

5. 植物群落における微気象観測 / 渦相関法

植山 雅仁

5.1. 植物—大気間の物質輸送と渦

植物群落と大気間の物質輸送は、乱流によって生じる渦によってなされる。物質輸送に寄与する渦のうち、主な渦はシア—生成（風による渦）による渦と浮力生成（温度差による上昇気流）による渦である。

渦の大きさ？

植物群落上の乱流輸送に寄与する渦は、様々な大きさを持っている。渦の大きさは、しばしば渦の回転周期で表される。即ち、小さな渦は小刻みな周期で変動し、大きな渦は長い時間をかけて変動する。乱流変動は、これらの様々な大きさの渦が重なってできている。

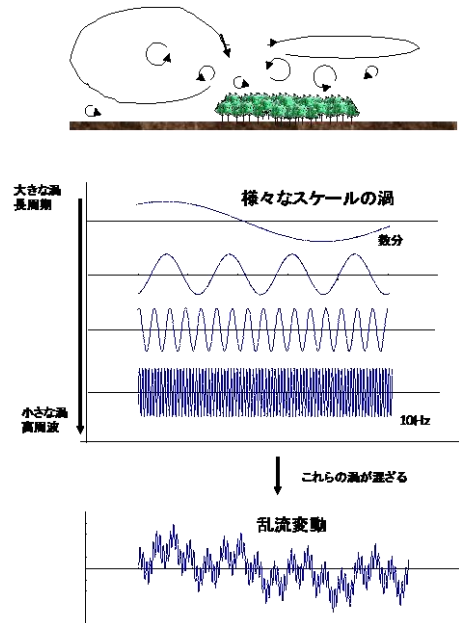


図1 乱流変動と様々な大きさの渦

一般に、植物群落上においては、小さなもので 10Hz (1 秒間に 10 回振幅する) から大きなもので 30~60 分のサイクルで振幅する渦によって物質が輸送されている。輸送に寄与する渦の大きさについては、高度が低いところでは小さい渦による輸送量が多くなり、高度が高いところでは大きな渦による輸送が卓越する。

平均化時間

フラックスの計算に際しては、輸送に寄与する全ての渦を対象として平均化する必要がある。短い時間でフラックスを計算すると、大きな渦によって輸送される分のフラックスを過小評価してしまう。例えば、フラックスの計算を 1 分毎に実施すると、1 分で完結しない大きな渦で輸送されているフラックスを過小評価してしまう。一方、長すぎる時間でフラックスを計算してしまうと、刻々と変わる気象要因の影響を受けて、正確にフラックスを計算することが出来ない。一般に、森林の場合は、輸送に寄与する最も大きな渦が 15 分程度であるとされているので、30 分を 1 単位(1 ラン)として計算することが多い。

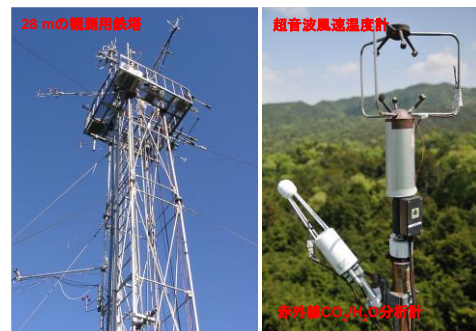


写真 1 ヒノキ林の観測用鉄塔と渦相関法測定システム

輸送に寄与する最も大きな渦が 15 分程度であるとされているので、30 分を 1 単位(1 ラン)として計算することが多い。

5.2. 渦相関法

- ・乱流変動を応答性の高い測器で測定して、その共分散からフラックスを算出する方法
- ・植生における熱・水・CO₂などのフラックスの長期モニタリングにおいて標準的な手法として採用
- ・用いる仮定が少なく、最も直接的な手法

