

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



著者らのグループでは、現在までに地表と大気間の熱や物質のフラックスの観測研究を様々な植生について実施してきた。特に、わが国の針葉樹林・タイのマングローブ林ではデータが蓄積しており、これらの森林の二酸化炭素フラックス観測では、現地に適応した様々な手法で評価を試みている。それらの成果から、フラックス観測の基本的な手法である渦相関法、それに準ずるREA(簡易渦集積)法、改良傾度法等について、それぞれの手法の詳細を、観測実務の経験を踏まえて述べる。

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

森林など植生と大気間のCO₂の交換量を直接渦相関法で求めるには、超音波風速計とオープンパスの赤外線ガス分析計を用いる方法が最適と考えられ多く用いられてきた。しかし、オープンパスの分析計はセンサーの保守に問題があり、降雨時などにも測定が困難になるなど長期間の連続測定には不向きである。一方、クローズドパス型の分析計は出力の安定性や精度において優れているが、チューブなどで分析計に空気を導く必要があるため変動の減衰が起こるという欠陥がある。ここでは、クローズドパス法にバンドパスコバリアンス法を組合わせて高周波部分を補正したものとオープンパス法の結果を比較した。

測定は滋賀県南部の森林内にある京都大学農学部の実験施設の鉄塔において行った。地形はおおむね北に向かって約10度下降している。植生は主に樹高が約15mのヒノキであり、アカマツも点在している。プラントキャノピーアナライザーで測定したLAIは約4.5であった。地上から22.6mの高さに設置した3次元超音波風速計(Kaijo, DA600 TR-61B)によって風速3成分の変動および平均を、細線熱電対温度計(直径50 μ m)によって気温の変動を、オープンパスの分析計はAdvanetの赤外線CO₂, H₂O変動計(E009A)によってCO₂と水蒸気量の変動を、クローズドパスの分析計はPPsystem社の分析計(CIRAS-SC)を用いた。オープンパスの受感部は日射が当たると誤差を生じる(これは機器によるので必ずしもE009Aに固有の現象ではない)ので図2.1に示すように流れを妨げないような日射避けを作った。観測のブロックダイアグラムを図2.2に示す。測定は1998年5月下旬の1日間(24時間)で、天気は晴れ、曇り、小雨と移行した。

以下に、山口ほか(1998)と山口(1999)に基づく解析結果を示す。図2.3はクローズドパス法とオープンパス法によって測定されたCO₂と水蒸気のコスペクトルの比較である。図の上段のCO₂コスペクトルを見ると、オープンパス法に比べてクローズドパス法は高周波数側が減少していることがわかる。一方、低周波数側にも違いが見られ

る。これはオープンパス分析計の出力が長周期側で不安定になっているために生じているものと考えられる。この不安定なドリフトは各ランによって異なる出方をしたので、補正は困難と考えられた。下段の水蒸気フラックスについても高周波側の違いは類似しているが、長周期側では水蒸気出力にドリフトがほとんど見られなかったため大きな違いは生じなかった。図2.4に測定期間とした24時間内の顕熱フラックス、潜熱フラックス、CO₂フラックスの変化を示す。クローズドパス法による値の過小評価が顕著に現われている。両者を比較したのが、図2.5である。潜熱フラックスについてはクローズドパス法による値がオープンパス法に比べて約15%過小評価されている。これはクローズドパス法の応答限界に起因するものであると考えられる。CO₂フラックスについては、おそらくオープンパス分析計のドリフトが原因となっていると考えられる大きなばらつきが見られる。オープンパス法では密度変動補正(1.1.4(a)参照)が大きな割合を占めることもばらつきの原因の一つとも考えられる。

クローズドパス法の応答限界を補正する方法として、バンドパスコバリエンス法(1.1.4(e)節参照)を適用した。バンドパスコバリエンス法の基礎となる、顕熱フラックスと水蒸気フラックスのコスペクトルの相互比較は1.1.4節の図1.10に示した通りである。そして、図1.11には水蒸気フラックスについて、バンドパスコバリエンス法の適用によってクローズドパス法による水蒸気フラックスがオープンパス法によるものに近づく様子を示した。バンドパスコバリエンス法による補正を行った値とオープンパス法によるフラックスの比較を図2.6に示す。潜熱フラックスについては補正前では15%の過小評価を示していたクローズドパス法の値がほぼ1 : 1に近い値となった。補正後のクローズドパス法の値が4%大きくなっていることについては、超音波風速計とオープンパス分析計の水平方向の設置間隔が原因でオープンパス法の値が過小評価されたためであると考えられる。Moore(1986)に示された方法によって今回の観測は平均的にオープンパス法が3.5%過小評価になっていることが計算で示せるので、このことを考慮すると、バンドパスコバリエンス法によって補正されたクローズドパス法の値はオープンパス法の値と高い精度で一致することがわかった。CO₂のフラックスについてはやはりばらつきは大きいものの、バンドパスコバリエンス法の適用で平均的には1 : 1の関係に近づいており、クローズドパス法とバンドパスコバリエンス法の組あわせの有効性が示されたといえる。

