

B-6 陸域生態系の二酸化炭素の評価と予測モデリングに関する研究

(4) グローバルカーボンサイクルモデルの開発

③ 対流圏移流拡散モデルによる炭素循環の変動予測モデルの開発

研究代表者 資源環境技術総合研究所環境影響予測部 林 正康

通商産業省 資源環境技術総合研究所

環境影響予測部

林正康

環境影響予測部

広域域間環境研究室

田口彰一

平成8～10年度合計予算額 11,228千円

(平成10年度 予算額 3,191千円)

[要旨] 観測された大気中二酸化炭素濃度と対流圏移流拡散モデルを用いて、陸域および海域が大気と交換する二酸化炭素の量を推定した。化石燃料の燃焼による発生は全球分布、陸域の植生は13、海域は12の領域を設定し、年平均交換量および季節変動量が年々変動を行わないという仮定の下に逆問題を解いた。1979年から2年間の地表、上空あわせて51地点の濃度観測を用いた。移流拡散モデルは1992年の気象データで走らせた。逆問題の解と拘束条件の関係を調べた。その結果現状の観測ネットワークでは、アフリカ、熱帯域のアジア、南米、熱帯太平洋西部、熱帯から南半球の大西洋などの交換量を推定することができないことと、このために全球の収支も閉じないことが分かった。現在のネットワークでもシベリアでの吸収、北米高緯度での放出、北米中緯度での吸収などを解として得た。北米の中緯度の陸上植生がもつ季節変動は南米やアフリカの熱帯雨林やサバンナ領域の季節変動より小さいという結果も得た。

[キーワード] 移流拡散モデル、逆問題、特異値分解法、炭素循環

1. 序

陸上の生態系が大気との間で交換する二酸化炭素の量は、季節の進行とともに変化するのはもちろんであるが、人為的な土地利用形態の変化や、その生態系を取り巻く環境の変化とりわけ気象状態の影響を強く受けて変動すると考えられる。大気中二酸化炭素の対流圏全域濃度に影響を及ぼすような大規模な陸上生態系の変化は、2～3年の短い時間スケールでは熱帯太平洋の温度変動(エルニーニョ・南方振動)や火山の噴火に伴い排出された火山灰による一時的な大気の寒冷化と関連するものがあり、10年以上の長い時間スケールでは熱帯雨林の破壊や、小氷期と関連するものが考えられる。

大気中二酸化炭素濃度が増大した場合の陸上生態系の反応や、農耕作物の変動や施肥形態の変動等が大気中二酸化炭素濃度に及ぼす影響を検討するには、生態系モデルが現状の大気中二酸化炭素の季節変動を正確に再現していることと、年毎の気象状態の変動に伴う二酸化炭素の発生・吸収量の変動を再現することが必要である。

2. 研究目的

大気中二酸化炭素濃度の将来予測には、3つの要素が重要である。第一に年間7ギガトンといわれる化石燃料消費に伴う発生に対し、大気中には3ギガトンしか残留しないため、残りがどこへ行くのかを明らかにすることである。もしこのほとんどを海洋が吸収している場合は海洋の循環にともない数千年は大気に放出されることはないと考えられる。ところが陸上の生態系が吸収しているのであれば、たとえば森林が成長過程から衰退過程の移行することにより百年程度で放出が始まると考えられる。これがいわゆるミッシングシンクを調べることの意義である。第2には将来の気象状態を予測することである。大気中二酸化炭素が増大すると対流圏の平均気温が増大することは比較的良好にわかっているが、平均気温の変動が、夜間の最低気温の変動によりもたらされるのか、日中の最高気温の変動によってもたらされるのか等植物の生育に直接関連する量としてはよく分かっていないし、気温・降水量・日射量の変動の地理的な分布もモデルの間での食い違いが大きい。第3には大気・陸上生態系・海洋まで含む炭素循環のモデル化を行うことである。これにより予測された将来の気候からの植生の分布を推定することができるとともに、その気候における二酸化炭素の発生・吸収量の推定が可能となる。

大気中二酸化炭素の濃度は季節変動を伴うことが、組織的な観測が始まるとすぐに認識された。また、観測された南北濃度分布と発生源の分布を一次元モデルによって関係づける試みが行われた。大気中微量物質の濃度は発生源分布と共に大気による輸送の影響が大きい。熱帯域の南北半球間交換過程と発生源近傍での鉛直輸送は特に大きな影響があると考えられる。実際、同一の発生源データを用いても、用いる3次元輸送モデル（CTM）によって結果が大きく異なることが分かっている。

