

〈特集〉

ライダーネットワークによる黄砂と越境大気汚染エアロゾルのモニタリング

杉本伸夫

(独)国立環境研究所 環境計測研究センター
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2 E-mail: nsugimot@nies.go.jp)

概要

東アジアの約20地点に自動観測ライダーを設置してエアロゾルの常時モニタリング観測を行っている。エアロゾルの非球形性の指標である偏光解消度を用いて非球形の黄砂と球形の大気汚染性エアロゾルを判別してその鉛直分布を測定する。これにより、日本に飛来する黄砂と越境大気汚染のほぼ全ての事象が捉えられる。データは毎時、(独)国立環境研に転送して自動処理し、黄砂と大気汚染性エアロゾルの鉛直分布を導出する。処理結果は、環境省の黄砂飛来情報ホームページなどで公開するとともに、黄砂飛来予測の改良などの研究に利用されている。

キーワード：ライダー、黄砂、エアロゾル、越境大気汚染、ライダーネットワーク

原稿受付 2012.1.6

EICA: 16(4) 2-5

1. はじめに

リモートセンシングによる大気環境の自動計測システムの例として、本文では地上ライダーネットワークによる黄砂と大気汚染エアロゾルの計測¹⁾について紹介する。大気汚染監視については、言うまでもなく浮遊粒子状物質 (SPM) のモニタリングネットワークが全国に限らず展開されており、そのデータは環境省大気汚染物質広域監視システム (そらまめ君) ホームページ²⁾でリアルタイムに見ることができる。しかし、大陸から輸送される黄砂や近年重要度を増している越境大気汚染など、より大きな空間スケールの現象を捉えるためには上空を含めたエアロゾルの分布を (できればエアロゾルの種類毎に) モニタリングするネットワークシステムが必要とされる。ライダーはそのような測定を可能にするリモートセンシング技術である。

本文で紹介するライダーネットワークは、当初、つくば、長崎、北京の3地点で2001年に黄砂研究のために開始されたものであるが、現在、環境省の設置した5地点を含む計21地点からなる常時観測ネットワークとなっている。このライダーネットワークの特徴は、黄砂と黄砂以外の大気汚染性のエアロゾルを分離してその高度分布を連続的に観測できることにある。これによって、例えば、視程のみの観測では分からない黄砂と大気汚染性の煙霧の判別を明確に行うことができる。また、上空まで含めたエアロゾルの分布は、長距離輸送を捉えるために不可欠で、黄砂や大気汚染を予測する化学輸送モデルの検証のための非常に良いデータとなる。さらに、観測データでモデルを系統的

に改良する手法であるデータ同化のデータとしてライダーネットワークデータが有用である。既に黄砂についてはデータ同化システムが開発され事例解析が行われている。ライダーネットワークデータはリアルタイムで得られるので、黄砂の飛来予測にデータ同化手法を用いる研究も行われている。以下では、ライダーネットワークとデータ利用研究について述べる。

2. ライダーネットワーク

2.1 ライダー装置とネットワーク観測

ライダーによるエアロゾルの測定手法には、ミー散乱ライダー、ラマン散乱ライダー、高スペクトル分解ライダー (HSRL) などがある。ミー散乱ライダーは最も簡単なライダーであるが、ライダー信号を表すライダー方程式に後方散乱係数と消散係数という2つの未知数があり厳密には解けず、消散係数と後方散乱係数の比 (ライダー比) を仮定してエアロゾルの高度分布を導出する。しかし、ライダー比はエアロゾル種に依存するので、仮定したライダー比による誤差を考慮する必要がある。ラマン散乱ライダーとHSRLは大気構成分子のラマン散乱あるいはレイリー散乱を利用してエアロゾルの消散係数を独立に測定する手法で定量性の高い手法である。但し、ラマン散乱信号は非常に弱く昼間の観測ができない問題がある。HSRLは高感度で昼夜観測できるが技術的な難易度が高く自動ネットワーク観測にはまだ課題がある。

東アジアのライダーネットワークで用いているライダーのブロック図を **Fig. 1** に示す。このライダーは、

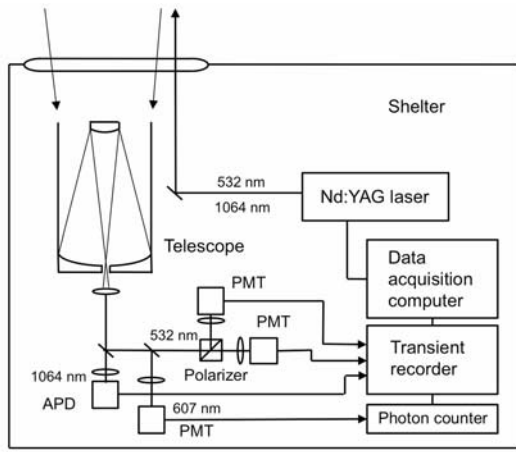


Fig. 1 Block diagram of the lidar used in the network

独国立環境研が開発した2波長(532 nm, 1064 nm)のミー散乱ライダーで、532 nmでは偏光解消度の測定機能を持つ。偏光解消度はエアロゾルの非球形性の指標で、これを用いて非球形の黄砂と球形の大気汚染性エアロゾルを判別できる。このライダーによって、地上から対流圏上部までの黄砂と大気汚染性エアロゾルの分布が昼夜連続して測定される(現在、ライダーネットワークの主要地点ではラマン散乱測定(607 nm)も行っているが、ラマンチャンネルのデータは夜間の大気低層の測定に限られる)。ライダーは天井にガラス窓を持つ小型のコンテナ内に設置され、天候に関わらず昼夜連続して自動運転される。週に一度程度の観測窓の清掃の他は、半年間程度メンテナンス不要である。通常の連続観測では15分毎に5分間の測定を行い1プロファイルのデータを取得する。すなわち、1日96プロファイルのデータが得られる。

ライダーネットワークは、現在、東アジアの21地点から構成されている。Fig. 2にネットワーク地点を

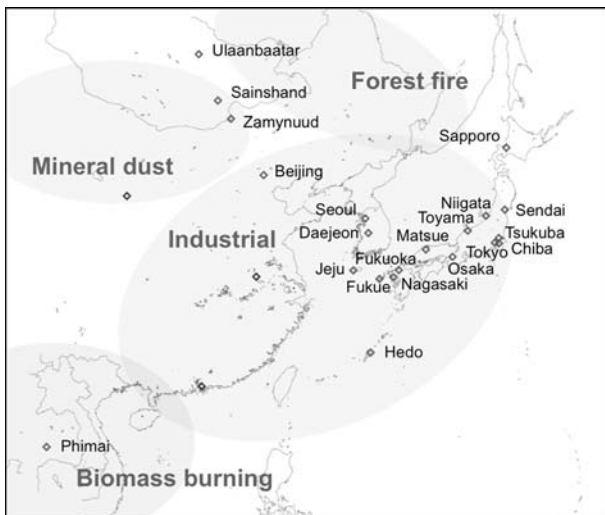


Fig. 2 Map showing lidar sites. Typical source regions of different types of aerosols are indicated in the map

示す。このネットワークは黄砂研究の中で構築された経緯からAD-Net (Asian Dust Network) と呼ばれている。

黄砂の主要な発生域は、モンゴル南部から中国の内モンゴル自治区にかけてのゴビ砂漠と中国新疆ウイグル自治区のタクラマカン砂漠であるが、日本に影響を及ぼす黄砂の大半はゴビ砂漠を発生源とするもので、ライダーネットワークはこれを捉えるように配置されている。Fig. 2中に示すように、黄砂の他に中国東部を中心とする工業活動や、東南アジアの野焼き、モンゴル北部やシベリアで時折発生する森林火災などのエアロゾル発生源がある。工業起源のエアロゾルはしばしば偏西風に乗って日本に輸送される。

世界的には欧州のEARLINET (European Aerosol Research Lidar Network) などのライダーネットワークがあるが、これらはエアロゾルの気候学的な研究を主な目的とするもので観測は必ずしも自動化されていない。領域規模の大気環境を連続的に監視するライダーネットワークとしてAD-Netは世界に先駆るものであると言える。なお、国際気象機関WMOのGlobal Atmosphere Watch (GAW)では、既存のライダーネットワークを連携したグローバルなライダーネットワーク(GAW Aerosol Lidar Observation Network: GALION)を構築しており、ND-Netもこれに参加している。

2.2 自動データ処理システム

ライダーネットワークの観測データは、(中国の地点を除いて)毎時独国立環境研に自動転送され、自動処理される。ライダーデータから得られる基本的なパラメータである減衰後方散乱係数、体積偏光解消度に加えて、偏光解消度を利用した解析手法により非球形エアロゾル(黄砂)と球形エアロゾル(主に大気汚染性エアロゾル)の消散係数を導出する³⁾。黄砂と大気汚染性エアロゾルの消散係数は、化学輸送モデルと直接比較できる物理量として非常に有用である。

Fig. 3に自動処理システムのデータ処理のフローチャートを示す。消散係数の導出では、最初に雲を検知し、解析する上端高度を決める。次に上端に境界条件を与えてライダー比50 srを仮定したFernald法によりエアロゾルの消散係数を求める。次に粒子偏光解消度から非球形の黄砂の混合比を推定して黄砂とそれ以外の球形エアロゾル(大気汚染性エアロゾル)の消散係数を求める。ここでは、黄砂と大気汚染性エアロゾルの2成分の外部混合状態を仮定して混合比を求めている³⁾。

自動処理システムで得られる準リアルタイムデータは環境省の黄砂飛来情報ページ⁴⁾や独国立環境研究所の環境GISホームページ⁵⁾で公開されている。また、黄砂や大気汚染の日本への輸送を予測する化学輸送モ

デルモデルのリアルタイムの検証やデータ同化の研究などに利用されている。

消散係数は光学的な濃度を表す物理量で視程の逆数に比例する。消散係数と重量濃度の関係はエアロゾルの種類や粒径分布に依存し、吸湿性のエアロゾルでは湿度にも依存する。黄砂については経験的な換算係数で消散係数を重量濃度（TSP, PM10, SPM, PM2.5などの黄砂成分）に換算することができる^{6,7)}。換算係数は粒径分布に依存し場所や時間によって異なるが、小粒子の黄砂への変換係数は定数に近いことが分かっている⁷⁾。

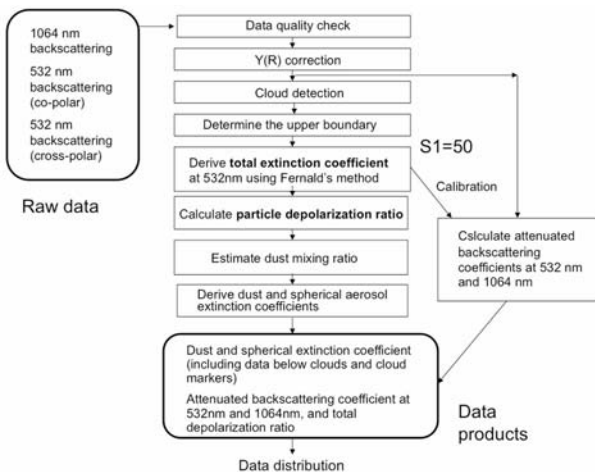


Fig. 3 Automatic data processing system for AD-Net

3. データ利用研究

3.1 黄砂のデータ同化

ライダーネットワークの主要な目的のひとつは、黄砂現象（黄砂の発生、輸送、沈着）を定量的に理解することである。そのためには、観測と同時に黄砂の輸送モデルが不可欠であり、観測によるモデルの検証とモデルの改良によって精度の高い黄砂の発生量の推定や輸送量の正確な推定が可能となる。

データ同化手法は、観測データと整合するようにモデルを系統的に調整する手法である。ライダーネットワークデータを用いた4次元変分法（4DVar）による黄砂のデータ同化システムが九州大学で開発された⁸⁾。このシステムは領域化学輸送モデル RAMS/CFORS をベースとするもので、データ同化では黄砂発生源のグリッド毎の日毎の発生量をスケールリングする因子を導入し、これを制御パラメータとして最適化している。

Fig. 4 に 2007 年 3 月末から 4 月初めの黄砂のデータ同化の一例を示す⁹⁾。ここでは、データ同化に用いたデータのうちソウル、松江、つくばの黄砂消散係数の時間高度表示を示す。図の上の段が観測データ、2

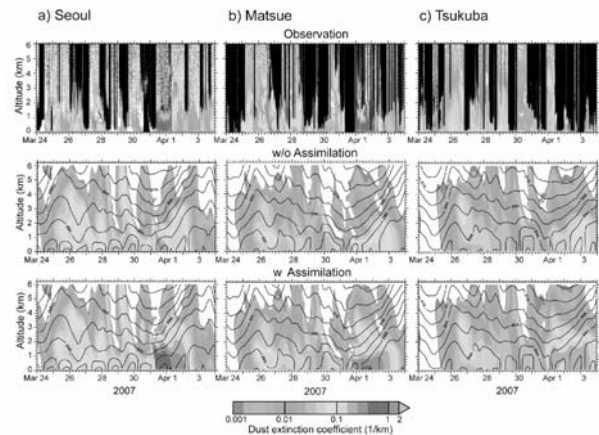


Fig. 4 Time-height indications of dust extinction coefficient at Seoul, Matsue, and Tsukuba. The first row shows observation. Second and third rows show modeled dust extinction coefficient without and with data assimilation (Yumimoto et al., 2008)

番目はデータ同化しない化学輸送モデルで計算した黄砂消散係数、下の段はデータ同化した計算結果である。データ同化しないモデルでも黄砂イベント（3月31日から4月1日）を再現してはいるが、定量的にはこの例では過小評価されている。データ同化した結果では観測がより良く再現されている。データ同化に用いた地点の観測結果が改善されるのは当然と言えるが、データ同化の結果は、ライダーデータのない地点のPM10や、MODISなどの衛星センサーの2次元分布もより良く再現する。また、データ同化した結果は、NASAの衛星搭載ライダーCALIPSO/CALIOPによる黄砂消散係数の三次元分布を風下の広い領域で良く再現している⁹⁻¹¹⁾。

データ同化手法は黄砂発生源における発生量の推定にも有用である。4DVarを用いたAD-Netのデータ同化システムでは、グリッド毎の日毎発生量のスケールリング因子が最適化され、観測データと整合するように黄砂発生量が推定される。このスケールリング因子は、元のモデルでは考慮されていない地表面状態の変化（例えば植生の成長など）の影響などを表す。Fig. 4に示した2007年3月末の事例では、黄砂発生量はデータ同化によって増加しているが、2007年の5月末の事例ではデータ同化によってモンゴル南部のゴビ砂漠の黄砂発生量が減少した。4月から5月末にかけてのモンゴルの植生の変化を調べたところ、この期間に植生が改善されており、それによって黄砂の発生が抑制されたと考えられることが分かった¹²⁾。このようにデータ同化手法は、観測のない地点を含めた黄砂の分布の正確な再現だけでなく、発生源における発生量の正確な推定に有用である。また、モデルの改良につながるモデルの問題点を明らかにする情報を与える。

データ同化手法は、黄砂の飛来予測のリアルタイムの改良にも有用である。例えば、北京のデータを用いて風下の日本への飛来予測を改善することができる。現在、気象研究所で、アンサンブルカルマンフィルターを用いたデータ同化による黄砂飛来予報の改良の研究が行われている。同様のデータ同化手法は大気汚染性エアロゾルの飛来にも適用可能である。

3.2 黄砂の健康影響研究

ライダーネットワークデータはエアロゾルの健康影響研究にも利用されている。Kanataniらは、富山のライダーで観測された地上付近の黄砂消散係数と小児の喘息との関係を調べ、黄砂イベントと入院との間に有意な相関があることを示した¹³⁾。ライダーの球形エアロゾル（大気汚染性エアロゾル）消散係数と入院には明確な相関はみられず、黄砂と大気汚染の両方を含むSPMとの間の相関も黄砂消散係数に比べると明瞭ではなかった。黄砂消散係数は小粒子の黄砂濃度と高い相関を持ち健康影響の良い指標となっているものと考えられる。一方、Onishiらは、黄砂消散係数と球形エアロゾル消散係数の両方を用いて、黄砂と大気汚染が同時に飛来する場合と黄砂のみが飛来する場合について呼吸器系の自覚症状を調べた。その結果、黄砂と大気汚染性エアロゾルが同時に飛来する場合に影響が大きいことを示唆する結果が得られている¹⁴⁾。黄砂と大気汚染性エアロゾルがどのように混合しているかについてはまだ明確ではなく、今後、偏光パーティクルカウンタやサンプリング分析による研究を進める計画である。

4. おわりに

本文ではライダーネットワークによる領域規模の大気環境のモニタリングについて紹介した。黄砂と長距離輸送された大気汚染性エアロゾルの日本への飛来状況をリアルタイムで捉える観測システムとデータ処理システムが構築されている。黄砂についてはデータ同化システムが開発され、黄砂事例について解析が行われている。また、黄砂飛来予測システムのデータ同化の研究も進められている。

ライダーの他、人工衛星からのエアロゾル観測も有用な情報を与える。しかし、静止軌道衛星以外では観測時間が限られリアルタイム性が得られないためモニタリングへの利用には制約がある。黄砂については静止軌道衛星のスプリットウインドウ法などの利用が考えられるが定量性に課題があるようである。今後、衛星データ、地上のPM10, SPMデータなども含めたエアロゾルのデータ同化システムの開発が期待される。

参考文献

- 1) N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, C. Xie, I. Uno, K. Yumimoto, Z. Wang and S-C. Yoon: Lidar Network Observations of Tropospheric Aerosols, SPIE, Vol. 7153 (2008)
- 2) 環境省：大気汚染物質広域監視システム（そらまめ君）ホームページ
<http://soramame.taiki.go.jp/>
- 3) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama and A. Yamazaki: Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidar in China and Japan during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, D19S17 (2004)
- 4) 環境省：黄砂飛来情報（ライダー黄砂観測データ提供ページ）
<http://soramame.taiki.go.jp/dss/kosa/>
- 5) 独国立環境研究所：東アジアの広域大気汚染マップページ
<http://www-gis5.nies.go.jp/eastasia/DustLider.php>
- 6) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, I. Mori, M. Nishikawa and M. Kido: Relationship between Lidar-derived Dust Extinction Coefficients and Mass Concentrations in Japan, *SOLA 7A*, pp. 1-4 (2011)
- 7) N. Sugimoto, Y. Hara, A. Shimizu, K. Yumimoto, I. Uno and M. Nishikawa: 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*, pp. 13-16 (2011)
- 8) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake: Adjoint Inverse Modeling of Dust Emission and Transport over East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L08806 (2007)
- 9) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu and D. M. Winker: Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations, *Atmos. Chem. Phys.* 8, pp. 2869-2884 (2008)
- 10) I. Uno, K. Yumimoto, A. Shimizu, Y. Hara, N. Sugimoto, Z. Wang, Z. Liu and D. M. Winker: 3D structure of Asian dust transport revealed by CALIPSO lidar and a 4DVAR dust model, *Geophys. Res. Lett.* 35, L06803 (2008)
- 11) Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu and D. M. Winker: Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model, *Atmos. Chem. Phys.* 9, pp. 1227-1239 (2009)
- 12) N. Sugimoto, Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, M. Nishikawa and J. Dulam: Dust emission estimated with an assimilated dust transport model using lidar network data and vegetation growth in the Gobi desert in Mongolia, *SOLA 6*, pp. 125-128 (2010)
- 13) K. T. Kanatani, I. Ito, W. K. Al-Delaimy, Y. Adachi, W. C. Mathews, J. W. Ramsdell and Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team: Desert-dust Exposure is Associated with Increased Risk of Asthma Hospitalization in Children, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, Vol. 182, No. 12, pp. 1475-1481 (2010)
- 14) K. Onishi, Y. Kurosaki, S. Otani, A. Yoshida, N. Sugimoto and Y. Kurozawa: Atmospheric Transport Route Determines Components of Asian Dust and Health Effects in Japan, accepted in *Atmos. Environ.* (2012)