

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
(5) 二酸化炭素高度分布測定とデータ解析による吸収源強度の推定

環境省 国立環境研究所

地球環境研究センター	井上元
地球環境研究グループ温暖化現象解明研究チーム	町田敏暢
大気圏環境部大気動態研究室	高橋善幸
地球・人間環境フォーラム	渡井智則・石崎教夫
地球フロンティア研究システム	S. Maksyutov
原子力研究所	志甫諒・山本昌則・渡辺聡彦

経済産業省 資源環境技術総合研究所

環境影響予測部 大気環境予測研究室	近藤裕昭・三枝信子
	村山昌平・飯塚悟
首席研究官	山本 晋

平成11-12年度合計予算額 80,163 千円
(うち、平成12年度予算額 40,010 千円)

[要旨]北海道苫小牧のカラマツ林にあるフラックス観測サイトで、渦相関法による測定と、二酸化炭素の高度分布の時間変化測定とを比較した。夜間の温度逆転層に森林の放出する二酸化炭素が蓄積する速度を気球で測定し、早朝蓄積された二酸化炭素が森林の光合成により吸収される速度を模型飛行機で測定した。大気カラム濃度の変化から求めた収支は、渦相関法により求めた収支に比べ、夜間については約2倍、早朝についてはほぼ等しい値となった。

岐阜県高山市乗鞍岳山麓にあるCO₂交換量長期観測地点で、複雑地形の観測値への影響をみるために小塔を設置して局地循環と夜間のCO₂フラックスとの関係を調べた。この結果斜面下降流が発達する夜間には27mタワーで測定されるCO₂フラックスが非常に小さいことがわかった。27mタワーで測定される各種フラックス量について複雑地形の影響を解析した。この結果、運動量、顕熱、潜熱、二酸化炭素の各フラックスに対する複雑地形の影響は同じではないこと、特に潜熱は西風で急斜面を吹き上がってくる風向のときには地表面の値を代表していない可能性があり過小評価となっていることが示唆された。メソスケールモデルで観測地点のCO₂濃度変化の再現を試みた。この結果メソスケールの風系の変化が濃度変化に影響を及ぼしており、高山での測定濃度の最大値が朝方ではなく深夜に出ることがわかった。

[キーワード] CO₂ フラックス、生態系交換量、複雑地形、CO₂ 濃度変化、メソスケールモデル

1. はじめに

森林生態系による二酸化炭素の吸収は、森林バイオマスの変動測定や微気象学的方法によるフラックス測定などによって評価されている。森林バイオマスの内、地下部については破壊的計測以外に無

いので、変動を測定することは困難である。そこで地上部のバイオマスを測定し、根系については相似則で推定し、土壌有機物についてはサンプリング測定を行う方法がとられている。しかしながら、樹木の地上部については成長が追え地下部も推定できるが、土壌有機物については増加速度を推定する精度はない。長期の二酸化炭素吸収はバイオマスの変動で評価できるが、年毎の吸収量の変化など細かな情報は得られない。微気象学的方法是二酸化炭素の刻々の収支を測定できる点で優れた方法である。地形が平坦で植生が均一に一定規模広がっている場合は、エネルギー・水収支などがほぼ閉じていることから、渦相関法の精度は良いとされている。しかしながら、傾斜地では夜間に冷却された二酸化炭素濃度の高い空気が、その比重が大きいことから傾斜地を低いほうに流れ（Gravity Flow）測定エリアの外に輸送されることが指摘されている。昼間は二酸化炭素濃度の低い空気が斜面に沿って上昇するので、二酸化炭素の地表面方向のフラックスが過大評価される。更に夜間に大気が安定化すると渦相関法でのフラックス測定の精度が著しく低下することも指摘されている。従って、微気象学的方法だけではなく、他の方法と組み合わせた観測や、観測データを評価する気流解析計算などが必要である。

「二酸化炭素の高度分布観測からの収支推定」の研究では、北海道苫小牧で、気球や模型飛行機を用いて二酸化炭素濃度の高度分布を測定することにより、広域の二酸化炭素収支を推定することを試み、渦相関法の結果と比較検討した。

「複雑地形上でのフラックス観測における地形影響の定量的評価」の研究では、岐阜県高山市の乗鞍岳山麓で行っている森林と大気の熱・水・ CO_2 交換量の長期観測結果について、複雑地形上での観測であることを鑑み、地形の影響を定量的に評価することを試みた。手法としては、①既存の27m塔の他に3mの塔を新たに設置し、二つの塔で測定される微気象量とフラックスの関係を調べる、②27m塔で観測されたフラックス値を共分散を構成する各成分の正負によって4つの場合に分け（4象限解析）、それぞれの輸送に何らかの特徴があるかどうかを調べる、③メソスケール気象モデルに生態系と人為起源の CO_2 の吸収・発生源を組み込み、高山での濃度変化の特徴に対する少し大きなスケールの複雑地形の影響を調べる、以上の3つの解析を行った。

2. 二酸化炭素の高度分布観測からの収支推定

2-1. 観測の原理

土壌や草地の呼吸/光合成や、湿原や水田からのメタン発生の測定には、地面を底のない箱で覆い、その中の二酸化炭素やメタン濃度の変化からフラックスを求める方法が広く取られている。森林についても樹木全体を被いその内部の濃度変化を測定する方法も採られているが、内部の温度や湿度が大きく変化し光合成に大きな影響を与えるため問題があるとされている。もし、十分大きな容器で森林全体を大きく被うことが可能ならば擾乱が抑えられ、そのような方法も適切と考えられるが現実的ではない。

オープンな場所でも夜間に地表面の放射冷却により地表面近くの空気が冷却され、いわゆる大気逆転層が形成され大気が安定する。この状態では、土壌や植物から放出された二酸化炭素は逆転層内に蓄積されるので、日没以降の二酸化炭素の蓄積量から、樹木の地上部、根系、土壌を含む森林生態系全体の呼吸による二酸化炭素放出量を推定することが可能である。早朝は日射により大気が不安定になり熱対流が起こり始めると同時に、樹木による光合成で二酸化炭素濃度が低下する。この間の二酸化炭素カラム濃度の変動から早朝の光合成速度を推定することが可能である。熱対流が盛んな日中に

は混合層全体の濃度はほぼ均一になり、混合層内部の二酸化炭素濃度は低下する。それと同時に、混合層の発達によりその上部ではその上の自由対流圏の大気を取り込むプロセスがある。また、混合層高度が一定でも、上部で自由対流圏への逃げ出しとその補償流が起こり、混合層と自由対流圏の間で大気の交換が起こる。これは地表面の構造から大気の鉛直流が生じることや、地表面温度が不均一でシステムティックな上昇気流の卓越する場所があるためである。従って、日中の濃度変化から光合成による二酸化炭素取り込みの速度を求めるには、混合層高度の変化や混合層・自由対流圏交換など気象的要素を測定するか、 R_n など地上で均一な発生がある物質をトレーサーとして測定するなど、補助的な観測が必要である。もし地表面が大きなスケールで均一と見なせる場合は、これらのプロセスを正確に測定するならば、大気濃度の高度分布の測定から森林の二酸化炭素収支の時間変化を追うことが可能である。しかし、わが国のように陸域面積が小さく、1日の間に水平風により海洋から陸域、さらには再び海洋に抜ける場合や、その間の植生が均一と見なせない場合は、1次元モデルでの解析は不可能である。従って、高度分布だけではなく風上、風下の断面分布などの測定を付け加える必要がある。

こうした弱点があるものの、大気濃度測定から二酸化炭素収支を推定する方法は、植生が均一でない場所や、土地被覆が単純でない場所でも総量を推定することが可能であること、また、収支の瞬時値ではなく積分値が得られることから条件が良ければ高い精度での観測が可能であり、魅力ある方法である。従って本研究では、昼間の光合成を評価する観測は問題が複雑なので、夜間の呼吸、早朝の光合成に焦点を絞り、高度観測によりそれらを評価する方法を検討する事とした。

2-2. 観測方法

高度 100m までの低高度観測に限られるが、夜間/昼間を通じて操作が可能な有索気球（カイツーンの改良型）による二酸化炭素の高度分布観測を一つの方法として選んだ。また、明るい時間帯に限られるが、混合層全体を観測する目的で、100m から 2000m までの高度分布観測に模型飛行機（カイトプレーン）を使用した。

（1）有索気球による観測

有索気球は直径約 2m、長さ約 4m の楕円回転体で、ヘリウム充填時の余裕浮力は約 4kg である。3 枚尾翼を設け、索を重心より前方に付けることにより、抵抗の少ない回転軸方向を風に常に対向させる構造とした（写真 1）。また、風のあるとき尾翼水平翼で浮力を生じさせる構造とし、風にながされ高度が低下することをある程度防ぎ、水平風に対する安定性能を向上させた。魚釣用の電動ウインチを改造して索長を変えられるシステムとした。

サーミスター温度計、セラミックス湿度計、熱線風速計、磁気方位計による風向計、気圧高度計などを組み合わせた気象測器システム（写真 2）を開発し、索の先端に取り付けた。データはデジタル化し電波によりダウンリンクした。データをリアルタイムで高度分布として表示するソフトウェアを開発した。

