

生態環境計測学 2017.11.08 の質問・補足

回答者 : 植山

1. 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) に密度を乗じること
で、以下のように表される。

$$F_s = \overline{ws} \quad (1)$$

変数は変動成分と平均成分に分けることができる。

$$\begin{aligned} w &= \overline{w} + w' \\ s &= \overline{s} + s' \end{aligned} \quad (2)$$

1 式に 2 式を代入すると、

$$\begin{aligned} \overline{ws} &= \overline{(\overline{w} + w')(\overline{s} + s')} \\ &= \overline{\overline{w}s + \overline{w}s' + w'\overline{s} + w's'} \\ &= \overline{\overline{w}s} + \overline{w's'} \end{aligned} \quad (3)$$

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。

共分散とは、2 変数間の 1 次的な関連の度合いを示す統計指標である。例えば、鉛直風速 (w) とある物理量 (s) の間の共分散は以下のようにあらわすことが出来る。

$$\overline{w's'} = \overline{(w - \overline{w})(s - \overline{s})} \quad (4)$$

ここで、オーバー・バーは時間平均、プライムは変動を表す。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ためである。

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出来る。

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

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 ー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.

2. 日中と夜間の乱流変動に関する補足が欲しい。また、鉛直風速と CO_2 密度が全く関係のない変動をした時、なぜ、フラックスがゼロとなるのか？

[Answer]

日中においては、樹冠付近の気温はそれよりも上層の気温よりも高くなり、拡散によって上へと運ばれる。上昇流の際に樹冠近くの暖かい空気が運ばれるため気温が高くなり、下降流の際に気温が低くなる。つまり、鉛直風速と気温の変動は正の相関を持つ。同様に、蒸散によって放出された水蒸気も上向きに輸送されるため、鉛直風速と水蒸気密度の変動は正の相関を持つ。一方、光合成が起こっている際、樹冠付近の CO_2 濃度が大気に比べて相対的に低くなるため、上昇流の際に CO_2 密度が低下し、下降流の際に密度が高くなる。即ち、鉛直風速と CO_2 密度の変動は負の相関を持つ。

夜間においては一般に顕熱フラックスは下向き、水蒸気フラックスは上向き、 CO_2 フラックスは上向きとなるため、鉛直風速の変動に対して、気温は負の相関、水蒸気密度は正の相関、 CO_2 密度は正の相関をもつ変動をとる (図 1)。以上から、 $w't'$ は負になり、 $w'q'$ 及び $w'c'$ は正の値をとることがおおい。

フラックスがゼロである場合、対象とする物理量は鉛直風速と無相関に変動する。例えば、 CO_2 であれば $w'c'$ は正・負のいずれの値もとり、それらを時間平均($\overline{w'c'}$)するとゼロになる。これは、ある瞬間に上昇風で運ばれた高濃度の CO_2 は、暫くすると下降流で再び下に戻っていると解釈できる。

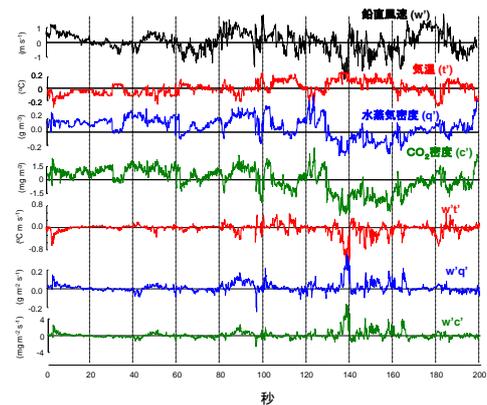


図 1 ヒノキ林上で観測された乱流変動
2008年11月18日 19時

3. 貯留の概念に関して完全に理解できなかった。

[Answer]

CO₂貯留とは、乱流輸送が不活発な時間帯において生態学的プロセス（例えば、光合成や呼吸）により発生・吸収されたCO₂が、測定高度より高い大気と混ざらず、その場の濃度変化に寄与する現象である。貯留は、フラックス観測高度以下におけるCO₂濃度の変化量から評価できる。貯留は、専門用語 storage の和訳であるが、正確には貯留変化速度などがより妥当な和訳となるかもしれない。

