

S-1 21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究

テーマII トップダウン(大気観測)アプローチによるメソスケールの陸域炭素収支解析

- (1) 大気観測ネットワークによる二酸化炭素のメソスケールの分布とその変動の観測
- (2) メソスケールのインバースモデルの開発による二酸化炭素収支分布の推定

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター 大気・海洋モニタリング推進室 町田敏暢
 主席研究員 マクシュートフ シャミル
 総括研究管理官 井上元(H18年3月まで)

独立行政法人海洋研究開発機構

地球フロンティア研究システム パトラ プラビル(H18年3月まで)

<研究協力者> 東京大学気候システム研究センター 今須良一・丹羽洋介
 独立行政法人国立環境研究所
 地球環境研究センター炭素循環研究室 下山宏
 衛星観測研究室 カルージュ クレア・ペレゴン アンナ
 古山祐司・カディグロフ ニコライ
 地球温暖化プロジェクト 大西領
 (財)地球・人間環境フォーラムつくば研究所
 渡井智則・篠原梓

サブテーマ1	平成14~18年度合計予算額	336,360千円
	(うち平成18年度予算額)	48,000千円)
	※上記予算額には、間接経費	77,621千円を含む
サブテーマ2	平成14~18年度合計予算額	45,365千円
	(うち平成18年度予算額)	13,000千円)
	※上記予算額には、間接経費	10,469千円を含む

[要旨] 本研究は、微気象・生態学的観測研究から陸域生態系の炭素収支を推定する方法(ボトムアップアプローチ)とは逆に、大気中の二酸化炭素濃度(CO₂)の観測からその地表面での吸収・放出量の分布を推定するもの(トップダウンアプローチ)である。即ち、地表面におけるCO₂の吸収・放出により濃度の変化した大気が、移流拡散した結果として、ある大気濃度分布となるが、移流拡散が正しいならCO₂の分布観測から逆に地表面の収支を推定する。そのためまず、1)観測候補地として地形が平坦で植生が比較的均一である西シベリアを選択し、地上における観測ネットワークの最適配置に関するモデル計算を行うとともに観測地点候補を現地調査し、10ヶ所の観測点を決定した。同時に2)

観測のインフラが不十分な場所で長期に安定的にしかも多地点で CO₂ 濃度を連続的に取得できる観測システムを新たに開発し、シベリアの気象条件下で必要な精度を発揮するシステムを作り上げた。観測装置の完成とロシア政府の観測許可を受けて、3) 西シベリア 5ヶ所、東シベリア 1ヶ所における CO₂ 濃度のタワー観測ネットワークを立ち上げ、詳細で高品質のデータを取得し、その変動パターンの特徴を明らかにした。最終的には西シベリアの観測点は 7ヶ所にまで拡大し、シベリア全体で 8ヶ所での観測ネットワークとなった。4) 観測で得られた CO₂ 濃度をフォワードモデルの計算結果と比較し、フォワードモデルの輸送スキームや陸上生態系モデルの CO₂ フラックスについての評価を行った。一方で 5) NIES モデルを用いたインバースモデルの空間分解能をさらに詳細にし、西シベリアにおける CO₂ フラックスの季節変動を明らかにした。同時に 6) LMDZ モデルを使ったインバースモデルを西シベリアに適用するための改良を行うと共にフラックス推定の評価を行い、西シベリアにおける CO₂ フラックスの詳細な変動を求めた。7) 最終的にインバースモデルによって推定された CO₂ フラックスを本研究課題テーマ 3 で推進した Sim-CYCLE モデルの計算結果と比較し、両者の違いについて検討を行った。

[キーワード] 二酸化炭素、メゾスケール、西シベリア、大気二酸化炭素濃度観測、インバースモデル

1. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) は言うまでも無く、自然の大気・陸域生態系・海洋の間を循環しているが、化石燃料消費・セメント生産・森林伐採など人為的な活動により、その循環が大きく変化している。気候変化が人間社会に大きな打撃を与えないレベル以下に、温室効果ガスの濃度レベルを保つ事が重要であるが、その実現には大きな努力が必要とされ、最も適切な地球環境管理を行うためには、人為的な放出をどのレベルに抑制する必要があるかを明らかにすることが必要である。それには人為的な放出の半分を吸収している陸域と海洋の炭素循環のメカニズムを理解し、それが将来どの様に変化するかを予測する必要がある。

その第一歩としては、CO₂ の陸域と海洋の放出／吸収の空間分布を明らかにし、その季節変動、年々変動の現状とその駆動力を解明することが必要である (GCP レポート)。海洋の CO₂ 放出／吸収は、大気海洋の CO₂ 分圧の差を埋める方向に動き、その大きさは分圧差と海表面風速によって決まる。この測定は分圧差の直接測定により精度良く測定できる。植物プランクトンが大量に発生するブルームを除いては、海洋吸収の空間分布は比較的緩やかな分布をしており、空間的・時間的に密度の低い観測からでも炭素吸収の空間分布の推定が可能である。他方、陸域での CO₂ 収支は極めて複雑な空間分布をしている。化石燃料消費やセメント生産による CO₂ 放出量は先進国に偏重しており、先進国では統計データも信頼性が高いことから、空間分布や年々変動は比較的精度良く把握できている。しかしながら、中国・インドなど経済成長の著しい国々の割合が増えており、その排出統計の信頼性は低い。更に農地化や都市化による森林減少、バイオマス燃焼、森林をはじめとする陸域生態系の CO₂ 吸収は複雑である。土地利用の形態と分布が複雑であり、その環境の違いにより炭素固定量や放出が大きく異なる。現在、数十箇所の地点で CO₂ フラックスが測定されているが、これは全球の炭素収支を推定するデータとしては遥かに不足している。森林の材となる部分については長期のデータがあるが、土壌炭素の収支データはごく僅かである。管理されている森林や農地や牧畜地なども同様である。そのためボトムアップの手法で推定した地球全体の収支には大きな誤差を含んでいる。

米国 NOAA の実施している大気中の CO₂ 濃度測定地点は約 90 ヶ所あり、相互にスケールが合っているのでトップダウンアプローチのデータ解析（インバースモデル）に広く使われている。その測定は毎週ボトルに大気を採取して NOAA に輸送し分析する方法を取っている。海洋性大気など空間的均一性が高く、時間的にも変動が少ない場合には、毎週のデータが代表性を持っているが、陸域のように日変化や空間的变化が大きいところでは、地上での連続測定か、航空機による自由対流圏の観測が必要である。本研究では地上での連続測定データを比較的高密度（1000km スケール）で取得し、地域規模のインバースモデル解析を用いた新たなフラックス推定手法の開発にチャレンジする。

2. 研究目的

陸域生態系における CO₂ 収支の測定は、テーマ 1 で行っている微気象学的方法による観測が最も信頼できるとされている。これは約 1km 規模のスケールで森林における樹木や林床植生による CO₂ 吸収、樹木等と土壌の呼吸による CO₂ 放出のバランスを時々刻々直接測定し、それを積分して年収支を求めるものである。しかしながら、1 ヶ所での測定範囲は狭く、また、信頼できるデータが得られるのは平坦な場所に限定されており、複雑地形での炭素収支は測定できない。また、観測手法による僅かな系統的バイアスが、通年観測では大きな差異となることがわかってきた。そのため誤差要因の小さい条件でのフラックス測定結果から森林の炭素収支モデルのパラメータを決定し、広域にスケールアップする方法が取られている。具体的には、先ず、比較的均一な植生で、地形的に平坦な場所で、その植生での炭素収支の大きさや時間的変動を測定する。その大きさや変動要因を、樹種、樹齢、気温、湿度、日射、土壌水分、土壌タイプ（栄養塩）などをパラメータとしてモデル化する。これを衛星画像データや実測によるパラメータ、気象観測から得られるパラメータによりスケールアップして、全球的な植生による炭素収支を推定する。この方法はボトムアップアプローチと呼ばれる。多くの植生タイプや異なった気候帯での観測データが積み上げられ、また、衛星画像データの解析手法の発達により、データベースやモデルを進化させより信頼性のあるデータを得る努力がなされている。また、このアプローチは気象データをパラメータとしているので、将来の気候変化に対する CO₂ 収支の応答を推測できるという、極めて重要な課題を担っている。しかしながら、その信頼性を確認するには、これと独立の観測によりスケールアップした結果を検証する必要がある（図 1）。

本テーマの研究課題は次の二つである。

- (1) 大気観測ネットワークによる CO₂ のメソスケールの分布とその変動の観測
 - (2) メソスケールのインバースモデルの開発による CO₂ 収支分布の推定
- しかし、本テーマは (1) の観測と (2) のモデル解析が一体となって密接な相互作用をしながら研究を進める必要があり、実際の研究の流れとしては以下ようになる。

- 1) 最終的アウトプットとして、この研究で得られる観測データと地理学的データベースから CO₂ の収支を明らかにすることをターゲットとし、そのために必要な観測地点のデ

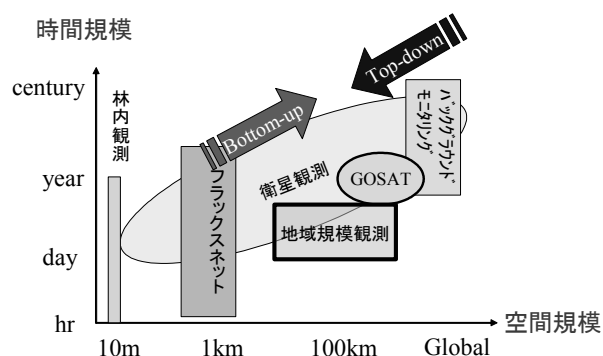


図 1 IGC0 の提起している炭素循環研究の全体像。本研究は Top-down の地域規模観測に対応する。

デザインを行う。

- 2) そのデザインに適合する観測地点をインフラや人的資源を考慮して選定する。
- 3) 外的条件に適合し、モデル側が必要としている観測の方法・計測精度の実現。
- 4) 観測の実施と観測データの評価・蓄積。
- 5) 初期値を与える陸域炭素収支のモデルの選定。
- 6) フォワード計算と実測との比較。
- 7) 高分解能インバースモデルの開発。
- 8) 観測データの解析。

従って報告はサブテーマ毎に分離することはせず、この研究の流れに従っておこなう。

3. 研究方法

大気中の CO_2 濃度はグローバルには過去の CO_2 収支の積分値であり、森林の農地への転換、それに続く産業革命以降の化石燃料燃焼という人為活動の結果を反映した濃度を示している。大気中の CO_2 の濃度分布は、そのような長期に蓄積された影響を反映したバックグラウンドの濃度に、比較的短時間における地表面での CO_2 収支をある時間・空間で積分したものを加えたものとなっている。森林樹冠の直上（樹冠上約 20m まで）では、森林が CO_2 を吸収している時について言えば、乱流により上昇流があればその中の CO_2 濃度は低く、下降流では高い。これを原理として鉛直風速と CO_2 濃度変動との相関を求めフラックスを直接測定している（渦相関法）。さらに上空では地表面でのそうした CO_2 収支の影響を受けつつ、一般風により水平に輸送された結果を反映した大気となっている（図 2）。即ち、水平輸送中に各場所での地表面と相互作用をし、その結果を積分したものが、ある時点での濃度である。大気は水平輸送中に乱流により拡散するので、ある場所、ある時点で観測した結果は、近い距離での狭い範囲での相互作用と、遠い距離での広い範囲

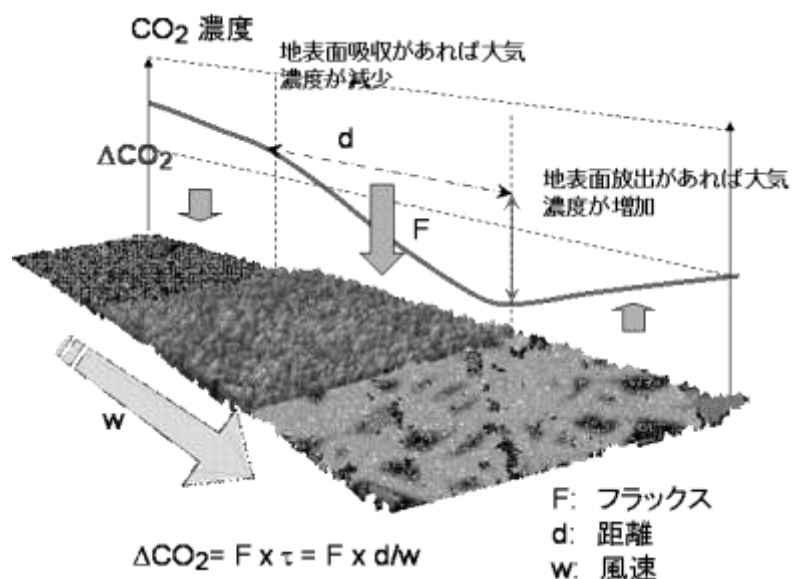


図2 大気の輸送中に地表面での炭素収支が大気中 CO_2 濃度を変化させる。

たものになっている。数日の規模では、ある場所では昼間の吸収を、次の場所では夜間の呼吸を反映し積算したものとなっている。地表面の植生が異なれば、それぞれの植生による吸収・放出の大きさを反映している。逆にいえば、ある地点での CO_2 濃度がバックグラウンドに対して変動するが、それを解析すれば過去に経てきた相互作用の大きさを推定できる。また、同一の気塊を追跡しその濃度変動を測定すれば、その変動から地上での相互作用の大きさをより直接的に評価できる。

こうした考察から、二つの観測手法が考えられる。一つは、例えばヘリコプターや大気密度とバラ

ンスした気球により大気の輸送を追いつつ、CO₂濃度の変動を測定する方法である。もう一つは水平輸送の上手と下手に固定の観測場所を設け、定常的にその濃度差を測定する方法である。前者は大気濃度測定と乱流拡散の測定を行えば、極めて精度良く、経由地それぞれの炭素収支を測定できる利点があるが、その観測は経費の嵩むものになるため頻度は限られ、長期継続的な観測には向かない。また、相互作用が弱い場合はCO₂濃度の変動が小さく、測定精度の限界以下になる。固定点での濃度差を測定する方法は長期継続的な観測が可能で、CO₂収支の日変動、季節変動を推定するには有利であるが、大気の輸送が一方方向ではないので、観測地点を多数設ける必要がある。また、前者と同様に観測地点が近いと空間的分解能が上がり、また、短時間の変動が直接測定できる反面、その間の変化を測定する高い精度が必要である。本研究では、CO₂収支の日変動よりも日収支やその中長期変動と環境因子の関係を求め、課題テーマ1の観測やテーマ3のモデル化・スケールアップの検証を行うという目的から、定点で観測する後者の手法を採用した。しかし、地上での観測は大気境界層内の観測であるため、自由対流圏濃度とは異なる可能性があり、実際に航空機観測と地上観測の値を比較する観測も必要である。(図3)

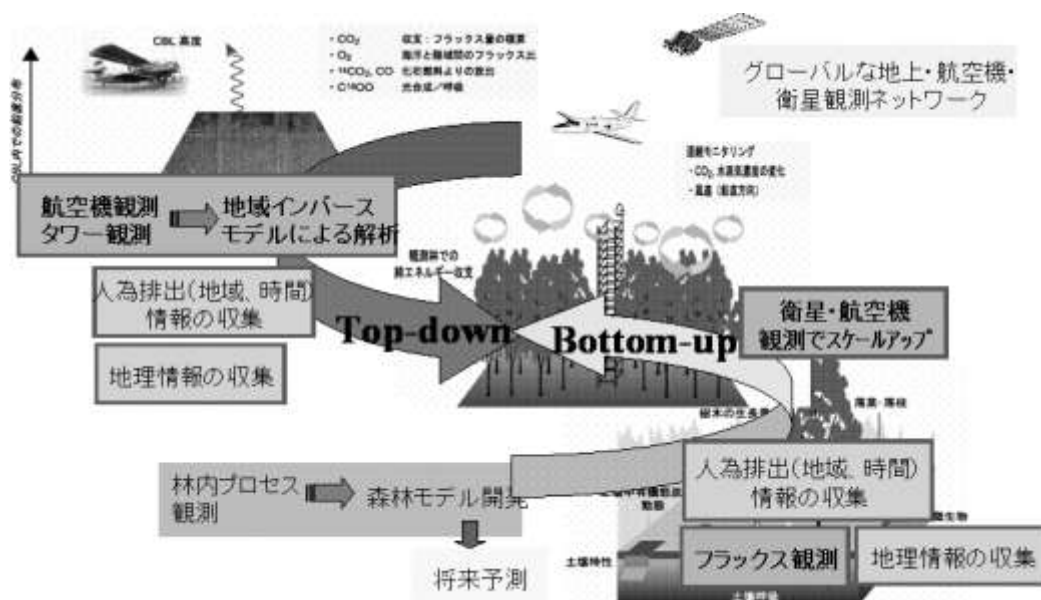


図3 トップダウンとボトムアップのアプローチの概念図

現在の大気中CO₂濃度測定の実用的確度は0.2ppmである(標準ガスの検定では0.1ppmより良い確度が出ている)。固定点でCO₂濃度をモニターして、その間のCO₂収支を測定するには、どの程度の距離を置く必要があるかを概算してみる。温帯や亜寒帯林の生育期の炭素収支の代表値として、120g C m⁻² month⁻¹とし、混合層高度を1000mと仮定する。大気の水平輸送が無く、混合層全体に鉛直混合のみをするケースでは、600mg CO₂ m⁻² hr⁻¹=7.2ppm day⁻¹=0.3ppm hr⁻¹の濃度変化が期待される(これは長期の平均値であり日内的変化はもっと大きい)。混合層の平均風速を5m s⁻¹(18km hr⁻¹)とすると、1日には432kmを移動するので、1500kmの距離で3.5日、二酸化炭素濃度は1ppm減少することになる。これは十分測定精度内に入っている。測定精度0.2ppmで決定できる吸収量は300km規模の観測ネットワークとなる。わが国の森林の多くは山岳部にあり、微気象学的方法でフラックスを測定することが困難な場所が多いため、大気計測から収支を測定する方法が有利であるが、現在の測定精度では300km規模の観測ネットワークで観測することになり、わが国土のサイズを越える。また、この方法は開発

段階にあり、先ず大気輸送や比較的単純である地表面の起伏が少ないところで実施検証する必要がある。また植生分布もできるだけ複雑でない方が好ましい。そのため、観測場所として西シベリアを対象とすることにした。

CO₂ フラックスを推定するためのインバースモデルの仕組みを以下に説明する。Globalview の CO₂ データ総合化プロジェクトにあるように、平均の CO₂ 濃度を使って、CO₂ の地表面フラックスを年平均で求めることは、Bayesian synthesis inversion を使った ‘時間に依存しない’ インバースモデルで可能である。コスト関数 F は、大気観測 D_0 と、地表面フラックスから輸送モデルにより予想されるもの $D = G \cdot S_0$ の差異であり、それを最小化するのがこのアルゴリズムである。

最初のフラックスが S_0 であり、 S が予想されるフラックスである。

$$F = (G \cdot S_0 - D_0) \cdot C_D^{-1} \cdot (G \cdot S_0 - D_0)^T + (S - S_0) \cdot C_S^{-1} \cdot (S - S_0)^T$$

予想されたパラメータと先見的なパラメータの差異は、濃度や地域的な発生源とによって重み付けて、最小化する。本手法では、これらのマトリックスを対角化し、対角因子は CO₂ の濃度と発生源の不確定さの自乗に等しくした。輸送モデルで、化石燃料燃焼、陸域 CASA モデル、大気海洋交換モデルなどからのフラックスに応答する大気年平均濃度を計算する。さらに、地域的な発生源の効果をモデル化するために、22 の地域（陸域 11、海洋 11 の領域）からのフラックスへの年平均応答を用意しなくてはならない。高い空間分解能のケース (HiRes) では、地上の多くの地域を 4 つの小さな領域器に分割し 42 に増加させた (図 4)。インバースモデルを解いて、コスト関数を最小化する地域フラックスを得ることができる。さらにフラックスの統計誤差 (フラックス不確定性) を数学的に予測することが可能である。フラックスの不確定性は次のようにあらわされる。

$$C_S = (G^T \cdot C_D^{-1} \cdot G + C^{-1})^{-1}$$

CO₂ 観測の最適化を行うことは、 C_S の値を最小化することを意味する。

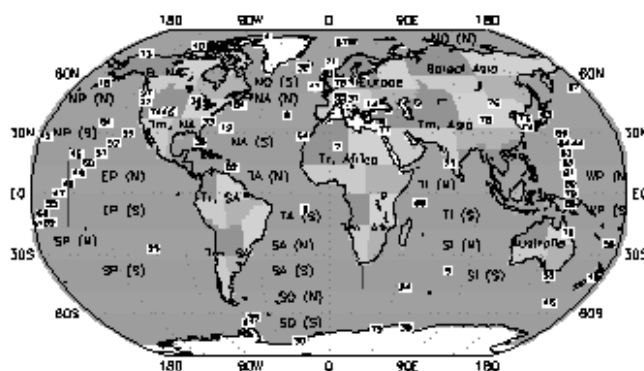


図 4 陸域を 42、海洋を 22 に分割した、インバースモデルのグリッドと計算に使用した CO₂ 濃度観測地点。

本研究では主として NIES の開発したグローバルな輸送モデルを、FRSGC と東北大学が共同で改良したものを使用した。このモデルは高度方向には 15 層、水平では経度 144、緯度 72 に分割する。大気境界層内の移流はセミラグラジアンでサブグリッドのプロセスは、鉛直拡散、等価質量フラックス、渦拡散でパラメータ化する。輸送モデルは 1997 年の 12 時間毎の ECMWF データを使った。インバージョンモデル計算で地表面フラックスに最適に拘束を与える場所を探すようにプログラムした。計算の詳細

細は Patra and Maksyutov, 2002⁷⁾ 詳細に述べている。

また、NIES モデルの他に本研究で CO₂ フラックスを導出するにあたって、フランスフランス気象力学研究所 (LMDZ) が開発した輸送モデルをもとにしたインバースモデルを用いた。さらに、シベリアでの観測結果を比較するフォワードモデルには東京大学気候システムセンターが開発した NICAM モデルも使用した。

4. 結果・考察

(1) 観測ネットワークの適正配置に関する研究【サブテーマ2の成果】

地表面の CO₂ 発生量をインバージョン法によって推定するためには、大気中 CO₂ 濃度の観測データセットが必要である。しかし、現時点で存在している大気観測ネットワークは疎であり空間的に均一でもない。衛星はグローバルに同一のセンサーで観測できるため空間分布の違いを精度良く観測できる利点があり、GOSAT (日本)、OCO (米国) による観測が計画されている。CO₂ 濃度のシミュレーションによると¹²⁾、地表面での濃度分布は発生や吸収の場所を反映しているが、5km より上空の分布は輸送拡散により地上での収支を同一緯度帯で平均化したものになっている。そのため地域的な発生の情報を含んでいる対流圏下部や大気境界層を測定する必要があり、現在計画されている衛星センサーはいずれも地表面から成層圏までのカラム濃度を測定するものになっている。GOSAT 衛星での精度要求は 1ppm が期待でき、地上観測などのデータと併せてグローバルな炭素収支分布の推定誤差 (全球 22 分割) を半減すると予想されている⁹⁾。他方、航空機による CO₂ の高度分布のモニタリングはわが国をはじめ米国や EU が実施しているが、経費がかさむので観測点は少ない。NIES・日本航空らは民間航空機による観測のための技術開発を終え、今後アジア地域で飛躍的にデータの増加が期待される。初期の研究で、われわれは各観測ステーションがどのくらい不確定さを減じているかを評価した¹¹⁾。

この研究の焦点は、インバースモデルでシベリアや北ユーラシア地域での観測地点を最適化することにある。地域的なフラックス評価の不確定さは、最適増加手法により減少させることができる。これは近い将来実現する衛星観測や航空機観測、さらには地球観測サミットの決定を受けた地上観測網の充実などにより期待される高密度の観測データを駆使した、高い分解能での炭素収支分布推定的手法として大きな役割を發揮すると考えられる。

空間分解能の高いインバースモデルでは、低分解能での結果に比べより均一に観測点を増やす方が良いという結論になった。これは、フラックスの不確定さが最も大きい場所での観測を行えば、そこでの不確実性を低減するが、最適化するにはもっと広い範囲をカバーしなくてはならないという原理からである。そのため例えば亜寒帯アジアでは、高分解能では相互に離れた 4 つのステーションが必要という結論になっている。また、北アメリカの亜寒帯では、低分解能では中央に 4 ヶ所であったが、高分解能では更に広い範囲で中央や東カナダが必要であるという結論になった。

シベリアの陸域炭素貯留はグローバルな炭素循環に関連した多くのプロセスを研究するのに適している。この生態系は炭素を大量に蓄積している場所の一つであり、また、グローバルな炭素貯留量の増加の 23% を占めている⁸⁾。更に実用的には、インフラの点から観測ネットワーク建設が可能かどうかの判断が必要で、一つの候補としてロシアのガスパイプラインに沿って建設されたタワーネットワークを考えることにした。

図 5 はフラックスの不確定さを少なくするために観測ネットワークを最適化したものである。西シベリア全体のフラックスを推定するには、亜寒帯ユーラシア全体の最適化を行った (A) が、そのうち

優先されるのは西シベリアの下流にあたる1～3の地域である。これは90–100° Eにある。次のステップは西シベリアの内部や境界の最適配置である。ここではインフラが整備されている場所（パイプライン）という制限で、ウラル山脈の西はのぞいた。新しいステーションの候補(B)は、ここでも風上（西側）風下（東側）であり、第二は中央である。この場合は、ステーション数の増加による不確定さの低減が(A)よりも遅い。

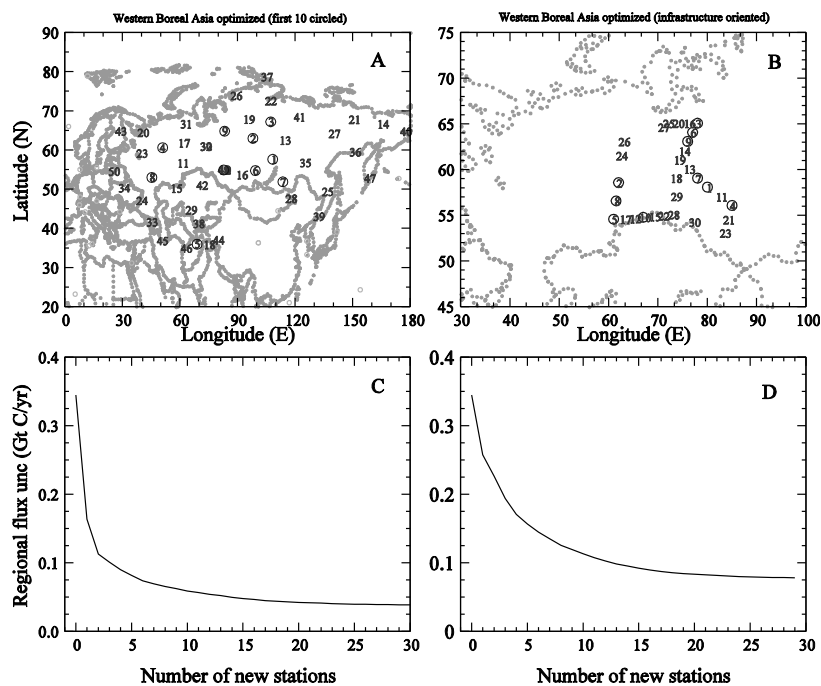


図5 亜寒帯アジア西部の二酸化炭素フラックス推定の誤差を低減するための、観測地点の最適化（Aは広域，Bは西シベリアの観測地点）。
C，Dはステーションの数を増やした場合の不確定さの減衰をあらわす。

(2) CO₂濃度ネットワーク観測展開【サブテーマ1の成果】

1) 観測地点

本研究では、大気インバースモデルの入力データとなる、大気CO₂(CO₂)濃度分布を得るために、西シベリアを中心とした2000kmスケール内に、新たな観測網を展開した。ローカルなCO₂放出・吸収の影響の少ない、空間代表性のあるデータを得るためには、高度方向に出来るだけ地表面から離れた場所で大気をサンプルする必要がある。したがって、地上での観測を実施するためには、ある程度の高さを持ったタワーが必要である。さらに、観測機器を稼働させるための電力供給、装置の点検やデータ回収のためのアクセスの便宜性など、幾つか考慮すべきインフラ条件がある。これらを考慮し、本研究ではロシア国内にて天然ガスパイプライン維持のために存在する、無線通信タワーを利用することとした。図6は、観測サイトの分布を示したものである。これらの観測サイトの選定には、(i) 前述のモデル計算による最適配置、(ii) 40m以上の高度、(iii) 300wの電力受給が可能であること、(iv) メンテナンスやデータ回収の協力、(v) 付近（特に風上である西）に工業地帯や高人口地帯が無いこと、(vi) 大気の輸送場を大きく乱す大河川や人工ダムが近くに無いこと、などを考慮した。選定された10箇所のサイト中、2006年までに西シベリアで5箇所、東シベリアで1箇所の観測が稼働している。これらの観測サイトの概要を表1に示す。また、本プロジェクト期間中に観測は実施されな

かったが、残りの2箇所における観測準備は既に整い、2007年から観測を開始できる状況に至っている。



図6 観測サイトの分布図

表1 観測サイトの概要

サイト名	略号	位置	観測高度
Berezorechka	BRZ	56°09'N, 84°20'E	80, 40, 20, 5m
Karasevoe	KRS	58°15'N, 82°24'E	67, 35m
Igrim	IGR	63°12'N, 64°24'E	47, 24m
Noyabrsk	NOY	63°26'N, 76°46'E	43, 21m
Demyanskoe	DEM	59°47'N, 70°52'E	63, 45m
Yakutsk	YAK	62°50'N, 129°21'E	70, 11m

2) CO₂濃度測定システム

本研究で開発した観測システムの概要を図7に示す。今回用いるCO₂濃度測定システムの条件として考慮したのは、(i)大気中CO₂濃度を0.2ppmの精度で連続測定、(ii)標準ガスによる校正、(iii)消費電力300W以下、(iv)消耗品の供給を抑制、(v)データの記録・データの回収のシステム化、などである。