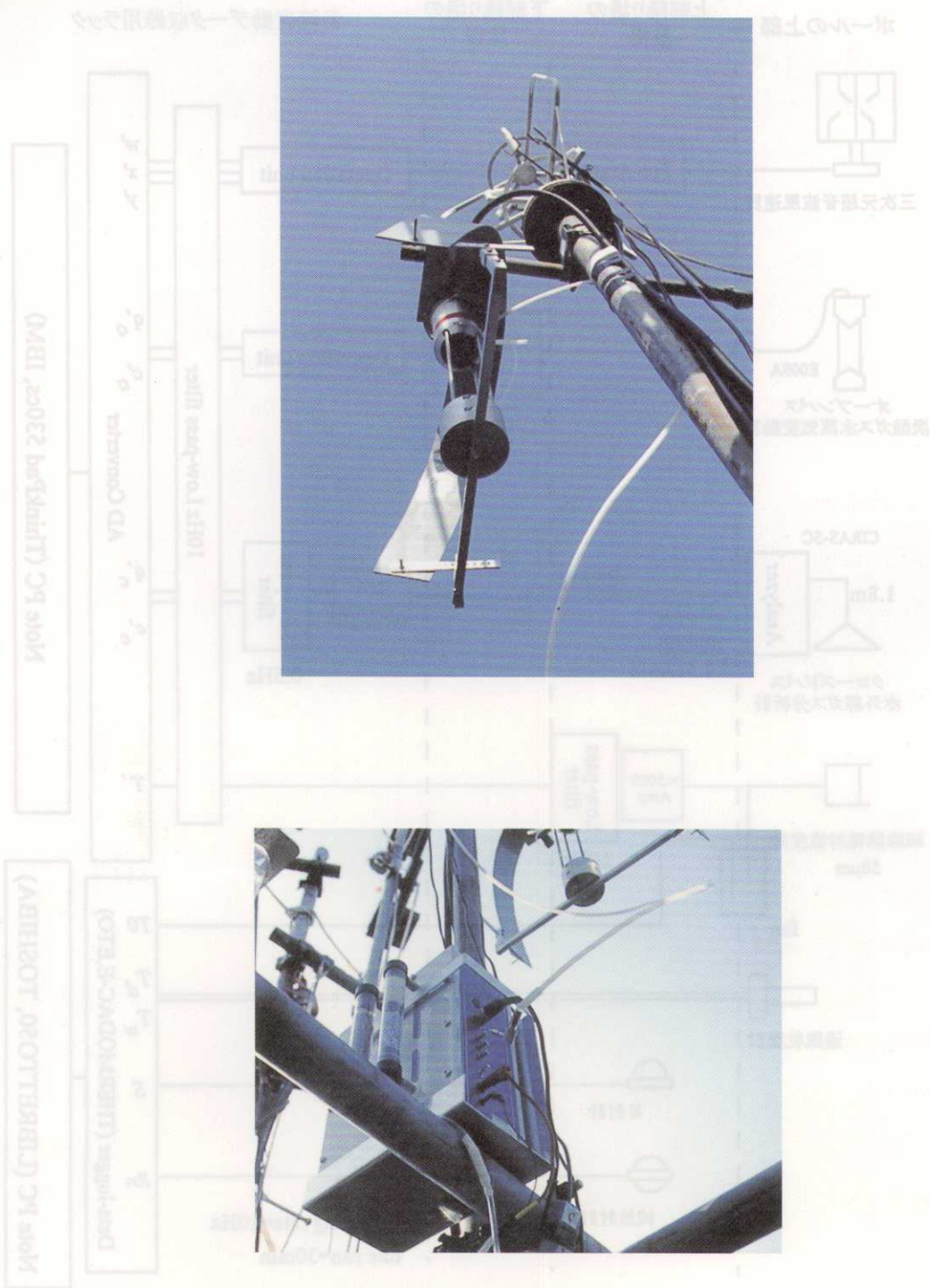


図2.1 オープンパスとクローズドパス法の比較実験の様子

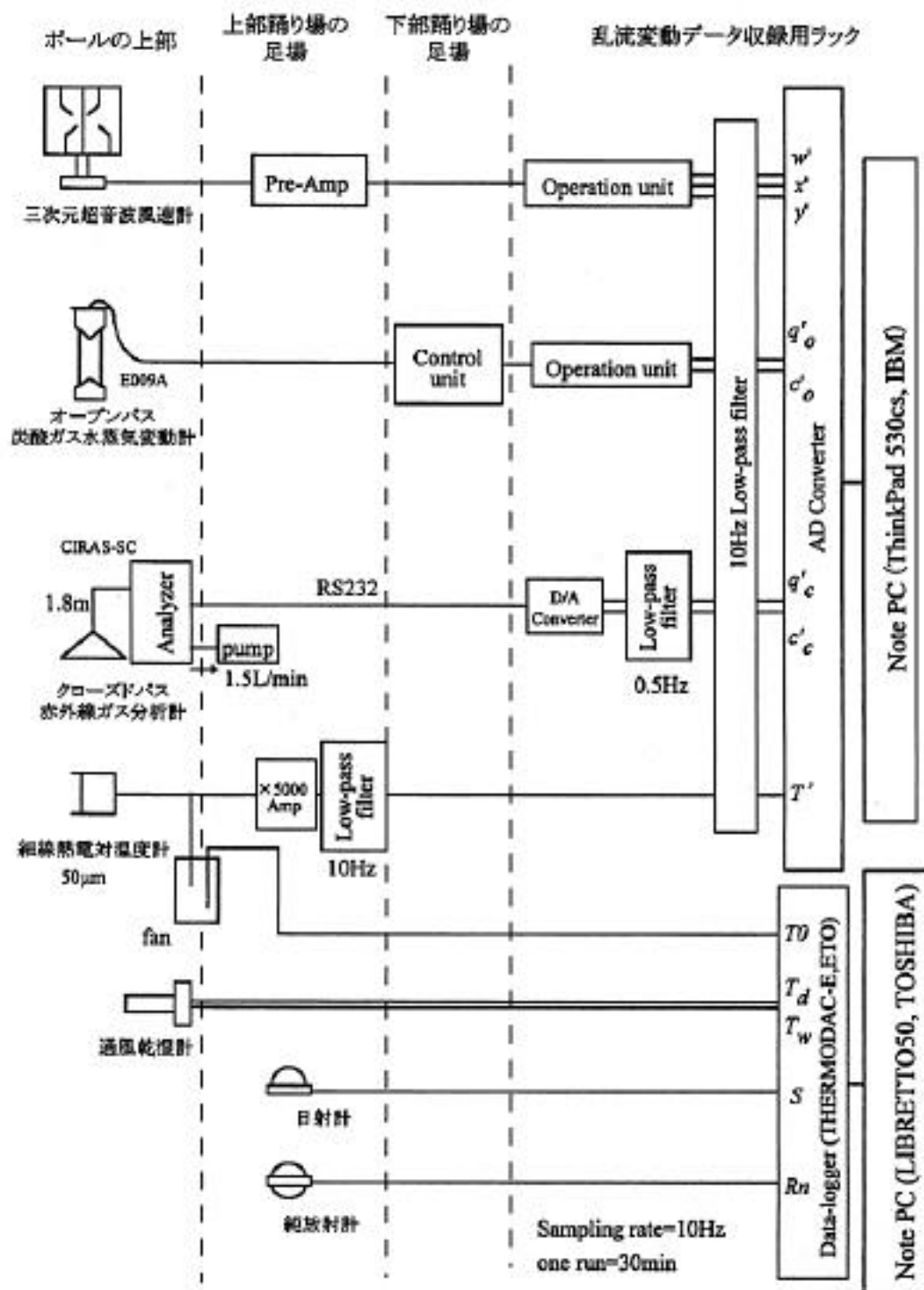


図2.2 オープンパスとクローズパス法の比較実験の接続

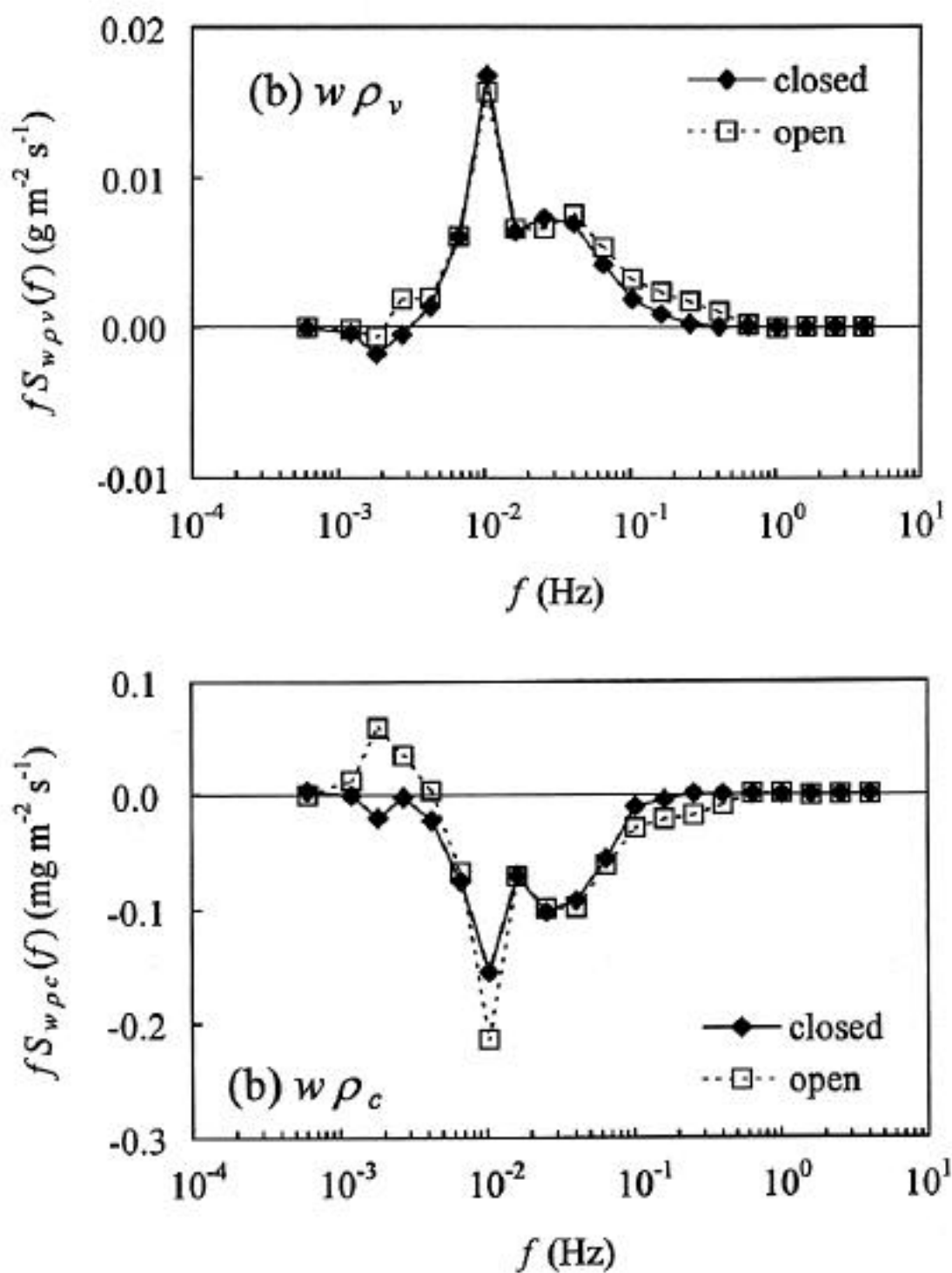


図2.3 オープンパスとクローズドパス法によるコスペクトルの比較(山口, 1999)

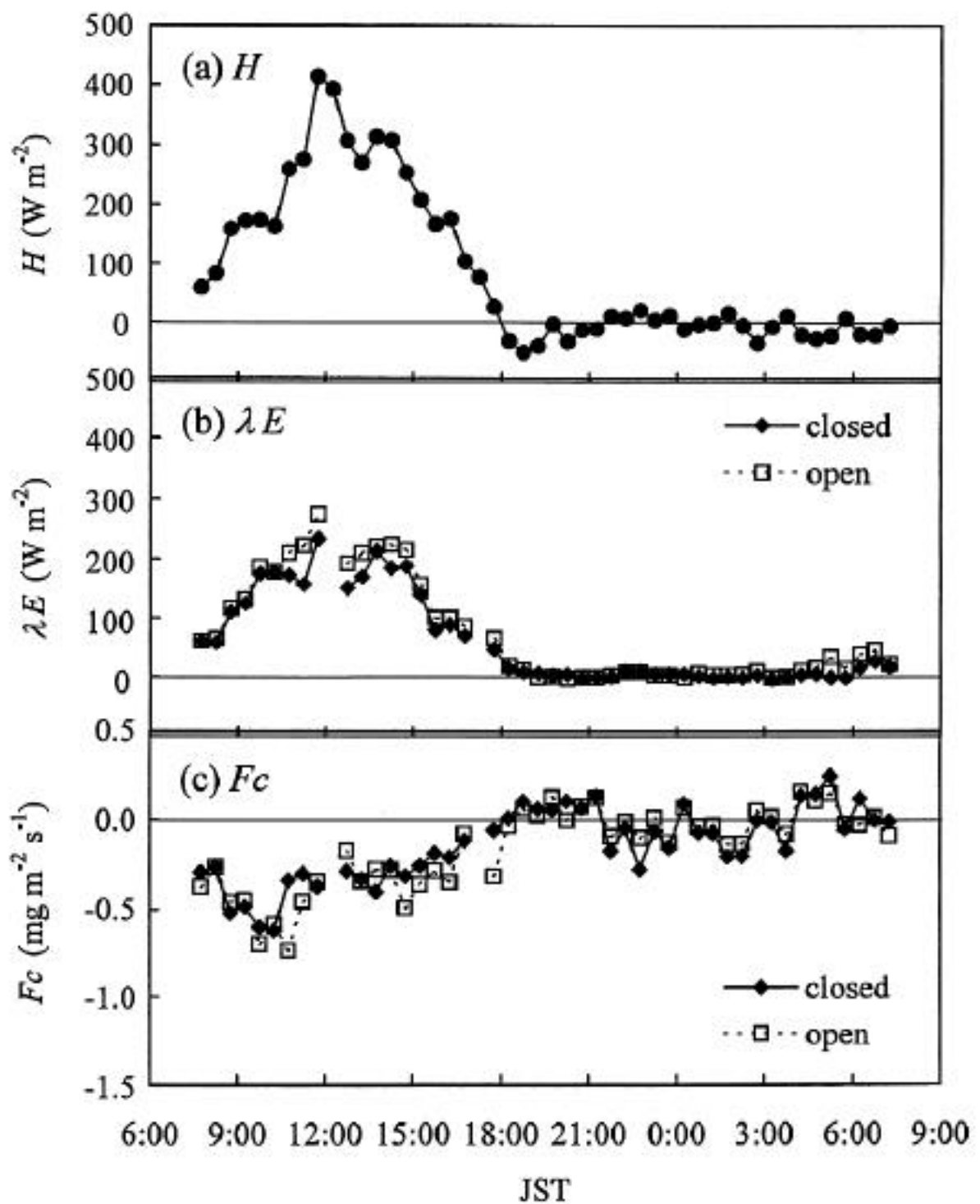


図2.4 オープンパスとクローズドパス法によるフラックスの時系列の比較
(山口, 1999)

