

信州大学における高層大気観測用ライダーシステム

小林啓二* 斉藤保典** 鹿野哲生*** 野村彰夫***

(平成6年10月31日 受理)

The lidar system for upper atmosphere observations at Shinshu University

Keiji KOBAYASHI* Yasunori SAITO** Tetsuo KANO***
Akio NOMURA***

In order to study the upper atmosphere, we have developed and installed a lidar system at Nagano Campus, Shinshu University ($36^{\circ} 40'N$, $138^{\circ} 12'E$) for measuring the mesospheric sodium layer, the stratospheric aerosols and the atmospheric molecular density above the tropopause. The lidar system is composed of two lasers which are a dye laser and a Nd:YAG laser, a Newtonian telescope of 1 m in diameter, the multipurpose photodetecting system with photomultiplier tubes, and a processing system with a personal computer. In this paper, we describe the configuration of the developed lidar system in detail and discuss its feasibility on the bases of the results obtained by field measurements.

1. はじめに

地球大気について詳しく知ることは地球大気環境問題を解決していく上で大変重要である。地球大気を観測する手段として、ロケット、高層気象ゾンデ、人工衛星、気象レーダ等多数存在するが、その中でもライダー（レーザ・レーダとも言う）は非常に有用である。ライダーとはレーザ光を大気中に射出し、その散乱強度から対象物の光学的な物理量を推定するものである。ライダーはレーザ光の射出を高速に繰り返すことにより、数分または数秒オーダーでデータを取得する事ができ、飛行機、気象ゾンデ及びロケット観測とは比較にならないほど優れた時間及び空間分解能を持っている。

1960年にMaimanによってルビーレーザの発振が実現される¹⁾とライダーはその応用として研究され始めた。1963年にはMITのFiocco及びSmullinによって初めてライダー観測が行われ²⁾、それ以後様々なライダーが研究開発され、観測が行われてきた。ライダーの中でもミー散乱を用いたエアロゾル、霧、雲の観測やレーリー散乱を用いた高層大気

* 大学院博士後期課程システム開発工学専攻

** 情報工学科 助教授

*** 情報工学科 教授

密度観測は最も一般的であり、代表的なライダーとして国立環境研究所の広域大気汚染観測用大型ライダーシステムが挙げられる³⁾。最近ではグローバルスケールでの観測が必要となりスペースライダーの開発が進められ、1994年9月上旬にスペースシャトルにライダーを搭載して、初めてスペースライダー観測(LITE計画)がNASAによって行われた⁴⁾。中間圏ナトリウム原子層の観測は、レーザが開発される以前には太陽光の共鳴散乱を利用して行われていた⁵⁾。1960年代後半になって、Bowmanらによって初めてナトリウム原子層のライダー観測が行われ⁶⁾、それ以後フランス⁷⁾、ドイツ⁸⁾、ブラジル⁹⁾、南極¹⁰⁾、アメリカ¹¹⁾、日本¹²⁾等世界各地で観測が行われている。最近では狭帯域化されたライダーを用いてナトリウム層の温度や風を観測することにより中間圏の大気変動が研究されている^{11,13)}。他にもラマン散乱を利用したラマンライダーや吸収を利用した差分吸収ライダーにより、大気中の N_2 、 O_2 、 CO_2 、 SO_2 、 NO_2 、 H_2O 等の大気組成の観測¹⁴⁾、オゾン層観測^{15,16)}等が行われている。

本研究は高層大気変動のトレーサとなる中間圏ナトリウム原子層(高度80~110km)及び気候変動の原因となりうる成層圏エアロゾル層(高度10~30km)を観測する事を目的としている。中間圏ナトリウム原子層観測は、日本では本学その他、東京都立大学においてしかライダー観測は行われておらず、世界においてもナトリウム層観測を行っているライダー基地は非常に少ない。従って、本ライダーシステムは日本のみならず世界的にみても貴重な結果を供給するものであり、地球的な高層大気変動を調べる上で重要な役割を成すものであると言える。また、火山性成層圏エアロゾルは気候変動の主原因となりうるものであり、これを観測することは気候変動を予測したり成層圏を知る上で重要である。火山性エアロゾルのライダー観測は1974年のフエゴ火山噴火¹⁷⁾の時初めて行われた。その後1982年には当時今世紀最大規模といわれたエルチチョン火山噴火等のライダー観測が行われた¹⁸⁾。そして1991年6月15日にフィリピン・ピナトゥボ火山において今世紀最大規模の大噴火が起こった。噴火後、世界各地でライダー観測が行われ、日本においても本学その他、つくば、八王子、豊川等で、国立研究所や大学によってライダー観測が行われた¹⁹⁻²⁴⁾。

本論文では、我々が開発を行い、情報工学科6階に設置した高層大気観測用ライダーについてそのハードウェア及びソフトウェアのシステム構成について詳しく紹介し、実際のフィールド観測データを基にしてシステムの評価・検討を行う。

2. ライダーシステムのハードウェア構成

2.1 システムの概要

本研究で用いているライダーシステムのシステム構成図をFig.1に示す。現在このライダーシステムの観測対象物は中間圏ナトリウム原子層及び成層圏エアロゾルである。

送信レーザには、ナトリウム原子層観測用としてフラッシュランプ励起色素レーザが用いられ、成層圏エアロゾル観測にはさらにYAGレーザも使用されている。受信望遠鏡に

は直径 1 m のニュートン型望遠鏡を用いている。望遠鏡で集光された散乱光は干渉フィルターを通り光電子増倍管で光電変換される。信号処理では光子計数法とアナログ計測法が用いられている。信号処理されたデータはパーソナルコンピュータ上でリアルタイム処理される。リアルタイム処理されたデータはディスプレイ上に表示され、プリンターに出力される。またデータは 1 次データベースに保存され、後に解析処理が行われる。詳しくは後で述べる。ライダーシステムの性能を Table.1 に示す。

