

論文の内容の要旨

論文題目 A Study on Aerosol Distributions and Optical Properties with a Global Climate Model
(全球気候モデルによるエアロゾルの分布及び光学特性に関する研究)

氏 名 竹 村 俊 彦

大気中の浮遊粒子状物質（エアロゾル）は、太陽・赤外放射を散乱・吸収したり（直接効果）、雲のアルベドや寿命を変化させたり（間接効果）することによって、気候システムに重大な影響を及ぼすことが指摘されている。しかし、2001年に発表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第3次報告書においても、温室効果気体と比較してエアロゾルによる気候変動の定量的評価は依然として不確定性が高い。この主要原因として、エアロゾルは分布に時間的・空間的に大きな偏りがあり、さらに様々な化学組成や粒径分布を持つため、影響評価の基礎となるモデリングが困難であったことが挙げられる。過去には1種類毎のエアロゾル分布に関するモデリング研究は数多くなされてきたが、1種類のみでの取り扱いであるために期間や地点が限られている地表濃度の観測としか比較ができなかった。従って、時間的・空間的に不均一な分布をしているエアロゾルが全球規模で正確にシミュレートされたか疑問である。しかし、近年、衛星や地上観測網のリモートセンシングのデータから、エアロゾルの全球分布の様子が気候変動評価の指標に近い光学パラメータとして得られるようになってきた。従って、これら光学観測データはエアロゾルモデリングの妥当性評価に有効であるが、光学観測では様々な種類のエアロゾルの混合状態を計測している。そこで本研究では、対流圏主要エアロゾルすべてを同時に扱うことのできる全球3次元エアロゾルモデルを開発し、光学的厚さ・オンゲストローム指数（粒径の指標）・1次散乱アルベドの全球分布を導出した。そして、シミュレーション結果を光学観測と比較・検証し、その上で、直接効果放射強制力の定量的評価を行った。また、IPCCの最新の汚染物質排出量予測であるSRESシナリオを用いた将来のエアロゾル分布予測実験を実施した。

本モデルでは炭素性（黒色炭素・有機物）・硫酸塩・土壌性・海塩のエアロゾルを扱う。東京大学気候システム研究センター(CCSR)/国立環境研究所(NIES)大気大循環モデルと結合しており、解像度はT42(2.8°×2.8°)、鉛直11層である。主なエアロゾル輸送過程は発生・移流・拡散・化学反応（硫黄系）・除去（雨滴との衝突・雲水への取り込み・乱流混合・重力落下）である。発生源として、炭素性エアロゾルは森林火災・化石燃料・木材燃料・農業活動・植物活動、硫黄は海洋植物プランクトン（硫化ジメチル）と化石燃料・火山（二酸化硫黄）を考慮し、年平均又は月平均値の全球分布データを与える。土壌粒子は地上10m風速・土壌水分・植生、海塩粒子は海上10m風速をパラメータとしてモデル内部で発生量を計

算する。また、種類によるエアロゾルの粒径分布・吸湿成長・複素屈折率の違いを考慮した光学的厚さや太陽・赤外領域にわたる放射過程の計算を行う。本研究で示す結果は、将来予測実験を除いて、米国環境予測センター(NCEP)/大気研究センター(NCAR)の再解析データ(風速・気温・比湿)を用いてナudgingをかけながら計算したものである。

エアロゾルの光学パラメータと直接効果放射強制力の年平均分布の計算結果を図1に示す。シミュレーションによると、アフリカ北部やアラビア半島周辺では土壤粒子が卓越しているため光学的に厚く、オングストローム指数は小さく(すなわち大粒子)、1次散乱アルベドは0.85前後と小さい。一方、アフリカ中南部や南米では森林火災の影響により、オングストローム指数は大きく、1次散乱アルベドは乾季には0.85前後となる。また、北半球中緯度では人為起源エアロゾルにより光学的に厚く、オングストローム指数は1.0から1.5程度と小さく、1次散乱アルベドは0.9前後となっている。これらの観測との比較の一例を図2に示す。光学的厚さは各地で季節変動を含めて定量的に良い一致をみている。シミュレーションでは、北半球中緯度で、従来から考えられていた人為起源硫酸塩エアロゾルの他に人為起源炭素性エアロゾルの光学的厚さも大きいことを示している(図2a)。これは近年の多くの観測結果と同等の傾向である。また、遠洋上の小さい光学的厚さも再現されている(図2b)。但し、森林火災のピークに1~2ヶ月の差があるため(図2c)、本モデルで使用した既存の森林火災起源エアロゾル発生量データの見直しが必要であると考えられる。オングストローム指数に関しては、アフリカ南部雨季の光学的に薄い季節にモデルの方が大きく評価している他は観測との一致度は高い。1次散乱アルベドは北半球中緯度・遠洋・森林火災地域ではモデルで示された特徴は観測でも見られるが、砂漠域ではモデルの方が小さい値を示している(図2d)。本研究では、気象学分野一般に普及している土壤粒子の複素屈折率に関するデータベースを基に光学パラメータ及び放射過程の計算を行っているが、そのデータベースの太陽放射吸収の部分が高すぎないかという指摘が最近なされてきている。本モデルと観測との相違もこの指摘と一致しており、土壤粒子の吸収係数に関する詳細な検証が今後必要である。検討課題は残るものの、主要エアロゾル混合状態の全球分布をシミュレートし、各光学パラメータに対する観測との比較・検証を行ったことが本研究の特色の1つであり、これにより問題点も明確になった。

