

全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルを用いた エアロゾルの分布及び放射強制に関する研究

2002年度山本・正野論文賞受賞記念講演

竹村俊彦*

1. はじめに

この度は山本・正野論文賞という名誉ある賞を頂き、正直に嬉しい気持ちとともに、まだまだ未熟であるにも拘わらず賞を頂くことに重圧を感じていることも確かであります。しかし、負の方向に考えるのではなく、今後も努力していきなさい、という周囲の方々の激励と受け止めることにしました。これまで指導して頂いた先生方や先輩方、研究生活を支えて頂いている関連分野の研究者や周囲の方々にただただ感謝するばかりであります。

私は大学院入学当初から、全球規模のエアロゾル(大気浮遊粒子状物質)の分布及び放射特性をシミュレートするモデルを開発してきました。エアロゾルモデルは、エアロゾルの気候に対する影響に関するメカニズムの解明に有効であるほか、社会的関心の高い気候変動予測及び汚染物質分布予測のツールとしての重要性もあります。受賞対象となった Takemura *et al.* (2002a) は、開発してきたモデルの第1次的な結果及び得られた知見を論文にしたものであり、東京大学気候システム研究センター在籍時に執筆しました。本解説では、上記論文で示したエアロゾルの光学特性の世界各地域での特徴を示すと共に、モデルの応用的な使用例として、最近頻発している大規模黄砂のシミュレーション結果を最後に紹介します (Takemura *et al.*, 2002b)。

2. エアロゾルの気候に対する影響

エアロゾルは、大気環境悪化や健康被害をもたらすだけではなく、気候変動因子の1つと考えられています。エアロゾルの気候に対する効果には大別して2つ

あります。1つは直接効果と呼ばれるもので、エアロゾルが太陽放射や赤外放射を散乱したり吸収したりすることによって地球大気の放射収支に変調をもたらす効果です。もう1つは間接効果と呼ばれるもので、エアロゾルは雲の凝結核 (CCN) として働くために、エアロゾル数が増加すると雲粒径が増加して、雲アルベドに変調をもたらしたり (第1間接効果)、降水効率を変化させたり (第2間接効果) する効果です。また、放射吸収特性を持つエアロゾルが存在する層があると、その層の大気が加熱されて大気が安定化し雲生成が抑止される準直接効果というものも最近議論され始めました。しかし、これらの効果の定量的評価は不確実性が高く、これまでの研究を集約した気候変動に関する政府間パネル第3次報告書 (IPCC, 2001) によると、対象とする量の増減に伴う大気放射収支の変化量である放射強制力に関して、人為起源エアロゾルによる直接効果の見積もりの全球平均値は $-0.2 \sim -0.8 \text{ W m}^{-2}$ の幅を持ち、第1間接効果では $0 \sim -2 \text{ W m}^{-2}$ という大きな不確実性があります。第2間接効果に至っては尤もらしい値を見積もることができないというのが現状です。放射強制力は負の値であると大気冷却化、正の値であると大気温暖化を意味しますが、ちなみに、IPCC (2001) では、人為起源温室効果気体の放射強制力は $+2.43 \text{ W m}^{-2}$ で不確実性10%と見積もられています。エアロゾルの気候影響評価の不確実性の原因としては、平均数日程度の短い大気滞留時間、複雑な化学組成、様々な発生源や粒径分布等により、全球規模でのエアロゾルの分布や特性を把握することが困難であったことが挙げられます。

しかし近年になって、衛星搭載センサである AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)、POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)、SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)、MODIS

* 九州大学応用力学研究所。

E-mail: toshi@riam.kyushu-u.ac.jp

—2003年1月16日受領—

—2003年4月21日受理—

(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 等や地上観測網である AERONET (Aerosol Robotic Network) を用いたりモートセンシングにより全球規模でのエアロゾル分布の把握が可能となってきました。これらの観測データはエアロゾルモデルの性能向上に非常に有用であります。1990年代に構築されたエアロゾル輸送モデルは基本的に1種類のエアロゾルのみを扱っており (e.g., Langner and Rodhe, 1991; Liousse *et al.*, 1996), 様々なエアロゾルの混合状態を観測していることになる上記リモートセンシングの結果を活用することができません。また、過去のエアロゾルモデルは、輸送過程と放射過程を同時には扱っておらず、エアロゾルの気候影響評価の高い不確定性の一因でありました。

そこで, Takemura *et al.* (2000) では、対流圏主要エアロゾルである土壌粒子 (soil dust)・炭素性粒子 (carbonaceous)・硫酸塩 (sulfate)・海塩粒子 (sea salt) の輸送過程を同時に扱うモデルを構築し、エアロゾル質量濃度の他に AVHRR や AERONET から解析されたエアロゾル光学特性との比較を行いました。さらに、Takemura *et al.* (2002a) では、輸送過程と放射過程を統合的に扱うモデルに発展させると共に、定量的な改善も実施し、エアロゾルの直接効果放射強制力の評価を行いました。この全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルには SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) と命名しました。

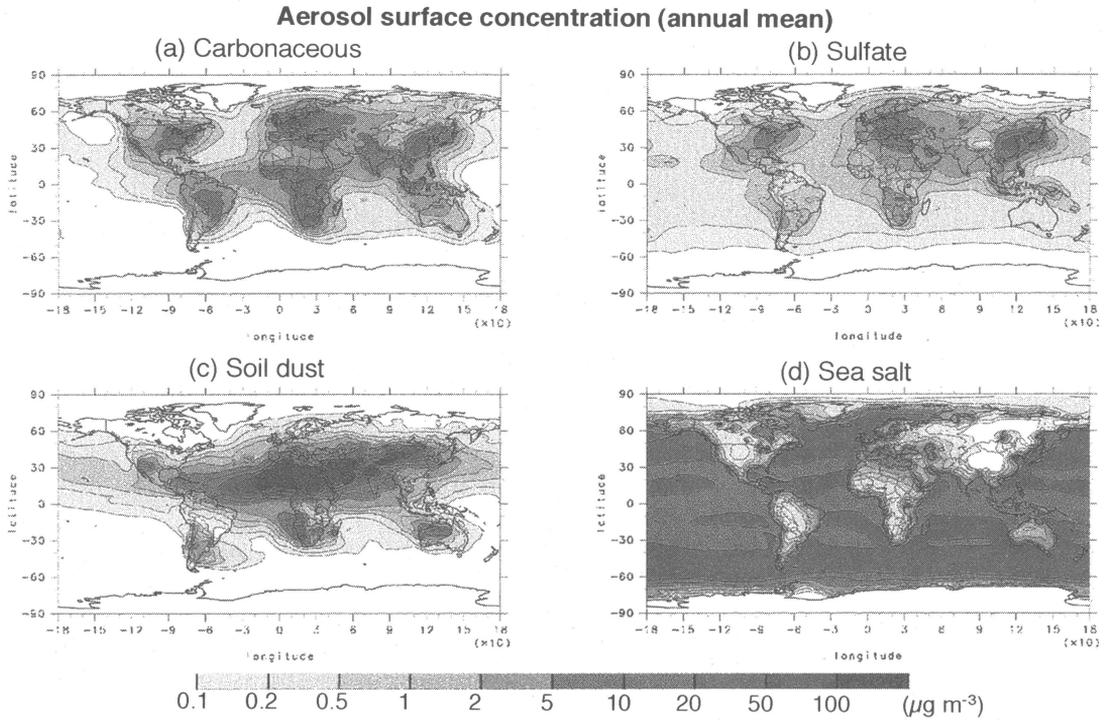
3. モデルの概要

SPRINTARS は、東京大学気候システム研究センター (CCSR) と国立環境研究所 (NIES) の大気循環モデル (AGCM) (Numaguti *et al.*, 1995) と結合しています。現在のところ、水平分解能は T42 (約2.8度)、鉛直分解能は11層です。本解説で用いるシミュレーションでは、NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Center for Atmospheric Research) 再解析データの2000年の風・気温・比湿を用いて、AGCM により計算される大気場の再解析データからのずれを修正するナッジングという手法を取り入れています。但し、大規模黄砂シミュレーションは2001年春季を対象としているため、2001年の再解析データを用いています。

トレーサーとして陽に取り扱っているのは、土壌粒子・炭素性粒子 (black carbon (BC) と organic carbon

(OC))・硫酸塩・海塩粒子の他に、硫酸塩の前駆物質である二酸化硫黄 (SO_2) と硫化ジメチル (DMS) であります。モデル内でのエアロゾル輸送過程には発生・移流・拡散・硫酸塩に関わる化学反応・除去が含まれます。炭素性エアロゾルでは森林火災・化石燃料・植物燃料・農業活動・植物活動起源を考慮し、GEIA (Global Emissions Inventory Activity) (Cooke and Wilson, 1996; Guenther *et al.*, 1995), FAO (Food and Agriculture Organization of UN), SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (IPCC, 2000) のデータベースを参照して発生源データを作成しました。尚、炭素性エアロゾルは BC と OC の内部混合物質として扱いますが、化石燃料起源 BC の50%のみは外部混合とします。GEIA データベースは、 SO_2 の化石燃料起源 (Benkovitz *et al.*, 1996) 及び火山起源 (Andres and Kasgnoc, 1998) にも使用しました。2001年の大規模黄砂シミュレーションでは、三宅島起源の大量の SO_2 放出も考慮しました。海洋植物プランクトン起源 DMS の発生量は、地表面での下向き太陽放射フラックスの関数としてモデル内部で計算されます (Bates *et al.*, 1987)。土壌粒子の発生は、植生・地上10 m 風速・土壌水分・積雪量を用いて、海塩粒子の発生は海上10 m 風速を用いて計算されます。移流計算には Flux-Form Semi-Lagrangian 法を用いており (Numaguti, personal communication, 1999), 積雲対流による輸送も考慮しています。化学反応は、DMS の気相反応と SO_2 の気相・液相反応を陽に計算しており、OH, H_2O_2 , O_3 の3次元分布は対流圏化学輸送モデル CHASER (Chemical AGCM for Study of Atmospheric Environment and Radiative Forcing) (Sudo *et al.*, 2002) の結果を使用しています。除去過程には、雲や雨による除去・乾性沈着・重力落下が含まれます。

SPRINTARS は CCSR/NIES AGCM の大気放射過程 (Nakajima *et al.*, 2000) とも結合しており、種類毎のエアロゾルの吸湿成長・粒径分布・波長依存の複素屈折率を考慮して、エアロゾルの光学特性や気象場へのフィードバックを計算することができます。エアロゾルの光学パラメータである光学的厚さ・1次散乱アルベド・オングストローム指数は特定波長での計算が可能です。光学的厚さ τ とは大気中の物質による放射強度の減衰の指標であり、ある基準位置での放射強度を I_0 、大気を透過した後の放射強度を I とすると、



第1図 地表面付近 (σ -level=0.995) での各エアロゾル質量濃度 ($\mu\text{g m}^{-3}$) の年平均分布のシミュレーション結果。
(a) 炭素性粒子 (b) 硫酸塩 (c) 土壌粒子 (d) 海塩粒子。

$$I = I_0 \exp(-\tau) \quad (1)$$

で定義されます。1次散乱アルベドは消散(散乱+吸収)に対する散乱の比により定義され、エアロゾルの種類により大きく異なります。オングストローム指数 α はエアロゾルの粒径の指標となるパラメータであり、2つの波長 λ_1 , λ_2 における光学的厚さ τ_1 , τ_2 を用いて次のように定義されます。

$$\alpha = -(\ln \tau_1 - \ln \tau_2) / (\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2) \quad (2)$$

また、エアロゾルによる雲粒径及び降水効率の変動(間接効果)に関するパラメタリゼーションもSPRINTARSには組み込まれていますが、研究の初期段階であるため、本解説で用いるシミュレーションではエアロゾル間接効果を外してあります。

