

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

(6) インバース・フォワードモデルによる炭素吸収源分布の推定

環境省国立環境研究所

大気圏環境部大気物理研究室

地球環境研究センター

神沢 博・菅田 誠治

井上 元・Shamil Maksyutov*

*現在、地球フロンティア研究システム

京都大学理学研究科

木田 秀次・井口 敬雄

国土交通省気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部

佐藤 康雄・馬淵 和雄・佐々木秀孝・足立 万代

筑波大学生物科学系

鞠子 茂・及川 武久・伊藤 昭彦

平成11～12年度合計予算額 25,118 千円

(うち、平成12年度予算額 12,564 千円)

〔要旨〕大陸規模での二酸化炭素濃度観測データと気象データから、大気物質輸送モデルを用いて、炭素吸収源分布を推定する方法の開発を目指した研究を行った。3次元全球輸送モデルを開発して、二酸化炭素濃度分布のシミュレーションを行い、シミュレーション値を観測値と比較することにより全球規模での大気中二酸化炭素収支について検討を行った結果、北半球の植生が二酸化炭素の大きな吸収源になっている可能性が示唆された。別途開発した全球輸送モデルおよびインバースモデルをもって、TransCom (Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project) プロジェクトに参加し、インバース法による炭素放出吸収源の推定の不確定性の研究を行った。シベリアの航空機観測による二酸化炭素高度分布のデータが、亜寒帯アジアの吸収源強度の推定の不確定性を約 1/2 にすること、亜寒帯北アメリカの推定の不確定性も減少させることがわかった。東京-シドニー間の定期旅客機による上部対流圏での航空機観測は、地上からはるか離れている観測にもかかわらず、東南アジアの放出源推定へのインパクトがあった。日本列島周辺域を対象とした高分解能局地二酸化炭素循環モデルの水平分解能を 30 km から 60 km にすることによりアジアのほぼ全域を対象とし、1年間について連続積分を行い、大気と陸上生態系との二酸化炭素の交換を直接計算する、いわばフォワードモデルによる炭素吸収源分布の直接推定を試行した。このモデルによる推定がどの程度の精度を有するかについては、フラックス観測値、大気中二酸化炭素濃度観測値との比較による十分な検討が必要である。さらに、地球環境変動に対する生態系の炭素吸収能の応答を予測し、評価する手法を確立するために、陸域生態系モデルを用いて、相異なる気象データが生態系純生産の評価に及ぼす影響を調べた結果、定性的には類似した傾向を示すが、定量的にはかなり大きな違いを生じる事が分かった。

〔キーワード〕 炭素吸収源分布、炭素収支、大気物質輸送モデル、局地二酸化炭素循環モデル、生態系モデル

1. 序

化石燃料の消費や土地利用のための森林伐採など、人間活動によって大気中の二酸化炭素濃度は急激な上昇を続けている。このまま二酸化炭素濃度の上昇が続けばその放射強制力によって、地球温暖化など全球規模での気候の変動がもたらされるとして大きな関心を集めている。今後の大気中の二酸化炭素濃度の動向を予測するためには、その全球規模の収支を明らかにすることが必要である。

大気中に放出される二酸化炭素は、巨大な炭素の貯蔵庫である海洋・森林に吸収・蓄積され、その残りが大気に蓄積されてゆく。特に、森林については、二酸化炭素の吸収あるいは放出（以下、一部の例外を除いて、放出は負の吸収という考え方をし、両者に対し、吸収という言葉を使用する）の強度、吸収強度の分布などの定量的な評価はまだ出来ていない。その評価に際し、様々な手法を適用して各手法の結果を比較して、評価の信頼性を高めてゆく必要がある。そのためには、本研究課題の他のサブテーマ研究で行われているように、巨大な炭素の貯蔵庫である森林と大気との間における二酸化炭素交換のメカニズムの解明と定量的評価を行う手法、すなわち、地上での炭素貯留の推定、二酸化炭素フラックスの観測、航空機による炭素収支の地域特性の観測などの空間スケールの小さな観測を積み上げる手法も有効である。一方、本サブテーマで実施しているように、客観解析気象グリッドデータから、大気物質輸送モデルによって大気中の二酸化炭素濃度分布を再現するシミュレーションを行い、そのシミュレーション結果と観測された大陸規模での二酸化炭素分布データとを比較することにより、炭素吸収源分布を推定するインバース法の開発も有力な手法と考えられている。そのような考えのもとに、IGBP/GAIM のプロジェクトのひとつである TransCom (Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project) が実施されている。

2. 研究目的

3次元大気物質輸送モデルを用いて大気中の二酸化炭素の濃度分布を得、さらにその分布を大陸規模の観測データと比較検討することにより、炭素吸収源分布を推定する方法（インバースモデル）を確立することを究極の目的として念頭に置き、研究を行う。さらに、大陸規模の炭素吸収源分布推定のための最適観測システムを提案することも念頭に置く。具体的な研究内容は以下の通りである。積雲・境界層等の過程をも含む詳細な全球輸送モデルを開発して用い、二酸化炭素濃度分布を計算することにより、積雲・境界層等の各過程の導入や、空間解像度の違いが、二酸化炭素濃度分布計算にどのような影響を与えるかを調べ、さらに、特に注目する東アジア域の風上に位置するシベリア等における二酸化炭素濃度の観測が、各地域の吸収強度推定に与える影響の評価を全球インバースモデルを用いて行う。日本列島を含む東アジア域を対象とし、大気と陸上生態系間の二酸化炭素交換を植物生理学、植物生態学の知識に基づいて直接に計算する地表面植生水文モデルを領域気候モデルに組み込み、長時間積分することによって、大気と陸上生態系間の二酸化炭素交換を直接計算で求めるいわゆるフォワードモデルを開発し、それによって森林による二酸化炭素の吸収源の分布を直接推定するモデルの構築を目指す。陸域生態系モデルを用いて、全球地上気象データを外部パラメータとして大気—陸上生態系間の炭素収支を見積もる。

3. 方法

全球の3次元の二酸化炭素大気輸送モデルの開発に関しては、全体的に開発途上にあることから、我々のグループで2つの異なるモデルを開発し、知見を交換しあい、モデル開発の発展に寄与しようとしている。二酸化炭素の分布につき、モデル積分の結果と観測データを比較するフォワードモデル開発の一環として、二酸化炭素全球輸送モデルのモデル開発そのものに重点をおいた研究を行う(4.1節)。一方、別途既に開発済みの二酸化炭素全球輸送モデルを用いて、二酸化炭素濃度分布の観測から吸収源分布を推定するインバースモデルの研究を、TransCom プロジェクトに参加し、かつ、日本独自の二酸化炭素濃度観測データをプロジェクトの提供するデータに追加して行う(4.2節)。これらの全球輸送モデルでは、二酸化炭素を輸送する風等の気象データに関しては、気象観測データに基づく客観解析気象データをモデルへの入力データとして使用している。アジア域二酸化炭素吸収源分布を推定するフォワードモデルとして、計算対象領域(アジア域)内部において気象量はモデル自身で計算し、大気と陸上生態系との二酸化炭素交換を直接計算するスキームを含む地表面植生水文モデルを組み入れた、局地二酸化炭素循環モデルの開発を行う(4.3節)。また、全球の大気―陸上生態系の炭素収支分布の解析を行うため、全球客観解析気象データの地上観測値をモデルへの入力データとして使用する陸域生態系モデルによる研究を行う(4.4節)。

4. 結果・考察・成果

4.1 二酸化炭素全球輸送モデルの開発

(1) 概要

全球の3次元の二酸化炭素大気輸送モデルを開発する。客観解析気象データとCO₂収支シナリオに基づく地表面炭素フラックスデータをその輸送モデルへの入力値として、大気中二酸化炭素濃度分布のシミュレーションを行い、シミュレーションの結果を大気中の二酸化炭素濃度分布観測値と比較し、二酸化炭素収支シナリオについて検討を行う。