渦相関法による乱流フラックスは、鉛直風速と気温やCO₂濃度などの物理量との共分散として以下のように表される。

$$\text{顕熱フラックス} : H = c_p \rho \overline{w'T'} \quad (1)$$

$$\text{CO}_2 \text{フラックス} : Fc = \rho \overline{w'c'} \quad (2)$$

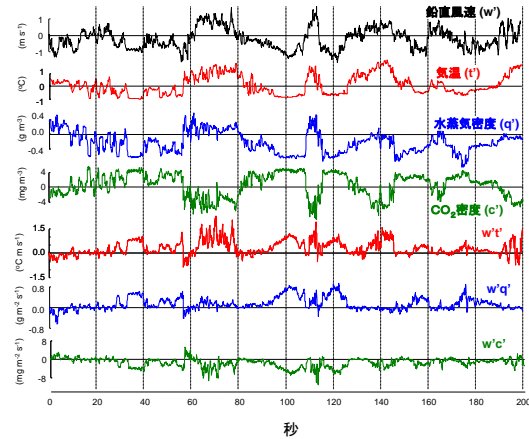


図2 ヒノキ林上で観測された乱流変動
2006年7月30日 13時

ここで、 w は鉛直風速、 T は気温、 c は CO₂ 濃度、 ρ は空気の密度を表す。オーバーバーは時間平均、プライム(′)は平均からの偏差を表す。

図 2 は、夏季の日中においてヒノキ林上で観測された乱流変動である。日中は、日射によって樹冠部が暖められているため、顕熱フラックスは上向きである。風が上向きに吹く時に樹冠部の暖かい空気が上昇することで気温が上がり、逆に風が下向きに吹く時に上空の冷たい空気がおりてくるために気温が低くなっていることが分かる。植物の蒸散によって樹冠部の水蒸気密度が高くなっているため水蒸気は上向きに輸送され、逆に、CO₂ 濃度は光合成によって樹冠部で低くなっているため、濃度の低い空気が下から上へ、CO₂ の濃い空気が上から下へと輸送されていることが見てとれる。即ち、鉛直風速と気温、水蒸気は正の相関をもつ変動をし、鉛直風速と CO₂ は負の相関を持つ変動をしている。渦相関法では、これらの輸送に寄与する乱流変動を高速かつ正確に記録することを要求される。

5.3. 植物群落のフラックス

エネルギーフラックス

植物群落がうけとる純放射量(Rn)は、顕熱フラックス(H)、潜熱フラックス(IE)及び、地中熱流量(G)の和として表される。

$$Rn \cong H + IE + G \quad (3)$$

すなわち 3 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)、地面を温める(G)エネルギーに転換される事を表している。図 3 は、夏季(2009 年 8 月 17 日～19 日)および春季(2010 年 5 月 1 日～3 日)にヒノキ林上で計測されたエネルギーフラックスの日変化

である。何れの時期においても、日中に純放射量が大きくなるに従って、顕熱フラックス、潜熱フラックスの値が大きくなっている。もう少し詳しく見ていくと、夏季は顕熱フラックスと潜熱フラックスの日中のピークが同程度の値を示しているのに対し、春季は顕熱フラックスが潜熱フラックスの2倍以上の値をとった。

エネルギーの分配の割合、顕熱フラックス、潜熱フラックスは、植物の生育・活性状態、気象条件などの様々な環境要因によって大きく変化する。

空気や地面の温度は、式1の熱収支の結果として決まる。

CO₂フラックス

CO₂は日中に植物の光合成によって群落に取り込まれ、夜間は逆に、植物と土壌中の微生物の呼吸によって大気に放出される(図4)。観測されたCO₂フラックスを日射量に対してプロットすると、光に応じて光合成が活発になる直角双曲線の関係を得ることが出来る(図6)。

大気中のCO₂濃度も、植物の光合成・呼吸(CO₂フラックス)に応じた明確な日変化を示し、日が昇って植物が光合成を始めると、それに応じて大気中のCO₂濃度も減少する。

貯留と生態系正味交換量 (Net Ecosystem Exchange; NEE)

フラックスは、測定高度を通過する物質の速度であり、実際の生態系におけるプロセスをそのまま反映したものではない。微気象学的手法により生態系のプロセスを評価するためには、計測されたフラックスに、測定高度以下における物質の変化量(貯留変化)を加える必要がある。