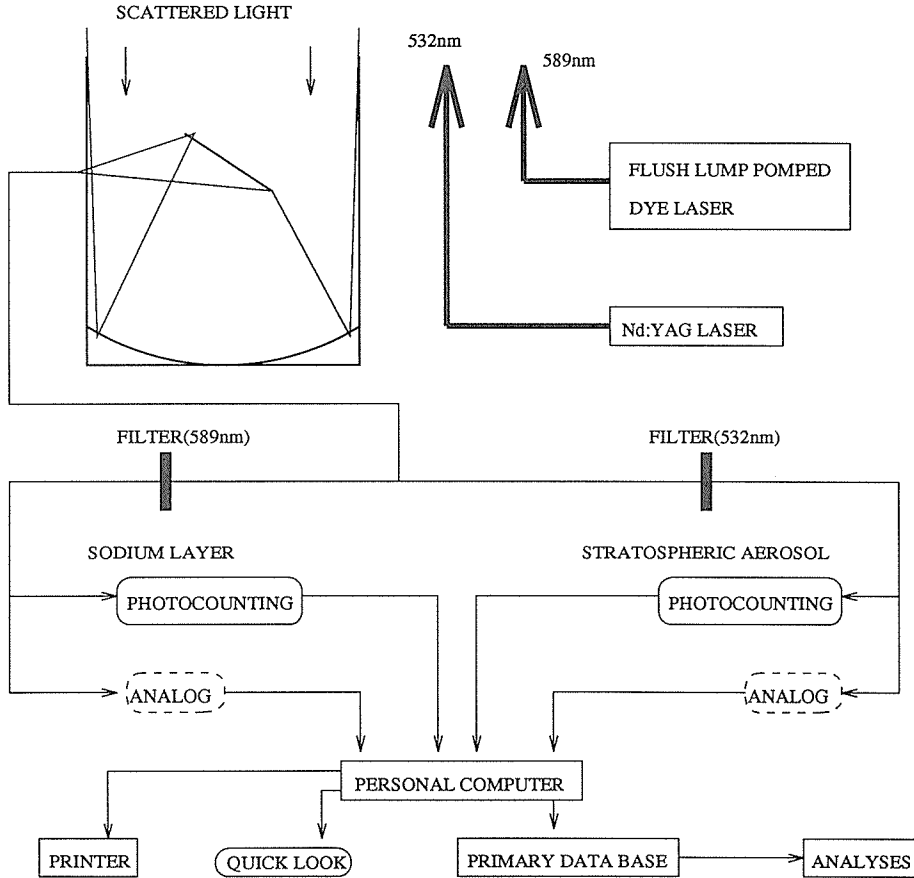


Fig. 1 Block diagram of the lidar system.

2.2 送信系

送信レーザーには、中間圏ナトリウム原子層観測用としてナトリウム D 2 線 (589nm) に同調した色素レーザー (SLL-500:Candela 社) を用い、成層圏エアロゾル層観測用として色素レーザーに加えて YAG レーザー (Surelite-10: Continuum 社) の第 2 高調波 (532nm) も用いている。レーザー光はビームエクパンダーを通して、直径 30mm 程度、ビーム広がり

を全角 1 mrad 以下にし、45° ミラーによって上空に射出される。色素レーザ送信システム構成を Fig.2 に示す。

レーザ光の波長同調と狭帯域化は、3ヶのプリズムと温度コントロールされた2枚のエタロン板（厚さ 0.25mm, 4.0mm）で行われる。同調のモニターには、回折分光器とファブリペロー干渉計が用いられる。また、レーザ光の出力エネルギーはパワーメータによりモニターされる。

成層圏エアロゾル層観測ではミー散乱を利用しているため、レーザ光を特定の波長に同調する必要はない。したがって観測に際しては、YAGレーザの第2高調波が使用される。

Table.1 Characteristics of the lidar system.

Transmitting system		
Laser	DYE (SLL-500)	YAG(Surelite-10)
Wavelength	589.0 nm	532.0 nm(SHG)
Linewidth	3.0 pm	0.1 nm
Output energy	80-100 mJ	110 mJ
Pulse length	500 ns	6 ns
Pulse rate	0.2 Hz	10 Hz
Beam divergence	< 1.0 mrad	< 1.0 mrad
Receiving system		
Telescope	Newtonian (diameter 1 m)	
Field of view	0.5~6 mrad (variable)	
Optical bandwidth	1.0 nm	3.0 nm
Optical efficiency	9 %	
Quantum efficiency	15 % (R943-02)	16 % (R943-02)
Signal processing system		
Detection	Range-gated photocounts	
Height resolution	0.1~9.9 km(variable)	
Processing unit	Personal computer	

2.3 受信系

上空に射出されたレーザ光の散乱光は、直径 1m のニュートン型反射望遠鏡によって集光される。集光された光は干渉フィルターによって 589nm ± 0.5nm (YAG レーザ用 532nm ± 1.5nm) 以外の光はカットされ、多目的受光システムにある各々の光電子増倍管 (PMT:R943-02, 浜松フォトニクス) に送られ、そこで電気信号に変換され信号処理系に送られる。

多目的受光システムでは最大7個の光電子増倍管が取り付け可能となっている。これは受信光をいくつかの光路に分け、アッテネータを組み合わせて複数の光電子増倍管で受信することにより、近距離から遠距離までの高度範囲を同時観測できるようにしたものである。また、将来的に同時多波長ライダーの受信系にも使用できるように設計されている。

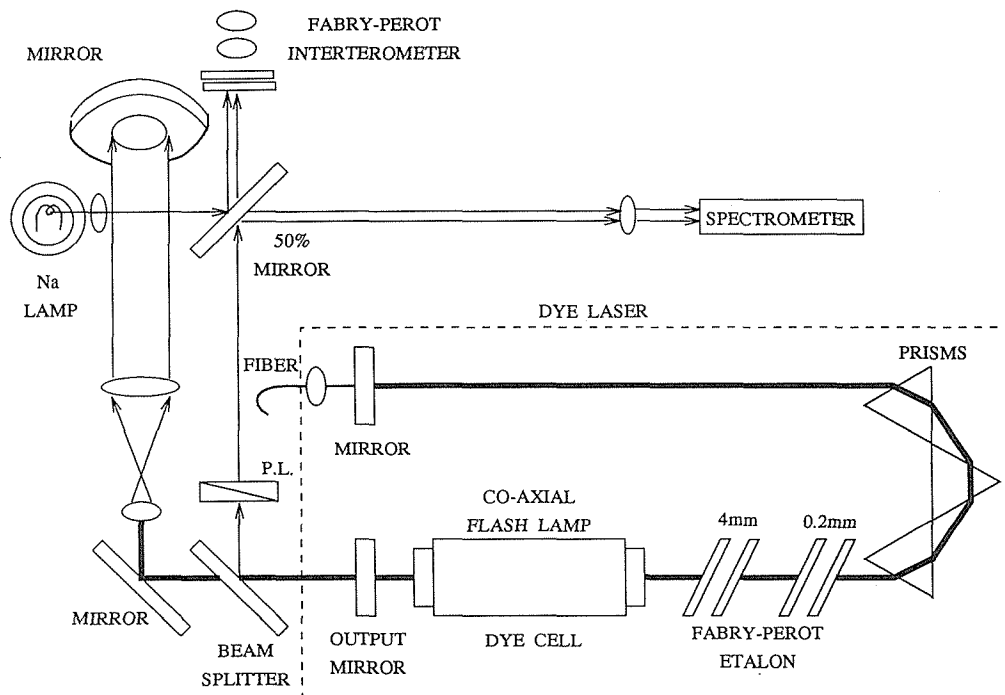


Fig. 2 Schematic diagram of the dye laser system.

