

## B-4 能動型と受動型リモートセンサーの複合利用による大気汚染エアロゾルと雲の気候影響研究

### (2) 高スペクトル分解ライダー等による雲・エアロゾル観測技術の研究

環境省独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域 遠隔計測研究室 杉本伸夫・松井一郎

アジア自然共生研究グループ アジア広域大気研究室 清水 厚

福井大学工学部

小林喬郎

平成14～18年度合計予算額	83,252千円
(うち、平成18年度予算額)	17,600千円)

#### [要旨]

将来の衛星観測を念頭に置いて、高スペクトル分解ライダー等によるエアロゾル、雲の光学特性の観測手法開発および、ライダーと雲レーダー、放射計等との複合利用により雲の微物理量、エアロゾルの光学特性を導出するための手法の開発を行った。国立環境研では、532nmの高スペクトル分解ライダー(HSRL)技術に関する研究と継続的な観測をつくばで2年間以上実施し、球形及び非球形エアロゾル、氷雲の532nmにおけるライダー比(消散係数対後方散乱係数比)を統計的に解析し、それぞれの気候値を求めた。一方、HSRLで得られる532nmのライダー比を、2波長ミー散乱ライダー(1064nm,532nmの後方散乱と532nmの偏光解消度を測定)の解析アルゴリズムに加えて、ダスト、海塩、人為起源水溶性エアロゾルとともに光吸収性のブラックカーボン(soot)の分布を分離して推定できる可能性が示された。また、532nmのHSRLシステムに二酸化ケイ素(シリカ)のラマン散乱測定用の検出チャンネルを追加し、大気中の黄砂に含まれるシリカ濃度測定に初めて成功した。宇宙航空研究開発機構(JAXA)と欧州宇宙機関(ESA)が共同で開発中のEarthCARE衛星に搭載計画中のATLID(YAGレーザーの第三高調波を用いた355nmのHSRL)の技術とアルゴリズム検証を目的として、355nmのHSRLの開発研究を福井大学で行い、ファブリペロ・エタロンを分光素子とするHSRLシステムの開発に成功した。さらに、このHSRLを用いているいろいろな気象条件下におけるエアロゾルと雲の355nmにおけるライダー比を測定した。雲レーダーとライダーの複合利用による雲の微物理量の導出に関して、航空機搭載ミー散乱ライダー(波長355nm偏光測定機能付き、または2波長(532nm, 1064nm)偏光測定(532nm)機能付き)を製作し、ガルフストリームII型機で観測実験を行った。また、海洋研究開発機構の研究船「みらい」に2波長(532nm, 1064nm)偏光(532nm)ライダーを雲レーダーと同時搭載し、長期間海洋上の雲の観測を実施し、海塩、ダスト、水溶性エアロゾルの分布を導出し、エアロゾル気候モデルSPRINTARSとの比較解析を行った。

[キーワード] 高スペクトル分解ライダー、ライダー比、航空機搭載ライダー、雲、エアロゾル

#### 1. はじめに

ライダーは、エアロゾル、雲の鉛直構造を測定するための非常に有効な手法である。従来、ミ

一散乱ライダーが観測に広く用いられているが、ミー散乱ライダー単独では厳密にはエアロゾルや雲の消散係数を定量的に求めることはできず、ライダー比と呼ばれる消散係数と後方散乱係数の比の値を仮定する必要がある。これに対してラマン散乱ライダーや高スペクトル分解ライダーは、大気構成分子の散乱を独立に測定することが可能で、消散係数を仮定なしに導出することができる。中でも高スペクトル分解ライダー(HSRL)は高感度で、次世代の衛星搭載ライダーにも採用されている。一方、ライダー測定を雲レーダーや放射計と同時に行い、複合的な解析を行うことによって、雲の粒径や雲水量、氷水量、エアロゾルの特性など、ライダー単独（あるいは他のセンサー単独）では得られない情報を導出できる可能性を持っている。宇宙航空研究開発機構(JAXA)と欧州宇宙機関(ESA)が共同で開発を進めているEarthCARE衛星<sup>1)</sup>では、HSRLと雲レーダー、イメージャー、赤外放射計が同じ衛星に搭載され、複合的な観測が計画されている。

本研究では、EarthCAREなどの将来の衛星観測や遠隔計測技術を用いた次世代の観測システムの構築をにらんで、HSRL技術に関する研究を行うとともに、雲レーダー、放射計等を複合的に利用する観測手法、データ解析手法の研究を行った。

## 2. 研究目的

将来の衛星観測や観測システムへの応用を念頭に置いて、ライダーによる定量的計測手法およびライダーと他のセンサーの複合観測手法を開発することを目的とする。具体的には、高スペクトル分解ライダーなど、エアロゾルおよび雲の光学特性を定量的に観測可能なライダー手法を開発し、ライダー比等の光学パラメーターの気候値を決定するとともに、ライダーと雲レーダー、放射計等との複合利用によって雲の微物理量、エアロゾルの特性と分布を導出する手法を開発することを目的とする。

## 3. 研究方法

高スペクトル分解ライダー(HSRL)技術に関しては、従来から国立環境研で開発されていたヨウ素フィルターを用いた532nmのHSRLシステムを改良し、国際交流課題(平成15-17)において継続的な観測を行なった。これによって、雲、球形エアロゾル、非球形エアロゾルのライダー比の気候値、季節変化などの解析を行った。一方、紫外域(355nm)の高スペクトル分解ライダー技術は、これまでに世界的にも新しいものであったが、高分解能の分光素子としてファブリペロ・エタロンを用いたシステムを福井大学で新たに開発した。さらに、これを用いて観測実験を行い、波長355nmのライダー比の気候値データを得た。

ライダーと雲レーダーとの同時観測に関しては、フィールド観測による実証を目的に、紫外領域(波長355nm)の航空機搭載用ミー散乱ライダーを開発した。ガルフストリームII型機に情報通信研究機構(NICT)の95GHz雲レーダー(SPIDER)と同時搭載し、観測キャンペーンAPEX-E3の中で同時観測を行った。後に、このライダーを2波長化(1064nm、532nm)する改造を行ない、海洋研究開発機構のパラオ観測実験等に参加しデータを蓄積した。一方、海洋研究開発機構の研究船「みらい」に2波長偏光ライダーと千葉大学が開発したFMCW方式の雲レーダーを同時搭載して、海洋上の雲、エアロゾルの観測を行った。ライダーと雲レーダーのシナジーによる雲の微物理量の導出は、サブテーマ1において行われた。一方、ライダーデータのみによるエアロゾル、雲の解析に関する研究を本課題において行い、エアロゾル気候モデルSPRINTARSとの比較などの解析

を行った。

この他、黄砂中のシリカのラマン散乱測定や2波長における偏光解消度の同時測定など、HSRLの開発およびデータ解析手法の研究の過程で得た新しいアイデアについても、将来の観測システムの高度化につながることを念頭に置いて積極的に研究を進めた。また、NASAの衛星搭載ライダーGLASとCALIPSOの検証実験やUNEPのプロジェクトABC(Atmospheric Brown Cloud)の観測キャンペーンなどに積極的に参加した。

#### 4. 結果・考察

##### 4-1 ヨウ素フィルターを用いた532nmの高スペクトル分解ライダー技術の研究

高スペクトル分解ライダーはレーザー波長におけるエアロゾルの後方散乱係数と消散係数を独立に測定することができるライダー手法のひとつである。もうひとつの方法はラマン散乱ライダーであるが、ラマン散乱は散乱断面積が非常に小さいため、例えば衛星搭載用にはラマン散乱ライダーは利用できない。

通常ミー散乱ライダーでは消散係数を求めることができない理由は、ミー散乱ライダー信号を表すライダー方程式(次式)が、後方散乱係数 $\beta$ と消散係数 $\alpha$ の二つの未知数を含むことによる。

$$P(R) = \frac{CP_0\Delta R}{R^2}(\beta_1(R) + \beta_2(R)) \times \exp\left[-2\int_0^R (\alpha_1(R') + \alpha_2(R'))dR'\right] \quad (1)$$