(2) モデルの概要

(a) 輸送スキーム

大気中におけるCO₂の分布をシミュレートするため、風などの気象データを外部パラメータとして与えてトレーサの輸送を計算する全球3次元大気輸送モデルを開発した。このモデルでは、輸送スキームとして、大気をグリッドボックスに分割して各ボックス内におけるCO₂の質量および濃度をデータとして保持し、隣り合うボックス間のCO₂フラックス量を計算して次のタイムステップにおけるCO₂量および濃度を計算するという独自に開発したスキームを用いている(図1)。このスキームには、モデル内のCO₂の総量が確実に保存されるという利点がある。また、鉛直風は最下層と最上層から計算していった途中の層で調整するようにし、極付近では東西方向に複数のグリッドボックスをひとまとめにして一つのボックスとして扱うなど、異常に強い鉛直風の計算や、計算不安定が起らないようにするための工夫を行っている。水平解像

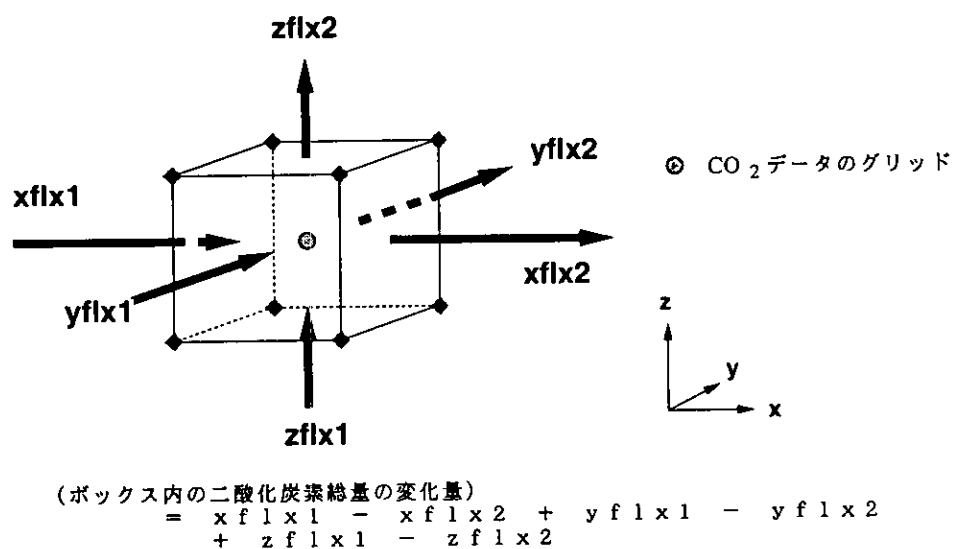


図1 輸送モデルにおける二酸化炭素濃度計算の基本スキーム

表1 炭素の年間収支 (GtC)

ホームページ (<http://www.giss.nasa.gov/data/co2fung/>) 掲載の Fung データと本研究によるその修正版。この表では、正の値は放出を意味し、負の値は吸収を意味する。

カテゴリー	北半球		南半球		南北両半球合計	
	Fung	修正	Fung	修正	Fung	修正
化石燃料	5.0	5.7	0.3	0.3	5.3	6.0
土地利用	0.18	0.6	0.12	0.4	0.3	1.0
海洋	0.3	-0.34	-2.9	-1.92	-2.6	-2.26
北大西洋中高緯度	(-0.56	-0.54)	(NA)		(-0.56	-0.54)
北大平洋中高緯度	(0.2	-0.15)	(NA)		(0.2	-0.15)
低緯度海洋	(0.66	0.35)	(0.13	-0.04)	(0.8	0.31)
南半球中高緯度海洋	(NA)		(-3.04	-1.88)	(-3.04	-1.88)
植生	0.0	-2.04	0.0	0.0	0.0	-2.04
大気中への蓄積	5.48	3.92	-2.48	-1.22	3.0	2.7

度は 2.5 度×2.5 度で、鉛直方向は σ 座標 ($\sigma = p/ps$; p = pressure, ps = surface pressure) で 14 層 (上端は 10 hPa) とした。

(b) 気象データ

輸送モデルに与える気象データは ECMWF/TOGA の客観解析気象データを用いた。このデータは水平解像度 2.5 度×2.5 度で輸送モデルの現仕様と同じであるが、グリッドの位置は異なる。また、鉛直方向には、地表面データおよび p 座標で 15 層、時間間隔は 12 時間毎 (00h, 12h) である。これを空間的・時間的に内挿してモデルに取り入れた。

(c) 地表面 CO₂ フラックスデータ

地表面における CO₂ フラックスデータとして、NASA/GISS の Fung が編集・作成したグリッドデータを用いた。このデータセットは、(i) 化石燃料の消費、(ii) 土地利用、(iii) 海洋、(iv) 植生の 4 つのカテゴリからの CO₂ フラックスデータで構成されており、(i) は Marland (1989)、(ii) は Houghton et al. (1987)、(iii) は Tans et al. (1990) および Broecker et al. (1986)、(iv) は Fung et al. (1987) の研究をもとに作成されている。表 1 に、このデータから求めた年間の二酸化炭素放出 (吸収) 量を示す。(iv) の植生からのフラックスについては、年間の合計が近似的に 0 になるように作られている。(i) と (ii) は 1 度×1 度、(iii) と (iv) は 4 度×5 度の水平解像度となっており、これを輸送モデルで使用する 2.5 度×2.5 度のデータに変換した。また、(i)、(ii) および (iii) は年間放出 (吸収) 量のデータとなっており、モデルでは時間方向にコンスタントなフラックスとして取り扱っている。一方、(iv) については月毎のフラックス値となっており、これをスプラインして 1 日毎にフラックスが変化するようにして、季節変化を扱った。日変化については、現在は取り入れていない。

(d) 初期状態

シミュレーションの初期状態となる CO₂ 濃度分布は、まず最下層の濃度については、WMO/WDCGG が収集した世界各地の観測データから 1990 年 1 月の月平均値を用いて内挿を行って設定した。つぎに上層の濃度については、1989 年の ECMWF/TOGA データと CO₂ フラックスデータを用いて予め 3 年分ほどモデルを走らせ、最下層の濃度と繋ぎ合わせている。また、全球平均濃度は、その後もう 1 年間モデルを走らせて得られた 1 年間の全球平均濃度が観測による推定値 (Conway et al., 1994) と等しくなるように決めてある。この初期状態 (1990 年 1 月 16 日の状態とする) から、1990 年の ECMWF/TOGA のデータおよび CO₂ フラックスデータを読み込み、1 年分の時間積分を行った。

(3) モデルによるシミュレーションの結果と考察

まず、CO₂ 濃度分布の年平均値について、Fung のデータをそのまま用いて行ったモデルシミュレーションの結果と観測値とを比較した。モデル結果では、CO₂ 濃度が観測値に比べて北半球で高く、南半球で低いという結果が出た。さらに月平均で見ると、北半球では特に春から夏にかけて観測に比べて高い濃度となった。このことから、モデルでは、植生による吸収が少なすぎることで、南半球の海洋の吸収が強すぎるものがうかがえる。次に、(i) 化石燃料、(ii) 土地利用、(iii) 海洋、(iv) 植生、の 4 つの放出源 (または吸収源) 別について、それぞれ単独にデータを与えてシミュレーションを行った。その結果、化石燃料のみを用いたシミュレーションでは、南北半球の CO₂ 濃度差は観測よりも小さく、観測される濃度差を実現するには、南半球における海洋の吸収が不可欠という結果が得られた。また、土地利用からの CO₂ 放出が南北半球の濃度差

