特 集

対流圏大気のライダー計測技術

小 林 喬 郎*

(1989年 2 月22日 受理)

Lidar Techniques for the Observation of the
Tropospheric Atmosphere

Takao KOBAYASHI*

(Received February 22, 1989)

Lidar (laser radar) techniques are reviewed for remote sensing of the environmental parameters of the troposphere (altitudes below 11 km). The principles and the basic performance of lidar schemes are classified and compared. The state-of-the-art of the lidar systems and applications are discussed for Mie lidars, differential absorption lidars (DIAL), and Raman lidars. Future possibilities and requirements of research and development of the lidar techniques are discussed.

Key Words: Lidar, Laser radar, Troposphere, Air pollution, Meteorology.

1. はじめに

大気現象の遠隔計測技術としてレーザーレーダー (Laser Radar), またはライダー (LIDAR: Light Detection And Ranging) は, レーザーの出現直後の1962年頃から研究開発が開始され, 既に四半世紀の期間が経過した¹⁻³⁾。創成期には, 高出力・コヒーレントなレーザー光源を導入した高感度な計測システムや計測手法の研究が活発に進められ, 従来の受動的センシング技術では得られない, 大気現象や物理情報の三次元空間分布を実時間で計測する技術の基盤が築かれた⁴⁾。次に, 70年代後半から現在までは発展期で, 大出力レーザーや波長可変レーザー, 大型光学系, 高速ミニコンピュータ技術等の発達に

よって, ライダーシステムの高感度・遠距離化や高性能化が進められた。それによって, 対流圏から超高層に至る大気の成分や気象要素の測定なども可能となり, 大気物理や地球物理学的に新しい知見が多く得られてきた⁵⁻⁶⁾。しかしながら, 多くのシステムは研究目的のみの利用に留り, 当初期待された程の広い利用分野や実用性は未だ実現されていない。

一方, 近年に至り地球規模の大気汚染や気候変動の問題, さらに生活環境の質の保全の重要性が社会的にも認識されてきた。これらの問題の解明にレーザーセンシング技術は, そのユニーク性や高機能性から判断して, 主要な役割りを果たすことができると考えられている⁷⁾。

本文では, ライダーによる対流圏, すなわち

* 福井大学工学部電子工学科 (〒910 福井市文京3-9-1)

* Department of Electronics and Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University, (3-9-1, Bunkyo, Fukui 910)

高度約11km以下の領域の大気環境の計測技術についての基本的事項を示し、さらに種々のシステムについての最近の技術状況と今後の発展の動向についても概観する。

2. ライダーの基本動作

2.1 動作原理とシステム構成

まず、Fig. 1にライダー計測法の概念図を示す。一般的にはパルス動作のレーザーを送信光源として用いて、送信光学系を通してレーザー光を平行ビームにして大気中に送り出す。遠方の物体または微小散乱体で散乱されたレーザー光の後方散乱光を受信光学系で集光し、フィルターで背景光などを取除いて光検出器で電気信号に変換する。受信パルス信号の時間波形から物体や微小散乱体の位置の情報が、また信号の大きさからそれぞれのサイズや密度などの情報を信号処理部で抽出して、そのデータを表示器に表示する。

微小粒子や原子・分子気体などの空間分布した散乱体の場合の受信電力 $P_r(\lambda)$ は次のライダー方程式で与えられる。

$$P_r(R) = P_0 l K A_r \beta(R) T^2(R) Y(R) / R^2 \quad (1)$$

Fig. 1 Basic arrangement of the lidar system.

