



Title	微気象学的な測定（渦相関法による測定）
Author(s)	斎藤, 琢
Description	2章 個体・環境の測定 2. 個体から群落スケールのCO2ガス交換 b. 群落の物質生産 b-4
Relation	光合成研究法. 北海道大学低温科学研究所, 日本光合成研究会共編
Citation	低温科学, 67, 129-136
Issue Date	2009-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/39110
Type	departmental bulletin paper
File Information	67-021.pdf



2. 個体から群落スケールの CO₂ ガス交換

b. 群落の物質生産

b-4. 微気象学的な測定（渦相関法による測定）

斎藤 琢¹⁾

群落スケールの CO₂ 交換量の計測手法の一つとして微気象学的な測定が挙げられる。本章では、微気象学的手法の一つである渦相関法を用いた CO₂ 交換量計測を中心に紹介する。

CO₂ flux measurement using eddy-covariance method

Taku M. Saitoh

To assess budgets of CO₂ exchange between the biosphere and atmosphere, long-term measurements have been carried out using eddy-covariance method over various ecosystems worldwide. In this chapter, we introduce eddy-covariance method. Especially, principle of measurements, calculation process of fluxes, and quality control of flux data has been described.

2.b-4.1 概要

群落スケールの大気と生態系間の CO₂ 交換量を研究対象とする場合、微気象学的手法によって CO₂ フラックス^{注1}を計測することが有効である。微気象学的手法は、短い時間インターバルで連続的に物質の交換量を把握できる利点を持ち、Biometric 法(2b. 3 参照)では困難な「日」から「季節」スケールでの生態系の環境応答を議論できる。微気象学的手法には、傾度法、バルク法、乱流変動法などがある¹⁾。近年は、乱流変動法の一つとして確立された計測手法である渦相関法が多用されている。乱流変動法には、他に、簡易渦集積法、バンドパスコバリアンス法などがある¹⁾。

裸地、草本類群落などの水平一様な理想的な観測条件において渦相関法によって計測される CO₂ フラックスは、純生態系交換量 (NEE: Net Ecosystem Exchange) と呼ばれ、土壌圏を含む生態系が正味として放出する CO₂ である。NEE は以下の式で表せられる (図 1)。

$$NEE = RE - GPP = -NEP \quad (1)$$

ここで、RE は生態系呼吸量 (Ecosystem Respiration) であり、生態系の呼吸によって放出された CO₂ 総量を表し、GPP は総一次生産量 (Gross Primary Productivity) であり、生態系の光合成によって吸収された CO₂ 総量を表す。NEE が負の値のとき生態系が炭素を吸収してい

ることを示し、純生態系生産量 (NEP: Net Ecosystem Productivity) とは逆符号となる。RE は森林生態系を例に挙げれば、

$$RE = R_h + R_{root} + R_{stem} + R_{leaf} \quad (2)$$

であり、微生物分解による呼吸量 (R_h)、根呼吸量 (R_{root})、幹呼吸量 (R_{stem})、葉呼吸量 (R_{leaf}) の総和として表すことができる (図 1)。

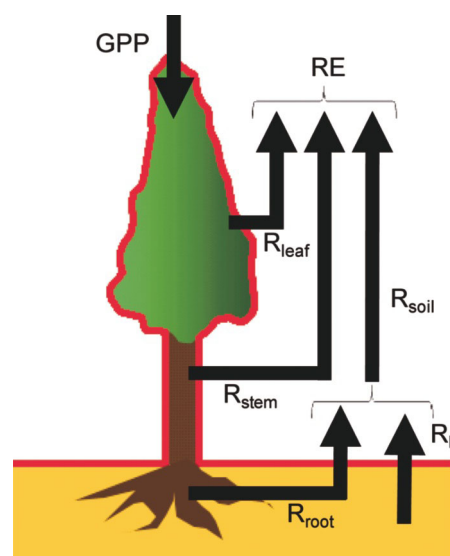


図 1：森林生態系の CO₂ 収支。

^{注1} 一般的には、単位面積、単位時間当たりにある面を通過する物質・エネルギーなどの量。狭義には、大気―地表面間の交換量を表す。

1) 岐阜大学流域圏科学研究センター

2.b-4.2 渦相関法の概念

渦相関法は、渦（乱流）によって輸送される物質量を直接的に計測する手法である。計測場所における鉛直風速と物質量の変動は、時々刻々と変化する乱流による上下方向の物質の輸送をとらえている。上向きの風は下方の物質を上方へ輸送し、下向きの風は上方の物質を下方に輸送する。このとき、上向き（下向き）に輸送される物質量が多ければ収支として物質は上向き（下向き）に輸送されたことになる。