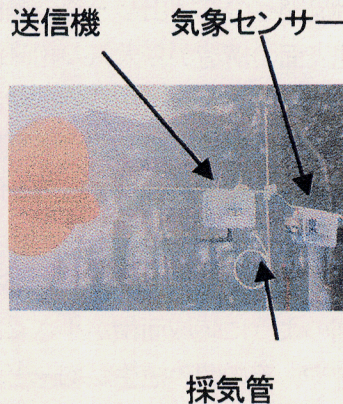
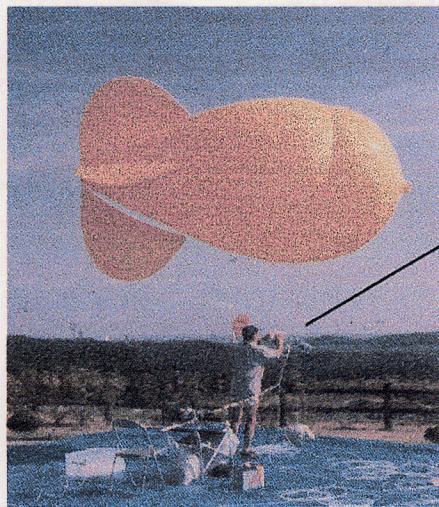


写真1
観測に用いた有索気球(左)と搭載した気象測器システム(右)

二酸化炭素濃度測定には、軽量の固体二酸化炭素センサーを気球直下に取り付け持ち上げる方式と、採気管を気球で持ち上げ、地上で大気を吸引し非分散赤外吸収法により高精度分析を行う方式とを検討した。その結果、固体二酸化炭素センサーの開発が十分でなく必要な性能が発揮できない可能性が高いので、後者の方式を採用することとした。採気用に1/4"のポリエチレンチューブの先端を気象測器と同じ場所に取り付け、索と別個に巻き上げる方式を採った。1/4"のチューブでは微風状態で120mまで、4mmのチューブでは同じく200mまで持ち上げることが可能であり、風速7m/s以下で操作が可能である。チューブの下端からポンプで大気を吸引し、除湿、流量調整の後、非分散赤外吸収型のCO₂計(LiCor-6262)により濃度測定を行った。採気管の長さや吸引速度が一定なので、測定の遅れ時間は30秒程度で一定である。また、濃度変動に対する応答の鈍りも無視できる程度であった。

観測は後述するカイトプレーンのオペレーションと同一の苫小牧市営墓地の丘で実施した。気球はほぼ一定速度で上昇・下降を繰り返し、高度分布の時間変化を測定した。20m毎に3分間高度を保ちその高度での濃度変動に対する平均値を求める方式をとったが、短時間の濃度変動は高度分布の変動に比べ十分小さかった。

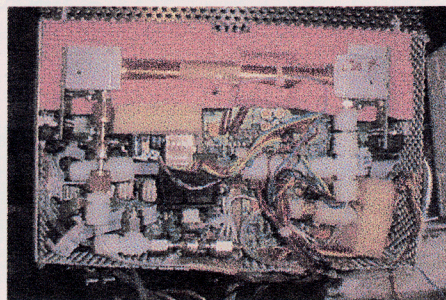
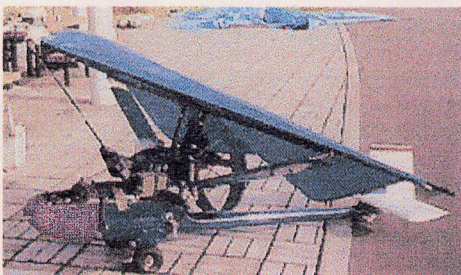


写真2 カイトプレーン(左)とこれに搭載した二酸化炭素センサー(右)

(2) 模型飛行機による観測

混合層の高度は1,000~2,000mと予想されるので2,500mまでの二酸化炭素高度分布を測定する必

要がある。一般的にはこの高度では小型飛行機を使用するが、100m以下の低高度からの観測は不可能である。また、有視界飛行のため夜間や早朝の観測は不可能である。

すでにオーストラリアや米国では、模型飛行機、模型グライダー、模型ヘリコプターなどによる気象観測が試みられており、気球ゾンデ観測と異なりセンサーが回収できる利点があり、高度な（高価な）センサーの利用に応用されようとしている。わが国でも国立環境研・佐藤建設工業が、高頻度の大気観測や、有人航空機による観測が困難である危険地域（火山活動地域など）での観測を目的として、自動操縦の模型飛行機の開発を推進してきた。自動操縦の模型飛行機は大別すると有翼機とヘリコプターに分けられる。後者は農薬散布用に開発されたものを自動操縦化するものであるが、RC操縦で操作ミスによる事故が多発しており、自動化は未だ開発途上である。前者は固定翼とハングライダーあるいはパラグライダー方式に分けられる。固定翼の模型飛行機は操縦性に優れているが、その反面、方向舵、昇降舵の操作に対する応答が敏感で自動操縦化が困難であるという弱点がある。そこで本観測にはハングライダー型の自動操縦飛行機を採用した（写真3）。この基本仕様は次の通りである。全長は2.2m、翼幅は2.8m、翼面積は2.4m²で乾燥重量は16kg、ペイロードは4kgである。2サイクルの75mlエンジンを搭載し、飛行速度は20-60km/hr、失速限界速度は4m/secである。上昇速度は低空でも100m/minと小さいが二酸化炭素測定など応答の遅いセンサーには適合している。

1999年度には次のような改造を加えた。測定器や電波による通信・制御に必要な電源をバッテリーで供給する方式に代え、発電能力のあるエンジン(75ml)を新たに選んで搭載し、搭載バッテリーを少なくし約1kgのペイロード増加が実現した。プロペラは幅、長さの異なる3つのタイプについて試験を行い、機の構造上許される最も長いものが、このエンジン・機材に対しては最適であるという結論を得た。離発着が可能なフルペイロードは4kgであるが、その条件では搭載燃料の80%を消費する35分間の飛行では1500mまでしか上昇出来なかった。ペイロード3.5kg、35分間の飛行により高度2,400mを、また、ペイロード2.5kgでは、45分間飛行を継続することにより（燃料搭載量が増えるため飛行時間を延長できた）高度3,500mまで到達する事が出来た。以下に述べる測定器が4kgと確定したので、これを搭載し混合層の最高高度として推定される2,000mまで上昇する事が2000年度の新たな目標となった。このエンジンは余裕を持っておりプロペラの径を大きくすることにより推進力を増強できるが、エンジンを機体の上部、翼の下部に取り付けている構造では、空間的に不可能である。そこで翼面積を2割近く拡張することにより浮力を強化することとした。その結果、ペイロード4kgで到達高度2,100mが実現した。

本機材は飛行に関してはGPSによる自動操縦が可能であるが、離発着は手動電波操縦である。離陸に必要な滑走距離は30m程度と極めて短い、離陸後の上昇速度が小さいので、樹木高度20mをクリアするためには、さらに30m程度の空地が必要である。着陸は離陸より短距離で可能であるが、機体の速度、高度、風速などを勘案して正確に着地させる事は困難で、離陸と同程度の空間が必要である。また、離発着は風に対抗させる必要がある、全体としては100x100m規模の平坦な場所が必要である。ペイロードが4kgと大きい場合、着地の衝撃が大きいので、極めて高度な操縦能力を必要とする。今後はカタパルトによる発進で初期加速度を大きくすること、着陸をエアーマットやネットで受け止める方式にするなど、改善の余地がある。

ここで用いた二酸化炭素測定器は非分散赤外吸収方式による市販の二酸化炭素計（LiCor社、LI-800）を大幅に改造したものである。市販品は赤外吸収セルは大気解放であり、高度の変動に対して圧力が変化するので気圧補正が必要であり、さらに、気圧変化は測定気体の流量変化をもたらし、

それに伴う実効セル内圧力の補正も必要である。測定器のゼロ点ドリフトがあるので定期的に標準ガスを流し校正を行う必要があるが、その流量も高度により変化する。高精度の測定を安定的に実施するにはセル内の圧力やガス流量を一定に保つ事が望ましい。本研究では搭載重量を 4kg 以下に留めつつ上記の能力を持たせるため、マイクロバルブをはじめとする小型・軽量・省エネルギーの部品を選定し、データロガーや標準ガスボンベ2本を含めて 4kg のものを開発した。データ記録は1秒毎に行い、5分おきに2種類の異なる濃度の標準ガスを分析しサンプルの濃度を決定した。測定精度は1 ppmv であるが、データの平均化処理により 0.3ppmv の確度が得られた。

1999 年度の実験ではデータのダウンリンクに用いる電波の障害が測定器に現れたので、今回は測定器全体をアルミニウムの箱に入れ電磁波をカットすると同時に、電源線に電波をカットする工夫をし、電波障害を除去した。

2-3. 観測

(1) 観測場所

地球環境研究センターの「フラックスリサーチサイト」がある苫小牧国有林を観測場所として選定した。ここは地形が平坦で、カラマツの人工林がほぼ均一に広がっている。カイトプレーンの離発着場としては、フラックス観測サイトから 8km 程離れた苫小牧市営墓地を選定した(図1)。ここは墓地を周回する道路があり、風の向きにより場所を選択できる利点がある。ここで約 600m まで上昇した後、高度を上げながらサイトに向かい、サイト上空にて高度 2000m 付近まで上昇した後、高度 600m 付近まで下降し、その高度を保ちながら離着陸場上空まで帰還し、着陸するというルートをとった。そのため以下に述べる 600m 以下の高度のデータは離発着場の付近の濃度分布であり、フラックス観測サイトのデータと直接比較できないという問題を残した。また、有索気球による観測も同一の離発着場で行った。

