

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

(3) 衛星ライダーにおける多重散乱効果の評価

国立環境研究所

大気圏環境部 高層大気研究室
エコフロンティアフェロー

杉本伸夫
Peter Voelger

平成 10~12 年度合計予算額	5, 250 千円
(うち、12 年度予算額)	1, 056 千円)

〔要旨〕人工衛星からのライダー（レーザーライダー）測定では、地上や航空機ライダーの場合と違って散乱体の多重散乱が重要となる。そのため、精度の高い解析を行うためには多重散乱効果を考慮したデータの取り扱いが必要がある。そこで、本研究では衛星ライダーで観測される種々の測定対象についてモンテカルロ法を用いたシミュレーションを行い、多重散乱の影響の評価を行った。また、データ解析における多重散乱の取扱い手法と誤差の検討を行った。

巻雲とエアロゾルについて検討した結果、巻雲の場合は、距離に依存しない多重散乱因子を解析で用いることで比較的正しく測定対象のプロファイルを導出できることがわかった。多重散乱因子は理論値（シミュレーションによる）が約 0.6 で、解析にはこの値あるいはやや高めの値を用いる場合に誤差が小さいことがわかった。エアロゾルの場合は多重散乱因子の理論値が距離の関数として変化するため厳密には一定の多重散乱因子を用いて解析することはできない。しかし、ここでは簡単のため一定の多重散乱因子を仮定して評価した。その結果、測定対象の消散係数が小さい場合（ 0.3km^{-1} 以下）は 0.2 程度の多重散乱因子を仮定して解析が可能であることが示された。

〔キーワード〕衛星搭載ライダー、多重散乱、エアロゾル、雲、モンテカルロ・シミュレーション

1. はじめに

現在の大気観測データにおいて衛星搭載計測器が大きな役割を担っている。宇宙空間からの受動遠隔センシングによって、地球規模での観測が可能になったが、その鉛直分解能は十分ではない。これに対してライダー技術は、優れた鉛直分解能をもって、雲の鉛直構造やエアロゾルの高度分布を測定できることが知られている。1994 年の NASA の LITE 計画（Winker et al., 1996）では、大気のリダー計測が、実際に宇宙から行えることを実証した。LITE は、2 週間の実験であったが、そのデータは、大気プロセスのさまざまな局面を新たな視点から取り扱う、多くの研究の出発点となった。

（Platt et al., 1999）

近年、宇宙開発事業団（NASDA）は、宇宙空間からの長期的観測のためのライダーを開発してきた。この ELISE システム（Experimental Lidar In Space Equipment）は、1 年間にわたって太陽同期軌道上で計測を行うことを目的として計画された。衛星軌道は、ほぼ地球全体をカバーし、高度 0~35km の間の高度域の大気散乱を計測する。残念ながら、H-II ロケットの失敗に伴う宇宙開発事業団の衛星計画の見直しのなかで、ELISE プロジェクトの停止が決定された。しかしながら、ELISE を目的として行ってきた種々の研究の成果は、他の衛星ライダー・プロジェクトにとっても有用なものである。本研究では、ELISE の仕様を念頭において衛星ライダーにおける多重散乱効果の影響を調査し

本研究では、ELISE の仕様を念頭において衛星ライダーにおける多重散乱効果の影響を調査した。

2. 研究目的

宇宙からのライダー計測における問題の 1 つは、後方散乱信号に対する多重散乱の寄与である。衛星ライダーにおいては観測される大気の体積が地上ベース/航空機搭載計測の場合より格段に大きく、多重散乱効果が無視できない。そこで、衛星ライダーで観測される種々の測定対象について計算機シミュレーションを行い、多重散乱の影響を評価するとともに、データ解析における多重散乱の取扱い手法を確立することを目的とする。

3. 研究方法

衛星ライダーにおける多重散乱の影響を評価するために、モンテカルロシミュレーションの手法を用いて各種の測定対象からのライダー信号のシミュレーション信号を作成した。これによって、それぞれの測定における多重散乱効果を、光学的厚さなどの条件毎に評価した。