CO₂ を例にすれば、裸地、草本群落、樹高が低い森林群落などで計測される CO₂ フラックス (NEE) は本質的には以下のように表すことができる（各記号については表 1 参照）。

$$NEE = \overline{w'c'}(h) \quad (3)$$

このとき、鉛直風の変動成分 (w') は乱流変動を示しており、CO₂ モル密度の変動 (c') は乱流によって上下方向へ輸送される CO₂ 量を示す。 w' と c' に正（負）の相関があれば、フラックスは上向き（下向き）となり、NEE は正（負）となる。このように、フラックス値が w' と c' の相関と関係深いことから渦相関法と呼ばれる。

表 1：使用記号一覧

記号	説明
NEE	純生態系交換量
NEP	純生態系生産量
RE	生態系呼吸量
GPP	総一次生産量
R _h	微生物分解による呼吸量
R _{root}	根呼吸量
R _{stem}	幹呼吸量
R _{leaf}	葉呼吸量
R _{soil}	土壌呼吸量
d	地面修正量 (m)
L	モニンオブコフの長さ (m)
u	x 座標方向の風速の水平成分 (m s ⁻¹)
v	y 座標方向の風速の水平成分 (m s ⁻¹)
w	風速の鉛直成分 (m s ⁻¹)
c	CO ₂ モル密度 (mol m ⁻³)
q	H ₂ O モル密度 (mol m ⁻³)
T _v	音仮温度 (K)
h	渦相関法計測高度 (m)
T	大気温度 (K)
c _{ppm}	CO ₂ 濃度 (ppm)
R	気体定数 (8.3143 J mol ⁻¹ K ⁻¹)
プライム (')	変数の変動成分
バー (—)	平均成分

2.b-4.3 渦相関法による計測

2.b-4.3.1 計測場所の選定

通常、計測器は、裸地、草本群落、背の低い森林群落では簡易ポール上に設置し、森林群落では観測タワーを建設してタワー上に設置する。ポールやタワーの設置場所（計測地点）としては、研究対象とする生態系が「水平一様」に広がる場所に観測サイトを設定することが理想である。その第 1 の理由として、渦相関法は、移流^{#2}による物質輸送を無視でき、物質の鉛直輸送量は乱流による輸送量のみで説明できるという仮定に基づいている点が挙げられる。「水平一様」でない観測場所ではこの前提が崩れ、移流による物質輸送が無視できないほど大きくなることもある。第 2 の理由として、タワーで計測された CO₂ フラックス値は風上の群落上の各地点で乱流によって輸送された CO₂ 量の加重平均である点が挙げられる。図 2 はタワーで計測されたフラックス値に風上側のどの地点が最も寄与するかを示した図である。計測されたフラックス値に影響を与える地表面の領域はフットプリントと呼ばれ、風や乱流の強さに依存して常に変化する。通常、大気が安定な成層になるほど鉛直方向の混合が弱くなるので、観測地点から遠方な場所の寄与率が大きくなる。フットプリント領域に研究対象外の地表面が含まれる場合、計測されたフラックス値に研究対象外

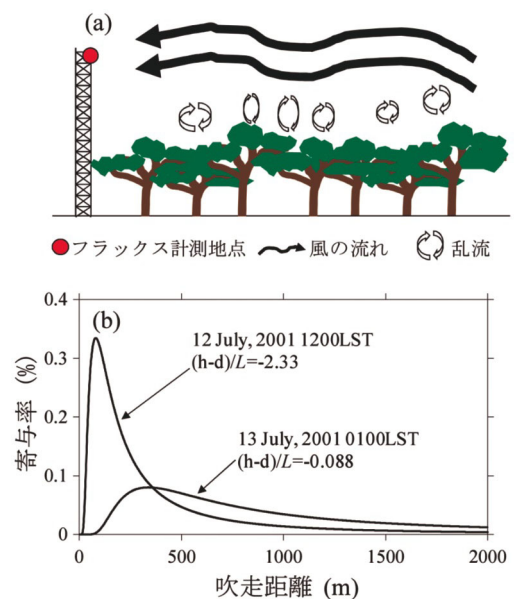


図 2：(a) 乱流による物質の鉛直輸送の模式図と (b) タワーで計測された CO₂ フラックス値への風上の各地点の寄与率（マレーシア熱帯雨林における計測例）。

^{#2} 乱流ではなく平均流によって物質が運ばれる現象

の地表面の情報も紛れ込むことになる。このような現象を回避するためにも、フットプリント内は、研究対象とする群落が「水平一様」に広がっていることが望ましい。必要十分な生態系の水平一様性の範囲は、生態系の構造と観測高度(樹冠の平均高度からの鉛直距離)、風速などに依存し、フットプリント解析²³を行うことによって事前調査が可能である²⁾。しかし、実際には、研究対象とする生態系が複雑地形上や急傾斜地上にあるという理由から、必ずしも理想的な観測条件が確保できるとは限らない。このような場合には、計測されたデータに対して行う品質管理によって不適切なデータの除外を行う。

