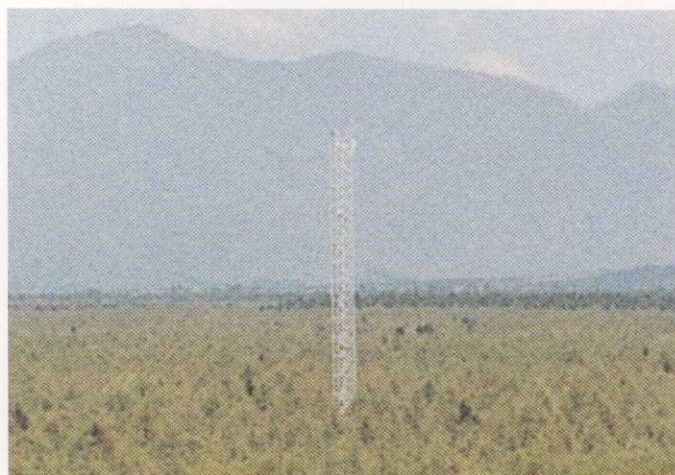


第3章

わが国の森林のフラックス観測への提言



1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)において、温室効果ガスの削減の数値目標達成に森林等の二酸化炭素(CO₂)の収支を勘案することとなり、森林等のCO₂の収支を精緻に見積もることが国際的な緊急課題として浮上した。そのために、多様な森林生態系で長期間にわたりCO₂フラックスを観測し、それらの世界的なネットワーク化を進め、観測データに裏付けられた精緻なモデル研究の推進が要請されている。長期的なCO₂フラックス観測の重要性は、IGBP(地球圏・生物圏国際共同研究計画)でも強く認識されている。

森林がどれだけCO₂など温室効果ガスを吸収、交換するのかということを量的に把握するためには、さまざまな森林で精度の高い観測を長期にわたって実施する必要がある。その一環として、世界各地の森林でタワーによる観測を中心としたプロジェクト(BOREAS, EUROFLUX, AmeriFluxなど)が進行しており、結果も公表されつつある。また、温室効果ガスフラックスを観測評価する上でこれまでに多くの問題点が明らかとなってきた。

しかし、フラックス観測に関しては、その観測手法がまだ完成されたものとは言い難く、かつ、観測地点の選択やデータ評価・検証体制の整備など、統一的なプロトコルの確立が急がれる。

3.1 フラックス観測への提言の概要

本報告ではフラックス観測の手法について、最近明らかとなったことや、以前から指摘されてきた観測解析上の問題点も含め考察を行ってきた。以下に、1章と2章で行った考察に基づいて、わが国でも、どのような観測あるいは解析が望ましいかについて提言する。特に、わが国では観測地点の地形や樹種構成が均一性に欠けており、それに対応した独自の手法・体制の構築が必要であり、その点も含め、最も望ましい手法・体制について言及した。

長期にわたる連続観測を可能とするためCO₂や水蒸気フラックスは基本的にはクロードパス渦相関法で測定するのが最適といえる。しかし、最近のオープンパス分析計も改良が重ねられているので可能な範囲でオープンパスによるフラックス長期観測も並行して行うことが望ましい。また、同時に傾度法を適用する意味も含めて、森林キャノピー内部とキャノピーの上の層までプロファイルも測定しておくのが望ましい。CO₂以外の微量気体(たとえばメタン、亜酸化窒素など)も測定する場合は、傾度法が保証されるときはこれを用いればよいが、相似則が成立しないときはREA(簡易渦集積)法の適用も考えられる。なお、測定結果は、測定を行った場所以外の森林でのガス交換にも適用できるように微気象モデル化を行っておく必要があるが、それに結びつく測定も実施することが望ましい。

3.2 望ましいフラックス観測の実際

以下に、クロードパス渦相関法を中心に据えた森林フラックスの観測手法の提言を、観測値に対する各種の補正や測器に対する較正、サンプリングや解析上の注意事項を前処理や保守も含めて要約する。

各項目のところに示した[]内は本報告内で説明を行った節を示している。

3.2.1 渦相関センサー [1.1.2]

- ・ 風速変動：3次元超音波風速計(Kaijo ; TR61CまたはTR61Bなど) [1.1.2 a]
- ・ 温度変動：超音波温度計が超音波風速計に付属しているものを用いるのが適当である。細線熱電対や細線白金抵抗線でも可。 [1.1.2 b]
- ・ 湿度変動：赤外線ガス分析計(クローズドパス)(LI-COR ; LI-6262など) [1.1.2 c]
- ・ CO₂変動：赤外線ガス分析計(クローズドパス)(LI-COR ; LI-6262など) [1.1.2 d]
- ・ メタンや亜酸化窒素など微量気体フラックス測定する場合には傾度法あるいはREA法を利用する。 [1.3.2] [1.2.2]

