

Feature Article

堀場雅夫賞受賞者論文

Masao Horiba Award

高強度フェムト秒レーザーを用いた白色光ライダーの開発 Development of the White Light Lidar using a High Power Femtosecond Laser System

染川 智弘

高強度フェムト秒レーザーを希ガスに集光すると、紫外から赤外におよぶ超広帯域なスペクトルを有するコヒーレント白色光が生成される。この白色光を、レーザーライダー（ライダー）の光源として用いる白色光ライダーの開発を行っている。白色光ライダーでは、散乱の波長依存性を利用したエアロゾルの粒径分布の推定や、偏光特性を利用した、黄砂の形状による識別、赤外域を利用した温室効果ガスである二酸化炭素の観測といった環境計測を同時に行うことができ、1台のライダーシステムで多種多様な環境計測が期待できる。

A white light lidar system, which uses self-trapping of the intense femtosecond laser pulse in atmospheric-pressure Kr gas, was utilized to obtain multi-wavelength backscatter and depolarization profiles from aerosols and clouds. The white light lidar has the advantage of performing at an arbitrary wavelength that is independent of the laser source. The observed results provided the wavelength dependence to enable the multi-wavelength depolarization ratio to be used as a method to evaluate the size of the atmospheric aerosols without using conventional inversion algorithms. As an environmental measurement example from the white light lidar, the Asian dust profiles were obtained by the white light depolarization system. The white light lidar system provides the new perspectives in a large number of fields such as the remote detection of the Asian dust particles that pose a threat to cross-border pollution in Japan or the monitoring of green house gases.

はじめに

3～6月にかけて日本にも多数回飛来する黄砂は、その発生メカニズム、飛来ルート、環境への影響を解明することを目的として研究が行われており、ライダー*1（レーザーライダー）では得られる高さ方向の情報、リアルタイム観測が特徴として研究が精力的に推進されている。黄砂は一般的に非球形の微粒子であり、レーザーの偏光を用いた観測が行われ、日本、中国、韓国、モンゴルと国際的なネットワークが形成され、その解析結果が報告されている^[1]。これまで自然現象だと理解されていたが、中国での過放牧、農地転換による耕地拡大等による人為的影響として再認識されつつあり、農作物などの砂塵被害だけでなく、輸送途中で人為起源の大気汚染物質の付着により、のどの痛みやせき、鼻水など花粉症に似た症状を訴える患者が急増している等、アレルギー体質の悪化を招いている^{[2],[3]}。

*1：ライダー（Lidar : Light Detection and Ranging）：パルス状のレーザーを測定対象に照射し、散乱光から測定対象までの距離、成分情報を計測する方法。

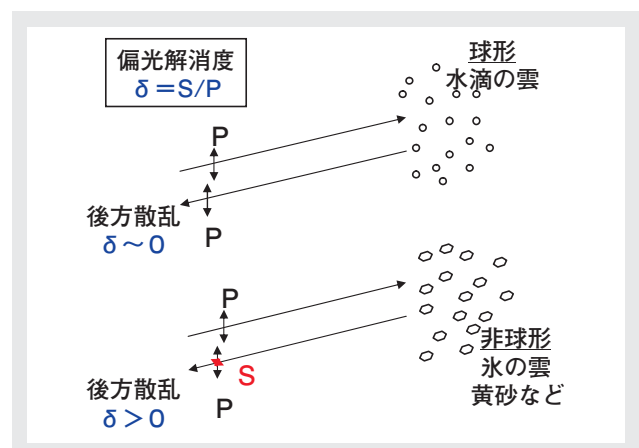


図1 偏光ライダーの原理

ライダーで黄砂と他のエアロゾルを識別する一般的なパラメータとして偏光解消度 δ が利用される。打ち上げるレーザーに平行な偏光成分をP、垂直な成分をSとして $\delta = S/P$ で定義される。図1に示すように、水滴の雲や球形のエアロゾルからの後方散乱光は、偏光の解消がなく、そのままPで戻ってくるので δ はほぼ0となるが、氷の雲や黄砂等の非球形の散乱体からは、偏光が解消されてS成分が戻ってくるため、 δ は >0 となる。

