

生態環境計測学 2019.05.08 の質問・補足

回答者 : 植山

1. アラスカの熱収支と放射収支について再度、説明してください。

[Answer]

高緯度の陸域生態系の放射収支の季節変化は、入射角の変化による短波放射量の違いに強く影響を受ける。夏には入射角が大きくなることで日中の短波放射量は、冬季のものに比べて大きくなる。また、夏は日の出が早く、日没が遅くなるため日照時間が長くなる。入射するエネルギーが大きいため、地表面近傍は暖まり、夏は地表面が露出する。地表面が植生に覆われていれば、アルベドは0.03~0.15と低い値をとり、短波放射の反射は少なくなる。一方、冬季は気温が低くなり、気温が0℃を下回るアラスカのような高緯度では、雪が地表面を覆おう。雪はアルベドが高いため、入射する短波放射の40~90%を反射する。よって積雪を伴う高緯度の冬季は、短波放射の入射が減り、反射も増えるため、正味の短波放射量は低くなる。

冬季は夏季と比べて地表面の気温、表面温度が低くなるため、上向き長波放射量は小さくなる。下向き長波放射は大気から地表面にむけて射出される放射である。地表面よりも上層の大気の温度が低いいため、冬季であっても下向き長波放射量は上向き長波放射量よりも小さい。

生態系が純放射量(R_n)として受け取ったエネルギーは、次式で示されるように顕熱フラックス(H)、潜熱フラックス(LE)、地中熱流量(G)として大気や地中に分配される。

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

地表面に植物が存在し蒸散に利用できる液体水が土壌に存在する場合、蒸散によって潜熱フラックスへエネルギーは分配される。蒸散の日変化、季節変化によって潜熱フラックスは時間変化する。例えば、アラスカの森林の場合は、融雪後に液体水が利用できるようになると、蒸散が行われるようになり、生態系は潜熱への分配が多くなる。また、季節の推移による展葉、落葉などの植物季節、或いは乾燥などの水ストレスの強度によっても、潜熱フラックスへの分配率は変化する。そのため、顕熱フラックスと潜熱フラックスの比率(ボーエン比)から、植物活性を類推することができる。土壌面に到達したエネルギーの一部は、地中熱流量として地面へ伝導する。森林などの葉面積が大きな群落の場合、森林土壌に到達するエネルギーは少ないため地中熱流量は無視できるほどに小さいが、粗な群落の場合は地中熱流量が大きくなる。アラスカの場合は、積雪による断熱効果のため冬季の地中熱流量は小さい。

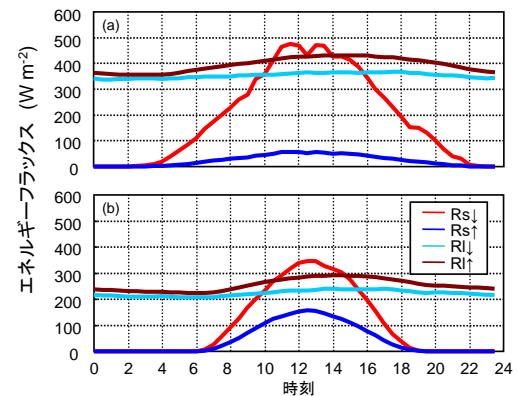


図 1. アラスカのクロトウヒ林で観測された7月(a)と3月(b)の放射収支の平均日変化: 短波放射量 (R_s)、長波放射量(R_l)

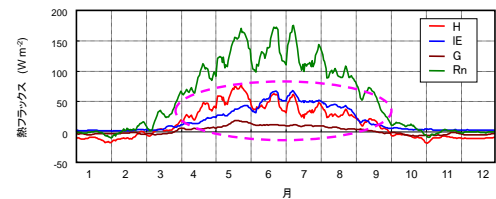


図 2. アラスカ・クロトウヒ林における熱フラックスの季節変化

2. アルベドの低下が純放射量を増加させる理由と、0°C付近の温度でアイス・アルベド・フィードバックが強く働く理由を補足して欲しい。

[Answer]

アルベドの低下（反射率の低下、あるいは吸収率の増加）は上向きの短波放射量を低下させるため、純放射量を増加させる。-20°Cなどの低温で数度の昇温が起こっても雪氷が融解することは無いが、0°C付近の温度で数度の昇温があると雪氷が融解する。雪氷の融解により地面や海面が露出すると、アルベドが低下するため、アイス・アルベド・フィードバックにより温暖化が増幅される。このため、0°C付近の昇温は、それよりも低い気温やそれよりも高い気温の際の昇温よりもこのフィードバックが強く働くといわれている。

3. 顕熱フラックスや純放射量が負の値をとることはどういった意味なのか補足してほしい。

[Answer]

負の顕熱フラックスは、大気から地表面に顕熱輸送されている場合に観測される。この場合、地表面温度よりも気温の方が高く、地表面が大気の熱を奪っていると解釈することができる。負の純放射量は、短波放射による放射の入力よりも、長波放射によるエネルギーの損失が大きい場合に観測される。夜間は短波放射はなく、地表面からの上向き長波放射量が大气からの下向き長波放射量を上回るため、負の純放射量はしばしば夜間に観測される。

4. 陸域生態系における炭素循環について説明が欲しい。(NEE = RE - GPP とする理由)

[Answer]

炭素は、光合成によって二酸化炭素(CO₂)が有機炭素として固定されることで陸域生態系に取り込まれる。取り込まれた炭素は、植物体による呼吸（独立栄養呼吸）によって大気へCO₂として放出される。また植物体に固定された炭素（根、幹、葉など）も、落葉や植物の枯死により土壌にかえり、土壌中の微生物に分解されること（従属栄養呼吸）で再び、CO₂として大気へ戻る。このような生態系と大気における炭素の流れは炭素循環と呼ばれる。

大気と生態系における炭素収支は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \text{NEE} &= \text{Ra} + \text{Rh} - \text{GPP} \\ &= \text{RE} - \text{GPP} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで NEE (Net Ecosystem Exchange) は純生態系交換量、Ra は独立栄養呼吸、Rh は従属栄養呼吸、GPP (Gross Primary Productivity) は総一次生産量（光合成量）、RE は生態系呼吸量（Ra + Rh）を表す。一般に、生態系から大気への放出を正とし、吸収を負とするため 3 式のように NEE は RE から GPP を引いた形で表される。

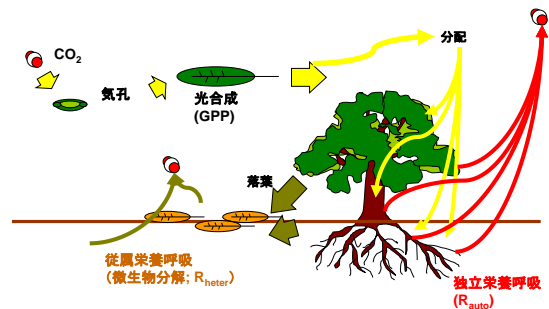


図 3. 生態系をめぐる炭素の流れ

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。

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。

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

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

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

5. 炭素循環フィードバックに不確実性が高い理由は？

[Answer]

炭素循環フィードバックとは、気候変動に伴い炭素循環が変化し、それに伴う大気中の温室効果気体の収支の変動を介して気候システムに影響を与えるフィードバックである。高緯度の陸域生態系を例として説明すると、気候の温暖化にともない生育期が延びることで、生態系がより多くの CO₂ を吸収するようになる場合、温暖化に対して負のフィードバックである。或いは、温暖化に伴って土壌有機物の分解が促進され、CO₂ の放出量の増加が吸収量の増加よりも大きくなる場合、大気中に温室効果気体が増えることになるため、正のフィードバックである。

気候変化に対する生態系の応答は、地域やプロセス（光合成、呼吸など）によってさまざまであり、それらすべての過程を正確に定量化することは難しい。陸域生態系の炭素循環が、将来、どのように気候システムにフィードバックを与えるかについては、多くの不確実性を有している。そのため、炭素循環フィードバックの取り扱い方は気候モデルによってさまざまであり、その将来予測もモデルに用いる仮定によって大きく異なる。

生物に由来する様々なプロセスが複雑に影響しているため、個別の関係性や相互作用を野外や室内の実験から全て明らかにすることが困難である。例えば、土壌微生物の有機物分解速度（従属栄養呼吸）は個々の微生物の量や特性によって変化するが、個別の微生物の振る舞いを全て特定することは困難である。個葉の光合成速度が大気 CO₂ 濃度により律則されているため、大気 CO₂ 濃度上昇は陸域生態系の CO₂ 吸収量を増加させると考えられる。一方、野外実験の結果からは、生態系は CO₂ 濃度上昇に対して順化するため、CO₂ 濃度上昇に対して CO₂ 吸収量を増加させない可能性が示唆されている。異常気象が生じたときの植物や微生物の応答や、将来の気候化において生態系がどのように順化するかなどは、現状の観測のみからでは正確に評価することが難しい。長い時間スケールでは、極相に達した生態系が火災、風害、虫害などの攪乱によってどのように枯死し、それがどのくらいの次時間をかけて CO₂ として大気に戻るかについても、短期間の観測のみからでは正確に評価することが難しい。このように、生態系にかかわる様々なプロセスを、様々な時間スケールで精緻化する必要があるため、現状の陸域炭素循環や炭素循環フィードバックの理解については大きな不確実性が残されている。

6. 生態系呼吸量はなぜ冬に減少するか？

[Answer]

呼吸は解糖系、クエン酸回路、酸化的リン酸化の代謝系がかかわるが、いずれも酵素反応であるため、高層が失活する温度以下では、高温の方が効率よく反応が進む。ゆえに、植物生育期の夏季よりも冬季において呼吸速度は低下する。アラスカのような冬が厳しい地域では、植物はしばしば休眠するため、休眠期間中の独立栄養呼吸は無視できるほどに小さくなる。いっぽう、土壌は積雪により断熱されているため、土壌微生物からの従属栄養呼吸は夏季に比べて小さいものの、一定程度、生じている。

7 地表面をコンクリートなど真っ白にするとアルベドが低下して純放射量が下がるので地球温暖化の緩和につながるか？

[Answer]

建物屋上に高反射塗装を施してアルベドを増加させ、建物への伝導熱量を低下させようとする試みは実際に行われている。ただし、高反射塗装を地上に行うと照り返しにより、人間環境に悪影響が懸念される。高反射塗装などの技術はヒートアイランドに対する効果は期待できるかもしれないが、地球に占める都市の被覆面積は小さいため、地球温暖化のようなグローバルスケールの現象を緩和する効果は期待できない。いっぽう、森林火災などで大規模に森林が消失する場合は、広域の放射強制力を現象させることが明らかになっている (Randerson et al., 2006)。北方林では近年、森林火災が激化しているが、極相の常緑針葉樹林が燃えて落葉広葉樹林に遷移すると、アルベドが増加するため、亜寒帯域で寒冷化が生じだろうと指摘されている。このように北方林がなくなれば地球温暖化は緩和されるかもしれないが、生物多様性などそのほかの問題が新たに生じるため、森林を高いアルベドを持つ土地被覆に改変すればよいという話でもない。

引用文献：

Randerson, J. T. et al., 2006: The impact of boreal forest fire on climate warming. *Science*, 314, 1130-1132.

8. 計測法などの専門用語は覚える必要があるか？

[Answer]

講義中に話した内容に関しては、覚えておく必要があると認識しておいてください。