

# 生態環境計測学 2018.05.09 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。

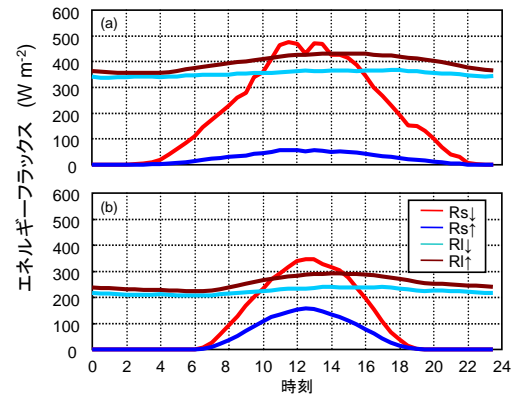


図 1. アラスカのクロトウヒ林で観測された7月(a)と3月(b)の放射収支の平均日変化: 短波放射量 ( $R_s$ )、長波放射量( $R_l$ )

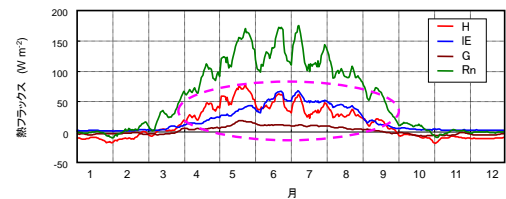


図 2. アラスカ・クロトウヒ林における熱フラックスの季節変化

## 2. 雪の融解熱というのは熱収支に含まれているか？

[Answer]

定義としては、水の相変化に伴うエネルギーは潜熱フラックスに含まれる。ただし、微気象学的手法（渦相関法、傾度法）に代表される大気中の水蒸気変動から潜熱フラックスを評価する場合、相変化を起こした水が水蒸気として大気に輸送される必要がある。雪が昇華（固体⇄気体の変化）される場合、そこで使用されたエネルギーは潜熱フラックスとして計測されるが、融解（固体→液体の変化）が生じた場合はそのエネルギーは微気象学的手法では潜熱フラックスとして計測されない。この場合、融雪量から融解にともなう潜熱量を評価する必要がある。このような方法で評価された融雪記のアラスカの融解潜熱は  $37 \text{ MJ m}^{-2}$  程度であり、昇華や蒸発による潜熱フラックス ( $40 \text{ MJ m}^{-2}$ ) と同等であり、エネルギー収支において無視できない (Nakai et al., 2013)。

引用文献

Nakai, T. et al., (2013) Characteristics of evapotranspiration from permafrost black spruce forest in interior Alaska. *Polar Science*, **7**, 136-148.

## 3. 熱収支式における貯熱量の定義を教えてください。

[Answer]

地表面の熱収支は、以下の式で表される。

$$R_n = H + LE + G + M \quad (2)$$

ここで、 $R_n$  は純放射量、 $H$  は顕熱フラックス、 $LE$  は潜熱フラックス、 $G$  は地中熱流量、 $M$  は生態系の貯熱量をあらわす。熱収支式 (式 2) における貯熱量とは、幹や葉、群落内の空気を暖めるのに使用された熱量のことである。群落内の空気に蓄積された熱量は群落内の気温の変化量 (顕熱として貯熱)、水蒸気の変化量 (潜熱としての貯熱) から計算することができる。顕熱、潜熱を貯熱した群落内の空気は、群落上の大気へ輸送されていない熱量と考えることができる。地中熱流量は、地面へ伝導した熱量を表すが、地中熱流量の計測深度よりも上に蓄積された熱量があれば、その熱量は計測された地中熱流量に加えるか、貯熱量として考える必要がある。

## 4. 負のフィードバックについて教えてください。

[Answer]

フィードバックとは、ある現象によって起こった結果が、もともとの現象を強める、あるいは弱めるように働く機構のことをいう。負のフィードバックとは元の現象を弱める方向に働くフィードバックであり、正のフィードバックは逆に強める方向に働くフィードバックである。一般に、負のフィードバックはある現象を弱める方向に働くため、システムを安定させる機構と考えられている。一方、正のフィードバックは、安定なシステムを別の安定状態へと加速度的に変化させるスイッチのような機構と考えられている。

5. 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。

6. 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(CO<sub>2</sub>)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CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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。

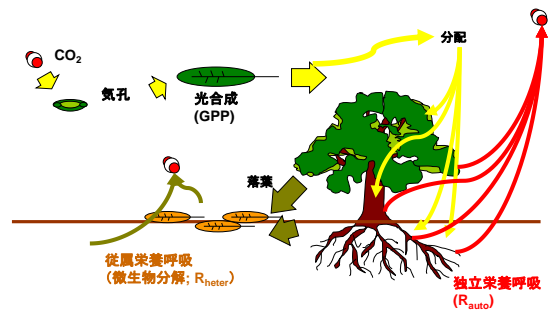


図3. 生態系をめぐる炭素の流れ

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。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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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。

$$\begin{aligned} \text{NEE} &= \text{RE} - \text{GPP} && (* \text{ NEE 負が吸収、正が放出}) \\ \text{NEP} &= -\text{NEE} && (* \text{ NEP 正が吸収、負が放出}) \end{aligned}$$

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

## 7 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 CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 濃度により律則されているため、大気 CO<sub>2</sub> 濃度上昇は陸域生態系の CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 濃度上昇に対して順化するため、CO<sub>2</sub> 濃度上昇に対して CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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。

## 8. リターの用語の意味を教えてください。

[Answer]

リターとは、落葉、枯死木、枯死した根などの植物遺骸のうち、分解が十分進んでいないために植物遺骸として認識ができるものをあらわす生態学用語である（Chapin et al., 2012）。

引用文献

Chapin III, F. S., Matson, P. A., Vitousek P. M. (2012) *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology Second Edition*. Springer, New York, 529pp.