ここに、 $P$ は受信光パワー、 $R$ は距離、 $P_0$ は送信光パワー、 $C$ は装置定数。 $\alpha$ 、 $\beta$ の添字は1がエアロゾル、2が大気構成分子を表す。大気構成分子の $\alpha$ 、 $\beta$ はモデルや気象観測から既知であると考えて良いので、未知数はエアロゾルに対する $\alpha$ 、 $\beta$ の二つである。式の数はひとつであるので、これを解くことはできない。これが、古くから知られているライダー方程式の解法の問題である。通常は、 $\alpha_1$ と $\beta_1$ の間に比例関係、 $S_1 = \alpha_1 / \beta_1$ を仮定してライダー方程式が解かれる。 $S_1$ はライダー比とも呼ばれる。しかし、ライダー比はエアロゾルの種類や粒径分布に依存する。通常、大陸性のエアロゾルでは $S_1 = 50$ (sr)程度、海洋性では $20$ (sr)程度であるので、あらかじめエアロゾルの特性を推定した上で仮定を置く必要がある。なお、ライダー方程式で得られた $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ において $S_1$ の仮定が正しくないことによって生じる誤差は、測定対象が光学的に薄い( $\alpha_1$ が小さい)場合と厚い( $\alpha_1$ が大きい)場合で異なる。一般に、光学的に薄い場合は $\beta_1$ の誤差が小さく、逆に光学的に非常に厚い場合は $\alpha_1$ の誤差が小さい。通常は、 $\beta_1$ は $S_1$ の仮定に敏感に依存せず、比較的精度良く求められる。

もし、(1)式に加えて、(2)式のように分子のみの後方散乱信号を独立に測定できれば、 $\alpha_1$ を独立に決めることができる。

$$P_2(R) = \frac{CP_0\Delta R}{R^2}\beta_2(R) \times \exp\left[-2\int_0^R (\alpha_1(R') + \alpha_2(R'))dR'\right] \quad (2)$$

また、(1)式と(2)式の比を取れば $\beta_1$ も得られる。このように、分子の後方散乱を測定する手法が、高スペクトル分解ライダー(High Spectral Resolution Lidar: HSRL)やラマン散乱ライダーである。HSRLでは大気構成分子のレイリー散乱が、ラマン散乱ライダーでは通常、振動ラマン散乱が

測定される。

HRSLにおいて、エアロゾルや雲のミー散乱と大気構成分子のレイリー散乱を分離するためには、送信レーザーを単一波長化し、受信光を非常に高分解能で分光する必要がある。高スペクトル分解ライダーと呼ばれる所以はここにある。単一波長の（スペクトル幅の非常に狭い）レーザーを大気中に送信する時、測定される散乱光は、エアロゾルによるスペクトル幅の狭いミー散乱光と大気分子による広がったレイリー散乱光から成る。スペクトルの広がりや散乱体の運動速度の違いによる。すなわち、エアロゾルはほぼ風速で移動し、風速の揺らぎ程度に相当するドップラー広がりしか持たないのに対して、分子は音速程度で飛び回っているためこれに相当する広いドップラー幅（可視光で数GHz程度）を持つ。HSRLではこれらの2つの成分を分離して受信する。そのための高分解能の分光素子として、分子の吸収線を用いたフィルターや干渉を利用したファブリペロ・エタロンなどが用いられる。広く用いられるレーザーであるNd:YAGレーザーの第2高調波の波長532nmではヨウ素分子( $I_2$ )の吸収がある。Nd:YAGレーザーをインジェクション・シーディングなどの手法で単一波長化してヨウ素フィルターに同調することによって、ヨウ素フィルターをミー散乱成分を除去するフィルターとして利用することができる<sup>2)</sup>。

図1に散乱光のスペクトル、ヨウ素フィルターのスペクトル、これを透過した光のスペクトルを概念的に示す。ヨウ素フィルターを透過した光はレイリー散乱信号のみを含む。HSRLの受信系に、このレイリー散乱のみの受信チャンネルと、全散乱（レイリー散乱+ミー散乱）の受信チャンネルを設けることによって、(1)式、(2)式に相当する情報を得ることができる。

分子フィルターを用いる方法は、フィルターの特性が入射角に依存しないことや高い分離特性が得られる（チャンネル間のクロストークが小さい）ことなど大きな利点を持っている。しかし、分子の吸収線にレーザー波長が同調できることが条件になる。355nmでは適当な吸収線を持つ適当な分子（十分に重く狭い吸収線を持つ分子）が無いのでこの手法は使えない。ヨウ素フィルターは、ほぼ常温で利用できることも大きな特長である。Csなどの金属蒸気の利用も考えられるが、その場合はフィルターを高温に過熱する必要がある、波長も波長可変レーザーが必要な波長であるので現実には利用困難である。現実には、532nmのヨウ素フィルターのみが利用できる。

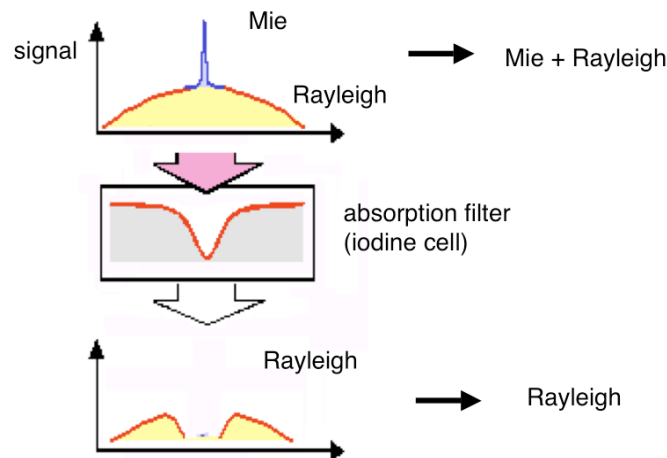


図1 ヨウ素フィルターを用いたHSRLの受信系の概念

国立環境研では1998年頃からヨウ素フィルターを用いたHSRLの開発を行ってきた<sup>3,4)</sup>。本研究ではこの装置を改良し、つくばにおいて長期間にわたる観測実験を実施した。図2に532nmのHSRLで得られたデータの例を示す。国立環境研の装置では偏光解消度も同時に測定するので、重要なパラメータである後方散乱係数、消散係数、ライダー比、粒子偏光解消度を全て求めることができる。例えば図2において、6kmより上に観測されている強い散乱の部分のライダー比を見ると20sr程度以下の小さな値になっていて他の部分とは大きく異なることがわかる。また、粒子偏光解消度が非常に高いことも分かる。これは、この部分が非球形な雲（すなわち氷雲）であることを表している。

平成15-17年度の国際交流課題では、このHSRLを用いた継続的観測を2年以上にわたって行い、雲、エアロゾルの光学パラメータの統計的な値を求めた。図3にライダー比のヒストグラムを示す。雲のライダー比は平均値が約18srで分布は比較的狭いのに対して、エアロゾルは広い範囲に分布する。非球形エアロゾル（黄砂）と球形エアロゾルを比較すると、ピーク値はいずれも50-60srであるが、球形粒子のライダー比はより広い範囲に分布する。これは、ブラックカーボンのような大きな値を持つものや海塩のように小さな値を持つものがあることによると理解される。この他、球形エアロゾルのライダー比の相対湿度に対する依存性や、雲のライダー比の高度依存性などの解析を行った<sup>5)</sup>。また、このHSRLを用いてNASAの衛星搭載ライダーGLAS（2003年打ち上げ）およびCALIPSO（2006年打ち上げ）の検証観測に参加し、データを提供した。

一方、532nm HSRLの研究の中で、黄砂エアロゾルの特性評価手法としてシリカ( $\text{SiO}_2$ )のラマン散乱を測定する手法を考案した。これは、532nmの送信光の $\text{SiO}_2$ のラマン線( $466\text{cm}^{-1}$ )（波長 $\lambda_r=545.8\text{nm}$ ）を測定するもので、HSRLを同時に用いることで減衰を補正して定量的に測定する。国立環境研のHSRLを用いて実験を行ない、世界で初めて大気中の黄砂に含まれる黄砂の測定に成功した<sup>6)</sup>。この方法は、黄砂性エアロゾルの輸送途上の変性などの研究に非常に有効であると考えられる。しかし、シリカのラマン散乱は非常に微弱で測定には大出力なレーザーが必要であるため、定常的な観測システムへの応用はむずかしい。

