

気候環境変化の予測に関わる大気微量成分の輸送モデルの開発

Modeling of transport of atmospheric minor constituents related to prediction of the global climate and environment changes

○廣岡 俊彦*, 木田 秀次**, 井口 敬雄†

○Toshihiko HIROOKA, Hideji KIDA, Takao IGUCHI

*九州大学大学院理学研究院, **京都大学大学院理学研究科, †京都大学防災研究所

*Kyushu University, **Kyoto University,

and †Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University

We developed usable transport models to simulate the global distributions of minor constituents of the atmosphere such as carbon dioxide, ozone, and aerosols. Such models are needed to make an assessment study of global changes of climate and environment of the earth due to changes of thermally active constituents. So far the circulations of these tracers have not yet been understood from a combined view of chemical, biological and dynamical processes, because even one of the three views has not well been established.

In this study a non-chemical transport global model, a partly-chemical transport model and an ozone-coupled general circulation model were developed and used to simulate the global distributions of minor constituents as well as climate changes. One of the results suggests that carbon dioxides are absorbed by the terrestrial vegetations.

1. 研究目的

二酸化炭素やオゾンは大気中の微量成分でありながら、大気のエネルギー収支にとって極めて重要な働きを持つことが知られている。ところが、これらの成分は、近年、人間活動の影響と思われる顕著な濃度変化を示しており、気候変動をもたらす原因として危惧されている。

例えば、二酸化炭素の増加(図 1)は、温暖化を引き起こす原因として重要視されており、特に化石燃料の消費などによる人為的増加が大きな問題となっている。こうしたことから、二酸化炭素の濃度増加をできるだけ正確に予測することが緊急に必要となっている。しかしながら、現状では、二酸化炭素の大気中濃度が一体どのようにして現在の濃度になっているのかという基本的問題すら満足に理解されているわけではない。すなわち、どこで、どれだけ、どのようにして、二酸化炭素が生成、消滅しているのか、いまだよくわかっていないのが実情である。また、大気中に放出された二酸化炭素やその他の微量成分が、どのように大気中を輸送され、地球規模での物質循環に関わっているのかについても十分な研究が行われていない。

一方、オゾンに関しては、特に春先の南極域成層

圏約 20km 付近の高度において、毎年大規模な減少が生じており、オゾンホールとして知られている。また、北極域でも年によってはかなりの規模のオゾン減少が観測されており、これら極域のオゾン減少がエネルギー収支の変化を通して、気候にどのような変化を及ぼすのか関心が持たれている。

こうした現状に対して、まず、微量成分の詳細な輸送過程を表すモデルを作成し、地球規模での微量成分の輸送がどのようになっているかについての研究を進展させ、同時に気候変動に関する新しい知見を得ることが本研究の課題である。

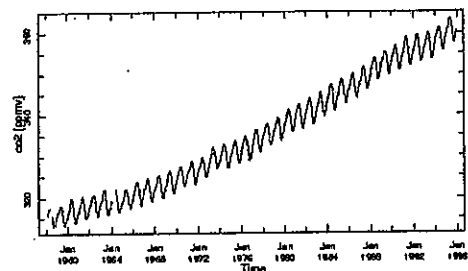


図 1. ハワイのマウナロアで観測された二酸化炭素の年々変動の様子。Keeling ら(1976)による。単位は ppmv。

2. 研究経過

輸送モデルに関しては、二酸化炭素の生成・消滅の部分はパラメータ化で対応し、輸送の力学過程に重点をおいて研究を進めた。まず、輸送の定式化の検討を行い、オイラー方式の計算の一つである Emde(1992) の方式を基礎にし、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の風データ(観測に基づく水平の風向と風速)を用いて二酸化炭素濃度の輸送量を計算することにした。輸送モデルの分解能は風データの分解能に対応させ、緯度経度格子約 2.5 度とした。鉛直方向には高度約 30km までを扱い 14 の層を設けている。

一方、オゾン減少の影響評価に関しては、上とは独立に、オゾンの光化学反応系を組み込んだ大気大循環モデル(GCM)を別途開発して用いた。本研究では、オゾンホールを想定して、春季極域成層圏に大規模なオゾン減少域を形成する数値実験を 50 年間分を行い、気候への影響を見積もった。GCM は、水平分解能が緯度経度格子約 5.6 度で、高度約 83km までを扱い、鉛直層数は 37 である。

3. 研究成果

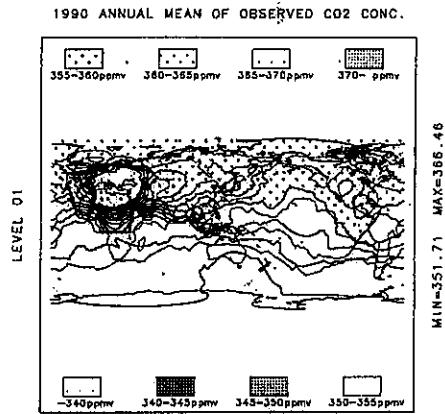
3.1 二酸化炭素の輸送に関する数値実験

最初に、過去の観測的研究を参考にして、二酸化炭素の地表面 flux を与えた計算を行った。これは、地表における二酸化炭素の放出、吸収量を、場所と時間の関数として仮定したものである。特に、陸面での植生における flux は不明なことが多いので、Fungら(1987)の推測値を採用した。