季節変動する発生源から年平均濃度に空間的な分布が発生する現象をレクティファと呼んでいる。これは電気の分野の用語で交流に含まれる直流成分のことである。交流は長時間平均すれば本来ゼロになるはずであるが、ある種の条件下では直流成分が発生する。大気中に発生と吸収を差し引きゼロとなるように与えても、大気中濃度は空間分布を持ってしまう。もちろん全球を積分すればゼロである。このようなレクティファの存在は2次元モデルで研究が行われていた頃から分かっていた。例えば熱帯付近の直接循環（ハドレーセル）は北半球の夏は北半球側で上昇し南半球側で下降となり、赤道の地表付近は南風である。冬にはこの循環は逆向きとなり地表付近の風は北風である。もし熱帯域の植生が行う放出と吸収に季節変動がこの北風と南風の変動と同期していれば南北半球の輸送は非対称となる。つまり相対的に薄い濃度が南へ運ばれる季節と相対的に濃い濃度が北へ運ばれる季節が発生する可能性がある。この場合は北を濃く南を薄くする作用があり年平均濃度の空間分布を形成する。別の例を考えよう、陸上の森林が生長する夏、大気の混合層は高くなり高い高度の大気から二酸化炭素を吸収すると考えられる。枯れ葉が分解する冬は混合層高度が低く、下層の濃度を高くする。この2つの季節を足しあわせると強い高度分布が発生すると考えられる。これも空間分布を形成する。先ほどの熱帯の例は実は中・高緯度でも考えることができる。夏に南風、冬に北風が吹くような森林では森林の生長に伴う吸収で薄くなった大気は北へ、分会による発生で濃くなった大気は南へ運ばれていく。従ってこの森林の南北の年平均濃度は北が低く、南が高くなる。観測される平均濃度はこれらの過程を全て含んでいるので輸送過程が重要なのである。

3. 研究方法

平成8年度は、陸上生態系が大気との間で交換するCO₂の季節変動を算出する生態系モデルの出力をCTMを使用することにより、大気中CO₂濃度の計算値と観測値との比較から現存する植生モデルの問題点を検討した。用いたCTMでは水平2.5度鉛直15層、輸送過程はセミラグランジュ法を用いている。気象データは6時間毎に与え、大気境界層高度をパルクチャート・ツ数から推定する。地表で与えたフラックスは、この境界層の内部で等しい混合比を持つ物とする。気象データはヨーロッパ中期予報センターが現業で解析しているTOGA/Advancedと呼ばれるデータセットで、上昇流は高分解能のモデルの中で質量保存式から算出された値を2.5度でサンプリングした物である。この値は中緯度でも一日当たり1000hPaを越えるピークが多く、このデータだけでもかなりの鉛直方向の混合が発生する。このためこのCTMでは低分解能CTMの多くが使用している積雲対流による鉛直輸送の効果を入れていない。

用いた植生モデルは人工衛星の正規化植生係数(NDVI)からCO₂吸収量を推定したもので、計算結果では北半球の春の濃度極大が観測より強く現れ、植生の成長による濃度の下降が観測より急激であることがわかった。北半球で最大の植生を持つ中国大陸でのモデルのCO₂フラックスと正規化植生係数、降水量の関係を調べたところ、降水量の最大が植生の最大より先行して起こることがわかった。従って、正規化植生係数には反映しない植物の生長が存在することが示唆され、観測との食い違いを説明できる可能性があることがわかった。

平成9年度は、観測された大気中CO₂濃度とCTMを用いて、陸域および海域が大気と交換するCO₂の量を推定した。化石燃料の燃焼による発生は全球分布、陸域の植生は13、海域は12の領域を設定し、年平均交換量および季節変動量が年々変動を行わないという仮定の下に逆問題を解いた³⁾⁴⁾。1986年から2年間の地表22点、上層2地点の濃度観測を用いた。

未知数の総数は102個となる。この未知数に初期推定値とその不確定性を設定する。また観測データも平均値、変化傾向、年周期の正弦と余弦、半年周期の正弦と余弦に分解しそれぞれに信頼性を設定する。但し、変化傾向は一定であるとするため使用する既知数は121個となる。問題は連立一次方程式で与えられこれを最小自乗法で解くことができる。解き方は特異値分解法と呼ばれるが、これは係数行列の性質に係わらず有効な解を与える方法である。

海洋の季節変動を取り入れた場合は陸上の年平均交換量が発生なのに対し、取り入れない場合は吸収となった。一方海洋の季節変動を取り入れない場合の方が南半球側での濃度の鉛直分布を良く再現した。北米の中・高緯度の陸上植生が持つ季節変動は、南米やアフリカの熱帯域の季節変動より小さい。

