

森林における 温室効果ガスフラックス観測手法に関する提言

大阪府立大学 文字 信貴 著

2000年7月

地球環境研究センター

Center for Global Environmental Research



環境庁 国立環境研究所

National Institute for Environmental Studies
Environment Agency of Japan



表紙（表）：地球環境研究センターフラックスモニタリング観測地
（北海道苫小牧市）
写真左　：上空からの観測サイト
写真中央・右：観測塔(41m高)

表紙（裏）：イラスト「地球環境問題のパズルを解く」

報告書の出版にあたって

温室効果ガス，とりわけ二酸化炭素の収支について，人為発生量から大気蓄積と海洋吸収を引いた残分が行方不明という意味で，"ミッシングシンク"と呼ばれていたのは，つい最近のことである。今では，これが様々な観測研究の成果から，陸域生態系による吸収によるものであり，森林の二酸化炭素吸収が温室効果を緩和する大きな役割を果たしていることが認知されつつある。しかし，その機能が将来とも続くかどうかは，気候変動の将来を予測する上で重要な問題点であるが，陸域生態系全体の炭素収支は容易に評価できるものではない。

この問題に明瞭，かつ直接的な回答を与えてくれる観測手法の一つが，「森林直上における二酸化炭素フラックスの測定」であり，温室効果ガス排出削減を決めた京都会議の取り決めの実施にあたっても，大きな役割を演じることが期待されている。しかしながら，森林生態系の炭素収支のわずかな変動差を，長期間連続して測定することは，技術的に極めて困難なものであり，現在，世界中で多くの研究者が森林における二酸化炭素フラックスの観測研究にチャレンジしている。

わが地球環境研究センターでは，この森林生態系の二酸化炭素フラックスを北海道苫小牧地方のカラマツ林において長期にわたり観測することを決意し，さらに，フラックス観測方法，データの処理，他の観測結果との相関などの研究の場としてもこれを提供することとした。その一環として，観測実務について概説することを企画した。

言うまでもなく，研究の推進に最も重要なのは人であり，その道に心血を注いできた研究者の経験を十分に継承することが必要である。同時に，その経験を多くの人のものとすることも研究全体の発展にとって重要なことである。フラックス観測の分野で先駆的な研究をなされている大阪府立大学農学部文字信貴先生に，観測の原理から実際の観測，その問題点など，多岐にわたって，詳細な解説をお願いし，取りまとめていただいた。今般，ここに出版するに至ったことは，大変喜ばしいことである。末筆ながら先生のご努力に改めて謝意を表したい。

平成12年2月

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究センター

総括研究管理官 井上 元

目 次

はじめに.....	1
第 1 章 温室効果ガスフラックス観測手法.....	3
1.1 渦相関法.....	5
1.2 R E A（簡易渦集積）法.....	23
1.3 傾度法.....	27
1.4 その他の方法.....	39
1.5 非一様地域での評価.....	40
1.6 スケールアップについて.....	41
第 2 章 実際の観測に基づいたフラックス観測手法の評価.....	47
2.1 針葉樹林でのオープンパス法とクローズドパス法の比較.....	49
2.2 針葉樹林での R E A 法を用いた長期観測.....	57
2.3 マングローブ林における改良傾度法観測.....	60
2.4 単純でない地形上の観測.....	66
第 3 章 わが国の森林のフラックス観測への提言.....	73
3.1 フラックス観測への提言の概要.....	75
3.2 望ましいフラックス観測の実際.....	75
関連文献リスト.....	81

はじめに

地球温暖化の主因となる温室効果ガス，特に二酸化炭素の吸収源として森林の機能を評価することが，国際的にも急務となっていることは，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)においても議論されたとおりである。その一助として，二酸化炭素の吸収源としての森林の機能を評価するために，現在，様々な国の森林で温室効果ガスフラックスに関する観測研究が推進されつつある。この報告では，森林などの植生の温室効果ガス収支の観測手法として有力な手法である微気象学的な手法を用いた森林と大気間の二酸化炭素のフラックス観測研究について，既存の文献資料や著者の実績に基づく知見・研究成果を取りまとめるとともに，今後のフラックス観測研究・モニタリングの展開指針を提言した。

第1章

温室効果ガスフラックス観測手法



植物と大気間のガス交換に係わる観測研究は、大気乱流研究分野における乱流相似則理論の確立と超音波風速計の発明によって画期的に進歩し、地表と大気間の熱や物質フラックスの評価が可能となった。この約30年間には米国、旧ソ連、ヨーロッパ、オーストラリア、日本を中心に急速に研究が進展し、データと論文等による成果が蓄積されている。それらの成果の中で、特に森林の温室効果ガスフラックス観測手法に関する文献を調査し、それぞれの手法についての概要・特徴等を取りまとめた。

1.1 渦相関法

1.1.1 原理

地表面や植物群落のすぐ上の気層では気流は大きく乱れており、その混合によって微量気体は上下に輸送される。渦相関 (eddy correlation) 法、あるいは乱流変動法は、乱流フラックスを求める方法として、用いる仮定が少なく、最も直接的な方法であると考えられている。温室効果ガス微量気体の鉛直フラックス(F_s)は次のように示される。

$$F_s = \overline{ws} = \overline{w's'} + \overline{ws} \quad (1.1)$$

ここに s は対象とする気体の空気中での密度、 w は風速の鉛直成分である。バー ($\overline{\quad}$) は時間平均を、プライム ($'$) は平均からの偏差を示す。平坦で一様な地表上では、 $\overline{w} = 0$ であると仮定できる場合には右辺の第2項は無視できるのでフラックスは w と s の共分散で表される。

この方法を微量気体のフラックスの評価に用いる場合、問題点はフラックスに寄与する全ての周期の変動をとらえることが必要なことである。センサーには10Hzほどの変動をとらえる応答と0.001Hz程度の変動を測定できる安定性がともに必要である。風速の鉛直成分(w)については、この条件を満たす超音波風速計が一般に使われる。しかし、このような性能を持つ微量気体の濃度センサーは少ない。これらの測器は非常に高価であったり、使用に当たって高い技術を必要とする。

渦相関法の測定に際してはさまざまな問題が生じる。植物群落の上からどの程度の高さにセンサーを設置すべきなのか、地形が傾斜しているとき測器の設置は鉛直でよいのか、雨が降ったらどうするか、風速鉛直成分の測器と濃度測定測器はどの程度離してもよいのか、ポールや塔からはどの程度離さねばならないか、などを解決しなければならない。次に、データ収録や解析に際しても、どの程度の長さを1 runと

するか、トレンドや長周期成分をどの程度の周期まで乱流成分とみなすか、ノイズはどう処理するか、応答の補正は必要か、などなど、直接法であるといってもこれらの扱いによってはフラックスの大きさはかなり変わりかねない。