図 2a は二酸化炭素の地表付近における年平均濃度の全球的分布を示したものである。ここで目立つのは、ヨーロッパにおいて著しく大きな濃度が見られることである。この原因として、この地域での二酸化炭素の排出量が多いことと、二酸化炭素の観測地点数がこの地域は他地域に比べて非常に多く、なおかつ地表付近で測定されているので濃度が大きく出る傾向にあることなどが挙げられる。他の地域でも、都市ではヨーロッパと同じ傾向があるが、観測地点の多くは都市から遠く離れた地域に設けられているので、都市で排出された二酸化炭素がその地域に達するまでに境界層内を十分よく鉛直混合かつ水平拡散された状態になる。以上を考慮すると、図 2a

は、地上付近の濃度として、それなりに意味のある実態を反映していると考えられる。ただし、境界層より上では、ヨーロッパ上空で必ずしも高濃度になるとは限らない点、注意が必要である。

(a)



(b)

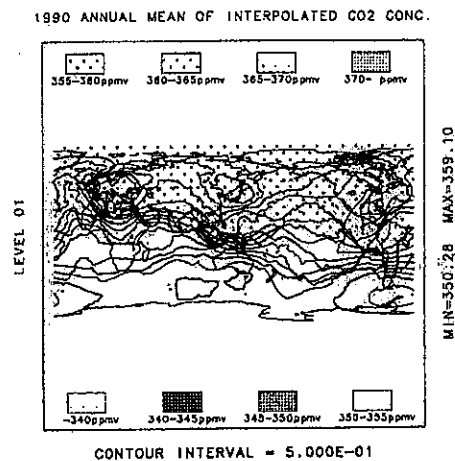


図2. 地表付近におけるCO₂の年平均濃度の全球的分布図。(a)は観測結果、(b)は3次元輸送モデルによる数値実験結果。単位は ppmv、等値線間隔は 0.5ppmv。

一方、図 2b は我々の輸送モデルでの数値実験結果である。ヨーロッパでは、車からの放出などで地表付近の濃度が大きくなる傾向は再現されている。しかし、前述の図 2a で見たような極端な高い濃度は見当たらない。これは、本輸送モデルにおいては境

界層が一層しかなく、地表から放出された成分が境界層全体に素早く鉛直拡散してしまうためと考えられる。境界層を一層しか取っていない理由は、輸送モデルに取り込む風データに境界層が一層しかないためであるが、この点改良の余地がある。

図3は年および経度で平均して求めた、観測とモデルの緯度分布の比較である。分布のおおまかな類似性は認められるが、南北両半球の量的な違いが存在する。また、観測に見られる北半球中高緯度の出っ張りも再現されていない。前者の、実測とモデルの比較に見られる南北差の問題については次節で検討を行う。他方、後者の北半球中高緯度の出っ張りは、ヨーロッパの高濃度の反映と考えられる。

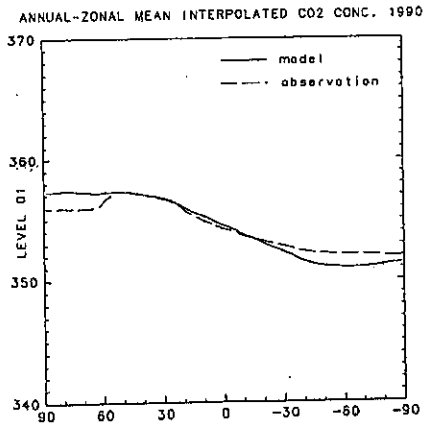


図3. CO₂の年および経度平均濃度の緯度分布。破線が観測、実線がモデル。横軸が緯度、負は南緯を表す。縦軸の単位はppmv。

3.2 植生の効果の導入

上記の数値実験では、地表からの二酸化炭素のfluxをFungらの推定値を採用して計算を実行した。しかし、前述の図2bや図3のように、両半球の濃度差の再現にやや問題があった。これにはいくつかの要因が関係していると考えられるが、本研究では、北半球のfluxの仮定をいろいろ調整して、何が最も結果の差を説明できるかを慎重に検討した。その結果、海洋のfluxも関係しているが、特に、北半球の陸域植生の効果が重要な要因となっている可能性を示す結果を得た。図4は、植生の効果を見直して計算した結果で、モデルと観測のよい一致が見られるであろう。