平成10年度は、前年に引き続き逆問題の解法によりCO₂の収支の解析を行った。変更した主な点は、CTMと観測データである。成層圏と対流圏の交換時間をより現実に近づけたCTMを用いた。これにより境界層を通じて大気に付加されたCO₂の地表濃度の上昇が現実に近くなった。上空濃度が重要であることが分かったので、シベリア上空、日本上空、日本からオーストラリアへの定期航空機による観測、オーストラリア・ケープグリムでの航空機観測を用いた。また、解析結果に対するデータの信頼性の影響、先見情報の信頼性の影響、データの採否による影響、CTMの非線形性の影響などを検討した。前年度の結論とほぼ一致する結果を得た。

解の例を図1に示す。陸上13、海洋12の領域は陰の濃さで表現している図中塗りつぶした丸は陸、白く抜けた丸は海でそれぞれゼロ点を示している。丸から延びた線上の横線が解を表し

丸より上なら放出、丸よりしたなら吸収である。横棒から上下に延びた矢印は解の信頼性を表す。解とその信頼性を表す長さの単位は図左下に示した。この解は以下の条件で求めた。化石燃料による発生 5.3 ± 0.2 ギガトン/年、陸域と海域の定常成分 0.0 ± 2.0 、陸域の季節変動成分のうちアマゾン、アフリカ、インドネシアを 0.0 ± 0.5 (成長期正味フラックス; GSNF)、他の陸域では 0.0 ± 10.0 、海洋の季節成分は 0.0 ± 0.5 とした。観測の平均値の信頼性は 0.3 ppm とし、季節成分の信頼性は近似曲線からの残差で与えた。陸域の季節成分に与える初期値の信頼性が大きく異なるのはいくつかの予備実験から緩い拘束ではこれらの6地域の季節変動が異常に大きくなり、レクティファの為に全体の収支に大きな影響が生ずる事が分かり、これを回避するためである。

この図を見るとシベリアでは年間2ギガトンの吸収、北米の高緯度では年間2ギガトンの放出となる。北米中緯度は吸収であるが、北米全体では放出となり最近のFan等⁵⁾の結果とは異なっている。海洋の収支を見ると、中緯度大西洋の吸収が大きい。北部大西洋は一般的に吸収といわれているが、ここでは放出となっている。

季節変動として得た解をFung等¹⁾²⁾の解と比較したのが図2である。13個の領域について月毎の値を年当たりの流量強度に変換して示した。ヨーロッパ、シベリア、中国などは1ヶ月程度の前後はある物の衛生から推定したバイオマスの総量や土壌モデルから推定したFungの交換量と一致している。所が北米の高緯度では夏期が放出となる解が得られた。北米中緯度の季節変動は従来の推定の1/3程度で、面積がこの1/3しかないインドネシア域と同程度かそれ以下である。

4. 結果と考察

この3年間の研究を通して、大気が陸上の植生との間で行う二酸化炭素の交換量と、大気中濃度の観測から推定される交換量の間には必ずしも一致しない部分があり、特に土壌有機物の分解過程などに十分解明されていない点がある可能性が明らかとなった。

北半球中緯度は大気中濃度の観測が豊富で、逆問題の解に高い信頼性があると考えられるが、北米中緯度では季節変動が極めて小さいという結論となった。常識的にはシベリアなどと同様な季節変動が期待されるが、逆問題の解を支持するためには植物の成長による吸収を補うだけの北米特有の放出を説明する必要がある。

また、逆問題の解は南米やアフリカの熱帯地域で北米中緯度に勝る季節変動を示した。現状の濃度観測網はこのような熱帯季節林のもたらすCO₂の収支をほとんど押さえる事ができず、中緯度と比べると数倍の不確定性を持つ。降水の分布を調べると一年周期の季節変動があり、サバンナなどが大きな面積を占めていることなどから逆問題の解を直ちに否定することができない。熱帯には季節が無いと考えがちであるが必ずしも当てはまらない可能性を示している。

大気全体の収支における陸上植生と海洋の相対的な役割の評価が、熱帯地域の収支の不確定により生じていることが分かった。全球の収支を閉じるためには熱帯地域での観測の整備が必要であろう。逆問題の解と拘束条件の関係を調べた。上層濃度として仙台上空とハワイのマウナロアにおいて観測された濃度を拘束条件に取り入れることにより解は大きく変動した。これらを拘束条件として入れなかった場合、得られた解を境界条件として使って対流圏移流拡散モデルを走らせた場合の大気中濃度は、これらの地点の季節変動とは全く異なっていた。上空濃度を拘束条

