

白色光偏光ライダーの開発

Development of the White Light Depolarization Lidar System

染川智弘¹、山中千博²、藤田雅之^{1,3}、M. C. GALVEZ⁴
T. SOMEKAWA¹, C. YAMANAKA², M. FUJITA^{1,3}, M. C. GALVEZ⁴

¹(財)レーザー技術総合研究所、²阪大院理、³阪大レーザー研、⁴デ・ラ・サレ大学

¹ Inst. for Laser Tech., ² Earth & Space Sci., Osaka Univ., ³ Inst. Laser Eng., Osaka Univ., ⁴ De La Salle Univ.

ABSTRACT

The coherent white light continuum is a novel and attractive light source with a broadband spectrum, a linear polarization, and an ultra-short pulse. This white light allows us to perform the simultaneous multi-wavelength depolarization measurements and evaluate the size of the atmospheric aerosols without using conventional inversion algorithms. Also, the Asian dust profiles were presented as an environmental measurement example from the white light lidar.

1. はじめに

高強度短パルスレーザーの開発はライダーの新たな応用として発展している。高強度フェムト秒レーザーを希ガス中に集光すると超広帯域なコヒーレント白色光の生成が見出された(Fig. 1)。この光源は元のレーザーと同様に指向性、干渉性、パルス幅、偏光といった性質を保持しており、ライダーの光源として用いる白色光ライダーの研究が進められている。

レーザー総研では、2000 年から白色光の広帯域性を活かした多波長同時計測が行われており¹⁾、2002 年から大阪大学理学研究科との共同研究として、白色光の偏光を利用する偏光ライダーの開発研究が行われている²⁾。本報告では、白色光の広帯域性と偏光を組み合わせた 3 波長同時偏光ライダーの開発と、実際の環境計測への応用例として黄砂の観測について紹介する。

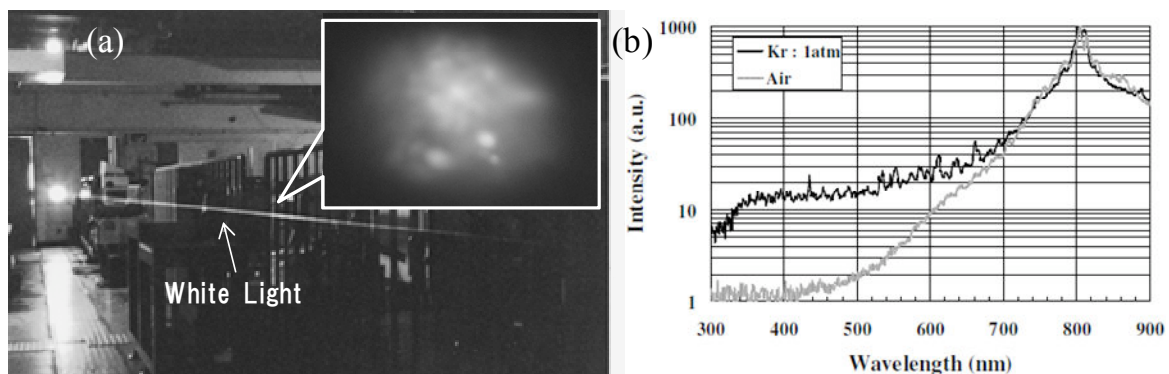


Fig. 1 (a) Propagation of the coherent white light continuum. Inset, white light profile showing multiple filaments. (b) White light spectra generated in atmospheric-pressure Kr gas cell (upper) and air (lower).

