〔創立125周年記念解説〕　　　204：501（ライダー；エアロゾル；ネットワーク観測；衛星搭載ライダー）

ライダー*

杉　本　伸　夫**

1．はじめに

ライダーは，レーザーレーダーとも呼ばれるようにレーザーを光源とする光学的なレーダーである．大気中に浮遊するエアロゾルや分子による散乱（ミー散乱，レイリー散乱，ラマン散乱など）や螢光，レーザーが伝播する間に受ける吸収などを利用して，エアロゾル濃度や水蒸気，大気汚染ガス濃度，気温，風速などを測定する様々な手法がある．現在，地上観測ネットワークが展開され，また衛星搭載ライダーが定常的に運用されるなど，ライダーは大気観測に欠かせない手法となっている．本文では，ライダー手法の概要と，研究の流れについて解説を試みるとともに，現在の動向と展望についても論じたい．なお，紙数の関係でオリジナルな文献を引用できないため，これらについては教科書[1)]やレビュー[2)]の文献リストを参照いただきたい．また，偏った内容となることもご容赦いただきたい．

2．初期のライダー研究

最初のライダー観測の報告は，1963年に Fiocco らによって行われた高層大気に関するものであった．Maiman によるルビーレーザーの発明が1960年であるので，ライダーはレーザーの最も古い応用のひとつと言えよう．Fiocco らがマサチューセッツ工科大学で行ったライダー研究の最初の目的は月測距であった．これに成功した後，ライダー技術の応用として大気の観測が考えられた．高層大気が最初のターゲットとなったのもそのような経緯によると推測される．

その後，非常に短期間のうちに数多くのライダー手法が提案された．本文を書くに当たって，1976年に出版された Hinkley 編の教科書[1)]を読み返してみたが，既にこの時点で現在用いられているライダー手法のほとんどは提案され，基礎的な実験が行われていたことが分かる．例えば，成層圏エアロゾル層の観測は1964年に Fiocco らによって報告され，大気構成分子のラマン散乱の測定が1967年に Leonard によって，共鳴散乱ライダーによる中間圏のナトリウム層の観測が Bowman らによって1969年に報告されている．この他，航空機搭載ミー散乱ライダーによるサハラダストの観測も既に1969年頃に Collis and Uthe によって行われている．一方，コヒーレントドップラーライダーが1970年に Huffaker によって，差分吸収ライダーが1974年に Schotland によって提案された．この他，偏光解消度や多重散乱についても例えば Carswell らによって研究が行われている．なお Hinkley 編の教科書の第5章は，Inaba によるラマンライダーと共鳴散乱に関する非常に優れた解説である．東北大学におけるライダー手法の研究や九州大学における高層大気観測に関する研究など，初期のライダー研究における日本の寄与は小さくない．

3．ライダー技術の精緻化と応用手法の確立

ライダー計測手法のその後の研究の多くは技術に関するものと言える．新しいレーザー技術の開発に伴って，ライダーによる測定の可能性が実現されてきた．例えば，差分吸収ライダーでは波長可変レーザーの開発が鍵であり，ドップラーライダーや高スペクトル分解ライダーでは狭帯域の高出力レーザーの開発が鍵であった．また，長期間安定に動作するレーザーが得られたことによって，ライダーが経常的な観測に応用できるようになったことの意味も大きい．この他，計算機技術の進歩は言うまでもないが，エタロンや干渉フィルターなどの光学素子の技術の進歩も著しい．

* Lidar.

** Nobuo SUGIMOTO，国立環境研究所．

© 2007　日本気象学会

差分吸収ライダー（DIAL）は，エアロゾルや大気構成分子による後方散乱と，レーザー光が散乱体までを往復する間に測定対象分子によって受ける吸収を組み合わせて，測定対象分子の濃度分布を求める手法である．当初，この手法はルビーレーザーの波長帯にある水蒸気の吸収線を利用して水蒸気プロファイルを測定する手法として提案された．紫外域の DIAL による成層圏オゾン層の観測は，色素レーザーを用いて Megie らによって（1977），またエキシマーレーザーを用いて Uchino らによって（1978）実現された．また，DIAL による大気汚染ガスの測定の研究は，Svanberg らなどによって，色素レーザーなどを光源として数多く行われた．例えば，可視紫外領域では，NO_2，SO_2，オゾン，水銀蒸気などの大気汚染物質の測定が報告されている．地上ライダーによる対流圏の水蒸気の測定では，DIAL とラマンライダーの両方が有効であるが，いずれの手法でも対流圏上部までの測定が実現されている．一方，米国航空宇宙局（NASA）の Browell らは，対流圏および成層圏のオゾンおよび水蒸気の測定を目的とする航空機搭載の DIAL を開発し，数多くの観測で大きな成果をあげている．

気温の測定については，レイリー散乱ライダーで得られる大気分子密度を用いて成層圏，中間圏の気温を導出する手法が Hauchecorne らによって開発された（1980）．これは，状態方程式と静水圧の式を用いて上端に境界値を与えてプロファイルを求める手法である．エアロゾルのある対流圏，下部成層圏では，回転ラマン散乱スペクトルの温度依存性を利用するライダーが有効である．Nedeljkovic らは回転ラマン散乱ライダーにより地上から高度35 km までの測定を報告している（1993）．大気構成分子の振動ラマン散乱によってもレイリー散乱ライダーと同様の方法で気温が求められるが，エアロゾルの存在する高度ではエアロゾルの消散の影響を受けるため補正が必要である．一方，高度80-120 km のナトリウム層の高度領域では，ナトリウムの螢光のスペクトル形状を利用して気温を測定する手法が実現されている．

風向風速の測定では散乱光のドップラーシフトが利用される．ドップラーシフトの測定にはエタロンなどの光学素子を用いるインコヒーレント方式とヘテロダイン検知を用いるコヒーレント方式がある．コヒーレント方式はエアロゾルによるミー散乱のドップラーシフトを利用するので，エアロゾルの存在する高度領域でのみ有効であるが，非常に高感度であることが大きな特長である．コヒーレントドップラーライダーはロケットの発射場や空港の風のモニターに用いられている．インコヒーレント方式は大気構成分子のレイリー散乱のドプラーシフトを利用することができるのでさらに高高度まで測定が可能である．地上ライダーによる成層圏の風速の測定は Gardiner ら（1992）によって行われた．さらに上層の高度80-120 km ではナトリウム層の螢光のドップラーシフトを利用した風速測定が行われている．

エアロゾルの測定に関して，1波長のライダー方程式は後方散乱係数と消散係数の2つの未知数を含むために厳密に解けないという問題がある．後方散乱係数は，単位厚さの大気層から，散乱角180度の単位立体角への散乱を表す係数でライダー測定に特徴的なパラメーターである．一方，消散係数は単位長さ当りの光の減衰を表す．初期の研究から後方散乱係数と消散係数の間に関係式を仮定する方法が用いられていたが，境界条件を遠方において積分方程式を解く Klett の解法が1981年に発表された．また，ミー散乱とレイリー散乱の2成分を考慮した Fernald 法は1984年に発表された．現在，1波長のミー散乱ライダーの解析にはこれらの方法が用いられる．Fernald 法では後方散乱係数と消散係数の間に比例関係が仮定されるが，エアロゾルに対する比例係数，すなわち，消散係数対後方散乱係数比は S1パラメータ，あるいはライダー比と呼ばれている．

エアロゾルの光学特性については，その後，多波長のミー散乱ライダーの可能性などが研究される一方で，ラマン散乱ライダーや後述の高スペクトル分解ライダーによってエアロゾルの後方散乱係数と消散係数を独立に測定する手法が開発された．すなわちライダー比が測定されるようになった．ラマン散乱で視程を導出する手法は非常に古く，Hinkley の教科書の Melfi による解説でも既に論じられているが，ライダー比の導出を明確に示したのは Ansmann らであった[3]．高スペクトル分解ライダーは，高分解能の分光素子を用いて，スペクトル幅の狭いエアロゾルのミー散乱とスペクトル幅の広い分子のレイリー散乱を分離して測定する手法である[4]．この手法は，当初はレイリー散乱のスペクトル形状から気温を求める手法として提案されたが，現在はエアロゾルの測定手法として用いられることが多い．

エアロゾル光学特性について，ドイツの対流圏研究所では多波長のラマン散乱ライダーが開発され[5]，多

波長の消散係数および後方散乱係数からインバージョン手法を用いてエアロゾルの単散乱アルベドや有効粒径を求める手法が開発された[6]．この他，いくつかのエアロゾル種についてあらかじめ光学特性を仮定し，多波長のライダーデータからそれぞれのエアロゾル種のプロファイルを求める手法も開発されている[7]．

4．ライダー研究の動向と展望

気象あるいは環境分野に関して，ライダー研究は，大きく言えば，地上の継続的な観測ネットワークの構築と宇宙からの観測の2つの方向で進んでいるように思われる．

宇宙からのライダー観測については，NASAでは1970年代から既に可能性が検討されてきた．最初の宇宙からのライダー観測は1994年にスペースシャトルで行われたLITE（Lidar In-space Technology Experiment）であった．これは，11日間の実験であったが3波長のミー散乱ライダーで雲，エアロゾルの分布の非常に良好なデータが得られた．その後，ICESat/GLAS（Geoscience Laser Altimeter System）が2002年1月に，CALIPSO（Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Observations）が2006年4月に打ち上げられた．GLASはレーザー高度計であるが，大気の観測も行われた．レーザーに不具合が発生し万全ではないものの，全球の雲頂高度やエアロゾルの分布など貴重な成果が得られている[8]．CALIPSOは2波長（532 nm，1064 nm）のライダーで532 nmでは偏光解消度も測定する．エアロゾル，雲の断面が継続的に測定され，現在，既に数値データが公開されるようになっている．また，CALIPSOは，雲レーダー衛星（CloudSat）と同期観測が行われており，両者を組み合わせた雲の微物理量の導出が期待されている．

CALIPSOのブラウズデータを見ると，極成層圏雲（PSC）や対流圏界面付近の薄い巻雲，上層から下層までの雲の多重構造，対流圏のエアロゾルなどが良好なSN比で観測されている[9]．また，サハラダストやタリム盆地のダストなどが鮮明に捉えられ，偏光解消度によるダストの識別も十分できそうである．これらのデータは，気候モデルの検証，極域成層圏の研究，ダストの長距離輸送の研究などに非常に有効であると考えられる．

今後，2008年には欧州宇宙機関（ESA）により，インコヒーレントドップラーライダーADM-Aeolusが打ち上げられる計画である．衛星ライダーで得られる全球の風のデータは数値予報へのインパクトが非常に大きいと期待される．また，副産物としてエアロゾルと雲の高スペクトル分解ライダー観測も行われる．さらに，ESAと日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）と情報通信研究機構（NICT）は，高スペクトル分解ライダーと雲レーダーを同時に搭載するEarthCAREを開発中である．このうちライダーはESA側で，雲レーダーは日本側（JAXA，NICT）で開発されている[10]．

その後のライダー搭載衛星の計画については，具体化していないが，コヒーレントドップラーライダーによる風速測定や差分吸収ライダーによる温暖化ガスの測定，差分吸収ライダーによる水蒸気測定などが期待される．

地上ライダーによる継続的な観測の国際的なネットワークについては，成層圏オゾン層の観測などを目的として1990年頃にスタートしたNetwork for the Detection of Stratospheric Change（NDSC）が先駆的なものである．このネットワークは，現在は名称がNetwork for the Detection of Atmospheric Composition Change（NDACC）と変更され，成層圏に加えて対流圏も含む大気組成の変動の長期観測が行われている．NDACCでは現在ライダー観測は16地点で，成層圏オゾン，中間圏および成層圏の気温，水蒸気の観測が行われている．この中で，対流圏上部および成層圏下部の水蒸気の測定のための大型のラマン散乱ライダーが開発されているのが注目される[11]．

対流圏のエアロゾルについては，NASAでは大気放射に関連するエアロゾル鉛直分布の観測のために，小型のマイクロパルスライダー（1波長のミー散乱ライダー）のネットワークを展開している．また，欧州では，エアロゾルについてミー散乱およびラマン散乱ライダーを用いたエアロゾルの研究観測ネットワークEARLINET（European Aerosol Research Lidar Network）が展開されている[12]．これは，主に対流圏エアロゾルの気候学を目的とするもので，欧州のライダー研究グループが連携して20以上の地点で観測が行われている．旧ソビエト連邦圏でも同様のライダーネットワークCIS Lidar Network（CISLiNet）が構築されている[13]．この他，研究ベースのネットワークは，米国でも展開されている．

日本では，黄砂の観測研究に関連して，1997年頃からボランタリーな研究情報交換ネットワークAD-Net（Asian Dust Network）がスタートした．これとは独立に，2001年から国立環境研では，大学や研究

機関との協力により，黄砂および地域スケールの大気環境の観測を目的とするライダーネットワークを展開している．現在，日本に7地点，韓国2地点，中国4地点，タイ1地点において，偏光解消度の測定機能を持つ2波長ミー散乱ライダーによる連続観測を行っている[14]．ネットワークの一部は，放射観測ネットワークSKYNETに位置づけられている．また，日本の3地点は環境省の黄砂モニタリングの一環である．このネットワークの目的のひとつは，黄砂と大気汚染性エアロゾルの動態を把握し，化学輸送モデルと組み合わせて，黄砂と地域規模の大気汚染の監視，予測に役立てることである．偏光解消度から，非球形の鉱物性エアロゾル（黄砂）と球形の大気汚染性エアロゾルの散乱の寄与を分離する手法を開発し，黄砂の解析に用いている．黄砂については，ライダーネットワークデータを4次元変分法による黄砂輸送モデルの同化に用いる手法が九州大学で開発され，黄砂発生源の推定に有効であることが確認された[15]．さらに，リアルタイムの同化が実現すれば，正確な黄砂の飛来予測が可能となる．大気汚染エアロゾルについてもデータ同化が今後の課題である．

衛星搭載ライダーの有用性については先に述べた通りであるが，地域スケールの現象の観測では，衛星ライダーは観測頻度が少なく，また雲のために地上付近が見えない場合も多いため十分ではない．さらに，太陽同期の場合，観測の時間帯が限られる問題もある．地域スケールの現象の観測では，時間的に連続した地上の観測ネットワーク観測の優位性は揺らがない．しかし，衛星ライダーで雲の下が見えないのと同様に，地上ライダーでは雲の上，あるいは非常に光学的に厚いエアロゾル層の上は見えない．地上と衛星を合わせた解析が今後の課題のひとつである．

最近，エアロゾル観測に関する既存のネットワークを連携し，WMOのGAW（Global Atmosphere Watch）のライダーネットワークとして，全球的なネットワークを構築しようという計画がある．将来，このネットワークを有効に活用するためには，エアロゾルに関して，地上ライダー，衛星ライダー，受動型衛星センサー，地上の放射観測データなどを総合的に取り扱えるようなデータ同化システムの開発が重要であろう．地上ライダーに求められる役割は，衛星ライダーでは得られない例えばライダー比のプロファイルや異なる波長のデータなど，同化へのインパクトの大きい，信頼性の高い情報の提供であろう．また，先に述べたように，雲の下など衛星では見えない領域のデータの提供も重要である．全球的エアロゾルライダーネットワーク構築ではこのような観点から戦略を立てる必要があろう．

5．おわりに

昨年，2006年夏に，第23回レーザーレーダー国際会議が奈良で開催された．この会議は，ライダー研究の初期から続いているもので，日本で開催は，1974年，1994年のそれぞれ仙台に続いて3度目であった．今回は約290名の参加者があり，約180名は海外からの参加者であった．このプロシーディングは1000ページを越えるものとなったが，最新の研究についてはこれを参照いただきたい[16]．

参考文献

1) Hinkley, E. D. (ed), 1976：Laser monitoring of the atmosphere, Topics in Appl. Phys. vol. 14. Splinger-Verlag.
2) 杉本伸夫，竹内延夫，1994：応用物理，**63**，444-454.
3) Ansmann, A. *et al*., 1992：Appl. Phys., **B55**, 18-28.
4) Eloranta, E. W., 2005：High Spectral Resolution Lidar. in Lidar：Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Edited by C. Weitkamp, Springer-Verlag, New-York, 455pp.
5) Ansmann, A. *et al*., 2000：Geophys. Res. Lett., **27**, 963-966.
6) Muller, D. *et al*., 1999：Appl. Opt., **38**, 2346-2357.
7) Nishizawa, T. *et al*., 2007：J. Geophys. Res. **112**, D06212, doi：10.1029/2006JD007435.
8) Spinhirne, J. D. *et al*., 2006：Reviewed and revised papers presented at the 23rd International Laser Radar Conference 24-28 July 2006, Nara, Japan, ISBN4-9902916-0-3.
9) http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/
10) Heliere, A. *et al*., 2006：Reviewed and revised papers presented at the 23rd International Laser Radar Conference 24-28 July 2006, Nara, Japan, ISBN4-9902916-0-3.
11) McDermid, I. S., ibid.
12) Pappalardo, G. *et al*., ibid.
13) Chaikovsky, A., ibid.
14) Sugimoto, N. *et al*., 2005：Water, Air, and Soil Pollution：Focus **5**, 145-157.
15) Yumimoto, K. *et al*., 2007：Geophys. Res. Lett., **34**, L08806, doi：10.1029/2006GL028551.
16) Nagasawa, C. and N. Sugimoto (ed), 2006：Reviewed and revised papers presented at the 23rd International Laser Radar Conference 24-28 July 2006, Nara, Japan, ISBN4-9902916-0-3.