3.2.2 プロファイルセンサー

- ・ 風速：2次元超音波風速計(たとえばKaijo ; SA-200 などが微風や耐侯性に優れている)あるいは微風まで計れる3杯風速計でも可 [1.3.2]
- ・ 温湿度：通風乾湿計
- ・ CO₂：赤外線分析計(LI-COR ; LI-6262など) , 1 台の分析計で数高度切り替える。

3.2.3 通常気象センサー

日射計 , 純放射計 , 雨量計 , 積雪計など

3.2.4 設置

- ・ 森林と地形：平坦な地形で均一な森林が望ましいが , そうでない場合は均一性の評価 [1.5] や地形の補正 [1.1.4] が必要。
- ・ 観測塔：高さはできれば群落高の3倍以上(少なくとも2倍)。塔の周囲にギャップができないように設置する。塔の内側を登るタイプが , 能率の点で優れている。
- ・ 測器の設置：フラックス測器は頂部に設置するのが望ましいが , 一様性に問題があるときはフェッチを考慮した高さに設置する。ただし , roughness sublayer に入らないようにすること。
プロファイル測器は , 塔の両側にアームを出して設置することが望ましい。群落内のプロファイルも測定し , 夜間など群落内のCO₂蓄積量の評価も行う。
クローズドパスの分析計本体は , 空気取り入れ口からあまり離さないようにする。
較正用の足場を作っておく必要がある。
- ・ 電源：商用AC電源を用いる。長期観測用だけでなく特別な強化観測などにも備えて電気容量は十分余裕のあるようにする。停電対策のため自動的に切り替わる補助電源 , あるいは , 自動的に起動する発電機の設置が必要である。発電機を使う場合は排ガスの影響が出ないようかなり遠いところに設置。発電機からのノイズ

対策も必要である。

- ・ 自動復帰：電源が絶たれ、回復したときには観測装置は自動的に復帰し、プログラムが立ち上がり再スタートする設定が必要である。
- ・ 通信：前処理したものが研究室などで常時モニターできるようにしておく、故障のときに対処が早くできる。
- ・ 避雷：避雷針やアレスターなど適した避雷装置を設置する。また、頻繁に落雷があるところでは、予備の測器を何台か用意しておく必要がある。

3.2.5 収録と解析(渦相関法)

- ・ フィルター：ローパスフィルター(10Hzなど)はエイリアシングを防ぐために不可欠。デジタル収録後に対応することはできない。ADコンバーターやマルチプレクサーからのノイズはとれない。その対策としてデジタルフィルターも有用である。[1.1.3a]
- ・ サンプリング周波数：森林の場合は10Hz。この周波数はエイリアシングに対して電源の周波数が50Hzでも60Hzでも対応できる。[1.1.3a]
- ・ 記録時間：現実には観測期間を通じて、コンピュータの容量が許す限り連続記録とするが、解析や整理のために区切りをもうけておくのが望ましい。その場合の1ランの時間は約30分から約60分のあいだが適当である。30分以下では十分な長周期が得られないし、60分を越えると日変化などの非定常の影響が出るおそれがある。[1.1.3 b]
- ・ 仮解析：大容量メディアを使えば乱流データをそのまま収納可能であるが各共分散値、標準偏差、スペクトルはリアルタイム処理をしておかないと、データがたまって処理しきれない。不適切データ、異常値の除去については基準を設けて自動的に解析から除外する。ただし、オリジナルデータは値が最終的に確定するまで消去せずに残しておく。
- ・ マルチタスク：データ収録プログラムを動かすOSのマルチタスク化を行いデータ収録時にもデータのバックアップや解析を行えるようにする。
- ・ トレンドの除去：600～1000秒程度のハイパスデジタルフィルターを用いたチャンネルを設けておく。あるいはデータを区切り、1次や2次関数でトレンドを近似して除去してもよい。機械的に無差別なトレンドを除去を行うとスパイク状のノイズが入った場合などは不適切な処理となるので注意が必要。[1.1.3 c]
 - ・ スペクトル、コスペクトルなどは逐次計算して残すことが望ましい。