2.b-4.3.2 計測測器

渦相関法を用いて CO₂ フラックスを算出するためには、時間応答性の高い測器を用いて風速の三次元成分(u , v , w)、温度(T)、CO₂ モル密度(c)、H₂O モル密度(q)を計測することが必要である。これらの観測には超音波風速温度計と赤外線 CO₂/H₂O ガス分析計を用いる場合が多い。超音波風速温度計は、10 Hz を超える応答速度で風速の三次元成分と温度(音仮温度 T_v)を計測することが可能な測器である。赤外線 CO₂/H₂O ガス分析計は、CO₂/H₂O モル密度(または濃度)の計測が可能であり、オープンパス式とクローズドパス式がある。オープンパス式は赤外線光路が外部に露出しており、大気中の CO₂/H₂O モル密度を直接計測可能である。一方、クローズドパス式は、赤外線光路が測定器内部にあり、ポンプを用いてサンプル空気を計測セル内に導入し濃度分析を行う。現在では、超音波風速温度計、オープンパス式赤外線 CO₂/H₂O ガス分析計、クローズドパス式赤外線 CO₂/H₂O ガス分析計のいずれも一年を超える長期観測に耐えうる耐候性と安定性を持った測器が存在する。また、後述する補正のために、温度、湿度²⁴の計測も必要であり、超音波風速温度計と赤外線 CO₂/H₂O ガス分析計と同高度で通風式の温湿度計を用いて計測を行うことが推奨される。

2.b-4.3.3 CO₂ フラックスの計算方法

5～25 Hz 程度のサンプリング周期²⁵で計測された

u , v , w , T_v , c , q の時系列から CO₂ フラックス値を算出するためには、平均化時間を設定する必要がある。これまでの研究から、輸送に寄与する乱流変動の統計値を求めるため、平均化時間を 30 分から 60 分と設定することが多い。この平均化時間毎の u , v , w , T_v , c , q の時系列データを 1 ラン²⁶と呼び、CO₂ フラックスはこの 1 ラン毎に c と w の共分散によって算出される(式(3)参照)。実際に計算を行う際には、座標変換³⁾や計測された各変数や式(3)で算出されたフラックス値に対する様々な補正を行う。代表的な補正を表 2 に示す。これらの補正や品質管理の際には、顕熱フラックス、潜熱フラックス、H₂O フラックス、運動量フラックスが必要であり、CO₂ フラックス値を算出する際に同時に計算を行う。

表 2：各種補正

補正	説明	文献
横風補正 (Crosswind correction)	水平風の影響で音波の到達時間が長くなることにより音速が過小評価され、結果として T_v も過小評価することになる。横風補正はこの T_v に対する補正である。	4,5)
水蒸気補正 (Humidity correction)	超音波風速温度計によって計測される T_v が水蒸気の変動成分を含んでいるため、 T が過大評価される。水蒸気補正はこの T_v に対する補正であり、横風補正とは逆センスに働く。	5)
プローブによる 流れの減衰 (Shadow effect)	超音波風速温度計のプローブ部の影響で風速の測定値を過小評価する現象に対する補正であり、風速を補正する。自然風条件下における平均風速に対しては、それほど影響がないとの指摘もある ⁶⁾ 。	7,8)
吹き上げ角エラ ーの補正 (Correction of attack dependent error)	超音波風速温度計に風が吹き上げる(吹き下げる)ことによって起こる鉛直風速の過小評価、水平風速の過大評価に対する補正であり、鉛直風速、水平風速を補正する。	9-11)
WPL 補正 (WPL correction)	大気鉛直方向の密度差で生じる鉛直平均流によって輸送される CO ₂ 量に関する補正であり CO ₂ フラックスを補正する。	12)
加熱補正 (Heating correction)	オープンパス赤外線ガス分析計のパス部分が熱せられることによって起こる気温変動の影響についての補正であり、CO ₂ フラックスを補正する。	13)

考慮して設定する必要がある。近年は多くの観測サイトでサンプリング周期として 10 Hz が採用されている。

²⁶ 10 Hz のサンプリング周期で平均化時間が 30 分の場合、1 ランの各変数のデータ数は 18000 個となる。

²³ Agricultural and Forest Meteorology の 127 巻 3-4 号が「Flux and Concentration Footprints」の特集号となっており、フットプリント解析について詳細に記述されている。

²⁴ 温度計には、熱電対型、サーミスタ型、白金抵抗型、乾湿球型などがあり、湿度計には、静電容量型、乾湿球型などがある。温度計、湿度計がセットになった計測測器(例えば、HMP45A, Vaisala)を用いる場合も多い。通風の方式は、その設置方法によって、横型および縦型がある。また、通風方法によって、自然風のみによる自然通風式と FAN を用いた強制通風式があり、後者の方が高精度を期待できる。