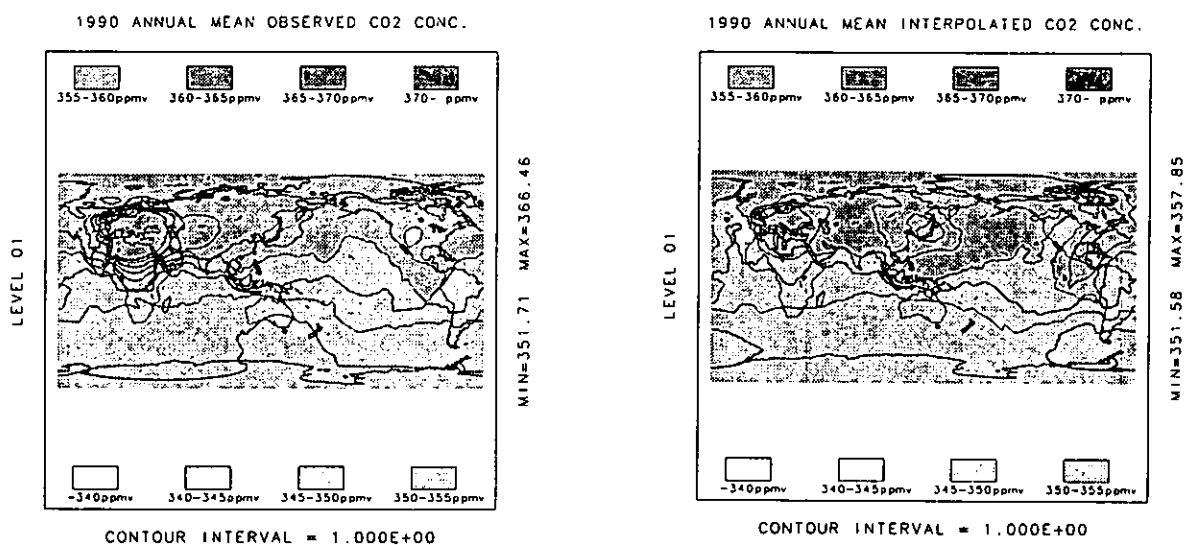


図2 二酸化炭素の年間平均濃度 (ppmv) の全球分布。1990 年の観測値 (左図) と表1の修正 Fung 年間収支データを用いた輸送モデルによるシミュレーション (右図)。右図は、シミュレーション結果から観測点の位置における計算値のみを取り出し、それからさらに内挿を行って求めた濃度分布である。

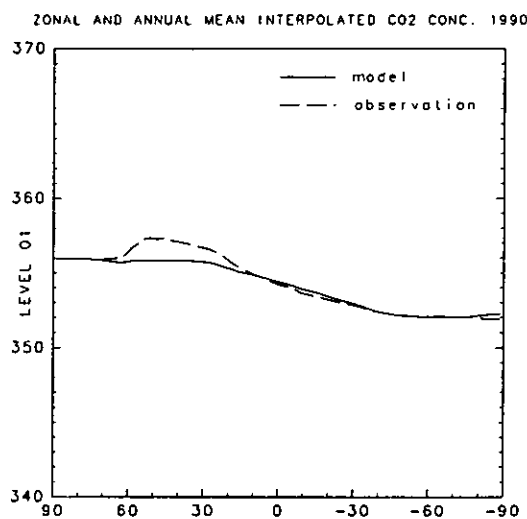


図3 年間・帯状平均された二酸化炭素濃度の緯度分布。修正 Fung 年間収支データを用いた計算結果。

に及ぼす影響は非常に小さく、植生からの放出については Fung のデータは季節変動の振幅が大きすぎるという結果が出た。

以上の結果に基づき、IPCC 第2次報告書 (IPCC, 1996) も参考にしながら、Fung のデータに変更を加えていくつかの収支シナリオを作り、それに基づいてシミュレーションを行った。その中から南北の濃度傾度が最も観測値に近かったものについて、その修正収支シナリオを元の Fung のシナリオとともに、表1に示す。図2に、その修正収支シナリオデータを与えたシミュレーション結果の年間平均水平濃度分布を観測分布とともに示す。図3に、図2の濃度をさらに経度方向に平均した値の緯度分布を示す。なお、図2でヨーロッパ付近の濃度が観測とモデルとで大きく異なるが、これはモデルの最下層の厚さを境界層程度 (約 1.4 km) にしているため、CO₂ フラックスが強い地域においては、現実に存在する大きな鉛直濃度傾度をモデルで再現できなかったことが原因と考えられる。また、図3で、赤道付近においてモデル値が必ず観測値よりも高くなってしまいが、これは、このモデルにおいては、積雲対流による CO₂ の鉛直輸送を考慮していないことが原因と考えられる。こうした境界層内におけるサブグリッドスケールの鉛直混合効果を適切にモデルに取り入れることは、今後の課題である。また、今回は、主に年間・帯状平均された濃度の南北分布に重点を置いて調べたが、2次元の水平濃度分布からも、北太平洋北部は吸収源である (Fung のデータでは CO₂ 放出源となっている) 可能性が高いと思われる結果が得られた。

本研究の結果、北半球の植生が CO₂ の大きな吸収源になっている可能性が示唆され、その他にも Fung の CO₂ 収支データに関する幾つかの修正点が見つかった。今後の目標は、輸送モデルに、植生モデルや大気大循環モデル (GCM) を結合させたモデルへと発展させ、大気-生態系間の相互作用を取り入れた炭素循環の数値シミュレーションを実現することである。

4.2 全球インバースモデルによる吸収源強度分布の推定

(1) 背景

インバースモデルによる年平均二酸化炭素フラックスに関するこれまでの結果によれば、北半球の陸域は炭素の吸収源 (carbon sink) となっている (e.g., Tans et al., 1990)。インバースモデルによる陸域および海洋域をそれぞれ10ヶ程度の区域に分割し、その区域ごとの年平均炭素吸収源強度を求める試みがいくつか行われてきているが、それらの推定は、北アメリカやユーラシアのような区域で、モデルによるばらつきが大きい (e.g., Fang et al., 1998; Rayner et al., 1999; Bousquet et al., 2000)。そのばらつきの理由は、使用されている輸送モデル、インバースモデルに依存する。また、陸域での二酸化炭素のフラックスを評価するのが困難な理由は、対象とする区域の内部あるいは近接した場所での二酸化炭素観測が不足していることにもよる。観測データが存在する場合にも、炭素吸収源に観測場所が近いために、観測される濃度が、大きな日変化、季節変化を示すこと、さらに、乱流による境界層内の混合の度合いにより大きく変化することのため、観測データの代表性の問題を解決する必要がある。

我々は、開発した輸送モデルおよびインバースモデルをもって、TransCom (Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project) プロジェクトに参加し、インバース法による炭素吸収源の推定の不確定性の研究を行った。TransCom プロジェクトは、二酸化炭素分布観測データと全

球大気輸送モデルによるシミュレーションから、地上の炭素吸収源分布をインバース問題（逆問題）として計算する際、輸送モデルの欠点、二酸化炭素観測データの選定、インバージョンの方法、等に起因する不確定性を定量化し評価することを目的としたプロジェクトであり、世界中から約 15 の輸送モデルが参加している。本研究の特徴は、TransCom プロジェクトが供給している標準の二酸化炭素分布観測データ（地上観測データ）に加えて、国立環境研究所、東北大学、気象研究所、等の日本のグループによる地上ばかりでなく、気球、航空機による高度分布観測データを与えた時に、インバージョン結果へどのようなインパクトがあるかを調べた点である。