CO₂濃度測定用の機器としては、参照ガスセルのない廉価型の非分散型赤外光吸収測定器(Li800; Li-COR, USA)を選定した。この装置に流量制御などの改造を加えることにより、数分のデータを平均化処理して0.1ppmのS/N比を実現した。大気中濃度の変動は数ppmであり、高いS/N比を必ずしも必要とせず、むしろ相互に比較できる校正システムがより重要である。

観測時間や高度別のラインや標準ガスの切り替えなどを考慮して、試料ガスの流量は約40ml/minに設定した。二高度の大気と標準ガスを20分毎に切り替えると、標準ガスの使用量は約20L/dayとなり35kgの大型シリンダの標準ガスを100日程度で消費する。標準ガスの検定・航空機輸送許可・輸送と通関など、これを供給する経費も作業も膨大なものになる。そこで現地で大気を採取し、それが均一になるのを待ち、これを現地標準ガス(Reference gas)として使用する事とした。高圧ガス製造の規制を避ける圧力で充填したものは約10日使用できる。日本から輸送した注意深く校正された標準ガスは、1日に2回使用すると、現地標準ガスを20回校正することになり、十分精度高く値付けられる。このシステムでは標準ガスの耐用年数は24倍になり、5年以上使用できることになる。

本装置では大気をポンプで加圧した後、凝結した水蒸気はトラップで除去し、次いでデニューダー

で乾燥し、さらに CO_2 飽和の無水 $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ により露点 -40°C まで乾燥させて測定する。これにより、標準ガスが -10°C から 30°C まで変化する環境下でも、測定精度に変化がないことが実験から確認された。

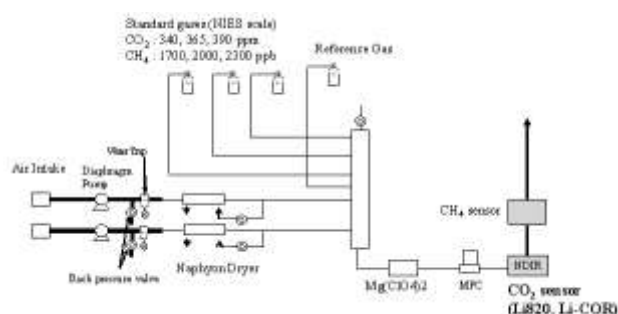


図7 CO_2 濃度観測システムの概要

3) CO_2 濃度の観測結果

a. 1時間観測値の変動

2002年以來、2007年3月までに観測が行われた6地点の全データ（1時間値）を図8に示す。黒線と灰線はそれぞれ、タワーにおける低高度と高高度の観測値である（各観測高度は表1参照）。最も早くに観測を開始した Berezorechka では、既に5カ年に渡る観測データが蓄積され、それに続く Karasevoe、Igrim では2カ年、2005年開始の残りのサイトも、1カ年以上の変動を得ることに成功している。

低濃度の値の季節変化に着目すると、5月初旬から顕著な低下が開始し、夏季の7~8月に最も濃度が低くなり、その後濃度が増加に転じる。これらは、すべての観測サイトに共通に見られる。この結果から、陸域生態系による光合成活動の季節変化を、正確に捉えていることが確かめられる。また、各年の最も低い CO_2 濃度が、年々増加傾向にあることも明確に捉えられる。

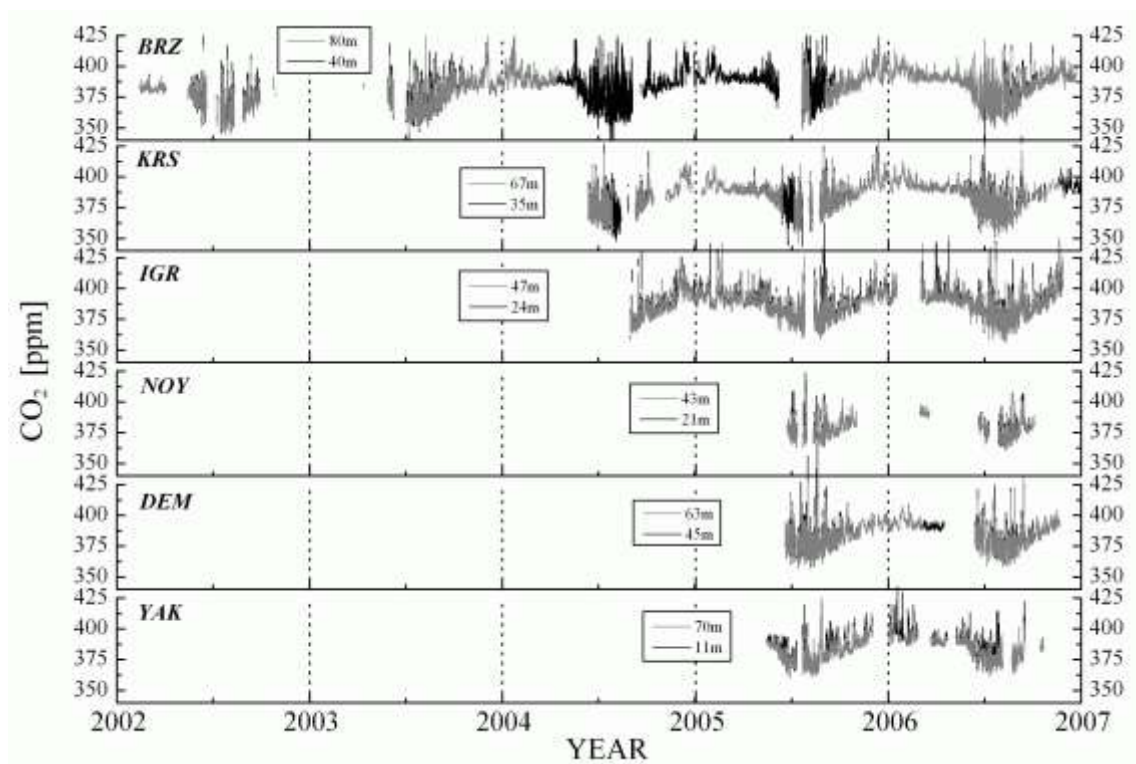


図8 CO₂濃度変動の時系列。上から順に、Berezorechka (BRZ)、Karasevoe (KRS)、Igrim (IGR)、Noyabrsk (NOY)、Demyanskoe (DEM)、Yakutsk (YAK) の1時間観測値を示す。

夏季と冬季の対照的な季節に着目すると、夏季は濃度変動が大きく、冬季は濃度変動が小さい。これは主にCO₂濃度の日変動を示している。図9に各月毎に平均したBerezorechkaのCO₂濃度の日変動を示す。日変動の振幅は冬季から夏季にかけて増加し、日中濃度は低く、夜間濃度は高くなる。夏季は夜間、日中ともに濃度変化が大きいが、特に夜間において顕著である。夜間のCO₂濃度の増加は、生態系の呼吸によって放出されるCO₂に起因する。観測高度の低いデータから徐々に濃度の増加が開始しており、近傍の生態系の呼吸によって放出されたCO₂が、地表面付近に蓄積されていく様子がはっきりとわかる。一方、日中は観測高度の低いデータからCO₂濃度の低下が始まり、大気鉛直混合によって地表面の高いCO₂濃度の空気が上層へ輸送される様子がわかる。鉛直混合の発達により大気境界層が形成されると、CO₂濃度が高度方向に一定となる。大気境界層が形成された後、CO₂濃度が低下するのは、植物が光合成によって大気CO₂を取り込んだ結果である。大気境界層高度が低い午前中は、顕著な濃度低下が観測される。一方、大気境界層が十分に発達した午後の時間帯は、濃度変化が小さくなっており、観測値の空間代表性が確認される。

これに対し、冬季は夏季と比較して、生態系活動は活発ではなく、また、高緯度地域であるため、日射量も非常に少ない。しかしながら、冬季の結果を詳しく見ると、その振幅は夏季のそれと比較して非常に小さいが、日変動の存在が確認される。正午前後の数時間を除いた時間帯では、地表面付近ほどCO₂濃度が高くなっている。つまり、冬季の大気CO₂濃度に、生態系の呼吸が影響を及ぼしている。そして、短い時間帯ではあるが、日中、CO₂濃度が高度方向に一定となり、鉛直混合の影響が捉えられる。すなわち、冬季も夏季と同様のプロセスによって、CO₂濃度の日変動が形成されていることがわかった。

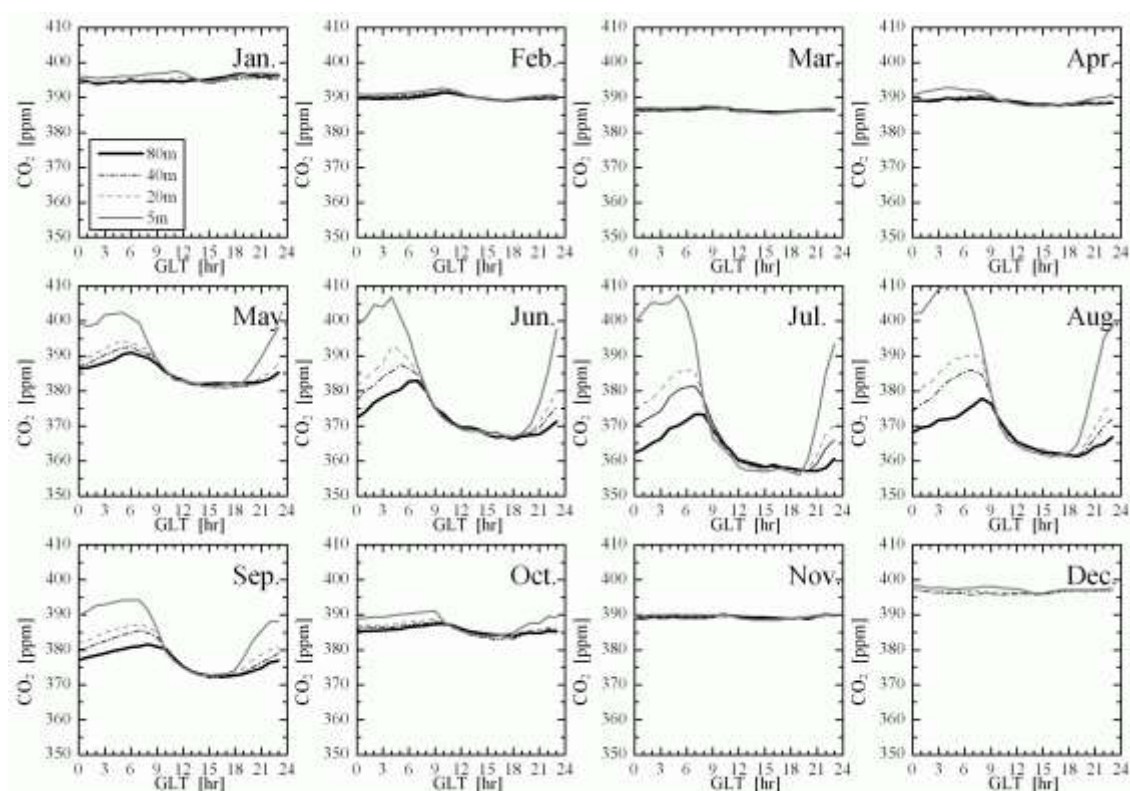


図9 BerezorechkaにおけるCO₂濃度日変動。2002年～2005年の各月におけるアンサンブル平均値を示す。

b. 観測データの代表性

地上での観測は、連続観測が可能であるという利点がある反面、夜間は強い安定成層が形成されるため、生態系呼吸、あるいは化石燃料消費により放出されたCO₂が高濃度に蓄積された影響を受ける。これらは非常にローカルな現象を強く反映するものである。本観測における第一の目的は、インバースモデルによる地域規模でのCO₂吸収・放出量推定のための基礎データの取得である。今回実施したタワーを用いた地上観測でも、昼間であれば、鉛直方向の混合が活発に生じており、大気境界層内と同じ濃度変動が観測されるものであることが推察される。夏季の大気境界層（＝混合層：ここでは、後述の接地境界層と区別するため混合層と呼ぶ）は、高度2000mにも発達することがある。従来の知見では、地表面の影響を強く受ける接地境界層は、混合層の下部10%程度の高度までとされている。今回の観測で用いるタワーの高度は、最も高いもので地上80mである。このため、タワーでの観測値と、混合層一般の濃度との間にギャップが存在する可能性も否定できない。そこで地上の観測データと航空機による観測データを比較し、地上観測データが、混合層（大気境界層）一般の値として、どの程度妥当性を持っているかを検討した。

図10aは地上80mでCO₂濃度を連続測定した結果のうち、昼間の全データを○でプロットし、また、航空機により上空のCO₂濃度の高度分布をオンボードで観測した結果のうち、500m以下のデータ（□）を合わせてプロットしたものである。航空機観測は午後1時から2時に実施している。航空機のデータとタワーのデータを比較すると、航空機のデータが地上データの低濃度側の包絡線上にあることがわかる。

図10bは、航空機観測を行った時刻の80m高度の地上データを、航空機観測の最低高度のデータと

あわせてプロットしたものである。両者を比較すると 2ppm の範囲で一致している。航空機の観測は目視飛行に限られるため晴天日に限られており、その条件では地上の観測データは混合層下部の代表性を有していると言える。曇天や降雨のある日には、CO₂濃度は図の包絡線より高くなっており、光合成が弱いため CO₂濃度の低下が小さかったためと判断される。曇天や降雨のある日の航空機観測データはないが、降雨時は鉛直混合が強いことが知られており、これらも混合層下部の大気代表性を持っていると考えられる。

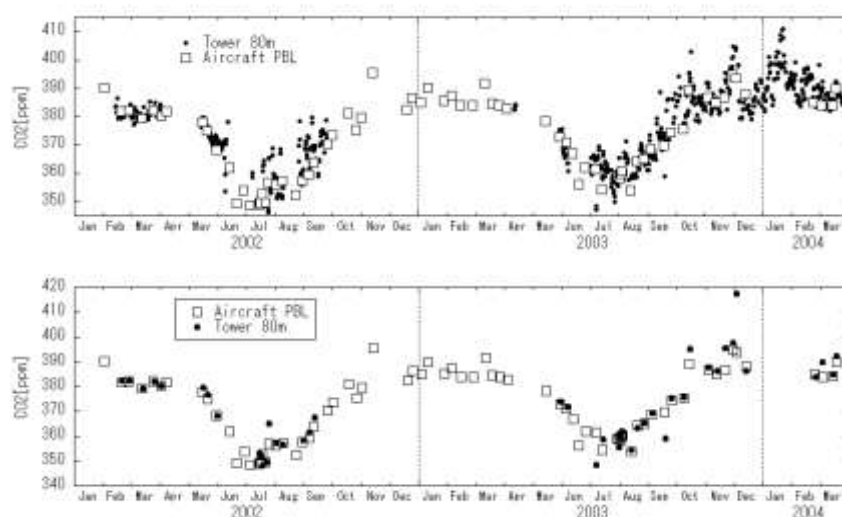


図 10 2002-03 年ベレゾレチカで、昼間の地上タワー観測で得た CO₂濃度(○)と、航空機観測で得た高度 500m以下の観測値(□)。(a)は全てのデータの比較、(b)は航空機観測を行った日の地上データのみ。