微量気体のフラックスを測定するときは、さらに困難がともなう。それは、密度変動に伴って生じる平均質量輸送、すなわち w にともなう輸送が無視できなくなることがあるからである(Webb et al., 1980)。この影響は顕熱の輸送の測定などには無視してもよいが、 CO_2 などの微量気体のフラックスを求めるときは誤差が生じることが多くある。場合によってはフラックスの符号さえ変わることがある(Leuning et al., 1982)。フラックス観測において密度変動補正を行うには、顕熱フラックスや潜熱フラックスの測定を並行して実施しなくてはならず、計測システムが複雑になる。この補正には顕熱フラックスの項が特に重要であるので、乾燥している場所では補正は不可欠であるといえる。クローズドパスタイプの分析計では流入空気の温度を一定とする工夫もなされている。

渦相関法にはオープンパスの測器を用いることが基本である。しかし、これまで赤外線の吸収を利用したオープンパス濃度計は天候にかかわらず安定して長期間稼動する保証がなかった。最近は技術的に多くの改良がなされたが、まだメンテナンスフリーで長期間自動観測を行うという実績が少ない。また、温度変動についても細線温度センサーを用いる場合は腐食が進んだり物が当たって切れたりする。渦相関法には常時きめ細かい配慮が必要である。

複雑な渦相関法ではあるが、それ以外の間接的な手法は全て何らかの大きな仮定を用いる必要があり、特に植物群落に対してはその仮定も曖昧なことが多いので、最後には渦相関法に頼らざるを得ない。全要素の渦相関測定が困難な場合には比較的測定が容易な顕熱フラックスだけでも渦相関法で測っておくと全体の精度向上に役立つ。

1.1.2 渦相関法のセンサー

a) 風速変動

渦相関法の適用のためには、風速の鉛直成分の変動を切り離して測定する必要がある。この目的のために、以前は熱線風速計をX字に組合わせたり(Evapotron : Dyer and Maher, 1965)、発泡スチロールのプロペラ型風速計の軸を鉛直にして用いたり(Fluxatron : Dyer et al., 1967)して工夫がなされてきた。現在では w 成分の測定に最も信頼できる測器として超音波風速計が一般的である。超音波風速計は1960年代にMitsuta(1966)やKaimal and Businger(1963)によって発明され、その後改良を重ねてさまざまなタイプのものが実用化されている(Hanafusa et al., 1982, Kaimal et al., 1990)。

超音波風速計の原理は、図1.1に示すように、固定されたパスに沿って伝播する音の到達時間が風速によって変化することを利用するものである。図に示すように音は両側の音響素子から交互に短時間に伝播方向が切り替わる。素子2から素子1へ音が伝わる時間を t_1 、その逆方向に伝わる時間を t_2 とすれば、

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{d}{(c \cos \theta - V_d)} \\ t_2 &= \frac{d}{(c \cos \theta + V_d)} \end{aligned} \quad (1.2)$$

と書ける。ここに、 d はスパン長、 V_d はパスに沿った風速成分、 $\theta = \sin^{-1}(V_n/c)$ 、 V_n はパスに垂直な風速成分、 c は音速である。ここから、 V_d を求める方法の一つは、

$$t_2 - t_1 = \frac{2d}{c^2} V_d \approx \frac{2d}{403T(1 + 0.32e/p)} V_d \approx \frac{d}{201.5 T_V} V_d \quad (1.3)$$

のように t_1 と t_2 との差を求めることである。ここで、 $V_n^2 \ll c^2$ と仮定している。また、 T_V は音仮温度と呼ばれ、

$$T_V = T (1 + 0.32e/p) \quad (1.4)$$

と表わされる。ここに e は大気水蒸気圧、 p は大気圧である。したがって、温度が変われば検定値が変わることになる。横風や、音速の影響を取り除くには、 t_1 、 t_2 の逆数をとって、

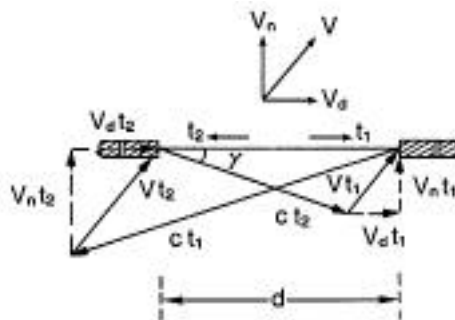


図1.1 超音波風速計の原理(Kaimal and Finnigan, 1994)

$$\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} = \frac{2}{d} V_d \quad (1.5)$$

としてやればよい。最近の超音波風速計では回路でこの演算を行っている。

超音波風速計は特定の風向成分を取り出せるので渦相関法にとって大きな利点を持ち、しかも精度や応答の面でも優れた特性をもっている。ただ、音響素子は有限の大きさをもつため流れの妨げとなる。いかなる風向にも対応できるように素子を配置することは不可能であるが、できるだけ影響を少なくするため、さまざまな工夫がなされている。図1.2の上段左に示すプローブは、120度を開いた方向から風を受けるように設計されているので、風向の変化を監視してたえず風を中央から受けるようにできる観測、あるいは同じ測器3セットを120度ずつ取り付ける場合には適したものといえる。図の上段右は、風向方向に常時向けている必要はないが、プローブが流れを妨げる向きが存在する。図の上段中央は、水平方向には流れを乱すものはない。ただ、渦相関法にとって重要な鉛直成分を直接には計らず、3つの成分から座標変換で求めるので厳密な調整が必要となる。図の下段は、水平成分を上下に分けることで影響を小さくすることを試みたものであるが、地表面近くの測定などあまり小さなスケールには不向きである。

b) 温度変動

顕熱フラックス測定用の気温変動の測定には、細線の白金線、熱電対、サーミスター、超音波温度計などが用いられる。前の3つは応答性を良くし、日射の影響を小にするため非常に細いものが用いられる。白金抵抗線では直径12.5 μm、熱電対では25～50 μmのものが使われるが、大気にさらされるので劣化しやすく、強風や雨、雪などに当たると切れることがある。

これらに対し、超音波風速計のヘッドを利用する超音波温度計も温度の測定に用いられる。式(1.4)から、

$$\frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_1} = \frac{2}{d} (c^2 - V_n^2)^{1/2} \quad (1.6)$$

が導かれる。音速(c)は $c^2 = 403T(1 + 0.32e/p)$ で表わされるので

$$T(1 + 0.32e/p) = \frac{d^2}{1612} \left(\frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_1} \right)^2 + \frac{1}{403} (V_x^2 + V_y^2) \quad (1.7)$$

