

## 電離層直接観測器とそれによる観測結果

平尾 邦雄

## 1. はし が き

前回の生産研究観測ロケット特集号(第13巻第10号)においてカップ8型用電離層直接観測器について述べた。今回はその続きとして、それ以後カップ9M型に搭載された測定器までのべることにするが、その設計基準等はほぼ同じであるので、それについては詳細にふれない。この文においては、電離層直接観測器のうつりかわりについて、現在まで得られた結果についても記すことにする。最後に今後の方針についてもすこしふれてみたい。

## 2. 電離層直接観測器のうつりかわり

(1) 電離層直接観測器 1A型 (K-8-7号機用) 前回のべた K-8-5 および 6号機用観測器は初めて、レゾナンスプローブを装着したものであって、これにより正イオン密度、電子密度および電子温度を同時に測定できるようになった。このことはプラズマ測定における最も基本的な量の一つである正負の荷電粒子数(電離層中においてはE層以下をのぞいては負イオンは存在しないと考えられている)を測定することができることを意味するので、この時以来われわれの観測器を電離層直接観測器と名付けることとしI型とした。このことは当然将来電離層の他の要素をはかる測定器を付加することによって、だんだん完成されてゆくことを意味するものである。

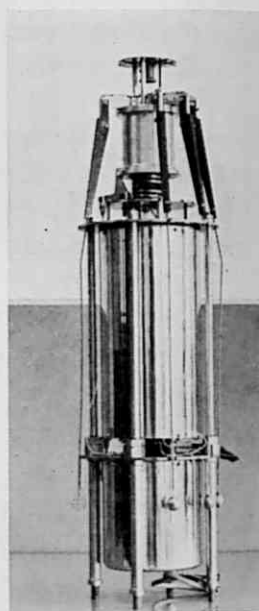
K-8-7号機ロケットにおいてわれわれは正イオンプローブの特性をよりよく解明するために、光電子の量の概略を知りうるようにした。すなわち電子用ラングミュアプローブの回路を時分割して、イオンプローブと同じ電圧をプローブに供給しうるようにした。すなわち網状プローブと完全球プローブとの比較を行なうようにした。大まかに言って、網状球プローブと完全球プローブはイオンの捕集面積は同じであるが、光電子放射の原因となる太陽紫外線に対しては網状球プローブは非常に小さくなっている。この二つのプローブによる電流の違いから光電子放射の影響を調べることができる。このIA型はK-8-5, 6号機に用いられたI型と外観的にはぜんぜん差違がない。

(2) 電離層直接観測器 II型 (K-8-8, 9号機用) K-8-8および9号機は昭和36年10月に秋田県道川実験場から発射された。この時は二機を昼間および夜間にわけて発射されたもので、網状球プローブの特性をさらに詳細に調べるために、2回とも網状球プローブと完全球プローブとを同時に搭載した。すなわち昼間においては前回と同じく、光電子放射を調べるため、特に高度等に

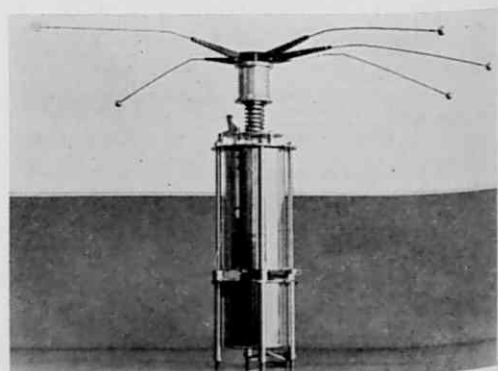
よってその差異があるかどうかを調べるため、二つのプローブとも連続記録をするようにした。さらに夜間観測においては、当然太陽輻射がないので、網状球プローブの正イオンの透過率が完全球プローブと比較した時に得られるはずである。特に約110km以上、イオンの平均自由行程が数十cmをこえるいわゆる軌道運動領域においてははっきりあらわれるはずである。以上の二つの問題が解決されると、少なくともロケットの速度の影響を除いては、網状球プローブの特性がかなりはっきりするわけである。