²⁵ サンプリング周期は、乱流輸送に寄与する乱流渦のスケールを

2.b-4.3.4 データの品質管理

実際に渦相関法によって得られた CO₂ フラックス値は、降雨時のデータ、測器のトラブルや校正時のデータ、乱流輸送が十分検出できていないと考えられるデータなど、データ利用目的に適さない様々なデータが含まれている。利用可能な CO₂ フラックスの時系列データセットを作成するためには、利用目的に合わせてデータの品質管理を行う必要がある。代表的な品質管理を表3に示す。表3に示す品質管理以外に、風向によるデータの除外がある。風向によるデータの除外は、ある風向に対して十分なフェッチ^{※7}が得られない場合に行う。各品質管理についてはいくつかの文献で詳細に記述されているのでそれらを参照されたい^{18,19)}。

表3：品質管理手法

品質管理手法	説明	文献
スペクトル解析 (Spectrum analysis)	各変数の1ランの時系列に対してスペクトル解析を行い、パワースペクトルが理想的な形状にならないランを検出する。	¹⁴⁾
ドロップアウト (Dropouts)	各変数の1ラン内の時系列における極端な凸凹を検出する。	¹⁵⁾
分解能 (Resolution)	低分解能データを検出する。	¹⁵⁾
スパイク値 (Spike)	各変数の1ラン内に一定以上の率でスパイクが存在するデータを検出する。	¹⁵⁾
絶対値 (Absolute limit)	各変数の1ラン内に閾値（最大値、最小値）外のデータが一定値以上の率で出現するデータを検出する。	¹⁵⁾
尖度 (Skewness)	各変数の1ラン毎または、1ランを数個に分割した時系列毎に得られる尖度（3次モーメント）の閾値外データを検出する。	¹⁵⁾
歪度 (Kurtosis)	各変数の1ラン毎または1ランを数個に分割した時系列毎に得られる歪度（4次モーメント）の閾値外データを検出する。	¹⁵⁾
ハル平均値 (Haar mean)	各変数の1ラン内における平均値の不連続性データを検出する。	¹⁵⁾
ハル分散値 (Haar variance)	各変数の1ラン内における分散の不連続性データを検出する。	¹⁵⁾
乱流強度 (Integral turbulence characteristics)	モニン・オブコフの相似則によって想定される安定度と分散量の関係に対する適応度合を検出する。	¹⁶⁾
定常性 (Instationarity or nonstationarity)	各共分散の1ラン内における定常性の保持度合を検出する。	^{16,17)}

※7 風上側に広がる均一な地表面の観測点からの水平距離のことで吹走距離ともいう。

2.b-4.4 渦相関法に関連した計測

2.b-4.4.1 様々な観測条件における NEE の推定

実際の観測では、必ずしも理想的な観測条件が揃うわけではない。このため、渦相関法による計測に加えて、非圧縮性流体における物質輸送で定義される複数の項目について計測することで NEE を算出する場合もある。非圧縮性流体において水平方向の乱流輸送^{※8}を無視すると、単位地表面上の直方体における NEE は式 (4) で与えられる。

$$NEE = \overline{w'c'}(h) + \int_0^h \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial t} dz + \int_0^h \left(\bar{u}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial x} + \bar{v}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial y} \right) dz + \int_0^h \left(\bar{w}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial z} \right) dz \quad (4)$$

I II III IV

第Ⅰ項は渦相関法によって取得された鉛直方向の CO₂ 交換量であり、第Ⅱ項は貯留 CO₂ フラックスと呼ばれる地表面と渦相関法計測高度間の CO₂ 濃度の時間変化、第Ⅲ項は水平方向の CO₂ 移流、第Ⅳ項は鉛直方向の CO₂ 移流である (図3)。式 (4) の各記号については表1を参照されたい。

第Ⅰ項に加えてどの項を追加で計測するかは観測サイトの植生や地形によって異なる。裸地、草本類群落、背の低い森林群落の水平一様な理想的な観測条件では、通常、第Ⅱ～Ⅳ項は無視し、第Ⅰ項の算出に必要な計測を行って NEE を求める^{20,21)}。比較的背の高い森林群落では、樹冠内部に CO₂ の貯留がおこるため²²⁻²⁴⁾、第Ⅰ項に加えて第Ⅱ項の算出に必要な CO₂ 濃度プロファイル計測も行うことが多い^{25,26)}。しかし、AC 電源供給のない観

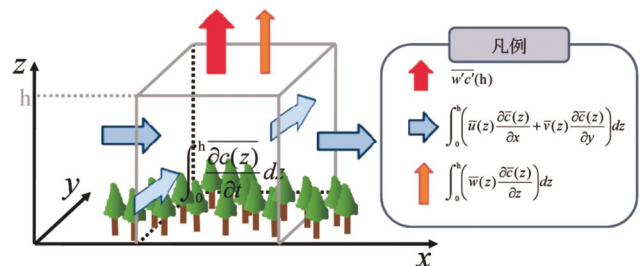


図3：非圧縮性流体における乱流と移流による CO₂ 輸送。水平方向の乱流輸送成分は無視。

※8 一般的に水平方向の乱流変動による物質輸送は式 (4) の各項に比べ小さいため無視される。

測サイトでは、CO₂ 濃度プロファイル連続計測の維持が困難な場合が多いため、比較的背の高い森林群落であっても第Ⅰ項の計測のみから NEE を算出する場合もある²⁷⁾。第Ⅱ項は、夜間の地表面付近の CO₂ 蓄積を放出する明け方と CO₂ 蓄積を開始する夕方の時間帯でとくに NEE の値に寄与する傾向がある²⁸⁾。第Ⅲ項、第Ⅳ項は特に複雑地形や傾斜地における観測サイト²⁹⁾で NEE への寄与が注目されている項である²⁹⁻³³⁾。しかし、AsiaFlux, AmeriFlux, CarboEurope-IP などのデータベースで公開されている NEE データは、第Ⅲ項、第Ⅳ項を無視して計算したものが一般的である²¹⁻²⁵⁾。その理由として、第Ⅲ項の算出については、(1)通常 2 地点以上の CO₂ 濃度プロファイルの高精度な計測が必要であり²⁸⁾、大がかりな観測システムとなるため研究コストがかかる、(2)連続した観測システムの維持に多大な仕事量を要する、といった理由が挙げられる。また、第Ⅳ項の算出については、渦相関法による計測と一地点の CO₂ 濃度プロファイル計測から算出可能ではあるが^{34,35)}、(1)第Ⅳ項の NEE への寄与率がどの程度かといった議論が依然不十分である、(2)鉛直平均風と CO₂ 濃度計測の高精度計測が要求される、といった理由が挙げられる。

2.b-4.4.2 CO₂ 濃度プロファイル計測

式 (4) の第Ⅱ～Ⅳ項を算出するためには、渦相関法計測高度下の CO₂ モル密度 (mol m⁻³) の鉛直分布が必要である。とくに、貯留 CO₂ フラックス (式 (4) 第Ⅱ項) は背の高い森林群落で NEE への寄与が大きいことが指摘されており^{21,23)}、多くの森林サイトで CO₂ 濃度プロファイルが連続的に計測されてきた。貯留 CO₂ フラックス (μmol m⁻²s⁻¹) は、計測された CO₂ 濃度 (ppm) と気温 (K) の鉛直分布から次式で表すことができる。

$$\int_0^h \frac{\partial c(z)}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h \frac{c_{ppm}(z)P}{RT(z)} dz \quad (5)$$

ここで、 c_{ppm} は ppm (μmol mol⁻¹) 単位系の CO₂ 濃度であり、 T が気温 (K)、 P は大気圧 (Pa)、 R は気体定数 (8.3143 J mol⁻¹K⁻¹) である。渦相関法計測高度下の CO₂ 濃度プロファイルの計測方法として、電磁弁制御システム、ポンプなどを用いて、各高度からチューブを通して大気サンプリングし、単一のクロズドパス赤外線ガス分析計を用いて複数の高度の CO₂ 濃度を自動計測する方法が一般的である³⁶⁻⁴³⁾。複数の赤外線ガス分析計を用

い計測することも可能ではあるが、測定時の器差の影響を受ける、測器が高価であるという理由により推奨されない。

計測高度は等間隔ではなく、濃度勾配が生じやすい地表面付近では間隔を密にし、樹冠上では間隔を粗に設定する。例えば、AsiaFlux の TKC サイト (樹高約 20 m の常緑針葉樹林) では、地上から 30.2, 22.8, 18.4, 14.7, 10.6, 6.5, 3.6, 1.3 m の計 8 高度で計測を行っている。

2.b-4.4.3 環境計測

実際に研究を行う際には、フラックス計測だけでなく、日射、気温、湿度、降水量、地温、土壤水分といった様々な微気象、土壤環境を同時に計測する必要がある。タワーにおけるフラックス観測とその周辺の環境計測例を図 4 に示す。環境計測については、多くの優良な教科書で、測定原理、計測手法、データ処理法、計測例について言及されている⁴⁴⁻⁴⁶⁾。ぜひ、これらを一読されたい。

2.b-4.5 渦相関法の問題点

渦相関法は、現在も計測手法そのものについて議論が行われている手法である。とくに、熱収支のインバランス問題、夜間呼吸量の過小評価については現在でも日々多くの論文で議論されている。

熱収支のインバランス問題とは、有効エネルギー (純放射量と地中熱流量の差) と乱流フラックス (渦相関法によって計測された顕熱と潜熱の和) は理論的には等しくなるが、実際の観測結果では両者が等しくならないという現象を指す。複数の観測サイトを研究対象とした論文⁴⁷⁾によれば、有効エネルギーに対する乱流フラックスの比は平均で 0.8 程度となり、この値がデータの品質の一つの目安となっている。

夜間呼吸量 (夜間 NEE) の過小評価は、乱流が十分発達していない安定成層条件下で式 (4) のⅠ項が小さくなることで起こる。夜間 NEE の過小評価はとくに年積算の RE, GPP, NEP を推定する際に誤差を生む。年積算 RE, GPP, NEP を推定するためには、計測トラブルや品質管理によって欠損となったデータを補完する必要がある。この補完方法には、(1)NEE と環境要因 (例えば、光合成有効放射量、気温、地温、土壤水分量) の関係から非線形回帰曲線を用いてデータギャップを埋める手法、(2)計測データから各期間毎 (例えば、数日、10 日程度、一か月) の平均日変化パターン of データセットを用意しデータギャップを埋める手法、(3)環境要因をある一定の幅で階級分けし、その階級ごとに NEE の平均値を算出した表を作成し、欠測日時の環境要因が当てはまる

²⁹⁾ Ecological Applications の 18 巻 6 号が「Eddy Flux Measurements in Difficult Conditions」の特集号となっており、理想的ではない観測条件におけるフラックス計測について詳細に記述されている。

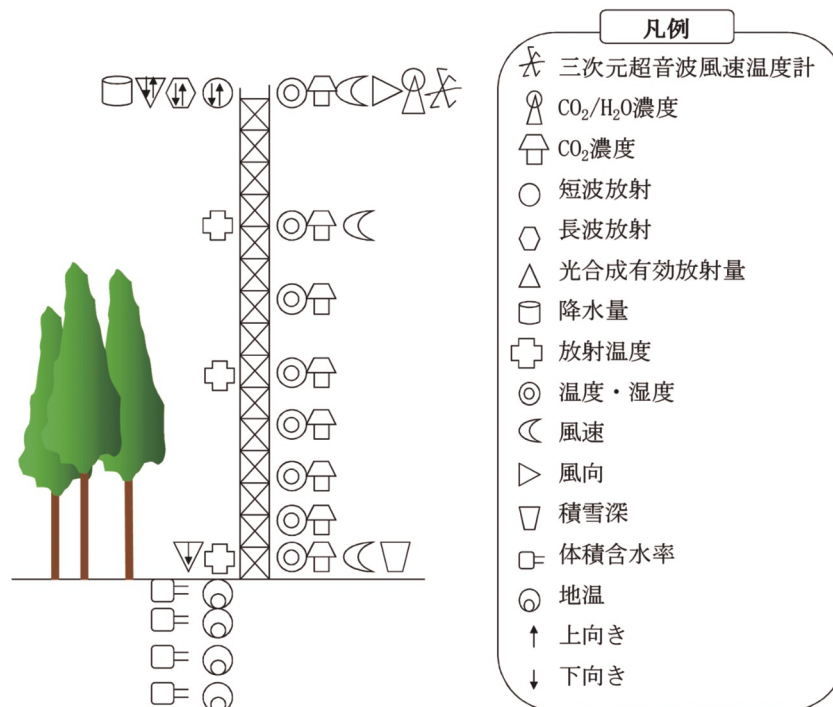


図4：フラックス観測タワーにおける計測例。

階級の NEE 値によってデータギャップを埋める手法、などがある²⁵⁾。何れの方法でも、過小評価された夜間 NEE を含むデータセットを用いて年積算 NEP を推定した場合、年積算 RE が過小評価され、年積算 NEP は過大評価される結果となる。

この過小評価を回避するために摩擦速度 (u^*) が小さい (乱流の発達が十分ではない) ときの夜間 NEE データを除去する方法を用いることが一般的である^{7,8)}。 u^* の閾値を増加させると夜間 NEE の値も増加するが、この夜間 NEE の増加が飽和したと判断される値を u^* の閾値とする。 u^* の閾値は観測サイト毎に異なるが、多くのサイトでは 0.5 m s^{-1} 以下の値となる^{25,48)}。最近では、 u^* の閾値を用いた手法の他に、夜間 NEE の各日の最大値のみを用いて温度-夜間 NEE 曲線を作成し RE を推定する手法²⁸⁾ や、チャンバー法によって計測された土壌呼吸量の値を基準として RE を推定する手法²⁷⁾ などが提案されている。

2.b-4.6 おわりに

微気象学的手法は、短い時間分解能で連続的に物質の交換量を把握できる利点がある一方、その計測や得られたフラックス値の計算手法、データの補完方法に様々な問題を持っており発展途上の手法であるといえる。このため、微気象学的手法によって得られた NEP, GPP,

RE の年積算値など定量値を議論する際には、積み上げ法による推定値やチャンバー法によって計測された R_{soil} とクロスチェックすることが重要となる。一方で、微気象学的手法は、相対値の議論に十分な観測精度を持っており、日変化や季節変化レベルの生態系の環境応答に関する研究に大いに活用されるべきである。ただし、本稿で示した計測手法、補正方法、データの補完方法については、推奨される手法が更新されることもあるので、最新の論文で確認することが望ましい。

参考文献

- 1) 塚本修, 文字信貴編, 「気象研究ノート 第199号 地表面フラックス測定法」, 日本気象学会, 2001, p.242.
- 2) P. H. Schuepp, M. Y. Leclerc, J. I. MacPherson, & R. L. Desjardins, *Boundary-Layer Meteorol.* **50** (1990) p.355.
- 3) X. Lee, W. Massman, & B. Law, *Handbook of Micrometeorology: A guide for surface Flux Measurement and Analysis*, Kluwer Academic Pub, 2004, p.250.
- 4) J. C. Kaimal, & J. E. Gaynor, *Boundary-Layer Meteorol.* **56** (1991) p.401.
- 5) P. Schotanus, F. T. M. Nieuwstadt, & H. A. R. de Bruin, *Boundary-Layer Meteorol.*, **26** (1983) p.81.
- 6) T. Hanafusa, T. Fujitani, Y. Kobori, & Y. Mitsuta, *Papers Meteor. Geophys.* **33** (1982) p.1.
- 7) T. Shimizu, M. Suzuki, & A. Shimizu, *Boundary-Layer Meteorol.* **93** (1999) p.227.

