

B-4 森林の二酸化炭素吸収の評価手法確立のための大気・森林相互作用に関する研究

(3) 微気象学的方法による森林生態系の炭素収支の高精度化

農林水産省農業環境技術研究所

環境資源部 気象特性研究室 原蘭芳信・宮田明・永井秀幸・鈴木智恵子・太田尚寿

平成11～12年度合計予算額 9,959千円

(うち、平成12年度予算額 4,970千円)

〔要旨〕 Ameriflux, EUROFLUX, AsiaFluxなどのフラックスネットワークでは、陸上生態系の炭素収支評価のうえでもっとも重要な生態系-大気間のCO₂フラックスの測定に渦相関法が用いられている。本研究では、渦相関法による森林生態系の炭素収支の評価を高精度化するため、渦相関法の適用上の問題点の検討、データ処理・解析方法の改善や補正方法の検証、異なる測定システム間の相互比較などを行った。苫小牧フラックスリサーチサイト（北海道苫小牧市、苫小牧国有林内、カラマツ林、98ha）の高さ41mに設置したオープンパス方式の渦相関システムによる観測データをもとに、データ処理・解析方法や補正方法について検討した。その結果、超音波風速計の座標変換やトレンド除去を適用する場合には、測定システムの点検（超音波風速計のゼロ点調整）やデータの質の確認（異常値やステップ状の変化がないこと）が必要なことや、密度補正の重要性が確認できた。とくに、密度補正の影響は吸収フラックスが大きくなる7月中旬でも50%を越えることがあり、日中のCO₂交換量を正確に評価するためには密度補正は不可欠である。同サイトの高度25mで実施した3組の渦相関システムの相互比較観測の結果から、超音波風速計のプロブの形状によっては、主風向成分の風速を過小に評価する可能性があること、システム間のCO₂フラックスのばらつき（標準誤差）は、日中の最大吸収量の10%強であることが示され、またオープンパス型ガス分析計の厳密な校正の重要性が指摘された。

〔キーワード〕 渦相関法、CO₂フラックス、オープンパス型、密度補正、カラマツ林

1. はじめに

1997年12月に気候枠組変動条約第3回締約国会議(COP3)が開催され、森林生態系と大気とのCO₂交換量を精度よく求め、CO₂排出量規制に組み込むことが合意された。COP6では森林以外の生態系の温室効果ガス収支も勘定に含めることが合意され、CO₂排出量の国別の規制値とその具体的削減方法が協議される見通しである。COP6以後の政府間協議をささえる科学的知見とするために、ヨーロッパ諸国ではEUROFLUXが、アメリカ合衆国とカナダではAmeriFluxがそれぞれ陸上生態系におけるCO₂吸収量を把握し、政府間協議に資するためのデータ蓄積と科学的知見の集約がなされつつある。また、東アジア地域でも、1999年にAsiaFluxが発足した。これらのCO₂フラックス観測ネットワークにおいて標準の観測方法とされているのは渦相関法である。日本は、渦相関法によるフラックスの測定に不可欠な超音波風速計や応答性の速いガス分析計の開発において、先駆的な研究開発を行ったにもかかわらず、渦相関法による観測精度を疑問視する主張があったことと、観測のための測器の調達や長期観測に経費がかかること、などの理由から、渦相関法の野外观測への適用に関する研究や、長期観測によるデータの蓄積が十分になされてきたとは言い難い。本研究課題では、渦相関法による森林生態系の炭素収支評価の高精度化を

目指して、渦相関法を日本の森林生態系に適用する場合の問題点や、長期連続観測において必要な補正方法、異なる渦相関システムを用いることに起因する誤差について検討する。

2. 研究目的

渦相関法によるフラックス測定は、測器が高価であることや計算負荷が大きいというデメリットがあるにもかかわらず、輸送過程に関する仮定を設けることなく精度の高いフラックスが得られることから、AmeriFluxやEUROFLUXでは標準的観測手法と位置づけられている。しかし、測器の発達や観測結果の蓄積により、実際の適用上のさまざまな問題点が指摘されている。渦相関法によるCO₂フラックスの測定方法は、オープンパス型のCO₂分析計を用いる場合と、試料空気を吸引してセル内の濃度を測定するクローズドパス型のCO₂分析計を用いる場合とに大別できる (Leuning and Judd, 1996)。オープンパス方式は、試料空気のサンプリングにともなう時間遅れや、サンプリングチューブやセル内で濃度変動の高周波成分の減衰がないことから、測定原理に忠実な測定方法といえる。一方、クローズドパス方式は、分析計を温度制御可能な場所に設置できるため、天候の影響を受けず、長期間安定した動作ができることや、自動校正が容易なことにより、長期観測に用いられる場合も多い (三枝, 2001)。オープンパス方式とクローズドパス方式の観測システムの比較は報告されている (文字, 2000; 三枝, 2001) ので、本課題では対象をオープンパス方式に絞り、フラックスの高精度評価に関する問題点の検討を行う。

渦相関法の適用上の問題点は、地形や測器の設置方法に起因する問題、測器が理想的でないことに起因する問題、データの収録や後処理、解析にかかわる問題などに分類できる。以下で概説するように、このうちのくつかの問題については、得られたフラックス値を補正する、という方法で解決が図られている。Webb et al. (1980)はオープンパス型のCO₂分析計を用いる場合に、上下運動する空気塊の密度の差異が見かけのフラックスとして観測されることを指摘し、その具体的補正方法を示した (密度補正)。近年実施されているBOREAS, AmeriFlux, EUROFLUXなどの総合的なフラックス観測では、データ処理において密度補正を組み込んでいる。また、1980年代初めに開発されて以降、世界で広く使われてきたE009シリーズ (アドバネット) のように、水蒸気とCO₂の赤外吸収帯が完全に分離できていないガス分析計の場合には、CO₂フラックスの計算過程でこれを補正する必要があるとされている (ガス分析計の相互感度の補正; Leuning and Moncrieff, 1990)。1998年に開催されたアメリカ気象学会の農林気象学会でのFLUXNET関連発表では、sensor separation (大気が安定な夜間などには風速センサと濃度センサの位置が離れている場合、コスペクトルの高周波成分の相関がなくなる) やline averaging (センサがある長さを持つため、風速や濃度の変動の高周波成分を平均化する影響) がフラックスの計算に及ぼす影響を考慮した補正 (Moore, 1996) も一般化した (原田ら, 1999) といえる。

最近のAmeriFluxやEUROFLUXなどのフラックスネットワークでは、以下の2点が議論されている。第一は、地形が平坦でない場合や、測器配置により気流が傾いた状態でフラックスが評価される場合の問題である。たとえば傾斜した観測サイトの生態系-大気間の炭素収支を議論する場合には、水平面を横切る物質移動量よりも斜面に平行な平均流を横切る物質移動量を測定したい。このため、座標軸の回転による補正がなされるが、長期間の連続観測では、わずかな傾斜を持つ観測サイトでも、夜間の重力流などの移流による影響が無視できず、座標変換以外の補正も重要となっている。第2の問題は、鉛直移流量の補正 (Lee, 1998) である。森林などでは渦相関法の測定高度が高いため、その高度における平均鉛直流にともなうCO₂の鉛直輸送量が、とくにCO₂の鉛直勾配が拡大する夜間には無視できない大きさになる。ここで、平均鉛直流とは、

超音波風速計の傾きや気流のねじれ (flow distortion) による見かけ上の鉛直風速ではなく、地表面の不均一さによって生ずる水平流の収束・発散や、地表面の起伏によって生ずる斜面風などが原因で誘起されるものと説明されている。しかし、観測やデータ解析から平均鉛直流を決定することが難しく、超音波風速計のゼロ点調整のずれや、設置の傾き、気流のねじれによる測定上の誤差が避けられないなかで、平均鉛直流をどう評価するかについては、まだ多くの議論の余地がある (PawU, *et al.*, 2000)。この鉛直移流の評価により夜間のCO₂の放出フラックスが増大し、年間のCO₂収支がモデル計算と同等になった事例が報告されている。なお、鉛直移流量を評価するためには、渦相関法によるフラックスの測定と同時に群落内外での平均濃度プロファイルの測定が不可欠になる。

このように、渦相関法の適用上の問題点が世界的に議論され、CO₂フラックスの評価精度向上のための方策 (補正方法) が提唱されているなかで、日本ではフラックス観測に関するネットワーク化が遅れたこともあり、渦相関法で測定されたフラックスに補正を加えることについての議論は少なかった。本研究では、苫小牧フラックスリサーチサイト (後述) の観測データに関して、上述の処理方法の影響や補正量の大きさを把握するとともに、森林生態系の炭素収支を高精度で求めるための方法について検討する。

フラックスネットワーク観測においては、特定のサイトの炭素収支を高精度で測定するだけでなく、サイト間の炭素収支の比較も重要な目的である。1999年に発足したAsiaFluxでは、渦相関法によるCO₂フラックスの測定を中心とした観測が各観測点で実施されているが、実際に使用している超音波風速計やガス分析計の機種は統一されていない。異なるシステムを用いた観測点相互間のデータの比較を行うためには、システムの違いに起因するフラックスの測定値の違い (系統的な差やばらつき) について、あらかじめ検討しておく必要がある。本課題では、代表的な3組のオープンパス型渦相関システムの相互比較観測も主要課題とし、苫小牧フラックスリサーチサイトで実施した。これまで、このような比較測定が実施された例は少ない (Twine *et al.*, 2000; Ishida *et al.*, 2001)。

3. 研究方法

(1) 渦相関法のデータの処理や解析における問題点や補正方法の検討

本研究は、森林によるCO₂吸収の長期モニタリングを目的として、国立環境研究所地球環境センター (CGER) が国有林野内に設置した苫小牧フラックスリサーチサイトで実施した。観測点付近は平坦で起伏が少なく、樹種は樹齢約40年のカラマツ林が占めており、樹高は18~20mである。苫小牧フラックスリサーチサイト内には、フラックスモニタリング用の「フラックスタワー」 (高さ41m) と、植物生態学的研究用の「エコタワー」 (高さ25m) が設置されている。

フラックスタワーの高さ41mに、超音波風速温度計 (Kaijo, DA-600) とオープンパス型赤外線ガス分析計 (OP2, Data Design Group) を設置が設置され、渦相関法による観測が行われている。30分毎に27分20秒間のサンプリングを10Hz (もしくは20Hz) で行い、その生データを光磁気ディスクに記録している (10Hzの場合で、バイナリ形式で一日当たり15メガバイト程度)。

この方法により、長期観測における時間管理を厳密化するとともに、生データを残すことで、今後の研究の進展にともなう新たな問題にも対処できる。本研究では、以下の手順でデータ処理を行った。1) 超音波風速計の座標変換、2) 1次トレンド除去、3) 乱流統計量の計算、4) スペクトル補正 (Sensor Separation, Sensor line Averagingの補正)、5) 密度補正。これらの手順に含まれる処理、補正がCO₂フラックスの評価に及ぼす影響について検討した。この際、苫小牧フラ

ックスリサーチサイトの観測データだけでなく、水田などの植生条件の異なるデータも含めて検討を行った。

(2) オープンパス型渦相関システムの相互比較

2000年7月10日から14日まで、苫小牧フラックスリサーチサイト内のエコタワーで、3組の渦相関システムの相互比較を実施した。比較に用いた3組の測器は以下の通り。

超音波風速計	オープンパス型赤外線ガス分析計
DA-600 (Kaijo)	E009B (アドバネット)
Solent (Gill)	LI-7500 (LICOR)
CSAT3 (Campbell Scientific)	OP2 (Data Design Group)

3つの超音波風速計のうち、DA-600の感部は、水平面内で120度で交差する2組のプローブと、これらに直交する鉛直成分測定用のプローブから構成されている。SolentおよびCSAT3は、鉛直軸に対して45度 (Solent) または30度 (CSAT3) 傾いた3組のプローブで構成されている。温度 (音速) については、DA-600は鉛直成分の測定から、SolentとCSAT3は3軸の測定から決定している。プローブのスパン長は、DA-600とCSAT3が10cm、Solentは15cm、ガス分析計のスパン長はE009Bが10cm、OP2が20cm、LI-7500は12cmである。各測器の感部は、エコタワー頂上 (高度25m) に、主風向である南を向けて横一列に配置した (図1)。データは10Hzでサンプリングし、同期させた2台のデータロガー (Teac, DR-M3a) で記録し、30分間を1区切りとして統計処理を行った。水蒸気とCO₂のフラックスは、上記の超音波風速計とガス分析計の組み合わせで計算した。観測期間中、7月10日、11日、14日は晴天であったが、12日午前から13日昼過ぎにかけて降雨があった。風向が南を中心に90度以内の時間帯のデータを解析対象とした。また、降雨中および降雨直後のデータは解析から除外した。超音波風速計については、観測前に農業環境技術研究所の風洞で比較測定を実施し、系統誤差がないことを確認した。ガス分析計については、観測サイトで校正を試みたが、校正時の環境温度が変動することによるドリフトの影響が大きく、信頼できる校正定数が決定できなかった。観測前に実験室で行った値を使用した (一部の機種についてはメーカーによる校正値を使用)。

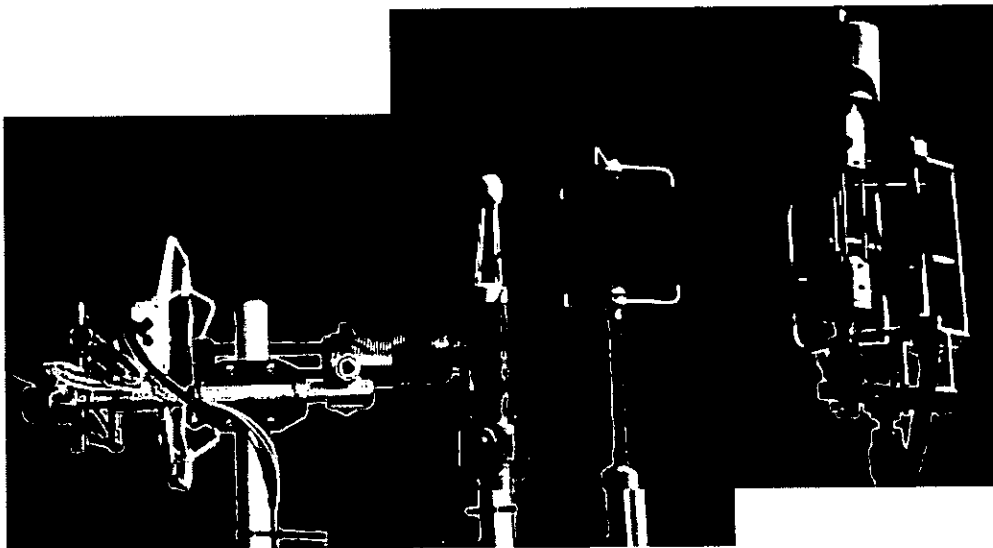


図1 オープンパス型渦相関システムの相互比較観測時の測器配置。右手から、DA-600(Kaijo), E009B (アドバネット), Solent (Gill), LI-7500 (LICOR), OP2 (Data Design Group), CSAT3 (Campbell Scientific)。左端はKrypton Hygrometer (Campbell Scientific)。