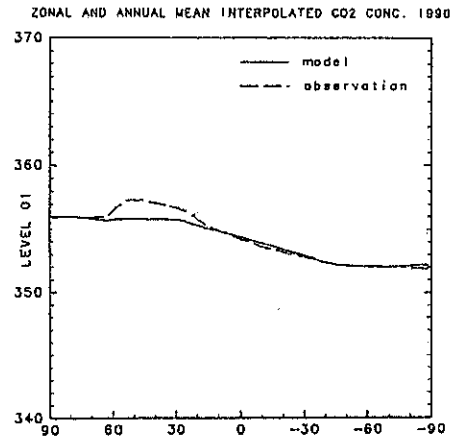


図4. CO₂ net flux (植生)を考慮した結果について、図3と同様に表したものの。

3.3 オゾン減少の影響評価

GCMを用いて行ったオゾン減少の影響評価実験については、南北両半球について、冬季から春季の期間を中心に解析を行ったが、ここでは北半球春季における結果のみを示す。

50年間の実験結果の中には、オゾン減少がほとんど生じなかった年もあれば、反対に大規模なオゾン減少が生じた年もあり、非常に年々変動が大きかった。そこで、北半球の春季(4~5月)に卓越する年々変動のパターンを見るために、2カ月を4月前半・後半、5月前半・後半に分けて平均し、それを基にmultiple EOF解析(M-EOF)と呼ばれる、主要な変動パターンを経験的に抽出する解析を行った。

図5は、5月後半の等圧面高度場に関し第一主成分に対応する変動パターンを示したものである。成層圏で顕著な、極域が低気圧、中高緯度が高気圧という特徴的なパターンが対流圏にまで及んでおり、大規模オゾン減少により、極域の低気圧が強化されるという大気循環場への影響が示唆されるが、これはエネルギー収支が変化し、極域の気温が低下したことと関連している。このようなパターンは現実大気で見られる北極振動(AO)と呼ばれる気候の変動パターンに極めてよく似ており、現実大気中でもオゾン減少がこの振動の形成に関与しているものと考えられる。対流圏における気候変動メカニズムの詳細は今後の課題である。

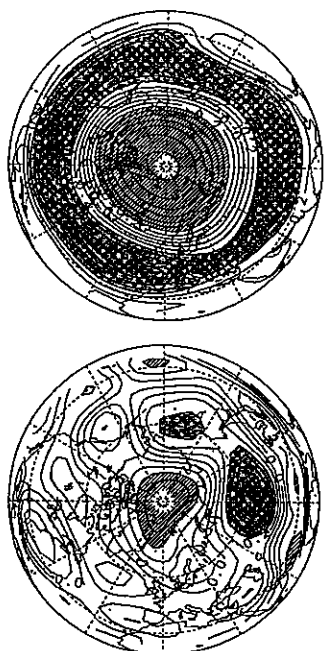


図5. オゾン減少実験におけるM-EOF解析の第1主成分に対する5月後半の等圧面高度場の変動パターンを表す相関分布図。上が11hPa、下が500hPa面、北極中心に北半球部分を示す。95%信頼限界に相当する正負0.3以上の領域に、それぞれ陰影と斜線を施す。

4. 今後の課題と発展

本研究を通して、二酸化炭素を初めとする大気中の微量成分の輸送モデルを開発し、基本形をほぼ完成することができた。また、二酸化炭素の全球的収支の数値実験により、陸域の植生が年々の増加を少なくする性質をもっていることが示唆された。

また、GCMを用いた数値実験により、春季極域成層圏のオゾン減少が大気大循環に与える影響の存在が示された。

今後、完成した輸送モデルを用いて、種々の微量成分の濃度や循環について輸送過程の面から研究を進展させることが必要である。また、オゾン減少の影響評価を、対流圏中心に詳細に行う必要がある。

並行して、モデルをさらに精緻化する必要がある。特に、鉛直混合の力学過程を精度よく導入する方法の開発が必要である。例えば、積雲対流による鉛直輸送や拡散効果の問題を掘り下げ、それをいかにパラメータ化するかは重要な課題と思われる。

参考文献

- Emde, K. V. D.: Solving conservation laws with parabolic and cubic splines, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 482-492 (1992).
- Fung, I. Y., C. J. Tucker and K. C. Prentice: Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO₂, *J. Geophys. Res.*, **92**, 2999-3015 (1987).
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl, P. R. Guenther and L. S. Waterman: Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Tellus*, **28**, 538-551 (1976).

発表論文リスト

- Hirooka, T., M. Yoshikawa, S. Miyahara and T. Kayahara: Radiative and dynamical impacts of Arctic and Antarctic ozone holes: General circulation model experiments. *Adv. Space Res.*, **24**, 1637-1640 (1999).
- 井口敬雄, 木田秀次: 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, 385-395 (1999).
- 井口敬雄, 木田秀次: グローバル輸送モデルと植生モデルの結合について. 京都大学防災研究所年報第44号, 95-103 (2001).
- Murazaki, K., H. Kida, and M. Chiba: Inter-hemispheric mass exchange due to ideal tropical Hadley-type circulations simulated by an axiallysymmetric 2-D global model. *Papers in Meteor. Geophys.*, **52**, 67-80 (2002).
- Watanabe, S., T. Hirooka and S. Miyahara: Interannual variations of the general circulation and stratospheric ozone losses in a general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, (2002) (in press).
- Iguchi, T. and H. Kida: A numerical study of the atmospheric CO₂ budget using a global transport model. *J. Meteor. Soc. Japan* (2002), Submitted.