次に、データ解析手法の検討ではライダー方程式に多重散乱因子を含める簡単な近似法を用いた。シミュレーション結果では多重散乱効果を単散乱と独立に評価できるので、用いるべき正しい多重散乱因子を測定対象毎に距離の関数として求めることができる。一方、実際の測定では正しい多重散乱因子を知ることはできないので推定値を用いることになるが、ここでは、距離に依存しない多重散乱因子をいくつか仮定してシミュレーションデータに適用して測定対象のプロファイルを求め、仮定した真のプロファイルとの差を調べた。また、理論的な多重散乱因子と誤差の少ないプロファイルが得られる多重散乱因子の値を比較した。

4. 研究結果と考察

後方散乱信号の解析に通常用いられるライダー方程式は、多重散乱効果の大きい衛星ライダーにはそのままでは適用できない。しかしながら、多重散乱を正確に含むライダー方程式を導いてこれを解析的に解くことは非常に困難である。そこで、近似的に多重散乱を取り扱うために、Kunkel と Weinman (1976) が提案した方法を用いる。この方法では、単一散乱ライダー方程式に、次のような多重散乱因数を導入する。

$$P_T(R) = \frac{C}{R^2} * \beta(R) \exp -2 * [1 - F(R)] \int_0^R \sigma(r) dr. \quad (1)$$

ここで、 $P_T(R)$ は時間 $t=2*R/C$ (C は光の速度、 R は距離) 後に検知されるライダー信号、 C はシステム定数、 β と σ はそれぞれ後方散乱と消散係数である。 F は導入されたいわゆる多重散乱因数である。これは、(2) 式で表される。

$$F(R) = \frac{1}{2 * \int_0^R \sigma(r) dr} * \ln \left\{ \frac{P_T(R)}{P_S(R)} \right\} \quad (2)$$

P_S は、ライダー信号への単一散乱寄与である。ライダー信号においては、単一散乱及び多重散乱強度の分離ができないので、多重散乱因数 F を計測から推定することはできない。しかし、事前にシミュレートされたライダー信号から F を評価しておくことができる。本研究ではそのために、モンテカルロ法によりライダー信号を生成し、異なった散乱次数の多重散乱強度と全後方散乱強度の両方を得る

種々の条件で計算した。

モンテカルロ法では入射する光子の散乱過程を確率的に順次トレースしてこれを多数について合計して全体の散乱特性を求める。そのために膨大な計算量を必要とする。そこで少ない計算量で精度を上げるための方法 variance reduction method を用いた (Marchuk et al 1980)。本研究では通常1つのケースについて、100,000,000 パス程度を計算した。これは SUN Sparc Ultra-30 の cpu タイムで約 10 時間を要した。

F の導入によって、多量の多重散乱を含むライダー信号から反転法により消散係数あるいは後方散乱係数を求めることが可能となった。地上ベースのライダー（単一散乱）に通常用いられるアルゴリズムは、Fernald (1984) により提案されたものであるが、多重散乱の補正項を含めると方程式は次のようになる。

$$\beta_A(R) = \frac{P_T(R)R^2 \exp\{-2([1-F]S_A - S_M) \int_{R_0}^R \beta_M(r) dr\}}{\frac{P_T(R_0)R_0^2}{\beta_A(R_0) + \beta_M(R_0)} - (2[1-F]S_A \int_{R_0}^R (P_T(r)r^2 \exp\{-2([1-F]S_A - S_M) \int_{R_0}^r \beta_M(r') dr'\} dr))} - \beta_M(R). \quad (3)$$

ここで、S はライダー比（後方散乱係数に対する消散比）である。下付数字 A と M は、それぞれエアロゾル及び分子のパラメータを指す。この方程式から、多重散乱の効果は、ライダー比が実際よりも大きい、あるいは消散係数が実際より小さいと仮定した場合と同様の影響を解析結果に与えることが分る。