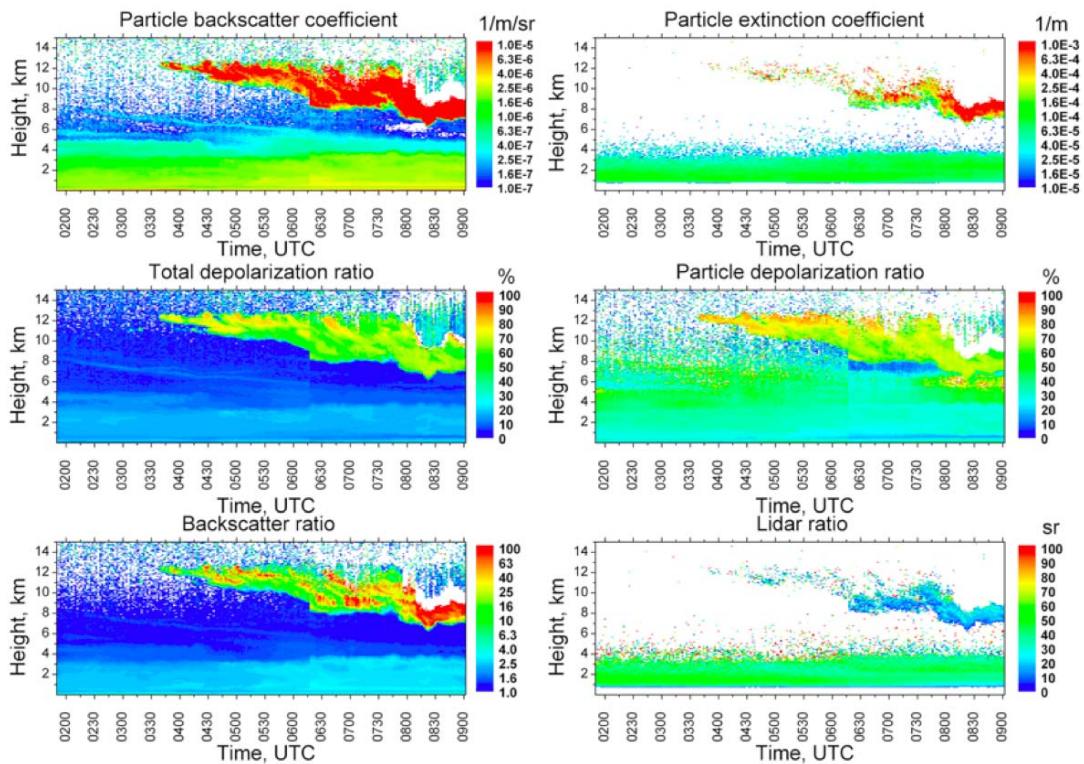


図2 532nmの高スペクトル分解ライダーで得られた後方散乱係数（左上）、全偏光解消度（左中）、後方散乱比（ミー散乱／レイリー散乱）（左下）、消散係数（右上）、粒子偏光解消度（右中）、ライダー比（右下）。2005年4月6日、09:50-19:20JST。

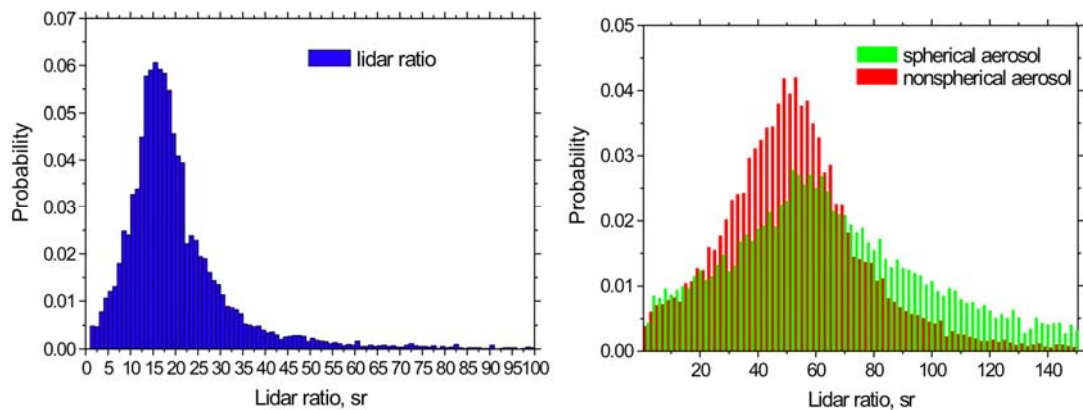


図3 つくばにおいて測定されたライダー比のヒストグラム。雲について（左）、球形エアロゾル、非球形エアロゾルについて（右）。

#### 4-2 エタロンを用いた355nmの高スペクトル分解ライダー技術の研究

Nd:YAGレーザーの第三高調波である355nmではヨウ素フィルターのような適当な分子フィルターが得られない。そこでファブリペロ干渉計などの光学素子を用いて受信信号を分光する必要があり、技術的な難易度が高い。これまで、355nmのHSRLは世界的にも例がなかったが、本研究ではファブリペロ・エタロンを用いたHSRLの開発を福井大学において行ないこれに成功した<sup>7)</sup>。

図4にエタロンを用いる場合の受信系の概念を示す。この場合、エタロンは狭帯域のバンドパスフィルターとして働く。従って、受信光のうちのミー散乱成分のみを選択して受信するチャンネルと全散乱を受信するチャンネルを用いる。図5に開発したシステムのブロック図を示すが、このシステムでは偏光解消度を測定するためにさらにもう1つの受信チャンネルを設けている。

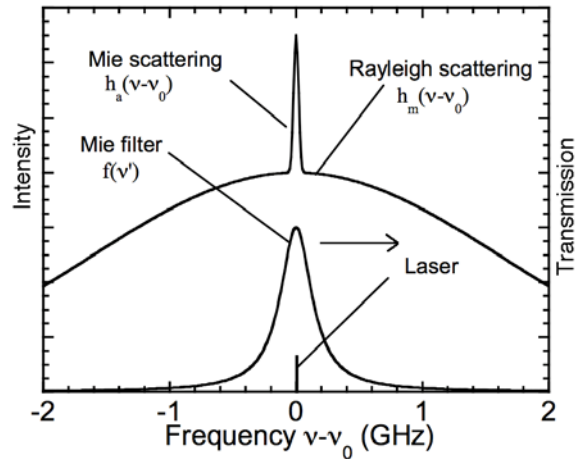


図4 エタロンを用いるHSRLの受信光とエタロン（バンドパスフィルター）のスペクトル。

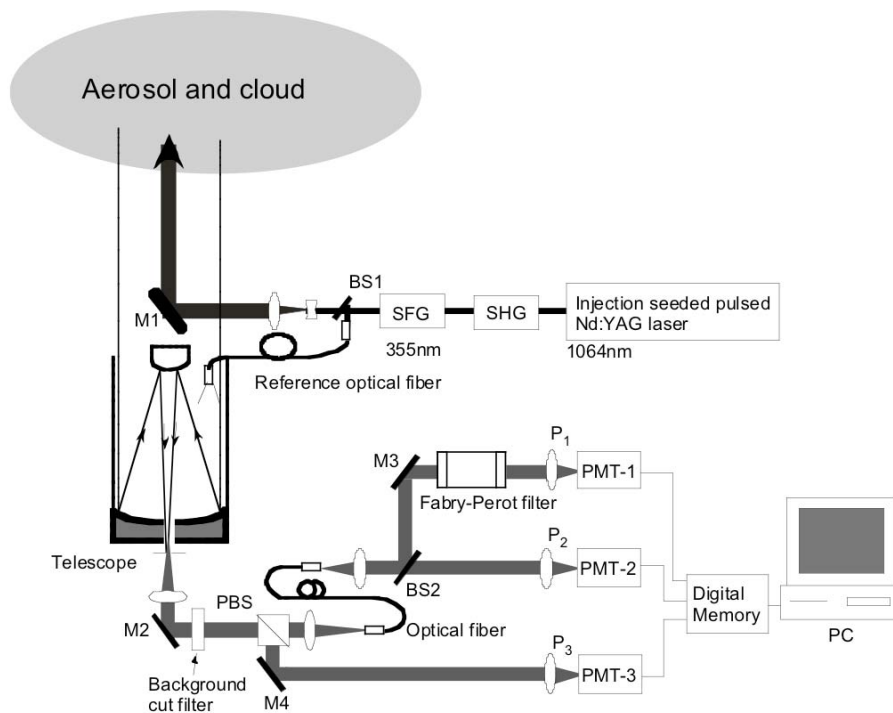


図5 エタロンを用いた355nmの高スペクトル分解ライダーのブロック図

開発した355nmの高スペクトル分解ライダーを用いて様々な気象状況の下でエアロゾル、雲の測定を行った。図6に測定した対象を散乱強度（消散係数）と偏光解消度で分類した結果を示す。ここでは、球形エアロゾル、非球形エアロゾル、水雲、氷雲の4つのカテゴリーに分類した。

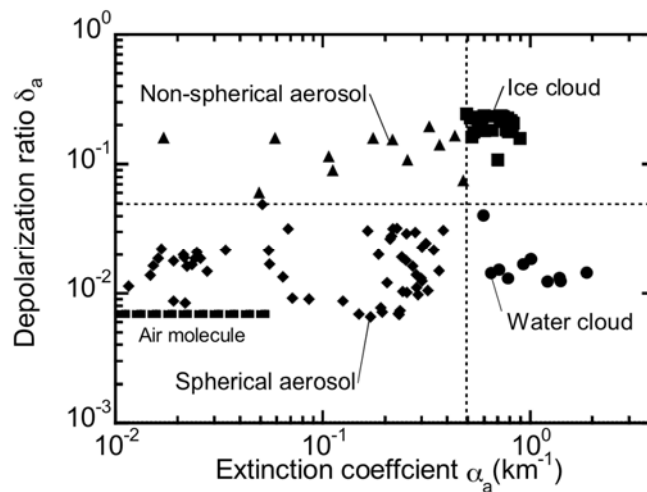


図6 355nmのHSRLで測定した種々の測定対象の分類。

それぞれのカテゴリーのライダー比の分布を図7に示す。

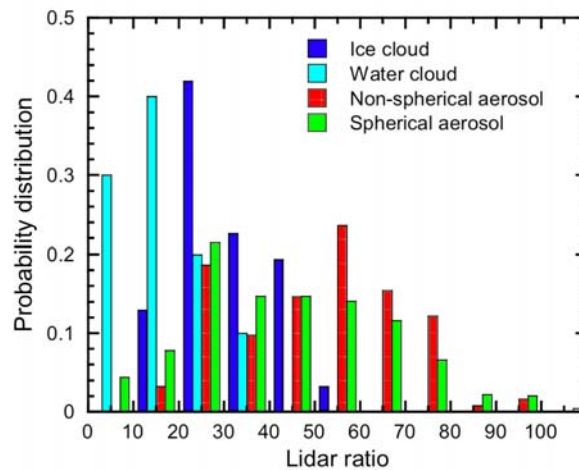


図7 355nmのHSRLで測定された球形エアロゾル、非球形エアロゾル、水雲、氷雲のライダー比

図7は、532nmの場合の図3に相当するものである。これまでのところ観測数はまだ十分に多いとは言えないが、HSRLでこのような観測が行われたのは世界的にもこれが最初であると思われる。エアロゾルの $S_1$ のピーク値は50-60srで、分布を見る限りでは532nmと大きな違いは見られていない。しかし、ラマン散乱ライダーを用いたこれまでの観測結果によると、532nmと355nmの $S_1$ を同時に測定した場合、エアロゾル種によってその波長特性が異なることが報告されている。従って、エアロゾルの特性評価には2波長同時のライダー比の測定が有効であると考えられる。

本研究では、532nmと355nmの両波長のHSRLの技術が開発された意義は大きく、今後これらを組み合わせた2波長のHSRLシステムの開発が望まれる。HSRLはラマン散乱ライダーと比べて感度が高いので、小型で昼夜観測可能な自動観測システムの実現が期待される。

#### 4-3 航空機および研究船「みらい」を用いたライダー観測



ライダーと雲レーダーの複合利用による雲の微物理量の導出を主目的として、航空機および研究船「みらい」を用いた観測研究を行った。ガルフストリームII型機搭載用の355nmのミー散乱ライダーを開発し、2003年3月15日から4月16日に行われたAPEX-E3の観測キャンペーンで、雲レーダー(SPIDER)との同時観測実験を行った。その後、ライダーを532nmと1064nmの2波長に改造して海洋研究開発機構のパラオ観測(2004年3月2日-12日)に参加し、パラオ周辺における3回のフライトの他、名古屋、パラオ間の往復のフェリーフライトで観測を行った。さらに、2007年4月にはCALIPSO、CLOUDSATとの同期フライトを行った。



図8 ガルフストリームII型機のポッドに搭載された雲レーダ(写真左)とキャビン内のライダー装置(中央と右)。

一方、国立環境研では海洋研究開発機構の研究船「みらい」によるライダー観測を1999年から実施してきた<sup>8-10)</sup>。雲レーダー(SPIDER)との同時観測は2001年のACE-Asia観測キャンペーンを機に開始された(MR01-K02, MR01-K05)。本研究では、2004年(平成16年度)から、千葉大学が開発したFMCW方式の雲レーダーとの同時観測を行った(MR04-07, MR04-08, MR05-04, MR05-05, MR06-05)。国立環境研では、この他、海洋上のエアロゾルの分布を広い海域で長期にわたって観測するために、「みらい」のゾンデコンテナに小型の2波長ライダー(1064nmと532nmの後方散乱+532nmの偏光解消度)を搭載して観測を継続した。

航空機および「みらい」を用いた観測結果のうち、雲レーダーとの複合解析についてはサブテーマ1で報告されるので、ここではライダーデータのみによるエアロゾルの解析結果について報告する。

図9は、「みらい」の西部太平洋域のライダー観測で得られたエアロゾルの光学的厚さを地図上にプロットした例である。ここでは、水溶性エアロゾルと海塩またはダストの2種類のエアロゾルモデルを仮定した2波長の解析アルゴリズム<sup>11)</sup>を用いた。「みらい」の観測データは、場所も時間も一定でないため、気候学的な解析が難しいが、MR01-K05について光学的厚さと消散係数プロファイルの緯度、経度分布をプロットした例を図10に示す。この例では、高緯度(35-38度)でエアロゾル濃度が高く、また、インド洋で濃度が高い傾向が見られる。しかし、陸からの距離などの条件が場所毎に異なるので解釈は簡単ではない。

「みらい」データの解析におけるひとつの有効な方法は、エアロゾル気候モデルで計算されたエアロゾルと雲の分布を「みらい」の航路(位置と時間)に沿って切り出したものを観測結果と比較することである。この方法によってモデルを検証し、モデルの問題点を解析することができる。図11に、MR01-K05の結果をエアロゾル気候モデルSPRINTARS<sup>12)</sup>と比較した例を示す。

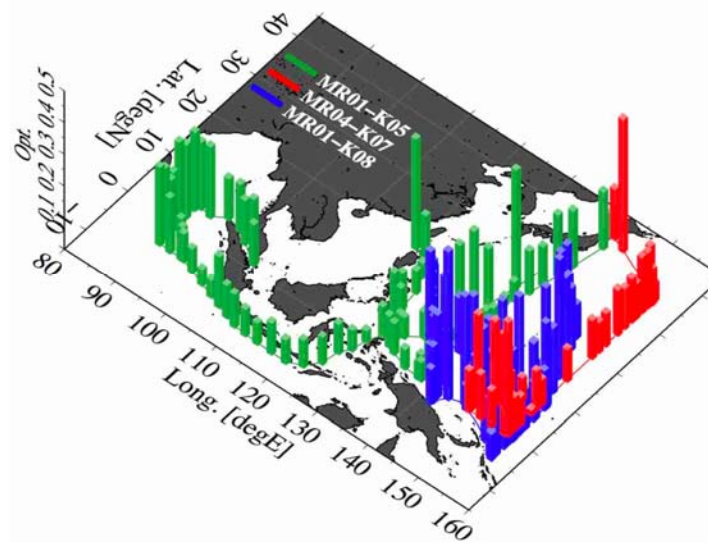


図9 「みらい」のライダーで観測されたエアロゾルの光学的厚さを地図上にプロットした例。

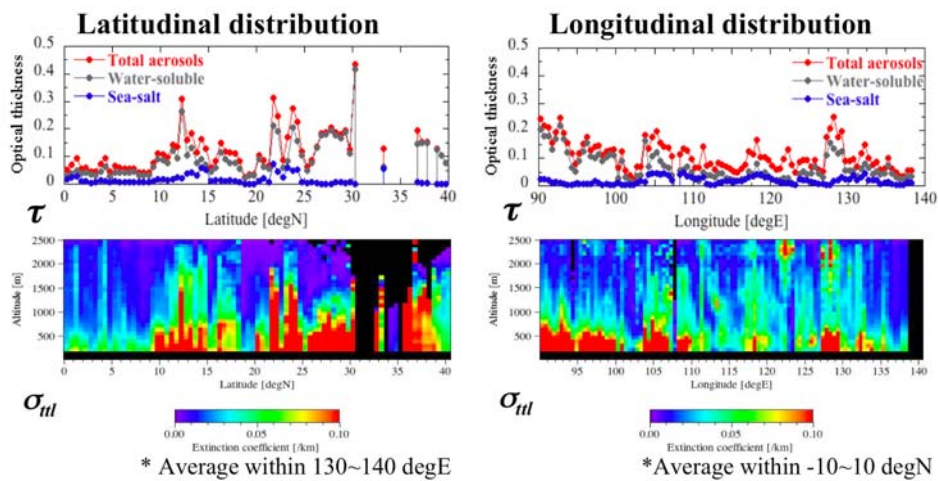


図10 「みらい」MR01-K05観測で得られた光学的厚さと消散係数プロファイルの緯度、経度分布。

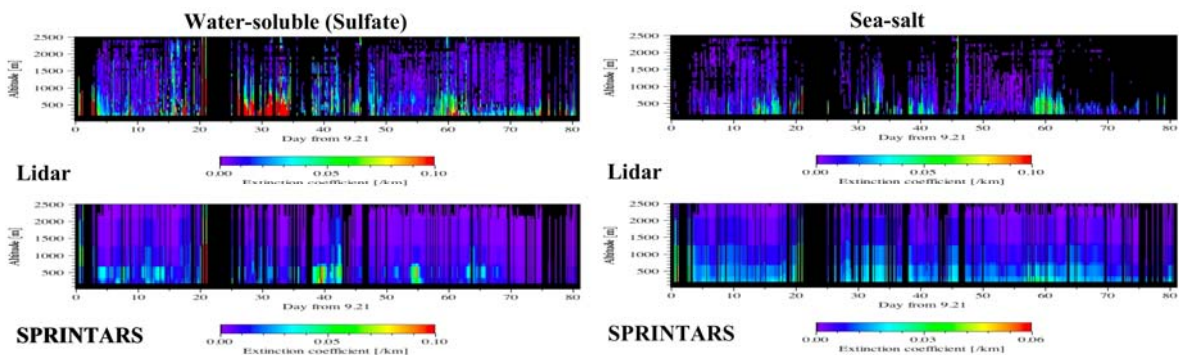


図11 「みらい」MR01-K05観測で得られた水溶性エアロゾル（硫酸塩）と海塩の消散係数プロファイルをエアロゾル気候モデルSPRINTARSによる計算結果と比較した例。

図11の比較結果を見ると、海塩についてはSPRINTARSにより観測が比較的良く再現されるが、人為起源の水溶性エアロゾル（硫酸塩）については、分布パターンにも違いが見られる。これはおそらく、人為起源エアロゾルの発生のインベントリーデータ（あるいはイベント的な発生源データの必要性）等の問題によるものと思われる。海塩については比較的簡単な物理モデルで記述できるので再現性が良いと考えられる。このような解析は、2003年に行われた南半球一周クルーズ（MR03-K04）などについても行った。エアロゾル気候モデルとの比較では同様の結果が得られている。

#### 4-4 高スペクトル分解ライダーデータを用いたエアロゾル分布の解析手法の研究

本研究では、532nmと355nmの両波長の高スペクトル分解ライダー(HSRL)により、それぞれの波長で後方散乱係数、消散係数（すなわちライダー比）を測定する手法を開発した。また、従来から用いている国立環境研の2波長ミー散乱ライダーでは、1064nmと532nmの後方散乱信号と532nmの偏光解消度が測定される。データ解析においては、これらの情報を合わせて、エアロゾルの特性とその分布を求める手法が必要である。

本研究では、従来のFernald法によるミー散乱ライダーの解法に加えて、偏光解消度を用いた非球形のミネラルダストと球形エアロゾルの分類手法<sup>13,14)</sup>を用いた解析を行った。また、あらかじめエアロゾルモデルを仮定して、1064nmと532nmのミー散乱と532nmの偏光解消度から、海塩またはダストと水溶性エアロゾル（硫酸塩）の分布を推定する手法を「みらい」のデータ解析等に応用した<sup>12)</sup>。さらに、532nmのHSRLで得られる消散係数（あるいはライダー比）の情報を加えることにより、海塩またはダストと水溶性エアロゾル（硫酸塩）に加えて、ブラックカーボン(soot)の分布を推定するアルゴリズムを開発した。図12は、この手法をつくばの2波長小型ライダーと532nmのHSRLのデータに適用した一例である。

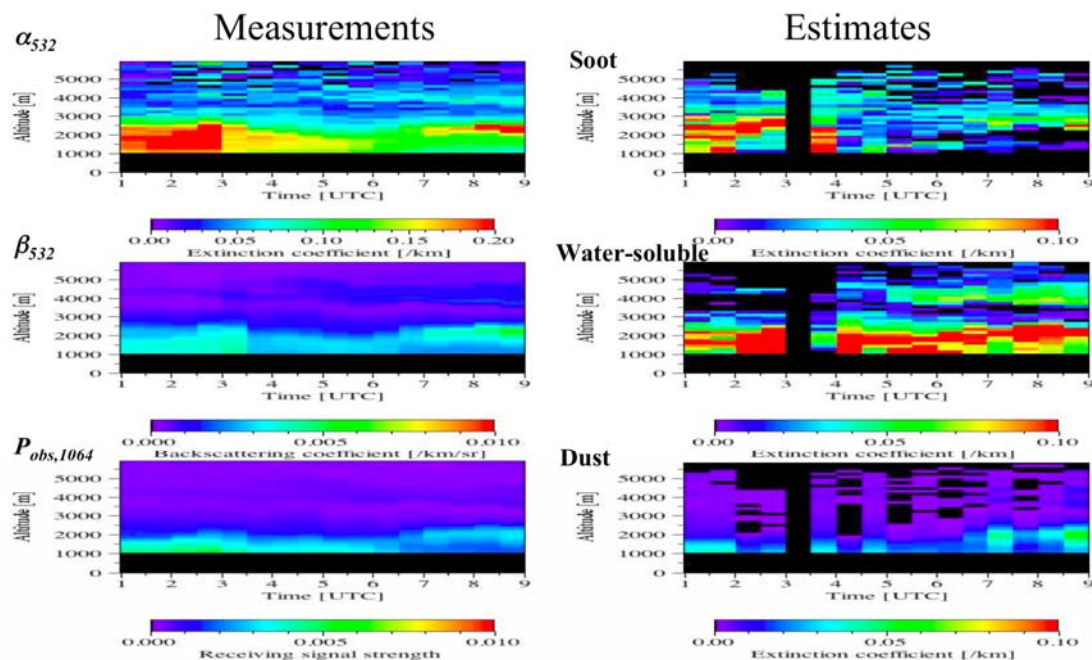


図12 つくばの2波長小型ライダーと532nmのHSRLデータによる、ダスト（海塩）、人為起源水溶性エアロゾル、ブラックカーボン(soot)の分布の推定。2004年4月8日の例。

この結果は、独立な後方散乱係数と消散係数（ライダー比）の情報が光吸収性のエアロゾルの推定に有効であることを示すものである。

最近、特に欧州のライダー研究者の間では、後方散乱のデータを  $\beta$ 、消散係数の測定（ラマン散乱ライダーあるいはHSRLによるもの）を  $\alpha$  と表して、例えば、3波長の後方散乱ライダーで532nmと355nmのラマン散乱測定があれば、 $2\alpha + 3\beta$  などと表すことが多い。数字は波長の数を表す。ここで、さらに偏光解消度を  $\delta$  と呼ぶことにすると、図12に示す方法は、 $1\alpha + 2\beta + 1\delta$ （スイッチ）のアルゴリズムと言える。この方法では偏光解消度は閾値による海塩とダストの判定にのみに使っているため、ここでは（スイッチ）と表した。欧州では最近、 $2\alpha + 3\beta$  から、インバージョン法を用いて有効粒径と単散乱アルベドを求める方法がよく用いられる<sup>15,16</sup>。しかし、この方法は、混合状態のエアロゾルが取り扱えないこと、複素屈折率の虚部の波長依存性が入っていないこと、非球形性が取り扱えないこと、導出結果をモデル検証・同化に使うことが難しい（モデルとの整合性が悪い）ことなどの問題を持つ。おそらくこの手法は、発生源が比較的良く分っているエアロゾルについて、光学モデルを改良するための解析に用いるのが有効であろう。

Nd:YAGレーザーを利用して現実的に得られる測定パラメータのフルセットは、 $2\alpha + 3\beta + 3\delta$  である。1064nmではレイリー散乱、ラマン散乱の測定は困難なので、ここでは $3\alpha$ ではなく $2\alpha$ としている。また、多波長の $\delta$ 測定は、エアロゾルの混合状態を敏感に反映することが実験的に示されているので重要である<sup>17</sup>。本研究で開発されたHSRL技術を応用して次世代の小型ライダーを開発すれば、 $2\alpha + 3\beta + 3\delta$ の昼夜の自動連続測定も夢ではない。データ解析アルゴリズムについても、このフルセットのデータ、特に偏光解消度を定量的に取り扱えるような統一的なアルゴリズムの開発が必要である。そのためには、まず非球形性が入ったエアロゾルの光学モデルの構築が必要である。なお、上のような観点から現在の主要な地上ライダー、航空機ライダー、衛星搭載ライダーの仕様をまとめると表1のようになる。

表1 現在の地上ライダー、航空機ライダー、衛星搭載ライダーの仕様

NIESライダー（SKYNET-lidar等）	$2\beta$ (1064, 532nm) + $1\delta$ (532nm)
Suwon(Kyung Hee大学)のライダー	$2\beta$ (1064, 532nm) + $2\delta$ (1064, 532nm)
NIES HSRL	$1\alpha + 1\beta + 1\delta$ (532nm)
福井大学HSRL	$1\alpha + 1\beta + 1\delta$ (355nm)
EARLINETラマン散乱ライダー	$2\alpha + 3\beta$
NASA Langley航空機ライダー	$1\alpha$ (532nm) + $2\beta$ (1064, 532 nm) + $2\delta$
LITEスペースシャトル実験(1994)	$3\beta + 1\delta$ (532nm)
ICESAT/GLAS (2003-)	$2\beta$ (1064, 532nm)
CALIPSO/CALIOP (2006-)	$2\beta$ (1064, 532nm) + $1\delta$ (532nm)
ADM-Aeolus (200?)	$1\alpha$ (355nm) + $1\beta$
EarthCARE/ATLID(2013?)	$1\alpha$ (355nm) + $1\beta + 1\delta$

表1に見られるように、特に衛星搭載ライダーでは測定パラメータが非常に限定される。本研究の中では、受動型イメージャーとライダーの複合利用によるエアロゾル測定についても可能性を示したが、今後、EarthCAREのデータ処理アルゴリズム等を開発するに当たっては、先に述べたような統合的なエアロゾルモデルを構築した後に、限られた測定パラメータを最大限活用できる方法を再検討する必要がある。また、CALIPSOの検証実験などの事例から、地上の観測システムの重要性が改めて実感される。衛星搭載ライダーは地球規模の巻雲の分布や自由対流圏のエアロゾル分布の観測には極めてインパクトのあるデータを与えるが、例えば、地域規模の大気環境の観測においては、観測頻度、観測パラメータ、測定精度のいずれも非常に限られたものである。地上の観測システムと衛星観測システムを統合した解析が今後の重要な課題となると考えられる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

エアロゾルの光学特性の定量測定手法である高スペクトル分解ライダー(HSRL)が532nmと355nmの2波長で開発され、観測によりライダー比等の気候値が得られた。また、HSRLで測定される独立な後方散乱係数、消散係数(従ってライダー比)の情報が、エアロゾルの特性と分布を推定するために有効であることが示された。

これによって、宇宙航空研究開発機構が欧州宇宙機関と共同で開発を進めているEarthCARE搭載ライダーATLIDのデータ処理アルゴリズム開発の見通しが得られた。

また、本研究で開発された2波長のHSRLの基礎技術は、将来の地上観測システムのための多波長HSRLの実現の可能性を示すものである。現在、欧州を中心に多波長ラマン散乱ライダーが用いられているが、ラマン散乱は感度が低く、昼間の観測が難しい、大型で自動運転も容易ではないなどの問題がある。本研究により、これに変わる小型の昼夜自動連続観測可能な多波長偏光HSRL( $2\alpha + 3\beta + 3\delta$ )の開発のための基礎技術が確立された。さらに解析手法においても研究の方向性が明確になった。

一方、航空機および研究船「みらい」を用いた2波長偏光ミュー散乱ライダーと雲レーダーの同時観測により、ライダーとレーダーの複合解析による雲微物理量導出のためのデータセットが構築された。

また、「みらい」搭載ライダーによる長期間の観測によって、広範囲の海洋上のエアロゾルと雲の分布のデータセットが構築された。さらに、エアロゾル気候モデルの検証など、データ利用の方法が示された。

この他、HSRL研究の過程で、大気中の黄砂に含まれる二酸化ケイ素の測定手法が開発された。これは新しいエアロゾルサイエンスに発展する可能性のある計測技術である。

### (2) 地球環境政策への貢献

直接的な貢献はない

## 6. 引用文献

1) EarthCARE- Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer, Report for Assessment, ESA SP-1257(1)

September 2001.