4. 結果および考察

(1) 渦相関法のデータの処理や解析における問題点や補正方法の検討

① 超音波風速計の座標変換

超音波風速計が傾いて設置されていて、しかも傾斜角が未知の場合には、しばしば観測データから鉛直成分 (w) の時間平均値をゼロになるように、超音波風速計の座標軸を回転させることが行われる。この座標変換は、水平成分を主風向に向ける回転と同時にされる。この座標変換を無条件に行うと、とくに風速が非常に小さいときには異常な回転角の座標変換が行われ、フラックスの計算に影響を及ぼすことが指摘されている (塚本ら, 2001)。今回の処理では、風速がある程度あるにもかかわらず、異常な回転角が算出される例が認められ、その原因を追求したところ、超音波風速計の鉛直成分 (w) のゼロ点調整が不正確であることが原因であることがわかった。この影響は、スカラー量フラックスよりも、摩擦速度 (u_*) に大きく影響する。とくに、低風速時にはわずかのゼロ調整のずれによって異常に大きな回転角が計算されることになるので、定期的に超音波風速計のゼロ点調整を行うとともに、アンプやデータロガーについてもゼロ点の確認が必要である。また、長期観測で観測点の u_* のおおよその値が把握できていれば、座標変換後の u_* を指標とすることにより、座標変換の妥当性を判定することも可能である。

② トレンド除去上の問題

乱流統計量やスペクトルを正確に計算するためには、トレンド除去が必要とされる (塚本ら, 2001)。今回の解析においては、スパイク状のノイズを含むデータセットが見られた。このような場合に、単純に全データから回帰式を求めてトレンド除去を行うと、平均値がバイアスを受けたようなデータセットとなり、計算される乱流統計量はきわめて大きくなる。したがって、センサの性質や観測場所のノイズレベルにより、データに含まれるスパイク状の異常値の影響を考慮したうえで、トレンド除去を行う必要があることがわかった。オーストラリアのCSIROのグループは異常値をその前後の平常値で置き換えて計算しており、このような方法の一般化が必要である。しかし、今回は、異常値を判別するためのしきい値をどのように設定するのが妥当かについては、検討できなかった。なお、スパイク状のノイズの原因として、電源ノイズ等の他に霧や小雨などの影響も考えられ、後者に関してはクローズドパス方式に比べてオープンパス方式の方が影響を受けやすい。

また、長周波成分 (低周波スペクトル) の寄与をフラックスの計算に十分に反映させるためには、フラックスの計算区間 (平均化時間) を長くとる必要があるが、その時間内に風速や気温、湿度、 CO_2 濃度などにステップ状の変化がある場合 (気団の通過、前線の通過前後に観測される) にも、通常のトレンド除去や平滑化がフラックスを異常にする場合がある。本研究では、このような性質を含むデータについてはトレンド除去を行わず、平均化時間を短くし、ステップ状の変化を取り除く処理を行うことで回避した。

③ スペクトル補正

センサ間距離やセンサの空間大きさの影響を補正するスペクトル補正の大きさは、大気安定度によって変化する。大気安定度には $z-d$ (z : 設置高度, d : 地面修正量) が含まれるので、測定高度によって補正の大きさが異なる。水稻のような低い植生の場合、低風速で安定な夜間には、補正係数が +50% 以上となり、夜間の CO_2 フラックスは補正前に比べて 20~40% 以上増加した。一方、苫小牧フラックスリサーチサイトでは地上 4.1 m で観測しているため補正量は小さく、静穏な早朝でも 1% 以下であった (図2)。群落上の高い森林群落上では、センサ間距離がやや離れていても、あるいはプローブのスパン長が長くとも、フラックスには大きな影響を及ぼさないこ

とが確認された。

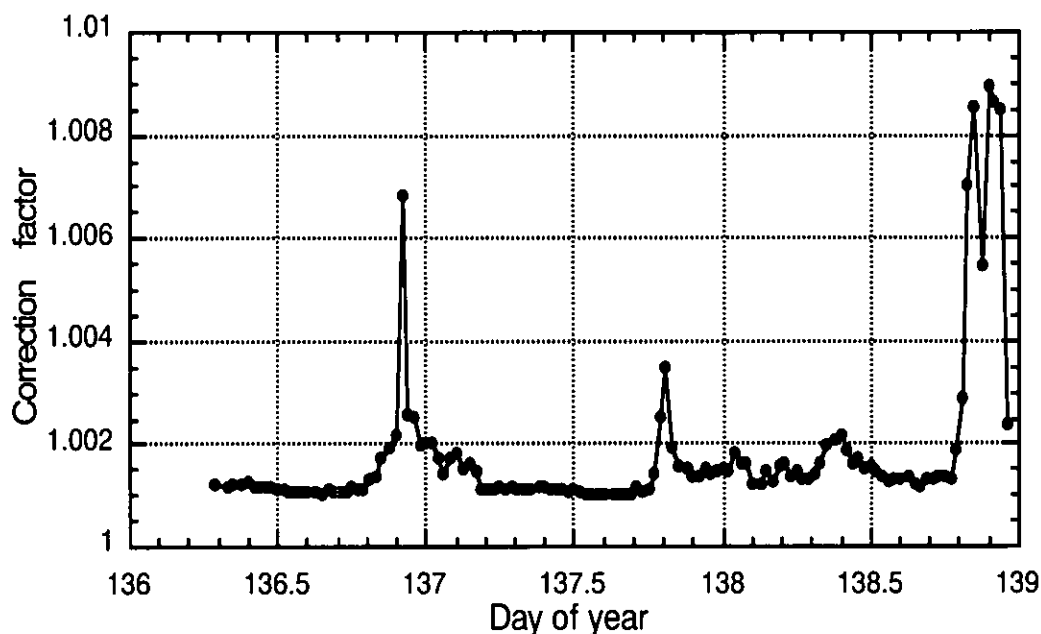


図2 高度4.1 mで測定されたCO₂フラックスに対するスペクトル補正量の見積もり（気象条件に伴う補正量の経時変化）。縦軸は補正のために乗ずる係数で、たとえば1.01は補正量が+1%であることを示す。

④密度補正

2000年5月15日から17日にかけての顕熱フラックス (H)、潜熱フラックス (IE)、CO₂フラックスの経時変化を図3に示す。 H 、 IE の経時変化で明かなように、15日は曇天で16、17日は比較的风速が高く乾燥した晴天日であった。渦相関法の一般的方法で計算した値と、スペクトル補正を加えた値とは、ほとんど差が認められない。これは、上述のように測定高度が高いことによる。一方、密度補正の効果は、顕熱フラックスが大きい日中にきわめて大きくなった。曇天日の5月15日は、補正前は日中0.35 mgCO₂m⁻²s⁻¹程度の吸収フラックスであるが、密度補正を施すと0.1 mgCO₂m⁻²s⁻¹程度の小さい吸収フラックスとなった。これに対して、16、17両日は11時頃からCO₂フラックスは減少し、正午頃には大きなCO₂放出となった。これは午前中植生によるCO₂吸収が僅かに認められるが、強い日射で顕熱が増え、対流とともに群落内部のCO₂が上方向へ輸送されたと見ることができる。観測時期は森林植生の若葉が未発達の状態であることを考慮すると、補正後の数値は妥当性が高い。

一方、2000年7月のエコタワーでの観測例を図4に示す。密度補正の効果はCO₂フラックスの符号（輸送の向き）を変えるほどではないが、日中には密度補正項の大きさが50%を超える場合もあることを示している。なお、図4のデータはオープンパス型ガス分析計としてE009B（アドバネット）を用いた例であるが、CO₂分析計の水蒸気に対する感度が完全に除去されていない影響を補正すると、最大で0.15 mgCO₂m⁻²s⁻¹程度、CO₂の吸収フラックスが増加した(Leuning and Moncrieff (1990) による相互感度係数 $\beta/\alpha=0.001$ として計算)。以上のように、オープンパス方式の渦相関システムにおいて、CO₂フラックスの評価に密度補正は不可欠であることが確認された。

