

## A-3 衛星利用大気遠隔計測データの利用実証に関する研究

### (2) 衛星ライダーによるデータの利用に関する研究

環境省国立環境研究所

大気圏環境部 高層大気研究室

杉本 伸夫・松井 一郎・劉 兆岩\*

\*科学技術特別研究員

大気圏環境部

笹野 泰弘

東京都立大学大学院工学研究科

長澤 親生

慶応義塾大学理学部数理科学科

清水 邦夫

東京大学気候システム研究センター

中島 映至

東北工業大学通信工学科

浅井 和弘

平成 10～12 年度合計予算額

72,500 千円

(うち、12 年度予算額

22,903 千円)

[要旨] 衛星搭載ライダー (レーザーライダー) は、雲、エアロゾルの全球的な 3 次元的分布を測定できる能動型の衛星センサーで、気候変動に関わる大気の放射収支等の研究において極めて有用な観測データを与えるものと期待されている。本研究は、衛星搭載ライダーによる計測データから雲、エアロゾルの分布情報や光学的特性を導出するための解析アルゴリズムと、衛星ライダーにより観測した雲、エアロゾルの全球分布データを気候モデル研究等に应用するための手法を確立することを目標とする。衛星ライダーデータの解析アルゴリズムを理論的に検討するとともに、計算機シミュレーションによる衛星搭載ライダーデータを用いて解析アルゴリズムの検証を行った。また、解析手法を研究船搭載ライダー、1994 年に米国で行われたスペースシャトルからのライダー観測実験のデータに適用して検討を行った。一方、気候モデルのモデルの検証や改良のための応用手法について検討した。

[キーワード] 衛星搭載ライダー、ライダー、レーザーライダー、LITE、雲、巻雲、エアロゾル、気候モデル

#### 1. はじめに

衛星搭載ライダーは雲、エアロゾルの立体的な分布構造を地球的規模で観測することができる。これによって、地球温暖化などの気候変動における雲、エアロゾルの役割の解明に極めて有効なデータを得ることができると期待されている。宇宙からのレーザーレーダ計測の最初の実験は NASA のスペースシャトルを用いて 1994 年に行われた。この観測は LITE (Lidar In-Space Technology Experiment) と呼ばれ、YAG レーザの基本波、第二高調波、第三高調波の 3 波長を用いた観測が約 10 日間にわたって行われた。これによって、雲の多層構造やサハラダスト、森林火災のエアロゾルなどが明瞭にとらえられた。

日本の宇宙開発事業団 (NASDA) は、2002 年の打ち上げを目指して、技術実証衛星 2 号機 (MDS2) に搭載するミー散乱レーザーレーダ (ELISE) の開発を進めてきた。1999 年 11 月の H-II ロケットの打ち上げ失敗後の計画の見直しにより、MDS2 の打ち上げは中止されることとなった。NASDA における

ELISE の研究については、将来の地球観測衛星への搭載を目指して継続されることとなった。現在、NASDA と欧州宇宙機関(ESA)との共同による地球放射観測ミッションのためのライダー搭載機器の検討が進められている。

本研究は、当初、MDS2 搭載用ライダーELISE の仕様に基づいた検討を中心にデータ利用手法の研究を実施した。しかし、MDS 計画が中止されたことによって、さらに将来を目指した高機能の衛星搭載ミ-散乱ライダーシステムを考慮した検討が必要とされることとなった。現在、米国航空宇宙局 (NASA) で、PICASSO と呼ばれる衛星搭載ライダーの打ち上げが 2004 年に計画されている。このライダーは ELISE とほぼ同様の観測を行うものである。一方、先に述べた日欧の共同ミッションはさらに次の世代のセンサーとして 2008 年の打ち上げを目指すものである。そこで、本研究では、これらの衛星ライダー計画をも念頭において、衛星搭載ミ-散乱ライダーのデータ解析アルゴリズムとデータ利用手法の研究を進めた。

## 2. 研究目的

衛星搭載ライダーデータから雲、エアロゾルの 3 次元的な分布や光学的特性を導出するためのアルゴリズムを確立し、衛星搭載ライダーによる観測データを気候モデル研究や大気の放射プロセスの研究に応用する手法を確立することを目的とした。

衛星搭載ライダー全般に共通する課題として、多重散乱の問題や、空間分解能や測定傾度の制約、光学的に厚い雲より下の構造が観測できないなど、データ解析において考慮する必要がある問題がある。これらを考慮した解析手法を確立し、今後展開される衛星ライダー観測から最大限に情報を引き出すこと、また、将来のライダー搭載機器の設計やパラメータ設定のための基礎情報を得ることを本研究の目標とした。

## 3. 研究方法

研究目的を達成するために、以下の方法で研究を進めた。

### (i) 衛星ライダーデータ解析アルゴリズムの研究

衛星ライダーによる巻雲、水雲、黄砂などのダスト層、大気境界層のエアロゾル等の測定について最適なデータ解析手法、解析アルゴリズムを検討した。測定対象の光学的なモデルと衛星ライダー仕様を仮定して測定のシミュレーションデータを作成し、それぞれの対象の解析アルゴリズムについての評価を行った。シミュレーションでは、主に、宇宙開発事業団で開発が行われた ELISE の仕様を用いた。

また、解析アルゴリズムを、1994 年に米国航空宇宙局 (NASA) によって行われた、スペースシャトルからのライダー実験、Lidar In-Space Technology Experiment (LITE) のデータに適用して評価を行った。

一方、雲、エアロゾル観測の際に問題となる多重散乱効果に関する検討を行った。複数の視野角を用いるマルチ FOV 受信系により、多重散乱効果を積極的に利用して雲、エアロゾルの特性を抽出する方法についても検討した。なお、多重散乱効果については、国際共同研究課題で、モンテカルロ法を用いた計算機シミュレーションによる評価と、多重散乱効果を考慮したデータ解析手法の研究を並行して行った。

## (2) 衛星ライダーデータの利用手法に関する研究

地上ライダーによりこれまでに蓄積されたデータを用いて雲分布等の統計的な解析を行い、衛星ライダーデータを利用する同様の手法を検討した。また、海洋地球研究船「みらい」に搭載したライダーによる西部太平洋上の広範囲にわたって雲、エアロゾルの観測を行い、衛星ライダーデータを利用した雲、エアロゾル研究の可能性を検討した。

また、東京大学気候システム研究センターのエアロゾル気候モデルを用いて、各種のエアロゾルの地球規模の分布を調べ、2波長の衛星ライダーデータのエアロゾル気候モデルの検証への利用について検討を行った。

## 4. 研究結果と考察

### (1) データ解析アルゴリズムの検討

#### ① 衛星ライダーELISEのデータ解析手法

衛星ライダーによる、雲、成層圏エアロゾル、巻雲、中低層の雲、黄砂などのダスト層、大気境界層の測定のシミュレーションデータを作成し、それぞれについて解析アルゴリズムを検討した。測定毎に以下の解析アルゴリズムを検討した。

これらの解析手法を具体的に評価するために、NASDAで開発された実証衛星ライダー(ELISE)の仕様を想定して、それぞれの測定対象のシミュレーションデータを作成し、これに解析手法を適用して数値的に評価を行った。表1に仮定したライダーの仕様を示す(Sasano et al., 1998)。

表1 仮定した衛星搭載ライダーの仕様

衛星	軌道/高度:	円軌道 / 550 ± 5 km
	対地速度:	6.983 km/s
送信部	レーザー:	半導体レーザー励起 Nd:YLF レーザー
	出力エネルギー:	84 mJ at 1053 nm; 10 mJ at 527 nm
	パルス繰り返し:	100 pps
	送信ビーム拡がり:	0.17 mrad (full angle)
受信部	受信望遠鏡口径:	1000 mm
	受信視野角 (FOV):	0.21 mrad
	受信チャンネル/検出器:	3チャンネル/Si-APD アナログ(1053 nm), フォトンカウンティング(1053 nm, 527 nm)
	測定方向:	鉛直下方
	高度領域:	0 to 35 km
	高度分解能:	100 m

モデルとして、まず、黄砂のようなダスト層を含むもの(モデル1)と低層の雲を含むもの(モデル2)の2つを考えた。それぞれのモデルの527 nmと1053 nmの後方散乱係数のプロファイルを図1の左に示す。各受信チャンネルについて、レーザー1ショットに対する受信信号光子数を、図