さらに、航空機による日変動の観測データを用いて詳細な検討を行った。航空機により高頻度で CO₂の高度分布を測定したケースについて、航空機とタワーによる CO₂測定値を比較したのが図 6 である。図 11 の(a) (b)にそれぞれ示した日射と気温からわかるように、2002 年 7 月 23 日はやや雲の多い日であったが、7 月 26 日は晴天日であった。航空機観測は 11 時から 20 時まで 1.5 から 2 時間おきに繰り返した。航空機で観測した大気境界層内の平均値を、タワーの各高度での連続測定値とあわせてプロットしたものが図 11 の(c), (d)である。40m 以上のタワーデータは、晴天日であっても曇天日であっても航空機の観測値と日変化を含めて極めてよく一致している。

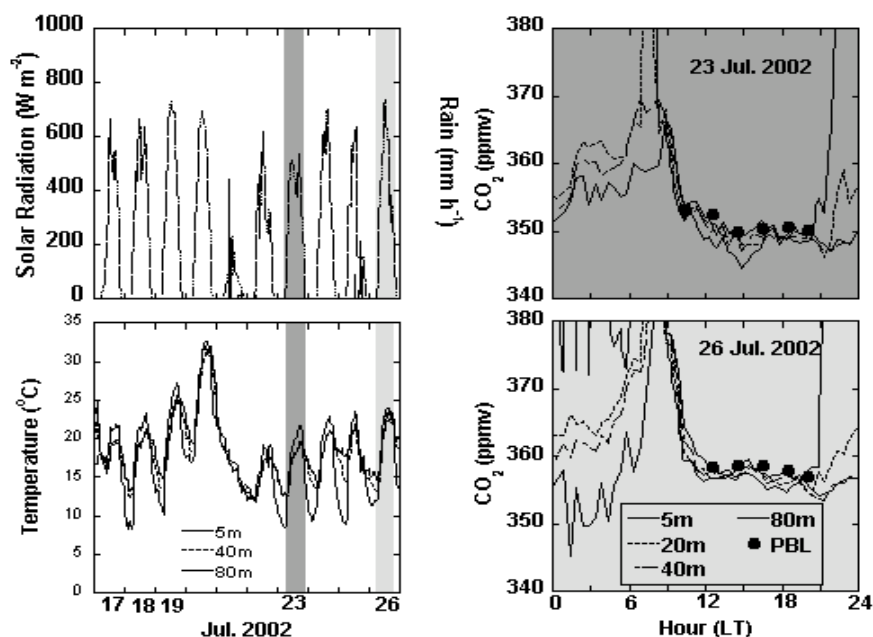


図 11 2002 年 7 月 23、26 日に、航空機による CO₂ 濃度高度分布の日変動観測を行った結果。大気境界層内の CO₂ 濃度を、タワーの連続観測値と比較した。
(a) は日射、(b) は気温（網部分が航空機観測時期）、(c)、(d) は CO₂ 濃度の日変動。

地上 80m 観測値と航空機 PBL 観測値の差を 2003-4 年のデータについてプロットしたものが図 12 である。この図から、以下の結論が得られる。日中午後の大気が混合した時間帯には、タワー高度 80m における CO₂ 濃度と、航空機によって得られた大気境界層内平均 CO₂ 濃度の差は±3ppm 以内にあり、その 90%は±2ppm 以内にある。しかしながら、航空機観測による大気境界層の値に比較して、地上観測データが明瞭に (4ppm 以上) 高いケースが、特に冬季に発生する。このときの気象データを見ると、長期の放射冷却により地表面が-20°C以下になり、大気が極めて安定化した日が続いていたケースである。こうした時期には日射があっても熱対流が起こりにくく、タワー観測高度が、安定成層内部にあることが明らかになった。

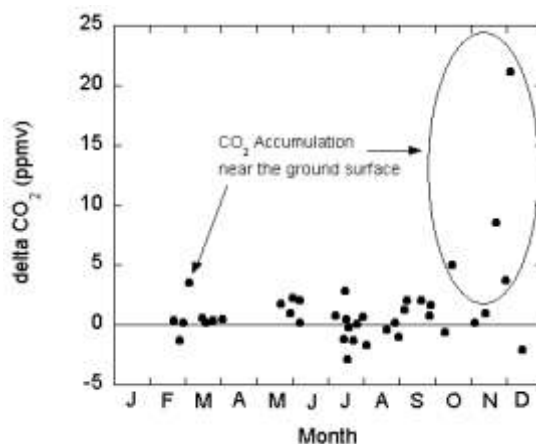


図 12 地上 80m 観測値と航空機による大気境界層観測値の差を 2003-4 年のデータについてプロットしたもの。矢印で示したケースは、地上観測値が 4ppm 以上高かったケース。

c. 日中データの変動

これまでの解析により、昼間の対流混合の活発な時間帯であれば、タワーでの観測値が、大気境界層を代表する値として取り扱いことが可能であることが示された。そこで図 13 に Berezorechka に例をとって示すように、昼間の対流混合が活発な時間帯の、大気境界層を代表するデータ(○で示した)を取り出す。昼間の時間帯に関しては、日変化の傾向を解析した結果、現地時刻 (GLT: 南中が 12:00 付近になるように経度から計算した時刻)、13時から17時のデータを用いることとした。

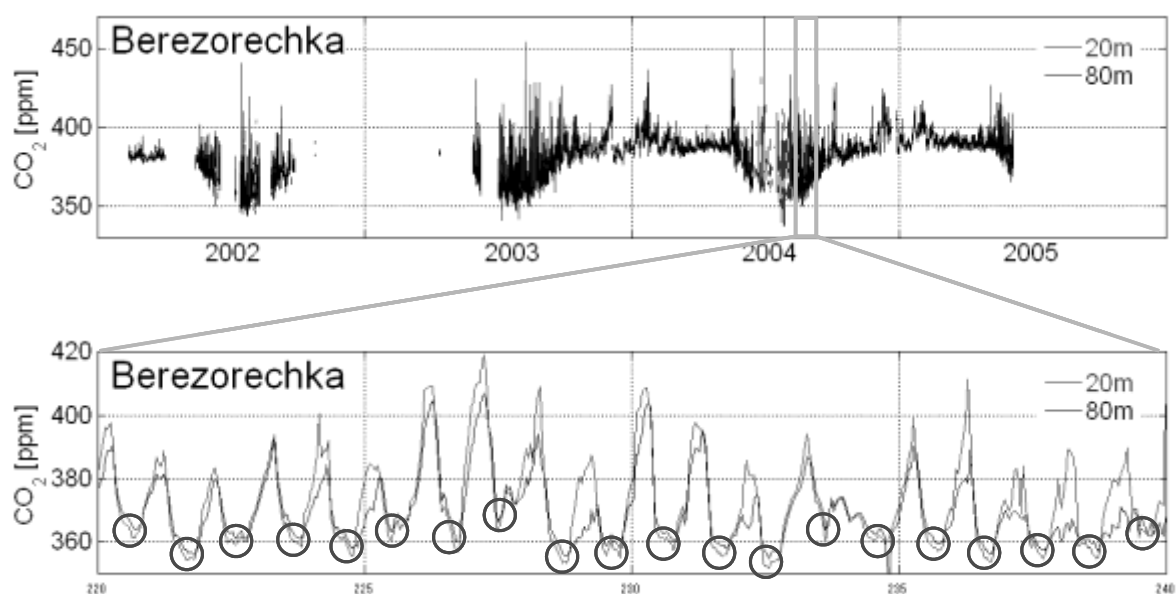


図 13 ベレゾレチカでの二酸化炭素濃度全データ(上)の一部を拡大した結果(下)から、混合層の一般的濃度として○で示す午後の鉛直混合の強い時間帯のデータのみを取り出す。

この時間帯の観測値のみ用いて計算した日平均 CO_2 濃度(日中平均値)の変動は、即ち広域的な空間代表性を持つ大気の変動を示すものである。各観測サイトに同様の処理を行なった結果を図 14 の白丸に示す。あわせて、最も観測期間の長い Berezorechka におけるフィッティングカーブとトレンドを、それぞれ実線と破線で示す。Berezorechka 以外のサイトとの比較を見るために、他のサイトにもこれらの結果を重複してプロットした。Berezorechka における 5 年間の濃度増加量は、約 10ppm であり、航空機観測で得られた値とほぼ同等の値であった。各サイトの変動を比較すると、夏季の濃度変化はサイト間で若干の違いが見られるが、季節振幅や濃度増加のトレンドには、ほとんど差が見られなかった。これは、大きな季節変動、年々変動が、大気の輸送混合過程によって支配されている結果を裏付けるものである。

一般的にバックグラウンドの大気の変動では、高濃度のピークは、 CO_2 の急激な低下が開始する直前に見られる。ところが本観測結果では、 CO_2 濃度が最も高くなるのは、どのサイトも共通して 12 月から 1 月にかけてであった。これは、前述したように、冬季の極低温下において生じる強い安定成層が、タワー高度内に存在することが原因である。

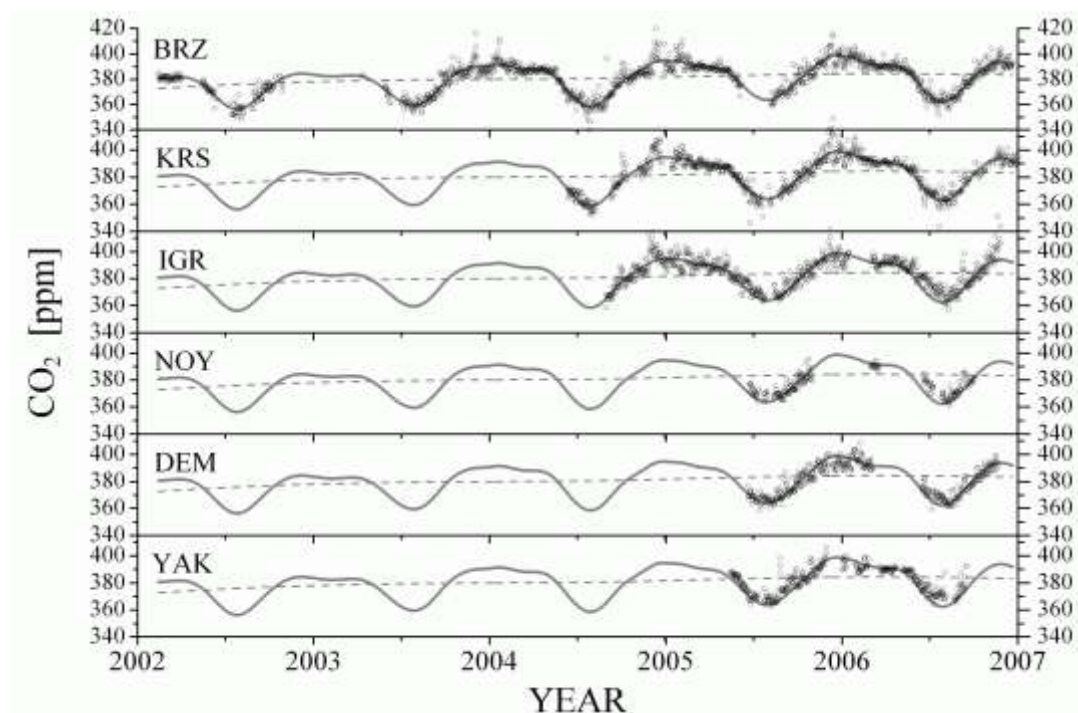


図 14 CO₂濃度の日中平均値変動の時系列。実践と破線はそれぞれ、Berezorechka におけるフィッティングとトレンドを示す。比較のために Berezorechka における両曲線を他の観測地点にも重ねて表示する。

観測サイト間での変動を詳しく比較するために、観測期間の長い上位 3 地点に対して、日中平均データに 7 日間の移動平均処理を施し、図 15 に表示した。Berezorechka と Karasevoe は西シベリア南東部に位置する観測地点で緯度経度が比較的近い。一方、Igrim は西シベリア北西部に位置し、前述の 2 地点とは大きく離れている。7 日間の移動平均を施した理由は、大規模大気場による変動をより明確に取り出すためである。冬季の変動に着目すると、隣接する Berezorechka と Karasevoe では、両者が非常に良く一致していた。一方、Igrim はこの 2 地点とは異なる変動を示すが、詳しく見ると、その濃度変動が先行して生じていることがわかる。これは、大気の流れは基本的には西から東へ移動するからであり、即ち、Igrim で観測された大気塊が、時間を経て輸送され、Berezorechka、Karasevoe で同様に観測されたものである。この結果は、本観測が、数 100km スケールの空間を代表する濃度データとその変動を、正確に捉えているという事実を示唆するものである。

夏季の Berezorechka と Karasevoe では、冬季と異なり、CO₂濃度とその変動には明らかに異なる傾向を示した。また、Igrim との間にも大きな違いが見られ、全体的に Berezorechka や Karasevoe よりも CO₂濃度が高かった。これは、Igrim が西シベリア地域の高緯度側に存在するため、西シベリア南部の Berezorechka や Karasevoe よりも、植物の光合成活動による CO₂吸収量が低いことを示す。一方、Berezorechka と Karasevoe は同様の植生、気候条件を持つ。従って、これらのサイト間で生じる濃度変動の差異は、各観測地点周辺における気象条件の違い、それに伴う生態系活動状況などに対応した、地域的な影響を強く反映しているものと言える。これらの結果からも、本観測データが、インバースモデルによる地域スケールの CO₂吸収・放出量分布推定するために、極めて質の高いものであることがわかる。