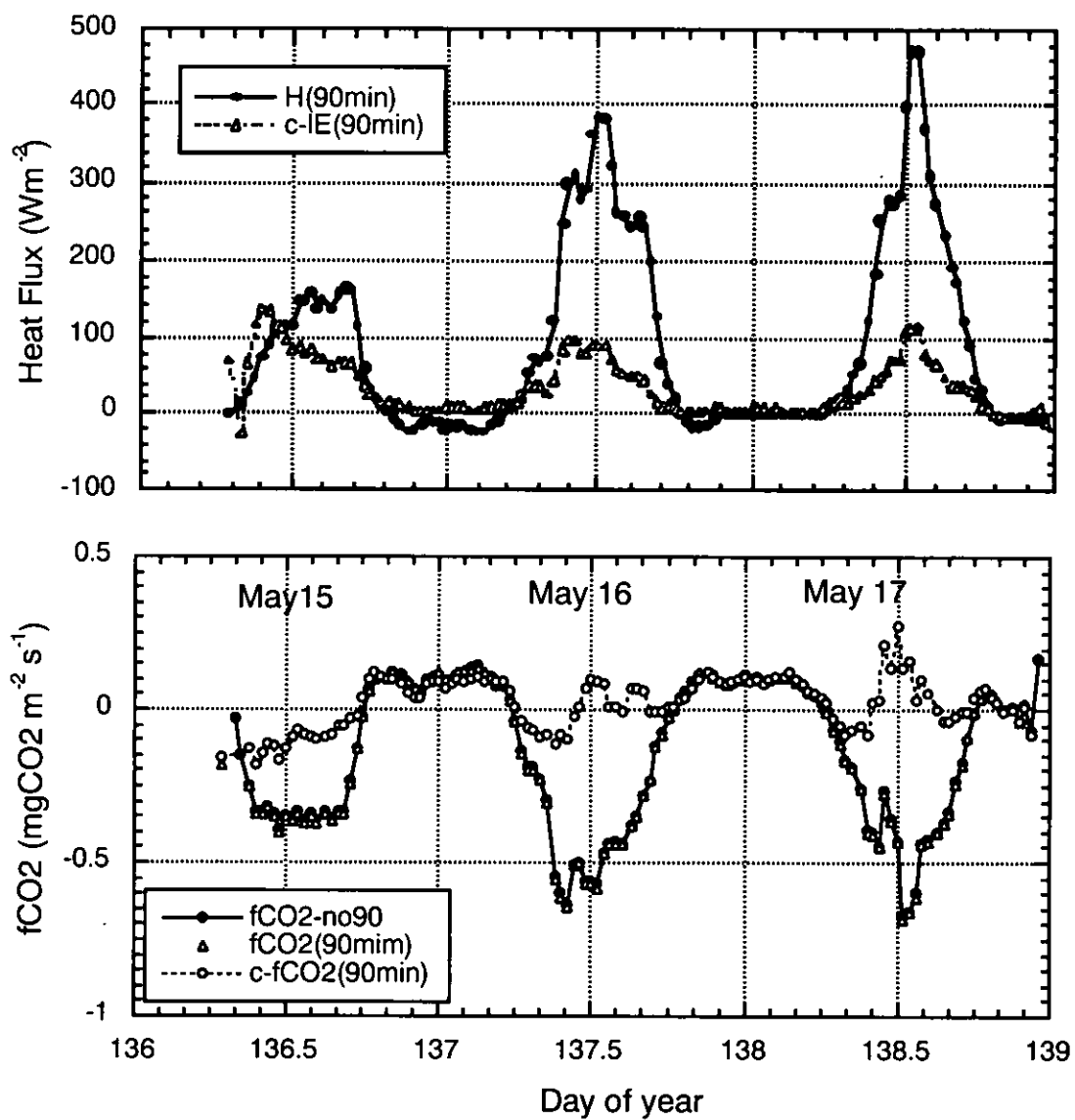


図3 苦小牧フラックスリサーチサイトにおける顕熱，潜熱フラックス（上段）， CO_2 フラックス（下段）の経時変化（2000年5月15～17日）．30分毎に求めたフラックスの3項移動平均を示した． CO_2 フラックスについては，スペクトル補正なし（●），スペクトル補正あり（△），およびスペクトル補正と密度補正あり（○）のそれぞれの値を示した．

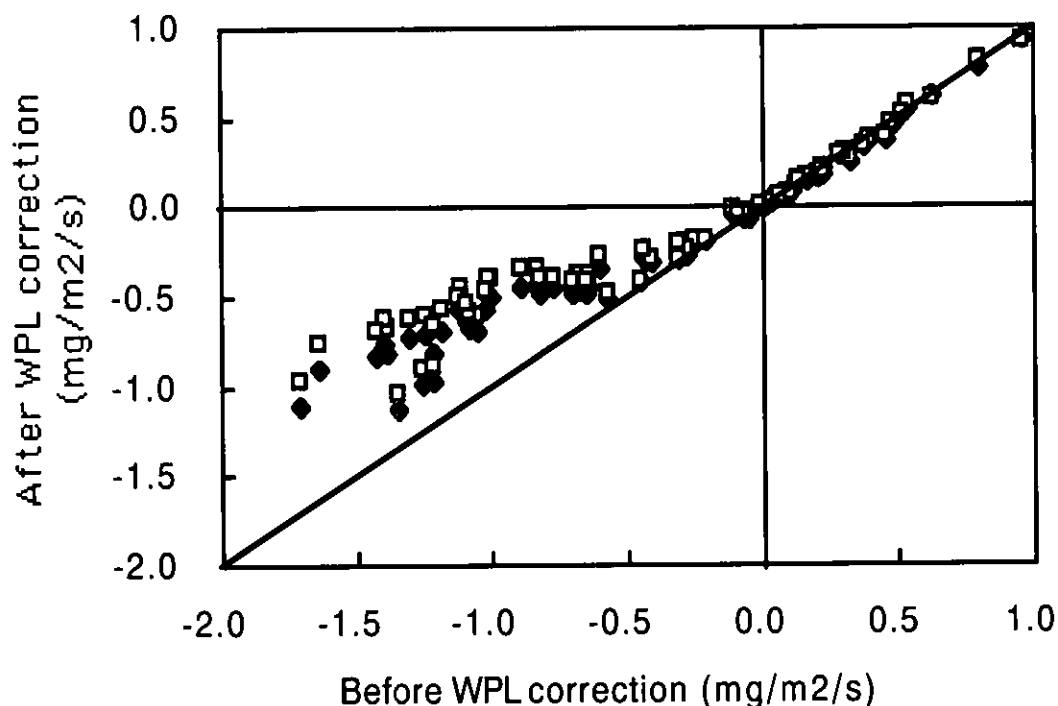


図4 CO₂フラックスに対する密度補正の影響（2000年7月10～14日）．ガス分析計（E009B）の水蒸気に対する感度の影響を補正しない場合（□）と、補正した場合（◆）の値を示す．

(2) オープンパス型渦相関システムの相互比較

①超音波風速計の比較

超音波風速計3機種で得られた風速の主風向成分（ u ）、水平面内で u と直交する成分（ v ）、鉛直成分（ w ）、温度（ T ；音速が出力される機種について、温度に変換した値）を比較した．生データの時系列データを比較すると、3機種ともほぼ同様の変動を示し、高周波ノイズのレベルも同程度であった（ w の比較を図5に示す）．30分間の統計量を比較すると、 v 、 w と T の変動量（標準偏差）は、3機種ともほぼ一致したが、 u については、他の2機種に比べてDA-600の測定値が、平均値で14%小さな値を、標準偏差は19%小さな値を示した（表1、図6）．比較観測前に実施した風洞実験ではこのような機種間差異は認められなかった．一方、韓国Yonsei大学が水田で実施中の比較観測でも、図6と同様の結果が得られている．これらの結果から、風向が変動する野外では、比較観測で使用したDA-600の感部の形状が水平風速の測定に影響を与えている可能性が示唆される．超音波風速計の感部（プローブ）が風速測定に及ぼす影響については、これまででも研究されており（塚本ら（2001）参照）、プローブによる影響（shadow effect）は風向がプローブの測線方向と重なったときに最大になるので、風向や風速が変動する自然風のなかでは、プローブによる影響はほとんど現れないとされているが（Hanafusa *et al.*, 1982）、今回は苫小牧の森林と韓国の水田で、従来の報告とは異なる結果が得られた．

