

第3回および第4回大気中の光散乱とリモートセンシングに関する 国際シンポジウム (ISALSaRS) の報告*

甲斐憲次^{*1}・河本和明^{*2}・杉本伸夫^{*3}・清水厚^{*4}
神慶孝^{*5}・岩渕弘信^{*6}・西澤智明^{*7}

1. はじめに

近年、光散乱リモートセンシングを用いた地球環境計測技術が著しく進歩した。2009年には、環境省と宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA) が共同開発した温室効果ガス観測技術衛星いぶき (Greenhouse gases Observing Satellite, GOSAT) により、宇宙から温室効果ガスの濃度を観測できるようになった。また今後、JAXA/情報通信研究機構/欧州宇宙機関 (European Space Agency, ESA) による雲とエアロゾルを観測対象とする衛星ミッション Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer (EarthCARE) や、仏独共同によるメタン観測衛星 Methane Remote Sensing Lidar Mission (MERLIN) の打ち上げが計画されている。

このような状況の中、大気中の光散乱とリモートセンシングに関する国際シンポジウム ISALSaRS (International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing) が、大気中の光散

乱や放射伝達理論、受動および能動型リモートセンシング研究の最新の研究状況について議論することを目的に、米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) ラングレー研究センターの中国系研究者が中心となって立ち上げられた。この NASA ラングレー研究センターは、2006年に打ち上げられたスペースライダ-搭載衛星 Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) の標準プロダクトを作成していることでも有名である。

第1回の2009年西安、第2回の2011年蘭州に続き、第3回は2013年名古屋、第4回は2015年武漢にて開催された。本稿では第3回および第4回についてそれぞれ報告する。

2. 第3回シンポジウムの報告 (ISALSaRS'13)

2.1 概要

第3回シンポジウムは、2013年7月29日-31日、名古屋大学にて甲斐憲次 (名古屋大学) を実行委員長として行われた。参加者総数は51名で、国別には日本20名、中国21名、米国5名、ドイツ2名、仏領ギアナ2名、カナダ1名であった (第1図)。

開催が決定した2011年から準備を開始したが、2013年度になって本シンポジウムに大きな試練が訪れた。米国政府の強制歳出削減の発動 (財政の崖) により、NASA など政府系研究機関に属する研究者の出張が厳しく制限され、本シンポジウムへの不参加を余儀なくされたのである。そのため急遽、ドイツからホーヘンハイム大学の Andreas Behrendt 博士と大気物理研究所の Gerhard Ehret 博士を招聘することで対応した。

* Report of International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing (ISALSaRS'13 and ISALSaRS'15).

^{*1} Kenji KAI, 名古屋大学大学院環境学研究所.

^{*2} (連絡責任著者) Kazuaki KAWAMOTO, 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科, kazukawa@nagasaki-u.ac.jp

^{*3} Nobuo SUGIMOTO, 国立環境研究所.

^{*4} Atsushi SHIMIZU, 国立環境研究所.

^{*5} Yoshitaka JIN, 国立環境研究所.

^{*6} Hironobu IWABUCHI, 東北大学大気海洋変動観測研究センター.

^{*7} Tomoaki NISHIZAWA, 国立環境研究所.



第1図 ISALSaRS'13参加者の集合写真。

2.2 主な発表内容

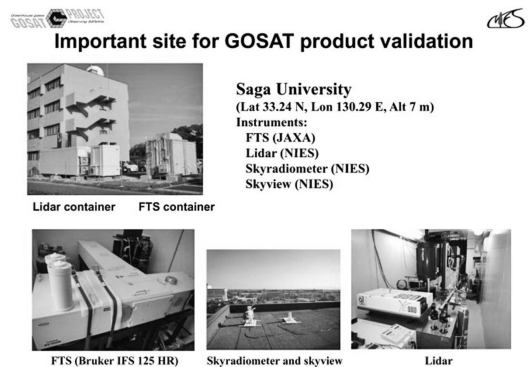
光散乱を利用した, CALIPSO, GOSAT (温室効果ガス), EarthCARE (雲・エアロゾル), MERLIN (メタンガス) 等の衛星観測の成果と研究計画が紹介され, 集中的に議論が行われた。このほか, 中国と日本におけるアジアダストの観測研究, 境界層プロファイリング, 放射過程の理論研究に関する発表が行われた。

2.2.1 光散乱を利用した衛星観測

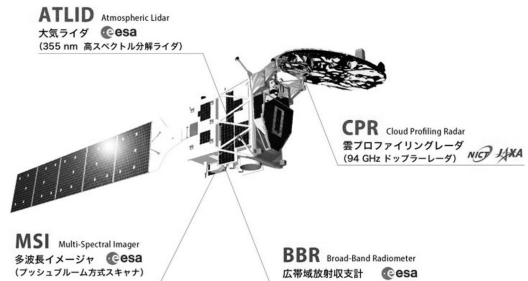
国立環境研究所の内野 修は, 「いぶき」(GOSAT) による二酸化炭素とメタンの気柱濃度に関する招待講演を行った。温室効果ガスの濃度推定法や, データ検証のために設置された地上観測サイト(第2図), そこで得られたデータに基づく検証手法の紹介のみならず, GOSAT ミッションやその測器の概要についても説明がなされた。薄い巻雲の影響に関するアルゴリズムの改良が最近行われ, 二酸化炭素濃度の地上観測や航空機観測の結果と比較したところ, 推定結果が大きく向上したとのことである。

ドイツ・大気物理研究所の Gerhard Ehret は2019年に打ち上げられる MERLIN について招待講演を行った。MERLIN はフランスとドイツの宇宙機関の合同ミッションであり, 1.645 μm での近接した2つの波長を使って大気中のメタンの鉛直プロファイルを測る。それによって, メタンの地域的な排出パターンやその時間変動についての重要な情報を提供する。発表では衛星計画に加えて観測の構想や分光学的特徴についても触れられた。

九州大学の岡本 創は JAXA と ESA が共同で開発している EarthCARE ミッションの現状やアルゴリズムについて招待講演を行った(第3図)。搭載される雲プロファイリングレーダー Cloud Profiling Radar (CPR) と大気ライダー Atmospheric LIDar



第2図 GOSAT データ検証のための地上観測システム。

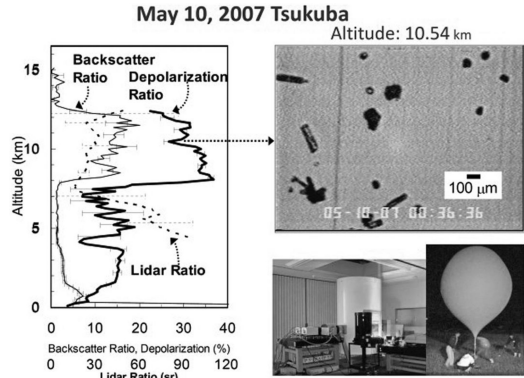


第3図 EarthCARE による雲・エアロゾルの衛星観測 (JAXA ウェブサイトより)。

(ATLID) はそれぞれ CloudSat のレーダーと CALIPSO 搭載ライダー Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) の後継と位置づけられるものであるが, EarthCARE の CPR には初めてドップラー機能が導入されるため, より詳細な雲とエアロゾルの姿が描かれることになる。

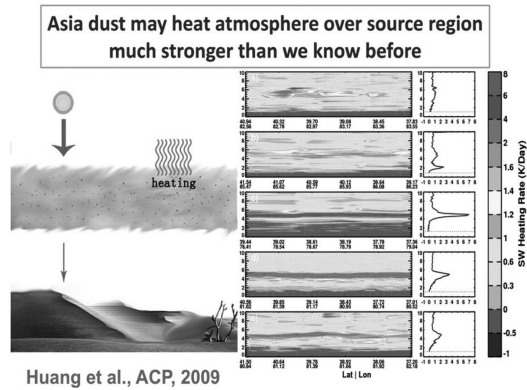
2.2.2 地上/衛星ライダーによるダストの観測

気象研究所の酒井 哲は、アジアダストが氷晶雲の形成に及ぼす効果を把握することを目的として、各種測器を搭載した気球とラマンライダーとを用いて巻雲とアジアダストを観測した(第4図)。ラマンライダーの観測結果より、高度6~12 kmでは粒子偏光解消度が15~35%と大きく、非球形のダストと氷粒子の存在が示唆される。同時に行われた気球観測では、高度8~12 kmにダスト粒子(粒径0.7~2.8 μm)と氷晶核(粒径10~400 μm)の存在が確認された。温度-33°Cから-63°Cかつ高い相対湿度の気層でアジアダストが氷晶核として作用している可能性が示された。



第4図 地上ライダーと気球によるアジアダストの観測。

蘭州大学の Jianping Huang は、2005年に、乾燥気候環境観測所とライダーネットワークを立ち上げ、中国北西部の乾燥地域における気候やダストの研究を精力的に行ってきた。第5図は、乾燥地域に浮遊するダストが大気を加熱していることを示している。ダストによる大気の加熱は、雲粒を蒸発させ、降水量を減少させる。その結果、ダストストームが頻発するようになる。このように、ダストによる大気の加熱は、乾燥・半乾燥地域における雲-降水相互作用に予想以上の影響を与える。しかしながら、ダストが湿潤地域に流入すると、氷晶核として機能し、降水量を増加させる。

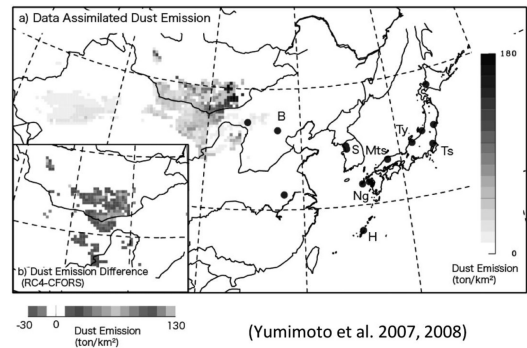


第5図 発生源におけるアジアダストのライダー観測。

国立環境研究所の杉本伸夫は、アジア域に展開中のライダーネットワーク Asian Dust and aerosol lidar observation network (AD-Net) について、これまでの成果として化学輸送モデルにおける黄砂消散係数の同化や、疫学調査における日平均黄砂消散係数の利用例などを示した。第6図は、4次元同化によるアジアダストの研究例(モデル領域とライダー観測地点、データ同化によって推定された黄砂発生量、データ同化しないモデルとの黄砂発生量の差)を示している。

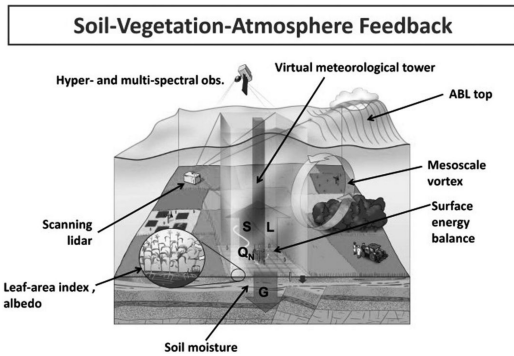
2.2.3 境界層プロファイリング

ドイツ・ホーヘンハイム大学の Andreas Behrendt は、回転ラマン散乱ライダー・水蒸気差分吸収ライダーの詳細について解説すると共に、これらおよびドップラーライダーを組み合わせたキャンペーン観測 HD(CP)² Observational Prototype Experiment (HOPE) の初期結果を示した(第7図)。いずれもスキャン可能なこれらライダーを組み合わせて気温・水蒸気・風速の3次元分布を同時に高い時間高度分解能で取得することで、複数の“Virtual Tower”による



第6図 4次元同化によるアジアダストの研究。

気象観測とも呼ぶべき情報が得られている。これからの境界層研究の方向性を示す、示唆に富む発表であった



第7図 仮想タワー“Virtual Tower”による土壌-植生-大気系フィードバックの観測。

た。

2.3 第3回シンポジウムを終えて

2013年に行われた名古屋での第3回シンポジウムは、名古屋大学大学院環境学研究科と長崎大学大学院水産・環境科学研究科との共催で実施された。大幸財団と Office of Naval Research Global から助成を受け、企業ブースには、JAXA、英弘精機、クリマテック、山梨技術工房、FITリーディングテックス、ブリードの6社からご出展頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

本シンポジウムで発表された論文を中心に、次の国際誌に特集号が組まれた。

Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer Vol. 150, Vol. 153

<http://www.journals.elsevier.com/journal-of-quantitative-spectroscopy-and-radiative-transfer/> (2015.11.14閲覧)

また使用した図は著者および当該プロジェクトのご厚意によって掲載を許して頂いた。

3. 第4回シンポジウムの報告 (ISALSaRS'15)

3.1 概要

第4回シンポジウムは、2015年6月1日-3日、中国湖北省の省都である武漢にて、武漢大学の Wei Gong 教授を実行委員長として開催された。参加者数は約110名で、口頭発表とポスター発表がほぼ半々であった。後述するように参加者の殆どを中国人研究者が占めていた (第8図)。

会議初日の夜に、会場の武漢からそれほど離れていない監利県の長江で大型客船が転覆し、多数の死者が出る大事故が発生した。そのため2日目は黙祷を行ってから午前のセッションを開始し、その晩の夕食会も場所を変えて行われた。

3.2 主な発表内容

北京大学の Jietai Mao は、遠隔計測の基礎に関する講演で「受動から能動へ」というような方向性について述べた。受動とは太陽光や大気からの赤外放射を利用する計測手法で、能動とはレーダーやライダーのようにセンサー自身から電波や光が送信され、測定対象物によって反射・散乱された信号を解析する手法である。質疑では当然、両方が必要であるというコメントがあったが、今回のシンポジウムの中国からの研究発表は、以下に紹介するようにライダーに関するものが多かった。一方、受動型センサーと地上観測を用いた長期データ解析に関する研究や、非球形粒子による光散乱といった放射伝達問題の進展についての発表も見られた。

3.2.1 CALIPSO による研究事例

蘭州大学の Jianping Huang は anthropogenic dust (AD) の CALIPSO 搭載 CALIOP による検出について報告した。AD は農作業や土木工事などにより人為的に発生した砂塵とのことだが、その検出過程で AD は自然起源の砂塵よりも偏光解消度が小さめで境界層に分布するという条件のもとに行われていた。これに



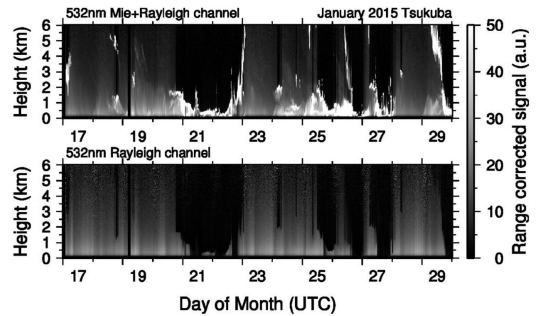
第8図 ISALSaRS'15参加者の集合写真。

より見積ったADの全球分布なども示されたが、この手法では自然起源の砂塵が球形の2次生成エアロゾルと共存する領域も検出されたADに含まれてしまっている恐れがある。

CALIPSO 研究の総本山である NASA ラングレー研究センターからは以下の研究が発表された。Zhaoyan Liu は、CALIOP でライダー比 (S1) を決定することが可能な不透明な雲より上のエアロゾル層について、最近リリースされた改良アルゴリズムによるデータセット Version4.00において Ver3.30以前から光学特性がどう変動したか論じた。キャリブレーションが改善された Version4.00では、ダストの S1 が以前より低下したが、粒子偏光解消度は殆んど変化しないとのことである。また Yongxiang Hu は、この数十年に増加していると言われている Arctic cloud について CALIPSO データを用いた解析を行い、9年間の観測期間中に雲量、微物理特性共に変化が見られることを報告した。その他、Xiaomei Lu は Yongxiang Hu と共に CALIOP の本来の観測目的を越えた樹冠高度測定について報告した。この解析では、森林からの散乱信号の貫通深度 (penetration depth) が1064 nm と532 nm で異なることを利用する。樹葉の反射率は1064 nmの方が大きいので貫通深度は532 nmの方が深い。2波長の貫通深度の差と Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite (ICESat) に搭載された Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) の波形解析による樹冠高度の間に良い相関があることが示された。

3.2.2 高スペクトル分解ライダーの広まり

今回のシンポジウムでは、第3回には無かった高スペクトル分解ライダー (High Spectral Resolution Lidar, 以後は HSRL) に関する発表がいくつか見られたことが特筆される。HSRL は、高感度で消散係数と後方散乱係数を直接的に測定できるため次世代のエアロゾルライダーとして期待されており、浙江大学から以下の3名の研究者の発表があった。Dong Liu は HSRL の受光部に用いるフィルターとして、入射角依存性を補償する特殊なマイケルソン干渉計を紹介した。Zhongtao Cheng は、上記干渉計の最適なデザインを決定するための精度解析結果について発表した。また Yupeng Zhang は、HSRL や一般的なミー散乱ライダーによって Haze の分類を行った場合の差異について議論した。武漢大学の Yingying Ma は HSRL のデータ解析手法について報告した。国立環



第9図 ヨウ素吸収フィルター法を用いた HSRL による観測例。

境研究所の神 慶孝は、ヨウ素吸収フィルター法を用いた HSRL の連続測定の結果についてポスター紹介をした (第9図)。第9図下段は、ヨウ素フィルターによって雲やエアロゾルなどのミー散乱成分が除去されたレイリー散乱信号を示している。

3.2.3 他のライダー研究

衛星からの長光路差分吸収ライダー (Integrated Path Differential Absorption, IPDA) による二酸化炭素濃度観測の可能性について、NASA ラングレー研究センターの Bing Lin と Michael Obland から NASA の Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons (ASCENDS) 計画に関する2件の報告があった。航空機搭載システムによる実証試験など開発が着実に進んでいることが示されたが、IPDA 装置はかなり大型であるという印象を受けた。今後急速に開発研究が進んでいくと予想されるが、同時に地上からの検証について検討する必要がある。中国からも、上海光学精密機械研究所の Weibiao Chen が二酸化炭素観測とエアロゾル観測用の衛星搭載ライダーの概念とそれぞれのレーザーの開発について報告した。但し、全般に測定誤差等に関する検討が十分には行われていないように見受けられ、多少楽観的に過ぎる印象も受けた。

中国科学院安徽光学精密機械研究所の Dong Liu は、合肥で実施された観測より、エアロゾルと雲の微物理特性を報告した。観測には、3波長ミー散乱ライダー (355 nm, 532 nm, 1064 nm) と2波長ラマンライダー (387 nm, 607 nm) が使用され、航空機観測との比較も行われた。

西安理工大学の Tingyao He は、西安において、2013年10月から1年間、ミー散乱ライダー (532 nm) による連続観測を実施した。また、後方流跡線解析

(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT) により、エアロゾルの起源を調べた。観測期間中のエアロゾル光学的厚さは、澄んだ状態で0.10、ダスト状態で0.76、平均で 0.32 ± 0.14 であった。HYSPLITによると、エアロゾル光学的厚さは、海洋性気団、大陸性気団、都市大気など卓越する気団の特徴との相関が高かった。すなわち、エアロゾル光学的厚さは、海洋性気団に覆われると小さく、大陸性気団に覆われると大きくなる。

中国科学院武漢物理数学研究所のYajuan Liは、武漢で実施された、回転ラマンライダーと高度10-80 kmにおける温度計測用レーザライダーの観測結果を報告した(温度データをフーリエ解析してラージスケールの気象波動を検出)。他にも安徽光学精密機械研究所や中国科学院国家空間科学中心から中層大気のライダー観測研究の報告があり、中国でこの分野も健在であることが分かった。

3.2.4 新しい動きなど

米国のUniversities Space Research Association (USRA) のYuekui Yangによる、ラグランジュポイントL1(地球から太陽方向に150万 km)から観測を行うDeep Space Climate Observatory (DSCOVR) についての紹介は興味深かった。10 chのイメージャEarth Polychromatic Imaging Camera (EPIC) により、これまでの極軌道や静止軌道からの観測とは異なる時空間パターンのデータセットが得られるため、全球規模の地上観測ネットワークとの擦り合わせなどにおいて新しい解析アイデアが生まれてくるのか、今後の展開が楽しみである。

またNASA ラングレー研究センターのWenbo Sunは、偏光情報を使った極めて薄い雲(super-thin clouds)の検出可能性についての発表を行った。受動

型センサーを使った研究であるが、能動型センサーとの併用などで更なる進展が期待できると思われた。

3.3 第4回シンポジウムに出席して

日本からは5名が参加した。日本人研究者が筆頭の発表を以下にまとめる。名古屋大学の甲斐憲次はモンゴルでのシーロメータによるダストの観測について、長崎大学の河本和明はCloudSatの94-GHz レーダーの水雲の反射率について、国立環境研究所の杉本伸夫はAD-Netによるエアロゾルの特性評価について、清水厚はAD-Netの長期データを用いたエアロゾル分布の時間・空間変動の解析について、それぞれ講演発表を行った。また前述の通り神慶孝は、AD-Netにおける高スペクトル分解ライダーによる連続観測についてポスター発表を行った。

ポスターセッションは、コーヒープレイクと同時に1日30分ほどの時間が与えられた。ポスターは初日から3日目まで貼り続けられたので、各々のポスターでの議論に多くの時間をかけることができた。

一方、キャンセルや発表者の入れ替えが激しく、最終的な発表順はセッション開始直前に座長に配られるペーパーでやっと確認出来る状況であった。また、予稿が提出されていないために予備知識がなく聞くことになる発表も多々あった。初回のISALSaRS'09以来、NASAの中国系研究者が中心の会合という印象があったが、今回は特に中国からの参加者が圧倒的に多く、国際シンポジウムと銘打つにはぎりぎりの感がある。次回は2017年に安徽省合肥において開催される予定であり、この際にどれだけ多様な参加者を確保できるか、真価が問われるであろう。第3回報告と同様、使用した図は著者および当該プロジェクトのご厚意によって掲載を許して頂いた。