂ 移動の観測では、空間の平均的なフラックスを精度高く測定する乱流変動法が広く用いられる(例えば, 5,6)。この測定法は、水平で一様な地表面が連続していることが必要とされるが、森林は山地などにも多くあるので、傾斜地における測定をしいられることがある。その際、傾斜地は水平地に比べ以下の点で大きく異なる。一般に斜面に沿って風が吹くので鉛直方向の平均風速は長い時間で平均してもゼロにならず、定常的に吹き上げ風で正の値、吹き下げ風で負の値をとる。そのためフラックスの計算などの乱流解析において鉛直方向の平均風速をゼロにするように3次元の風速成分に対して座標変換する必要がある(3)。

文字ら(4)は斜面傾斜が約10度の山地針葉樹林において、座標変換前後のフラックスの大きさを比べ、吹き上げ角度が正であると変換後のフラックスが大きく、吹き上げ角度が負であると小さくなる吹き上げ角と座標変換効果の強い傾向を図示している。す

なわち、傾斜地の乱流変動法における座標変換の意味は大きい。しかし、座標変換しない場合と変換した場合で、実際の現象として乱流特性にどのような違いが生じているかについての詳細は説明をしていない。

本試験地は長大な斜面のやや上部に位置し、樹冠凹凸の著しい森林地である。この試験地では、日中では東～南の方向から斜面を上昇する吹き上げ風が多く、夜間では西の方向からの斜面を下降する吹き下げ風が卓越し、日周期の局地循環が顕著にみられる(2)。本研究では、30分間の鉛直と主風方向の風速変動成分を乱流の性質とし、各風速成分の変動の大きさとして標準偏差(σ_x : 添え字は各風速成分を示す)を用いる。本研究の目的は、傾斜地の森林樹冠上における乱流観測データをもとに、乱流の性質が座標変換によりどのように変化するかについて解析し、座標変換の影響がフラックス算定に与える影響を明らかにすることである。

Izumi KOSAKA, Hideki TAKIZAWA (College of Bioresource Sciences, Nihon University, 1866 Kameino, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan) Relationships between coordinate rotation and flux estimation above a forest on a mountain slope

II 方法

1. 観測地と測定方法 観測地はタイ北部チェンマイ近郊(18° 45' N, 98° 54' E, 標高 1,268-1,420m)の常緑性の熱帯季節林である。この森林では優占樹種はブナ科(*Fagaceae*)で、マテバシ属(*Lithocarpus*)などが混在している。平均樹高は 30m 程度で、最大は 40m 程度であり、大きなギャップもあり樹冠凹凸は大きい。

タワー周りの東西方向の平均傾斜角は 10° で、東向き斜面上の標高 1,295m に 50m の観測塔が設置されている。この観測塔の高さ 39m の位置において南方向に 2m のアームを水平に取り付け、その先端にスパン長 10cm の超音波風速風向温度計(KAIJO, DA-600)を設置した。測定は 10Hz の間隔で行われ、約 30 分毎(1 ランのデータ数: 16,384 個)に 3 次元風速および気温のデータをパーソナルコンピュータに記録した。観測は 1999 年に 4 回、3 月、5 月、8 月、11 月のそれぞれ 5 日間程度行われた。

2. 解析に使用したデータ 今回の解析では、以下のようなノイズやスパイクを含んだ約 30 分毎の観測データは省いた。降雨中の値は、センサー感部の間に雨粒が入ることにより、またセンサー感部に水滴が溜まり不定期に滴下することによりノイズを含む可能性があるため省いた。また温度に電気的なノイズと思われる極端な値が入っている場合には省いた。さらに、Foken and Wichura (1996)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。これらにより消去されたデータは全データ 1,126 ランのうちの 420 ラン(約 37%)であり、解析には 706 ランのデータを用いた。

本研究での座標変換は、超音波風速温度計を水平に設置して観測された風速の 3 次元成分(x, y, z)より、乱流の性質である渦の成分、すなわち各変動成分をまず抜き出す。まず、30 分間の測定値を用い、水平面(x - y 面)における主風方向を求め、主風方向 u_1 とそれと直角方向 v とする。次に、主風方向 u_1 と鉛直方向 z の平均風速から吹き上げ角度を求め、その角度で主風方向と z からなる面において座標を回転させ、鉛直方向の平均風速が 0 となるように新たな主風風速 u_2 と鉛直方向 w を求める。本研究では、無変換の鉛直風速と主風風速を z と u_1 とし、変換した鉛直風速と主風風速を w と u_2 とする。また、吹き上げ角度が正の場合を吹き上げ風とし、吹き上げ角度が負の場合を吹き下げ風とする。

