

B-4 能動型と受動型リモートセンサーの複合利用による大気汚染エアロゾルと雲の気候影響研究

(3) 衛星データとモデルによる雲・エアロゾルの研究

3) 気候モデルによる雲・エアロゾル相互作用と雲形成の研究

東京大学気候システム研究センター

大気モデリング分野 教授 高橋正明

気候モデリング分野 教授 中島映至（研究リーダーとして全サブテーマに関連が

あるが、特にこのサブサブテーマの研究の詳細に関わっているので、研究業績等をこのテーマで記載する。）

研究協力者：竹村俊彦（九州大学応用力学研究所）、鈴木健太郎、向井真木子、井口享道、五藤大輔、福田 悟、三井達也、鶴田治雄、Nick Schutgens（東京大学気候システム研究センター）

平成14～18年度合計予算額 60,098千円
（うち、平成18年度予算額 16,000千円）

[要旨] 本サブサブテーマでは、大気大循環モデルと衛星データ解析等から得られた雲・エアロゾル微物理量データセットを利用して、エアロゾルが気候に及ぼす間接効果量の推定を行う。本年度は最終年度として、これまでに得た大循環モデルの改良、非静力学雲・エアロゾルモデルを利用して、他班から出てくる衛星・地上データのより多くの解析を他班と協力しておこなった。その結果次の成果を得た。

- ・SPRINTARS+GCMおよび、NHM+HUCMビン型エアロゾル雲モデルを開発した。
- ・米国製を含む現在のGCMでは、エアロゾルと雲層の成層状態をうまく表現できていない。シミュレーションされた層高が高すぎることを示された。
- ・そのため、大気上端直接効果が過小評価気味である可能性があることが示唆された。
- ・全球平均では、間接効果が大きく、直接効果は小さいことが示された。
- ・東シナ海領域では全球平均の6倍以上の放射強制がかかっており、直接効果が大きいことがわかった。
- ・その結果、日傘効果による海面温度の減少と温室効果ガスの温暖化が引き起こす2次大循環が間接効果による雲量の増加よりも優勢になり、中国域で雲量減少を引き起こすメカニズムが見いだされた。
- ・さらにエアロゾルが引き起こす降雨量変化は人為起原温室効果ガスが引き起こす変化と同等の大きさを持っており、しかも地域的に非常に複雑であることがわかった。
- ・ビン型雲エアロゾルモデルによって、衛星が観測するエアロゾル量と雲微物理パラメーター（光学的厚さ、有効粒子半径）との間の特徴的な相関を再現することができた。

[キーワード] 気候モデリング、雲、エアロゾル、放射強制力、大気汚染

1. はじめに

大気中に排出されている人為起源のエアロゾル粒子は太陽放射を吸収・反射して、放射過程と気候に影響を及ぼす。近年では数値モデルによって人為起源エアロゾルの間接効果による放射強制力が評価されているが、その評価にはばらつきが大きいと言われている。IPCC (2001) の報告書では、エアロゾルの第一種間接効果による放射強制力を $0\text{W}/\text{m}^2$ から $-2\text{W}/\text{m}^2$ として評価した上に、第二種間接効果も考慮すれば、各モデルの計算による放射強制力の不確定性はさらに $0\text{W}/\text{m}^2$ から $-5\text{W}/\text{m}^2$ に広がると結論づけている。これらの不確定性を縮小させることが地球温暖化現象の再現と予測に非常に重要である。

2. 研究目的

本研究は、雲レーダーとライダーを利用した観測システムの開発のために役立つ雲とエアロゾルの相互作用現象に関する物理パラメーターを提供するために、大循環気候モデルを用いて相互作用現象のシミュレーションを行う。特に、雲の有効粒子半径と雲水量の値がエアロゾル量によってどのように変化するかをモデルを用いて調査する。

3. 研究方法

本サブサブテーマでは、CCSR-NIES-FRCGC/MIROC大循環モデルとSPRINTARSエアロゾルモデル (Takemura et al., 2000) を利用して、エアロゾルの気候影響について研究する。また、他班から得られる観測値と比較するためのモデル値の提供をおこなう。さらに非静力学大気モデル非静力学正20面体格子大気モデルNICAMや気象庁統一非静力モデルNHMに結合することができるビン型雲粒子モデルを開発する。

4. 結果・考察

本研究では、エアロゾルの光学的厚さ(波長550nm)と低層雲の有効粒子半径について、SPRINTARSモデルから得られる値とADEOS-II/GLI衛星搭載イメージャーから得られた値を多く比較したが、その代表的な事例として図1に2003年4月における月平均値の比較を示す。図によるとモデルは衛星で得られた特徴をよく表現している。しかし、系統的な違いも見いだされる。図は外洋上においてエアロゾルの光学的厚さが過大評価されている可能性を示している。詳細な調査によるとこれはサブピクセルサイズの雲を海塩と間違えた可能性があることがわかった。雲スクリーニングをより強化するとこの過大傾向は解消される傾向にあることを確認した。また、北太平洋では、衛星観測ではエアロゾル量が多く、そのために起ったと考えられる雲の有効粒径の減少傾向がエアロゾルの分布パターンと似ていることから、衛星でみられるエアロゾル量の大きな分布パターンは過大評価ではないことが示唆される。従って逆に、モデルのエアロゾル光学的厚さが過小評価されている可能性が示された。

エアロゾルのモデリング結果をさらに検証するために、図2に本研究で観測された福江島と奄美大島におけるエアロゾルの光学的厚さの時系列をモデル値と比較した。図は衛星値が若干、大

きめであることを除いて、時系列の長期トレンドをほぼ再現していることがわかる。その誤差は0.1程度である。また、図3に本研究も参加したUNEP/ABCプロジェクト(Ramanathan et al., 2005)におけるEAREX05局地実験(Nakajima and Yoon, 2005)でスカイラジオメーターから得られたエアロゾルの一次散乱アルベドの時系列を示す。図は、中国Hefeiサイト(31.90N, 117.17E)では、一次散乱アルベドが0.8から0.9と非常に小さな値を取る一方、大陸起原のエアロゾルのアウトフロー領域にあたる韓国、日本のサイトでは、これよりも大きな値を取ることがわかる。この場合、奄美大島における値の方が、済州島や福江島付近に比べると小さいことが示されている。

これらの図は、東アジア域においてエアロゾル量と光学特性が大きな季節変化と年々変化を示している。

さて、このような観測値の動態を理解するために、図4に大循環モデルによって計算された2005年3月平均のエアロゾルの光学的厚さ(550nm)と一次散乱アルベドの分布を示す。図によると、EAREX05期間中の東シナ海付近ではエアロゾルの光学的厚さは0.2から0.4程度になることが示され、図2で示した地上観測値の傾向と整合していることがわかる。図は奄美大島などの海洋上のサイトも、中国や東南アジアからのエアロゾルの影響を受けることにより、図2に示す高い値になることがわかる。また、大陸の影響を受けた気団に覆われた場合には、一次散乱アルベドも0.9程度の小さい値を取ることがわかる。しかし、詳細に図2、3、4を比較すると、観測では、奄美大島では、済州島/福江島に比べて、光学的にも厚く、一次散乱アルベドも小さくなっており、モデルの地域依存性と異なる振る舞いをしていることがわかる。モデルでは、中国南部から伸びる大きな光学的厚さの領域と、低い一次散乱アルベドの分布パターンが異なっており、一次散乱アルベドが大陸起原の前駆物質の量のみならず、海上におけるエアロゾルの水蒸気成長にも強く依存していることが示唆される。観測値との違いは、モデルにおける中国南部からのエアロゾル輸送量が過小評価されており、また、水蒸気成長が過大評価されている可能性があることを示している。もっとも、観測サイトのある島周辺では相対湿度が下がる傾向があり、観測値が一次散乱アルベドを過小評価している可能性もある。

図5に、図4に対応する期間における大気上端と大気下端の全天状態(雲を含む)のエアロゾルによる放射強制力を示す。図によると東アジア領域では大気上下端でそれぞれ -1 W/m^2 から -5 W/m^2 、 -2 W/m^2 から -10 W/m^2 程度の強制がかかっていることがわかる。また、インド洋やインドシナ半島ではさらに大きな強制力がかかっていることをわかる。図5と図4を比較すると、このような傾向は、東アジア域に比べて、東南アジアから南アジアにかけての領域でエアロゾルの光学的厚さが大きく、一次散乱アルベドが小さいことで説明されると考えられる。詳細な調査によると、同時に雲量が南アジア域では比較的少ないことも大きな強制を生み出す原因になっていることもわかった。

Nakajima et al. (2003)によると晴天域の大気上下端でのエアロゾルによる放射強制はほぼ次の形式で表現される。

$$\begin{aligned} ARF(\text{clear}, 24 \text{ hour}, \text{surface}) &= -\beta_{\text{sfc}} \tau_{500} \\ ARF(\text{clear}, 24 \text{ hour}, \text{toa}) &= -\beta_{\text{toa}} \tau_{500} \end{aligned}$$

係数 β の値はモデル計算や地上のSKYNET点における日射量観測から求められる(Kim et al., 2005;

Takamura et al., 2007) が、その大きさは $\beta_{\text{sf}_c} = 70$ から 100 W/m^2 、 $\beta_{\text{toa}} = 20$ から 30 W/m^2 程度の値になる。通常、赤外の放射強制はその1/5程度以下であるが、土壌粒子が加わると同程度の大きさの温室効果を作り出すことが詳細な数値計算でわかった。また図6に示すように、土壌粒子の複素屈折率の虚数部は報告によって大きく異なるために、太陽放射領域においても土壌粒子の放射強制力への評価には大きな不確定性がある。図7には、図6に示す屈折率の虚数部の小さなもの(ADEC1)と大きなもの(ADEC2) (Aoki et al., 2005)によって構成した土壌粒子を、大気汚染エアロゾルと混合した場合の一次散乱アルベドを図7に示すが、選ばれる屈折率モデルによって、一次散乱アルベドが土壌粒子の量の増加によって増加する場合もあるし、減少する場合もあることがわかる。図5に示す屈折率の大きな不確定性は、測定方法の誤差だけではなく、実際の土壌粒子の種類の違いによっても起っていると考えられるので、土壌粒子が多く混合することの多いアジア域のエアロゾルの放射強制力が、実際に大きく変化していることを考えられる。図8には、このようにして得られた様々なエアロゾルの混合状態が作り出す大気上下端の放射強制力の理論値を示す。図には晴天大気とともに曇天時の値も示した。図は、晴天日の放射強制がエアロゾルタイプによって大きく変化すること、また、雲量が100%の状況にあっても放射強制があまり小さくならないことを示している。これは従来よく行われていた晴天大気の放射強制力に晴天率をかけて全天状態の放射強制を算定する手法が誤りであることを示している。また図から、下層雲の上にエアロゾル層が乗る場合には、大気上端での放射強制力が正になる現象(すなわち系を加熱する)が起ることもわかる。逆に上層雲の下にエアロゾルが入ると放射強制力は小さくなる。

以上の結果、エアロゾルの放射強制力がエアロゾル組成、エアロゾル層の高さ、および雲の高さに依存して大きく値が変わることがわかった。従って、正確な放射強制力の評価のためには、モデルが層高等を正しく再現することが必要である。この点を確認するために、図9にライダーと雲レーダーで求めたエアロゾルのスケール高と雲量分布の観測値とモデル値を比較する。図によると中高緯度でエアロゾルの層高がモデルで過大評価されること、熱帯域では季節変化に伴う層高の大きな変化をうまく再現できないことがわかる。また、モデルが下層雲量を過小評価、上層雲量を過大評価する傾向があることもわかった。図では熱帯の例を示したが、このような雲量の過小/過大評価の傾向は中緯度のデータでも同様に見られる。また、世界の代表的な大循環モデルでも同様な傾向が見られる。このことは、現在の大循環モデルでは上層雲が多いため、大気上端でのエアロゾルの放射強制を過小評価する傾向を持っていることを示唆している。また、エアロゾル層高が高いと低層雲の上にエアロゾル層が乗り易くなるために、放射強制力は正の値になりやすく、この要因でもエアロゾルの放射強制力が小さく評価されざみになる可能性がある。

図10に本研究でこれまでに得たエアロゾルの直接効果と間接効果の評価のまとめを示す。図によると本研究では、全球平均の場合、大気上端での直接放射強制力の絶対値は非常に小さい(ほぼ0)と評価された。これは、IPCC第4次報告書第2章による様々な過去研究のまとめから得られた約 -0.5 W/m^2 に比べると小さい。SPRINTARSから得られるエアロゾルの光学特性についてはAERONET地上観測網から得られるものに対して検証が取られている(Takemura et al., 2002)が、アジア域については、上に議論してきたような問題点(一次散乱アルベドの分布の違い、土壌粒子の光学特性の把握の困難、エアロゾルと雲の層構造のシミュレーションの問題)があるので、若干過少評価であるかも知れない。一方、全球平均では間接効果が -1 W/m^2 程度と大きな値を示し

ており、地球温暖化の相殺要因としては一番大きいことがわかった。この値はIPCC第4次報告書の7章のモデル結果の平均値と同等の値になる。しかし、第4次報告書第2章の直接効果と第一関節効果の和もこれと同等程度であり、さらにこれに第2間接効果を加えるとずっと大きな放射強制が期待される。この意味において第4次報告書の評価も章間で整合がとれておらず、結論として、本研究の結果も考慮すると、現時点でも間接効果の評価には0.5 W/m²程度の不確定性があると考えられる。評価を改善するには、述べてきたようなエアロゾルと雲層の層状構造のモデル再現能力のアップと、あまり研究の進んでいない深い対流雲に対する間接効果の研究が必要である。一方、大気下端では直接効果が卓越する。

さて、東アジア域に関してみると全エアロゾルの放射強制力は全球平均の6倍程度の値を示す。また、この領域では大気上端でも下端でも直接効果の放射強制が卓越することがわかる。このような放射強制はエアロゾル量によって大きく変わるので、エアロゾル量の大きな大陸およびその周辺と外洋域の間に大きな気候強制が加わる。そのためにエアロゾルによる複雑な降雨量変化が発生する。図11に海洋混合層を結合した大循環気候モデルによって行った、産業革命以前と2000年の状態における平衡感度実験から得られた降雨量の差を示す。図ではアジア域のエアロゾルが太平洋や大西洋の降水変化を引き起こすことを示している。詳細な解析によると、エアロゾルによる日射量の減少が作り出す海面温度の低下が引き起こす二次大循環のために、このような複雑な降雨量変化が起ることがわかった。図はその影響が太平洋や大西洋まで及ぶことがわかる。また、化石燃料起原エアロゾルと植生燃焼起原エアロゾルでは異なる降雨量変化をもたらすこともわかった。

以上の研究結果は大循環モデルを用いて得られたが、より物理過程に忠実にエアロゾルと雲場を再現するために、ビン型粒子成長モデルを組み込んだ非性力学領域雲・エアロゾルモデルも本研究で開発した。図12に、EAREX05局地実験期間中の大陸からの吹き出しが強い大気状態に対して行った数値実験結果を示す。図は大陸からの吹き出しにともなって生成される積雲群が海上で発達する様子が再現されているが、同時に雲粒の有効粒子半径も大きく変化する様子が示されている。この地域での有効粒子半径は太平洋の外洋に比べて著しく小さい10ミクロン以下であり、このような状況のもとでは大陸から輸送されるエアロゾルによる間接効果が発生していることがわかる。これらの特徴的な値は、MODIS衛星搭載イメージャーによって観測された雲粒子半径とも整合していることが図からわかる。本モデルは、MIROC+SPRINTARS全球モデルによってシミュレーションされるエアロゾル分布からネスティングしており、エアロゾルの長距離輸送の効果も適切に評価されている。図には示さないが衛星観測との詳細な比較の結果、観測が示す雲の光学的厚さと有効粒子半径のエアロゾル依存性をモデルがよく再現していることを確認した (Suzuki et al., 2006)。

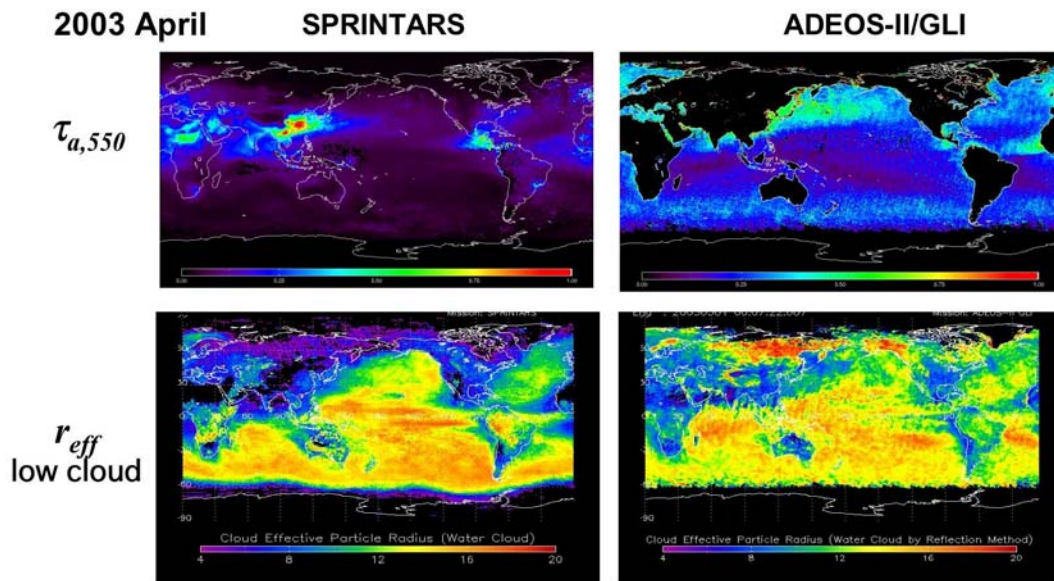


図1. 大循環モデルとADEOS-II/GLI衛星イメージャーから得られたエアロゾルの光学的厚さ(550nm)と低層雲の有効粒子半径(ミクロン)の全球分布の比較。2003年4月における月平均値。

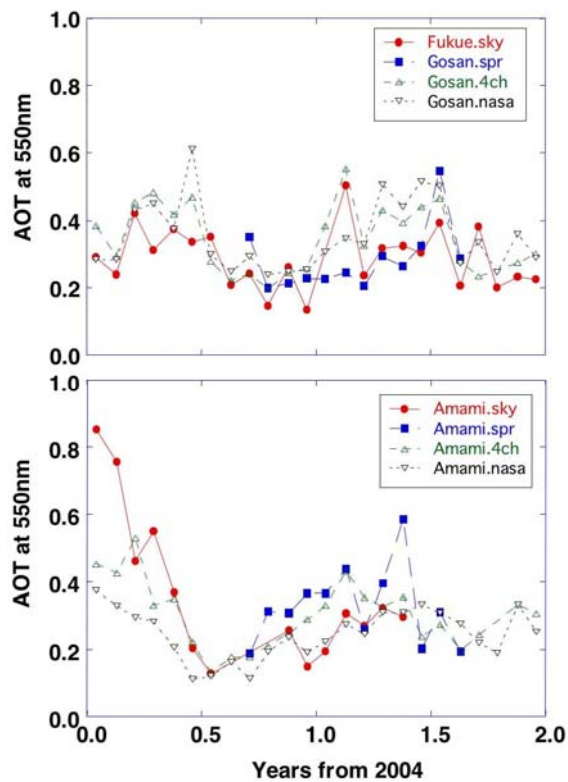


図2. 福江島と奄美大島におけるエアロゾルの光学的厚さ(550nm)の時系列。スカイラジオメーター(sky)、TERRA/MODIS衛星観測結果(NASAおよび本研究で開発した4波長アルゴリズム(4ch)2つの解析アルゴリズムを使用)、モデル値(spr)を比較する。

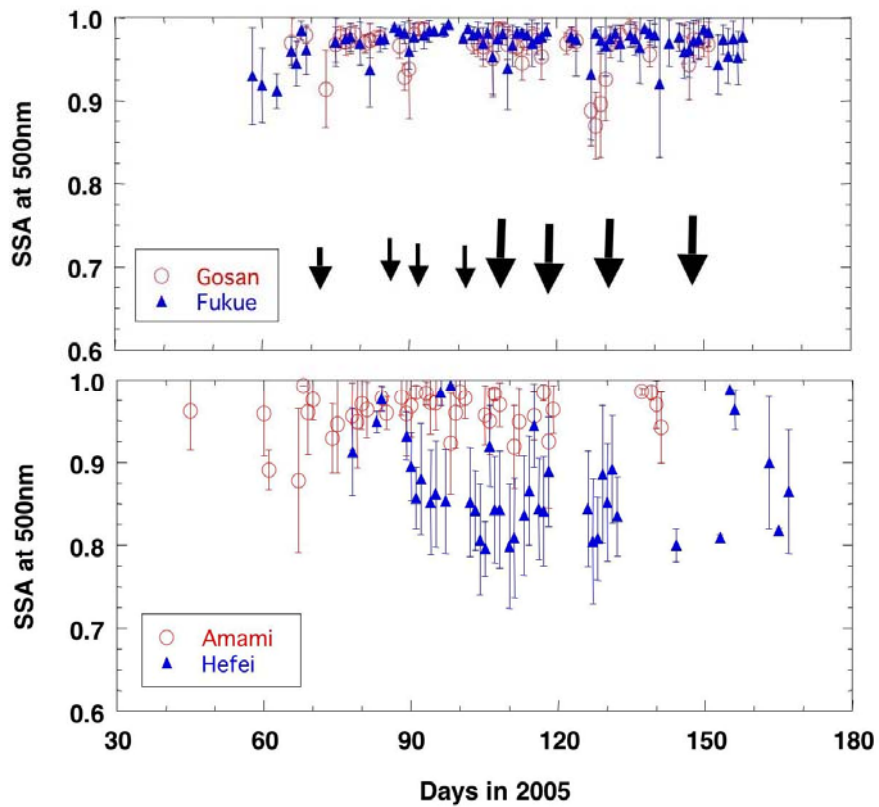


図3. 濟州島（韓国Gosan観測所）、福江島、奄美大島、中国Hefei観測所においてスカイラジオメーターから観測されたエアロゾルの一次散乱アルベドの日平均値の時系列。2003年3、4月の例。

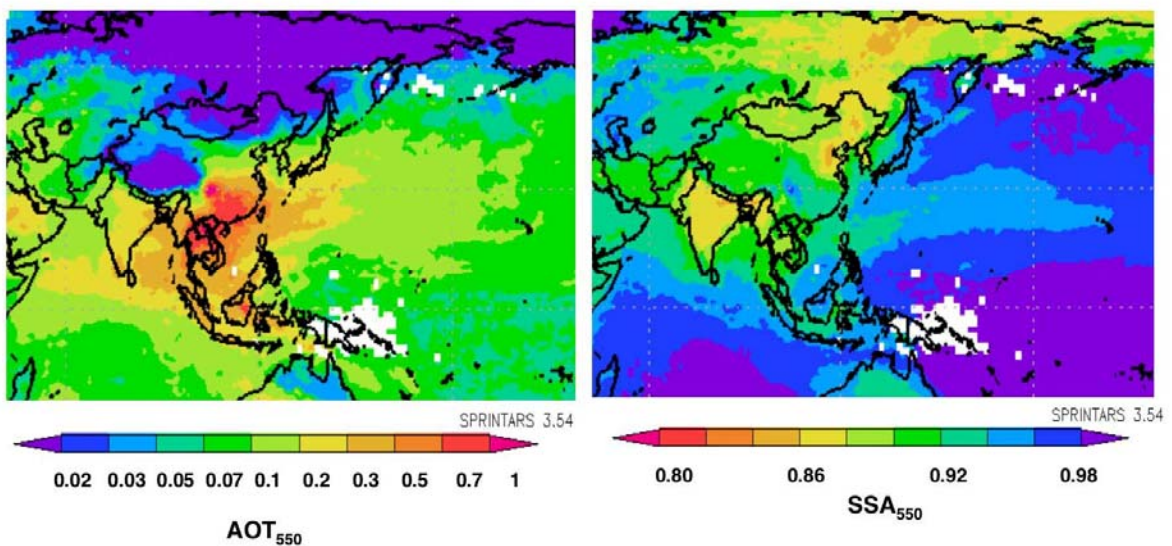


図4. 大循環モデルによって計算されたエアロゾルの光学的厚さと一次散乱アルベドのアジア域における分布。2005年3月の月平均値。

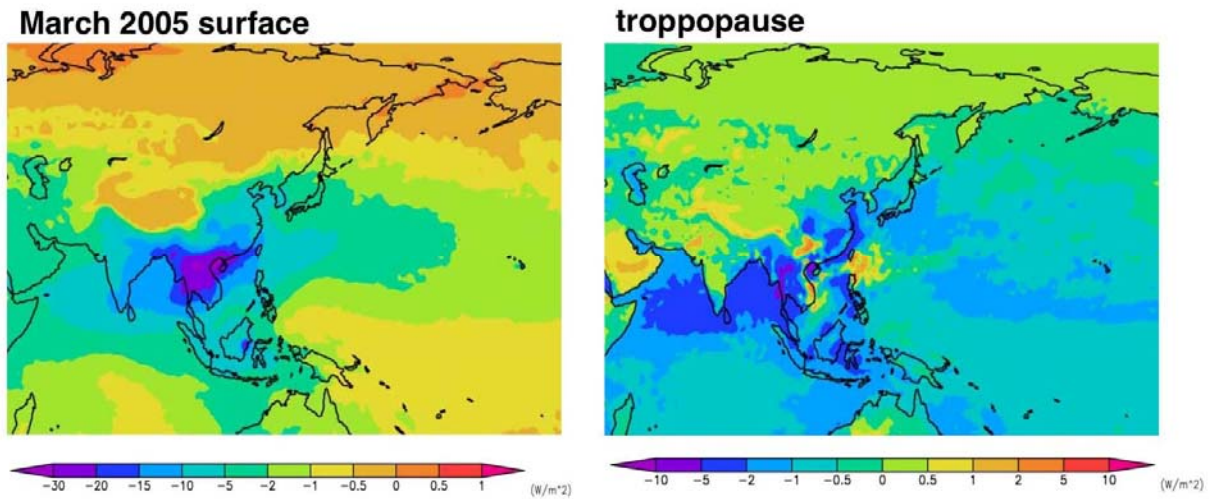


図5. 大循環モデルによって計算された大気上下端における全天状態・全波長のエアロゾル放射強制力の分布。2005年3月の月平均値。

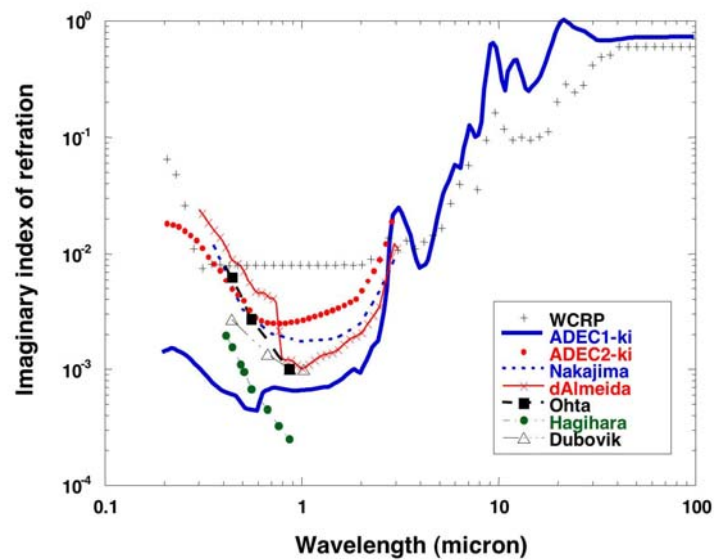


図6. 土壌粒子性エアロゾルの複素屈折率の虚数部の波長依存性。様々な過去研究結果をプロットする。

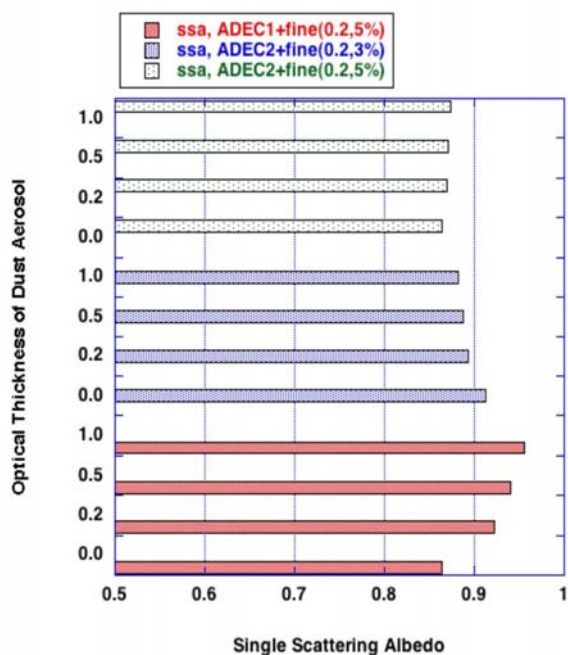


図7. 図5のADEC1とADEC2型土壌モデルが、半径0.1ミクロンのモード半径を持つ小粒子エアロゾルと混合した場合の一次散乱アルベド（波長500nm）。小粒子エアロゾルの光学的厚さ（波長500nm）を0.2、含まれるすすの体積比を3%、5%；また土壌粒子の光学的厚さをいくつか変えた。

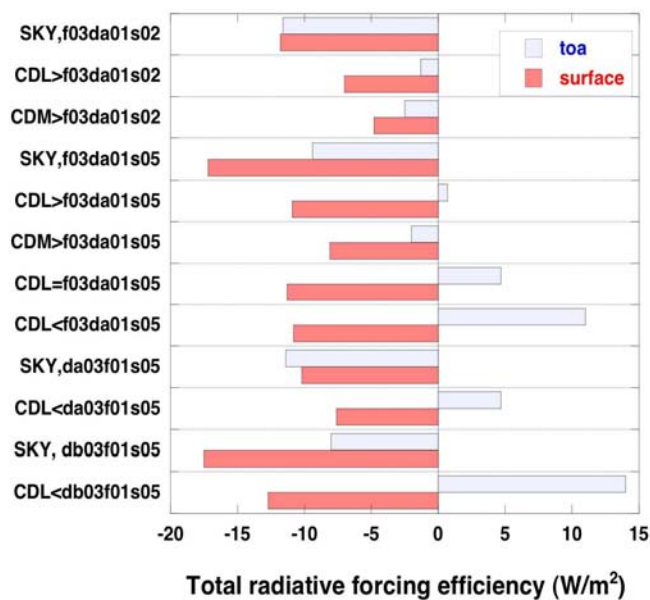


図8. 様々なエアロゾルによる大気上下端の全天放射強制力。晴天および曇天時の値を示した。エアロゾルの全光学的厚さ（波長500nm）は0.4に固定した。成層状態を示すキーの意味は表1を参照。

表1. 図8に示す放射強制力の数値実験パラメーター値。小粒子モードのすす体積比 (soot)、光学的厚さ (tauf)、層の下端高度 (btm, km)、上端高度 (top)、土壌粒子の光学的厚さ (taud)、層の下端 (btm)、上端 (top)、土壌粒子の屈折率モデル (成層状態を示すキー中のdaがADEC1)、ADEC2 (dbがADEC2)、雲の光学的厚さ (tauw)、層の下端 (btm)、上端 (top) を示す。

Stratification	fine				dust			cloud		
	soot	tauf	btm	top	taud	btm	top	tauw	btm	top
SKY,f03da01s02	0.02	0.3	0	1.0	0.1	0	1	0	1	1.5
CDL>f03da01s02	0.02	0.3	0	1.0	0.1	0	1	10	1	1.5
CDM>f03da01s02	0.02	0.3	0	1.0	0.1	0	1	10	4	5
SKY,f03da01s05	0.05	0.3	0	1.0	0.1	0	1	0	1	1.5
CDL>f03da01s05	0.05	0.3	0	1.0	0.1	0	1	10	1	1.5
CDM>f03da01s05	0.05	0.3	0	1.0	0.1	0	1	10	4	5
CDL=f03da01s05	0.05	0.3	1	1.5	0.1	1	1.5	10	1	1.5
CDL<f03da01s05	0.05	0.3	2	3.0	0.1	2	3	10	1	1.5
SKY,da03f01s05	0.05	0.1	1	1.5	0.3	2	3	0	1	1.5
CDL<da03f01s05	0.05	0.1	2	3	0.3	2	3	10	1	1.5
SKY,db03f01s05	0.05	0.1	1	1.5	0.3	2	3	0	1	1.5
CDL<db03f01s05	0.05	0.1	2	3	0.3	2	3	10	1	1.5

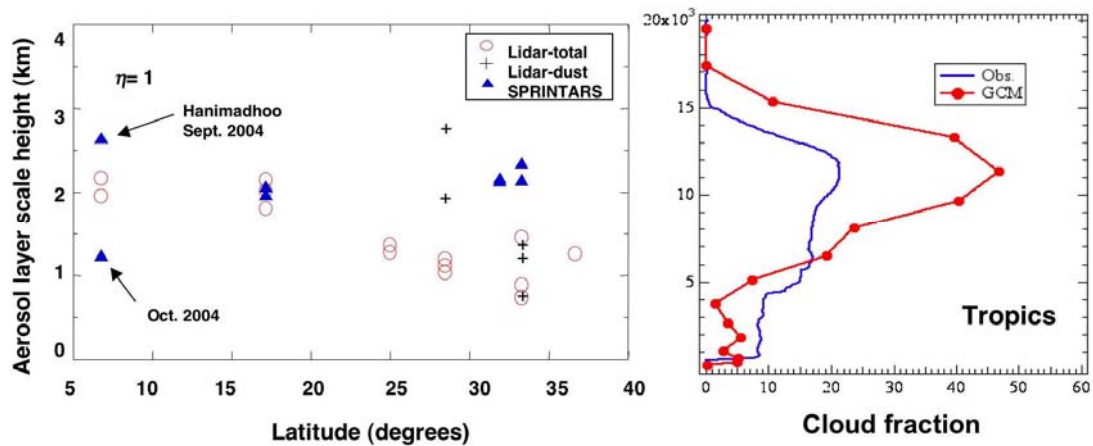


図9. 観測サイトごとのエアロゾル層のスケール高 (左、横軸は観測サイトの緯度) と、熱帯域での雲量 (右) の観測値を大循環モデル値と比較する。

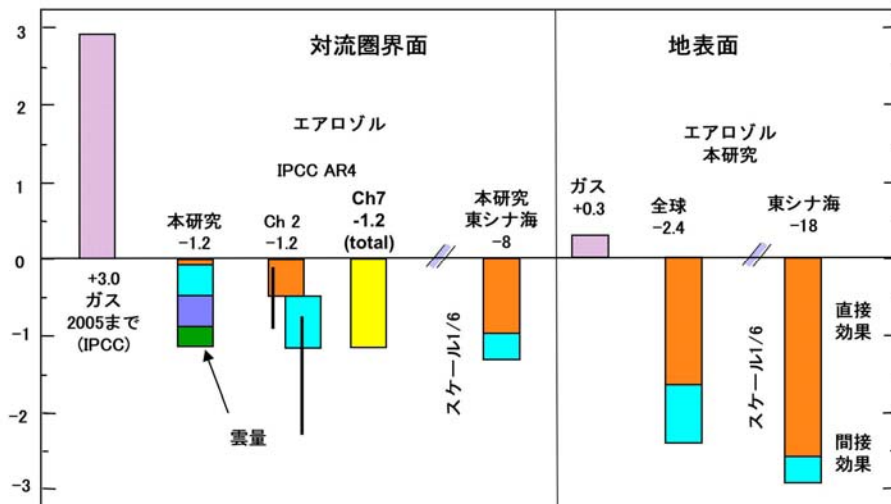


図10. 人為起原のエアロゾルが産業革命以降に起こした直接・間接効果による放射強制力のまとめ。比較のためにIPCC第4次報告書の評価も示す。また、済州島と奄美大島付近の東アジア域の全エアロゾルによる放射強制力もスケールを1/6にして示してある。

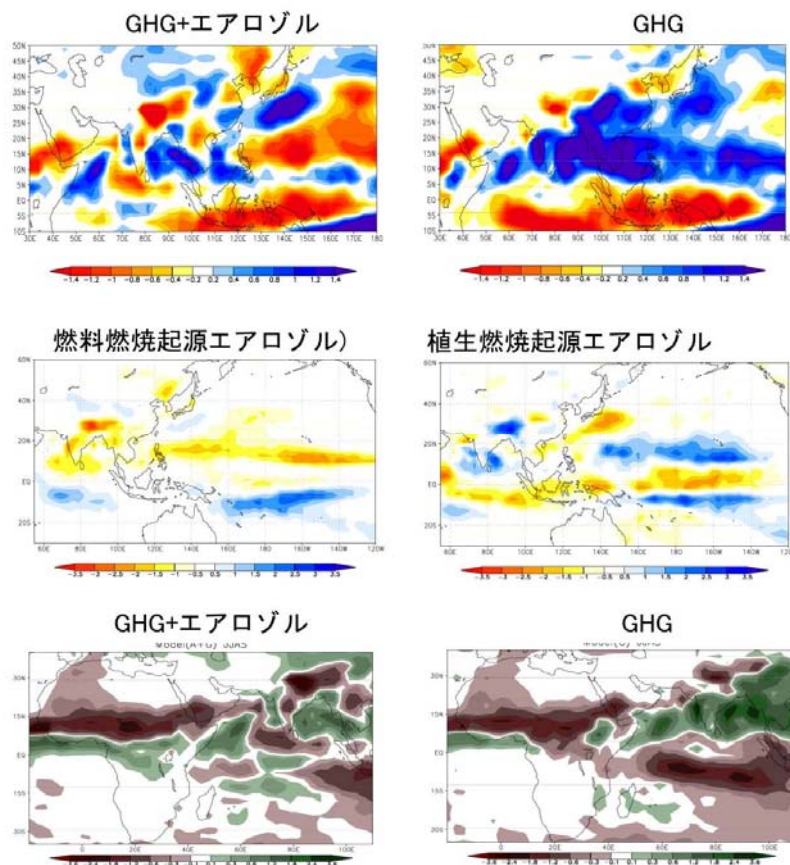


図11. 産業革命以降の人為起原温室効果ガスの変化による降雨量変化（上段右、下端右）と、エアロゾルも考慮した場合の変化（上段左、下端左）。中段に化石燃料起原のエアロゾルと植生燃焼起原のエアロゾルによる変化を示す。6月から9月までの期間平均値（mm/day）。

0300 UTC 13 March 2005

Typical convective cloud by monsoon in winter

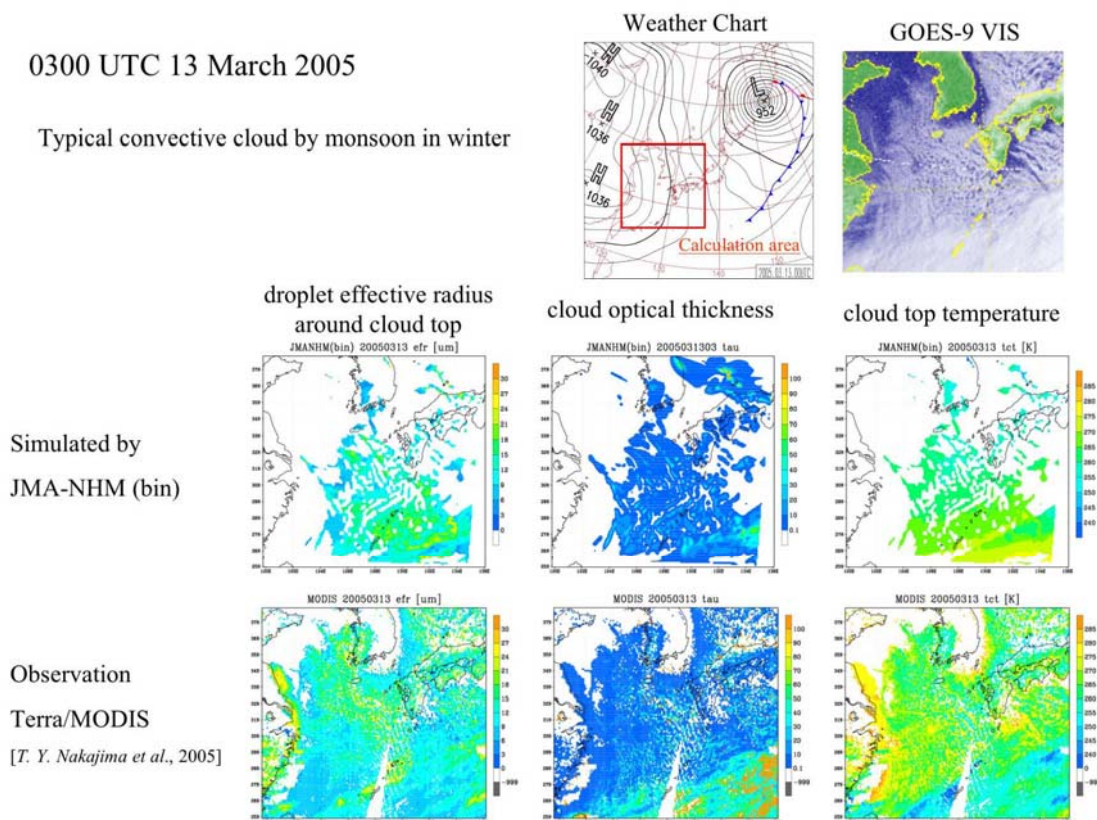


図12. 非静力学ビン型エアロゾル・雲モデルによる東シナ海領域での雲の光学的厚さ、有効粒子半径、雲頂温度のシミュレーション結果。MODISによる観測値も示す。2005年3月15日の例。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究で得た成果は次のようにまとめられる。

- SPRINTARS+GCMおよび、NHM+HUCMビン型エアロゾル雲モデルを開発した。
- 米国製を含む現在のGCMでは、エアロゾルと雲層の成層状態をうまく表現できていない。層高が高すぎる。
- これは大気上端直接効果が過小評価気味であることを示唆している。
- 全球平均では、間接効果が大きく、直接効果は小さいことが示された。
- 東シナ海領域では全球平均の6倍以上の放射強制がかかっており、直接効果が大きい。
- その結果、日傘効果による海面温度減少と温室効果ガスの温暖化が引き起こす2次大循環が間接効果による雲量の増加よりも優勢になり、中国域で雲量減少を引き起こす。
- さらにエアロゾルが引き起こす降雨量変化は人為起源温室効果ガスが引き起こす変化と同等の大きさを持っており、しかも地域的に非常に複雑である。
- ビン型雲エアロゾルモデルによって、衛星が観測するエアロゾル量と雲微物理パラメータ（光

学的厚さ、有効粒子半径) との間の特徴的な相関について再現することができた。

その結果、放射強制力については全球平均で、 0.5 W/m^2 以下の精度の評価できたと思う。この値は当初目標とした精度よりも倍近く大きい。その原因は、エアロゾルの強制力については未だに複雑な過程が大きいこと、また雲物理モデル研究がもう少し必要であった点あげられる。また、降雨量変化については、エアロゾルが引き起こす影響が大きいことを示すことができた。本研究の成果によって、今後の研究のための研究課題とそのために必要なツールを準備することができた。今後はいよいよ実践的なモニタリングに関する研究提案をしてゆくつもりである。

(2) 地球環境政策への貢献

総合科学技術会議の温暖化イニシアチブ、文部科学省の共生プログラム、IPCC第4次報告書に関する検討会にて、本研究に基づいた人為起源エアロゾルの間接効果の重要性、ADEOS-II/GLIセンサーからの成果、雲レーダーとライダーを搭載したEarthCARE衛星の重要性を発言してきた。国連環境計画 (UNEP) のアジアの褐色雲 (ABC) プロジェクトにおける東アジア領域実験をリードした。現在、UNEP/ABCプロジェクトの大気汚染が引き起こす水資源インパクトに関するスタディーワーキンググループの幹事を行っており、本研究の成果を適切に反映させる予定である。本研究成果の一部はIPCC第4次報告書にも取り上げられている。また、環境省のGOSATミッションのイメージャーグループの主査として、本研究の成果を反映させることによって、計画を推進している。学会会議の地球人間圏分科会、G8に向けた課題別分科会の組織化などにも貢献しているが、その際にも本研究で得た知見を有効に活用している。

6. 引用文献

- 1) Aoki, T., T. Y. Tanaka, A. Uchiyama, M. Chiba, M. Mikami, and S. Yabuki (2005), Sensitivity experiments of direct radiative forcing caused by mineral dust simulated with a chemical transport model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83A, 315-331.
- 2) Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, and T. Takamura (2005), Aerosol radiative forcing over East Asia determined from ground-based solar radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, 110, D10S22, doi:10.1029/2004JD004678.
- 3) Nakajima, T. and S.-C. Yoon (Eds.) (2005), Implementation plan for ABC Gosan Campaign: East Asia Regional Experiment 2005, 73 pp., School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, and National Research Laboratory, Meteorological Research Institute, the Korea Meteorological Administration, Seoul, Republic of Korea.
- 4) 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 (2003), Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region, *J. Geophys. Res.*, 108, D23, 8658, doi: 10.1029/2002JD003261.
- 5) Ramanathan, V., and P. J. Crutzen (2003), New directions: Atmospheric Brown Clouds, *Atmos. Environ.*, 37, 4033-4035.

- 6) Suzuki, K., T. Nakajima, T.Y. Nakajima, and A. Khain, 2006: Correlation pattern between effective radius and optical thickness of water clouds simulated by a spectral bin microphysics cloud model. *SOLA*, **2**, 116-119, doi:10.2151/sola.2006-030.
- 7) Takamura, T., N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Aoki, T. Nakajima, B. J. Sohn, and H. Takenaka (2007), Aerosol radiative characteristics at GOSAN/Korea during the ABC EAREX 2005. *J. Geophys. Res.*, under revision.
- 8) Takamura, 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.
- 9) Takamura, T., T. Nozawa, S. Emori, T.Y. Nakajima, and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2004JD005029.

7. 国際共同研究等の状況

- (1) ヨーロッパ宇宙機関がEarthExplorer 3号の搭載ミッションとしてEarthCAREを選定した。これにより、本研究から得られたエアロゾル-雲相互作用現象に関する研究の成果が、実際の衛星ミッションによって応用に供される可能性が出てきた。中島は日本側代表研究者である。
- (2) 当気候センターの佐藤正樹助教授、米国NASAのESSP/CLOUDAT代表研究者のGraeme Stephens教授（コロラド州立大学）等と、本研究で開発しているエアロゾルと反応する非静力学雲モデルを地球シミュレーターで稼働してCLOUDSATデータを解析する研究連絡を行った。昨年は草津において、今年度は10月にイギリス、レディング大学にてワークショップが開かれる。
- (3) UNEP/ABS (Atmospheric Brown Cloud Project) (PI: V. Ramanathan、スクリプス海洋研究所) の東アジア領域実験 (EAREX2005) が2005年4月に実施された。その実験計画書では本研究の成果が多く取り入れられている。また、観測実験の実施とそのデータの解析でも本研究成果がひろく利用されている。Journal of Geophysical Researchの特集号が生まれ、中島が代表者となった。
- (4) GLI衛星計画：宇宙開発事業団のADEOS-IIに搭載されている36チャンネル汎用全球イメージャーGLIの高次成果物の作成アルゴリズム研究は国際的なPI研究チームによって運用されているが、本研究で使っているエアロゾルと雲アルゴリズムは、このPI研究チームと密接な協力関係によって改良され、またより多くのデータに適用されてきた。さらに次世代型のSGLI (Second Generation Global Imager) の計画検討も始まり、その中で本研究成果が生かされ始めた。
- (5) GOSAT衛星計画：環境省のGOSAT衛星観測ミッションにおいて、CAIイメージャーのための解析アルゴリズム作り、エアロゾルモデリングによる支援システム作り、地上検証システム作りに本研究結果が利用され始めた。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

- 1) Takemura, T., Y.J. Kaufman, L.A. Remer, and T. Nakajima, 2007: Two competing pathways of aerosol effects on cloud and precipitation formation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04802,
- 2) Okamoto, H., T. Nishizawa, T. Takemura, H. Kumagai, H. Kuroiwa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, S. Emori, A. Kamei, and T. Nakajima, 2007: Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: Midlatitude case study during the MR01/K02 cruise of the research vessel Mirai, *J. Geophys. Res.*, **112**, D08216, doi:10.1029/2006JD007628.
- 3) Suzuki, K., T. Nakajima, T.Y. Nakajima, and A. Khain, 2006: Correlation pattern between effective radius and optical thickness of water clouds simulated by a spectral bin microphysics cloud model. *SOLA*, **2**, 116-119, doi:10.2151/sola.2006-030.
- 4) Takemura, T., Y. Tsushima, T. Yokohata, T. Nozawa, T. Nagashima, and T. Nakajima, 2006: Time evolutions of various radiative forcings for the past 150 years estimated by a general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19705, doi: 10.1029/2006GL026666, 2006.
- 5) 中島 孝、中島映至、日暮明子、菊地信行、久慈 誠、2006 : ADEOS-II衛星搭載GLIセンサーは大気の何をみてきたか。日本リモートセンシング学会誌、26、33-36.
- 6) Nakajima, T.Y., A. Uchiyama, T. Takamura, N. Tsujioka, T. Takemura, and T. Nakajima, 2005: Comparisons of warm cloud properties obtained from satellite, ground, and aircraft measurements during APEX Intensive observation period in 2000 and 2001. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 1085-1-95.
- 7) Kikuchi, N., T. Nakajima, H. Kumagai, H. Kuroiwa, A. Kamei, R. Nakamura, and T.Y. Nakajima, 2006: Cloud optical thickness and effective particle radius derived from transmitted solar radiation measurements: Comparison with cloud radar observations. *J. Geophys. Res.*, **111**, D07205, doi:10.1029/2005JD006363.
- 8) Carmine, C. Di, M. Campanelli, T. Nakajima, C. Tomasi, and V. Vitale, 2005: Retrievals of Antarctic aerosol characteristics using a sun-sky radiometer during the 2001-2002 austral summer campaign. *J. Geophys. Res.*, **110**, D13202, doi:10.1029/2004JD005280, 2005.
- 9) Kapustin, V.N., A.D. Clarke, Y. Shinozuka, S. Howell, V. Brekhovskikh, T. Nakajima, and A. Higurashi, 2006: On the determination of a cloud condensation nuclei from satellite: Challenges and possibility. *J. Geophys. Res.*, **111**, D04202, doi:10.1029/2004JD005527.
- 10) Adhikari, M., Y. Ishizaka, H. Minda, R. Kazaoka, J.B. Jensen, J. L. Gras, and T. Nakajima, 2005: Vertical distribution of cloud condensation nuclei concentrations and their effect on microphysical properties of clouds over the sea near the southwest islands of Japan. *J. Geophys. Res.*, **110**, D10203, doi:10.1029/2004JD004758.
- 11) Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T.Y. Nakajima, and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2004JD005029.
- 12) Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, and T. Takamura, 2005: Aerosol radiative forcing over East Asia determined from ground-based solar radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, **110**, D10S22, doi:10.1029/2004JD004678.

- 13) Mukai, M. , T. Nakajima, and T. Takemura, 2004: A study of the long-term trend of mineral dust aerosol distributions in Asia using a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19204, doi: 10.1029/2003JD004270, 2004.
- 14) Katagiri, S., and T. Nakajima, 2004: Radiative characteristics of cirrus clouds as retrieved from AVHRR. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 81-99.
- 15) Bergstrom, R. W., P. Pilewskie, J. Pommier, M. Rabbette, P. B. Russell, B. Schmid, J. Redemann, A. Higurashi, T. Nakajima, and P. K. Quinn, 2004: Spectral absorption of solar radiation by aerosols during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S15, doi:10.1029/2003JD004467.
- 16) Kahn, R., J. Anderson, T.L. Anderson, T. Bates, F. Brechtel, A. Clarke, E. Dutton, R. Flagan, R. Frouin, H. Fukushima, B. Holben, S. Howell, B. Huebert, A. Jefferson, H. Jonsson, K. Carrico, O. Kalashnikova, J. Kim¹⁴, S.-W. Kim, P. Kus, W.-H. Li, J.M. Livingston, S. Masonis, C. McNaughton, J. Merrill, S. Mukai, T. Murayama, T. Nakajima, P. Quinn, J. Redemann, M. Rood, P. Russell, I. Sano, B. Schmid, J. Seinfeld, N. Sugimoto, J. Wang, E.J. Welton, J.-G. Won, S.-C. Yoon, 2004: Environmental Snapshots for Satellite Multi-Angle Aerosol Retrieval Validation During the ACE-Asia Field Campaign, *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S14, doi:10.1029/2003JD004339.
- 17) Kawamoto, K., T. Hayasaka, T. Nakajima, D. Streets, and J.-H. Woo, 2004: Examining the aerosol indirect effect using SO₂ emission inventory over China using SO₂ emission inventory. *Atmos. Res.*, **72**, 353-363.
- 18) Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Takemura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2004: Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, **109**, No. D2, D02209, 10.1029/2003JD003387.
- 19) Suzuki, K., T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, K. Kawamoto, and A. Higurashi, 2004: A study of the aerosol effect on a cloud field with simultaneous use of GCM modeling and satellite observation. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 179-194.
- 20) Campanelli, M., T. Nakajima, and B. Olivieri, 2003: Determination of the solar calibration constant a sun-sky radiometer: Proposal of an in situ procedure. *Appl. Opt.*, **43**, 651-659.
- 21) Kawamoto, K., and T. Nakajima, 2003: Seasonal variation of cloud particle size as derived from AVHRR remote sensing. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, No. 15, 1810, doi: 10.1029/2003GL017437.
- 22) Takemura, T., T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta, and N. Sugimoto, 2003: Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian-Pacific region simulated by Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS). *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), 8659, doi:10.1029/2002JD003210.
- 23) 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, 2003: Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region. *J. Geophys. Res.* , **108**(D23), 8658, doi: 10.1029/2002JD003261.
- 24) Myhre, G., F. Stordal, M. Johnsrud, A. Ignatov, M.I. Mishchenko, I.V. Geogdzhayev, D. Tanré, J.-L. Deuzé, P. Goloub, T. Nakajima, A. Higurashi, O. Torres, and B.N. Holben, 2004: Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over the ocean. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 499-513.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 中島映至、2006:雲・エアロゾルと気候の関係。エネルギー・資源, **27**, 113-118.
- 2) Nakajima, T., and S.-C. Yoon, eds., 2005: Implementation Plan for ABC Gosan Campaign: East Asian Regional Experiment 2005. document supported by UNEP and WMO, published by Korean Meteorological Research Institute, 74pp.
- 3) 中島映至、鶴田治雄、2004: 森林火災とエアロゾル、自然災害科学、23、337-340.
- 4) 中島映至、2004: 東アジアにおける大気汚染と気候影響、天気、51、783-790.
- 5) Nakajima, T., 2004: Chapter 9. Climate and Human Activities. in "Nature and Human Communities", Takeshi Sasaki (ed.), 171-185, Springer-Verlag, Tokyo, 2004, ISBN 4-431-20720-1.

(2) 口頭発表（学会）

- 1) Nakajima, T., 2006: Active remote sensing and climate studies. *Proc. 23rd International Laser Radar Conference*, 24-28 July 2006, Nara, Japan, 3-4 (invited). LidarWS0606NKJ.pdf
- 2) 中島映至、2006:大気粒子研究の重要性と衛星観測。日本気象学会2006年度春季大会予稿集、つくば、2006年5月21日-24日、p. 84.
- 3) 五藤大輔、中島映至、竹村俊彦、2006:二次生成有機エアロゾル(SOA)の気候への影響。日本気象学会2006年度春季大会予稿集、つくば、2006年5月21日-24日、p. 410.
- 4) 鈴木健太郎、中島映至、中島 孝、2006: 衛星観測とビン法雲モデルを用いた雲微物理過程の研究。日本気象学会2006年度春季大会予稿集、つくば、2006年5月21日-24日、p. 95.
- 5) Nakajima, T., 2005: Overview of EAREX05 observation. *APMEX&EAREX Joint Data Analysis Workshop*, 5-6 Dec. 2005, Bangkok.
- 6) Nakajima, T., 2005: A modeling study of effects of atmospheric particles on the earth's climate and environment. *55th Canadian Chemical Engineering Conference*, 16-19 Oct. 2005, Invited.
- 7) Nakajima, T., 2005: A strategy for ABC EAREX05 Collaboration. 2nd EAREX05 Data Analysis Workshop., 25 Oct., Seoul.
- 8) Nakajima, T., 2005: An overview of ABC-EAREX2005 Experiment., IAMAS, 8 August, Beijing.
- 9) Nakajima, T., 2005: Overview of UNEP/ABC-East Asian Regional Experiment 2005 (EAREX05). EAREX05 Data Analysis Workshop, 29 June- 1 July 2005, Kyoto.
- 10) Nakajima, T., A. Higurashi, and I. Sano, 2005: Cloud and Aerosol Imager on GOSAT. 2nd International Workshop on Greenhouse Gas Measurement from Space, 24-25 March 2005, Pasadena, USA.
- 11) Nakajima, T., 2005: On the Recent Progress of Atmospheric Satellite Remote Sensing and Radiation Budget Studies. *CERES International Workshop*, 17-18 Feb. 2005, Chiba.
- 12) Nakajima, T., M. Kimoto, A. Abe, and H. Hasumi, 2004: Issues of the global warming and climate change simulations. *Proc. 21st Century Center of Excellence (COE) International Symposium: Predictability of the Evolution and Variation of the Multi-scale Earth System*. 8-9 Jan. 2004, Tokyo, 232-235.

- 13) Nakajima, 2003: Issues in the surface radiation measurements. Proc. 2003 Intern. Symp. on the Climate System of Asian Monsoon and its Interaction with Society. 11-13 Nov. 2003, Khon Kaen, Thailand, 83-85.

(3) 出願特許
なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) J. Geophys. Res., Organizing the special section of ABC/EAREX05 experiment.
- 2) IUGG2007/MS003、Lead convener
- 3) AOGS2007/AS12, Lead convener
- 4) APMEEX and EAREX Joint Data Analysis Workshop, Bangkok, Thailand, 1-2 Dec. 2005.
- 5) ABC-EAREX05 1st Data analysis workshop, Kyoto, Japan, June 29 -July 1, 2005.
- 6) 2nd data workshop for atmospheric brown cloud (ABC) East Asian Regional Experiment 2005, Seoul, Korea, 25-26 October 2005.
- 7) Air Pollution and Climate Change Study Workshop, Phimai, Thailand, 26-28 April, 2005.

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 中島映至、地球温暖化：対策に仮想研究所、毎日、2007年4月26日。
- 2) 気候システム研究センター、4 国立大が温暖化研究、朝日、2007年4月20日。
- 3) 気候システム研究センター、温暖化研究4 大学連携、東大・千葉大など、気候予測システム開発、日経、2007年3月31日夕刊一面
- 4) 中島映至、2007： IPCC第4次報告書SPMの発表に関して、海面水位の上昇についてのコメント、産経新聞、2007年2月3日
- 5) 中島映至、2007：「環境キーパーソン100」において温暖化諸問題についての回答、「月刊環境ビジネス」2月号、50-50.
- 6) 中島映至、2006： 天気予報はなぜ難しいか？ 婦人公論、対談 泉 麻人、中島映至、麻木久仁子、5月22日号、148-153.
- 7) 中島映至、2006： 論点「異常気象の予測 精度向上へ多分野連携」、読売新聞、2006年2月1日朝刊。
- 8) 読売新聞、2006年1月30日、「温暖化」研究で産学連携
- 9) 日経新聞、2006年1月9日、「温暖化による自然災害 発生や影響予測、東大など計算モデル開発へ」
- 10) ニュートン、2005年7月号、128p, 「地球の気温は温室効果ガスだけでは決まらない」の記事で、中島のエアロゾルの日傘効果、雲の効果のコメントが取り上げられる。
- 11) 日本テレビ、2005年5月18日：「おもいっきりテレビ」の「今日は何の日」コーナーでセントヘレンズ火山爆発と昭和55年の冷害との関係についてコメント。
- 12) 日経新聞、2005年5月1日、サイエンス、「温暖化促す大気汚染対策？」でエアロゾルの気候影響についてコメント。

- 13) 琉球新聞2005年3月6日、「褐色雲」、中島がリードするABC東アジア観測実験に関する記事、
島山史郎氏コメント、MIDORI-II/GLI画像
- 14) 毎日新聞2005年3月7日、「褐色雲」、中島がリードするABC東アジア観測実験に関する記事、
島山史郎氏コメント
- 15) 朝日新聞2005年2月21日朝刊1面、「アジアの褐色雲」、中島がリードするABC東アジア観測
実験に関する記事
- 16) 朝日新聞2005年2月16日温暖化モデリングの問題点と雲の重要性に関する記事コメント

(6) その他

なし