2. 白色光偏光ライダーシステム

Fig. 2 に 450、550、800 nm における 3 波長同時白色光偏光ライダーを示す。波長 800nm、パルス幅 100fs、繰り返し周波数 10Hz の高強度フェムト秒レーザーをレンズで 1 気圧の Kr ガスに集光させ、広帯域なコヒーレント白色光に変換する。得られた白色光は曲率 10m のミラーで再びコリメートし、大気に打ち上げられる。大気中の散乱光は直径 30cm の望遠鏡で集められ、測定装置に導かれる。

スペクトル分解にはダイクロイックミラーを用いて散乱光の波長帯域を分離し、干渉フィルターを用いて観測するスペクトル幅を制限している。中心透過波長は450、550、800nmの3波長であり、バンド幅はそれぞれ、10、40、10nmである。550nmでは得られる散乱光強度が小さかったことから広帯域のフィルターを用い、送信白色光と観測系の偏光面の調整に使用する $\lambda/2$ 波長板も広帯域のものを使っている。

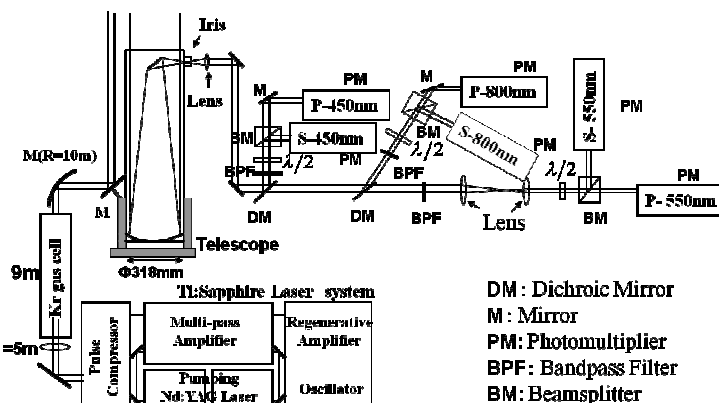


Fig. 2 Schematic diagram of the white light depolarization lidar system.

4. 雲・エアロゾルの3波長同時偏光観測結果

Fig. 3に2007年冬の3波長同時観測データを示す。測定は500回積算で1分ごとに行っている。800Pは800nmでのP偏光の後方散乱信号であり、雲やエアロゾルの空間的な分布構造を得るため、距離の2乗で補正している。800 δ 、550 δ 、450 δ はそれぞれの波長での δ である。打ち上げレーザーの偏光面に平行な成分をP、垂直な成分をSとして偏光解消度 δ は $\delta = S/P$ と定義している。