(1) 巻雲

氷晶の大きなサイズ・パラメータ（入射光の波長に対する粒子半径の比）のために、光の散乱は主に前方散乱になる。したがって、たいいていの場合、光子は散乱後の円錐視野内に残り、全後方散乱信号に寄与することになる。そのため、消散係数が大きい場合、光子の自由行路長がより短くなり、結果的に多重散乱の寄与が増大する。

巻雲内での多重散乱の役割を調べるために、8~10km 高度の間の均質な雲層を持つ簡単な大気モデルを仮定した。氷晶雲は、六角柱とみなした。2つの異なった消散係数 0.3km^{-1} と 1km^{-1} の場合を考察した。雲の上下の大気は、エアロゾルが無いと仮定した。すなわち、分子散乱のみを仮定した。

図 1 は、2つの場合について、散乱強度のシミュレーション結果を表わす。全散乱及び単散乱強度の両方を示した。ライダー方程式から予想されるように、単散乱強度は、いずれの消散係数の場合についても、ほぼ指数関数的な減少を示した。また、全散乱信号もほぼ指数関数的に減少したが、絶対値はより大きかった。信号の減少は消散係数が大きいほど大きい。単散乱と全強度の間の差が、多重散乱強度を表す。それは雲中の侵入深さとともに増加する。

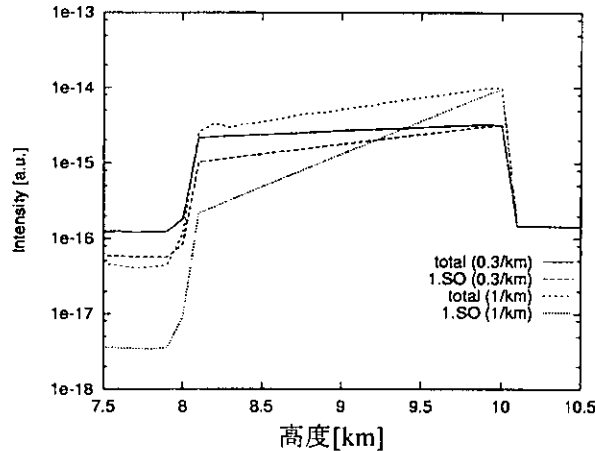


図1 消散係数 0.3 および 1km^{-1} を持つ高度 8~10km の巻雲からのライダー信号のシミュレーション結果

図 2 から、単散乱に対する多重散乱比は、いずれの場合も雲の中で指数関数的に増加し、雲の背後では、ほぼ一定であることがわかる。その理由は、前方散乱が雲の低い部分や雲の背後の領域のライダー信号を増加させるようにみえることによる。大きな消散係数の場合には、単散乱に対する多重散乱比は、高度約 9.5km すなわち雲中の 500m で 1 に達する。より大きな侵入深さの場合、多重散乱は単散乱よりも強い。小さな消散係数 (0.3km^{-1}) の場合には、その比は、巻雲の下部の 200 m の部分、すなわち 1.8km 透過後に 1 に達した。

以上の例についての多重散乱因子 F を図 3 に示す。上層雲境界近辺での急激な増加後、 F は巻雲全域及び巻雲の下で一定になる。ここで考えたいずれの消散係数の場合も、 F の値は約 0.6 であった。しかし、Platt et al. (1999) が指摘したように、値は後方散乱方向の散乱関数に依存する。従って、粒子形状に大きく左右される。

2 つの消散係数について多重散乱因子を仮定した解法で求めた消散係数のプロファイルを図 4a 及び b に示した。(正しい消散係数は、それぞれ 0.3 と 1km^{-1} である。) 両図より、解析結果の多重散乱因子に対する感度は、光学的深さに比例して増加することがわかる。最良の結果が得られるのは、理論的に計算された値より若干大きい多重散乱因子を用いた場合である。

