

レーザー光散乱によるエアロゾルの観測*

中井貞雄**・井沢靖和†・檜原俊昭**・山中千代衛**

1. ま え が き

筆者らは搭載レーザー装置より射出したレーザー光のエアロゾルによる散乱光を、光倍管を用いて高感度に受光し、散乱強度および散乱断面積を測定することにより、エアロゾルの状態および粒子密度分布を求めるため、AZL 計画により研究を進めてきた。まず地上予備実験により搭載レーザーの開発、同期光電子計数法による微弱光検出技術の確立、信号処理方式の開発などを行ない、ロケット搭載装置製作の基礎実験を行なった。これらの技術、資料にもとづき第1号搭載装置が製作され、その第1回ロケット観測実験は、1970年9月19日20時30分に内之浦より発射されたL-3H-5号機のブースタに搭載されて行なわれた。

エアロゾルの観測研究の方法としてはこれまで①飛しょう体による直接採集[1][2]、②ロケットにマイクロホンを搭載し、粒子衝突による音圧より粒径、密度分布等を求める方法[3]、③地上からのレーザーレーダによる方法[4]などが用いられている。しかし①の方法は回収が必要であり、高度分解して採集するのがむづかしい。②の方法はマイクロホンが上昇にともなうゆっくりした温度変化によりノイズを出すことが見出され[5]、これまでのデータはほとんどノイズによるものであろうと結論されている。レーザーレーダを用いた Fiocco らの実験によると地上 60~90km および 110~140km に散乱層のあることが見出されている。彼らはこれを飛来した微粒子が大気によりさらにこまかく、砕かれる過程において地上 110~140km あたりで 0.1 ミクロン程度となり、ルビーレーザー光に対するミー散乱断面積の極大値をとるためとしている。ほかにも多くの実験結果が報告されているが[6]、散乱層を検出していない例もあり[7]、また Q スイッチレーザー発射後約 2msec 程度の間は弱いけい光が出るので、それによるものではないかとの意見もある[8]。これらのあいまいさは異なった方法を用いることにより除去することが必要である。エアロゾルに関する詳細な観測は、流星塵の大気圏における変遷、夜光雲の成因や位置に関し興味あるデータを提供するものである。

さらにレーザー技術の進歩と、微弱光検出技術の進歩により、散乱計測法が地上で広く用いられようとしているが、これの超高層観測への応用は種々新しい可能性を含んでいる。すなわちミー散乱、レーリ散乱、トムソン散乱、共鳴散乱などによる微粒子密度、粒径、ガス分子の密度、種類、微量化学組成の検出、プラズマの電子密度、電子温度、イオン温度等の測

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 大阪大学工学部

† 大阪府立工業奨励館

定が期待できる。

今回は搭載レーザ装置による散乱計測の第 1 回の試みであり、観測データを得ることのみならず、液体窒素冷却光倍管と光電子計数を用いた新しい技術のエアロゾル観測への応用に関する基礎的な問題点の解明をもあわせ行なった。

観測結果によると、地上 40~50km, 120km, 170km, 190~200km 付近に $N\sigma$ が 10^{-12} $\text{cm}^{-1}\text{ster}^{-1}$ 程度の散乱層のあることが見られる。300km を越すあたりにこれより 2 けたも大きな散乱断面積をもつ厚い層が観測されたが、これに関しては、このように大きな散乱断面積をもつ層の形成の可能性、および観測装置の信頼性の検討、第 2 回観測による再確認などを含め、今後に残された問題である。

今回の観測実験により搭載レーザ装置に関する問題点がかなり明らかとなった。この資料をもとに $N\sigma$ より微粒子粒径と粒子密度の分離、化学組成の同定などに有効な同調型色素レーザの搭載器機としての開発を現在行なっている。地上実験よりみて、これのロケット搭載による超高層観測への適用はユニークなデータを提供するものと期待される。