3.2.6 補正

- ・ CO₂フラックスの 密度変動補正(WPL補正)はオープンパス法では不可欠である。
[1.1.4a]
- ・ センサーパス，センサー間の位置関係の補正は数%の精度を問題にする場合は実施することが望ましい。[1.1.4d]
- ・ 地形補正は行う方が望ましいが，平坦地であれば10度程度にとどめるべきである。気象条件などで大きな鉛直流が発生する場合があります機械的な補正は大きな誤差につながる可能性がある。[1.1.4c]
- ・ クローズドパスにおける ダンピングの補正はバンドパスコバリアンス法で行うことが可能である。ただし，顕熱フラックスが小さい場合は注意が必要である。
[1.1.4e]
- ・ 超音波温度計を用いる場合の湿度補正を見積もっておく必要がある。
- ・ オープンパス法ではCO₂とH₂Oの 相互感度の検定を行っておく必要がある。
[1.1.4b]
- ・ 3杯風速計の回りすぎは超音波風速計などでチェックしておくことが望ましい。

3.2.7 較正と保守

- ・ フラックスはオープンパス法との比較を早い時点で行い、その後も数カ月に1回程度の比較観測を行うことが望ましい。
- ・ クローズドパスにおける遅れ時間：観測開始までにオープンパスの測器を用いて決定する事が望ましい。wとの最大の相関となる遅れ時間をとるのは理論的根拠は薄いが行われてはいる。
- ・ 傾度(あるいはプロファイル)のセンサーは時々同じ高度に設置して相互比較を行う必要がある。空気取り入れ口も同じ位置に設置して相互比較を行う。[1.3.2]
- ・ CO₂は時々 標準ガスで検定を行うことが必要である。自動的に較正值が入るようなシステムが望ましい。
- ・ 水蒸気のオープンパス変動計は絶対値や直流成分が測定できないので，細線乾湿計や容量型(バイサラ型)の湿度計を併設して ダイナミックな検定を行うことが必要である。
- ・ 水蒸気はチューブで空気を引く場合凝結が起こらないようにすること。
- ・ ガス分析計の乾燥剤，ソーダライムの定期的な交換は不可欠である。
- ・ 予備観測を行って応答特性を把握し，バンドパス補正などの対策を立てておく必要がある。[1.1.4e]

- ・ 乾湿計では蒸留水の補給や湿球の取り替えを定期的に行う必要がある。
寒冷地では湿球の凍結の問題がある。

3.2.8 その他の測定，調査

- ・ 土壌呼吸の測定は連続して行うことが望ましいが，できないときは定期的に期間を設けて行う。同時に土壌水分と地中温度の測定が必要となる。
- ・ キャノピー表面温度(放射温度計)や樹木内部の温度を測定しておくことが望ましい。
- ・ 地面修正量(d)は成長の段階にあわせて風杯風速計を密に配置して測定しておく必要がある。
- ・ LAIの測定をキャノピーアナライザーや全天カメラなどを用いて定期的に測定し，成育調査やLADの鉛直分布の測定も行うことが望ましい。
- ・ 気孔コンダクタンスも可能な範囲で行うことが望ましい。
- ・ フットプリント評価を試みることが望ましい。

3.2.9 観測期間

観測期間については，対象としている森林について結論が得られるまでには測定は数年にわたって行うことが望ましいことは言うまでもない。1年間の連続観測で概要は把握できるが，気象状況は年々変動があるので，測定した期間が特異な気象の年でなかったかどうかを検証しておく必要がある。

3.2.10 観測体制とモデル解析

対象としている森林で複数の研究機関による共同観測を実施し，さまざまな手法や異なる測器を用いて測定法についての比較検証を行うことが必要と思われる。

このようにして得られたデータに基づいて，さまざまな森林に対してガス交換の推定が簡単な環境要因から求められるようにしておくことが望ましい。そのためにはモニターの対象としている森林のガス交換の状況が様々な気象要素や環境要因によってどのように変化するかをモデル化(たとえば乱流については，高次クロージャーマodelや，LESモデル，さらには植物の生理を組み込んだガス交換モデル)しておくことが望まれる。

謝 辞

この報告書の作成にあたり，農林水産省農業環境技術研究所気象特性研究室の原園芳信室長から文献についてお教え頂き，また，大阪府立大学農学部の高谷憲氏からは測定技法について多くのご意見を頂きました。第2章の観測の実施に際して，マングローブ林については日本生命財団，関西電力と関西総合環境センターに，そして滋賀県の針葉樹林については京都大学大学院農学研究科森林水文学研究室にお世話になりました。また，この研究に際して国立環境研究所地球環境研究センターの藤沼康実研究管理官はじめ多くの方のお世話になりました。ここに新甚の謝意を表します。