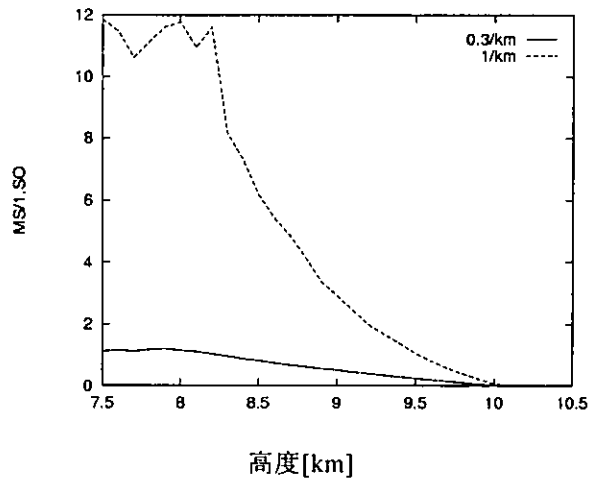


図2 図1と同じ巻雲の単散乱に対する多重散乱の比

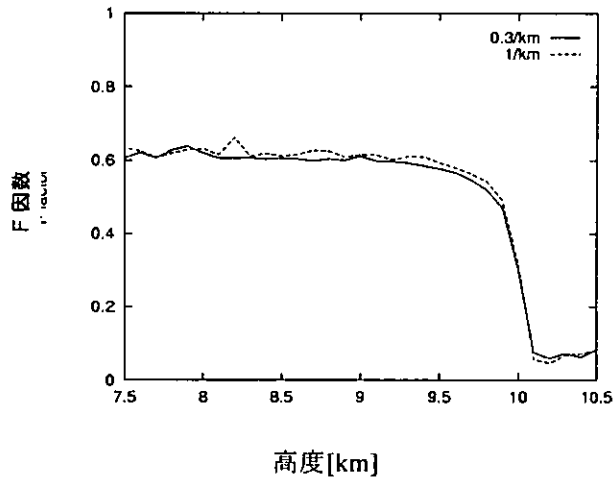


図3 図1の巻雲の多重散乱因子F

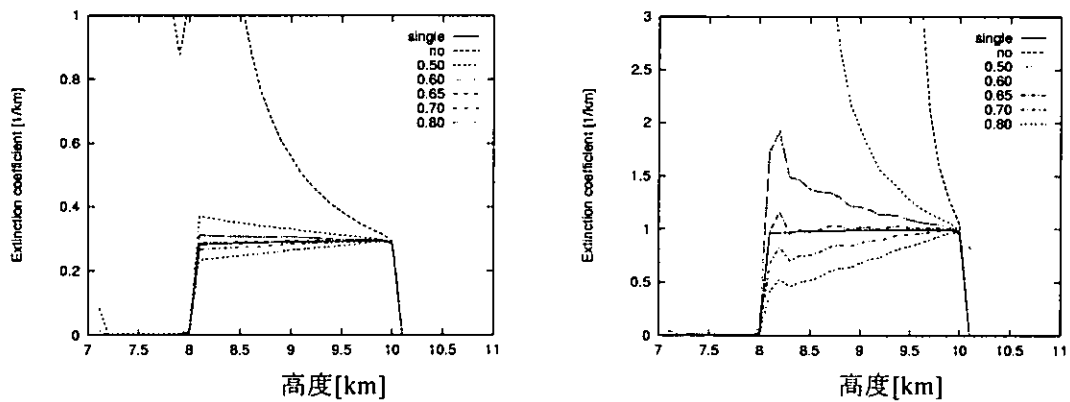


図4 図1の巻雲に対して、異なった多重散乱因子を仮定した解法で求めた消散係数プロファイル; a: $\sigma=0.3\text{km}^{-1}$, b: $\sigma=1\text{km}^{-1}$