1の中央(モデル1)と右(モデル2)に示す。図にはフォトンカウンティング(PC)チャンネルの直線性の確保される領域も表示した。これによると527 nmのPCチャンネルでは、仮定した巻雲、ダスト層で飽和することがわかる。一方、1053 nmのPCチャンネルは巻雲、ダスト層では飽和しないが低層の雲では飽和する。3つのチャンネル全てを考えると、全ての測定対象を観測できることが分かる。

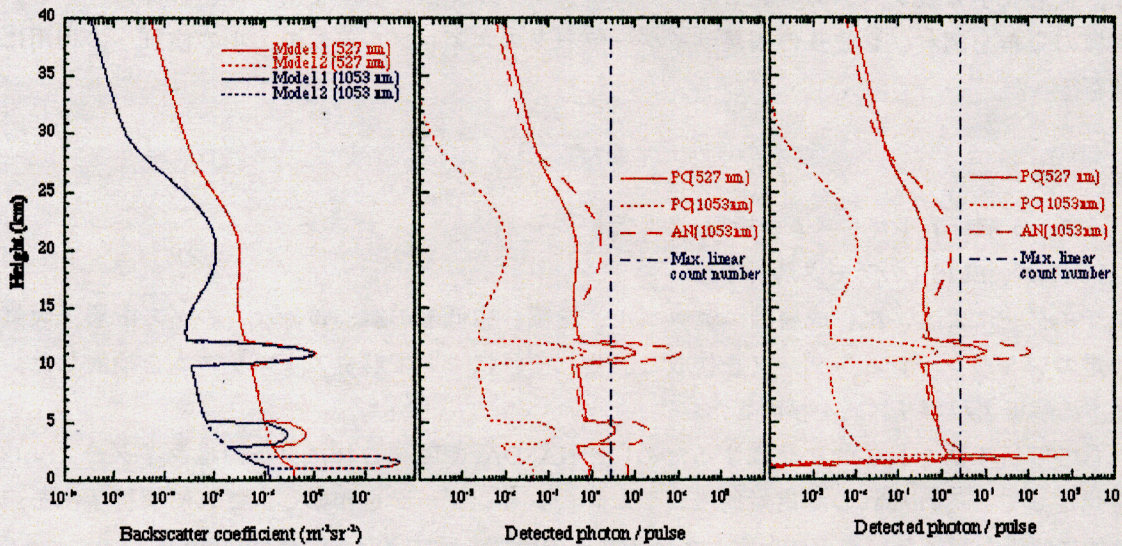


図1 仮定したモデルと、レーザー1ショットに対する各受信チャンネルの信号フォトン数

3つの受信チャンネルのうち、527 nm フォトンカウンティングについては高度30 km~40 kmのレイリー散乱を用いて較正ができる。1053 nmではレイリー散乱が小さいため積算回数を非常に大きくする必要があるが、PCチャンネルはレイリー散乱を用いて較正ができる。積算回数は100,000が必要で、これは地球を数周回る時間に相当するが統計的処理によりこの方法が適用できる。一方、1053 nmアナログチャンネルは、レイリー散乱信号を用いた較正ができない。そこで、適当な散乱係数を持つ巻雲を、1053 nmアナログと1053 nm PCチャンネルの両方で測定して比較することによって較正が可能である。

次に、図2の上段のような大気の2次元的な後方散乱係数のモデルを仮定したシミュレーションを行った。ELISEのそれぞれのチャンネルのシミュレーション信号を図2の2段以下に濃淡表示で示す。シミュレーションでは、検出器の雑音や背景光雑音、デジタル変換の誤差、飽和など、想定される雑音を全て考慮して、それらを数値的に発生させた。図2よりELISEの各チャンネルで雲、エアロゾルの分布が良く観測できることがわかる。

次にこのシミュレーションデータを用いて、それぞれの測定対象について解析アルゴリズムを検討した。

雲の検知については、距離補正信号がある閾値を超えた時に雲と判定する閾値法を評価した。ELISEの仕様の場合、巻雲、水雲、極成層圏雲(PSC)のタイプIbとIIの多くが検知可能であることが示された。



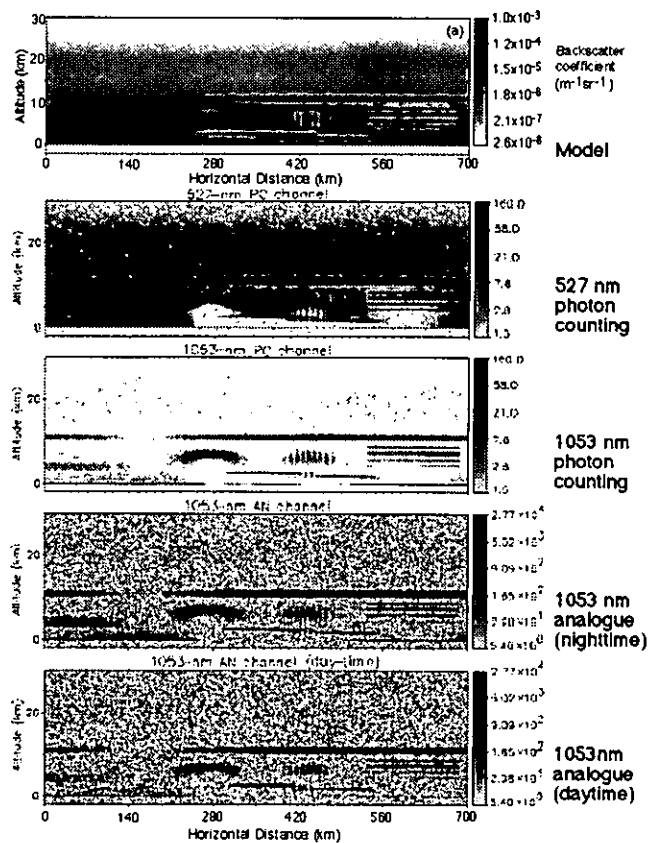


図 2 仮定した 2 次元的大気モデルと ELISE の各チャンネルの信号のシミュレーション結果

雲やエアロゾルの光学特性（後方散乱係数、消散係数）を定量的に求める手法を測定対象毎に検討した結果、成層圏エアロゾルについては、消散係数と後方散乱係数の比（ライダー比、SI）を仮定する 2 成分のフォワードインバージョン法 (Fernald, 1984) により後方散乱係数が比較的精度良く求められる。また、レイリー散乱から光学的厚さを求め、これを拘束条件とする解法も適用できることが示された。

対流圏の雲、エアロゾルについても 2 成分のフォワードインバージョン法を適用することができる。その結果を図 3 に示す。

巻雲については、巻雲の上下で分子によるレイリー散乱信号が得られると考えられるのでこれを利用してまず光学的厚さを求め、これを拘束条件に後方散乱係数のプロファイルを導出する方法を検討した。ELISE の例では、527nm の PC チャンネルは散乱のピークでは飽和する場合が多いと考えられ、一方、1053nm の PC チャンネルは飽和しないが、巻雲の光学的厚さをこのチャンネルから測定するには SN 比が十分でない。そこで、光学的厚さは 527nm から求め、後方散乱係数の導出は 1053nm の PC チャンネルの信号を用いて行う方法を考えた。解析アルゴリズムとして、光学的厚さを拘束条件とする解法と Young によるイタレーション法 (Young, 1995) を検討したがいずれも良い結果が得られた。なお、これらの方法では巻雲の SI を同時に求めることができる。

ダストの層や大気境界層のエアロゾルについては、フォワードインバージョン法の他、2 波長の信号を用いて、2 波長に対する後方散乱係数が相似になるような条件でライダー比と後方散乱係数を求める方法 (Sasano and Browell, 1985) も適用できることを示した (Liu et al. 2000)。

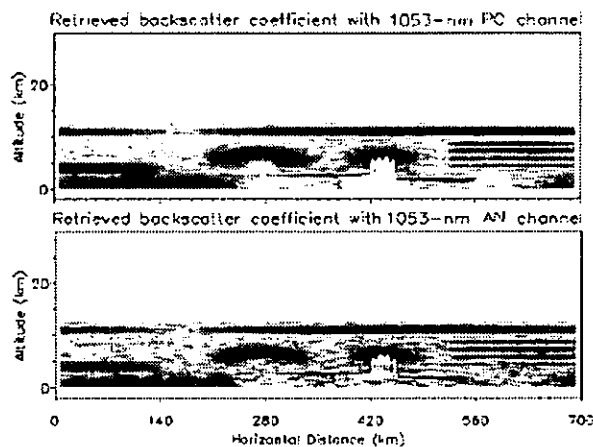


図3 フォワードインバージョン法による解析結果

衛星搭載ライダーでは、多重散乱効果の取扱いが重要であることがシミュレーション結果等から示されているが、データ解析において多重散乱因子と呼ぶひとつのパラメータを導入することで近似的に取り扱われることが示されている。多重散乱因子は、測定対象毎にあらかじめモンテカルロシミュレーション等で評価しておくことができる。これについては、国際交流課題「衛星搭載ライダーにおける多重散乱効果の評価」でシミュレーションを行いその結果を取り入れて解析法を評価した。