2. 測定原理

レーザ光送出パワー P_0 、受信パワーを P_r とすると、レーザレーダ方程式は

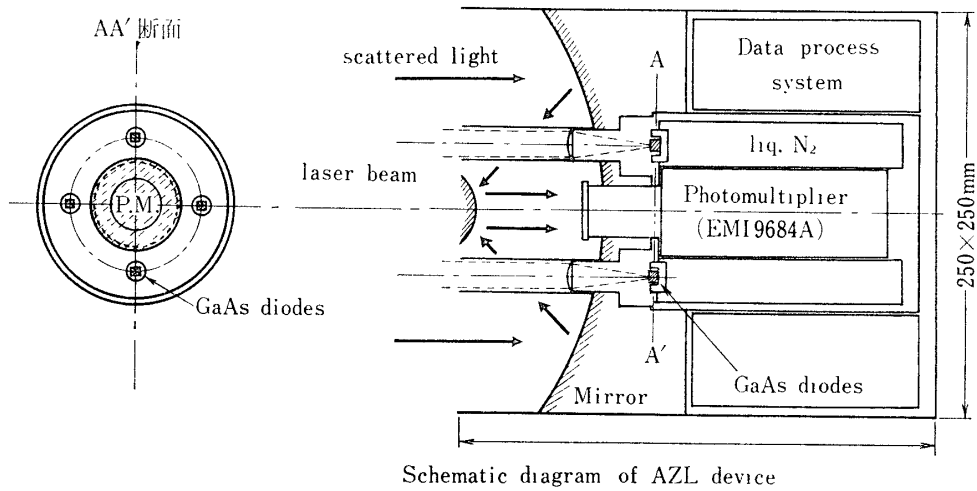
$$\frac{P_r}{P_0} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{KAT^2N\sigma}{R^2} dR \quad (1)$$

となる。ここに K , A , T , R はそれぞれ送受信系効率、受光面積、大気透過率、送受信システムから散乱場所までの距離であり、 R_1 , R_2 は散乱光を検出している最近および最遠距離である。 N は光散乱物体の数密度、 σ は散乱断面積である。 K , A , R_1 , R_2 は装置の構成によりきまり、さらに超高層では $T=1$ とおける。したがって P_r/P_0 を測定することにより $N\sigma$ を求めることができる。ただしこの式よりわかるように、単一波長を用いた 1 方向からの散乱光受信では $N\sigma$ の積として測定される。波長の異なる二つの光ビームを用いて、散乱断面積 σ の波長依存性を利用するか、微分散乱断面積の角度分布の波長依存性を用いることにより、 N と σ とを分離して測定することができる。さらに σ が大きくなった場合には各散乱粒子からの散乱光強度のパルス高分析により σ の分布を求めることができる。これより粒子密度のみならず粒径分布をも求められる。