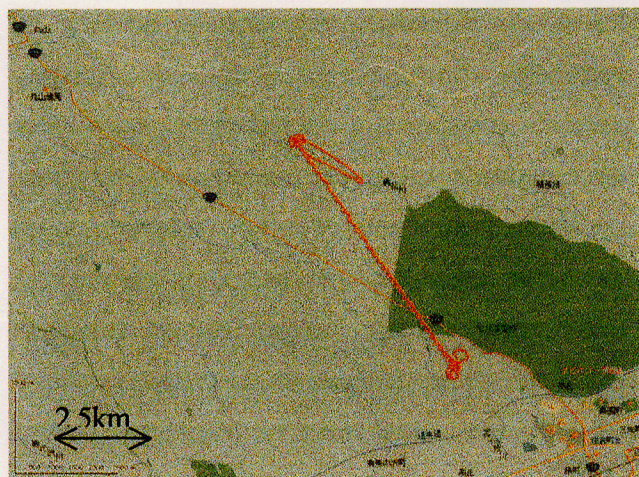


図1

観測を行った苫小牧森林の地図

赤がカイトプレーンの航行軌跡で、その右下端が離発着地点で、気球観測もここで実施した。航行軌跡の左上端が苫小牧フラックス観測サイト。

(2) 観測結果

<有索気球観測>

図2に2000年8月24日夕刻から8月25日昼にかけて、気球により観測した二酸化炭素の高度分布

を示す。本観測においては 1/4" の採気管を使用したので、観測高度は地上 120m までである。21 時 50 分のデータでは高度 70m まで接地境界層が生じ、40m 以上では日中の濃度である 365ppmv で一定であるが、地表面濃度は 393ppmv まで上昇している。その後接地境界層が発達し 3 時 40 分には既に気球の到達高度である 120m を越え、地表面濃度はこの間上昇を続け 3 時 40 分には 430ppmv となった。早朝 7 時 21 分から 9 時 27 分の間に二酸化炭素濃度は 430ppmv から 377ppmv 付近まで一気に低下し、11 時 21 分には前日よりも濃度の低い 355ppmv になった。前日との差 10ppm は光合成活性の差か、あるいは水平風による輸送の違いかは明らかでないが、24 日は西風であったのに比べ 25 日は北西風になっているので、大気履歴の違いを反映している可能性（後者）が高い。

< 模型飛行機観測 >

模型飛行機（カイトプレーン）による二酸化炭素の高度分布観測は、離発着は目視により行う必要があり、夜間の飛行はできない。従って、この観測の主要な目的は早朝までに接地境界層に蓄積され

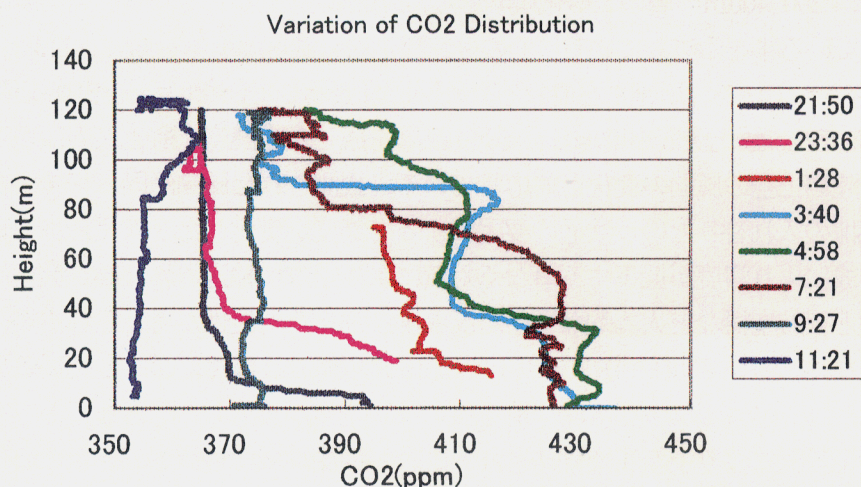


図2 気球で観測された二酸化炭素濃度の高度分布

8 月 24 日から 8 月 25 日かけての二酸化炭素の高度分布を、気球で観測した結果。凡例は測定開始時刻を示す。測定は気球を上昇しつつ測定しているので、120m での測定は凡例に 20 分加えた時刻の値である。

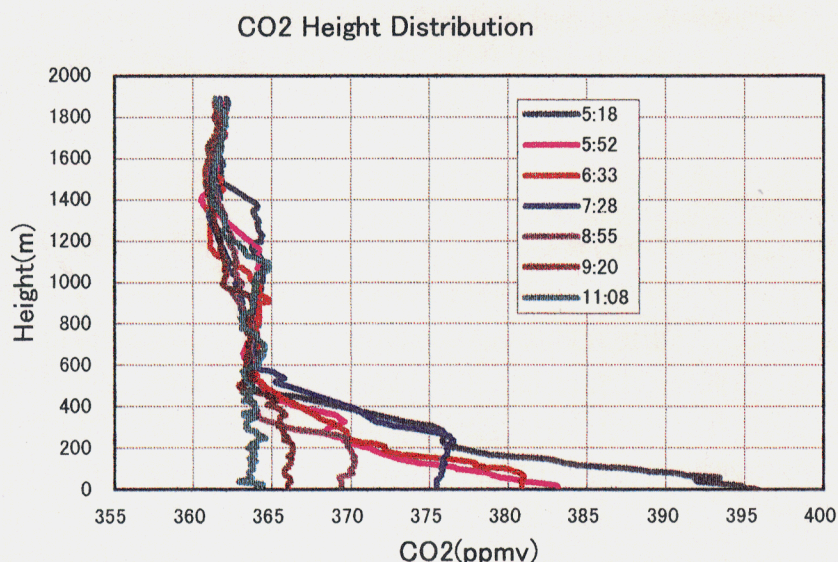


図3 模型飛行機で観測した二酸化炭素濃度の高度分布

8 月 27 日に模型飛行機に搭載した二酸化炭素計で測定した結果。上昇時と下降時に測定を行っている。時刻はそれぞれ約 20 分間の測定の間中時刻。

た二酸化炭素分布を測定することと、その後光合成により二酸化炭素が吸収され、同時に、地表面が加熱され引き起こされる鉛直混合により、蓄積された二酸化炭素が上方に輸送される過程を測定する事に主眼をおいた。2000年8月23日から26日にかけては、晴天日は放射冷却により早朝は霧があり、降雨日は大気の大気鉛直混合が強く、いずれも早朝の二酸化炭素の高度分布を測定するには適しなかった。27日は西風が5m/sec程度あり霧がかからなかったもので、早朝からの観測が可能であった。

図3に27日に得られた二酸化炭素の高度分布観測の結果を示す。一フライトには約40minを要し、それぞれの飛行で上昇および下降時に得られた高度分布を分けて示してある。図に挿入した時刻は上昇・下降の観測の中間時刻を示す。早朝5:01~6:10の観測では低高度での二酸化炭素濃度は396ppmvで高度が増すにつれほぼ線形に濃度が減少し、高度550mからそれ以上はほぼ一定の364ppmvで、さらに高度1500mから上では更に減少し361-2ppmvとなっていた。降下時には全体に濃度が低下し、着陸時には384ppmvに低下していた。6:50-7:41の飛行では、上昇時には鉛直混合で均一な層が70mまで存在し、降下時にはその厚さが230mまで増していた。このように40分という短い時間に混合層が急激に上昇している。これに伴い200-400mの層の二酸化炭素濃度は7ppmvも上昇しており、高濃度の低層の空気が上方に輸送されている事を示唆している。その後二酸化炭素濃度は低下を続け、11時には高度1,200mまで均一に混合されている。煩雑さを避けるため図には表示していないが、12:40以降の飛行では1,000m以下で高濃度の二酸化炭素が増加し、局所的に層を成した高濃度二酸化炭素領域が観測された。この変化は離着陸場上空の風向の変化と対応している。観測された風向は同日午後、北から南に変化しており、空気塊の入れ替りという共通の要因によって濃度が変化したと考えられる。これは裸地などにおいて光合成により濃度が低下する事なく対流により上方に輸送された高濃度二酸化炭素の大気が層を成した可能性と、航空機など人為的な発生が高々度にあった可能性が考えられるが、どちらであるかは明らかではない。逆に、高度約1800m以上では15時以降CO₂濃度が減少している。同時に観測した湿度の分布は、この高度において15時以降湿度の高い空気が流入したことを示しており、低高度の大気が大規模な上昇流により上空まで輸送され、これが観測地域に移流してきたことによってCO₂濃度が低下したと考えられる。

なお、この日は風速が強く有索気球観測に適しなかったもので、カイトプレーンと有索気球観測をつなぎ、前日夕刻からの呼吸により接地境界層への二酸化炭素蓄積（気球による）から、早朝の光合成による濃度低下と混合層の発達（カイトプレーンによる）とを、時間と高度全般にわたって測定することができなかった。

2-4. 考察

図4に気球観測の結果を、高度120mまでの積分濃度を24日の日中の二酸化炭素濃度を基準として整理して、時間的にどのように変化したかを示す。ここで時刻は25日零時を零としている。これをそのまま夜間の二酸化炭素放出量とすると、放出速度は0.4mgCO₂/m²/secとなる。図3に見られるように、逆転層の高度は600mに達している事が予想され、120mまでの観測高度はその1/5、二酸化炭素濃度が地表面から600mまで線形に減少しているとする、全カラム濃度の36%に過ぎない。従って、ここで求めた120mまでのカラム濃度を夜間の呼吸量とする事は過小評価になる。24日夜は曇天であったので放射冷却が弱く逆転層は27日よりも低かった事が予想され、二酸化炭素放出速度は最大でも約1mgCO₂/m²/secであると推察される。この解析は1次元モデルを前提としており、水平風により分布の異なった大気が輸送される場合は成り立たない。この時の風速は120mの高度でも3m/sec以下の微

風速であり、二酸化炭素が増加している 400 分間に約 70km 輸送された事になるが、風上は種類が異なるものも混じるが森林であり、1次元モデルを適用することは概ね妥当である。

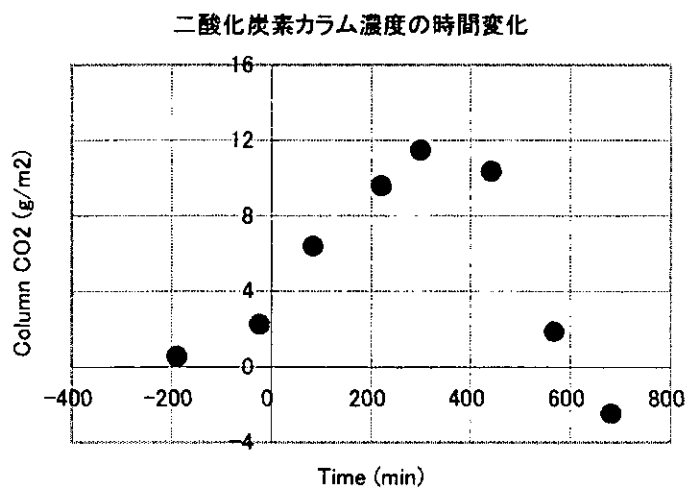


図4 気球観測で得られた二酸化炭素カラム濃度の時間変化
図2の二酸化炭素分布を高度120m まで積分して得られたカラム濃度を測定時刻に対してプロットした。濃度については364ppmvを基準にして差分を、時刻については25日0時を基準にしている。

図5にカイトプレーンで得た二酸化炭素の高度分布（図3）から計算したカラム濃度の時間変化を示す。ここでいうカラム濃度は、高度600mから1200mの平均濃度である364ppmvを基準とし、これからの増分である。時刻は標準時である。

カラム濃度の時間変化はデータにばらつきがあるが線形であると仮定して最小自乗法で決めた直線を示している。この直線の傾きから二酸化炭素吸収速度の値として $2.3\text{gCO}_2/\text{hr}=0.6\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{sec}$ が得られた。

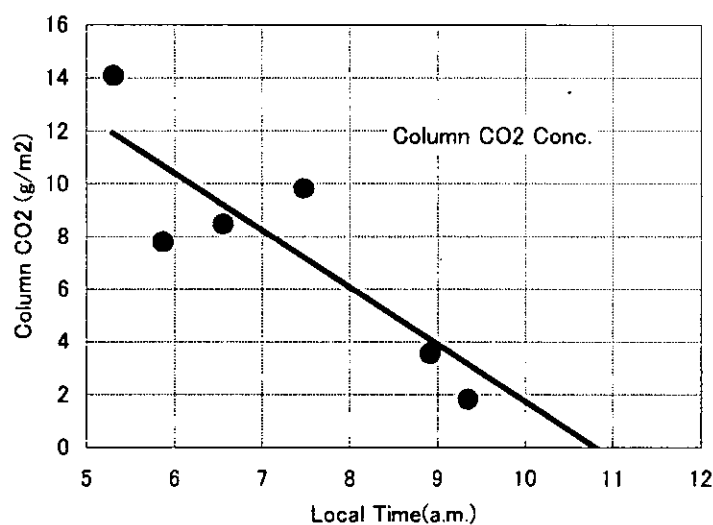


図5 二酸化炭素カラム濃度の時間変化
図3の二酸化炭素高度分布を地上から高度600m まで積分して得たカラム濃度を時間に対してプロットした。カラム濃度は364ppmvを基準とした。時刻は標準時。

気球観測で得られた24日の夜間の呼吸による二酸化炭素放出速度は $0.4\sim1.0\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{sec}$ であり、カイトプレーンで得られた27日早朝の光合成による二酸化炭素吸収速度は $0.6\text{mgCO}_2/\text{sec}$ である。これを苫小牧フラックスサイトで渦相関法により求めたフラックスと比較することは興味深く意義のあ

る事である。24-25日の夜間のフラックスは図6に見られるように安定していないが、おおむね0.15~0.2mgCO₂/m²/secであり、有索気球で観測した結果の1/2以下である。27日午前中のフラックスは6時ごろから吸収に転じ12時には-0.8mgCO₂/m²/secとなっており、カイトプレーンで得られた-0.6mgCO₂/secはその範囲に入っている。しかし、渦相関法によるフラックス(図6)を時間積分したものが図5に対応するが、図6では早朝には吸収が弱く12時頃に最大となったので、積分値の時間変化は上に凸の減衰曲線となる。カイトプレーンで得たデータは吸収の時間変化を議論するほどの精度はなく、大きさのオーダーが合っているという評価にとどまる。

このように大気中の二酸化炭素カラム濃度の変動と渦相関法によるフラックス測定は、大きさはほぼ合致しているものの、夜間の呼吸に関しては渦相関法の結果は1/2以下となっており、午前中の光合成による吸収に関しては時間的な変動が比較できる精度がでていない。これがシステムティックな違いであるのか、あるいは、カラム濃度観測が水平風による輸送などにより擾乱を受けているのかが、将来に残された問題である。カラム濃度観測を高頻度で実施することや、水平風の影響を評価する観測を組み合わせるなどの改善が必要である。

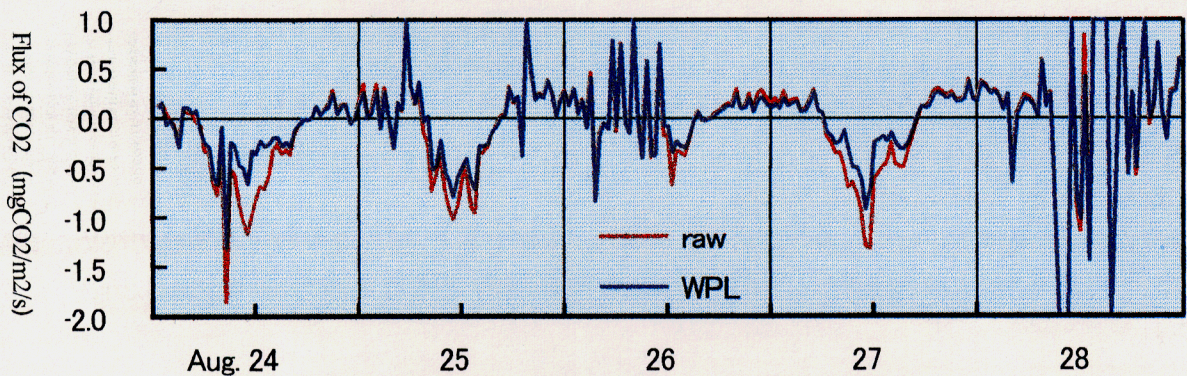


図6 苫小牧フラックスサイトで得られた渦相関法による二酸化炭素フラックスの時間変化。密度補正を施したWPLが真のフラックスである。

3. 複雑地形上でのフラックス観測における地形影響の定量的評価

3-1. 研究目的

岐阜県高山市(乗鞍山麓)の落葉広葉樹林で、森林と大気の間での熱・水・CO₂交換量の長期観測を1993年以来行なっている。観測点周辺の植生は落葉広葉樹二次林で、ダケカンバ(*Betula ermanii*)、シラカンバ(*Betula platyphylla*)、ミズナラ(*Quercus mongolia*)を主体とし、林床にはクマイザサ(*Sasa senanensis*)が生育している。樹高は15-20mである。林床にササを持つ冷温帯落葉広葉樹林は、北日本から中部山岳地帯にかけて広く見られる植生である。観測点(標高1420m)は高山市街(同約600m)と乗鞍岳(3026m)の中間付近にあり、市街(タワーから見て西)と山頂(東)の水平距離は約30kmである。タワーは尾根状地形の上にある(図1)。

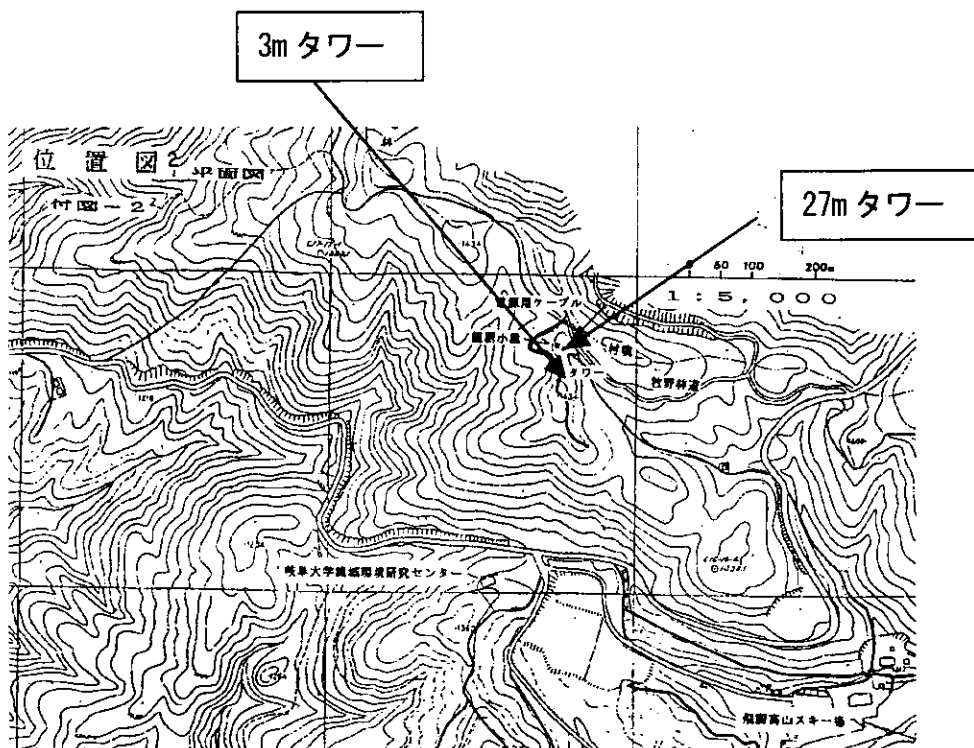


図1. 高山観測点付近の地形と27m、3mのタワーの位置。上方が北

観測点には高さ27 mの気象観測用タワーが設置されている。このタワーを使って、1993年以降、樹冠上2高度の CO_2 濃度差を用いた CO_2 フラックスの連続観測が行われている。また、森林の熱収支や CO_2 フラックスと気象条件の関係を詳しく調べる目的で、1998年7月以降、渦相関法による顕熱・水蒸気・ CO_2 フラックスの連続観測を行っている。渦相関法によるフラックス観測には、三次元超音波風向風速温度計(Kaijo, DAT-600)とclosed-path式の赤外線分析計(LI-COR, LI-6262)を用いている。

これまでに、フラックスの長期観測を実施する上で測定法上の問題点がいくつかあることがわかってきた。その一つが夜間における CO_2 フラックスの過小評価である。図2に、渦相関法で測定された夜間の CO_2 フラックス(上向き)と夜間気温の関係を示す。大気が中立に近い場合(図2a)、フラックスは気温の増加とともに急速に増加しているが、安定の場合(図2c)、フラックスの気温依存性は小さい。しかし一般に、土壌微生物による CO_2 放出量と植物の呼吸は温度上昇に伴い急速に(10°C 上昇で2~2.5倍)増加する性質を持つことがよく知られている。従って、大気が安定成層状態にある夜間に、何らかの原因で CO_2 フラックスが過小評価されていることが予想される。

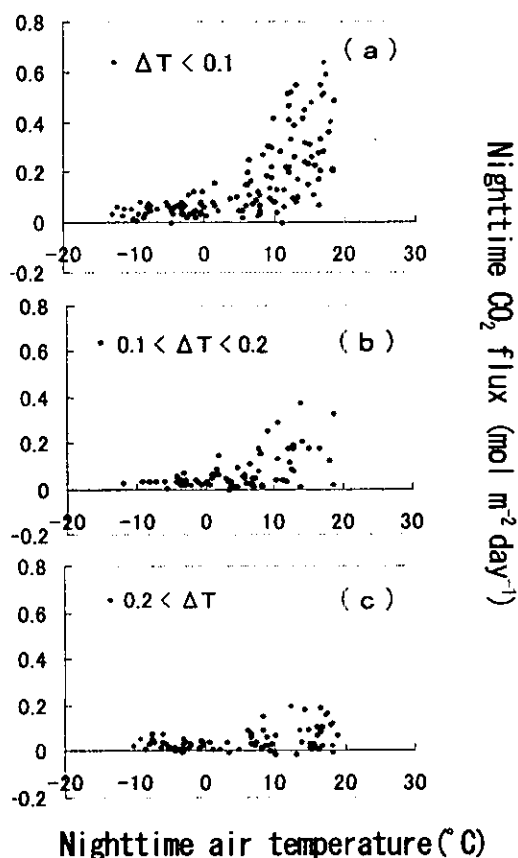


図2. 1998年7月～1999年7月の無降水日における一晩平均のCO₂フラックス(上向き)と気温の関係。 $\Delta T =$ (高度25 mの気温)-(18 mの気温)。

出現確率(%)

降水日 24

無降水日 76

(a) 中立 35

(b) 弱安定 20

(c) 強安定 21

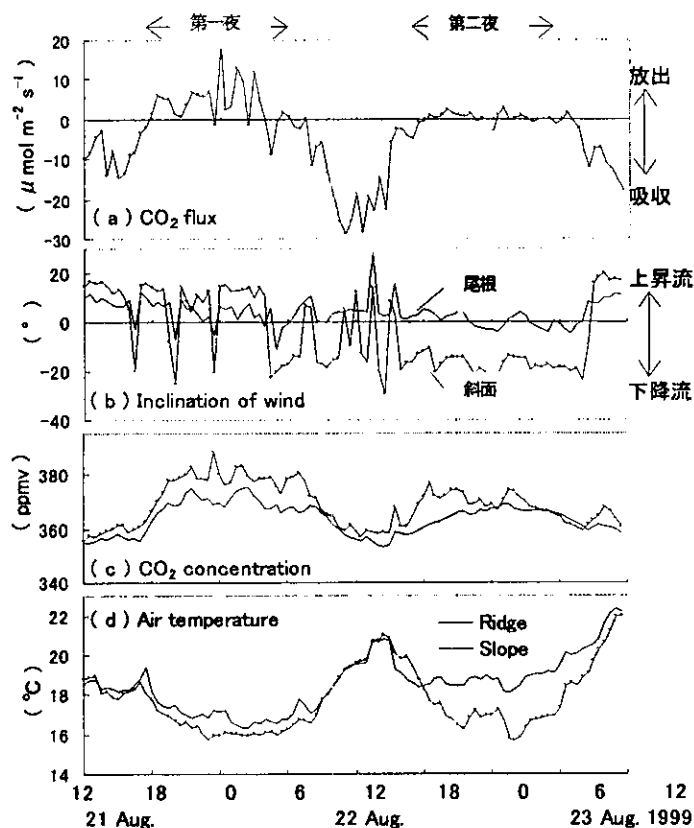


図3. 1999年8月21～23日に測定された(a)CO₂フラックス、(b)平均風の傾斜角、(c)CO₂濃度、(d)気温。

大気安定度の影響を受けてフラックスが過小評価になっていると予想される夜(図 2b、c)の出現確率は 41%に達することから、森林の年間炭素収支を求める場合に、夜間のフラックス過小評価の問題を解決することは重要な課題である。そこでまず、高山における夜間フラックスと地形によって生じる流れの関係を明らかにすることを試みた。

高山のみならず、世界中のフラックス測定点では地表面(森林等を含む)に入射する正味の放射量が独立に測定された顕熱+潜熱+蓄熱の総和よりも大きくなる傾向が言われている。高山においても測定される顕熱+潜熱+蓄熱の総和は正味放射量の約 60% (Yamamoto et al., 1997)となっている。このような熱収支のインバランスは測定されている CO_2 フラックスの精度にも疑問を与えるものであり、インバランスの原因を究明する必要がある。このため、フラックスとして計算される共分散(たとえば顕熱の場合 $\overline{w'T'}$) を構成する各成分の正負によって 4 つの場合に分け、それぞれの絶対値を比較することによって乱流輸送に何らかの特徴が現れるかどうかを調べた。輸送の特徴を比較するため、2000 年度から運用が始められた環境省苫小牧フラックスリサーチサイトでの測定データとも比較した。

高山での CO_2 濃度の時間変化をみると、長期的にはグローバル変動とよい相関がある(村山他、2000)ものの、日変化スケールで見ると平地の測定点とは異なり、明け方ではなく真夜中に CO_2 濃度のピークが現れる。この原因を調べるために資環研で開発されたメソスケールモデル(Kondo 1990、1995)に生態系起源と人為起源の CO_2 の発生・吸収源を組み込んで高山付近の CO_2 濃度変化の特徴を調べた。

3-2. 研究方法

(1) 微気象と CO_2 フラックスの関係

尾根上地形の上に設置されている高度 27 m の観測タワーのほか、タワーから西へ約 40 m 離れた斜面の途中(林床の高度 3 m 地点)に、超音波風向風速計と CO_2 濃度測定のための空気取り入れ口を設置した。そして斜面上(林床)での三次元風速成分と CO_2 濃度変動の連続測定を行い、斜面を上昇・下降する流れの発生とタワー上 25 m の CO_2 フラックスの関係について調べた。

(2) 各フラックス輸送に対する複雑地形の影響の抽出

1999 年 8 月 21 日～23 日について、27m 塔で測定された運動量($\overline{u'w'}$)、顕熱($\overline{w'T'}$)、潜熱($\overline{w'q'}$)、 CO_2 ($\overline{w'C'}$) フラックスについて、 $\overline{w}$ が 0 になるように風向補正をした後、各成分(運動量の場合は u' と w') の正負に応じた 4 つの場合に輸送されるフラックス量を独立に調べた(4 象限解析)。運動量の場合を例にとると、 $u' < 0$ かつ $w' > 0$ の場合は相対的にゆっくりとした水平風速が上空に持ち上げられることによって運動量が輸送されており、 $u' > 0$ かつ $w' < 0$ の場合は相対的に速い水平風速が下に降りてくることによって運動量が輸送される。どちらも運動量の輸送される方向は同じであるが、どちらが卓越しているかによって、乱流渦のどの部分での輸送が大きいかがある程度わかり、輸送に関わる渦構造に関する情報を与える。同様な解析を 2000 年 8 月 17 日～19 日における環境省苫小牧フラックスリサーチサイトの 22m 観測点でのデータでも行い比較した。

(3) メソスケールモデルによるCO₂濃度変化の計算

メソスケールモデルに生態系起源と人為起源のCO₂発生源を組み込み(近藤他 2000)高山におけるCO₂濃度の日変化とメソスケール気象との関係を調べた。計算された濃度変化に対し、鉛直拡散の寄与と移流項の寄与を別々に求め、それらの時間変化と濃度の変化との関係を調べた。

3-3. 結果と考察

(1) 微気象とCO₂フラックスの関係

1999年8月に測定したタワー(尾根)のCO₂フラックス、および尾根と斜面で測定した平均風傾斜角と気温を図3に示す。最初の夜(第一夜)に比べて次の夜(第二夜)は、上向きCO₂フラックスが極端に小さく(図3a)、斜面上では安定した下降流が観測されていた(図3b)。その際、風向は尾根・斜面とも東風(斜面を下る方向)で、風速は尾根で1~3 m s⁻¹、斜面で0.5~1 m s⁻¹だった。

第二夜の尾根と斜面の気温差が大きいこと(図3d)、夜通し約 -70 W m⁻²の放射冷却が続いたことから、夜間冷却により斜面下降流が発生したことが予想された。さらに、夜中から朝方にかけてわずかながら気温の上昇(図3d)とCO₂濃度の低下(図3c)が見られたこと、第一夜に比べて顕著な比湿の低下が見られたこと(-0.3 g kg⁻¹ hr⁻¹)から、斜面風の補償流として沈降流が存在した可能性もあることがわかった。また、乗鞍岳山頂付近では、第一夜、第二夜とも安定した西風が続き、高山市街では、第一夜は南から西方向で風向の変化が大きく、第二夜は18時ころまで西風で0時すぎから朝方までは安定した東風が変わった。これらのことから、CO₂フラックス過小評価は、タワー近傍における下降流の発生と同時に起こっていること、また、高山市外から乗鞍岳に至る水平スケールでの斜面下降流とも同時に発生している可能性があることもわかった。

表1 図4、6の番号に対応するフラックスの条件

フラックス	1	2	3	4
運動量	$u' > 0$ $w' > 0$	$u' > 0$ $w' < 0$	$u' < 0$ $w' < 0$	$u' < 0$ $w' > 0$
顕熱	$w' > 0$ $T' > 0$	$w' > 0$ $T' < 0$	$w' < 0$ $T' < 0$	$w' < 0$ $T' > 0$
潜熱	$w' > 0$ $q' > 0$	$w' > 0$ $q' < 0$	$w' < 0$ $q' < 0$	$w' < 0$ $q' > 0$
CO ₂	$w' > 0$ $C' > 0$	$w' > 0$ $C' < 0$	$w' < 0$ $C' < 0$	$w' < 0$ $C' > 0$

(2) 各フラックス輸送に対する複雑地形の影響の抽出

図4に高山の27m塔で測定された風向、潜熱、顕熱、CO₂、運動量フラックスの4象限解析結果を示す。グラフの数字と各成分の正負の関係を表1に示す。フラックス計算は10分間平均で行った。図4の一番下の運動量輸送のグラフを見ると、運動量は全期間の平均では負となり、上空から地面方向へ輸送されているが、各10分間で見ると下方ばかりでなく、上方へも輸送されている。グラフの負の側(下側)で2と4を比較するとおおむね2のほうが4より大きく、上空の速い風速が下方に降りて

1,3 は正值、2,4 は負値

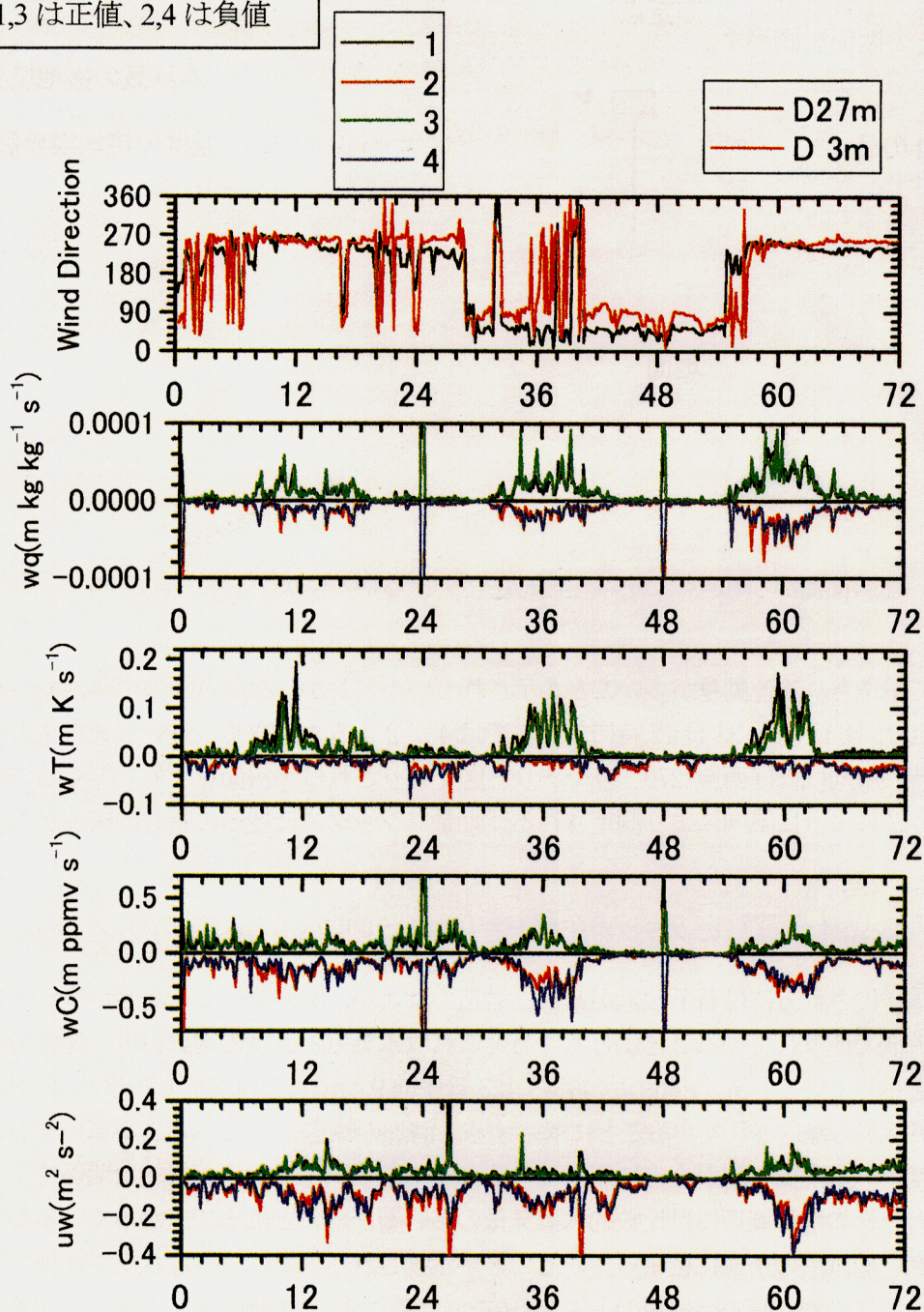


図4 高山 27m 観測塔により測定された風向、潜熱、顕熱、CO₂、運動量の各フラックスの4象限解析の結果。フラックスの平均化時間は 10 分間である。潜熱と顕熱では真夜中の 0 時にキャリブレーションが入るため異常値となっている。横軸は 1999 年 8 月 21 日 0 時から時間数である。

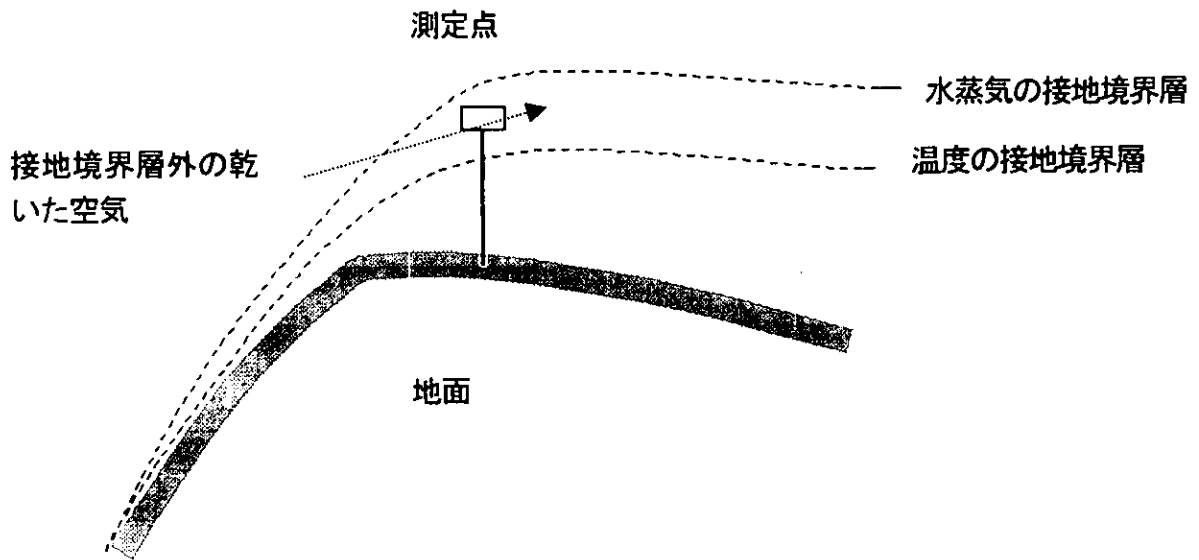


図5 急斜面側から測定点に乾いた空気がやってくる時の模式図。

くることによって輸送される運動量が多いことが示されている。しかしながら図の12時間と60時間の付近（それぞれ21日12時と23日12時に対応）では4が2よりも大きく、遅い風速が上方へ運ばれている。この時の風向はほぼ西風（270度）であり、図1よりこれは急斜面を上昇してくる方向の風に対応している。このように風向により測定される運動量フラックスに地形に特有の構造があることが示唆される。

次に潜熱($\overline{w'q'}$)と顕熱($\overline{w'T'}$)のグラフを比較すると、共に昼間は上方へ輸送されるフラックスが多い。しかし、輸送のされ方には若干の差があり、潜熱では3が、顕熱では1の場合が少し大きい。両者とも同じ乱流渦で運ばれていることから考えるとこれは水蒸気と温度の地表付近の鉛直分布が異なっていることを示している。57時間付近の潜熱（23日午前9時頃）には2のピークが2つ見える。2は乾いた空気が下から輸送されてくることに対応する。潜熱の輸送で一般的に3が卓越することは塔の下での観測高度での水蒸気勾配が上方に比べてゆるやかであり（温度との相対的な関係であるが）西風以外の風向のときの塔の周辺には比較的水蒸気量の多い層が塔の上にまで広がっているが、温度の場合は温度の高い層は塔の下側に留まっていることが示唆される。このような状況で西風の時には急斜面上にある水蒸気の濃度高い接地層の上にある乾いた空気が塔の観測高度に進入する（図5）。従ってこの輸送による潜熱の減少は地上の生態系からの寄与ではなく、結果として生態系からの潜熱を過小評価する原因となる。

同様な解析を苫小牧でも行った（図6：2000年8月17日～19日）が、風向による明瞭な差異は見られなかった。

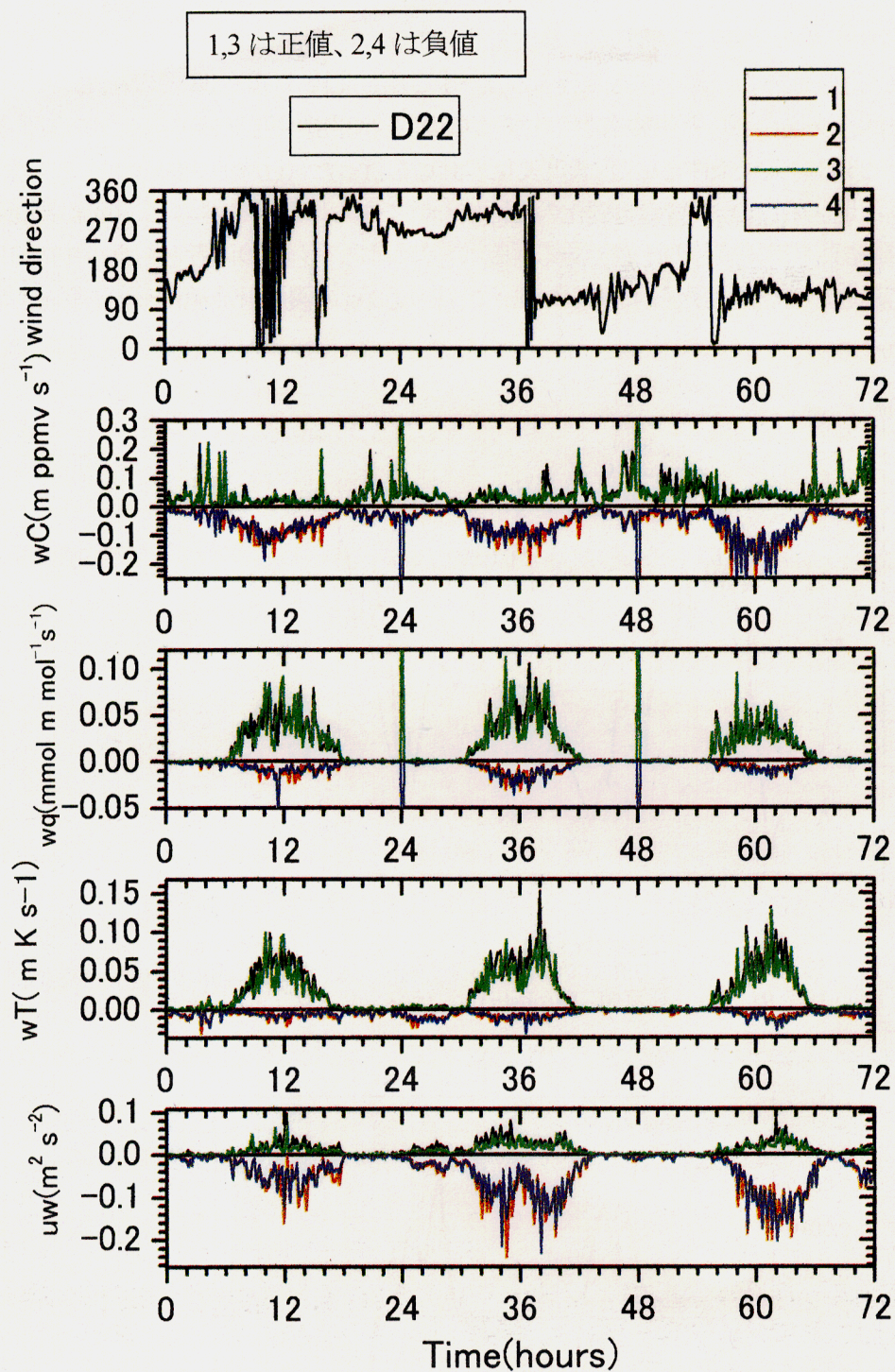


図6 苫小牧フラックスリサーチサイト 22m 高度における各フラックスの4象限解析。測定時期は2000年8月17日～19日。グラフの意味は高山と同じ。

(3) メソスケールモデルによるCO₂濃度変化の計算

中部・関東・近畿地方の一部を含む東経 135 度～142 度、北緯 33 度～38 度の範囲について、人為起源（産業、生活、交通など）と生態系から生ずるCO₂を水平解像度 10km のモデルに組み込み、1997 年 7 月 21 日～26 日の気象条件とCO₂濃度変化の計算を行った（近藤他 2000）。ここではこの計算結果を用いて高山地区のCO₂濃度の日変化の原因についてさらに解析を進めた。図 7 は高山におけるCO₂濃度の計算結果と実測値との比較である。細かい差異はあるものの両者とも真夜中の 0 時頃に濃度が最大となる。この変化をもたらす原因について、高度 30m の濃度計算値について鉛直拡散項と移流

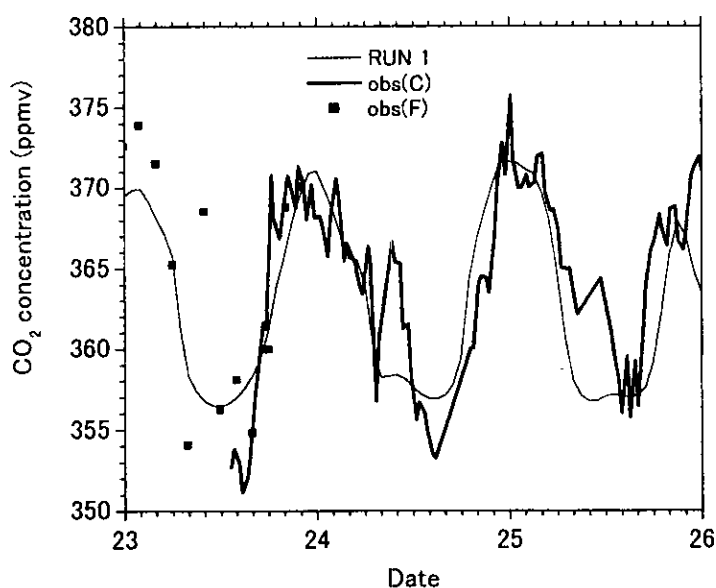


図7 1997 年 7 月 23-25 日の高山での CO2 濃度変化。太い実線が測定値(obs(C):連続測定)、細い実線(RUN1)が計算値、■(obs(F))はフラスコサンプリングである。

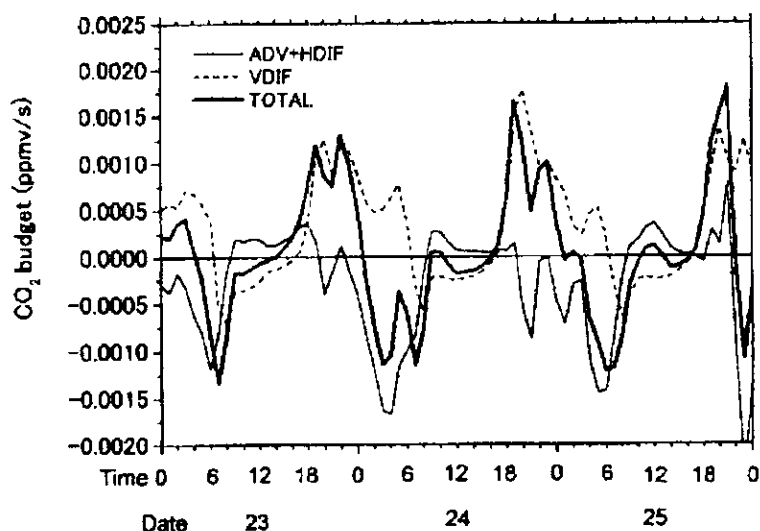


図8 高山格子点の地上 30m の CO2 濃度の時間変化に寄与する成分。太い実線がトータルの時間変化率、細い実線が移流、破線が鉛直拡散である。

項に分解してその時間変化を調べた(図8)。それによれば、真夜中からの濃度の低下は、北アルプスから高山市街方向へ向かう夜間の斜面降下流とともに起こることがわかった。山の高いところでは気温が低く生態系の呼吸量も少なく相対的に CO_2 濃度は低い。このような低い濃度の CO_2 が斜面降下流の発達と共に観測点に到達し、観測点の濃度を下げる。一方、鉛直拡散の時間変化を見ると夜明け直後に負のピークが見える。この時間帯は植生の光合成活動が始まったところであり、乱流拡散の卓越する大気境界層はまだ発達を始めたばかりである。高度 30m (塔の観測点の高度に相当) では、それより下に発達した乱流境界層によって下側への CO_2 の輸送が起こり濃度が低下する。しかしもう少し時間が経つと大気境界層の厚さが厚くなり、上空の高い濃度の CO_2 が下方に輸送されて濃度が一時的に上昇する。このような CO_2 濃度の午前中の変化は実測でも測定されている(図7)。

2000年8月24日から25日にかけて苫小牧ブラックスリサーチサイトにおける CO_2 濃度の高度分布をカイツーンによって測定した。明け方4時41分から6時13分までの測定によれば高度60m程度までの CO_2 濃度は高山に比べてかなり高くなり、高度20m(樹冠上7-8m)でも明け方の濃度420ppmvを越え、地上5mでは470ppmv程度となる。このように複雑地形地とは異なり平坦地形上では CO_2 が夜間接地境界層中に蓄積されていく。

4. 本研究によって得られた成果

二酸化炭素のカラム濃度は、バックグラウンド濃度を初期値とする二酸化炭素フラックスの時間積分値である。それは森林生態系の二酸化炭素収支そのものであり、一次元で近似できる場合は一点での測定でも高い精度で二酸化炭素収支を求めることのできる方法である。しかし実際の気象は水平輸送されながら地表面での収支を反映させて変化するので、その気塊の経路にそったフラックスの積分値となる。したがって、地上のフラックスの分布データと輸送を考慮したモデル計算と比較する方法が、均一と見なせる森林を囲む数点での観測を行い、この領域を通過する間に变化するカラム濃度を計測する方法を採る必要がある。こうした方法でカラム濃度の測定から地表面の二酸化炭素収支を求める方法は、一様でない地表面フラックスや地形が複雑であるなど渦相関法によるフラックス測定が困難な場合や、夜間の放射冷却で強い逆転層が生じ風が無いいため渦による鉛直輸送が小さく渦相関法の精度がでない場合などには、有効な方法と期待される。

今回は、その方法を検証する一ステップとして、北海道苫小牧のカラマツ林にある二酸化炭素フラックスモニタリングサイトの近くの一地点で、有索気球とカイトプレーンを使用して二酸化炭素の高度分布の時間変化を計測した。二酸化炭素のバックグラウンド濃度(前日の混合層内部の濃度、あるいは、接地境界層より上の大気中濃度)に対する変化分を高度に対して積分し、カラム濃度変動を計算した。カラム濃度の時間変化が森林からの二酸化炭素フラックスに相当し、8月24日から25日にかけての夜間の二酸化炭素放出速度は $0.4\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{sec}$ 、また、8月27日の夜明けから昼にかけての二酸化炭素吸収速度は $0.6\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{sec}$ であった。渦相関法による二酸化炭素フラックスの時間変化の観測結果は、夜間の放出速度については約1/2であり、早朝の吸収速度の大きさはほぼ合っているものの、時間変化は一致しない。この比較は水平輸送が無い場合か、水平輸送の範囲が均一な植生である場合に可能あり、実際はそうでないから不一致は当然予想されるところである。しかしながら、カラム測定結果がフラックス測定結果と大まかな一致を見たことは、基本的な考え方に大きな誤りが無いことを示唆する。

岐阜県高山市乗鞍岳山麓にある CO_2 交換量長期観測地点で、既存の27m塔のそばの林床に設置した

小塔における観測から、斜面下降流が発達する夜間に27m塔で測定されるCO₂フラックスが非常に小さいことがわかった。複雑地形周辺に生成される比較的小スケールの局地循環も測定量に大きく影響していることが示唆された。

27m塔で測定されている運動量、顕熱、潜熱、CO₂フラックスについて共分散を構成している各成分の正負に応じた4つの場合についてそのフラックスの絶対値を比較した。高山の場合西風で急斜面を上昇してくる風の時に測定される運動量フラックスと潜熱フラックスに他の風向と異なる特徴が見られた。また、顕熱と潜熱では輸送に携わる渦の部位に差が見られ、測定高度における温度（濃度）勾配、あるいは接地層の厚さに差があることが示唆された。このようなことから、西風の場合には接地層の上の乾いた空気の影響が観測点で潜熱フラックスとして測定され、結果的に生態系からの潜熱を過小評価している可能性が示唆された。

メソスケール気象モデルに人為起源と生態系起源のCO₂の発生・吸収源を組み込み、高山におけるCO₂の濃度の時間変化への移流と鉛直拡散の寄与を調べた。高山では苫小牧などの平坦地形とは異なり、CO₂の最大濃度は真夜中に出現する場合がある。このような時には真夜中から朝にかけて乗鞍岳方面から斜面下降流が吹いてくる。高度の高いところでは気温が低く生態系の活性度が低いので斜面下降流のCO₂濃度は低くなる。また、明け方、CO₂濃度が一旦下がりその後一時的に上昇する現象が高山では見られることがあるが、これは大気境界層の発達段階と密接に結びついていることがわかった。

5. 参考文献

- Kondo, H. 1990: A Numerical Experiment of the Extended Sea Breeze over the Kanto Plain, *J. Meteor. Soc., Japan*, **68**, 419-434.
- Kondo, H. 1995: The thermally induced local wind and surface inversion over the Kanto plain on calm winter nights, *J. Appl. Met.*, **34**, 1439-1448.
- 近藤裕昭、三枝信子、村山昌平、山本晋、2000：気候・物質循環モデルによる気候変動の定量的評価に関する研究（7）森林生態系を含む局地気候モデルによる局地気候変動の評価に関する研究、GERF 研究報告書B-1、89-100.
- 村山昌平、山本晋、三枝信子、近藤裕昭、江口陽三、2000：冷温帯落葉広葉樹林における大気中CO₂濃度の長期観測、日本気象学会2000年秋季大会講演予稿集、D156
- Yamamoto, S., S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo, 1999: Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan, *Tellus*, **51B**, 402-413.

[国際共同研究等の状況]

なし

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表（学術雑誌）

- ①Kondo, H. N. Saigusa, S. Murayama, S. Yamamoto and A. Kannari, 2001: A numerical simulation of the daily variation of CO₂ in the central part of Japan -summer case-, *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 11-21.

(2) 口頭発表

- ①三枝信子・近藤裕昭・村山昌平・山本晋、2000: 夜間の CO₂ フラックス観測に及ぼす斜面下降流の影響. 日本気象学会 2000 春季大会.
- ②山本晋・三枝信子・村山昌平・飯塚悟・近藤裕昭、2000: タワーと係留気球による大気-カラマツ林間の CO₂ 交換量の観測 (序報). 日本気象学会 2000 秋季大会.
- ③近藤裕昭・三枝信子・村山昌平・山本晋・神成陽容、2000: 中部日本における夏期の二酸化炭素の広域的日変化. 日本流体力学会年会 2000.
- ④近藤裕昭、2001: CO₂ 濃度の日変化とメソスケール気象、第 50 回理論応用力学講演会.
- ⑤近藤裕昭・三枝信子・村山昌平・山本晋、2001: 複雑地形上の森林生態系周辺の二酸化炭素輸送について. 日本流体力学会年会 2001.
- ⑥Kondo, H., N. Saigusa, S. Murayama, and S. Yamamoto, 2001: An analysis of the relation between daily variation of CO₂ concentration and local flow induced by complex terrain, Sixth International Carbon Dioxide Conference in Sendai.
- ⑦近藤裕昭・三枝信子・山本晋・村山昌平、2001: 高山測定点におけるフラックス測定値への複雑地形の影響、日本気象学会 2001 秋季大会.
- ⑧渡井智則・町田敏暢・石崎教夫・井上元、2001: 模型飛行機搭載型非分散赤外分光計による二酸化炭素濃度鉛直分布の測定、日本気象学会 2001 春季大会.
- ⑨Watai, T., T. Machida, N. Ishizaki and G. Inoue, 2001: A new observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small airplane, Sixth International Carbon Dioxide Conference in Sendai.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 苫小牧民報、2000年8月10日
- ② 北海道新聞、2000年8月18日
- ③ 毎日新聞、2000年8月29日朝
- ④ 室蘭民報、2000年8月29日夕
- ⑤ 読売新聞、2000年8月30日朝
- ⑥ 苫小牧民報、2000年8月30日