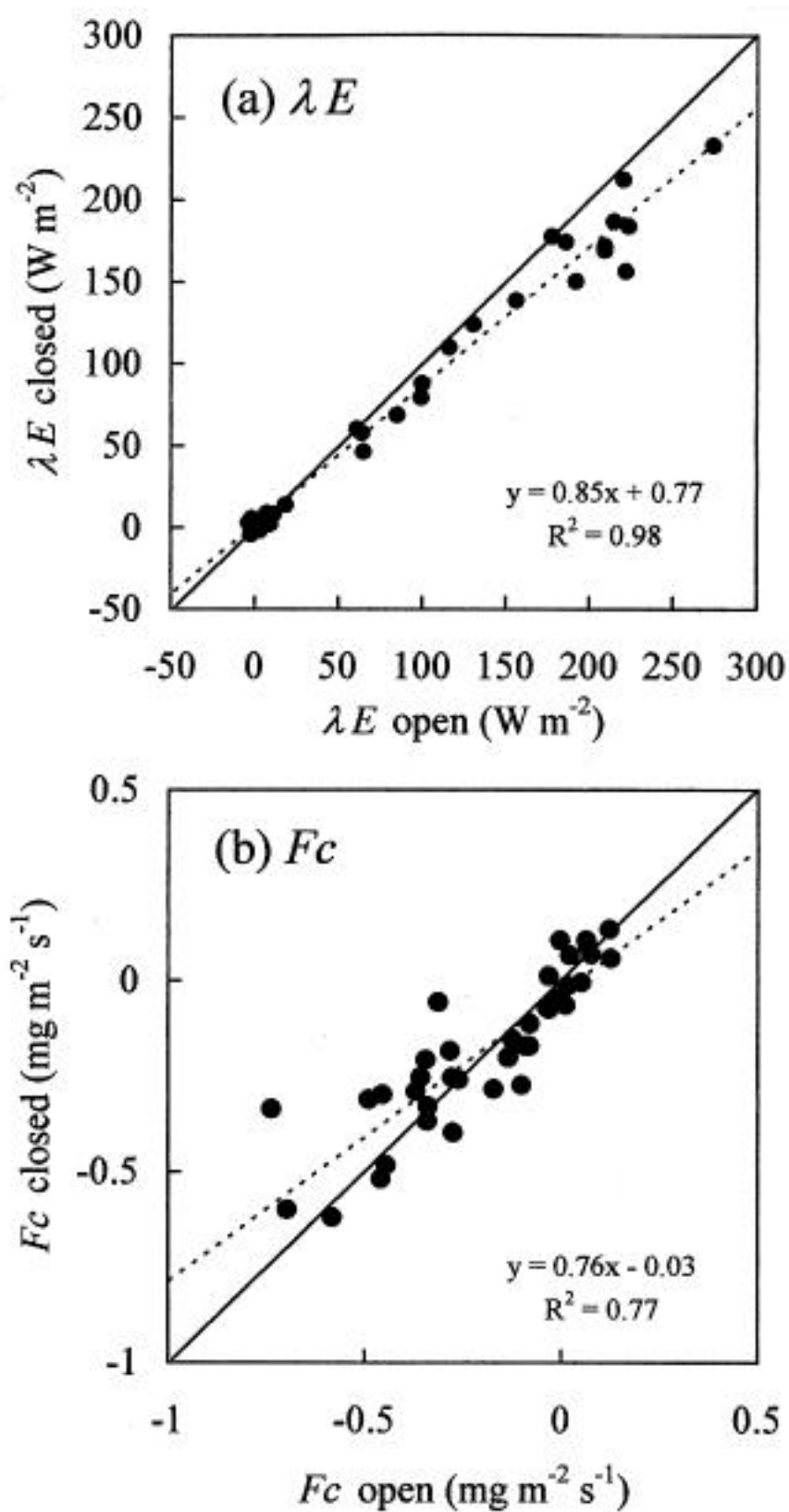


図2.5 オープンパスとクローズドパス法のフラックス比較(山口, 1999)

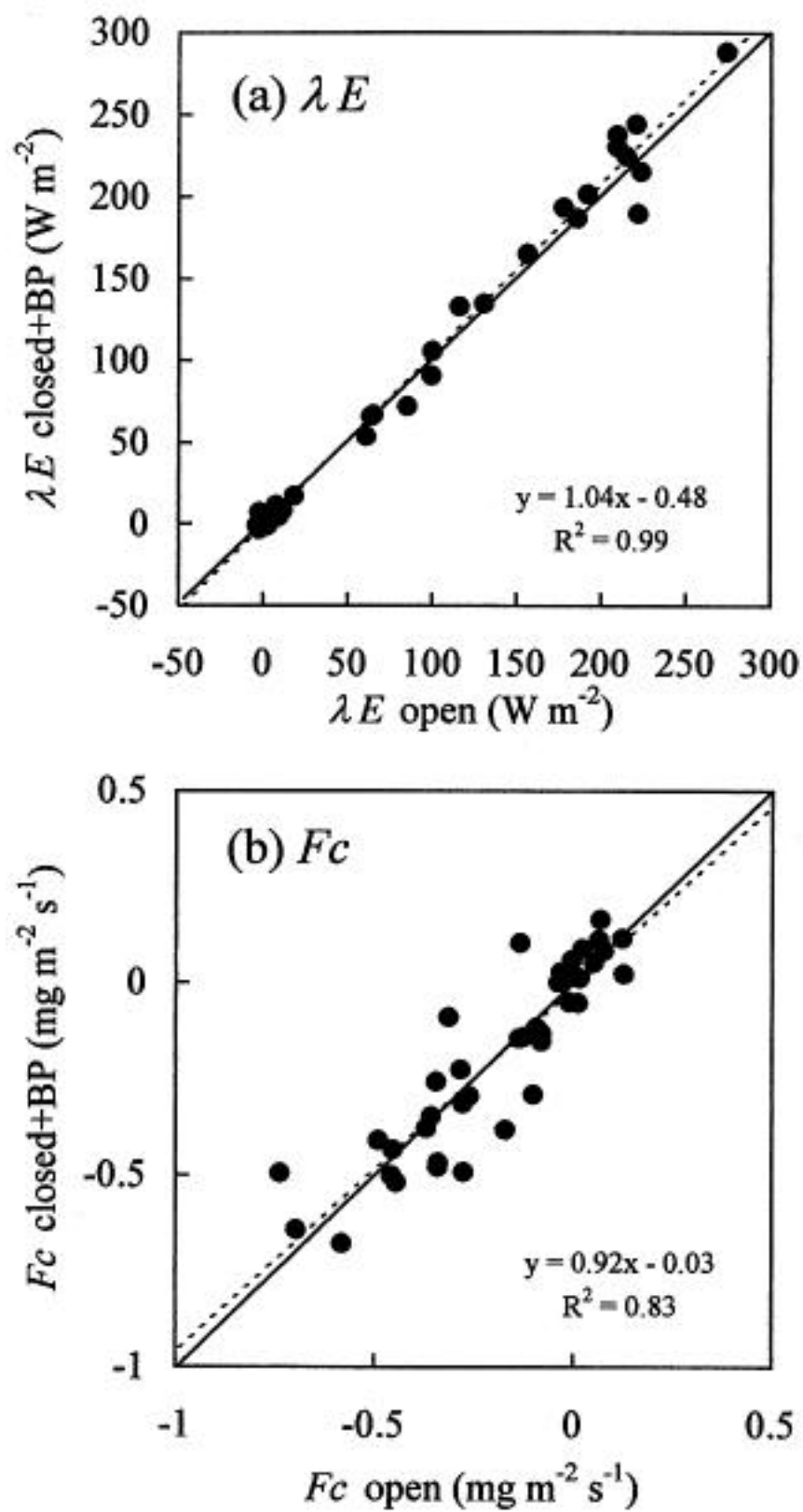


図2.6 図2.5の値にバンドパスコバリエンス法による補正を加えたもの(山口, 1999)

2.2 針葉樹林でのREA法を用いた長期観測

森林などの植生と大気とのCO₂の交換量は多くの測定が試みられているが、測定精度を向上させることや長期間の測定を行うことなど課題は多い。この研究では、森林におけるCO₂フラックスの長期連続測定を行うため、針葉樹林地内にREA(簡易渦集積)法によるCO₂フラックスの長期連続測定装置を設置した。そして約5月間の測定を行ったので、その結果を鱧谷・文字(1998)に基づいて述べる。

測定を行ったのは2.1節で述べた場所と同じ京都大学農学部の観測鉄塔で、滋賀県の琵琶湖南東岸に位置し、樹種構成はヒノキとアカマツの混交林で樹高はおよそ15 mであった。測定高度は23mとした。

REA法による森林群落のCO₂フラックスの測定装置は1.2節で示したもの(Hamotani et al., 1996)と類似の機能をもっているが、特に、長期の連続自動観測に耐えるように装置の細部に渡って検討し、測定を始める前に現地で十分に検証した。REA法によるフラックスは1.2節で述べたように $F_c = b \cdot w(C^+ - C^-)$ で示される。ここで F_c はCO₂のフラックス、 C^+ は風が上向きの際の平均のCO₂濃度、 C^- は風が下向きの際の平均のCO₂濃度、 w は風速の鉛直成分の標準偏差で、 b は実験により求められる係数である。空気のサンプリングには電磁ポンプを使用した。サンプリングされた空気は20リットルのテドラーバッグに集めた後に赤外線ガス分析器(富士電機製、ZRH型)に送ってCO₂の濃度を測定した。これらのガスの収集(30分間)や分析とバッグの排気(30分間)のプロセスは1サイクルを1時間として電磁弁とポンプにより自動的に行った。