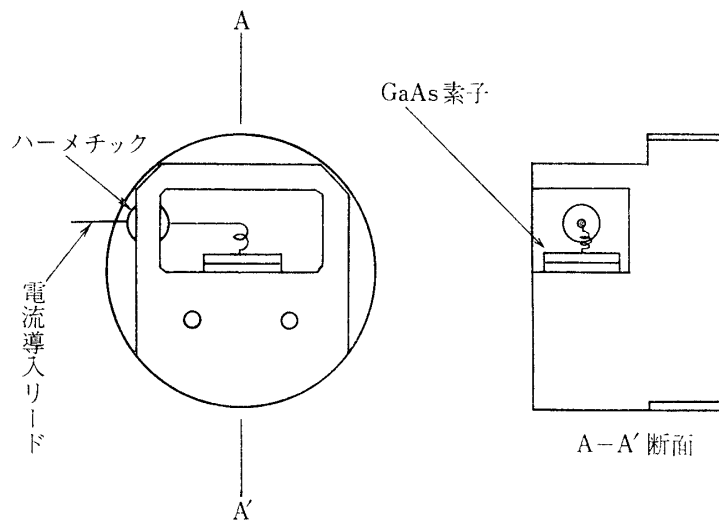
3. 観測装置および動作

装置概略を第 1 図に示す。全体は送信系、受信系、信号処理部よりなる。

(送信系) $GaAs$ 半導体レーザをパルス幅 $1\mu\text{sec}$ 、繰返し 1kc で動作させた。レーザ素子は第 2 図に示すように銅ブロックにマウントされ、このカートリッジを第 1 図のように液体窒素容器の前面側壁にねじ込み方式で装着し、冷却した。このような素子を 4 個、それぞれ独立な電源を用いて駆動した。 $GaAs$ 半導体レーザのパルス発振特性については別に詳述する。上記冷却方式では発振時間率を $10^{-6}/10^{-3}=10^{-3}$ 以上にすると出力ピークパワーが低下してきた。レーザ光の波長は素子を作成したロット、冷却温度等により異なり、搭載レー



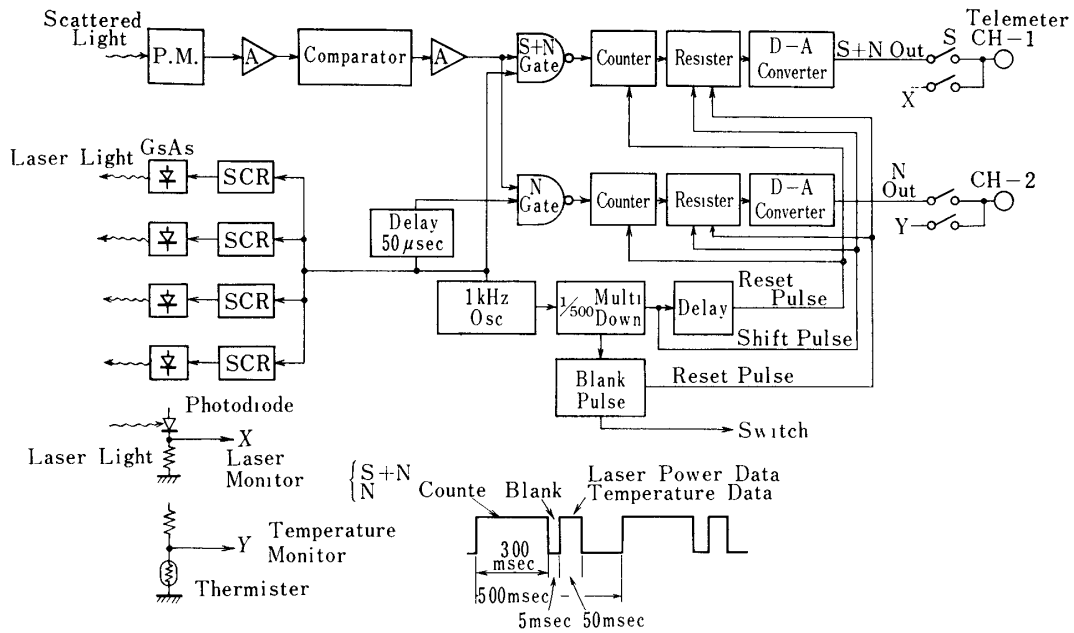
第1図



第2図

ザ素子については 8570 \AA であった。ビーム広がりには $5 \sim 15$ 度程度あり、レンズで集光し平行ビームとした。装置内での迷光を極力防ぐため射出光は直径 10 mm のパイプ中を導かれ、ロケット機壁より機軸に直角に射出された。