（２）輸送モデル

全球大気輸送モデルによって得られた CO₂ の鉛直分布の季節変化、および水平分布はいくつかのモデルの相互比較研究で報告されているように、モデルのデザインに大きく依存する。特に、乱流拡散および積雲対流による鉛直輸送のような物理過程は、CO₂ のように安定なトレーサの鉛直分布の変化に大きな影響を及ぼす。これらを勘案し、大気輸送モデルの開発を進めた。輸送スキームとしてのセミ・ラグランジュアン法 (Semi-Lagrangian Scheme) の導入、プラネタリー境界層 (PBL: Planetary Boundary Layer) の深さを季節変化させる手法の導入、Tiedtke (1989) による湿潤積雲対流パラメタリゼーションの導入を行った。いくつかのテストを CO₂ とラドンに対して適用し、観測データ及び TransCom プロジェクトに参加している他のモデルの結果と比較し、良好な結果を得た。CO₂ に対しては、湿潤積雲対流パラメタリゼーションの導入により全球平均の鉛直分布が改善された。このようなモデルの開発を踏まえ、TransCom プロジェクトに参加した。

（３）インバースモデル解析法

TransCom プロジェクトの標準的インバース法、すなわち、Bayesian synthesis inversion 法 (Rayner et al., 1999) を使用した。また、14 の輸送モデルの結果をインバージョンに使用した。輸送モデルにより、季節変化する全球平均二酸化炭素フラックス（化石燃料燃焼、陸域生物圏、海洋域）に対する大気中の年平均二酸化炭素濃度を求める。また、地域的な炭素吸収源分布を推定するため、全球を 22 の区域（陸 11 区域、海 11 区域）に分けた解析も行う。

（４）採用した観測値とデータ処理

TransCom プロジェクトで現在進行中のインバージョン計画 Transcom-3 (e.g., Gurney et al., 2001) で使用されている標準観測データセット (Globalview-CO₂, 2000) に、日本のグループの独自の観測データを追加して、インバージョン推定に対するインパクトを調べた。追加したデータを表 2 に示す。追加データの観測期間は、Transcom-3 の標準観測データセットの期間 (1992-1996) と一致しない。標準観測データセット期間の中途あるいはその後に観測データが得られるようになった観測拠点もある。また、西シベリアの Surgut のように、期間を長くとした (1993-1998) のは、その間データが得られていること、また、航空機サンプリングの頻度が月 1 回程度であることに起因する日々の変動による誤差を、データを重ねることによって小さくするためである。期間の異なるデータを融合して使用するため、南極点での地上二酸化炭素濃度のトレンド (1991-1998) をそれぞれのデータから最初に引き去り、その引き去ったデータから平均的な季節変化と年平均を求め、最後に南極点でのトレンドを足し合わせる手法をとった。年々変動の大きさは、追加データの低頻度に由来するノイズより小さいと仮定した。また、標準観測データセットと追加データとでキャリブレーション用の標準ガスが異なっていることによる誤差は、観測の

表2 インバージョン解析に追加した日本グループによる観測データリスト

Maksyutov et al. (2001) より引用

site	period	type	altitude	analysis	reference
Surgut, 61N 73E	93-98	troposphere	0.5 km – 7 km	flasks	Machida et al., 2001
Yakutsk, 62N 129E	96-98	troposphere	1 km – 5 km	flasks	"
Novosibirsk, 55N 82E	97-98	troposphere	0.5 km – 7 km	flasks	"
Yakutsk tower, 62N 129E	93-98	surface	77 m AGL	GC	Fedoseev et al., 2001
Hateruma, 24N 123E	94-98	surface	10 m ASL	NDIR	Mukai et al., 2001
Cape Ohchi-ishi, 43N 145E	96-98	surface	49 m ASL	NDIR	"
Sendai, 37N 140E	92-98	troposphere	0.5 km – 9 km	flasks	Nakazawa et al., 2001
Tokyo-Sydney 36N-34S	93-96	troposphere	12 km	flasks	Matsueda et al., 1996

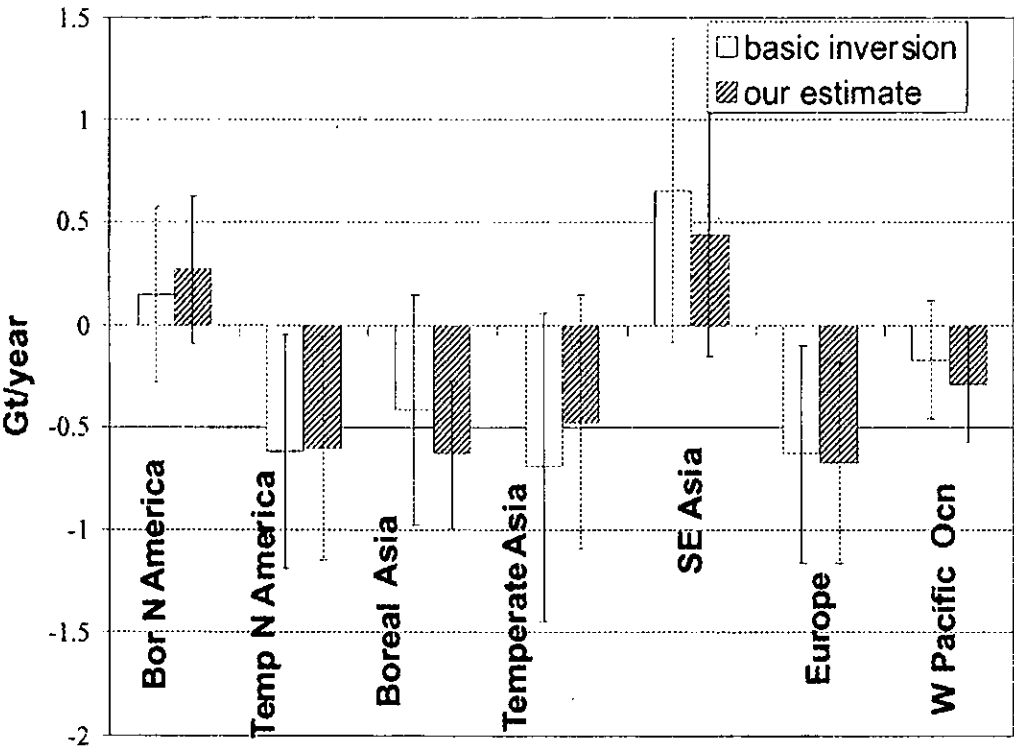


図4 インバージョンモデルによる1年あたりの二酸化炭素フラックスの値（単位：GtC/year = PgC/year）。Maksyutov et al. (2001) より引用。表2の追加データを加えない標準観測データセットのみを用いた場合 (basic inversion) と追加データ（ただし、Yakutsk tower データを除く）を加えた場合 (our estimate) に分けてある。負（正）の値は、陸域が吸収（放出）源になっていることを示す。エラーバーはインバースモデル推定の不確定度を示す。海洋フラックスは、Takahashi et al. (1999) を採用。

不確定性の程度より十分小さい。

(5) インバージョン結果と考察

図4に、インバージョン結果による1年あたりの二酸化炭素フラックスの値を示す。追加データを加えない標準観測データセットのみを用いた場合 (basic inversion) と追加データとを加えた場合 (our estimate) に分けてある。負(正)の値は、陸域が、吸収(放出)源になっていることを示す。世界の陸域を11に分割した区域のうち、追加データのインパクトがあったアジア域およびその他の合計7つの区域について示す。追加データの最も大きなインパクトは、亜寒帯アジア (Boreal Asia) で見られる。そこでは、シベリアの航空機観測データの追加によって、吸収量の不確定性がほぼ半分に減った (0.56 から 0.33 Gt/year へ)。また、吸収量が約 0.2 Gt/year 増えた。西シベリア Surgut の航空機観測データには年々変動があり、その年々変動が大気輸送の変動とそこでの生態系の変動のどちらによるのか不明であり、Surgut の航空機観測がカバーするデータの期間 (1993-1998) が、標準観測データセットの期間 (1992-1996) と異なることに起因するインバージョン推定結果の不確定性が大きい可能性があることに注意する必要がある。なお、同データの追加によって、亜寒帯北アメリカ (Boreal North America) でも不確定性が減少している。シベリアにおいて、Surgut に続いて、Novosibirsk および Yakutsk で観測を始めたが、これらの観測を継続して積み上げてゆく価値は高い。