(2) エアロゾル

エアロゾルのサイズ・パラメータは、一般に雲の粒子よりも小さい。したがって、散乱関数は、より均一である。すなわち、前方散乱は余り大きくなく、横方向散乱がより重要である。これにより、光子が、散乱イベント後に受信系の円錐視野を、離れる確率が増加する。これらの光子は、後方散乱信号には寄与しない。したがって、全後方散乱信号における多重散乱の寄与は、雲の場合に比べて小さい。

エアロゾルの衛星搭載ライダー計測における多重散乱の役割を具体的に考察するために、例として、表面～2km 高度間の均質なエアロゾル層の場合を考えた。エアロゾルの種類として、Deirmendjian (1969) によって与えられた、いわゆる「Haze L」を用いた。ここでも 2 つの消散係数、0.3 及び 1 km^{-1} の場合を考察した。図 5 は、全散乱信号と単散乱のシミュレーション結果である。全散乱と単散乱の差は、巻雲の場合よりもずっと小さい(図 1 参照)。さらに、全強度の減少は、指数関数的ではない。これは、単一散乱に対する多重散乱の比を示す図 6 でもみられる。

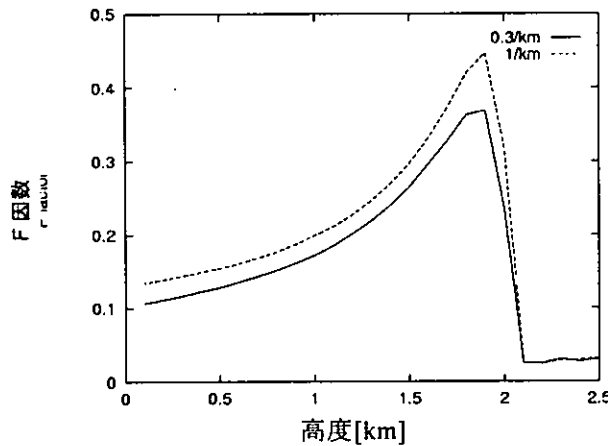


図 5 消散係数 0.3 及び 1 km^{-1} を持つ地表～高度 2km のエアロゾル層 (Haze L) のライダー信号のシミュレーション結果

単一散乱に対する多重散乱比は、指数関数的には増えない。いずれの消散係数の場合でも、単散乱強度は、多重散乱強度よりも大きい。単散乱に対する多重散乱比の非指数増加は、多重散乱因子がエアロゾル層では一定ではないことを意味している。

図 7 から、単一散乱に対する多重散乱比は、侵入深さの増加に比例して減少することが判明した。F は、散乱係数が大きくなると、大きくなった。値は、 $\sigma = 0.3\text{ km}^{-1}$ と $\sigma = 1\text{ km}^{-1}$ に対し、それぞれ 0.37～0.11、0.45～0.14 であった。消散係数のプロファイルが変化すると(高度に依存する消散係数を仮定すると)、これは F の高度プロファイルに影響を与える。図 8a と図 8b は、それぞれ消散係数 0.3 と 1 km^{-1} の場合について、反転法で求めた消散プロファイルを示している。ここでは、定数の F を仮定している。消散係数が高いほど、求めた消散係数プロファイルは F の値に影響されやすい。また、巻雲の場合と比べて、F の選択に対する反転法の結果の感度が、エアロゾルではより大きいことが分かった。求められた消散係数は、層の上部では真の値より高く、下部では真の値より低い傾向がある。

