

≡≡≡ 気象学への手引 ≡≡≡

リモートセンシング

II. レーザー遠隔計測*

杉本伸夫**

1. はじめに

レーザーが1960年代初頭に発明されてまもなくレーザーの大気計測への応用に関する数多くの研究がなされ、その後もレーザー技術の進歩に伴ってより高度な計測手法が開発されてきた。成層圏のエアロゾル層など、古くからライダー(レーザーレーダー)による観測研究が行われてきた分野もあるが、全般的に見れば、ライダーをはじめとするレーザー遠隔計測技術の気象および大気環境研究への応用は、この数年間にめざましく進んだと言えよう。

本文では最近の文献を中心に、レーザー遠隔計測手法とその応用の解説を試みる。なお、測定原理等の詳しい記述のある教科書として Measures(1)、Hinkley(2) などがあるので参照されたい。また、最新の研究動向の把握のためには、2年に一度開かれる International Laser Radar Conference、米国光学会(OSA)の Topical Meeting、Optical Remote Sensing of the Atmosphere、同じく OSA Topical Meeting、Coherent Laser Radar の要旨集が参考になろう。

2. レーザー遠隔計測手法とその応用

2.1 ミー散乱ライダー

ミー散乱は光の波長と同程度以上の直径を持つ球形粒子による散乱で、理論的な説明を与えた G. Mie の名をとってミー散乱と呼ばれる。対流圏低層の大気による可視・赤外光の散乱の大部分は大気中のエアロゾルによるミー散乱である。ミー散乱ライダーではレーザーパルスが大気中に送信し、エアロゾルによる後方散乱光を時間の関数として測定する。レーザーパルスを送信した時間からの時間遅れが測定距離に対応し、その時の信号強度がエアロゾル濃度に比例する。一方向のライダー信号からレーザーの光路に沿ったエアロゾルの一次元の濃度

分布が得られる。測定方向の掃引により平面的・立体的なエアロゾル分布が得られる。

ミー散乱ライダーでは光学的に見たエアロゾルの分布(消散係数 α あるいは後方散乱係数 β の分布)が測定される。さらに、エアロゾル分布をトレーサーとして大気の構造を可視化して観測できる。また、散乱光の強度のみでなく偏光解消度の測定を行うことによって球形でない散乱体が含まれるかどうかを知ることができる。その他、複数の波長でミー散乱ライダー測定を行うことにより、エアロゾルの粒径分布を推定したり、エアロゾルの種類を推定する研究も行われている。

エアロゾルをトレーサーとして、例えば、大気境界層(3)や海風前線の構造(4)の観測が行われている。また、黄砂など、対流圏の長距離の輸送現象の観測にもミー散乱ライダーは有力である。

ECLIPS (Experimental Cloud Lidar Pilot Study) という観測計画では人工衛星による雲の観測のグランドトゥールースとして、地上からの雲のライダー観測が行われている(5)。ライダー観測では衛星から観測が困難な雲底高度や雲の構造が観測される。

成層圏の高度 20 km 付近には火山噴火などによって形成されるエアロゾル層がある。成層圏エアロゾルは大気の放射特性に重要な影響を及ぼすほか成層圏の大気化学にも大きな影響を及ぼすと考えられている。ミー散乱ライダーはこの成層圏エアロゾルの非常に有力な観測手段である(6-8)。エアロゾル層の散乱係数から光学的な性質が観測される他、構造の変化や偏光解消度の測定によりエアロゾルの性状の変化が推定される。また、多点におけるライダー観測や航空機搭載ライダーによる観測によって輸送状況が観測される。

オゾンホールが発生に関与することで注目される極地の成層圏エアロゾル(PSCs: Polar Stratospheric Clouds)の観測においても、SAGE 衛星とともにミー散乱ライダーによる観測の果たす役割は大きい(9)。

* Remote Sensing, II, Laser Remote Sensing.

** Nobuo Sugimoto, 国立環境研究所.

ミー散乱ライダーの応用のひとつにエアロゾルの分布パターンの移動から風向風速を測定する手法がある。エアロゾル濃度の時間変化を複数の点で測定し、その相関から風速を求める時間相関法により、比較的簡単な装置で風向風速の鉛直分布が測定できる(10, 11)。

2.2 レイリー散乱ライダー

レイリー散乱は大気を構成する分子による散乱である。エアロゾルのほとんど無い 30 km より上空からのライダー信号はレイリー散乱による。レイリー散乱ライダーでは大気分子の密度が測定され、状態方程式と静水圧の式を用いて気温を求めることができる。この手法は成層圏および中間圏の気温測定法として非常に有効である(12)。エアロゾルによるミー散乱の寄与が大きい 3⁰ km より下層ではこの手法を用いることが困難となるため、後に述べるラマン散乱を利用する大気密度の測定が研究されている。

レイリー散乱の強度のみではなくレイリー散乱のスペクトルの形状から気温を測定する手法も提案されている(13, 14)。この手法では散乱光を非常に高分解で分光する必要があるため高分解ライダーと呼ばれている。この手法はまだ開発段階であるが原理的に高感度の気温測定が期待される。高分解ライダーはミー散乱とレイリー散乱のスペクトル幅の違いを利用してライダー信号のミー散乱成分とレイリー散乱成分を分離して測定する手法としても利用できる。

2.3 差分吸収ライダー (DIAL)

差分吸収ライダー (Differential Absorption Lidar: DIAL) は気体成分の測定を目的とするライダー手法で、エアロゾルおよび空気分子によるレーザー光の後方散乱とレーザー光が大気中を伝播するときに受ける測定対象分子による吸収の両方を利用する。DIAL では、測定対象分子の吸収線の波長と吸収を受けにくい参照用の波長の 2 波長のレーザー光を用いる。吸収線の波長のライダー信号は分子の吸収により参照波長の信号に比べて大きな減衰を受ける。この 2 波長のライダー信号を解析することによって測定対象分子の濃度分布が求められる。DIAL では参照波長の信号からエアロゾル分布も同時に求められる。

DIAL は最初レーザーを使った水蒸気分布の測定手法として提案され、その後、大気汚染気体を中心に数多くの研究が行われた。可視・紫外領域では色素レーザーを用いて NO₂、SO₂、オゾン、NO、水銀原子、水蒸気など(15-19)、赤外領域では炭酸ガスレーザーや DF レーザーを用いてオゾン、エチレン、HCl など(20、

21)の測定が行われている。大気汚染の研究への DIAL の応用は特に欧州を中心にさかんに行われている(15, 16)。

紫外領域のレーザーを用いた DIAL は対流圏および成層圏のオゾンの非常に有効な測定手法である。NASA の Browell らは航空機搭載 DIAL を開発し、数多くの観測を行っている(17, 18)。地上ベースの DIAL による成層圏オゾンの測定は Megie ら(22)や Uchino ら(23)による先駆的な観測の後、ドイツ(24)などで行われた。ライダーによるオゾンの観測は比較的精度の良い高度分布の測定が高度 50 km 付近まで行えることに大きな利点がある。現在、日本の環境研(25)、気象研(26)をはじめ、米国(27)、フランス(28)、ドイツなどで観測が行われている。成層圏変動の観測を目的とする NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) では、DIAL によるオゾンの観測がミー・レイリー散乱ライダーによるエアロゾルと成層圏の気温の観測とともに重要な役割を果たすことになる。NDSC に関連して、カナダ、ハワイ、ニュージーランド、南極でも DIAL によるオゾン観測が行われる計画である。

波長 730 nm 付近の水蒸気の吸収線を利用した DIAL は対流圏の水蒸気分布の測定手法として注目されている。水蒸気の吸収スペクトルは鋭い構造を持つため、レーザーの波長幅や波長の制御に高度な技術が要求される。現在、米国と欧州を中心に開発が行われており、航空機からの測定例も報告されている(19)。

この他に、酸素分子の吸収スペクトルの圧力依存性を利用した DIAL による気圧分布の測定が報告されている(29)。また、酸素分子の吸収線の温度依存性を用いた気温の測定手法も研究されている。

2.4 ラマン散乱ライダー

ラマン散乱は散乱分子に固有な波数だけ散乱光の波数がシフトするような散乱である。波数のシフトの大きさは散乱分子の基底状態の振動単位あるいは回転準位に対応し、それぞれ振動ラマン、回転ラマンと呼ばれる。ラマンシフトの大きさは分子に固有であるため、ラマン散乱を用いて分子の同定が可能である。しかしながら、ラマン散乱の断面積はレイリー散乱よりも 4 桁程度小さいため、微量な大気成分の測定はラマン散乱ライダーではむずかしい。ラマン散乱ライダーは水蒸気など比較的高濃度の分子(30)や窒素などの振動ラマン散乱を利用した大気密度(気温)の測定(31)に有効である。また、大気主要成分の回転ラマン散乱の温度依存性を利用して気温

を測定する手法(32)も研究されている。

2.5 共鳴散乱・共鳴蛍光ライダー

レーザーの波長が散乱分子あるいは原子の吸収線と同調している時に、共鳴散乱、共鳴蛍光が観測される。共鳴散乱と共鳴蛍光は良く似た現象であるが、厳密に言えば、前者は入射光と散乱光の2つの光子が同時に関与する現象(2光子過程)であるのに対して、後者は吸収と放出という2つの1光子過程が連続して起こる現象である。

共鳴散乱ライダーは中間圏の Na, K, Li, Ca などの金属原子層の観測に大変有効である(33), (34)。また、共鳴散乱(蛍光)スペクトルのドップラー広がりを利用して温度の測定も報告されている(35)。

共鳴蛍光は大気中では分子の衝突による消光(クエンチング)によって効率が著しく低下するため、対流圏の微量分子の測定に蛍光ライダーを利用することはむずかしい。一方、成層圏では、気球に搭載した蛍光ライダーを用いた OH ラジカルの測定が報告されている(36)。

2.6 ドップラーライダー

風に乗って移動する散乱体によるライダー信号のドップラーシフトを測定することによって風速を測定する手法である。ライダー信号の検出にヘテロダイン検波を用いて散乱光の周波数シフトを測定するコヒーレント・ドップラーライダーとエタロンなどの高分解能の分光素子を用いるインコヒーレント・ドップラーライダーがある。対流圏ではライダー信号はスペクトル幅の狭いミー散乱が支配的であり、また、風速が小さくドップラーシフトも小さいためコヒーレント方式が有効である。一方、成層圏、中間圏からのライダー信号はスペクトル幅の広いレイリー散乱光であり、測定に用いるレーザー波長も短いためヘテロダイン検波は有効ではない。この場合、インコヒーレント方式が有効である。

コヒーレント・ドップラーライダーは地上観測にも応用されているが(37)、現在、人工衛星からの風向風速の全地球的なマッピングを目的とする NASA の LAWS (Lidar Atmospheric Wind Sounder) を目指した研究が盛んに行われている(38)。従来、炭酸ガスレーザーを用いたシステムが主流であったが、最近、固体レーザーを用いたシステムに取って代われようとしている(39)。

一方、インコヒーレント・ドップラーライダーを用いた成層圏・中間圏の風向風速の測定はフランスのグループによって報告されている(40)。

2.7 その他のレーザー遠隔計測手法

以上に述べたライダー手法の他に、レーザーを応用し

た大気微量分子の遠隔計測手法として、レーザー長光路吸収分光法(41)や太陽光を光源とするレーザーヘテロダイン分光計(42)などがある。長光路吸収法は実大気中の光路で測定する方法の他、測定感度を上げるために減圧したセルに大気を引き込む方法が用いられている。

1996年に日本の NASDA が打ち上げる ADEOS に搭載されるリフレクター(RIS)を用いて、地上衛星間のレーザー長光路吸収法による大気微量分子の観測が計画されている。

3. レーザー遠隔計測技術の動向と将来展望

ライダー技術の動向としてまず最も注目されるのは航空機や人工衛星へのライダーの搭載である。航空機の利用は対流圏、成層圏のいずれの観測においても非常に有効である。米国では DC 8 級の航空機を用いたライダー観測が数多く行われており、欧州やソ連でも航空機ライダーによる観測がさかんに行われている。日本でも小型航空機によるライダー観測が行われているが、今後、航空機の利用がさらに推進されることが望まれる。

一方、雲分布、水蒸気分布、風向風速など、人工衛星からの全球的なライダー観測の実現が強く期待される。ミー散乱ライダーによる宇宙からの短期間の観測実験はスペースシャトルや旧ソ連のミールを用いて近く行われる計画である。人工衛星搭載ライダーとして米国で開発が進められているのは先に述べた LAWS と GLRS (Geoscience Laser Ranging System) である。GLRS はレーザー測距を主目的とするが、雲など大気の観測も計画されている。欧州では LAWS と同様な風向風速の観測やエアロゾルと雲の観測を目的とするスペースライダーの研究が行われている。日本でも、水蒸気 DIAL や、中間圏の金属原子層の観測を目的とする共鳴散乱ライダー(43)などの衛星搭載ライダーが提案されている。

衛星搭載ライダーの開発の鍵はレーザー技術であり、半導体励起固体レーザーや波長可変固体レーザー、波長変換技術などの開発が重要である。これらの技術は、衛星搭載ライダーだけでなく、航空機搭載ライダーや小型で維持の容易な地上ライダーなどにも応用され、レーザー遠隔計測技術のより広い分野での利用につながるものと期待される。

文 献

- 1) Measures, R.M., 1984: Laser Remote Sensing, John Wiley & Sons.
- 2) Hinkley, E.D., (ed), 1976: Laser monitoring of the atmosphere, Topics in Appl. Phys. Vol.

14. Springer-Verlag.
- 3) Sasano, Y., H. Shimizu, and N. Takeuchi, 1982: Convective cell structures and image data processing. *Appl. Opt.*, **21**, 3166-3169.
- 4) Nakane, H., and Y. Sasano, 1986: Structure of a sea-breeze front revealed by scanning lidar observation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 787-792.
- 5) Platt, E.M.C., S.A. Young and G. Patterson, 1990: Lidar sensing of clouds—The ECLIPS programme and preliminary results. Abstracts, 15th Int. Laser Radar Conf., Part I, 305-306.
- 6) Hirono, M. and T. Shibata, 1983: Enormous increase of stratospheric aerosols over Fukuoka due to volcanic eruption of El Chichon in 1982. *Geophys. Res. Lett.* **10**, 152-154.
- 7) McCormik, M.P., T.J. Swisler, W.H. Fuller, W.H. Hunt and M.T. Osborn, 1984: Airborne and ground-based lidar measurements of the El Chichon stratospheric aerosols from 90°N to 58° S, *Geof. Int.*, 23-2.
- 8) Hayashida, S., Y. Sasano, and Y. Iikura, 1991: Volcanic disturbance in the stratospheric aerosol layer observed with the NIES lidar during the period from 1982 through 1986. *J. Geophys. Res.* **96**, 15 469-15 478.
- 9) Iwasaka, Y., T. Hirasawa, and H. Fukunishi, 1986: Lidar measurement on the Antarctic stratospheric aerosol layer [II] The changes of layer height and thickness in winter. *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 99-109.
- 10) Matsui, I., N. Sugimoto, Y. Sasano, and H. Shimizu, 1990: Wind profiling by a conical-scanning time-correlation lidar. *Japan J. Appl. Phys.*, **29**, 441-444.
- 11) Kolev, I., O. Parvanov, and B. Kaprilov, 1988: Lidar detection of winds by aerosol inhomogeneities: Motion velocity in the planetary boundary layer. *Appl. Opt.*, **27**, 2524-2531.
- 12) Hauchecorne A. and M.L. Chanin, 1980: Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km. *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 565-568.
- 13) Schwiesow, R.L. and L. Lading, 1981: Temperature profiling by Rayleigh-scattering lidar. *Appl. Opt.*, **20**, 1972-1979.
- 14) Lehman, F.J., S.A. Lee, and C.Y. She, 1986: Laboratory measurements of atmospheric temperature and backscatter ratio using a high-spectral-resolution lidar technique. *Opt. Lett.*, **11**, 563-565.
- 15) Edner, H., K. Fredriksson, A. Sunesson, S. Svanberg, L. Uneus and W. Wendt, 1987: Mobile remote sensing system for atmospheric monitoring. *Appl. Opt.*, **26**, 4330-4338.
- 16) Beniston, M., J.P. Wolf, M. Beniston-Rebetez, H.J. Kolsch, P. Rairoux and L. Woste, 1990: Use of lidar measurements and numerical models in air pollution research. *J. Geophys. Res.*, **95**, D7, 9879-9894.
- 17) Browell, E.V., A.F. Carter, S.T. Shipley, R. J. Allen, C.F. Butler, M.N. Mayo, J.H. Siviter, Jr., and W.M. Hall, 1983: NASA multipurpose airborne DIAL system and measurements of ozone and aerosol profiles. *Appl. Opt.*, **22**, 522-534.
- 18) Browell, E.V., E.F. Danielsen, S. Ismail, G.L. Gregory, and S.M. Beck, 1987: Tropopause fold structure determined from airborne lidar and in situ measurements. *J. Geophys. Res.*, **92**, D2, 2112-2120.
- 19) Ehret, G. and W. Renger, 1990: Water vapour and aerosol profiling using an airborne DIAL system in the near IR. Abstracts of 15th Int. Laser Radar Conf., Part I, 67-69.
- 20) Itabe, T., K. Asai, M. Ishizu, T. Aruga, and T. Igarashi, 1989: Measurements of the urban ozone vertical profile with an airborne CO₂ DIAL. *Appl. Opt.*, **28**, 931-934.
- 21) Killinger, D.K. and N. Menuk, 1987: Laser remote sensing of the atmosphere. *Science*, **235**, 37-45.
- 22) Megie, G., J.Y. Allain, M.L. Chanin, and J.E. Blamont, 1977: Vertical profile of stratospheric ozone by lidar sounding from the ground. *Naure*, **270**, 329-331.
- 23) Uchino, O., M. Maeda, J. Kohno, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hirono, 1978: Observation of stratospheric ozone layer by a Xe-Cl laser radar. *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 807-809.
- 24) Werner, J., K.W. Rothe and H. Walther, 1983: Monitoring of the stratospheric ozone layer by laser radar. *Appl. Phys.*, **B32**, 113-118.
- 25) 杉本伸夫, 笹野泰弘, 中根英昭, 林田佐智子, 松井一郎, 湊 淳, 1989: 成層圏および対流圏オゾン鉛直分布の測定を目的とする多波長オゾンレーザーレーダーの製作. *応用物理*, **58**, 1385-1397.
- 26) Uchino, O. and I. Tabata, 1991: Mobile lidar for simultaneous measurements of ozone, aerosols and temperature in the stratosphere. *Appl. Opt.*, **30**, 2005-2012.
- 27) McGee, T.J., P. Newman, R. Ferrare, D. Whiteman, J. Butler, J. Burris, S. Goddin, and I.S. McDermid, 1990: Lidar observations of ozone induced by subpolar air mass motion over Table Mountain, California (34.4° N).

- J. Geophys. Res., 95, D 12, 20527-20530.
- 28) Godin, S., G. Megie, and J. Pelon, 1989: Systematic lidar measurements of the stratospheric ozone vertical distribution. Geophys. Res. Lett., 16, 547-550.
- 29) Korb, C.L., G.K. Schwemmer, D. Starr, M. Dombrowski, C.R. Prasad and H. Walden, 1990: Airborne lidar observation of gravity waves from measurements of the two-dimensional pressure profile. Abstracts of 15th Int. Laser Radar Conf., Part I, 30-33.
- 30) Cooney, J., K. Petri and A. Salik, 1985: Measurements of high resolution atmospheric water-vapor profile by use of a solar blind Raman lidar. Appl. Opt., 24, 104-108.
- 31) Keckhut, P., M.L. Chanin, and A. Hauchecorne, 1990: Stratosphere temperature measurement using Raman lidar. Appl. Opt., 29, 5182-5186.
- 32) Arshinov, Y.F., S.M. Bobrovnikov, V.E. Zuev, and V.M. Mitev, 1983: Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar. Appl. Opt., 22, 2984-2990.
- 33) Nomura, A., T. Kano, Y. Iwasaka, H. Fukunishi, T. Hirasawa and S. Kawaguchi, 1987: Lidar observations of the mesospheric sodium layer at Syowa station, Antarctica. Geophys. Res. Lett., 14, 700-703.
- 34) Kwon, K.H., D.C. Senft, and C.S. Gardner, 1990: Airborne sodium lidar observations of horizontal and vertical wave number spectra of mesopause density and wind perturbations. J. Geophys. Res., 95, D 9, 13723-13736.
- 35) Fricke, K.H. and U. von Zahn, 1985: Mesopause temperatures derived from probing the hyperfine structure of the D2 resonance line of sodium by lidar. J. Atmos. Terr. Phys., 47, 499-512.
- 36) Heaps, W.S. and T. McGee, 1985: Progress in stratospheric hydroxyl measurement by balloonborne LIDAR. J. Geophys. Res., 90, D 5, 7913-7921.
- 37) Post, M., J. and W.D. Neff, 1986: Doppler lidar measurements of winds in a narrow mountain valley, Bull. Amer. Meteorol. Soc., 67, 274-281.
- 38) NASA 1987: LAWS (Laser Atmospheric Wind Sounder). Earth Observing System, Instrument Panel Report, Vol. IIg.
- 39) Coherent Laser Radar. OSA Topical Meeting, Snowmass, Colorado.
- 40) Chanin, M.L., A. Garnier, Hauchecorne and J. Poreneuve, 1989: A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere. Geophys. Res. Lett., 16, 1274-1276.
- 41) Webster, C.R., R.D. May, R.T. Toumi and J.A. Pyle, 1990: Active nitrogen partitioning and the nighttime formation of N_2O_3 in the stratosphere: simultaneous in situ measurements of NO, N_2 , O_3 and N_2O using the BLISS diode laser spectrometer. J. Geophys. Res., 95, D 9, 13851-13866.
- 42) Fukunishi, H., S. Okano, M. Taguchi and T. Ohnuma, 1990: Laser heterodyne spectrometer using a liquid nitrogen cooled tunable diode laser for remote measurements of atmospheric O_3 and N_2O . Appl. Opt., 29, 2722-2728.
- 43) 文部省宇宙科学研究所地球大気観測ワーキンググループ, 1991: 地球大気観測計画, 2.5 節スペースライダー, 222-238.

第15回極域気水圏シンポジウムのお知らせ

南極域では現在、第33次南極地域観測隊により「氷床ドーム深層掘削観測」が実施されており、北極域ではスピッツベルゲン、グリーンランドを中心に現地観測が進められています。また、国内でも「南極域における気候変動に関する総合研究(ACR)」で得られた成果をはじめ、氷床コアの分析や衛星データの解析、オゾンホールや海水・氷床変動など多方面におたる研究が続けられております。つきましては極域における気象学、雪氷学、海洋学に関連する研究成果と今後の研究展望について議論すべく、下記によりシンポジウムを開催致します。ふ

るって御参加ください。

記

日時: 1992年7月8日(水)・9日(木)

会場: 国立極地研究所 講堂

発表申込締切: 4月30日(木) 必着

連絡先: 国立極地研究所 気水圏シンポジウム係

〒173 東京都板橋区加賀 1-9-10

電話 03-3962-4711

Fax 03-3962-5719