

### 3. 生態系物質循環と計測デザイン

植山 雅仁

#### 3. 1. 物質循環とフラックス

エネルギーや物質は、生態系内に蓄積されたり、流れたりすることで循環している。生態系生態学では、これらの蓄積量のことを「プール」、輸送量のことを「フラックス」とよぶ。図 1 は全球における炭素循環の一部である。図中の四角がプール、赤矢印がフラックスを表す。

フラックスとは単位時間、単位面積における物質、熱、エネルギーなどの物理量の輸送量（輸送速度）

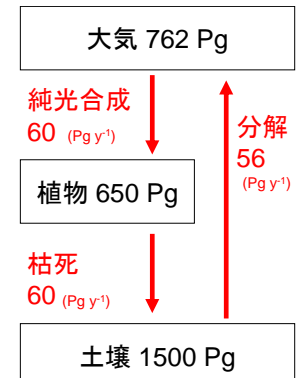


図 1. 全球炭素循環の一部 (Chapin et al., 2012)

#### フラックスの計測方法

- チャンバー法
  - バルク法 (微気象学的手法)
  - 傾度法 (微気象学的手法)
  - 渦相関法 (微気象学的手法)
  - コンパートメントモデル (生態学的手法)
- など

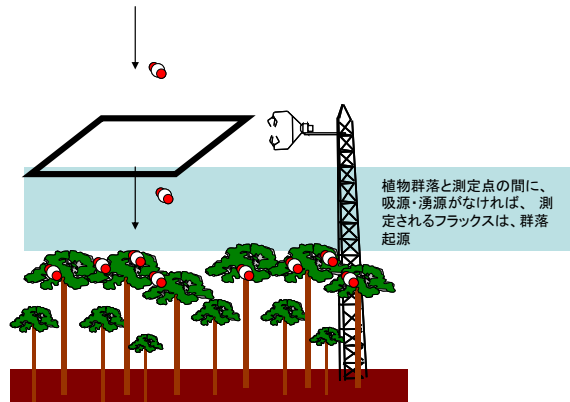


図 2 微気象学的手法によるフラックス

#### 3. 2. 地表面の熱収支

地表面における熱収支は、短波放射量(S)と長波放射量(L)の収支として以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 Rn &= S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \\
 &= (1 - ref) S \downarrow + L \downarrow - L \uparrow \\
 &\cong H + IE + G + M
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここで、 $Rn$  は純放射量、 $ref$  は地表面の反射率(アルベド)、 $\downarrow$ は下向き、 $\uparrow$ は上向きを表す。また、 $H$  は顕熱フラックス、 $IE$  は潜熱フラックス、 $G$  は地中熱流量、 $M$  は貯熱量を表す。すなわち 1 式は、植物群落が純放射量として受け取ったエネルギーが、大気を暖める(H)、水を蒸発させる(IE)、地中を温める(G)エネルギーに転換され、残りが貯熱量として蓄えられる事を表している。

長波放射量は、ステファン・ボルツマンの法則により以下のように表すことができる。

$$L \uparrow = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2)$$

$$L \downarrow = \sigma T_b^4 \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon$ は射出率、 $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )、 $T_s$ は地表面温度、 $T_b$ は天空温度を表す。

図3は、アラスカのクロトウヒ林で観測された7月のエネルギーフラックスの日変化パターンである。

短波放射は正午ごろに最大をとる山形

入力された短波放射の12%が反射

→ アルベドは0.12

長波放射は下向きより上向きの方が大きい。

→ 長波の収支はマイナス

→ 上向き長波放射は地表面温度にそった日変化

純放射の約半分を顕熱、残りの半分を潜熱に分配

→ 地中熱流量は小さい

→ 顕熱は日中プラス、夜間マイナス

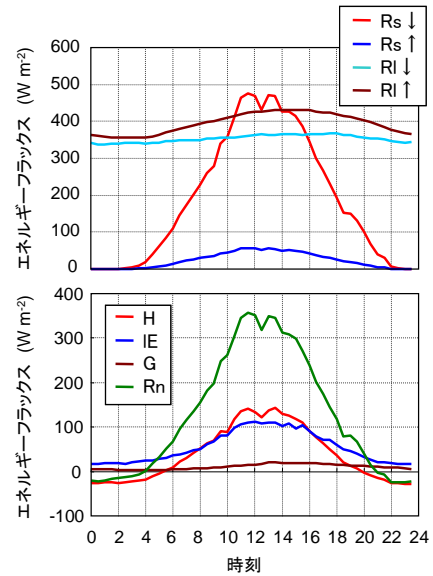


図3 アラスカのクロトウヒ林の熱収支 (7月)

**アイス・アルベド・フィードバック**

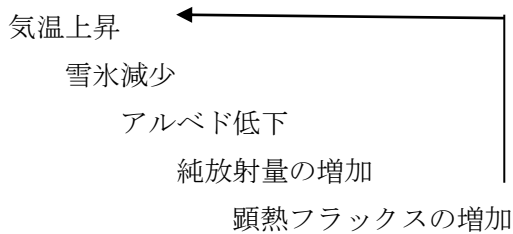


表1. アルベド (近藤, 1994)

| 地表面      | アルベド (%) | 地表面     | アルベド (%) |
|----------|----------|---------|----------|
| 水面       | 2~10     | 裸地 (乾燥) | 20~35    |
| 森林       | 3~15     | 砂地      | 15~30    |
| 草地 (みどり) | 10~20    | 砂漠      | 25~40    |
| 草地       | 20~25    | 雪 (旧)   | 40~70    |
| 畑        | 15~25    | 雪 (新)   | 70~90    |
| 裸地 (湿)   | 5~15     |         |          |

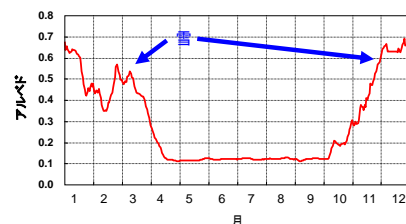


図4 アラスカのクロトウヒ林におけるアルベドの季節変化

### 3. 3. 炭素循環

大気-生態系における炭素循環では、炭素の多くは  $\text{CO}_2$  の形で流れる (図 5)。炭素は大気から植物の光合成によって  $\text{CO}_2$  として取り込まれる (GPP)。取り込まれた炭素は、葉、幹、根といった植物プールに蓄積され、その一部は、植物の呼吸によって  $\text{CO}_2$  として大気に放出される。また、蓄積された炭素も枯死することで土壌プールに流れ、微生物に分解されることで大気に戻る。このように、陸域生態系と大気の間で、炭素の循環がなされている。

GPP : Gross Primary Production

総生態系生産量 (群落光合成量)

$R_{\text{auto}}$  : Autotrophic Respiration

独立栄養呼吸 (植物の呼吸)

$R_{\text{heter}}$  : Heterotrophic Respiration

従属栄養呼吸 (微生物の呼吸・分解)

RE : Ecosystem Respiration 生態系呼吸量 ( $R_{\text{auto}} + R_{\text{heter}}$ )

NEE : Net Ecosystem Exchange, ( $\text{NEE} = \text{RE} - \text{GPP}$ )

純生態系交換量 ( $\approx \text{CO}_2$  フラックス)

### 炭素循環・フィードバック

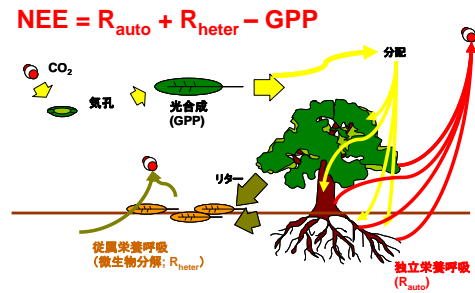
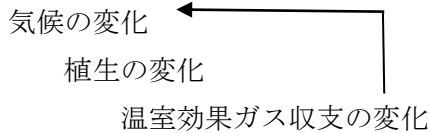


図 5 生態系における炭素の流れ

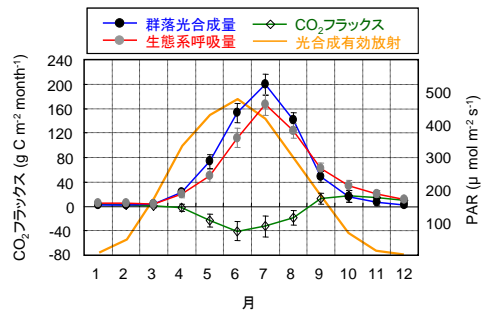


図 6 アラスカ・クロトウヒ林の  $\text{CO}_2$  フラックスと光合成有効放射

### 3. 4. スケール

陸域生態系におけるフラックスなどの環境要因を評価する際は、対象とする時間・空間スケールによって用いる手法を選択する必要がある。

チャンバー : 狭い空間、短い時間スケール

渦相関法 (微気象学的手法) :

林分~地域スケール、数十分~10 年程度

リモートセンシング :