色光の偏光特性を利用した開発を行い、3波長同時 δ の観測による雲の形状・粒径の推定や、実際の環境計測への応用として黄砂の観測に成功している^[5]。

*2: Mie散乱: 光の波長程度以上の大きさの球形の粒子による光の散乱現象

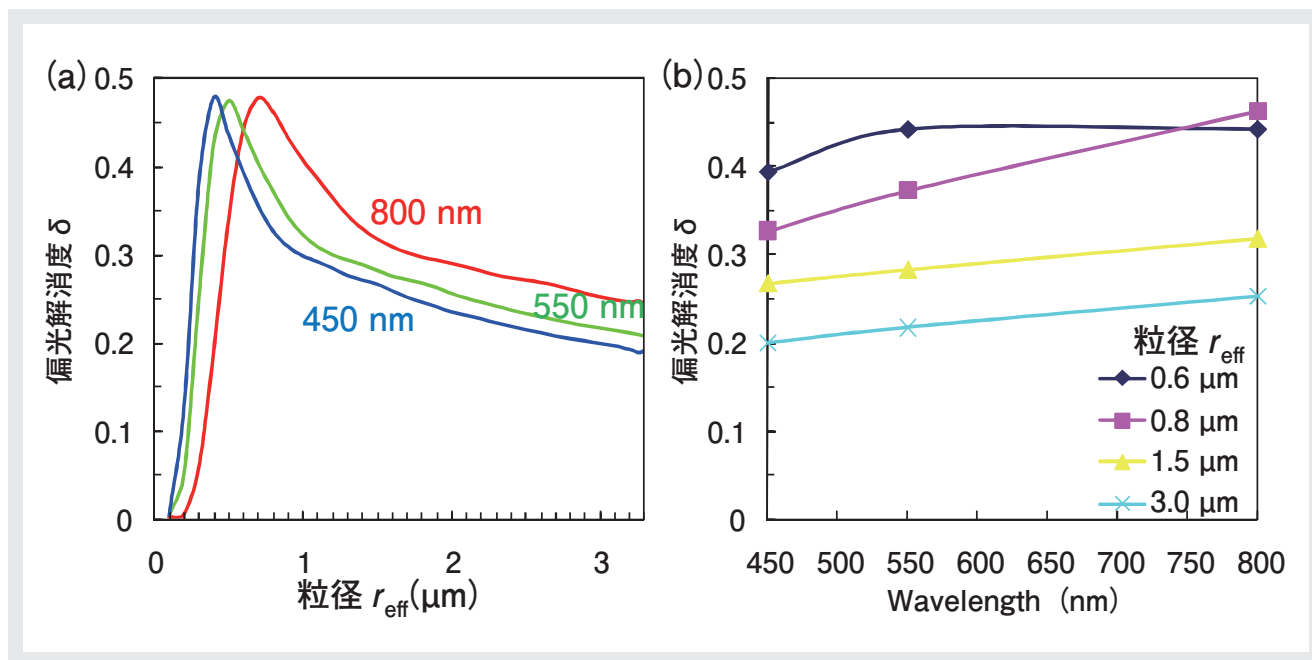


図2 T-matrix法による黄砂の3波長 δ の振る舞い

この δ の大きさによって形状を識別するわけだが、Mie散乱*2を利用しているため観測される δ はライダー送信波長や散乱体の粒径に大きく依存してしまう。

図2は、黄砂に対してライダー波長800, 550, 450 nmで観測した場合のT-matrix法を用いて計算した δ である。T-matrix法は、非球形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り、黄砂の平均形状は軸比1.4の回転楕円球としている^[4]。(a)は散乱体の粒径 r_{eff} と δ の関係であり、同じ粒径の散乱体を観測した際でも波長によって得られる δ が異なることがわかる。(b)はある粒径 r_{eff} に対して波長と δ の関係を示したグラフであり、3波長の δ の大きさ・カーブの違いによって黄砂の粒径や形状を評価できることがわかる。しかしながら、 δ の多波長同時計測は、複数台のレーザーを同時に動作させる必要があり、さらに送信レーザーを同一光軸上に送信するレーザーのアライメントも複雑になる。そこで、任意の波長で多波長同時計測が可能になる白色光のレーザーを用いた白色光ライダー開発を行っている。特に、白