日本の地上および航空機観測の温帯アジア (Temperate Asia) のインバージョン結果に対するインパクトは小さかった。標準観測データセットの中に既に中国、韓国、モンゴル、日本の観測データが登録されているからである。東京-シドニー間の定期旅客機による航空機観測は、東南アジアの放出源に対する拘束力があつた。高度 12 km という地上から遠く離れた高度での観測が、地上でのフラックスにインパクトを与え、かつ、インバース推定の不確定性を小さくするという結果は興味深い。この結果は、人工衛星での熱帯対流圏上部の二酸化炭素観測が、炭素吸収源のインバースモデルによる推定に有用なデータを与える可能性があることを示唆する。

4.3 局地二酸化炭素循環モデルによるアジア域二酸化炭素吸収源分布の推定

(1) 概要

大気と陸上生態系との二酸化炭素交換を直接計算するスキームを含む地表面植生水文モデル (BAIM: Biosphere-Atmosphere Interaction Model) を組み込んだ気象研究所局地二酸化炭素循環モデル (Mabuchi et al., 1997; Mabuchi et al., 2000) の性能チェックを行い、地表面二酸化炭素フラックスを計算するモデルとして十分かどうかを検討する。さらに、そのモデルを、アジア域を対象として適用し、1年間の長時間連続積分を行って、アジア域の植生による年積算での二酸化炭素の吸収量の推定を試行し、その精度を検討する。このモデルでは、側面境界では、観測に基づく気象データを与えるが、計算対象領域においては、気象量(風、温度、等)はモデルで計算しており、その風で二酸化炭素は運ばれ、その温度で植生の活動がコントロールされる。上記に述べた全球大気輸送モデルでは、気象量については、観測に基づく気象データを使用する。空間スケールが異なることの他、その点で両者は異なっている。

(2) 結果・考察

モデルによるアジア域二酸化炭素吸収源分布の推定を行った。図5は計算に用いた 60 km 分解

2	落葉広葉樹＋草本
3	混合林＋草本
4	常緑針葉樹＋草本
6	草地
B	裸地
C	熱帯雨林
E	混合林
F	常緑針葉樹
G	落葉針葉樹
H	ツンドラ
J	半砂漠
K	砂漠

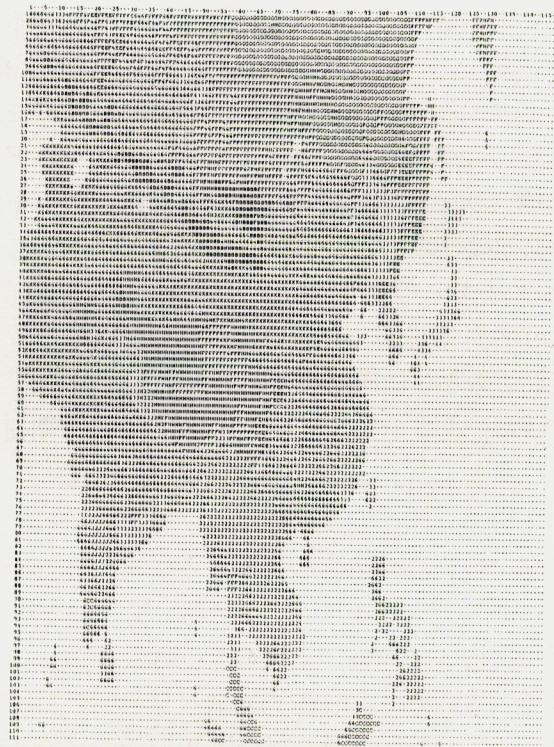


図5 局地二酸化炭素循環モデルの格子に配置された植生種類の分布図。各々の格子点の記号は、図の左の表で与えられる植生の種類を示す。

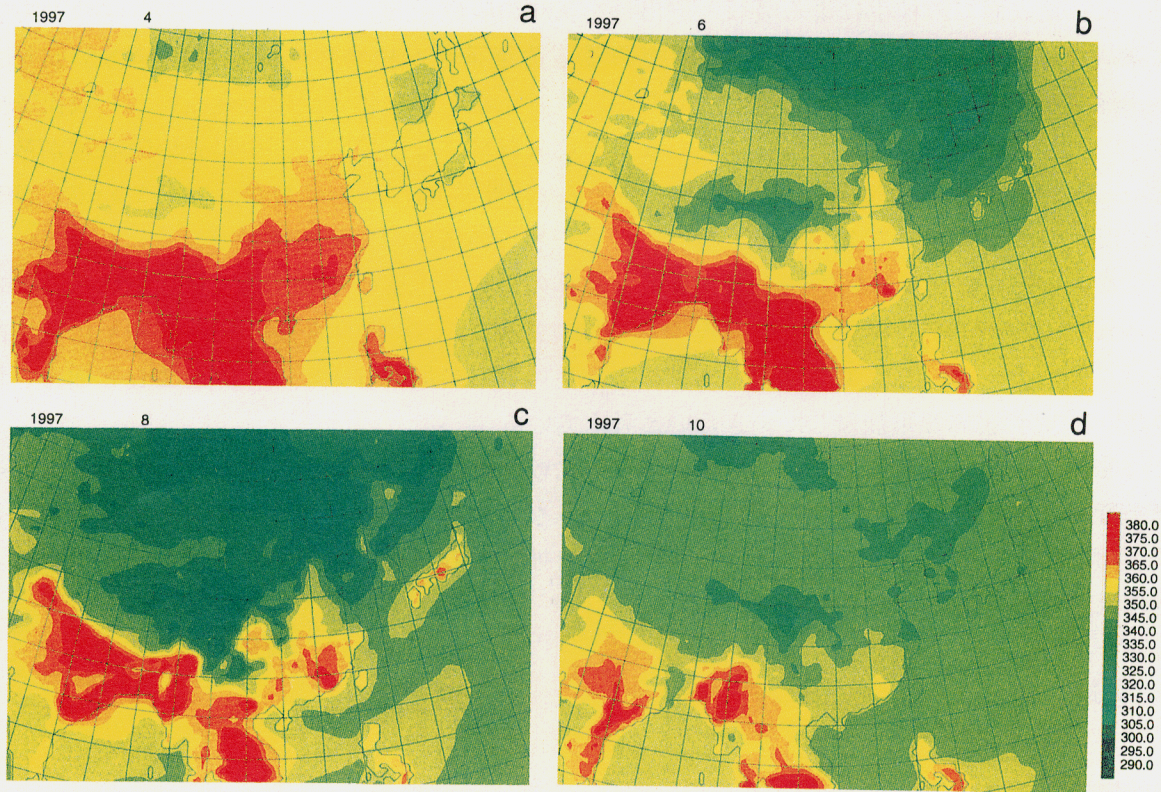


図6 局地二酸化炭素循環モデルで計算された地表面（1.5 m 高度）での 1997 年の月平均二酸化炭素濃度分布：単位は ppmv）。(a) 4 月、(b) 6 月、(c) 8 月、(d) 10 月。

能でのアジア域植生分布図である。これらの植生分布は2種類のデータセットから構成されている。日本列島域については環境庁による日本列島現存植生図、アジア大陸については Olson et al. (1983) のデータセットから 60 km 四方の分解能で優占する植生を与えた。サブグリッドスケールの植生分布は考慮していない。また、一旦グリッドでの植生が決定されるとその樹高、展葉期間等生態学的パラメータは固定され、地理的違い、季節変化の年による違い等は考慮されていない。計算の期間は 1997 年 3 月から 1998 年 9 月までの 19 ヶ月としたが、解析は、1997 年 3 月から 1998 年 2 月までの 1 年間について行った。側面境界条件として、気象条件については、NCEP/NCAR の再解析値の 1 日 2 回のデータを与え、二酸化炭素濃度については、観測値を参考にして高度によらない標準的季節変化を与えた。