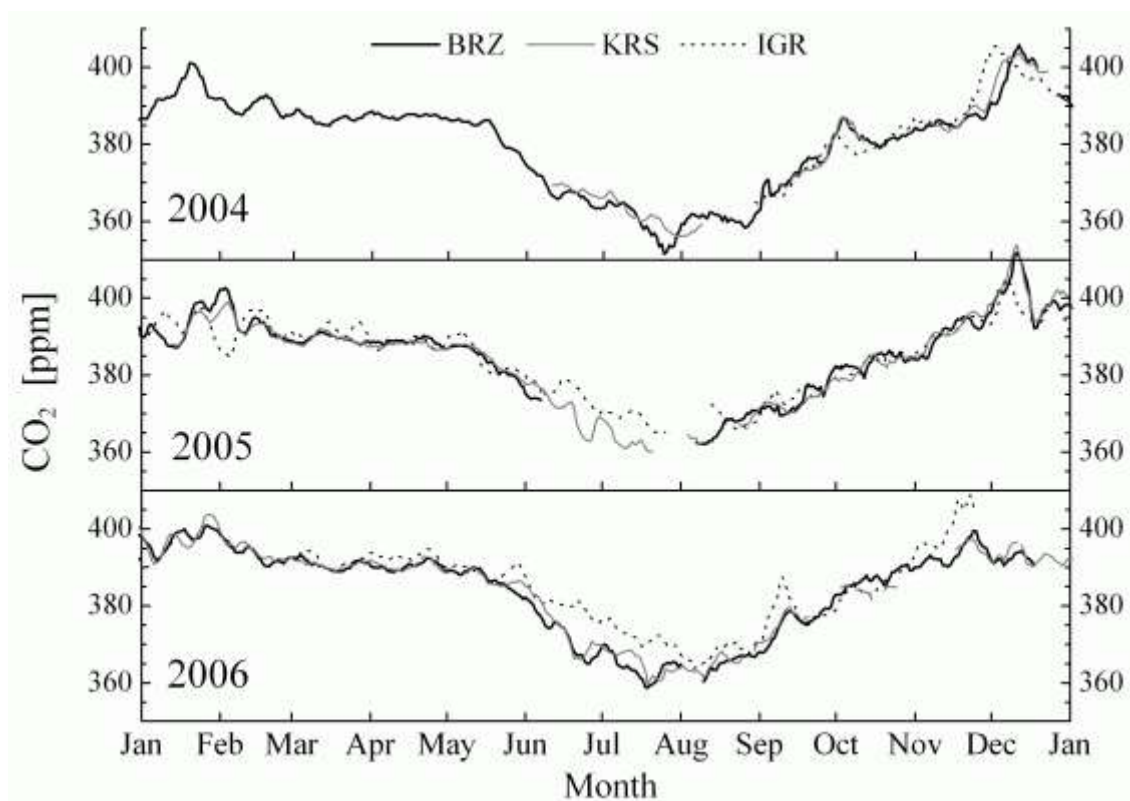


図 15 7 日間の移動平均処理を施した日中平均値の変動。観測期間の長い Berezorechka (BRZ)、Karasevoe (KRS)、Igrim (IGR) の 3 地点について示す。

d. フォワードモデルでシミュレートされた CO₂ 変動との比較

Berezorechka の観測データに対して、大気輸送モデルを用いて計算した CO₂ 濃度変動の結果を図 16 に示す。モデルの結果は、大気大循環モデル NICAM をベースとした輸送モデルに、地表面フラックスとして、化石燃料起源フラックス、大気-海洋間フラックス、植生起源フラックス (CASA モデルによる値) を入力し、計算された大気 CO₂ 濃度である。ここでは、2002 年から 2003 年にかけて計算されたモデル計算による CO₂ 濃度と観測値の変動を比較した。季節変化を示す両者のフィッティングデータを見ると、CO₂ 濃度の低下開始時期および季節最小値の時期が非常に良く一致しており、モデルによる季節変化の再現性が良い事がわかる。しかしながら、その絶対値を比較すると、観測で得られた季節振幅が約 32ppm であるのに対し、モデルは約 22ppm であり、観測値の値よりも 10ppm も小さく評価していた。

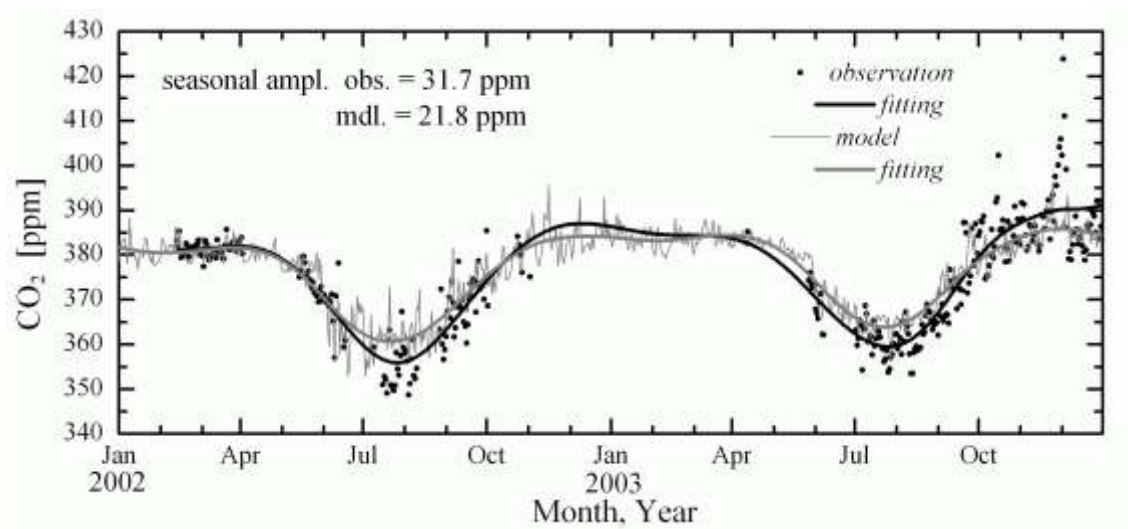


図 16 Berezorechka における CO_2 濃度観測値とモデル計算値の時系列の比較。

図 17 は各観測サイトに対して観測値とモデル計算値を比較したもので、モデル計算値に異なる 2 つの植生起源フラックス (CASA モデルと SiB モデル) を用いている。一見して、植生起源フラックスにより、 CO_2 濃度変動の計算値が異なることがわかる。また、季節振幅に着目すると、CASA による結果は、Igrim、Demyanskoe、Noyabrsk で良く一致しており、SiB による結果は、Berezorechka、Karasevoe で良く一致している。この結果は、植生起源フラックスを推定するモデルが、シベリアのような観測研究が不足している地域に対して、そのパラメータ設定が不完全であることを指摘するものである。

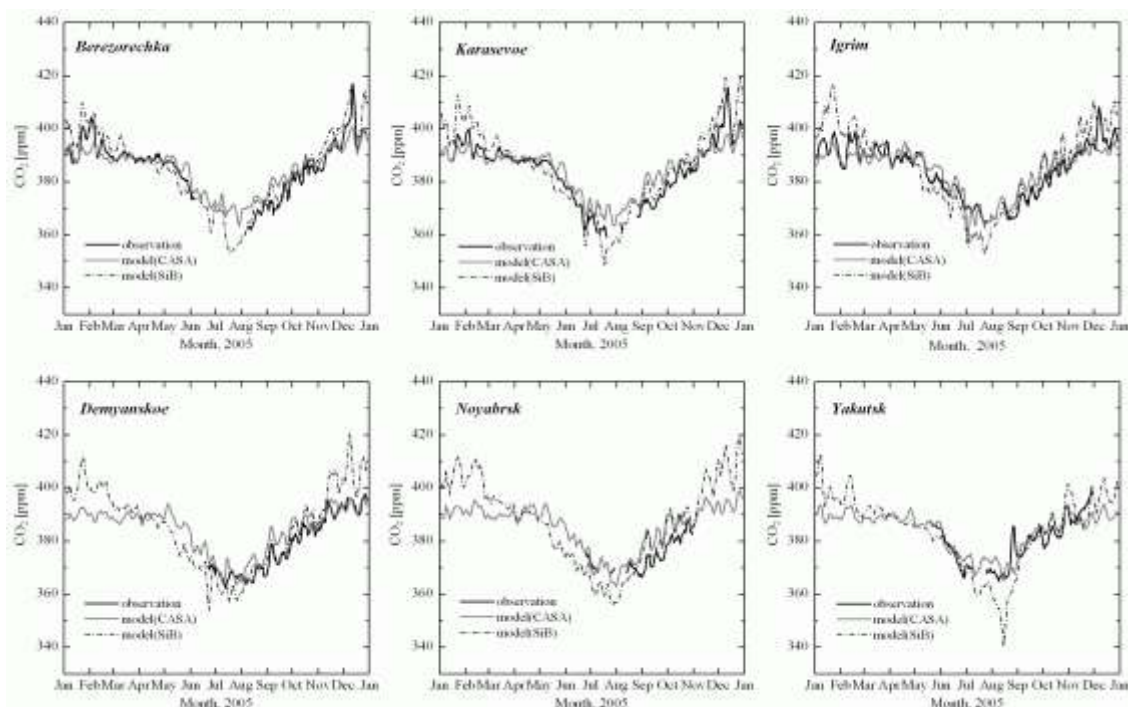


図 17 各観測サイトにおける CO_2 濃度の観測値とモデル計算値の比較。

異なる植生起源フラックス (CASA モデル、SiB モデル) を用いた結果を示す。また、植生起源フラックスは 2003 年の月平均値を用いている。

モデルには月平均フラックスを用いているため、日々変化する植物起源フラックスに対応した変動は再現出来ない。ところが、絶対値は異なるものの、季節内における5日～10日程度の変動のパターンは、観測結果とモデル結果は非常に類似していることがわかる。このような変動をもたらすのは、1000kmスケールで生じる大気の輸送混合過程である。つまり、大規模な大気場の変動に伴う輸送混合過程は、モデルによって良い精度で表現されていると言える。一方で、それよりも短い数日程度の時間スケールの変動では、観測値とモデル計算値の変動に大きな違いが見られる。この傾向は夏季に特に顕著である。夏季は地表面に入力するエネルギーが多いため、大気境界層の構造や、植物起源フラックスの絶対値およびその変動が非常に大きく、かつ複雑である。従って、このような短いスケールの変動、あるいは地域スケールの現象を評価するには、現段階のモデルでは誤差が大きい、という問題点が指摘される。

(3) インバースモデルを用いたCO₂収支の推定【サブテーマ(2)の成果】

1) NIESモデルを利用したインバースモデル

a. インバースモデル

西シベリアにおけるCO₂収支を推定するために時間依存インバースモデル(Bayesian Time Dependent Inverse models: TDI model)による解析を行った。ここでインバース解析に利用した全球輸送モデルは、NIES/FRSGCモデルで、全球を水平方向に2.5°x2.5°、鉛直方向に15sigmaに区切った輸送モデルである⁴⁾。輸送モデルはNCEP再解析データの風場を利用し、2004年と2005年の月毎のパルス関数を導出した。Transcomでは当初全球を22の領域に分割し、領域毎のCO₂収支を計算していた⁶⁾。¹⁴⁾はこの領域をさらに陸上においては4分割、海洋上の領域については2分割し、全球を64領域に分けたインバースモデルを用いてCO₂収支の分布を推定した。本研究では¹⁴⁾の64領域インバースモデルを基に、西シベリアをさらに2分割した領域を採用し(図18)、より詳細なCO₂収支を推定することとした。

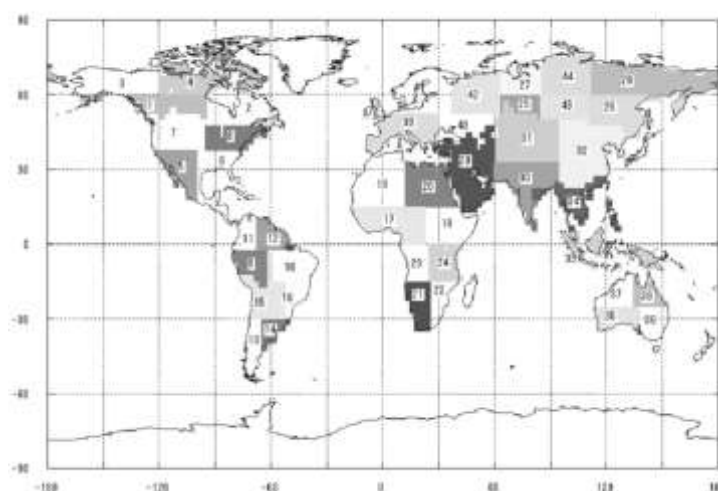


図18 全球を66分割したCO₂収支推定領域の分布。旧Land 25を新Land 25とLand 43に、旧Land 27を新Land 27とLand 44に分割した。

インバース解析に利用した CO₂ 濃度の観測データは、本研究で得られたシベリア 6 ヶ所のタワーデータに加えて BRZ 上空 3km における小型航空機による高度別の CO₂ 濃度定期観測データ、YAK 上空 3km における定期サンプリングによる定期観測データおよび西シベリアの Surgut と Novosibirsk 上空 7km における定期観測データも用いた。また、バックグラウンドの CO₂ 濃度観測値は GLOBALVIEW から提供された 2005 年までのデータセットを利用した。

b. 西シベリアにおける CO₂ 収支の季節変動

西シベリア南部の北緯 60°より南に相当する領域である Land25 での 2005 年における CO₂ 収支の季節変動を図 19a に示す。Land 25 には BRZ、KRS、DEM のタワー観測点と BRZ、Novosibirsk の航空機観測領域が存在し、これらの観測データが CO₂ 収支を推定する上で大きな拘束条件になっている。インバースモデルから推定された CO₂ フラックスは 9 月から 4 月にかけてほぼゼロかわずかに放出の傾向であるが、5 月より吸収に転じ、6 月に最大の吸収量である 0.75[tC/ha/month]を示した。このフラックスをインバース解析の初期値に使った CASA モデルの CO₂ フラックスと比較すると、季節変動の傾向は似ているものの、インバース解析の結果は全体的に夏季の吸収量が大きくなっており、上記の観測結果がこの領域の CO₂ フラックスを吸収方向に導いたことがわかる。特に CASA モデルでは 5 月のフラックスは依然として放出であるのに対して、インバース解析のフラックスは 0.2[tC/ha/month]の吸収になっており、CASA モデルでは表現しきれなかった CO₂ フラックスの季節変動を本研究の観測データとインバースモデルによって導出できたことになる。Land 25 における 2005 年を通した CO₂ の総吸収量は 1.17[tC/ha]であった。

図 19b は、西シベリア北部の北緯 60°より北に相当する領域である Land 27 での 2005 年における CO₂ 収支の季節変動を示している。Land 25 では NOY、IGR のタワー観測データと Surgut の航空機観測データが CO₂ 収支を推定する上で有力な拘束条件になっている。Land 27 における CO₂ の吸収は Land 25 に比べて季節変動の位相がやや遅く、7 月に最大の吸収量である 0.6[tC/ha/month]を示している。このフラックスを CASA モデルと比較すると、5 月の違いは Land 25 と同様に CASA がやや高めであるが、6 月は CASA による吸収量が明らかに小さく、インバース解析によるフラックスの誤差範囲からもはずれている。Land 27 の植生はツンドラまたは北部タイガに分類されるが、南部タイガ地帯ほどの森林は少なく、むしろ湿地帯が多く存在する。CASA モデルはこれら植生の分布または植生のフェノロジーが正確でない可能性がある。Land 27 における 2005 年を通した CO₂ の総吸収量は 0.88[tC/ha]であった。

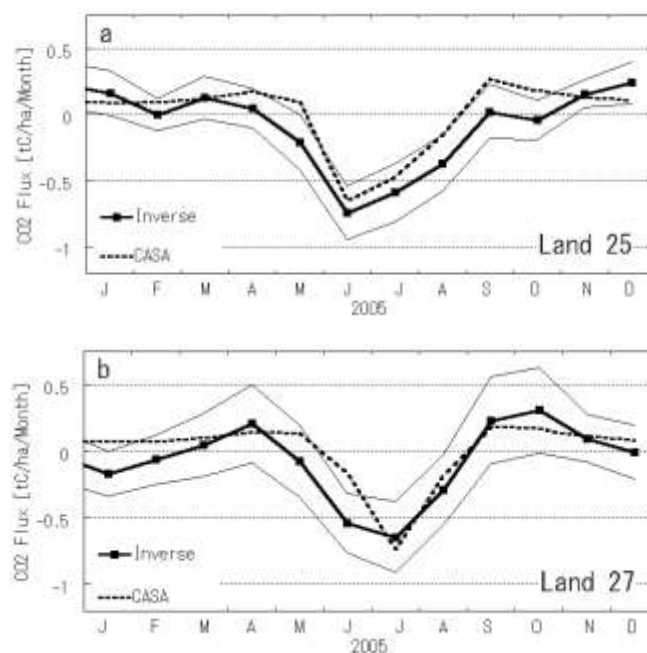


図 19 インバースモデルによって推定された Land 25 と Land 27 における 2005 年の CO₂ フラックスの季節変動。細線は推定誤差を表す。太実線は初期値である CASA モデルによるフラックスを表す。

c. Sim-CYCLE モデルとの比較

前章で CO₂ フラックスの比較に用いた CASA モデルは植生による平均的なフラックスの気候値を推定する生態系モデルであり、CO₂ フラックスの年々変動はなく、1 年を積算したフラックスはゼロになるよう調整されている。インバース解析における年間を通じたネットフラックスやフラックスの年々変動を考慮に入れた比較を行うために、Sim-CYCLE モデルから求められた同じ領域における CO₂ フラックスとの比較を行った (図 20)。なお、Sim-CYCLE モデルは本研究課題のテーマ 3 においてこの 5 年間に開発・改良を加えてきた生態系モデルである。

Land 25 における Sim-CYCLE から推定された CO₂ フラックスはインバース解析の結果と季節性が非常に良く似ているが、夏季における吸収量の絶対値はやや小さくなっている。これは Sim-CYCLE モデルが、この領域の生態系のフェノロジーを正しく表現できていることを示していると考えられる。唯一 10 月におけるフラックスは Sim-CYCLE が 0.8[tC/ha/month] の放出を示しているのに対して、インバース解析の結果はほぼゼロであり、明らかに違っている。2005 年 1 年間の Land 25 における CO₂ の総吸収量は、インバース解析の推定結果が 1.17[tC/ha] であるのに対して Sim-CYCLE は 0.32[tC/ha] である。この領域がネットで CO₂ を吸収しているということはお互いに合っているが、その積算値は 3 倍以上の差が存在している。

一方北部の Land 27 においては夏から秋にかけての CO₂ 吸収の変動がその相対的な違いだけでなく、各月の絶対量も極めて良く一致している。前章で述べたように CASA モデルはこの領域で明らかに違ったフラックスの季節変動を示していた。Sim-CYCLE モデルの CO₂ フラックスはインバース解析の初期値とは一切関係なく、全く独立したアプローチから推定された結果である。この事実は植生の活動が活発な時期における Sim-CYCLE モデルとインバース解析による CO₂ フラックス推定の妥当性を示す

ものである。しかしながら、冬季の1—2月は両者のフラックスに不一致が見られ、インバース解析の結果が「吸収」を示唆している。寒さの厳しいシベリア北部においてこの時期に有意な CO_2 吸収があるとは考えにくいので、この不一致はインバース解析の結果に不具合があるものと考えられる。冬季のシベリア域は大気の鉛直混合が抑制されることによって時として広い空間を代表しない CO_2 濃度が観測される可能性がある。このような事象が起こった際に大気輸送モデルが極めて薄い境界層の状態を正しく表現できていない場合には、現実とは違うフラックスを推定する可能性がある。冬季のフラックス推定をより正確にしていくことが今後のインバースモデルの改良に当たって1つの重要な課題であると言える。2005年1年間のLand 27における CO_2 の総吸収量は、インバース解析の推定結果が $0.88[\text{tC/ha}]$ であるのに対してSim-CYCLEは $0.17[\text{tC/ha}]$ であった。冬季のフラックスの違いが1年間の総吸収量の違いに大きく反映された結果となった。

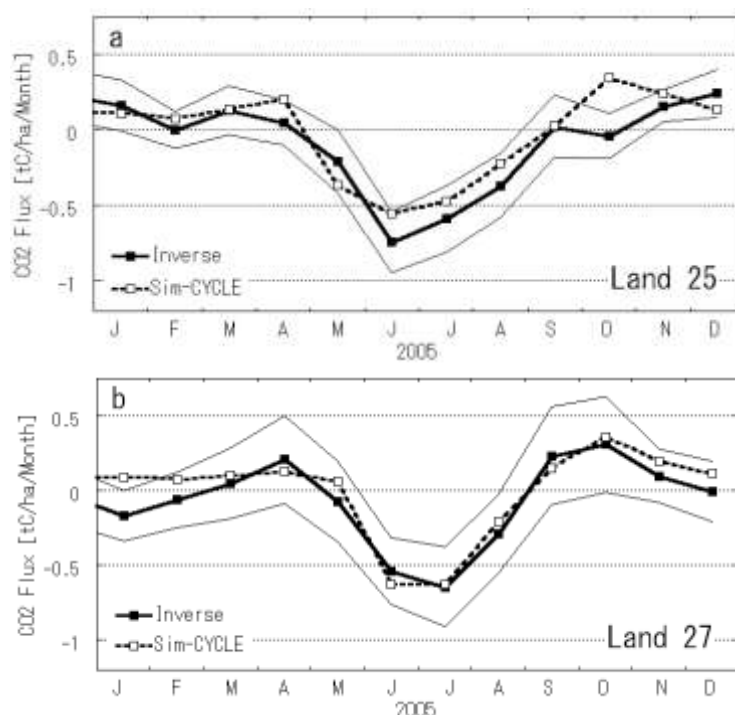


図20 インバースモデルによって推定されたLand 25とLand 27における2005年の CO_2 フラックスの季節変動とSim-CYCLEによる推定値との比較。細線はインバース解析の推定誤差を表す。

2) LMDZ モデルを利用したインバースモデル

a. インバースモデル

ここで用いるインバースモデルはフランス気候環境科学研究所 (LSCE) で開発された、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ グリッドと非常に詳細な空間解像度で、 CO_2 フラックスの日変動を推定するという時間分解能も非常に高いモデルである¹⁵⁾。モデルの輸送場にはフランス気象力学研究所 (LMDZ) が開発した GCM を用いており、ECMWF と比較することで現実の風場を再現している。¹⁵⁾ が開発したインバースモデルはヨーロッパ域を詳細なグリッドで表現していたが (図 21)、本研究では詳細領域を西シベリアに移動し、西シベリアの CO_2 フラックス推定を行うツールとして改良を行った。フラックスの日変動を推定するためには CO_2 濃度の連続観測が必要であり、サブテーマ1で観測した西シベリアにおける5ヶ所のタ

ワー観測データを利用した。テーマ1のデータを詳細に解析したところ、境界層が発達したワー観測データが広い空間代表性を持つのは観測値の経度を基準とした現地時間の13時から17時であることが明らかになったので、LMDZモデルに使うCO₂濃度の日平均値はこの時間帯の観測値を用いることとした。



図21 LMDZモデルをもとにしたインバース解析で用いたグリッド。

この図はヨーロッパ域を50kmx50kmの詳細なグリッドで表現したものの。

b. 疑似観測データによるインバース解析の検証

LSCEがヨーロッパ域に照準を合わせたLMDZインバースの解析結果は、観測点の少なさとモデルの不確実性から、細かなグリッドにおけるフラックスを正しく表現できていなかった。そこで本研究ではまず、インバースモデルがどれくらいの時間・空間スケールであればより確からしいフラックスを推定できるかを評価した。

評価のために生態系モデルであるORCHIDEEによるCO₂フラックスをLMDZモデルで輸送して疑似のCO₂観測データを作った。この観測データでインバース解析を行い、推定されたフラックスともとのフラックスとの相関と標準偏差の時間・空間依存性をプロットしたのが図22a、bである。図22aより、フラックス推定を行う空間が小さくなるほど、時間間隔が短くなるほど相関が悪くなることがわかる。時間分解能を5日に設定すれば空間分解能が400kmx400km(およそ10°x10°グリッド)でフラックスを推定しても0.7以上の相関の良さが保証できることがわかった。推定したフラックスの標準偏差をもとのフラックスの標準偏差で割ったNormalized Standard Deviation (NSD)は時間間隔が短くなると急激に大きくなることがわかる。時間分解能を5日に設定すればNSDは0.9~1.3の範囲に収まることわかった。

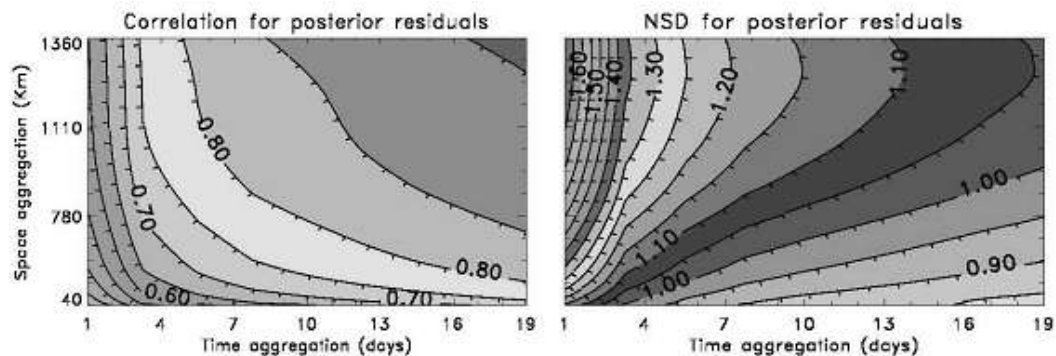


図22 疑似観測データを用いた推定フラックスともとのフラックスとの相関(a)と標準偏差(b)の時間・空間依存性

c. 観測データによるインバース解析の検証

実際の観測データを使ったインバース解析において、フラックス日平均値推定誤差の減少をどれくらいの空間スケールで実現できるかを評価した（図 23）。評価は地域規模のインバース解析を行う前のフラックス初期値の誤差とインバース解析で得られたフラックスの誤差を比較することによって行った。フラックス日平均値の推定誤差はタワー観測地点の間でほぼ均一に減少しており、2005 年の平均で約 6%である。しかしながら、推定誤差の減少は冬季に大きく、最大で約 15%であるのに対して、夏季はわずか 3%以下である。これは混合層の厚さに起因していると考えられる。夏季は大気鉛直混合が盛んで、混合層が高高度まで成長するので地表面付近の情報は拡散してしまい、誤差減少が小さく抑えられているものと考えられる。

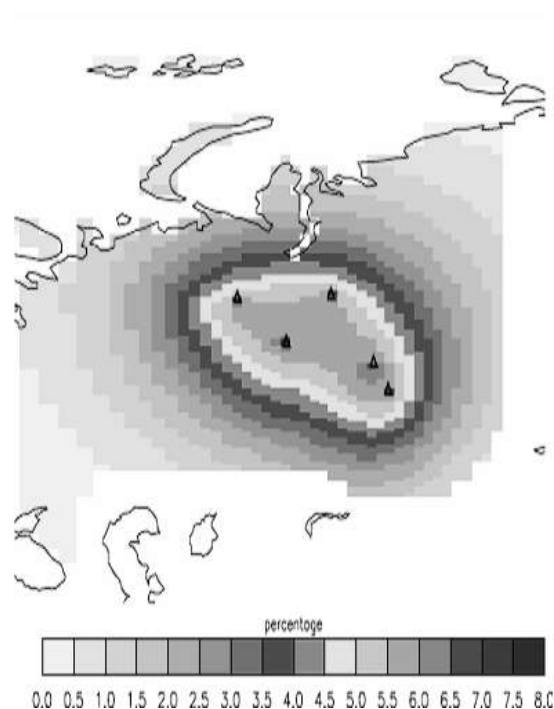


図 23 西シベリア 5ヶ所の観測データを使ったインバース解析でのフラックス日平均値推定誤差減少の分布。2005 年一年間の平均値。▲はタワー観測地点を表す。西シベリアの中心部分で 6%の誤差減少があったことを表している。

d. 西シベリアにおける CO₂ フラックスの季節変動

LMZD モデルを使ったインバース解析の手順は以下の通りである。まず OCHIDEE モデルの結果を利用し、西シベリア域における日々の CO₂ フラックスの初期値にした。次に Globalview による世界の 63 サイトにおける CO₂ 濃度観測値¹⁵⁾ を使ってインバース解析を行い、西シベリアにおける CO₂ フラックスの季節変動（月別値）を推定する。OCHIDEE フラックスの日々の変動はそのままにしておき、Globalview から推定したフラックスの月別値で季節変動を補正し、これを新たな初期値 Prior とする。西シベリアのタワー観測値を使って地域規模のインバース解析を行い、これを最終的なフラックスの推定値（Posterior）とする。

以上の手順で推定された西シベリアの 2005 年における CO₂ フラックスの日々変動を図 24 に示す。

インバース解析によって推定された CO_2 フラックスはタワー観測値によって大きく拘束されて、初期値とは異なった変動をしている。特に3月から4月前半にかけてのフラックスがゼロ付近になっていることと、7月後半から9月末にかけての CO_2 吸収量の減少が明らかに早くなっている点が目立っている。また、日々のフラックスの短周期変動幅が非常に大きくなっている。現時点ではこれが現実の CO_2 フラックスの変動を表現しているのか、タワー観測値との不一致がこのような大きな変動幅を作り出しているのかは判断できていない。

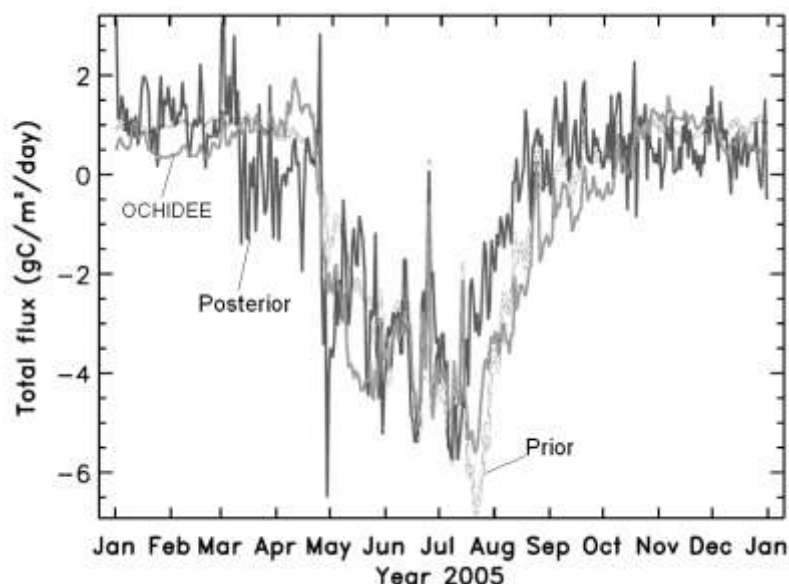


図 24 LMDZ モデルを使ったインバース解析で推定された西シベリア域における 2005 年の CO_2 フラックスの変動(Posterior)と解析に使用した OCHIDEE フラックス および、初期値フラックス (Prior)。

e. Sim-CYCLE モデルとの比較

LMDZ モデルを用いたインバースモデルで推定された西シベリアにおける CO_2 フラックスを Sim-CYCLE モデルで計算されたフラックスと比較した (図 25)。フラックスの変動パターンは非常に良く一致しているが、5月から7月にかけての CO_2 吸収量は明らかにインバース解析の結果が大きくなっている。これは NIES モデルを使ったインバース解析の Land 25 における結果と定性的に一致している。また、4月と10月の Sim-CYCLE の放出フラックスがインバース解析の結果よりもやや高めである点も NIES インバージョンの結果と整合的である。