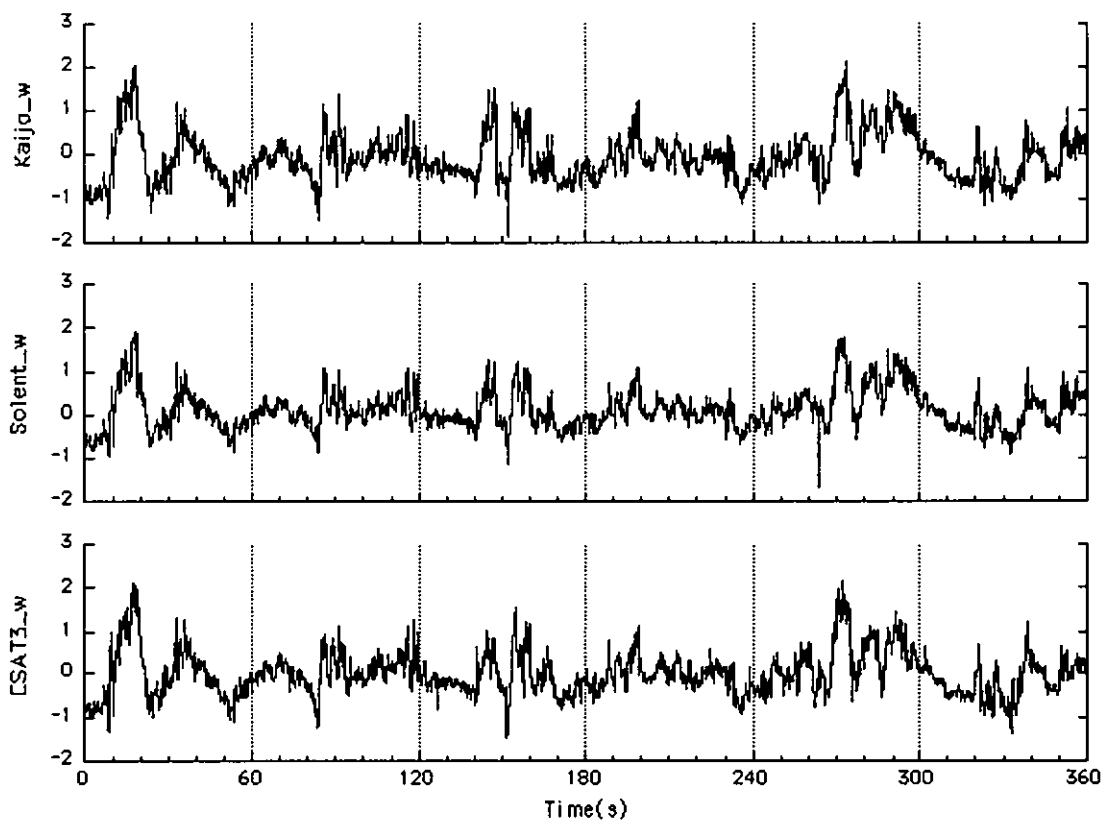


図5 3種類の超音波風速計で得られた鉛直風速 (w) の生データ比較. 200年7月10日15時30分の例. 縦軸の単位は ms^{-1} .

表1 超音波風速計3機種の測定値の比較.

項目 (単位)	基準 / 比較対象	散布図の回帰直線の傾き	散布図の回帰直線の切片	決定係数 (R^2)
u の平均値 (m s^{-1})	Solent / DA-600	0.86	-0.03	0.981
	Solent / CSAT3	0.982	0.04	0.969
u の標準偏差 (m s^{-1})	Solent / DA-600	0.811	0.037	0.922
	Solent / CSAT3	0.940	0.031	0.937
v の標準偏差 (m s^{-1})	Solent / DA-600	1.011	-0.029	0.948
	Solent / CSAT3	1.084	-0.010	0.973
w の標準偏差 (m s^{-1})	Solent / DA-600	1.022	0.029	0.994
	Solent / CSAT3	1.001	0.019	0.993
T の標準偏差 (K)	Solent / DA-600	0.967	-0.010	0.984
	Solent / CSAT3	1.005	-0.017	0.959

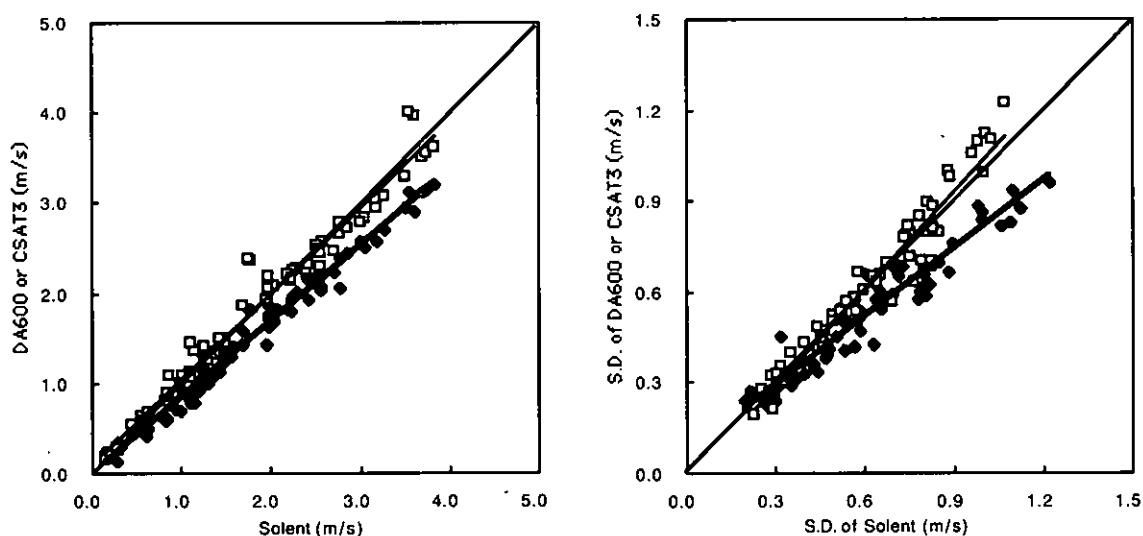


図6 超音波風速計3機種による主風向成分風速（ u ）の30分間平均値（左図）とその標準偏差（右図）の比較．SolentとDA-600（◆），SolentとCSAT3（□）を比較した．

②ガス分析計の比較

オープンパス型ガス分析計3機種で得られた水蒸気濃度（ q ）と CO_2 濃度（ c ）を比較した．生データの時系列を比較すると，3機種ともほぼ同様の変動を示したが，高周波ノイズは機種ごとに大きく異なり，E009Bが最も大きく，LI-7500が最小であった．またE009Bの出力には時間とともに出力が低下するトレンドが認められた（ c の比較を図7に示す）．30分間の統計量の比較を表2に示す．標準偏差を比較すると，E009Bの q ， c はLI-7500のそれらに比べてそれぞれ10%，20%大きく，高周波ノイズの影響と考えられた．一方，OP2とLI-7500を比較すると， q は13%， c は15%，OP2の方が小さかった（図8）．とくに， c の平均値を比較すると，OP2の方が小さいだけでなく，散布図のばらつきも大きかった（ $R^2=0.74$ ）．これらの結果から，OP2の c に対する校正定数が正しく決定されていなかったか，観測実施中に校正定数が変化したことが考えられる．

