



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	フラックス観測の展望
Author(s)	高木, 健太郎; Takagi, Kentaro
Citation	北方森林保全技術, 第18号, 43-47
Issue Date	2000-10-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73310
Type	departmental bulletin paper
File Information	1999_1-12.pdf



I-12 フラックス^{*1}観測の展望

北ステーション 高木 健太郎

はじめに

地球温暖化防止京都会議（COP3）において、温室効果ガス削減の数値目標達成に森林による二酸化炭素の吸収を勘案することとなり、その特性や収支の解明が重要かつ緊急の課題となっている。アメリカ（<http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/ameriflux/>）やヨーロッパ（<http://gaia.agraria.unitus.it/euroflux/>）ではフラックス観測研究機関の間でネットワークを組織し、情報の相互利用を進めている。日本もアジアにおけるフラックス情報の発信源となるべくネットワークを組織し（AsiaNet）、今年になってホームページが開設された（http://www.cger.nies.go.jp/~moni/flux/asia_flux/index.html）。日本の森林に限れば、森林総合研究所がすでに独自のフラックスネットワークを公開している（<http://ss.affrc.go.jp/labs/flux/>）。本演習林においても現在、苫小牧地方演習林で冷温帯落葉樹林の二酸化炭素吸収量・蒸発散量の観測を行っているが、今後苫小牧の国有林で環境庁が実施するガスフラックス観測研究に参加する計画や天塩地方演習林における観測計画、あるいは中国の東北林業大学との共同研究など、ガスフラックス観測と関わる機会が増えることとなる。これらの現状を踏まえ、フラックス観測の基礎を把握することを目的として、本報ではまず始めにガスフラックスの微気象学的な観測手法の原理と概要について説明し、後に本研究分野で近年報告されている事例を紹介する。

微気象観測によるフラックス評価

(1) 微気象観測によるフラックス評価の利点と欠点

微気象観測法による二酸化炭素吸収量の評価が、他の方法に比べて有利な点は、a.短期的な特徴を非破壊で連続的に測定できる。b.半径数100mの範囲の代表的な特徴を把握することができる。ということであろう。測定精度も他の評価法と比較して高い。その反面、悪天候・風速が弱くなる夜間・モザイク状植生におけるフラックスの評価方法等未解決の部分も多い。特に長期収支を評価する際には悪条件下での観測やデータの欠測が増えることになるので、データの補完を行う必要がでてくる。そのため林分の成長量の測定等の他の評価法を併用することによりデータの精度を上げることが推奨されている。その他、不利な点としては、a.その代表範囲の広さゆえに測定場所が限定される。b.設置および維持費用が高額であること等が挙げられる。2-3章で森林の二酸化炭素吸収量を評価する場合の問題点に限ってさらに詳しく述べる。

(2) 渦相関法

微気象観測によるフラックス観測のうち近年標準とされている方法を渦相関法という。この方法は他の微気象観測方法と違いフラックスを直接評価できるという点に長所がある。図1では渦相関法と他の測定法の違いを示している。熱収支ボーエン比法や傾度法では植生上2高度の物質濃度とその間の“物質の移動のしやすさ”がフラックスの評価に必要で

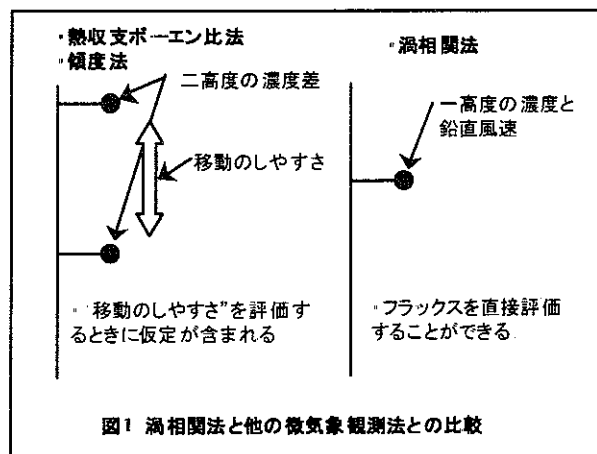


図1 渦相関法と他の微気象観測法との比較

ある。このうち“物質の移動のしやすさ”を評価する際に、いくつかの仮定を設ける必要がある。一方、渦相関法を用いる際には、0.1 秒間隔で鉛直風速（水平方向の風速に比べ非常に小さい）と濃度を測定する必要がある。この条件を満たす測器群は 1980 年代になって商品化され、多くの研究者がその恩恵にあずかることができるようになった。既存のフラックス評価方法の中では渦相関法が唯一の直接法である。以下にこの条件についてさらに詳しく述べる。