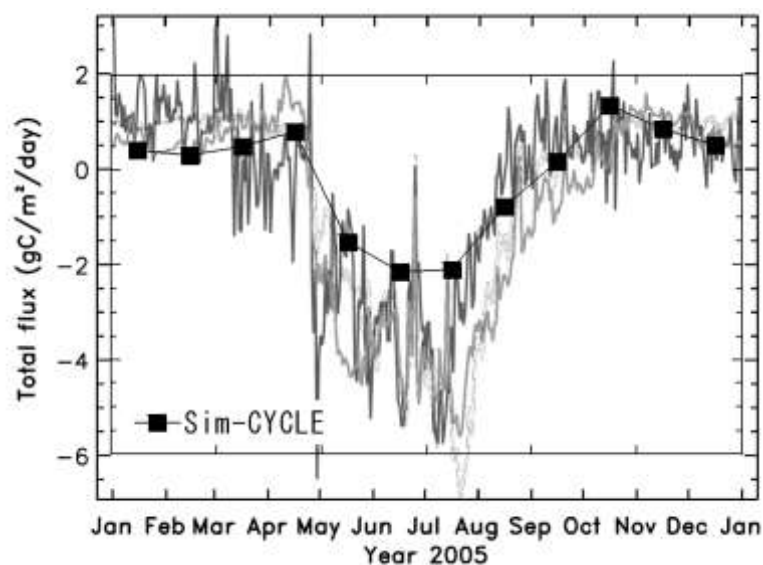


図 25 LMZD モデルを使ったインバース解析で推定された西シベリア域における CO₂ フラックスと Sim-CYCLE モデルによるフラックスとの比較。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 1) 小型で長期に安定的に CO₂ 濃度を観測するシステムを開発した。高精度分析を行うにあたって必須である標準ガスの消費を極端に少なくした本システムは、世界の観測系研究者から高い関心を持たれている。【サブテーマ1の成果】
- 2) シベリアにおいて多地点の高精度観測網を構築した。内陸におけるこれほど高密度の観測網はなく、ヨーロッパやカナダを始め世界のモデル研究者から共同研究の申し出がある。また、2008 年度に打ち上げられる温室効果気体観測衛星 (GOSAT および OCO) の内陸での有力な検証データとしても期待されている。【サブテーマ1の成果】
- 3) 地上におけるタワー観測でも日中の観測値を使えば、境界層内を代表するデータが取得できることを明らかにした。航空機観測に比べてタワー観測は安価で高密度観測が可能であるので、この意義は大きい。【サブテーマ1の成果】
- 4) タワー観測ネットワークとインバースモデルを組み合わせることで亜大陸規模の CO₂ フラックスを推定できることを実証した。テーマ2の当初からの目標であったフラックス推定手法の確立を最終的に達成することができた。今後は CO₂ フラックスの年々変動に科学的な関心を向けることができる。【サブテーマ2の成果】

(2) 地球環境政策への貢献

1) 気候変動に関する国際連合枠組条約における「京都議定書」への貢献

- a. 京都議定書では「気候変動とその悪影響及び種々の対応戦略による社会上及び経済上の結果に関連する不確実性を軽減するため、組織的観測の維持及び開発を促進すること」としている。本研究は温室効果ガスの将来の変動予測に貢献する組織的観測の手法開発である。【サブテーマ1の成果】

- b. 本研究で実施する CO₂ 収支推定手法開発は、温室効果ガスの排出量を国レベルで算出したインベントリーを大気観測から検証する方法として適用できる。本研究の結果、より精度の良い客観的な排出量推定が可能となり、温室効果ガス排出規制戦略策定に貢献する。【サブテーマ2の成果】

2) わが国の地球環境研究の推進

- a. 総合科学技術会議の分野別推進戦略（平成 13 年 9 月）において、環境分野の重点課題である地球温暖化研究では、温暖化総合モニタリングプログラムを推進することとし、温暖化研究イニシアティブでは温室効果ガスの収支推定誤差を半減することを目標として掲げている。本研究は CO₂ の収支推定誤差を大幅に低減させると期待できるものである。【サブテーマ1、2 共通】
- b. 総合科学技術会議の「今後の地球観測に関する取り組みの基本について」（中間とりまとめ、平成 16 年 3 月）は、「統合された地球観測システムの構築」のため、「衛星等のプラットフォームを用いた各種の観測システムを構築する」ことが重要であるとしている。環境省はこの方針に基づき温室効果ガス観測技術衛星「GOSAT」の開発を推進しており、本研究は衛星センサーのデータを検証する観測として、また、本研究において開発するデータ解析手法は、衛星センサーデータから国別の CO₂ 収支を推定する手段である。【サブテーマ1、2 共通】

6. 引用文献

- 1) Masarie K. A., Tans P. P., Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record, *J. Geophys. Research*, 100, 11593-11610, 1995
- 2) Nakazawa T. et al., Two curve fitting methods applied to CO₂ flask data, *Environ Metrics*, 8, 197-218, 1997
- 3) Rayner, P. J., I. G. Enting, R. J. Francey, and R. L. Langenfelds, *Tellus*, 51B, 213-232, 1999.
- 4) Maksyutov S., Inoue G., Modeling the global transport of atmospheric CO₂ with a Transcom-3 experimental protocol, CGER supercomputer activity report CGER-I043-2000, NIES, Tsukuba, Japan, 38-39, 2001
- 5) Ito A., Oikawa T., A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling*, 151, 147-179, 2002
- 6) Gurney, K. R., R. Law, A. S. Denning, P. J. Rayner, et al., *Nature*, 415, 626-630, 2002
- 7) Patra, P. K., and S. Maksyutov, *GRL*, 29, doi:10.1029/2001GL013943, 2002
- 8) Shvidenko, A., and S. Nilsson, A Synthesis of the Impact of Russian Forests on the Global Carbon Budget for 1961-1968, *Tellus* 55B, 391-415, 2003
- 9) Maksyutov, S., T. Machida, H. Mukai, P. Patra, T. Nakazawa, G. Inoue, & Modelers, TRANSCOM-3, Effect of recent observations on Asian CO₂ flux estimates by transport model inversions, *Tellus B*, 55 (2), 522-529. doi: 10.1034/j.1600-0560.2003.00052, 2003
- 10) Patra P. K., Maksyutov S., Ishizawa M., and Nakazawa T., Interannual variability in ocean and land CO₂ fluxes derived using Time Dependent Inverse Model, EOS, Trans. AGU, 84 (86), Fall Meet. Suppl., Abstract A52B-0792, 2003

- 11) Patra P.K., S. Maksyutov and TransCom-3 modellers, *Tellus*, 55B, 498-511, 2003
- 12) Patra P.K., S. Maksyutov, Y. Sasano, H. Nakajima, G. Inoue, and T. Nakazawa, *J. Geophys. Res.*, 2003a
- 13) Shvidenko, A., and S. Nilsson, *Tellus*, 55B, 391-415, 2003.
- 14) Patra, P.K., M. Ishizawa, S. Maksyutov, T. Nakazawa, and G. Inoue, Role of biomass burning and climate anomalies on land-atmosphere carbon fluxes based on inverse modelling of atmospheric CO₂, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB3005, doi:10.1029/2004GB002258, 2005
- 15) Peylin, P., Rayner, P. J., Bousquet, P., Carouge, C., Hourdin, F., Heinrich, P. and Ciais, P., Daily CO₂ flux estimates over Europe from continuous atmospheric measurements: 1, inverse methodology, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 3173-3186, 2005
- 16) GLOBALVIEW-CO₂: Cooperative Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide. CD-ROM, NOAA CMDL, Boulder, Colorado [Also available on Internet via anonymous FTP to ftp.cmdl.noaa.gov, Path: ccg/co2/GLOBALVIEW], 2006

7. 国際共同研究等の状況

(1) 政府間国際共同研究協定に基づくもの

1) 日露環境保護協定:

- a. ロシア気象委員会中央高層大気観測所 (Central Aerological Observatory, Chernikov 所長) とスルグートにおける航空機による大気中温室効果気体観測
- b. ロシア科学アカデミー永久凍土研究所 (Zhan 所長) とヤクーツクにおける大気中温室効果気体観測
- c. ロシア科学アカデミーの微生物研究所 (Galchenko 所長) と西シベリアの湿原からのメタン発生の広域測定とその将来予測や、天然ガス生産輸送に伴うメタンの漏洩

2) 科学技術協力協定:

- a. 「シベリアにおける温室効果ガスの収支に関する研究」をロシア科学アカデミーの微生物研究所の Galchenko 所長をカウンターパートとして実施している。

(2) 国際共同研究プロジェクト

- 1) Global Carbon Project の第一フォーカスである炭素循環の Patterns and Variability 課題の一部として、地域規模の炭素循環の研究方法が位置付けられている。
- 2) Integrated Global Carbon Observation Strategy の Towards a Global carbon Observing System で地域規模の炭素収支推定のための観測システムが提案されている。(井上が共同提案者になっている。)
- 3) Trancom のインバースモデルの相互比較グループ内に、M. Heimer や Ph. Ciais らと地域インバースモデルのサブグループを結成した。(S. Maksyutov が世話人となっている。)

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Gurney K. R., A. Scott Denning, P. Rayner, B. Pak, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y.-H. Chen, P. Ciais, I. Y. Fung, M. Heimann, K. Higuchi, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, P. Peylin, M. Prather, S. Taguchi: *Transcom 3 inversion intercomparison: Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111 (2004)
 “Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks”
- 2) Peregón A., S. Maksyutov, N. Kosykh, N. Mironycheva-Tokareva, M. Tamura and G. Inoue: *Phyton*, Special issue: “APGC 2004”, v. 45, Fasc. 4, 543-550 (2005)
 “Application of the Multi-Scale Remote Sensing and GIS to Mapping Net Primary Production in West Siberian Wetlands”
- 3) Patra, P. K., S. Maksyutov, and T. Nakazawa: *Tellus*, 57B, 357-365 (2005)
 “Analysis of atmospheric CO₂ growth rates at Mauna Loa using inverse model derived CO₂ fluxes”
- 4) Patra, P. K., M. Ishizawa, S. Maksyutov, T. Nakazawa, and G. Inoue: *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB3005, doi:10.1029/2004GB002258 (2005)
 “Role of biomass burning and climate anomalies on land-atmosphere carbon fluxes based on inverse modelling of atmospheric CO₂”

<その他誌上発表（査読あり）>

- 1) Ishizawa M., D. Chan, K. Higuchi, S. Maksyutov, C.-W. Yuen, J. Chen and D. Worthy: *Tellus*, 58B, 447-462, doi:10.1111/j.1600-0889.2006.00219. (2006)
 “Rectifier effect in an atmospheric model with daily biospheric fluxes: impact on inversion calculation”
- 2) Baker, D., Law, R. M., Gurney, K. R., Denning, A. S., Rayner, P. J., Pak, B. C., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Peylin, P., Prather, M., and Taguchi, S.: *Transcom 3 inversion intercomparison: Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1010, doi:10.1029/2004GB00243 (2006)
 “Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 町田敏暢、O. Krasnov、渡井智則、森泉純、下山宏、山本昌則、井上元：第13回大気化学シンポジウム研究集会講演集，159-161（2003）
 「タワーと航空機を利用した大気境界層とその上部での二酸化炭素濃度の高頻度観測」
- 2) Maksyutov, S., P. K. Patra, M. Ishizawa, G. Inoue, and T. Nakazawa: *CGER Supercomputer Activity Report*, CGER-I058-2004, 11, 21-24 (2004)
 “Development and application of parallel atmospheric transport model to inverse modeling of global carbon cycle”
- 3) Maksyutov, S., R. Onishi, G. Inoue, Patra, P. K., and T. Nakazawa: *Proc. 7th Int. Carbon Dioxide Conf.*, Boulder (2005)

“Synoptic scale CO₂ variability simulated with global high resolution atmospheric transport model”

- 4) Patra, P. K., K. Ishijima, T. Nakazawa, S. Maksyutov, and T. Takahashi: Proc. 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder (2005)
“Subcontinental scale source/sink inversion of atmospheric CO₂ and interannual variability in CO₂ growth rates”
- 5) Venevsky, S., Patra, P. K., S. Maksyutov, and G. Inoue: Proc. 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder (2005)
“Interannual variability in terrestrial carbon exchange using an ecosystem-fire model and inverse model results”
- 6) Venevsky, S., S. Maksyutov, and G. Inoue: Proc. 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, (2005)
“Accurate simulation of local daily carbon fluxes using large scale climate data sets: example of EUROFLUX sites”
- 7) Peregon, A., S. Maksyutov, N. Kosykh: N. Mironycheva-Tokareva, M. Tamura, and G. Inoue, Proc. 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder (2005)
“Mapping NPP and biomass in west Siberian wetlands”
- 8) Ishizawa, M., D. Chan, K. Higuchi, S. Maksyutov, et al.: Proc. 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder (2005)
“Rectifier effect in an atmospheric model with daily biospheric fluxes”
- 9) Deng, F., J. M. Chen, C.-W. Yuen, Misa Ishizawa, G. Mo, K. Higuchi, D. Chan, B. Chen, and S. Maksyutov: Proc. 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder (2005)
“Global monthly CO₂ flux inversion with regularization using remote sensing-based surface flux fields”
- 10) Maksyutov S., M. Ishizawa, G. Inoue: CGER Supercomputer Activity Report, Tsukuba, CGER-I058-2006, 13, 15-18, (2006)
“Synoptic scale variability of atmospheric CO₂ in continental boundary layer: model and observations”
- 11) Maksyutov, S., R. Onishi, M. Naja, A. Yaremchuk, P. K. Patra, and G. Inoue: CGER-I058-2007, 14, 49-54 (2007)
“Atmospheric CO₂ simulations with a high resolution model and synoptic scale variability of CO₂ column”

(2) 口頭発表

- 1) Maksyutov S., N. Fedoseev, T. Machida, G. Inoue: International Conference “The role of permafrost ecosystems in global climate change”, Yakutsk, Russia (2002)
“Transport model-assisted analysis of carbon dioxide observations near Yakutsk”
- 2) Gurney K.R., R.M. Law, A.S. Denning, P.J. Rayner, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y.-H. Chen, P. Ciais, S. Fan, I.Y. Fung, M. Gloor, M. Heimann, K. Higuchi, J. John, T.