件とすると、大気中の残存量の季節変動が数ヶ月変動し陸上生態系の成長期正味交換量が1割上昇した。

海洋の季節変動を取り入れた場合、陸上の季節変動が大きく変動すると共に、年平均交換量が吸収から発生に変化した。成長期正味交換量は陸上15ギガトン、海上6ギガトンとなった。一方、海洋の季節変動を取り入れない場合の方が南半球側での濃度の鉛直分布をよく再現した。

いずれの解も人工衛星から求めた正規化植生係数によって推定されていた従来の交換量とは大きく異なり、北半球高緯度での季節変動と熱帯域の季節変動は同程度の振幅を持つ。Fung等(2)の推定ではヨーロッパも北米も最大最小幅にして年間10GtCの季節変動を持つが、今回得た解は2GtCに満たない。熱帯のアフリカや南米に関しては両者とも4GtC程度の振幅を持っている。従って、中・高緯度の陸上植生がもつ季節変動は南米やアフリカの熱帯雨林やサバンナ領域の季節変動より小さい。

5. 本研究により得られた成果

陸上植生の二酸化炭素交換量の季節変動を対流圏移流拡散モデルを用いた計算から逆問題を解いて求めた。逆問題の解は拘束条件により大きく変動した。ここでは上空濃度観測値の効果と海洋の交換量の季節変動の効果調べた。拘束条件を変更しても、陸上生態系の季節変動は中・高緯度より低緯度の方が常に大きくなった。

6. 参考文献

- 1) Fung,I., K.Prentice, E.Matthews, J.Lerner, and G.Russel,1983: Three-dimensional tracer model study of atmospheric CO₂: Response to seasonal Exchanges with the terrestrial biosphere,J.G.R., 88, 1281-1294
- 2) Fung,I.Y., C.J.Tucker, K.C.Prentice,1987: Application of advance very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO₂,J.G.R., 92, 2999-3015
- 3) Enting, I.G., C.M.Trudinger, R.J.Francey, and H. Granek, 1993: Synthesis inversion of atmospheric CO₂ using the GISS tracer transport model. Division of atmospheric research Technical Paper, No.29. (CSIRO, Australia).
- 4) Enting,I.G., C.M. Trudinger, R.J.Francey, A synthesis inversion of the concentration and $\delta^{13}C$ of atmospheric CO₂, Tellus, 47B, 35-52.
- 5) Fan,S. M.Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmient, T. Takahashi, and P. Tans, A large terrestrial carbon sink in north america implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models, Science, 282, 442-446, 1998.

国際共同研究等の状況

- ① 豪州、連邦産業科学研究機構、大気研究部門と逆問題解法に関する情報交換。
- ② 米国、カリフォルニア州立大学サンタバーバラ分校が実施する全球移流拡散モデルの相互比較実験 (Transcom-3) の立ち上げ会議に出席し情報交換
- ③ 独、マックスプランク気象研究所トーマス・カミンスキ博士を招聘し、アジョイント法を用いた逆問題解法に関して情報交換 (日独環境保護パネル)

- ④ 英国、エジンバラ大学を訪問し、二酸化炭素交換量の実測と逆問題の解の関係について意見交換（科学技術庁・重点基礎研究による派遣）

研究発表の状況

（１）口頭発表

- ① S.Taguchi, I.G.Enting: Fifth International Carbon Dioxide Conference, Cairns, Australia (1997)
"Synthesis inversion of atmospheric CO₂ using the NIRE chemical transport model"
- ② 田口彰一：1997年日本気象学会秋季大会（1997）
「逆転法を用いた二酸化炭素発生源の推定」
- ③ S.Taguchi, I.G.Enting: International symposium on atmospheric chemistry and future global environment, Nagoya, Japan (1997)
"Synthesis inversion of atmospheric CO₂ using the NIRE chemical transport model"
- ④ S.Taguchi: Workshop on inverse methods in global biogeochemical cycles, Heraklion, Greece, (1998)
"Synthesis inversion of atmospheric CO₂ using the NIRE chemical transport model"
田口彰一、日本気象学会秋季大会
全球移流拡散モデルを用いた二酸化炭素の発生源の推定
- ⑤ S.Taguchi: Atmospheric CO₂ inversion intercomparison project (TransCom 3), San Francisco, (1998)
"Inversion results part 5"
- ⑥ S.Taguchi, CO₂ in the Ocean, Tsukuba (1999)
"Seasonal cycles of air-sea exchange of CO₂ derived with an inverse method"
- ⑦ 田口彰一、気象庁環境気象課、講演会
逆問題解法による二酸化炭素の発生・吸収量の推定手法

（２）論文発表

- ① S.Taguchi, AGU Monograph（投稿中）
"Synthesis inversion of atmospheric CO₂ using the NIRE chemical transport model"

（３）出願特許、受賞など

なし

Figure 1: Annual mean flux of CO₂ over thirteen land areas and twelve oceanic area. Circles indicate the zero point for the relevant area and horizontal bar denotes the solution. Vertical arrows indicate the uncertainties of the solution derived from the covariance matrix. The size of flux is shown at the left bottom corner.