表2 オープンパス型ガス分析計3機種の測定値の比較．E009Bは平均値からの偏差を出力するモードで使用したので，平均値の比較はできない．

項目（単位）	基準／比較対象	散布図の回帰直線の傾き	散布図の回帰直線の切片	決定係数（ R^2 ）
q の平均値（ g m^{-3} ）	LI-7500／E009B	—	—	—
	LI-7500／OP2	0.981	0.58	0.949
q の標準偏差（ g m^{-3} ）	LI-7500／E009B	1.095	0.026	0.881
	LI-7500／OP2	0.868	0.000	0.958
c の平均値（ $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-3}$ ）	LI-7500／E009B	—	—	—
	LI-7500／OP2	0.773	207	0.740
c の標準偏差（ $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-3}$ ）	LI-7500／E009B	1.208	0.19	0.843
	LI-7500／OP2	0.850	0.05	0.927

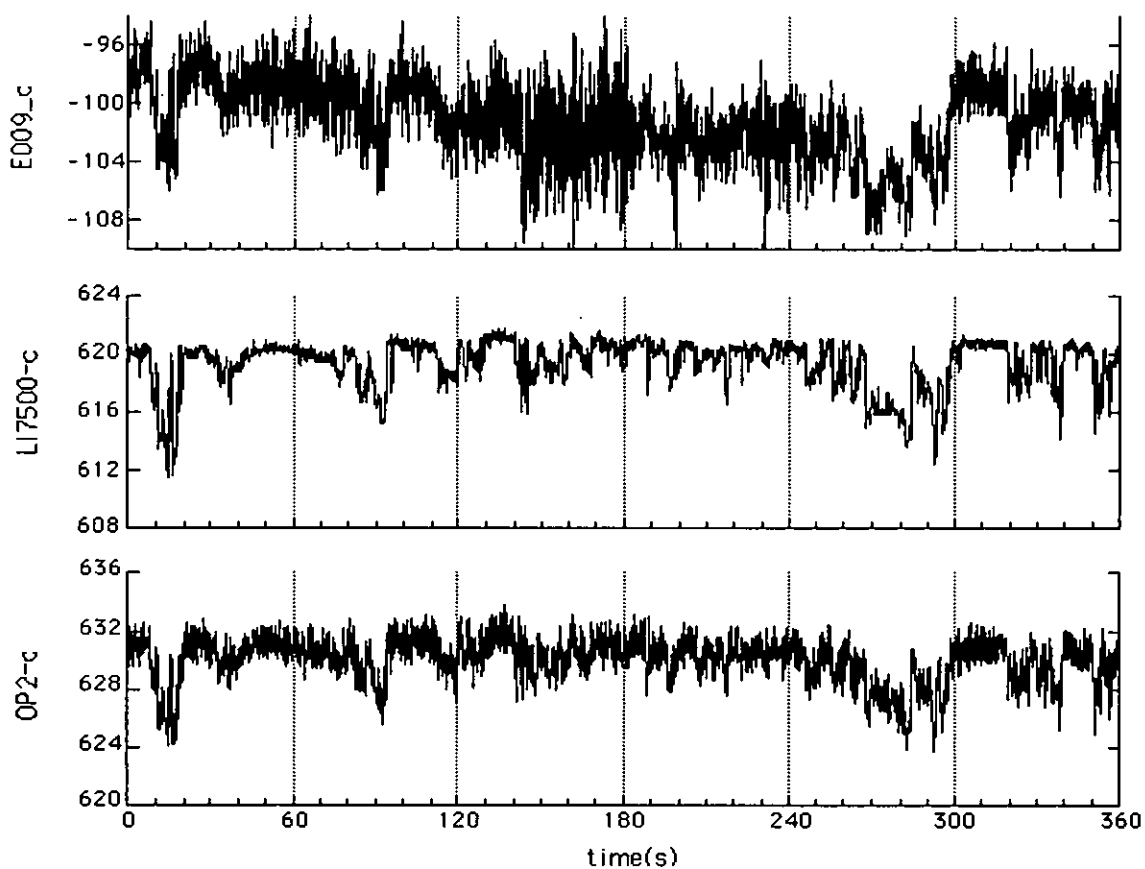


図7 3種類のオープンパス型ガス分析計で得られたCO₂濃度 (c) の生データの比較. 200年7月10日15時30分の例. 縦軸の単位はmgCO₂m⁻³. E009B (上段) の値がマイナスを示しているのは, 平均値からの偏差を出力しているため.

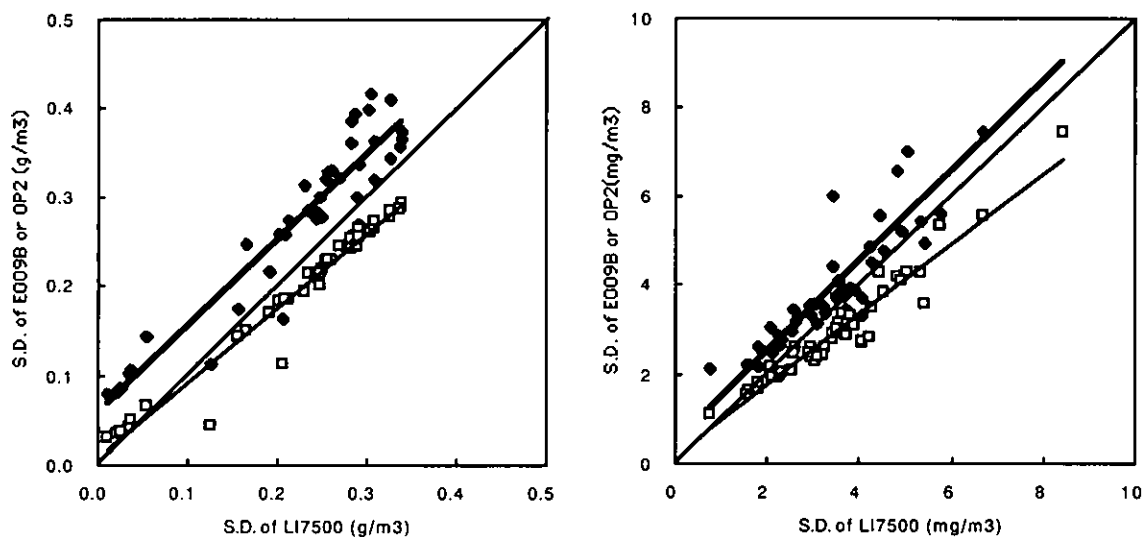


図8 オープンパス型赤外線ガス分析計3機種による水蒸気(左図)およびCO₂濃度(右図)の30分間の標準偏差の比較. LI-7500とE009B (◆), LI-7500とOP2 (□) を比較した.

③フラックスの比較

3組の渦相関システムによる運動量フラックス ($\overline{u'w'}$), 温度フラックス ($\overline{w'T'}$), 水蒸気フラックス ($\overline{w'q'}$), およびCO₂フラックス ($\overline{w'c'}$) の比較を表3に示す. DA-600による $\overline{u'w'}$ は, Solentに比べて21%小さかった. 上述のように, DA-600は水平風速 u を過小評価する傾向がみられたので, DA-600とSolentの u の標準偏差の回帰直線の傾き (0.811) の逆数をDA-600による $\overline{u'w'}$ に乗じて補正すると, Solentによる $\overline{u'w'}$ とほぼ等しくなり, 標準誤差も減少した. すなわち, DA-600による $\overline{u'w'}$ の過小評価はおもに u (およびその変動量) の過小評価に起因すると考えられた.

SolentとCSAT3による $\overline{u'w'}$, 3組のシステムによる $\overline{w'T'}$, (Solent, LI-7500) の組み合わせと (DA-600, E009B) の組み合わせによる $\overline{w'q'}$, $\overline{w'c'}$ は, 約10%以内の違いで一致した. E009Bによる q や c の標準偏差がLI-7500に比べて10~20%大きかった (表2) にもかかわらず, $\overline{w'q'}$ や $\overline{w'c'}$ がほぼ一致したのは, E009Bの高周波ノイズはランダムで, 鉛直風速 w との相関がないためである. このことは $\overline{w'q'}$ や $\overline{w'c'}$ のコスペクトルからも確認できた. (CSAT3, OP2)の組み合わせによる $\overline{w'q'}$, $\overline{w'c'}$ は, いずれも (Solent, LI-7500) の組み合わせに比べて20%小さかった. これについても, DA-600の u の場合と同様の方法で, OP2による q や c の標準偏差がLI-7500に比べて小さい (表2) ことを補正する (OP2の校正定数を変更することに相当する) と, 回帰直線の傾きはほぼ1になった (ただし, $\overline{w'c'}$ の標準誤差は変化しなかった). すなわち, $\overline{w'q'}$, $\overline{w'c'}$ の機種による回帰結果の差異の主な要因は, 校正定数の不正確さやその時間変化と考えられる. 一方, 表3の標準誤差で示されるシステム間のばらつきは, 今回の比較観測では, その大きさは温度フラックスで0.012 K m s⁻¹ (顕熱フラックスの15Wm⁻²に相当する), 水蒸気フラックスで0.009 g m⁻² s⁻¹ (潜熱フラックスの約20Wm⁻²に相当), CO₂フラックスでは0.11~0.13mgCO₂m⁻²s⁻¹ (日中の最大吸収量の10%強) であった. 異なるシステムによるフラックスデータの比較を行う場合には, これらの不確定性を考慮する必要がある. これらの補正を施した後のCO₂フラックスの経時変化を図9に示す. 降雨後の13日午後から夜間のOP2のデータはばらつきが大きく, レンズに雨滴が付着していた可能性があるため図からは除外したが, それ以外の時間帯は3組の渦相関システムによるCO₂フラックスはほぼ同じ経時変化を示した.

表3 3組の渦相関システムによるフラックスの比較.

項目 (単位)	基準/ 比較対象	散布図の回帰直線の傾き	標準誤差
$\overline{u'w'}$ (m ² s ⁻²)	Solent / DA-600	0.79 (1.017)*	0.069 (0.027)*
	Solent / CSAT3	0.89	0.058
$\overline{w'T'}$ (K m s ⁻¹)	Solent / DA-600	0.941	0.008
	Solent / CSAT3	0.914	0.012
$\overline{w'q'}$ (g m ⁻² s ⁻¹)	(Solent, LI-7500) / (DA-600, E009B)	1.038	0.009
	(Solent, LI-7500) / (CSAT3, OP2)	0.80 (1.034)**	0.009 (0.004)**
$\overline{w'c'}$	(Solent, LI-7500) / (DA-600, E009B)	1.056	0.126
(mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	(Solent, LI-7500) / (CSAT3, OP2)	0.80 (0.983)**	0.107 (0.107)**

* DA-600による u の標準偏差がSolentに比べて小さいことを補正した場合の値.

**OP2による q , c の標準偏差がLI-7500に比べて小さいことを補正した場合の値.

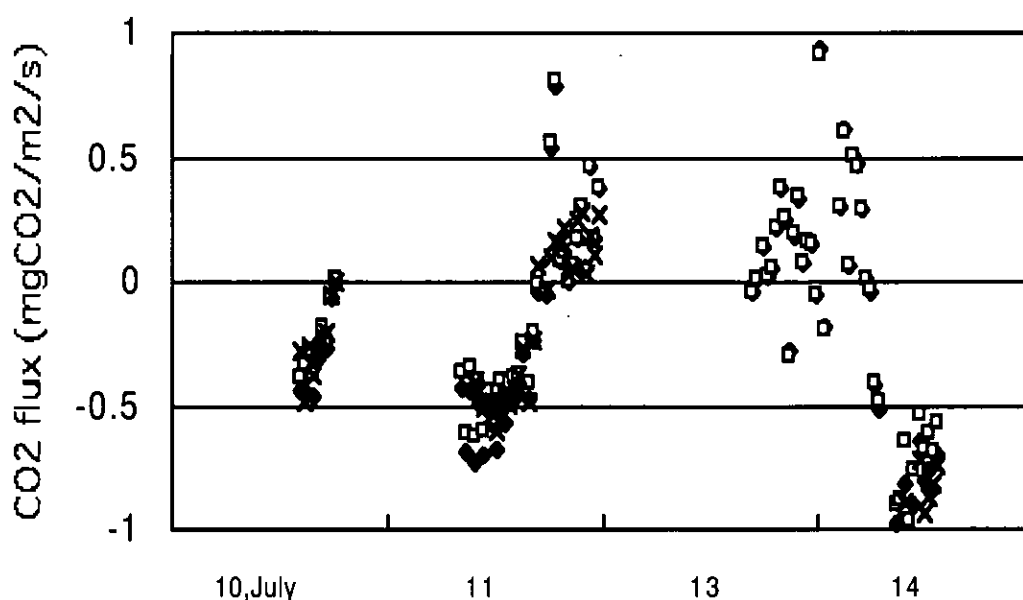


図9 3組の渦相関システムで測定したCO₂フラックスの比較. DA-600とE009B (◆), SolentとLI-7500 (□), およびCSAT3とOP2 (×) のそれぞれの組み合わせで計算した. 7月12日は降雨のためデータを除外した. また, 7月13日の午後から14日早朝までのCSAT3とOP2のデータについては, OP2の測定値に降雨の影響と見られるドリフトが認められたので除外した.

渦相関システムの比較観測の結果から, オープンパス型ガス分析計の厳密な校正の重要性が改めて指摘される. クローズドパス型に比べて, オープンパス型ガス分析計の校正は難しく, 水蒸気では可能な動的校正 (応答速度の遅いセンサとパワースペクトルを比較し, 低周波領域でスペクトルを重ね合わせる方法. 塚本ら(2001)) は不可能である. 通常は, ガス分析計の光路に筒を被せて閉鎖した状態で校正ガスを筒内に導入し, 分析計の出力の時間平均値から校正定数を決定する. この校正方法は, 大量の校正ガスを要するとともに, 筒内の気温および気圧の影響を受けるので, それらのモニタが必要である. また, ガス分析計の機種によっては出力の温度ドリフトが大きいので, 温度を制御できる環境 (恒温槽や風洞) で行うことが望ましいが, このような施設がある観測サイトはまれである. このような理由から, オープンパス型ガス分析計の校正については, その重要性は意識されながらも, これまで十分な議論がなされてこなかった. 最近開発された機種 (LI-7500) では, 校正時に使用する筒の容積を小さくして校正ガスの使用量を削減したり, 温度や気圧をモニターしながら校正を行うシステムを提供したりして, 観測サイトでの校正を比較的容易に, 短時間で完了できる工夫がなされている. このような機能がない機種については, サイトでの厳密な校正は難しく, 設備の整った実験室に持ち帰って校正することになり, 半日から数日の欠測期間を生じることになる. これを回避するためには, 同一のガス分析計を2組用意し, 測定に使用していない組を校正するなどの対応が必要であろう.