REA法に含まれる実験係数 b は顕熱フラックスについて渦相関法との比較を行って求めた。このため細線熱電対(太さ50 μ m)と超音波風速計(Kaijo, DA-600型)を使用してそれぞれ気温と風速の鉛直成分の変動 T' 、 w' を測定し、小型のコンピュータボードにより自動的に30分毎の w と T の共分散 $w'T'$ 、 w の標準偏差 w 、など必要な計算を行いアナログ信号に変換した。このアナログ信号と日射量、純放射量、雨量、群落上の乾球温度、湿球温度、平均風速、風向、地温などのアナログ信号はロガーにより集めて連続的にノートパソコンに収めた。

実験係数 b の5月間の変化を図2.7上段に示す。この係数 b は顕熱フラックスから求められているので、雨の日など日射量が極端に少ない日には0.5より離れるときもあったが、通常0.5に近い値となった。そこで係数 b を0.5として計算したもの(縦軸)と1日毎に係数 b を求めて計算したもの(横軸)で比較をした(図2.7下段)。いずれも日中(午前6時より午後6時まで)の値である。両者は良く一致している。なおここでは1日毎の係数 b を求めてその値をREA法の群落のCO₂フラックスの係数に使用した。

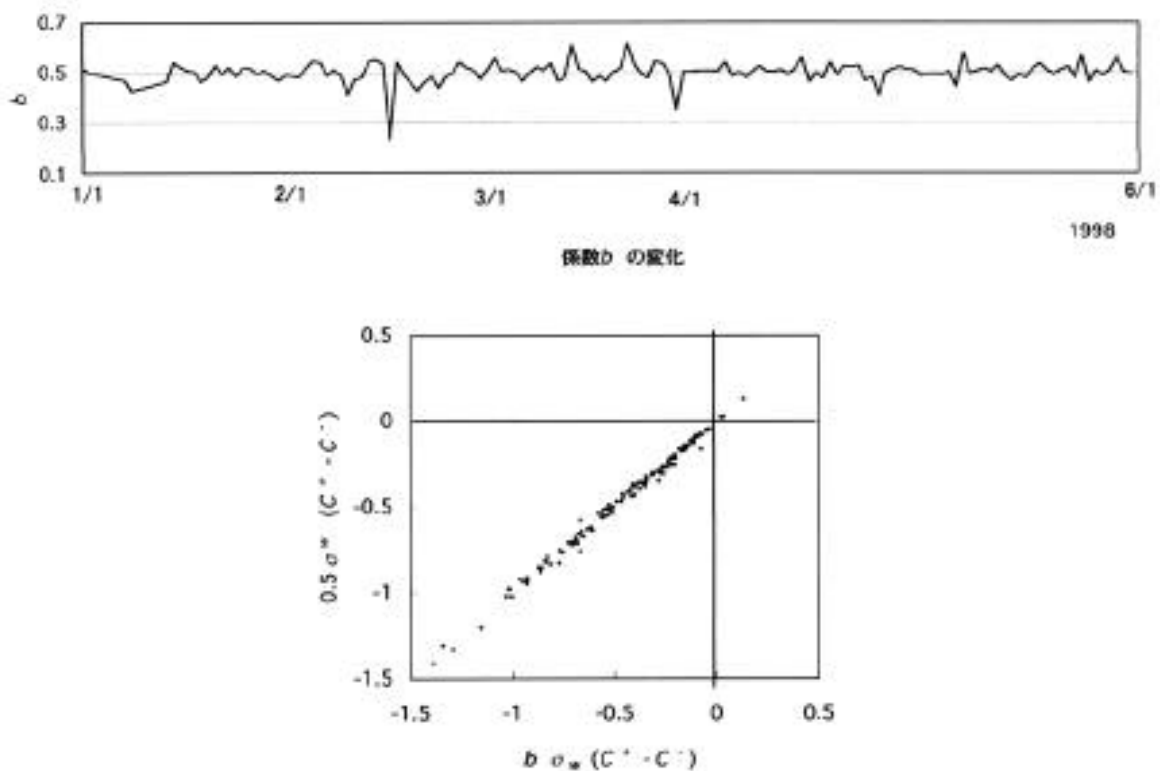


図2.7 REA法の係数(温度の信号利用)の変化(上段)とREA法の係数を一定(0.5)とした場合のばらつき具合(下段)(鱧谷・文字, 1998)

1月から6月までの群落のCO₂フラックスの経過を図2.8に示す。太い実線は日平均値で、細い実線は日中の平均値、破線は夜間の平均値を示す。いずれも1時間当たりのフラックスである。測定した森林はヒノキ林のため、冬でも落葉せず、日中には少しの下向きのフラックスが見られた。夜間は上向きであるが非常に少ない値であった。1月から6月に季節が変わるにつれ日中の下向きフラックスと夜間のフラックスはともに増加していった。日平均値はマイナス側(下向き側)で経過した。また、冬から春に至る過程で、2月から4月までは下向きフラックスが急速に増加した。

次に日中の群落のCO₂フラックスと日射量(日積算値)の関係を図2.9に示す。日射量が増えると群落のCO₂の吸収量が大きくなる傾向が一般に見られたが、日変化の中で日射量が最大するときには必ずしも群落のCO₂の吸収量が最大ではなく、他の要因も関係しているため図は大きくばらついている。

現在もこの観測は継続中であり、CO₂交換量と気象要素との関係についても、引き続き長期にわたるより詳細な解析を行う予定である。

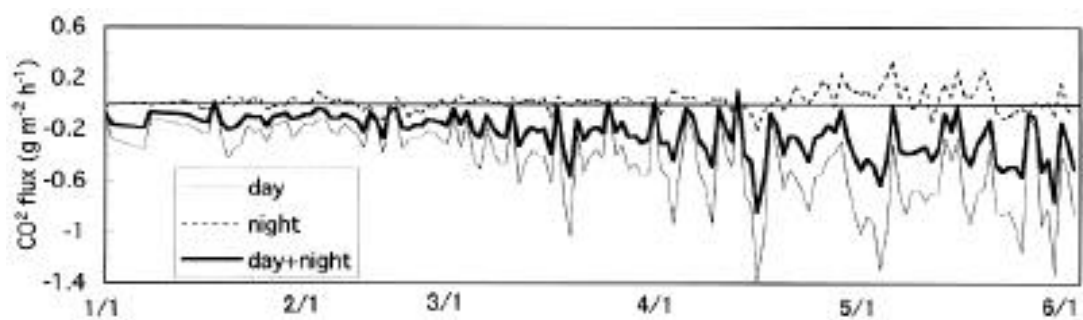


図2.8 REA法で求めた針葉樹林のCO₂フラックスの季節変化(鱧谷・文字, 1998)

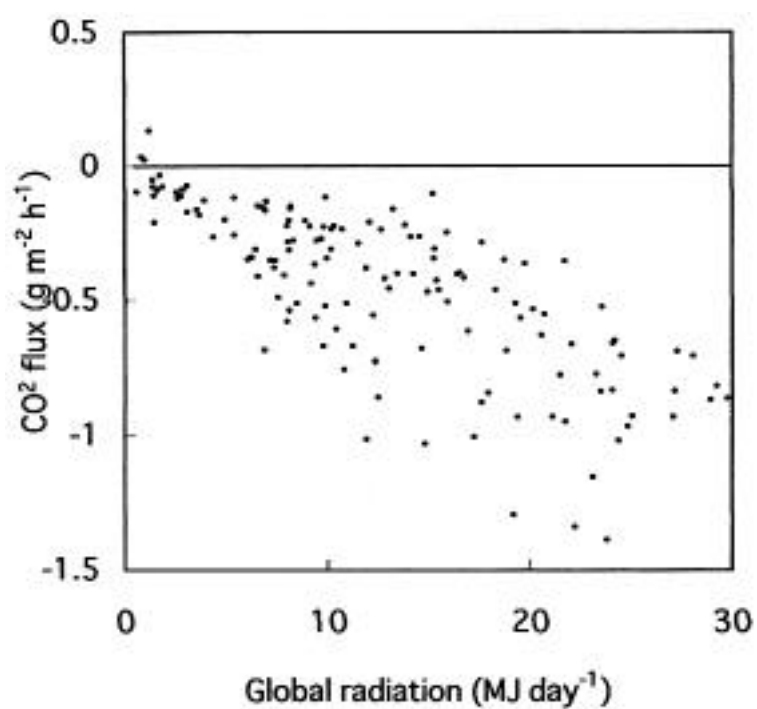


図2.9 REA法で求めた針葉樹林のCO₂フラックスと日射量の関係
(鱧谷・文字, 1998)

2.3 マングローブ林における改良傾度法観測

マングローブ林は熱帯や亜熱帯の汽水域に生育する植物の群落であり、多くの観点から注目を集めている。一つは海岸線を浸食から保護したり、魚介類の生息、産卵の場を提供するなど、地域の環境・資源としてであり、また、世界の広い範囲(現在約1600万ha)に生育するという点から、CO₂の重要な吸源となり得る点である。しかしながら、マングローブ林はどの国でも著しく破壊されており、防災や地球環境の保全の意味からその回復が急務であると認識されており植林も進められている。

マングローブは潮間帯の泥の中という植物には不利な条件で育つため、CO₂吸収能力やその他のガス交換機能についてはさまざまな推測がなされてきたが、実測はきわめて少ない。マングローブ林がどの程度のCO₂の吸収能力があるのかを評価するためには、マングローブのガス交換のモデル化が必要であるが、そのためには、現地観測によって気象環境要因とガス交換量の関係を求める必要がある。この研究ではタイのマングローブ林において現地観測を行い、群落とその上の大気との間の乱流交換にかかわるパラメータ(渦拡散係数など)と、葉内と大気のガス交換にかかわるパラメータ(気孔コンダクタンスなど)を決定し、日射、風速、温湿度など気象環境要因とCO₂吸収の関係を求めることを目的とした。これによってマングローブの生育環境からマングローブ林のCO₂吸収能力を推定することが可能になると考えられる。

