

B-2 温室効果ガス観測衛星データの解析手法高度化と利用に関する研究

(3) 二酸化炭素収支分布推定のためのデータ同化手法の開発

東北大学大学院理学研究科	中澤高清
独立行政法人国立環境研究所	
地球環境研究センター	Shamil Maksyutov 井上元（平成16、17年度）
独立行政法人産業総合技術研究所	
環境管理技術研究部門	田口彰一
独立行政法人海洋研究開発機構	
地球環境フロンティア研究センター	Prabir K. Patra

平成16～18年度合計予算額	46,900千円
（うち、平成18年度予算額	19,500千円）

[要旨] 本研究においては、GOSAT衛星から得られるカラム濃度と地上観測や航空機観測による濃度データを結合し、全球3次元大気輸送モデルで解析することによって、地域別のCO₂の収支を全球にわたって評価する手法を確立することを目的としている。そのため、高解像度全球大気輸送モデルの開発・検証、データベース間の誤差や観測サイト選別、総観気象バイアスなどが収支推定に及ぼす影響の検討、逆解法解析手法の高速化、CO₂収支分布推定のためのデータ同化手法の開発、CO₂濃度の全球分布表示システムの開発、他機関からのCO₂濃度データの早期入手の調査を行った。その結果、大気輸送モデルの時間空間分解能を向上させることにより、巨大都市からのCO₂の流れ出しや内陸サイトでしばしば観測されるCO₂濃度スパイクなどを良く表現できる、データベース間の系統的誤差はわずかであっても収支推定に重大な影響を与える、現在の大気輸送モデルの不完全性に起因して、陸域サイトのデータだけを用いると推定されるCO₂フラックスの誤差が大きくなる、低気圧付近での大気の鉛直運動に伴って夏期のCO₂カラム濃度がシベリアや北米で顕著に低下することが見いだされ、CO₂収支解析の際にこれらのバイアスを考慮する必要がある、などが明らかとなった。また、全球大気輸送モデルのアジョイント演算子の作成と機能評価を行い、それを基に4次元データ同化システムの構築と動作の検討を行った。さらに、観測が行われていない地域での濃度変動を検討したり、GOSAT衛星から得られるデータの解析に際して必要となる初期値を与えたりするために、逆解法によって推定されたCO₂の放出源・吸収源と大気輸送モデルからCO₂濃度の3次元分布を計算し、観測された濃度とともに自在に表示するシステムを作成した。国内外の代表的機関を対象として、GOSAT衛星観測データを用いてCO₂収支解析を行うために必要な地上および航空機観測からのデータの早期入手の可能性も調査した。

[キーワード] 二酸化炭素、フラックス、逆解法、衛星観測、データ同化

1. はじめに

二酸化炭素（CO₂）を始めとする温室効果気体がこの200年間に急速に増加したことは、極域氷

床コアの分析や大気の詳細観測から間違いのない事実である。例えば、CO₂濃度は産業革命以前には280 ppmであったが、最近では380 ppmを示しており、100 ppmもの増加となっている。このような増加は、エネルギーや食糧の生産・消費と密接に関係した化石燃料消費や森林破壊・土地利用改変といった人間活動によるものである。したがって、このような温室効果気体の増加傾向は今後も続くと考えられ、それに伴って温室効果が強まり、近い将来の気候が大幅に変化することが懸念され、最も深刻な環境問題として国際的な関心事となっている。地球温暖化と呼ばれるこの問題に対処するためには、原因となっている人為起源の温室効果気体の全球規模変動を明らかにし、その循環を定量的に理解することによって、大気中濃度の将来予測と濃度増加の抑制対策を可能にすることが重要である。地球規模における温室効果気体の循環の解明は、早急に解決すべき科学的な研究課題として国際的な取り組みがなされており、様々な側面から多くの研究が活発に行われている。本研究においては、衛星観測といった新たな観測手法からのデータを取り入れたCO₂フラックスの時間空間変動の解析手法の開発とそれに関連した研究を行う。

2. 研究目的

全球規模にわたる温室効果気体の循環と収支を理解する方法としては、多くの地点でフラックスの直接測定を行い、その結果を時間的・空間的に拡張するボトムアップアプローチと、大気中の温室効果気体濃度の変動を詳細に把握し、それを全球3次元大気輸送モデルで解析するトップダウンアプローチが通常採用される。前者の方法は直接的であり、メカニズムが理解し易いという利点があるが、基礎データの取得に広範な観測ネットワークと極めて長い時間を要し、また一般化する際に多くの誤差が入る余地がある。一方、後者の方法は間接的であるが、比較的短時間の大気観測から放出源・吸収源強度の時間・空間変動を推定できるという特徴がある。

これまでに行われてきたトップダウンアプローチによる温室効果気体の収支の評価は、主に地上における観測ネットワークからの濃度データと比較的分解能の粗い大気輸送モデルが用いられてきた。本研究においては、トップダウンアプローチを採用して、最も重要な温室効果気体であるCO₂の収支を評価することを目指す。全球大気輸送モデルを高解像度化し、地上観測からの濃度データに加え、航空機による濃度の高度分布およびGOSAT衛星観測によって得られるCO₂カラム濃度を併せ解析することにより、CO₂の放出源・吸収源強度の時間空間変動を推定するための手法を開発する。また、逆解法を適用する際に生ずる誤差の検討や濃度の4次元データ同化など関連する研究を実施する。

3. 研究方法

トップダウンアプローチを採用してCO₂の地域別・時間別収支を求めるためには、全球3次元大気輸送モデルと地球規模にわたるCO₂濃度のデータセットを必要とする。従来の全球大気輸送モデルの典型的な空間分解能は2.5° × 2.5° 程度であり、GOSAT観測による空間分解能はおよそ30 kmと想定されるので、既存のモデルの格子間隔はこれよりもはるかに大きく、現状では空間的に狭い現象を扱うために衛星データを有効に利用することができない。大気組成の衛星リモートセンシング観測は、既にNO_xのトレンド監視において威力を発揮することが示されており (Richter and Burrows, 2002)、CO₂についても有効な手段となることが期待される。そのためには、CO₂の放出源・吸収源の近傍も測定し、雲やエアロゾルの影響を受ける衛星観測によるデータの解析にとっ

ては、さらに高解像度のモデルが必要となる。また、衛星観測スペクトルからカラム濃度を推定する際に初期値を与え、また衛星観測のシミュレーションを行うためにも、高い分解能を有する大気輸送モデルが不可欠である。さらに、濃度の日変化など、短時間変動による影響を解析するためには、計算する時間ステップを従来と比べて十分に短くする必要がある。そこで、本研究においては、これまでわれわれが使用してきた全球3次元大気輸送モデルを元に、飛躍的に高分解能化したモデルを開発し利用した。具体的には、 0.125° 間での水平分解能を持つ高解像度大気輸送モデルを開発し、 CO_2 濃度のシミュレーションを行い、観測結果との比較によって高解像度化の必要性を検討した。NIESオフライン輸送モデル (Maksyutov and Inoue, 2000) の時間空間分解能に関するアルゴリズムにのみ改良を加え、モデルの水平方向の解像度を 2° 、 1° 、 0.5° 、 0.25° 、 0.125° に設定できるようにし、TransCom 連続実験のプロトコル (Law et al., 2005) に従って、季節変化する海洋 CO_2 フラックス (Takahashi et al., 2002)、日変化を含んだSib2による陸域生態系 CO_2 フラックス、化石燃料燃焼起源の CO_2 放出を組み込み、大気中 CO_2 濃度をシミュレートした。人為起源の CO_2 排出量は、解像度 $1^\circ \times 1^\circ$ の排出インベントリを解像度 2.5° の全球人口分布図 (CIESIN, 2000) を用いて高解像度化し、水平解像度が $1^\circ \times 1^\circ$ で鉛直方向が26レベルのNCEP/NCARの客観解析風データも用いた。さらに、境界層の混合過程をより明らかにするために、鉛直方向の層の数を47に増やし、また3時間毎に更新されるPBL高度のデータ (ヨーロッパ中期予報センター; ECMWF) も併せて用い、モデルの鉛直方向の層を高度が高いほど厚くなるように設定した (地表近くでは約12 hPa、対流圏では約25 hPa)。また、ベクトル計算機能付きのNEC SXのような大規模な並列計算システムに対応できるようにプログラムを作成するために、まず全球データを緯度単位で分割し、さらに風向風速の客観解析データの前処理とフラックスの補間、そしてお互いの数値に影響を及ぼすことなくアウトプットの処理をそれぞれの緯度単位内で行った。ノード間の情報交換を極力避け、各々のCPUが独立して計算することにより効果的な並列計算を可能にした。NEC SXを用いた試験計算ではプロセッサごとの計算量は、単独プロセッサを使ったときに比べ、 $1^\circ \sim 0.125^\circ$ の水平分解能において、60ドメインで70%に抑えられた。

また、気象擾乱が CO_2 カラム濃度に及ぼすバイアスや、異なった観測手法によって取られた濃度データが収支解析に及ぼす影響を、従来用いてきたNIES大気輸送モデル (水平分解能 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 、鉛直15層) (Maksyutov and Inoue, 2000) と、陸域と海域をそれぞれ11に分割とした逆解法を基にして検討した。逆解法を行う際の初期データは、化石燃料燃焼起源の CO_2 についてはCDIACデータセット (Marland et al., 2003) から、陸上生物圏の CO_2 フラックスはCASAモデル (Randerson et al., 1997) から、海洋の CO_2 フラックスは大気・海洋間 CO_2 分圧差測定を基にした評価 (Takahashi et al., 2002) から与えた。逆解法によって求めたフラックスの時系列に含まれるノイズや観測データが無い領域でのフラックスの変動を減少させるために、Baysian法 (Gurney et al., 2003) あるいはSingular Value Decomposition truncation法 (Baker, 2001) を採用した。また、大気中 CO_2 濃度データはGlobal-View (Global Monitoring and Diagnostics Laboratory, 2004) から採られた。

さらに、大量の CO_2 濃度の観測結果を従来より高速で逆解法を用いて解析する手法を新たに開発した。これは、従来のBaysian逆解法 (Enting et al., 1995; Rayner et al., 1999) よりも、大量のデータに対して空間的により詳細な CO_2 収支の分布を求めることができるので、GOSAT衛星観測にとって有効と期待される。Baysian逆解法は「直接逆解法」と呼ばれており、フラックスとデータの次元 (量) を制限さえすれば、理論的には様々なタイプの問題を解くことができる (Peylin et al.,

