

課題名	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		
課題代表者名	中島映至（東京大学気候システム研究センター）		
研究期間	平成14-18年度	合計予算額	355,150千円（うち18年度 65,936千円）
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 雲レーダによる雲観測手法高度化とシナジアルゴリズムの研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・雲レーダ観測手法の高度化の研究（独立行政法人情報通信研究機構） ・雲レーダ・ライダーシナジアルゴリズムに関する研究（東北大学） ・雲レーダ地上観測システムの高度化の研究（千葉大学） <p>(2) 高スペクトル分解ライダー等による雲・エアロゾル観測技術の研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ライダーによる雲・エアロゾル観測技術の研究（独立行政法人国立環境研究所） ・近紫外線高スペクトル分解能ライダーに関する研究（福井大学） <p>(3) 衛星データとモデルによる雲・エアロゾルの研究（東京大学）</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 可視・赤外イメージャー及びフーリエ型分光放射計による雲・大気推定の研究（東京大学） 2) 可視・赤外イメージャーによるエアロゾルの推定の研究（独立行政法人国立環境研究所） 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） 		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序（研究背景等）</p> <p>気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第3次レポートでも結論されたように、過去150年間の気候変動要因が作り出す大気上端での放射強制力のうち、大きな不確定性を持つものは人為起源エアロゾルによる直接および間接効果によるものである。特にエアロゾルが雲場を変化させる間接効果の評価には全く手がついていないのが現状である。一次の間接効果の大きさでさえ$0\sim-2W/m^2$の範囲でしか明らかになっていない。人為起源温室効果ガスによる放射強制は$+2.5W/m^2$程度であることから、上の事実は、人為起源エアロゾルの気候影響はほとんど無視できるのか、あるいは温室効果をほとんど相殺するほどの効果があるのかもわかっていないことを意味する。どちらの場合も、我々の地球温暖化モデルを大きく変える必要がある。一方、モデルによる雲自体の再現能力も現時点では十分ではなく、IPCCの第2次レポート（1996）の時点から温暖化に伴う雲変化が作る放射強制力の評価における不確定性は縮まっていない。地球温暖化研究において既に多くの研究投資が行われてきたにも拘わらずこのような状況にあると言うことは、従来の延長ではなく、ブレークスルーをもたらす研究が必要であることを意味する。ACECAP（Aerosol and Cloud Environmental studies with Combined Active and Passive sensors）と名付けられた本研究では、このような事態を打開するために、従来用いられてきた受動型センサーに加え、画期的な能動型センサーを用いる大気環境監視に関する研究を提案する。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究の最終目的は、雲自体が作り出す放射強制および、人為起源エアロゾルが間接・直接に引き起こす放射強制の大きさをより正確に評価することである。そのために、能動型センサーである高感度ドップラー雲レーダーと近紫外波長の高分解能スペクトルライダーを、受動センサーである可視・赤外イメージャーとフーリエ型分光放射計に組み合わせた新しい環境監視手法を確立する。このような新しい監視システムの地上設置型および航空機搭載型を開発して、雲とエアロゾル層の三次元構造と微物理構造の観測を行う。さらにその知見を利用して衛星搭載システムの設計・評価を行う。ここで提案する雲レーダーは波長3ミリのミリ波を利用するものであり、高分解能スペクトルライダーは近紫外波長でのミー散乱と分子散乱を個別に測定することができる。これらのセンサーの投入は、雲研究とエアロゾルの直接、間接効果の研究に画期的な知見をもたらすことが期待される。</p> <p>このような新しい手法によって、雲とエアロゾル層の微物理特性を水平方向および鉛直方向に詳</p>		

細に測定する。このデータを気候モデルと組み合わせることによって、 0.2W/m^2 程度の精度で人為起源エアロゾルが引き起こす放射強制を推定する。

3. 研究の方法及び結果

(1) 雲レーダーによる雲観測手法高度化とシナジーアルゴリズムの研究

(独立行政法人情報通信研究機構、東北大学、千葉大学)