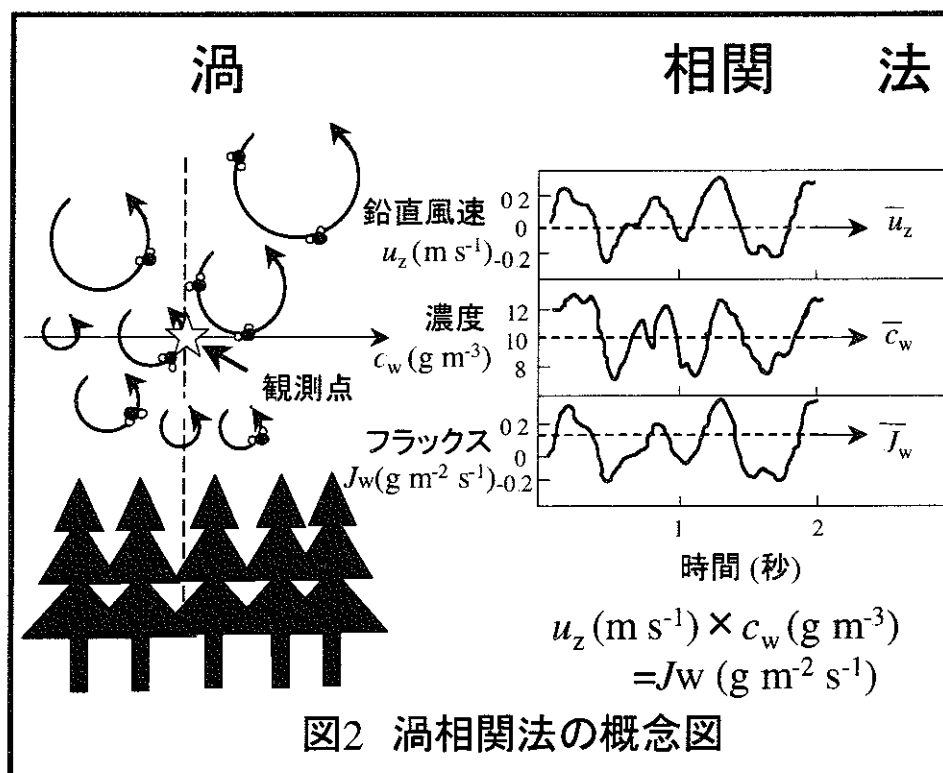
- a. 測定間隔と平均化時間:渦相関法の概念は“風は大小の渦から構成されていて、その渦が物質（熱や運動量も含まれる）を輸送する”というものである（図 2）。渦の大小は鉛直風速を測定した時にその周波数として表現することができる。したがって輸送に寄与するすべての渦を観測するためには、周波数の大きい風から小さい風までを測定する必要がある。そのためには 0.1 秒の測定間隔（フラックスに寄与する 1 番周波数の大きい渦の大きさ）で 15～30 分間の連続観測（フラックスに寄与する 1 番周波数の小さい渦の大きさ）を行う必要がある。フラックス(F)の計算式は、

$$F = \overline{w'c'}$$

ここで、 $\overline{w'c'}$ は平均化時間における鉛直風速と物質（例えば二酸化炭素）の濃度の共分散である。またこの式は鉛直風速と物質の濃度の標準偏差（それぞれ σ_w と σ_c ）を用いて以下のように表すこともできる。

$$\overline{w'c'} = r_{wc} \sigma_w \sigma_c$$

ここで r_{wc} は鉛直風速と物質の濃度の相関係数である。この式を見てわかるように、フラックスは標準偏差が大きいほど、また相関係数が高いほど大きくなり、相関係数が 0 の時にはフラックスも 0 になる。



- b. 鉛直方向の風速:ここで述べている鉛直方向とは絶対的（物を落とした時に落ちる方向）なものではなく、主風向に対してである。絶対的な鉛直方向の風速は風速計のレ

ベルを水平に合わせるにより測定可能であるが、主風向に対する鉛直方向は測定データを見てみないとわからない。特に斜度が 5° を超えるような場合は、両者の差は顕著である。また鉛直方向は平均化時間毎に変化する。渦相関法の定義によれば、主風向に対する鉛直方向の風速はすべての大きさの渦を捉えたときに 0 となる（時間にして 10～30 分）。そこで多くの研究では平均化時間毎に鉛直方向の風速が 0 になるように、風速計の x, y, z 座標を変換し、変換した風速を以後の解析に用いる。

