

ライダー観測とデータ利用

杉本 伸夫

¹ 国立環境研究所 (〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

Lidar observation and data utilization

Nobuo Sugimoto

¹National Institute for Environmental Studies,
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

(Received January 10, 2023)

In recent years, data from satellite-borne lidar CALIPSO/CALIOP and ground-based lidar networks, such as AD-Net, have become essential for aerosol and cloud studies related to global warming and the regional environment. In addition, lidars provide valuable data to study urban air pollution and volcanic ash monitoring, etc. This special issue on lidar data utilization presents six review papers on the following subjects: derivation of global three-dimensional aerosol distributions using CALIPSO and MODIS; studies of aerosol-cloud interactions using CALIPSO, CloudSat, MODIS, and microwave radiometers; dust prediction using CALIPSO data assimilation; validation and assimilation of chemical transport models using AD-Net and CALIPSO; study of three-dimensional diffusion/variation of air pollutants utilizing a MAX-DOAS and a scanning coherent Doppler lidar; and study on volcanic ash monitoring near the Sakurajima vent using two Mie scattering lidars.

キーワード：ライダー観測, データ利用

Key Words: Lidar observation, Data utilization

2022年は、レーザセンシング学会の前身であるレーザ・レーダ研究会が発足して50年の節目の年であった。この記念の年に、筆者は、レーザセンシング学会功労賞をいただくという栄誉に与った。お世話になった数多くの皆様に心より感謝申し上げたい。筆者は、1979年に国立公害研（現国立環境研究所）に入所して以来、ライダー手法の開発とそれを応用した観測研究に携わってきた。その中で、エアロゾルライダーのデータ利用は、この20年くらいの研究の主要テーマのひとつであった。今回、巻頭言の執筆依頼をいただいたのもこのような背景によるものと思う。

本号は雲・エアロゾルに関するライダーデータ利用の特集号で、6件の解説から構成されている。いずれもエアロゾルや雲、大気汚染等の研究におけるライダーデータの利用を主題とする解説であるが、地球規模、領域規模の現象から、比較的小さなスケールの現象まで様々な内容を含んでいる。また、衛星ライダーデータや地上ライダーネットワークのようにデータの仕様が定義されて公開されているデータの利用もあれば、観測研究の中でのライダーの利用、さらにはライダーの利用自体がやや新しいと思われる内容も含まれている。本特集号は、1巻1号「特集：エアロゾル計測I」、3巻1号「特集：ライダー観測I」に続くものであるが、ライダー観測とライダーデータ利用はどう違うのかと考えると、おそらくライダーデータ利用という場合は、少し大きな応用や科学的な課題のなかで何らかの目的を持ってライダーデータを利用するというような意味合いであろう。そのような場合には、ライダーデータだけではなく他のデータと共にライダーデータも利用されるということが多い。ライダー研究者としての立場からいえば、いかにユニークでインパクトの大きな情報をライダーが提供できるかが問われることになる。

筆者が関係している東アジアの地上ライダーネットワーク (Asian Dust and lidar observation Network: AD-Net) のミー散乱ライダーのデータ利用 (あるいはデータ利用を意識した解析) について振り返ってみると、初期のものは、大気境界層高度の推定、雲の検知と雲底高度の推定、雲の相 (水雲、氷雲) の判別などであった。黄砂の観測に関しては、当初はライダー研究者の間で一般的に用いられていた、減衰後方散乱係数 (距離2乗補正信号) と体積偏光解消度の高度時間表示を上下に並べた図を使って研究会などで報告していた。しかし、黄砂研究者からそれでは分からないと言われることが多く、必要に迫られて粒子偏光解消度から黄砂とそれ以外の球形エアロゾルの混合比を推定して、黄砂消散係数として1枚の図面に表現する方法を考案した。ライダー研究者からは厳密でないという批判もあって、そもそもミー散乱ライダーから求めた消散係数を消散係数と呼んで良いのかという研究者さえ居た。しかし、要はどのパラメータをデータプロダクトとして提供するかという問題であって、誤差が評価できるならば多少強引な (単純化した仮定に基づく) 解析を行なっても良いだろうと思う。いずれにしても、AD-Net のデータ利用では、利用側の研究者とのインタラクションが非常に重要であった。

衛星観測の分野では「データ利用」はセンサー開発の初期の段階から必須の概念であろう。データ利用のあらゆる可能性を考えて観測要求が策定され、センサーの仕様が決定される。また、データプロダクトが定義され、運用では観測およびデータ処理が定常的に行われる。地上ライダーネットワークなどの定常観測でも、データをネットワークとして有効に利用するためには、衛星観測に倣ってデータプロダクトを定義して、準リアルタイムでデータを集約して一括処理することが必要である。AD-Net でもそのようなデータ処理が行われている。衛星観測のデータプロダクトには、生データに近いものから複雑な解析で導出されるものまで色々なレベルの (レベル0, 1, 2, 3 などと呼ばれる) もがある。高次のプロダクトでは利用側で取り扱いやすいパラメータが提供されるが、解析に仮定が入っていたり時間空間分解能が低かったりすることが多い。特にライダーの場合はデータ利用側がどのレベルのデータを用いるかというのは考えどころである。

気象モデルや化学輸送モデルと観測データを融合するデータ同化は、ライダーデータを有効に利用するための重要な手法である。これによって、観測地点や頻度の限られるライダーデータからより大きな時間空間スケールの現象に関する有用な情報を引き出すことが可能となる。但し、観測研究を行うものとしては心に留めておくべきこともあるのかもしれない。筆者らがかつて地上ライダーネットワークデータによる黄砂のデータ同化について学会発表を行なった際に、観測研究の研究者から否定的なコメントをもらうことが何度かあった。それは研究内容そのものについてではなく、観測研究者としてデータ解析を放棄することになるのではないかというようなコメントであった。それにも一理あるものと思う。データ同化はあくまでモデルに依存していて、モデルで考えられていない現象は再現されない。まず、モデルの時間空間分解能よりも小さなスケールの現象は再現しようがない。例をあげると、ライダーでは多数の薄いエアロゾル層が見えているのにモデル側に渡すときにはずっと粗い時間・高度の区間の平均値 (あるいは中間値) を取らなくてはいけない。「それで役に立つのなら嬉しいけれど、でも、あの縞々は…」というような感じである。モデルは、ある目的をもったモデルであるのでそれで良いわけであるが、観測データに含まれる情報の全てが利用されるわけではない。重要であるかどうかは別として、利用されない情報が観測データには含まれていて、目的の決まったルーチン的な処理のみを行っているとそれを見逃すことになるのではないかということである。これはしかしデータ同化に限ったことではなくて、何らかの目的をもってデータを利用しようとする場合には普通に起こることである。例えば、AD-Net の場合、応用によっては黄砂が飛来しているかどうか、すなわちその日が黄砂日であるかどうかの判定のみが必要な場合もある。そのような場合は、例えば数時間の区間について、地上付近の黄砂消散係数に閾値を用いて判定するようなデータ処理で十分であって、詳細な分布構造は必要ないわけである。データ同化の話に戻ると、モデルの時間空間分解能より大きなスケールの現象については、データ同化によって観測データに含まれる情報が有効に利用される。もし、モデルで考えられていない現象が観測されている場合にはその部分でモデルとの不一致が大きいのということになるが、逆にそのことに着目するならばモデルで見落とされていた現象の発見につながるものでもある。ということで、データ同化は、やはり現象を理解するためにも有効な手法となるものである。

データ同化において、できるだけ直接観測されたパラメータに近いパラメータを同化に用いるのが良いという考えもある。その場合にはデータ解析とデータ同化が融合することになるとも言える。ミー散乱ライダーの場合では、観測から与えるパラメータはライダー信号に近い減衰後方散乱係数と体積偏光解消度など

である。ライダー信号の再現に必要な情報（エアロゾル種毎の分布と光学モデル）をモデル側は持っているはずなので、モデル側でライダー信号を計算して観測されたライダー信号と合わせるというような考えである。実際、本特集号でも解説される関山氏の CALIPSO 衛星搭載ライダーを用いた黄砂のデータ同化ではこのような方法が用いられている。一方、観測側で解析したデータの中で比較的誤差の小さい後方散乱係数と粒子偏光解消度などを同化に用いる方が適当な場合もある。例えば、地上ライダーでは、低層にモデルでは再現が難しい局所的な高濃度のエアロゾルがある場合が多いので減衰後方散乱係数を同化に用いるのは難しい。CALIPSO データについても、最近、データ同化ではないが、レベル2プロダクトの後方散乱係数と粒子偏光解消度を使って、利用側でダスト消散係数プロファイルを計算してダストの輸送などを解析するという論文も出ている。厳密には一貫性がないが、最終的な誤差を考えると妥当な方法と言える。

2023 年度には、高スペクトル分解ライダー ATLID (ATmospheric LIDar) と雲レーダー CPR (Cloud Profiling Radar) を搭載する EarthCARE 衛星が打ち上げられる予定である。また、地上でも高スペクトル分解ライダーなどの一層の展開が期待される。これらによってさらに高度なデータ解析やデータ利用が可能になるものと期待される。

さて、以上が本号特集号の巻頭言としてふさわしいものかどうか心もとないと思いつつ、改めて本号の6報の解説記事を読んで紹介を試みる。

工藤氏らの解説では、CALIPSO 衛星搭載ライダーと Aqua 衛星に搭載されたイメージャー MODIS (Moderate resolution Imaging Spectrometer) による多波長観測の複合的な解析手法による、4 種類のエアロゾル（水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子）の全球的な三次元的な分布の導出について紹介される。また、得られた全球のエアロゾル三次元分布を用いた、地球温暖化に関わるエアロゾルの直接効果による放射強制力の評価についても紹介される。

河本氏の解説では、エアロゾルの間接効果に関係するエアロゾルと雲の相互作用について、衛星搭載能動センサーである CloudSat 搭載雲レーダーと CALIPSO 搭載ライダー、受動センサーである MODIS やマイクロ波放射計などを複合的に利用した研究事例が紹介される。非常に複雑なエアロゾル雲相互作用に関する研究が分かりやすく簡潔にレビューされている。

関山氏の解説では、データ同化手法が紹介され、CALIPSO データを同化することによって黄砂飛来の推定精度が改善されるという研究事例が紹介される。また、CALIPSO と同等の衛星ライダーが4台あった場合にはさらに改善されるという仮想実験についても紹介される。

弓本氏らの解説では、化学輸送モデルとの比較検証や季節変化、長期トレンドの解析、データ同化における AD-Net データ、CALIPSO データの利用について紹介される。AD-Net データの利用の主要な成果がここで紹介されている。

高島氏の解説では、MAX-DOAS による NO₂ の測定とスキャン式のコヒーレントドップラーライダーを利用した福岡における大気拡散過程の研究が紹介され、大気汚染現象において大気の三次元的な拡散輸送が重要であることが示される。

中道氏の解説では、桜島火山の東西2地点の観測所にミー散乱ライダーを設置して、火口上空を通る光路上の細粒火山灰を連続的に観測した研究について紹介される。また、今後の大噴火時の AD-Net の利用の可能性にも触れられている。

いずれの解説も充実した内容であり、今後の研究の展望なども述べられている。ぜひ一読いただくことをお勧めしたい。