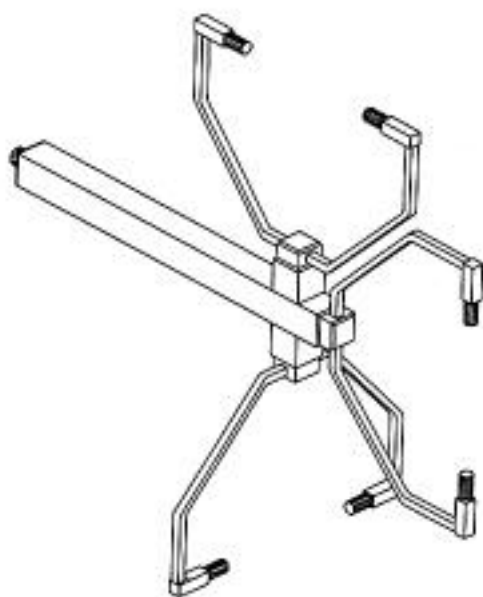
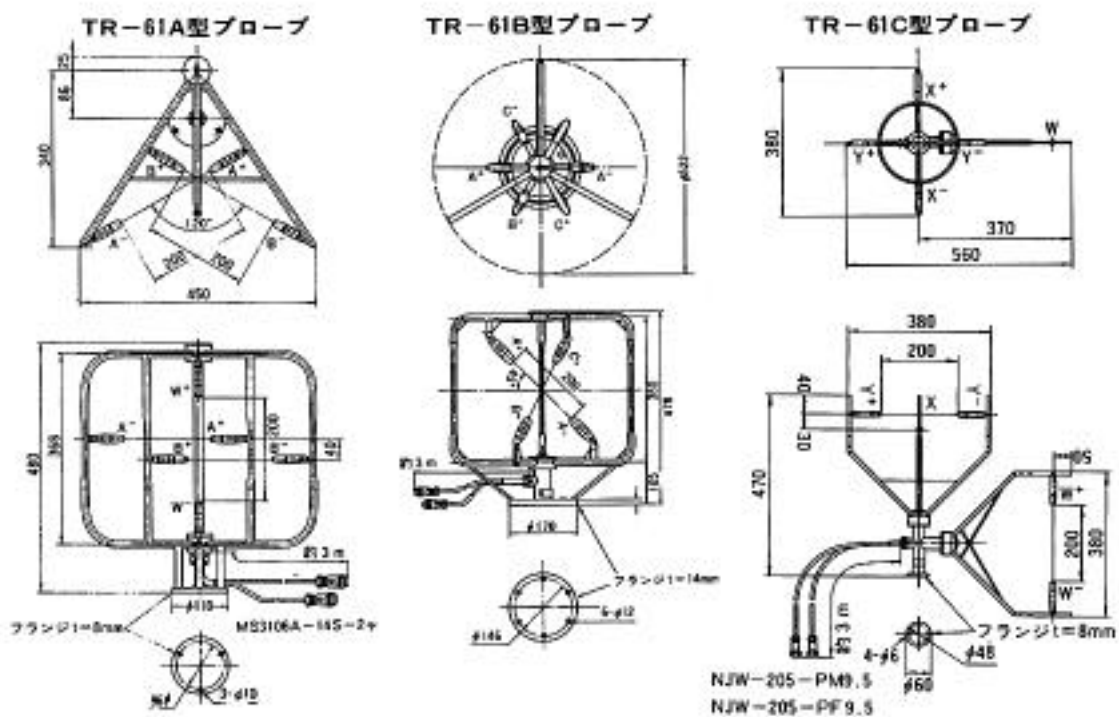


図1.2 さまざまな3次元超音波風速計

上段の3種はKaijoのカタログより, 下段はKaimal et al., 1990.

となる。(1.7)式の湿度を含む部分は(1.4)式と同じ音仮温度 $T_v = T(1 + 0.32 \, d \, p)$ である。したがって、超音波温度計は、横風の影響(たとえば Hignett, 1992)と、湿度の影響(たとえば Kaimal and Gaymor, 1991)を受けることになり、それらを見積もっておく必要がある。

c) 湿度変動

湿度の乱流変動の測定については、空気に直接触れて測定するタイプ(乾湿球温度計、容量型湿度計など)と赤外線や紫外線の吸収を利用するタイプとに分けられる。前者は一般に応答特性が優れないので、高周波成分の補正が必要である場合が多い。例えば、細線熱電対を利用した乾湿計では、湿球の応答特性が悪くなるので、感部の熱交換の関係から、信号を微分することによって応答を改善させる方法などが用いられる。しかし、高周波側にノイズなどが入っていると過剰に修正されるので注意が必要である。また、乾球と湿球の応答に差があるので前処理の段階で合わせる作業が必要である。容量型湿度計(ヴァイサラ型)は相対湿度を測定するセンサーであるが応答については問題がある。また、ごみや浮遊粒子などが付くと正しい値を示さなくなるので、平均値を測定するときは防護幕の中に入れて用いるのが普通であるが、乱流測定時にはこれは用いられないので頻繁な保守作業が重要となる。いずれにしても、応答の悪いセンサーを用いざるを得ないときでも、バンドパスコバリアンス法(1.1.4節参照)などによるフラックス補正も可能である。オープンパスの変動計は絶対値の検定や、一定値(直流値)の検定が困難なことが多いので、細線の乾湿計や容量型の湿度計を併設して100～10秒程度の周期の変動を利用して動的な検定を行う必要がある。

赤外線の吸収を利用するものには、オープンパスのものとクローズドパスのものとが利用される。オープンパスの分析計としては、Ohtaki and Matsui (1982) の開発した炭酸ガス水蒸気変動計(Advanet製)、伊藤・小沢(1998)の開発したもの(Kaijo製)、CSIROのHyson and Hicks(1975)が開発したものなどいくつかが実用化されている。オープンパスのセンサーは長周期側の安定性に問題があるが、CSIROの赤外線湿度計は長周期をあきらめて、透過光の瞬間値と平均値の比が比湿の変動に比例するという回路のアイデアを取り入れ、しかも普通の豆電球を光源に用いた単純な装置であった。

赤外線水蒸気分析計のクローズドパスタイプのもの(例えば、LI-COR ; LI-6262)は優れた安定性を有する測器であるが、チューブで空気を引く際に途中で凝結が起らないよう細心の注意が必要となる。

紫外線(Ly- 線)の水蒸気による吸収を利用する測器も開発されている(藤谷, 1980)。

吸収率が大変大きいので測定部を小さく作ることができる。そのため地面近くなど高い周波数まで必要な場所での湿度変動測定には好都合である。しかし、紫外線の発生に用いる放電管の寿命が短く、検定値の経時変化も大きいと長期測定には適していない。

d) CO₂変動

CO₂の乱流変動を測定するには、オープンパスあるいはクローズドパスの赤外線分析計が使用される。乱流変動を直接とらえるにはオープンパス変動計を使用することが基本的な考え方であり、Ohtaki and Matsui (1982) はこのため変動計を開発した。彼等の試作したものは、光源にセラミックヒーターを使用し、フッ化カルシウムレンズを通して測定光路へ放射され、もう一方のレンズで赤外線検出器に集光される方式である。検出器の全面にはCO₂と水蒸気の吸収帯の波長(それぞれ、4.3 μmと2.6 μm)を分光透過する回転する干渉フィルターを用い、CO₂と水蒸気の両方の変動が測定できるようにしたものである(図1.3)。このオープンパス分析計は耐候性や水蒸気とCO₂バンドの相互影響など問題を抱えていたが、最近はドリフトと防水性は改良されつつある(松井・大滝, 1998)。