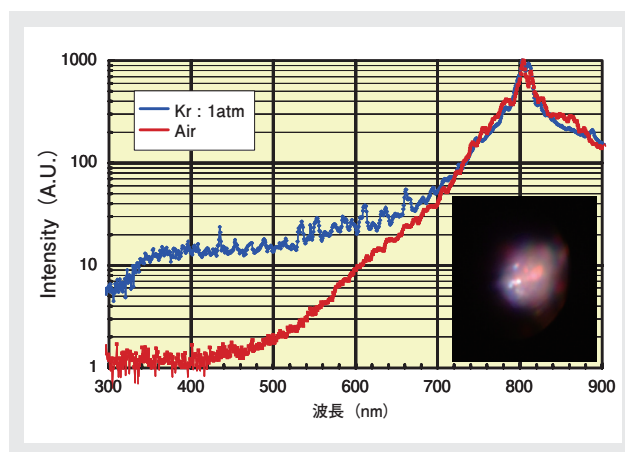


図3 コヒーレント白色光のスペクトルと写真

高強度フェムト秒レーザーを希ガス中に集光すると、強い非線形効果によって自己位相変調が誘起され、紫外から赤外におよぶ、非常に広帯域なスペクトルをもつコヒーレント白色光が生成される(図3)。白色光は、太陽光線とは異なり、元のレーザー光の性質である指向性、干渉