III 結果および考察

1. 鉛直および主風風速の変動成分の標準偏差 図-1a)に鉛直風速の変動成分の大きさを表す標準偏差について無変換(σ_z)と変換したものの(σ_w)を比較する。吹き上げ風と吹き下げ風で分けると、変換した鉛直風速の変動成分の標準偏差(σ_w)は吹き上げ風では常に大きく、吹き下げ風では常に小さくなった。

図-1b)に主風方向の変動成分の大きさを表す標準偏差について無変換(σ_{u_1})と変換したものの(σ_{u_2})を比較する。吹き上げ風と吹き下げ風で分けると、変換した主風方向の変動成分の標準偏差(σ_{u_2})は吹き上げ風では常に小さく、吹き下げ風では常に大きくなった。

図-2 に鉛直風速の変動成分の標準偏差に対する主風風速の変動成分の標準偏差の比において無変換のもの(σ_{u_1}/σ_z)と変換したものの(σ_{u_2}/σ_w)の比を比較する。図-2において、吹き上げ風を丸印で、吹き下げ風を三角印で示し、吹き上げ角度の大小で色を分けて示した。図-2では、図中の 1:1 のラインに対して吹き上げでは σ_{u_1}/σ_z を下側に、吹き下げでは σ_{u_2}/σ_w を上側に常に分布している。また図-2の σ_{u_1}/σ_z と σ_{u_2}/σ_w の関係について、吹き上げ角が +5° 以上および -5° 以下のものと、それ未満(-5° ~ +5°)のものを比較すると、1:1 のラインに対して隔たりが大きくなるようにみとれる。

これらの結果は、吹き上げ角度によって鉛直および主風風速の変動成分の大きさが変化し、つまり乱流の性質が変化することを意味している。

2. 吹き上げ角度と鉛直および主風風速の変動成分の標準偏差において座標変換しないものに対する座標変換したものの比の関係 図-3a)~c)は、鉛直および主風風速の変動成分の標準偏差において座標変換しないものと座標変換したものの比(σ_w/σ_z および $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$)、鉛直風速の変動成分の標準偏差に対する主風風速の変動成分の標準偏差の比において変換しないものと変換したものの比($(\sigma_{u_2}/\sigma_w)/(\sigma_{u_1}/\sigma_z)$)がそれぞれ吹き上げ角度に対してどのように変化するかを示したものである。

σ_w/σ_z , $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$ および $(\sigma_{u_2}/\sigma_w)/(\sigma_{u_1}/\sigma_z)$ と吹き上げ角度の関係では、高い相関が認められる。これらの関係について、切片=1 とした 2 次の近似式を図-3a)~c)にそれぞれ示した。それぞれの近似式における決定係数(R^2)は 0.8 以上と高い値となった。吹き上げ角度 1° に対して σ_w/σ_z は 0.7~1.0%、 $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$ は 0.5%、 $(\sigma_{u_2}/\sigma_w)/(\sigma_{u_1}/\sigma_z)$ は 1.2~1.6% で変化する。吹き上げ角度に対するそれぞれの比の変化率は吹き上げ角度が

負の方で大きくなる。

以上より、図-3における σ_w/σ_z , $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$ および $(\sigma_{u_2}/\sigma_w)/(\sigma_{u_1}/\sigma_z)$ は吹き上げ角度によってほぼ決まっていることが分かった。このことは、図-3で示した近似式を用いて座標変換による鉛直風速と主風風速の標準偏差の変化率を定量化できることを示唆する。

3. 座標変換による鉛直および主風風速の変動成分の標準偏差の変化 図-4は吹き上げ・吹き下げ角度を+12° から-12° まで変化させたとき、鉛直風速の標準偏差と主風風速の標準偏差が吹き上げ角度とともに、どのように変化するかを示したものである。図-3で決定した σ_w/σ_z , $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$ の近似式を用いて吹き上げ角度を-12° から+12° で変化させ σ_w/σ_z および $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$ を算出し、これらの比を次式で x 成分と y 成分に分離した。

$$x = 1.00 \cdot \sigma_w/\sigma_z \cdot \cos((\varphi + 90)/180 \cdot \pi) \quad (1)$$

$$y = 1.00 \cdot \sigma_w/\sigma_z \cdot \sin((\varphi + 90)/180 \cdot \pi) \quad (2)$$

$$x = 1.32 \cdot \sigma_{u_2}/\sigma_{u_1} \cdot \cos(\varphi/180 \cdot \pi) \quad (3)$$

$$y = 1.32 \cdot \sigma_{u_2}/\sigma_{u_1} \cdot \sin(\varphi/180 \cdot \pi) \quad (4)$$