図2の夜間20時~23時頃に貯留が増えているのは、風速の低下などにより乱流拡散が低下し、呼吸により放出されたCO₂が上空に拡散されずに、その場にとどまった(測定高度以下の気層においてCO₂濃度が上昇した)ことに起因する。一方、朝方の貯留が負の値をとることは、この時間に乱流拡散が低かったため植生が群落付近に滞留したCO₂を使って光合成したことを示している。日中において貯留の絶対量が小さくなるのは、乱流拡散が活発であるため植生の光合成に使用されたCO₂がフラックス観測高度より上の大気から輸送されたことを示している。

CO₂濃度(密度)の変化に伴う貯留変化を評価する上では、高さ何メートルの気塊の濃度をどのくらい変化させたのかという情報が不可欠である。気層の厚さ1mの気塊の濃度を1ppm低下させた場合と、厚さ2mの気塊の濃度を1ppm低下させた場合では、2mの気塊の濃度を1ppm低下させた場合のほうが2倍のCO₂を要する。この気塊の量を考慮するために、測定高度間の距離を単位時間における濃度変化量に乗じる必要がある。CO₂濃度に対するフラックス(w'c')の単位は[ppm m s⁻¹]であり、貯留変化も[ppm m s⁻¹]の単位をとる。フラックスと貯留変化の和として表されるNEEについても、同じ次元(ppm m s⁻¹)をもつ。

4. 夜間の観測値を使ってNEEを光合成と呼吸に分離することについて補則が欲しい。

[Answer]

生物の呼吸速度は温度に依存し、昇温に伴って指数関数的に増加する。このような呼吸と温度の関連については、化学反応と温度の関連を予測するアレニウスの式を用いて表現でき、その定式が様々に提案されている。以下は其中最も簡単な、Q₁₀モデルと呼ばれる温度依存式である。

$$RE = R_{ref} \times Q_{10}^{T/10} \quad (6)$$

R_{ref}は0°Cのときの生態系呼吸量(RE)、Q₁₀は呼吸の温度依存係数、Tは温度(気温や地温)を表す。森林の場合、生態系呼吸量を定式化する際にTに気温が使用されることが多いが、背の低い植生や土壌呼吸量を定式化する際は、地温を用いて定式化されることもある。

渦相関法で測定された夜間呼吸量から日中の光合成を推定する手法では、夜間の呼吸と環境要因(例えば、

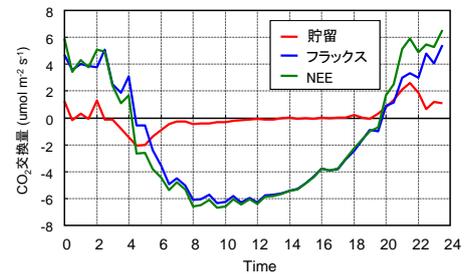


図2 フラックスと貯留の関係
アラスカのクロトウヒ林の場合

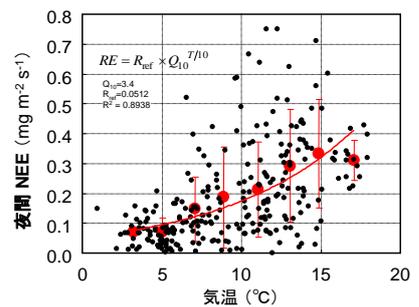


図3 夜間のCO₂フラックスと気温の関係

気温)の関係式が日中においても同様に成り立つ事を仮定している。しかしながら、そのような仮定が実際に成り立つかについては検討の必要がある(Wehr et al., 2016; 質問5への回答を参照)。呼吸量の推定に関する不確定性の低減と呼吸プロセスの解明に向けて、渦相関法から推定された生態系呼吸量とチャンバーなどで測定された呼吸量との比較研究を進める必要がある。

図4は、図3で得られた夜間NEEと気温の関係と気温の日変化を用いて、NEEをGPPとREに分離した結果である。8/17~8/19にかけて日中の吸収量のピークが減少しているが、これは、光合成の低下ではなく気温の上昇による呼吸量の増加が原因であると推測することができる。

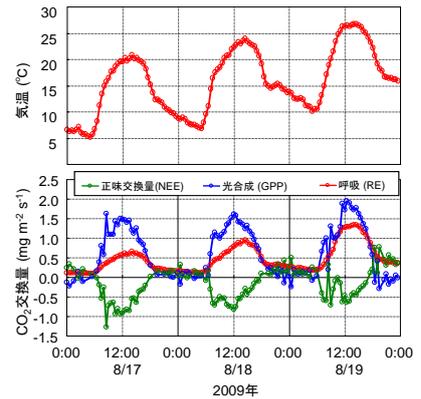


図4 ヒノキ林におけるCO₂フラックス、光合成、呼吸、気温の日変化

引用文献：

Wehr, R., Munger, J. W., McManus, J. B., Nelson, D. D., Zahniser, M. S., Davidson, E. A., Wofsy, S. C., Saleska, S. R., 2016. Seasonality of temperate forest photosynthesis and daytime respiration. *Nature*, **534**, 680-683.

5. 日中の呼吸は夜間の呼吸と同様に扱って良いのか？

[Answer]

個葉の呼吸速度は、光がある条件下では暗条件下よりも呼吸速度が低下することが知られている。これはKok効果と呼ばれており、詳細なプロセスが解明されていない。同位体を用いた群落スケールでのNEEの観測から夜間よりも日中の生態系呼吸量が少ないことが分かってきており、生態系スケールでも明条件下での個葉の呼吸速度の低下が重要である事が指摘されている(Wehr et al., 2016)。

引用文献：

Wehr, R., Munger, J. W., McManus, J. B., Nelson, D. D., Zahniser, M. S., Davidson, E. A., Wofsy, S. C., Saleska, S. R., 2016. Seasonality of temperate forest photosynthesis and daytime respiration. *Nature*, **534**, 680-683.

6. クロノシーケンスとは？問題点・不確かさは無いのか？

[Answer]

クロノシーケンスとは、時間による変化を空間による変化で代用する手法である。クロノシーケンスを用いると攪乱からの年数に応じて、フラックスやバイオマスなどがどのように変化するかを評価することが出来る。

クロノシーケンスは、攪乱からの年数以外の要因(気象条件、生育環境、攪乱前のバイオマス量など)が同じとみなせる複数の場所で実施される必要がある。その為、条件

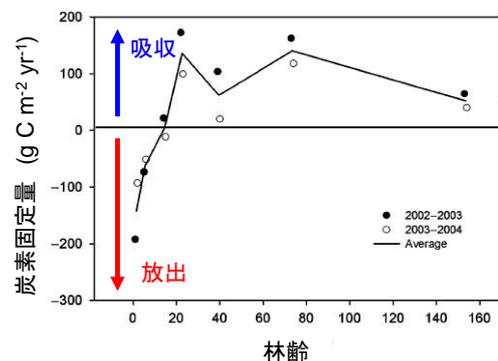


図2 カナダの森林における火災からの二次遷移に伴うCO₂フラックスの変化 (Goulden et al., 2010)

を満たしていない観測場所で比較観測をすると、攪乱からの年数以外の要因が結果に影響を及ぼし誤差をうむ。クロノシーケンスにおける誤差の原因となるものは以下にあげられる。

- 1) 空間代表性誤差：比較対照サイト間における攪乱前の環境条件の違い
- 2) 時間代表性誤差：計測を実施した時期の気象条件が長期間の気象条件を十分に代表できない
- 3) 計測誤差：各サイトにおける観測誤差・観測システムの統一が不完全であること

クロノシーケンスを実施する際は、上記の誤差がどの程度であるかなど、事前・事後に丁寧に評価する必要がある。図 2 の結果で、林齢 40 年の森林において炭素吸収量が一時的に低下した原因は、上記の理由の 1) によるものであることが報告されている(Goulden et al., 2010)。

引用文献：

Goulden, M. L., McMillan, A. M. S., Winston, G. C., Rocha, A. V., Manies, K. L., Harden, J. W., Bond-Lamberty, B. P., 2010. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. *Global Change Biology*, **17**, 855-871.

7. 欠測補完にはどういった方法があるのか？

[Answer]

長期観測においてはデータの欠測がさけられないため、さまざまな欠測データの補完法が提案されている (Falge et al., 2001)。欠測が数時間程度のごく短時間であれば、前後のデータからの内挿で補完することができる。それよりも長い欠測に対して、例えば対象とするデータが典型的な日変化を持つ場合は、同時期のデータから平均的な日変化パターンを作成して同時刻の平均値で補完する方法（平均日変化法）や、他の環境条件から類推する方法（表検索法、非線形方程式法、機械学習法）などが挙げられる。例えば、非線形方程式法や機械学習法では、PPFD、気温、飽差などから CO₂ 交換量の欠測を類推して補完する。ただし、降雨時の欠測など、特定の条件のデータが常に欠測となる場合は、信頼性の高い関係をデータから構築することができないため、補完の精度が低くなる。また、欠測が長期にわたる場合や環境変数との対応が不明瞭なデータに対しても精度よく補完することは困難である。

引用文献：

Falge E. et al., 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**, 43-69.