オープンパス分析計を使用したフラックス測定は、メンテナンスなしでは長期間放置するには不安が残るので、これに変わってクローズドパス分析計が渦相関法に用いられることが多い(1.1.5節参照)。最近多く用いられているものにLI-COR社のLI-6262という分析計がある。図1.4に構造の概略図を示す。これは非分散型赤外線分析計(NDIR)で、CO₂と水蒸気が同時に測定可能である。2つのセルがあり、その内の一つ(reference cell)は既知の濃度のガスが流れるようにし、もう一つのセル(sample cell)に測定用の空気を導く。用いているフィルターはCO₂は4.26 μm、水蒸気は2.59 μmである。両者の相互干渉はほとんど無視できることが確かめられている。

1.1.3 渦相関法のデータ収録と解析

乱流信号を時系列データとしてデジタル収録したり、またその解析を行う場合いくつかの点に注意する必要がある。これらを正しく扱わないと解析結果に重大な誤差が生じる可能性がある。以下にKaimal and Finnigan (1994) をもとに、サンプリング周波数、エイリアシングとフィルター、平均化時間、トレンドの除去について述べる。

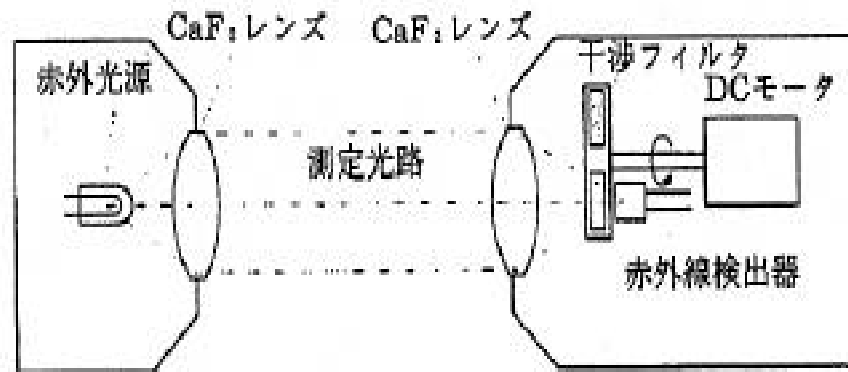


図1.3 オープンパスCO₂・H₂O分析計(松井・大滝, 1998)

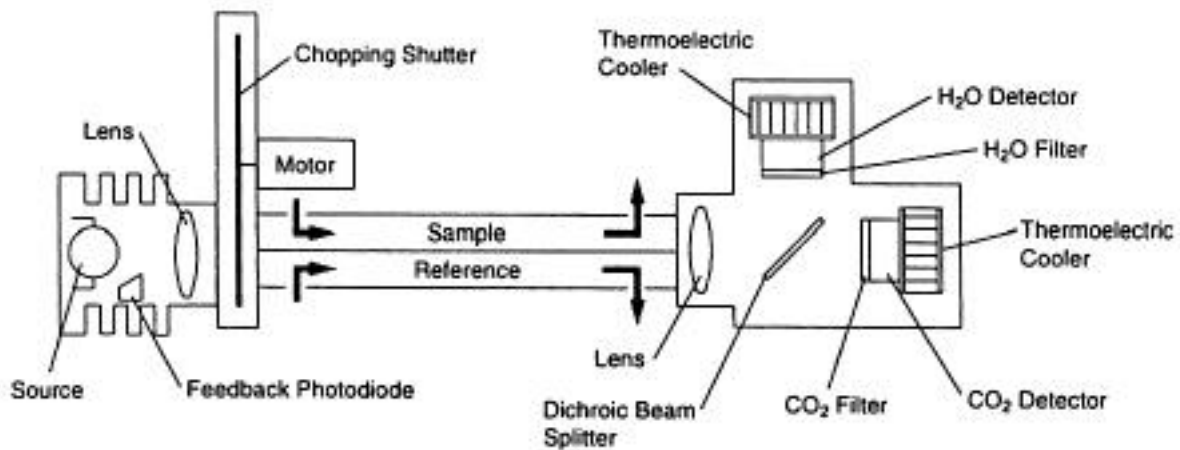


図1.4 クローズドパスCO₂・H₂O分析計(LI-COR取扱説明書より)

a) サンプリング周波数

ある周波数 f_c までの情報を得たいときはサンプリング間隔 t は

$$t = 1/(2 f_c) \quad (1.8)$$

とすればよい。ただし、この信号にそれ以上の高い周波数の不必要なノイズなどが含まれている場合は、それらは f_c のところで折り返して低周波側に現われてしまうという性質を持っている。これはエイリアシングと呼ばれる現象で、その現象をわかりやすく示したのが図1.5である。これを無くするためには f_c よりも高い周波数が現われないようにデジタル化する前段でフィルターをかけるか、または適当な周波

数まで細かくサンプリングを行う必要が生じる。ノイズの周波数がわかっている場合，その周波数が直流($f=0$)に折り返すように f_c を決めたほうがよい。電源のノイズであれば，このエイリアシングの影響を少なくするには60Hzの場合にはサンプリング周波数は10Hzでも20Hzでもよいが，50Hzの地域では10Hzは良くて20Hzのかわりに25Hzを用いたほうがよい。フラックスに寄与する周波数は高周波側は慣性小領域までであるので，フラックスの測定には慣性小領域のなかの周波数，たとえば森林であれば10Hzなどをサンプリング周波数として選べば問題が少ないと考えられる。

b) データの長さ

サンプリング時間，あるいは平均化時間は，十分な長さを持ち，フラックスに寄与するすべてのスケールを含まなければならない。すなわち，定常性が保証される長さが必要である。（ t ）という時系列が定常な場合には平均時間（ T ）が大きくなると，分散や共分散が一定の値に近づいていく。ある積分スケール が存在して， T が満足されるのは， の平均値を とするとき，

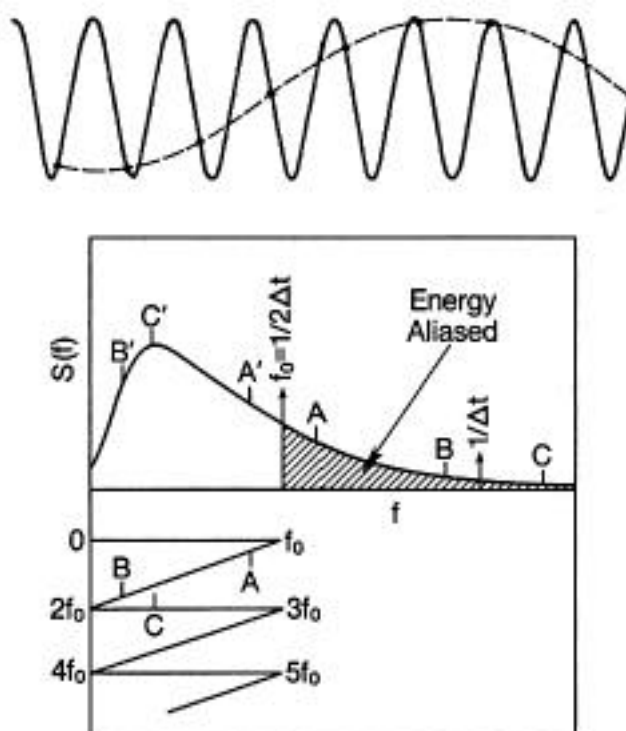


図1.5 エイリアシングの原理

上図：サンプリングの仕方破線のような見かけの波が発生する様子を示す。

下図：周波数A, B, Cの折り返す位置を示す(Kaimal and Finnigan, 1994).