ここで、 φ は吹き上げ角度(°)である。なお吹き上げ角がゼロの場合、 σ_z に対する σ_{u_1} の比の平均をとり、鉛直風速の変動成分と主風風速の変動成分を(0.00, 1.00)と(1.32, 0.00)に設定した。

図-4では、吹き上げ角度が大きくなると σ_w を大きくし、 σ_{u_2} を小さくする。吹き下げ角度が大きくなると σ_w を小さくし、 σ_{u_2} を大きくすることが分かる。また σ_w と σ_{u_2} は吹き上げ角度が±12° の範囲においてほぼ直線的に変化する。このことから、様々な地表面で行われる乱流観測のデータについて吹き上げ角度で座標変換すると、それぞれについて同様な楕円が描けると考えられる。

気温、比湿や CO₂ といったスカラー量と鉛直風速の変動成分の共分散であるフラックスを大きく算定するには、 σ_w が大きくなるように座標軸を回転させればよいことになる。つまり、観測されたデータが吹き上げ風や吹き下げ風に関わらず、座標軸をより吹き上げるように座標軸を回転すれば σ_w が大きくなり、フラックスの値も大きくなると考えられる。

IV まとめ

本研究では、傾斜地の森林樹冠上における乱流観測データをもとに、乱流の性質が座標変換によりどのように変化するかについて解析を行い、以下の結論を得た。

(1) 乱流の性質の1つである、鉛直風速の標準偏差

について、座標変換したものは(σ_w)変換していないもの(σ_z)に対して、吹き上げ風では常に大きく、吹き下げ風では常に小さくなる。このことが原因で、吹き上げ風では無変換に比べて変換後のフラックスが大きくなり、吹き下げ風では無変換に比べ変換後のフラックスが小さくなると考えられる。

(2) 座標変換した場合、鉛直風速の標準偏差と水平風速の標準偏差の比(σ_{u_2}/σ_w)の変化率は吹き上げ角度によって変動する。これらの比の変化率は吹き上げ角度が負の方で大きくなることから、乱流の性質は吹き上げ風と吹き下げ風で異なる。

引用文献

- (1) FOKEN T, WICHURA B (1996) Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric For Meteorol*, **78** : 83-105.
- (2) 小坂泉, 瀧澤英紀, 田中克典, チャチャイ タンタシリン, 鈴木雅一, 塚本良則(2004) 熱帯域の丘陵性常緑樹林上における乱流がもつ幾つかの性質. *水文・水資源学会誌*, **20** : 243-252.
- (3) MCMILLEN RT (1988) An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol*, **45** : 231-245.
- (4) 文字信貴, 鱧谷憲, 安藤純二 (1999) 複雑地形形状の渦相関測定における座標変換の効果. *農業気象*, **55** : 247-252.
- (5) TUMIPSEED AA, BLANKEN PD, ANDERSON DE, MONSON RK (2000) Energy budget above a high-elevation subalpine forest in complex. *Agric For Meteorol*, **110**: 177-201.
- (6) WILSON K, ALLEN G, FALGE E, AUBINET M, BALDOCCHI D, BERBIGIER P, BERNHOFER C, CEULEMANS R, DOLMAN H, CHRIS F, GRELE A, IBROM A, LAW BE, KOWALSK A, MEYERS T, MONCRIEFF J, MONSON R, OECHEL W, TENHUNEN J, VALENTIN R, VERMA S (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric For Meteorol*, **113** : 223-243.

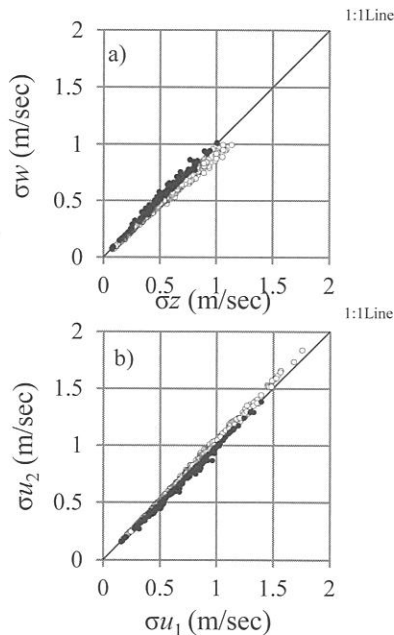


図-1. 座標変換前と変換後のa)鉛直風速の標準偏差の関係およびb)主風速の標準偏差の関係
 Fig.1 Relationships between a) the standard deviation of the fluctuating component of vertical wind velocity before the coordinate rotation(σ_z) and after the coordinate rotation(σ_w), b) the standard deviation of the fluctuating component of horizontal wind velocity before the coordinate rotation(σ_{u_1}) and after the coordinate rotation(σ_{u_2})
 Legends: ●, upslope flows ; ○, downslope flows

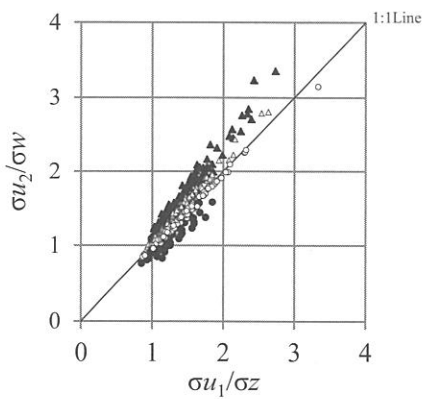


図-2. 鉛直風速の変動成分の標準偏差に対する主風速の変動成分の標準偏差の比において無変換のもの(σ_{u_1}/σ_z)と変換したもの(σ_{u_2}/σ_w)の比の関係
 Fig.2 Relationship between the ratio of standard deviation of the fluctuating component of horizontal wind velocity to standard deviation of the fluctuating component of vertical wind velocity before the coordinate rotation (σ_{u_1}/σ_z) and after the coordinate rotation (σ_{u_2}/σ_w)
 Legends: ●, upslope flows(angle in the u_1 -z plane over +5deg);
 ○, upslope flows(angle in the u_1 -z plane between 0 and +5deg);
 ▲, downslope flows(angle in the u_1 -z plane under -5deg);
 △, downslope flows(angle in the u_1 -z plane between -5 and 0deg)

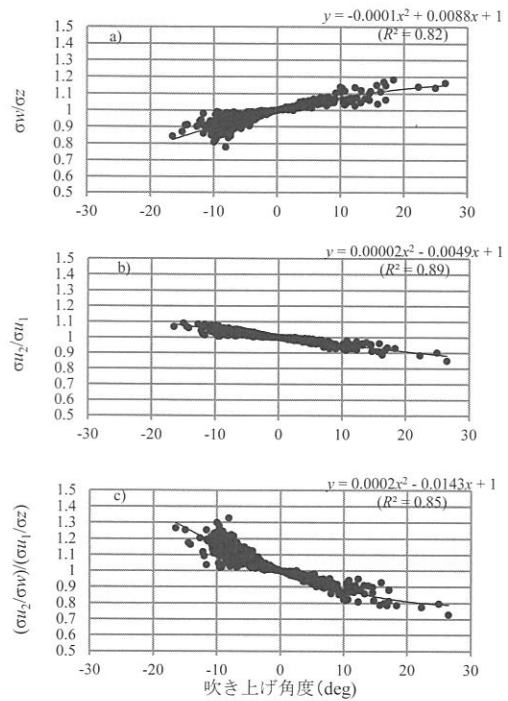


図-3. 吹き上げ角度とa) σ_w/σ_z , b) $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$ およびc) $(\sigma_{u_2}/\sigma_w)/(\sigma_{u_1}/\sigma_z)$ の関係
 Fig.3 Relationships between the angle in the u_1 -z plane and a) σ_w/σ_z , b) $\sigma_{u_2}/\sigma_{u_1}$, and c) $(\sigma_{u_2}/\sigma_w)/(\sigma_{u_1}/\sigma_z)$

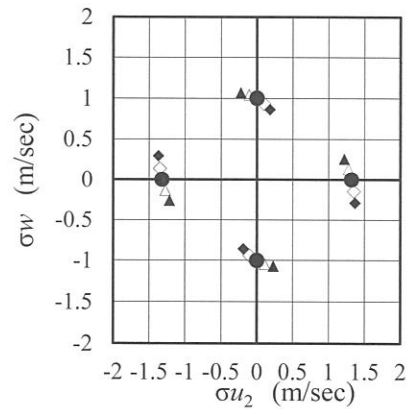


図-4. σ_{u_2} と σ_w の関係
 Fig.4 Relationship between σ_{u_2} and σ_w
 Legends: ◆, angle in the u_1 -z plane equal -12deg;
 ◇, angle in the u_1 -z plane equal -6deg;
 ▲, angle in the u_1 -z plane equal +12deg;
 △, angle in the u_1 -z plane equal +6deg;
 ●, angle in the u_1 -z plane equal 0deg