2005)。しかし、この直接逆解法は、計算機の制限によって、現時点では全球を64分割 (Patra et al., 2005) もしくは100分割 (Rayner et al., 2002) した時の月毎の収支分布しか推定することができない。より大な問題を解くときには、大規模な最適化やデータ同化手法が一般的にもちいられる。例えば、Rodenbeck et al. (2003) は、非線形最適法を用いて月毎、グリッド毎のフラックスを推定した。また、データ同化の手法においては、フラックスと濃度分布の相関が強い時間フレームを選ぶことによって問題をより小さい次元で解くことができる。この手法は Bruhwiler et al. (2005) や Hartley and Prinn (1993) が利用した Kalman smoother の手法に良く似ている。本研究では、一般的に使われているデータ同化の手法を用いることとし (Yaremchuk et al., 2001)、具体的には、正規化項をコスト関数に加えて逐次最適化し、フラックスのノイズを除去した。

衛星観測は、全球をカバーできるという利点を有するが、衛星の軌道・回帰周期や雲・エアロゾルなどの影響によって、得られるデータが時間的にも空間的にも不連続となってしまう。このような濃度データの時間・空間的不連続性に起因する収支推定の不確定さを軽減する、すなわち全球大気輸送モデルによってCO₂の時間・空間分布の推定を行い、衛星からの観測値と融合させ、その結果を放出・吸収の推定に活用・援用するために、旧資源環境技術研究所で開発した大気輸送モデルを基礎としてアジョイントコードを作成し、CO₂濃度の4次元同化を試みた。利用した全球大気輸送モデルは水平2.5°、鉛直15層の分解能を持ち、ECMWF気象データにより駆動される NIRE-CTM-96である。このモデルの随伴 (アジョイント) 演算子 (CO₂濃度を時間軸に沿って逆方向に遡る計算モデルを示す) は、アジョイント演算子の自動生成プログラム (Giering and Kaminski, 1998) を開発しているドイツのFast Opt社に制作を依頼した。開発したアジョイント演算子は、NIRE-CTM-96の格子点の一つについて、1979年1月1日から1999年12月31日までの間の任意の時刻を指定点とし、その点に影響を及ぼす範囲をアジョイント感度として出力する。演算子の基本的な性質を確認するため1999年1月31日の18UTC (世界標準時) のサハラ砂漠上空3kmを指定点とし、積分期間や指定点の変更がアジョイント感度に及ぼす影響などを調査した。また、このアジョイントコードを用いて世界6地点について1995年の1年間の連続観測データから地表面フラックスを推定することを試みた。1日4回のデータから1460個のアジョイント感度を6地点について計算し、ロジャーズの方程式系を特異値分解法で解いた。この推定では、南極大陸上を除く549個の矩形領域を設定し、観測濃度からNIRE-CTM-96の順方向積分結果を差し引いたものを観測ベクトルとして用いた。なお、この順方向積分では76地点の月平均濃度から年々変動する気象データを用いて全球22領域について解いた解を用いた。さらに、NIRE-CTM-96およびそのアジョイント演算子を用いて4次元データ同化システムを開発し、一つの地点の1年間の仮想濃度を用いてその動作を検討した。データ同化を行う対象は、NIRE-CTM-96が化石燃料燃焼、陸上植生、海洋について推定されるフラックスから計算する全球濃度分布とした。気柱積分した一定濃度に同化する実験を1979年の1年間について行い、収束に要する反復回数等を統計した。

以上の他に、逆解法によって推定されたCO₂の放出源・吸収源と全球大気輸送モデルを用いてフォワード法で計算されたCO₂濃度の三次元分布を、観測された濃度とともに自在に表示し、また必要なデータをダウンロードできる機能を有するCO₂濃度表示システムを作成し、webサーバ (<http://cgermetex.nies.go.jp/gosat/co2nies/>) を通してユーザが自由に利用できるように公開した。

4. 結果・考察

(1) 大気輸送モデルの高解像度化とその検証

本研究において開発された高解像度全球大気輸送モデルを用いてCO₂濃度のシミュレーションを行った。水平方向の分解能を向上させることにより、巨大都市からのCO₂の流れ出しや内陸サイトでしばしば観測されるCO₂濃度のスパイクなどを良く表現できることがわかった。たとえば、日変化する地表フラックスがある場合、人為起源の都市ブルームはモデルを十分に高分解能にしなければ表現することができず、また都市の近傍での年平均CO₂濃度は、分解能を向上させて汚染地域と非汚染地域のコントラストを明確にしてやることによって正確に求まることが判明した。内陸サイトで夏によく見られる気象擾乱に関係したCO₂変動については、いずれのモデル分解能であっても似たような結果を示すが、アラスカ・ポイントバーローなどについて行ったシミュレーションの結果は、時系列上の気象擾乱による変動はより高分解能にすることによって良く再現できることが明らかとなった。

異なった解像度のモデルで計算されたCO₂濃度の分布を図1に示す。解像度2°×2°と解像度0.25°×0.25°の結果を比較してみると、平均CO₂濃度はほぼ同じであるにもかかわらず、その分布は大きく異なっている。たとえば、0.25°×0.25°の結果は2°×2°の結果よりも、都市周辺の高濃度のブルームや九州周辺の台風による大気の渦をより鮮明に表現している。

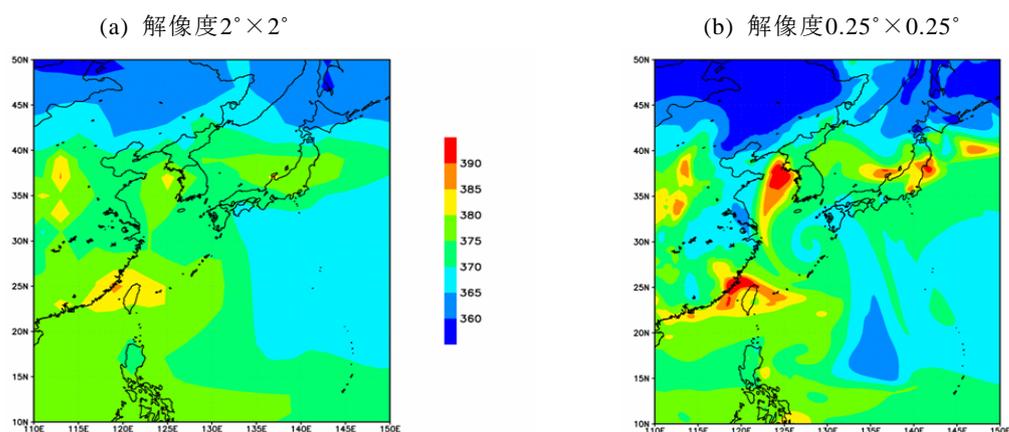


図1 解像度の異なる大気輸送モデルで計算された東アジアにおけるCO₂濃度の地表面分布（2002年8月30日分）。

図2に示すように、総観規模のCO₂変動の再現にはモデルの解像度による違いはあまり見られなかったが、高解像度モデルのほうが観測値により近い濃度を与えている。つくばでの観測結果とモデル結果を比較すると、東京からの風が卓越していた8月4日から7日については、低解像度よりも高解像度の結果が観測値に近いことがわかる。アラスカ・ポイントバーロー (Pt. Barrow) についても同様な結果が得られている。日変動する地表面フラックスが存在する場合には、都市からの人為起源のCO₂ブルームは、ある程度以上の解像度を持ったモデルを用いることにより、日変動が小さくなる高度においてのみ再現が可能であった。大都市から300km以内に位置する地域の多くでは、解像度を2.5°から0.5°に向上させることにより、汚染の影響を受けた地域とそうでない地域のコントラストがより鮮明に再現され、また平均濃度が大きく異なった。

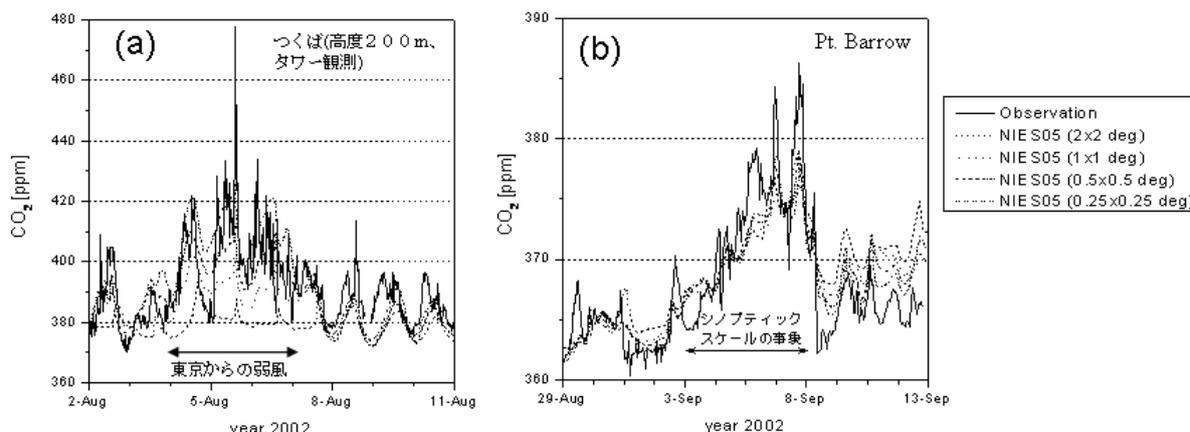


図2 つくばとPt. Barrowについて解像度の異なる大気輸送モデルで計算された地表レベルのCO₂濃度と観測値の比較。

(2) データ誤差および観測サイトが収支推定に及ぼす影響の検討

衛星観測による大気中のCO₂濃度データは、これまでに逆解法解析で伝統的に用いられてきた地上データのみと比べて、全球にわたる放出源・吸収源強度の地域分布を導出する上で、有効な役割を果たすと期待されている (Rayner and O'Brien, 2001; Pak and Prather, 2001; Patra et al., 2003; Maksyutov et al., 2003; Houwelling et al., 2004)。しかしながら、衛星データを利用するにあたっては、測定精度や異なった測定手法によるデータ間のバイアス、測定とモデル計算の時間的不一致、雲やエアロゾルによる干渉などについて十分な配慮が必要である。そこでPatra et al. (2003) やその他の研究を基に検討を行った。図3(A)は、衛星データおよびTransCom-3のプロトコルに従って海域と陸域をそれぞれ11に分割した逆解法を用いて、データにバイアスを与えない場合と全球一様な1%のバイアスを与えた場合の結果の差を表している。この図から、一様なバイアスはどの地域のフラックスにも大きな影響を与えないことがわかる。

一方、二つの異なった観測方法からのデータ（ここでは衛星観測と地上観測を仮定）が用いられた場合、衛星データにわずか0.3%のバイアスを与えただけで、推定されたフラックスに大きな違いを生ずることが図3(B)からわかる。また、海域と陸域のフラックスの違いはほぼ同程度であるが、影響は領域によってかなり異なる。このことは、衛星データの検証と必要な補正が極めて重要であることを意味している。

衛星観測とモデル解析の時間の不一致から生ずるフラックスの誤差の評価は、上述の事項と比べてはるかに困難である。そこで、本研究では、今後の研究に供するために、大気輸送モデルを用いて基本的概念を検討した。この種の誤差としては、CO₂の日変化から生ずるバイアス (diurnal bias) と総観規模の気象条件の不適切な表現に関係したバイアス (clear sky bias) が考えられる。これらのバイアスを検討するためには、大気境界層の日変化のパラメタリゼーションおよびそれに関連したプロセスの扱いや、大気の大気対流システムの時間変化と強度の取り扱いの正確化などについて、濃度のフォワード計算を行う際に用いる大気輸送モデルの改善が必要である。加えて、気象データを基にした陸上・海洋生物圏フラックスの日変化を計算する能力も必要である。Clear-sky biasに関しては、本研究で行った検討の一例を次節で示す。

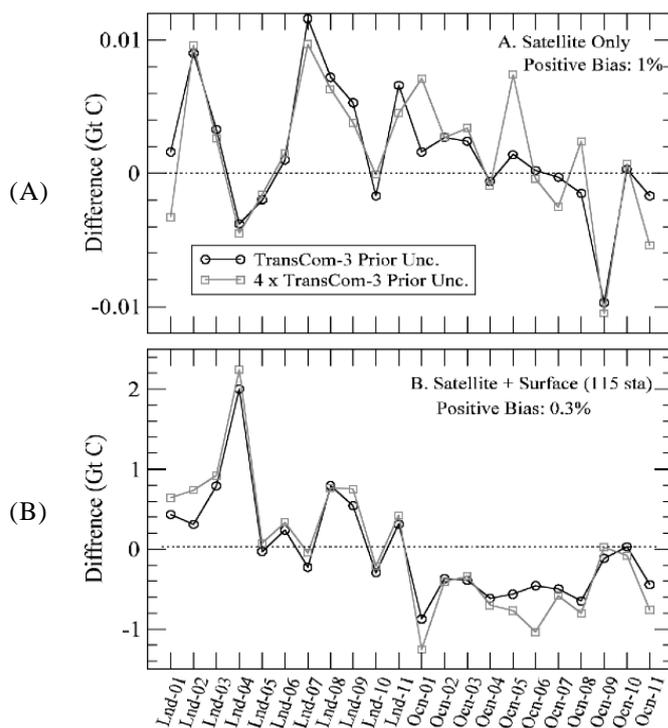


図3 衛星データと逆解法を用いて推定された海域 (Ocn) と陸域 (Lnd) のCO₂フラックスの違い。(A) は、衛星データのみを用いて、それに1%のバイアスを与えたときと与えないときの結果の違いを表し、(B) は、衛星データと115地点の地表データを用いて、衛星データに0.3%のバイアスを与えたときと与えないときの結果の違いを表す。ただし、衛星データには測定誤差はないと仮定してある。

逆解法によるCO₂収支の推定においては大気中のCO₂濃度データが不可欠である。一方現状においては、解析に用いる大気輸送モデルは輸送過程の観点から見ると必ずしも完璧とは言えないため、推定されたCO₂放出源・吸収源を基に計算した大気中CO₂濃度が観測結果と一致しないことがしばしば起こる。そこで本研究では、国際的な大気輸送モデルの相互比較計画であるTransCom-3に参加しているモデルを用いて、使用するCO₂濃度データを変えて収支解析を行い、海域と陸域のデータが結果に与える影響を検討した。

ここでは年平均CO₂フラックスとその誤差を評価するためのTransCom-3 (Level-1) のフレームワークに従って、全球を陸域11と海域11に分割し、16の大気輸送モデルによる時間非依存逆解法を用いた。化石燃料消費起源のCO₂は6.6GtC/yrとした。大気中CO₂濃度データにはGlobal-Viewに集録されている世界87地点のデータを採用し、解析においてはサイト数を変化させるとともに、1999-2001年の実際の週毎データを99%、90%、70%でカットしたものをを用いた。また、海洋サイトCO₂データは、内陸および沿岸部の観測サイトを除くことによって作成した。

全サイトデータを用いた場合、1999-2001年の全球CO₂吸収は3.4GtC/yr (陸域吸収が1.1GtC/yr、海洋吸収が2.3GtC/yr) と推定された。陸上サイトの数を増やすと海洋吸収が弱くなり、陸上生物圏の吸収が強くなる傾向が見られた。一方、海洋サイトデータのみを用いた場合は、陸上生物と海洋による吸収はそれぞれ0.8GtC/yrと2.6GtC/yrとなり、全サイトデータと比べると、陸域での直

接的な強いCO₂放出・吸収の影響が弱くなり、モデルの大気輸送プロセスの違いが明瞭に現れなくなるので、between-model誤差が小さくなった。一方、観測ネットワークのサイズが小さくなるため、within-model誤差は多少大きくなった。全サイトデータの場合、北半球のCO₂吸収は3.3GtC/yrであり、サイト数が増えるとわずかに増加し、海洋サイトデータの場合の陸域吸収は1.5-1.6GtC/yrと推定された。赤道域の海洋放出（およそ0.6GtC/yr）はネットワークサイズに依存せず、また全サイトデータからの陸域吸収も変化が無かった。その理由は赤道域に観測サイトがほとんど存在しないことによる。南半球の吸収も比較的安定していた。

表1は、本研究から推定された1999-2001年の平均的なCO₂フラックスをTransCom-3 (Gurney et al., 2003) およびその他の研究の結果と比較したものである。TransCom-3との違いは、期間が異なっていることによる火災や生態系管理の違いの影響に加え、1992-1996年にエルニーニョが発生し、ピナツボ火山が噴火しているため、その影響によるものと考えられる。北米 (Temperate North America, Boreal North America) の陸域吸収は、他の方法から推定された値とほぼ一致している。

表1. 本研究で推定された1999-2001年の平均的CO₂フラックスとTransCom-3 (1992-1996年)、その他の研究の結果との比較。

Flux Region	Prior Fluxes and Uncertainty	TransCom Control Estimates (92-96)		This Study (Network with 70% real data)				*Other Estimates (min/max.)
		All-sites	Ocn only	Estimated Flux		Flux Uncertainty		
				All-sites	Ocn only	*Within-	*Between-	
Boreal N America	0.00±0.73	0.28	0.16	0.28	0.12	0.63	0.15	~ +0.08
Temp N America	-0.20±1.49	-0.82	-0.59	-0.56	-0.69	0.93	0.50	-0.37 / -0.7
Tropical America	0.55±1.41	0.67	0.58	0.50	0.55	1.17	0.42	-
South America	0.00±1.23	-0.13	0.09	-0.16	0.01	1.06	0.18	-
Northern Africa	0.15±1.33	0.01	-0.15	0.19	-0.24	1.06	0.46	-
South Africa	0.15±1.41	-0.29	-0.27	-0.22	-0.03	0.96	0.39	-
Boreal Asia	-0.40±1.51	-0.60	-0.56	-0.33	-0.29	0.78	0.45	-
Temperate Asia	0.30±1.73	-0.42	-0.41	-0.34	-0.66	1.12	0.77	-
Tropical Asia	0.80±0.87	0.42	0.44	0.16	0.46	0.66	0.23	-
Australasia	0.00±0.59	-0.16	-0.16	-0.16	-0.06	0.56	0.09	-
Europe	-0.10±1.42	-0.61	-0.34	-0.46	0.03	1.06	0.38	-0.14 / -0.2
North Pacific	-0.50±0.27	-0.25	-0.39	-0.89	-1.14	0.50	0.25	-0.48 / -0.5
West Pacific	0.15±0.39	-0.16	-0.10	-0.26	-0.18	0.33	0.30	0.10 / 0.0
East Pacific	0.47±0.37	0.63	0.66	0.62	0.66	0.34	0.23	0.59 / 0.50
South Pacific	-0.23±0.63	0.51	0.33	-0.24	-0.50	0.63	0.35	-0.26 / -0.2
Northern Ocean	-0.44±0.35	-0.30	-0.34	-0.53	-0.35	0.21	0.07	-0.30 / -0.3
North Atlantic	-0.29±0.27	-0.45	-0.56	-0.41	-0.40	0.34	0.06	-0.28 / -0.3
Tropical Atlantic	0.13±0.41	-0.05	-0.03	-0.10	-0.08	0.33	0.09	0.17 / 0.15
South Atlantic	-0.13±0.55	-0.04	-0.04	-0.13	-0.16	0.43	0.08	-0.13 / -0.1
Southern Ocean	-0.88±0.72	-0.46	-0.50	-0.17	-0.18	0.35	0.23	-0.55 / -0.7
Trop Indian Ocean	0.12±0.48	-0.34	-0.54	0.34	0.21	0.37	0.33	0.17 / 0.1
S Indian Ocean	-0.56±0.41	-0.24	-0.09	-0.54	-0.50	0.39	0.13	-0.48 / -0.5
Northern Land	-0.40±3.17	-2.16	-1.73	-1.41	-1.49	1.05	0.40	-
Tropical Land	1.50±2.12	1.10	0.87	0.85	0.77	1.45	0.72	-
Southern land	0.15±1.96	-0.59	-0.34	-0.54	-0.07	1.28	0.42	-
Northern ocean	-1.23±0.52	-1.00	-1.29	-1.84	-1.89	0.70	0.29	-
Tropical Ocean	0.87±1.02	0.08	-0.01	0.60	0.61	0.75	0.46	-
Southern Ocean	-1.80±1.61	-0.24	-0.30	-1.09	-1.35	0.78	0.29	-
Total Land	1.25±4.29	-1.65	-1.20	-1.09	-0.79	1.36	0.50	-
Total Ocean	-2.16±1.53	-1.16	-1.60	-2.33	-2.63	1.36	0.52	-1.46 / -2.12

*Other estimates refer to those published results which are not primarily based on Bayesian inverse modelling of atmospheric CO₂. Boreal North American, Temperate North American, and European fluxes are based on *Kurz and Apps* [1999], *Pacala et al.* [2001], and *Janssens et al.* [2003], respectively. The oceanic fluxes are estimated from an updated data base of *Takahashi et al.* [2002].

濃度測定が行われていない幾つかの陸域 (Tropical South America, Temperate South America, South Africa, Boreal Asia) については、全サイトデータと海洋サイトデータについての結果がほとんど同じであり、正味の吸収となっている。一方、ヨーロッパについての本研究およびTransCom-3のフラックスは、陸域サイトを考慮するかしないかで大きく結果が異なり、海洋サイトデータから

求められたフラックスは他の独立した推定とよく一致している。Between-model誤差が非常に小さいNorth Pacificの吸収は、TransCom-3およびTakahashi et al. (2002)より大きく、North OceanやNorth Atlantic、Tropical Atlantic、South Atlantic、South Pacificのフラックスはサイトデータによらずほぼ一致しており、Takahashi et al. (2002)とも良い一致が見られる。

本研究から、陸域サイトからのCO₂データを用いると、推定されたフラックスに大きな違いを生ずる場合があることが判明した。その原因は使用した16の大気輸送モデルの不完全性にあり、大気輸送場の表現をより現実に近づけるための改良が必要である。現時点では、他の独立した推定による結果との比較から、海洋サイトデータを用いた方がよい一致が見られることが判明した。また、本研究の結果は、アジア、アフリカ、南アメリカなどで更なる観測が必要であることを示している。

(3) 総観気象バイアスの検討

衛星を用いてCO₂を測定する際、気象条件によって常に観測ができる訳ではなく、取得データに偏りが出る。そのため、常時観測が可能な地上観測からのデータとともにモデルによる収支解析をおこなうと、得られた結果にバイアスがかかるので注意が必要である。そこで本研究では、CO₂カラム濃度と総観規模の気象擾乱との関係を調べることにした。本研究では、6時間毎のNCEP再解析データで駆動されるNIES全球大気輸送モデルと世界87地点での濃度観測データを用いて、逆解法によって求めた陸域と海洋（それぞれ11の領域）の月毎のCO₂フラックスを求め、それを基に大気カラムCO₂濃度を計算した。逆解法を行う際の初期データは、上で述べた通りである。カラムCO₂濃度のアノマリーと総観規模の気象擾乱との関係を調べるために、ここでは地上気圧を気象擾乱の指標として採用した。

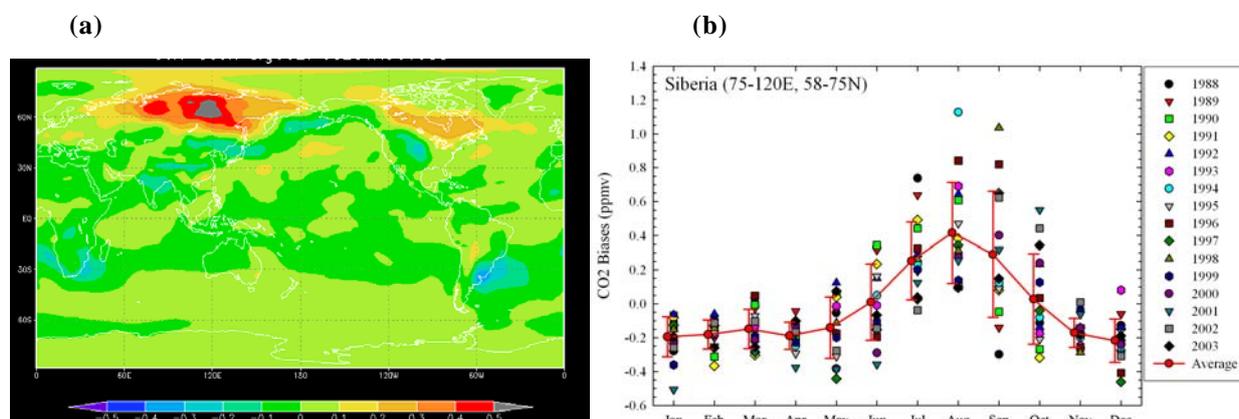


図4 (a) 気圧の変化に伴うCO₂カラム濃度バイアスの全球分布。1998-2003年の8月の平均値を表す。(b) 1988-2003年のシベリア上空(75°-120°E, 58°-75°N)におけるCO₂カラム濃度バイアスの季節変動。鉛直バーは各月の平均値に対する $\pm 1\sigma$ を表す。

モデルで計算された1988-2003年のCO₂カラム濃度を地上気圧と比較したところ、特に夏期のシベリアと北米上空において明瞭な正の相関が見いだされた(図4(a))。このような相関は、低い

CO₂濃度を持つ境界層の空気が低気圧の上昇流によって上空に輸送されるために生じていると考えられる。また、図4(b)に見られるように、低気圧が引き起こすバイアスは、月平均で見ても夏のシベリア上空では年によっては1ppm以上にも達する。CO₂カラム濃度の季節変化の振幅が8-10ppmであることを考えると(Olsen and Randerson, 2005)、炭素収支を推定する際に2-11%という大きな不確定を生ずる可能性があることを意味する。バイアスの年々変動は8月のシベリアにおいては0.3-0.4ppmであるが、南半球ではほとんど無視できるほど小さく、また他の月でははるかに小さくなる。

GOSATも含めて衛星による観測は雲のあるところでは行うことができない。雲量は平均的には50-60%であり、シベリアの夏には60-80%に及ぶので、有効な衛星データはかなり限られたものとなる。したがって、ここで示した大気鉛直運動に関係した濃度バイアスは、衛星データと地上データを同時に用いてCO₂収支を解析する際には大きな誤差要因となるので、この影響を考慮することが重要である。

(4) 逐次最適化による逆計算の高速化

まず初めに、おおよその特異値のスペクトルを計算し、デジタルフィルターのカットオフ値を選択した。この選択を行うために、図5に示すような、22領域、月毎の逆解法からのCO₂フラッ

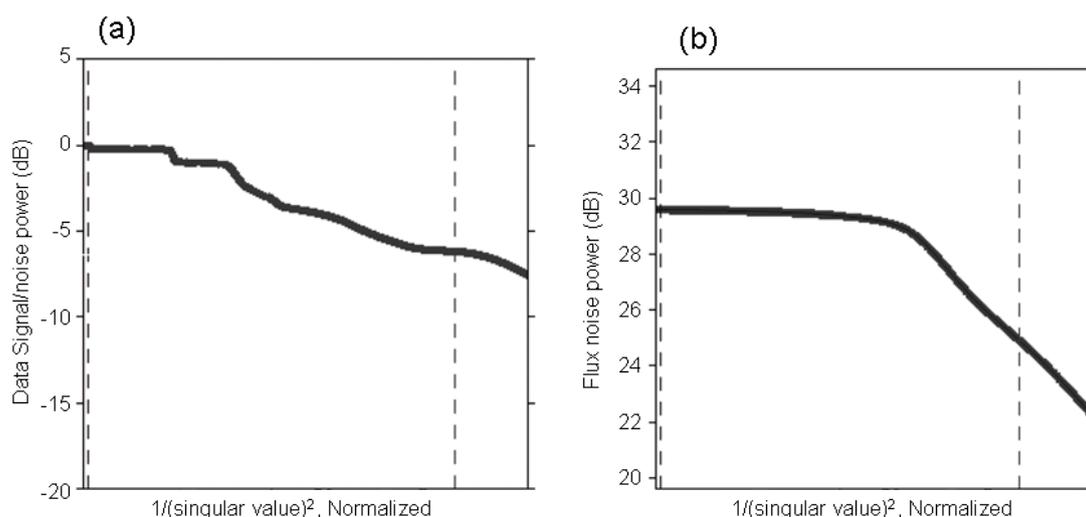


図5. 逆解法モデル(22領域、月毎)の特異値スペクトルの初期値。(a) 観測データに基づくノイズスペクトル(実線)とカットオフ値の先験値(破線)。(b) フラックスノイズのスペクトル(実線)、とカットオフ値(破線)。

クス(Baker et al., 2006)の特異値のスペクトルを作成した。できる限りシグナルを保持する一方で、逆解法モデルの誤差を大きくする弱いシグナルは取り除くようにカットオフ値を選択する必要がある。ノイズパワーが急落する所をカットオフ値とする必要がある。特異値分解(SVD)法と呼ばれるこの手法では、小さい特異値は逆解法計算から除かれ、特異値ベクトルは抑制もしくは除去される。カットオフ値を選択すると、カットオフフィルターの形が決まり、どの程度ノイズが低減するかも推定できる(図6)。

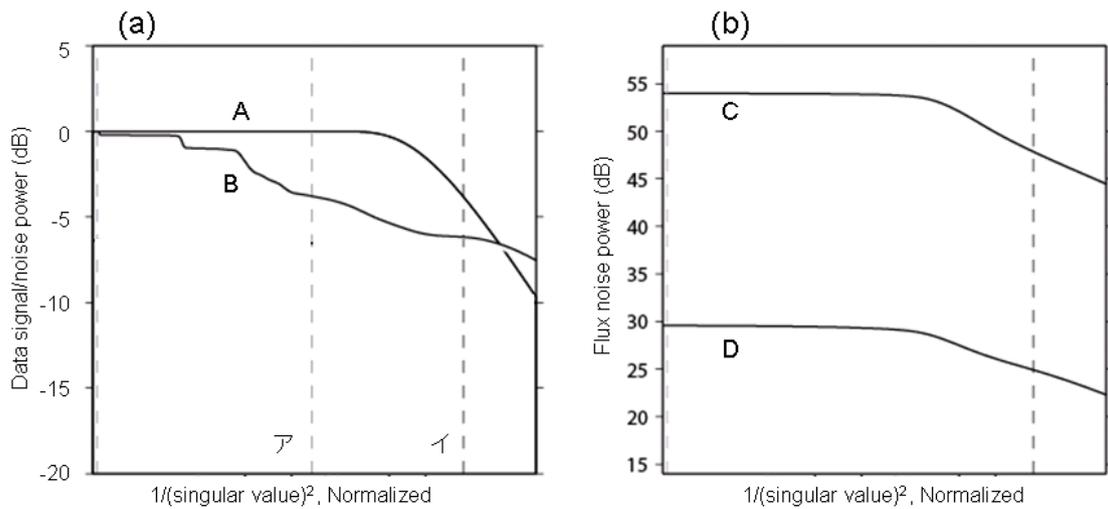


図6. (a)与えられたカットオフ値（図5aとbの破線）に対するカットオフフィルターの形（実線A）とカットオフ値の選定値（破線ア）。図6(a)中の実線Bと破線イはそれぞれ図5(a)中の実線と破線に相当する。(b)フィルター適用後の理論的フラックスノイズのスペクトル（実線C）。図6(b)中の実線Dと破線はそれぞれ図5(b)の実線と破線に相当する。

この手法（逐次最適法）を用いた逆解法と従来の直接逆解法による結果を、北米亜寒帯（Baker et al., 2006）のCO₂フラックスの時系列変化について図7で比較する。これらのフラックスの変動の差は比較的小さく、それぞれの誤差の範囲内である。しかし、カットオフフィルターと逐次最適法を用いることによって計算時間は大幅に短縮され、フラックスの時系列変動もよりスムーズかつ現実的なものになった。

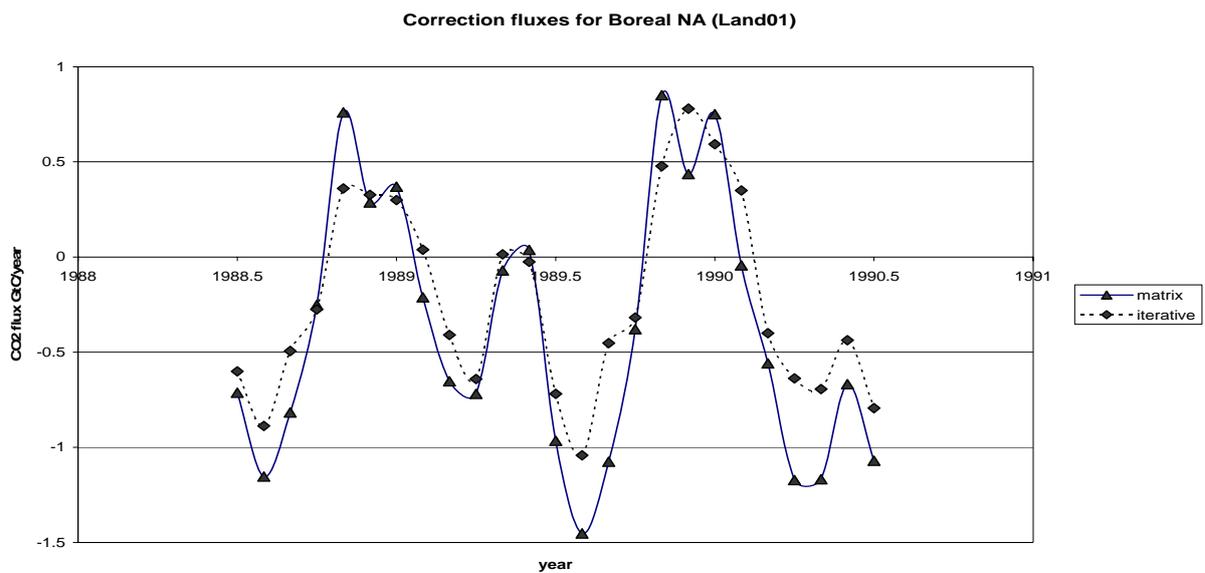


図7 直接逆解法(▲)と逐次最適逆解法(◆)によって求めたフラックスの比較。

現在、この手法をTranscom-3の逆解法モデル（Patra et al. 2005; Baker et al., 2006）に適用できるように拡張している（コンパイラとしてFortranを、グラフィカル・インターフェースとしてMatlabをWindows上で使用）。このプログラムは1次元のマトリックスを扱う為（注：従来の直接インバース法は未知数であるフラックスと既知数である観測値の2次元マトリックスを扱う）、大きなメモリーを必要としない。そのため、基本的なプログラムに修正を加えることなく、使用するCO₂の観測値とフラックスの領域数を求めることができる。

（5）衛星観測CO₂濃度データの四次元同化モデルの開発

入手したアジョイントコードの性能をテストするために、GOSAT衛星がデータを取得する可能性が高いサハラ砂漠上空（5° E, 22.5° N, 3 km）の1999年1月31日18UTCをターゲットとして解析を行った。最初にターゲットを固定したまま、積分期間を10日、20日、30日と変えて、アジョイント感度の空間分布の変化を調べた。図8に示すように、立体的に見た場合、ターゲットの地点と同一の高度の感度が時間と共に風上側、すなわち西向きに伸びていく様子が観察された。これを3 kmの高度での水平断面で見ると、米国東海岸に上昇流域があった（1月22~24日）ためにこの地点までは速やかに西向きに進んだものの、その地点を越えてさらに西向きには急速に強度を減衰した。弱い感度領域は、時間と共に西向きに広がり続けた。一方地表では、上昇流のある北米東岸の地点で感度が増した後、この地点を中心に周囲へ拡大した。これは、この上昇域が大規模場

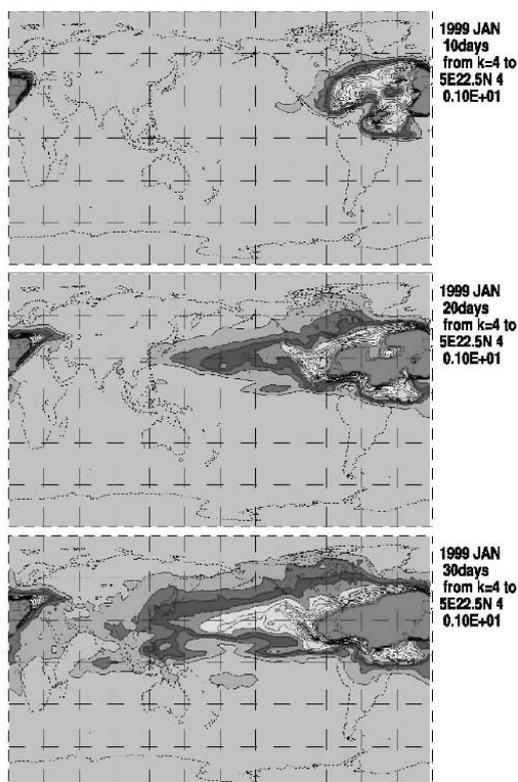


図8 1999年1月31日のサハラ砂漠上空（5°E、22.5°N、上空3km）をターゲットとした10、20、30日のアジョイント感度。

の収束を伴い周囲の情報をかき集めて上空へ運んでいるという状況を反映しているためと考えられる。ターゲットを2.5°南へ移した場合の積分期間15日のアジョイント感度は、最大感度の場所については3 kmでも地表でも大きな違いは無く、いずれも北米東海岸の上昇流の地点を通過した気流がサハラ砂漠の3 km地点に大きな影響を及ぼしている。ところがターゲットを5 kmとした場合には、最大感度が大西洋の赤道上空となり、その原因は1月28～29日にこの付近にあった上昇流域の影響と考えられる。このような傾向は積分期間を15日から30日に延長した場合にも大きな変化は無かった。これらのことは、気柱積算濃度とアジョイント感度を関係づけるためには高度方向の濃度の変動を巧妙に仮定する必要があることを示している。

取得したアジョイントコードを用いて、1995年の1年間について、アラスカのポイントバロー、南鳥島、ハワイのマウナロア、米国領サモア、タスマニアのグリム岬、南極点の6地点での連続観測データから地表面フラックスを推定することを試みた。1979年から1999年について、NIRE-CTM-96を用いて逆解法によって陸域11、海域11のCO₂発生・吸収量を推定し、その放出・吸収量分布を再度NIRE-CTM-96に与えて計算したCO₂濃度と観測値の差をアジョイント感度の線形結合によって表現し、年平均のCO₂の放出・吸収量分布を未知数とした。モデルは1日に4回(0, 6, 12, 18UTC)濃度を出力するので、1時間間隔の観測濃度からこれらの時刻の前後3時間の平均濃度を求め、対応させた。また、赤道上では5x3個の格子点(東西12.5°、南北7.5°)を一つの領域として設定し、面積が大きく異なることがないように、極に近づくにつれて経度方向の格子の数を少しずつ増やすように領域を設定した。その結果、南極大陸を除く549領域のフラックスが未知数となった。アジョイント感度は30日間のもの、つまり1996年1月1日の00UTCの濃度は、1995年12月2日06UTCから30日間に継続的に放出がある場合の観測点濃度を用いた。したがって、6地点の1460個のアジョイント感度を予め計算することになる。このアジョイント感度は3次元の分布となるが、下に述べるように未知数とする領域毎に最下層の値を加算して用いた。

各観測点でまず観測値と計算値の平均の偏差を取り除き、その後の二乗誤差の平方根(RMS)を求めると、観測点によって大きく異なった。観測の誤差と輸送モデルの計算誤差は、観測点の位置とモデルの中で表現できる位置のズレや、気象データの誤差などを含めたものであるが、それらを加味したデータ誤差は観測点ごとのRMSに比例するとした。すなわち観測点ごとのRMSに係数 S_e を乗じてデータ誤差を設定した。フラックスを推定する矩形領域549個の事前推定値はゼロとし、その不確定性は均一に S_a とした。データ誤差の係数(S_e)と事前推定値の不確定性(S_a)を変化させることによって正規化誤差(X2)が1に近くなるように S_a と S_e の組み合わせを探した。解は複数となったが、これらについてフラックスの分布を再構築し、再度輸送モデルを走らせ、RMSの計算を繰り返した。この解はアジョイント感度すなわち濃度の増加率として与えられるので、フラックスに変換するには輸送モデルの最下層の厚みが影響する。例えば、ある領域の解が6時間当たり1ppmと出た場合、これは輸送モデルの最下層に1ppmの変化を与えるフラックスとなるが、最下層の厚さは、地表気圧によって変動するので一定ではない。また、実際は境界層全体が均一の濃度となるので、希釈された濃度がモデルに与えられることになる。いずれもアジョイント感度が想定している状況とは異なるので、モデルを再度走らせた結果はアジョイント感度を組み合わせたものとは異なる。さらに、観測とモデルの平均値を差し引いて解いたので、解を用いたフラックスは年平均するとゼロとなる必要があるが、実際は僅かながらゼロとは異なる場合があった。高々1%程度であるが、過大となるフラックスの側、例えば増加する場合は正のフラッ

クスに均一な係数をかけて年間の総和がゼロとなるように調節した。このようにして得られた解は、誤差を最小とする組み合わせが個々の観測点によって異なることを示した。

Seつまり観測誤差を小さく設定することによってアジョイント感度の合成では観測濃度に近づけることができたが、再度モデルを走らせた場合は、かえって濃度が観測値から遠くなった。考えられる原因として、濃度の増加率として得られる解をフラックスに変換する部分で生ずる不整合が挙げられる。また、南極点の季節変動が、1年を通じて一定のフラックスを変更しただけで変化することは興味深い。南極点の季節変動は発生源の変動によるものではなく、発生源の地点が影響していることになり、熱帯収束帯の季節的な変動と発生源が干渉するためではないかと思われる。また、アジョイント感度の計算では30日間のものを用いたが、南極点でSaの減少とともにRMSが増大する現象は、熱帯付近を通過する30日より長い時間の輸送が関係していると思われるので、本解析システムを改良するためには、期間の延長は避けられないのかもしれない。

このような問題はあるが、解の地理的分布から興味深い傾向を読み取ることができる。事前推定値(ゼロ)に対する不確定性を大きくとると(図9(a))、インド、アラスカ沖などが大きな放出

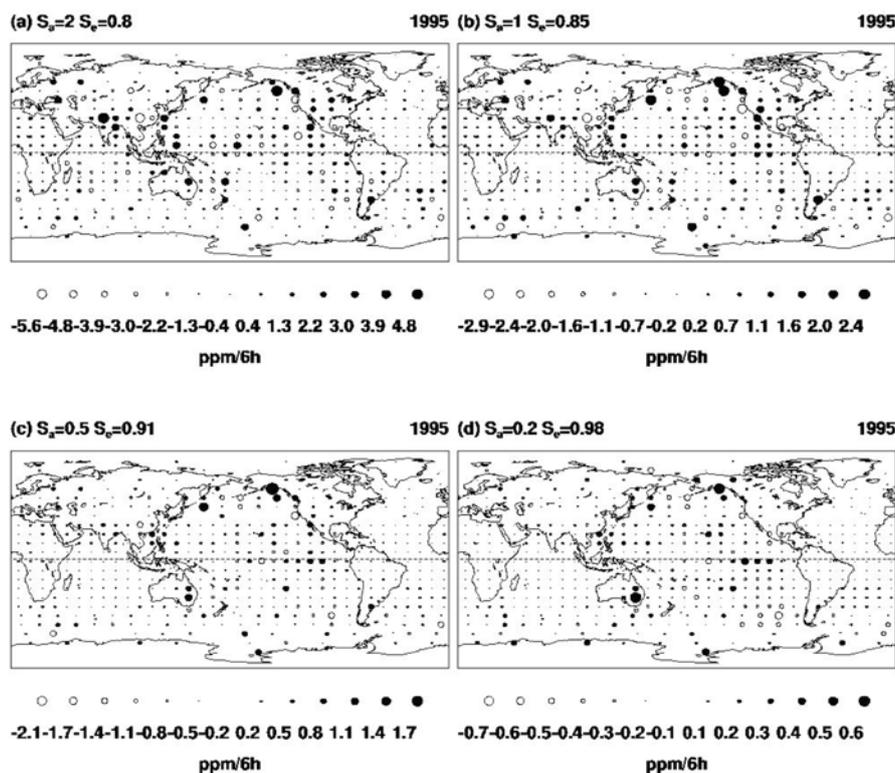


図9 1995年の年平均の放出・吸収について逆問題を解いた際のCO₂放出・吸収の補正值の分布。黒丸の大きさは地表において大気を受け取る率を、白丸は大気から取り除かれる率を表す。事前情報の不確定性、観測値と輸送モデルの不確定性について4つの場合を仮定した結果を示してある。

源となり、中国大陸、カリフォルニア沖に吸収源が見られる。また、事前推定値に対する不確定性を小さくすると(図9(d))と、アラスカ沖の放出源はそのままであるが、オーストラリアの東側に大きめの放出源が現れ、太平洋の東部赤道にも放出源が見出される。観測点が太平洋を南北

に渡る形で配置されていることとも関係あるかもしれないが、このような放出、吸収が見出されたことは大変興味深い。

本研究で実施したデータ同化法の開発では、データ同化しようとする衛星観測からの気柱積分濃度が与えられると、まず順方向積分をして得た（背景）濃度の気柱積算量と比較し、観測濃度との差が2 ppm（約5%）以上の場合、その食い違いの濃度を全球大気輸送モデルが作り出す分散に応じて高さ方向に配分する。背景濃度にこの食い違いを取り入れるために必要となる6時間前の濃度分布の修正量は、最小二乗法型の評価関数を定義し、それを最小にするような濃度として求めた。さらに修正した濃度分布を初期値として大気輸送モデルを順方向に6時間（1ステップ）走らせ、観測との食い違いを修正するという手続きを誤差が2 ppm以下となるまで反復した。その結果、年間濃度が365 ppmから380 ppmへ変動する地点についてこの二つの濃度へのデータ同化を行った所、およそ20-30回の反復計算を行うことにより2 ppmの誤差に収束した。

（6）CO₂濃度の全球分布表示システムの開発

現在、地上基地や航空機などを利用して観測された大気中のCO₂濃度と全球三次元大気輸送モデルを用いて、逆解法により陸域生態系と海洋のCO₂放出・吸収強度の時間・空間分布を推定することができる。また、得られた結果を大気輸送モデルに入力することにより、大気中のCO₂濃度の三次元分布を計算することが可能である。したがって、計算された大気中のCO₂濃度と直接観測された結果を比較することにより、モデルの有効性を検証したり、観測が行われていない地域での濃度変動を検討したり、異なった研究グループによる逆解法解析の結果を比較したりすることが可能となる。さらに、その結果は、GOSAT衛星から得られるデータの解析に際して必要となる初期値や、解析の信頼性の幅を与えることにも利用できる。このような研究を遂行するためには、逆解法によって求められたCO₂の放出源・吸収源のデータと大気輸送モデルからCO₂濃度の三次元分布を計算し、その結果を観測された濃度とともに自在に表示するシステムが必要となる。そこで本研究においては、CO₂濃度の全球分布をさまざまな角度から表示し、元となる濃度データをダウンロードできるシステムを作成した。このシステムを開発するに当たって、上述のNIES大気輸送モデルによる逆解法により、11の陸域と海洋（都合22の領域）の月毎のCO₂フラックスを求め、それを基に大気中のCO₂濃度を計算した。

本システムは、データセットの特性および開発時間が限られていることを考慮し、webサーバ (<http://cgermetex.nies.go.jp/gosat/co2nies/>)によりユーザへのデータ公開を行こととした。ユーザへのデータ提供、グラフ・アニメーションの表示にはHTMLを用い、プルダウンメニューにはJavaScriptを用いた。システムは、ユーザが直接アクセスするWebサーバ（UNIX FreeBSD）およびWebサーバのみからアクセスできるグラフアプリケーションサーバ（Windows XP）から構成された。ユーザのリクエストはWebサーバからアプリケーションサーバへ引き渡され、アプリケーションサーバによりグラフやデータがユーザへ提供される。ネットワーク上のセキュリティを保つため、Webサーバとアプリケーションサーバの間にファイアウォールを設置した。フリーソフトウェアのZスクリプトライブラリ (<http://www.zegraph.com/z-script/index.html>)を用いて、データ処理およびグラフ表示を行うプログラムを作成した。Zスクリプトは軽くて速く、簡便な言語であり、全ての32ビットCPUのWindowsマシン（Windows95からXPまで）上で稼働する。

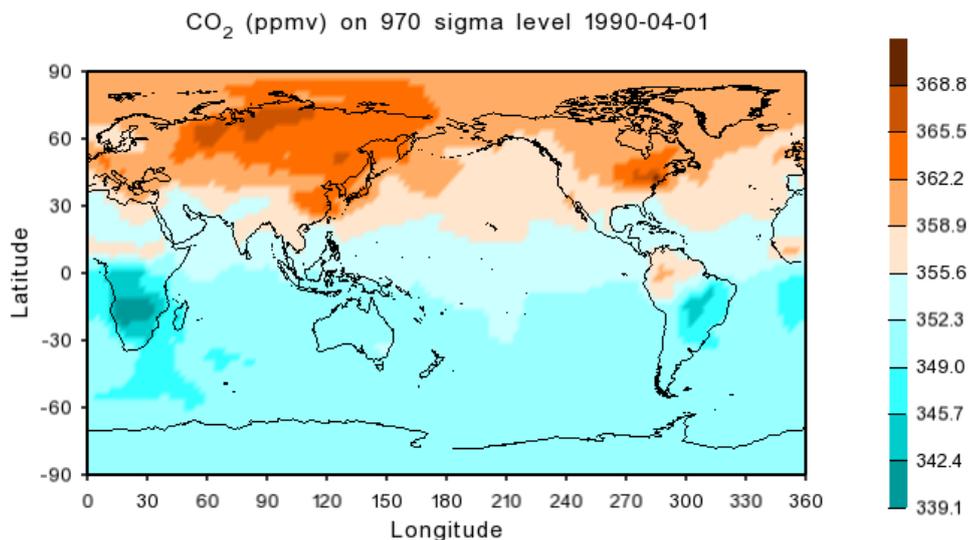


図10 1990年4月1日の0.97 σ レベルでのCO₂濃度の全球分布。

Web上では1990年から2003年の期間について、(1) 与えられた σ レベルでの日々および月ごとのCO₂濃度の取得、(2) 日々および月ごとの地表CO₂濃度とCO₂カラム濃度のアニメーション表示、(3) 与えられた σ レベルでの日々CO₂濃度の表示、(4) 日々のCO₂濃度の高度-経度分布の表示、(5) 日々のCO₂濃度の高度-緯度分布の表示、(6) CO₂濃度の球面表示、(7) 与えられた地点でのCO₂濃度の時系列の表示、(8) 月ごとのCO₂濃度についても上と同様な表示が行えるようにした。表示の一例を図10に示す。なお、ユーティリティプログラムを使用することにより、ファイルに収納されている全濃度データをディレクトリーにダンプすることができ、その際、日付と σ レベルに従って新たにファイルに名前を付けることができるようにした。

(7) 地上・航空機観測CO₂濃度データの早期入手の調査

GOSAT衛星によって取得されたデータを用いて逆解法によってCO₂収支の地理的分布を推定する際には、さらに地上基地や航空機による観測からのデータも必要とする。CO₂濃度観測を行っている機関は、一般的にはデータ取得後、標準ガスの再検定、一次データの濃度への変換、データ選別を経て所定のフォーマットに整えて濃度データを公表する。そのため、観測が終了してからかなりの時間が経ってからCO₂濃度データが利用できるようになるので、GOSAT衛星データの早期解析に大きな障害となる。そこで、広範なCO₂観測を展開している幾つかの国内外の機関に対してデータの早期提供の可能性を打診した。今回、調査を行った国立環境研究所（日本航空・シベリア・相模湾航空機観測、波照間島・落石岬地上観測、太平洋上船舶観測）や東北大学・国立極地研究所（日本上空航空機観測、太平洋上船舶観測、昭和基地・ニューオルスン基地地上観測、日本・昭和基地上空大気球観測）、気象庁（南鳥島・与那国島地上観測）などの国内機関からは、精度が0.1ppm程度の予備解析データであれば、観測終了後、数ヶ月から半年以内に提供できるとの回答を得た。

一方国外の機関については、アメリカNOAA/ESRL、カナダEC、オーストラリアCSIRO、フラ

ンスLSCE、ドイツMax-Planckを対象として調査を行った。その結果、世界最大の観測ネットワークを有しているNOAA/ESRLからは、予備解析データの提供は可能であるが、詳細については今後さらに検討したいとの回答を得た。カナダECは、CO₂濃度については0.2ppmの精度であれば、国内6地点でのデータを観測終了後一週間程度で提供してよい、また今後ftpサーバ上で公開することも可能である、オーストラリアCSIROは、公式な手続きを経た後に世界に展開している9地点のデータを提供できる、との回答を得た。フランスLSCEはRAMCESと名付けて世界に展開している地上および航空機観測からデータを提供する、ドイツMax-Planckはロシアなどで行っている地上・航空機観測のデータを提供する、と回答してきたが、いずれの機関からもヨーロッパにおけるデータの公開は一般的に遅いのが現状であり、今後早期に提供するように努力することであった。

今回の調査から、多くの機関は予備解析データの提供に協力的であることが判明したが、確実にデータを入手するためには、必要なデータを具体的に示して公的な手続きを早期に開始することが重要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、GOSAT 衛星によって観測される CO₂ カラム濃度データと地上観測や航空機観測からの濃度データを合わせ用いて、全球大気輸送モデルで解析することによって CO₂ フラックスの時間空間変動を推定するために必要な諸課題について検討を行った。これまでの同様な手法による CO₂ フラックスの推定では、主にベースライン条件での地上観測データが用いられており、衛星観測を想定した研究は限られている。そこで、本研究では GOSAT 衛星を念頭に置き、様々な視点から検討を行った。GOSAT 衛星による観測の空間分解能は 30 km 程度と考えられるが、既存の大気輸送モデルの格子間隔はこれよりもはるかに大きく、現状のモデルでは、京都議定書に謳われている CO₂ の国別放出削減など、空間的に狭い現象の監視のために衛星データを有効に利用することができない。本研究では従来の 2.5°×2.5°の水平分解能を 0.125°×0.125°までに向上させ、時間ステップも最小で 150 秒の計算を可能とし、極めて高解像度化したモデルを開発し、実際に CO₂ 濃度の時間変動や水平分布のコントラストをより現実的に表現できることを示した。また、現在 CO₂ フラックスの逆解法において広く用いられている全球大気輸送モデルについて、陸域と海域における観測サイトからのデータセットを解析することによって、特に鉛直輸送の表現に不備があることを示し、衛星データの解析に用いるためにはモデルの改良が必要であることを明らかにした。

衛星データと地上観測データを同時に用いた場合、データ間のバイアスに起因する CO₂ フラックスの推定誤差について配慮が必要であり、本研究では詳細なシミュレーションを行うことによって観測に際して配慮すべき指針を与えた。また、衛星観測データは日中の晴天域のデータしか取得できないので CO₂ 濃度に偏りを生ずる、低気圧付近で大気の鉛直運動に起因する濃度変化が起こる、といったこともあり、測定点によってはその影響は大きいと考えられる。これらのバイアスをモデルに取り組みするために、連続観測データからのバイアス量の推定や、次世代の雲改造モデルの利用などを通してさらに検討を進める必要があることを本研究によって確認した。さらに、本研究で開発に着手した逐次的逆解法によって、観測データからより現実的な CO₂ フラック

スを効率良く推定できることを示した。

アジョイント演算子を用いて地表面でのCO₂フラックスを直接推定する手法は、作成した演算子の適用時間が一ヶ月に制限されているために断定的な結果を得るに至らなかったが、CO₂の発生と吸収に関して極めて興味深い結果を示した。また、本研究で作成した4次元データ同化システムはCO₂濃度に特化した簡便かつ効率的なシステムであるが、衛星観測によるCO₂カラム濃度のみならず、定期航空機を用いたCO₂濃度の三次元観測などにも適用できる能力を有していることも大きな意義がある。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究の成果は、「GOSATサイエンスチーム」会合において随時発表され、衛星軌道・回帰周期や観測時間・場所、カラム濃度導出など、GOSAT衛星によるCO₂観測における重要な要素の決定に大きな貢献をした。また、今後利用すべき衛星データの解析法とその開発に指針を与えた。更に、本研究の副次的な効果として、本研究で得られた手法や知見は逆解法によるCO₂フラックスの時間空間変動の推定の高度化に直接役立つので、ここで研究開発された手法を応用することにより、京都議定書に基づくCO₂排出削減の検証などに貢献することが期待される。

6. 引用文献

- 1) D. Baker, Sources and sinks of atmospheric CO₂ estimated from batch least-squares inversion of CO₂ concentration measurements, Ph.D. thesis, Princeton Univ., Princeton, N. J., USA, 2001.
- 2) D. Baker, R. M. Law, K. R. Gurney, A. S. Denning, P. J. Rayner, B. C. Pak, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y. -H. Chen, P. Ciais, I. Y. Fung, M. Heimann, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, K. Masarie, M. Prather, B. Pak, S. Taguchi and Z. Zhu, Transcom3 inversion intercomparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Global Biogeochem. Cycles*, **20**, GB 1002, doi:10.1029/2004GB002439, 2006.
- 3) L. Bruhwiler, A. M. Michalak, W. Peters, D. Baker and P. P. Tans, An improved Kalman filter for atmospheric inversions, *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, **5**, 1891–1923, 2005.
- 4) CIESIN, Center for International Earth Science Information Network, Gridded population of the world, version 2. Available at <http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw>, 2000.
- 5) I. G. Enting, C. M. Trudinger and R. J. Francey, A synthesis inversion of the concentration and d13C of atmospheric CO₂, *Tellus*, **47B**, 35–52, 1995.
- 6) G. Giering and T. Kaminski, Recipes for adjoint code construction, *ACM Transactions on mathematical software*, **24**, 437-474, 1998.
- 7) Global Monitoring and Diagnostic Laboratory, Cooperative Atmospheric Data Integration Project-Carbon Dioxide [CD-ROM], Natl. Oceanic and Atmos. Admi., Boulder Colo. (Available at <ftp.cmdl.noaa.gov>), 2004.
- 8) K. R. Gurney, 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, E. Kowalczyk, T. Maki, S. Maksyutov, P. Peylin, M. Prather, B. C. Pak, J. Sarmiento, S. Taguchi, T. Takahashi, C-W. Yuen, Transcom 3 CO₂ inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information, *Tellus*, **B 55** (2), 555–579, 2003.

- 9) D. Hartley and R. Prinn, Feasibility of determining surface emissions of trace gases using an inverse method in a three-dimensional chemical transport model, *J. Geophys. Res.*, **98**(D3), 5183–5198, 1993.
- 10) S. Houweling, F.-M. Breon, I. Aben, C. Rödenbeck, M. Gloor, M. Heimann and P. Ciais, Inverse modeling of CO₂ sources and sinks using satellite data: a synthetic inter-comparison of measurement techniques and their performance as a function of space and time, *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 523-538, 2004.
- 11) R. Law, W. Peters and C. Rodenbeck, Transcom continuous experiment protocol, *available from authors*, 2005.
- 12) S. Maksyutov and G. Inoue, Vertical profiles of radon and CO₂ simulated by the global atmospheric transport model, CGER supercomputer activity report, *CGER/NIEAS-1039-2000*, **7**, 39-41, 2000.
- 13) S. Maksyutov, P. K. Patra and G. Inoue, Pseudo-data inversion of column-CO₂ observations by remote sensing using a high resolution inverse model, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV, Part. 7/W14, Paper No. J-2, 2003.
- 14) G. Marland, T. A. Boden and R. J. Andres, Global, regional, and national fossil fuel CO₂ emissions, In Trends: A compendium of data on global change, Carbon Dioxide Information Analysis Center, ORNL, Oak Ridge, USA, 2003.
- 15) S. C. Olsen and J. T. Randerson, Differences between surface and column atmospheric CO₂ and implications for carbon research, *J. Geophys. Res.*, **109**, D02301, doi:10.1029/2003JD003968, 2004.
- 16) B. C. Pak and M. J. Prather, CO₂ source inversions using satellite observations of the upper troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, **28**(24), 4571-4574, 2001.
- 17) P. K. Patra, S. Maksyutov, Y. Sasano, H. Nakajima, G. Inoue and T. Nakazawa, An evaluation of CO₂ observations with Solar Occultation FTS for Inclined-Orbit Satellite sensor for surface source inversion, *J. Geophys. Res.*, **108**(D24), 4759, 2003.
- 18) P. K. Patra, 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.
- 19) P. Peylin, P. Rayner, P. Bousquet, C. Carouge, F. Hourdin, P. Heinrich, and P. Ciais, Daily CO₂ flux estimates over Europe from continuous atmospheric measurements: 1: Inverse methodology, *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, **5**, 1647– 1678, 2005.
- 20) J. T. Randerson, M. V. Thompson, T. J. Conway, I. Y. Fung and C. B. Field, The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide, *Global Biogeochem. Cycle*, **11**, 535-560, 1997.
- 21) P. J. Rayner, I. Enting, R. Francey, and R. Langenfelds, Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, δ¹³C and O₂/N₂ observations, *Tellus*, **51B**, 213-232, 1999.

- 22) P. J. Rayner and D. M. O'Brien, The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions, *Geophys. Res. Lett.*, **28**(1), 175-178, 2001.
- 23) P. J. Rayner, R. M. Law, D. M. O'Brien, T. M. Butler and A. C. Dilley, Global observations of the carbon budget: 3. Initial assessment of the impact of satellite orbit, scan geometry, and cloud on measuring CO₂ from space, *J. Geophys. Res.*, **107**(D21), 4557, doi:10.1029/2001JD000618, 2002.
- 24) A. Richter and J. P. Burrows, Tropospheric NO₂ from GOME measurements, *Adv. Space Res.*, **29**, 1273-1683, 2002.
- 25) C. Rodenbeck, S. Houweling, M. Gloor and M. Heimann, CO₂ flux history 1982– 2001 inferred from atmospheric data using a global inversion of atmospheric transport, *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 1919–1964, 2003.
- 26) T. Takahashi, S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson and Y. Nojiri, Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects, *Deep-Sea Res. II*, **49**, 1601-1623, 2002.
- 27) A. Yaremchuk, M. Yaremchuk, J. Schroter and M. Losch, Local stability and estimation of uncertainty for solutions to inverse problems, *Ocean Dynamics*, **52**, 71–78, 2001.

7. 国際共同研究等の状況

大気輸送モデル相互比較の国際共同研究であるTransCom（全球モデル相互比較実験）に、本研究の分担メンバーであるS. MaksyutovやP. Patra、田口彰一が、P. Cias（LSCE, フランス）、R. Law（CSIRO, 豪州）、S. Houweling（SRON, オランダ）、M. Heimann（MPI/Jena, ドイツ）等とともに参加し、フォーワード法によるCO₂濃度の計算値と地上連続観測の結果との比較を行った（Baker et al. (2006)を参照のこと）。その結果、我々のモデルは濃度の日変化や季節変化をかなり良く表現することが証明された。また、上層大気に関するシミュレーションについてもP. Raynerグループ（LSCE, フランス）が準備したプロトコルに従って実施するとともに、TransCom Satellite Experiment Protocolを国際共同研究として作成すべく、P. Peylin（LSCE, フランス）とS. Houweling（SRON, オランダ）と協議し、出力データの収集を現在進行させている。連続観測CO₂データを逆解法に取り込む方法に付いてもTransComの枠組みでの研究協力を行ってきた。さらに、WMOが企画したCO₂標準ガスの国際相互比較を実施した。この計画には、米国NOAA/CMDL（現NOAA/ESRL/GRD）や豪州CSIROなど、温室効果気体を観測している世界の代表的機関が参加し、使用している標準ガスや計測技術の相互比較を行い、それぞれの機関のCO₂濃度データの差異を明らかにすることを目的としており、同一基準による国際的データベースの作成に不可欠な情報となる。なお、国立環境研究所、東北大学およびCSIROの間では、CO₂濃度計測法のさらに詳細な相互比較を実施し、それぞれの機関の濃度データの相互利用を可能にした。アジョイント演算子の作成を依頼したドイツのFast Opt社とは引き続き連絡を取り、最終論文の作成に向けて協力関係を維持している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

- 1) K. R. Gurney, A. S. 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 and Transcom 3 inversion intercomparison, Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Global Biogeochem. Cycles*, **18**, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111, 2004.
- 2) D. F. Baker, D. F., R. M. Law, K. R. Gurney, P. Rayner, P. Peyline, A. S. Denning, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y. -H. Chen, P. Ciais, I. Y. Fung, M. Heimann, J. Joh, T. Maki, S. Maksyutov, K. Masarie, M. Prather, B. Pak, S. Taguchi and Z. Zhu, TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1988-2003, *Global Biogeochemical Cycles*, **20**, GB1002. doi:10.1029/2004GB002439, 2005.
- 3) P. K. Patra, S. Maksyutov and T. Nakazawa, Analysis of atmospheric CO₂ growth rates at Mauna Loa using interannual fluxes from an inversion model, *Tellus*, **B57**, 357-365, 2005.
- 4) P. K. Patra, S. Maksyutov, M. Ishizawa, T. Nakazawa, T. Takahashi and J. Ukita, Interannual and decadal changes in the sea-air CO₂ flux from atmospheric CO₂ inverse modelling, *Global Biogeochemical Cycle*, **19**, GB4013, doi:10.1029/2004GB002257, 2005.
- 5) P. K. Patra, S. Maksyutov, M. Ishizawa, T. Nakazawa and G. Inoue, Effects of biomass burning and meteorological conditions on land-atmosphere CO₂ flux from atmospheric CO₂ inverse modeling, *Global Biogeochemical Cycle*, **19**, GB3005, doi:10.1029/2004GB002258, 2005.
- 6) P. K. Patra, K. R. Gurney, A. S. Denning, S. Maksyutov, T. Nakazawa, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y.-H. Chen, P. Ciais, S. Fan, I. Fung, M. Gloor, M. Heimann, K. Higuchi, J. John, R. M. Law, T. Maki, B. C. Pak, P. Peylin, M. Prather, P. J. Rayner, J. Sarmiento, S. Taguchi, T. Takahashi, and C.-W. Yuen, Sensitivity of inverse estimation of annual mean CO₂ sources and sinks to ocean-only sites versus all-sites observational networks, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L05814, doi:10.1029/2005GL025403, 2006.

〈その他誌上発表（査読なし）〉

- 1) 井上元, GOSAT 検証観測候補地としてのワリグアン観測所訪問記, 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターニュース, Vol.15, No.7, 2004年10月, pp11-12.
- 2) 井上元, GOSAT プロジェクト: 新しい段階に移行, 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターニュース, Vol.16, No.1, 2005年4月, pp16-17.
- 3) 井上元, 地球環境研究センターの GOSAT プロジェクト, 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターニュース, Vol.16, No.5, 2005年9月, pp17.
- 4) 井上元, 宇宙から見る炭素 (Carbon from Space) シンポジウムに参加して, 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターニュース, Vol.16, No.6, 2005年10月, pp2-4.
- 5) S. Maksyutov, R. Onishi, N. Manish, A. Yaremchuk, P. K. Patra and G. Inoue, Atmospheric CO₂ simulations with a high resolution model and synoptic scale variability of CO₂ column,

CGER supercomputer activity report, CGER-I070-2007, vol.14-2005, 49-54, 2007.

(3) 口頭発表 (学会)

- 1) 田口彰一, 大気の輸送の年々変動が二酸化炭素収支の逆問題解に及ぼす影響, 日本気象学会2004年度春季大会, 2004年5月.
- 2) 石澤みさ, Shamil Maksyutov, 中澤高清, 青木周司, 輸送モデルによる日本上空CO₂濃度変動のシミュレーション, 日本気象学会2004年度春季大会, 2004年5月.
- 3) 石澤みさ, Shamil Maksyutov, 中澤高清, 青木周司, 日本上空CO₂濃度の経年変動の数値シミュレーション, 第10回大気化学討論会, 2004年6月.
- 4) S. Maksyutov and M. Ishizawa, CO₂ variability simulated with daily fluxes, TransCom Workshop, Tsukuba, June 2004.
- 5) S. Maksyutov, Combining observations and modeling to estimate carbon balance of Siberia, Russian-Japanese-German-French workshop on quantifying and understanding the carbon balance of Siberian ecosystems, 2004.
- 6) P. K. Patra, S. Maksyutov, M. Ishizawa, and T. Nakazawa, Study of interannual variability in CO₂ fluxes using inverse modeling of atmospheric CO₂ observations, 8th International Global Atmospheric Chemistry Conference, Christchurch, New Zealand, September 2004.
- 7) S. Maksyutov, M. Ishizawa and G. Inoue, Synoptic scale variability of atmospheric CO₂ in continental boundary layer: model and observations, スーパーコンピュータによる地球環境研究発表会, 筑波, 2004年10月.
- 8) S. Maksyutov, T. Machida, M. Ishizawa, S. Venevsky and G. Inoue, Synoptic scale variations of atmospheric CO₂ over Siberia: modeling and observations, 6th APGC Symposium, Tsukuba, October 2004.
- 9) S. Maksyutov, T. Machida, M. Ishizawa, S. Venevsky and G. Inoue, Modeling and observations of atmospheric CO₂ in PBL over Siberia, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2004.
- 10) P. K. Patra, S. Maksyutov, T. Nakazawa, T. Yokota and G. Inoue, Estimation of regional CO₂ fluxes, interannual flux variability and future scopes, AGU Chapman Conference on The Science and Technology of Carbon Sequestration, San Diego, USA, January 2005.
- 11) P. K. Patra, S. Maksyutov, T. Nakazawa, T. Yokota and G. Inoue, On the use of satellite CO₂ observations in inverse modeling of its sources and sinks, 2nd International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Pasadena, USA, March 2005.
- 12) S. Maksyutov, P. K. Patra and S. Houweling, TransCom satellite experiment protocol, TransCom Meeting, Paris, June 2005.
- 13) P. K. Patra, K. R. Gurney and TransCom modellers, Sensitivity of inverse estimation of annual mean CO₂ sources and sinks to ocean versus land-dominated observational networks, TransCom Meeting, Paris, June 2005.
- 14) S. Taguchi, Data assimilation using an adjoint model, TransCom Meeting, Paris, June 2005.
- 15) M. Ishizawa, D. Chan, K. Higuchi and S. Maksyutov, Rectifier effect in an atmospheric model

- with daily biospheric fluxes, 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, September 2005.
- 16) S. Maksyutov, R. Onishi, G. Inoue, P. K. Patra and T. Nakazawa, Synoptic scale CO₂ variability simulated with global high resolution atmospheric transport model, 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, September 2005.
 - 17) P. K. Patra, K. Ishijima, T. Nakazawa, S. Maksyutov and T. Takahashi, Subcontinental scale source/sink inversion of atmospheric CO₂ and interannual variability in CO₂ growth rates, 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, September 2005.
 - 18) S. Venevsky, P. K. Patra, S. Maksyutov and G. Inoue, Interannual variability in terrestrial carbon exchange using an ecosystem-fire model and inverse model results, 7th Int. Carbon Dioxide Conf., Boulder, September 2005.
 - 19) P. K. Patra, K. Ishijima, T. Nakazawa and H. Akimoto, Effect aerosols on the Indian summer monsoon and oceanic biogeochemistry, 4th Asian Aerosol Conference, Mumbai, December 2005.
 - 20) M. Naja, A. S. Yaremchuk, R. Onishi, S. Maksyutov and G. Inoue, Relationship between synoptic scale weather systems and column averaged atmospheric CO₂, AGU Fall Meeting, December 2005.
 - 21) 田口彰一, 逆問題解法を用いたフラックスの推定, 大気化学の今後を考える会, 大気化学研究会, 豊川, 2006年1月.
 - 22) G. Inoue, T. Yokota, S. Maksyutov, Y. Oguma, I. Morino, A. Higurashi, Y. Aoki, Y. Yoshida, N. Eguchi, H. Suto, A. Kuze and T. Hamazaki, Global carbon dioxide and methane column observation by GOSAT (Greenhouse gases observing satellite), EGU General Assembly 2006, Vienna, April 2006.
 - 23) S. Maksyutov, GOSAT inverse modeling, 3rd International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Tsukuba, May 2006.
 - 24) S. Maksyutov, G. Inoue, T. Yokota, Y. Oguma, I. Morino, A. Higurashi, Y. Aoki, Y. Yoshida, N. Eguchi, H. Suto, A. Kuze and T. Hamazaki, Plans for operational GOSAT data analysis at NIES, Carbon Fusion-International Workshop on Data Assimilation in Terrestrial Carbon Cycle Science, Edinburg, May 2006.

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

TransCom Tsukuba, 産業総合技術研究所つくば中央, 2004年6月14~18日, 出席者40名.

炭素循環および温室効果ガス観測ワークショップ, メトロポリタンプラザ, 2005年11月10~11日, 出席者140名.

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし