

B-1 気候・物質循環モデルによる気候変動の定量的評価に関する研究

(1) 全球規模の気候変動におけるエアロゾル・水の効果の定量化に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 高藪 縁

環境庁 国立環境研究所

大気圏環境部 大気物理研究室

高藪 縁, 野沢 徹, 日暮 明子, 江守 正多,
菅田 誠治, 神沢 博

(委託先) 東京大学気候システム研究センター 中島 映至

平成 9 年度～平成 11 年度 合計予算額	31,261 千円
(平成 11 年度予算額)	10,790 千円)

[要旨] 本研究では、全球規模の気候変動予測における不確実性を削減することを目的として、全球気候モデルを用いた数値実験および現実データを用いた解析研究により、気候にもたらすエアロゾルと雲の効果を研究した。

まず、CCSR/NIES 全球気候モデルを用い、エアロゾルの放射効果の取扱を高精度化することによる温暖化実験への効果を調べた。また、定点観測データを用いた雲とエアロゾルの放射効果の高精度推定を行った。次に CCSR/NIES 全球大気モデルを基本にしたエアロゾル 3 次元輸送モデルの開発を行い、エアロゾルの全球分布の再現実験を行った。さらに、衛星データと大気モデルを用いたエアロゾルの全球的特性の見積り、およびエアロゾルモデルの詳細な検討を行った。

その結果、衛星観測においてもモデル実験においても、これまでは単純に取り扱われていたエアロゾルについて、主要 4 種(土壌性・硫酸塩・炭素性・海塩) のエアロゾル特性を反映した推定が可能になった。また、気候モデルに雲に対するエアロゾルの間接効果を採り入れるなど、エアロゾルのモデル化も高精度化した。

最後に以上の知見を元に、4 種のエアロゾルを高精度に取り扱った気候モデルにより、IPCC2000 に向けた新しい 4 つのエアロゾル排出シナリオ (SRES) に基づく気候変化実験を行った。

[キーワード] エアロゾル, IPCC シナリオ, 温暖化実験, 衛星観測, エアロゾル分布シミュレーション, 間接効果

1. 序

気候モデルを用いた地球温暖化の将来予測における不確実性は、未だ予想される温暖化の幅に比べても大きいのが現状である。中でも特にエアロゾルおよび雲・水蒸気等の水物質による気候影響の理解は不十分である。IPCC1995 年レポート においても、温暖化予測の不確実性減少のためにエアロゾルおよび雲・水蒸気の効果の把握が重要であると指摘されている。

対流圏エアロゾルの放射に対する効果は化学組成や粒径分布によって異なり、しかも大気中の存在量の時間・空間変動も激しいため、気候モデルの中での取り扱いが遅れている。一方、雲や水蒸気等の水物質は、気候変化へのフィードバック過程が大変複雑なために不確実性が高く、その取り扱いが世界の気候モデル間の相違をもたらす大きな要因となっている。また、雲や降水過程を介してのエアロゾルの間接効果については、重要性が指摘されながら、その研究は世界的にも試行錯誤の段階である。

主な研究成果は以下の通りであり、それぞれ節を設けて成果の概要を記述する。

- ① 高精度放射コードを採用した温暖化実験におけるエアロゾルの効果の研究
- ② 現実の雲とエアロゾルによる地表面放射効果の定量化
- ③ 3次元エアロゾル輸送モデルを用いた全球エアロゾル分布の推定
- ④ エアロゾルモデルの詳細な検討とエアロゾルの全球的特性の見積り
- ⑤ 新しいIPCCシナリオ (SRES) に基づいた気候変化実験

2. 高精度放射コードを採用した温暖化実験におけるエアロゾルの効果の研究

二酸化炭素などの温室効果気体 (GHG) と同様に人為活動に伴い増加している大気中の硫酸エアロゾルは、太陽放射を反射して GHG の増加に伴う温暖化を部分的に打ち消す可能性がある (IPCC, 1996). 硫酸エアロゾルの効果にはそれ自身が太陽放射を散乱する直接効果と、雲の凝結核となることにより雲の光学的・微物理的特性を変化させることによる間接効果があることが指摘されている. Mitchell and Johns (1997)(以下では MJ97 と略記), Haywood et al. (1997) は将来の GHG および 硫黄酸化物 (SO_x) の排出シナリオを用いて将来 100 年程度の気候変化実験を行い、100 年間の全球平均気温上昇が、硫酸エアロゾルの増加により 0.6 度程度緩和されるとしている. ただし、彼らは硫酸エアロゾルの (直接) 放射効果を相当する地表アルベドの増加に換算する形で与えており、その取り扱いの精度に疑問が残る. ここでは硫酸エアロゾルの直接効果を放射伝達に組み込んで解く手法を用い、彼らと同様の全球気候モデルによる気候変化実験を行った.

[モデルと実験]

モデルは CCSR/NIES AGCM と CCSR OGCM をもとに海水の熱力学モデルと河川モデルを組み込んだ全球大気海洋結合モデルを用いた. モデルの不完全性によりそのままでは系が非現実的な状態へドリフトするのを避けるため、海表面において熱と水のフラックスに人工的な補正項 (季節と場所に依存) を加える「フラックス調節」を行っている. 解像度は大気が水平 T21 (約 5.4°) 鉛直 20 層、海洋が水平 2.8° 鉛直 17 層である. このモデルの重要な特徴は、世界各国のモデルに比較して放射過程の取扱が高精度な点である (Nakajima et al., 1995).

MJ97 など先行する同様の実験ではエアロゾルの効果は地表アルベドの増加に換算されて放射コードに与えられているが、本実験ではエアロゾルの放射効果をより直接的に扱っている. 特に、エアロゾル光学特性の波長依存性、湿度依存性を考慮している. 硫酸エアロゾルの間接効果には未だ不明な点が多いので、先行研究と同様に直接効果のみを扱った.

実験は、GHG 濃度を 345ppmv、エアロゾル濃度をゼロとしてモデルを長期間積分して得られた準平衡状態を初期値とし、1890 年から 2090 年までの 200 年間について表 1 に示した 3 つのケースを行った.

表 1: 実験の設定

[CTL]	GHG 濃度, エアロゾル濃度とも不変
[GHG]	GHG 濃度のみ増加
[SUL]	GHG 濃度, エアロゾル濃度とも増加

GHG とエアロゾルの増加シナリオは MJ97 にならった. GHG 濃度は二酸化炭素濃度に換算して与えた. 1990 年までは観測に基づき、それ以降は IPCC の中位シナリオである IS92a に準じた

年率 1%複利の増加とした。エアロゾル濃度は 1990 年と 2050 年について SO_x 排出量をもとに作成された分布データ (Langner and Rodhe, 1991) を用い、各年の分布は排出量に応じてこの分布をスケールリングして与えた。ここで 1990 年以降の SO_x 排出量は IS92a に従っている。

[結果]

実験 **SUL** で見積もられた 2060 年における GHG およびエアロゾルによる放射強制の分布を図 1 に示す。2060 年は 1990 年と比較して GHG 濃度が 2 倍程度に達する時期である。放射強制は対流圏界面付近の下向きを正とした放射フラックスの差として定義され、例えば GHG の放射強制は 2060 年の計算において、GHG 濃度を 2060 年レベルとしたときと 1890 年レベル (本実験におけるコントロールレベル) としたときに計算されるフラックスの差である。GHG による放射強制は雲の分布などに由来する空間分布を示すが、全球にわたって比較的一様な強さを持つ。これに対してエアロゾルによる放射強制は中国、インド、ヨーロッパ、北米などエアロゾル原因物質である SO_x の排出量の大きい地域に集中している。両者の和を取ると、ほとんどの領域で GHG による加熱効果の方が大きい。中国南東部を中心に正味でエアロゾルによる冷却の強制力が顕著な部分がある。

本研究および先行する研究によって見積もられた人為起源 GHG およびエアロゾル (直接効果) による全球平均の放射強制の比較を表 2 に示す。

表 2: 全球平均放射強制の見積もりの比較

温室効果気体	1990 年	2060 年	[W/m ²]
本研究 [SUL]	+1.72	+5.63	
IPCC(1996),IS92a	+2.1	+5.8	
硫酸エアロゾル	1990 年	2060 年	[W/m ²]
本研究 [SUL]	-0.41	-0.85	
Kiehl and Briegleb(1993)	-0.28		
Mitchell and Johns(1997)	-0.64	-1.49	
IPCC(1996),IS92a	-0.6	-1.1	

GHG による放射強制がこれまでの見積りより小さめなのは、本研究のモデルが雲を多めに見積もるバイアスを持つためと考えられる。エアロゾルの直接効果の見積もりは、本研究 **SUL** では MJ97 に比較してかなり小さめである。両者は同じエアロゾル増加シナリオを用いているので、エアロゾルの放射効果の表現が異なることがこの違いの主な原因と考えられる。本研究では MJ97 よりも精密な方法でエアロゾルの効果を放射伝達に組み込んでおり、また同様に精密な方法を用いて放射強制のみを見積もった過去の研究 (Kiehl and Briegleb, 1993) がやはり小さめな見積もりになっていることを併せて考えると、MJ97 の見積もりが過大評価であった可能性が高い。

各実験における全球平均地表気温の 200 年間の時系列を図 2 に示す。モデルの不完全性により、外部条件を変化させなかった実験 **CTL** において 200 年間で -0.5 度程度のドリフトが見られる。これを考慮して補正を行うと、1990 年から GHG 濃度がほぼ倍増する 2060 年までで、実験 **GHG** では 2.2 度、**SUL** では 1.9 度の昇温となる。硫酸エアロゾルの効果を表す **SUL** と **GHG** の差は、MJ97 など過去の研究と比較して小さい。これは前述したように放射強制の見積もりが本研究で小さめであることと対応している。

最後の 50 年間 (2040 ~ 2090 年) を平均した年平均地表気温の実験間の差を図 3 に示す。図 3a は **SUL-CTL** で、GHG と硫酸エアロゾルの増加を合わせた効果を表す。昇温パターンのおおまか

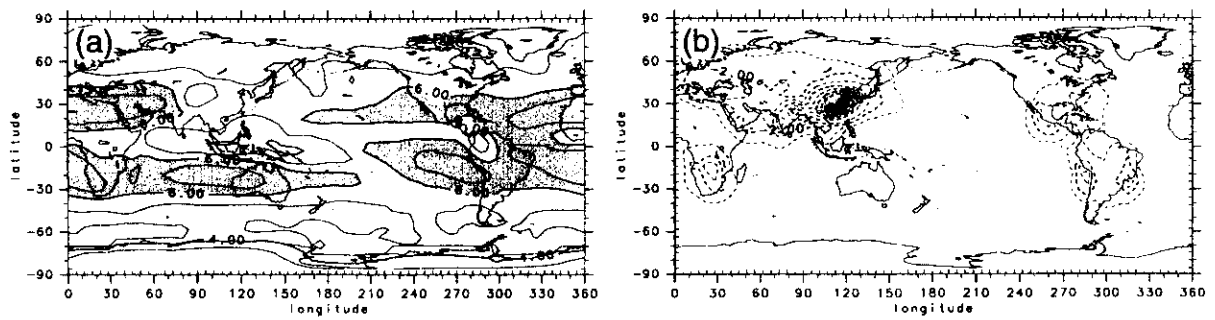


図1: 実験 SUL において見積もられた 2060 年における放射強制. (a) 人為起源温室効果ガス, (b) 人為起源硫酸エアロゾル直接効果. 実線は正 (加熱), 破線は負 (冷却) の強制力を表す. コンター間隔 1 W/m^2

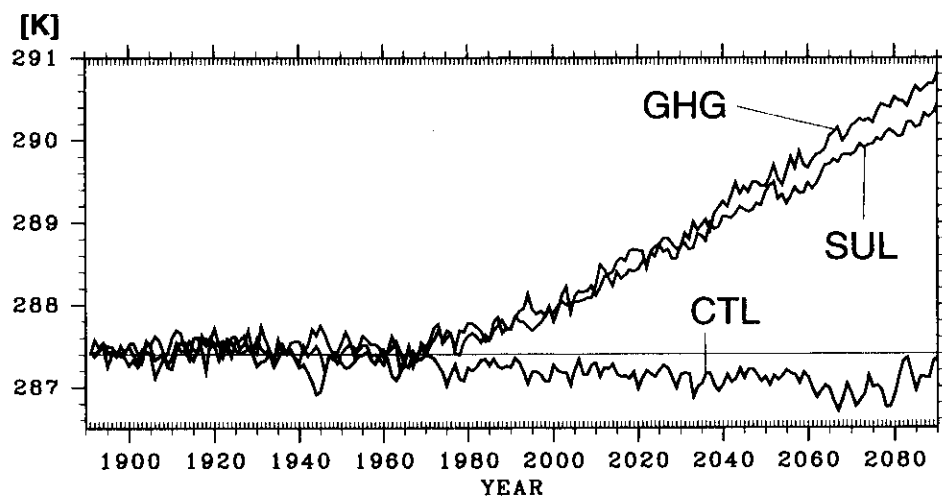


図2: 各実験における全球平均地表気温の時系列.

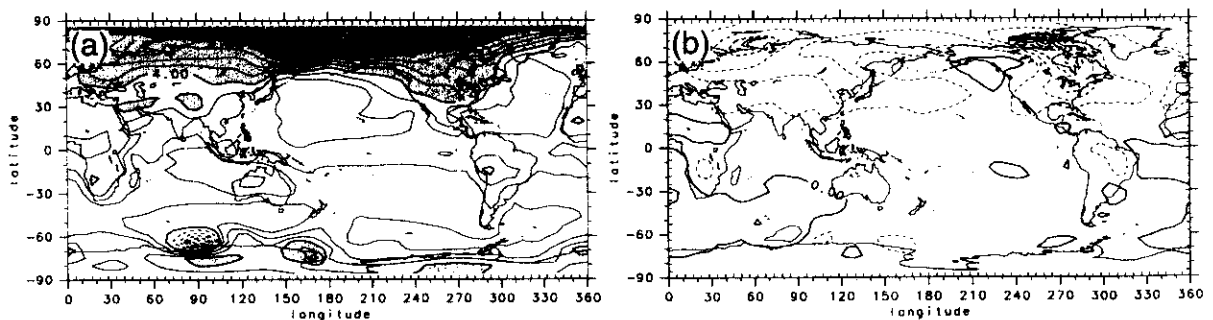


図3: 2040 年～2090 年を平均した年平均地表気温の実験間の差. (a) SUL-CTL, コンター間隔 1 K , (b) SUL-GHG, コンター間隔 0.5 K . 実線は正 (昇温), 破線は負 (降温) を表す.

な特徴は過去の多くの大気海洋結合モデルによる温暖化実験と同じである。すなわち、海上より陸上で昇温が大きい、海水や積雪の融解などにより高緯度で昇温が大きい、北大西洋と南極環海の海洋循環の沈み込み域で昇温が小さい、などである。南極環海の顕著な降温域はモデルのフラックス調節に問題点があったため生じたものであると考えられる。図3bは **SUL-GHG** で、硫酸エアロゾルの増加による効果を表す。主に硫酸エアロゾルが増加する北半球の陸上で昇温を抑える効果があるが、高緯度の海水や積雪による増幅効果が大きく効いているのが分かる。

[結論]

全球大気海洋結合モデルを用いて硫酸エアロゾルの増加を考慮した温暖化実験を行った。硫酸エアロゾルの効果は過去に行われている地表アルベドに換算する方法よりも精密な方法で放射伝達に組み込んだ。結果は、硫酸エアロゾルによる放射強制についても、それによる地表気温上昇の抑制効果についても、過去の研究 (MJ97 など) よりも有意に小さく見積もられた。

3. 現実の雲とエアロゾルによる地表面放射効果の定量化

気候システムにおける雲とエアロゾルの役割を正しく理解するためには、まず現実大気における雲とエアロゾルの放射効果の全球的な推定が必要と考えられる。そのためには衛星観測の利用が不可欠である。地球外放射収支における雲の効果については、ERBE(Earth Radiation Budget Experiment)データを用いて全球的な定量化が成功してきた (Hartmann 1993)。一方、地上放射収支における雲の効果については、現在 WCRP の ISCCP プロジェクト等において、衛星の可視赤外面像から得られた雲情報を用いて全球的に求める試み等がなされている (Zhang and Rossow, 1993)。しかしながら、限定された衛星データによって地表面短波放射量を計算するためには、様々な仮定やモデルが入らざるを得ない。特に雲の放射特性は、データとして得にくい微物理や形態に大きく影響される。このような状況で推定精度を上げるためには、精度のよい地上観測を利用した多くの検証研究が必要である。ここでは、地上観測データと放射伝達計算とを併用した新しい方法により雲とエアロゾルの地表面放射強制の年間値を推定した結果について報告する。

[データと放射計算]

地表面放射量の見積りには以下のデータおよび放射計算を用いた。放射計算には、中島他が開発による高精度放射計算コード RSTAR シリーズを 4-stream 法で利用した。

- ① 館野高層気象台 直達・散乱・反射日射観測一分値 (Eppley NIP 型, EKO B 型通風式)
- ② 館野高層気象台 下向き長波放射観測一分値 (Eppley PIR 型)
- ③ 館野高層気象台 高層ゾンデ観測 湿度・気温プロファイル 00Z, 12Z
- ④ スカイラジオメタ観測によるエアロゾルの光学的厚さ・粒径分布 (晴天時のみ約 15 分間隔)

[結果]

地表面短波強制は雲やエアロゾルが日射を遮る日傘効果である。この値は晴天放射量とトータル放射量(雲・エアロゾルの存在する大気を通した放射量)との差で定義される。しかしながら、観測値から晴天放射量を求めることは、雲やエアロゾルの混入のために困難である。一方逆に、放射伝達計算からトータル放射量を求めることは、雲の重なり合いや有限雲についての情報不足のために困難である。そこでここでは、晴天放射量は、ラジオゾンデ観測による温度湿度プロファイルを用いたレイリー散乱大気についての計算により求め、雲+エアロゾルの地表面短波強制 (CAF)、エアロゾル強制 (AF)、および計算誤差推定値 (AE) は以下のように定義した。Ftotal(obs)、Faero(obs)、

Fclear(calc)、Faero(calc)は各々、短波長域(0.3-3.0 μm)での地表面放射量観測値、スカイラジオメーター観測時の地表面放射量観測値、レイリー散乱大気地表面フラックス計算値、エアロゾルの光学特性を入れた地表面放射量計算値である。

$$\text{CAF}=\text{Ftotal}(\text{obs})-\text{Fclear}(\text{calc}) \quad \text{雲+エアロゾル放射強制}$$

$$\text{AF}=\text{Faero}(\text{calc})-\text{Fclear}(\text{calc}) \quad \text{エアロゾル放射強制}$$

$$\text{AE}=\text{Faero}(\text{calc})-\text{Faero}(\text{obs}) \quad \text{計算誤差推定値}$$

雲+エアロゾルの地表面短波強制的1996年の年間平均値は -81 W m^{-2} であった(図4下)。これは、大気上端の太陽入射の約24%に当たる。一方、エアロゾル強制は、3-4月を除く年間平均値が -18 W m^{-2} で、約5%にあたる。

一方、雲の長波強制は、雲が地球放射を閉じ込める温室効果である。下向き長波観測値FLWtotal(obs)と高層観測データを用いた放射伝達計算(3-100 μm)により求めた晴天放射量FLWclear(calc)との差から雲の下向き長波強制を推定した。

$$\text{CFLW}=\text{FLWtotal}(\text{obs})-\text{FLWclear}(\text{calc}) \quad \text{雲の下向き長波放射強制}$$

ところが、夏季の日中に下向き晴天長波放射が明らかに過大評価される事例があった。これは、日中に下層水蒸気量が極小値を持ち、00zと12zの高層観測からの内挿では、日中の可降水量が過大評価される結果であると推測された。そこで、年平均長波放射強制を推定するにあたっては、長波放射の日変化が小さいことを前提に、ゾンデ観測の存在する00zと12zの値のみを用いた。その結果、雲の下向き長波強制的1996年平均値は $+47 \text{ W m}^{-2}$ と見積もられた(図4上)。

[考察]

スカイラジオメタによるエアロゾル光学特性の推定値は、複素屈折率の仮定に依存する。今回利用したスカイラジオメタ観測によるエアロゾル特性のうち、特に粒径分布の精度に疑問が残った。短波放射の計算結果が観測値と矛盾しないことを検証として、エアロゾル光学特性の推定方法を検討することが提案される。特に今回の研究の中で短波放射量とのbest fitによりエアロゾル中の煤の割合を推定したが、今後、この結果をエアロゾルの光学特性の推定に生かす必要がある。

また、館野のような精度の高い地上観測データは世界にも少ないが、今後より多くの地上観測データを収集して短波・長波の雲・エアロゾルの放射強制的推定事例を増やし、衛星データを用いた全球的な地上放射フラックス計算の検証を行う必要がある。

4. 3次元エアロゾル輸送モデルを用いた全球エアロゾル分布の推定

[CCSR エアロゾル気候モデル]

CCSR/NIES 大気大循環モデル (AGCM) にエアロゾル特有の輸送過程を組み込み、エアロゾル3次元輸送モデルを開発した。モデルの解像度は水平約5.6度、鉛直11層である。モデルに必要な物理量データは、風速・気温・比湿について、NCEP (National Center for Environmental Predictions) / NCAR (National Center for Atmospheric Research) 再解析データを用いた調整を行いながら AGCM の計算によって作成された。輸送過程としては、主に発生・移流・拡散・除去(雲水による取り込み・雨滴との衝突・地表付近での乱流混合・重力落下)を考慮した。また、硫酸塩エアロゾルに関しては化学反応も導入し、硫化ジメチルとOHラジカルとの反応による二酸化硫黄の生成、二酸化硫黄とOHラジカルとの気相反応による硫酸塩の生成、二酸化硫黄と過

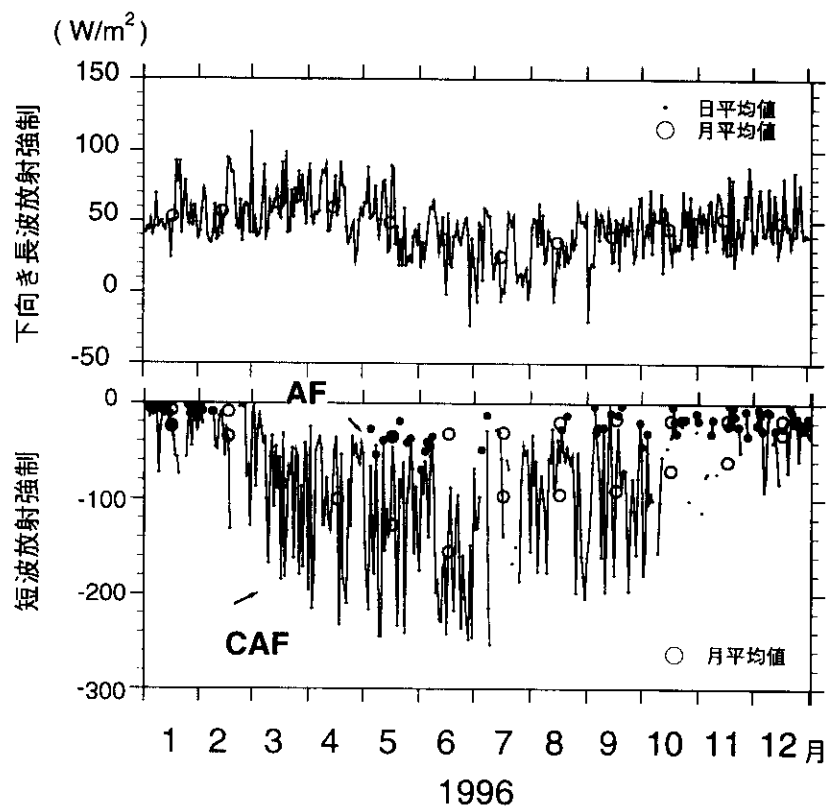


図4：（上図）1996年の雲の地表面下向き長波放射強制(CFLW)の時系列。直線は日平均値、○は月平均値。ただし、00Zと12Zでの値のみ用いた。（下図）雲+エアロゾル地表短波放射強制(CAF)とエアロゾル地表短波放射強制(AF)の時系列。直線と●は日平均値、○（上：CAF、下：AF）は月平均値。ただし、2/8-4/30および7/12-7/30はエアロゾルデータ欠測。

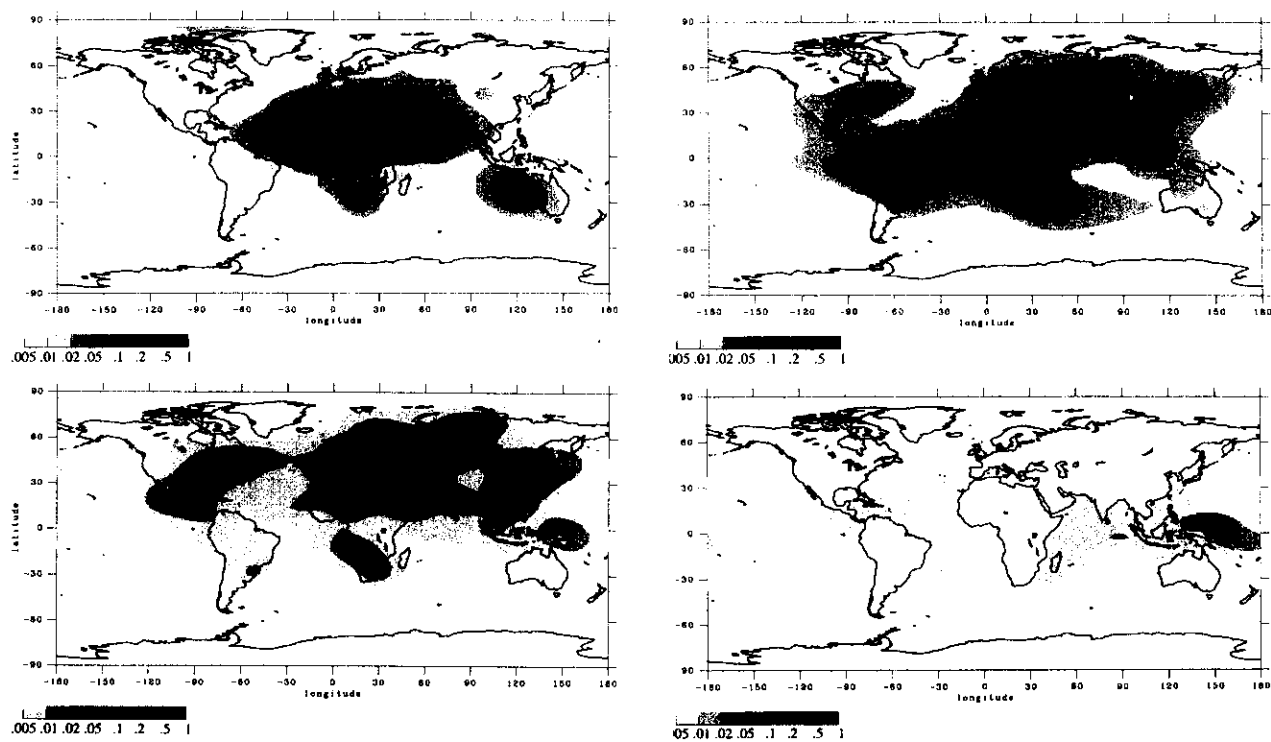


図5： シミュレーションされたエアロゾルの年平均光学的厚さ。(a) 土壌性エアロゾル、(b) 炭素性エアロゾル、(c) 硫酸塩エアロゾル、(d) 海塩エアロゾル。

酸化水素・オゾンとの液相反応による硫酸塩の生成を考慮した。発生源として、炭素性エアロゾルは森林火災・焼き畑・化石燃料消費・木材燃料消費・農業活動・植物起源テルペンを考慮した。各発生源で、有機炭素と黒色炭素との存在比率が異なる。硫黄系に関しては、化石燃料消費や連続的な火山活動による二酸化硫黄・海洋植物起源の硫化ジメチルを導入した。これらの発生量・発生場所は、硫化ジメチルに関しては地表面の太陽放射フラックスを用いてモデル内部で計算されたが、その他は GEIA (Global Emissions Inventory Activity) のデータベースや FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) のデータを基に作成した。海塩・土壌性エアロゾルの発生量は、地上10mの風を見積もり、それを用いてモデル内部で計算された。また、土壌性エアロゾルに関しては、砂漠や半乾燥域から発生するとし、土壌水分も考慮した。気候への影響を評価するにはエアロゾルの鉛直分布の再現性が重要であると考えられるため、地表気温や各層の温位を用いた発生スキームを導入するという工夫を行った。また、炭素性・硫酸塩エアロゾルは、相対湿度に依存して周囲の水蒸気を吸収することによって粒径が変化するとした。さらに、上述した衛星搭載センサ等の光学観測から得られたデータとの比較のために、モデルの各タイムステップ毎に光学的厚さの計算を詳細に行った。各エアロゾルによって異なる粒径分布を考慮し、さらに吸収した水との混合比を考慮した複素屈折率を用いて、ミー理論に基づいて計算した。

[結果と考察]

図5に各エアロゾルの光学的厚さのシミュレーション結果を示す。土壌性エアロゾルは、サハラ地域から貿易風により大西洋上に輸送されている。また、アラビア地域では、モンスーンの強い季節に土壌性エアロゾルが大量に大気中に堆積されている。炭素性エアロゾルは、森林火災・焼き畑起源のものが、中南部アフリカや南アメリカから発生・輸送されているのが目立つ。また、北半球中緯度、特に東アジア・北アメリカ・ヨーロッパでは、化石燃料や木材燃料消費による炭素性エアロゾルの堆積も顕著である。硫酸塩エアロゾルは、北半球中緯度の工業地域に分布が偏っている。海塩エアロゾルは、発生量は高緯度地域で多いものの、粒径が大きいために大気中から除去されやすく、鉛直拡散の強い熱帯域で光学的厚さは大きくなっている。ただし、海塩エアロゾルは、他のエアロゾルと比較して光学的厚さに対する貢献度は小さい。各エアロゾルの除去過程に注目してみると、炭素性・硫酸塩エアロゾルは、雲水による取り込みによって大部分が除去されるが、海塩エアロゾルや土壌性エアロゾルでは乱流混合や重力落下によるものの比率も高い。

特に注目されるシミュレーション結果と観測との一致点を2つ挙げる。まず、人為的寄与が大部分を占める北半球中緯度の工業地域周辺では、炭素性エアロゾルの光学的厚さは硫酸塩エアロゾルとほぼ同程度かもしくはそれ以上であるというシミュレーション結果が、最近の航空機観測と一致したことである。これまでの一般的な認識は、硫酸塩エアロゾルが人為起源の主要エアロゾルであるというものであった。炭素性エアロゾルのうち、有機炭素に関しては硫酸塩エアロゾルと光学的に類似した性質を持っていて太陽放射を散乱する効果が大きいですが、黒色炭素は太陽放射を強く吸収するために大気を暖める効果がある。特に工業地域から放出される炭素性エアロゾルは、黒色炭素の比率が高い。従って、このような炭素性エアロゾルと硫酸塩エアロゾルの可視・赤外放射に対する光学特性の違いから、人為起源による気候変動の影響評価にも大きな変更が生じることになる。各エアロゾルの存在比率がこのように適切に再現できたのは、同じ大気場を用いて様々なエアロゾルを扱うことのできるモデルを構築できたことによるところが大きい。

もう1つは、サハラ西岸の光学的厚さの最大値をとる緯度が季節によって異なる（1月前後は北緯10度付近、7月前後は北緯20度付近）という現象が衛星観測から指摘されているが、この季節変動の要因として新しい説明を提唱したことである。これまでの説は、サヘル地帯での新

たな耕作による人為起源土壌性エアロゾルが自然起源を上回る量発生すればこの季節変動を説明できるというものであったが、この仮定を導入してシミュレーションを行っても観測されているほどの季節変動は再現することができず、不完全な説であった。しかし、本研究で複数の種類のエアロゾルを同時に扱ってシミュレーションしたところ、この季節変動は、サハラからの自然起源土壌性エアロゾルと、1月前後のギニア湾沿岸からの森林火災・焼き畑起源の炭素性エアロゾルの混合によって説明できることを初めて示した。

今後は、衛星データ解析結果と比較しながら、エアロゾルと雲の相互作用のモデリングを進めていく必要がある。IPCC1995年レポートでも、エアロゾルの間接効果の不確定性が非常に大きくなっており、信頼できる気候変動予測を行うためにもこの領域の研究が不可欠である。また、本研究で開発したモデルを on-line モデルにすることにより、エアロゾルの分布と大気場との間にフィードバックをかけ、過去の気候の再現、もしくは将来の気候予測をより適切にシミュレーションすることも必要である。

5. エアロゾルモデルの詳細な検討とエアロゾルの全球的特性の見積り

エアロゾルの気候影響把握が、気候変動研究においてひとつの重要な課題となっている。エアロゾルは、太陽放射を直接散乱・吸収することにより直接放射収支を変動させる直接効果と、雲凝結核として働くために雲の微物理特性を変調させ、気候に対して影響を及ぼす間接効果をもつが、最近の研究によると、これらの影響は、温室効果のおよそ3分の1をも相殺する可能性が指摘されている。しかしながら、エアロゾル特性に関する知見が十分でないため、これらの推定値にはまだ大きな不確定性が含まれており、直接効果で2倍、間接効果に至ってはほとんど分かっていないのが現状である。この不確定性を減少させるために、観測によるエアロゾル特性把握とそのモデリングの推進が求められている。

本研究ではこれらの課題に取り組み、不確定性の大きいエアロゾルの放射強制力のより正確な評価を目指してきた。その結果、以下の成果が得られた。

[エアロゾルモデリング]

4種（硫酸塩、炭素性、土壌性、海塩）のエアロゾルモデルの基幹部分の開発が終了した。これを受けて、モデルを利用した応用研究を行った。例えば、衛星観測結果と比較することによってエアロゾルの全球分布を明らかにした。それによると、これまで無視されてきた炭素性エアロゾルの寄与が硫酸塩エアロゾルに対しても無視できないことが示された。大西洋中央部でも土壌性エアロゾルと炭素性エアロゾルによる光学的厚さの大きさは同程度であることが明らかになった（図6，Takemura et al., 2000）。これらの成果は、IPCCや世界の研究者によって引用され（Kinne, 2000）、世界的に他モデルや観測結果との性能比較も行われた。このようなモデルによると、本エアロゾルモデルは、他のモデルに比べても性能が良いことが明らかになった。しかし、場所によっては観測値と大きな差が見られる場所もあるので、より現実的な再現が得られるようにモデルを改良する必要もあることがわかった。これらの改良の一環として、風場の再現精度向のためにT21からT42へモデル分解能を上げた。また、雲との混合状態に伴う放射強制力の変化、一次散乱アルベドの評価などもおこなった。

今後の課題は、ガスモデルとの結合と力学モデルとフルカップルしたモデルを走らせることである。

[雲－エアロゾル相互作用モデリング]

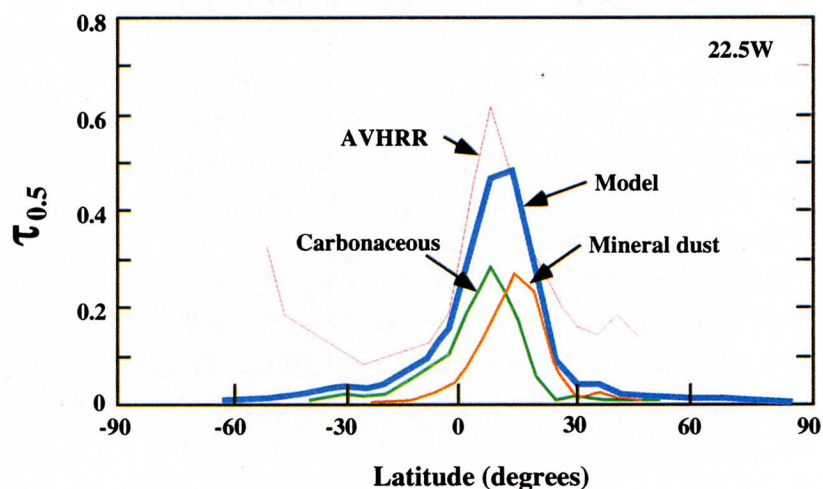


図6：太平洋で再現されたエアロゾルの光学的厚さの緯度分布。(Takemura et al., 2000)

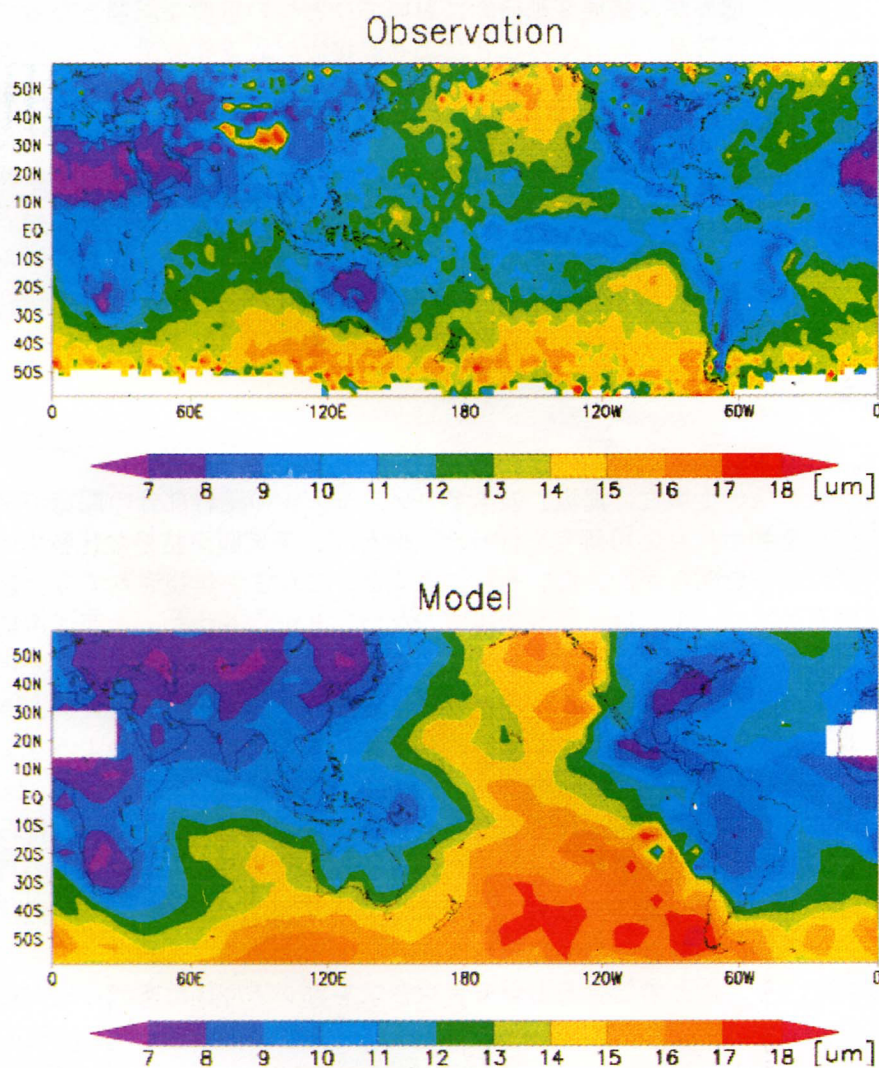


図7：AVHRRによるリモートセンシングとモデルによる低層雲の有効粒子半径の全球分布の比較。(Suzuki, 2000)

雲とエアロゾルの相互作用をモデル化するために、エアロゾル数によって雲水数を関係づけた。さらにモデルで推定される雲水量と雲水数を用い、エアロゾルの間接効果のひとつである雲の寿命効果を取り入れる Berry のパラメタリゼーションによって雲水の生成率をモデル化した。得られた低層雲の有効粒子半径の全球分布を衛星観測結果と比較した。その結果、モデル結果は観測結果の特徴をほぼ再現できることが明らかになった (図 7, Suzuki, 2000)。それによると、大陸周辺での大規模な雲粒径の減少や熱帯域における植生燃焼起源エアロゾルの雲の粒径への影響などがモデルによって表現できることが明らかになった (図 8, Suzuki, 2000)。しかし、赤道域の対流雲が多く、また上層雲が発達する地域で、モデル値と観測値に系統的な差が出ることもわかった。これは、モデルでは対流雲に対するエアロゾル効果の取り込みが考慮されていないことや、観測では上層雲の除去が不十分なことなどが理由として考えられる。エアロゾル影響のモデル依存性を見るために、Berry 型と Kessler 型のパラメタリゼーションによるシミュレーション結果を比較したところ、衛星観測結果を再現するためには、Berry 型のようなエアロゾルが及ぼす雲の寿命効果を取り入れることが重要であることが分かった。今後の課題は、エアロゾルモデルと雲モデルをフルカップルしたモデルを走らせることである。また、対流雲へのエアロゾルの影響をモデル化する必要がある。

[エアロゾルの光学特性の観測]

これまでに開発した可視・近赤外波長アルゴリズムを適用して得られたエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の全球分布を得た。その結果は、IPCC など多くの研究者によって引用された。さらに、海色衛星 (SeaWiFS) の 4 チャンネルデータを利用した、4 種のエアロゾルを分離するアルゴリズムを開発した。主要なエアロゾルには砂塵、硫酸塩、炭素性、海塩エアロゾルがあるが、このアルゴリズムによると粒径の大小と青色光吸収特性の有無により、これらを分離することが可能であることが示唆された。アルゴリズムを SeaWiFS データに適応したところ、炭素性エアロゾルと砂塵性エアロゾルの分布などが、他のエアロゾルから分離できることが明らかになった (図 9, Usui, 2000)。

6. 新しい IPCC シナリオ (SRES) に基づいた気候変化実験

人為活動に伴って増加しているエアロゾルの気候影響には、それ自身が太陽放射を吸収・散乱する直接効果と、エアロゾル粒子が雲核となって雲の光学的・微物理的特性を変化させる間接効果とがあることが指摘されている (IPCC, 1996)。最近では、硫酸エアロゾルの直接効果を考慮した将来の気候変化見通し実験が行われてきており、硫酸エアロゾルの増加によって、2100 年における全球平均気温上昇が 0.4 ~ 0.8 度程度緩和されるという結果が得られている (Mitchell and Johns, 1997; Emori et al., 1999; etc.)。Roeckner et al. (1999) は大気海洋結合モデルに硫酸エアロゾルの化学モデルを組み込み、IS92a シナリオを用いた将来の気候変化見通し実験を行った。硫酸エアロゾルの直接効果に加えて間接効果の一部 (雲の光学的厚さが増大する粒径効果のみ) も考慮した場合、2050 年における全球平均気温上昇が温室効果気体のみ増加させた場合と比べて 1.0 度程度緩和されるとしている。しかし、彼らのモデルでは、硫酸エアロゾルと同等かあるいはそれ以上の放射強制力を持つ可能性が示唆されている炭素性エアロゾルなど、硫酸以外のエアロゾルによる気候影響は勘案されていない。また、IS92a シナリオには 1985 年以降の経済構造の変化 (旧ソ連・東欧諸国の変革、アジアの経済成長等) が考慮されていないなどの問題があるため、最近では新しい排出シナリオが作成されている (IPCC, 2000)。本課題では、硫酸、炭素性、海塩、土壌性の主要な 4 種類のエアロゾルによる直接および間接効果を導入した大気海洋結合モデルを用いて、新しい排

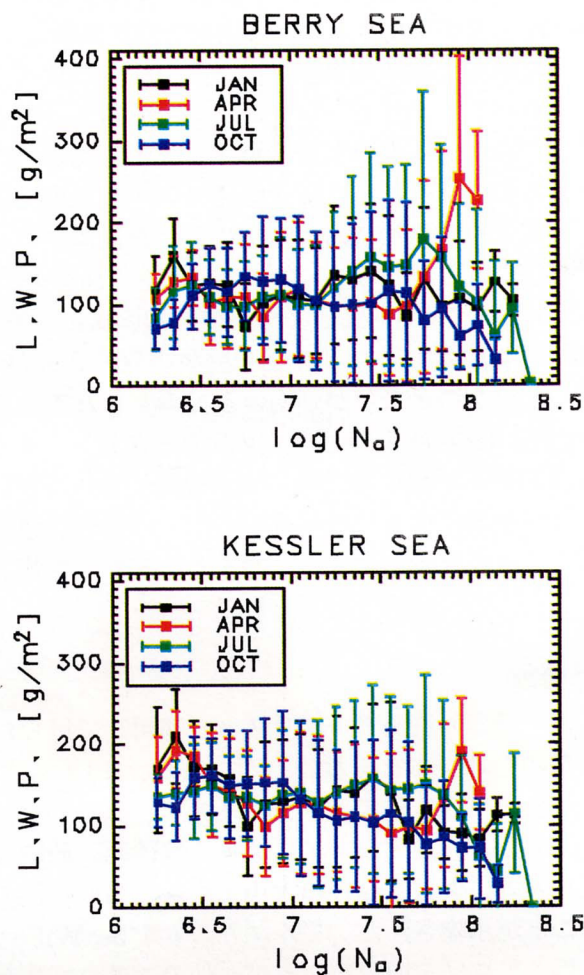


図8：Berry型モデルとKessler型モデルによる雲水量のエアロゾル数依存性。AVHRR観測によると雲水量はエアロゾル数にあまり依存しないので（図8）、Berry型モデルの方が妥当であると考えられる。（Suzuki, 2000）