渦相関法はオープンパス（開路）法とクローズドパス（閉路）法の 2 つの方法に大別される。2 つの方法ともに風速の測定は 3 次元の超音波風速計によりおこなうが、濃度の測定法に違いがある。二酸化炭素や水蒸気の濃度は測定対象の空気に赤外線照射しその減衰量から評価するが、オープンパス法の場合は赤外線の照射を野外の空気に対して直接行う（濃度測定セルが開放されている）。従って測定に伴う濃度の変動特性の変化が比較的起こりにくいという利点がある。その反面、測器が外気にさらされるために耐久性に若干の不安がある。センサーの用途も制限されるため、フラックス観測サイトにはあまり普及していない。クローズドパス法は風速測定場所の空気をポンプによって吸引し、別の場所で濃度測定を行う（濃度測定セルが比較的閉じている）。従って測器は屋内に設置することも可能であり、長期に渡り安定した結果が得られる（メンテナンスも比較的楽）といった利点がある。その反面、空気を長距離吸引するために濃度の変動特性が若干変わる可能性があり（特に高周波成分が減少する）その補正が必要である。また吸引による遅れ（フラックス評価には濃度を測定している空気が吸引口にあった時の鉛直風速が必要となるため）を補正する必要がある。遅れ時間は吸引量や吸引距離に依るがおおよそ数秒である。日本の主要サイトでは測器はタワー脇の小屋に接地している場合が多く吸引距離も数十 m におよぶ。アメリカのフラックスサイトでは吸引距離を短くするためにタワーの水平ビームに設置しているところが多い（3m 以内）。面倒な補正は極力排除するという方針であるが、この場合高所での濃度校正には苦勞しているとのことである。温室効果ガスのうちオープンパス法が適用できるのは、現在のところ二酸化炭素のみであり、メタンガス測定用機器が開発中である。二酸化炭素フラックスの長期観測サイトではクローズドパス法を採用しているところが多いが、最近アメリカの有力会社がオープンパスのシステムを比較的安価で提供し始めたので、オープンパス法の勢力も大きくなるであろう。

(3) その他特記事項

測定高度と測定範囲： 森林の場合、植生上部から最低 5m は上の高度で観測したほうがよいといわれている。それ以下の場合はフラックス測定に何らかの障害を受ける場合が多いようである。渦相関法の場合測定は一点で行うが、そこで得られる風速や濃度の情報は風上側の影響を受けるため、測定結果はある程度の広がりを持った地域の代表値となる（当然測定点に近いほどその影響は大きい）。一般に測定地点から全方向に測定高の 20～100 倍程度^{*2}の距離の影響を受けるとされており、観測サイトを選択する際にはこの範囲において植生が均一である場所に設定することが望ましい。植生が均一な範囲が広いほど、観測結果に測定対象外の情報が入る可能性が減り、データの選別や解釈がより容易になるためである。

渦の輸送量と二酸化炭素吸収量： 渦相関法により測定ができるのは、測定高度において渦により輸送される物質の移動量である。渦の輸送が卓越する晴天日の日中などは移動量 $\div$ 生態系の二酸化炭素吸収（放出）量となるが、場合によっては両者の差が大きくなるために補正を行う必要がある。代表的な例をあげると、風速が弱くなる夜間は土壌や樹体から呼吸によって放出された二酸化炭素が森林内に停滞する。このため、観測高度以下で濃度の増減が起こり、その変化が観測点に反映されない場合がある。このような濃度の増減を評価するためには、森林内の濃度の時間変化を数高度で測定する必要がある。

また、今までは話をわかりやすくするために、鉛直風速の時間平均が0になるということで話を進めてきたが、現実には地表面の傾斜や測器の傾きがない場合でも鉛直風速が0にはならない場合が多々ある。このような現象は特に森林のように測定高度が高い場合や、測定地域周辺の影響による水平流の収束・発散が起こりやすい場合にみられる。そして、この0ではない平均鉛直流による物質の輸送（渦相関法では測定できない）は夜間の林内二酸化炭素のように鉛直濃度勾配が高くなるような場合には無視ができないくらいに大きくなることもある。これが近年問題になっている渦相関法によるインバランス（収支があわない）問題である。この問題が厄介な理由は、平均鉛直風速が0になるように単純に座標変換を施して渦相関法を適用すると、フラックスを過小評価してしまうことである。主風向が水平ではない場所（例えば地表面の傾斜が大きい場所）では、平均鉛直風速を地表面の傾斜に伴う流線の傾きから分離して求める必要がある。

インバランス問題は Lee (1998) によって、その重要性が認知されるようになったが、この論文が評価された理由はインバランス問題があることを発表したからではなく、平均鉛直流による輸送の解析法を提案し、その影響を量的に示したことにある。最近では平均鉛直風速を風速計の傾きや、地表面の傾斜に伴う流線の傾きから分離して求める方法を考案している研究なども見られるが、この手法に関してはまだ多くの議論の余地がありそうである。最近の研究発表では、観測場所（測定対象植生の面積が小さすぎる場合や地表面の傾斜が大きい場合等）や観測高度（樹冠に近すぎる等）の問題、あるいは測定技術による問題など測定上の前提を無視したものについてもインバランスをうたっている場合があるが、もちろんこれらはデータの品質チェックにより選別を行わなければならないものであり、より低次の問題である。