② LITE データを用いた解析アルゴリズムの検証

ELISE のシミュレーションデータを用いて評価した各種の測定対象に対するデータ解析手法を、米国航空宇宙局 NASA が 1994 年にスペースシャトルから行ったライダー実験 LITE のデータに適用して、実データを用いた評価を試みた。以下に具体的ないくつかの例を報告する。ここでは、オーストラリア上空を通過した LITE の orbit 125 の観測データを用いた。図 4 に地上 track を示す。

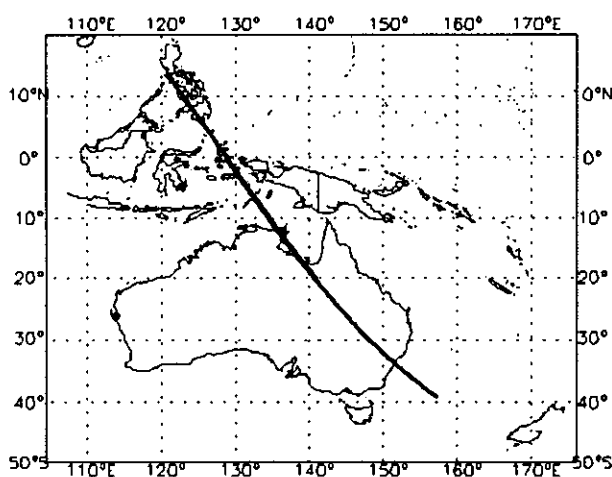


図4 LITE の orbit 125 の地上 track

LITE は 1064nm、532nm と 355nm の 3チャンネルのライダーである。図 5 に 532nm と 1064nm のライダー信号の高度・緯度表示を示す。ライダープロファイルは、10 ショット毎に平均し、また、

鉛直方向に 150 m の幅で平滑化した。高度 16km 以下に雲が、またその上にも薄い雲が観測されている。また、大気境界層のエアロゾル層（約 3km 以下）も観測されている。

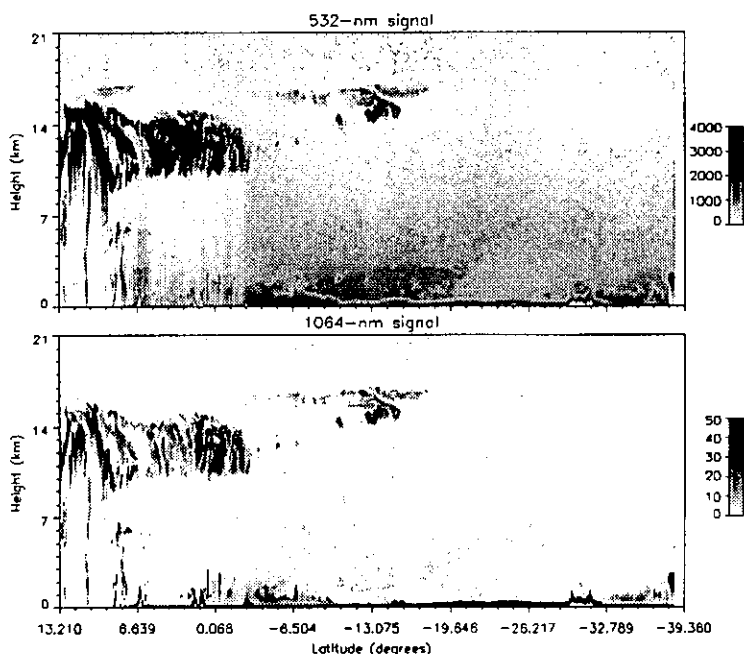


図5 LITE の 532nm と 1064nm の信号の高度・緯度表示

まず、成層圏エアロゾルについて、図 6 (a)に 12.47S-22.76S の間の全てのプロファイルの平均を示す。同時にモデルのレイリー散乱プロファイルも示す。これら是对応する観測データに 6.5-9 km と 28-35 km の領域でフィッティングした。それぞれの波長について、雲の上下でフィットしたレイリー散乱プロファイルの比から光学的厚さを求めた。その結果、532nm で  $0.039 \pm 0.016$ 、355nm で  $0.058 \pm 0.015$  であった。また、消散係数・後方散乱比  $S1$  は、532nm で  $77 \pm 31$  sr、355nm で  $31 \pm 8$  sr であった。さらに成層圏エアロゾルの消散係数と後方散乱係数分布も求めた結果を図 6 (b)に示す。

次に、巻雲の解析結果を示す。薄い巻雲に対しても多重散乱が無視できない。また、図 6 に示したように、10-27km の高度にエアロゾル層があるので、データ解析ではこの層も考える必要がある。そこで、多重散乱効果を考慮した 2 成分アルゴリズムを用いた。図 7(a)に 532nm と 355nm の信号から求めた雲の有効光学的厚さを示す。有効光学的厚さは、巻雲のあるプロファイルの 6.5-9km 部分の信号を巻雲の無い参照プロファイルの同じ部分の信号と比較して求めた。

図 8(a)に、例として巻雲のある 0.068N のプロファイルと巻雲の無い参照プロファイル (19.74 S、100 ショットの平均) を示す。雲の中で、532 nm 信号は飽和しているが、雲信号の以外の信号は飽和していない。巻雲のあるプロファイルの 6.5-9 km の信号は巻雲の減衰で参照プロファイルより小さくなっている。この部分の信号の比が巻雲の往復の透過率であり、この比から巻雲の有効光学的厚さ(多重散乱効果を含む)が求められる。求めた 2 波長の有効光学的厚さ(図 7(a))は、7.84N の右側でよく一致しており(その違いは 0.05 以下)、左側では一致していない。7.84N の左側の雲は厚く、おそらく多重散乱のために有効光学的厚さが正しく推定されていないと思われる。この結果は巻雲の光学特性は波長にあまり依存しないことを示している。

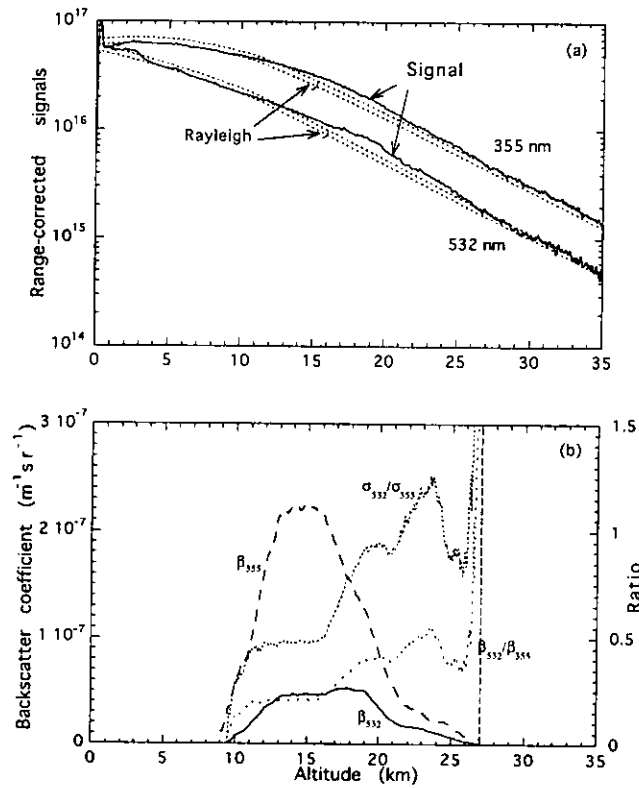


図6 LITEで観測された成層圏エアロゾル。(a)距離補正信号、(b)後方散乱係数の解析結果

推定した 532nm の有効光学的厚さを拘束条件として、532nm と 1064nm のライダー比を求めた結果を図 7(b)に示す。7.84N の左側の雲は厚く、有効光学的厚さが正しく求められていない。13.8S の付近の薄い雲に対して、532nm と 1064nm のライダー比は一致する。しかし、濃い雲に対しては、532nm のライダー比は 1064nm より大きくなっている。これは、532nm の信号の飽和によると考えられる。

