

生態環境計測学 2018.05.23 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。

$$F_s = \overline{w\rho_s} \quad (1)$$

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。

$$F_s = \rho_a \overline{ws} \quad (2)$$

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。

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

ここで、オーバー・バーは時間平均、プライムは変動を表す。2式に3式を代入すると、

$$\begin{aligned} \overline{ws} &= \overline{(\overline{w} + w')(\overline{s} + s')} \\ &= \overline{\overline{w}s + \overline{w}s' + w'\overline{s} + w's'} \\ &= \overline{\overline{w}s} + \overline{w's'} \end{aligned} \quad (4)$$

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 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. CO₂ フラックスの吸収、放出の向きがよく分からない。NEE、GPP などの用語がよく理解できなかった。

[Answer]

大気ー陸域生態系間の CO₂ フラックスを簡略化して定式化すると以下のようにあらわすことができる。

$$NEE = RE - GPP \quad (6)$$

ここで、NEE (Net Ecosystem Exchange; 純生態系交換量)、GPP (Gross Primary Productivity; 総一次生産量)、RE (Ecosystem Respiration; 生態系呼吸量)をあらわす。ここで、微気象学的手法によるフラックスは、吸収を負、放出を正とすることが多いため、NEE が負であれば (GPP のほうが RE よりも大きい) 生態系が CO₂ の吸収源として作用していることを表し、NEE が正であれば (RE のほうが GPP よりも大きい) 生態系が CO₂ の放出源として作用していることを表す。

ただし、生態系生態学では生態系が吸収する場合を正とすることが多いため、微気象学的手法によるフラックスの向きとは逆向きで表記されることがある。その為、グラフを読み取る際は、符号が吸収・放出の何れを意味しているかをその都度、確認する必要がある。

$$NEE = RE - GPP \quad (* NEE \text{ 負が吸収、正が放出})$$

$$NEP = -NEE \quad (* NEP \text{ 正が吸収、負が放出})$$

* NEP (Net Ecosystem Productivity; 純生態系生産量)

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（顕熱であれば温度変化）に寄与する現象である。貯留 (F_s) は、フラックス測定高度よりも下の気層における CO₂ 濃度の変化量から評価できる。

$$F_s = \int_0^m \frac{\Delta C(z)}{\Delta t} dz \quad (7)$$

ここで、 m はフラックスの測定高度、 t は時間、 C は物理量（たとえば、CO₂ 濃度）の濃度を表す。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 1 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 1 m の気塊の濃度を 1ppm 低下させた場合と、厚さ 2 m の気塊の濃度を 1ppm 低下させた場合では、2 m 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 ($w'e'$) 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. 資料で示されているヒノキ林の CO₂ 交換量の季節変化は、複数年の平均値で示されているが、各年では傾向が異なるか？

[Answer]

陸上生態系における CO₂ フラックスは年々の気象条件の変動によって大きく変動するため、典型的な季節変動の形を評価するためには、長期観測の結果を平均する必要がある。このことは年間の CO₂ の吸収量を定量化する上でも同じであり、森林の CO₂ 吸収量は年々変動が大きいため、その吸収量を正確に評価するためには、長期観測の結果に基づいて評価する必要がある。

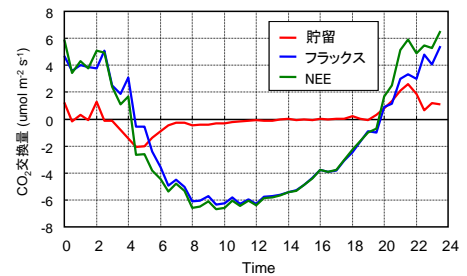


図 1 フラックスと貯留の関係
アラスカのクロトウヒ林の場合

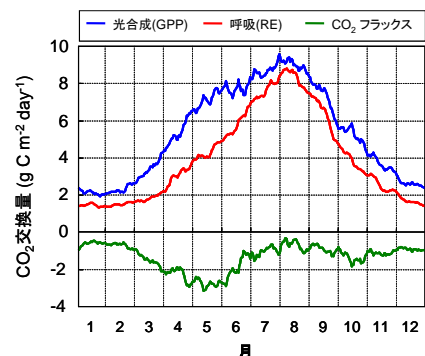


図 2 ヒノキ林の CO₂ 交換量
2000～2007 年の平均的な季節変化

5. 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できる。

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開催される必要がある。その為、条件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などの遷移以外の条件の違い
- 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3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.

6. 熱収支式の説明をして欲しい。また、エネルギーインバランス問題について、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量以外に植物が吸収するエネルギー（光合成などに用いるエネルギー）や森林自体がもつエネルギーを考慮しても純放射量を満たせずインバランスとなるのか？

[Answer]

地表面のエネルギー収支は以下のように表すことができる。

$$R_n = H + IE + G + B + S$$

ここで、 R_n は純放射量、 H は顕熱フラックス、 IE は潜熱フラックス、 G は地中熱流量、 B は光合成の生

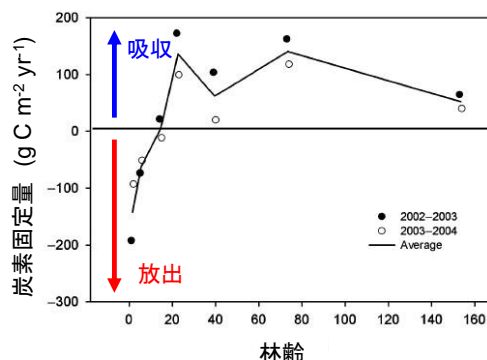


図3 カナダの森林における火災からの二次遷移に伴うCO₂フラックスの変化 (Goulden et al., 2010)

学反応に使用されるエネルギー、 S は土壌、群落に蓄えられる貯熱量を表す。図 4 は、カナダのクロトウヒ林が純放射として受けとったエネルギーがどのような要素に分配されているかを表したものである。図から読み取れるように、純放射として受けとったエネルギーの多くは、顕熱フラックスと潜熱フラックスに分配されている。光合成の生化学反応に使用されるエネルギーは 1%、地中熱流量は 3% と非常に小さい。また、図には貯熱量 S が示されていないが、これは純放射量に対して 5%未満と群落に蓄えられるエネルギーとしては小さい。以上のことから、上の熱収支の式のうち群落スケールでは無視できる項を除くと、森林群落のエネルギー収支式は以下のように簡略化することが出来る。

$$Rn \cong H + LE + G$$

図 4 のカナダのクロトウヒ林の場合は、エネルギー収支をほぼ満たしていたが、渦相関法によるフラックス測定におけるエネルギーインバランス問題では、図 5 に示されるように殆どの観測サイトで 2 ~3 割程度、乱流フラックスの和が小さくなることが報告されている。このインバランスは、貯熱量や生化学反応に使用されたエネルギーを考慮したとしても大きく改善する事は期待できない。エネルギーインバランスについてはいくつかの原因が指摘されており、その原因のとして渦相関法では捉えきれていない大きなスケールの渦による輸送、定在的な流れによる輸送などの輸送の空間不均一性、鉛直移流により過小評価が生じていると指摘されている（渡辺・神田, 2002, Lee, 1998）。しかしながら、インバランスが生じる原因については、研究者間でも意見が分かれており、現段階では確定的なことはいえない。

引用文献：

- 渡辺力・神田学, 2002. LES による熱収支インバランス問題に対する検討（第 2 報）水平一様な植生キャノピー層を含む中立接境界層における検討, 水文・水資源学会誌, 15, 253-263.
- Jarvis, P. G., Massheder, J. M., Hale, S. E., Moncrieff, J. B., Rayment, M., and Scott, S. L., 1997: Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor, and energy exchanges of a boreal black spruce forest. *J. Geophys. Res.*, 102, 28953-28966.
- Lee, X., (1998) On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric. For. Meteorol.*, 91, 39-49.

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避けられないため、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

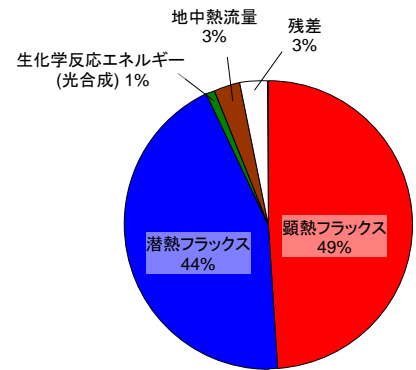


図 4 カナダのクロトウヒ林で計測された 120 日間のエネルギー収支 (Jarvis et al., 1997)

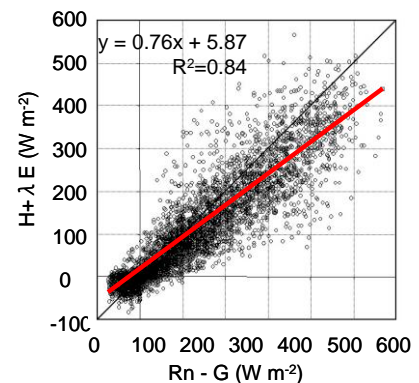


図 5 有効エネルギー($Rn-G$)に対するエネルギーフラックスの和

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.

8. 熱帯林が CO₂ 吸収していないのに、なぜ、熱帯林の伐採が温暖化につながるのか教えてほしい。

[Answer]

熱帯林での CO₂ 交換量の長期観測がなされるにつれて、従来考えられていたほど熱帯林は大きな CO₂ 吸収源ではないことが明らかとなってきた (Hirata et al., 2008; Hirano et al., 2012; Kosugi et al., 2012)。これは、1) 成熟林の場合、樹木の枯死などによる粗大有機物 (Coarse Woody Debris) の分解が多いこと、2) ENSO などの気象条件の年々変動の影響を受けること、3) 排水や伐採などの人為攪乱の影響を受けることなどが原因であると考えられている。ただし、熱帯林を破壊、あるいは攪乱すると、森林に蓄えられた大量の有機炭素が大気へ放出されることになるため、CO₂ の排出源に変わる (Hirano et al., 2012)。さらに森林がなくなることによって、エネルギー収支が変化して地域的な蒸散量が減り、蒸散による水に起因する降水が減ることで、地域的な乾燥化が引き起こされることが懸念されている。地域的に降水量が減れば、未攪乱の熱帯林の生産性が落ちるため、熱帯地域が CO₂ の放出源になる可能性も指摘されている (Cox et al., 2013)。

引用文献：

Cox, P. E. et al., 2013. Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*, **494**, 341-344.

Hirano, T. et al. 2007. Carbon dioxide balance of a tropical peat swamp forest in Kalimantan, Indonesia. *Global Change Biol.*, **13**, 412-425.

Hirata, R. et al., 2008. Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 761-775.

Kosugi, Y. et al. 2012. Effect of inter-annual climate variability on evapotranspiration and canopy CO₂ exchange of a tropical rainforest in Peninsular Malaysia. *J. For. Res.*, **17**, 227-240.