数 10 m~全球スケール、数日~10 年程度

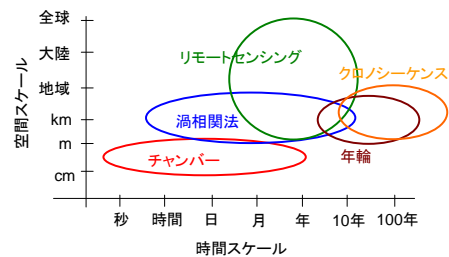


図 7 計測手法と空間・時間スケール

### **3. 5. 微気象**

微気象とは、地表面の影響を強く受ける地上付近の気層内の微細な時間・空間スケールの気象現象をいう（農業気象学用語解説集）。植物群落の内外において微気象学的観測を実施すれば、植物—大気間におけるエネルギーや物質（水蒸気、CO<sub>2</sub>など）の交換量やそのプロセスを評価することができる。

#### **植生モニタリングの際の微気象学的な手法の利点**

##### **■高い空間代表性**

植物群落におけるフラックスは時間・空間的に非常に不均一  
チャンバー等の測定で代表性を得るためには、他点での計測が必要

##### **■非破壊**

植物を刈り取って炭素固定量などを評価すると、それ以降、同じ個体で評価できない。

##### **■自然状態を乱さず測定が可能**

チャンバーなど、箱をかぶせると実際の環境と異なる環境となってしまう。  
（例えば、風が吹かなくなったり、蒸散によって湿度が高くなったりする。）

##### **■連続測定が可能（様々な時間スケールでの評価が可能；数十分～数十年）**

自動測定が可能なことから、長期連続的に測定が可能

#### **測定に必要な条件**

##### **■一様性**

植物群落が風上方向に、無限と考えてよいほどに十分な広がりを持つこと  
植物群落が水平方向に一様に分布していること

##### **■定常性**

一単位の計測時間（1 ラン）中に気象条件が大きく変化してはいけない

### 3. 6. 微気象観測のデザイン

植物群落などの自然生態系の機能を長期的にモニタリングする場合、気象条件などの対象とする現象に関連する多くの要素を計測することが望ましい。

群落スケールでの光合成速度や蒸発散などの植物機能を評価するためには？

#### 測定要素

- 大気：風速、風向、気温、湿度、日射、  
光合成有効放射、放射収支  
降水量、CO<sub>2</sub>濃度
- 土壌：地温、表面温度、地中熱流量、土壌水分
- フラックス：CO<sub>2</sub>(純光合成)、潜熱(蒸発散)  
顕熱

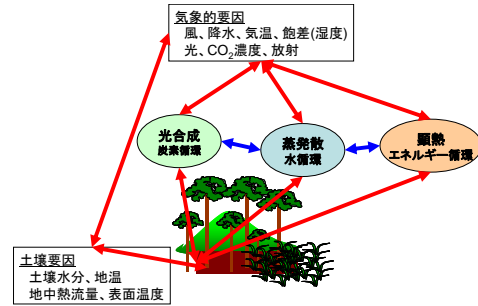


図8 植物群落をとりまく様々な要因

様々な要因が複雑に絡んでいる！

- 群落光合成： 日変化：風速、日射、気温、湿度、土壌水分  
季節・年次変化: 気象、栄養分、土壌要素、植物季節(葉量)  
長期変化: CO<sub>2</sub>濃度、栄養分、樹齢、遷移

光合成などの炭素循環は、植物を解して蒸散などの水循環と関連

蒸散など水循環は、顕熱・潜熱などのエネルギー循環とも関連

- 様々な要素を計測しその関連を調べることで、植物機能のメカニズムが明らかになる。
- 長期的モニタリングでは、対象とする現象に関連する多くの要因が

長期的に計測されていることが重要

- \* 1つ環境要素が欠けているだけで正確に評価できなくなることもある。
- \* 後戻りして観測できない。

長期モニタリングを実施する際は事前に綿密な計画が必要であると同時に、追加で計測する必要がある環境要因がないかを注視してデータを解析する必要がある。

#### 引用・参考文献

Chapin III, F. S., P. A. Matson, and P. M. Vitousek. 2012. *Principles of terrestrial ecosystem ecology 2nd Edition*. Springer-Verlag Press, New York, 529 pp.

近藤純正, 1994: 水環境の気象学 -地表面の水収支熱収支-, 朝倉書店, 350pp.

日本農業気象学会編, 1997: 新編 農業気象学用語解説集—生物生産と環境の科学—, 313pp.

文字信貴・平野高司・高見晋一・堀江武・桜谷哲夫, 1997: 農学・生態学のための気象環境学, 丸善, 199pp.

Randerson, J.T., Chapin, III, F.S., Harden, J.W., Neff, J. C., and Harmon, M. E., 2002: Net ecosystem production: A comprehensive measure of net carbon accumulation by ecosystems. *Ecol. Appl.*, 12, 937-947.