図 8(b)は例をとって求めた 0.068N の 532nm と 1064nm の後方散乱係数プロファイルを示す。また、図 9 は求めた 532nm と 1064nm の後方散乱係数の高度・緯度分布を示す。図 8(b)は、信号の飽和により 532nm の雲の後方散乱係数が低く評価されていることを示している。図 9 より、13.8N の付近の薄い雲の構造が 2つの波長でよく一致すること、濃い雲では 532nm の詳細な構造が見えなくなることが分かる。



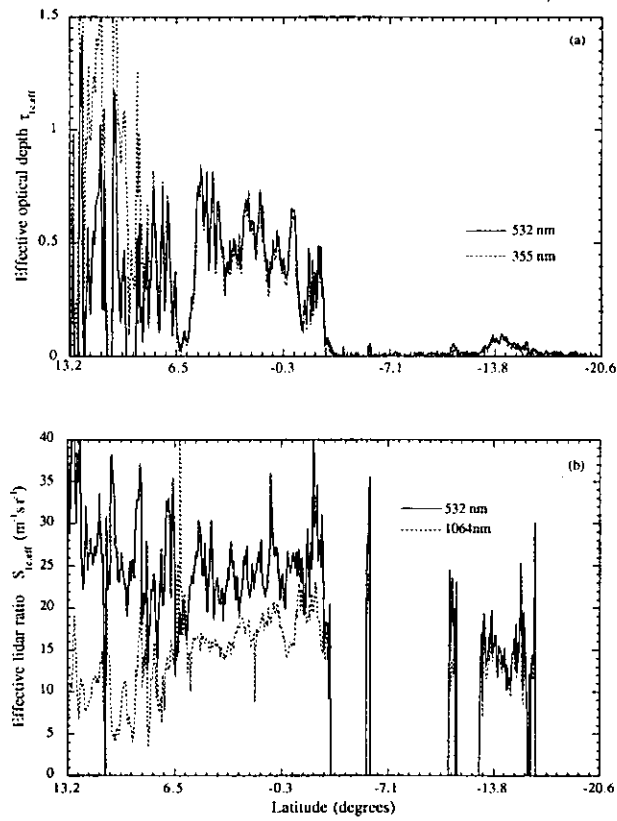


図 7 LITE データから求めた巻雲の光学特性(a)光学的厚さ、 (b) ライダー比、 $S_1$

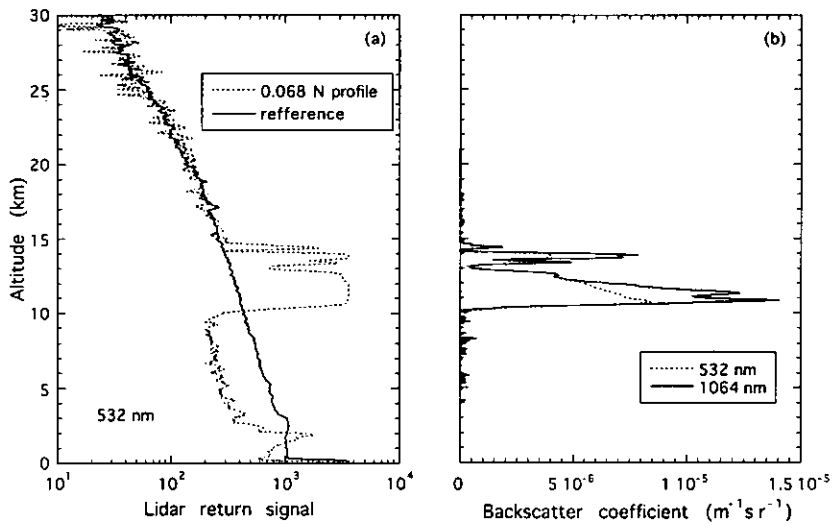


図 8 LITE で観測した巻雲のプロファイル。(a)ライダー信号、 (b) 後方散乱係数の解析結果

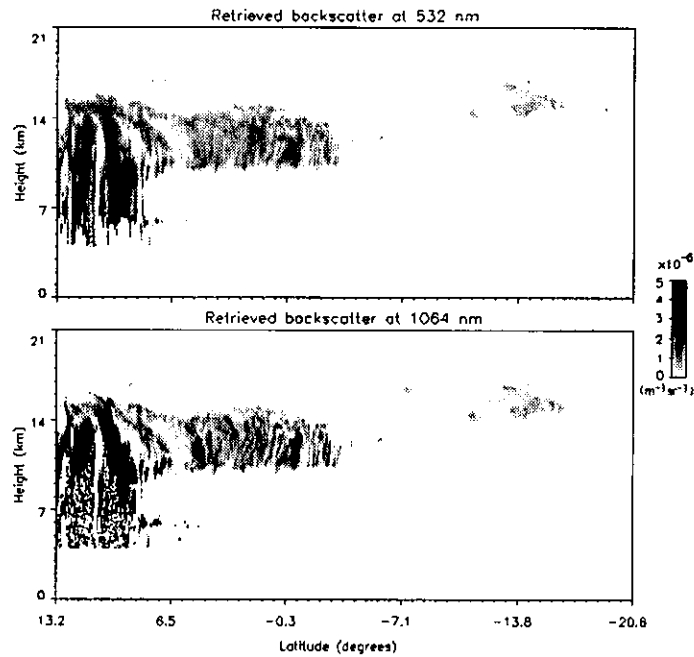


図9 LITE データから求めた巻雲の 532nm と 1064nm の後方散乱係数の高度・緯度分布

エアロゾルについては、まず Fernald の方法によるフォワードインバージョンを行った。その結果を図 10 に示す。ここで、ライダー比（消散係数/後方散乱係数）は 1064nm では 45 sr、532nm では 28 sr（海洋性エアロゾル）と仮定した。

つぎに、緯度-34.5 から-37.5 の間のデータに、2 波長法を適用した。LITE は 3 波長を持つので、532nm、355nm のそれぞれと 1064 nm の組み合わせを考えた。図 11 にその結果を示す。1064nm のライダー比を 0 あるいは 90 と仮定したとき、532nm、355nm のライダー比はそれぞれ 5 sr、12 sr と 46 sr、28 sr と求められた。

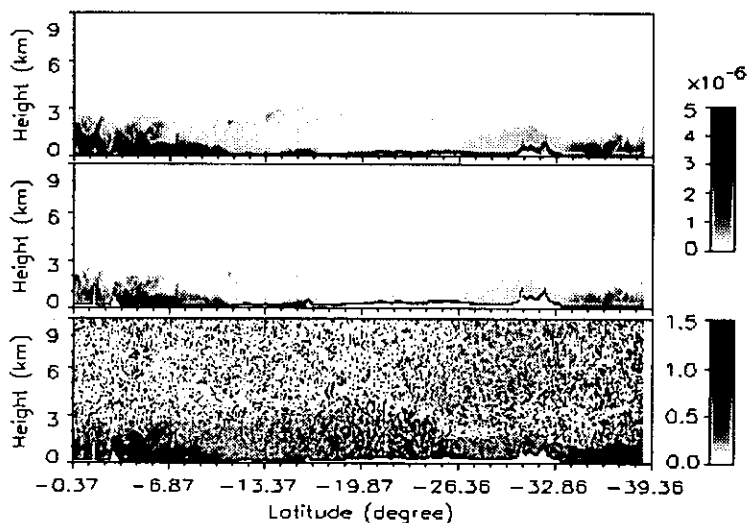


図 10 532nm、1064nm の後方散乱係数と 2 波長の後方散乱係数の比 (1064nm/532nm)