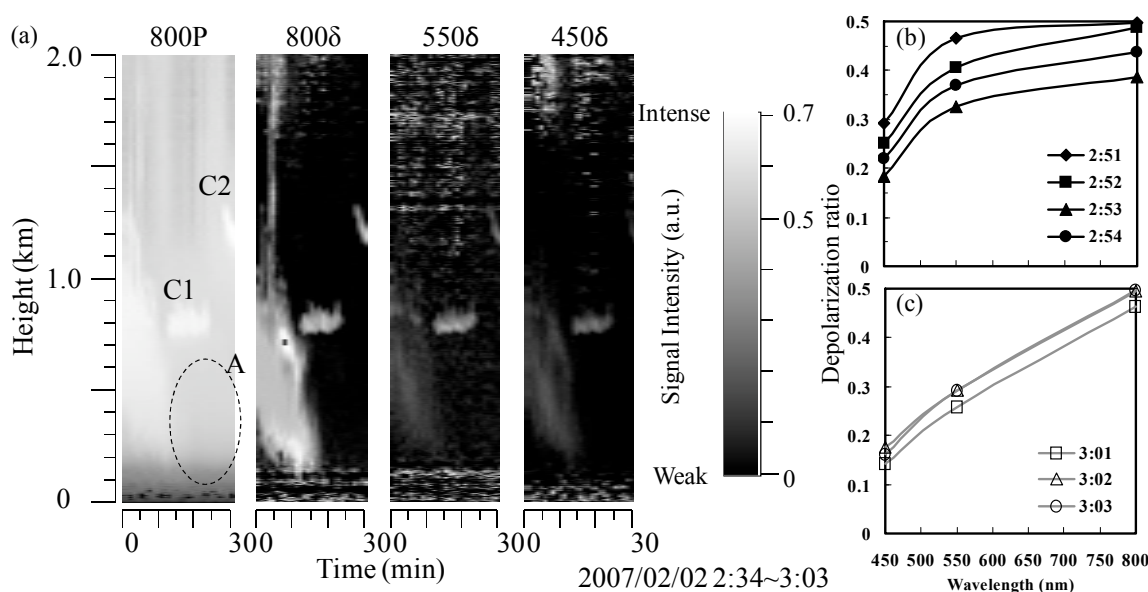


Fig. 3 (a) Time height displays of the simultaneous three-wavelength depolarization ratios and wavelength dependence of the depolarization ratios for (b) C1 and (c) C2 in (a).

Aで示している点線で囲った部分は、散乱光の強度が弱く雲ではなくエアロゾルと考えられる。また、 δ はすべての波長でほぼ0を示すので、球形のエアロゾルだと考えられる。また、C1、C2で示す雲は、波長によって δ の値が変化しており、この δ の波長依存性をFig. 3(b), (c)に示す。 δ の値はそれぞれの雲でのピーク位置をとっている。C1では800nmと550nmの δ の値が近く、450nmで小さくなる“上に凸”のカーブを描き、C2ではほぼ直線的に減少している。 δ の波長依存性は雲によって特徴的であり、新しい分類法が期待できる。そこで、従来の多波長Mieライダーで用いられるオングストローム係数とTmatrix法を用いたシミュレーションとの比較を行った。

4. 得られた雲の δ とオングストローム係数、 T -matrix 法によるシミュレーションとの比較

雲やエアロゾルからの後方散乱係数 β の波長依存性からオングストローム係数は $\hat{a} = -\ln\{\beta(550)/\beta(550)\}/\ln(550/800)$ と表わされる。 $\hat{a}$ は粒径の指標となるパラメータであり、粒径と負の相関を示すことが知られている。Fig. 4(a)に雲 C1、C2 での 550nm の δ と、550、800nm の 2 波長の散乱信号を用いて求めた $\hat{a}$ の依存性を示している。 δ と $\hat{a}$ には正の相関がみられる。つまり、 δ は粒径の指標となり、 δ の値が大きいと粒径が小さく、 δ の値が小さくなるにつれて粒径が大きくなる。

Fig. 3(b)の 2:51 と 2:52 に観測された雲では 800nm での δ にほとんど差は見られないが、550、450nm では大きな差が見られる。また、Fig. 4(a)の $\hat{a}$ を見ると、この 2 つの観測例には粒径の違いが見られる。1 波長での δ 観測では分離が難しい観測例もあるが、多波長で δ を測定することによって感度のよい識別が可能である。

T -matrix 法は、非球形微粒子の散乱計算を粒子形状が回転対称を持つと仮定して解く手法である。観測日の高層大気的气温データを見ると、観測地の大阪吹田から南に 150km ほど離れた潮岬のデータではあるが、観測された雲の高度では $-4 \sim -9^\circ\text{C}$ 程度であり、この温度領域での氷の結晶は軸比が 1.4 の六角柱である。そこで、観測された雲を氷の結晶と仮定して、ランダムに配列した軸比が 1.4 の回転楕円球に対して T -matrix 法を用いて計算を行った^{3,4)}。粒径は同じ表面積を持つ球の直径、粒径分布はべき乗分布を採用した。計算した波長はライダー観測で使用した 450、550、800nm である。

Fig. 4(b)に、ある粒径に対する δ と波長の依存性を示す。粒径が小さな $1.3\mu\text{m}$ では 800nm と 550nm の δ が近く、450nm で小さくなる上に凸のカーブを描く。これは先ほどの観測例の Fig. 3(b)の 2:51 に対応すると考えられ、粒径が小さいことも Fig. 4(a)の結果と一致する。さらに粒径の大きな $1.8\mu\text{m}$ では直線的な減少になり、これは、Fig. 3(c)の結果に対応している。また、 $2.4\mu\text{m}$ で再び上に凸になるが、これは Fig. 3(b)の 2:52~2:54 の粒径が大きくなる変化と一致する。このように、 T -matrix 法で求めた δ の波長依存性は Fig. 3 の観測例をよく再現しており、 δ の波長依存性をプロットすることによって散乱体の粒径と形状を推定できる。

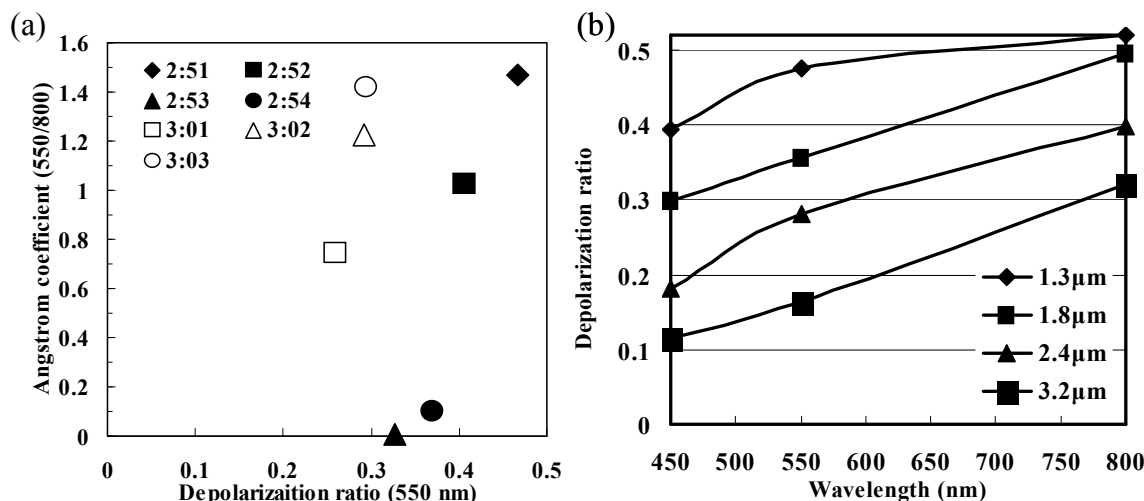


Fig. 4 (a) The Angstrom coefficients as a function of the depolarization ratios at 550 nm for the C1 and C2 clouds in Fig. 3(a). (b) Depolarization ratios computed at 450, 550, and 800 nm for ice particles of various effective radii.

5. 白色光偏光ライダーによる黄砂の観測結果

Fig. 5 に実際の白色光ライダーの環境計測への応用として、大阪大学・吹田キャンパスでの 2007 年 5 月の(a)黄砂が観測されなかった日、(b)黄砂が観測された日の観測結果を示す⁵⁾。観測は Fig. 2 に示した 3 波長同時偏光ライダーシステムを用いた。黄砂が観測されなかった(a)では得られたエアロゾル層

の偏光解消度 δ は、通常の観測で得られるようにほぼ 0 を示すが、黄砂が観測された日(b)での観測結果は $\delta = 0.3 \sim 0.7$ 程度と大きな値を示している。これは、非球形微粒子である黄砂によって生じた δ だと考えられ、白色光偏光ライダーによって黄砂の識別が行えたことを示している。

今回観測に成功した5月の観測例は、どれも800nmでの偏光解消度は大きな値を示したが、450、550nmでは偏光解消度は0を示した。これは現状における生成した白色光の強度が800nmに比べて450、550nmでは2桁程度弱いため、弱い偏光解消信号であるS偏光の信号が検出できなかったと考えられる。また今回観測に成功した日は大阪でも黄砂観測の報告が見られたが、観測可能な夜には黄砂の量が少なかったことも原因と考えられる。今後は、黄砂を対象として3波長同時の偏光解消度を得ることで、黄砂の粒径や形状を議論したい。また、観測に使用したのは通常の偏光ライダーに用いられるような単色レーザーではなく、紫外域にまでブロードに広がった白色光源であり、偏光解消度に対する蛍光の効果などについても議論を行う必要がある。

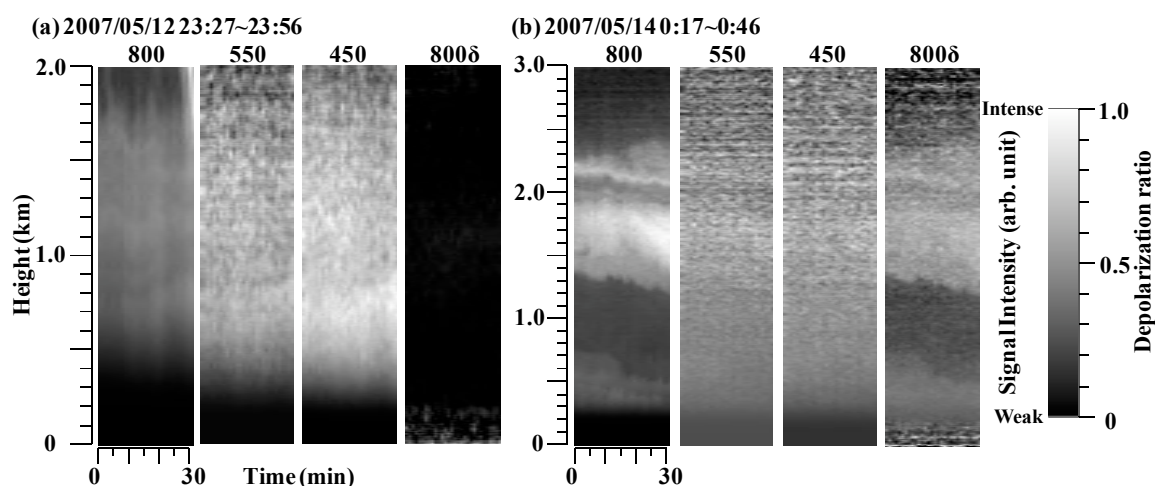


Fig. 5 Depolarization ratios with white light lidar system on (a) 12 May and (b) 14 May in 2007. The Asian dust covered the Osaka region on May 13–14, 2007.

6. まとめ

2000年より継続してきた白色光ライダー研究は、偏光を利用することでより広範囲な観測を可能にした。今後は偏光を用いた新たな観測法の発展のみならず、現在未使用であるコヒーレント白色光の赤外域まで観測の幅を広げたい。これは、赤外域での分子の吸収を利用して、二酸化炭素、メタンなどの温室効果ガスの同時観測が期待できる。地球温暖化など地球規模での環境問題が深刻となった現在、より広範囲な測定対象に対して同時観測を可能とする白色光ライダーの応用可能性は広い。

謝辞

本研究はレーザー総研、阪大理学部、阪大レーザー研、De La Salle 大学（フィリピン）との共同研究として進めており、ご協力いただいた方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M. C. Galvez, M. Fujita, N. Inoue, R. Moriki, Y. Izawa and C. Yamanaka, Jpn. J. Appl. Phys, **41**, L284-L286, 2002.
- 2) T. Somekawa, C. Yamanaka, M. Fujita and M. C. Galvez, Jpn. J. Appl. Phys, **45**, L165-L168, 2006.
- 3) T. Somekawa, C. Yamanaka, M. Fujita and M. C. Galvez, J. Appl. Phys., **103**, 043101, 2008.
- 4) T. Somekawa, C. Yamanaka, M. Fujita and M. C. Galvez, Part. Part. Syst. Charact., **25**, 49-53, 2008.
- 5) T. Somekawa, C. Yamanaka, M. Fujita and M. C. Galvez, Jpn. J. Appl. Phys, **47**, 2155-2157, 2008.