

物質循環モデルの開発改良と地球環境への影響評価に関する研究

○柴田 清孝、忠鉢 繁、直江 寛明、関山 剛、田中 泰宙、出牛 真、
栗原 和夫、馬淵 和雄(環境・応用気象研究部)、小畑 淳(気候研究部)

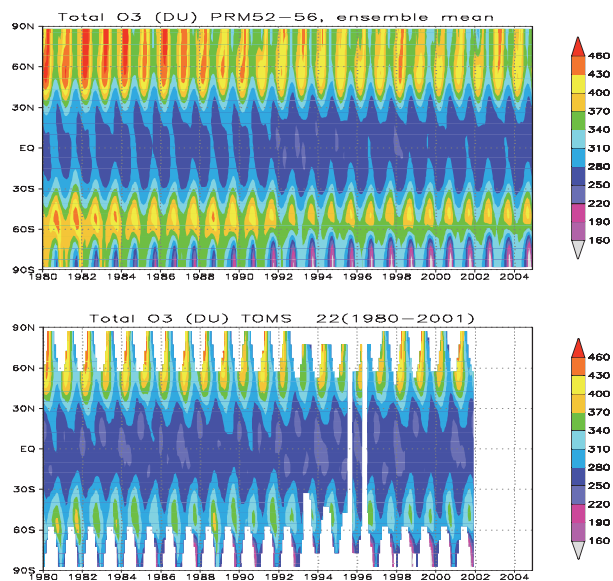
1. はじめに

本研究は、温室効果気体、エアロゾル、オゾン等の大気環境の監視業務、および黄砂予測業務、紫外線予測業務、さらに、微量物質が与える気候変動への影響評価に資するために、大気中の化学種、エアロゾルなどの微量物質についての挙動を監視・予測するための数値モデルの開発・改良を行い、これを用いて化学種の濃度の将来予測やエアロゾルの放射強制力に及ぼす影響を評価することを目的としている。3つのサブテーマを設定し、それぞれ主なターゲットをオゾン・エアロゾル・二酸化炭素として研究を行った。

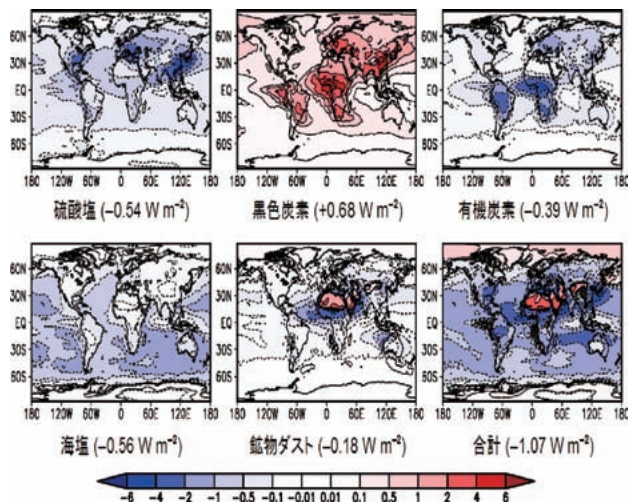
2. 数値モデルによる結果

2.1. オゾン化学輸送モデル

化学-気候モデルを使って、過去 25 年間(1980-2004)の成層圏のオゾンや気候を再現する実験を行った。化学-気候モデルへの入力として、観測に基づく種々の外力(海面水温、温室効果気体、フロン、太陽紫外線変動、火山エアロゾル)を与えて数値積分し、オゾン層の振る舞いとそれに関連する気候変動を調べた。化学モジュールは 51 化学種と 124 種の化学反応(不均一反応を含む)を扱い、初期値が少しずつ異なる 5 メンバーを使ったアンサンブル実験である。オゾン全量の経年変化(第 1 図)から南極の春先に起るオゾンホール(オゾ



第1図 オゾン全量の 1980-2004 年の経年変化。モデル(上)と衛星観測(下、TOMS オゾン観測センサー)の結果。



第2図 大気上端での放射強制力(W/m²)。硫酸塩エアロゾル(左上)、黒色炭素(中上)、有機炭素(右上)、海塩(左下)、鉱物ダスト(中下)、合計(右下)。

ン全量が 220 ドブソンユニット以下の領域)は 1980 年あたりから始まり、その後、面積は増加し続けるが、1990 年代半ば頃からほぼ同レベルで推移している。衛星は極夜のオゾンを観測できないため図上でははっきりとは見てとれないが、オゾンホール内のオゾン全量最低値はモデルが観測結果をほぼ忠実に再現していることがわかった。また、北半球の冬～春のオゾンの年々変動が非常に大きいことも再現している(Eyring, et al., 2006)。

過去の再現実験の他、将来予測実験を実施した結果、化学-気候モデルは南極オゾンホールが 2060 年頃に消滅することを示した。

2.2. エアロゾル化学輸送モデル

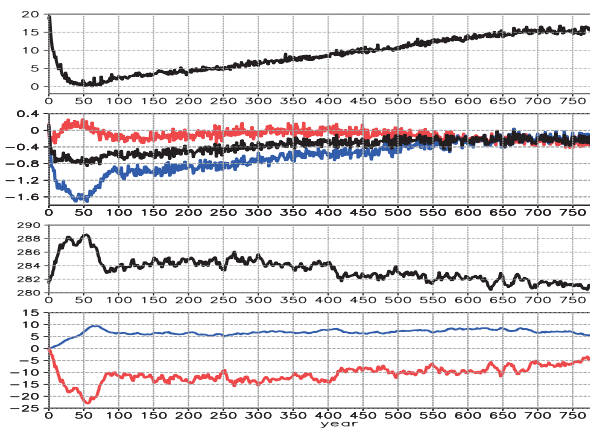
全球エアロゾルモデルによってシミュレートされた、エアロゾルの大気上端での放射強制力の年平均値を図2に示す。エアロゾル全体を考慮した場合、全球平均では -1.07 W m^{-2} の冷却となる。しかし、顕著な地域差が見られ、雪氷域や砂漠上など地表面アルベドの高い地域、また低層雲の多い地域では加熱の傾向を示している。