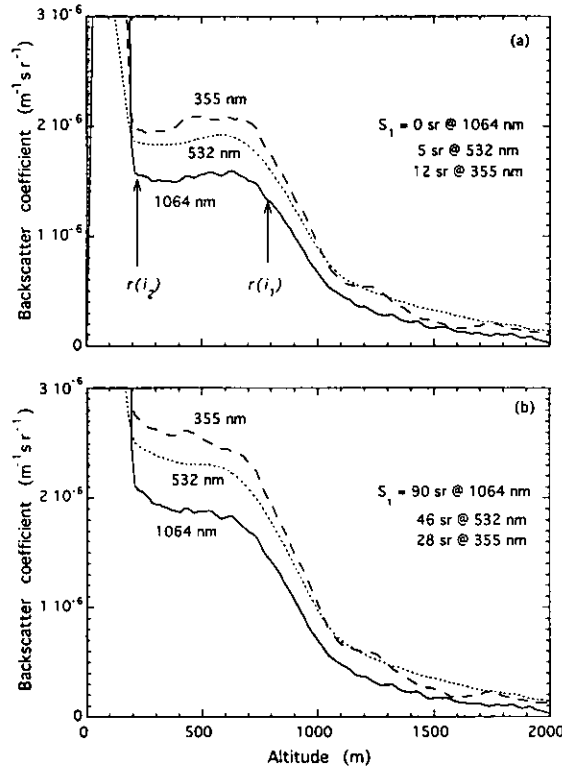


図 11 2 波長法で求めた後方散乱係数とライダー比

2 波長法は 532nm あるいは 355nm のライダー比が推定できる点に特長がある。求められた後方散乱係数、ライダー比は、仮定した 1064nm のライダー比に依存するが、仮定した範囲内で推定値を絞り込むことができる。また、2 波長の後方散乱係数の比の値は、1064nm のライダー比の仮定にあまり依存せず、後方散乱係数そのものよりも 2 波長の比のほうが正確に決定できる。2 波長のアルゴリズムが大気境界層のエアロゾルのタイプの識別などに有効であると考えられる。

## (2) 衛星ライダーデータの利用手法に関する研究

衛星ライダーのデータ利用研究として、雲、エアロゾルの全球的な分布の気候学的な解析、地上との同期観測による、雲・エアロゾルの放射収支の解明などいろいろなものが考えられる。本研究では、これらの内容について検討するとともに、地上ライダー、海洋地球研究船「みらい」に搭載したライダーのデータなどを用いて検討を行った。

雲の鉛直分布データについては、実利用に近いものとして数値予報モデルの検証が考えられる。この場合は、リアルタイムに近いデータの提供が必要になる。また、エアロゾルの分布についても、数値予報モデルに取り入れることが期待されるが、この場合は長期間の観測に基づく気候値としてのデータの利用であると考えられる。一方、最近、エアロゾル分布についてもリアルタイム的な輸送モデルが開発されており、これらのモデルの検証や同化に衛星ライダーのエアロゾルデータをリアルタイム的に利用することも期待される。

地球温暖化等の研究への利用においては、スナップショット的にデータを利用するものと、長期間のデータを統計的に利用するものが考えられる。雲の放射過程などのプロセス研究的なものの多くは前者に、気候モデルの検証などは後者に属すると考えられる。いずれの場合も、各種の地上観測デー

タや他の衛星センサーとの複合的な利用が重要である。

図 12 に衛星ライダーのデータ利用の概念を示した。

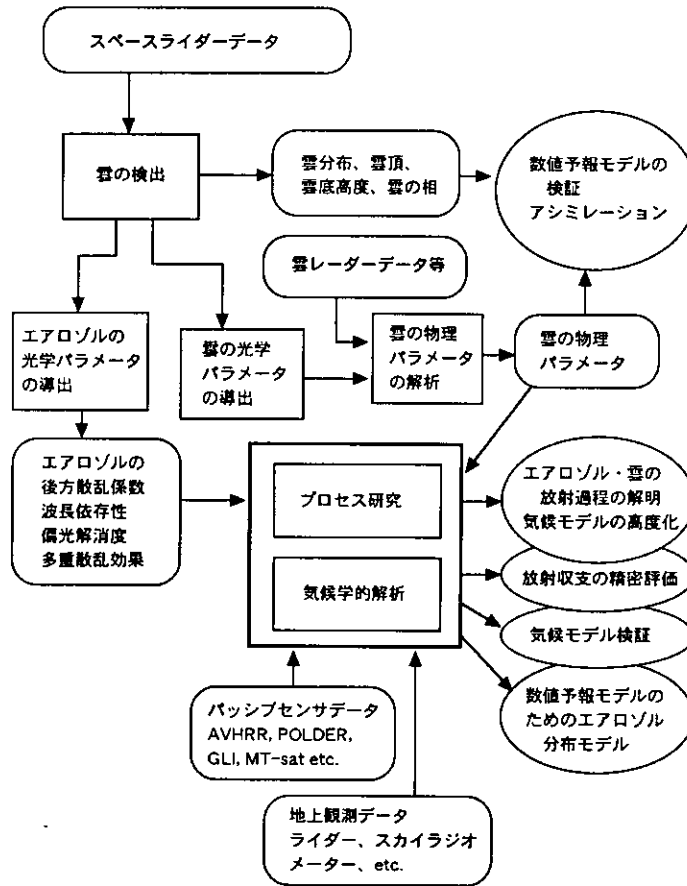


図 12 衛星ライダーデータの利用の概念

以下では、さらに本研究で行った検討結果を具体的な報告する。

①地上ライダー、「みらい」搭載ライダー等を用いた衛星ライダーデータ利用の研究

つくば、ジャカルタにおける連続観測データや、海洋地球研究船「みらい」搭載ライダーによるエアロゾル、雲の分布のグローバルな観測データを用いて、データ処理手法、検証実験手法を検討するとともに、衛星ライダーの検証手法や、衛星ライダーと地上ライダー、船舶搭載ライダー等を組み合わせた利用研究の手法を検討した。

衛星ライダーの重要な観測目標のひとつは全球的な雲の分布である。雲は放射収支、水循環、エネルギー循環において非常に大きな効果を持つ。雲の放射効果は雲の分布する高度や鉛直構造によって大きく変わるため、雲の鉛直分布を全球的に観測することが衛星ライダーに期待されている。また、雲の分布の長期的な観測は、気候変動の監視や気候モデルの検証に非常に有効である。例えば、地球温暖化に伴って雲の全球的な分布は大きく変化することが予測され、また、モデルによって予測される雲の分布が異なることが知られている。

国立環境研究所では、これまで、地上ライダーを用いて、つくばやジャカルタにおいて雲、エアロゾルの継続的な観測を行ってきた。図 13 はジャカルタにおける雲底高度のヒストグラムを、199



8年と1999年の雨季、乾季、について表示したものである。1998年の雨季はエルニーニョで雨が少なく、1998年の乾季はラニーニャで雨が多い。1999年は典型的な雨季、乾季を表している。

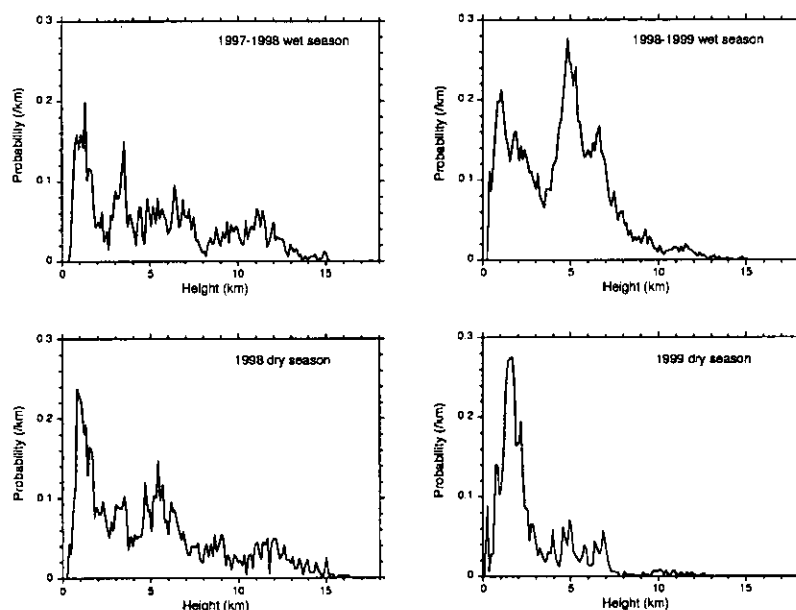


図 13 ジャカルタで観測された雲底高度のヒストグラム。1997-8年の雨季（左上）、1998年の乾季（左下）、1998-9年の雨季（右上）、1999年の乾季（右下）

つくばにおいても、1996年から継続観測を行い、月毎の雲底高度のヒストグラムに統計モデルをあてはめ、その年変化、経年変化を解析した。

衛星ライダーデータでは、このような解析を、全地球的に行うことができる。しかし、衛星ライダーでは厚い雲の下が観測されないという問題がある。一方、地上ライダーでは厚い雲の上が観測されない。そこで、観測のない高度域のデータを統計的に推定する手法を検討した。この推定手法に関しては、現在のところ、上からの統計的なデータが十分に得られず検証されていないが、衛星ライダーが実現すれば有効な手法となると考えられる。

