

ライダーによる東アジア大気環境および気候研究の推進

—2017年度堀内賞受賞記念講演—

杉 本 伸 夫*

1. はじめに

この度は、堀内賞をいただき光栄です。推薦していただいた方々、選考していただいた方々に心より感謝いたします。今回の受賞は、私だけの成果ではなく、国立環境研究所のライダー研究チームを中心とする対流圏エアロゾル観測に関する一連の研究を評価して頂いたものであると思います。そのような意味でも一層嬉しく感じます。また、この研究は、国内外の多くの方々の協力によって初めて可能となったもので、関係者の皆様に深く感謝いたします。

最初に、私自身の紹介をしたいと思います。今回の受賞は気象と環境の境界領域の研究を評価していただいたものと理解していますが、私の出身は、実は、気象でも環境でもなくて、物性物理（半導体光物性）でした。大阪大学の基礎工学部の出身ですので、理学と工学の境界領域でもありました。偶然にも、レーザーと分光学という関わりで、1979年に当時の国立公害研究所に採用されて、そのまま現在に至っています。採用された時は修士修了で、研究所に入ってからNO₂のレーザー分光の研究で学位を取得しました。私のそのような背景から、当初は、大気計測手法や装置の開発に関する研究が中心でした。その中では、何か新しいことをやらなくてはいけないという思いが常にあって、いろいろなことを手がけましたが、大気計測でそれほど新しい手法があるわけでもなく、あっても直ぐには役に立つわけではないということで、計測側からもサイエンス側からもどうも中途半端という感

がありました。

今回の受賞につながる研究の転機は、1992年に研究室長になって、国立環境研のライダー関連研究を引き継ぐことになったことにあります。当時、国立環境研のライダー観測研究では、掃引型の大型ライダーや鉛直方向を測定する小型ライダーを使った大気下層のエアロゾルの研究と、大型の差分吸収ライダーによる成層圏オゾンの研究が主要な課題でした。ADEOS衛星（1996年打ち上げ）に向けて研究体制がシフトしたのに伴って、エアロゾル観測に関する研究を笹野泰弘さんから私が引き継ぐことになりました。オゾンライダーの方は、中根英昭さんの担当でした。

エアロゾル観測に関して、当時、科学技術庁の「地球温暖化の原因物質の全球的挙動とその影響等に関する観測研究」という、小川利紘先生が研究代表者で、観測を10年間継続するという研究プロジェクト（1990-99）が走っていました。ちなみに、植松光夫先生がこのプロジェクトの検討委員のひとりでした。ライダーによるエアロゾル観測の分担者が笹野さんで、この研究課題も私が引き継ぎました。それまで、掃引型の大型ライダーによる観測が中心でしたが、連続観測には不向きであったため、鉛直上方のみを観測する小型のミー散乱ライダーを改修して、1996年に、つくばで自動連続観測を開始しました。ライダー装置としては特に新しいものではありませんでしたが、「とにかく観測を止めないように」というのを目標として観測を継続しました。これが後のネットワーク展開につながるライダーのプロトタイプになりました。地上の継続観測とほぼ同じ時期（1998年）に、海洋地球研究船「みらい」によるライダー観測も開始しています。

* 国立環境研究所。
nsugimot@nies.go.jp

—2018年1月29日受領—
—2018年3月9日受理—

2. 小型ライダーによる対流圏エアロゾルの連続観測

以上のような経緯で連続観測を始めましたが、研究のターゲットは、本来の目的である地球温暖化に関わるエアロゾル分布の長期変動の他、黄砂などの地域規模のエアロゾル現象でした。また、当時、2000年の打ち上げを目指して開発されていて実現しなかった日本の衛星搭載ライダーMDS2 (Mission Demonstration test Satellite 2号機)搭載ELISE (Experimental Lidar In Space Equipment)の検証も視野にありました。観測に使ったライダーは、簡単なミー散乱ライダーで、当初は波長532 nm (Nd:YAG レーザーの第2高調波)の後方散乱だけで、後に532 nmの偏光解消度と1064 nm (Nd:YAG レーザーの基本波)の後方散乱の測定が加わりました。

前述の科技庁の研究プロジェクトの国際ワークショップが1997年に名古屋で開催された際に、ドイツのライプニッツ対流圏研究所 (TROPOS) のJost Heintzenbergがアドバイザーとして招待されていて、私の発表に対して「我々はライダー観測に興味があるのではなく、「定量的な」ライダー観測に興味があるのだ」とコメントしたのをよく覚えています。「定量的でない」というのはミー散乱ライダーでは信号を表すライダー方程式に後方散乱と消散係数という2つの未知数が含まれていて、ライダー比 (消散係数対後方散乱係数比)の仮定なしには解けないというよく知られている問題のことで、しかし、ミー散乱ライダーでも、ライダー比の気候値を仮定して解析し、この仮定で生じる誤差を評価しておけば、誤差の範囲内では定量的な利用ができるわけで、私はHeintzenbergのコメントを全く気にしないで、その後、ミー散乱ライダーのネットワークを展開しました。当時、TROPOSでは多波長ラマン散乱ライダーの研究を進めていて、Dietrich Althausen, Albert Ansmann, Ulla Wandinger, Detlef Müllerといった錚々たるメンバーがこれに関わっていました。一方、こちらは松井一郎さんと私のみであったということもありますが、簡単なミー散乱ライダーの観測でも十分に面白くて、詳細な光学特性よりは分布の把握の方が先であろうという考えもありました。TROPOSの研究は、多波長ラマン散乱ライダーで得られる後方散乱係数と消散係数がエアロゾルの複素屈折率と粒径分布 (あるいはエアロゾルの種類)を推定するための情報を含むことを示す重要なものでした。それまでにも、多波長

ミー散乱ライダーに関する研究はありましたが、あまり良い結果が得られていませんでした。TROPOSの研究はラマン散乱ライダーによる消散係数の独立な測定に着目した点で画期的でした (Müller *et al.* 1998)。ずっと後になってから、国立環境研でも多波長ラマン散乱ライダーや、さらに進んだ多波長高スペクトル分解ライダーを用いたエアロゾル種の解析の研究を行うこととなります。

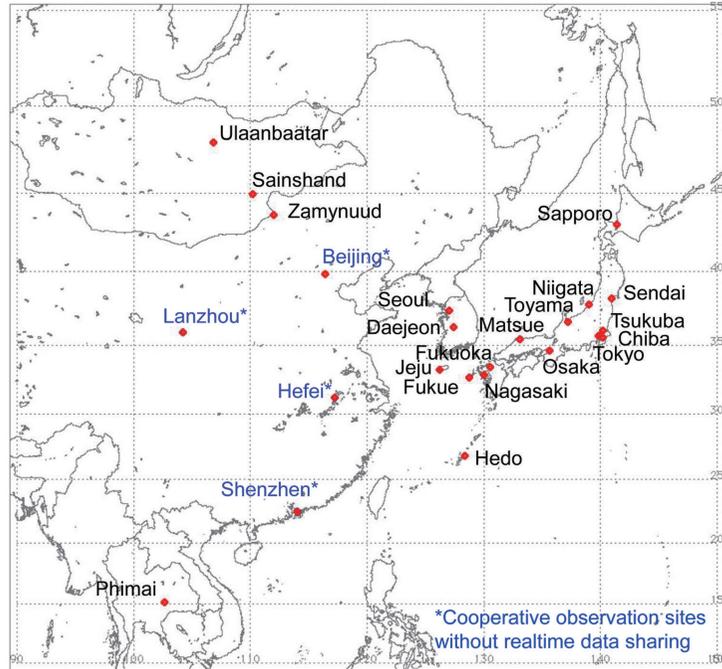
ネットワーク観測については、当時、東京商船大 (現東京海洋大)の村山利幸氏を中心とする黄砂の研究観測ネットワークAD-Netがありました。これは、研究のネットワークで、ライダーに限らず、黄砂イベントに関する観測データや情報を、手動でwwwページにアップロードするというものでした。AD-Net (Asian Dust Network)というものは、もともとこの研究ネットワークの名称として村山氏が命名したものでした。後に、国立環境研を中心に展開した自動観測ライダーネットワークのことをAD-Netと呼ばれることが多くなったので、現在も引き続きAD-Netの名称を使っています。但し、黄砂以外のエアロゾルも観測対象とするので正式名はAsian Dust and Aerosol Lidar Observation Networkに変更しました。

3. 自動観測ライダーネットワークAD-Netの構築

環境省環境研究総合推進費の黄砂に関する研究 (西川雅高氏が研究代表者)の中で、北京にある日中友好環境保全センター (全浩先生の研究チーム)にライダーを設置することになり、2001年3月から、長崎大学 (荒生公雄先生)、つくばの国立環境研の3地点で自動観測ライダーネットワークを始動しました。丁度、三上正男氏の科学技術庁のプロジェクトADECも2000年に始まり、これと連携することができました。また、東アジアの大気環境インパクトに関する笠原三紀夫先生の科研費特定領域研究が立ち上がって、これに参加する機会を得ました。さらに、中島映至先生のJST CREST課題「アジア域の広域大気汚染による大気粒子環境の変調について (APEX)」の中で、2002年の秋から、タイのSri Samrong (後にPhimaiに移設)でライダー観測を行うことになりました。このライダーは幸運にも半年以上メンテナンスなしで稼働し、遠隔地でのライダー観測に関して一定の評価を得ることができました。

その後、柴田科学株式会社の協力を得て、ライダー

システムを製品化することができました。また、2004年から2008年にかけて、環境省が、黄砂モニタリング事業で、国内の5地点（富山、松江、長崎、新潟、東京）にライダーを設置しました。さらに、JICAプロジェクトの中で、モンゴルの3地点（ウランバートル、サインシャンド、ザミンウド）にライダーを設置しました。その他にも、東北大学（浅野正二先生、早坂忠裕さん）、北海道大学（藤吉康志先生）、近畿大学（向井苑生先生、佐野 到さん）、韓国のKyung Hee 大学（Choo-Hie Lee先生）、ソウル国立大学（Soon-Chang Yoon先生）などとの研究協力や、高村民雄先生の大気放射観測網SKYNETの構築に関する文科省の研究課題、畠山史郎先生のエアロゾルの植物や人間への影響に関する新学術領域研究などの研究課題の中で、ネットワークの拡張やデータ解析手法の研究、また、ライダーネットワークデータを利用した研究を進めました。現在、東アジアの20地点においてライダー観測を連続して行っています（Shimizu *et al.* 2017a）。第1図に現在のAD-Netのライダー観測地点を示します。現在のところ、中国の地点はリアルタイムでデータ共有しない協力観測局という位置付けになっています。また、第2図にAD-Netの標準の



第1図 現在のAD-Netのライダー観測地点。



第2図 AD-Netの標準的なライダー装置の写真。左側が送受信部で、円筒形のものが受信望遠鏡（口径20 cm）。その隣のパイプを通してレーザーが上空に発射される。右側はデータ収集装置と制御用のコンピュータ。

ライダー装置の写真を示します。ライダーは小型のコンテナに設置され、天井のガラス窓を通して常時観測が行われます。

構築したライダーネットワーク (AD-Net) の最大の特徴は、黄砂やヘイズなどの日本に輸送される領域規模のエアロゾルイベントをほぼ逃すことなく捉えることができる観測ネットワークになっていることです。欧州のライダーネットワーク EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network) や米国 NASA のグローバルなライダーネットワーク MPL Net (Micro-Pulse Lidar Network) も、ほぼ同じ時期に始まっていますが、エアロゾル現象を捉えることを考えて設計されたものとは思えません。EARLINET は、ライダー研究者のネットワークで非常に高性能なライダーが用いられている一方で、自動観測ではない地点も多くあります。現象を捉える研究よりもエアロゾルの光学特性の気候学的な研究が主なターゲットとなっているように思います。また、MPL Net の本来の目的は、AERONET と同様、おそらく衛星観測の検証にあるものと思います。

4. AD-Net によるエアロゾル研究

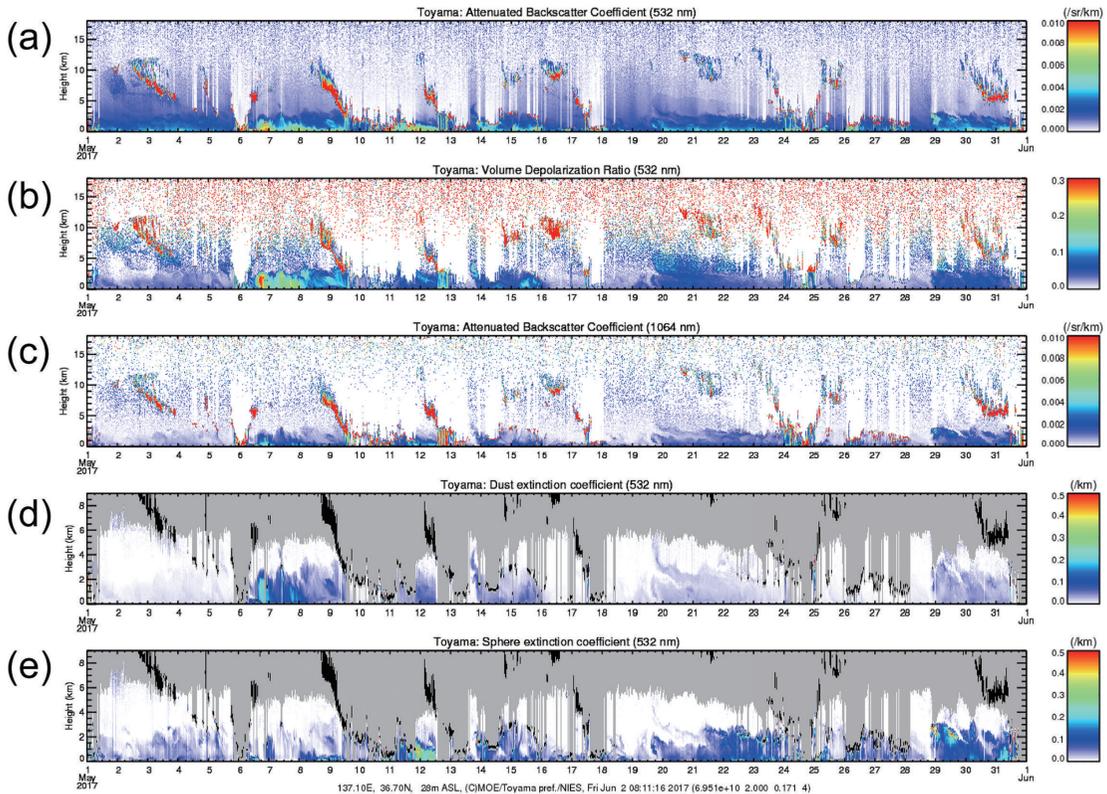
初期の AD-Net の主要な目的は、黄砂の連続的なモニタリングと化学輸送モデルの検証でした。先に述べたように、AD-Net のライダーは簡単なミー散乱ライダーですが、偏光解消度の測定機能を持っています。偏光解消度は、直線偏光で送信したレーザー光が散乱によってどれくらい乱れるかを表す量で、散乱体が球形ならば偏光は乱れないのでゼロ、非球形ならば大きな (例えば黄砂ならば 0.3 などの) 値をとります。従って、偏光解消度は黄砂を見分けるための感度の良い指標になります。従来、ライダー観測では後方散乱係数 (全エアロゾルの濃度に近似的に比例) と偏光解消度 (エアロゾルの非球形性の度合い) の時間高度表示を並べて見せて、いつ、どの高さに黄砂が来たという議論をしていましたが、2 枚の図を同時に見るのは難しいと言われることがしばしばありました。そこで、後方散乱係数と偏光解消度を組み合わせ、非球形な黄砂と概ね球形である大気汚染性エアロゾルを分離して、それぞれの消散係数 (光学的な濃度) を表示する方法を考えました。これは、非球形の黄砂と球形の大気汚染粒子という 2 種類のエアロゾルを考え、観測されるのはそれらが外部混合したものであるとして混合比を求めるという方法で、単純化した仮定に基づ

くものです。しかし、実際に光学粒子計数器 (OPC) による粒径測定とよく整合し、現実をほぼ正しく表現していることが分かりました。この手法は、ライダーの観測結果をモデルで計算した黄砂の分布と直接比較することができるなど、実用的に非常に有用です (Sugimoto *et al.* 2002, 2003; Shimizu *et al.* 2004)。なお、このようにエアロゾルを成分に分けて考える方法は、後に、高性能ライダーで得られる多数のパラメータを用いたエアロゾルコンポーネント解析につながるものでした。

AD-Net では、初期の頃から観測データを準リアルタイムで www ページを通じて研究コミュニティに公開しています。これは、研究ネットワークであった AD-Net からの自然の流れでした。自動データ収集、解析システムは清水 厚さんが中心になって開発しました。現在のデータ公開ページでは、ライダーの基本的なデータである減衰後方散乱係数 (532 nm, 1064 nm) と体積偏光解消度 (532 nm) とともに、前述した非球形粒子 (黄砂) と球形粒子 (主に大気汚染粒子) の消散係数 (532 nm) の推定値を、画像表示と NetCDF 形式の数値データで提供しています (Shimizu *et al.* 2017a)。第 3 図にデータの一例を示します。

ライダー観測データによる化学輸送モデルの検証と同化は、これまでの AD-Net による研究のなかで最も重要な成果が得られたところであろうと思います。初期の頃にまず行ったのは、九州大学の鶴野伊津志さんが開発した CFORS (Chemical Weather Forecast System) や竹村俊彦さんの SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) で計算された黄砂と大気汚染性エアロゾルの時間高度表示をライダー観測 (黄砂と大気汚染粒子) と比較することでした。その結果、定性的には化学輸送モデルは観測を概ね再現することが分かりました。つまり、モデルで計算されるエアロゾルの空間分布は、現実に近いものであることが確認されました (Sugimoto *et al.* 2005; Takemura *et al.* 2003)。

北京の観測では、春季に大きな黄砂イベントが時折観測され、黄砂イベントの前には高濃度の大気汚染が観測される例がしばしば見られます (Sugimoto *et al.* 2003)。ダストイベントが北京に到達する前、ダストを伴う低気圧が西側にあるときには、北京は弱い南風で汚染物質を含む気塊が南から運ばれて滞留し、低気圧が東に移動するのに伴ってダストを伴う強い北



第3図 自動解析によるAD-Netの標準データの画像表示。富山の2017年5月の例。(a)532 nmの減衰後方散乱係数, (b)532 nmの体積偏光解消度, (c)1064 nmの減衰後方散乱係数, (d)非球形エアロゾル(黄砂)の消散係数, (e)球形エアロゾル(大気汚染性エアロゾルなど)の消散係数の時間高度表示, それぞれカースケールで表示, 横軸は時間でひと月分, 縦軸は高度で, (a)-(c)では地上から18 km, (d), (e)では地上から9 kmまでを表示, (d) (e)では, 雲と判別された領域を黒で, 雲の上など解析できない領域, または解析精度が十分でない領域は灰色で表示している. AD-Net www ページでは, 各地点のデータの時間高度表示と NetCDF 形式の数値データを提供し, 1時間毎に更新している.

西の風が吹き込む状況になります。

CFORS と合わせた黄砂イベントの解析によって, 北京や日本の大気下層に輸送される大きな黄砂イベントの発生源はモンゴル南部から中国の内モンゴル自治区のゴビ砂漠であることが分かりました。このようなイベントでは, ゴビ砂漠で発生した黄砂は, ほぼ地上を這って日本まで輸送されます。一方, ライダーでは, 上空に浮かんだ黄砂もしばしば観測されます。北京, 長崎, つくばを比較すると, 発生源から遠いほど黄砂が地上で観測される頻度は減少し, 浮かんだ黄砂の割合が高くなります (Shimizu *et al.* 2004)。また, 黄砂よりも発生源が観測地点に近い大気汚染性のエアロゾルは, 黄砂よりも低い高度に分布することも長期間のライダーデータの解析で示されました (Hayasa-

ka *et al.* 2007)。さらに, 黄砂の光学特性が輸送に伴って変化することもライダー観測によって示されました (Sugimoto *et al.* 2002)。一般に, 輸送とともに偏光解消度が減少する傾向, すなわち黄砂の非球形性が低下する傾向が見られます。粒径に関係する後方散乱の波長比には変化はみられないので, 黄砂と大気汚染性エアロゾルの内部混合あるいは黄砂表面の化学反応の可能性が示唆されます。これについては, 最近, ソウルおよび北京における偏光粒子計数器 (POPC) を用いた観測研究によって, 黄砂の形態が大気汚染との相互作用によって変化することが捉えられています (Sugimoto *et al.* 2015; Pan *et al.* 2017)。また, 粒子の化学組成の変化と合わせた解析により, 大気汚染による硝酸と黄砂表面の炭酸カルシ

ウムの反応の重要性が指摘されています (Pan *et al.* 2017)。

タクラマカン砂漠は周囲を山に囲まれていることもあって、発生した黄砂は高高度に輸送され、日本ではダスト層は自由対流圏で観測されることが多いようです。タクラマカン砂漠起源の黄砂は非常に長距離に輸送されるので全球的な影響は大きいと言えると思います。後に、鶴野さんが、NASA の衛星搭載ライダー CALIPSO/CALIOP のデータと全球モデルを使って、タクラマカン砂漠起源のダストが約13日かけて地球を一周することを示しましたが (Uno *et al.* 2009)、地上ライダーで上空にしばしば発生源が不明なダスト層が観測されることも研究の動機のひとつであったと思います。

ゴビ砂漠起源の強い黄砂イベントの観測事例について、各地点のライダーで観測された黄砂消散係数の時間高度断面を CFORS と比べてみると、CFORS は各地点の観測をおよそ良く再現することが分かりました。但しイベントによって、濃度 (消散係数) が過大あるいは過小であるということが見られました。それならば、次は黄砂発生領域の発生量を制御変数にしたデータ同化であると鶴野さんが考えられたに違わず、鶴野先生の学生であった弓本桂也さんが、4次元変分法によるデータ同化システムを開発しました。同化には非球形粒子 (黄砂) 消散係数を使いました。データ同化したモデルは、黄砂の分布をより良く再現するだけでなく、発生源と発生量のより正確な推定に有用であることが示されました (Yumimoto *et al.* 2007, 2008)。モンゴルのゴビ砂漠で発生した黄砂事例の解析では、元のモデルには入っていない春季の植生の回復によると思われる発生量の減少をデータ同化によって検知することもできました (Sugimoto *et al.* 2010)。CFORS では発生源の黄砂の粒径分布を北京での過去のサンプリング測定に基づいて与えていますが、ライダーデータを同化したモデルは、エアロゾルの地上重量濃度 (PM10, PM2.5) もほぼ良く再現します (Sugimoto *et al.* 2011)。すなわち、黄砂の粒径分布や輸送中の粒径の変化や消散係数への変換が大体うまくいっていると言えると思います。

AD-Net の長期間の観測データを用いた気候学的な解析は現在進行中の課題ですが、これまでに、東アジアの大気汚染性エアロゾルの季節変化 (Hara *et al.* 2011) や経年変化 (Shimizu *et al.* 2017a)、日本上空の黄砂の経年変化 (Shimizu *et al.* 2017b) など

の解析が行われています。大気汚染性エアロゾルについては、この数年間、中国の発生量の減少によると考えられる減少傾向が見られます。黄砂についても減少傾向が見られますが、高高度ほど減少率が大きいこと、また発生源では減少傾向が見られないことから、輸送に関する気象場の変化が示唆されています。

以上に紹介した研究の他、ACE-Asia や ABC (Atmospheric Brown Cloud) などの国際観測研究 (Nakajima *et al.* 2007) や、日中韓環境大臣会合の黄砂に関する研究ワーキンググループ (TEM DSS-WG1) における研究 (Sugimoto *et al.* 2010, 2011, 2016; Shimizu *et al.* 2017b)、WMO の SDS-WAS (Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System) の活動などに参加してきました。AD-Net (Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network) は、2013年には WMO GAW (Global Atmosphere Watch) の協賛ネットワーク (contributing network) として承認され、全球ライダーネットワークである GALION (GAW Aerosol Lidar Observation Network) の東アジアコンポーネントとなりました。GALION はネットワークのネットワークであり、AD-Net の他に、EARLINET や MPL Net、南米のライダーネットワーク LALINET (Latin America Lidar Network)、旧ソ連圏の CIS-LiNet (Commonwealth of Independent States Lidar Network) などが参加しています。前述のように AD-Net では既に準リアルタイムのデータ提供を行っていますが、GALION 全体としてはまだ体制は整っておらず懸案となっています。準リアルタイムデータは全球的なエアロゾル予測モデルの検証・同化への利用のために今後非常に重要であると考えています。

5. ネットワークライダーの高機能化

非球形の黄砂と球形の大気汚染粒子を判別するだけでなく、ライダー観測からエアロゾルの特性をさらに詳細に把握するためには、さらに多くのパラメータを測定する必要があります。特に、放射影響で重要な光吸収性のエアロゾル (ブラックカーボンなど) を推定するためには、消散係数を後方散乱係数とは独立して測定することが不可欠です。そこで、AD-Net でも主要な地点のライダーにはラマン散乱の受信チャンネルを追加しました。また、新たに、Nd:YAG レーザーの3波長を使った多波長ラマン散乱ライダーと多波長高スペクトル分解ライダー (HSRL) を製作しま

した。これらのライダーでは、3波長(1064 nm, 532 nm, 355 nm)の後方散乱係数(β), 2波長(532 nm, 355 nm)の消散係数(α)と2波長(532 nm, 355 nm)の偏光解消度(δ)を測定します。ラマン散乱ライダーとHSRLは、いずれの手法も、エアロゾルの後方散乱の測定とは独立に、大気構成分子の散乱を測定し、分子散乱信号の減衰からエアロゾルの消散係数を求めます。ラマン散乱ライダーでは微弱なラマン散乱を利用するのに対してHSRLでは数桁強いレイリー散乱を利用します。ラマン散乱ライダーは太陽背景光の多い昼間は測定が困難ですが、HSRLは昼夜ともに高感度で消散係数の測定が可能です。但し、HSRLでは高分解能の分光素子を使ってミー散乱とレイリー散乱を分離する必要がありますので、技術的な難易度は高いです。現在、福岡、沖縄辺戸岬、富山の3地点で多波長ラマン散乱ライダー、つくばでHSRLの連続観測を行っています。

ライダーの高機能化と並行して、データ処理手法の研究も行ってきました。これは、エアロゾルコンポーネント解析と呼んでいる独自のアプローチで、元々は、当時東北大(現在九大応力研)の岡本 創さんの学生だった西澤智明さんがAD-Netの2波長ライダーに対して開発した手法(Nishizawa *et al.* 2007)をベースに西澤さんがさらに発展させたものです。この手法は、あらかじめ光学特性(複素屈折率, 粒径分布など)を仮定した何種類かのエアロゾルコンポーネントを考えて、観測を再現するような外部混合を求めるといような手法で、柔軟性が非常に高い方法です。もちろん、各エアロゾルコンポーネントの光学モデルの仮定が必要ですが、化学輸送モデルの結果から放射特性を計算するときにも光学モデルが不可欠なわけで、モデルとの整合性の良い方法と言えます。現在のところ、光学的に判別できるエアロゾルコンポーネントは、光吸収性の小さい小粒子(硫酸塩など)、光吸収性の小さい大粒子(海塩)、光吸収性の大きい小粒子(ブラックカーボン)、非球形粒子(ダスト)の4種類と考えていて、十分な数の独立な測定パラメータがあれば4種類の濃度を定めることができます。例えば、2波長の β , 1波長の α と δ が測定されていれば、4種類を決めることができます(Nishizawa *et al.* 2008)。測定するパラメータが多い場合は、エアロゾルコンポーネント毎の粒径(有効半径など)を推定することも可能になります。また、パラメータの数が少ない場合にもそれに応じた結果が得られるの

で、このアプローチはいろいろな種類のライダーによる観測の相互検証にも利用できると考えています(杉本ほか 2014)。

これまでに、多波長ラマン散乱ライダーによる観測を3年間以上に継続的に行っており、九州大学で同時に行っている地上サンプリングのデータと比較して、エアロゾル光学モデルの妥当性を検証しています(Nishizawa *et al.* 2017)。最新の結果では、ブラックカーボンの比較において、球状の純ブラックカーボンのモデルでライダーデータを解析すると、サンプリング測定と比べて濃度が過大評価(すなわちライダーで測定された光学特性を再現するためにはより多くのブラックカーボンが必要)となり、シェル(多少、光吸収性を持つ)で覆われたブラックカーボンのモデル(コア・グレーシェルモデル)を用いると、ほぼ妥当な結果が得られることが分かりました。これは以前から言われているレンズ効果(シェルが光学的にレンズのように働いてコアのブラックカーボンが大きく見える)と整合するものと思います。まだまだ課題は多いと思いますが、ようやくライダーで観測した光学特性とエアロゾルの組成、形状との関係を議論できるところまで来たと言えると思います。

多波長ラマン散乱ライダーとHSRLのデータ同化に関する研究も鶴野さんの科研費基盤S課題で行われています。データ同化では、エアロゾルコンポーネント解析の結果ではなくて、より測定値に近いパラメータ(各波長の消散係数, 後方散乱係数, 粒子偏光解消度)を使っています。しかし、エアロゾルコンポーネント解析とサンプリング測定などとの比較によって求められるエアロゾル種毎の光学モデルは、データ同化の観測演算子の作成に必要です。そういうわけで、エアロゾルコンポーネント解析とモデルによるフォワードな計算の両方のアプローチで研究を進めています。

6. 今後の課題と展望

私の目標とすることのひとつは、エアロゾルの組成、形状と、光学特性(放射影響)をリンクすることです。そのためには、リーズナブルなエアロゾル光学モデルを構築するというのが本質的な課題です。これは、地上観測、地上リモートセンシング、衛星観測、化学輸送モデルをリンクすることに繋がるものでもあります。リーズナブルなエアロゾル光学モデルを構築するためには、多機能ライダーとサンプリング分

析や, in-situ 測定, sky radiometer などのリモートセンシングによる同時観測を重ねることが必要です。ライダーの解析については, 先に紹介したエアロゾルコンポーネント解析が重要な役割を果たすと考えています。

ライダーだけではありませんが, 観測データに含まれる情報を最大限に利用するためにはデータ同化が重要です。現在のエアロゾルコンポーネント解析手法では, 異なるエアロゾルコンポーネント間の内部混合を取り扱うことができません。先に触れたブラックカーボンのコア・グレーシエルモデルの場合は, コンポーネントのひとつについて内部混合を考えているので問題はないのですが, 例えば, ダストと大気汚染性エアロゾルの内部混合を取り扱うことはできません。今のコンポーネント解析では, 内部混合したダストは, おそらく, ダストと海塩の外部混合と解釈してしまうものと思います。これをどのように取り扱うかは今後の課題です。もし, 化学輸送モデルでダストの内部混合を適切に取り扱うことができれば, ライダーデータの同化が可能であろうと考えています。

GALION のデータの利用などの観点からは, 簡単な後方散乱ライダーやシーロメータについてもデータ同化手法を確立することが必要です。その場合, 観測の誤差やモデルの誤差を最小にするためには, ライダーデータの解析とデータ同化を融合する必要があると考えています。例えば, 地上の後方散乱ライダーのデータを同化する場合, ライダーで得られる減衰後方散乱係数は地上付近の局所的な影響を強く受けていること, またモデル側も一般に地表面付近の再現性が悪いことのため, 減衰後方散乱係数を同化のパラメータとすると誤差が大きいと考えられます。そこで, モデルで計算したライダー比を使ってライダーデータを解析して導出した消散係数プロファイルを用いてモデルを同化する方が良いと考えられます。そうすると, モデルとデータ解析を一体化するしかありません。今後, AD-Net 以外の GALION のリアルタイムデータ提供の体制の整備を推進することも必要ですが, 上のような手法が確立されれば, 全球的なエアロゾル予測モデルの検証・同化に大きく貢献できると考えています。

日本 (JAXA, NICT) と欧州 (ESA) の共同による地球観測衛星 EarthCARE (2020年頃打ち上げ) には, 初の衛星搭載 HSRL である ATLID が, 雲プロファイリングレーダー-CPR, 多波長イメージャー

MSI, 広帯域放射収支計 BBR と共に搭載されます。ATLID は355 nm の単一波長ですが, 後方散乱係数と消散係数を独立に測定することができるので, CALIPSO/CALIOP とは違って, 光吸収性のエアロゾルを測定することができます。高機能ライダーを含む AD-Net および GALION が, ATLID による測定とデータ解析の検証やデータ利用研究に貢献できることを期待しています。

謝 辞

今回の受賞の対象となった研究のほとんどは, 国立環境研のライダー研究チームとしてのものです。改めて現在のメンバーである清水 厚さん, 西澤智明さん, 神 慶孝さん, また現在客員研究員である松井一郎さんに感謝いたします。また, 所内でライダー観測研究を強力にサポートしてくださった西川雅高さんに感謝いたします。本文中で触れましたので, 改めてお名前を挙げることはいたしません, 共同研究を進めていただいた多くの方々, 論文の共著者の皆様に感謝いたします。また, いろいろな研究プロジェクトの中でライダー観測研究を育ててくださった先生方に深く感謝いたします。最後に, ライダーの運用や日々の観測で協力いただいているの方々, 北海道大学, 東北大学, 千葉大学, 富山大学, 近畿大学, 九州大学, 環境省, 富山県環境科学センター, 島根県保健環境科学研究所, 長崎県環境保健研究センター, アジア大気汚染研究センター, 柴田科学株式会社, 中国科学院大気物理研究所, ソウル国立大学, モンゴル気象環境監視庁他の関係者の皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- Hara, Y., I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Yumimoto, J. Kurokawa, T. Ohara and Z. Liu, 2011: Seasonal characteristics of spherical aerosol distribution in eastern Asia: Integrated analysis using ground/space-based lidars and a chemical transport model. SOLA, 7, 121-124.
- Hayasaka, T., S. Satake, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Aoki and Y. Muraji, 2007: Vertical distribution and optical properties of aerosols observed over Japan during the Atmospheric Brown Clouds-East Asia Regional Experiment 2005. J. Geophys. Res., 112, doi:10.1029/2006 JD008086.
- Müller, D., U. Wandinger, D. Althausen, I. Mattis and A. Ansmann, 1998: Retrieval of physical particle prop-

- erties from lidar observations of extinction and backscatter at multiple wavelengths. *Appl. Opt.*, **37**, 2260–2263.
- Nakajima, T. *et al.*, 2007: Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi:10.1029/2007JD009009.
- Nishizawa, T., H. Okamoto, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu and K. Aoki, 2007: An algorithm that retrieves aerosol properties from dual-wavelength polarized lidar measurements. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi:10.1029/2006JD007435.
- Nishizawa, T., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov and H. Okamoto, 2008: Algorithm to retrieve aerosol optical properties from high-spectral-resolution lidar and polarization Mie-scattering lidar measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **46**, 4094–4103.
- Nishizawa, T., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, I. Uno, K. Yasunaga, R. Kudo and S.-W. Kim, 2017: Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **188**, 79–93.
- Pan, X., I. Uno, Z. Wang, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Yamamoto, H. Kobayashi, Y. Sun, P. Fu, X. Tang and Z. Wang, 2017: Real-time observational evidence of changing Asian dust morphology with the mixing of heavy anthropogenic pollution. *Sci. Rep.*, **7**, doi:10.1038/s41598-017-00444-w.
- Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama and A. Yamazaki, 2004: Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2002JD003253.
- Shimizu, A., T. Nishizawa, Y. Jin, S.-W. Kim, Z. Wang, D. Batdorj and N. Sugimoto, 2017a: Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia. *Opt. Eng.*, **56**, 031219, doi:10.1117/1.OE.56.3.031219.
- Shimizu, A., N. Sugimoto, T. Nishizawa, Y. Jin and D. Batdorj, 2017b: Variations of dust extinction coefficient estimated by lidar observations over Japan, 2007–2016. *SOLA*, **13**, 205–208.
- Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, K. Asai, T. Endoh and T. Nakajima, 2002: Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2002GL015112.
- Sugimoto, N., I. Uno, M. Nishikawa, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, Y. Chen and H. Quan, 2003: Record heavy Asian dust in Beijing in 2002: Observations and model analysis of recent events. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2002GL016349.
- Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, K. Arao, X. Dong, S. Zhao, J. Zhou and C.-H. Lee, 2005: Study of Asian dust phenomena in 2001–2003 using a network of continuously operated polarization lidars. *Water Air Soil Pollut. Focus*, **5**, 145–157.
- Sugimoto, N., Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, M. Nishikawa and J. Dulam, 2010: Dust emission estimated with an assimilated dust transport model using lidar network data and vegetation growth in the Gobi desert in Mongolia. *SOLA*, **6**, 125–128.
- Sugimoto, N., Y. Hara, A. Shimizu, K. Yumimoto, I. Uno and M. Nishikawa, 2011: Comparison of surface observations and a regional dust transport model assimilated with Lidar network data in Asian dust event of March 29 to April 2, 2007. *SOLA*, **7A**, 13–16.
- 杉本伸夫, 西澤智明, 清水 厚, 松井一郎, 2014: エアロゾルライダー: データ品質保証と観測の整合性の確保. *エアロゾル研究*, **29**, 166–173.
- Sugimoto, N., T. Nishizawa, A. Shimizu, I. Matsui and H. Kobayashi, 2015: Detection of internally mixed Asian dust with air pollution aerosols using a polarization optical particle counter and a polarization-sensitive two-wavelength lidar. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **150**, 107–113.
- Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui and M. Nishikawa, 2016: A method for estimating the fraction of mineral dust in particulate matter using $PM_{2.5}$ -to- PM_{10} ratios. *Particulology*, **28**, 114–120.
- 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**, doi:10.1029/2002JD003210.
- Uno, I., K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara and N. Sugimoto, 2009: Asian dust transported one full circuit around the globe. *Nature Geosci.*, **2**, 557–560.
- Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake, 2007: Adjoint inverse modeling of dust emis-

sion and transport over East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, doi:10.1029/2006GL028551.
Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu

and D. M. Winker, 2008: Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2869–2884.

Observational Studies of the Effects of Aerosols on the Environment and Climate in East Asia Using Lidars

Nobuo SUGIMOTO*

* *National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan.*
E-mail : nsugimot@nies.go.jp

(Received 29 January 2018; Accepted 9 March 2018)