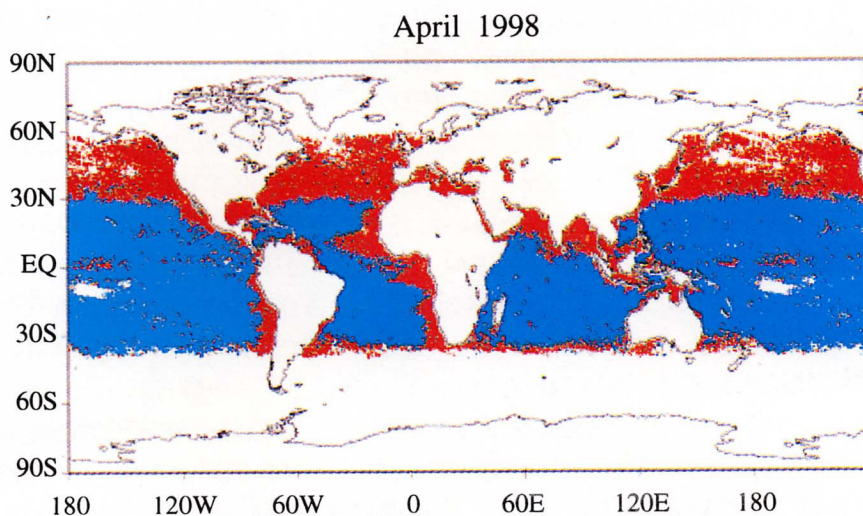


図9：青色光吸収性エアロゾルと非吸収エアロゾルの全球分布。（Usui, 2000）

出シナリオに基づく将来の気候変化見通し実験を行った。

[モデルと実験]

計算には CCSR/NIES AGCM, CCSR OGCM, 海水の熱力学モデル, 河川モデルから構成される全球大気海洋結合モデルを用いた。分解能は大気が水平 T21 (5.6度相当) 鉛直 20 層, 海洋が水平 2.8 度鉛直 17 層である。再現された気候が非現実的な状態にドリフトするのを避けるため, 大気・海洋間の熱と水のフラックスに関しては人工的な補正項を与える「フラックス調節」を行っている。

実験は 1890 年より開始し, 1990 年以前は観測に基づき, 1990 年以降は表 1 に示す IPCC の新しい排出シナリオ (SRES シナリオ) に基づいて行った。本シナリオに関して注目すべきことは,

表 1: IPCC の新しい排出シナリオ

A1	高成長社会	高度な技術開発により環境を制御, 創造
A2	多元化社会	各地域が独自の文化, 伝統を重んじて発展
B1	持続発展型社会	環境に優しい技術開発が促進 (脱物質化)
B2	地域共存型社会	地域ごとに経済成長と環境保護とを両立

IS92a では上昇し続けていた SO_2 排出量が, 2030 年以降はすべてのシナリオにおいて減少に転じていることである。温室効果気体 (GHG) は CO_2 , CH_4 , N_2O , Halocarbons を個別に考慮し, CO_2 , CH_4 , N_2O 濃度の時間変化は各シナリオに従うとした。対流圏オゾン濃度は Hadley Center の化学輸送モデルで計算された 3 次元データを用い, 対流圏オゾン全量の時間変化は各シナリオに従うとした。エアロゾルは硫酸, 炭素性, 海塩, 土壌性の 4 種類とし, それらの濃度分布は CCSR エアロゾル輸送モデル (Takemura et al., 2000) により off-line で求めた。硫酸および炭素性エアロゾルの時間変化は各排出シナリオに従うとし, 海塩, 土壌性エアロゾルについては 1990 年における濃度を気候値として与えた。

エアロゾルの直接効果は, 各エアロゾルの光学特性の波長依存性, 湿度依存性を個別に考慮し, 放射伝達方程式において陽に求めている。土壌性エアロゾルについては吸湿性が小さいと仮定しているため, その光学特性は湿度に依存しない。間接効果は, 雲粒数密度をエアロゾル数密度から評価することにより導入されている。雲粒数密度が増加することによって放射伝達における雲粒の平均有効半径が小さくなり, 雲の光学的厚さが増大する粒径効果だけでなく, 雲粒が小さくなることによって雲粒から雨粒への変換の時間スケールが長くなる寿命効果も考慮した。

[結果と考察]

GHG およびエアロゾルによる瞬時放射強制力の全球・年平均値の時間発展を図 10 に示す。放射強制力は, 対流圏界面付近の下向を正とした放射フラックスの差として定義される。例えば, 2100 年における CO_2 による放射強制力は, 2100 年の計算において, CO_2 濃度を 2100 年の値とした場合と 1890 年の値とした場合の放射フラックスの差である。図 10 を見ると, GHG による放射強制力は基本的に単調増加しており, なかでも CO_2 による放射強制力が卓越している。炭素性および硫酸エアロゾルによる直接効果は, 全球平均値としてはそれぞれ正および負であり, その時間発展は各排出シナリオに従っている。シナリオ間の差が大きいものの, この両者はほぼ相殺し合っているといえる。間接効果 (粒径効果のみ) は A2 を除けばあまり変化せず, およそ -0.6 W/m^2 前後である。A2 シナリオでも 2020 年以降は約 -1.0 W/m^2 でほぼ一定である。1990 年において見積

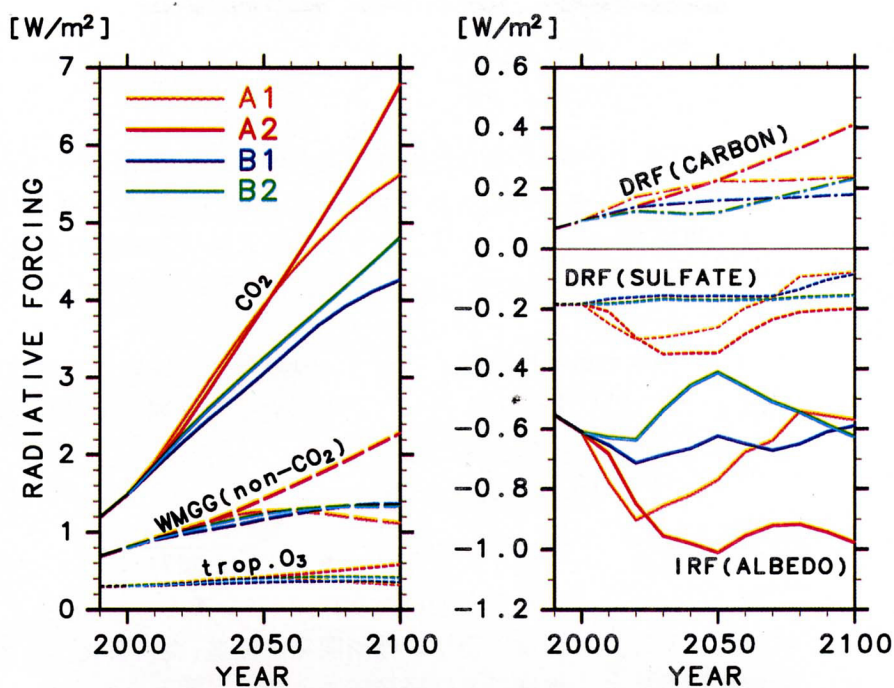


図 10: 全球および年平均した瞬時放射強制力の時間発展. 図中の WMGG は CH₄, N₂O, Halocarbons を, DRF は直接効果を, IRF は間接効果を表す.

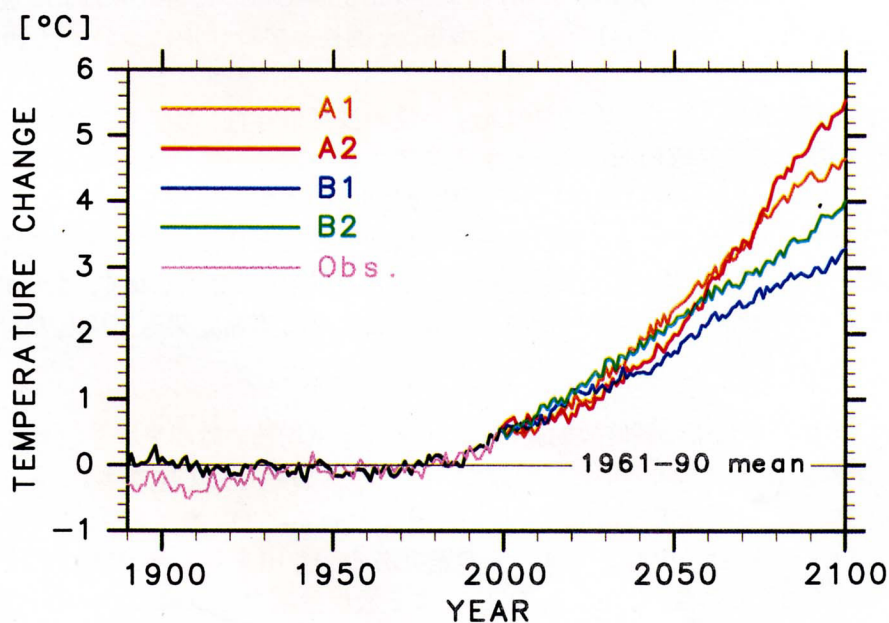


図 11: 全球および年平均した地表面気温の時間発展. 1961～1990年の30年平均値(13.7°C)からのずれを示す.

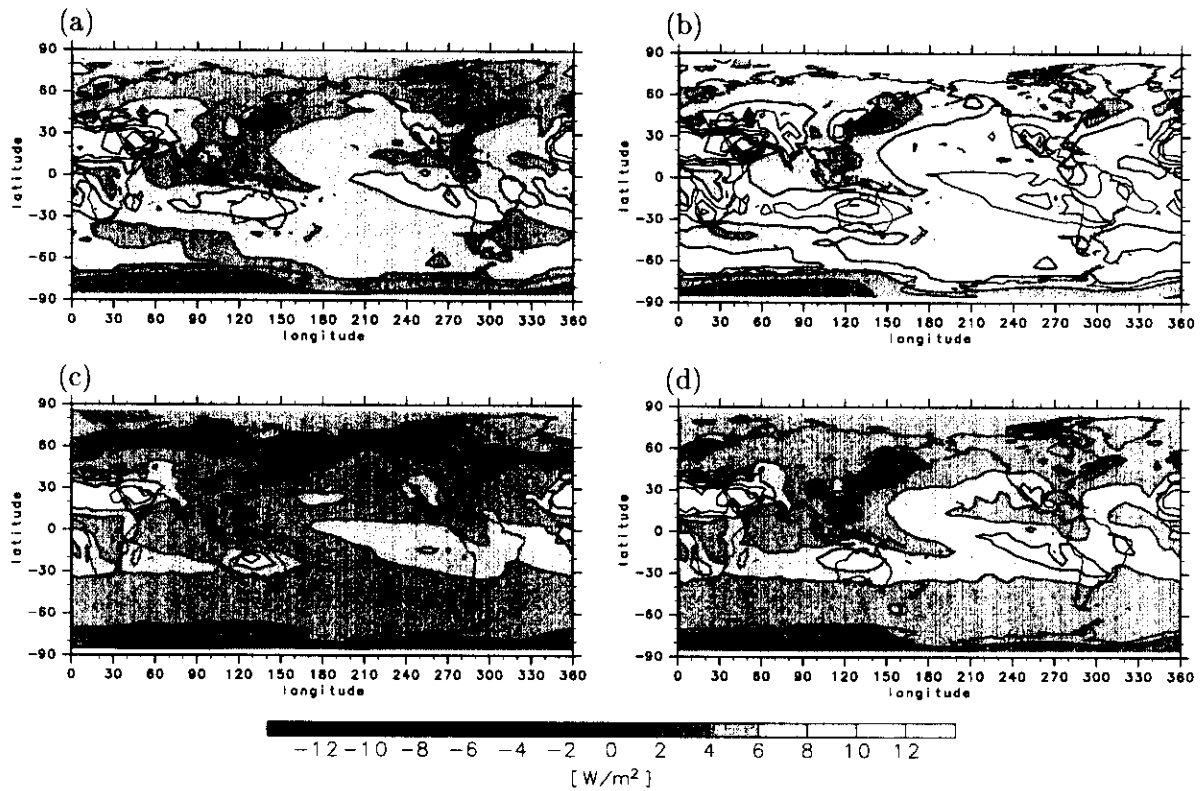


図 12: 2100 年における全放射強制力の地理的分布. (a) A1 シナリオ, (b) A2 シナリオ, (c) B1 シナリオ, (d) B2 シナリオ.

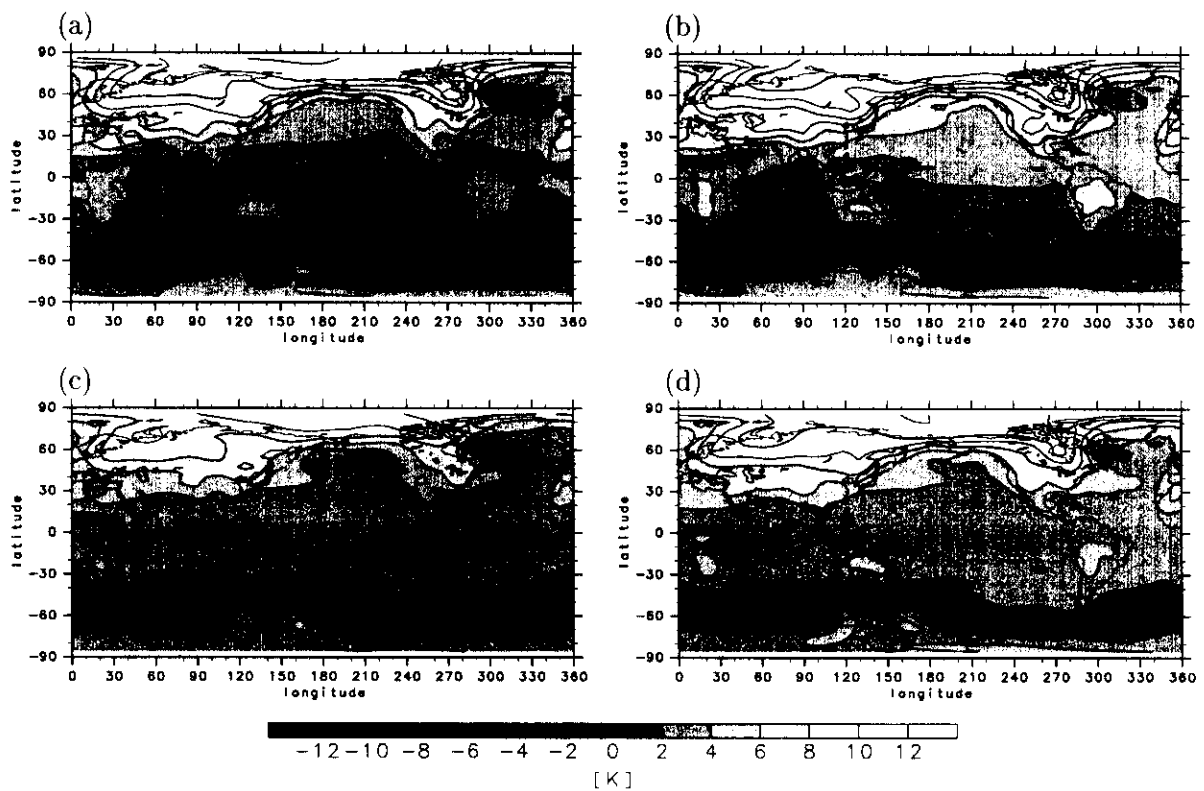


図 13: 2091 ~ 2100 年の 10 年平均した地表気温上昇の地理的分布. 1961 ~ 1990 年の 30 年平均値からの偏差を示す. (a) A1 シナリオ, (b) A2 シナリオ, (c) B1 シナリオ, (d) B2 シナリオ.

もられた寿命効果は約 -0.56 W/m^2 で粒径効果とはほぼ同程度であったことから、将来にわたっても寿命効果と粒径効果とがほぼ同程度であると仮定すると、エアロゾルによる正味の気候影響は -1.2 W/m^2 程度 (A2 では -2.0 W/m^2 程度) であると考えられる。

図11は、全球および年平均した地表面気温上昇度の時間発展を示す。1990年以降、すべてのシナリオに対して温暖化が進んでいる。各排出シナリオが異なり始める2000年以降2050年頃まではシナリオ間の差異があまりはっきりせず、ほぼ同様の温度上昇が続いている。GHGの気候影響だけを考えれば、A1、A2シナリオの温度上昇が大きくなるはずであるが、これらのシナリオでは同時にエアロゾルによる正味の冷却効果も大きいため、結果としてB1、B2シナリオよりも温度上昇が抑制されている(図10)。2050年以降はCO₂の増加に伴う放射強制力が卓越してくるため、各シナリオ毎の差がはっきりし始め、2100年における温度上昇度はA2が最大で約5.5°C、B1が最小で約3.3°Cである。

2100年時点における全放射強制力の地理的分布を図12に示す。図10からも明らかなように、2100年においてはCO₂による放射強制力が卓越しているため、すべてのシナリオにおいて比較的一様な分布を示している。また、振幅の大小を除けば、放射強制力分布のシナリオ間の差異は小さい。アラビア半島周辺では炭素性エアロゾルによる温室効果が大きいため、強い正の放射強制力を示している。北緯30度以北ではエアロゾルの間接効果による冷却効果が強いいため、GHGによる温室効果が抑制されている。あまりはっきりしないものの、この効果はエアロゾル排出量の大きいアジア、北米東岸、西ヨーロッパで顕著である。

図13は、2091～2100年の10年平均した地表気温上昇の地理的分布を示す。放射強制力同様、振幅の大小を除けば、空間パタンのシナリオ間の差異は小さく、基本的に同じ傾向(いわゆる温暖化パターン)を示している。全球平均地表気温上昇が最も大きいA2シナリオでは、東部シベリア域で17.8度もの温度上昇を示しており、B1シナリオの1.5倍程度となっている。

[結論]

多種類のエアロゾルによる直接および間接的な気候影響を考慮した大気海洋結合モデルを用いて、IPCCの新しいシナリオ(SRESシナリオ)に基づく将来の気候変化見通し実験を行った。2100年における全球平均地表気温上昇(1960～1990年の30年平均からの偏差)はA2シナリオが最大で約5.5度、B1シナリオが最小で約3.3度である。エアロゾルによる間接効果が比較的大きな冷却効果を持つため、エアロゾルの増加(減少)に応じて温暖化が減速(加速)される。2100年においてはGHGによる温室効果が卓越するため、すべてのシナリオにおいてほぼ同じ昇温パターンを示す。

7. まとめ

本研究では、全球規模の気候変動予測における不確実性を削減することを目的として、気候にもたらすエアロゾルと雲の効果を研究した。主な成果を以下にまとめる。

(1)CCSR/NIES気候モデルの重要な特徴は、世界各国のモデルに比較して放射過程の取扱が高精度な点である。Michell and Johns (1997)等従来のモデルではエアロゾルの効果が地表面アルベドに換算されていた。本研究において、エアロゾルの効果を放射伝達方程式で直接解いた結果、従来の実験では、エアロゾルの放射効果が過大評価されている可能性が高いことが指摘された。

(2)衛星データから得た雲の分布を用いた放射計算により、地表面における雲の放射効果を推定すると共に、世界基準放射観測ネットワークに指定された観測点での高精度地上放射観測データ

を用い、太陽放射および赤外放射に対する雲とエアロゾルの放射効果の毎時の時系列を1年間を通じて求めた。

(3)CCSR/NIES 大気大循環モデルを基に開発した3次元エアロゾル輸送モデルを用いて、対流圏に存在する主要なエアロゾルと考えられている土壌性・硫酸塩・炭素性・海塩の4種類のエアロゾルについて同一モデル内での3次元シミュレーションを行った。これにより、NOAA衛星のAVHRRデータから推定されたエアロゾルの光学的厚さや粒径指標の全球分布との比較が初めて可能になった。

(4)エアロゾルモデルから得られるモデル結果の吟味をおこなった。特に、雲との混合状態に伴う放射強制力の変化、一次散乱アルベドの評価などをおこなった。雲とエアロゾルの相互作用に関しては、モデル内で使用しているパラメタリゼーションを吟味し、雲粒の寿命効果を適切に取り込むと、モデル結果と衛星リモートセンシング結果とを近づけることができた。また、海色衛星の4チャンネルデータを利用した、主要4種のエアロゾル(硫酸塩、炭素性、土壌起源、海塩)分類の可能性が示唆できた。

(5)多種類のエアロゾルによる直接および間接的な気候影響を考慮した大気海洋結合モデルを用いて、IPCCの新しいシナリオ(SRESシナリオ)に基づく将来の気候変化見通し実験を行った。2100年における全球平均地表気温上昇(1960～1990年の30年平均からの偏差)はA2シナリオが最大で約5.5度、B1シナリオが最小で約3.3度である。エアロゾルによる間接効果が比較的大きな冷却効果を持つため、エアロゾルの増加(減少)に応じて温暖化が減速(加速)される。2100年においてはGHGによる温室効果が卓越するため、すべてのシナリオにおいてほぼ同じ昇温パターンを示す。

以上の結果から、地球温暖化物質の増加に伴う気候変化の予測において、光学特性の異なる多種類のエアロゾルについての詳細なデータを高精度なエアロゾルモデルを用いて作成し、気候モデル実験においてその情報を採用することの重要性が示された。また、エアロゾルの直接の放射影響(直接効果)だけでなく、エアロゾルの存在が雲の特性を変化させる間接効果が、同様かそれ以上に重要であるということが示された。今後は、エアロゾルのリモートセンシングをさらに高精度化すると共に間接効果のモデル化のための基礎的知見を観測およびモデル研究においてさらに積み上げることが必要である。

8. 参考文献

- Emori, S., T. Nozawa, A. Abe-Ouchi, A. Numaguti, M. Kimoto and T. Nakajima, 1999: Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering, *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1299-1307.
- Hartmann, D. L., 1993: Radiative Effects of Clouds on Earth's Climate. *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, Academic Press, 151-173.
- Haywood, J. M., R. J. Stouffer, R. T. Wetherald, S. Manabe and V. Ramaswamy, 1997: Transient response of a coupled model to estimated changes in greenhouse gas and sulfate concentrations. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1335-1338.

- IPCC, 1996 : *Climate Change 1995: The Science of Climate Change.*, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK., 572p.
- IPCC, 2000: *Special Report on Emission Scenarios*, Cambridge Univ. Press (to be published).
- Kiehl, J. T. and B. P. Briegleb, 1993 : The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, **260**, 311-314.
- Kinne, S., 2000: Private communication for the model intercomparison results.
- Langner, J. and H. Rodhe, 1991 : A global three dimensional model of the tropospheric sulfur cycle. *J. Atmos. Chem.*, **13**, 225-263.
- Mitchell, J. F. B. and T. C. Johns, 1997 : On modification of global warming by sulphate aerosols. *J. Climate*, **10**, 245-267.
- Nakajima, T., M. Tsukamoto, Y. Tsushima and A. Numaguti, 1995 : Modelling of the radiative process in a AGCM, *Climate System Dynamics and Modelling, Reports of A New Program for Creative Basic Research Studies*, T. Matsuno ed., **I-3**, 104-123.
- Roeckner, E., L. Bengtsson, J. Feichter, J. Lelieveld and Rodhe, 1999: Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle, *J. Clim.*, **12**, 3004-3032.
- Suzuki, K., 200: 大気大循環モデルと衛星観測を用いた雲-エアロゾル相互作用の研究、鈴木健太郎、修士論文、東京大学、1999年3月。
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000: Global simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins with a three-dimensional model, *J. Geophys. Res.* (in press).
- Usui, 2000: 海色観測衛星によるエアロゾルの全球分布特性の導出。白井崇行、修士論文、東京大学、1999年3月。
- Zhang, Y.-C. and Rossow, W. B., 1995: Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets. 1. Method and sensitivity to input data uncertainties., *J. Geophys. Res.*, **100**, 1149-1165.

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- Higurashi, A., and T. Nakajima, 1999: On the global aerosol retrievals with AVHRR and OCT-S. ALPS' 99, Jan. 17-22, 1999, Hotel La Chaudanne, Meribel, France.
- Higurashi, A., and T. Nakajima, 1998: A characterization of aerosols on global scale with two channel remote sensing. 32nd Scientific Assembly of COSPAR, July 12-19, 1998, Nagoya congress Center, Nagoya, Japan.

Nozawa, T., S. Emori, A. Numaguti, T. Takemura, T. Nakajima, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto : Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change based on IPCC SRES scenarios. 11th Symposium on Global Change Studies, Long Beach, CA, U.S.A.

江守正多, 阿部彩子, 沼口敦, 野沢徹, 木本昌秀 : IPCC シナリオに基づく全球大気海洋結合モデルによる気候変化実験. 日本気象学会 1998 年春季大会.

高萩 縁 他 : 雲とエアロゾルの放射効果の研究 (その 1) 館野観測とモデルによる地表面短波放射強制の解析. 日本気象学会 1997 年秋季大会.

高萩 縁 他 : 館野における地表面放射への雲とエアロゾルの影響の見積り. 日本気象学会 1998 年春季大会.

野沢徹, 江守正多 他 : 多種類のエアロゾルによる直接・間接効果を考慮した場合の全球大気海洋結合モデルを用いた気候変化実験. 日本気象学会 1999 年秋季大会, 福岡.

野沢徹, 江守正多 他 : 大気海洋結合モデルによる将来の気候変化見通し 実験における対流圏エアロゾルの気候影響. 日本気象学会 2000 年春季大会, つくば.

(2) 論文発表

○ Nakajima, T., and A. Higurashi, 1998: A use of two-channel radiances for an aerosol characterization from space. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3815-3818.

○ Higurashi, A., and T. Nakajima, 1999: Development of a Two Channel Aerosol Retrieval Algorithm on Global Scale Using NOAA / AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, 56, 924-941.

○ Higurashi, A., 1998: A study of aerosol properties on global scale using satellite remote sensing. University of Tokyo, Ph. D. thesis.

○ Takayabu, Y.N. et al., 1999: Estimate of the cloud and aerosol effects on the surface radiative flux based on the measurements and the transfer model calculations. Part I: Shortwave forcing in Tateno, Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.77, 1007-1021.

○ Emori, S., T. Nozawa, A. Abe-Ouchi, A. Numaguti, M. Kimoto and T. Nakajima, 1999: Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77, 1299-1307.

○ Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000: Global simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins with a three-dimensional model, *J. Geophys. Res.* (in press).

○ Higurashi, A., and T. Nakajima, 1999: Development of a Two Channel Aerosol Retrieval Algorithm on Global Scale Using NOAA / AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, 56, 924-941.

○ Higurashi, A., T. Nakajima, B. N. Holben, A. Smirnov, R. Frouin, B. Chatenet, 2000: A Study of Global Aerosol Optical Climatology with Two Channel AVHRR Remote Sensing, *J. Climate*, 13, 2011-2027.

○ Nozawa, T., H. Kanzawa, Y.N. Takayabu, S. Sugata, S. Emori, A. Higurashi, K. Takata, A. Numaguti, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto, 1999 : Direct and indirect radiative forcings due to various aerosols. CGER's Supercomputer Activity Report Vol.7, 16-21.