

「地球変動のメカニズム」

平成11年度採択研究代表者

中島 映至

(東京大学気候システム研究センター 教授)

## 「アジア域の広域大気汚染による大気粒子環境の変調について」

### 1. 研究実施の概要

本研究APEX (Asian Atmospheric Particle Environmental Change Studies) では、アジア域の人為起源エアロゾルによって、同地域の雲の場がどのように変化し、その結果、放射エネルギー収支と降雨効率がどのように変化するかを調査する。2002年度は、2000年12月と2001年4月に奄美大島周辺で行った第1回および第2回APEX観測実験 (APEX-E1、E2 実験) の詳細なデータ解析を行った。また、それをサポートするために、東シナ海領域での人工衛星データ解析やエアロゾルモデル計算を実施した。その結果、春季の東シナ海領域では硫酸塩エアロゾル、炭素性エアロゾル、黄砂エアロゾル、海塩エアロゾルが複雑に入り交じった状態にあること、これらのエアロゾルが直接、太陽放射を散乱・吸収するために大気上端で-5から-8 W/m<sup>2</sup>程度、地表面では-11から-23 W/m<sup>2</sup>程度の大きな放射強制を作りだしていることなどが明らかになった。一方、この地域のエアロゾルによって引き起こされた雲の変化を通して起こる間接的な放射強制力は-1から-4 W/m<sup>2</sup>程度の大きさであると推定された。一方、全球衛星データと大循環モデルを使って得られた全球平均の放射強制力の評価は、直接効果が-0.2から-0.5 W/m<sup>2</sup>、間接効果が-1 W/m<sup>2</sup>から-2 W/m<sup>2</sup>の範囲にあった。このようにして得られた東アジア域と全球平均での放射強制力の大きさを比較すると、直接効果は地域的には大きな不均質性を持っているが全球平均の惑星反射率をあまり変えないが、間接効果はより均質に分布しており惑星反射率を効率よく変化させることがわかる。すなわち、直接効果は熱エネルギーの再配分に大きく寄与しており、間接効果は日傘効果による惑星の冷却により大きく寄与していることが明らかになってきた。しかし、領域でも、全球でも評価には大きなばらつきが見られるので、この結論の確度を高めるデータ解析とモデルシミュレーションを今後行ってゆく予定である。そのために、奄美大島と福江島に長期観測サイトを設置し、エアロゾル、雲そして放射収支の同時観測を開始した。また、これらの拠点と航空機を使って2003年3月15日から4月14日までAPEX-E3観測実験が実施されたが、この観測には国内外の研究者や欧州宇宙機関など多くの参加者があった。これらの活動から得られるデータを利用して、より詳細なエアロゾルと雲、およびそれが引き起こす放射場への影響を明らかにできる見込みである。

## 2. 研究実施内容

・ APEX 仮想研究室の運用：これまでに整備してきた APEX 仮想研究室 (<http://duckbill.ccsr.u-tokyo.ac.jp/index.php>) は大きく発達し、ウェブサイトを見ると明らかなように、エアロゾルと雲が作り出す放射強制力の研究のためのさまざまな情報交換の場になっている。特に、2003年の観測実験であるAPEX-E1, E2, E3の局地観測実験のページでは、地上観測、航空機観測、衛星観測、数値モデリング結果を、研究者が随時、掲載・閲覧できる観測支援システムを実現した。今年度は特に衛星データや地上データの自動収集、セミリアルタイム処理システムの確立が実現し、その結果、これらの局地観測実験において、APEX研究グループのみならず、世界の広範な研究者がAPEX仮想研究室を訪れ、観測結果をタイミングよく閲覧することができた。また鹿児島空港を基地とした3機の観測航空機の運用効率がE1, E2に比べてE3では非常に良くなった。このような観測システムは今後、他の観測でも活用できる状態にあるのでさまざまな観測データの蓄積に役立てることができる。

・ 東アジア域のエアロゾルの混合状態の把握：このようなAPEX観測実験で得られたデータを利用して、前年度に引き続き詳細な解析を行った。その結果、東シナ海と日本周辺では特に春季、土壌粒子である黄砂エアロゾルや人為起源の硫酸塩エアロゾル、有機炭素性エアロゾルが移動性の高低気圧によって大陸から運ばれており複雑に混合していることを把握した。今年度は特に、衛星観測、地上観測、モデルシミュレーションといった異なる手法によって評価されるエアロゾルの光学特性と晴天太陽放射強制力がどの程度つじつまが合うのかを検討した。その結果、異なる方法から得られる直接効果の放射強制力は時系列的に似ているが、絶対値には評価法によって40%程度の違いがあることが明らかになった。図1に、2つのモデル（CFORS領域モデル、SPRINTARS全球エアロゾルモデル）、衛星リモートセンシング、地上放射観測による2001年4月の月平均での放射強制力の値をGosan (33.28N, 127.17E) と奄美大島 (28.15N, 129.30E) で示す。評価法による違いは、おもに光学的厚さと一次散乱アルベドの評価の違いにあるが、光散乱の非対称因子の評価の違いも無視できないことが分かった。また、奄美大島では地上観測によるとエアロゾルの光吸収は大きく（1次散乱アルベドが小さい）、地表面で大きな放射強制力が得られているが、他の手法から得られる値と大きな違いがあるので、今後その検証が必要である。表1に2001年4月の月平均のエアロゾルパラメーターと24時間平均晴天太陽放射強制力 $ARF(24hr, SW, clr)$ に関する効率因子 $\beta$ を示す。ここで効率因子は波長500nmでのエアロゾルの光学的厚さ $\tau_{500}$ を使って次のように定義する。

$$ARF(24hr, SW, clr) = -\beta \tau_{500}$$

表によると大気上端での値はアメリカ東海岸のTARFOX領域とインド洋での値に近く、地表面では若干小さな値になっている。このような傾向は、エアロゾルの一次散乱アルベドと散乱の非対称因子が他の地域に比べて若干大きいとすると説明できる。評価法による地

表での $\beta$ 値の違いは日々のばらつきと同程度の20%くらいの不確定性を作っている。このことは、晴天太陽放射強制力の評価法による不確定性40%のうち、約半分が光学的厚さの不確定性、残りの半分が一次散乱アルベドと散乱非対称因子の不確定性によることを意味している。

図2にGosanと奄美大島での雲の影響を含めたエアロゾルの全波長放射強制力と雲の放射強制力を示す。図はこの地域のエアロゾルが大気上端では-5から-8 W/m<sup>2</sup>、地表面では-11から-23 W/m<sup>2</sup>程度の大きな放射強制力を作りだしていることを示している。一方、雲の変化を通して起こる間接的な放射強制力は-1から-4 W/m<sup>2</sup>程度の大きさであると推定された。一方図には示さないが、全球衛星データと大循環モデルを使って得られた全球平均の放射強制力の評価は、直接効果が-0.2から-0.5 W/m<sup>2</sup>、間接効果が-1 W/m<sup>2</sup>から-2 W/m<sup>2</sup>の範囲にあった。このようにして得られた東アジア域と全球平均での放射強制力の大きさを比較すると、直接効果は地域的には大きな不均質性を持っているが全球平均の惑星反射率をあまり変えない一方、間接効果はより均質に分布しており惑星反射率を効率よく変化させることがわかる。すなわち、直接効果は熱エネルギーの再配分に大きく寄与しており、間接効果は日傘効果による惑星の冷却に大きく寄与していることが明らかになってきた。

・エアロゾルと雲研究のための新しいテクノロジーの確立：本研究では、低過飽和度雲核計や測雲レーダーとライダーを組み合わせた同時観測システムによる新しいデータの取得を通して、エアロゾルが雲に及ぼす影響に関する理解を深める戦術を取っている。今年度は新たに開発したFMCW型測雲レーダーシステムを実用レベルに引き上げ、APEX-E3実験において奄美大島に投入した。現在、データを解析中であるが、パルス型の測雲レーダーと同等である-36 dBz程度の高感度が得られることを確認した。同時にエアロゾルと雲に関しても新しいモデルの開発を行ってきた。エアロゾル4種の化学輸送モデルSPRINTARSは、地上観測との比較を通して改良され、確度の高いエアロゾル分布のシミュレーションが可能になってきた。さらに本年度は、新たにエアロゾルと相互作用する雲物理モデルの開発を行った。これをAPEX-E2観測期間に適応して、衛星から得られる雲水量と有効粒子半径の分布の特徴を東アジアにおいて再現することに成功した。その一例（2001年4月20日の場合）を図3に示す。衛星観測値はMODIS衛星搭載イメージャーから推定された値、モデル値はSPRINTARS全球エアロゾルモデルから計算されたエアロゾル数密度分布から推定される雲核量を与えて計算したものを示す。図によると衛星観測に見られる雲粒子が大きな領域と小さな領域のおおざっぱな分布が再現されていることが分かる。しかしながら、図4に示す頻度分布を見ると雲核量を4倍程度大きくしないと衛星観測による頻度分布の形を再現できないことがわかる。今後モデルの改良と雲核量の推定手法の検討が必要である。

・本年度はSPRINTARSエアロゾルモデルを利用して新たに1981年から2001年までの黄砂現象の再現も行った。その結果、最近数年の黄砂現象の増加傾向は、黄砂発生域が中国北東部に移動したためであることを見いだした（図5）。従来大きな発生地帯であったタクラマカン砂漠では長期的に風速が減少しており、むしろ発生量は減少傾向にある。これらの現象は、数年程度の気候変動の影響もあるが、地球温暖化の影響も無視できないことが、

温暖化の数値実験結果を解析することによって明らかになってきた。今後、このような人為起源要因による土壌性粒子の放射強制力についても評価を行う必要があると思われる。

・これらの研究成果を議論するために、2002年7月3日から5日まで第5回APEX国際ワークショップを、若手研究者と学生のための放射の学校と並列で開催した。海外からの研究者を含めて2つの会合で延べ110余名の参加者があり、活発な議論と啓蒙活動を展開することができた。

・今後の課題：多くの地上観測データと衛星データ、さらにエアロゾルと雲のモデル群を確保できたので、まず、モデルによる観測データの詳細なシミュレーションを通して、モデル性能を調査する予定である。このようにして検証されたモデルを用いて、人為起源エアロゾルが作り出す直接効果と間接効果の放射強制力と降雨量変化を最終的に評価する予定である。

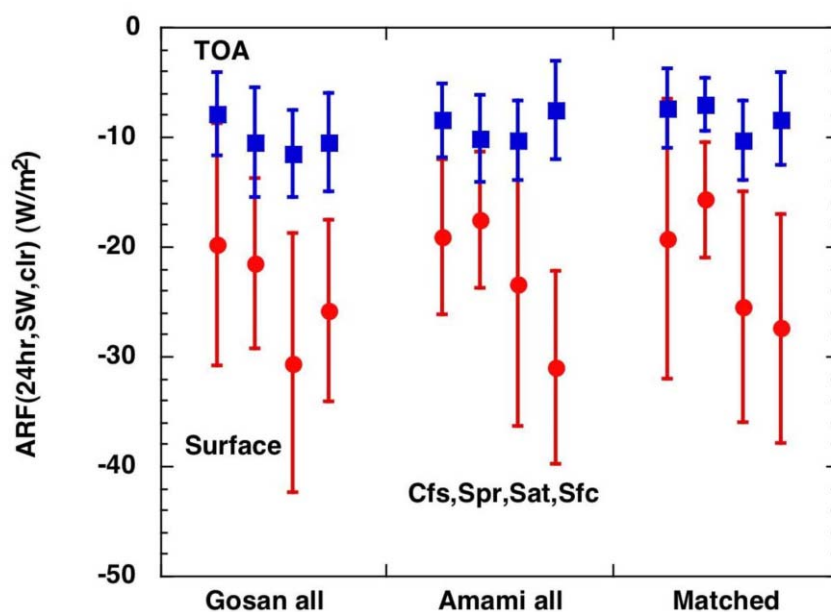


図1 Gosanと奄美大島において評価された2001年4月平均のエアロゾルによる24時間晴天太陽放射強制力。4つの方法：CFORSモデル (Cfs)、SPRINTARSモデル (Spr)、衛星リモートセンシング (Sat)、地上放射観測 (Sfc) による大気上端 (TOA) と地上 (Surface) での値。各サイトの全データを利用した結果 (Gosan all, Amami all) および、4つの手法すべての評価があった日 (Gosanで11日分、奄美大島で6日分) での値の平均を示す。

表1 24時間平均晴天太陽放射強制力の効率因子  $\beta$  と波長500nmでのエアロゾルパラメーター（光学的厚さ  $\tau_{500}$ 、一次散乱アルベド  $\omega_{500}$ 、非対称散乱因子  $g_{500}$ ）。Gosanと奄美大島での2001年4月の月平均値。他の研究による放射強制力の効率因子も同時に示す。 $\beta$  値のばらつきを土の後に示すが日々のばらつきを (t) で、評価方法によるばらつきを (m) で示す。

	TOA		Surface
This study			
$\beta$	$26 \pm 4(t), 3(m)$	$63 \pm 11(t), 12(m)$	
$\tau_{500}$	$0.37 \pm 0.15(t), 0.04(m)$		
$\omega_{500}$	$0.92 \pm 0.03(t), 0.03(m)$		
$g_{500}$	$0.71 \pm 0.03(t), 0.02(m)$		
Charlson (1992)	30	30	Global mean
Russel et al. (1999)	30	70	TARFOX area
Ramanathan et al. (2001)	25	75	Moldive, KCO

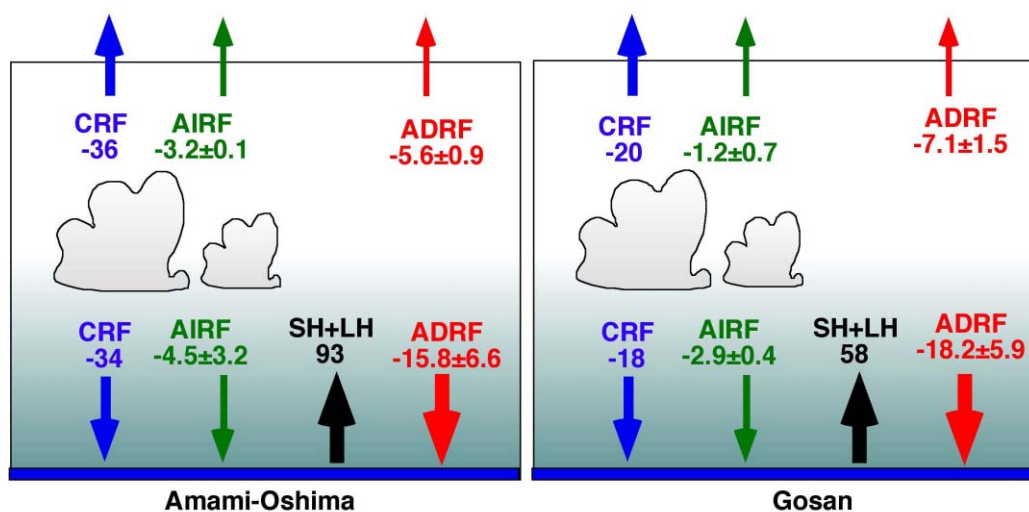


図2 Gosanと奄美大島における地表・大気系のエネルギー収支。2001年4月平均 ( $W/m^2$ )。雲放射強制力 (CRF)、エアロゾルによる直接効果の放射強制力 (ADRF)、間接効果による放射強制力 (AIRF)、顕熱と潜熱フラックス (SH+LH)。誤差表示は評価法による不確定性を示す。

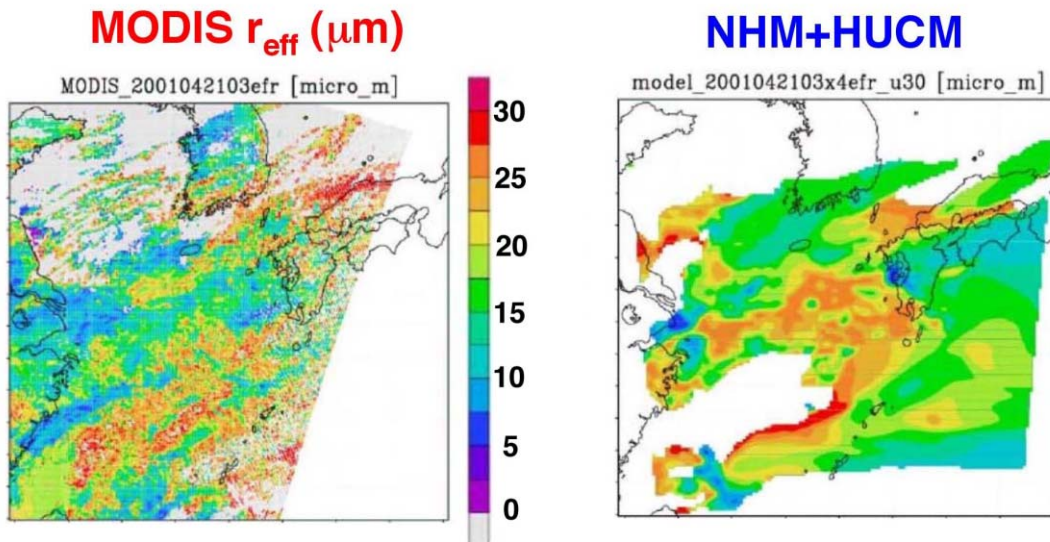


図3 MODIS衛星イメージャーによって推定された雲層上端付近の有効雲粒子半径（マイクロン）（右）および非静力雲物理モデルによる再現値（左）。2001年4月21日3:00UTCの場合。

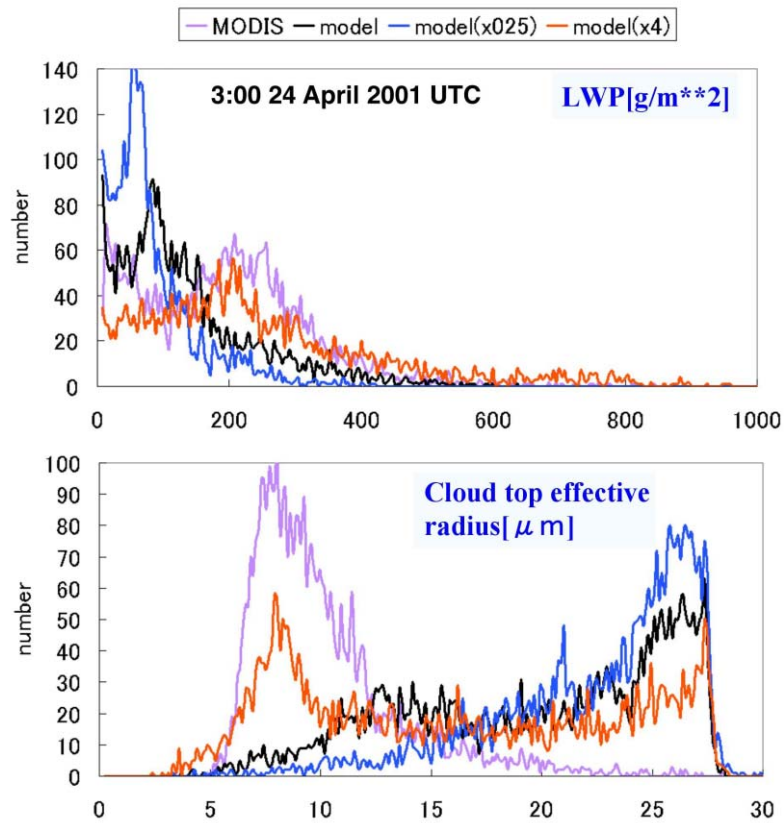


図4 雲水総量（上、 $\text{g}/\text{m}^2$ ）と有効雲粒子半径（下、マイクロン）の出現ヒストグラム。図3のMODISの場合（紫）、モデル値（黒）、モデルにおいて雲核量を1/4にした場合（青）、4倍にした場合（赤）。

3-5月平均の風  
(700hPa, 1981-2001年の平均)

3-5月平均地上付近ダスト質量濃度  
(2000-2001年平均) - (1995-1999年平均)

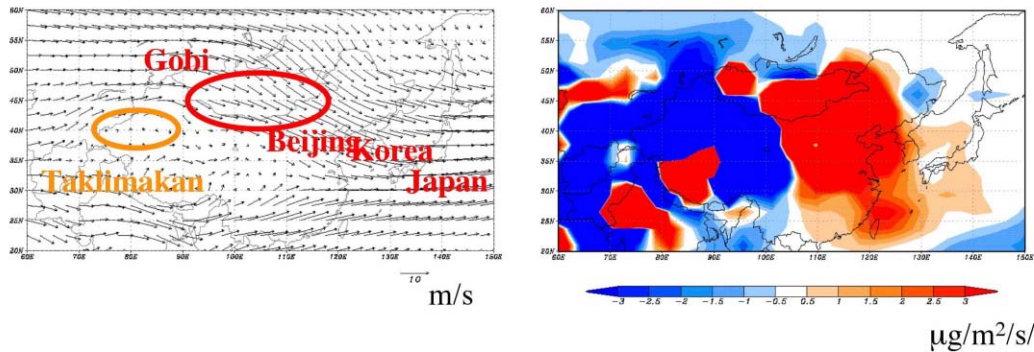


図5 2001年平均の風ベクトルの1981年平均からの偏差（左）およびモデルによって再現された2000年から2001年の期間平均黄砂粒子質量フラックスの1995年から1999年までの期間平均からの偏差（右）。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 航空機観測グループ（リーダー：内山 明博）

- ① 内山 明博（気象庁気象研究所気候研究部、室長）  
石坂 隆（名古屋大学地球水循環研究センター、助教授）  
島山 史郎（国立環境研究所大気圏環境部、室長）  
浅野 正二（東北大学大気海洋センター、教授）

#### ② 研究項目

“航空機観測によってエアロゾル前駆物質、エアロゾル、雲核、雲粒子、および放射場の関係を調査する”

#### (2) アクティブセンサーグループ（リーダー：熊谷 博）

- ① 熊谷 博（通信総合研究所電磁波計測部門、研究主管）  
岡本 創（東北大学大気海洋センター、助教授）  
安井 元昭（通信総合研究所地球環境計測部、主任研究官）  
杉本 伸夫（国立環境研究所大気圏環境部、室長）  
村山 利幸（東京商船大学物理学教室、助教授）  
鷹野 敏明（千葉大学大学院自然科学研究科、助教授）

#### ② 研究項目

“雲レーダーとライダーによってエアロゾルと雲の鉛直方向の物理構造を調査する”

#### (3) 地上観測グループ（リーダー：高村 民雄）

- ① 高村 民雄（千葉大学環境リモートセンシング研究センター、教授）  
鶴田 治雄（東京農工大学農学部、非常勤講師）  
岡田 格（科学技術振興事業団、研究員）

太田 幸雄（北海道大学大学院工学研究科、教授）

② 研究項目

“地上におけるエアロゾル前駆物質、エアロゾル、雲、放射場の連続観測を行い、これらの場の関係を調査する”

(4) 衛星リモートセンシンググループ（リーダー：中島 孝）

① 中島 孝（宇宙開発事業団地球観測利用研究センター、副主任開発部員）

日暮 明子（国立環境研究所大気圏環境部、研究員）

増永 浩彦（コロラド州立大学、研究員）

② 研究項目

“衛星リモートセンシングによって広域におけるエアロゾルと雲場の構造を調査する”

(5) 大規模気候モデリンググループ（リーダー：鶴野 伊津志）

① 鶴野 伊津志（九州大学応用力学研究所、教授）

藤吉 康志（北海道大学低温科学研究所、教授）

高橋 正明（東京大学気候システム研究センター、教授）

大原 利眞（静岡大学工学部システム工学科、教授）

竹村 俊彦（九州大学応用力学研究所、助手）

② 研究項目

“数値モデルによってエアロゾルと雲の生成メカニズムを再現することによって、人為起源エアロゾルによって放射強制力と降雨能率の変化を評価する”

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- Chin, M., P. Ginoux, S. Kinne, O. Torres, B. Holben, B. Duncan, R. Martin, J. Logan, A. Higurashi, and T. Nakajima, 2002: Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sunphotometer measurements. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 461-483.
- Gunnar, M., F. Stordal, M. Johnsrud, A. Ignatov, M.I. Mishchenko, I.V. Geogdzhayev, D. Tanré, P. Goloub, T. Nakajima, A. Higurashi, O. Torres, B.N. Holben, 2003: Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over ocean. *J. Atmos. Sci.*, in press.
- Hatakeyama, S., I. Uno, K. Murano, H. Mukai, H. Bandow, 2002: Analysis of the Plume from Mt. Sakurajima and Kagoshima City by Aerial Observations of Atmospheric Pollutants and Model Studies -- The IGAC/APARE/PEACAMPOT Campaign over the East China Sea --. *J. Aerosol Res. Japan*, **17**, 39-42.
- Higurashi, A., and T. Nakajima, 2002: Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(17), 1836, doi:10.1029/2002GL015357.



- Higurashi, D. Koch, C. Land, U. Lohmann, M. Mishchenko, T. Nakajima, G. Pitari, B. Soden, I. Tegen, and L. Stowe, 2002: A Comparison of model- and satellite-derived optical depth and reflectivity. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 441-460.
- Ishizaka, Y and M. Adhikari, 2003] Composition of cloud condensation nuclei. *J. Geophys. Res.*, **108**, D4, 4138 (AAC 2-1, 16).
- Kagawa, M., Y. Ishizaka and K. Ohta, 2003: Sources of sulfate in winter aerosols over the Sea of Japan, as inferred from selenium composition. *Atmos. Environ.*, **37**, 1593-1600.
- Kimura, H., H. Okamoto and T. Mukai, 2002: Radiation pressure and pointing-robertson effect for fluffy dust particles, *ICARUS*, **157**, 349-361.
- Li, L.-P., H. Fukushima, R. Frouin, B. G. Mitchell, M.-X. He, I. Uno, T. Takamura, and S. Ohta, 2003: Influence of sub-micron absorptive aerosol on SeaWiFS-derived marine reflectance during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, in press.
- Liu, Q.J., T. Takamura, N. Takeuchi, and G. Shao, 2002: Mapping of borealvegetation of a temperate mountain in China by multitemporal Landsat TMimagery, *Int. J. Remote Sensing*, **23**, 3385-3405.
- Liu, Z., N. Sugimoto, and T. Murayama, 2002: Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar., *Appl. Opt.*, **41**, 2760-2767.
- Liu, Z. and N. Sugimoto, 2002: Simulation study for cloud detection with space lidars by use of analog detection photomultiplier tubes, *Appl. Opt.*, **41**, 1750-1759.
- Masunaga, H., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi, and K. Suzuki, 2002: Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined Use of TRMM Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner. 2. Climatology of warm clouds and rain. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4367, doi: 10.1029/2001JD001269.
- Masunaga, H., T.Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi, R. Oki, and S. Kuroda, 2002: Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of TRMM Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner: Algorithm. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi: 10.1029/2001JD000743.
- Murayama, T., 2002: Optical properties of Asian dust aerosol lofted over Tokyo observed by Raman lidar. *Journal of the Tokyo University of Mercantile Marine (Natural Sciences)*, **53**, 169-172.
- Nakajima, T., M. Sekiguchi, T. Takemura, I. Uno, A. Higurashi, D.H. Kim, B.J. Sohn, S.N. Oh, T.Y. Nakajima, S. Ohta, I. Okada, T. Takamura, and K.

- Kawamoto, 2002: Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region. *J. Geophys. Res.*, in press.
- Nakajima, T. Y., H. Murakami, M. Hori, T. Nakajima, T. Aoki, T. Oishi, and A. Tanaka, 2003: Efficient use of an improved radiative transfer code to simulate near-global distributions of satellite-measured radiances, *Appl. Opt.*, **42**, in press.
  - Okamoto, H., 2002: Information content of the 95-GHz cloud radar signals: Theoretical assessment of effects of nonsphericity and error evaluation of the discrete dipole approximation, *J. Geophys. Res.*, **107**, D22, 4628, doi:10.1029/2001JD001386.
  - Okamoto, H., S. Iwasaki, M. Yasui, H. Horie, H. Kuroiwa, and H. Kumagai, 2003: An algorithm for retrieval of cloud microphysics using 95GHz cloud radar and lidar, *J. Geophys. Res.*, **108**, D7, 4226, doi:10.1029/2001JD001225, 2003
  - Penner, J.E., S.Y. Zhang, C.C. Chuang, M. Chin, J. Feichter, Y. Feng, P. Ginoux, M. Herzog, A. Sekiguchi, M., T. Nakajima, K. Suzuki, K. Kawamoto, A. Higurashi, D. Rosenfeld, I. Sano, and S. Mukai, 2002: A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite datasets of aerosol and cloud parameters. *J. Geophys. Res.*, in press.
  - Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, K. Asai, T. Endoh, and T. Nakajima, 2002: Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, No. 19, 1901, doi:10.1029/2002GL015112.
  - Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano, 2002: Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2158, doi:10.1029/2002GL016251.
  - Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne, 2002: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *J. Climate*, **15**, 333-352.
  - Uno, I., G.R. Carmichael, D. Streets, S. Satake, T. Takemura, J.-H. Woo, M. Uematsu, and S. Ohta, 2003: Analysis of surface black carbon distributions during ACE Asia using a regional scale aerosol model. *J. Geophys. Res.*, in press (2002JD003252).
  - Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto, 2002: Multiple Scattering Simulations for the Japanese Space Lidar Project ELISE, *IEEE Trans. Geosciens and Remote Sensing*, **40**, 550-559.

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数：1件