ここで、 P_0 はレーザー光のピーク出力、 R は散乱体までの距離、 A_r は受信開口面積、 K は送信受信光学系の全効率、 $l = c\tau/2$ (τ : パルス時間幅、 c : 光速) はパルスの空間長の半値、 $Y(R)$ は送信ビームと受信視野の重なりを示す係数で、通常は $Y(R)=1$ の領域を利用する。 $\beta(R)$ は散乱体の体積後方散乱係数と呼ばれ、散乱体の平均密度 $N(R)$ と後方微分散乱断面積 $d\sigma/d\Omega$ に対して次式で与えられる。

$$\beta(R) = N(R) [d\sigma/d\Omega] \quad (2)$$

また、 $T(R)$ はレーザー光の大気透過率で

$$T(R) = \exp\left(-\int_0^R [\alpha_{sp} + \alpha_{sm} + \alpha_a] dR\right) \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 α_{sp} はエアロゾル粒子の散乱、 α_{sm} は大気分子によるレーリイ散乱、また α_a は大気分子の吸収、に基づくそれぞれ消散係数である。

パルス動作のライダーでは距離 R は送信-受信両パルスの時間差 t より

$$R = ct/2 \quad (4)$$

と求められる。また、(1)式より

$$\beta(R) = k P_r(R) R^2 / T^2(R) \quad (5)$$

となる。ここで、 k は装置定数である。近距離では $T(R)=1$ と仮定できるため、(5)は容易に解けて $\beta(R)$ が求められる。しかしながら、遠距離では $T(R)$ が減少するため、この値を導出し補正することが必要となる。この解法は逆散乱問題と呼ばれ、現在まで種々検討されているが、未だ完全な方法は見つかっていない。

2.2 ライダー方式の分類と特長

まず、ライダーの一般的な特徴として、レーザー光の持つ高指向性、短パルス特性、高出力特性、狭帯域スペクトル特性等により、高感度で実時間の遠隔計測が可能となることであり、また相互作用の種類が多く、物質計測(定性分析)や高精度計測が可能となることもが従来のパッシブ法や電波や音波などを利用する計測法

Table I Classification of the optical interaction processes used for the laser remote sensing.

Observable	Interaction Process	Matter	Sensing Parameter
Light Wave	Intensity	Mie Scattering -----	Particle -----Size, Ref. Index, Dens.
		Scattering (elastic) -----	Rayleigh Scatt. -----Molec., Atom --Density, Temperature
		Resonance Scatt. -----	Atom -----Species, Dens., Temp.
	Frequency	Absorption (Differ. Absorp.) -----	Molec., Atom --Spec., Dens., Press., Temp.
		Scattering -----	Raman Scattering -----Molecule --Spec., Dens., Temp.
	Wavelength	(inelastic) -----	Dopplar (Rayl.) Scatt. -----Molec., Atom --Velocity, Dens., Temp.
		Emission -----	Fluorescence -----Molec., Atom --Spec., Dens., Temp.
	Phase -----	Dopplar Shift -----	Partic. Solid --Velocity, Dens.
	Polarization -----	Mie Scattering -----	Particle -----Density, Species
	Propagation Direction -----	Mie Scattering -----	Particle -----Size, Ref. Index
	Velocity (Time Delay) -----	Dispersion -----	Molecule -----Temp., Press.

と比較した場合の利点と言えよう。

Table I にライダーに利用される光波の特性と相互作用の種類、計測可能な物質と物理量の分類を示す。このように、光波の相互作用特性を利用することにより、大気物理・化学パラメータの遠隔計測が可能となる。

次に、これらの相互作用方式の内で大気成分の分析が可能なライダー方式について、最小検出可能密度の距離依存性を比較した結果を Fig. 2 に示す。ここで、システム定数として現状技術で容易に実現可能な値を仮定している。この図より、対流圏大気の分光計測に利用できる相

互作用方式の種類と感度が推定できる。

また、ライダーのデータ表示法は従来の A - スコープから、最近では THI (時間-高度-強度) や RHI (距離-高度-強度)、PPI (面分布) などの 2 次元表示や、レーザー光を高速に走査し動画像として立体表示することも可能となり⁸⁾、これらはライダー独自の機能となっている。

