HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	レーザーレーダーによる成層圏微粒子の観測
Author(s)	橋本, 訓
Citation	電子科学研究, 4, 67-69
Issue Date	1997-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24376
Type	departmental bulletin paper
File Information	4_P67-69.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

レーザーレーダーによる成層圏微粒子の観測

光電子物性研究分野　橋　本　　訓

沃素分子セルを峡帯域光学フィルターとして用いた高スペクトル分解型レーザーレーダー（HSRL）を制作し，これを用いて大気化学的に重要な成層圏エアロゾルの観測を試みた。HSRLの原理と，観測例を紹介する。

1．はじめに

極域では冬期に極渦と呼ばれる極を中心とした大気の巨大な渦が発生する。この極渦が発達したとき成層圏極渦内部の−80°C以下の領域には硝酸性微粒子を主とするエアロゾルの堆積が出現することがある。これは極域成層圏雲（PSC：Polar Stratospheric Cloud）と呼ばれる。このPSC微粒子表面上の反応がオゾンホールの生成にかかわっていると言われている。成層圏でCl原子のリザーバーとなり，その生成によって結果的にオゾン破壊反応を減速している$ClONO_2$がPSC微粒子表面でHClと反応し，$ClONO_2+HCl \rightarrow HNO_3+Cl_2$によって塩素を解放する。極域が春になったとき，これが一気に光分解をはじめ，オゾンの極端な減少を招きオゾンホールを生ずる，とされる[1]。今のところ明確なホールを作るに至っていない北極圏でも同じことは起こっているはずであり，PSCの観測が望まれている。

この様な高空に存在する微粒子を比較的簡単に計る方法としてレーザーレーダーによる観測がある。レーザーレーダーはライダー（LIDAR：LIght Detection and Ranging）とも呼ばれ，その名の示すように一般のレーダー（RADAR）の電波の代わりにレーザー光を用いたリモートセンシング法である[2]。ライダーでは用いる電磁波の波長が短いため，レーダーでは不可能な大気中エアロゾル（このうちの半径0.1〜数十μm程度）を検出できる。

2．ライダーシステム

大気観測用ライダーシステムは，パルスレーザーを光源とする送信系と，望遠鏡—フォトンカウンタによる受信系から構成される。測定はパルス光を送出し，戻ってくる散乱光強度の時間変化を記録するだけである。散乱体までの距離は散乱光が受信されるまでの遅延時間から直接的に求められる。さらに各距離での信号強度から散乱体の密度を見積もることが出来るのだが，これには，かなり複雑な操作を要する。ここで，ある距離Rからの散乱光受信信号強度をI(R)とすると，

$$I(R)=\left[E_0\xi R^{-2}\beta_a(R)\frac{\mathbf{P}_a(\pi,R)}{4\pi}+\beta_m(R)\frac{\mathbf{P}_m(\pi)}{4\pi}\right]e^{-2\int_0^R\alpha(r')dr'}+M(R) \quad (1)$$

の様に書け，これをライダー方程式と呼ぶ。(1)式中，E_0はレーザー光強度(出力)，ξはシステム定数，βは後方散乱係数，$\mathbf{P}$は後方散乱Phase Function，αは消散係数，Mは多重散乱成分である。添字a，mは，それぞれのエアロゾルによる寄与（ミー散乱成分）と空気分子による寄与（レイリー散乱成分）を表す。観測データから$\beta_a(R)$を決定できれば，比例関係にあるエアロゾル数密度を見積もることが出来る。

(1)式には未知数が多すぎ，解くには幾つかの仮定おかねばならない。多重散乱の項は成層圏のライダー観測が可能な気象条件では無視出来るので除外し，さらに何らかの方法で空気分子の寄与だけを単独に知ることが出来たとすると，その信号強度$I_m(R)$は次の様に書ける。

$$I_m(R)R^2=E_0\xi\beta_m(R)\frac{3}{8\pi}e^{-2\int_0^R\alpha(r')dr'} \quad (2)$$

ただし，$P_m(\pi)$はレーリー後方散乱の値に置き換えた。

ここで(1)と(2)の比をとれば，

$$\frac{I(R)}{I_m(R)}=\frac{2\mathbf{P}_a(\pi,R)}{3}\frac{\beta_a(R)}{\beta_m(R)}+1 \qquad (3)$$

の関係が導かれる。(3)式の左辺は散乱比と呼ばれる。$\beta_m(R)$ と $P_a(\pi, R)$ を見積もる方法はあるので，これらを使えば散乱比から $\beta_a(R)$ を決定できる。しかしながら，相対的なエアロゾル密度の変動を知るには散乱比のまま比較するだけでも十分であり，ライダーの測定結果は散乱比で描かれる場合が多い。

結果を散乱比で表すにせよ，$I_m(R)$ は求めねばならない。通常，成層圏上部ではエアロゾルが非常に少ないことが知られており，30 km 程度以上では散乱比を1と仮定出来る。これから $\beta_m(R)$ と比例関係にある $I_m(R)$ を見積もる事が可能であり，散乱比も計算できる。以上はマッチング法と呼ばれ，一般のミー散乱ライダー観測データ解析に常用されてきた。マッチング法は簡便であるが多くの仮定が入るため定量性は悪くなってしまう。

最近，より正確に散乱比を求めるために幾つかの研究グループで HSRL 型が開発され，使われ始めている。質量の小さい空気分子は熱運動が速くこれによるレイリー散乱光は，質量の大きいエアロゾルからのミー散乱より，ずっと大きなドップラー広がり（数 GHz 程度）を持っている。非常に峡帯域の光学フィルターを使えば，全散乱からエアロゾル成分を取り除くことが出来るので，$I_m(R)$ に直接換算できる信号の測定が可能となる。本研究で用いたライダーは，Nd：YAG レーザーをシーダーを使って単一縦モード発信させ（送信光はフィルター以上に峡帯域でなければならない），その第二高調波(532 nm)を送信光とし，フィルターとして沃素分子セルを使った HSRL である(図1)。

3．観測結果

図2に 1996 年 9 月 6 日に行った石狩湾上空のライダー観測結果を散乱比として示した。12 km 付近の圏界面から 30 km 程度にかけて成層圏に恒常的に存在するユンゲ層による散乱が見える。8 km 付近のピークは対流圏中の絹雲によるものである。HSRL によって求めたもの(a)に比べ，従来から使われているマッチング法(b)では，特に低高度領域でオフセットが大きく，誤差が含まれることが分かる。なお，他の測定でも

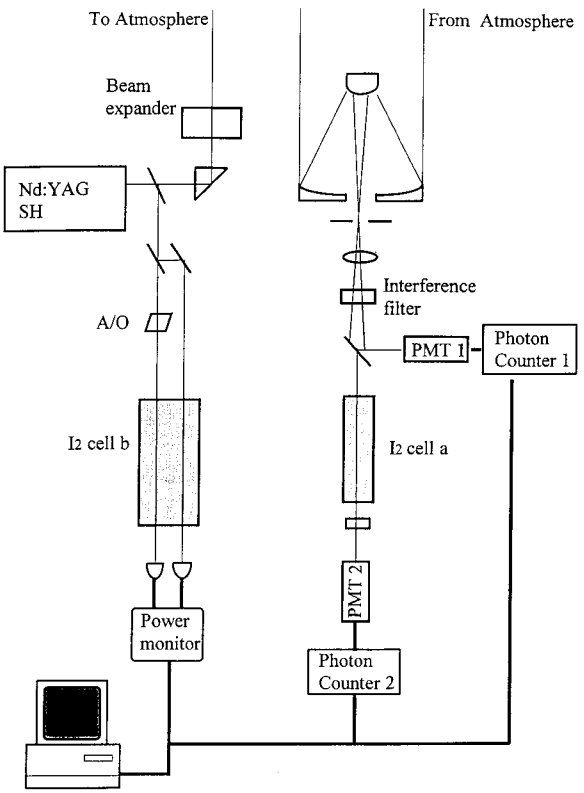

図1 HSRL (High Spectral Resolution Lidar) の構成図．沃素分子の回転線に合わせて単一縦モード発信させた Nd：YAG レーザーの出力の2倍波(532 nm)を拡大して上空に送信し，戻ってくる散乱光を望遠鏡で受光する．これをビームスプリッターで二分し，一方はそのまま，もう一方は沃素セルを通して光電子増倍管に導く．送信光の一部は沃素セル b ーパワーモニタに導き，常に波長ドリフトを監視している．

1996 年秋の成層圏にはユンゲ層以外のエアロゾルは観測されなかった。これは，つくば市をはじめ他の地点のライダー観測などでも同様であり，1996 年秋現在成層圏はクリーンな状態にあると言える。

4．展　望

本研究はレーザー計測法の環境科学への貢献のひとつと言える。直接的には国立環境研究所，松井一郎，杉本伸夫，中根秀昭3氏との共同研究であり，最終的な目的は極渦内の成層圏エアロゾルの変動を知ることである。北半球の極渦はもちろん北極を中心に発生するが，場合によってその一部が北海道まで達することが実際に起こっている。このため札幌程度の緯度でも極渦内のエアロゾル観測を狙うことが出来る。国立環境研究所のメンバーが北海道にライダーの設置を望ん

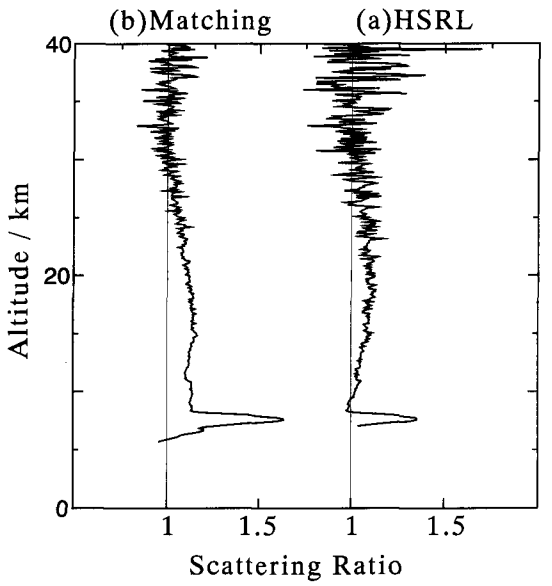

図2 石狩湾上空のライダー観測（1996年9月6日）によって得られた散乱比．成層圏には12 km付近の圏界面から30 km程度にかけてユンゲ層による散乱が見える．8 km付近のピークは対流圏中の絹雲によるものである．HSRLによって求めたもの(a)に比べ，従来から使われているマッチング法(b)では，特に低高度領域でオフセットが大きい．

だ理由もそこにある。変動を知るには先ず通常の成層圏の状態を観測しておかなければならないので，当面札幌での観測は続けるが，実際に極渦内のエアロゾルが測定できるかどうかは，それこそ運を天に任すほか無い。一方，HSRL自体ライダーとして新しいタイプのものであり，測定法，データ処理法とも改良すべき点が残されている。

【参考文献】

[1] R. L. Jones, S. Solomon, D. S. McKenna, L. R. Poole, W. H. Brune, D. W. Toohey, J. G. Anderson, D. W. Fahey, Geophys. Res. Lett., 17, 541 (1990); C. R. Webster, R. D. May, D. W. Toohey, L. M. Avallone, J. G. Anderson, S. Solomon, ibid, 20, 2523 (1933).

[2] ここで紹介したライダーは，ミー散乱型［G. Ficco, L. P. Smullin, Nature, 1275 (1963)］およびHSRL型［H. Shimizu, S. A. Lee, C. Y. She, Appl. Optics, 22, 1373 (1983); S. T. Shipley, D. H. Tracy, E. W. Eloranta, J. T. Trauger, J. T. Sroga, F. L. Roesler, J. W. Weinman, Appl. Optics, 22, 3716 (1983)］である。この他にラマン散乱型［H. Inaba, T. Kobayashi, Opto-Electronics, 4, 101 (1972)］，差分吸収型［R. M. Shotland, J. Appl. Meteor., 13, 71 (1974)］などがある．