図 6 は、植物の生育期間である 4 月から 10 月の期間のうち、4、6、8、10 の各月について、地上（正確には地上 1.5 m 高、すなわち植物群落中では植生の中）での月平均二酸化炭素濃度の分布図である。赤系統が濃度の高い所、緑系統が濃度の低い所である。6、8 月には、アジア大陸北部で、植物の光合成活動によると考えられる低濃度域がある。一方、インド西部からインドシナ半島域にかけても、4、6、8、10 月と季節進行に伴って、CO₂ 濃度は減少するが、この領域の高温に呼応して植物、土壌の呼吸作用が強く出ている結果、場所によっては、高濃度域になる傾向も少々みられる。日本列島域に注目すれば、8 月が相対的に高濃度になっているのも、8 月の高温による植物・土壌の呼吸作用が活発になるためと考えられる。このようなモデル計算結果と観測データとの詳細な照合を行い、モデルパラメータのチューニングを行う必要があると考えている。

図 7 は、地表面での植生による吸収・放出量を正味の吸収量とした表わしたもの、すなわち、生態系純生産量 (NEP)、の年平均分布図である。黄色系統が植物体の吸収域（植物が成長する）、緑が年平均で吸収も放出も無し（成熟林）、青系統が植物体と土壌を込みにした放出域である。アジア大陸の中・高緯度全般にわたって弱い吸収域になっており、中に強い吸収域が散布している。一方、亜熱帯域のインド東部、インドシナ半島域には放出域が分布している。NEP は、高温による土壌呼吸も含んでいるので、必ずしもこの領域の植物が年間で成長しないということの意味するわけではないが、高温による植物体の呼吸、土壌の呼吸が効き過ぎている結果と考えられる。このモデル結果を、フラックス観測、大気中 CO₂ 濃度変動の観測値等と比較検討していく事によって、モデルのパラメータをより良いものに取り替えていく等の改良を加え、精度の高い NEP の推定を可能にしていきたいと考えている。

フラックス観測値、大気中 CO₂ 観測値等との比較解析によってモデルパラメータのチューニングを行う必要があることがわかったが、そのような比較解析を通じてこの種のモデルを改良していけば、陸上生態系の NEP をある程度の精度で推定することは可能であろうと考えられる。今後の課題である。

4.4 陸域生態系モデルによる炭素収支の解析

(1) 概要

これまで開発してきた筑波大学陸域生態系モデル (Sim-CYCLE) を用い、緯度経度 0.5 度の高分解能での全球の大気—陸上生態系の炭素収支分布を、全球地上気象データを外部パラメータと

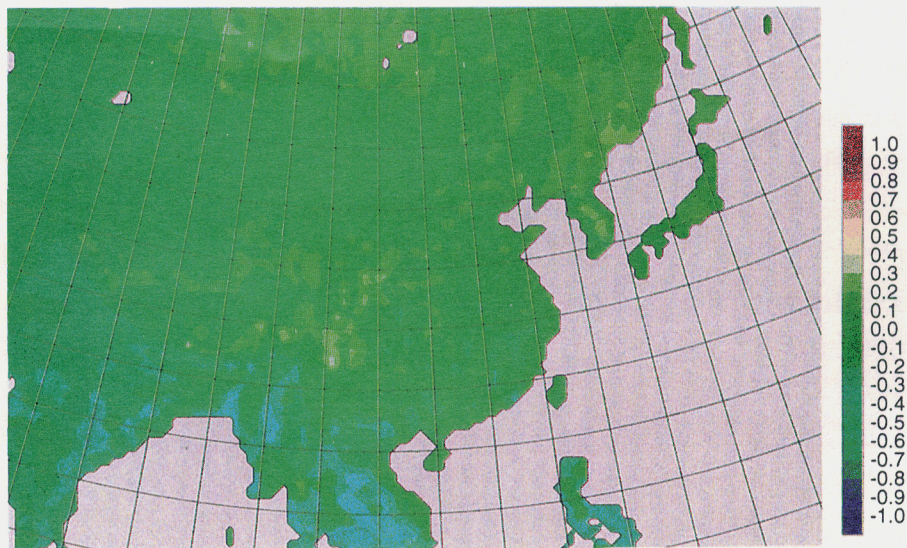


図7 局地二酸化炭素循環モデルで計算された陸上生態系による年平均 (1997.3~1998.2) 正味二酸化炭素吸収量 (NEP) の分布 (単位: $\text{CO}_2 \text{ mol/m}^2/\text{day}$)。大気から陸上生態系が二酸化炭素を吸収する向きが正。

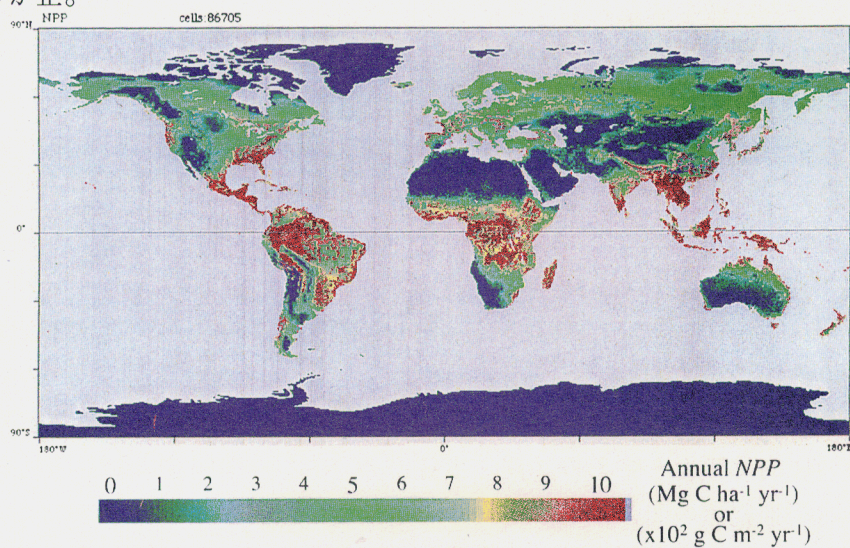


図8 陸上生態系モデルによって求められた陸上生態系の純一次生産力 (NPP) の分布。

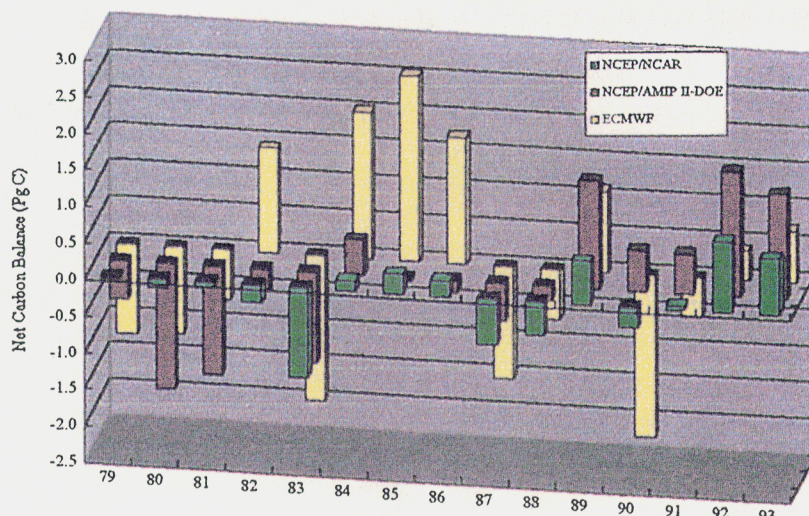


図9 陸上生態系モデルによって計算された3種類の異なった気象再解析データによる生態系純生産 (NEP) の年々変動 (単位: PgC)。横軸は年。

して与えて計算する。その際、複数の気象データによる炭素収支の違いを評価する。

(2) モデル開発

これまでに開発してきた陸域生態系モデルにおいて、緯度—経度 0.5 度グリッドの植生分布に加えて、光合成能力と炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) への分別効果が異なる C_3 植物と C_4 植物との区分を明示的に導入して、大気—陸域生態系間の CO_2 交換について高分解能 (緯度経度 0.5 度) の全球シミュレーションを行った。その結果、全陸域生態系の光合成生産量、いわゆる一次の総生産量 (GPP) は年間で 124 PgC (1 Pg = 1 Gt) と推定され、 C_4 植物の寄与分はそのうちの 18% と推定された。植物生産力の最も適切な指標である純一次生産力 (NPP; GPP から呼吸量を引いた値) は全球合計で 60.5 PgC/年となった。図 8 に、得られた NPP の地理分布を示した。 C_3 植物と C_4 植物の光合成に伴う分別効果は大気 CO_2 に対して平均でそれぞれ -20.2 ‰ と -2.5 ‰ と推定されたが、 C_4 植物はサバンナと呼ばれる亜熱帯域を中心とする草原に主に分布するために、陸域生態系による $\delta^{13}\text{C}$ への明らかな地域変化が生じていた。このような CO_2 と $\delta^{13}\text{C}$ の交換のモデル研究を、今後、一層推進することにより、以下について大きな進展が見込まれる: (i) 全球の炭素循環における陸域生態系の寄与を推定する; (ii) モデル結果を大気 CO_2 濃度・ $\delta^{13}\text{C}$ の観測結果と比較することで、NPP などの算出の推定精度を検証する。

(3) 陸域生態系炭素収支における経年変動のモデル解析

陸上生態系の炭素収支における年々変動は、これまでは毎月の米国 NCEP/NCAR-再解析気象データを用いて推定してきたが、この気象データは他の再解析気象データとは異なる点があることが指摘されていることから、モデル解析の気象データ依存性を検討する必要性が生じた。そこで、これまで使用してきた米国 NCEP/NCAR-再解析気象データに、新たに、米国 NCEP/AMIP-II DOE-再解析データと欧州 ECMWF-再解析データとを加え、これら 3 つの再解析気象データを用いて、1979~1993 年の 15 年間を対象に、陸上生態系の炭素収支、すなわち生態系純生産 (NEP) の年々変動を計算した。3 つの値を比較した結果を図 9 に示す。各再解析気象データは年々の気象変動の傾向は類似しており、陸域生態系の NEP の推定結果にも定性的には類似した傾向が見られたが、推定値の間にはかなり大きな定量的な差異が生じた。このように、モデル解析の気象データ依存性が示唆されたので、今後このような解析を行う場合は、入力気象データの不確定性を考慮しつつ解析結果を解釈する必要があることがわかった。また、大気大循環気候モデルによる将来の気候予測の気象データを生態系モデルに入力する場合にも、同様な注意が必要であることが明らかとなった。

4.5 その他

様々な時間スケールを含む大気運動の結果としての長期的全球トレーサー輸送を論じるため、時間の閾値を用いたラグランジュ的解析法 (全球的トレーサー輸送を記述する手法) の開発を行った。この新手法は数値的トレーサー実験において多数の軌跡を解析するのに役立つ。指定面を通過する大気粒子の運動を考え、通過の周期に着目し、与えた時間の閾値よりも長い周期を持つ通過だけを、その閾値よりも長い時間スケールで輸送に寄与する「有効な」フラックスであるとして選出する。この解析法で大気中のミキシングリージョン (mixing region) 間の境界を近似的に検出できる。有用性を確かめるために、大気大循環モデルの北半球冬の対流圏から下部成層圏

にかけての多数の粒子の軌跡に、この方法を適用した。2日より長い閾値に対して選られる有効な南北フラックスの緯度分布において、中緯度域は上部対流圏で極小を示す。このことは、CO₂を含むトレーサーの南北輸送が、冬季の中緯度の上部対流圏上部で妨げられていることを示唆しており、CO₂の輸送モデルの結果の解釈に有用な情報を与える。その他、炭素収支は気孔抵抗にも依存することから、植生と大気との間の二酸化炭素、水、熱の交換にとって大きな要素である植生の気孔抵抗につき、中国の北部の地域の冬小麦を対象に、1997年3月の衛星画像データと地上気象データを使い、推定を試みた。

5. 考察

炭素循環研究の中で、「1. 序」で述べたように、炭素吸収源分布を推定する方法としてここで紹介した方法、輸送モデルと二酸化炭素濃度観測データから推定する方法の試みが世界中で盛んになされ、我々のグループも参加している TransCom プロジェクトも行われている。世界的にみても未だ開発途上の方法ではあるが、地球規模で大づかみに炭素吸収源分布を推定する方法としては他に適当な方法が見当たらないことから、また、逆問題 (inverse problem) を解くという研究として魅力的な側面も含んでいることから、このような研究が進展している。また、この研究は、整合的・統合的な炭素大循環モデル研究の基礎ともなる。二酸化炭素の高度分布観測を行っている日本のグループとの連携をよりいっそう深めることにより、また、輸送モデルそのものの開発をよりいっそう進めることにより、今後も、この方法の発展に寄与できると考えている。

6. 参考文献

- Bousquet, P., P. Ciais, P. Peylin, M. Ramonet and P. Monfray (1999): Inverse modeling of annual atmospheric CO₂ sources and sinks 1. Method and control inversion, *J. Geophys. Res.*, 104, D21, 26161-26178.
- Broecker, W.S., et al. (1986): Isotopic versus micrometeorological ocean CO₂ fluxes: A serious conflict. *J. Geophys. Res.*, 91, 10517-10527.
- Conway, T.J. et al. (1994): Evidence for inter-annual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network. *J. Geophys. Res.*, 99, 22831-22855.
- Fedoseev, N., S. Maksyutov, T. Machida and G. Inoue (2001): Continuous observations of atmospheric carbon dioxide near Yakutsk, East Siberia in 1993-1998. Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, October 2001 (Extended Abstract submitted).
- Fan, S., M. Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmiento et al. (1998): A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models, *Science*, 280, 442-445.
- Fung, I. Y., C. J. Tucker and K. C. Prentice (1987): Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO₂. *J. Geophys. Res.*, 92, 2999-3015.
- Fung's data Home Page: <http://www.giss.nasa.gov/data/co2fung/>
- GLOBALVIEW-CO₂ (2000): Cooperative Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide, 2000. CD-ROM, NOAA CMDL, Boulder, Colorado.