2.4 信号処理系

高度 10km 以上からの信号は極微弱なため、本システムでは光子計数法を採用した。光子計数法とは、受信信号が微弱であり、離散的な光子として得られる状態の時（観測対象物が遠方にある場合）、光子の個数を計数する事で受信信号強度を求める計測法である。ただし、多目的受光システムを完成させることにより、近距離からの強い信号を受信して計測することが可能なアナログ計測法も使用できる。アナログ計測法とは、いくつかの光子が同時に光電面に衝突する状態の時（観測対象物が比較的近距离にある場合）、光電変換器に生じた、光子数すなわち受信信号強度に比例した電圧を A/D 変換し波形記録装置に取り込んで対象物質の空間濃度分布を求める計測法である。

光電子増倍管からの信号は先ず前置増幅・波高弁別器（前置増幅・波高弁別器：E G & G 社 MODEL1121A）に入力され、一定の波高（ディスクリレベル）以下の信号をノイズとしてカットする。ディスクリレベル以上の信号は同じ高さのパルスを出力する。前置

増幅・波高弁別器の性能を Table.2 に示す。

Table.2 Characteristics of the discriminator control unit(MODEL1121A:EG & G).

Input signal	Impedance	50 Ω
	Input signal	Negative pulse
	Detect pulse width	2.5ns
	Input terminal	BNC
Amplifier	Band width	150MHz
	Coupling	AC coupled
Discriminator	Max count rate	
	periodic pulse	100MHz
	random pulse	37×10^6 count/s
	Dead time	5ns

Multi channel counter(以下 MCC とする)のブロック図を Fig.3 に示す。前置増幅・波高弁別器からの信号は MCC に送られ、一定のゲート幅毎のパルスを計数し、FIFO メモリに一旦格納した後、パーソナルコンピュータ(PC-9801)に転送される。ここではデータ転送及びメモリ初期化時の Dead Time をなくすため、2つのカウンタを交互に使用している。MCC の性能を Table.3 に示す。ゲート幅は可変であるが、通常、成層圏エアロゾル層観測の場合は 0.1km、中間圏ナトリウム層の場合は 1.0km に設定して観測を行っている。

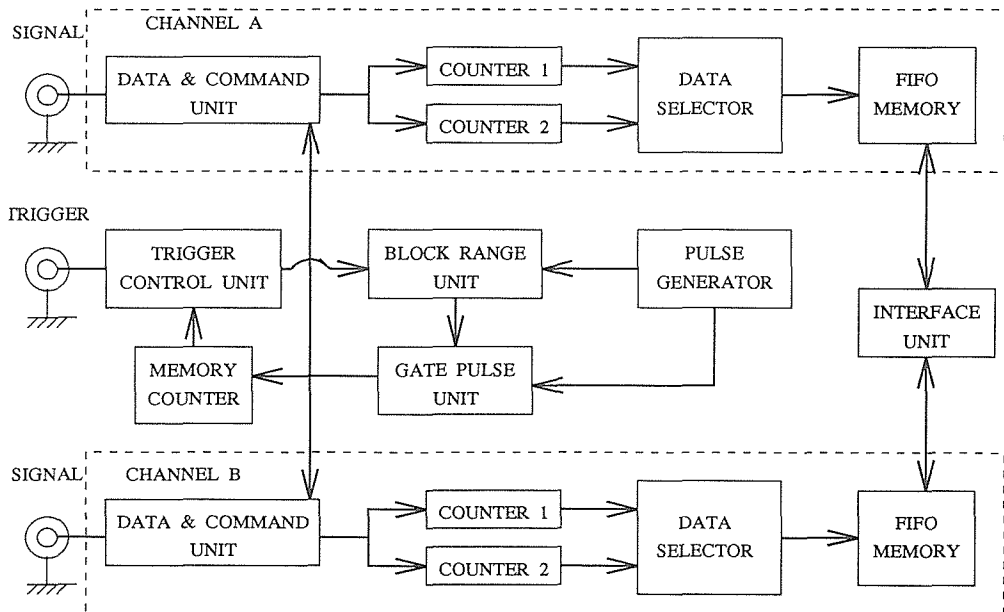


Fig. 3 Block diagram of the multi channel counter.

Table.3 Characteristics of the multi channel counter.

Input	Signal	Channel number	2
		Impedance	50 Ω
		Input level	ECL
		Detectable pulse width	4ns
		Input terminal	BNC
	Trigger	Impedance	50 Ω
		Input level	TTL
		Detectable pulse width	70ns
Counter	Capacity	Periodic pulse	5.0×10^7 cps
		Random pulse	5.0×10^6 cps
		Gate width	0.1~9.9km(0.1km/step)
		Block range	0~99km(1km/step)
Memory	Organize	FIFO Memories 8BIT × 511WORD × 2CH	
Output	Data	Parallel 16BIT	
	Command	Clear, Retransmit, Read	
	Status	Full-flag, Empty-flag	

3. データ及び解析処理

MCC からパーソナルコンピュータに取り込まれた信号は距離自乗補正を施されて、A スコープ（横軸が距離，縦軸が受信信号強度）としてコンピュータディスプレイ上にリアルタイム表示されると同時にプリンターにも出力される。また得られたデータは1次データベースに保存される。

中間圏ナトリウム原子層観測条件はレーザーパワー 20mW，視野角 1.5mrad，距離分解能 1.0km，積算回数 100 回である。また，成層圏エアロゾル観測条件は，レーザーパワー 20mW（色素レーザー使用時は受信系に T=2.48% のアッテネータを設置），視野角 1mrad，距離分解能 0.1km，積算回数 100 回（色素レーザー）,8000 回（YAGレーザー）である。

中間圏ナトリウム原子層観測と成層圏エアロゾル観測のリアルタイム表示で得られるAスコープ表示例を Fig.4, 5 に示す。Fig.4 において，高度 80~100km にナトリウム層からの強い受信信号が得られている。この高度において誤差は 10%以内であり，良い S/N比が得られている。Fig.5 において高度 13~30km に，成層圏エアロゾルからの強い受信信号が得られている。この図から，高度 30km 付近までの成層圏の観測が可能である事がわかる。