雲、エアロゾルの広域にわたる分布を観測するために、研究船「みらい」にライダーを搭載して観測を実施した。搭載したライダーは、1064nm と 532nm の2波長で、532nm では偏光解消度の測定機能を持つ。ライダーは航海の全期間にわたって連続的に運転され、10秒毎にデータを取得した。データ解析では、衛星ライダーデータの取扱いの手法を応用した。まず、時系列的なライダーデータから雲を識別して雲の分布を求め、一方、高度数 km までに雲が検出されなかったデータのみを分離してエアロゾルについて後方散乱係数等を求めた。

図 14 に、1999年の夏の航海(MR99-K03)で観測された雲底高度のヒストグラムとエアロゾルの後方散乱係数の緯度分布を示す。海洋上では、例えば大気境界層の日変化は小さいので、ここでは、全期間のデータを緯度のみで分類して処理を行った。図 14 より、雲の分布には大きく3層の構造が見られることがわかる。エアロゾルは北緯約 25 以北で高く、これはアジア大陸からのエアロゾルであると考えられる。また、図には示していないが2波長のデータから、大陸性のエアロゾルは粒径が小さいことも示された。これに対して、低位度の下層のエアロゾルは海塩粒子であることが示された。

2波長の衛星ライダーでは、同様のデータが全球にわたって得られるものと期待される。

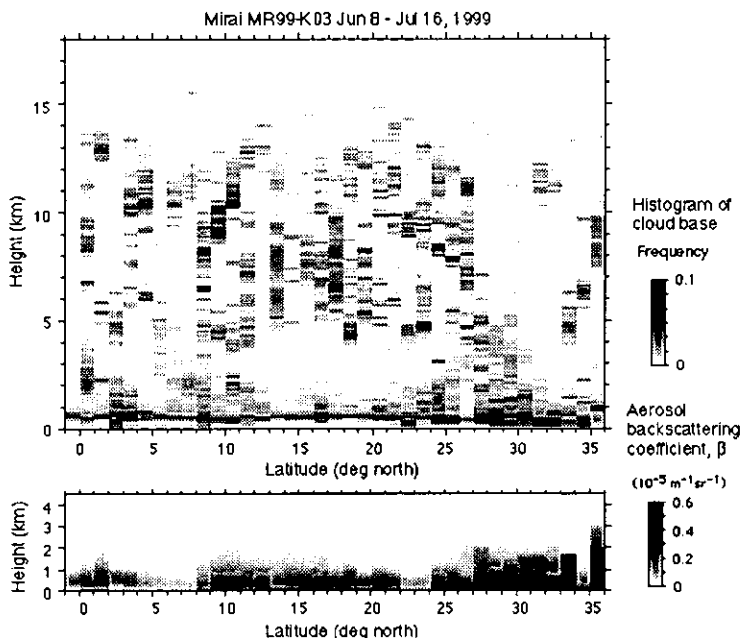


図 14 雲底のヒストグラム（上）とエアロゾルの後方散乱係数（下）の緯度分布。

## ②衛星ライダーデータを気候モデル研究への応用手法の研究

衛星ライダーデータの応用のひとつとして期待されるのが気候モデルの検証である。この場合、雲やエアロゾルの分布の気候値について衛星ライダーによる実測値とモデルから導出される分布を比較してモデルの精度やモデルに組み込まれている過程の妥当性を評価する手法が有効である。東京大学気候システム研究センターで開発されたエアロゾル気候モデルを利用して、エアロゾルの全球分布を作成して検討した。このモデルでは、硫酸塩エアロゾル、炭素性エアロゾル（有機炭素および黒色炭素エアロゾル）、土壌性エアロゾル、海塩エアロゾルの4種を再現できるもので、輸送過程（雲と雨による除去プロセスを含む）と硫黄系の基本的反応を含んでいる。このモデルでは、衛星や地表からのリモートセンシングによる観測と比較できるように光学的厚さが計算できる。

一例として、図 15 に1990年1月と7月における各種エアロゾルの光学的厚さの分布を示す。図によると、一般に、土壌性エアロゾルと炭素性エアロゾルの光学的厚さが大きいことが分かる。特に、サハラ沖の大西洋域ではサハラ砂漠起源の土壌性エアロゾルとアフリカの森林火災起源の炭素性エアロゾルの寄与が大きく、また顕著な季節変化を示している。中東域からインド域にかけても、同様に土壌性エアロゾルと炭素性エアロゾルの寄与に季節変化が見られるが、この場合の炭素性エアロゾルは工業起源のものも大きい。この例でわかるように、これまで言われていたことと異なり、熱帯地方の植生燃焼地域のみならず、中緯度の工業地帯においても炭素性エアロゾルの寄与が大きく、酸塩エアロゾルに匹敵していることが分かる。得られた分布は AVHRR によるリモートセンシング値と比較され、結果が整合していることが明らかになった。このことは、モデルの妥当性と同時に、モデルと衛星リモートセンシングと組み合わせる研究が可能なることを示唆している。

このように全球規模のエアロゾルの混合状態は、季節や場所によって大きくことなり、従って、光学的厚さの波長依存性も大きく変化する。このような変化は、エアロゾルによる2波長のライダー信

号にも大きな変化をもたらすことが分かる。従って、衛星ライダーの2波長の信号を利用して、エアロゾルの混合状態をモデルと組み合わせて理解することができると考えられる。

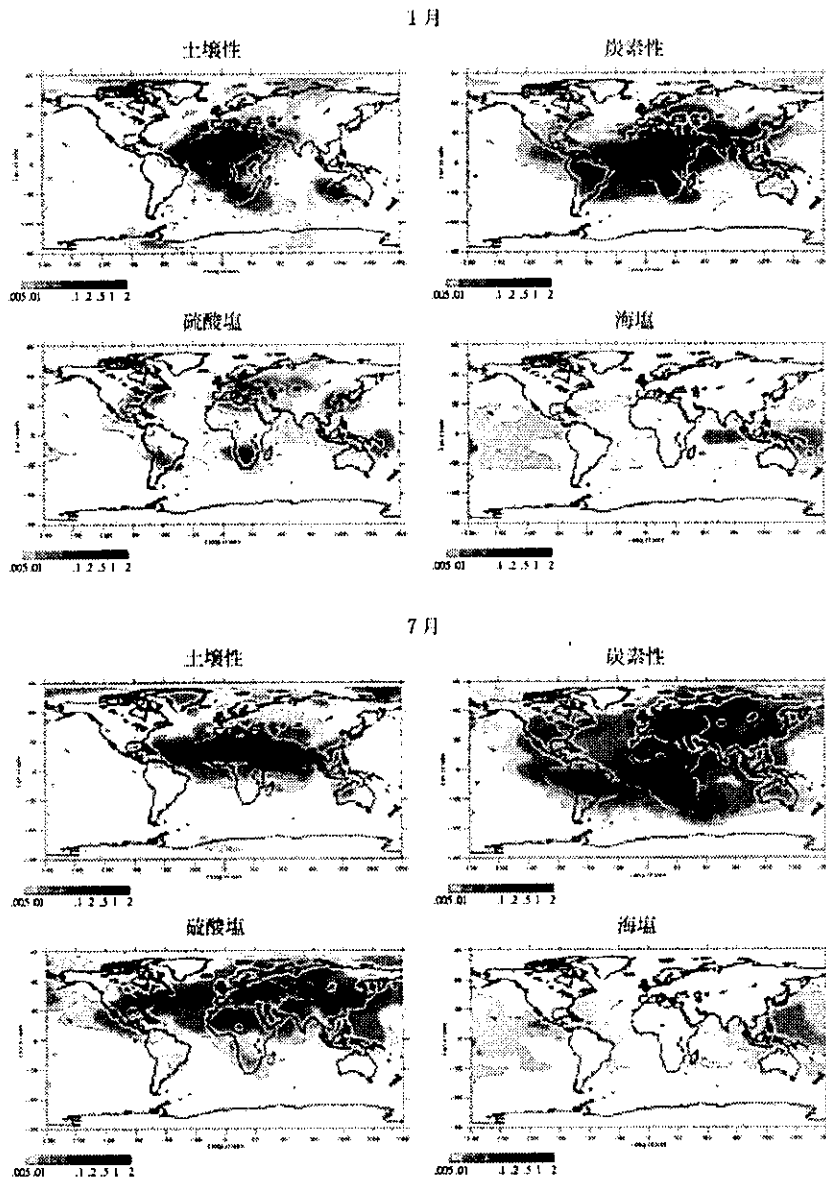


図15 1990年1月と7月における各種エアロゾル（土壌性・炭素性・硫酸塩・海塩）の光学的厚さの全球分布

## 5. 研究成果

衛星ライダーのデータ解析手法を検討し、測定対象毎に最適な手法を明らかにした。

現実的な衛星搭載ライダー（宇宙開発事業団が開発した ELISE）の装置パラメータと現実的な大気モデルを用いて、衛星ライダーで受信される信号を数値シミュレーションにより発生し、測定対象毎に開発したデータ解析アルゴリズムを適用して、解析手法の妥当性を評価した。この結果、衛星ライダーにより、各種の雲の分布、成層圏エアロゾル、巻雲、黄砂エアロゾル、大気境界層エアロゾルなどの光学特性などが観測できることが示された。

衛星ライダーで問題となる多重散乱の効果については、多重散乱因子を用いて近似的に取り扱う方法を採用した。観測対象毎の多重散乱因子については、国際交流課題でモンテカルロシミュレーションによる研究を実施し、その成果を取り込んだ。

開発した衛星ライダー解析アルゴリズムを、米国航空宇宙局が1994年に行ったスペースシャトルからのライダー観測実験 LITE のデータに適用し、成層圏エアロゾル、巻雲、大気境界層エアロゾルの解析を行った。これによって、解析アルゴリズムを検証した。

衛星ライダーのデータ利用について、地上ライダー、研究船搭載ライダーのデータを利用して検討を行った。雲の高度分布の統計的な解析が気候変動の検知や気候モデルの検証に有効であることが示された。また、全球的なエアロゾルの分布の観測と、エアロゾルの種類の識別が2波長ライダーによって可能であることが実証され、2波長の衛星ライダーによっても同様の情報が得られると考えられることが示された。

一方、エアロゾルの生成を取り入れた気候モデルを東京大学気候システム研究センターで開発した。これによって、エアロゾルの全球分布を作成し、衛星ライダーによる観測の可能性を明らかにするとともに、衛星ライダーデータのモデル検証への利用について検討した。その結果、2波長の衛星ライダーにより、様々な種類のエアロゾルの光学特性を反映した観測結果が得られ、モデル検証への有効に利用できることが示された。

宇宙開発事業団で開発されてきた衛星ライダー-ELISE は、H-II ロケットの問題等で中止されたが、米国では、衛星ライダー-GLAS が2001年12月に、PICASSO が2004年に打ち上げられる予定である。本研究の成果はこれらの衛星ライダーのデータを利用した地球温暖化研究等に有効に利用できるものである。また、現在、日本と欧州宇宙機構の協力により提案中の地球大気放射ミッション EarthCARE では、ライダーと雲レーダーの同時搭載が検討されている。本研究の成果は、EarthCARE の基礎研究として活用できるものである。

## 6. 引用文献

- Fernald, F. G., "Analysis of atmospheric lidar observation: some comments," Appl. Opt. 23, p.652, 1984.
- Liu, Z., P. Voelger and N. Sugimoto, "Simulations of the observation of clouds and aerosols with the Experimental Lidar in Space Equipment system," Appl. Opt. 39, 3120-3137 (2000).
- Sasano, Y. and E. V. Browell, "Light scattering characteristics of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations," Appl. Opt. 28, 1670-1679 (1989).
- Sasano, Y., K. Asai, N. Sugimoto, Y. Kawamura, K. Tatsumi, and T. Imai : NASDA Mission Demonstration Satellite Lidar Project and Its Sciences, SPIE 3504, 2-7 (1998).
- Young, S. A., "Analysis of lidar backscatter profiles in optical thin clouds," Appl. Opt. 30, p.7019, 1995.

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上发表

- ① Liu, Z. and N. Sugimoto : Theoretical and Experimental Study of Inversion Algorithms for Space Lidar Observation of Clouds and Aerosols, SPIE 3494, 296-304 (1998).
- ② Nakajima, T., and A. Higurashi : A use of two-channel radiances for an aerosol characterization from space.



- Geophys. Res. Lett., 25, 3815-3818 (1998).
- ③ Sasano, Y., K. Asai, N. Sugimoto, Y. Kawamura, K. Tatsumi, and T. Imai : NASDA Mission Demonstration Satellite Lidar Project and Its Sciences, SPIE 3504, 2-7 (1998).
  - ④ Pinandito, P., I. Rosananto, I. Hidayat, S. Sugondo, S. Asiati, A. Pranowo, I. Matsui, and N. Sugimoto et al.: Lidar Network System for Monitoring the Atmospheric Environment in Jakarta City, Opt. Rev. 5, 4, 252-256 (1998).
  - ⑤ Higurashi, A., and T. Nakajima : Development of a Two Channel Aerosol Retrieval Algorithm on Global Scale Using NOAA / AVHRR. J. Atmos. Sci., 56, 924-941 (1999).
  - ⑥ 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).
  - ⑦ Liu, Z., P. Voelger, and N. Sugimoto: Simulation Study for the Experimental Lidar in Space Equipment (ELISE), Abstracts of Papers, International Laser Sensing Symposium, Fukui, Japan, pp. 271-272 (1999).
  - ⑧ Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto: Effects of Multiple Scattering on the Retrieval of Optical Parameters from ELISE - Simulation Study, SPIE 3865, 172-177 (1999).
  - ⑨ Liu, Z., P. Voelger and N. Sugimoto: Simulations of the Observation of Clouds and Aerosols with the Experimental Lidar in Space Equipment (ELISE), Applied Optics 39 (18), 3120-3137 (2000).
  - ⑩ Sugimoto, N.: Mie Scattering Lidar Observation of Aerosol Vertical Profiles in Jakarta, Indonesia, Environmental Science 13 (2), 205-216 (2000).
  - ⑪ 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).
  - ⑫ Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, M. Pinandito, S. Sugondo: Climatological Characteristics of Cloud Distribution and Planetary Boundary Layer Structure in Jakarta, Indonesia Revealed by Lidar Observation, Geophys. Res. Lett., 27 (18), 2909-2912 (2000).
  - ⑬ Asai, K., Y. Sasano, N. Sugimoto, O. Uchino, T. Itabe, K. Mizutani, Y. Kawamura, M. Ishizu, T. Imai, K. Terada, N. Saki: Planned/Proposed Spaceborne Lidar Programs in Japan, Advances in Laser Remote Sensing, Eds. A. Davas, C. Loth and J. Pelon (Edition de l'Ecole Polytechnique 2001) pp. 11-14.
  - ⑭ Liu, Z., P. Voelger and N. Sugimoto: Data Reduction Methods for Space Lidar Observation of Clouds and Aerosols, SPIE 4153, 647-655 (2001).
  - ⑮ Liu, Z., P. Voelger and N. Sugimoto: Data Analysis Method for Aerosol Observation with Space Lidar: Application to LITE Data, Advances in Laser Remote Sensing, Eds. A. Davas, C. Loth and J. Pelon (Edition de l'Ecole Polytechnique 2001) pp. 31-34.
  - ⑯ Matsui, I., N. Sugimoto, Z. Liu, A. Shimizu, K. Asai, T. Murayama: Observation of aerosols and clouds in the western tropical Pacific using a two-wavelength polarization lidar on the research vessel Mirai, SPIE 4153, 234-241 (2001).
  - ⑰ Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arai, B.-J. Shon, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka: Ground-Based Network Observation of Asian Dust Events of April 1998 in East Asia,

accepted for publication in *J. Geophys. Res.* (2001).

- ⑱ Murayama, T., N. Sugimoto, I. Matsui, Z. Liu, T. Sakai, T. Shibata, Y. Iwasaka, J.G. Won, S. C. Yoon, J. Zhou, H. Hu: Lidar Network Observation of Asian Dust, *Advances in Laser Remote Sensing*, Eds. A. Davas, C. Loth and J. Pelon (Edition de l'Ecole Polytechnique 2001) pp. 167-172.
- ⑲ Pinandito, M., S. Sugondo, N. Sugimoto, I. Matsui: A Long-Term Lidar Observation and Analysis of Aerosol Vertical Profiles in Jakarta, Indonesia, *SPIE 4153*, 191-198 (2001).
- ⑳ Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui: Climatology of Cloud Distribution and Backscattering Coefficients of Aerosols Observed by the Compact Mie-Scattering Lidar at Tsukuba, Japan, *SPIE 4153*, 143-150 (2001).
- ㉑ Sugimoto, N., Z. Liu, P. Voelger, A. Shimizu, Y. Sasano, K. Asai, M. Ishizu, T. Itabe, T. Imai: Science Applications of the Multi-FOV Lidar for ATMOS-B1/ERM, *SPIE 4153*, 399-406 (2001).
- ㉒ Sugimoto, N., I. Matsui, Z. Liu, A. Shimizu, S. Sakida, T. Murayama, I. Tamamushi, and K. Asai: Observation of Sea-Salt Aerosols in the Tropical Western Pacific with a Shipborne Two-Wavelength Dual-Polarization Mie Scattering Lidar, *Advances in Laser Remote Sensing*, Eds. A. Davas, C. Loth and J. Pelon (Edition de l'Ecole Polytechnique 2001) pp. 203-206.
- ㉓ Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto: Influence of System Parameters on Multiple Scattering in Spaceborne Lidar Measurements, *SPIE 4153*, 631-646 (2001).

## (2) 口頭発表

- ① Sasano, Y. : ELISE (Experimental Lidar In Space Equipment) Development and Science Application Plan: NASDA Mission Demonstration Satellite Lidar (MDS-lidar) Project, 19th Int. Laser Radar Conference, Annapolis, Maryland (1998).
- ② Sugimoto, N., Y. Sasano, K. Asai, and Y. Kawamura : Cloud Observation Planned with the Mission Demonstration Satellite Lidar (MDS-Lidar), GCSS-WGNE Workshop on Cloud Processes and Cloud Feedbacks in Large-Scale Models, Reading (1998).
- ③ 長澤親生、阿保真、柴田泰邦、杉本伸夫 : ライダーにおける多重散乱効果の実験的研究、第 46 回応用物理学関連講演会、野田 (1998).
- ④ Liu, Z., P. Voelger, and N. Sugimoto: Simulation Study for the Experimental Lidar in Space Equipment(ELISE), Abstracts of Papers, International Laser Sensing Symposium, Fukui, Japan (1999) pp. 271-272.
- ⑤ Voelger, P., Z. Liu, N. Sugimoto: Simulation of Lidar Measurements for the MDS-lidar (ELISE) Proc. MUSCLE10, Florence, Italy (1999) p. 128-134.
- ⑥ Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto: Simulation of Multiple Scattering Effects in Planned Measurements with the MDS-Lidar (ELISE), Abstracts of Papers, International Laser Sensing Symposium, Fukui, Japan (1999) pp. 273-274.
- ⑦ Asai, K., Y. Sasano, N. Sugimoto, O. Uchino, T. Itabe, Y. Kawamura, M. Ishizu, K. Terada, T. Moriyama, N. Saki: Multi-FOV Cloud/Aerosol Lidar for ATMOS-B1/ERM Program, *SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring*, Sendai, (2000).
- ⑧ Asai, K., Y. Sasano, N. Sugimoto, Kobayashi, Y. Kawamura, M. Ishizu, and T. Imai H., ELISE (Experimental Lidar in Space Environment): First Japanese spaceborne lidar project, The Workshop on

- Experimental Lidar In SpaceEquipment (ELISE), Tsukuba, January 26, (2000).
- ⑨ Liu, Z., P. Voelger and N. Sugimoto: Data Reduction Methods for Space Lidar Observation of Clouds and Aerosols, SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, Sendai, (2000).
  - ⑩ Liu, Z., P. Voelger and N. Sugimoto: Data Analysis Method for Aerosol Observation with Space Lidar: Application to LITE Data, 20th Int. Laser Radar Conf. Vichy (2000).
  - ⑪ Liu Z., P.Voelger, and N. Sugimoto, Simulation study of cloud and aerosol measurements with ELISE, The Workshop on Experimental Lidar In SpaceEquipment (ELISE), Tsukuba, January 26, (2000).
  - ⑫ Matsui, I., N. Sugimoto, Z. Liu, A. Shimizu, K. Asai, T. Murayama: Observation of aerosols and clouds in the western tropical Pacific using a two-wavelength polarization lidar on the research vessel Mirai, SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, Sendai, (2000).
  - ⑬ Pinandito, M., S. Sugondo, N. Sugimoto, I. Matsui: A Long-Term Lidar Observation and Analysis of Aerosol Vertical Profiles in Jakarta, Indonesia, SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, Sendai, (2000).
  - ⑭ Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui: Climatology of Cloud Distribution and Backscattering Coefficients of Aerosols Observed by the Compact Mie-Scattering Lidar at Tsukuba, Japan, SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, Sendai, (2000).
  - ⑮ Sugimoto, N., Z. Liu, P. Voelger, A. Shimizu, Y. Sasano, K. Asai, M. Ishizu, T. Itabe, T. Imai: Science Applications of the Multi-FOV Lidar for ATMOS-B1/ERM, SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, Sendai, (2000).
  - ⑯ Sugimoto, N, I. Matsui, Z. Liu, A. Shimizu, S. Sakida, T. Murayama, I. Tamamushi, and K. Asai: Observation of Sea-Salt Aerosols in the Tropical Western Pacific with a Shipborne Two-Wavelength Dual-Polarization Mie Scattering Lidar, 20th Int. Laser Radar Conf. Vichy (2000).
  - ⑰ Sugimoto, N., Y. Sasano, Z. Liu, P. Voelger, K. Asai, O. Uchino, T. Itabe, M. ISHIZU, and K. Terada: Science Objectives of the Multi-Field-of-View Dual-Polarization Spaceborne Lidar for ATMOS-B1/ERM Program, 20th Int. Laser Radar Conf. Vichy (2000).
  - ⑱ Sugimoto, N., Z. Liu, P. Voelger, Y. Sasano, K. Asai, O. Uchino, T. Itabe, M. Ishizu, and K. Terada: Cloud and Aerosol Observation Planned with the Space-Borne Lidar "ELISE" and the ATMOS-B1/ERM Lidar, IGARRS, Hawaii (2000).
  - ⑲ Sugimoto, N., Overview of MDS-2/ELISE science plan, The Workshop on Experimental Lidar In SpaceEquipment (ELISE), Tsukuba, January 26, (2000).
  - ⑳ Sugimoto, N., Proposal of MDS-2/ELISE science data processing systemThe Workshop on Experimental Lidar In SpaceEquipment (ELISE), Tsukuba, January 26, (2000).
  - ㉑ Takagiwa, M., K. Shimizu, I. Matsui and N. Sugimoto, Statistical Analysis of Cloud Distribution Observed with a Ground-Based Lidar, The First International Workshop on Spaceborne Cloud Profiling Radar, Tsukuba, Japan (2000).
  - ㉒ Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto: Influence of System Parameters on Multiple Scattering in Spaceborne Lidar Measurements, SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, Sendai, (2000).
  - ㉓ Voelger, P., Z.Liu and N. Sugimoto, Influence of multiple scattering on measurements with ELISE, The

Workshop on Experimental Lidar In Space Equipment (ELISE), Tsukuba, January 26, (2000).

- ⑭ 杉本伸夫、松井一郎、清水 厚、劉 兆岩、浅井和弘：海洋地球研究船「みらい」によるエアロゾルと雲のライダー観測：エアロゾルの間接効果の解明を目指して、大気ライダーシンポジウム、東京 (2000)
- ⑮ 杉本伸夫、劉 兆岩、松井一郎、清水 厚、浅井和弘：Nauru 99 におけるエアロゾルのライダー観測、気象学会 (秋)、(2000)
- ⑯ 杉本伸夫、劉 兆岩、Peter Voelger、笹野泰弘、清水 厚、浅井和弘、石津美津雄、板部敏和、今井 正：衛星搭載 2 波長マルチ視野角ライダーによる雲とエアロゾル観測のシミュレーション検討、リモートセンシングシンポジウム、東京 (2000)
- ⑰ 杉本伸夫、松井一郎、清水 厚、浅井和弘：ライダーによるアジア太平洋域のエアロゾル・雲の観測研究、気象学会 (春)、東京 (2001)
- ⑱ 杉本伸夫、松井一郎、清水 厚、劉 兆岩、浅井和弘：「みらい」による西部太平洋におけるエアロゾルと雲のライダー観測、海洋気象学会、神戸 (2001)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- 1) 2001 年 1 月 29 日、日本経済新聞 (朝刊) 「温暖化左右するエアロゾル観測」
- 2) 2001 年 2 月 12 日、日本経済新聞 (朝刊) 「中国からの黄砂 1 月初めに観測国立環境研」