$$NEE = F_c + F_s$$

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

F_c : CO₂フラックス、 F_s : 貯留変化、 C : CO₂濃度、 z : 高さ、 t : 時間、 m : フラックスの測定高度

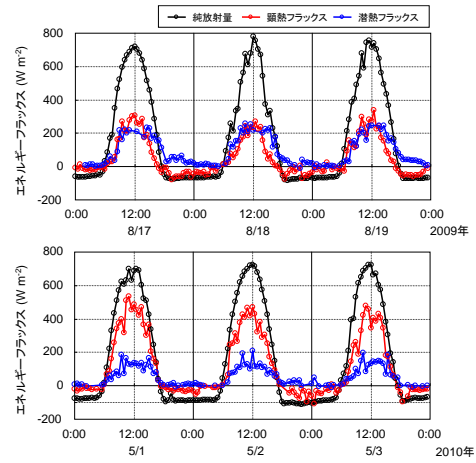


図3 ヒノキ林で観測されたエネルギーフラックス

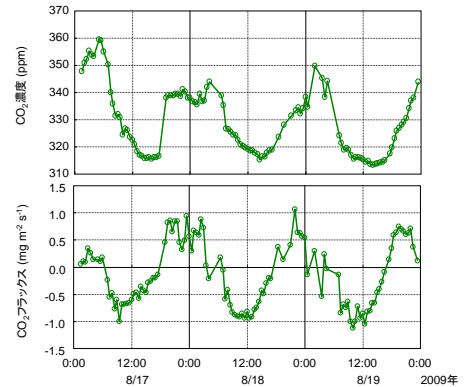


図4 ヒノキ林で観測されたCO₂濃度とフラックス

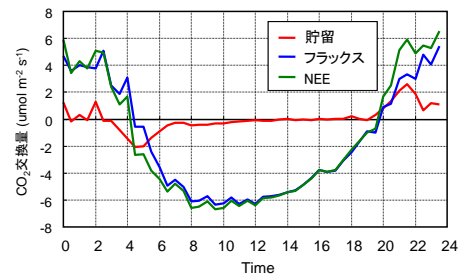


図5 フラックスと貯留の関係 アラスカのクロトウヒ林の場合

光合成と呼吸

群落上で計測される NEE は、光合成によって取り込まれる量と、呼吸によって放出される量の差である。

$$NEE = RE - GPP \quad (5)$$

ここで、 RE は生態系呼吸量 (植物及び土壌微生物の呼吸の総和; Ecosystem Respiration)、 GPP は総一次生産量 (光合成量; Gross Primary Productivity) を表す。

夜間には光合成が起こらないこと、また、植物・土壌微生物の呼吸が温度に依存する事を利用して、 NEE を光合成と呼吸に分離することが出来る。

呼吸の温度依存に関しては、様々な定式がなされているが、最も簡単なものとして以下の式が広く使用される。

$$RE = R_{ref} \times Q_{10}^{T/10} \quad (6)$$

R_{ref} は $0^{\circ}C$ のときの生態系呼吸量、 Q_{10} は呼吸の温度依存係数、 T は温度(気温や地温)を表す。気温などの温度に対する生態系呼吸量を定式化しておく(図 7)、その式と日中の温度から日中の呼吸量を推定することが出来る。日中の呼吸量と観測された NEE から、5 式により、日中の光合成量を算定することが可能となる(図 8)。

図 8 は、ヒノキ林における夏季の GPP 、 RE 、 NEE の日変化である。8/17~19 日にかけて日中の下向きの CO_2 フラックス(吸収速度)が徐々に減少しているが、これは、光合成の低下によるものではなく、呼吸の増加に伴って起こっていることが見てとれる。

森林が CO_2 を最もよく吸収する季節は？

群落スケールでのフラックス計測を長期的に実施するとそれぞれの森林で固有の熱・水・ガス (CO_2) 交換の季節的な特徴が見えてくる。

図 9 はヒノキ林で観測された 2000~2007 年の光合成、呼吸、 CO_2 フラックスの平均的な季節変化である。このヒノキ林の場合、1 年を通して CO_2 を吸収していることが分かる。光合成と呼吸のピークは 8 月であるが、 CO_2 の吸収が