ANNUAL MEAN FLUX

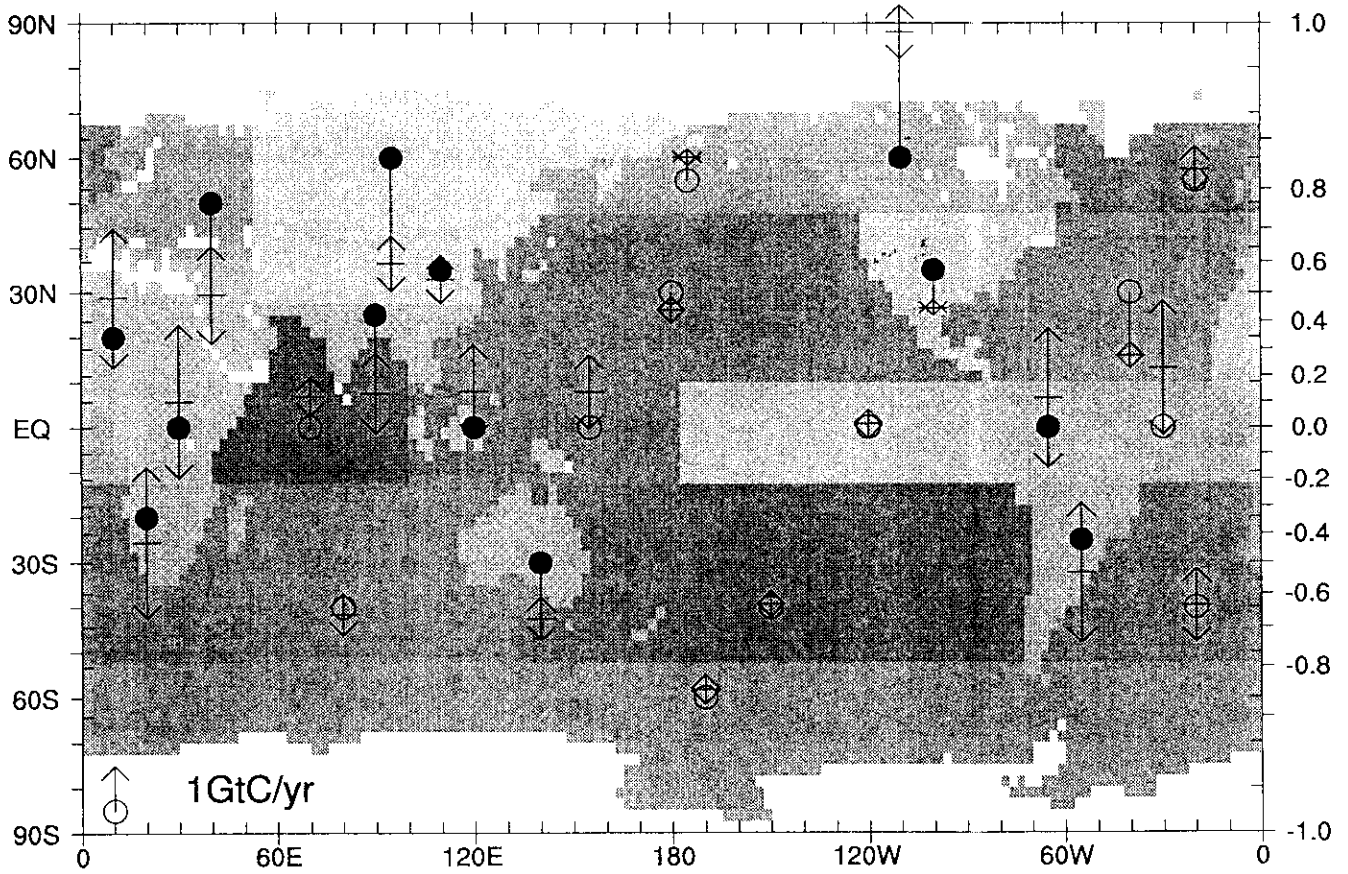


Figure 2: Seasonal cycle of CO₂ flux over thirteen land area. Dashed lines are for the estimates by *Fung et al.* [8].