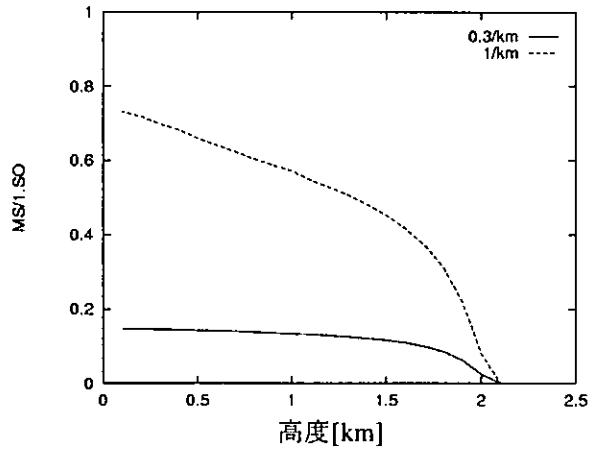


図6 図5と同じエアロゾル層の単散乱に対する多重散乱の比

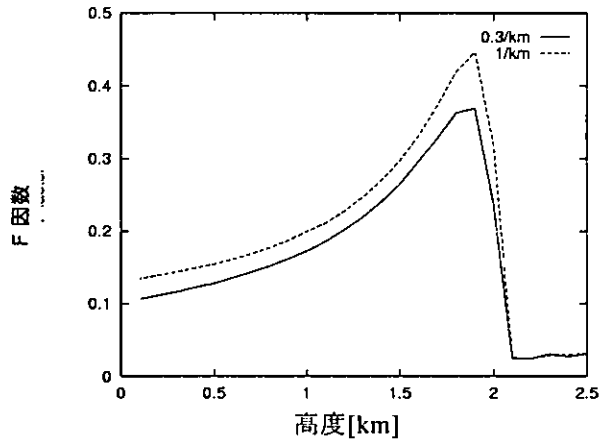


図7 図5のエアロゾル層の多重散乱因数F

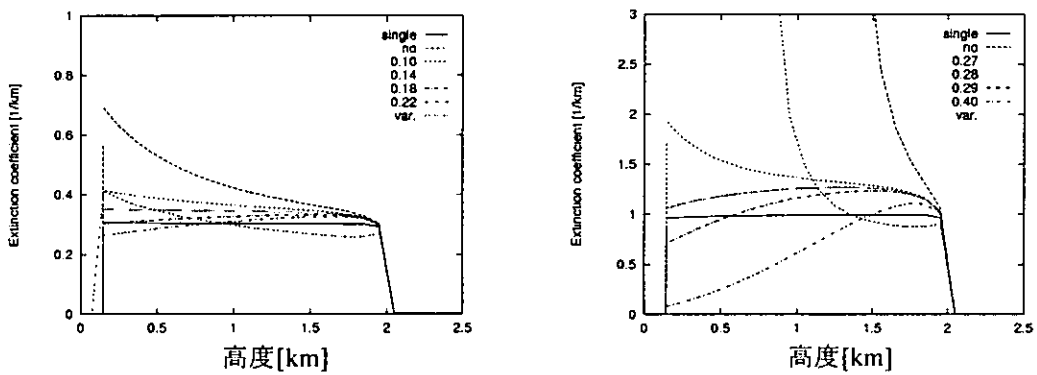


図8 図5のエアロゾル層に対して、異なる多重散乱因子を仮定した解法で求めた消散係数プロファイル；a： $\sigma=0.3\text{km}^{-1}$ ，b： $\sigma=1\text{km}^{-1}$

5. 研究成果

本研究では、人工衛星からのライダー計測に関する、多重散乱の影響を調査した。ライダーのシステム仕様は、宇宙開発事業団のELISEプロジェクトのために提案されたものを想定した。

モンテカルロ法を用いたシミュレーションにより、巻雲、水雲、エアロゾルの衛星搭載ライダー信号における多重散乱効果を評価した。また、データ解析における多重散乱の取扱い手法と誤差の評価を含む検討を行った。

データ解析手法における多重散乱効果の取り扱いでは、2成分のライダー方程式に多重散乱因子を含める簡単な近似法を用いた。まず、多重散乱を含むライダー信号のシミュレーションデータ、解析に用いるべき正しい多重散乱因子を測定対象毎に距離の関数として求めた。一方、実際の測定の解析では正しい多重散乱因子を知ることはできないので、距離に依存しない多重散乱因子をいくつか仮定してシミュレーションデータを解析し、真のプロファイルとの差を調べた。また、理論的な多重散乱因子と誤差の少ないプロファイルが得られる多重散乱因子の値を比較した。

