

生態環境計測学 2015.10.28 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、風速が2倍になると機械生成による渦が卓越するため鉛直方向の輸送が盛んになり、気温、水蒸気、CO₂といったものの鉛直勾配が小さくなる。また、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、風速が2倍になったことによる境界層コンダクタンスの上昇よりも、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出来る。しかしながら、ここでの光合成の低下の影響は小さく、CO₂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。

夜間は放射冷却が発生するため、樹冠部の葉面温度が低下する (図2)。その為、大気から樹冠にエネルギーが奪われるために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、土壌からの蒸発が生じているためである。CO₂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 CO₂が放出されるために、地表面付近の CO₂濃度は高くなる。

* ここでの結果は、群落多層モデルを用いたシミュレーションである。

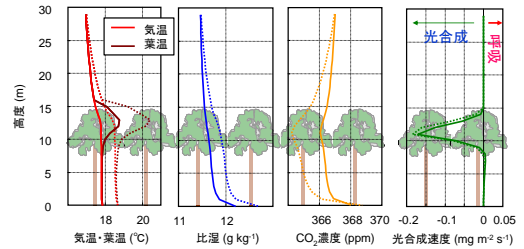


図1. 物理量の鉛直プロファイル
実線：風速2倍、破線：1倍

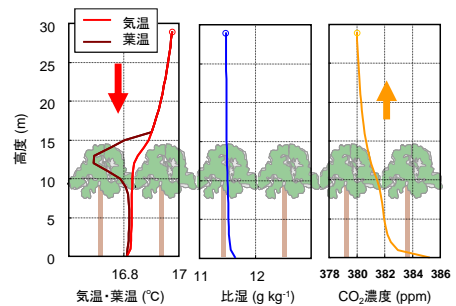


図2. 夜間の鉛直プロファイル

2. 傾度法の式の意味、フラックスの向き・符号について

[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。

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

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

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

ここで、 ΔC は2高度のCO₂濃度差、 $\Delta \theta$ は2高度の温位差、 F_c はCO₂フラックス、 H は顕熱フラックスを表す。 ρ 、空気の密度、 z は高さを表す。 K は乱流拡散係数を表し、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 は大気不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)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式の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。

大気中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変数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(地表面の影響を強く受ける大気下端の気層)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。故に、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。

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、予測される高度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。

3. 傾度法における CO₂ 濃度等の物理量はどの高さでの平均値を用いると良いのか？

[Answer]

傾度法では高さ方向に異なる 2 点の物理量の平均値を用いる。ここで、植物群落上で傾度法による観測をする場合は、群落上の 2 点における物理量の高度差を観測する必要がある。植物群落内は、勾配—拡散理論が成り立たないため、傾度法を適用することはできない。例えば、植物群落の高さが 15 m である場合は、25 m と 35 m の 2 高度で観測をし、その平均値から勾配を算出するとよい。

2 点間の拡散係数を計算するための高度、即ち 3 式における z は、対数法則から下記のように表される。

$$z = \frac{z_{\text{high}} - z_{\text{low}}}{\ln\left[\frac{z_{\text{high}} - d}{z_{\text{low}} - d}\right]} \quad (4)$$

ここで z_{high} 、 z_{low} は上下の測定高度、 d は地面修正量をあらわす。

4. 傾度法における安定度補正の意味とは？

[Answer]

傾度法は、2 高度の物理量の差と拡散係数からフラックスを算出するための観測手法である。大気中においてたくさんの渦が生成されていれば、それだけ輸送が効率よくなされる。渦の生成には風速差によって機械的に生じる渦（シア生成の渦）と浮力によって生じる対流性の渦がある。日中は、大気が不安定であるため対流が盛んに起こるため、輸送が活発に起こる。一方、夜間は大気が安定であることが多いため、日中と比べて輸送が起こりにくい。この大気安定度の効果を考慮したものが、拡散係数の式中（式 3）にある安定度補正項である。

安定度による補正、即ち浮力生成による渦を適切に考慮して計算したフラックス（図 3 の青線）は考慮せずに計算したフラックス（図 3 の赤線）に比べて日中のフラックスの絶対値が 2 倍程度大きくなる。このことは、浮力生成による渦により全輸送量のおおよそ半分が輸送されていることを示唆する。一方、夜間は安定度を補正しないとフラックスは過大評価となっている。このことは、大気が安定状態であるため輸送が起こりにくくなっていることをあらわす。安定成層下では上下の輸送が起こりにくいため、鉛直勾配は大きくなるが拡散係数が小さいため 1、2 式によって表されるフラックスの絶対値は小さくなる、

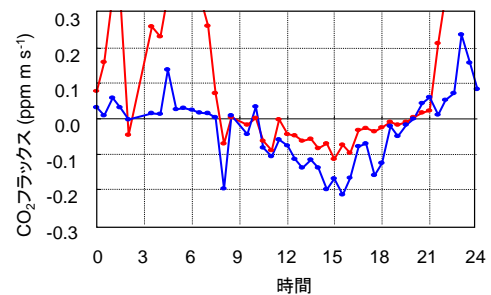


図 3. 傾度法により観測された CO₂ フラックス
赤線は安定度補正を考慮せずに計算されたフラックス、青線は考慮して計算されたフラックスである。

5. 定常性に関して理解しづらかった。

[Answer]

ある状態が時間的に変化せずに一定の状態を維持している状態を定常状態という。また、定常状態であることを、定常性が確保されているということもできる。微気象学的手法では大気中のエネルギーや物質の輸送が乱流拡散によってなされることを利用してフラックスを計測する。微気象学的手法によるフラックス観測に定常性が必要とされる理由は、この乱流輸送の理論が定常状態において成り立つことに起因する。

図4は、ある期間における物理量の変化の模式図である。図4aのように、物理量に変動がありつつも一定期間で概ね一定の値で推移している場合、その期間において定常性が確保されているとすることができる。一方、図4bのように期間において信号が徐々に変化する場合や、図4cのように値が突然変化する場など是非定常な状態であったといえる。

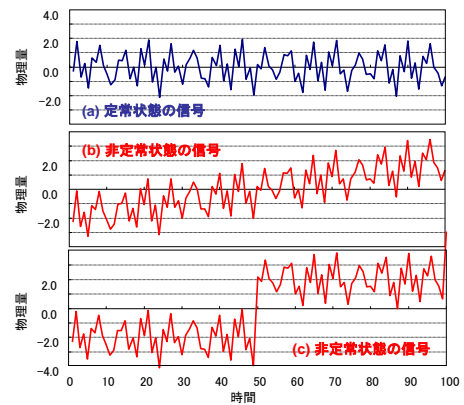


図4. 定常・非定常状態の信号

6. 乱流輸送において小さな渦の集合を大きな渦とみなせるか？

[Answer]

小さい渦の集合は、大きな渦とはみなせない。渦の大きさと輸送の効率に関しては、渦が観測される高度によっておおよそ決まっている。一般に、植物群落上であれば、数十秒から数百秒くらいのスケールの渦が効率的に物質を輸送しており、それよりも大きい、あるいは小さい渦の輸送効率は小さくなっている。