地球放射収支を通して気候変動に大きな影響を与えるとして雲およびエアロゾルは近年非常に注目されている。この気候変動予測のキーとなる雲を、その高さ構造も含めて精度よく観測できる手法の開発が本サブテーマの目的である。そこで本研究では、ミリ波を使った雲レーダを開発し、さらにその観測手法や解析手法も併せて開発した。ミリ波雲レーダについては、パルス方式の航空機搭載型雲レーダ(SPIDER)と本プロジェクトで開発したFMCW方式雲レーダ(FALCON)を用いた。特にFMCW方式雲レーダは、2アンテナ方式のFALCON-Iおよび1アンテナ方式のFALCON-IIを独自に低コストで開発したことから、マスコミなどに大いに注目された。また、雲レーダを使ったデータ取得も進め、SPIDERにおいては、2003年春季や2006年2月の直下ライダーを同時搭載した航空機観測や、2003, 2004, 2005, 2006年に地上での長期観測、また、インドネシア赤道レーダサイトにおけるキャンペーン観測を実施した。また、FALCONは観測船みらいに搭載して長期観測を行い、北極海、赤道太平洋、インド洋など広い地域を観測して、多くのデータを取得した。そして、SPIDER、FALCONなどの雲レーダで取得されたデータを用いてレーダ単独による雲の微物理量解析手法やライダーと組み合わせたシナジーによる微物理量解析手法の開発も進めてきた。これらの結果を気候数値モデルなどと比較することで、モデルで得られた上層の巻雲が観測より多すぎるなど気候モデルの検証や改良に結びつく結果を得ることができた。また、エアロゾル数密度と有効半径、氷水量と比較することで雲エアロゾル相互作用についての検討材料を収集することができた。日本と欧州宇宙機関は、雲とエアロゾルの全球放射に対する役割を解明するために雲レーダとライダーを搭載したEarthCARE衛星の開発を2012年度の打ち上げを目指して進めている。この衛星の高次データ処理で必要となるレーダ・ライダーのシナジー解析手法は本手法を基にして今後詳細化を図りながら活用していく。

(2) 高スペクトル分解ライダー等による雲・エアロゾル観測技術の研究

(独立行政法人国立環境研究所、福井大学)

将来の衛星観測を念頭に置いて、高スペクトル分解ライダー等によるエアロゾル、雲の光学特性の観測手法を開発するとともに、ライダーと雲レーダー、放射計等との複合利用により雲の微物理量、エアロゾルの光学特性を導出するための手法の開発を行った。

高スペクトル分解ライダー(HSRL)はエアロゾルの後方散乱係数と消散係数が独立に得られる手法で、消散係数対後方散乱係数比(ライダー比)を観測から求めることができる。ライダー比は、ミー散乱ライダーライダー(例えばCALIPSO衛星など)の解析において重要なパラメータであるだけでなく、エアロゾルの特性を評価するための有効な指標となる。国立環境研では、532nmのHSRL技術に関する研究を行うとともに、国際交流課題において、532nm HSRLによる継続的な観測をつくばにおいて2年間以上にわたって実施した。これによって、球形エアロゾル、非球形エアロゾル、氷雲の532nmにおけるライダー比を統計的に解析し、それぞれの気候値を求めた。また、NASAの衛星搭載ライダー、GLASSおよびCALIPSOの検証実験に参加し、アルゴリズム検証のためのライダー比のデータ等を提供した。一方、HSRLで得られる532nmのライダー比を、国立環境研で従来展開している2波長ミー散乱ライダー(1064nm, 532nmの後方散乱と532nmの偏光解消度を測定)の解析アルゴリズムに加えることによって、ダスト、海塩、人為起源水溶性エアロゾルに加えて光吸収性のブラックカーボン(soot)の分布を分離して推定できる可能性が示された。この他、532nmのHSRLシステムに二酸化ケイ素(シリカ)のラマン散乱測定用の検出チャンネルを追加し、大気中の黄砂に含まれるシリカの濃度測定を行うことに初めて成功した。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)と欧州宇宙機関(ESA)が共同で開発中のEarthCARE衛星にYAGレーザーの第三高調波を用いた355nmのHSRLであるATLIDの搭載が計画されている。本研究ではATLIDの技術およびアルゴリズム検証を目的として、355nmのHSRLの開発研究を福井大学において行った。355nmのHSRLは世界的にも新しいものであったが、ファブリペロ・エタロンを分光素子とするHSRLシステムの開発に成功した。さらに、このHSRLを用いているいろいろな気象条件下におけるエアロゾルおよび雲の355nmにおけるライダー比を測定した。

雲レーダーとライダーの複合利用による雲の微物理量の導出に関しては、航空機搭載ミー散乱ライダー(波長355nm偏光測定機能付き、または2波長(532nm, 1064nm)偏光測定(532nm)機能付き)を製作し、ガルフストリームII型機を用いて観測実験を行った。また、海洋研究開発機構の研究船「みらい」に2波長(532nm, 1064nm)偏光(532nm)ライダーを雲レーダーと同時に搭載し、長期間

にわたって海洋上の雲の観測を実施した。レーダー、ライダーによる雲の微物理量の導出の研究はサブテーマ1で実施された。本サブテーマでは、ライダーデータのみを用いてエアロゾルの解析を行った。2波長のライダーデータ解析アルゴリズムを用いて、海塩、ダスト、水溶性エアロゾルの分布を導出するとともに、エアロゾル気候モデルSPRINTARSとの比較などの解析を行った。

本研究により、532nm、355nmの両波長における高スペクトル分解ライダーに関する技術が開発され、両波長のライダー比の気候値が得られた。一方、雲レーダーとの複合観測を航空機および船舶で行い、雲の微物理量導出アルゴリズム検証のためのデータセットが得られた。また、海洋上の広範囲にわたる長期間のエアロゾル、雲の観測データが蓄積された。さらに、HSRLデータを含めたエアロゾル解析アルゴリズムの検討を行い、今後の衛星搭載ライダーのデータ解析手法や次世代のエアロゾル観測システム構築の方向性が示された。

(3) 衛星データとモデルによる雲・エアロゾルの研究 (東京大学)

1) 可視・赤外イメージャー及びフーリエ型分光放射計による雲・大気推定の研究 (東京大学)

本サブサブテーマの研究目的は、エアロゾルによる雲微物理特性の変化を検出するために必要なリモートセンシングデータの解析手法を開発し、実際の観測データの解析によりエアロゾルの間接効果量を推定するために必要となる統合データセットを作成することにある。

人工衛星搭載の可視・赤外イメージャーによる観測については、まず雲微物理量を抽出するための自動処理システムの開発を行った。このとき、雲レーダーやライダーなどの能動型センサーデータを組み合わせて用いることで衛星観測データの検証を行い、より高精度な解析技術を確立することができた。その技術を用いて、雲微物理量の全球的な空間分布を得ることができた。特に東アジアを中心とした地域については雲物理量データセットの集中的な蓄積を行った。さらには非静力学大気モデルとの比較が行えるようシステムを改良した。衛星データ利用の最終段階としては、受動型と能動型のセンサーの複合利用による雲の特性の理解に役立つ低コストな領域規模の衛星データの整備を実施した。これらのデータを用いた解析からは、水雲の光学的厚さと有効半径について、インド洋や北半球北部の大陸沿岸、大陸東岸などにおいて、エアロゾル量と雲粒粒径との関係に顕著な特徴みられるという結果が得られ、本研究で得られたデータセットの有用性を示すものであった。

一方、赤外放射場の直接観測の重要性を示す目的でフーリエ型赤外分光放射計による大気観測手法を導入した。まず、放射環境場の計算に重要な気温等の鉛直分布、および、窓領域における雲の赤外放射特性を求める手法を開発した。実際の地上観測結果からは、雲レーダーで見えない雲でも赤外放射場には大きな影響を与えることや、気温場の直接測定的重要性、また雲物理量解析手法としての有効性が示された。

2) 可視・赤外イメージャーによるエアロゾルの推定の研究 (独立行政法人国立環境研究所)

エアロゾルの気候影響評価に資する、より高精度の全球エアロゾル特性把握を行う為に、衛星搭載受動型センサーによるエアロゾル特性推定アルゴリズムの開発・改良を行い、開発アルゴリズムを用いたエアロゾル解析システムの構築を行った。これにより、東アジア域のエアロゾルの光学的厚さ、オンゲストローム指数、エアロゾルタイプが準リアルタイムで得られるようになった。地上観測と衛星観測とのマッチアップを図り、解析システムにより推定されたエアロゾル特性の検証を行った。フィルターサンプリングによる化学成分分析の結果との比較において、衛星から推定されたエアロゾル種別光学的厚さの割合が化学成分分析による各成分の濃度比と非常によく整合することが示された。

更に、開発アルゴリズムを MODIS/Terra および GLI/ADEOS-II の全球データに適用し、MODIS については 2000年2月から 2005年12月まで、また GLI については 2003年2月から 10月までの、エアロゾルの光学的厚さ、オンゲストローム指数、エアロゾル種別の光学的厚さの全球分布を得た。得られたエアロゾル特性分布は、全球エアロゾル輸送モデルの結果と比較された。衛星解析は、清浄な領域での過大評価はあるものの、主要なエアロゾル層についてはモデルシミュレーションとよい一致をみた。衛星解析の過大評価は、全球平均でおよそ +0.03 で、既存研究により示されている衛星—モデル間のバイアス +0.05 に比べ、改善が示された。エアロゾル種別の光学的厚さについては、あるタイプが卓越する地域では整合するものの、多種類のタイプが混在する地域において一致しない部分も多く見られた。衛星解析における全エアロゾルの光学的厚さから種別値を求める過程、特に多種類のエアロゾルが混在した状態について、今後より詳細に検討していく必要性が示された。

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）

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（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。

4. 考察と結論

本研究では、受動型リモートセンシング測器と能動型測器を組み合わせることによって、エアロゾルの気候影響に関する画期的な観測システムを構築することを主たる目的に掲げて研究を遂行した。その結果、パルス型とFMCW型の2つのタイプの94GHzの雲レーダーシステム、連続観測型と高波長分解型の2つのタイプのライダーシステムを開発・改良することができた。また、ライダー、雲レーダー、衛星イメージャー、フーリエ分枝器を単独、あるいは複合的に使用した解析システムも開発することができた。現在、これらのシステムは本研究にとどまらず、国内外の様々なプロジェクトにひっぱりだこの状態である。従って、本研究の先見性と波及効果が証明されたと思う。

これらの原理を利用した衛星システムである日欧共同のEarth Explorer3/EarthCAREも打ち上げが決定されることになった。この共同研究にも本研究成果が中心的に活かされている。また環境省のGOSAT衛星のCAIイメージャーの解析アルゴリズムには、本研究で開発された4波長アルゴリズムが使用される予定である。現在、雲レーダーと2波長偏光ライダーをそれぞれ搭載したESSP/CLOUDSATとCALIPSO衛星が打ち上げられ、エアロゾルと雲の成層状態に関する画期的なデータを送ってきている。その解析においても早速、本研究の成果が活かされつつある。本研究が実施されなかった場合にはこのような発展は期待できなかつたと思われる。

このようにして開発された観測測器と解析システムからは、エアロゾルと雲パラメータとエアロゾル種の分布、ライダー比の統計、巻雲の成層構造など、従来型的手法では得られないデータが得られた。現在、着々とモデルと観測結果の比較が行われている。本研究では大循環用の放射エアロゾルモデルであるSPRINTARSモデルの改良と、非静力学／ビン型雲・エアロゾルモデルを開発することができた。

モデル結果と観測結果の比較によると、エアロゾルの空間分布と成層状態はモデルによって比較的よく再現されることがわかった。ただし、同時に、大循環モデルではエアロゾルの層高と上層雲量を過大評価している可能性があることが示された。そのために、大気上端での放射強制力の評価に最大 0.5 W/m^2 程度の誤差を生んでいる可能性がある。この 0.5 W/m^2 と言う不確定性は、本研究の目標として掲げた 0.2 W/m^2 と言う値に比べて大きい、これまで言われていた誤差の軽減できたと思う。モデルによると全球平均の大気上端での放射強制力は間接効果が大きく、温暖化を30%程度相殺していると思われる。一方、大気下端、および大気汚染地域では直接効果が大きく、そのために海面が冷えて、複雑な二次大循環が形成されることがわかった。そのために降雨量の変化が複雑な地域分布で引き起こされる。このことは、アジア域における降水量の変化は、10年以下の早さで変化する経済活動によって顕著に変化する可能性を示唆しており、それをモニタリングするために、本研究で提案したシステムをいよいよ実用化する必要があると思っている。

本研究では、観測で得られた様々な興味ある現象を、未だに十分に気候モデルと領域モデルの改良に活かしてきていない反省点もある。しかし、それにはモデルコミュニティの助けも必要であり、本研究チームのみでは達成することのできない課題であるので、今後、粘り強い共同研究を続ける必要があると考えている。

5. 本研究により得られた結果

(1) 科学的意義

- ・地上、衛星、モデルによって、東アジア域におけるエアロゾルの成層状態を把握できた。それによると、この地域では、特に春先、土壌粒子と人為起原粒子が複雑な混合状態を作っており、その放射強制力は、混合状態に強く依存することがわかった。一次散乱アルベドは土壌粒子お増加で、増加することも減少することもある。
- ・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。
- ・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。
- ・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おらず、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。
- ・地表面でのエアロゾルの直接効果によって、東アジア域で陸面と海面の著しい温度減少が誘発されることがわかった。この効果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。中国北東部と南部ではそれぞれ、温暖化シグナルとエアロゾル間接効果が卓越するために、異なる雲量変化が起っていることが示唆された。

(2) 地球環境政策への貢献

- ・本研究で得られたエアロゾルの放射伝達計算のモデリングは、現在、国立環境研究所の温暖化モデルに反映されている。また、IPCC第4次報告書への日本からのシミュレーション結果にも反映されている。
- ・放射計、ライダー、雲レーダーを用いた新しい観測手法と解析アルゴリズムを確立した。現在、国立環境研究所の沖縄辺戸岬観測所に設置してあるこれらの測器から得られるデータは、本手法で解析されている。データの一部はUNEP/ABCプロジェクトの成果としてバンコックのUNEP Regional Office for Asia and the Pacific に送られている。
- ・ライダーと雲レーダー解析システムは、日欧共同のEarthExplorer/EarthCare人工衛星ミッションの概念設計に利用された。Phase-B研究でも利用される予定である。

6. 研究者略歴

課題代表者：中島映至

1950年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程単位修得退学、理学博士
 現在、東京大学気候システム研究センター教授、センター長
 国際放射委員会会長、IPCC第3次報告書執筆委員、第4次報告書レビューエディター
 EarthCARE衛星ミッション日本側代表研究者、UNEP/ABC/EAREX2005観測実験代表研究者、
 環境省GOSAT衛星／雲エアロゾルイメジャーグループ代表研究者

主要参画研究者

(1)：熊谷 博

1952年生まれ、京都大学大学院工学研究科修士課程卒、工学博士
 現在 独立行政法人情報通信研究機構電磁波計測部門研究主管

(2)：杉本伸夫

1954年生まれ、大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了、理学博士（東京大学）

(3)

1) 今須良一

略歴：1962年生まれ、名古屋大学理学研究科博士課程後期中退、理学博士
 現在 東京大学気候システム研究センター助教授

2) 日暮明子

略歴：東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（1998年）
 現在、独立行政法人国立環境研究所大気圏環境研究領域主任研究員

3) 高橋正明

1950年生まれ、九州大学大学院理学研究科博士課程単位修得退学、理学博士
 現在 東京大学気候システム研究センター教授

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) H. Okamoto : J.Geophys. Res., 107 (D22, 4628)、 doi: 10.1029/2001JD001386 (2002)、 “Information content of the 95GHz cloud radar signals: Theoretical assessment of non-sphericity and error evaluation of the discrete dipole approximation”
- 2) H. Okamoto, S. Iwasaki, M. Yasui, H. Horie, H. Kuroiwa and H. Kumagai: J.Geophys. Res., 108, D7, 4226、 doi:10.1029/2001JD0001225 (2003)、 “An algorithm for retrieval of cloud microphysics using 95-GHz cloud radar and lidar”
- 3) S. Iwasaki, R. Shirooka, Y. Tsushima, I. Matsui, A. Shimizu, N. Sugimoto, A. Kamei, H. Kumagai, H. Kuroiwa, M. Katsumata, K. Yoneyama, H. Okamoto: Geophys. Res. Lett., 31, L09103、 doi:10.1029/2003GL019377 (2004)、 “Subvisual cirrus clouds observation with the 1064-nm lidar, the 95-GHz cloud radar, and radiosondes on the warm pool”
- 4) S. Iwasaki, H. Okamoto, H. Hanado, K. K. Reddy, H. Horie, H. Kuroiwa, and H. Kumagai: J. Meteor. Soc. Japan, 83, 771-782(2005)、 “Retrieval of Raindrop and Cloud Particle Size Distributions with 14 GHz and 95 GHz Radars”
- 5) K. Yasunaga, K. Yoneyama, K. H. Kubota, H. Okamoto, A. Shimizu, H. Kumagai, M. Katsumata: J. Atmos. Sci., 63, 11, 3020-3032(2006)、 “Melting layer cloud observed during R/V Mirai cruise MR01-K05”
- 6) R. Nagasawa, T. Iwasaki, S. Asano, K. Saito, and H. Okamoto: J. Meteor. Soc. Japan., 84, 969-987(2006)、 “Resolution Dependence of Nonhydrostatic Models in Simulating the Formation and Evolution of Low-Level Clouds during a Yamase Event”
- 7) K. Sato and H. Okamoto: J. Geophys. Res., 111, D22213、 doi:10.1029/2005JD006959 (2006)、 “Characterization of Ze and LDR of nonspherical and inhomogeneous ice particles for 95-GHz cloud radar: Its implication to microphysical retrievals”

- 8) H. Okamoto, T. Nishizawa, T. Takemura, H. Kumagai, H. Kuroiwa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, A. Kamei, S. Emori, and T. Nakajima: *J. Geophys. Res.*, 112, D08216, doi:10.1029/2006JD007628 (2007), "Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar, Part (I) : mid-latitude case study during the MR01/K02 cruise of the R/V Mirai"
- 9) T. Nishizawa, H. Okamoto, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, K. Aoki: *J. Geophys. Res.*, 112, D06212, doi:10.1029/2006JD007435 (2007), "An algorithm that retrieves aerosol properties from dual-wavelength polarized lidar measurements"
- 10) A. Heymsfield, A. Protat, R. Austin, D. Bouniol, R. Hogan, J. Delaue, H. Okamoto, K. Sato, G. Zadelhoff, D. Donovan, Z. Wang: Accepted *J. Appl. Meteor.*(2007), "Testing and Evaluation of Ice Water Content Retrieval Methods using Radar and Ancillary Measurements"
- 11) N. A. J. Schutgens: Accepted *J. Atmos. Oceanic Technol.* (2007), "Simulated Doppler radar observations of inhomogeneous clouds; Application to the EarthCARE space mission"
- 12) Sugimoto, Nobuo and Choo Hie Lee, Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths, *Applied Optics*, Vol. 45, No. 28, 7468-7474, 2006.
- 13) Kamei, A., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, and T. Shibata, Volcanic Aerosol Layer Observed by Shipboard Lidar over the Tropical Western Pacific, *SOLA*, Vol. 2, 001-004, doi:10.2151/sola.2006-001, 2006.
- 14) Tatarov, B., and N. Sugimoto, Estimation of quartz concentration in the tropospheric mineral aerosols using combined Raman and high-spectral- resolution lidars, *Optics Letters*, Vol. 30, NO. 24, 3407-3409, 2005.
- 15) Imaki, M., Y. Takegoshi, T. Kobayashi, "Ultraviolet high-spectral-resolution lidar using Fabry-Perot filter for the accurate measurement of extinction and lidar ratio", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 4, 2005.
- 16) Hua, D., T. Kobayashi, "UV Rayleigh-Mie Raman Lidar for Simultaneous Measurement of Atmospheric Temperature and Relative Humidity Profiles in the Troposphere", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 3, 2005.
- 17) Hua, D., M. Uchida, T. Kobayashi, "Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar for daytime-temperature profiling of the troposphere", *Appl. Opt.*, **44**, pp.1315-1322, 2005.
- 18) Hua, D., T. Kobayashi, "Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere", *Appl. Opt.*, **44**, pp.1305-1314, 2005.
- 19) Voelger, P., A.Y.S. Cheng and N. Sugimoto, Influence of atmospheric and systematic parameters on multiple scattering in spaceborne backscatter lidar measurements, *Applied Optics* Vol. 44, No. 6, 1051-1065, 2005.
- 20) Hua, D., M. Uchida, T. Kobayashi, "UV high-spectral-resolution Rayleigh - Mie lidar with dual-pass Fabry - Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere", *Opt. Let.*, vol. 29, 2004.
- 21) Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, K. Asai, T. Endoh, T. Nakajima: 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, 10,1029/2002GL015112, 2002.
- 22) R. Imasu and Y. Ota: *SPIE* 4897, 57-64 (2003) "Ozone retrieval from high-resolution spectrum data observed by IMG/ADEOS sensor"
- 23) V.I. Zakharov, R. Imasu, and K.G. Gribanov: *SPIE* 4897, 65-71 (2003) "D/H latitudinal distribution in the atmosphere retrieved from IMG spectra"
- 24) K. Kondo, R. Imasu, T. Kimura, M. Suzuki, A. Kuze, and T. Ogawa: *SPIE* 4897, 91-98 (2003) "Mission objectives and instrument design concept of EarthCARE FTS"
- 25) K. Kondo, R. Imasu, T. Kimura, J. Tanii, T. Nakajima: *SPIE*, 5152, 32-41 (2003) "Objectives and instrument design of EarthCARE FTS"
- 26) R. Imasu and Y. Ota: *SPIE*, 5655, 106-113 (2004) "CO2 columnar amount retrieved from thermal infrared spectra observed by IMG/ADEOS"
- 27) Y. Ota and R. Imasu: *SPIE*, 5655, 437-444 (2004) "Temperature and water vapor retrieval from IMG/ADEOS spectrum data"
- 28) A. Toptygin, K. G. Gribanov, R. Imasu, W. Bleuten, and V. I. Zakharov: *SPIE*, 5655, 508-514, (2004) "Seasonal methane content in atmosphere of the permafrost boundary zone in Western Siberia determined from IMG/ADEOS and AIRS/AQUA data"
- 29) K.G. Gribanov, R. Imasu, G. Schmidt, A. Toptygin, and V. I. Zakharov: *SPIE*, 5655, 515-521, (2004) "Neural network retrieval of deuterium to hydrogen ratio in atmosphere from IMG/ADEOS spectra"
- 30) V.I. Zakharov, R. Imasu, and K. G. Gribanov: *SPIE*, 5655, 540-547 (2004) "Regarding free energy net of the earth and its monitoring from space concept"
- 31) T.Y.Nakajima, A. Sumi, K. Imaoka, and N. Kikuchi: *SPIE*, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XI,5978, 597802 (2005) "On the sciences obtained from ADEOS-II mission"
- 32) Imasu, R., N. Saitoh, Y. Ota, and S. Taguchi: *SPIE*, doi:10.1117/12.724963 (2006) "CO2 retrieval performance of TANSO-FTS(TIR) sensor aboard Japanese greenhouse gases observing satellite (GOSAT).
- 33) Toptygin, A. Yu, K. G. Gribanov and V. I. Zakharov, Y. Kasai, A. Kagawa, Y. Murayama, R. Imasu,

- G.A. Schmidt, G. Hoffmann, and J. Jouzel: SPIE, doi:10.1117/12.724949 (2006) "Method and results of retrieval of HDO/H₂O in atmosphere from IMG/ADEOS and FTIR data"
- 34) Saitoh, N., Y. Ota, S. Taguchi, R. Imasu: SPIE 6405, doi:10.1117/12.693803 (2006) "Assessment of uncertainty in CO₂ concentrations retrieved from thermal infrared spectra of GOSAT satellite"
- 35) A. Higurashi and T. Nakajima: *Geophys. Res. Lett.*, 29(17), 1836, doi: 10.1029/2002GL015357 (2002). "Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data"
- 36) T. Takemura, I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano: *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2158, doi:10.1029/2002GL016251 (2002). "Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia"
- 37) T. Takemura, T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta, and N. Sugimoto: *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8659, doi: 10.1029/2002JD003210 (2003). "Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian-Pacific region simulated by SPRINTARS"
- 38) T. Nakajima, M. Sekiguchi, T. Takemura, I. Uno, A. Higurashi, D. Kim, B. J. Sohn, S. N. Oh, T. Y. Nakajima, S. Ohta, I. Okada, T. Takamura, and K. Kawamoto: *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8658, doi: 10.1029/2002JD003261 (2003). "Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region"
- 39) M. Sekiguchi, T. Nakajima, K. Suzuki, K. Kawamoto, A. Higurashi, D. Rosenfeld, I. Sano, and S. Mukai: *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 4699, doi:10.1029/2002JD003359 (2003). "A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite datasets of aerosol and cloud parameters"
- 40) K. Suzuki, T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, K. Kawamoto, and A. Higurashi: *J. Atmos. Sci.*, 61, 179-194 (2004). "A study of the aerosol effect on a cloud field with simultaneous use of GCM modeling and satellite observation"
- 41) G. Myhre, F. Stordal, M. Johnstrud, A. Ignatov, M. I. Mishchenko, I. V. Geogdzhayev, D. Tanré, J. L. Deuzé, P. Goloub, T. Nakajima, A. Higurashi, O. Torres, B. N. Holben: *J. Atmos. Sci.*, 61, 499-513 (2004). "Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over ocean"
- 42) R. W. Bergstrom, R. W., P. Pilewskie, J. Pommier, M. Rabbette, P. B. Russell, B. Schmid, J. Redemann, A. Higurashi, T. Nakajima, P. K. Quinn: *J. Geophys. Res.*, 109, D19S15, doi:10.1029/2003JD004467 (2004). "Spectral absorption of solar radiation by aerosols during ACE-Asia"
- 43) V. N. Kapustin, A. D. Clarke, Y. Shinozuka, S. Howell, V. Brekhovskikh, T. Nakajima, and A. Higurashi: *J. Geophys. Res.*, 111, D04202, doi:10.1029/2004JD005527 (2006). "On the determination of a cloud condensation nuclei from satellite: Challenges and possibilities"
- 44) 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,
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) 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.
- 48) 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.
- 49) 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.
- 50) 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.
- 51) 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.
- 52) 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.
- 53) 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.
- 54) 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.
- 55) Katagiri, S., and T. Nakajima, 2004: Radiative characteristics of cirrus clouds as retrieved from AVHRR. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 81-99.
- 56) 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.
- 57) 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.
- 58) 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.
- 59) 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.
- 60) 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.