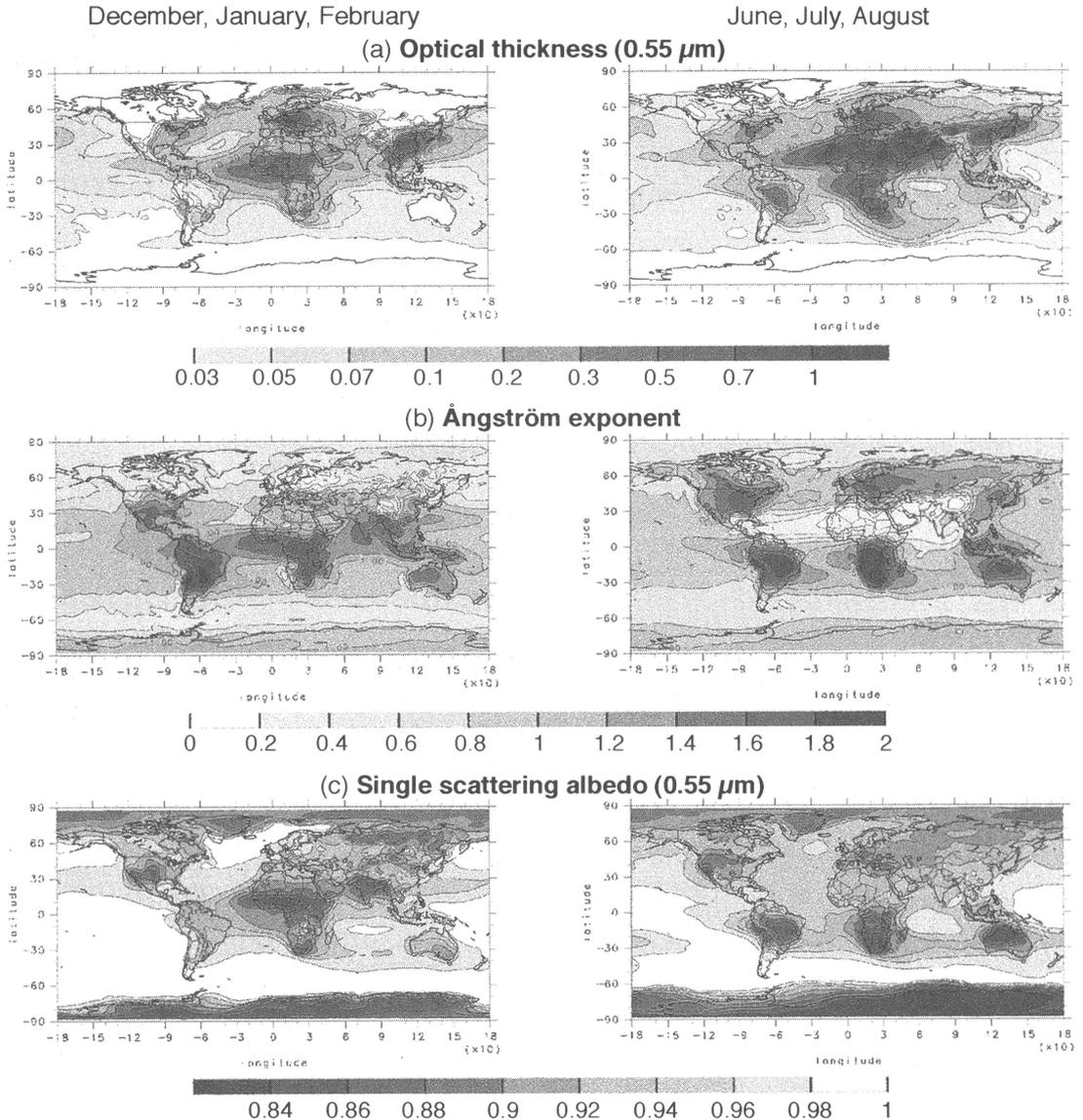
SPRINTARSの詳細は、Takemura *et al.* (2000, 2002a, 2002b) を参照してください。

4. エアロゾルの全球規模シミュレーション

第1図にモデル最下層(σ -level=0.995)における種類別の年平均エアロゾル全球分布のシミュレーション

結果を示します。炭素性粒子は、化石燃料・植物燃料・農業活動起源により北半球中緯度の都市域及び人口密集地域で濃度が高くなっています。また、森林火災によりアフリカ中南部や南アメリカでも高濃度となっています。硫酸塩は北半球中緯度の都市域に偏在していますが、DMSの化学反応により海洋上にも広く分布しています。サハラ地域では土壌粒子の濃度が高く、大西洋へも大量に流出しています。アラビアやアジア内陸の砂漠域でも高濃度となっています。海塩粒子は他のエアロゾルよりも海上で比較的均質に分布していますが、南北両半球の緯度50~60度の強風域で濃度が高くなっています。シミュレートされた各エアロゾル濃度は現場観測と比較され、良好な一致を見ている(Takemura *et al.*, 2000)。

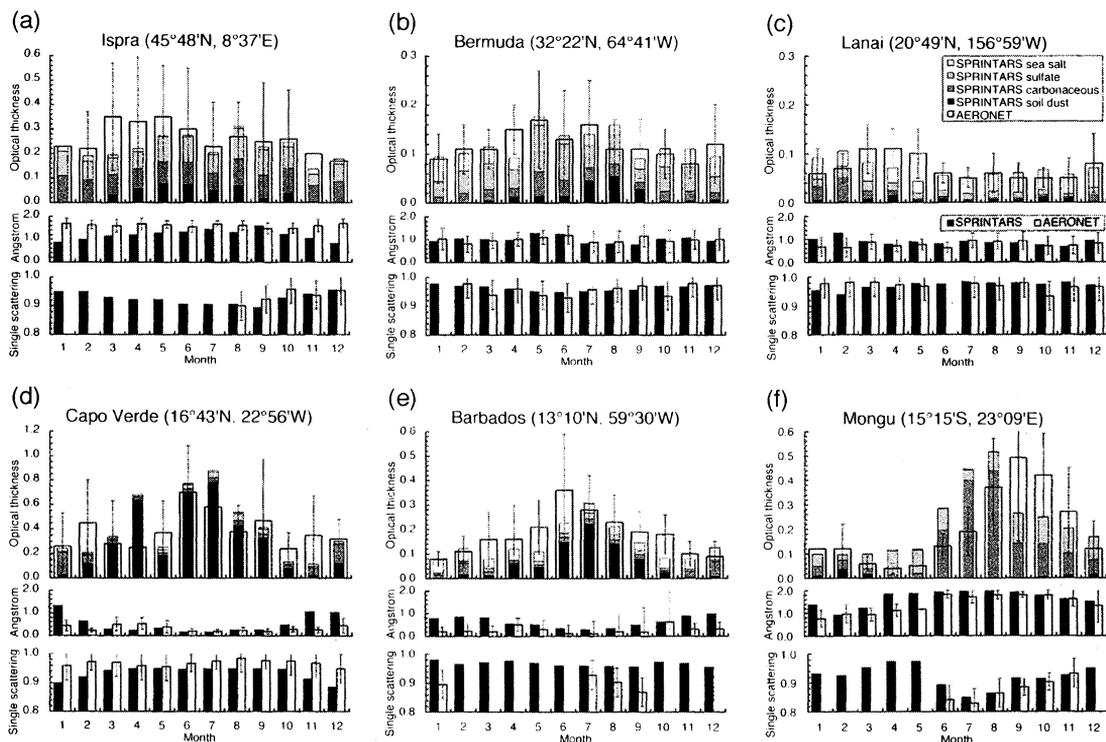
エアロゾル濃度を適切に表現することがエアロゾルモデルの基本ですが、エアロゾルの気候影響を評価する際には、エアロゾルと大気放射との関係を議論することになるため、エアロゾルの濃度よりも光学特性を検証することが直接的なアプローチとなります。また、第2節で紹介したりモートセンシングによるエアロゾル観測データとの比較を行う上でも、モデ



第2図 全エアロゾル混合状態における鉛直積算のエアロゾル光学特性の季節平均分布のシミュレーション結果。左が北半球冬季、右が北半球夏季。(a)可視光 ($0.55 \mu\text{m}$) に対する光学的厚さ (b) オングストローム指数 (c) 可視光 ($0.55 \mu\text{m}$) に対する1次散乱アルベド。

ルにおいて光学特性を計算する必要があります。第2図には、モデル計算に基づき鉛直積算された可視光(波長 $0.55 \mu\text{m}$)に対するエアロゾル光学的厚さ・オングストローム指数・可視光(波長 $0.55 \mu\text{m}$)に対する1次散乱アルベドの冬と夏の季節平均分布を示しています。北半球中緯度の都市域(東アジア・北アメリカ・ヨーロッパ)では、人為起源の硫酸塩や炭素性粒子により年間を通して光学的に厚く、オングストローム指数が

大きい、即ち小粒子が卓越しています。一方、アフリカ北中部では、北半球夏季にサハラダストにより光学的厚さのピークが北緯20度付近にあり、冬季にはサハラダストと森林火災起源エアロゾルの混合及び風向変化により北緯10度付近にピークが移動するという季節変化が見られます。また、アラビア半島周辺では、北半球夏季にモンスーンに伴う地上の強風(ソマリジェット)の影響を受けて大量の土壌粒子が舞い上が

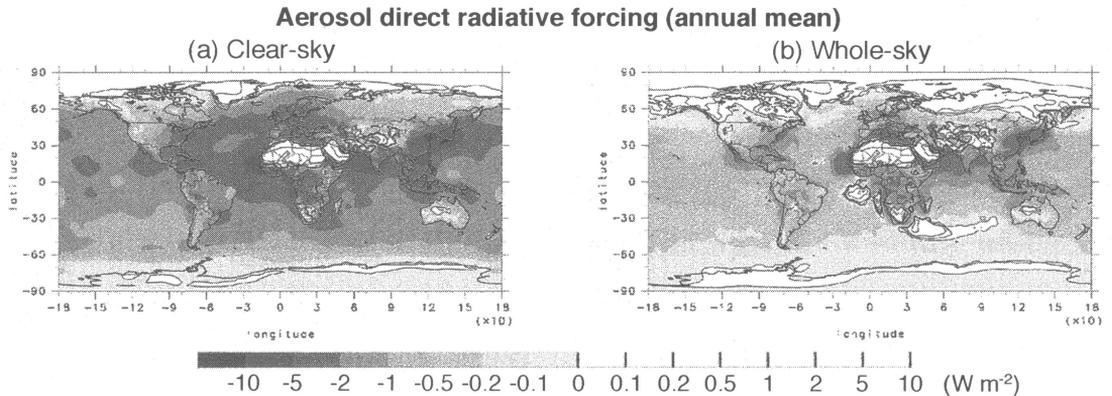


第3図 可視光 (0.55 μm) に対するエアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数・可視光 (0.55 μm) に対する1次散乱アルベドのシミュレーション結果とAERONET観測との月平均値の比較。光学的厚さの比較においては太柱(細実線による誤差棒付き)がAERONET観測に基づく推定値を示し、細柱がモデルシミュレーション結果を示す。光学的厚さのシミュレーション結果はエアロゾル種別に示している。オングストローム指数及び1次散乱アルベドの比較においては白柱(細実線による誤差棒付き)がAERONET観測に基づく推定値を示し、黒柱がモデルシミュレーション結果を示す。(a) イタリア北部(Ispra) (b) 中緯度北西大西洋(Bermuda) (c) ハワイ諸島(Lanai) (d) 亜熱帯北東大西洋(Capo Verde) (e) 亜熱帯北西大西洋(Barbados) (f) アフリカ南部(Mongu)。

り、光学的に厚くオングストローム指数は小さくなっています。アフリカ南部やアマゾンでは、乾季に当たる7~11月にかけて森林火災により光学的厚さが大きく、オングストローム指数も大きな値を示しています。シミュレーションによって表現されたこれらの季節変化は、人工衛星からのリモートセンシングによる解析結果(e.g., Higurashi *et al.*, 2000)と定量的にも一致度が高くなっています。尚、海塩粒子は他のエアロゾルと比較して濃度は高くなっていますが(第1図参照)、大粒子が卓越しているために可視光に対する単位質量当たりの消散効率が低く、光学的厚さはそれほど高くなりません。波長0.55 μm の可視光に対するエアロゾルの1次散乱アルベドは、森林火災起源エアロゾルが存在する場合には0.85前後、その他の陸上及び都市周辺の海域では約0.9、遠洋上では1に近い値を示しています。また、土壌粒子が卓越している地域では

0.9~0.95という結果になっています。従来、土壌粒子の放射吸収が大きく見積もられた複素屈折率のデータ(WCP-55, 1983)が標準的に用いられてきましたが、近年のサハラダストの観測結果によると、放射吸収はそれほど大きくはなく、1次散乱アルベドは約0.9~0.95の値を示しています(Kaufman *et al.*, 2001; Dubovik *et al.*, 2002)。さらに、黄砂粒子はサハラダストよりも赤鉄鉱の含有率が低いために、放射吸収はさらに弱いと考えられます。1次散乱アルベドを正確にシミュレートすることは、エアロゾルの直接効果放射強制力の信頼ある評価を行う際の重要な要素となります(次節参照)。

観測との比較の一例として、第3図にAERONET観測に基づき推定されたエアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数・1次散乱アルベドの月平均値との比較を示します(Holben *et al.*, 2001; Dubovik *et*



第4図 全エアロゾル混合状態における対流圏界面での直接効果放射強制力の年平均分布のシミュレーション結果。(a) 晴天大気 (b) 全大気。

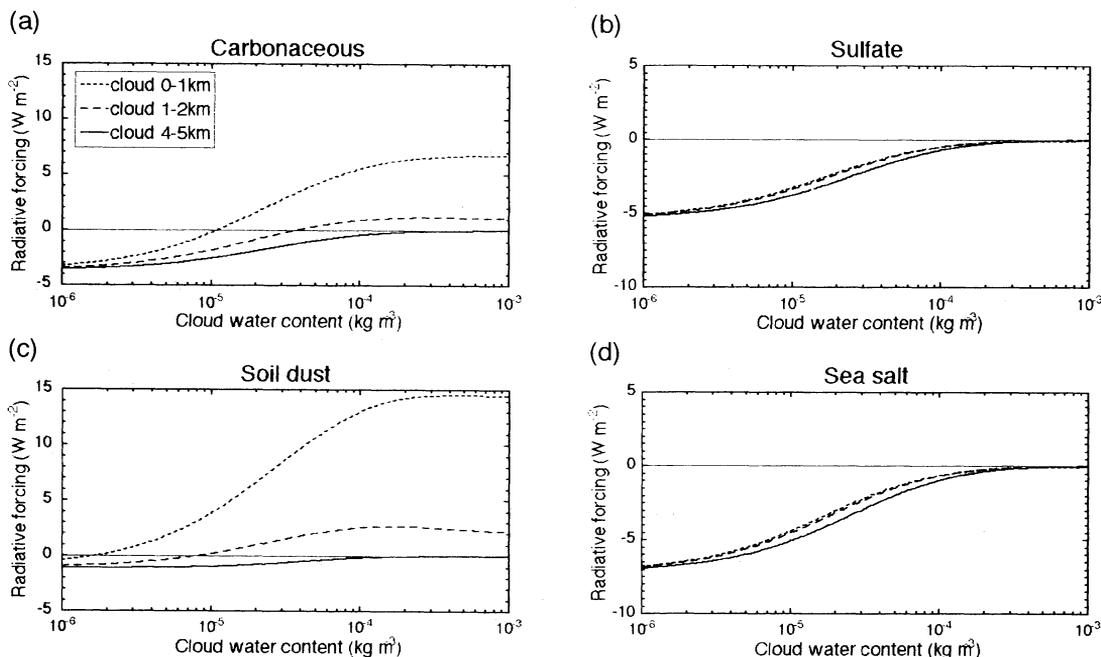
al., 2002). 光学的厚さのスケールが各地点で異なることに注意してください。北半球中緯度では(第3図 a, b), 光学的厚さに占める炭素性粒子の比率が硫酸塩と同様に高く, 特に大陸上では炭素性粒子の重要性が示唆されます。このことは観測結果とも一致します(Hegg *et al.*, 1997)。また, 地域によっては, 中緯度でも砂漠起源の土壌粒子の影響を受ける季節があります。オングストローム指数は, 大陸から離れるにつれて小さくなっています。これは, 海塩粒子の比率が高くなることと, 相対湿度が高く吸湿成長が盛んになることが原因と考えられます。都市域の少ない緯度帯の遠洋上では(第3図 c), 光学的厚さが0.1以下と小さく, オングストローム指数は1.0前後, 1次散乱アルベドは0.95~1.0という特徴がモデルでも再現されています。サハラ西岸及びダスト流出域では(第3図 d, e), 光学的厚さの季節変動及び小さいオングストローム指数という点でまずまずの一致を見えています。森林火災発生地域では(第3図 f), 乾季に光学的に非常に厚く, 1次散乱アルベドは小さいという季節変動をモデルは上手く再現しています。

5. エアロゾル直接効果放射強制

光学的厚さ・オングストローム指数・1次散乱アルベドのシミュレーション結果の検証及び観測との比較を踏まえ, エアロゾルの直接効果による放射強制力を評価します。第4図は, 全エアロゾル混合状態における対流圏界面での直接効果放射強制力の年平均全球分布のシミュレーション結果を示しています。雲の無い状態を仮定した晴天大気の場合, 放射吸収が無い, 若しくはほとんど無い人為起源の硫酸塩やOCにより,

東アジアや北アメリカ東部で -5 W m^{-2} を超えています。また, サハラ西岸ではサハラダストにより, アラビア海北部ではアラビアダストとインドからの人為起源エアロゾルにより -5 W m^{-2} 以上の強制力となっています。これは, 土壌粒子は放射吸収特性を持つものの, 地表アルベドの低い海上では可視光に対する散乱効果の方が勝り, 負の強制力となっています。一方, サハラ砂漠やアラビア半島では, 高い地表アルベドの影響を受けて, 土壌粒子により正の強制力を示しています。これは, 土壌粒子が存在しなければ高い地表アルベドにより宇宙空間へ反射されていた放射が, 土壌粒子により吸収されてしまうためです。また, 極域やチベットでは, 微量のBCや土壌粒子の流入と高い地表アルベドを持つ雪氷面の影響により, 弱いながら正の強制力となっています。

一方, 普通に雲分布を導入して放射強制力を計算した全大気の場合, 全体的に負の強制力が弱くなっているのが第4図から分かります。さらに, 森林火災起源エアロゾルの流出域であるアフリカ南部等, 正の強制力の領域が増大しています。この晴天大気との違いを検証するために, 1次元放射モデルを用いて, エアロゾル層を固定して雲層の高度と雲水量を変化させる実験を行いました(第5図)。放射吸収を無視できる硫酸塩や海塩粒子の場合は, 雲の高度依存性はほとんどなく, 雲水量が増加すると雲粒による散乱が増加してエアロゾル自体による散乱が減少するためにエアロゾルによる負の放射強制力は小さくなります。放射吸収特性を持つ炭素性粒子(ここではBC:OC=1:6.92の均質内部混合粒子を仮定しています)と土壌粒子の場合は, 雲層がエアロゾル層よりも下, 若しくは同高

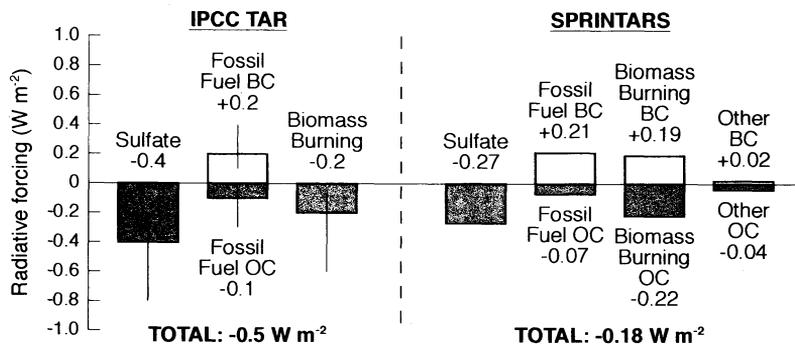


第5図 1次元放射モデルを用いた雲の高度・雲水量に対する大気上端でのエアロゾル直接効果放射強制力の感度実験の結果。横軸は雲水量 (kg m⁻³) を示す。雲の高度は4~5 km (実線), 1~2 km (破線), 0~1 km (点線) の3種類。エアロゾル層は均質に光学的厚さ $\tau=0.1$ で高度0~2 km に固定。地表アルベドは0.07, 太陽高度は30度を仮定。(a) 炭素性粒子 (b) 硫酸塩 (c) 土壌粒子 (d) 海塩粒子。

度の時に、雲水量が増加すると強制力が負から正に転ずることが分かります。これは、直達光だけではなく、雲層によって多重散乱された放射もエアロゾルによって吸収されることが原因であると考えられます。雲層がエアロゾル層よりも上の時は、硫酸塩や海塩粒子と同様な振る舞いを見せます。このことから、エアロゾルの直接効果放射強制力を評価する際には、雲の3次

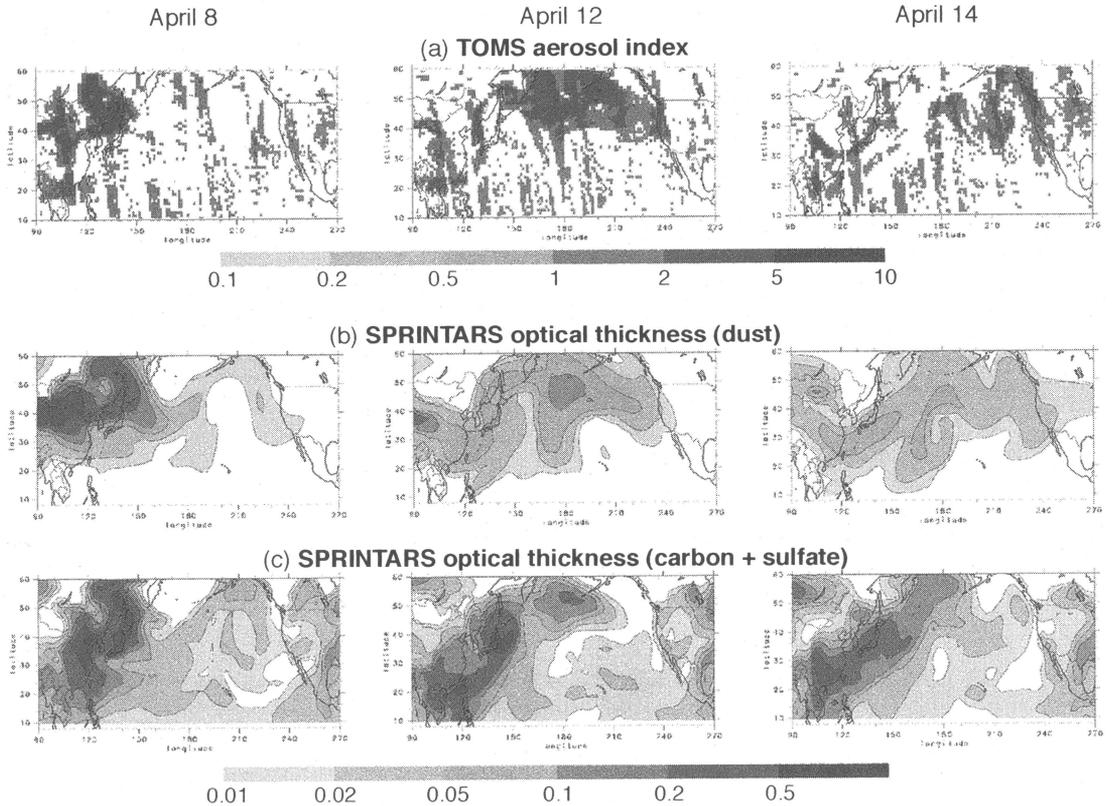
元分布も適切に考慮する必要があることが分かります。

第6図には、SPRINTARSによる人為起源エアロゾルの年平均・全球平均の直接効果放射強制力を、IPCC第3次報告書 (IPCC, 2001) の評価と合わせて示します。硫酸塩と化石燃料起源炭素性粒子に関しては、IPCC評価の不確定性の範囲内に入っています。但し、硫酸塩の強制力はIPCC評価の最尤値よりも33%



第6図 人為起源エアロゾルによる直接効果放射強制力の年平均・全球平均値。左はIPCC (2001) による評価、右はシミュレーション結果。

小さくなっています。森林火災起源炭素性粒子に関してはIPCCではBCとOCの分離を行っていませんが、統合するとSPRINTARSの方が負の強制力が小さく計算されています。IPCCでは過去の研究を寄せ集めて評価をしている一方、SPRINTARSではエアロゾル光学特性を検証して光学的観測と直接比較を行っているわけですが、その結果、人為起源エアロゾルによる直接効果放射強制力はIPCCでは-0.5 W



第7図 2001年4月の大規模黄砂時における (a) TOMS aerosol index (b) SPRINTARS による土壌粒子の光学的厚さ (c) SPRINTARS による炭素性粒子と硫酸塩合計の光学的厚さの日平均分布. (左) 4月8日 (中) 同12日 (右) 同14日.

m^{-2} , SPRINTARS では -0.18 W m^{-2} になりました.

6. 黄砂の長距離輸送

黄砂現象は、ゴビ砂漠やタクラマカン砂漠、近年ではゴビ砂漠より東の都市部に近い新たな砂漠から、強風により土壌粒子が大気中へ舞い上がる現象で、主に春季に見られます。2000年以降、黄砂現象の頻度及び規模が増大し、大陸沿岸の都市部に深刻な被害をもたらしているほか、日本でも黄砂の観測日数が急増しています。そこで、SPRINTARS を用いた応用例として、黄砂の発生・輸送を再現したシミュレーション結果を紹介します (Takemura *et al.*, 2002b)。第7図には、2001年4月に発生した大規模黄砂の計算結果を、TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) から解析された aerosol index と合わせて示します (Herman *et al.*, 1997)。TOMS は紫外域に放射吸収特性を持つ土壌粒子や BC を検出することが可能な衛星搭載センサです。TOMS によると、6日から9日にかけて

発達中の低気圧に伴いゴビ砂漠やその周辺から断続的に土壌粒子が舞い上がり、朝鮮半島や日本へ流出しました。その後、黄砂は北太平洋を横断し、北アメリカ西岸に到達したことが分かります (第7図 a)。この粒子は、SPRINTARS による土壌粒子の光学的厚さを見ると、モデルによっても再現されていることが分かります。日本上空を通過した黄砂の10~20%が北アメリカ西岸まで輸送されたという結果がモデルにより得られています (第7図 b)。また、黄砂と同時に、大陸沿岸から排出される人為起源の炭素性粒子や硫酸塩も太平洋へ長距離輸送されているというシミュレーション結果が得られました (第7図 c)。アジア諸国では、急激な経済発展及び人口増加により、今後数十年は人為起源エアロゾルおよび前駆物質の排出量が増加し続けると予測されており (IPCC, 2000)、SPRINTARS によるシミュレーション結果は、新たな越境汚染の問題を示唆しています。

また、1970年代後半から1998年にかけて、アジア大

陸内部の高温化により南北の温度傾度が小さくなり、低気圧の発生頻度が減少して黄砂現象観測日数は漸減したと報告されています (Qian *et al.*, 2002). しかし、2000年以降は黄砂現象が急増しており、その原因の詳細な究明が必要とされています。

7. おわりに

多種類のエアロゾルを同時に扱うことの出来るモデルの構築、及び全球規模でのエアロゾル光学観測との比較・検証により、異種成分の粒子内での内部混合の形態や非球形の問題は残るものの、直接効果放射強制力の評価の信頼度は向上してきたものと考えられます。一方、雲とエアロゾルの相互作用である間接効果は過程が非常に複雑であり、解明及び信頼ある評価へ向けて多くの研究者が鋭意努力を重ねている段階であります。微物理・放射・化学的観点から、観測とモデルの両方を用いて研究が進められており、その一端を担うことができればと思っております。

SPRINTARS 構築の動機として、エアロゾル輸送過程の把握ということもありますが、私自身としてはやはり、エアロゾルの気候システムへの影響を詳細に検証するという課題に魅力を感じております。前者及び後者の導入部は、これまでの研究で良い段階まで達したと思われますので、エアロゾルの直接・間接効果が気象場へどのような変化をもたらすのか、SPRINTARS を用いて調べていくというのが、個人的な次の段階の研究課題であります。

謝 辞

研究生活を始めて高々数年ではありますが、様々な方々からの御指導、御助力を賜りましてやってきました。大学院時代の恩師であり、受賞対象論文の共著者でもあります東京大学気候システム研究センターの中島映至教授には、研究の方向性や手法に関して適切なアドバイスを頂いてきました。中島先生は良い意味でフランクに接して下さり、色々な刺激を受けることができました。現在東北大学理学研究科の岡本 創助教授には、東京大学気候システム研究センター在籍時に土壌粒子モデルの基礎を築いて頂きました。受賞対象論文の共著者であります B. N. Holben, O. Dubovik (NASA Goddard Space Flight Center), S. Kinne (Max Plank Institute) 各博士には AERONET のデータを提供して頂き、SPRINTARS の性能向上に対して重要な役割を担って下さいました。

そして、東京大学気候システム研究センターの先生方、先輩同輩後輩の方々、関係者の皆様のおかげをもちまして、在学中に快適な環境で生活を送ることが出来ました。この場をお借りしまして御礼申し上げます。また、現在の職場であります九州大学応用力学研究所の鶴野伊津志教授をはじめ研究所の方々には、快適な研究環境に身を置かせて頂いていることに感謝致します。

最後に、一昨年、不慮の事故により御他界された沼口 敦さん。私が大学院入学当初に東京大学気候システム研究センターの助教授でいらした時からお世話になり、私もようやく自立し始め、これからも御一緒に研究させて頂こうかと願っていたところでした。沼口さんのパワーには到底及びませんが、目指しておられた研究課題の少しの部分でも担えるように努力していきたいと思っております。

参 考 文 献

- Andres, R. J. and A. D. Kasgnoc, 1998 : A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions, *J. Geophys. Res.*, **103**, 25251-25261.
- Bates, T. S., R. J. Charlson and R. H. Gammon, 1987 : Evidence for the climatic role of marine biogenic sulphur, *Nature*, **329**, 319-321.
- Benkovitz, C. M., M. T. Scholtz, J. Pacyna, L. Tarascon, J. Dignon, E. C. Voldner, P. A. Spiro, J. A. Logan and T. E. Graedel, 1996 : Global gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen, *J. Geophys. Res.*, **101**, 29239-29253.
- Cooke, W. F. and J. J. N. Wilson, 1996 : A global black carbon aerosol model, *J. Geophys. Res.*, **101**, 19395-19409.
- Dubovik, O., B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanre and I. Slutsker, 2002 : Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 590-608.
- Guenther, A., C. N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W. A. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor and P. Zimmerman, 1995 : A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.*, **100**, 8873-8892.
- Hegg, D. A., J. Livingston, P. V. Hobbs, T. Novakov and P. Russell, 1997 : Chemical apportionment of aerosol column optical depth off the mid-Atlantic

- coast of the United States, *J. Geophys. Res.*, **102**, 25293-25303.
- Herman, J. R., P. K. Bhartia, O. Torres, C. Hsu, C. Seftor and E. Celarier, 1997 : Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus-7/TOMS data, *J. Geophys. Res.*, **102**, 16911-16923.
- Higurashi, A., T. Nakajima, B. N. Holben, A. Smirnov, R. Frouin and B. Chatenet, 2000 : A study of global aerosol optical climatology with two-channel AVHRR remote sensing, *J. Climate*, **13**, 2011-2027.
- Holben, B. N., D. Tanre, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenu, Y. J. Kaufman, J. Vande Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O'Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss and G. Zibordi, 2001 : An emerging ground-based aerosol climatology : Aerosol optical depth from AERONET, *J. Geophys. Res.*, **106**, 12067-12097.
- IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000 : Special Reports on Emissions Scenarios, N. Nakicenovic and R. Swart, Eds., Cambridge Univ. Press, 612 pp.
- IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001 : Climate Change 2001 : The Scientific Basis, J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu, K. Maskell and C. A. Johnson, Eds., Cambridge Univ. Press, 896 pp.
- Kaufman, Y. J., D. Tanre, O. Dubovik, A. Karnieli and L. A. Remer, 2001 : Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground-based remote sensing, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1479-1482.
- Langner, J. and H. Rodhe, 1991 : A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle, *J. Atmos. Chem.*, **13**, 225-263.
- Liousse, C., J. E. Penner, C. Chuang, J. J. Walton, H. Eddleman and H. Cachier, 1996 : Global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols, *J. Geophys. Res.*, **101**, 19411-19432.
- Nakajima, T., M. Tsukamoto, Y. Tsushima, A. Numaguti and T. Kimura, 2000 : Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model, *Appl. Opt.*, **39**, 4869-4878.
- Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima and A. Sumi, 1995 : Development of an atmospheric general circulation model, *Climate System Dynamics and Modeling*, T. Matsuno, Ed., Center for Climate System Research, University of Tokyo, 1-27.
- Qian, W., L. Quan and S. Shi, 2002 : Variations of the dust storm in China and its climatic control, *J. Climate*, **15**, 1216-1229.
- Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa and H. Akimoto, 2002 : CHASER : A global chemical model of the troposphere 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, **107** (D17), 4339, doi : 10.1029/2001JD001113.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000 : Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins, *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853-17873.
- Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben and S. Kinne, 2002a : Single scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, *J. Climate*, **15**, 333-352.
- Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi and I. Sano, 2002b : Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (24), 2158, doi : 10.1029/2002GL016251.
- WCP-55, 1983 : Report of the experts meeting on aerosols and their climatic effects, A. Deepak and H. E. Gerber, Eds., World Meteorological Organization, 107 pp.

A Study of Aerosol Distribution and Radiative Forcing with a Global Three-Dimensional Aerosol Transport-Radiation Model

Toshihiko TAKEMURA

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

E-mail: toshi@riam.kyushu-u.ac.jp

(Received 16 January 2003; Accepted 21 April 2003)

国際学術研究集会にかかわる補助金申請の募集のお知らせ

—国際学術交流委員会—

日本気象学会細則第7章「国際学術交流」に基づき、国際学術研究集会出席および招聘にかかわる旅費の補助を下記により行いますので、希望者は応募締切り日までに応募願います。

記

対象の集会

2003年12月1日～2004年5月31日の期間に開催される国際学術研究集会

1. 外国で開かれる国際学術研究集会への旅費補助

1) 応募資格：日本気象学会会員で国際学術研究集会に出席し論文の発表もしくは議事の進行に携わる予定の者。ただし、他から援助のある者は除く。なお、大学等の研究を本務とする機関で定職に就いている者の複数回の助成は原則として認めない。また大学院生の場合は、原則として修士2年程度の研究実績を要するものとする。

2) 募集人員：若干名

3) 補助金額：開催地域を考慮し最高15万円程度

4) 応募手続：所定の申請書類を期日までに国際学術交流委員会

(〒100-0004 東京都千代田区大手町1-3-4 気象庁内日本気象学会気付) に提出する。大学院生は指導教官の推薦状を併せて提出する。

応募締切り日：2003年9月15日

注：申請書は最新の様式のもを日本気象学会事務局から取り寄せるか、気象学会ホームページにあるものを使用すること。申請書の様式は

断りなく変更することがある。古い様式の申請書で応募しても受理しない。
e-mailでの申請は受け付けない。

5) 補助金受領者の義務：当該集会終了後30日以内に集会出席の概要を「天気」に掲載可能な形式で1ページ(2000字)程度にまとめ、報告書として委員会に提出する。

2. 国内で開かれる国際学術研究集会への旅費補助

1) 外国人研究者招聘の旅費補助

外国で開催される国際学術研究集会への気象学会会員の出席旅費補助を目的とした予算の他に「交流事業」としての予算が計上されています。

国際学術交流の趣旨に基づき、使途を「日本気象学会会員が主催者となり国内で開催される国際学術研究集会に出席する外国人研究者招聘の旅費の補助」に限定して、会員からの申請を募集します。

2) 応募手続：申請書の形式は特に定めていない。

当該研究集会の主催者である日本気象学会会員は、集会の期日、目的、概要、招聘する研究者の国名、氏名、招聘に関わる費用を明記して申請すること。

書類提出先は1の4)に同じ。

応募締切り日：2003年9月15日

3) 補助金受領者の義務：補助金受領者は別に定める様式の報告書を提出すること。