検討の結果、巻雲の場合は、距離に依存しない多重散乱因子を解析で用いることで比較的正しく測定対象のプロファイルを導出できることがわかった。多重散乱因子は理論値（シミュレーションによる）が約0.6で、解析にはこの値あるいはやや高めの値を用いる場合に誤差が小さいことがわかった。エアロゾルの場合は多重散乱因子の理論値が距離の関数として変化するため厳密には一定の多重散乱因子を用いて解析することはできない。しかし、測定対象の消散係数が小さい場合 (0.3km^{-1}) は0.2程度の一定の多重散乱因子を仮定して解析が可能であることが示された。

本研究によって、衛星搭載ライダーの解析に必要な多重散乱因子が、巻雲、エアロゾルなどの代表的な測定対象について求められた。

謝辞

モンテカルロ法の原型は、ドイツのミュンヘン大学の数学研究所で開発された。氷晶のミューラー行列は、オーバープファッフェンホーフェン（ドイツ）のDFDのM. Hessのご厚意で提供されたものである。

6. 引用文献

- D. Deirmendjian: *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*, Elsevier, 290pp., 1969
- F. Fernald: *Analysis of Atmospheric Lidar Observations: Some Comments*, *Appl. Opt.*, Vol. 23, 1984, p. 652-653
- K. E. Kunkel, J. A. Weinman: *Monte Carlo Analysis of Multiply Scattered Lidar Returns*, *J. Atm. Sci.*, Vol. 33, 1976, p. 1772-1781
- C. M. R. Platt, D. M. Winker, M. A. Vaughan, S. D. Miller: *Backscatter-to-Extinction Ratios in the Top Layers of Tropical Mesoscale Convective Systems and in Isolated Cirrus from LITE Observations*, *J. Appl. Met.*, Vol. 38, 1999, p. 1330-1345
- Y. Sasano, K. Asai, N. Sugimoto, Y. Kawamura, K. Tatsumi, T. Imai: *NASDA Mission Demonstration Satellite Lidar Project and Its Sciences in: Optical Remote Sensing for Industrial and Environmental Monitoring*, eds: H. Hu, U. N. Singh, and G. Wang, *Proc. SPIE*, Vol. 3504, 1998, p. 2-7
- D. M. Winker, R. H. Couch, M. P. McCormick: *An Overview of LITE: NASA's Lidar In-Space Technology Experiment*, *Proc. IEEE*, Vol. 84, 1996, p. 164-180

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- ① 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).
- ② Liu, Z., P. Voelger and N.Sugimoto, "Simulations of the Observation of Clouds and Aerosols with the Experimental Lidar in Space Equipment (ELISE)," accepted for publication in Applied Optics (2000).
- ③ Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto, 1999: Effects of Multiple Scattering on the Retrieval of Optical Parameters from ELISE - Simulation Study, SPIE 3865, 172-177.
Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto: Influence of System Parameters on Multiple Scattering in Spaceborne Lidar Measurements, SPIE 4153, 631-646 (2001).
- ④ Voelger, P., Z. Liu, and N. Sugimoto: Multiple Scattering Simulations for the Japanese Space Lidar Project ELISE, submitted to IEEE Trans. Geosciens and Remote Sensing (2001).

(2) 口頭発表

- ① P. Voelger, Z. Liu, and N. Sugimoto, Simulation of Lidar Measurements with the MDS-Lidar (ELISE), International Workshop Multiple Scattering Lidar Experiments 10, 1999, Florence.
- ② 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.
- ③ Voelger, P., Z. Liu, N. Sugimoto: Simulation of Lidar Measurements for the MDS-lidar (ELISE) Proc. MUSCLE10, Florence, Italy (1999) p. 128-134.
- ④ 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.
- ⑤ 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).
- ⑥ Voelger, P., Z.Liu and N. Sugimoto, Influence of multiple scattering on measurements with ELISE, The Workshop on Experimental Lidar In SpaceEquipment (ELISE), Tsukuba, January 26, (2000).

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし