レーザーオリジナル

紫外線ライダーにおけるソーラーブラインド効果

柴田 隆*・成清 徹*・一森 誠也*
秋吉 英治**・前田 三男*

(1988年4月21日 受理)

Solar-Blind Effect in Ultraviolet Lidars

Takashi SHIBATA*, Tohoru NARIKIYO*, Seiya ICHIMORI*
Hideharu AKIYOSHI** and Mitsuo MAEDA*

(Received April 21, 1988)

Solar-blind effect in ultraviolet lidars is investigated analytically and experimentally, evaluating the background solar radiance, the cut-off characteristics of solar-blind filters, and the wavelength dependence of Rayleigh and Mie lidars. If the quality of the solar-blind filter is good, the widest altitude range is covered with the transmission wavelength slightly shorter than the cut-off wavelength, that is 305-308 nm. Using the first and the second Stokes lines of the H₂ Raman laser pumped by a KrF laser, a compact solar-blind DIAL for ozone detection with a range of 3 km is demonstrated. In the case of large lidar station, it can be expected to construct a solar-blind ozone lidar with an altitude range of 20 km by the use of a wavelength combination of 291.6 and 308 nm.

Key Words: lidar, ozone, DIAL, UV laser.

1. まえがき

強力なエキシマーレーザーの実用化によって、紫外域のレーザーレーダー（ライダー）の重要性が高まりつつある。特に、差分吸収法（DIAL）によるオゾン検知や¹⁾、レイリーライダー²⁾、ラマンライダー³⁾などに対して、エキシマーレーザーの適用は大変有効である。ライダーに使用可能なエキシマーレーザーの波長は、248nm

(KrF), 308nm (XeCl), 352nm (XeF) の三波長であるが、更に、水素分子等を用いた誘導ラマン散乱 (SRS) によって得られる豊富な近紫外域のストークス線は変換効率が高く、ライダーの有力な光源となっている⁴⁾。

一方、太陽光のうち紫外域の一部は成層圏オゾンによって吸収され、地上に到達しない。そのため、紫外線ライダーでは昼間の背景光雑音が著しく軽減され、昼夜の区別なく動作するラ

* 九州大学工学部電気工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

** 九州大学理学部物理学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

* Department of Electrical Engineering, Kyushu University (6-10-1. Hakozaki Higashi-ku, Fukuoka 812)

** Department of Physics, Kyushu University (6-10-1. Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812)

ライダーを実現できる可能性を持っている。これをソーラーブラインド効果とよぶことにする。ソーラーブラインドライダーの概念は1980年Renautらによって、ラマンライダーについてはじめて提案され⁵⁾、PetriらはKrFレーザーを用いたラマンレーザーにおいて地上1000mまでの水蒸気を昼間観測するのに成功した³⁾。

我々は先に、二波長オゾンライダーにおけるソーラーブラインド効果について若干検討を行った⁶⁾。しかし、ソーラーブラインド効果がどのような場合に有効であるかについての一般的な概念がまだ確立していないように思われるので、本論文では実験と解析を混えつつ紫外線ライダーにおけるソーラーブラインド効果の評価を行った。またDIALによる昼間のオゾン計測についても、最適送信波長や到達距離の限界などについて考察した。

2. レイリー・ミー散乱ライダーにおけるソーラーブラインド効果

2.1 背景光とフィルターの評価

通常のレイリー・ミー後方散乱光を受信するライダーにおけるSN比は、昼間には太陽光による背景光がその主な雑音源と考えれば、

$$S/N = \frac{\sqrt{p}P(z)}{\sqrt{P(z) + 2P_b}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $P(z)$ は1レーザーパルスあたりの高度 z と $z + \Delta z$ の間からの後方散乱光電子数、 P_b はその間の背景光光電子数、 p は積算パルス数である。

高度区間 Δz に受信する背景光光電子数 P_b は次式で与えられる。

$$P_b = P_s(\lambda) \Omega f K A \eta 2 \Delta z / h \nu c \quad (2)$$

ここで、 P_s は単位立体角、単位面積、単位波長当りの地上に到達する背景光光子数、 Ω は受光立体角、 η は光電子増倍管(フォトマル)の量子効率、 f はフィルターのバンド幅、 K は受光光学系の総合透過率、 A は望遠鏡の受光面積、 c は光速、 h はプランク定数、 ν は送信周波数である。昼間の観測では、通常受光立体角 Ω とフ

Fig.1 Calculated sky radiance by radiative transfer equation. Solid lines are for model atmosphere, and broken lines are for ozone free model atmosphere. The circles are measured values when the solar zenith angle was about 45° and the weather was clear.

ィルターのバンド幅 f とを小さくすることによって背景光雑音の減少がはかられる。

ソーラーブラインド領域では $P_s(\lambda)$ 自体が著しく減少していると考えられる。しかし、教科書に見られる太陽光のスペクトルに関する記述は不十分な点が多く、カットオフ付近のスペクトル分布の評価はもっと厳密に行う必要がある。Fig.1の実線は、太陽光が大気で散乱されつつ地上に達したときの、地表での鉛直方向下向きの散乱光スペクトル分布を示したもので、それは次のような計算によって求めた⁷⁾。

近紫外の太陽光は、大気圏に入射して地表に向かう間に、大気分子によって散乱されながら、一部はオゾンにより吸収され、オゾンの光解離

や大気を加熱するためのエネルギーとして使われる。ここでは、一回以上の散乱を受けて地表に到達した光（拡散光）の大きさを見積るために、2-stream近似と呼ばれる方法を使用した。通常、大気物理に用いられる放射伝達方程式は、ある高度 z において、 z に関する一階の微分方程式で記述されるので、それを大気上端と地表での境界条件を与えて解くことにより、任意の高度における上向き、下向き拡散光フラックスが求められる。入射光方向に対する大気分子の散乱角依存性も、その際、簡単な仮定のもとに考慮に入れている。この方法により、 $z=0$ での下向き拡散光フラックスを求めれば、地表に達する拡散光が得られる。

得られたスペクトルは紫外側に極めて鋭いカットオフが存在する。Fig. 1の点線は大気中にオゾンが存在しないと仮定した場合の計算結果である。これと、実線との差をソーラーブラインド効果であると考え、実線が点線の10%になる波長をカットオフ波長 λ_c と呼ぶことにしよう。Fig. 1によれば太陽の天頂角 θ が 30° の場合 $\lambda_c=305\text{ nm}$ 、 $\theta=60^\circ$ のとき $\lambda_c=308\text{ nm}$ となる。 θ が大きくなると λ_c が長波長へシフトするのは、太陽光が地上に届くまでの光路長が長くなり、オゾンの吸収やレイリー散乱による短波長光の減衰が大きくなるためである。

次に、実際のライダーの受光系に近いFig. 2のような構成で、背景光強度 P_s の実測を行った。受光望遠鏡は直径250 mmのニュートン式で、焦点距離200 mm、口径比4.2の回折格子モノクロメーター（Jobin Yvon H-20UV）を通してフォトマル（浜松フォトニクス社製、R562）で受光した。この分光器には従来の回折格子より迷光が少ないホログラフィック回折格子が使用されている。入射スリットとして2 mm ϕ のアイリスを用い、受光視野角を1.6 mradにしている。Fig. 1中の丸印は、分光器の波長を変えることによって測定された P_s のスペクトルである。 P_s の絶対値はフォトンカウンティング法によって計測した背景光の光電子数 P_0 から、(2)式中の各種パラメーターを使用したシステムについて適

Fig. 2 Block diagram of lidar system.

当に仮定して計算したものである。測定時の太陽天頂角 θ は約 45° で、天候は快晴、視程は良好であった。理論値と測定値を比較すると、絶対値もカットオフ波長もほぼ一致している。分光器のスリット幅（2 mm）で決まる帯域は8 nmでその分だけカットオフは短波長に移動する。その他、波長に依存しない迷光が存在するが、そのレベルは 10^{-6} オーダーであった。

上記の分光器を用いて測定された、太陽天頂角や天候の変化による背景光強度の変化をFig. 3に示す。これらの条件の違いによる背景光強度の変化は2桁以上におよぶ。強度の小さい時、使用した250 mm口径の望遠鏡では、290 nm以下の迷光は昼間でもフォトマルの暗電流レベル以下になる。快晴で、 θ が比較的小さい場合の迷光レベルは暗電流レベルより大きい、ホトンカウンティングが十分に可能な程度である。しかし、大口径の望遠鏡を用いる場合には受光視野角を下げるか、ダブルモノクロメーターなどの使用が必要になる。

一方干渉フィルターを分光器の代わりに使った場合の特性をFig. 4丸印に示す。三角印はほぼ同時に分光器を用いて測定した結果である。各々の測定は、同一の天候（快晴）、視程（良）、

Fig. 3 Measured background sky radiance with a monochromator. The solar zenith angles and weather are 45° and fine (circles), 50° and fine (triangles), and 60° and cloudy (squares).

太陽天頂角（約50°）で行われたと考えてよい。測定した干渉フィルターはSpectro film 社製の誘電体蒸着の干渉フィルターで中心波長277, 290.5, 308, 313nmのものである。Fig. 4 によれば、カットオフ波長 λ_c 以下のフィルターでもかなり高いレベルの背景光が検知されている。これは主に長波長の光がもれてきたものと考えられる。

一般にライダーで背景光を切るために入れるフィルター特性としては、透過バンド幅 $\Delta\lambda$ と中心より離れた波長での遮断特性が重要であるが、 λ_c 以下のソーラブラインド領域で使う

Fig. 4 Measured background sky radiance with interference filters (circles) and a monochromator (triangles).

場合にはバンド幅は広くてもよく、広い波長域にわたって遮断特性の良いものが望ましい。 λ_c 以下での背景光を暗電流レベルにするには、フォトマルの全感度域（ λ_c より約700nmまで）にわたって 10^{-6} の遮断透過率が要求されるが、これを1枚の干渉フィルターで実現するのは困難である。紫外域の干渉フィルターでは、可視域全域の光を遮断するためには多くのフィルター膜を重ねる必要があり、遮断透過率を下げると、全体の透過率も下がってしまう傾向にある。一般に短波長域をカットするのに比べ長波長をカットするフィルターは製作が難しく、そのことが良好な遮断特性をもった紫外干渉フィルターを得るのに困難にしている。

以上の考察をまとめると以下ようになる。地上に到達している背景光は、理論計算によればおよそ305~308nmにあるカットオフ波長以下では鋭く減衰しており、もし完全なソーラブラインドフィルターがあれば、この波長以下では昼夜同一のSN比でライダー観測ができる。次節で述べるように紫外域では送信波長が長い程ライダーの到達距離が延びるので、この場合には送信波長をできるだけ入。の近くに選んだ方がよい。フィルターとして迷光の少ない回折格子分光器を用いたときには、入。にかなり近い波長までソーラブラインド効果を期待でき、迷光レベルは 10^{-6} である。しかし1枚の干渉フィルターでは、可視部から回り込んでくる背景光遮断が不完全で、十分なソーラブラインド効果を期待できない。

2.2 ライダーの到達距離とSN比

2.1では背景光雑音について考察したが、ここではSN比を決めるもう一つの要素である信号強度について考える。レイリー・ミー散乱ライダーの受信光電子数 $P(z)$ は次式によってあたえられる。

$$P(z) = P_0 A K \frac{\beta \Delta z}{z^2} \exp[-2 \int_0^z (\tau_m + \tau_a + \tau_o) dz] \quad (3)$$

ここで β はレイリー・ミー後方散乱断面積、 τ_m, τ_a, τ_o はそれぞれレイリー散乱、ミー散乱およびオゾン吸収による減衰係数である。この節では受信信号とSN比の波長依存性を実験とモデル大気を用いたシミュレーションにより調べた。

Table I Wavelengths and output energy of the Raman lasers pumped by a KrF laser.

Raman material	H ₂	D ₂	H ₂	H ₂
Order of Stokes line	1	2	2	3
Wavelength [nm]	277	291.6	313	360
Output energy [mJ] per pulse	38	16	46	20

実験に使用した送信波長とその出力エネルギーをTable Iに示す。受信系にはFig.2に示した250mmの反射望遠鏡と回折格子分光器を使用した。夜間、鉛直方向でのフォトンカウンターによるエコーの例をFig.5に示す。いずれも100ショットの積算である。(3)式において大気の減衰係数 τ が波長が短くなるとともに急激に大き

Fig.5 Lidar echo signals for different wavelengths observed at night. The vertical resolution is 150m. Shot number is 100.

Fig.6 Signal to noise ratio in Rayleigh and Mie lidar for different wavelengths calculated from the results in Fig 5.

Fig.7 Simulated SN ratio of Rayleigh and Mie lidar utilizing model atmosphere. The vertical resolution is 100m.

くなるため、送信波長が短くなるにつれて到達高度が低くなってゆく。特に、277 nmの到達高度は約3 kmにすぎない。360nmでのエコーが313 nmでのエコーより小さくなっているのは、Table

Iに示したように、360nmでのレーザー出力313 nmでの値に比べて約1/2となっているためである。

Fig. 6にこれらのデータから実測したSN比

を示す。点線はTable Iに示したシステムのパラメータとエルターマンモデル大気を用いて計算したSN比である。この場合のノイズはフォトマルのショットノイズのみを考慮している。両者はモデルと実際の大气との相違等を考えると、よい一致を示しているものと考えられる。

Fig. 7はFig. 6点線と同様の計算方法を用いて、送信エネルギーは50mJで一定とし、送信波長を変えたときの高度とSN比の関係を示した。この場合も、太陽光のノイズは考慮していない。昼間の観測においては約300nm以上の波長ではこれよりSN比が低下する。いずれにしても、短波長になるにつれ、著しく到達高度が下がってゆくのがわかる。

今までは夜間での計測であるが、送信波長によるソーラブラインド効果の違いを直接的に示すために、Fig. 8でそれぞれ277nm, 360nm

における昼と夜のSN比の比較を示す。この場合にはウェイクメモリを使い、エコーを計測している。ここで、次式によりデータからSN比を求めた。

$$SN = \bar{S} / \sigma_s \quad (4)$$

ここに、 $\bar{S}$ はシグナルの平均強度を、 σ_s はシグナル強度の標準偏差である。277nmにおいては昼間でもほとんど背景光ノイズはなかったので、昼と夜のSN比に差がない。Fig. 8でむしろ昼間の方の若干SN比が良くなっているのは、昼夜間の大气の条件の違いによるものであろう。一方、360nmでは夜間のSN比の方が昼間の値より一桁近く大きい。

3. DIALにおけるソーラブラインド効果

これまで述べてきたように、良好なソーラブラインドフィルターを使えば、カットオフ波長 λ_c 以下では、昼夜同一のSN比でライダーエコーを得ることができる。本節では二波長差分吸収ライダー (DIAL) のソーラブラインド効果について考察する。その場合最も重要な問題は二つの波長の選択にある。夜間におけるオゾン観測では、15km以下の低い高度では約300nm以下の短い波長の組合せ、15~40kmの高度域では300nm以上の長波長が有利になる⁸⁾。これは、オゾン密度が小さい対流圏では、吸収断面積の大きい短波長域が測定精度が良くなるのに対し、成層圏ではむしろ到達距離が大きい長波長が要求されるためである。

先に我々は、KrFレーザー励起水素ラマンレーザーの第1・第2ストークス線である277nm波と313nm波の組合せで、小型のソーラブラインドライダーが構成できることを提案し、昼間のオゾン観測の実験を行った⁶⁾。Fig. 9は今回行った計測データの例である。今回の測定で変わったのは、望遠鏡が口径500mmから250mmと小型になり、干渉フィルターのかわりに前節で述べた回折格子モノクロメーターを使用した点である。送信光エネルギーは277nmが38mJ, 313nmが46mJで、積算パルス数は、それぞれ100

Fig. 8 Measured SN ratio of Rayleigh and Mie lidar in day time and night time at 277 and 360nm.

Fig.9 Observed ozone profile in day time with two wavelengths 277 and 313 nm.

ショットであった。望遠鏡が小型化されたにもかかわらず、150mの距離分解能で高度3kmまでのオゾン分布を昼間測定することができた。

波長277, 313nmでは、 H_2 ラマンシフターにより高い変換効率で同時二波長発振が得られるため、レーザーシステムの小型化ができる利点がある。しかし、前節で検討した結果を用いて評価すると、波長277nmは良好なソーラーブラインド効果は期待できるが、波長がカットオフ λ_0 よりかなり短いために、ライダーとしての到達距離が制限される。一方313nmは λ_0 より少し長いためにソーラーブラインド効果が十分きかない。Fig.9のデータを解析してみると、3kmという到達高度を決めているのは277nm波の方で、313nm波は太陽光の干渉を受けているにもかかわらず、高度6kmまで到達している。我々の使用したパルス出力と250mmの望遠鏡での277nm波の到達高度はFig.6, 7の解析や計測からも明かなように3km程度が上限に近い。従って、

さらに長距離のソーラーブラインドライダーは後に述べるように、 λ_0 にもっとも近い波長を使うことによって実現できる。

277, 313nmの二波長を使う場合のもう一つの問題は、波長の差が40nmで、DIALオゾンライダーで最適な波長差とされる5nmより約1桁大きい点である⁸⁾。このため、エアロゾルの後方散乱、消光係数の波長依存性による誤差が大となる。Fig.9ではこの点は考慮されていない。この効果による誤差は、オゾン吸収の小さい313nmでエアロゾル分布を求め、エアロゾルの光学的特性を仮定して、引き去ることができる。Fig.10はこの誤差がどの程度含まれ、補正によってどの程度修正できるかを見積るために、行ったシミュレーション計算の結果である。補正前（エアロゾルの効果を引き去る前）の誤差と補正後の誤差が示されている。補正後の誤差は、仮定したエアロゾルの光学的特性の不確かさによるものである。この補正により、エアロゾル

Fig.10 Simulated relative error in ozone observation. The effect of aerosols is corrected in circles, and uncorrected in triangles.

による誤差は十分小さくできるものと考えられる。

このように、277, 313nmという波長はソーラープラインドオゾンライダーとして最適な組合せというわけではないけれども、近距離用で移動型のコンパクトなオゾンライダーとして実用性の高い装置と考えられる。現在エキシマレーザーもふくめ車載可能なサイズのシステムを開発中で、これにより半径3kmの範囲のオゾン密度を2秒程度の測定時間で全日にわたって観測可能な装置が製作できるものと期待される。

一方、長距離のソーラープラインドオゾンライダーにおける送信波長の選び方について考察しよう。基本的な考え方は、ソーラープラインドフィルターが完全であれば、カットオフ波長 λ_c に短波長側でなるべく近い波長を選ぶは良い。しかし、カットオフ波長は太陽からの離角や天候によって変化すること、フィルターの透過帯域によって短波長へ移動することに注意しなければならない。また迷光による波長に依存しない背景光成分は特に大口径の望遠鏡を使う場合、検知器のダイナミックレンジを著しく制限することになるので、より迷光の少ないフィルターの使用や、受光視野角の制限などの対策が必要になってくるであろう。

さらに、送信波長にはレーザーの側からの制限がある。ここでは291.6, 300, 308nmの三波長について考えてみよう。このうち291.6nm波はKrFレーザー励起D₂ラマンレーザーの第二ストークス線によって発生でき、大型の装置ではパルス当り最大100mJ程度までの出力を期待できる。308nmはXeClレーザーの直接波長であるから0.5J程度までの高出力が得られる。しかし、 λ_c より若干長いので、ある程度の太陽光の影響が避けられないものと思われる。波長300nmはカットオフに最も近いので一番望ましい波長のように見えるが、今のところ色素レーザーの第二高調波しか実用的な光源がないので、その出力は最大10mJ程度しか期待できない。

Fig. 11は、これら三波長について、その出力を上述の最大値とし、受光望遠鏡口径1m、送

Fig. 11 Simulated SN ratio of Rayleigh and Mie lidar. The vertical resolution is 1 km.

信パルス数 10^4 として、(1)~(3)式を用いてレイリーおよびミー散乱光のSN比を計算したものである。その際、点線で示した昼間の観測における太陽光ノイズは、Fig. 1の計算値を使い、視野角は2 mradとした。従って、ソーラープラインドフィルターは理想的なものと仮定されている。

Fig. 11の計算は現実には構成可能なソーラープラインドフィルターで検知できる理論的上限に近い値を示しているものと考えられる。291.6nmでは昼夜の差はない。昼間の観測では、300nmと308nmの組合せと291.6nmと308nmの組合せはいずれも約20kmまで到達高度が期待できることがわかる。しかし、このような低い高度のオゾン計測では短い波長の方が計測誤差が少ないので、結局291.6nmと308nmの組合せが最適であると結論される。

4. むすび

紫外線ライダーにおけるソーラープラインド

効果による S N 比の改善について考察し、二波長差分吸収オゾンタイダーに適用した場合、高度 20km 程度までの計測に使用可能なことを示した。このようなソーラーブラインド効果は必ずしもオゾンライダーだけでなく、紫外線を使うライダー一般に適用できるもので、紫外線ライダーの大きな魅力となるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) O. Uchino, M. Maeda and M. Hirono :
IEEE J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) 527.
- 2) T. Shibata, M. Kobuchi and M. Maeda :
Appl. Opt. **25** (1986) 685.
- 3) K. Petri, A. Salik and J.A. Cooney : Appl.
Opt. **21** (1982) 1212.
- 4) 柴田, 関, 速水, 小渕, 前田 : レーザー研究
13 (1985) 60.
- 5) D. Renaut, J.C. Pourny and R. Captini :
Opt. Lett. **5** (1980) 233.
- 6) T. Shibata, T. Fukuda, T. Narikiyo and
M. Maeda : Appl. Opt. **26** (1987) 2604.
- 7) W.E. Meador and W.R. Weaver : J. Atmos.
Sci. **37** (1980) 630.
- 8) J. Pelon and G. Megie : J. Geophys. Res.
87 (1982) 4947.