エアロゾルは組成によって光学的特性と分布が異なるため、放射への影響も異なっている。硫酸塩エアロゾルは、雪氷域を除いて、ほとんど全球で地球を冷却する。全球平均で -0.54 W m^{-2} となっている。

炭素系エアロゾルは黒色炭素と有機炭素で顕著に異なり、黒色炭素は全球において地球を加熱する。その値は全球平均で $+0.68 \text{ W m}^{-2}$ 。一方、有機炭素エアロゾルは -0.39 W m^{-2} となり、ほとんどの地域で冷却効果となっている。海塩エアロゾルはほとんどの地域で冷却効果となっている。地域ごとの値は大きくないものの、発生源となる海洋の面積が大きいため、全球平均では -0.56 W m^{-2} と、比較的大きな値になっている。

鉱物ダストは全球平均では -0.18 W m^{-2} と弱い冷却効果となっている。しかしその水平分布は地表面のアルベドと低層雲の存在に大きく依存しており、陸面では砂漠地域や雪氷面、低層雲の頻度の高い高緯度の海洋上では加熱、一方、陸面上のアルベドの低い地域や中・低緯度の海洋上では冷却となっている。この違いは特にサハラ・サヘル地域では顕著であり、サハラ砂漠上では加熱、サヘル地域上では冷却の効果となっている(Tanaka et al., 2007)。

2. 3. 炭素循環モデル



第 3 図 北大西洋淡水流入実験。淡水流入は初めの 60 年間。(最上) 北大西洋熱塩循環の強さ(単位は $\text{Sv}=10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)、(2 番目) 初期からの気温変化($^{\circ}\text{C}$) (南半球、全球、北半球)、(3 番目) 大気二酸化炭素濃度 (ppm)、(最下) 炭素量変化(GtC) (海洋、陸域)

気候変動の理解と正確な予測には、主な温室効果気体である二酸化炭素の大気中濃度を変動させる陸域と海洋の炭素循環、及び気候との相互作用も考慮しなければならない。そこで、炭素循環モデルを開発し、大気海洋結合大循環モデル(MRI-CGCM2)に組み込み、気候炭素循環モデルとして下記の変動実験を行い、解析を行った(Obata, 2007)。

(1) 化石燃料炭素排出による温暖化予測実験

産業革命以前の定常状態を再現しているモデルの大気に、化石燃料消費による二酸化炭素を排出して(IS92aシナリオ)計算した結果、現代までの大気中の二酸化炭素の増加と温

暖化が再現され、2100年には二酸化炭素の濃度が675ppm、21世紀中の気温上昇は 1.5°C となった。温暖化で土壌呼吸による二酸化炭素の放出が強まり、21世紀後半には光合成促進効果による二酸化炭素吸収効果を上回って陸域の炭素吸収は減少する。

(2) 北大西洋への淡水流入に対する応答

氷期終了時の環境激変(北大西洋への氷床融水流入)に関連して、モデルの北大西洋高緯度の海面に淡水を 60 年間与えて応答を調べた。北大西洋熱塩循環の停止による北向き熱輸送の減少で、北半球の寒冷化(-1.7°C)及び雪と海水の増加が表現され、全球平均気温も低下した(-0.8°C)。この北半球寒冷化で陸域生態系が衰退し(-23GtC)、これが主な原因となって大気二酸化炭素濃度が 7ppm 増加した(第3図)。これらの結果は Younger Dryas 初期(約 1 万 2700 年前)の変動を説明し得る。通常は相関の良い気温と大気二酸化炭素濃度も、分離した振る舞い(寒冷化と二酸化炭素増加)を示し得る事が、本実験によって明らかになった。

3. まとめ

- 成層圏化学-気候モデルを作成し、オゾンのトレンドや南極オゾンホールを経年変化等を現実的に再現することができた。
- エアロゾル輸送モデルに全てのエアロゾルを組み込み、それぞれの放射効果の定量的な評価を行った。
- 炭素循環モデルを気候モデルに組み込んで温暖化予測実験を行った。さらに、北大西洋への淡水流入に対する応答実験も行い、Younger Dryas 初期の二酸化炭素変動の機構との関連を調べた。

参考文献

- Eyring, V. et al., 2006: Assessment of temperature, trace species and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past, *J. Geophys. Res.*, 111, D22308, doi:10.1029/2006JD007327.
- Tanaka, T. Y., Te. Aoki, H. Takahashi, K. Shibata, A. Uchiyama and M. Mikami, 2007: Study of the sensitivity of optical properties of mineral dust to the direct aerosol radiative perturbation using a global aerosol transport model, *SOLA*, 3, 33-36, doi:10.2151/sola.2007-009.
- Obata, A., 2007: Climate-carbon cycle model response to freshwater discharge into the North Atlantic, *J. Climate*, 20, 5962-5976.

本研究は、融合型経常研究「物質循環モデルの開発改良と地球環境への影響評価に関する研究(H16-20)」として行われた。主任研究者：柴田清孝、研究分担者：忠鉢繁、直江寛明、関山剛、田中泰宙、出牛真、栗原和夫、馬淵和雄、財前祐二、高橋由(環境・応用気象研究部)、小畑淳(気候研究部)