$$\frac{1}{2} \sim 2 \quad \frac{1}{2} \quad / T \quad (1.9)$$

が無視できる程度に小さい時である(Lumley and Panofsky,1964)。いま，水平風速を例にとって考えると，たとえば $u=1 \text{ m s}^{-1}$ ， $u=10 \text{ s}$ ， $=5 \text{ m s}^{-1}$ とし $=0.1 \text{ m s}^{-1}$ を満たすことを条件とすれば， $T=2000 \text{ sec}(\sim 30 \text{ min})$ ということになる。 $/$ を小さくしようとすれば T を大きくすればよい。しかし，1時間程度が T の限界である。それ以上になると，日変化にともなう非定常性が入ってきて精度がかえって悪くなる。

c) トレンドの除去

時系列データに含まれるトレンドが大きいと低周波数側が増大するという好ましくない影響がでる。もし，直線的に増加する(または減少する)トレンドが含まれているとパワースペクトルには f^{-2} に比例する成分が加わることになる(図1.6参照)。これはフーリエ変換が有限の長さのデータを繰り返して処理するためにトレンドも繰り返し現われ，鋸刃の解析を行うような結果が生じるためである。これを防ぐためには，ハイパスフィルターを用いたり，移動平均を計算して原時系列から差し引くなどの処置が必要である。トレンドが直線など単純な形であれば最小自乗法などを用いて除去してもよい。

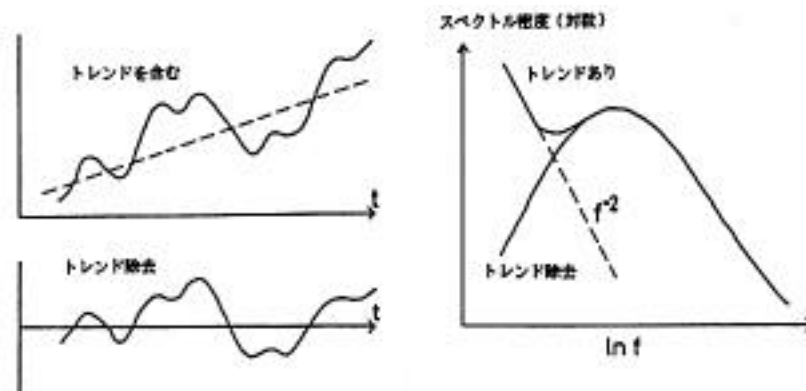


図1.6 トレンドがスペクトルに与える影響

d) コスペクトル解析の必要性

フラックスが正しく評価されているかどうかを確認するためには，各乱流信号のパワースペクトルやフラックスのコスペクトルを計算してチェックする必要がある。観測期間が長期にわたる場合はすべてのデータのスペクトル解析は困難であるので，

最初に数日間のデータを用いて、各渦相関センサーの応答性やノイズ、フラックスの対象になる周波数帯のコスペクトル形の妥当性などを確認することは不可欠である。可能な範囲で原データを保存し、不合理と思われる結果についてはもとに戻って原信号を調べる必要がある。

1.1.4 補正について

a) 密度変動補正

(1.1)式において、第1項に対して第2項が無視できるときは、単に $\overline{w's'}$ の計算を行うだけでフラックスは得られるが、微量気体のフラックスについては第2項が無視できないことがある。Webb et al.(1980) は次の様な補正が必要であるとした。まず質量保存の原理から、乾燥空気の鉛直フラックスはゼロ、すなわち、

$$\overline{w_a} = \overline{w_a} + \overline{w'_a} = 0 \quad (1.10)$$

ここで、 ρ_a は乾燥空気の密度である。これより、平均鉛直風速は

$$\overline{w} = - \frac{\overline{w'_a}}{\rho_a} \quad (1.11)$$

と表わせる。また、状態方程式を用いると、

$$\overline{w} = \frac{\mu}{\rho_a} \overline{w'_v} + (1 + \mu) \frac{\overline{w''T''}}{T} \quad (1.12)$$

が成り立つ。ここに、 T は気温、 $\mu = m_a/m_v$ 、 ρ_v/ρ_a であり、また m_a 、 m_v はそれぞれ乾燥空気、水蒸気の分子量、 ρ_a 、 ρ_v はそれぞれ乾燥空気、水蒸気の密度である。(1.1)式から、

$$F_c = \overline{w'c'} + \mu \frac{\overline{c}}{\rho_a} \overline{w'_v} + (1 + \mu) \frac{\overline{c}}{T} \overline{w'T'} \quad (1.13)$$

と書ける。この式の右辺第1項は測定されたCO₂フラックス、第2項は水蒸気フラックスの寄与、第3項は顕熱フラックスからの寄与を表わす。これは著者の頭文字を

としてWPL補正とも呼ばれる。同様にして、水蒸気フラックスは

$$E = (1 + \mu_v) \left(\overline{w'v'} + \frac{\overline{v}}{\overline{T}} \overline{w'T'} \right) \quad (1.14)$$

と書ける。この補正がどの程度の大きさとなるのかということと、森林でどの程度の補正值がでるかという1つの例を図1.7に示す。

密度変動以外にも水平流の収束発散などによって誘起される平均的なwによってフラックスが生じることが指摘されている(Lee, 1998)。これはフラックスの絶対値が小さい夜間などに問題が大きくなるが、実際に測って評価するには困難がともなうと考えられる。

b) 相互感度の補正

赤外線分析計でCO₂濃度を測定する場合、水蒸気とCO₂の吸収波長帯が重なることによる誤差が生じる。干渉フィルターなどの技術でほとんど無視できるものもあるが、分析計によっては補正が必要なものもある。これを考慮するとCO₂濃度の変動は

$$c' = \frac{V'}{a} - \frac{v'}{v} \quad (1.15)$$

のように表わせる(Leuning and Moncrieff, 1990)。ここに、V'は出力電圧の変動、 $\frac{v'}{v}$ とはそれぞれ赤外線分析計のCO₂と水蒸気に対する感度である。これをWPL補正式に適用すると

$$F_c = \overline{wV'} + \left(\mu \frac{\overline{c}}{a} - \frac{v'}{v} \right) \overline{w'v'} + (1 + \mu_v) \frac{\overline{c}}{\overline{T}} \overline{w'T'} \quad (1.16)$$