一方、レーザー光は雨や霧などの気象状況により減衰が大きく変化すること、及び現状のレーザー装置が一般に大型であることなどが実用上の制限となっている。

3. ミー散乱ライダー

高度約 11km 以下の対流圏大気中には直径数 nm ～数 μm に至る固体粒子エアロゾルや 0.1 μm ～数 mm の水滴や氷晶などが浮遊しており、これらがミー散乱によりレーザー光を強力に散乱する。ミー散乱の後方散乱係数、すなわち散乱効率が大きいために小型の装置構成でも容易に検出できる特徴がある。このため、現在まで極めて多数の装置が研究開発され、ほぼ実用化の域に至っている動作方式である。

3.1 ミー散乱ライダーシステム

ライダーは装置形態から、固定型と移動型に分類される。固定型の代表例として、国立公害研の大型ライダーシステムは 50km の広域の大気現象を測定できるもので、出力 0.4J の YAG レーザー高調波 (532 nm) の光源を主に利用し、受信開口径は 1.5 m である⁹⁾。特徴として、ミニ

Fig. 2 Comparison of the detection sensitivity and the range relations for laser spectroscopic detection schemes.

コンによるシステム制御とデータ処理、表示等の自動化、高精度の方位設定性能などを備えている。

また、レーザー出力が約1 J 以下で受信鏡口径30~50cmの中型システムは多数見受けられ、大学や研究機関、環境アセスメント企業等で使用されている。

移動型は比較的小型のレーザーと小口径の望遠鏡、ミニコン、磁気テープ等のデータ収録装置を車や飛行機に搭載するシステムである。大気汚染などの発生地域に移動して固定測定する方式⁹⁾と、移動しながら自動測定する方式¹⁴⁾とがある。

レーザー光源としては初期には専らQスイッチ・ルビー(694.3nm)が用いられたが、70年代以後は高繰返しパルス動作の可能なNd:YAG(1.064 μ m)とその第2高調波(532nm)、色素(400~700nm)、N₂(337nm)、TEA CO₂(10.6 μ m)、最近ではエキシマ(258~350nm)や半導体(~800nm)等のレーザーも利用されている。

3.2 対流圏大気現象の計測

次に、ミー散乱ライダーの動作例を示す。

(1) 局地気象現象の観測

(a) 大気境界層構造の測定¹⁰⁾

地上約2kmまでの大気境界層は、地表面からの汚染物質などが閉じ込められ、滞留する領域である。ミー散乱方式ではエアロゾル粒子の3次元空間分布が測定できる。Fig.3にXeClレーザー(波長308nm)を用いたミー散乱ライダーにより、エアロゾルの $\beta(R)$ の高度分布を測定したRHI表示結果を示す。高層(約3km)の雲と下層の境界層のエアロゾル分布の時間変動の様子が分る。

ミー散乱測定においては、体積後方散乱係数 $\beta(R)$ よりエアロゾルの重量密度の相対値が求められ、その空間分布から混合層や温度逆転層などの大気境界層の発達過程やブルームの内部構造が詳細に観測されている。

(b) 雲、霧、雪、雨などの測定

Fig. 3 Time-height indicator (THI) display of a Mie lidar determined backscatter coefficient of aerosol and clouds located at about 3 km height.

雲底高度を測定する雲高計(シーロメータ)は小型ライダーシステムとして実用化が進んでいる¹¹⁾。光源として小型のGaAs半導体レーザー(800~910nm)やEr⁺固体レーザー(1.54 μ m)等が用いられ、空港での航空機の離着陸のための気象データの自動計測システムとして利用されている。

(c) 風の測定

エアロゾル塊のパターンを時間を少しずらして測定し、2板の画像を移動させて相関係数の計算より風速と風向の水平面内の2次元ベクトル量の測定が行われている¹²⁾。さらにドップラー方式ライダーでも風速の測定が可能であり、高精度の測定が行われている¹³⁾。

(2) 大気汚染粒子の局所観測

煙突からの排煙中の微小粒子の検出にミー散乱ライダーは高感度特性を示し、火力発電所排煙等の遠隔地への拡散や移流などの特性が直接的に測定できるため、環境アセスメントに有用な計測手段となっている。

(3) 黄砂やエアロゾルの長距離輸送の測定

エアロゾル分布の広い領域での測定には、航空機搭載の小型システム¹⁴⁾や、多数地点のライダーにより同時観測し、データ交換するライダーネットワークにより、数100～数1000kmの広域にわたる大気汚染の発生源分布や拡散、輸送特性、また海洋上における大気の大気対流構造などの実態を把握することができる。

(4) 視程、エアロゾル散乱特性の測定

ライダーにより斜方向の視程が求められる。すなわち、(5)式から $\beta(R)$ の空間変化を求め、この傾斜がレーザー光の透過率 $T^2(R)$ にほぼ比例することから、(3)式の消散係数と視程の値が求められる(スロープ法)。また、 $\beta(R)$ と消散係数 α_{sp} に比例係数(散乱パラメータ)を仮定することによって、より正確に α と視程が求められる。さらに逆散乱解の安定性に関して、Klettの解法^{15, 16)}以来、散乱パラメータの研究が活発となっており、さらに多波長レーザーによる高精度の解法の検討もある。

4. 差分吸収ライダー(DIAL)

吸収過程を利用するレーザーセンサーの動作法は2.1節の散乱方式の動作法と異なる。差分吸収ライダーは、浮遊粒子をターゲットとして物質の吸収スペクトルの山(共鳴)と谷(非共鳴)の2波長 λ_1, λ_2 のレーザー光を用いてミ-散乱の受信電力 $P_r(\lambda_1, R), P_r(\lambda_2, R)$ を測定し、これより大気中の原子、分子の密度分布 $N(R)$ を次の式により測定する方式で、通常

DIAL(Differential Absorption Lidar)と呼ばれる。

$$N(R) = \{1/2 \Delta \sigma L \} \ln \{ \{P_r(\lambda_1, R) P_r(\lambda_2, R+L)\} / \{P_r(\lambda_2, R) P_r(\lambda_1, R+L)\} \} \quad (7)$$

ここで、 L は空間分解能、 $\Delta \sigma$ は吸収断面積の差分値である。この様に、DIAL方式は散乱法と吸収法の複合技術と言えよう。

4.1 DIAL システム

Fig. 4に、 SO_2 分子密度の空間分布測定のための車載型DIALのシステム構成を示す¹⁷⁾。光源は2台のNd:YAG励起色素レーザーSH光で、300nm付近の2波長での出力は10mJ、受光鏡口径50cmの装置特性である。

Table IIにDIALおよびラマン散乱ライダー

Fig. 4 Block diagram of a DIAL system for the remote measurement of SO_2 , O_3 and NO_2 . (Hawley et al.¹⁷⁾)

Table II Characteristics of the DIAL and the Raman lidars for the tropospheric constituent measurements

Constituent (Parameter)	Scheme*	Wavelength (μm)	Laser	Sensitivity	Max. Range	Institute
Hg, NO	DIAL(M)	0.425	Dye SH	1 ng/m ³	1 km	Lund IT
SO ₂ , O ₃ , NO ₂	DIAL(M)	0.30, 0.45	YAG-dye	2 ppb·km	3 km	SRI
SO ₂ , O ₃ , NO ₂	DIAL(A)	0.30, 0.45	YAG-dye	10 ppb·km	15 km	NASA
NO ₂	DIAL	0.463	Dye	3.5 ppb·km	1 km	NIES
HCl	DIAL(S)	3.64	DF	30 ppb·km	2 km	GKSS
O ₃	DIAL	9.50	CO ₂	4.5 ppb·km	2 km	Radio RL
O ₂ (press.temp.)	DIAL	0.759	Alex.	0.3 %, 2 K	2 km	NASA
H ₂ O (humid.)	DIAL(H)	10.2	CO ₂	0.5 g/m ³	10 km	NOAA
N ₂ (press.)	Vib.Raman	0.694	Ruby	5·10 ⁻⁴ atm	40 km	Univ. WI
N ₂ , O ₂ (temp.)	Rot.Raman	0.5106	Cu	1 K	1 km	IAO,Tomsk
H ₂ O (humid.)	Vib.Raman	0.355	YAG TH	1 %	10 km	NASA

* M:Mobile, A:Aircraft borne, S:Ship borne, H:Heterodyne detection

の動作特性例を示す。レーザーとしては、表中のルビー、色素、 CO_2 、DF 以外に、最近では半導体やアレキサンドライト($\text{Cr}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$)、 $\text{Co}:\text{MgF}_2$ 等の固体やエキシマなども利用されている。

DIAL の特性としては、(7)式から分るように、最小検出可能密度 $N_{\min}(R)$ と距離分解能 L には、不確定性関係がある。すなわち、 L を長くとり距離分解能を下げると $N_{\min}(R)$ が小さくなって高感度になる。このため、これらの積 $S = N_{\min}(R) \cdot L$ の値で感度特性が評価される。

4.2 大気成分計測への応用

(1) 大気汚染分子の立体的観測

Fig. 5 に、前節の Fig. 4 で示した DIAL システムによる火力発電所から放出された排煙中の SO_2 密度分布の PPI 表示を示す¹⁷⁾。2 波長のレーザー光のパルス間隔を $100\mu\text{s}$ と大気状態のゆらぎ時間約 1ms よりも短くすることにより測定精度の向上を図っており、 2.5km の距離まで精度約 20ppb で測定可能である。この観測結果より、排煙中の SO_2 ガス成分の移流や拡散特性が明確に解析できる。

また、DIAL システムを航空機や船舶に載せて移動測定する試みが活発に行われている。NASA では、 O_3 や水蒸気、 SO_2 、 NO_2 、エアロゾルなどの高度分布測定を行っており、陸上

Fig. 5 Ground-level map of SO_2 concentrations downwind of a coal-fired power plant by using a DIAL system. (Hawley et al.¹⁷⁾)

や海洋上の汚染状態や大気構造の広域分布についての詳細なデータを得ている¹⁸⁾。一方、船舶搭載の DF レーザー DIAL (出力 $10\sim 30\text{mJ}$) により、廃棄物焼却船の排煙中の HCl 密度が空間分解能 75m で、約 300ppm の精度で計測されている¹⁹⁾。このシステムによって北海での焼却船からの HCl の放出総量などを導出している。

(2) 気象要素 (湿度、気温、気圧) の測定

DIAL による対流圏内の気象要素の三次元計測も種々試みられている。まず、湿度は H_2O 分子の吸収線に波長を一致させて分子密度を求めるもので、ルビーや CO_2 レーザーに代って、最近では $0.7\sim 0.9\mu\text{m}$ の色素レーザーが主に利用されている。例えば、フランス CNRS では出力 70mJ の色素レーザーと 60cm の集光鏡を用いて 6km の高度まで、従来のラジオゾンデ測定と変わらない 10% 程度の高精度での遠隔計測を行っている。

大気温度と気圧の DIAL 計測法としては NASA の研究が注目される²⁰⁾。測定原理としては、前者では大気中の O_2 分子の吸収断面積の温度変化を、後者では圧力依存性を利用している。波長可変アレキサンドライト固体レーザーを出力 100mJ 、線幅 0.02cm^{-1} 、安定度 0.005cm^{-1} で高安定動作させ、 2km の高度まで精度 0.3% で気圧の測定が可能となっている。また、気温の測定では $\pm 2\text{K}$ 程度の精度で測定されている²¹⁾。これらの DIAL を将来、スペースシャトルに搭載して上空から大気の大気温度や圧力の高度変化をグローバルに測定することが可能になると予測される²²⁾。

5. ラマン散乱ライダー

5.1 システム

ラマン散乱は、散乱断面積が小さいため 1ppm 以下の微量物質の検出には適さない。しかし、単一波長の UV 域レーザー光源を用いると多数の物質の種類と密度の定量測定ができ、散乱方式であるため距離分解能が高く、また温度や圧力等の状態が変化しても安定な測定が可能なのが特徴である²³⁾。

Fig. 6 に Nd : YAG レーザー 第 3 高調波を利用する湿度 (水蒸気量) 測定用のラマン散乱ライダーシステムの構成を示す²⁴⁾。

5.2 気象要素の測定

湿度の測定例として, Fig. 7 に大気中の水蒸気混合比の高度分布の測定結果を気球での測定結果と比較した例を示す²⁴⁾。この実験では, 前図 Fig. 6 に示したシステムを用いている。両者の測定値が極めてよく一致しており, また前線通過時の大気構造の変化を精密にとらえることに成功している。

Table II に示したように, 比較的大型の装置

Fig. 6 Block diagram of the Raman lidar system to observe moisture profiles. (S. H. Melfi et al.²⁴⁾)

Fig. 7 A comparison of Raman lidar derived water vapor mixing ratio profiles with a rawinsonde measured profile²⁴⁾.

では N_2 分子の振動ラマン散乱による大気分子密度が高度 40 km まで求められ, 大気分子の回転ラマン散乱によっても 8 km まで求められており, 高層の気温及び気圧分布の測定が可能となっている。

さらに, 回転ラマン散乱スペクトル形状の温度変化を利用した大気温度の測定法も検討されている。Cu 蒸気レーザーを用いた回転ラマン方式ライダーでの気温測定実験では, 1 km の高度で $\pm 1.5 K$ の精度が得られている²⁵⁾。

5.3 大気分子, 汚染物質の測定

ラマン方式では, ジェットエンジンの排出ガスや排煙中ガス成分と濃度の測定が可能である²³⁾。さらに, 大気 CO_2 分子の測定なども行われている。また, 最近の高出力紫外域エキシマレーザーの利用により, さらに高感度化や多機能化が期待されている。

6. ライダー技術の展望

次に, 対流圏大気計測を中心とした主要なライダー技術の研究開発や実用化の可能性について展望する。

(1) 小型, 可搬, 自動計測型のミー散乱及び DIAL システム

半導体レーザーを利用する RM-CW 法²⁶⁾やパルス動作法が開発されており, 数 km のミー散乱計測に実用化が進められている。

(2) コヒーレントライダー

赤外域の CW またはパルスレーザーを用いたヘテロダイン検波によるドップラー方式ライダーによる風速, 風向, 乱流の計測や²⁷⁾, DIAL による大気成分の高感度計測法の開発が進展している¹³⁾。

(3) 人工衛星利用の 3 次元グローバル大気の計測システム

大気微量成分, 風, 気象要素などのスペースライダー計測技術の開発が各国で進展の気運にある²⁸⁾。

(4) 気象要素, 風などの高精度計測ライダー都市域や空港, 発電所等の数 km 程度の局所気

象現象の精密計測のためのラマン方式やDIAL, ドップラー方式システムの実用化が期待されている。

(5) 広域気象予報及び環境汚染監視用ライダーネットワーク

多数のライダーステーションを結んで、広域にわたる大気輸送特性の実時間データを処理するネットワークの構築が高度情報化時代には可能となるであろう。

7. まとめ

以上のように、ライダーは地球大気環境の研究手段や監視技術としてその重要性が見直されてきている。しかしながら、その持てる可能性の実現のためには、さらにレーザー技術の進展が必要で、とくに現状のレーザーに対して高効率化、広帯域波長可変特性、スペクトルの高純度・安定化、長寿命化、小型・軽量化、などの特性改善が期待されている。この条件を満たす新レーザーとして高出力半導体レーザーや波長可変固体レーザーなどが注目される。この様にライダー技術は今後、主に中領域出力のレーザーの進展を促すものと考えられる。

また、ライダーを中心とするレーザー遠隔計測技術の広い実用化のためには、その利用分野や利用方法などのソフトウェア面に関して、環境科学や地球物理学などを含む新しい学際的な研究・協力が必要となっている。

参 考 文 献

- 1) E. D. Hinkley ed.: *Laser Monitoring of the Atmosphere*, (Topics in Appl. Phys. 14, Springer-Verlag, New York) (1976).
- 2) D. K. Killinger and A. Mooradian ed.: *Optical and Laser Remote Sensing* (Springer-Verlag, New York) (1983).
- 3) R. Measures: *Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications*, John Wiley and Sons, New York (1984).
- 4) 稲場文男他: (日本気象学会編): ライダ (レーザーレーザー) と気象観測, 気象研究ノート, 116号 (1973).
- 5) 竹内延夫: 日本リモートセンシング学会誌, 2 (1982) 3.
- 6) 五十嵐隆: レーザー学会編レーザーハンドブック, 27章, オーム社 (1983) 529.
- 7) T. Kobayashi: *Remote Sensing Reviews*, 3 (1987) 1.
- 8) E. W. Eloranta: 14th ILRC (Int. Laser Radar Conf.) Abstracts (1988) 150.
- 9) H. Shimizu, Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsuda and M. Okuda: *Opt. Quant. Electron.* 12 (1980) 159.
- 10) 笹野泰弘他: エアロゾル研究, 2 (1987) 128.
- 11) 石川直樹, 佐藤家郷: 第8回レーザ・レーダシンポジウム予稿集 (1982) 57.
- 12) Y. Sasano, H. Hirohara, T. Yamasaki, H. Shimizu, N. Takeuchi and T. Kawamura: *J. Appl. Meteor.*, 21 (1982) 1516.
- 13) R. M. Hardesty: *NOAA Tech. Memorandum*, ERL-WPL-118 (1984).
- 14) E. E. Uthe and W. E. Wilson: *Atmos. Environ.* 13 (1979) 1395.
- 15) J. D. Klett: *Appl. Opt.*, 20 (1981) 211.
- 16) J. D. Klett: *Appl. Opt.*, 25 (1986) 2462.
- 17) J. G. Hawley, L. D. Fletcher and G. F. Wallace: *Opt. and Laser Remote Sensing*, Springer-Verlag, New York (1983) 128.
- 18) E. V. Browell et al.: *Appl. Opt.*, 22 (1983) 522.
- 19) H. J. Heinrich et al.: 12th ILRC Abstracts, F11 (1984).
- 20) C. L. Korb and C. Y. Weng: *Appl. Opt.*, 22 (1983) 3759.
- 21) G. K. Schwemmer et al.: 12th ILRC Abstracts, D3 (1984).
- 22) P. B. Russell et al.: *Appl. Opt.*, 21 (1982) 1554.
- 23) H. Inaba and T. Kobayashi: *Opto-Electron.*, 4 (1972) 101.
- 24) S. H. Melfi, D. Whiteman, R. Ferrare and V. Falcone: 14th ILRC Abstracts (1988) 60.
- 25) Y. F. Arshinov, V. E. Zuev and V. M. Mitter: *Appl. Opt.*, 22 (1983) 2984.
- 26) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba and K. Sakurai: *Appl. Opt.*, 22 (1983) 1382.
- 27) J. W. Bilbro: *Optical and Laser Remote Sensing*, Springer Verlag (1983) 356.
- 28) LAWS Instrumental Panel Report, NASA EOS Report II g (1988).