

生態環境計測学 2019.05.22 の質問・補足

回答者 : 植山

1. 風速が2倍になったときのプロファイルと夜間の温度・湿度プロファイルに関して、説明が欲しい。

[Answer]

大気-植物群落間の物質輸送は乱流拡散によって起こる。ここでその他の環境要因を変化させず、風速のみを 6 m s^{-1} から 12 m s^{-1} に2倍とすると機械的生成による渦による輸送が高まるため鉛直方向の輸送が促進され、気温、水蒸気、 CO_2 といった物理量の鉛直勾配が小さくなる。樹冠部の葉は日射によって暖められるが、風が強くなると境界層コンダクタンスが高くなるため、大気-葉面間の熱交換が盛んとなり葉温は風が弱いときよりも低くなる。風速が2倍になったときの

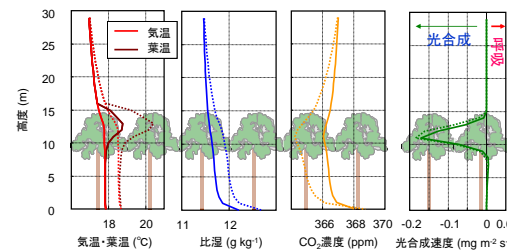


図1. 物理量の鉛直プロファイル
実線：風速2倍、破線：1倍

光合成速度に注目すると (図1)、葉面レベルでの光合成速度が低下していることが分かる。これは、風速の増加に伴って拡散が活発に行われて、樹冠部での湿度が低下し気孔コンダクタンスが低下したためである (大気の乾燥に伴い気孔が閉じ気味になった)。この場合、境界層コンダクタンスの上昇による葉面近傍の CO_2 濃度の増加よりも、湿度の低下に伴う気孔コンダクタンスの低下のほうが、より強く群落光合成に影響したと考察することができる。ただし、ここでの光合成の低下の影響は小さく、 CO_2 濃度の鉛直勾配が小さくなった原因は拡散速度が増加したことによるものである。今回の実験では、風速を 6 m s^{-1} から 12 m s^{-1} と非常に強い風速に対する実験であるが、より低い風速の 1 m s^{-1} を 2 m s^{-1} に変化させる場合、さまざまな要因により非線形な応答を示す可能性があり、異なる結果になる可能性があることに留意する必要がある。

夜間は放射冷却が発生するため、樹冠部の葉温が低下する (図2)。その為、大気から樹冠にエネルギーが奪われ、樹冠周辺の気温は低下する。一方、夜間は植物による蒸散が起こらない (光のない条件では気孔が閉じているため) ために、樹冠部からの水蒸気の供給がなくなり、その結果、樹冠と上空の大気における比湿の鉛直勾配は無くなる。土壌周辺で比湿が僅かに高くなるのは、土壌から蒸発が生じているためである。 CO_2 については、夜間は光合成が行われず呼吸のみが行われるため、樹冠部において濃度が高くなる。また、地表面からは根や微生物からの呼吸によって CO_2 が放出されるために、地表面付近の CO_2 濃度は日中と同様に高くなる。

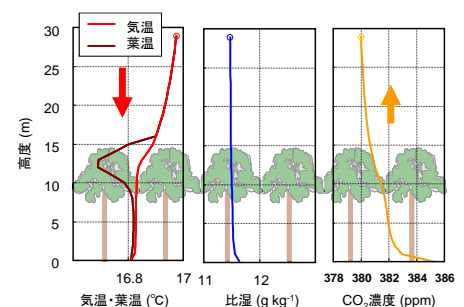


図2. 夜間の鉛直プロファイル

* ここでの結果は、群落多層モデル (Kishihara et al., 2006) を用いたシミュレーションである。

引用文献 :

Kishihara, Y., Ueyama, M., Hamotani, K. and Monji, N., 2006: Vertical change of CO₂ flux within a larch forest. J.Agric.Meteorol. 62, 9-14.

2. 傾度法の式の意味と計測法に関する補足がほしい。

[Answer]

CO₂フラックス、顕熱フラックスに関する傾度法の式は、以下のように表される。

$$Fc = -\rho K_c \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta z} \quad (1)$$

$$H = -c_p \rho K_h \frac{\Delta \bar{\theta}}{\Delta z} \quad (2)$$

$$K_h = K_c = \frac{k^2 z^2}{\Phi} \frac{\Delta \bar{U}}{\Delta z} \quad (3)$$

ここで、 ΔC は2高度のCO₂濃度差、 $\Delta \theta$ は2高度の温位差、 Fc はCO₂フラックス、 H は顕熱フラックス、 ρ は空気の密度、 z は高さ、 K は乱流拡散係数を表す。一般には顕熱に対する乱流拡散係数(K_h)とCO₂などのガスに関する乱流拡散係数(K_c)は同等であるとみなすことが出来る。 k はカルマン定数(0.4)、 ΔU は風速差、 Φ は大気安定度に関する補正值を表す。

上記の式は、フラックスが2高度のCO₂濃度差、風速差、安定度(温位差、風速差)によって決まることを表している。例えば、上の高度のCO₂濃度が下の高度よりも高い場合、CO₂が上から下へと輸送され、フラックスは負となる。1式先頭にマイナスが付いている理由は、この向きを合わせるためである。一般に、微気象学的手法によるフラックスの向きは、生態系(地表面)から大気への輸送を正、大気から生態系への輸送を負とすることが多い。

接地境界層(地表面の影響を強く受ける大気下端の気層)での物質輸送は乱流拡散を支配する渦によるが、傾度法ではこの乱流拡散を支配する渦を直接計測しているわけではなく、渦生成に伴う輸送効率の違いを拡散係数という指標を使ってモデル化している。即ち、拡散係数とは理想的な接地境界層内において、2高度の風速、温位の差が観測された際、それに起因して生成されるであろう渦を見積るために導入された指標と考えることができる。凹凸が大きいなどで地表面の状態が理想的でない場合、計算された拡散係数を補正する必要がある。3式のように拡散係数が表現されるとおり、風速差が同じであれば高度が高いほど拡散係数が大きくなり、大気安定度の効果(Φ)は高さや風速差とは独立して拡散を強めたり弱めたりすることが分かる。拡散係数の数式は、運動量フラックスと顕熱フラックスが水平方向に一樣な地表面であれば高さによって変化しないとする相似則から導くことができる(文字, 2003)。

傾度法では、2高度間の物理量の差を正確に計測することが重要となる。そのため、計測に用いる温度計、風速計や赤外線ガス分析計などは、予測される物理量の差が十分に計測できる精度を有しているかを事前に検討し、差を十分な精度で計測するための観測デザインを考える必要がある。特に赤外線ガス分析計は感度

が経時的に変化するため、長期的に観測する場合は器差により正確な濃度差が計測できないことがある。このような問題を避けるために、各高度からの空気を1台の分析計にポンプ等でき取りこむことで、濃度差が正確に計測できるような工夫が必要となる。

引用文献：

文字信貴 (2003), *植物と微気象 群落大気の流れとフラックス*, 大阪公立大学共同出版会, 大阪, pp140.

3. 暖かい空気の密度が低く、冷たい空気の密度が高くなる理由を教えてください。

[Answer]

理想気体の状態方程式を移項すると、下記ようになる。

$$n/V = P/(RT) \quad (4)$$

ここで、 n はモル数、 V は体積、 P は圧力、 T は気温、 R は気体定数を表す。密度は単位体積あたりの質量であるため、 n/V と等価である。4式から気温が高くなれば密度が低くなり、低くなれば密度が高くなること導ける。気温が高い状態とは、気体中の分子運動が高く、分子間距離が大きい状態である。このため、体積が膨張して密度が低くなる。

4. 鉛直輸送についてのみ説明していたが、水平輸送を考慮する必要がないのか？

[Answer]

微気象学的手法が適用可能な水平方向に一樣で平坦な地表面であれば、水平輸送の寄与を一般に無視することができる。例えば、同一の地表面が一樣に広がっていれば、水平方向の物理量の分布は均一になり、水平方向の拡散は無視できる。ただし、地表面が非一樣であれば水平方向にエネルギーや物質が拡散（あるいは移流）することになり、フラックスを過小、あるいは過大評価することになる。また山地などの複雑地形では、夜間に地表面近くの冷たく重い空気が斜面を流れる移流が発生し、フラックスの過小評価となっていることが指摘されている。

5. 水平方向に一樣な場所は、森林以外にあるのか、また、水平方向に非一樣な場所で微気象学的手法を用いることはできるのか？

[Answer]

水平方向に一樣な場所は、森林以外にも、農地生態系、草原、ツンドラなどの植生のほか、海洋、雪面など様々な表面がある。

水平方向に非一樣な場所でも、測定システムや取り付け高度を工夫すれば微気象学的手法でフラックスを計測できる可能性はある。非一樣な場所では、測定されたフラックスが何を代表したものであるかの検討が必要である。また、傾度法は2高度の差からフラックスを計算するが、この2高度の空間代表性が異なれば

正しいフラックスを計算することができなくなる。例えば、樹木と建物が混在する都市で計測する際、下の高度が樹木の影響を受けた濃度を計測し、上の高度が建物の影響を受けた濃度を計測してしまうと、出てくる濃度差は上下の高度の拡散に起因する濃度差ではなく、単に空間的非一様に起因する濃度差を計測していることとなる。こういった空間非一様性の影響を受けない程度に高い高度で測定することが不可欠である。

6. 渦相関法の計算式が共分散の形で表現されているが、渦相関法ではなぜフラックスを共分散の形であらわすのか？

[Answer]

物理量 s のフラックス (F_s) は、速度 (鉛直方向のフラックスであれば鉛直風速; w) に物理量の密度 (ρ_s) を乗じることで、以下のように表される。

$$F_s = \overline{w\rho_s} \quad (5)$$

ここで、物理量の混合比 (s) を計測している場合は、混合比に関するフラックスに乾燥空気の密度 (ρ_a) を乗じて、以下のようにあらわすことができる。

$$F_s = \rho_a \overline{ws} \quad (6)$$

フラックスが鉛直風速と対象とする物理量の変動の積で表されるのは、高速で (高い鉛直風速で) 少量のものが運ばれることと、低速で (低い鉛直風速で) 大量のものが運ばれることが等価であることを意味する。物理量の瞬時値は変動成分と平均成分に分けることができる。

$$\begin{aligned} w &= \overline{w} + w' \\ s &= \overline{s} + s' \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、オーバー・バーは時間平均、プライムは変動を表す。6式に7式を代入すると、

$$\begin{aligned} \overline{ws} &= \overline{(\overline{w} + w')(\overline{s} + s')} \\ &= \overline{\overline{w}s + \overline{w}s' + w'\overline{s} + w's'} \\ &= \overline{\overline{w}s} + \overline{w's'} \end{aligned} \quad (8)$$

のように展開できる。ここで、変動の定義で $\overline{w'} = 0$ 、 $\overline{s'} = 0$ である。 $\overline{w} = 0$ が成り立つ条件であれば、フラックスは共分散の形で表すことができる。

共分散は対象とする2変数間にどの程度相関があるかを表し、正であれば正の相関、負であれば負の相関があることを示す。また、相関係数(r)は、共分散と標準偏差を用いて以下のようにあらわすことができる。

$$r = \frac{\overline{w's'}}{\sigma_w \sigma_s} \quad (5)$$

ここで、 σ_w と σ_s は、それぞれ鉛直風速と対象とする物理量の標準偏差をあらわす。共分散は基本的な統計指標であるため、統計関係の書籍やインターネットなどから高校数学を復習しておくこと。

参考文献：

文字信貴 2003. 植物と微気象 一群落大気の乱れとフラックスー. 大阪公立大学共同出版会, 140pp.

7. 渦のサイズを決定する要因はなにか？

[Answer]

接地境界層内の渦のサイズはさまざまな要因によって決まる。一般に、高度が高いほど大きな渦が卓越し、地表面に近いほど小さな渦となる。これは、上空から運動量が輸送されてくる中で、大きな渦が地表面に近づくにつれて壊れて小さな渦へとエネルギーがカスケードするからである。大気が不安定な時は、安定な時に比べて接地境界層内の渦は大きくなる。森林の中では、葉によって渦が壊れるため、葉の大きさに起因するスケールの渦が多く生成される。それらの渦も、地表面に近づくにつれてより小さな渦へとカスケードしていく。