となる。 / はたとえば、Leuning and King(1992)によればAdvanet E009のオープンパス型では5.58x10⁻⁴であった。しかし山口(1999)はさらに大きな値も得ている。クローズドパス型のLI-6262やCIRUS-SCなどについてもチェックしておくことが望ましい。

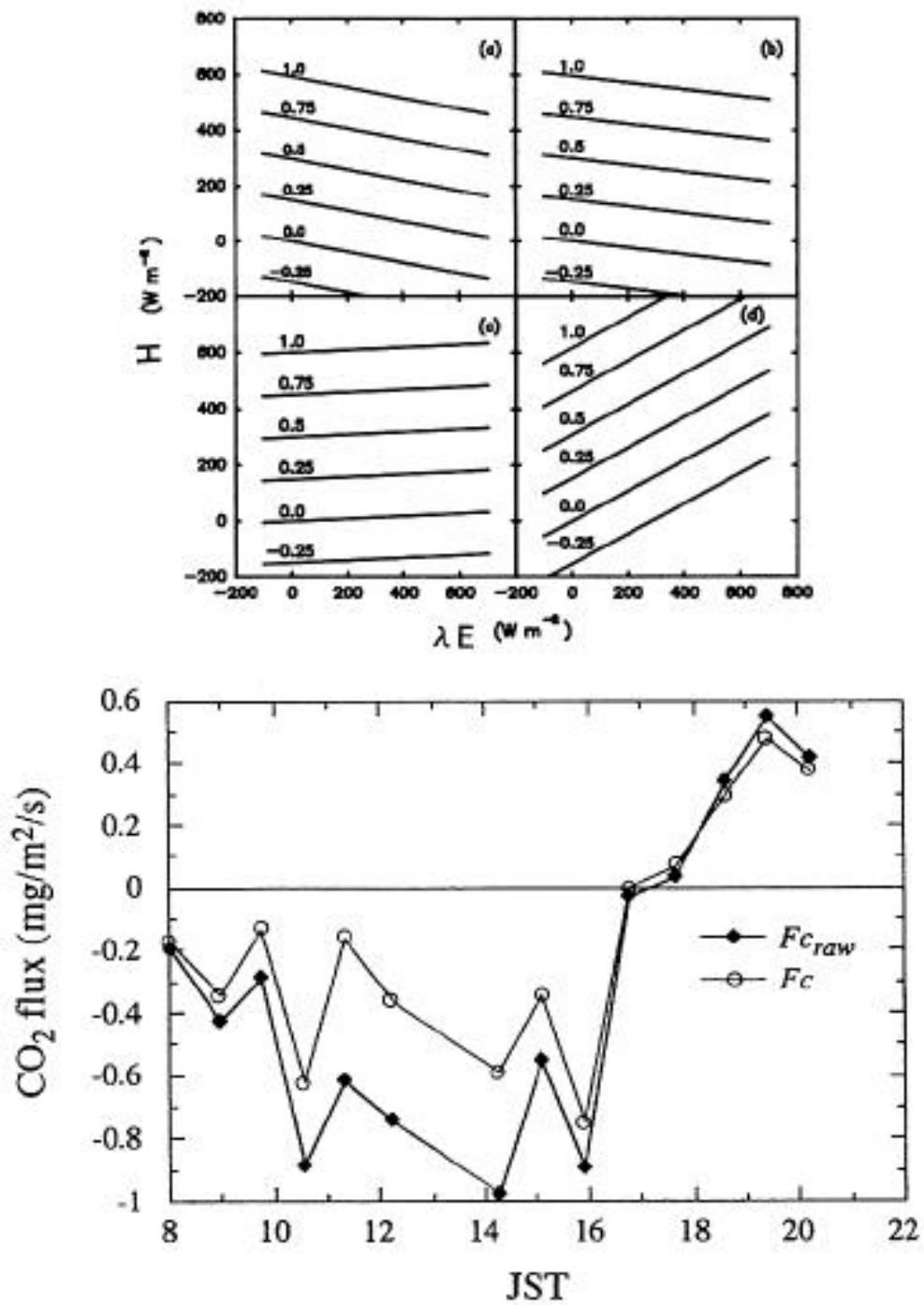


図1.7 密度変動補正の大きさ(上)と密度変動補正の効果の例(下)

密度変動補正の大きさは、顕熱・潜熱フラックスの関数として表わしてある。

(a) $\beta = 0$, (b) $\beta = 3 \times 10^{-4}$, (c) $\beta = 1 \times 10^{-3}$, (d) $\beta = 3 \times 10^{-3}$ (Leuning and Moncrieff, 1990),

密度変動補正の効果の例は針葉樹林の CO_2 フラックスの観測例(原園ほか, 1996).

c) 地形変換

超音波風速計など風速計を用いる場合それをどのように設置するかという，設置角度の問題が生じる。水平で一様な地形上で水準器を利用して厳密に設置しても，取り付け器具やポールなどの影響で平均流が水平にならないことがあることは以前から知られており，その補正も行われてきた。Kaimal and Haugen (1969)は運動量フラックスに対しては測器の傾きを0.1度以内におさめる必要があると述べている。一方，熱や水蒸気， CO_2 などスカラー量のフラックスについては水平で一様な地形上では誤差はより小さく，実質的には無視できる場合も多い。

最近，傾斜角が大きい複雑な地形上の森林などで渦相関法を用いたフラックスの測定が多く行われるようになってきているが，地形が傾斜している場所あるいは森林など表面の凹凸が大きい場所で測定を行う場合は座標をどのように選ぶかが問題となる。平均流の方向と流れの傾角を測定して座標変換をほどこすことが可能である場合は問題は少なく，すでに座標変換を行った結果を報告している研究者も少なくない(たとえば，McMillen, 1988)。

座標変換は，まず1 run(たとえば30分)について平均風向(u の方向)を決め，その方向に対する迎角を求めて計算を行う。座標変換の関係式は次のように表わすことができる。

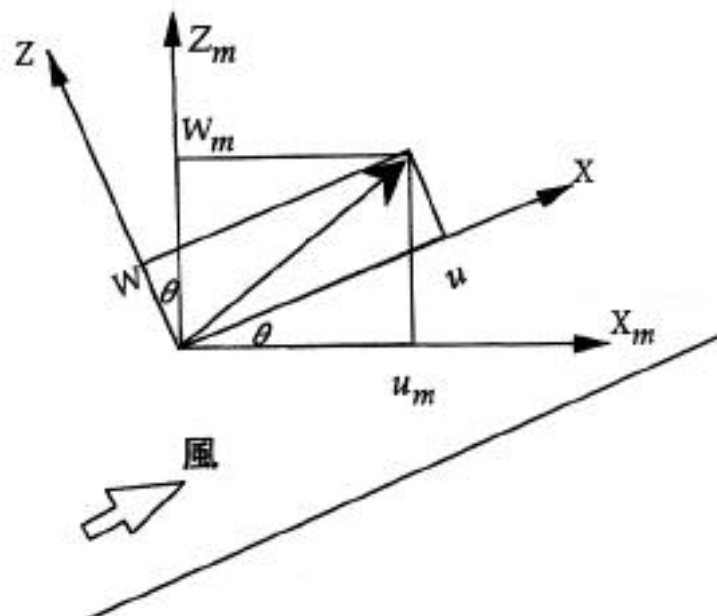


図1.8 斜面に沿った流れへの座標変換

$$\begin{aligned}
u' &= u'_m \cos \theta + w'_m \sin \theta \\
v' &= v_m \\
w' &= w'_m \cos \theta - u'_m \sin \theta
\end{aligned} \tag{1.17}$$

$$\begin{aligned}
\overline{u'^2} &= \overline{u'^2_m} \cos^2 \theta + \overline{u'_m w'_m} \sin \theta \cos \theta + \overline{w'^2_m} \sin^2 \theta \\
\overline{w'^2} &= \overline{w'^2_m} \cos^2 \theta - \overline{u'_m w'_m} \sin \theta \cos \theta + \overline{u'^2_m} \sin^2 \theta \\
\overline{u' w'} &= \overline{u'_m w'_m} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\overline{w'^2_m} - \overline{u'^2_m}) \sin \theta \cos \theta \\
\overline{w' c'} &= \overline{w'_m c'} \cos \theta - \overline{u'_m c'} \sin \theta
\end{aligned} \tag{1.18}$$

ここで，下付のmは測定値を表わす。この変換によって現実にどの程度の影響が出るのか，WPL補正などの補正との関係はどうなるか，あるいは浮力など実際に鉛直に働く力を機械的に座標変換しても良いかなど，座標変換の考え方について検討しておく必要がある。具体的な座標変換の適用例については2.4節に示した。

d) 応答およびスパン，センサー間距離補正

渦相関法に用いる測器は地表面付近では10Hz程度の応答が要求される。背の高い森林でも数Hzの応答は必要である。しかし，一般に測器は，スパンを持つもの，慣性を持つもの，大きな熱容量を持つもの，回路の時定数があるなどが原因で理想の応答特性が得られないことが多い。

超音波風速計における応答限界は，スパン長が有限であるためにその間の平均値が観測されることである。音のパス間が離れていることも応答の遅れを発生させる。厳密な議論はKaimal et al.(1968) に示されているが，大ざっぱには，スパン長をd，あるいはパス間の距離をsとし，流れ方向の波数を $k_1 = 2\pi f/u$ としたときスペクトルに変形が生じるのは， $k_1 d = 1$ あるいは $k_1 s = 1$ である。どちらかの大きい方で98%のパワーのカットオフが決まる。現実には4 m以上の高さでのフラックスの測定には市販の20cm以下のスパンを持つ風速計についてはほとんどこの補正は必要ないと考えられる。詳しくはKaimal and Finnigan(1994)などに述べられている。

また，wセンサーとスカラーセンサーの上下，左右の位置関係も精度に影響を及ぼすことが指摘されている。Kristensen et al.(1997)によれば，フラックスの過小評価を最小限にするには，wセンサーの下にスカラーセンサーを配置するのが望ましいとの結果が出ている。

温度計や湿度計に細線が用いられるときも高周波側の補正が必要となることがある。特に湿度変動に乾湿球温度計が用いられた場合、湿球の応答がきわめて悪くなるため補正が必要であるが、熱的応答の原理を用いて信号を微分する補正方法などが試みられている(たとえば、塚本・光田, 1986)。

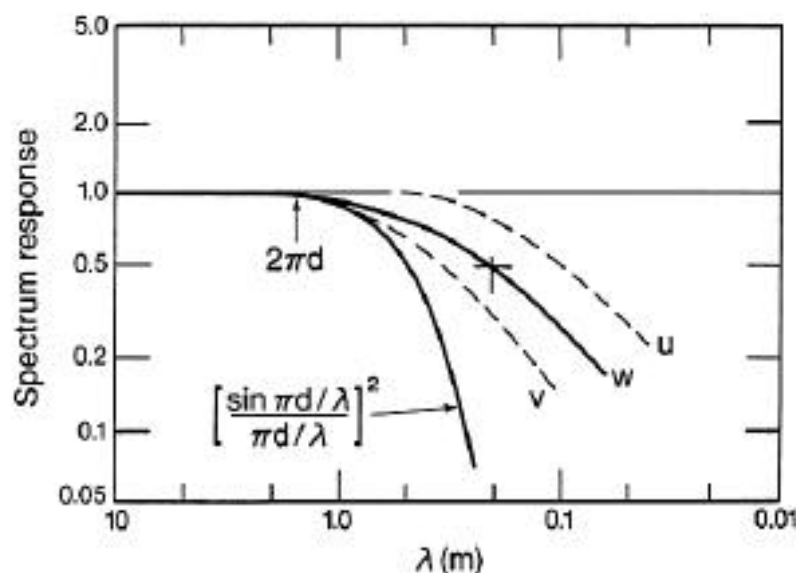


図1.9 3次元超音波風速計(スパン長20cm, 120 ° 型)に正面から風が吹く時の高周波側での減衰

関数はパスに沿って吹いた時の減衰を示す(Kaimal et al., 1968).

e) バンドパスコバリアンス法

バンドパスコバリアンス法も応答補正のひとつであり、応答の遅いセンサーやガス分析計の応答限界や後で述べるクローズドパス法におけるチューブ内の濃度変動ダンピング、あるいは分析計の空気取り入れ口と超音波風速計の間の距離が原因となっておこるコスペクトルの高周波側の過小評価を是正する方法である。この方法は、温度、水蒸気、CO₂など各スカラー量のフラックスのコスペクトルが全周波数領域にわたって相似であるという仮定を用いることにより、高周波まで測定可能な温度変動を用いて計算された顕熱フラックスのコスペクトルを基準として、あまり応答性の優れない測器で測定されたスカラー量の高周波領域を推定する方法である。これまでのさまざまなオープンパス分析計を用いて測定されたコスペクトルの相似性は、この方法の可能性を示唆している(Anderson and Verma, 1985; Monji et al., 1993など、図1.10参照)。