この研究の中心はタイ国のマングローブ林における野外観測であるが、観測は、1994～1998年の5ヵ年の間に5つの期間(1994年7～8月、1995年3～4月、1996年12月～1997年1月、1997年7～8月、1998年8～9月)について行った観測を紹介する。このうち、前の2つの期間は日本生命財団、後の3つの期間は関西電力と関西総合環境センターの支援を得て実施したものである。この中で1996年度は乾季に当たる12月から1月にかけて、また、1997年度は雨季に当たる7から8月にかけて、ほぼ同じ形態の観測を行ったので、雨季と乾季の比較も含めその解析が可能である。また、1998年8～9月には、この観測体制に加え、クローズドパス渦相関法を適用し、これによって直接にCO₂フラックスや水蒸気フラックスを評価することを試みた。これについては解析途中である。

観測の実施場所は、タイ南部のパンガ(Phangnga 北緯8度20分、東経98度27分)で、王立森林庁マングローブ種子生産センターの協力を得て行った。パンガのマングローブ林は樹齢10～20年の二次林である。本研究の目的には極相林よりもこのような生育途上の森林が好ましいと考えられる。現地の森林面積は約30,000haの広さを有し、タイ最大である。また、微気象観測に必要な水平方向に一樣な場所を確保することができる。植生は10種類ほどあり、有占樹種は主に膝根型の気根を持つシロバナヒルギ(*Bruguiera cylindrica*)、支柱根型のフタバナヒルギ(*Rhizophora apiculata*)であるが、

そのほかコヒルギ(*Ceriops tagal*)、板根を持つハウガンヒルギ(*Xylocarpus moluccensis*)なども多く見られた。樹高は4 m未満の木が多数を占めるが、平均樹高は約5 mであり、群落高は約7 mであった。プラントキャノピーアナライザー(LI-COR; LI-2000)によって1997年8月に求めた葉面積指数(LAI)は1.4~3.9の範囲の値をとったが、平均的には約3であった。

観測用のプラットフォームとして、高さ15.6mで一辺が1.5mの鉄塔を建て、それに測器を設置した。設置状況を図2.10に示す。フラックスの測定には傾度法と渦相關法を使用した。傾度法のための測器は15.6mと8.6mの2高度に設置した。それらは3杯風速計(牧野測器製を改造)、通風乾湿計(銅コンスタンタン熱電対)、およびCO₂濃度測定のための空気の入取り入れ口である。2高度で取り込まれた空気はチューブを通してガス分析計(LI-COR, LI-6262)に導いた。

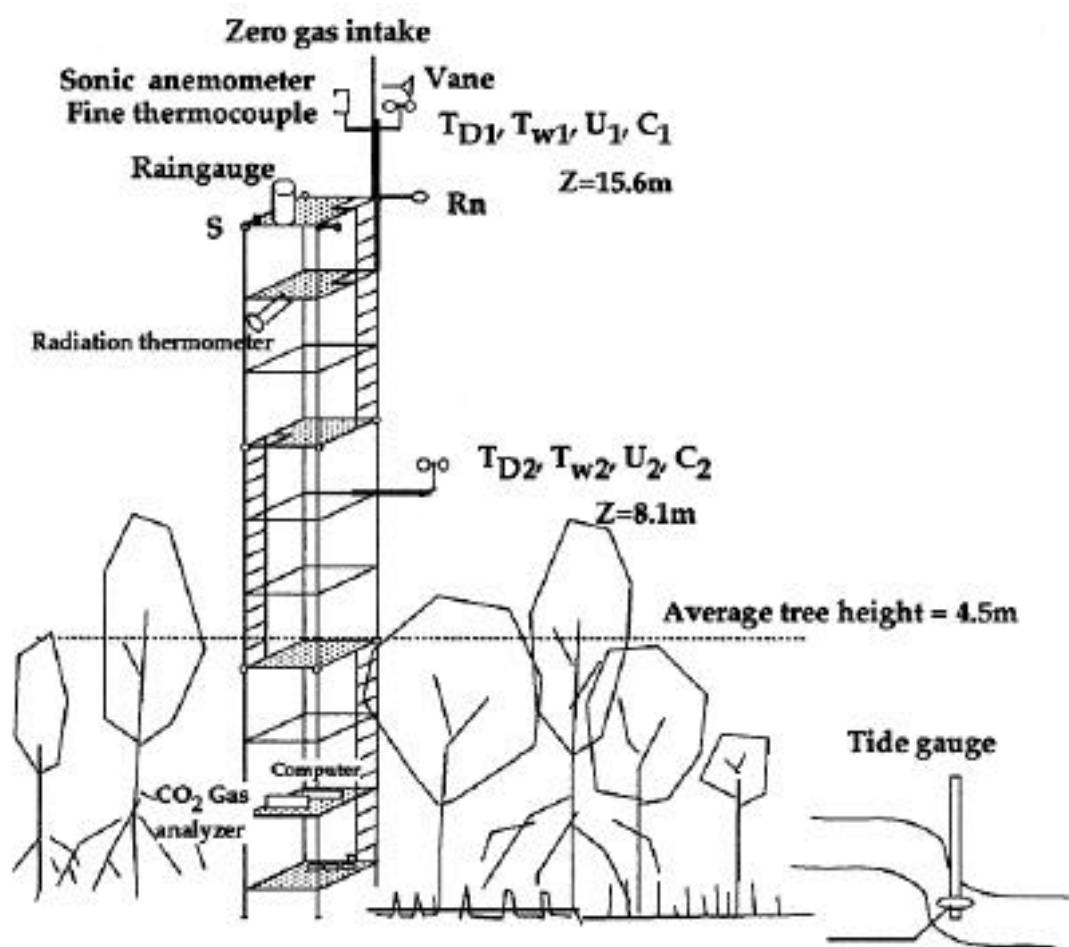


図2.10 マングローブ林観測の設置状況(Monji et al., 1997)

鉄塔の最上部(15.7m)には1次元超音波風速計(Hamotani and Monji, 1999) , 細線(50 μ m)熱電対温度計を取り付けて渦相関法により顕熱フラックスを求めた。なお1998年の8～9月の観測では超音波風速計のそばに渦相関法で運動量フラックスを求めるための熱線風速計(KANOMAX)と, クローズドパス渦相関法によってCO₂と水蒸気フラックスを求めるための空気取り入れ口を設けた。取り入れ口からクローズドパスガス分析計(CIRAS-SC, PPsystems)までは長さ90cmのテフロンチューブで結んだ。渦相関法に用いる乱流量の信号は10Hzのローパスフィルターを通したあとAD変換してパソコンのHDに収録した。

鉄塔の最上部に日射計(英弘精機; ML020V), 純放射計(英弘精機; CN-11), 雨量計, 風向計(自作, 16方位)を設置した。また, 樹冠部葉温測定のための放射温度計(堀場製作所, IT-340)を14mの高度に設置した。潮位は近くに圧力センサーによる水位計(Phoenix Int製)を設置して測定した。これらのデータは塔の下部に設置した2台のデータロガー(Campbell Sci.; CR10)を通じてパソコンに収録した。そのほか, 1997年7～8月については土壌水分, 土壌塩分の測定を, また近くの入り江で水温(2深度)の測定と塩分濃度の測定を限られた期間について行った。

測定結果の予備的なものを, 深川ほか(1997)と浜田ほか(1998)および鱧谷ほか(1998)(いずれも日本農業気象学会全国大会講演要旨)に基づいて示す。なお, 1994年7～8月(雨季)と1995年12月～1996年1月(乾季)の結果については, それぞれMonji et al.(1996)とMonji et al.(1997)に結果が述べられている。

1996年12月～1997年1月の観測期間は乾季の初めのころであり, 天気は晴れで, 雨はほとんど降らなかった。降雨が観測されたのは2回でいずれも1mm程度の小雨であった。1997年7～8月(雨季)にはその前の乾季とほぼ同様の観測を行った。この時期は雨季ではあったが, 降雨のある期間とない期間が繰り返して訪れ, およそ2週間程度の周期が認められた。降雨日には日雨量が数10mmという土砂降りの状態が続き, 最大日降雨量は100mmに達した。

降雨のない日の気象要素の日変化は乾季の状況とほぼ同じ傾向を示すが, 乾季のようにまったく雲の発生しない状態は長続きせず, 日射量や純放射量は耐えず激しく変化している。また, 降雨のある期間は日射は小さな値をとり, したがって気温も低い状態が続く。風速は, 乾季にくらべて雨季の, 特に天気の悪い日には大きな値を示した。(1.36)式を用いてフラックスを求めるには係数を決定しておく必要がある。乾季のデータについて, h_m を R_i の関数としてプロットした結果については1.3.3節で述べた。図2.11にはこの式を用いて計算した顕熱フラックスと直接渦相関による $\overline{w'T}$ とを比較した例を示す。両者の値には差があり, h_m から求める方法も精度に限界があることがうかがえる。

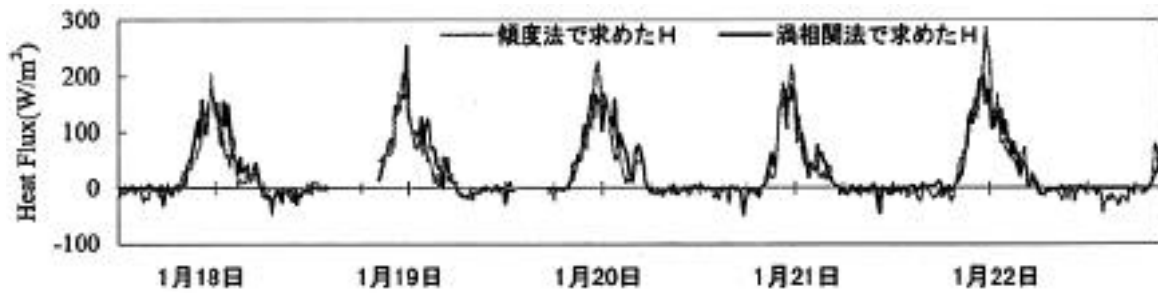


図2.11 m_h と R_i との関係に基づいて求めた顕熱フラックスと渦相関法によるフラックスの比較(深川ほか, 1997)

マングローブ林の微気候は主に熱収支によって決定される。図2.12に乾季の代表的な期間の変化を示す。この図からわかるように顕熱フラックスと潜熱フラックスの両者を加えても純放射に達していない。これは、群落に蓄えられる熱量がかなり大きいことを意味する。群落といっても単に樹木だけでなく、群落内の大気、土壤に蓄えられるほか、常に潮の干満によって出入りする水によっても輸送されている可能性が大きいので、付近の水温を測定し解析を進めている。ただし、熱収支が閉じず、常に $R_n > H + E + G$ となる観測はさまざまな森林で報告されており貯熱量の評価を正確にするだけでは解決しない問題が含まれている可能性がある。

図2.12には雨季の晴天日のについても顕熱および潜熱フラックスの時間変化の1例を示している。晴天日には日中、顕熱フラックスは大きな正の値を示す。ここには示していないが雨天日には顕熱フラックスは負の値、すなわち、夜間と同じように大気から森林に向かって熱が流れる。雨天日(ここには示していない)には時によっては潜熱フラックスが大きな正の値を示すが、これはこの負の顕熱フラックスによって支えられているものと考えられる。

1.3.3節で示したように、勾配 m_h と安定度の関係が得られているので、これを用いて CO_2 フラックスの評価を行った。その日変化例を図2.13とに示す。雨季の結果は晴天日についてはほとんど乾季と同じ特徴を示した。しかし雨天日(ここには示していない)には日射が弱いのでその分だけ CO_2 フラックスも小さかった。日射量と CO_2 フラックスの関係を図2.14に示す。 CO_2 フラックスがゼロとなる光補償点はおよそ $50 W m^{-2}$ である。また日射量が増大してもそれ以上フラックスが増えない光飽和はばらつきは大きいがおおよそ $-0.5 mg m^{-2} s^{-1}$ であるといえる。フラックスは同じ日射量では風速が大きいほど大きい傾向があることもわかった。

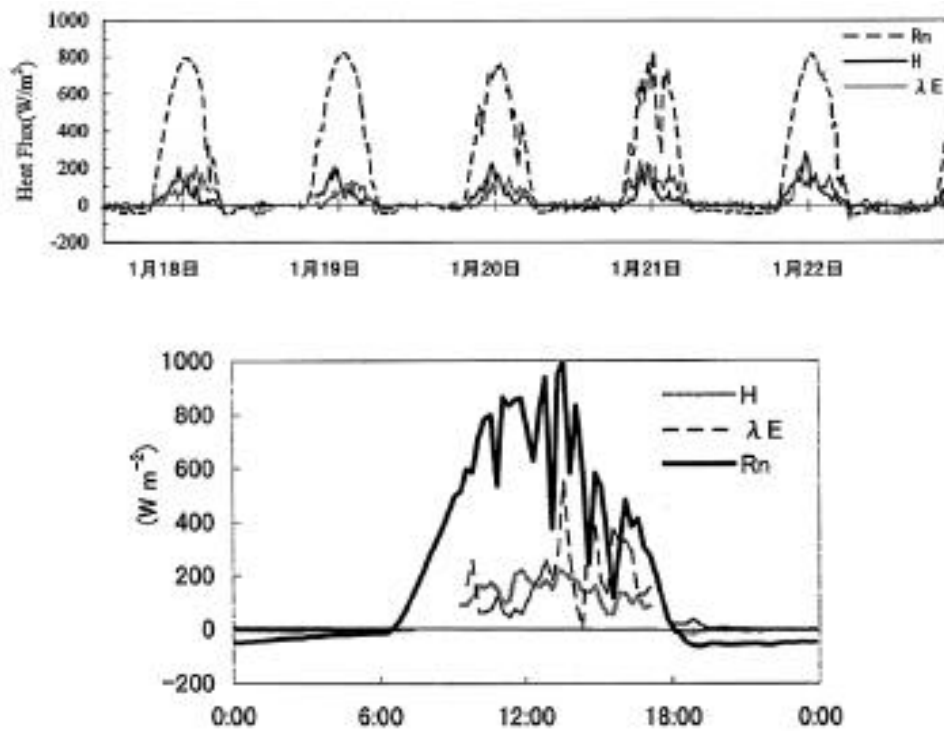


図2.12 改良傾度法で求めた乾季(上図)と雨季晴天日(下図)のマングローブ林の熱収支項の日変化例(深川ほか, 1997, および浜田ほか, 1998)

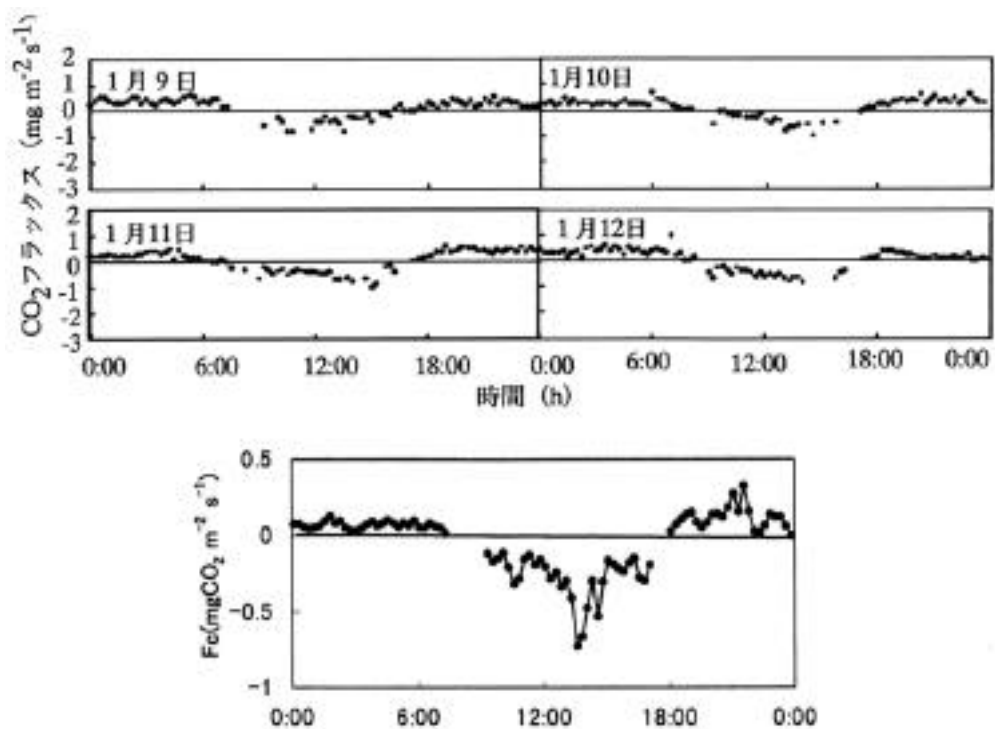


図2.13 改良傾度法で求めた乾季(上4図)と雨季(下図)におけるマングローブ林のCO₂フラックスの日変化例

上段の4図は鱧谷ほか(1997), 下図は浜田ほか(1998)による.

群落におけるCO₂濃度分布の時間変化を図2.15に示す。早朝は群落の上でも上空が濃度が低くなっているのに対し、日中は群落上ではほとんど濃度差が認められない。一方群落の中では、葉面積密度が高い層に対応して、光合成が活発に行われていることを示す低濃度層が現われている。

マングローブ林の観測にかかわるこれまでのデータはここには一部しか示せなかったが今後解析を進めて近く公表する予定である。

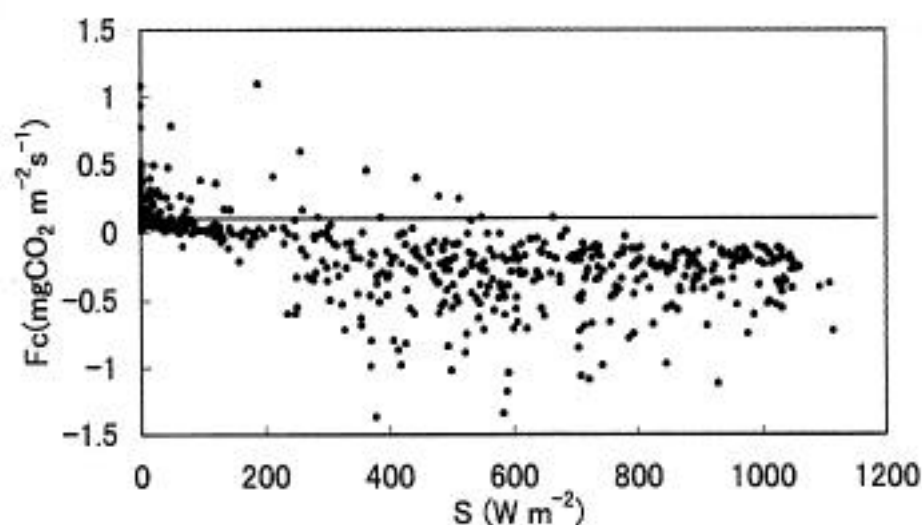


図2.14 改良傾度法で求めたマングローブ林のCO₂フラックスと日射量との関係
(深川ほか, 1997)

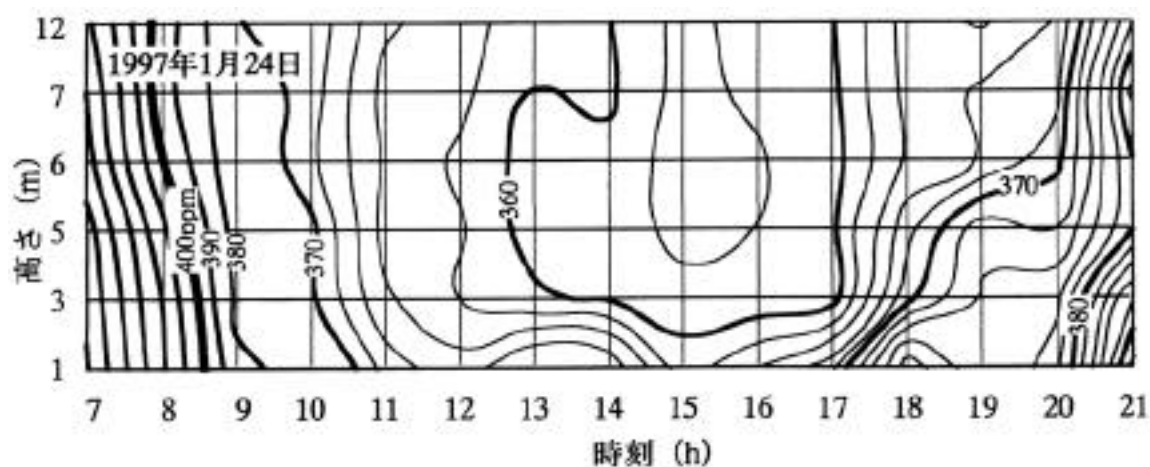


図2.15 マングローブ林内のCO₂濃度の日変化例(鰐谷ほか, 1997)

群落高は約7 m

2.4 単純でない地形上での観測

地形が傾斜している時や，複雑な地形での流れの方向への座標変換については1.1.4節に述べたが，ここでは実際の例(文字ほか,1999)について報告する。

滋賀県南部の森林内にある京都大学農学部の実験施設の鉄塔において行った測定例についてのべる。測定地点の地形は図2.16のとおりである。地形はおおむね北に向かって約10度下降している。植生は主に樹高が約15mのヒノキであり，アカマツも点在している。地上から22.6mの高さに設置した3次元超音波風速計(Kaijo ; DA600 TR-61B)によって風速3成分の変動および平均を，細線熱電対温度計(直径50 μ m)によって気温の変動を，赤外線CO₂，H₂O変動計(Advanet ; E009A)によってCQと水蒸気量の変動を測定した。測定は1995年8月初旬の4日間で，この期間の天気は晴れであった。

4日間の測定期間中に風向はさまざまに変化した。風の迎角， $\tan^{-1}(W/U)$ ，と風向との関係を図2.17に示す。ここにWとUはそれぞれ風の鉛直成分と水平成分の30分間平均値である。地形が北に向かって下降しているので北寄りの風が吹き上げ(図中プラス側)となっている。また，西寄りと南南東の風の時が吹き下り(図中マイナス側)である。風の迎角は大気の安定度など地形以外の要因によっても左右されることが考えられるので必ずしも風向と迎角の関係は一意的とはなっていない。時々大きな迎角を示すこともあるが，地形が約10度の傾斜をもっていることから，迎角もほとんどが10度以内に収まっている。

図2.18の(a)～(e)はそれぞれ w ， $\overline{u'w'}$ ， $\overline{w'T'}$ ， $\overline{w'q'}$ ， $\overline{w'c'}$ に対する座標変換の効果をも風速鉛直成分の標準偏差， u' ， w' ， T' ， q' ， c' はそれぞれ風向方向の風速，鉛直風速，気温，比湿，CO₂濃度の変動成分である。縦軸は1.1.4節の変換式(1.17)(1.18)に基づいて座標変換を行った値(添字c)と変換を行わない値(添字u)の差を変換を行った値で割ったものを示している。座標変換は，まず1つのラン(約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った。いずれのフラックスも迎角が正(吹き上げ)で大きいほど，変換の効果が正の向きに大きくなる。これはuとwの相関が常に負であるため，たとえば $w'T'$ の変換であれば補正項として現われる $u'T'$ の符号が $w'T'$ と逆になるためである。

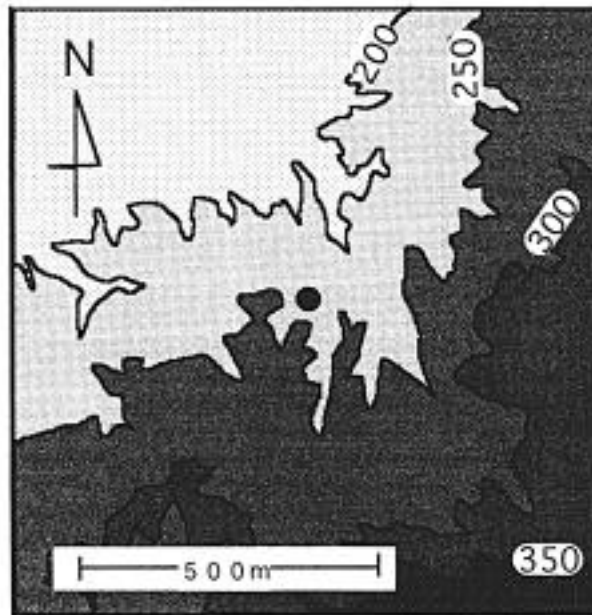


図2.16 観測地付近の地形
は観測塔の位置

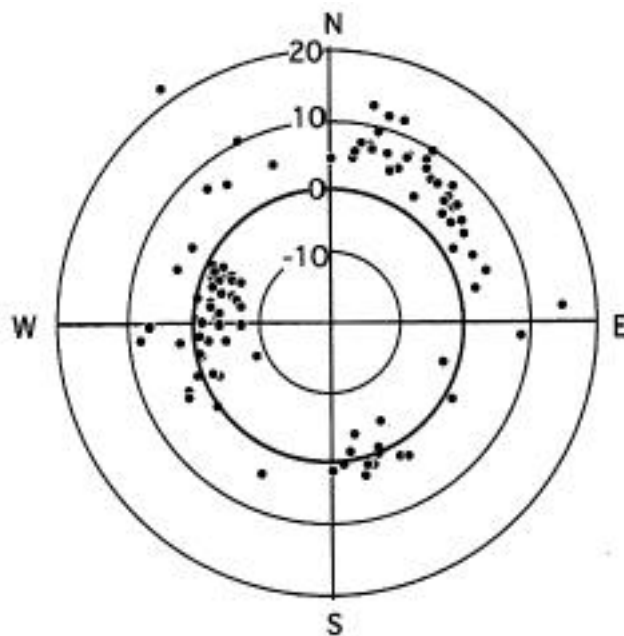


図2.17 風の傾角の方向による変化

単位は度で，zeroより外側は上昇流を，内側は下降流をあらわす。

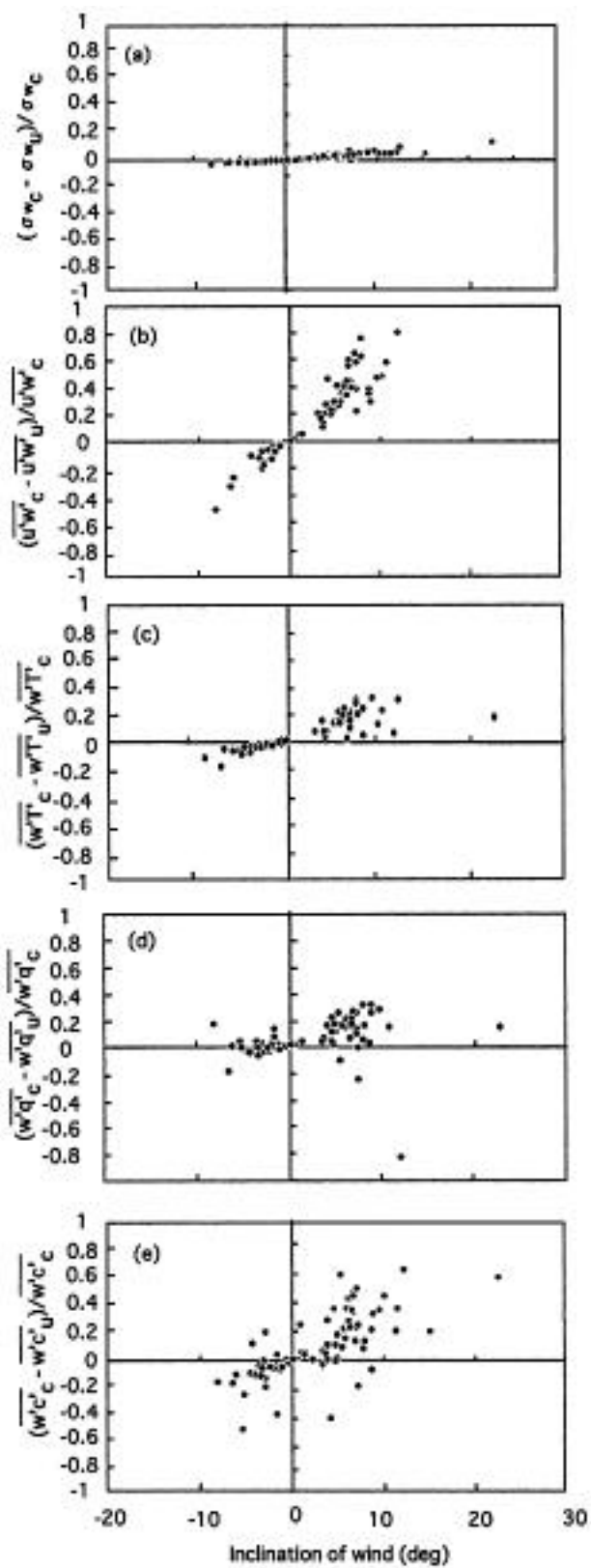


図2.18 座標変換をした場合のフラックスの変化の風の傾角への依存性
(文字ほか, 1999)

図からわかるように、鉛直風速の標準偏差 w については座標変換の効果は数%であり、補正の必要は実質的にはほとんど無いことがわかる。また、共分散については座標変換の効果が $\overline{u'w'}$ において大きいことがわかる。これは、座標が傾いていると u および w の両方に影響があり、特に u 成分が w に入るため $\overline{u'^2}$ が $\overline{u'w'}$ へ影響を及ぼすことが誤差が大きくなることの原因である。スカラー量である $\overline{w'T'}$ や $\overline{w'q'}$ に対する効果は10度程度の風の迎角があっても約30%程度にとどまっているが、 $\overline{w'c'}$ についてはそれよりも大きな差が出ている。 $\overline{w'c'}$ の変換においては、密度変動補正に含まれる $\overline{w'T'}$ と $\overline{w'q'}$ のそれぞれに対して座標変換したものをを用いているので、その効果が蓄積した可能性がある。また、地形補正に現われる項 $\overline{u'c'}$ に対する密度変動補正はどうするかという問題が残る。地形変換と密度変動補正の両方を行うときは補正を行う順序も含め、さらに検討が必要である。

同じ風の傾きに対して図が大きくばらつく理由については、地形が単に傾斜しているだけでなく非一様であることも影響したり、また、安定度の影響の可能性も考えられるが、この解析ではその原因を明確にはできなかった。なお、フラックスの値にはゼロ近辺の値が多く含まれており、分母の値がゼロに近いと不確定な値となるので図2.18の計算には分母(変換後の値)がその絶対値の約1/3以下の小さなものは除外した。

図のような形で共分散の誤差をみると、数10%を超えるような大きな値となることがあるが、実際に重要なのはどの程度の誤差がフラックスの値そのものに現われるかということである。そこで、フラックスの値がどれくらい座標変換によって変わるかを $\overline{u'w'}$, $\overline{w'T'}$, $\overline{w'c'}$ について図2.19に示した。 $\overline{u'w'}$ については大きなばらつきを示すが、スカラー量のフラックスは座標変換の影響の受け方が少ないことがわかる。 $\overline{u'w'}$, $\overline{w'T'}$, $\overline{w'q'}$, $\overline{w'c'}$ の値の平均2乗誤差は、それぞれ $0.0558 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 0.0185 m s^{-1} , $0.00556 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$, $0.0615 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。これらのうちスカラー量についてはいずれも代表的な値 ($\overline{w'T'} \sim 0.2 \text{ m s}^{-1}$, $\overline{w'q'} \sim 0.04 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$, $\overline{w'c'} \sim 0.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) の十数%以内にとどまっている。

一般に複雑地形上の乱流はモーニン・オブコフの相似則に従わないと考えられている。特に森林など大きな粗度上のフラックス測定はよほど群落から上に離れないと正しい値が得られないことが指摘されている(例えば, Kaimal and Finnigan, 1994)。

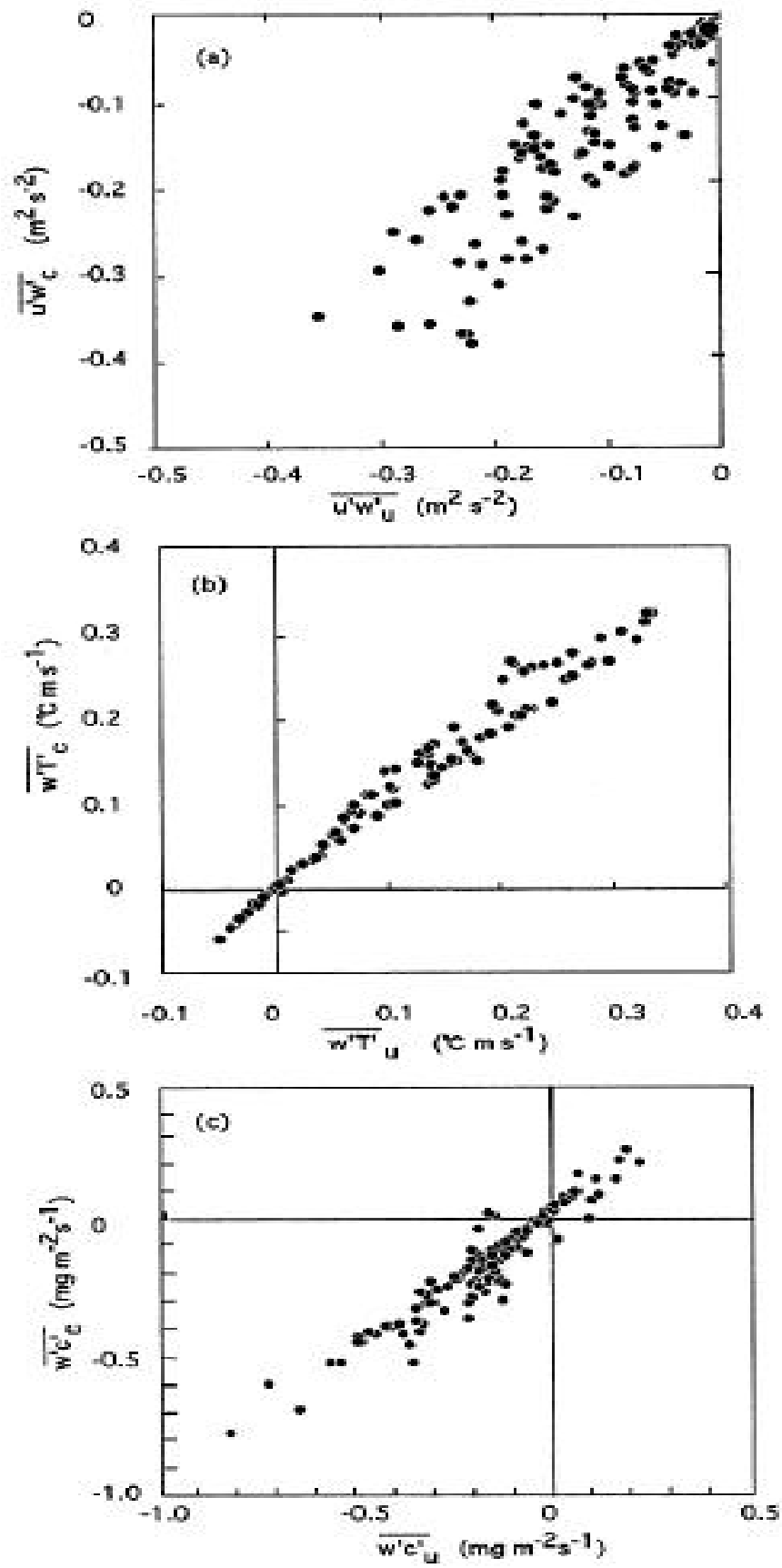


図2.19 座標変換をする場合としない場合のフラックスの比較(文字ほか, 1999)

確かに、フラックスと勾配との関係は複雑地形上で測定しても単純な形では求められない。しかし、乱流統計量の間関係については相似則が成り立つ可能性がある。例えば、図2.20に示すように w/u^* と z/L の関係などはある程度のばらつきはあるものの一様で平坦な地面上の性質を保持している。また、図2.20の二つの図を比べて見ると座標変換したほうがばらつきが小さくなっている。しかし、変換を行わなくても平均的には中立時に w/u^* は1.3という値をとり、不安定時には1/3乗則から大きくは離れない変化を示していることもわかる。なお、ここでは安定度が中立付近をよく見るために線形座標で示している。 w はほとんど座標変換の影響を受けない(図2.20(a))ので、座標変換にともなう変化は主に u^* の変化によるものである。不安定大気中で $(z-d)/L$ が負の大きい値をとるときは u^* の影響は消えるので座標変換の影響はほとんど発生しないことになる。ここで、モーニン・オブコフの長さ(L)に含まれる浮力には湿度変動も含めた仮温度を用いた。また、 d は地面修正量で、群落の高さの70%(10m)と仮定した。

ここには示していないが、 τ/T^* についてはほとんど座標変換の影響は現われなかった。また、 q/q^* や c/c^* については座標変換の有無にかかわらずこの観測では $(z-d)/L$ の関数とはならなかった。

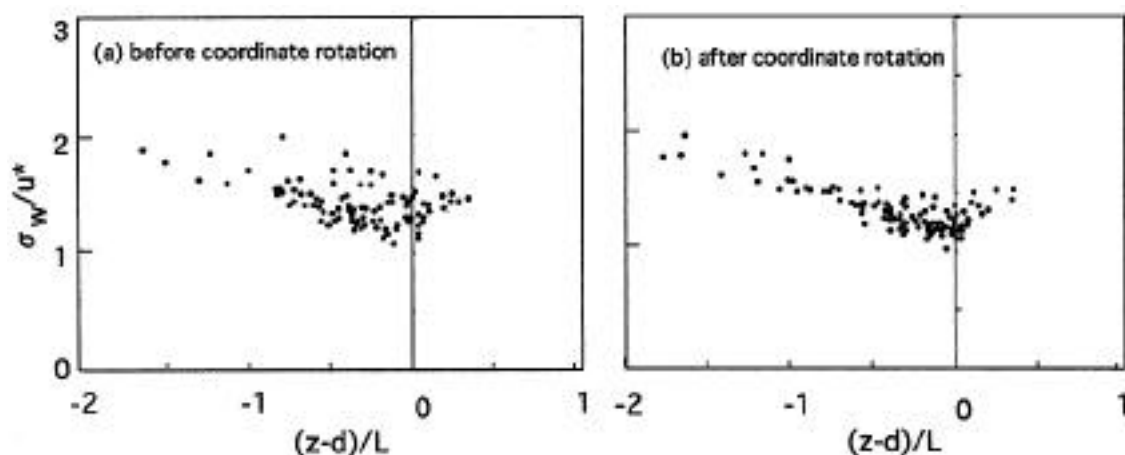


図2.20 座標変換をしない場合とした場合の w/u^* のと $(z-d)/L$ との関係の相違
(文字ほか, 1999)

結論としては、座標変換による変化の割合という点では場合によっては大きな値を示す結果となっているが、フラックスそのものの値を見ると $\overline{w'T'}$ 、 $\overline{w'q'}$ 、 $\overline{w'c'}$ の変化の範囲は平均2乗誤差が代表的なフラックスの値の十数%であることを考えると実用上補正しなくても問題がない場合も多いと考える。すなわち、この程度の精度で許容できる場合には3次元風速計を用いなくても1次元で測定可能であり、また煩雑な座標変換も行わなくても評価できるといえる。

$\overline{u'w'}$ については $\overline{w'T'}$ 、 $\overline{w'q'}$ 、 $\overline{w'c'}$ などスカラー量のフラックスに比べて大きな誤差となるので注意が必要である。また、 w/u^* と $(z-d)/L$ の関係にも座標変換の効果が現われている。しかし、座標変換を行わなくてもばらつきが大きいだけで、一様平坦地形上の性質を維持している。目的や要求される精度によっては座標変換を含めなくても相似則が成立しているともいえる。

ここで解析の対象としたのは傾斜が約10度の地形であったが、急峻な地形では浮力が鉛直に働くことも要因として考慮しなければならないかも知れず、また、樹木も斜面と大きな角度を持つようになり、単なる機械的な変換では不十分となる可能性もある。