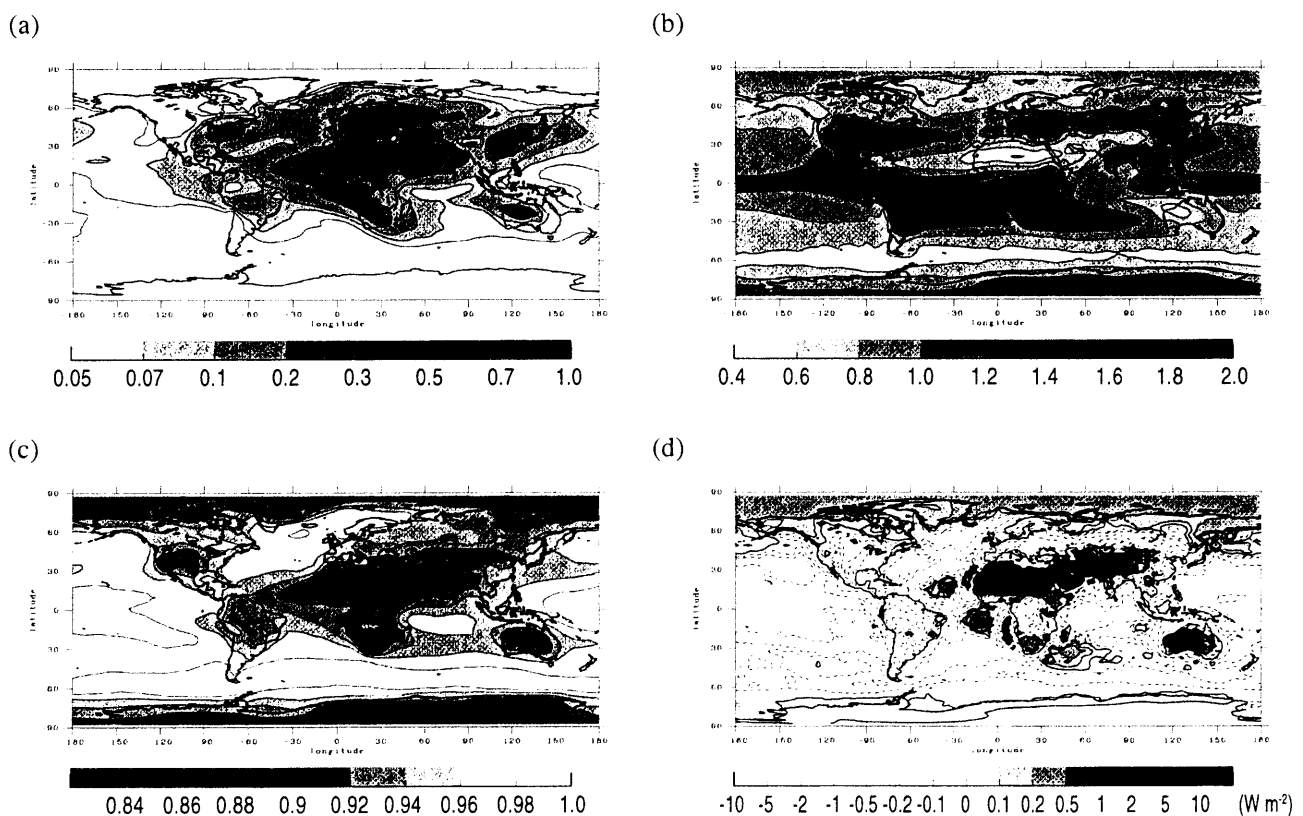


図1 シミュレートされたエアロゾルの (a) 光学的厚さ($0.55\mu\text{m}$) (b) オングストローム指数 (c) 1次散乱アルベド(可視) (d) 直接効果放射強制力の年平均分布

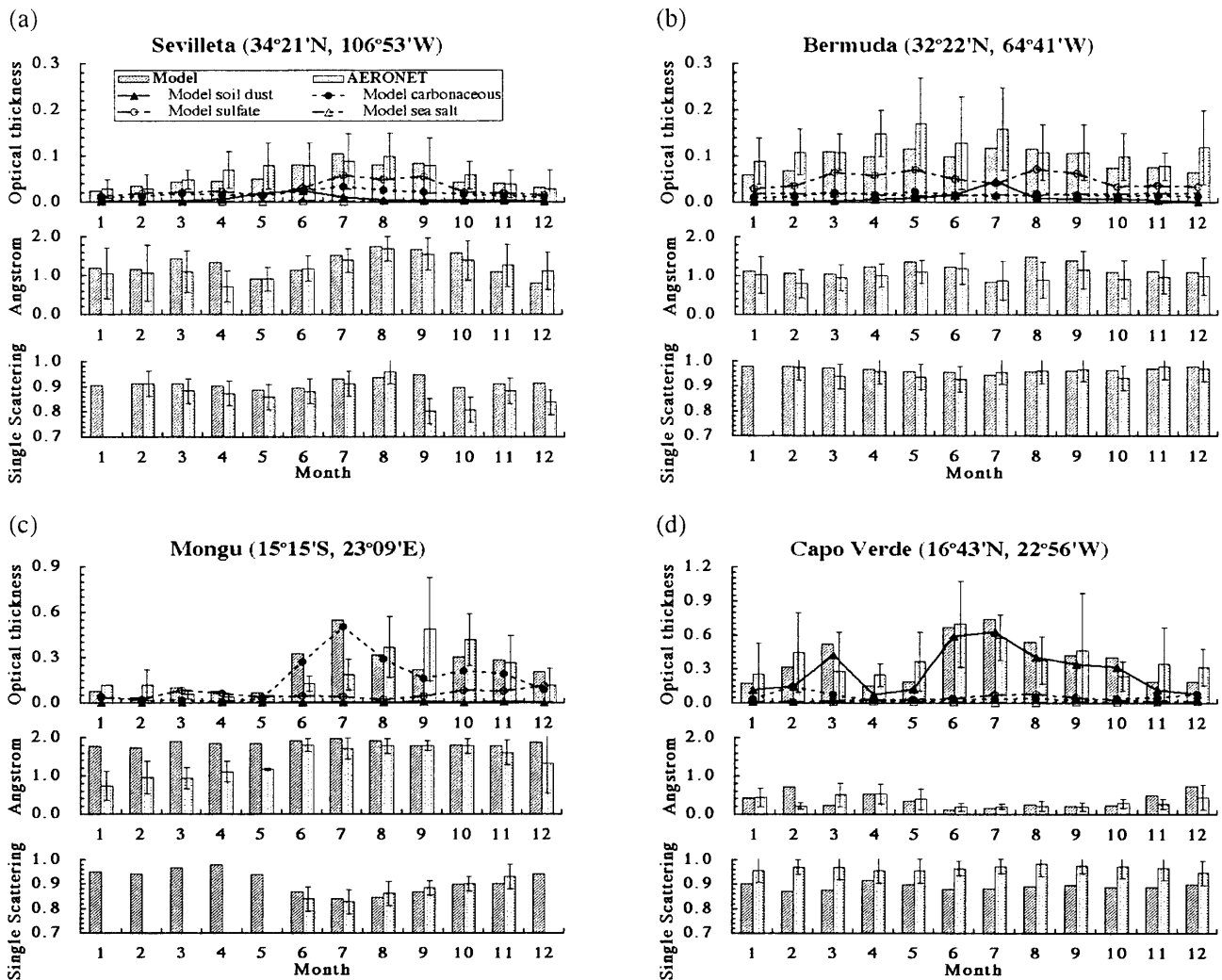


図2 エアロゾルの光学的厚さ・オンゲストローム指数・1次散乱アルベドの月平均値と AERONET との比較 (a) 北米中部 (b) 北大西洋 (c) アフリカ南部 (d) サハラ西岸

図1dには、モデルにより計算されたエアロゾルの直接効果放射強制力の分布を示す。全球的には負の強制力の地域が多いが、砂漠域やチベット・極域では地表アルベドが高いことと吸収性エアロゾルの存在のために正の強制力となっている。但し、土壌粒子の1次散乱アルベドのモデルと観測との相違から、砂漠域での正の強制力は過大評価である可能性がある。また、アフリカ中南部周辺の海域では流出した森林火災起源エアロゾルが雲により多重散乱された放射を吸収するため正の強制力であると計算された。1次元放射モデルを用いた感度実験によると、炭素性エアロゾルや土壌粒子といった吸収性エアロゾルの場合には、エアロゾル層と比較して雲層が相対的に低くなるにつれて、また雲水量が多くなるにつれて、多重散乱光の吸収が強まって正の強制力が大きくなることが示された。一方、太陽放射をほとんど吸収せずに散乱する硫酸塩エアロゾルや海塩粒子の場合には、雲水量が多くなると入射する太陽光が減少して負の強制力が弱まることも示された。従って、エアロゾルの直接効果を評価する際には、適切な雲の3次元分布を使用することが重要であると示唆される。

図3には本研究と IPCC (2001)による直接効果放射強制力の全球平均値を示す。エアロゾル光学パラメータの観測との比較・検証を行った上で直接効果を評価した本研究では、人為起源の放射強制力が -0.19 W m^{-2} と計算された。これは IPCC (2001)の下限に近い値であり、エアロゾル直接効果による負の強制力は、これまで考えられたきた平均値の半分以下である可能性を示した。

また本研究では、IPCCのSRESシナリオによる汚染物質排出量予測を用いた将来のエアロゾル分布予測実験を行った。SRESには大別して4つのシナリオ(A1, A2, B1, B2)があるが、そのうち人為起源汚染物質排出量が最大に予測されているA2シナリオと最小のB1シナリオを使用したシミュレーションを

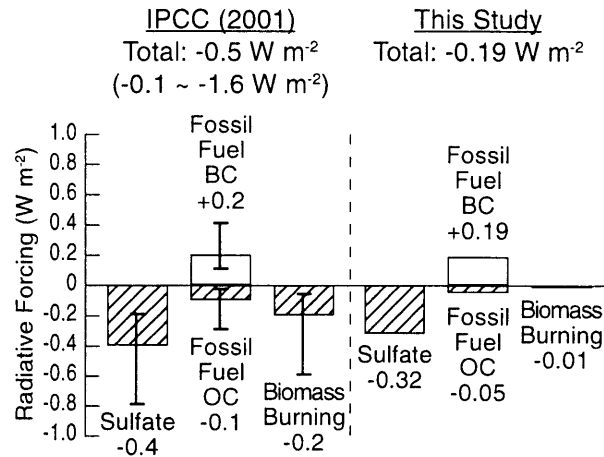


図3 エアロゾル直接効果による全球平均放射強制力

2000年から2050年の10年毎に実施した。また、SRESには炭素性エアロゾルのデータが含まれていないために、CO₂の排出量を基に新たに作成した。さらに、特に東アジア大陸を発生源とする汚染物質の影響を評価するため、当該地域の排出をマスクした実験も行った。実験の結果、50年後には炭素性エアロゾルは世界各都市で増加、一方、硫酸塩エアロゾルはヨーロッパ・北米では減少するもののアジア域では今後の経済発展に伴い増加すると予測された。光学的厚さは、A2シナリオに基づいたシミュレーションによると、ヨーロッパや北米では現在値からの変化は小さいがアジア域では顕著に増加し、東シナ海では年平均値が2000年には0.4であるが、2050年には1に近くなると計算された。また、北半球中高緯度での1次散乱アルベドは現在よりも小さくなると計算され、エアロゾルの直接効果による地球大気放射収支への寄与が徐々に変調する可能性を示唆した。日本でも50年後には、炭素性エアロゾル濃度は2~3倍、硫酸塩エアロゾル濃度や全エアロゾル合計の光学的厚さは2倍程度になると予測された(表1)。実験結果は、日本における大気エアロゾルの将来増加の主要原因は東アジア大陸起源の物質であることを示しており、越境汚染による大気環境の悪化及び気候変動を無視することはできない段階にすでに入っていることを示唆している。

気候システムに対するエアロゾルの影響に関して、今後は間接効果の研究を推進していく必要がある。IPCC (2001)においても間接効果の放射強制力の評価は0~-2 W m²と研究者間で評価が大きくばらついているのが現状である。これはエアロゾルと雲粒子の微物理的な相互作用に未知の部分が多いことが主要原因であると考えられる。観測・モデル両面からのアプローチにより間接効果の不確定性が減少していくことが望まれる。

表1 シミュレートされた2000年, 2050年(A2), 2050年(B1)の日本におけるエアロゾル濃度及び光学的厚さ(0.55μm)の年平均値と大陸排出起源の占有比

	黒色炭素		硫酸塩		全エアロゾル	
	濃度 (μg m ⁻³)	大陸起源比 (%)	濃度 (μg m ⁻³)	大陸起源比 (%)	光学的厚さ	大陸起源比 (%)
129.38E, 29.30N (南西諸島)						
2000	0.49	54	5.58	70	0.23	55
2050 (A2)	1.41	72	11.25	83	0.45	72
2050 (B1)	1.41	88	7.51	84	0.35	60
140.62E, 34.88N (関東南海上)						
2000	1.27	32	5.23	65	0.25	46
2050 (A2)	2.56	35	11.31	79	0.47	62
2050 (B1)	1.38	35	4.36	70	0.28	54
140.62E, 43.25N (北海道西部)						
2000	2.42	30	6.46	82	0.37	59
2050 (A2)	4.54	48	13.21	92	0.66	74
2050 (B1)	2.63	38	4.18	84	0.36	60