- 8) J. C. Kaimal, J. E. Gaynor, H. A. Zimmerman, & G. A. Zimmerman, *Boundary-Layer Meteorol.* **53** (1990) p.103.
- 9) J. H. C. Gash, & A. J. Dolman, *Agric. For. Meteorol.* **119** (2003) p.195.
- 10) T. Nakai, M. K. van der Moren, J. H. C. Gash, & Y. Kodama, *Agric. For. Meteorol.* **136** (2006) p.19.
- 11) M. K. van der Moren, J. H. C. Gash, & J. A. Elbers, *Agric. For. Meteorol.* **122** (2004) p.95.
- 12) E. K. Webb, G. I. Pearman, R. Leuning, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **106** (1980) p.85.
- 13) G. G. Burba, D. J. Anderson, L. Xu, & D. K. McDermitt, *27th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, (2006) p.4.4.
- 14) J. C. Kaimal, & J. J. Finnigan, *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, 1994, p.289.
- 15) D. Vickers, & L. Mahrt, *J. Atmos. Oceanic Technol.* **14** (1997) p.512.
- 16) T. Foken, & B. Wichura, *Agric. For. Meteorol.* **78** (1997), p.83.
- 17) L. Mahrt, *J. Atmos. Oceanic Technol.* **15** (1998) 416.
- 18) 間野正美, 宮田明, 安田幸生, 永井秀幸, 山田智康, 小野圭介, 齊藤誠, 小林義和, 農業気象 **63** (2007) p.125.
- 19) AsiaFlux 運営委員会編, 「陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実際」, 独立行政法人国立環境研究所地球研究センター, 2003, p.116.
- 20) T. Kato, Y. Tang, S. Gu, X. Cui, M. Hirota, M. Du, Y. Li, X. Zhao, T. Oikawa, *Agric. For. Meteorol.* **124** (2004) p.121.
- 21) L. Xu, & D. D. Baldocchi, *Agric. For. Meteorol.* **122** (2004) p.79.
- 22) R. Hirata, T. Hiratno, N. Saigusa, Y. Fujinuma, K. Inukai, Y. Kitamori, Y. Takahashi, S. Yamamoto, *Agric. For. Meteorol.* **147** (2007) p.110.
- 23) Y. Malhi, A. D. Nobre, J. Grace, & B. Kruijt, *J. Geophys. Res.* **D24** (1998) p.31593.
- 24) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo, & N. Nishimura, *Agric. For. Meteorol.* **112** (2002) p.203.
- 25) E. Falge, D. Baldocchi, R. Olson, P. Anthoni, M. Aubinet, C. Bernhofer, G. Burba, R. Ceulemans, R. Clement, H. Dolman, A. Granier, P. Gross, T. Grünwald, D. Hollinger, N.-O. Jensen, G. Katul, P. Keronen, A. Kowalski, C. T. Lai, B. E. Law, T. Meyers, J. Moncrieff, E. Moors, J. W. Munger, K. Pilegaard, Ü. Rannik, C. Rebmann, A. Suyker, J. Tenhunen, K. Tu, S. Verma, T. Vesala, Wilson, & S. Wofsy, *Agric. For. Meteorol.* **107** (2001) p.43.
- 26) R. Hirata, N. Saigusa, S. Yamamoto, Y. Ohtani, R. Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, Y. Kosugi, S. -G. Li, T. Nakai, K. Takagi, M. Tani, & H. Wang, *Agric. For. Meteorol.* **148** (2008) p.761.
- 27) Y. Kosugi, S. Takanashi, S. Ohkubo, N. Matsuo, M. Tani, T. Mitani, D. Tsutsumi, & A. R. Nik, *Agric. For. Meteorol.* **148** (2008) p.439.
- 28) E. van Gorsel, R. Leuning, H. A. Cleugh, H. Keith, & T. Suni, *Tellus* **59B** (2007) **59B**, p.397.
- 29) M. Aubinet, P. Berbigier, C. H. Bernhofer, A. Cescatti, C. Feigenwinter, A. Granier, T. H. Rrünwald, K. Havrankova, B. Heinesch, B. Longdoz, B. Marcolla, L. Montagnani, & P. Sedlak, *Boundary-Layer Meteorol.* **116** (2005) p.63.
- 30) C. Feigenwinter, C. Bernhofer, & R. Vogt, *Boundary-Layer Meteorol.* **113** (2004) p.201.
- 31) C. Feigenwinter, C. Bernhofer, U. Eichelmann, B. Heinesch, M. Hertel, D. Janous, O. Kolle, F. Lagergren, A. Lindroth, S. Minerbi, U. Moderow, M. Mölder, L. Montagnani, R. Queck, C. Rebmann, P. Vestin, M. Yernaux, M. Zeri, W. Ziegler, & M. Aubinet, *Agric. For. Meteorol.* **148** (2008) p.12.
- 32) B. Marcolla, A. Cescatti, L. Montagnani, G. Manca, G. Kerschbaumer, & S. Minerbi, *Agric. For. Meteorol.* **130** (2005) p.193.
- 33) K. T. Paw U, M. Falk, T. H. Suchanek, S. L. Ustin, J. Chen, Y.-S. Park, W. E. Winner, S. C. Thomas, T. C. Hsiao, R. H. Shaw, T. S. King, R. D. Pyles, M. Schroeder, A. A. Matista, *Ecosystems* **7** (2004) p.513.
- 34) X. Lee, *Agric. For. Meteorol.* **91** (1998) p.39.
- 35) D. D. Baldocchi, J. Finnigan, K. Wilson, K. T. Paw U, & E. Falge, *Boundary-Layer Meteorol.* **96** (2000) p.257.
- 36) 斎藤琢, 熊谷朝臣, 佐藤嘉展, 鈴木雅一, 水文・水資源学会誌 **17** (2004) p.648.
- 37) B. Saugier, & E. A. Ripley, *J. Appl. Ecol.* **11** (1974) p.103.
- 38) P. V. Biscoe, J. A. Clark, K. Gregson, M. McGowan, J. L. Monteith, & R. K. Scott, *J. Appl. Ecol.* **12** (1975) p.227.
- 39) J. M. Skell, T. S. Fredericksen, J. E. Savage, & K. R. Snyder, *Environ. Pollut.* **94** (1996) p.235.
- 40) F. A. Bazzaz, & W. E. Williams, *Ecology* **72** (1991) p.12.
- 41) J. R. Brooks, L. B. Flanagan, G. T. Varney & J. R. Ehleringer, *Tree Physiol.*, **17** (1997) p.1.
- 42) N. Buchmann, & J. R. Ehleringer, *Agric. For. Meteorol.* **89** (1998) p.45.
- 43) L.-K. Xu, A. A. Matista, & T. C. Hsiao, *Agric. For. Meteorol.* **94** (1999), p.1.
- 44) 森林立地調査法編集委員会編, 「森林立地調査法 森の環境を測る」, 博友社, 2002, p.284.
- 45) 日本農業気象学編, 「新訂 農業気象の測器と測定法」, 農業技術協会, 1997, p.345.
- 46) 牛島素行編, 「身近な気象・気候調査の基礎」, 古今書院, 2000, p.195.
- 47) K. Wilson, A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom, B. E. Law, Andy Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oe-

chel, J. Tenhunen, R. Valentini, & S. Verma, *Agric. For. Meteorol.* **113** (2002) p.223.
48) N. Saigusa, S. Yamamoto, R. Hirata, Y. Ohtani, R.

Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, Y. Kosugi, S.-G. Lie, Y. Nakai, K. Takagi, M. Tani & H. Wang, *Agric. For. Meteorol.* **148** (2008) p.700.