5. 本研究により得られた成果

苫小牧フラックスリサーチサイトの高度41mでの観測データを用いて, オープンパス方式の渦相関法によるデータ処理・解析方法や補正方法について検討した結果, 超音波風速計の座標変換やトレンド除去を適用する場合には, 測定システムの点検 (超音波風速計のゼロ点調整) やデー

タの質の確認（異常値やステップ状の変化がないこと）が必要なことや、密度補正の重要性が高いことが確認できた。とくに、密度補正の影響は吸収フラックスが大きくなる7月中旬でも50%を超えることがあり、日中のCO₂交換量を正確に評価するためには不可欠であることがわかった。同サイトの高度25mの樹冠上で実施した渦相関システムの相互比較観測の結果から、超音波風速計のプロープの形状によっては、主風向成分の風速を過小に評価する可能性があること、システム間のCO₂フラックスのばらつき（標準誤差）は日中の最大吸収量の10%強であることが示され、またオープンパス型ガス分析計の厳密な校正の重要性が指摘された。

6. 引用文献

- 原藺芳信, 宮田明, 桑形恒男, 濱崎孝弘 (1999): 第23回アメリカ気象学会農業森林気象国際会議報告. 農業気象, 55, 47-52.
- Hanafusa, T., T. Fujitani, Y. Kobori, Y. Mitsuta, 1982: A new type sonic anemometer-thermometer for field operation. Pap. Met. Geophys. 33, 1-19.
- Ishida, S., M. Toda, I. Tamagawa, S. Miyazaki, M. Sugita, D. Matsushima, J. Goto, T. Miyamoto, S. Iida, H. Ishikawa, 2001: Comparison of the different turbulent measuring sensors. Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, 1 Supplement, 86-88.
- Lee, X. (1998): On micrometeorological observations of surface-atmosphere exchange over tall vegetation. Agric. Forest Meteorol., 91, 39-50.
- Leuning, R., J. Moncrieff, 1990: Eddy-covariance CO₂ flux measurements using open- and closed-path CO₂ analyzers: Corrections for analyzer water vapour sensitivity and damping fluctuations in air sampling tubes. Boundary-Layer Meteorol., 53, 63-76.
- Leuning, R., Judd M.J., 1996: The relative merits of open- and closed-path analysers for measurement of eddy fluxes. Global Change Biology, 2, 241-253.
- 文字信貴, 2000: 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. CGER-REPORT M006-2000, pp92.
- Moore, C. J., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. Boundary-Layer Meteorol., 37, 17-35.
- PawU, K. T., D. D. Baldocchi, T. P. Meyers, K. B. Wilson, 2000: Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. Boundary-Layer Meteorol., 97, 487-511.
- 三枝信子, 2001: オープンパス型とクローズパス型の赤外線分析計を用いたフラックスの観測法の比較. 気象研究ノート, 199, 地表面フラックス測定法 (塚本修・文字信貴編), 124-129.
- 塚本修, 文字信貴, 伊藤芳樹, 2001: 乱流変動法による運動量・顕熱・潜熱 (水蒸気) のフラックスの測定. 気象研究ノート, 199, 地表面フラックス測定法 (塚本修・文字信貴編), 19-55.
- Twine, T. E., W. P. Kustas, J. M. Norman, D. R. Cook, P. R. Houser, T. P. Meyers, J. H. Prueger, P. J. Starks, M. L. Wesely, 2000: Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. J. Agric. Meteorol., 103, 279-300.
- Webb, E. K., G. L. Pearman, R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quart. J. Royal Meteorol. Soc.,

〔国際共同研究等の状況〕

苫小牧フラックスリサーチサイトにおける渦相関システムの相互比較は、AsiaFlux関連の共同研究とも連携し、韓国Yonsei大学のJoon Kim博士らのグループと共同で実施した。韓国側からはKim博士のほか大学院生4名が参加し、データ解析も共同で実施した。

〔研究成果の発表状況〕

（１）誌上発表（学術雑誌）

- ①原藺芳信，小峰正史，高木健太郎，小室浩一：農業気象，55，173-178（1999）
「WWW 公開型の微気象・フラックスデータベースの開発」
- ②Cook, G., L. Vourlitis, Y. Harazono：農業気象，56，31-40（2000）
“Evaluating the potential for long-term elevated CO₂ exposure studies using CO₂ springs in Japan”
- ③Miyata, A., R. Leuning, O. T. Denmead, J. Kim, Y. Harazono: Agric. Forest Meteorol., 102, 287-303（2000）
“Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field.”
- ④Leuning, R., O. T. Denmead, A. Miyata, J. Kim: Agric. Forest Meteorol., 104, 233-249（2000）
“Source/sink distributions of heat, water vapour, carbon dioxide and methane in a rice canopy estimated using Lagrangian dispersion analysis.”
- ⑤Li, S. G., Y. Harazono, T. Oikawa, H. L. Zhao, S. Y. He, X. L. Chang: Agric. Forest Meteorol., 102, 125-137（2000）
“Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia.”
- ⑥原藺芳信，高木健太郎，小林義和，小峰正史，小室浩一：農林水産研究計算センター報告，B13，1-118（2000）
「WWW連携による農業環境情報データベースシステム “Ecosystem Database”」
- ⑦Kim, J., Y. Harazono, S. Yamamoto, A. Miyata, N. Saigusa, T. Choi：Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, 1 Supplement, 83-84（2001）
“Flux measurements in a complex landscape: How reliable and consistent are fluxes from single eddy covariance tower?”

（２）口頭発表

- ①原藺芳信，高木健太郎，小峰正史，小林義和，小室浩一：日本気象学会 1999 年度秋季大会（1999）
「研究用 Eco-DB システムの開発とデータベースネットワーク化」
- ②M. Komine, Y. Harazono, F. Miglietta, E. Magliulo：日本農業気象学会 1999 年度全国大会（1999）
“CO₂ and H₂O fluxes in drought and rainy seasons at Macchia stands in Sardinia, Italy.”

- ③Y. Harazono, N. Ohta, A. Miyata, K. Nakamoto, W. Oechel : 日本農業気象学会 1999 年度
全国大会 (1999)
“CO₂ and H₂O fluxes during thawing period at Arctic Coastal tundra, Alaska.”
- ④高木健太郎, 小峰正史, 小林義和, 原菌芳信 : 日本農業気象学会 1999 年度全国大会 (1999)
「Eco-DB システムの開発とデータベースネットワークの構築」
- ⑤Y. Harazono, A. Miyata, J. Kim, N. Chae: Annual meeting of Korean Agric. Forest
Meteorol. Soc. (1999):
“Simultaneous Flux Measurements of CH₄ and CO₂ at Kushiro Mire. ”
- ⑥Y. Harazono, A. Miyata, N. Ota, K. Takagi, M. Komine, 11th International Symposium
on Global Change Studies, Long Beach, CA, USA, 2000 (2000):
“Seasonal changes and yearly budgets of CH₄ and CO₂ fluxes at lotus field in Japan.”
- ⑦K. Takagi, Y. Harazono, M. Komine, H. Komuro, Y. Kobayashi, International Workshop
on Asia Pacific Advanced Network and its Applications (2000)
“Development of the Networked Database of field observation data, (Eco-DB) on
Internet.”
- ⑧N. Ota, A. Miyata, Y. Harazono, K. Nakamoto, R. Zulueta, W. Oechel: 8th Symposium on
joint Siberian permafrost studies between Japan and Russia in 1999 (2000)
“Carbon dioxide and methane fluxes over Arctic coastal tundra at Barrow in 1999.”
- ⑨永井秀幸, T. Choi, J. Hong, 宮田明, 原菌芳信, 鈴木智恵子, 三枝信子, J. Kim : 農業環境
工学関連4学会2001年合同大会 (2001)
「開光路型ガス分析計を用いたフラックス測定システムの相互比較」
- ⑩平野高司, 藤沼康実, 高田雅之, 井上元, 三枝信子, 山本晋, 原菌芳信 : 農業環境工学関連4
学会2001年合同大会 (2001)
「苫小牧カラマツ林におけるCO₂フラックスモニタリング-試験観測の結果-

(3) 出願特許

なし.

(4) 受賞等

原菌芳信 日本気象学会堀内賞受賞, 「各種陸上生態系における温室効果ガスフラックスの観測
と収支評価に関する実験的研究」, 1999年11月.

(5) 一般への公表・報道等

なし.