- Maki., S. Maksyutov, P. Peylin, M. Prather, B. C. Pak, S. Taguchi: AGU Fall Meeting, San Francisco CA, USA (2002)
 “Global-scale, seasonal carbon sources and sinks from the TransCom atmospheric inversion experiment”
- 3) Patra, P.K., S. Maksyutov, G. Inoue, and T. Nakazawa: AGU Fall Meeting, San Francisco CA, USA, Dec. (2002)
 “Network Design for CO₂ Observation With High Resolution Inversions”
- 4) Patra, P.K., S. Maksyutov, Y. Sasano, and T. Nakazawa: Crete, Greece (2002)
 “Comparing optimal extension of the CO₂ observations: surface vs. satellite, IGAC/CACGP Conference on Atmospheric chemistry within the earth system”
- 5) Maksyutov S., T. Machida, N. Fedoseev, G. Inoue: International Conference “Boreal forests and environment: local, regional and global scales”, Krasnoyarsk, Russia (2002)
 “Current problems in assessing carbon cycle in Siberia using atmospheric CO₂ observations and models of atmospheric transport”
- 6) Patra, P. K., S. Maksyutov, M. Ishizawa, and T. Nakazawa: Eos. Trans. AGU, 84 (46), Fall Meet. Suppl., Abstract A52B-0792 (2003)
 “Interannual variability in ocean and land CO₂ fluxes derived using Time Dependent Inverse model,”
- 7) Maksyutov S., P. K. Patra, and G. Inoue: Eos. Trans. AGU, 84 (46), Fall Meet. Suppl. , Abstract A52B-0785 (2003)
 “Inversion of Column-CO₂ Observations from Space Using a High Resolution Inverse Model”
- 8) Maksyutov S., D. Rukhovich, A. Peregon, E. Kozin, Y. Polischuk: International Symposium on Boreal Forest Disturbance and Its Effects to Global Warming, Hokkaido Univ. Sapporo, 2003
 “Soil and vegetation GIS datasets for modeling biogeochemical cycles in West Siberia”
- 9) Ishizawa M., S. Maksyutov and T. Nakazawa: 2nd International NCCR Climate Summer School, Grindelwald, Switzerland, Aug. 30- Sep. 6 (2003)
 “An analysis on the relationship between the regional response of terrestrial ecosystems to climate variations and atmospheric CO₂ anomalies”
- 10) T. Machida, O. Krasnov, T. Watai, K. Shimoyama and G. Inoue: AGU Fall Meeting, San Francisco (2003)
 ” Measurements of CO₂ Mixing Ratio in and above PBL over the Forest Area in Western Siberia”
- 11) T. Watai, T. Machida, K. Shimoyama, O. Krasnov, M. Yamamoto and G. Inoue: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2003)
 “Measurement of Atmospheric Carbon Dioxide on Tower in Berezorechka, West Siberian Forest Region”
- 12) K. Shimoyama, T. Machida, T. Watai, O. Krasnov, G. Inoue and J. Zeng: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2003)
 “Diurnal variation in CO₂ profile in the lower troposphere above a west Siberian forest”

- 13) 渡井智則、町田敏暢、O. Krasnov、山本昌則、井上 元：2003 年度日本気象学会春季大会（2003）
「西シベリア・ベレゾレチカにおける大気境界層内とその上空の CO₂ 濃度観測（1）－大気境界層内 CO₂ 濃度変動のタワー観測－」
- 14) 森泉 純、青島弘幸、大倉毅史、O. A. Krasnov、渡井智則、山本昌則、町田敏暢、井上 元：2003 年度日本気象学会春季大会（2003）
「西シベリア・ベレゾレチカにおける大気境界層内とその上空の CO₂ 濃度観測（2）－大気中ラドン 222 濃度変動のタワー観測－」
- 15) 町田敏暢、O. Krasnov、渡井智則、下山 宏、井上 元：2003 年度日本気象学会春季大会（2003）
「西シベリア・ベレゾレチカにおける大気境界層内とその上空の CO₂ 濃度観測（3）－航空機を利用した CO₂ 濃度の鉛直分布観測－」
- 16) 下山 宏、町田敏暢、O. Krasnov、渡井智則、井上 元：2003 年度日本気象学会春季大会（2003）
「西シベリア・ベレゾレチカにおける大気境界層内とその上空の CO₂ 濃度観測（4）－夏季集中観測における CO₂ 度鉛直分布日変化－」
- 17) 町田敏暢、渡井智則、下山宏、山本昌則、井上元、O. Krasnov：第 13 回大気化学シンポジウム（2003）
「タワーと航空機を利用した大気境界層とその上部での二酸化炭素濃度の高頻度観測」
- 18) 町田敏暢、O. Krasnov、渡井智則、下山 宏、井上 元：第 9 回大気化学討論会（2003）
「タワーと航空機を利用した大気境界層とその上部での二酸化炭素濃度の高頻度観測」
- 19) 渡井智則、町田敏暢、O. Krasnov、山本昌則、井上 元：第 9 回大気化学討論会（2003）
「西シベリア・ベレゾレチカにおける大気境界層内とその上空の CO₂ 濃度観測－大気境界層内 CO₂ 濃度変動のタワー観測－」
- 20) S. Maksyutov, P. K. Patra, and M. Ishizawa: The TransCom-3 Meeting, Max-Planck Institute, Jena, May (2003)
“TDI experiment with NIES model and interannually varying NCEP winds”
- 21) S. Maksyutov, P.K. Patra, M. Ishizawa, G. Inoue T. Nakazawa: CGER Supercomputer activity workshop, Japan (2003)
“Study of the interannual variability in global carbon cycle with parallel atmospheric transport model”
- 22) S. Maksyutov, P. K. Patra, M. Ishizawa: International Symposium on Boreal Forest Disturbance and Its Effects to Global Warming, Hokkaido Univ. Sapporo (2003)
“Biospheric modeling and atmospheric transport inversion of CO₂ fluxes in boreal forest region”
- 23) Patra, P. K., S. Maksyutov, and TransCom-3 modelers: EGS-AGU-EUG general assembly, Nice (2003)
“Using inverse model to evaluate future CO₂ observations: What have we learnt from multimodel transport”
- 24) Patra, P. K., S. Maksyutov, A. Ito, and TransCom-3 modelers: The TransCom-3 Meeting, Max-Planck Institute, Jena (2003)
“An evaluation of an ecosystem model for studying CO₂ seasonal cycle and TransCom-3 related

activities using multimodel simulations”

- 25) Inoue G., S. Maksyutov, T. Machida, T. Watai, K. Shimoyama: International Symposium on Boreal Forest Disturbance and Its Effects to Global Warming, Hokkaido Univ. Sapporo (2003)
“What was known from the atmospheric green house gases observation in Siberia?”
- 26) 町田敏暢、O. Krasnov、渡井智則、下山 宏、井上 元：2004 年度日本気象学会春季大会(2004)
「西シベリア・ベレゾレチカにおける大気境界層内とその上空の CO₂ 濃度－航空機観測とタワー観測の比較（1）－」
- 27) 下山 宏・町田敏暢・渡井智則・O. A. Krasnov・三枝信子・藤沼康実・井上 元：2004 年度日本気象学会春季大会（2004）
「航空機を用いた分散法による CO₂ フラックス評価の試み」
- 28) T. Machida, O. Krasnov, T. Watai, K. Shimoyama J. Moriizumi and G. Inoue: NOAA/CMDL Annual Meeting, Boulder, USA (2004)
“Measurements of CO₂ mixing ratio in and above PBL over the forest area in Siberia”
- 29) Takahashi, Y., Watai, T., Machida, T., and Fedoseev, N.: SIBAE-BASIN Conference, Partitioning of fluxes between the biosphere across spatial scales, Interlaken, Switzerland (2004)
“Aircraft monitoring of vertical profiles of 13C/12C ratio in atmospheric CO₂ over a forest in East Siberia: Seasonal variability of source isotope signature”
- 30) 渡井智則・町田敏暢・下山宏・O. Krasnov・山本昌則・井上 元：2004 年度日本気象学会春季大会（2004）
「西シベリア・ベレゾレチカにおける大気境界層内とその上空の CO₂ 濃度－航空機観測とタワー観測の比較（2）」
- 31) 下山 宏・町田敏暢・渡井智則・O. A. Krasnov・三枝信子・藤沼康実・井上 元：2004 年度日本気象学会春季大会（2004）
「航空機を用いた分散法による CO₂ フラックス評価の試み」
- 32) T. Watai, T. Machida, K. Shimoyama, O. Krasnov, M. Yamamoto, J. Zeng and G. Inoue: 8th International Global Atmospheric Chemistry Conference, Christchurch, New Zealand (2004)
“Measurements of Atmospheric Carbon Dioxide on Tower in West Siberian Forest, Berezorechka”
- 33) Peregon A., S. Maksyutov, N. Kosykh, N. Mironycheva-Tokareva, M. Tamura and G. Inoue: 6th APGC Symposium, Tsukuba (2004)
“Application of the multi-scale remote sensing and GIS to mapping net primary production in West Siberian wetlands”
- 34) Maksyutov, S., M. Ishizawa: Transcom Workshop, Tsukuba (2004)
“CO₂ variability simulated with daily fluxes”
- 35) Maksyutov, S., T. Machida, M. Ishizawa, S. Venevsky, G. Inoue: AGU Fall 2004 San-Francisco (2004)
“Modeling and observations of atmospheric CO₂ in PBL over Siberia”
- 36) Maksyutov S., T. Machida, M. Ishizawa, S. Venevsky, G. Inoue: 6th APGC Symposium, Tsukuba

(2004)

“Synoptic scale variations of atmospheric CO₂ over Siberia: modeling and observations”

- 37) Maksyutov, S., T. Maki, S. Taguchi, P.K. Patra, M. Ishizawa, T. Nakazawa: IGOS international workshop, Tokyo Int. Exchange Center, Tokyo, Feb 2-4 (2004)
 “Atmospheric CO₂ data analysis for global carbon cycle research”
- 38) Maksyutov S., : Russian-Japanese-German-French workshop on quantifying and understanding the carbon balance of Siberian ecosystems, Moscow, Inst. Atmosph. Phys (2004)
 “Combining observations and modeling to estimate carbon balance of Siberia”
- 39) Takahashi, T., T. Machida, T. Watai, G. Inoue, T. Nakazawa, T. Inagaki, K. Yazawa, N. Fedseev, M. Panchenko, M. Arshinov, N. Vinnichenko: Boulder, Colorado, USA (2005)
 “Long-term observation of vertical profiles of 13C/12C ratio of atmospheric CO₂ over Siberia and Japan” Seventh International Carbon Dioxide Conference”
- 40) T. Machida, O. Krasnov, H. Matsueda, Y. Nakagawa, M. Tomosawa, K. Ishikawa, T. Nakazawa, T. Ogawa, T. Suenaga and G. Inoue: 13th CO₂ Experts Meeting, Boulder, USA (2005)
 “New CO₂ measurement Systems Using Aircraft”
- 41) T. Machida, K. Shimoyama, O. Krasnov, T. Watai and G. Inoue: 7th International CO₂ Conference, Broomfield, CO, USA (2005)
 “Measurements of CO₂ mixing ratio in and above PBL over the forest area in Siberia”
- 42) Maksyutov, S., R. Onishi, G. Inoue, Patra, P. K., and T. Nakazawa: 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder (2005)
 “Synoptic scale CO₂ variability simulated with global high resolution atmospheric transport model”
- 43) Peregon A., S. Maksyutov, N. Kosykh, N. Mironycheva-Tokareva, M. Tamura, and G. Inoue: 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder (2005)
 “Mapping npp and biomass in west Siberian wetlands”
- 44) Ishizawa M., D. Chan, K. Higuchi, S. Maksyutov, et al, 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, (2005)
 “Rectifier effect in an atmospheric model with daily biospheric fluxes”
- 45) Venevsky, S., Patra, P. K., S. Maksyutov, G. Inoue: 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, September (2005)
 “Interannual variability in terrestrial carbon exchange using an ecosystem-fire model and inverse model results”
- 46) Patra, P. K., S. Maksyutov, T. Nakazawa, T. Yokota, G. Inoue: AGU Chapman Conference on The Science and Technology of Carbon Sequestration, San Diego, January (2005)
 “Estimation of Regional CO₂ Fluxes, Interannual Flux Variability and Future Scopes”
- 47) Patra, P. K., S. Maksyutov, T. Nakazawa, T. Yokota, G. Inoue: 2nd IGGMS Workshop, Pasadena (2005)
 “On the use of satellite observations CO₂ in inverse modelling of its sources and sinks”
- 48) Naja M., Yaremchuk, A., S., Onishi, R., Maksyutov S., G. Inoue: AGU Fall meeting, Dec 05-10

(2005)

“Relationship between synoptic scale weather systems and column averaged atmospheric CO₂”

- 49) T. Watai, K. Shimoyama, T. Machida, O. Krasnov, and G. Inoue: Seventh International Carbon Dioxide Conference, Boulder, Colorado, USA (2005)

“Atmospheric CO₂ Measurement Network on Towers in West Siberia”

- 50) Patra, P. K., K. Ishijima, T. Nakazawa, S. Maksyutov, T. Takahashi: 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, USA (2005)

“Subcontinental scale source/sink inversion of atmospheric CO₂ and interannual variability in CO₂ growth rates”

- 51) 町田敏暢、S. Maksyutov、高橋善幸、中澤高清、M. Arshinov、N. Vinnichenko、B. Belan、N. Fedoseev: 第12回大気化学討論会 (2006)

「シベリア上空における温室効果気体およびその関連気体の年々変動」

- 52) 下山 宏、町田敏暢、篠原 梓、S. Maksyutov、M. Arshinov、D. Davydov、A. Fofonov、O. Krasnov、N. Fedoseev、B. Belan、須藤洋志、井上 元: 第12回大気化学討論会 (2006)

「シベリアタワー観測ネットワークにおける CO₂・CH₄ 濃度連続観測」

- 53) K. Shimoyama, T. Machida, A. Shinohara, S. Maksyutov, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, O. Krasnov, N. Fedoseev, B. Belan, H. Sutoh, G. Inoue: AGU fall meeting, San Francisco, USA (2006)

“Atmospheric CO₂ and CH₄ Measurement Network on Towers in Siberia”

- 54) Maksyutov S.,: Workshop on NEESPI dry land processes FRC establishment, Beijing (2006)

“Integrated Research on Carbon Budget Management in Terrestrial Ecosystems of Asia in the 21st Century (S-1)”

- 55) Maksyutov S., T. Machida, K. Shimoyama, C. Carouge, A. Peregon, P. Patra, M. Arshinov, O. Krasnov, B. Belan, N. Fedoseev, A. Shvidenko, G. Inoue: AGU Fall meeting, San-Francisco (2006)

“Top-down approach to West Siberian regional carbon budget: combination of the CO₂ observations and inverse modelling”

- 56) Patra, P. K., S. Venevsky, M. Ishizawa, S. Maksyutov, G. Inoue, T. Nakazawa: Vulnerability of Carbon to Drought and Fire, Canberra, June (2006)

“Effects of drought and fire on interannual variability in CO₂ fluxes as derived using atmospheric- CO₂ inversion”

(3) 出願特許

- 1) 井上元: 名古屋大学; 「SnO₂ メタンセンサーについて」、準備中

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) 「システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態」S-1 ワークショップ (H18 年 10 月 14 日、早稲田大学国際会議場・井深大記念ホール、観客約 200 名)

(5) マスコミ等への公表・報道等
なし

(6) その他

1) 井上元：日本気象学会堀内賞、2003年10月