近年の観測事例

森林における年間の二酸化炭素収支は 1990 年代に入って精力的に研究が行われ、その結果が発表され始めている。世界数カ所で行われているタワー通年観測による推定結果を表 1 にまとめて示す。夜間の二酸化炭素フラックスの問題はまだ議論の余地があるため、概略値としてとらえる必要があるが、年間ヘクタールあたりおおよそ 1 から 6 t の炭素が吸収されるという結果が出ている。この値を世界の保護林面積で積算した例では年間 0.6-2.2 Gt の炭素が吸収されている結果となっている（山本, 1999）。この値は地球の炭素収支におけるミッシン

表1 タワー長期観測から求めた森林生態系の炭素固定量

山本(1999), Malhi et al. (1999)より

優占種	炭素固定量 (tC/ha/年)	平均気温 (°C)	年降水量 (mm)	葉面積指数	海拔高度 (m a.s.l.)
落葉樹林					
Massachusetts, USA (Wofsy et al. 1993) ナラ、カエデ、マツ	3.7(1991)	7.5	--	--	340
Massachusetts, USA (Goulden et al. 1996) 混交林	1.4-2.8				
Oak Ridge, TN, USA (Greco et al. 1996) ナラ、クルミ、カエデ	5.3	13.9	1350	4.9	365
Central Italy (Valentini et al. 1996) ブナ	4.5	7.2	1100	4.6	1564
Takayama, Japan (Yamamoto et al. 1998) カバ、ナラ	1.2 (1994)	7.3	2382	3.5	1420
熱帯雨林					
Rondonia, Brazil (Grace et al. 1996) ヤシ	1	--	--	4	120
Manaus, Brazil (Malhi et al. 1997) 常緑広葉樹 (>200種/ha)	5.9	--	2200	5~6	--
寒帯林					
Saskatchewan, Canada (Black et al. 1998) ヤナギ科、マツ、ハシバミ	1.3	--	458	3.3	1564
Central Sweden (Lindroth et al. 1998) トウヒ(老齢林)	0.7-2.2	--	--	--	--

に匹敵する量であり、森林の炭素吸収量が二酸化炭素の増加を抑制する大きな役割を担っていることがわかる。しかし全球的な二酸化炭素収支における森林の役割を解明するためには現状の観測地点数では絶対的に不足しており、気温や水分状態などの気象条件による年々変動が大きいことも報告されている。今後も観測の継続や観測サイトを増やすことが必要である。

北海道には、日本の他地域の森林と比較して、平坦地に大規模な森林が残されており、観測サイトとして優れている場所が多い。現に日本の代表的なフラックスサイトでは、“市街地に隣接していて、高速道路も近くに通っており、純粋な森林の特徴を観測することが難しい”（森林総合研究所、川越森林気象試験地）とか、“山の鞍部にサイトがあり風系を把握しがたい”（資源環境研究所、高山）といった悩みを持っている。演習林ではこれらの問題を解決できる優位性を活かして、研究を展開させることができるのではないかと考えている。

参考文献

- Lee, X, On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(39-49), 1998.
- Malhi, Y., Baldocchi, D.D. and Jarvis, P.G., The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests, *Plant, Cell and Environment*, 22 (715-740), 1999.
- 山本晋, 日本/アジアのCO₂フラックス測定ネットー森林生態系の吸収能の解明を目指してー, 燃料及燃焼, 66 (163-169), 1999.

*1: フラックス（密度）とは、熱や水蒸気、物質などの物理量の流れの強さを示し、ある面積を通して単位時間内に一方から他方へ流れる量を意味する。ここでは二酸化炭素や水蒸気の大気ー森林間の移動量を示しており、微気象及びガス濃度を測定することにより算出することができる。フラックスを測定することにより、半径数 100 m の森林生態系における蒸発散量や光合成/呼吸量を評価することができる。

*2: 森林など植生高が高い場合は、風速は地表面よりも大分高い位置ではほとんど 0 となるため、ここで述べている測定高は地表面からの高度とはならない。森林の場合風速がほとんど 0 となる高度は植生高の 7 割から 8 割程度の高さとされている（当然この割合は植生の状態によって異なる）。従って、植生高が 10m の場合で、そこから 5m 上で測定を行った場合の測定高は、 $15\text{m} - 10\text{m} \times 0.7$ （あるいは 0.8）= 8（あるいは 7m）程度である。この場合半径 140～800m の地域が均一であることが望ましいことになる。