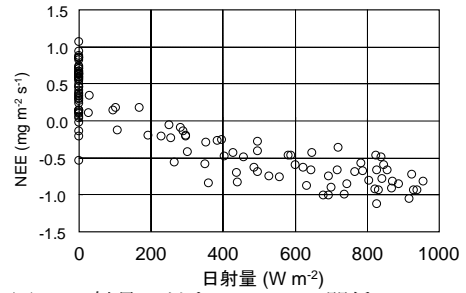


図 6 日射量に対する NEE の関係

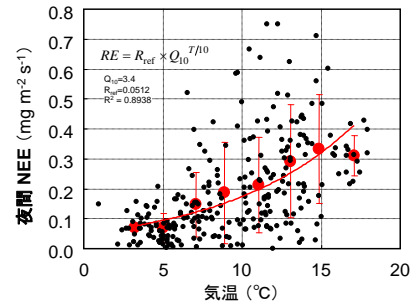


図 7 夜間の CO_2 フラックスと気温の関係

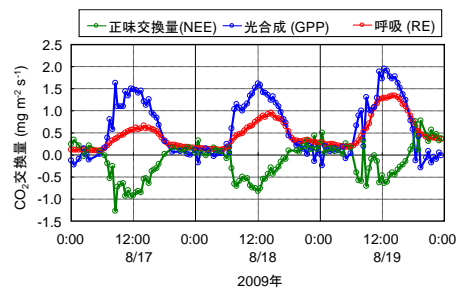


図 8 ヒノキ林における CO_2 フラックス、光合成、呼吸の日変化

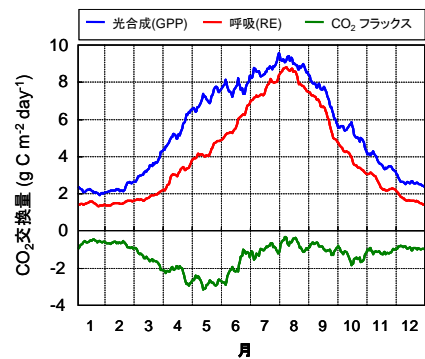


図 9 ヒノキ林の CO_2 交換量 2000~2007 年の平均的な季節変化

最も大きくなるのは5月である。これは、夏は光合成が高くなるが、その一方で、気温が高くなり呼吸が増えるためにCO₂吸収がそれほど大きくなりたためである。森林のCO₂吸収量は、このように樹木の光合成だけでなく、呼吸量の変化が重要であることが分かる。

気象条件は年毎に大きく変化するため、このような森林の季節的な推移を知るためには、1年間の計測では不十分であり、より長期的なモニタリングを実施する必要がある。

クロノシーケンスへの適用

時間による変化を空間による変化で代用する手法

攪乱からの二次遷移における炭素蓄積量やフラックスの回復過程などを評価できる。例えば、攪乱から150年間の回復過程を評価する際に、150年間同一の場所で計測するのではなく、攪乱後1, 6, 15, 23, 40, 74, 154年といった異なる林齢の場所で計測した結果を統合して評価する。

図10は、森林火災からの二次遷移に伴ってCO₂フラックスがどのように回復していくかをクロノシーケンスで計測した結果である。火災後、20年が経過した時点で、生態系が炭素の放出源から吸収源へと変化していることが読みとれる。

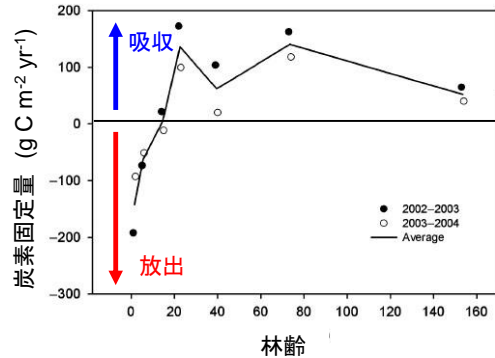


図10 カナダの森林における火災からの二次遷移に伴うCO₂フラックスの変化 (Goulden et al., 2010)

FLUXNET 計画

個別に実施されている微気象観測のデータを統合することで、地球規模でのフラックスを評価しようとするネットワーク

2007年で、400サイト以上が登録 (Baldocchi, 2008)

世界ネットワーク : FLUXNET

アジア : AsiaFlux

日本 : JapanFlux

アメリカ : AmeriFlux など

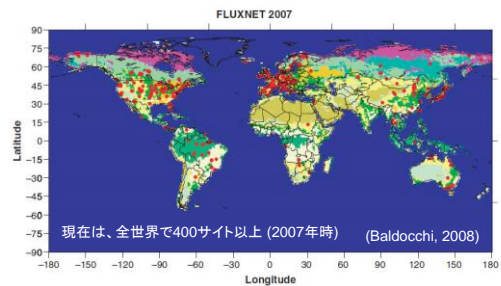


図11 世界のフラックス計測サイト (Baldocchi, 2008)

引用・参考文献

Baldocchi, D., 2008. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement system. Australian J. Botany 56, 1-26.

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. Glob. Change Biol. 17, 855-871.

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 2003. 植物と微気象 —群落大気の流れとフラックス—. 大阪公立大学共同出版会, 140pp.

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.