- 2) Piironen, P. and E. E. Eloranta, "Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter", *Opt. Lett.*, 19, 234-236 (1994)
- 3) Liu, Z., I. Matsui and N. Sugimoto: High-Spectral-Resolution Lidar Using an Iodine Absorption Filter for Atmospheric Measurements, *Optical Engineering* 38(10) 1661-1670, 1999.
- 4) Liu, Z., N. Sugimoto, and T. Murayama: Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed by high-spectral-resolution lidar and Raman lidar, *Applied Optics* Vol. 41, No. 15, 2760-2767, 2002.
- 5) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Two-Year-Observations of Optical Properties of the Tropospheric Aerosol and Clouds by a High-Spectral-Resolution Lidar over Tsukuba, Japan, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 451-454 (3P-17), Nara, Japan, 2006.7.
- 6) Tatarov, B., and N. Sugimoto, Estimation of quartz concentration in the tropospheric mineral aerosols using combined Raman and high-spectral- resolution lidars, *Optics Letters*, Vol. 30, NO. 24, 3407-3409, 2005.
- 7) Imaki, M., Y. Takegoshi, T. Kobayashi, "Ultraviolet high-spectral-resolution lidar using Fabry-Perot filter for the accurate measurement of extinction and lidar ratio", *Jpn. J. Appl. Phy.*, Vol. 44, No. 4, 2005.
- 8) Sugimoto, N., I. Matsui, Z. Liu, A. Shimizu, I. Tamamushi and K. Asai: Observation of Aerosols and Clouds Using a Two-Wavelength Polarization Lidar during the Nauru99 Experiment, *Journal of The Marine Meteorology Society, UMI TO SORA (SEA AND SKY)* 76, 93-98 (2000).
- 9) Sugimoto, N., I. Matsui, Z. Liu, A. Shimizu, K. Asai, K. Yoneyama and M. Katsumata: Latitudinal distribution of aerosols and clouds in the western Pacific observed with a lidar on board the research vessel Mirai, *Geophys. Res. Lett.* Vol. 28, No. 22, 4187-4190 (2001).
- 10) Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, K. Asai, T. Endoh, T. Nakajima: Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai, *Geophys. Res. Lett.* 29, 10,1029/2002GL015112, 2002.
- 11) Nishizawa, T. , H. Okamoto, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, and K. Aoki, An algorithm that retrieves aerosol properties from dual-wavelength polarized lidar measurements, 2006JD007435R, *J. Geophys. Res.* VOL. 112, D06212, doi:10.1029/2006JD007435, 2007
- 12) Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, (2005), Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *J. Geophys. Res.*, 110, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- 13) Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki, Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidar in China and Japan during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S17, doi:10.1029/2002JD003253, 2004.
- 14) Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, U. Itsushi, K. Arao, Y. Chen, S. Zhao, J. Zhou, and C-H. Lee (2005), Study of Dust Transport Using a Network of Continuously Operated Polarization Lidars, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 5, 145-157.

- 15) Müller, D., Wandinger, U., and Ansmann, A. (1999), Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory, *Appl. Opt.*, **38**, 2346-2357, 1999.
- 16) Müller, D., Wandinger, U., Althausen, D., and Fiebig, M. (2001). Comprehensive particle characterization from three-wavelength Raman-lidar observations: case study, *Appl. Opt.* **40**, 4863-4869.
- 17) Sugimoto, N. and C-H. Lee, Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths, *Applied Optics*, Vol. 45, No. 28, 7468-7474, 2006.

## 7. 国際共同研究等の状況

- 1) 放射観測衛星EarthCAREに関する宇宙開発機構と欧州宇宙機構のJoint Mission Advisory Groupに参加。
- 2) 国立環境研の532nmの高スペクトル分解ライダーを用いて米国航空宇宙局（NASA）の衛星搭載ライダーGLASの検証実験に参加。また、2006年4月に打ち上げられたNASAの衛星搭載ライダーCALIPSOの検証実験に参加。高スペクトル分解ライダーデータを提供。
- 3) WMOのGlobal Atmosphere Watch(GAW)のライダーネットワークの構築のためのワークショップおよび報告書の作成に参加。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Yaunaga, Kazuaki, Kunio Yoneyama, Hisayuki Kubota, Hajime Okamoto, Atsushi Shimizu, Hiroshi Kumagai, Masaki Katsumata, Nobuo Sugimoto, and Ichiro Matsui, Melting layer cloud observed during R/V Mirai cruise MR01-K05, *Journal of the Atmospheric Sciences* (accepted, March 2006, JAS-188)
- 2) Nishizawa, T., H. Okamoto, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, and K. Aoki, An algorithm that retrieves aerosol properties from dual-wavelength polarized lidar measurements, 2006JD007435R, *J. Geophys. Res.* VOL. 112, D06212, doi:10.1029/2006JD007435, 2007
- 3) Sugimoto, Nobuo and Choo Hie Lee, Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths, *Applied Optics*, Vol. 45, No. 28, 7468-7474, 2006.
- 4) Kamei, A., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, and T. Shibata, Volcanic Aerosol Layer Observed by Shipboard Lidar over the Tropical Western Pacific, *SOLA*, Vol. 2, 001-004, doi:10.2151/sola.2006-001, 2006.
- 5) Tatarov, B., and N. Sugimoto, Estimation of quartz concentration in the tropospheric mineral aerosols using combined Raman and high-spectral-resolution lidars, *Optics Letters*, Vol. 30, NO. 24, 3407-3409, 2005.
- 6) Iwasaki, S., Tsushima, Y., Shirooka, R., Katsumata, M., Yoneyama, K., Matsui, I., Shimizu, A., Sugimoto, N., Kamei, A., Kuroiwa, H., Kumagai, H., and Okamoto, H., Subvisual cirrus clouds

- observation with a 1064-nm lidar, a 95-GHz cloud radar, and radiosondes on warm pool, *Geophys. Res. Lett.* 31 (9), L09103, doi:10.1029/2003GL019377, 2004.
- 7) Imaki, M., Y. Takegoshi, T. Kobayashi, “Ultraviolet high-spectral-resolution lidar using Fabry-Perot filter for the accurate measurement of extinction and lidar ratio”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 4, 2005.
  - 8) Hua, D., T. Kobayashi, “UV Rayleigh-Mie Raman Lidar for Simultaneous Measurement of Atmospheric Temperature and Relative Humidity Profiles in the Troposphere”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 3, 2005.
  - 9) Hua, D., M. Uchida, T. Kobayashi, “Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar for daytime-temperature profiling of the troposphere”, *Appl. Opt.*, **44**, pp.1315-1322, 2005.
  - 10) Hua, D., T. Kobayashi, “Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere”, *Appl. Opt.*, **44**, pp.1305-1314, 2005.
  - 11) Voelger, P., A.Y.S. Cheng and N. Sugimoto, Influence of atmospheric and systematic parameters on multiple scattering in spaceborne backscatter lidar measurements, *Applied Optics* Vol. 44, No. 6, 1051-1065, 2005.
  - 12) Hua, D., M. Uchida, T. Kobayashi, “UV high-spectral-resolution Rayleigh - Mie lidar with dual-pass Fabry - Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere”, *Opt. Lett.*, vol. 29, 2004.
  - 13) 三浦和彦、児島紘、加藤俊吾、新村典子、杉本伸夫、鶴野伊津志、植松光夫, 観測船「みらい」で測定した海洋大気エアロゾルの物理, 化学特性、海洋、Vol. 36, No. 2, 154-158, 2004.
  - 14) 杉本伸夫、松井一郎、清水厚、岡本創、西澤智明、亀井秋秀、黒岩博司、熊谷博, 「みらい」ACE-Asia航海(MR01-K02)におけるエアロゾルと雲のライダー観測、エアロゾル研究、Vol.19, No.2, 97-102, 2004.
  - 15) 三浦和彦、児島紘、加藤俊吾、杉本伸夫、松井一郎、清水厚、鶴野伊津志、新村典子、植松光夫, 「みらい」航海におけるエアロゾルの物理特性、エアロゾル研究、Vol.19, No.2, 108-116, 2004.
  - 16) Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, K. Asai, T. Endoh, T. Nakajima: Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai, *Geophys. Res. Lett.* 29, 10,1029/2002GL015112, 2002.

<査読付論文に準ずる成果発表> 該当なし

<その他誌上発表（査読なし）> 該当なし

- 1) Sugimoto, N., Lidar methods for measuring distributions and characteristics of aerosols and clouds, *SPIE* 5226, 223-233, 2003.

(2) 口頭発表（学会）



- 1) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, Lidar Determination of Quartz Concentration in the Tropospheric Mineral Aerosols - Methodology and First Results, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 23-26 (2O-3), Nara, Japan, 2006.7.
- 2) Okamoto, H., T. Nishizawa, K. Sato, S. Otake, M. Senu, T. Takemura, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Siihimizu, H. Kumagai, Y. Ohno, T. Takano and T. Nakajima, Microphysics of Clouds and Aerosols by Combined Use of Lidar and Cloud Radar, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 337-349 (3O-8), Nara, Japan, 2006.7.
- 3) Nishizawa, T., H. Okamoto, T. Takemura, K. Aoki, N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu, Aerosol Optical Properties Retrieved From Dual-Wavelength Polarized Lidar Measurements during Mirai MR01K02 Cruise, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 443-446 (3P-14), Nara, Japan, 2006.7.
- 4) Kim, Man-Hae, Soon-Chang Yoon, Sang-Woo Kim, Nobuo Sugimoto, Atsushi Shimizu, Comparison of Vertical Extinction Profiles Obtained from 2 Ground-Based Mie-Scattering Lidars at Gosan, Korea during ABC-EAREX2005, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 449-450 (3P-16), Nara, Japan, 2006.7.
- 5) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Two-Year-Observations of Optical Properties of the Tropospheric Aerosol and Clouds by a High-Spectral-Resolution Lidar over Tsukuba, Japan, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 451-454 (3P-17), Nara, Japan, 2006.7.
- 6) Sato, K., H. Okamoto, T. Takemura, N. Sugimoto, H. Kumagai, Development of Algorithms for Air-Motion, Ice Sedimentation and Microphysics Using Lidar and Radar, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 487-490 (3P-27), Nara, Japan, 2006.7.
- 7) Iwasaki, S., I. Matsui, A. Shimizu, N. Sugimoto, M. Shiotani, Observations of subvisual cirrus clouds with a lidar in Tarawa, Kiribati, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 601-604 (4P-15), Nara, Japan, 2006.7.
- 8) Hayasaka, T., K. Aoki, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, S. Satake, and Y. Muraji, Vertical Distribution and Optical Properties of Aerosols Observed over Japan in Spring 2005, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 639-642 (5O-4), Nara, Japan, 2006.7.
- 10) Lee, C-H., N. Sugimoto, C-B. Park, Lidar Depolarization Measurement at Two Wavelengths (532nm and 1064nm) in Asian dust event, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) pp. 837-840 (5P-30), Nara, Japan, 2006.7.
- 11) 杉本伸夫、ライダー手法による雲・エアロゾルの観測 専門分科会「雲・エアロゾルの新しい地球環境観測システム」、つくば、2006.5.

- 12) Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, A. Kamei, B. Tatarov, C-B. Park, S-W. Kim, S-C. Yoon, C-H. Lee, X. Dong, J. Zhou, Lidar inter comparison and network observation of Asian Aerosols using polarization lidars, The 2nd Data Workshop for Atmospheric Brown Cloud (ABC) East Asian Regional Experiment 2005, Seoul, Korea, 2005.10
- 13) Kim, S-W., S-C. Yoon, M-H. Kim, N. Sugimoto, A. Shimizu, E.J. Welton, Comparison of Ground-based Lidar Measurements: Methods of Analysis and Results for Aerosol Extinction Coefficient, The 2nd Data Workshop for Atmospheric Brown Cloud (ABC) East Asian Regional Experiment 2005, Seoul, Korea, 2005.10.
- 14) Shimizu, A., N. Sugimoto, and I. Matsui, Distributions of marine aerosols and Asian dust over Western Pacific observed by airborne Mie-scattering lidar, *The 6th Asian LIDAR Network Meeting*, Gwangju, Korea, 2005.9.
- 15) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Two years of routine high-spectral-resolution lidar measurements of lidar ratio and depolarization ratio of tropospheric aerosols and clouds, *The 6th Asian LIDAR Network Meeting*, Gwangju, Korea, 2005.9.
- 16) Kim, S-W., S-C. Yoon, M-H. Kim, N. Sugimoto, A. Shimizu, E.J. Welton, Comparison of Ground-based Lidar Measurements: Methods of Analysis and Results for Aerosol Extinction Coefficient, *The 6th Asian LIDAR Network Meeting*, Gwangju, Korea, 2005.9.
- 17) Kamei, A., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, T. Shibata, Lidar observation of unusual aerosol layer above the tropopause in the tropical western Pacific, *The 6th Asian LIDAR Network Meeting*, Gwangju, Korea, 2005.9.
- 18) Okamoto H., T. Nishizawa, K. Sato, S. Ohtake, M. Senu, T. Takemura, N. Sugimoto, Study of clouds by shipborne radar and lidar on the R/V Mirai: Its implication for validation of general circulation model, IAMAS 2005, A-19, Beijing, 2005.8.
- 19) Nishizawa, T., H. Okamoto, T. Takemura, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Intercomparison of aerosol vertical profiles retrieved from dual-wavelength polarization lidar data with those simulated from three dimensional aerosol transport model, IAMAS 2005, A-28-29, Beijing, 2005.8.
- 20) Shimizu, A., N. Sugimoto, and I. Matsui, Vertical distributions of clouds and aerosols in Gosan observed with NIES lidar, *ABC-EAREX05*, Kyoto, Japan, 2005.6.
- 21) 亀井秋秀、杉本伸夫、松井一郎、清水厚、南半球周航航海においてライダーで観測したエアロゾル・雲の分布特性、第9回みらいシンポジウム,横浜, 2006.2.
- 22) 西澤智明、岡本創、杉本伸夫、松井一郎、清水厚、2波長偏光ライダーを用いたエアロゾル導出アルゴリズムの開発(III),2005年度日本気象学会秋季大会, p. 449, 神戸, 2005.11.
- 23) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎、タイにおけるエアロゾル鉛直分布構造の長期ライダー観測, 2005年度日本気象学会秋季大会, p. 446, 神戸, 2005.11.
- 24) 大竹慎一、岡本創、浅野正二、杉本伸夫、西澤智明、岩淵弘信、偏光ライダーと赤外放射温度計データによる熱帯における巻雲物理特性の導出、2005年度日本気象学会秋季大会, p. 314, 神戸, 2005.11.
- 25) 亀井秋秀、杉本伸夫、松井一郎、清水厚、柴田隆、海洋地球研究船「みらい」搭載ライダーで観測された火山起源エアロゾル層、2005年度日本気象学会秋季大会, p. 185, 神戸, 2005.11.

- 26) 岡本創、大竹慎一、佐藤可織、扇子みなみ、西澤智明、竹村俊彦、藤吉康志、熊谷博、杉本伸夫、鷹野敏明、中島映至、熱帯・中緯度・極域における雲量と雲微物理量の解析、2005年度日本気象学会秋季大会, p. 53, 神戸, 2005.11.
- 27) 亀井秋秀、杉本伸夫、松井一郎、清水厚、柴田隆、熱帯太平洋域においてライダーで観測された成層圏エアロゾル層、第24回レーザセンシングシンポジウム, pp. 131-132, 鴨川、千葉, 2005.9.
- 28) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎、航空機搭載ライダーによる太平洋上の海洋性エアロゾル・黄砂観測、第24回レーザセンシングシンポジウム, pp. 105-106, 鴨川、千葉, 2005.9.
- 29) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Measurement of the seasonal variation of the lidar ratio for aerosols and clouds by a high-spectral-resolution lidar, 第24回レーザセンシングシンポジウム, pp. 19-22, 鴨川、千葉, 2005.9.
- 30) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu: Systematic observations of lidar ratio for tropospheric aerosols and clouds by high-spectral-resolution lidar over Tsukuba, Japan. 22nd International Laser Radar Conference, pp.329-332, Matera, Italy, 2004.7.
- 31) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu: Observations of the seasonal variations of the tropospheric aerosols optical properties by high-spectral-resolution lidar over Tsukuba, Japan. SPIE Fourth Int. Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium, Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space, Honolulu, Hawaii, USA, 2004.11.
- 32) Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu: High-spectral-resolution lidar observations of aerosols and clouds in the troposphere over Tsukuba, Japan. Earth CARE Workshop, p.27, Tokyo, 2005.4.

(平成16年度以前の口頭発表は省略する。平成14-16年合計53件。)

- (3) 出願特許  
なし
- (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)  
なし
- (5) マスコミ等への公表・報道等  
なし
- (6) その他  
なし