1次データベースに保存されたデータは一連のデータ解析が行われ，観測対象物に関して様々な情報を得ることが出来る。解析処理はコンピュータを用いて行われる。1次データベースに保存されたデータは各高度からの受信光子数である。

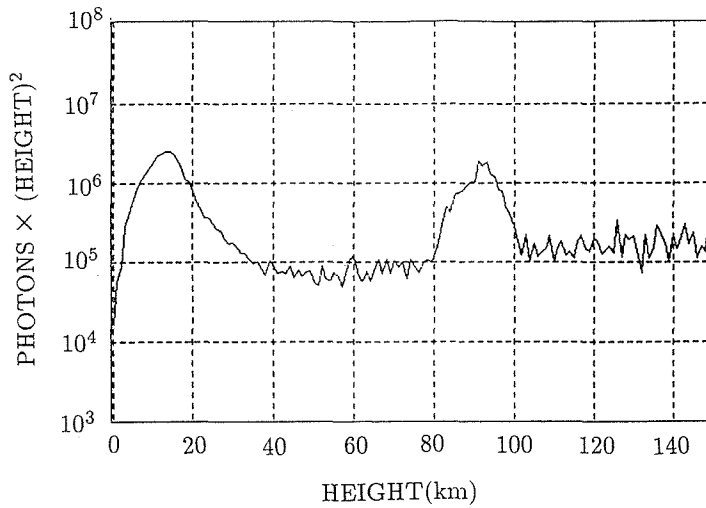


Fig. 4 The data of mesospheric sodium layer observation.(1993.4.15)

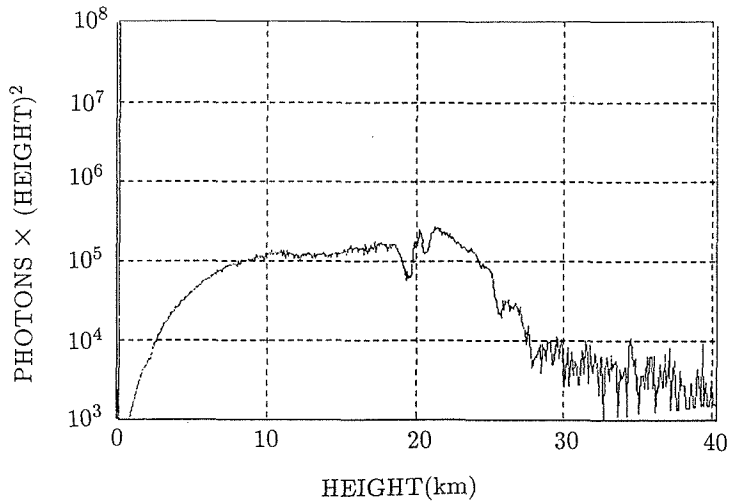


Fig. 5 The data of stratospheric aerosol layer observation.(1991.12.14)

受信光子数から、散乱対象物の密度を得る際に用いられるのが以下に示すライダー方程式¹⁰⁾である。

$$n(z) = n_0 \frac{\eta A K Y(z) T(z)^2 \beta(z) \Delta z}{z^2} + n_B$$

ただし、 $\beta(z) = N_M(z)(d\sigma/d\Omega)_M + N_A(z)(d\sigma/d\Omega)_A + N_{Na}(z)(d\sigma/d\Omega)_{Na}$

- $n(z)$: 高度 $z \sim z + \Delta z$ からの受信光子数
- n_0 : 送信光子数
- n_B : 背景光雑音
- z : 高度
- η : 光電子増倍管の量子効率
- A : 受光面積
- K : 送受信系光学効率
- $Y(z)$: 送受信系の視野の重なり
- $T(z)$: 大気の透過率
- $\beta(z)$: 体積後方散乱係数
- $N_M(z)$: レーリー散乱粒子 (大気分子) 数密度
- $N_A(z)$: ミー散乱粒子数密度
- $N_{Na}(z)$: ナトリウム原子数密度
- $(d\sigma/d\Omega)_M$: レーリー散乱粒子の後方微分散乱断面積
- $(d\sigma/d\Omega)_A$: ミー散乱粒子の後方微分散乱断面積
- $(d\sigma/d\Omega)_{Na}$: ナトリウム原子の後方微分共鳴散乱断面積

成層圏エアロゾル層観測解析の場合には $N_{Na}(z)(d\sigma/d\Omega)_{Na}$ の項を 0 と仮定し, 中間圏ナトリウム原子層解析の場合には $N_A(z)(d\sigma/d\Omega)_A$ の項を 0 と仮定している。中間圏ナトリウム原子層観測解析処理の流れ図を Fig.6 に示す。

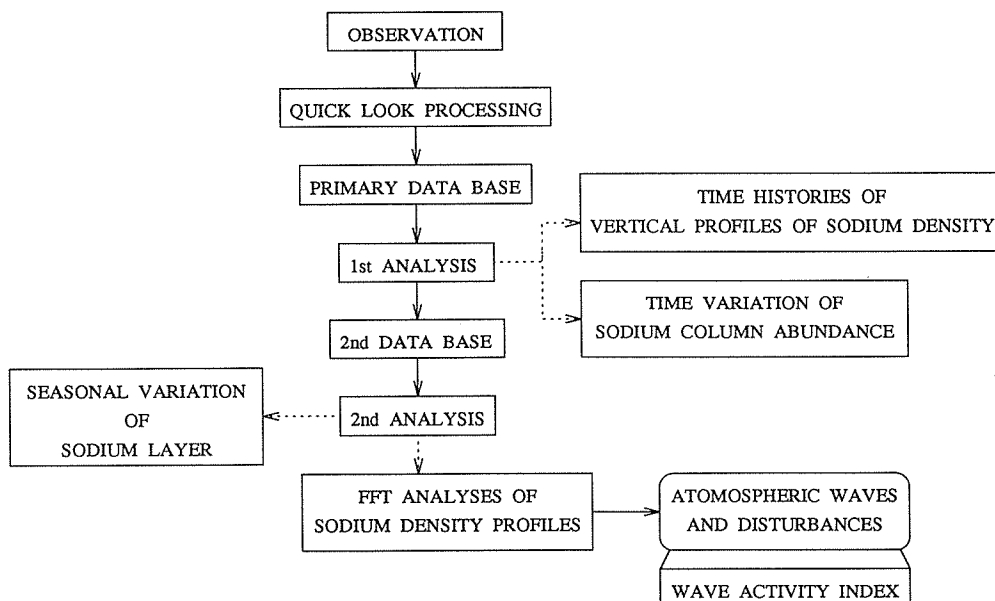


Fig. 6 Flow chart of the analyses(mesospheric sodium layer).

1 次データベースに蓄えられた各データは一次データ加工が行われ, ナトリウム層高度

分布と気柱密度の夜間変化が求められる。この夜間変化の例を Fig.7 に示す。Fig.7 において、午前 0 時から 1 時にかけてナトリウム気柱密度がピークを迎えていることがわかる。

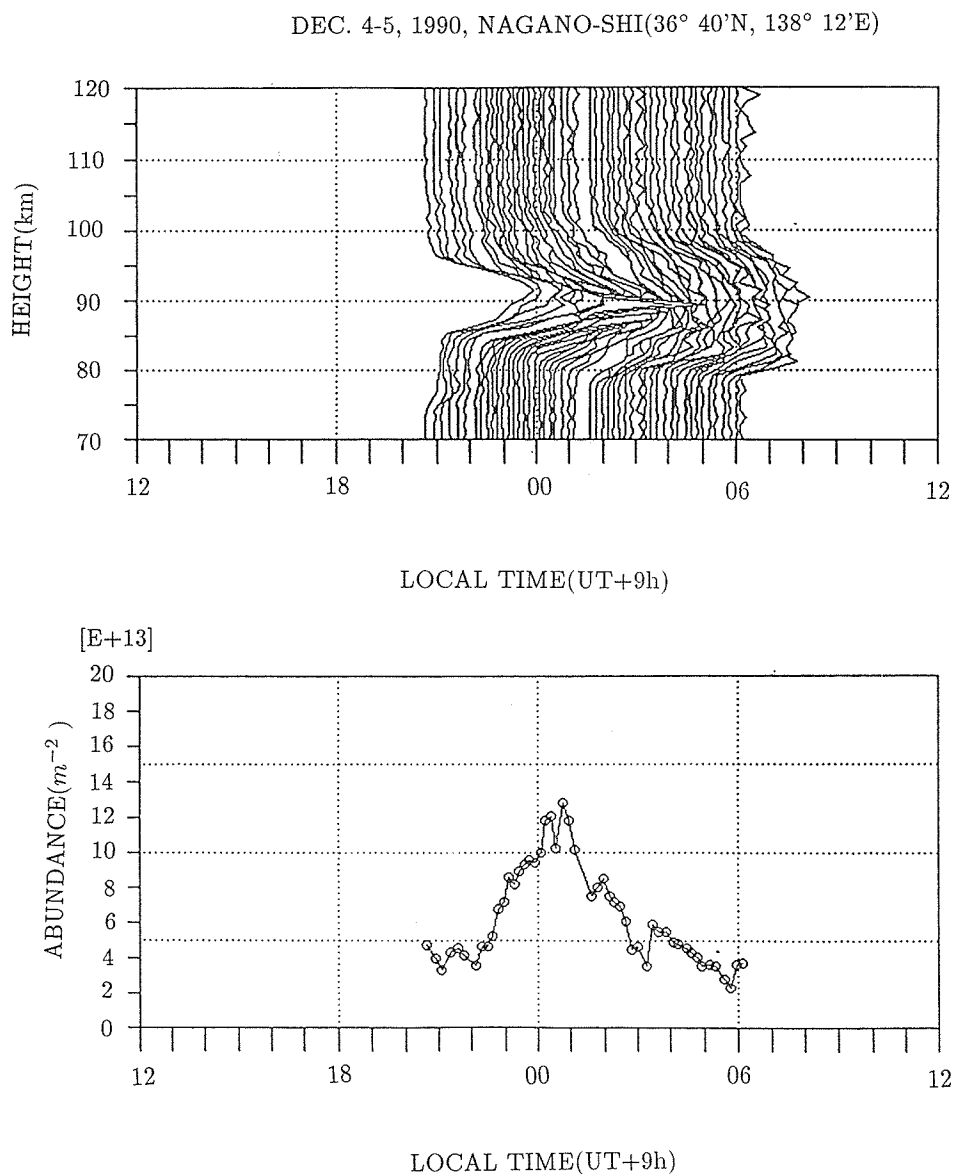


Fig. 7 Time histories of vertical profiles of sodium density(upper). Time variation of sodium column abundance(lower).

DEC. 4-5, 1990, NAGANO-SHI(36° 40'N, 138° 12'E)

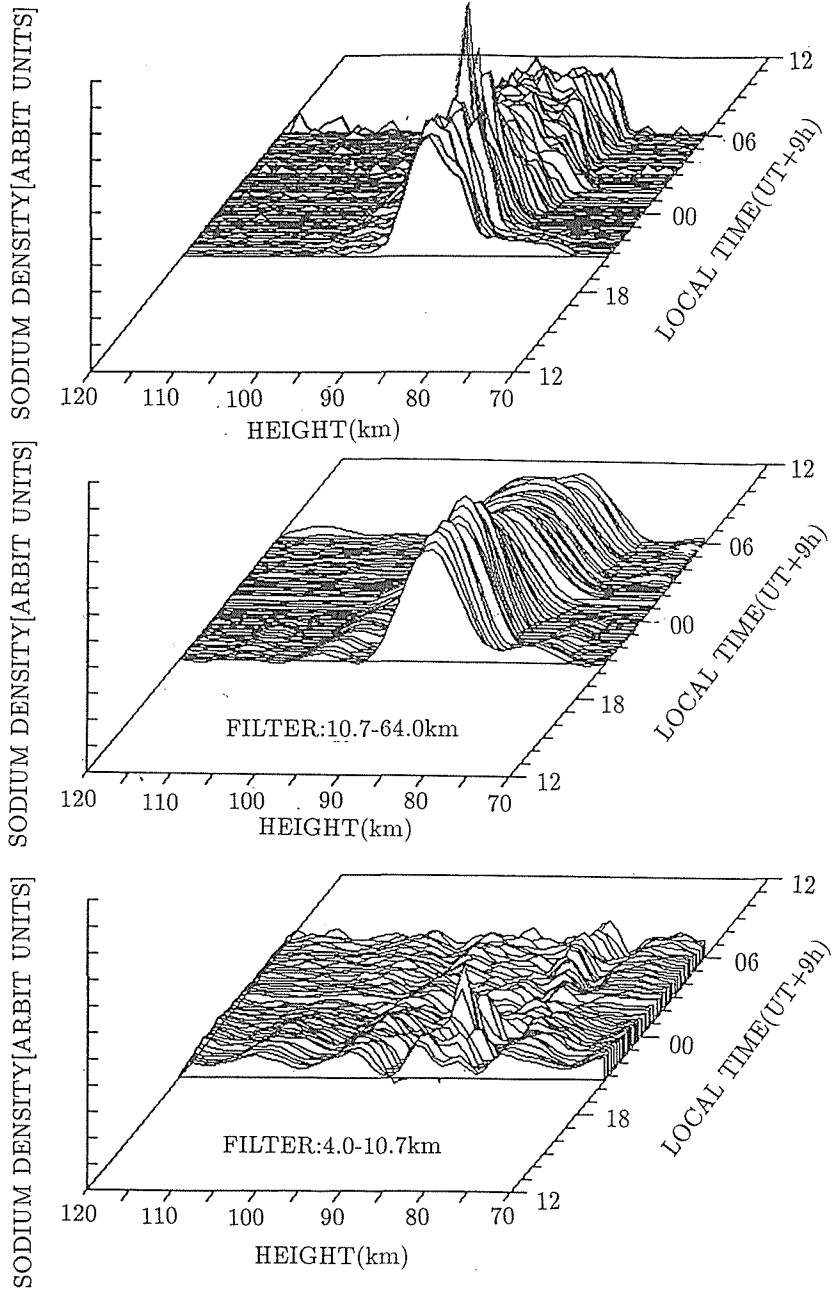


Fig. 8 FFT analyses of sodium density profiles.

1次データ加工の結果は2次データベースに保存され、2次加工が行われる。2次加工で

は、空間スペクトルの長波長成分（4.0km～10.7km）及び短波長成分（10.7km～64.0km）に分けたスペクトル解析を行ったり、各観測夜のデータを基にナトリウム層の季節変化を求める。Fig.8 にスペクトル解析の例、Fig.9 にナトリウム層の季節変化の例を示す。Fig.8 では波動活動の時間変化がよくわかる。Fig.9 では、冬季においてナトリウム気柱密度が増加していることがわかる。

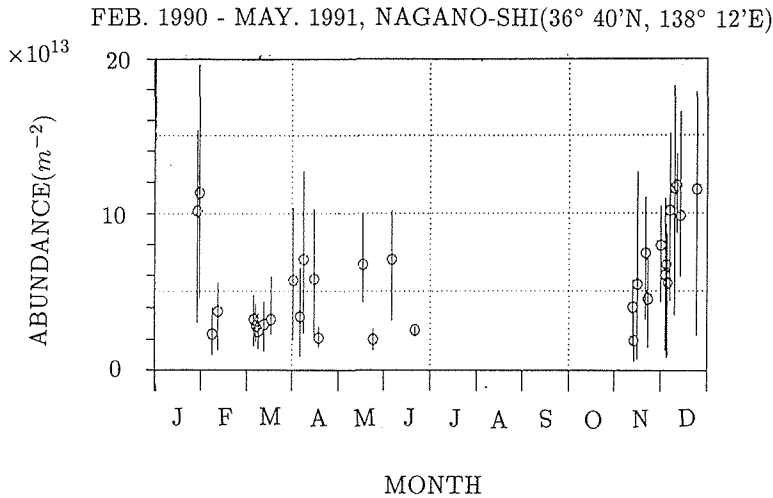


Fig. 9 Seasonal variation of sodium column abundances.

成層圏エアロゾル層観測は、1991年6月15日に噴火したフィリピン・ピナトゥボ火山噴火（今世紀最大規模と言われる）に起因する長野市上空の火山性エアロゾル層を観測するために始められた。解析処理の流れのブロック図を Fig.10 に示す。

解析においては、まず1次データベースに保存された各高度からの受信光子数を用いて、大気からの全散乱と大気分子による散乱（レーリー散乱 β_M ）との比である散乱比Rを算出する。散乱比は以下の式で表されるエアロゾル後方散乱係数の算出 β_A に用いられる。

$$\beta_A(z) = (1 - R)\beta_M(z) = (R - 1)(\rho_z/M) \times N_A(d\sigma/d\Omega)_M$$

ρ_z : 高度 z における大気密度
 M : 大気分子の 1 kmol の質量
 N_A : アボガドロ数 (1 kmol 中)

1次加工の例を Fig.11, Fig.12 に示す。光学的なエアロゾル全量を表す積算後方散乱係数は、後方散乱係数を成層圏の範囲で高度方向に積算する事によって得られる（Fig.12 黒塗り部分）。また、積算後方散乱係数の半値から重心高度が求められる。1次データ加工の結果は2次データベースに保存される。2次データは観測日時毎にまとめられ2次データ加工が行われる。2次データ加工の例として、Fig.13 に散乱比の日変化、Fig.14 に積算後方散乱係数の日変化を示す。

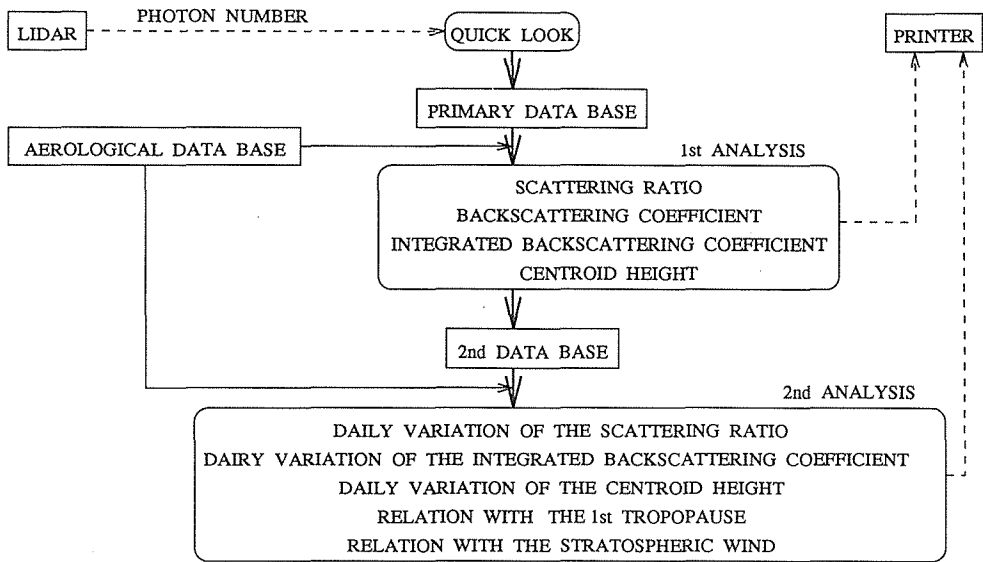


Fig. 10 Block diagram of the analyses(stratospheric aerosol layer).

SEP. 28, 1991, NAGANO-SHI(36° 40'N, 138° 12'E)

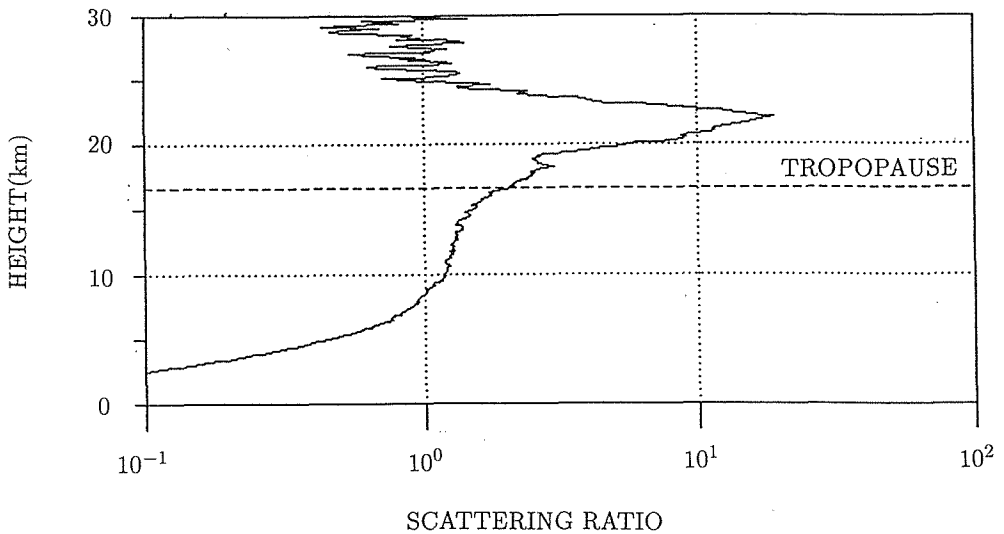


Fig. 11 Profile of the scattering ratio.

Fig.13において、成層圏エアロゾル層の形態の変化がはっきりとわかる。Fig.14において、エアロゾル量は1991年12月から1992年2月にかけてピークを迎え、その量は平常時の100倍程度にもなっている事がわかる。また、ピークを迎えた後は非常にゆっくりと減少している様子がわかる。

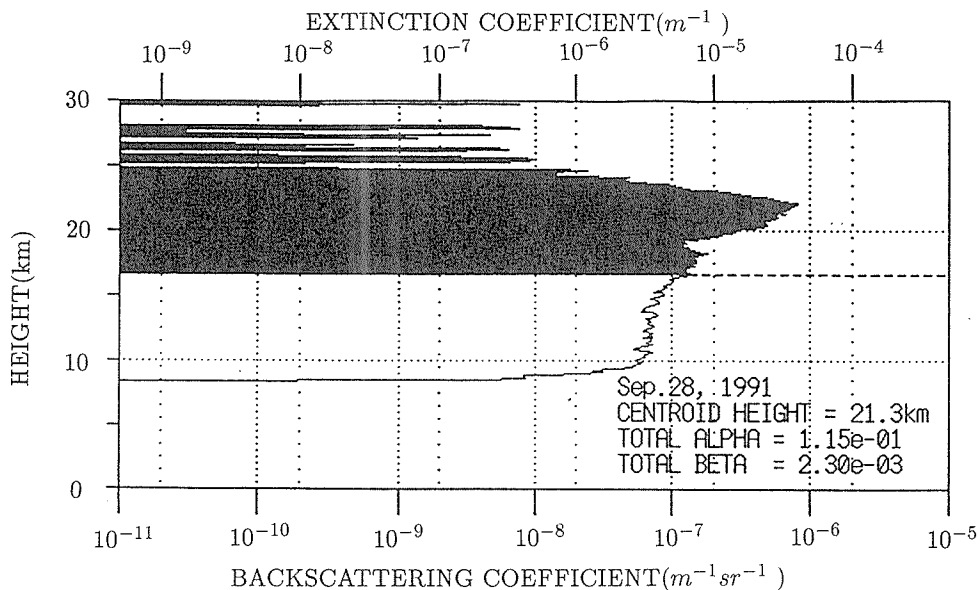


Fig. 12 Profile of the backscattering coefficient(The height above tropopause is shadowed).

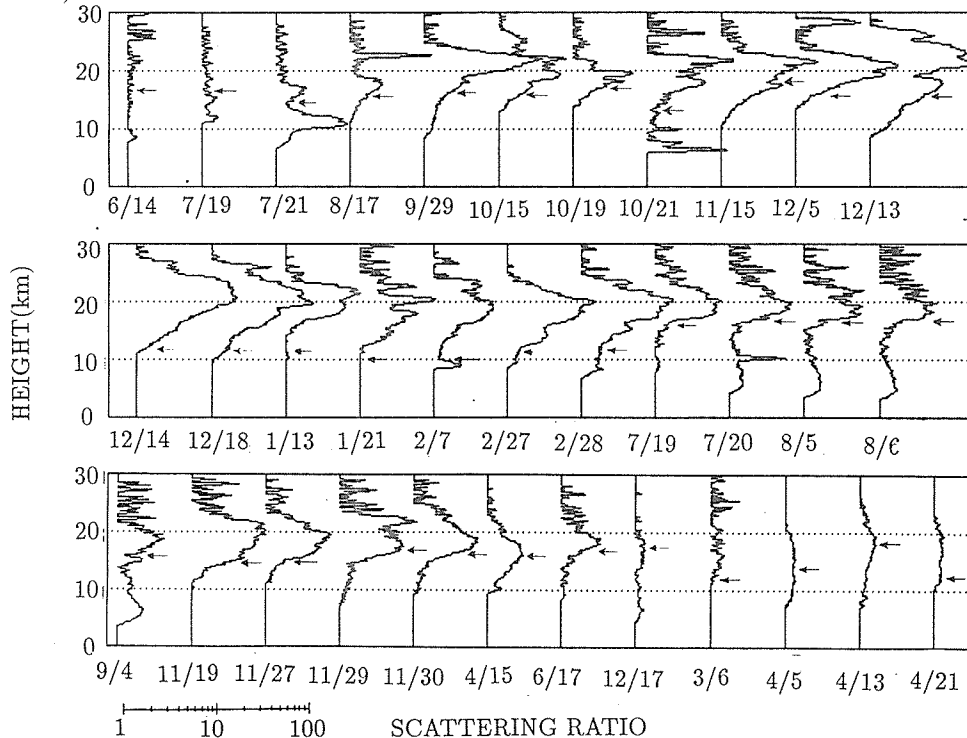


Fig. 13 Daily variation of the scattering ratio(The height of tropopause is indicated by arrows).

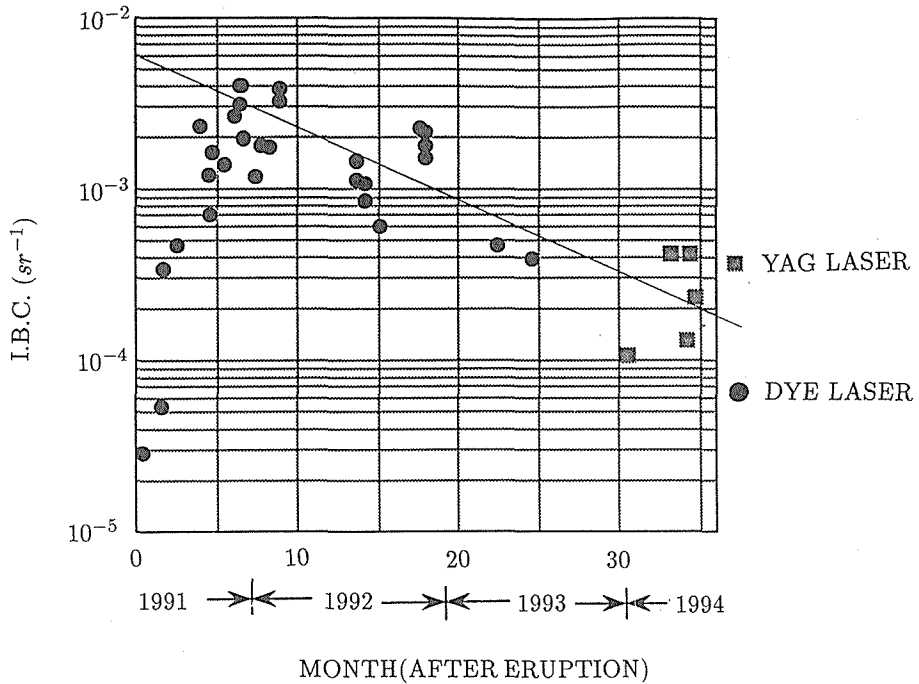


Fig. 14 Daily variation of the integrated backscattering coefficients(I.B.C.).

4. まとめ

本論文では、本研究で構築したライダーシステムにおける各部の構成や動作について説明を行い、そのシステムを用いて得られたデータの解析処理について説明した。本ライダーシステムを用いたフィールド観測、高度 80~110km の中間圏ナトリウム層及び高度 10~30km の成層圏エアロゾル層の観測を行う事が可能である事を明らかにした。現在観測は準定常的に続けられている。

参考文献

- 1) T.H.Maiman : Nature, **187**, 493-494 (1960).
- 2) G.Fiocco and L.D.Smullin : Nature, **199**, 1275-1276 (1969).
- 3) 清水, 竹内, 笹野, 杉本, 松井, 奥田 : 応用物理, **50**, 1154-1164 (1981).

- 4) M.P.McCormick: 17th International Laser Radar Conference (Sendai, Japan, 1994) 341-344.
- 5) J.E.Blamont and T.M.Donahue : Geophys.Res., **66**, 1407-1423 (1961).
- 6) M.R.Bowman, A.J.Gibson and M.C.W.Sandford : Nature, **221**, 456 (1969).
- 7) J.E.Blamont, M.L.Chanin and G.Megie : Ann.Geophys., **28**, 833-838 (1972).
- 8) K.H.Fricke and U.Von Zahn : J.Atmos.Terr.Phys., **47**, 499-512(1985).
- 9) P.P.Batista, B.R.Clemesha, D.M.Simonich and V.W.J.H.Kirchhoff : J.Geophys. Res., **90**, 3881-3888 (1985).
- 10) A.Nomura, Y.Iwasaka, H.Fukunishi, T.Hirasawa, S.Kawaguti and T.Kano : Proc.NIPR Symp. Upper Atmos.Phys., **1**, 75-83 (1988).
- 11) R.E.Bills, C.S.Gardner and C.Y.She : Opt.Eng., **30**, 13-21 (1991).
- 12) C.Nagasawa and M.Abo : 17th International Laser Radar Conference (Sendai,Japan, 1994) 514-515.
- 13) C.Y.She, R.E.Bills, H.Latifi, J.R.Yu, R.J.Alvarez 2ed and C.S.Gardner : Geophys.Res.Letts., **17**, 929-932 (1990).
- 14) S.Nakahara, K.Ito, K.Kanekiyo, H.Inaba and T.Kobayashi: IEEE.J,Quant.Elect., QE-7, 325 (1971).
- 15) 杉本伸夫 : センサ技術, **9**, 22 (1989).
- 16) O.Uchino et al : 14th International Laser Radar Conference (San Candido, Italy, 1988) 409.
- 17) J.H.Good : 11th International Laser Radar Conference, NASA Conf.Pub., **2228**, 14-16(1982).
- 18) D.C.Woods and R.L.Chuan : Geophys.Res.Lett., **11**, 1041-1044 (1983).
- 19) Q.Jinhuan, S.Jinhui, L.Daren, X.Qilin and Z.Jinding: 17th International Laser Radar Conference (Sendai, Japan, 1994) 363-366.
- 20) M.Yasui, S.Ikawa, H.Nonaka, K.Shiraishi and M.Fujiwara : 17th International Laser Radar Conference (Sendai, Japan, 1994) 368-370.
- 21) O.Uchino : 17th International Laser Radar Conference (Sendai, Japan, 1994) 381-384.

- 22) T.Itabe and K.Mizutani : 17th International Laser Radar Conference (Sendai, Japan, 1994) 434-435.
- 23) Y.Iwasaka, M.Hayashi, T.Shibata, M.Nagatani, H.Nakada and T.Ojio : 17th International Laser Radar Conference (Sendai, Japan, 1994) 440-441.
- 24) M.Abo and C.Nagasawa : 17th International Laser Radar Conference (Sendai, Japan, 1994) 442-443.