(受信系) エアゾルによる後方散乱光は直径 250 mm のカセグレン型集光鏡で光倍管に導かれている。光倍管は EMI 9684 A を用い、第1図に示すように液体窒素で冷却されている。夜光、星光などの外来光除去のため干渉フィルタを光倍管前面に用いている。干渉フィルタの透過波長は用いたレーザ素子の発振波長に合わせた。反射鏡は真ちゅうベースの上にクロムメッキがほどこされており、鏡軸に対し 5 度以内の入射光は光倍管感光面に入射する。上記カセグレン型集光鏡以下装置全体は $250 \times 250 \times 270$ のアルミ製筐体に入れ、 250×250 のロケット機壁にあいた窓より機軸に直角に外方を向いて装着されている。低高度での風圧、まさつなどより本体を保護するため、脱着装置付きのパイレックス窓がとりつけら



Schematic Diagram of Rocket Loaded AZL System

第3図

れ、低高度ではこの窓ごしに観測を行ない、発射後 103 秒（メイン切放し後 4 秒）でこの窓をタイマ信号に同期してとりはずし、以後は直接集光鏡を露出して観測を続ける。パイレックス窓板には直径 15mm の 4 個の穴があけてあり、レーザ光はこの穴を通して外部へ射出し、迷光を少なくしている。

（信号処理）回路構成を第 3 図に示す。1kc のマスタークロックパルスに適宜カウントダウンおよび遅延させて動作タイミングパルスを得ている。

まず SCR をスイッチング素子として用い、マスターパルスに同期して 1kc で $GaAs$ 半導体レーザを動作させる。これのエアロゾルによる散乱光が光倍管に受光される時期に同期して、図中 (S+N) gate を開閉する。これより $50\mu\text{sec}$ 遅れたタイミングパルスにより (N) gate を開閉する。それぞれの gate を通過してきたパルスは 0.5 秒間カウントし、DA コンバータにより 0—100 カウントまでを 0—5 ボルトに変換し、テレメータにより地上に伝送する。両信号の差をとることにより、両方に共通に含まれるノイズ成分を引きさり、信号成分のみを取り出す。これと同時にテレメータに送る出力端切換により第 3 図に示されているように、レーザ光出力、液体窒素温度をそれぞれホトダイオードおよびサーミスタを検知器としてモニタしている。

観測は発射後 5 秒に光倍管高電圧印加より開始し、低高度ではパイレックス窓を通して行なった。ロケットの飛行データによると 93.1 秒にメインとブースタとの切放しが行なわれたあと 99.65 秒にメインが点火された。その後 103 秒に、タイマーパルスにより脱着装置を作動させ、パイレックス窓を取りはずし観測を続けた。

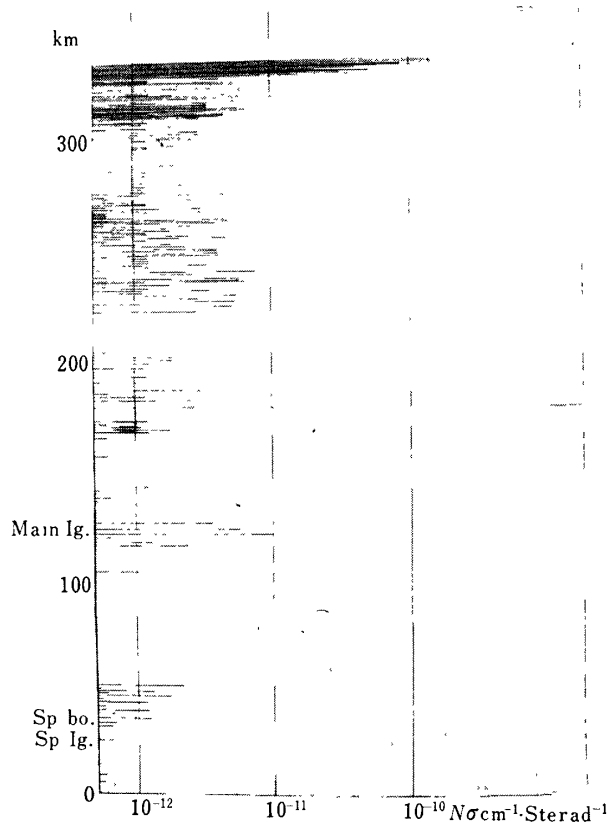
4. 観測結果および解析

観測ロケット L-3H-5 号機は 1970 年 9 月 19 日 20 時 30 分に、内之浦より打上げられた。本装置を搭載したブースタは発射後 320 秒後に最高々度 335km に達した。クライオスタットの液体窒素保持時間は、発射直前の実測では 42 分であった。このため液体窒素補給は角度セット直前、発射前 36 分まで行なった。これより予期されたごとく、本装置は発射後 335 秒まで正常に動作し、その後動作を停止した。得られたデータより(1)式を用いて $N\sigma$ の高度分布を求めることができる。いま Ch 1(S+N) の出力を X_1 , Ch 2(N) の出力を X_2 (Volt) とすると受信パワー P_r (Watt) は

$$P_r = \frac{100}{500} \frac{(X_1 - X_2)}{5} \frac{h\nu}{\eta} \times 10^{-6} \quad (2)$$

ここに $h\nu$ はレーザー光のフォトンエネルギー、 η は光倍管受光面の量子効率であり、用いた光倍管(EMI 9684 A) では 0.37% が与えられている。さらにレーザー光波形を $1\mu\text{sec}$ 幅の矩形波と近似している。(1)式中の受光面積 A は、カセグレン型集光鏡の副鏡支持アーム、レーザー光射出口等を差し引くと 290cm^2 、送受信系効率 ϵ はレーザー光の集光レンズの表面反射、集光鏡での 2 回反射、フィルタの透過率を考慮すると約 15% となる。

これらの数値を用い、得られたデータより $N\sigma$ を算出した結果を第 4 図に示す。縦軸高



第4図

度に合わせ主なロケット動作のタイムシーケンスを添えて記入してある。これより高度 40~50km, 120km, 170km, 190~200km 付近に $N\sigma$ が $10^{-12}\text{cm}^{-1}\text{sterad}^{-1}$ 程度の散乱層のあることが見られる。メインロケット点火時期の高度は 125km 付近であり、この高度での大きな散乱断面積に関しては、あるいはメインの噴煙の影響が入っている可能性が考えられる。図示の結果はロケット上昇時のデータによるものである。発射後 320 秒に最高々度に達した後 335 秒に動作を停止したため下降時のデータが得られていない。しかし最高々度後 15 秒間の下降時のデータは上昇時の結果を逆にたどる様子を示しており、結果に対する信頼性はある程度確信できる。300km 付近の異常に大きな $N\sigma$ の散乱層は、さらに上昇するにつれ増大する傾向を示しており、さらに高々度までの観測が必要なようである。このような大きな散乱断面積をもつ層の

形成の可能性, および観測装置の信頼性の検討, 第 2 回観測による再確認等を含め今後に残された問題である.

最後に, 搭載用半導体レーザの開発に関してはシャープ株式会社, 半導体部, 重政淳一郎氏, 中央研究所, 矢野盛規氏, 装置の製作, 調整, 搭載にあたりシャープ株式会社, 開発部, 中村 功氏にひとかたならぬご協力を戴いた, 記して謝意を表わす.

1971 年 1 月 14 日

参 考 文 献

- [1] R. K. Sobermann & C. L. Hemenway: J. Geophys Res. **70**, 4943 (1965)
- [2] C. L. Hemenway & R. K. Sobermann: Astron. J. **67**, 256 (1962)
- [3] F. L. Whipple: Nature **189**, 127 (1961)
- [4] G. Fiocco & G. Colombo: J. Geophys Res. **69**, 1795 (1964)
- [5] C. Nilson: Science **153**, 1242 (1966)
- [6] B. R. Clemensha et al: Nature **209**, 798 (1966) **214**, 261 (1967)
- [7] P. D. McCormik et al: Nature **209**, 798 (1966)
- [8] W. C. Bain & M. C. W. Sandford: JATP **28**, 543 (1966)
: Nature **210**, 826 (1966)