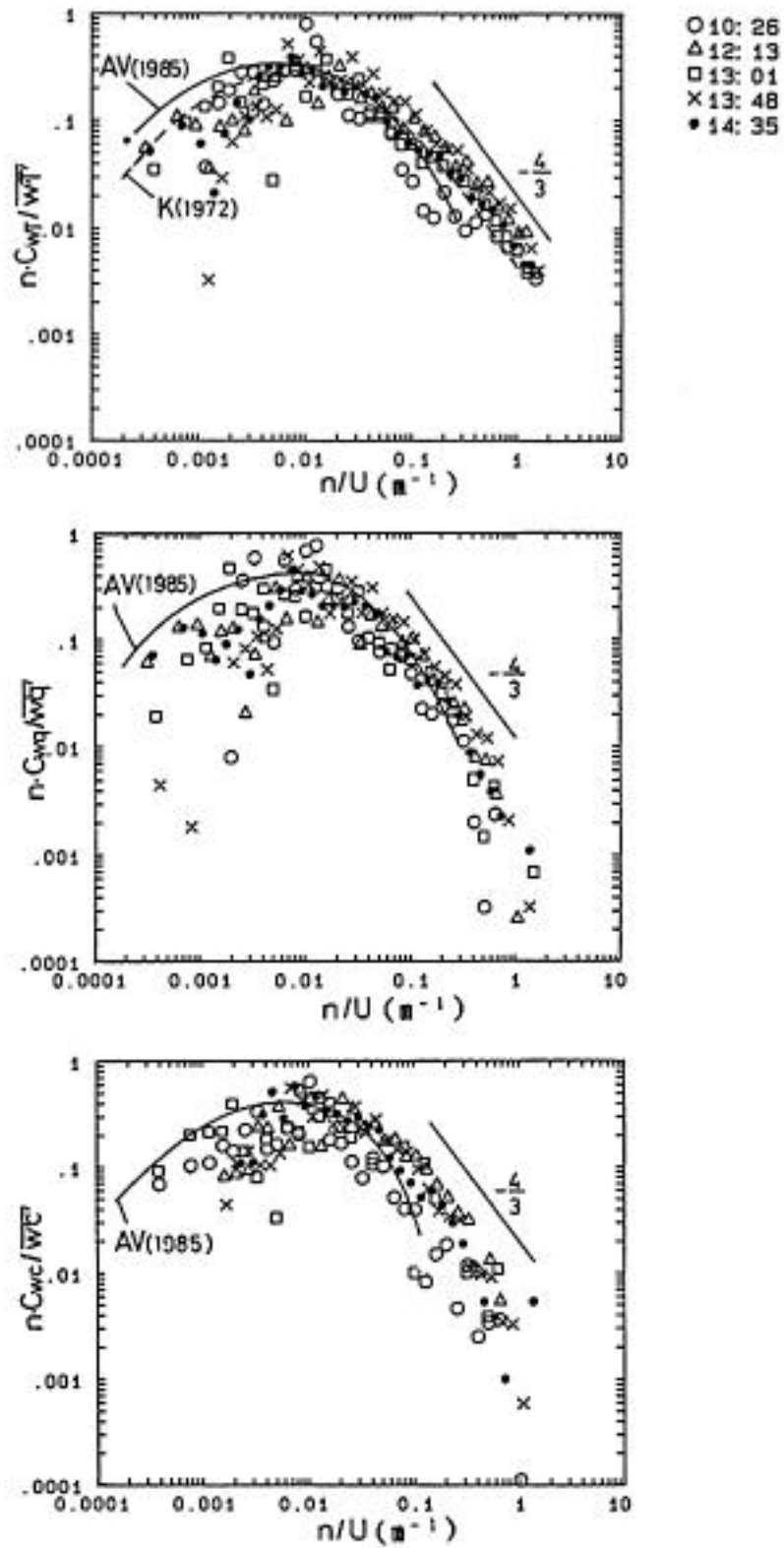


図1.10 森林上のスカラー量フラックスのコスペクトル間の相似性(Monji et al., 1994)

上図：顕熱フラックス，中図：水蒸気フラックス，下図：CO₂フラックス

応答の遅い分析計が実際の濃度変動に追従できる周波数帯をバンドパス帯(b_p)とし、それよりも高周波帯をハイパス帯(h_p)とすると、各スカラー量のスペクトルが全周波数領域において相似であるという仮定から次式が成り立つ。

$$\frac{(\overline{w's'})_{hp}}{(\overline{w'T'})_{hp}} = \frac{(\overline{w's'})_{bp}}{(\overline{w'T'})_{bp}} \quad (1.19)$$

すると、高周波成分の過小評価された部分を補正した形でスカラー量のフラックスが次のように得られる。

$$F_s = (\overline{w's'})_{bp} \left[1 + \frac{(\overline{w'T'})_{hp}}{(\overline{w'T'})_{bp}} \right] \quad (1.20)$$

補正の様子は図1.11に示す。この方法は顕熱フラックスのコスペクトルが正しく評価されていることが前提であるので、朝夕や湿地上など顕熱フラックスが小さいときはそのまま適用することは困難となることがある。また、適用すべきバンドパス帯は周波数を用いると風速によって変化する、すなわち、風速が大きくなるとコスペクトルは高周波数側にシフトするので、バンドパスコバリエンス法を自動的に適用するには最適な周波数帯を見出すプログラムの開発が必要である。

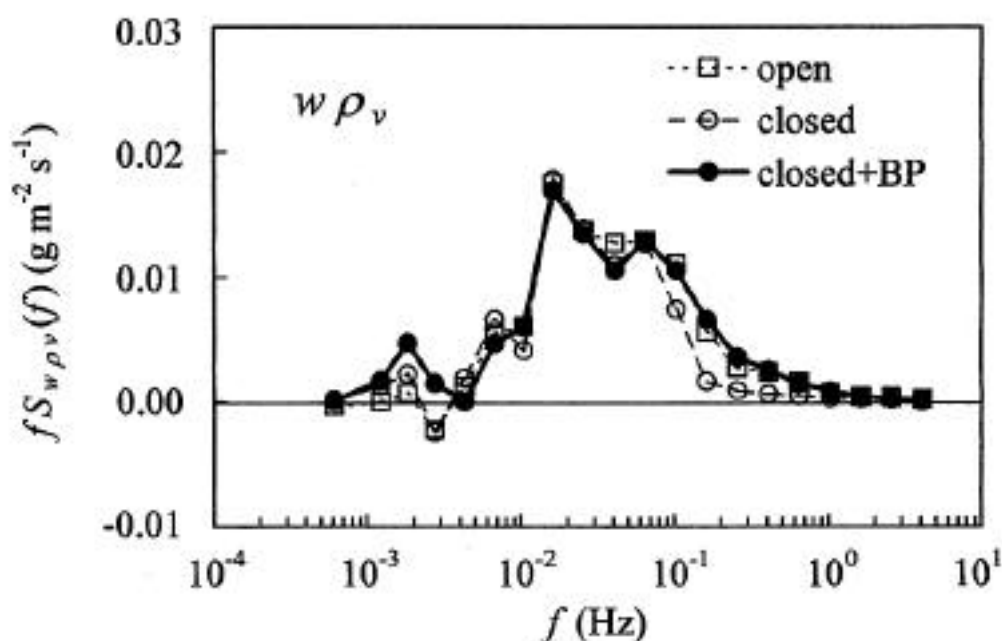


図1.11 バンドパスコバリエンス法の効果を示す結果の例(山口, 1999)