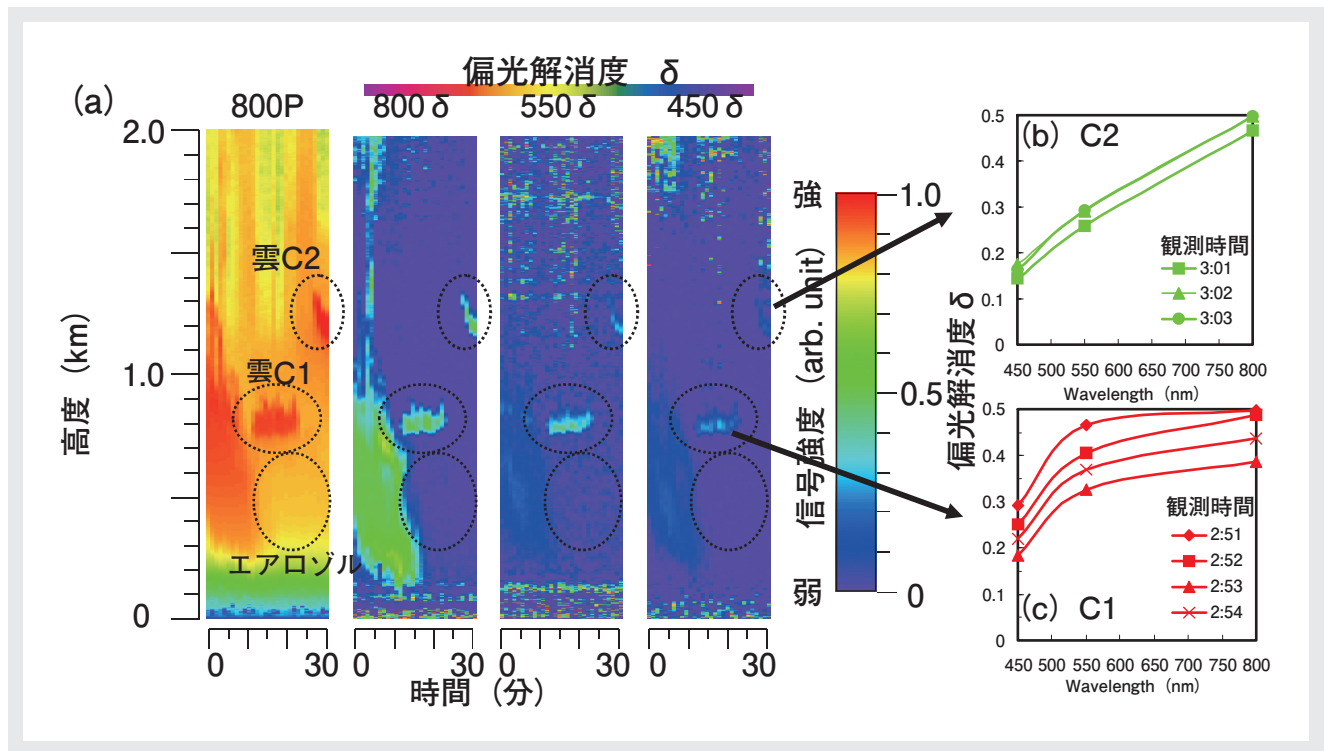


図4 白色光ライダーによる3波長同時 δ の観測結果(2007年7月2日2時34分~3時3分)

性、超短パルス性、偏光特性を保持している。これを大気観測用のライダー光源として用いる白色光ライダーでは、任意の多波長でライダー信号の取得が可能となるため、多種多様な測定対象に対して波長依存性を含めた多くの情報を同時に取得することができる。図2. T -matrix法による黄砂の3波長 δ の振る舞いさらに、生成前のレーザーと同じ偏光特性を保持しているため偏光ライダーへの応用も可能である。

多波長同時偏光観測による雲・エアロゾルの観測結果

図4に800, 550, 450 nmの3波長での δ の観測結果を示す。800Pは800 nmのP偏光信号の距離2乗補正信号であり、観測日の大気の高高度分布情報を示している。信号強度の大きな赤色の部分が雲であり、点線で囲った少し信号強度の小さい部分がエアロゾルである。エアロゾルを偏光解消度で見ると、全波長でほぼ0を示すことから、球形のエアロゾルだと判断できる。

雲は、大きな偏光解消度を示すことから氷の雲ではないかと考えられ、3波長の δ の振る舞いが、観測した雲C1とC2で異なり、C1では大きな時間変化を観測していること

がわかる。こうした3波長での δ の振る舞いは図2で示した T -matrixの計算でよく再現できることから、 δ の波長依存性を測定することで雲・エアロゾルの粒径・形状の推定が可能である。

黄砂の観測

散乱体の形状による識別が可能になった白色光偏光ライダーシステムを用いて、実際の環境計測への応用として、3~6月に日本に飛来する非球形微粒子である黄砂の観測を行った(図5)。黄砂が観測地である大阪に来た2007年5月13, 14日の前日である12日の(左)の観測結果では、0.5~2.0 kmにエアロゾルが分布しており、 δ はほぼ0を示している。これは図5でも観測されている。通常の大気を浮遊している球形のエアロゾルだと考えられる。一方で、黄砂が来た(右)の2.5 kmまで及ぶ層状構造を示すエアロゾルの観測結果では、これまでのエアロゾルでは観測されなかった大きな δ を示している。黄砂は通常のエアロゾルとの識別がはっきり行え、観測日の黄砂は1.5~2.0 kmに集中していることがわかる。また、日本に飛来する黄砂は1~2 kmの層状の構造をしているという他の研究報告とも一致している^[4]。

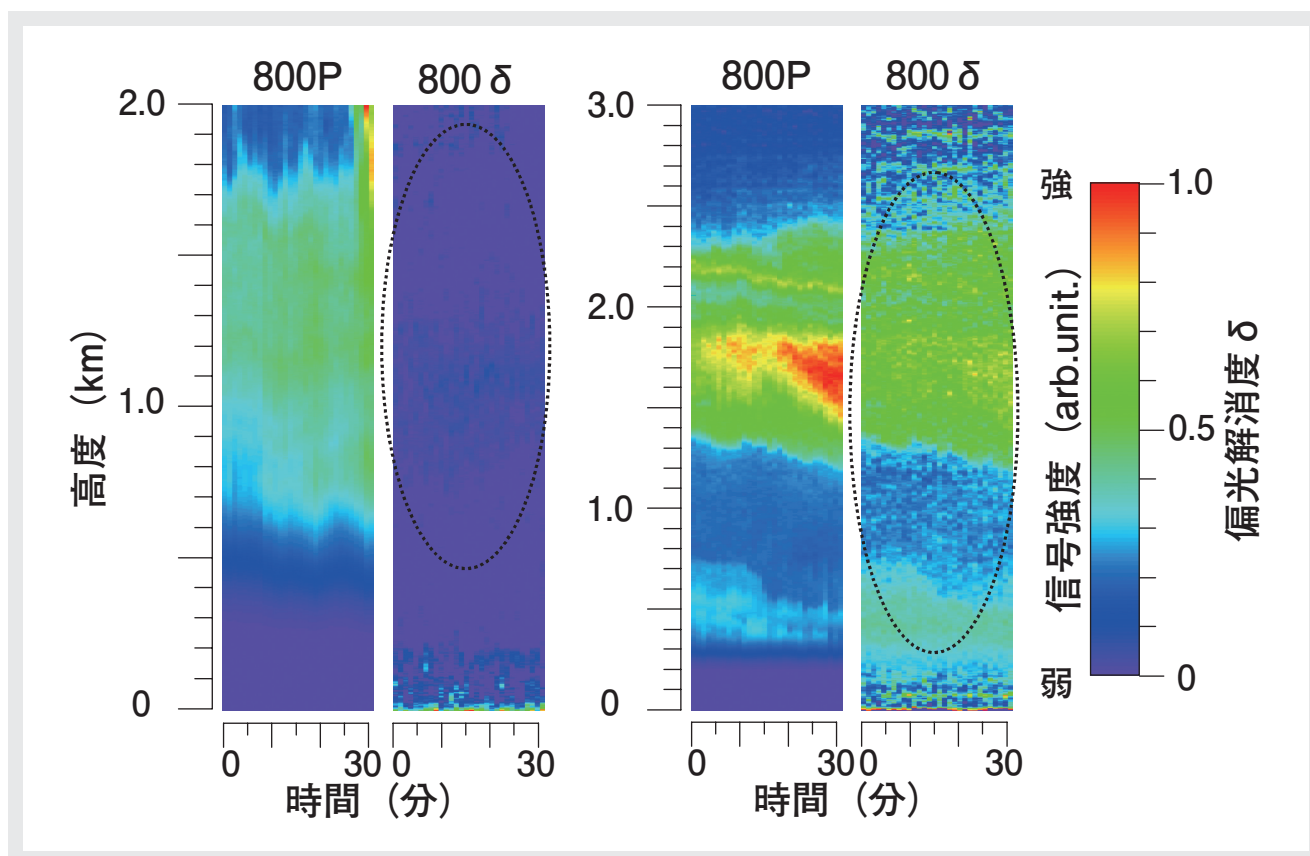


図5 観測地の大阪に黄砂が飛来した(左)前日と(右)当日の高度分布情報(2007年5月12日23時47分~23時56分, 2007年5月14日0時17分~0時46分)

おわりに

2000年より研究を行ってきた白色光ライダーの開発は、偏光を利用することでより広範囲な観測を可能にした。開発した多波長同時偏光測定では従来手法では、レーザーシステムの大規模化から観測があまり行われていなかったが、本手法では観測を容易なものとし、3波長同時偏光解消度という、新たなアプローチで散乱体の粒径と形状の推定が行えるという、ライダー観測に新たな知見を与えることができた。また、実際の環境計測の応用として、黄砂の観測にも成功した。現在、偏光を用いた新たな計測手法や、赤外域を用いた二酸化炭素の吸収計測の研究を進めており^[6]、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

本研究は財団法人レーザー技術総合研究所、大阪大学大学院理学研究科、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、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] T. Murayama et al., J. Geophys. Res., **106**(2001) 18,345.
- [2] F. Var, Y. Narita, S. Tanaka, Atmos. Environ., **34**(2000)2755.
- [3] K. Kim et al., Atmos. Environ., **37**(2003)753.
- [4] K. Okada et al., J. Meteorol. Soc. Jpn., **65**(1987) 515.
- [5] 染川智弘, 山中千博, 藤田雅之, M. C. Galvez, レーザー研究, **37**(2009)758.
- [6] T. Somekawa, M. Fujita, Y. Izawa, Appl. Phys. Express., **3**(2010)082401.



染川 智弘

Toshiiro Somekawa

財団法人レーザー技術総合研究所
レーザー加工計測研究チーム 研究員
理学博士