

地球観測衛星データを用いた雲物理量・雲特性の導出手法と アルゴリズムの開発

—2011年度堀内賞受賞記念講演—

中 島 孝*

1. はじめに

この度は日本気象学会堀内賞という荣誉ある賞に中島孝を選んでいただき、ありがとうございます。20年近くにわたり衛星観測に関わってきた研究者としてこの受賞を大変嬉しく感じています。これまでお世話になってきた多くの先生方、共に研究を行ってきた研究仲間、前職・宇宙航空研究開発機構 JAXA の皆様、現在の大学教職員の皆様に御礼を申し上げます。

改めて指摘するまでもなく、現在、地球観測衛星は気象予報業務、気象研究、気候研究になくてはならない観測手段となっています。ひとつのセンサで全球規模を観測できるという点が衛星観測の最大の特徴であり、地上観測において特に苦勞する多観測器間校正という観点からみると、大きなアドバンテージを有しているといえるでしょう。一方で、リモートセンシング、つまり遠隔観測であることに起因する課題や困難があることも衛星観測の特徴です。ここから始まる文章は、衛星による雲観測の面白さについての話が大半、受賞記念講演（2011年11月17日、名古屋）ではお伝えし切れなかった放射伝達とリモートセンシングの話途中に挟み入れ、そして最後に宇宙開発と地球観測の物語を加えてみました。全学会員の皆様に読者に想定しながら書きましたが、特に雲やエアロゾルのリモートセンシングの世界に興味を持っている研究者／技術者の皆様の足がかりとして、そして日本の衛星観

測研究の現場についてちょっと知ってみたいという方の参考になるように留意しました。しばらくの間、どうぞおつきあいください。

2. 宇宙から地球を測ること、雲を観ることの面白さ

長いこと衛星データを眺めていると、1枚の衛星画像から多くの情報を読み取ることができるようになります。人間の画像認識、空間把握能力はたいしたもの、数キロメートル程度より細かい解像度の衛星画像をみれば、自然のままの領域と人間の手が加わった領域を、おおよそ見分けることができます。さらに年季が入ってくると雲の重なり具合までもが見えてくるので不思議なものです。もちろん、目視による画像判別作業には「勝手な思い込み」や「個人的な印象バイアス」が入り込みますから、それを排除するための検証が必要で、その蓄積と科学的な分析こそが経験であり、プロがプロたる所以です。

人工衛星による地球観測には陸面、大気、海洋、雪氷など多くの観測分野があります。「リモートセンシング」といえば地理情報システム (GIS)、というように、現在のリモートセンシングは地理情報や地表面分類など地表面を観測対象にしたものが多くなっています。しかしながら、私には大気現象、特に「雲」が面白い観測対象に感じられました。可視光センサでみた雲は単に「白く」、地表面の多様性に比べれば個性が乏しいように感じますが、ところがこれが大間違いで、雲は動態変化が速いうえに（低軌道衛星では捉えられないほど!）、境界層に発生する霧、低層で成長する層雲や積雲、熱帯域の強い上昇流で発達する積乱雲、上層の巻雲、そして極域に特徴的な極成層圏雲の

* 東海大学情報デザイン工学部情報システム学科／東海大学情報技術センター。

—2012年1月5日受領—

—2012年8月20日受理—

ように、その存在を検知すること自体が難しいものの気象学的には大きな役割を有する雲まで、多くのバリエーションを有しています。一般書店に雲の写真集が何冊も売られていることから判るように、雲は市民にも馴染み深い自然現象である一方で、地球のエネルギー収支に大きな影響力をもつ重要な地球物理現象でもあるわけです。

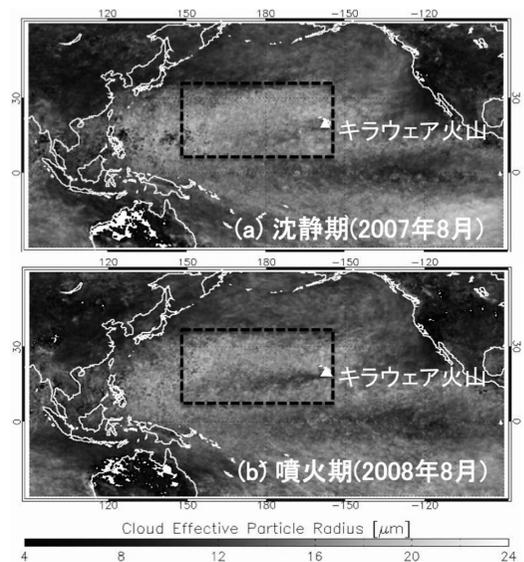
私が宇宙からの雲観測を開始したのは1992年の春です。東京理科大学の大気物理学研究室（故 中江 茂教授）で都市気候をテーマに卒業研究を修めた私は、衛星観測の可能性に大きな希望を見いだし、東京大学気候システム研究センター（CCSR）（現 東京大学大気海洋研究所）の中島映至研究室の扉をノックしたのでした。圧倒的に著名な教授陣がいらっしやるCCSRにおいて、私のその後の人生を左右するほどの沢山の刺激を得ることができました。

3. 事例：火山噴火による雲特性の大規模変質

第1図はNASAが打ち上げたTerra衛星搭載MODISデータを中島が開発した解析アルゴリズム（Nakajima and Nakajima 1995; Kawamoto *et al.* 2001）で推定した太平洋領域における水雲の粒径（雲の最上部の温度 $>273.15\text{K}$ ）の1ヶ月平均値です。MODISの地表観測頻度はおおよそ1日1回ですから、平均値の分母は多い場合で30回です。まず画像中段やや右側にあるハワイ諸島キラウエア火山周辺に注目してください。火山噴火による雲特性変化を見るために、火山の沈静期（2007年8月）（第1図a）と噴火期（2008年8月）（第1図b）の解析結果を対比させてみました。図中の点線で囲った領域に注目してみると、キラウエア火山を起点とし、その風下であるハワイ諸島西方の広い範囲にかけて雲粒径が減少していることが明瞭に判ります。その減少領域は東西5,000 km、南北1,000 kmという広大なものです。ちょうど日本列島がすっぽり入るほどの広さです。この粒径の減少は、いわゆる「エアロゾル間接効果」の現れであると考えられます。すなわち火山噴煙が雲凝結核として働いたために、雲粒ひとつひとつのサイズが小さくなったのです。読者の皆様方の中には、第1図におけるもうひとつの大きな特徴、すなわち大陸域の雲粒径が海洋域よりも小さくなっていることにお気づきかと思います。この雲粒径の海陸コントラストはHan *et al.* (1994), Kawamoto *et al.* (2001), Nakajima *et al.* (2009a) などでもそれぞれ報告されて

おり、季節にかかわらず極めて安定的にみられる現象です。エアロゾルが陸域で多く発生することを考えると、雲粒径の海陸コントラストもエアロゾル間接効果の発現である可能性が高いのですが、そもそも海域と陸域では水の供給量が異なりますし、力学場も一般には大きく異なります。すなわち海陸コントラストの結果だけからエアロゾル間接効果を定量化することは難しいと言えます。しかしながら、今回実施した特定の注目領域における火山噴火前後の比較では、噴煙以外の要素、すなわち水蒸気量や力学過程がほぼ同一と見なせるので、同効果の定量的理解が可能であると私たちは考えます。

以上のシナリオのもとに、九州大学鶴野伊津志教授グループの大学院生、江口健太氏が3次元モデルと中島 孝の衛星解析結果を使用した考察を実施しました。その結果によると、キラウエア火山から大気中に注入された1.8メガトンの噴出物は雲粒径を約23%減少させ、平均的な水雲の雲量は平時の9.1%に対して13.4%に増加、雲の反射率は平均して1%増加し、それに対応する短波放射の減少はマイナス 5 W/m^2 であったと見積もりました（Eguchi *et al.* 2011）。このような完全外的要因の事例を元にエアロゾル間接効果の定量化やメカニズムの理解を深化させることができ



第1図 キラウエア火山の噴火による水雲粒径の大規模な変化。(a)沈静期と(b)噴火期。Terra衛星MODISデータをCAP-COMアルゴリズムで解析した結果。

れば、他の要因が混在する海陸コントラストの定量的理解も進んでくるものと思われます。その意味で Eguchi *et al.* (2011) 論文の意義は非常に高くなっています。

4. 衛星データ解析アルゴリズム

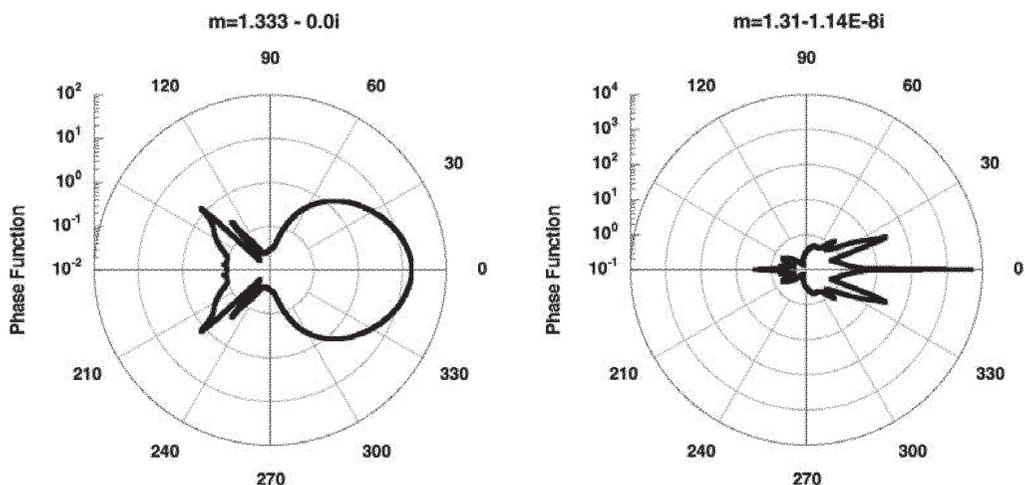
4.1 放射伝達とリモートセンシング

私たちが実施しているリモートセンシングは、観測ターゲットである散乱体（雲粒子など）による電磁波の散乱物理過程と放射伝達を基盤にしています。太陽放射や地球放射を光源とすれば受動型リモートセンシングとよばれ、みずからが発した電磁波の散乱であれば能動型といわれます。散乱物理過程を知っていれば、観測された輝度や輝度温度などの物理量からターゲットの情報を推定できます。すなわち、リモートセンシングを物理ベースで考えることでその応用力や対応力を高く保て、雲、エアロゾル、大気分子成分のような大気現象のみならず陸面、海洋、雪氷などの多くの他分野にも適用可能となります。また、散乱理論で構成された放射伝達ソルバーは大循環モデルや雲解像モデルなどにおける放射ルーチンとしても役立てることができます。ここでは、一例として雲粒子による散乱解法と、その結果を用いた放射伝達ソルバーについて紹介しましょう。

雲のリモートセンシングでは、最初のステップとして雲粒子における電磁波の散乱を計算する必要があります。計算で求める量は、入射した電磁波に対する散

乱光の向きと強さを記述した散乱分布関数、そして相互作用1回あたりの散乱と吸収の配分を決める一次散乱アルベドです。なお、散乱分布関数は位相関数と呼ばれることもあります。この計算の難易度は、水雲と氷雲でかなり異なります。その大きな理由は粒子の形状による散乱過程の複雑さの違いです。水雲粒子は単純な球形とみなすことができますが、氷雲粒子は様々な結晶状態をとります。雲の光学リモートセンシングで主に使用される電磁波は $0.4\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ の波長、一方で雲粒子の半径は $3\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 程度です。電磁波の波長と粒子の大きさが数オーダー以内の差異の場合、散乱の具合は粒子の材質だけではなく、大きさと形状に強く依存するようになるため、最新の計算機でも対応できないほど計算量が増大することがあります。

非球形粒子による散乱理論は古くて新しい研究課題です。計算手法は大きく分けて3つ。ひとつは幾何光学近似に基づく手法、もうひとつはマクスウェル方程式を直接解く手法、そしてそれらのハイブリッドです。そのうち、幾何光学近似の計算量は粒径のサイズや形状にほとんど依らず、計算時間は現実的な範囲に収まります。第2図に幾何光学近似で計算した散乱分布関数の形を示してみましょう (Nakajima *et al.* 1997)。球形と六角柱では散乱の具合が全く異なっている様子がわかると思います。一方のマクスウェル方程式を直接解く手法では、粒子の表面や体積における電磁場に関するなんらかの量を離散化します。このと



第2図 幾何光学近似で計算した散乱分布関数（回折効果は入っていない）。光は左方から入射。左図が球形粒子、右図が六角柱粒子。

き、粒子のモデル化手法、離散化手法、カーネル関数の形などにより必要な計算時間が変わってきますが、どのような方法でも電磁波の波動を表現できるだけの計算の細かさ、つまり1波長あたり3点~4点程度の離散点が必要となります。つまり、波長に対する粒子のサイズが大きくなるに従って計算量が急激に膨れあがるのが、本問題を難しくしているのです。

非球形粒子による散乱問題については非常に多くの論文があり、ここで全てを網羅することはできません。それでも、幾何光学近似手法の代表的なものはTakano and Liou (1989)による六角柱等の主な結晶形の解、および幾何光学近似解に波動性起源の回折をハイブリッドした論文(Yang and Liou 1996a), Macke (1993)による多面体, Muinonen *et al.* (1996)によるランダム粒子の散乱解などが著名な論文と言えるでしょう。マクスウェル方程式系では、まずAsano and Yamamoto (1975)が回転楕円体による散乱解の導出に成功し、続いてDraine and Flatau (1994)によるDiscrete Dipole Approximation (DDA)法, Mishchenko *et al.* (1996)によるT-Matrix法, Mano (2000)による表面積分法(CFIE)などの数値解法が次々に開発されました。Mano (2000)のCFIE手法では、散乱分布関数などの散乱特性は粒子表面の電磁流から計算されます。そこで、Nakajima *et al.* (2009b)は独自に作成した同手法のプログラムを使って、まず粒子表面における電磁流の様子を明らかにし、次にこれらを滑らかに表現するための離散点の設定方法、そして離散点の数と計算精度の関係を議論しました。その他にも、特に近年ではFinite Difference Time Domain (FDTD)法(Yang and Liou 1996b)による散乱解の計算が活発に行われ、Ping Yangらが作成した散乱強度データベースが世界中で活用されています。

ひとたび散乱解が求まれば、放射伝達ソルバーによる放射計算が可能になります。つまり衛星センサが観測するであろう輝度や輝度温度をシミュレーションすることが可能になるのです。読者の皆さんの中にはLOWTRAN (LOW resolution spectral TRANsmision) (Kneizys *et al.* 1988), MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmision) (Berk *et al.* 1998)等の放射伝達ソルバーを放射計算に利用した方が多くいらっしゃるかと思います。現在、多くの放射計算分野でMODTRANが使われていますが、日本においては特に大気の研究分野でSystem

for Transfer of Atmospheric Radiation (STAR)コード(Nakajima and Tanaka 1986, 1988)が使用されるようになり、これが多くの衛星プロジェクトにおける標準ソルバーに指定されるなど、存在感が増してきました。MODTRANとSTARコードの計算値の比較については、例えばSu and Suzuki (2001)による紫外線領域の調査事例があります。米国ではNASAのDIScrete Ordinate Radiative Transfer (DISORT) (Stamnes *et al.* 1988), 欧州ではSecond Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) (Kotchenova *et al.* 2006; Kotchenova and Vermote 2007)もよく使われているようです。

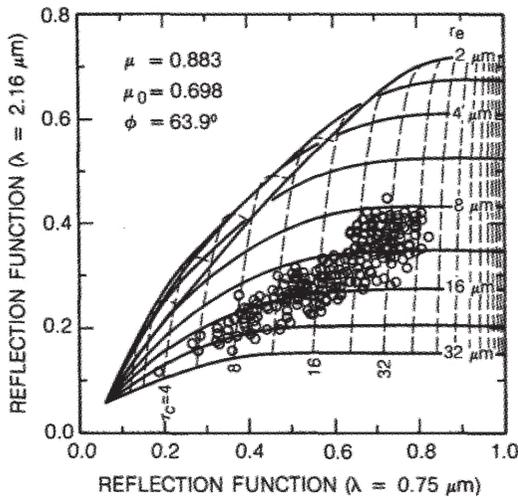
多くの放射伝達ソルバーはWeb等で一般に公開されています。日本のSTARコードには、非偏光輝度ベースのR-STARシリーズ、偏光輝度ベースのP-STARシリーズ(Ota *et al.* 2010)、大循環モデルや雲解像モデル向けの高速度放射伝達ソルバーであるMSTRNシリーズ(Sekiguchi and Nakajima 2008)が整備され、主たるものについては筆者らが主宰しているOpenCLASTR (Open Clustered Libraries for Atmospheric Science and Transfer of Radiation, オープンクラスター)から公開されていますので是非ご利用下さい。なお、放射伝達ソルバーの教育的活用法やOpenCLASTRについては「天気」に掲載された中島 孝の解説記事も参照下さい(中島 2006)。

4.2 Nakajima-King ダイアグラムの先進性

雲リモートセンシングにおけるエポックメイキングな論文は、現在東京大学教授の中島映至先生による2本の論文(Nakajima and King 1990; Nakajima *et al.* 1991)です。これらの論文では、散乱理論と伝達理論を用いて雲粒子による電磁波相互作用を解明し、その結果の応用として、可視光領域(VIS)と近赤外光領域(NIR)の2波長観測を用いた雲の光学的厚さ(Cloud Optical Thickness, COT)と雲粒径(Cloud Droplet Radius, CDR)の推定理論を示しました。特にVISとNIRの2次元座標軸に、COT, CDRの多くの組み合わせによる理論計算放射値をプロットしたグラフ(第3図)は、2波長による2未知数の推定という、ともすれば難解な説明を必要とする問題を極めて明快に示すグラフであったことから、後年になって「Nakajima-King ダイアグラム」と広くよばれるようになり、現在の可視近赤外光による雲特性リモートセンシングの基礎となっています。1991年の中島映至先生の論文では、航空機に搭載された可視光(0.75

μm) と近赤外光 ($2.16\mu\text{m}$) の 2 波長を用いて北米西岸沖層積雲の物理特性の推定がなされています。同じく航空機に搭載された雲粒子測器 (PMS) との比較による検証までが網羅されており、理論展開の道筋と論文構成の明快さも相まって雲特性観測手法に関する入門的な論文となっています。

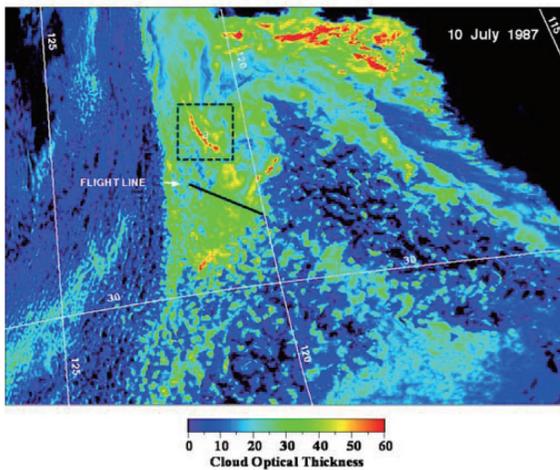
私、中島 孝が大学院時代に中島映至教授の指導のもとで挑戦したのは、Nakajima-King ダイアグラム



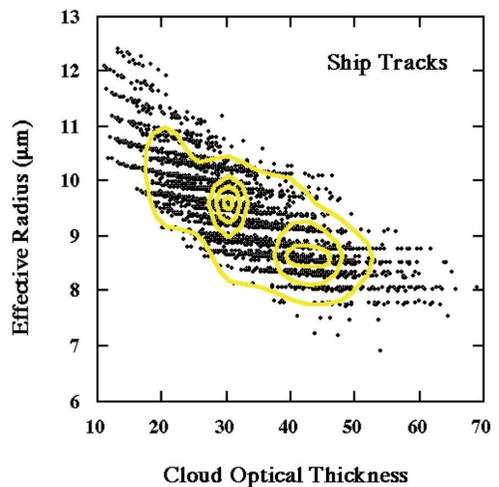
第3図 Nakajima-King ダイアグラム (Nakajima and King (1990) から転載).

を NOAA 衛星搭載 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) センサに適用することでした。先の航空機観測との相違はふたつ。ひとつは衛星観測の観測範囲が広大であることによる太陽/観測対象/センサの配置関係 (一般に Geo-location 情報とよびます) のバリエーションの多さ、もうひとつは近赤外光に $3.7\mu\text{m}$ という太陽放射と地球放射の境界領域の波長を用いることによる熱放射成分の取扱いの難しさです。どちらも解析アルゴリズムを複雑にする要素です。試行錯誤の末に解析アルゴリズムを完成させ、その成果を Nakajima and Nakajima (1995) に発表しました。同論文は中島映至先生にご苦労をおかけしつつ仕上げた私にとって初めての審査付論文でした。ここでは北米西岸沖と北極州西岸沖の 2 カ所における雲特性を広域推定し、さらに当時から話題になっていた航跡雲 (Ship Tracks) における雲特性の変質を定量化しました (第4図)。同論文は、2011年12月末までに180回を超える Citation を得ており、最近でも年に10~20回のペースでそれが増えています。その意味で、宇宙からの雲特性観測のスタンダード論文になったと申し上げて良いのではないかと思います。

なお、当時の衛星による雲リモートセンシングでは、NASA の William Rossow らのグループも Nakajima-King ダイアグラムを適用した研究アプローチを採っており、私たちの1995年の論文が出る少しだけ前の1994年に Han *et al.* (1994) が発表されまし



第4図 北米西岸沖にあらわれた航跡雲 (Ship Tracks, 左図点線の範囲) による雲特性の変質 (Nakajima and Nakajima (1995) から転載).



た。同論文では全球規模の雲特性の解析結果が得られており、IPCC 第3次レポートで参照されるほどの影響力を持ちました。もちろん私たちも全球解析を狙っていましたが当時は悔しい思いをしました。しかしその後、私の大学院時代の後輩である河本和明氏（現長崎大学）が AVHRR 用の雲特性解析アルゴリズムを拡張して全球解析に成功しました（Kawamoto *et al.* 2001）。同論文の Citation も順調にあがっています。現在、多くの日本の衛星プロジェクトにおいて、Nakajima and Nakajima (1995) の方法に Kawamoto *et al.* (2001) の全球に対応した拡張を施したアルゴリズム、Comprehensive Analysis Program for Cloud Optical Measurement (CAPCOM) が使用されています。また、最近開始した静止気象衛星を利用した全球放射フラックス推定システム（Takenaka *et al.* 2011）における雲特性推定プログラムとしても CAPCOM が使用されています。

4.3 異種センサのシナジーによる雲特性観測

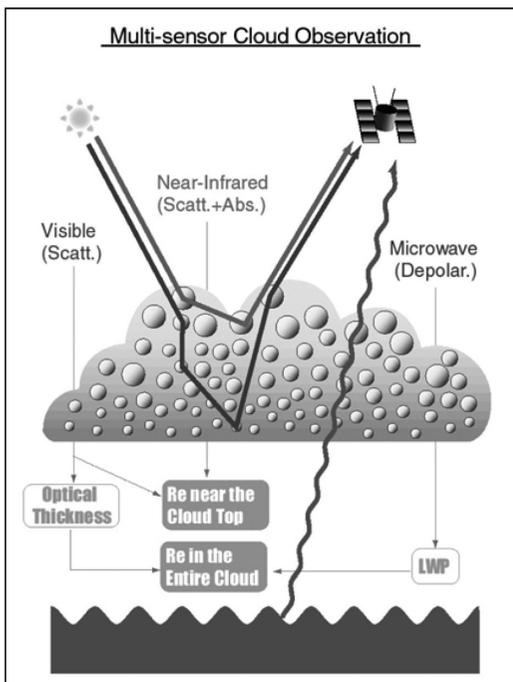
世界初の衛星搭載型降雨レーダが搭載された熱帯降雨観測衛星（TRMM）は1997年に満を持して打上げ

られました。TRMM にはメインセンサである降雨レーダ（PR）とともに、可視赤外イメージャ（VIRS）、マイクロ波放射計（TMI）、広帯域放射計（CERES）、雷観測センサ（LIS）が同時搭載されています。これらのセンサのうち、特に雲の観測に役立つのが VIRS と TMI です。一般にイメージャの近赤外チャンネル（ $1.6\mu\text{m}\sim 3.7\mu\text{m}$ ）は雲の上層付近における光源（太陽光）の反射光を、マイクロ波放射計は地面（海面）で射出され雲を透過してくるものを観測します（第5図）。すなわち、VIRS、TMI はそれぞれ雲の上層付近と雲の全層コラムについての何らかの情報を有していることとなります。仮に VIRS と TMI それぞれから推定した「雲粒の大きさ」に差があるとすれば、その差は雲層内における粒径の鉛直プロファイルを示すこととなります。この特徴に目を付けたのが、2000年頃に NASDA（現 JAXA）で私とともに仕事を行っていた増永浩彦氏（現名古屋大学）です。Masunaga *et al.* (2002a, b) の論文は、増永氏による TMI 解析アルゴリズムと私が開発した VIRS 解析アルゴリズムのシナジーにより生み出され、その結果は準全球規模（熱帯～中緯度）における水雲粒径の鉛直コントラストの図、そして降雨性の議論でした。続いて Matsui *et al.* (2006) がエアロゾルと大気安定度に対する降雨性分布の様子を同じ方法で調べ、エアロゾル間接効果の議論に向けて一石を投じました。

可視赤外イメージャとマイクロ波放射計によるシナジー雲観測は、ADEOS-II 衛星においても可能です。しかも同衛星は太陽同期極軌道であるため、熱帯域を中心に観測する太陽非同期軌道の TRMM では叶わなかった高緯度地域まで網羅することができます。そこで、Nakajima *et al.* (2009a) は同衛星搭載 GLI と AMSR の解析を進め、TRMM 衛星では南北緯度約 35° の範囲であった観測を ADEOS-II 衛星により南北緯度 60° まで拡張しました。同論文は2011年度の日本リモートセンシング学会論文賞に選ばれました。

4.4 アクティブ雲センシングの衝撃

2006年に NASA は世界初の衛星搭載型雲レーダ（CPR）を搭載した CloudSat 衛星の打上げに成功しました。これが雲観測にとって大きな節目になります。CPR を使うことで、受動型センサによる水平2次元観測では直接うかがい知れなかった雲の詳細な鉛直断面が観測できるのです（Stephens *et al.* 2002）。



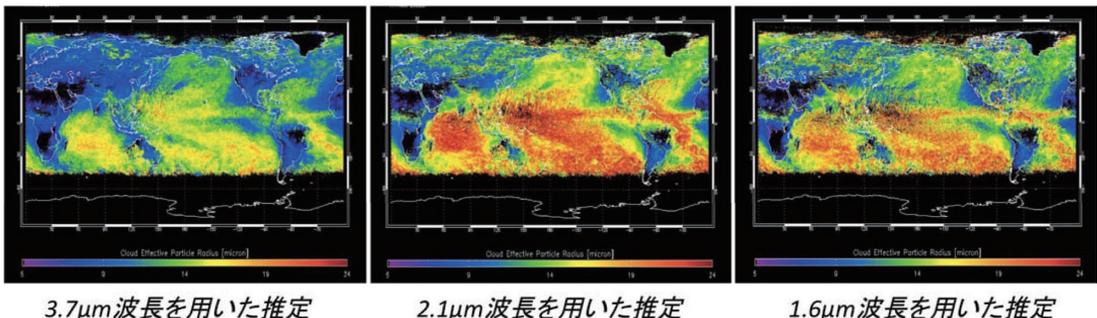
第5図 可視赤外イメージャとマイクロ波放射計による雲観測の概念図（増永浩彦氏より掲載許可済）。

ところで受動型の観測においても、多波長サウンディングという手法で観測対象の鉛直構造が得られる場合があります。例えば高分解能赤外センサによる気温の鉛直推定は広く行われています。先に紹介した Nakajima-King ダイアグラムをベースとする雲特性推定では、雲粒径の推定に $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.1\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ の近赤外波長をそれぞれ利用することができますが、この3波長がサウンダ的に振る舞う可能性について1990年代からしばしば示唆されてきました（例えば、Nakajima *et al.* 1991; Platnick 2000）。その示唆の検証が現実的になったのは、2000年前後に登場した多波長可視赤外イメージングセンサの時代になってからです。具体的には NASA が上げた Terra/Aqua 搭載 MODIS センサ、そして NASDA（現 JAXA）が上げた ADEOS-II 搭載 GLI センサです。これらのセンサは雲粒径推定に資する3波長の全てを有していました。そして、それぞれの波長から推定される水雲の雲粒径を調べてみると、確かに異なるのです（Nakajima *et al.* 2010a）（第6図）。ちなみに、この差異は雲観測の研究コミュニティのなかでは予測されていたものですが、雲場の再現に取り組んでいるモデル研究（事例としては、例えば Takemura *et al.* 2005; Suzuki *et al.* 2008）にとっては早急に解決を要する現象です。つまり、3波長からそれぞれ得られる粒径の差異を説明できないと、モデルシミュレーションによる雲場の検証値として使いにくいのです。このようにして、あらたな研究課題が生まれました。この課題に対する展開で考えられるのは CloudSat に搭載された雲レーダの利用です。雲の鉛直断面を明らかにできる CloudSat と可視赤外イメージャの3波長によるサウ

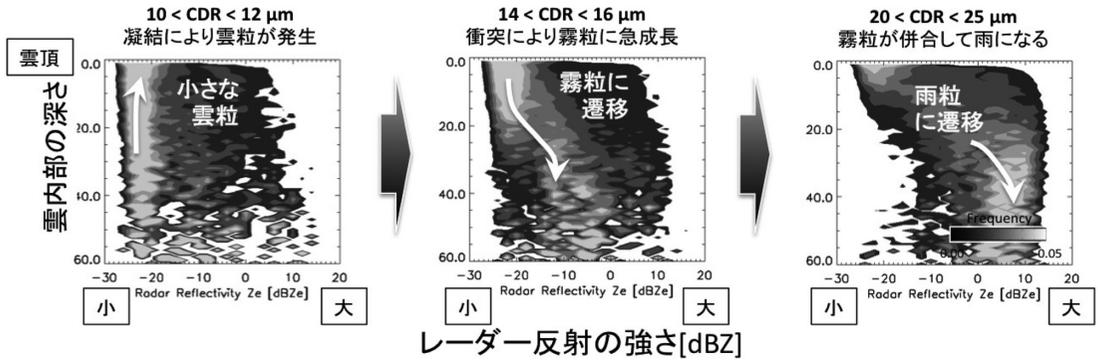
ンディング（とおぼしき観測結果の相違）を併用することで観測値の相違を理解できるのではないかと考えたのです。

ここからの仕事は2008年から2009年にかけて米国コロラド州立大学（CSU）に出向いて実施しました。当時 CSU では鈴木健太郎氏（現在は JPL/カリフォルニア工科大学）が Graeme L. Stephens 教授（現在は JPL/カリフォルニア工科大学）のもとで雲微物理モデルと気候モデルを使った雲場の研究を行っていました。そこに私が合流し、まず手始めに CSU で大量にアーカイブされている Aqua 搭載 MODIS と CloudSat 搭載 CPR のデータセットを複合的に解析するところから着手しました。最初のうちは鳴かず飛ばずでしたが、ちょうど滞在が半年を過ぎた頃のある日、鈴木氏とのティータイム中の議論でふと湧いて出てきた、ある解析手法を試すことにしたのです。それが後に Contoured Frequency by Optical-Depth Diagram (CFODD) と称することになった解析・可視化手法です。通常、雲レーダの反射因子 dBZ の観測頻度を可視化する場合、横軸に dBZ をとり縦軸に高度をとりますが (Contoured Frequency by Altitude Diagram, CFAD)、私たちは縦軸に雲層内光学的深さ (in-cloud optical depth) を割り当ててみたのです。3つの近赤外 (NIR) 波長による雲粒径推定値の相違は、各波長の雲に対する光学特性の相違に起因するという仮説から思いついた方法でした。これが正解でした。MODIS で推定した雲粒径 (CDR) の大きさを幾つかのカテゴリーに分類して、CFODD で表すと、雲の深い内部で雲粒モードが霧粒モードに変遷してゆく様子が映し出され、これは受動型3波長によ

人工衛星から推定した雲粒の半径(μm) (2006年7月の1ヶ月平均値)



第6図 近赤外領域の3波長をそれぞれ用いたときの雲粒径推定値の違い (Nakajima *et al.* (2011a) から体裁を組み替えて転載)。

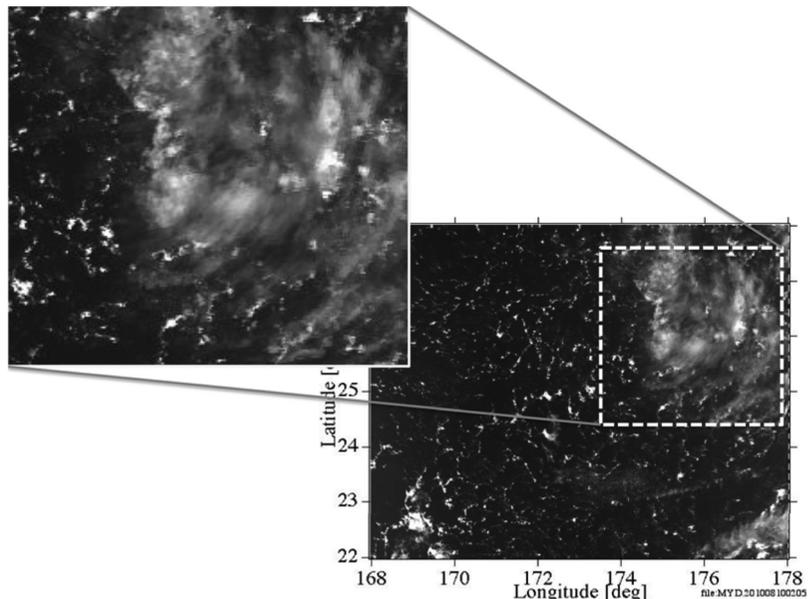


第7図 CFODD に現れた雲の成長過程. 左から $10 < \text{CDR} < 12 \mu\text{m}$, $14 < \text{CDR} < 16 \mu\text{m}$, $20 < \text{CDR} < 25 \mu\text{m}$ で分類した図.

る雲粒径推定値の相違を鉛直サウンディングとみなした仮説と整合していました. さらに, CFODD に雲の成長過程が見事に現れてきたのです (第7図). すかさずこれらの成果をとりまとめ, Nakajima *et al.* (2010a, b), Suzuki *et al.* (2010) の3本の論文を発表しました. その後も, Suzuki *et al.* (2011) がCFODDを全球モデルによる計算結果の診断に活用する方法を提案するなどダイナミックな展開がみられます. CFODDの評価が定まるのはこれからですが, 既刊論文のCitationが急速に上がり始めたこともあり, これからの伸びが楽しみな成果となりました.

4.5 雲はどこ？

さて, ここで第8図に示す衛星画像(可視光チャンネル)を見て頂きたいです. 皆さんはこの画像のうちどこが曇りでどこが晴れであるか, おおよそ判断が付けられますね. でも, 本当にその判断は正しいのでしょうか? 例えば, 巻雲はいかがでしょう. 一見快晴に見える領域に薄い巻雲がかかっている可能性があります. 第8図の画像は約1kmの水平解像度を有しますが, より小さな積雲がどこかの画素に含まれてい



第8図 雲はどこ？ 衛星データにおける雲の判別には曖昧さがある.

るかもしれません. このように衛星による雲観測を多く経験するほど, 雲の存在判断は曖昧なものだと感じるようになります.

雲識別は衛星画像を処理する場合の最初の手続きです. 画素ひとつひとつに対して, そこに雲が含まれているか否かを客観的に判断するのですが, これまでの雲識別アルゴリズムは, 曇 or 晴に明瞭な白黒をつけて判断するものがほとんどでした. 加えて, これまでのリモートセンシングが地表面の観測を主としてきた歴史的背景により「判断が難しいものはとりあえず雲

マスク]、という雲バイアスを持たせているものがあります。しかし、先の光学的に薄い巻雲の例のように、注目する画素が曇りであるか晴れであるかには曖昧さを有しているはずです。加えて、雲量そのものの調査や、雲特性の観測では、雲バイアスや晴バイアスが観測結果に決定的な悪影響を与える可能性があります。ここが既存の雲識別アルゴリズムに対する私の不満であり研究上の着目点でした。そこで、2006年に私の研究室にポストドクターとしてお迎えした石田春磨氏（現 山口大学）とともにバイアスを持たない雲識別アルゴリズムの開発を開始しました。私たちが注目したのは、可視赤外センサで実施する複数の閾値テストそれぞれが癖として持つ固有バイアスです。石田春磨氏はMODISデータを使った膨大なテストを実施し、その結果、概して可視光テストは雲バイアスを、赤外テストは晴バイアスを持ちやすいことを見いだしました。そしてそのバイアスを打ち消すような式を提案したのです。曇/晴の判断も、曇から晴への結果を0.0~1.0の実数値（晴天信頼度Q値）でそのまま示すことにしました（Ishida and Nakajima 2009）。曖昧さを曖昧のままに残したのです。私たちは新たに開発したこのアルゴリズムにCLAUDIA（Cloud and Aerosol Unbiased Decision Intellectual Algorithm）の名称を与えました。CLAUDIAはアルゴリズムの構造が簡素であるため、任意のイメージャへの適用や移植が簡単です。また、ほとんどの閾値テストを並列に配置したため、特定の閾値テストの結果に判定が引きずられる「ちゃぶ台返し（英語ではRestoration）」が起りにくく、異なるセンサにおける雲識別結果の相違を定量的に比較することができます（Nakajima *et al.* 2011）。この特徴は、1980年代から脈々と続く歴代イメージャを用いた各種の長期動態解析では、観測結果の連続性を担保するために絶対に必要となるものです。現在、CLAUDIAは宇宙航空研究開発機構/国立環境研究所/環境省の共同ミッションであるGOSAT衛星CAIセンサの標準アルゴリズムとして採用されるなど、徐々に実績があがっています（Ishida *et al.* 2011）。

5. 宇宙開発と大気研究

私は今でこそ「自分は大気物理や気象を主な研究対象とする研究者です」、と言えますが、多くの気象学会員の皆様と若干違ふところがあるとすると、それは宇宙航空研究開発機構（JAXA）（旧 宇宙開発事業

団、NASDA）での職務経験（1994年~2005年）が長くあるところではないでしょうか。そのためか、多くの気象学者よりも宇宙の利用に対する興味が強いと思います。その点が、新しい研究・新規分野の開拓に対する評価である堀内賞を頂いたひとつの意味と考えています。

さて、JAXAの中でもとくに旧 宇宙開発事業団（NASDA）から引き継がれた部門は宇宙開発及び宇宙利用の事業管理と推進が主な業務です。地球観測部門における日々の主な仕事は、計画立案、仕様書作成、資金管理、衛星打上げ、そしてデータ解析に至るまでの多方面のお世話をする事です。時間的な制約から、研究の多くは大学や国立研究所などの外部の研究者に研究公募方式で委ねることになります。もちろんJAXA職員が科学論文を書くことは大いに推奨されていましたが、それでも休日などの時間もかなり充てることになりました。私の場合、自分が担当する幾つかの衛星計画から興味深いネタを発掘しては論文に仕上げ発表していました。修士課程のあとすぐに社会に出た私はいずれ博士号を取得するという目標を宣言していたので、それを叶えたかったという背景もあります。幸い大学や国立研究所の先生方や上司も応援してくれました。11年間のJAXA（NASDA）勤務では、ADEOS、TRMM、ADEOS-IIという大型プロジェクトに携わることができ、それ以外にもMission Demonstration Satellite (MDS) 搭載 Lidar プロジェクトのようなパイロットミッション（残念ながら打上げには至りませんでした）の経験も積むことができました（Nakajima *et al.* 1999）。このように、他ではなかなか得られない大きな経験をさせていただいたこと、私の大学への転身希望に理解を示して頂いたことに対してJAXAの皆様には感謝しています。

6. 宇宙の難しさについて

衛星による地球観測には地上観測にはない特有の難しさがあり、それに関わるためにはちょっと太めの肝っ玉が必要です。いったん宇宙に打ち出したら決してやり直しや修理ができない観測機材であることが、緊張感を必要とする主要因です。それは研究者が主体的に関わるセンサ仕様確定の場でいきなり出てきます。最近の衛星センサは観測対象に対して極めて高度に最適化されています。最適化の目的は観測精度の確保ですが、開発費の軽減という側面も重要です。研究

者は放射シミュレーションを駆使しながら、必要な観測性能が出せる仕様を探ります。マージンを多くもたせれば開発費がかさみ、ぎりぎりを狙いすぎて余裕がなければいずれ観測に問題が出てきます。設計が終わるとメーカーによる製作に進みます。材料一つ一つの吟味から始まり、クリーンルームでの組み立て、宇宙環境を模擬した試験室での過酷なテストを経てようやく衛星とセンサができあがります。ここでは技術陣が日夜がんばります。次は打上げです。現在の日本の主幹ロケット H2A の信頼性は高いものですが、それでも 100% 成功とはいきません。数百億円ものリソースを使って作った衛星とセンサが一瞬にして失われるかもしれないという恐怖は、主体的に計画に参加する立場で打上げを見守った人にしかわからないことかもしれ



第9図 NASDA/EORC で開催された ADEOS-II/GLI センサ初画像確認会 (2003年1月26日)。

ません。打上げが成功した後は画像の取得です。「まさか、真っ黒な画像が降りてきやしないか」。仕様設計にどれだけ自信があっても胃がきりきり痛みはじめます (第9図)。私は若手〜中堅として各種プロジェクトに関わりましたが、もっと上の立場であるプロジェクトマネージャ、プロジェクトリーダー、チーフサイエンティストが背負う責任の大きさと心労は想像に難くありません。

このように衛星観測には幾つかの特有の難しさがあり、研究者としてそれに携わるにはかなりの覚悟を必要とします。しかしそれ故にやりがいがあり、そして宇宙利用そのものへの興味を抱かせる機会が多々あるのも確かです。このようにして進められた衛星計画から自分の専門領域の成果が得られ、それが実際の気象学の発展に役立てられ、今回の受賞のように成果を認められる。研究者人生としてこれ以上の幸せがありますでしょうか (第10図)。

7. 将来に向けて

私は、いつかは宇宙に出てみたい、宇宙から雲の様子を思う存分眺めてみたいとかなり本気で願っています。はたして、いち研究者が宇宙に出ている時代が来るでしょうか？ 卒業研究生のひとりが言います。「僕は学科の仲間内でいつも雲の話をしているので、ミスター・クラウドとよばれているのですよ」。このような話を聞いて指導教員として嬉しくないはずがありません。主体的に仕事に取り組むことの面白さに気

づいたその学生は、きっと充実した社会人生活をおくることができるでしょう。

先日、社団法人学士会の定期刊行冊子 U7 を眺めていたら、東京大学数物連携宇宙研究機構 (IPMU) の村山 斉機構長のインタビュー記事が目にとまりました。村山 斉氏は「宇宙科学研究は99%がうまくいかない。やっとのことで残り1%に可能性を見いだすことができ、それを元に論文を書きあげるわけですが、その内容が10年後くらいに一気にひっくり返され



第10図 堀内賞受賞記念パーティーの様子。幹事は永尾 (松井) 隆氏、司会は増永浩彦氏。筆者は左方中列左から4番目 (2011年11月17日、名古屋にて)。

ることがよくある。」という趣旨の発言をなされてきました(村山 2011)。私は大いに同意します。気象学も同じです。地球システムに関するパーツをひとつひとつ慎重に検討しながら丁寧に理論を組み上げてきたつもりが、あるタイミングで大きな置き換えが入る。置き換えられたパーツに価値がないのかというと全然そうではなくて、正解を導き出すための重要なステップであったわけです。改めて指摘するまでもなく、研究の実施や成果の発表には慎重かつ丁寧な対応が求められますが、それと同時に大胆な発想とそれを発表する勇気も重要です。次世代を担う中堅、若手の活力を十分に引き出して未来につなぐために、私たち研究者をとりまく環境にも配慮したいところです。

今後の衛星観測ですが、ADEOS-II 衛星が担ったミッションは GCOM-W (2012年打ち上げ済み) と GCOM-C という 2 系統のシリーズ衛星に引き継がれます(五十嵐ほか 2009)。また、雲とエアロゾルの 3 次元観測に重点化した EarthCARE 衛星の打上げが予定されています(Bezy *et al.* 2005)。EarthCARE 衛星に搭載される雲レーダはドップラー機能を有することから、雲構造の解明がさらに進むことでしょう。また、静止気象衛星「ひまわり」が 2015 年を境に多波長・高頻度観測を可能にする第 3 世代に入れ替わるなど(佐々木・操野 2011)、観測原理、観測手法、ターゲットにそれぞれ特徴を持つ多くの地球観測衛星およびセンサが同時稼働する時代が始まります。これらの多種多様なデータを用いることで、地球システム、特に雲を中心とする多くの謎の解明につなげていきたいと考えています。私は研究上の大きなヒントは多種センサの複合解析にあると強く感じ、多くの研究仲間達と共に準備を進めています。これまで以上の先見性と、相応の時間、そして研究そのものを楽しむ姿勢が必要になるでしょう。困難もあるでしょうが、知恵を働かせながらひとつひとつ問題を解決したいと思います。今後ともご支援をお願いいたします。

謝辞

堀内賞受賞記念解説文という本原稿の性格上、映画の最後に流れるスタッフロールのように無数の方々に御礼を申し上げなければなりません。しかし、誌面に限りがありますので、まずは研究者らしく、研究支援を頂いた機関や研究枠組みに対して、次に主に共同研究によって論文を共著させていただいた方々に御礼を申し上げたいと思います。

これまで得られた成果は、科学研究費補助金、宇宙航空研究開発機構、米国航空宇宙局、欧州宇宙機関、科学技術振興機構、国立環境研究所、日本気象協会および日本財団、東海大学など、多くの研究枠組みあるいは機関による支援によるものです。多大なるご支援に改めて感謝いたします。

私に地球物理の面白さを教えてくれた東京理科大学の故中江 茂先生及び三浦和彦先生、修士論文と博士論文のご指導を頂いた東京大学の中島映至先生、ライダー研究をご指導くださった内野 修様と永井智広様、雲特性解析の全球展開を担当した河本和明様、エアロゾル衛星観測の日暮明子様、氷雲衛星観測の片桐秀一郎様、マイクロ波放射計解析の増永浩彦様、センサシミュレータ研究を共に実施してくれた ADEOS-II/GLI プロジェクト研究代表者の皆様、モデルを使用した研究展開を図っている竹村俊彦様と鈴木健太郎様そして佐藤正樹先生、非球形粒子の散乱研究で多くのアドバイスを頂いた真野裕三様と吉森 久様、新しい雲識別手法の仕事と一緒に取り組んでくれた石田春磨様、放射伝達ツールの整備に尽力中の関口美保様、雲レーダとの連携を実施している岡本 創様、放射フラックスの超高速計算手法を開発した竹中栄晶様、雲特性の検証に尽力頂いた高村民雄先生と青木一真様、キラウェア火山と雲特性の関係を分析してくれた鶴野伊津志先生と江口健太様、その他多くの研究者の皆様や研究者になるべく修行中の学生さんに厚く御礼を申し上げます。私の成長と活躍を辛抱強く見守ってくださった、歴代の東京大学気候システム研究センター長の方々、特に松野太郎先生、住 明正先生には大変お世話になりました。

NASDA~JAXA 時代の研究ディレクターでいらっしゃった鳥羽良明先生、小川利紘先生には研究活動を応援して頂きました。地球観測研究センター(EORC)の歴代センター長、田中 佐様、奥田常生様、原田好博様、大築二三夫様、そして直属上司の森山 隆様、五十嵐 保様には様々な局面におけるピンチを助けていただきました。当時の ADEOS-II プロジェクトマネージャであった上野精一様、伊東康之様、松浦直人様にも御礼を申し上げ、さらに GLI のプロジェクトコーディネータの皆様やアルゴリズムインテグレーションチーム(GAIT)の多国籍メンバー、現在の JAXA/NICT の EarthCARE (木村俊義様、沖 理子様、高橋暢宏様、大野裕一様、他多数)および GCOM プロジェクト(今岡啓治様、村上

浩様, 堀 雅裕様, 田中一広様, 他多数), そして JAXA-NIES-MOE の GOSAT プロジェクト (横田達也様, 渡辺 宏様, 中島正勝様, 久世暁彦様, 他多数), 日韓交流や地球観測衛星研究連絡会でお世話になっている早坂忠裕先生, その他の多くの皆様と受賞の栄誉を共有したいと思います. 東海大学で中島 孝の研究をバックアップしている情報技術センター (TRIC) の松前義昭所長および宇宙情報センター (TSIC) の下田陽久所長, そして TRIC 職員の皆様, 情報デザイン工学部の長 幸平先生と福江潔也先生 (現 情報理工学部) を始めとする教員及び教学職員の皆様に御礼申し上げます. 現在, 中島 孝研究室で活躍している永尾 (松井) 隆研究員とフスリート研究員には, 授業/研究/委員会/会議等で日々多忙な中島 孝をバックアップしてもらっています. 私が受け持っている多くの学生さんも研究のエネルギー源です.

最後に, これまでの研究活動全般に理解を示してくれ, 公私にわたる沢山の困難と一緒に乗り越えてくれた愛妻と息子に最大の謝意を表したいと思います.

参 考 文 献

- Asano, S. and G. Yamamoto, 1975: Light scattering by a spheroidal particle. *Appl. Opt.*, **14**, 29-49.
- Berk, A., L. S. Bernstein, G. P. Anderson, P. K. Acharya, D. C. Robertson, J. H. Chetwynd and S. M. Adler-Golden, 1998: MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. *Remote Sens. Environ.*, **65**, 367-375.
- Bezy, J.-L., W. Leibrandt, A. Heliere, P. Silverstrin, C.-C. Lin, P. Ingmann, T. Kimura and H. Kumagai, 2005: The ESA Earth Explorer EarthCARE mission. *Earth Observing Systems X*, J. J. Butler Eds., SPIE, **5882**, doi: 10.1117/12.619438.
- Draine, B. T. and P. J. Flatau, 1994: Discrete-dipole approximation for scattering calculations. *J. Opt. Soc. Amer.*, **A11**, 1491-1499.
- Eguchi, K., I. Uno, K. Yumimoto, T. Takemura, T. Y. Nakajima, M. Uematsu and Z. Liu, 2011: Modulation of cloud droplets and radiation over the North Pacific by sulfate aerosol erupted from Mount Kilauea. *SOLA*, **7**, 77-80.
- Han, Q., W. B. Rossow and A. A. Lacis, 1994: Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data. *J. Climate*, **7**, 465-497.
- 五十嵐 保, 今岡啓治, 可知美佐子, 藤井秀幸, 村上浩, 堀 雅裕, 小野朗子, 田中一広, 伊藤徳政, 中川敬三, 2009: 地球環境変動観測ミッション (GCOM) の展望. *日本リモートセンシング学会誌*, **29**, 665-674.
- Ishida, H. and T. Y. Nakajima, 2009: Development of an unbiased cloud detection algorithm for a spaceborne multispectral imager. *J. Geophys. Res.*, **114**, D07206, doi:10.1029/2008JD010710.
- Ishida, H., T. Y. Nakajima, T. Yokota, N. Kikuchi and H. Watanabe, 2011: Investigation of GOSAT TANSO-CAI cloud screening ability through an intersatellite comparison. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1571-1586.
- Kawamoto, K., T. Nakajima and T. Y. Nakajima, 2001: A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing. *J. Climate*, **14**, 2054-2068.
- Kneizys, F. X., E. P. Shettle, L. W. Arbeau, J. H. Chetwynd, G. P. Anderson, W. O. Gallery, J. E. A. Selby and S. A. Clough, 1988: Users guide to LOWTRAN-7. Air Force Geophysics Laboratory Tech. Rep., AFGL-TR-88-0177, 137.
- Kotchenova, S. Y. and E. F. Vermote, 2007: Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. *Appl. Opt.*, **46**, 4455-4464.
- Kotchenova, S. Y., E. F. Vermote, R. Matarrese and F. J. Klemm, 2006: Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Appl. Opt.*, **45**, 6762-6774.
- Macke, A., 1993: Scattering of Light by polyhedral ice crystals. *Appl. Opt.*, **32**, 2780-2788.
- Mano, Y., 2000: Exact solution of electromagnetic scattering by a three-dimensional hexagonal ice column obtained with the boundary-element method. *Appl. Opt.*, **39**, 5541-5546.
- Masunaga, H., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi, R. Oki and S. Kuroda, 2002a: Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of Tropical Rainfall Measurement Mission Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner: Algorithm. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4083, doi:10.1029/2001JD000743.
- Masunaga, H., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi and K. Suzuki, 2002b: Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner 2. *Climatology of warm clouds and rain. J. Geophys. Res.*, **107**, 4367, doi:10.1029/2001JD001269.

- Matsui, T., H. Masunaga, S. M. Kreidenweis, R. A. Pielke, W. K. Tao, M. Chin and Y. J. Kaufman, 2006: Satellite-based assessment of marine low cloud variability associated with aerosol, atmospheric stability, and the diurnal cycle. *J. Geophys. Res.*, **111**, D17204, doi:10.1029/2005JD006097.
- Mishchenko, M. I., L. D. Travis and D. W. Mackowski, 1996: T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: A review. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **55**, 535-575.
- Muononen, K., T. Nousiainen, P. Fast, K. Lumme and J. I. Peltoniemi, 1996: Light scattering by Gaussian random particles: Ray optics approximation. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **55**, 577-601.
- 村山 斉, 2011: 宇宙の起源と進化の解明をめざして「統一の理論で説明したい」. 学士会 U7, **37**, 10-19.
- 中島 孝, 2006: 大学院教育における WWW 版放射伝達シミュレータの活用. *天気*, **53**, 727-731.
- Nakajima, T. and M. D. King, 1990: Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1878-1893.
- Nakajima, T. and M. Tanaka, 1986: Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **35**, 13-21.
- Nakajima, T. and M. Tanaka, 1988: Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **40**, 51-69.
- Nakajima, T., M.D. King, J. D. Spinhirne and L. F. Radke, 1991: Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: Marine strato-cumulus observations. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 728-750.
- Nakajima, T. Y. and T. Nakajima, 1995: Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 4043-4059.
- Nakajima, T. Y., T. Nakajima and A. A. Kokhanovsky, 1997: Radiative transfer through light scattering media with nonspherical large particles: direct and inverse problems. *Satellite Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere II*, J. D. Haigh eds., SPIE, **3220**, 2-12, (London, UK).
- Nakajima, T. Y., T. Imai, O. Uchino and T. Nagai, 1999: Influence of daylight and noise current on cloud and aerosol observations by spaceborne elastic scattering lidar. *Appl. Opt.*, **38**, 5218-5228.
- Nakajima, T. Y., H. Masunaga and T. Nakajima, 2009a: Near-global scale retrieval of the optical and microphysical properties of clouds from the Midori-II GLI and AMSR data. *J. Remote Sens. Soc. Japan*, **29**, 29-39.
- Nakajima, T. Y., T. Nakajima, K. Yoshimori, S. K. Mishra and S. N. Tripathi, 2009b: Development of a light scattering solver applicable to particles of arbitrary shape on the basis of the surface-integral equations method of Müller type: Part I. Methodology, accuracy of calculation, and electromagnetic current on the particle surface. *Appl. Opt.*, **48**, 3526-3536.
- Nakajima, T. Y., K. Suzuki and G. L. Stephens, 2010a: Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part I: Sensitivity analysis of the MODIS-derived cloud droplet sizes. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1884-1896.
- Nakajima, T. Y., K. Suzuki and G. L. Stephens, 2010b: Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part II: A multisensor view. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1897-1907.
- Nakajima, T. Y., T. Tsuchiya, H. Ishida, T. N. Matsui and H. Shimoda, 2011: Cloud detection performance of spaceborne visible-to-infrared multispectral imagers. *Appl. Opt.*, **50**, 2601-2616.
- Ota, Y., A. Higurashi, T. Nakajima and T. Yokota, 2010: Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere-ocean system. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **111**, 878-894.
- Platnick, S., 2000: Vertical photon transport in cloud remote sensing problems. *J. Geophys. Res.*, **105**, 22919-22935.
- 佐々木政幸, 操野年之, 2011: 静止地球環境観測衛星ひまわり 8号及び9号について. *日本リモートセンシング学会誌*, **31**, 255-257.
- Sekiguchi, M. and T. Nakajima, 2008: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **109**, 2779-2793.
- Stamnes, K., S.-C. Tsay, W. Wiscombe and K. Jayaweera, 1988: Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Opt.*, **27**, 2502-2509.
- Stephens, G. L. et al., 2002: The CloudSat mission and the A-Train. —A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1771-1790.

- Su, W. and M. Suzuki, 2001: Evaluation of star in the UV region for the application of GCOM-A1/ODUS. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **69**, 205-216.
- Suzuki, K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima and G. L. Stephens, 2008: Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
- Suzuki, K., T. Y. Nakajima and G. L. Stephens, 2010: Particle growth and drop collection efficiency of warm clouds as inferred from joint CloudSat and MODIS observations. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3019-3032.
- Suzuki, K., G. L. Stephens, S. C. van den Heever and T. Y. Nakajima, 2011: Diagnosis of the warm rain process in cloud-resolving models using joint CloudSat and MODIS observations. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 2655-2670.
- Takano, Y. and K.-N. Liou, 1989: Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part I: Single-scattering and optical properties of hexagonal ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3-19.
- 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.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Takenaka, H., T. Y. Nakajima, A. Higurashi, A. Higuchi, T. Takamura and R. Pinker, 2011: Estimation of solar radiation using a neural network based on radiative transfer. *J. Geophys. Res.*, **116**, D08215, doi:10.1029/2009JD013337.
- Yang, P. and K. N. Liou, 1996a: Geometric-optics-integral-equation method for light scattering by nonspherical ice crystals. *Appl. Opt.*, **35**, 6568-6584.
- Yang, P. and K. N. Liou, 1996b: Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space. *J. Opt. Soc. Amer.*, **A13**, 2072-2085.

Algorithm Development for the Satellite Measurements of Cloud Properties

Takashi Y. NAKAJIMA*

* *Tokai University School of Information & Design Engineering, Department of Network and Computer Engineering / Research and Information Center, Tokyo 151-0063, Japan.
E-mail: nkjm@yoyogi.ycc.u-tokai.ac.jp*

(Received 5 January 2012; Accepted 20 August 2012)