- Gurney, K., S. Denning, R. Law, P. Rayner, D. Baker, et al. (2001): Overview of the atmospheric CO₂ inversion intercomparison project (TransCom). Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, October 2001 (Extended Abstract submitted).
- Houghton, R.A. et al. (1987): The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use: geographic distribution of the global flux. *Tellus*, 39B, 122-139.
- IPCC (1996): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. J.T. Houghton et al., Eds., Cambridge University Press, 572p.
- Mabuchi, K., Y. Sato, H. Kida, N. Saigusa and T. Oikawa (1997): A Biosphere-Atmosphere Interaction Model (BAIM) and its primary verifications using grassland data. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 47, 115-140.
- Mabuchi, K., Y. Sato and H. Kida (2000): Numerical study of the relationships between climate and the carbon dioxide cycle on a regional scale. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 78, No.1, 25-46.
- Machida, T., T. Nakazawa, S. Ishidoya, S. Maksyutov, Y. Tohjima, et al. (2001): Temporal and spatial Variations of atmospheric CO₂ mixing ratio over Siberia. Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, October 2001 (Extended Abstract submitted).
- Maksyutov S., T. Machida, T. Nakazawa, G. Inoue, H. Mukai, P.K. Patra and Transcom-3 modelers (2001): Asian CO₂ fluxes estimated using recent observations and transport model inversions. Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, October 2001 (Extended Abstract submitted).
- Marland, G. (1989): Fossil fuels CO₂ emissions: Three countries account for 50% in 1986. *CDIAC Communications* Winter 1989.
- Matsueda, M. and H. Inoue (1996): Measurements of the atmospheric CO₂ and CH₄ using a commercial airliner from 1993 to 1994. *Atmos. Environ.*, 30, 1647-1655.
- Mukai, H., M. Katsumoto, R. Ide, T. Machida, Y. Fujinuma, et al. (2001): Characterization of atmospheric CO₂ observed at two-background air monitoring stations (Hateruma and Ochi-ishi) in Japan. Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, October 2001 (Extended Abstract submitted).
- Nakazawa, T., S. Aoki, S. Sugawara, M. Ishizawa, S. Morimoto, et al. (2001): Variations in the concentration and carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan and their implication for the global carbon cycle. Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, October 2001 (Extended Abstract submitted).
- Olson, J.S., J. A. Watts and L. J. Allison (1983): *Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems*. ORNL-5862, Environmental Sciences Division Publication No. 1997, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Rayner, P.J., I.G. Enting, R.J. Francey, and R. Langenfelds (1999): Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, $\delta^{13}\text{C}$ and O₂/N₂ observations. *Tellus*, 51B, 213-232.
- Takahashi, T., R.H. Wanninkhof, R.A. Feely, R.F. Weiss, D.W. Chipmann, et al. (1999): Net sea-air flux over the global ocean: An improved estimate based on the sea-air pCO₂ difference. *Proc. 2nd International Symp., CO₂ in the oceans*, Ed. Y. Nojiri, Tsukuba, Japan, CGER-I037-'99, 9-14.
- Tans, P., I. Fung, and T. Takahashi (1990): Observational constraints on the global atmospheric carbon dioxide budget. *Science*, 247, 1431-1438.
- Tiedtke, M. (1989): A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 1779-1800.
- TransCom Home Page: <http://transcom.colostate.edu/>

[国際共同研究等の状況]

本研究は、国際協同研究 IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme: 地球圏-生物圏国際協同研究計画) の GAIM (Global Analysis, Integration (最近、元の Interpretation から変更) and Modelling: 地球変動の解析・統合・モデリング) の国内研究活動として位置づけて研究を行っている。また、IGBP/GAIM のプロジェクトのひとつである TransCom (Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project) にも参加している。

[研究成果の発表状況]

(1) 論文発表 (学術雑誌)

- 木田秀次・井口敬雄 (1999): 3次元輸送モデルを用いた大気中における CO₂ 収支の研究. 京都大学防災研究所年報, 第42号 B-1, 385-395.
- 木田秀次・井口敬雄 (2000): グローバル・モデルによる大気中 CO₂ 分布のシミュレーション. 京都大学防災研究所年報, 第43号 B-1, 237-247.
- Li, S.G., Y. Harazono, T. Oikawa, H.L. Zhao, Z.Y. He, and X.L. Chang (2000): Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorol.*, 102, 125-137.
- Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida (2000): Numerical study of the relationships between climate and the carbon dioxide cycle on a regional scale. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 78, No.1, 25-46.
- Maksyutov, S., and G. Inoue (2000): Vertical profiles of radon and CO₂ simulated by the global atmospheric transport model. CGER's Super Computer Activity Report, CGER-I039-2000, CGER, NIES, Japan, Vol. 7, 39-41.
- Maksyutov, S., and G. Inoue (2001): Modeling the global transport of atmospheric CO₂ with a Transcom 3 experimental protocol. CGER supercomputer activity report, CGER-I043-2000, CGER, NIES, Japan, Vol. 8, 37-38.
- Sato, Y., K. Mabuchi, H. Sasaki, and K. Adachi (2000): Development of local CO₂ circulation models and elucidation of role of land ecosystem. CGER's Super Computer Activity Report, CGER-I039-2000, CGER, NIES, Japan, Vol. 7, 44-48.
- Sugata, S. (2000): Time threshold diagnostics: A mixed Lagrangian-Eulerian method for describing global tracer transport. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 78, No. 3, 258-277.
- Zhang, J., Fu, C., and Kanzawa, H. (2001): Simulating stomatal conductance of winter wheat in agriculture ecosystem based on remote sensing information and micro-meteorological parameters. *J. Environ. Sci.*, in press.

(2) 口頭発表

- Iguchi, T. and H. Kida (1999): Some results from numerical simulations for CO₂ distribution and possible sinks using a global transport model. 2nd IGBP Congress, Shonan, Japan, May 1999. (Abstracts, 20-21)
- 井口敬雄・木田秀次 (2000): 輸送モデル-GCM 結合モデルを用いた大気中 CO₂ の輸送実験. 日本気象学会関西支部例会, 神戸, 2000年2月. (要旨集, 90号, 54-57)
- Inoue, G., S. Maksyutov, M. Sorokin, and O. Krasnov (2000): Fluxes of methane and CO₂ from wetland in West Siberia observed in 1999. Eighth Symposium on Joint Siberian Permafrost studies in 1999, NIES, Tsukuba, Japan, 19-20

January 2000.

伊藤昭彦・及川武久 (1999): 陸上生物圏モデルを用いた気候要素と炭素収支アノマリーの相関解析. 日本気象学会 1999 年春季大会, 東京, 1999 年 4 月.

伊藤昭彦・及川武久 (1999): 施業が林分の炭素収支に与える影響のシミュレーション. 日本林学会 110 回大会, 愛媛, 1999 年.

伊藤昭彦・及川武久 (2000): 森林生態系の炭素循環モデルによるシミュレーション. 日本林学会 111 回大会, 藤沢, 2000 年.

伊藤昭彦・及川武久 (2000): 陸上生態系モデルを用いた 1958-1998 年の炭素収支の解析: 1998 年最大負アノマリーの考察. 日本気象学会 2000 年春季大会, つくば, 2000 年 5 月.

Mabuchi, K. (2001): Verification of the climate features of a regional climate model with BAIM., International Workshop on Regional Climate Model Inter-comparison for Asia, Beijing, China.

Maksyutov, S., and G. Inoue (1999): Prospects for using atmospheric CO₂ observations for evaluation of the regional carbon budget. International Conf. on World Natural Forests and their Role in Global Processes, Khabarovsk, Russia, 15-20 August 1999.

Maksyutov, S., D. Fujita, T. Saeki, and T. Nakazawa (2000): Tracer transport model validation and model-simulated CO₂ cycle over continents. (Abstract: EOS Trans., 81, No. 48, AGU Fall Meet. Suppl., B21F-08)

Maksyutov, S., T. Nakazawa, T. Machida, G. Inoue, and H. Mukai (2001): Effects of some Asian surface and aircraft observations on CO₂ inversions. IGBP/GAIM Transcom-3 workshop, CSIRO, Mordialloc, Australia, 18-23 March 2001.

Maksyutov S., T. Machida, T. Nakazawa, G. Inoue, H. Mukai, P.K. Patra, and Transcom-3 modelers (2001): Asian CO₂ fluxes estimated using recent observations and transport model inversions. Sixth International Carbon Dioxide Conference, Sendai, October 2001 (Extended Abstract submitted).

Sato, Y. (2001): Numerical study of the relationships between climate and the carbon dioxide cycle on a regional scale., International Workshop on Regional Climate Model Inter-comparison for Asia, Beijing, China.

Zhang, J., Fu, C., and Kanzawa, H. (1999): Estimation of stomatal conductance for winter wheat in Ecosystem based on remote sensing information and micro-meteorological parameters. 日本気象学会 1999 年度秋季大会, 福岡, 1999 年 11 月.

Zhang, J., Emori, S., and Kanzawa, H. (2000): Global analysis of LAI sensitivity to precipitation and surface air temperature variations. 日本気象学会 2000 年度秋季大会, 京都, 2000 年 10 月.

Zhang, J., Kanzawa, H., Emori, S., and Fu, C., (2001): The interaction between climate and ecosystem in the Asia monsoon region based on remote sensing and climate dataset. XII GCTE SSC Meeting & GCTE Global Change Conference, Beijing, China, 26-30 March 2001.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし