

生態環境計測学 2019.05.29 の質問・補足

回答者 : 植山

1. 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-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。

$$NEE = RE - GPP \quad (1)$$

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)

2. 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。

$$F_s = \int_0^m \frac{\Delta C(z)}{\Delta t} dz \quad (2)$$

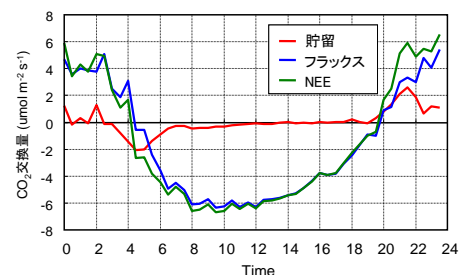


図1 フラックスと貯留の関係
アラスカのクロトウヒ林の場合

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。

3. 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足が欲しい。

[Answer]

生物の呼吸速度は温度に依存し、最適温度までは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 (Schipper et al., 2014)。以下は其中最も簡単な、 Q_{10} モデルと呼ばれる温度依存式である。

$$RE = R_{ref} \times Q_{10}^{T/10} \quad (3)$$

R_{ref} は0°Cのときの生態系呼吸量 (RE)、 Q_{10} は呼吸の温度依存係数、 T は温度(気温や地温)を表す。森林の場合は、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、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。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。

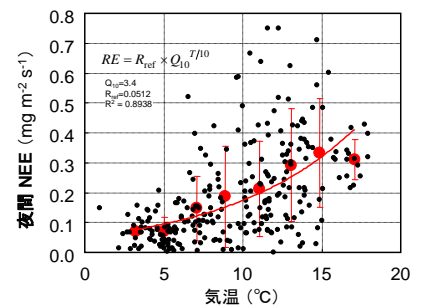


図2 夜間のCO₂フラックスと気温の関係

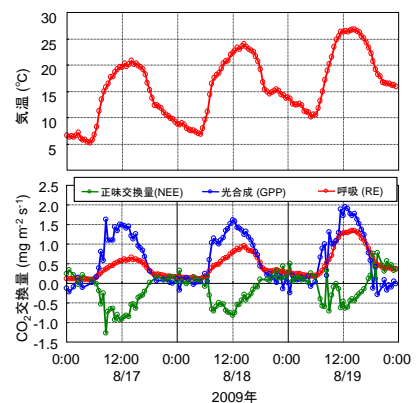


図3 ヒノキ林におけるCO₂フラックス、光合成、呼吸、気温の日変化

図3は、図2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。

呼吸速度は温度以外の環境要因によっても変動しているため、正確な呼吸速度の見積もりのためには慎重に環境要因を検討する必要がある。例えば、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)。乾燥地などの生態系においては土壌含水率等のそのほかの要因についても生態系呼吸量に強く影響を与える要因である(図4)。

夜間フラックスを用いる方法以外にも、 ^{13}C 安定同位体を用いた分離についての研究も進められている(Wehr et al., 2016)。光合成による CO_2 固定において $^{13}\text{CO}_2$ と $^{12}\text{CO}_2$ に同位体分別が生じる。気孔から葉緑体までの拡散過程における物理的分別と CO_2 固定の際の生化学的分別によるものであるが、より質量の軽い $^{12}\text{CO}_2$ を多く取り込むように働く。一般に、呼吸では同位体分別がないとされているため、呼吸による同位体比は基質の同位体比から予測したり、土壌呼吸の同位体比を観測することで知ることができる。これらの情報を連立させることで、観測されたNEEからGPPを分離することができる(Wehr et al., 2016)。ただし、生態系スケールではさまざまな基質から呼吸が生じたり、呼吸によって放出された CO_2 を再利用(recycling)して光合成が行われているため、正確な分離を行うためには、森林内のコンパートメントの同位体比や林内のガス拡散にかかわる情報を総合的に取り扱う必要がある(近藤ら, 2007)。

引用文献：

Davidson, E. A., Belk, E., Boone, R. D., 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, **4**, 217-227.

近藤美由紀・内田昌男・小泉博 2007. 安定同位体分析を用いた呼吸起源 CO_2 の再固定過程(CO_2 recycling)の評価. *システム農学*, **23**, 327-337.

Shipper, L. A., Hobbs, J. K., Rutledge, S., Arcus, V. L., 2014. Thermodynamic theory explains the temperature optima of soil microbial processes and high Q_{10} values at low temperatures. *Global Change Biology*, **20**, 3578-3586.

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.

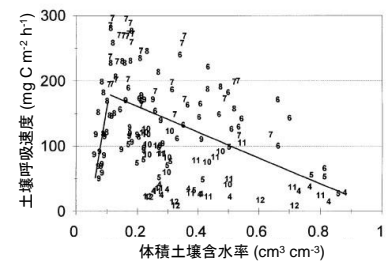


図4. 森林における体積土壌含水率と土壌呼吸速度の関係 (Davidson et al., 1998)

4. 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5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.

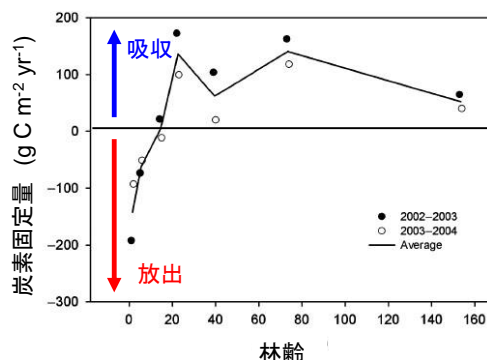


図5 カナダの森林における火災からの二次遷移に伴うCO₂フラックスの変化 (Goulden et al., 2010)

5. 近赤外域 (0.7~2.5 μm) において植物の分光反射率が低下している理由はなにか?

[Answer]

近赤外域の緑色植物の分光特性は、液体水による吸収と生化学物質による吸収の影響を受けているとされている。特に、液体水による吸収の影響は強く、植物が乾燥するとこの波長域の電磁波の吸収率が低くなる(つまり反射率が高くなる)とされている (Gao, 1996)。この特性を利用して、複数の近赤外域の反射率から植生の水ストレスに関する指標(例えば、Normalized Difference Water Index; NDWI) が提案されている。

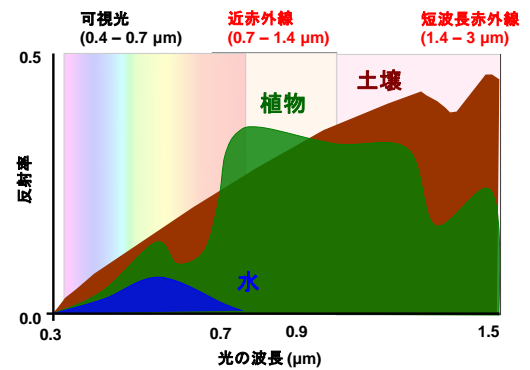


図 6 植物・土壌・水域の分光反射特性

引用文献 :

Gao, B. -C., 1996. NDWI- a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, **58**, 257-266.

6. 暗視装置などで用いているのは長波放射か短波放射のいずれを用いているか?

[Answer]

暗部とは我々人間の目で視覚することができない部分とすると、短波放射が非常に少ない場所であるといえる。地球上に存在する物体は、太陽に比べて低温であるため、その温度の物体が射出する電磁波は赤外線に代表される長波放射である。よって暗視装置は長波放射(赤外線)を計測している。

参考文献 :

Wikipedia 「暗視装置」