さらにこの回よりレゾナンスプローブを応用した電子温度測定用の専用プローブも一本付属させることにした。以上のいきさつでこの回は必要なプローブ数は5本となりI型およびIA型と同じプローブの突出機構では無理であるので、新しい型のプローブ突出機構とした。第1図に示すのは観測器II型の全景であり、第2図にプローブを展開させた形を示す。

このプローブ機構を設計するに当たり、つぎの2点が重要であった。第1はプローブ展開後プローブが振動しないこと、第2にはプローブの展開がなめらかに行なわれることの2点である。第1の点についてはプローブの支持棒についていく



第1図 電離層直接観測器II型



第2図 同上 (プローブを展開したところ)

つかの実験がなされたが、けっきょく直径 1mm 前後のピアノ線 3 本を内径 2mm のテフロンチューブの中に押し込んだものを使用した。このような支持棒は振動を起してもピアノ線相互間の摩擦によって、エネルギーが消費され、振動が減衰される。試みに 1 本の真鍮線、ピアノ線、ニッケル線等をテフロンチューブに入れて前者とくらべてみると前者は他のいずれのものよりも早く、数分の一以内の時間で静止する。これはテフロン自体が非常になめらかであるので、チューブと金属の摩擦は非常に小さいからである。第二の点については最終的にシリンダーでプローブを押し上げる際、お互いにあれあうシリンダーの端面の内縁と、それによっておされるプローブのホルダーの部分の曲線について吟味され、プローブの持ち上がる角速度がほぼ一定になるような曲線が設計された。このようにしないとプローブの持ち上がりの初速度が非常に大きくなり、その衝撃的な力によってプローブの支持棒がたわみ、ためにプローブが測定器にぶつかるようなことがおるのである。このような考慮のもとに、スプリングの力を適当にえらんだ結果プローブの展開自体に約 0.2 秒、そうしてプローブの振動の減衰に約 2 秒間を要してプローブ展開が完全に終了するような結果を得た。

この時以来搭載しはじめた電子温度プローブは、レゾナンスプローブの特性中、プラズマ周波数より十分低い周波数領域においては特性曲線のずれが周波数に無関係に一定であり、かつそのずれが電子温度の函数であることを応用したものである。実際には 30 kc の一定周波数

の電圧をプローブに加えた時と加えない時とのプローブの直流電圧の差をとっている。

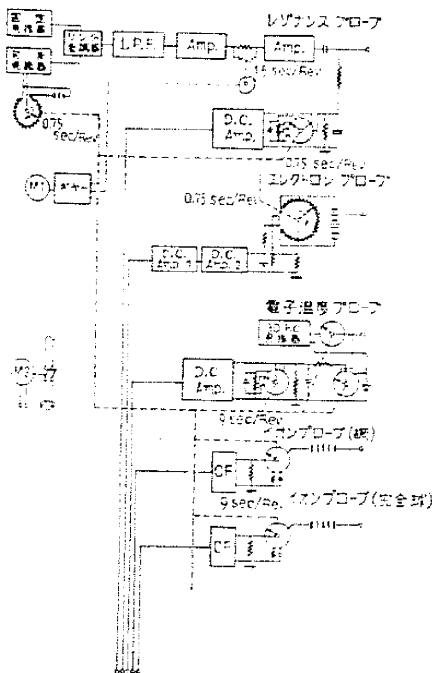
さらにこの時以来レゾナンスプローブの掃引発信器に変更が加えられた。掃引発信器としては唸周波発振器を使用しているのが、これまでは可変発信器に小さな可変空気コンデンサーを用い、これをマイクロモータで回転させることによって掃引周波数を得ていた。しかしこのような方法では当然将来予想される長寿命の飛しょう体へのせるのには不適當であるので、その改良の第一歩として可変容量ダイオードを用いる方法を採用した。しかし現在の段階においては基準電圧等のように、どうしてもマイクロモータによらなければならない部分もあるので、ダイオードに与える直流可変電圧は、マイクロモータによって回転される可変抵抗器によって与えることにした。しかしこれは十分信頼しうる、かつ高絶縁のリレーを得ることによって解決しうる問題であり、事実 1963 年度の実験よりは完全に電子化する予定である。このことについては後にもう一度のべる予定である。

以上のべた計画により設計製作されたのが II 型であり、そのブロック図を第 3 図に示す。

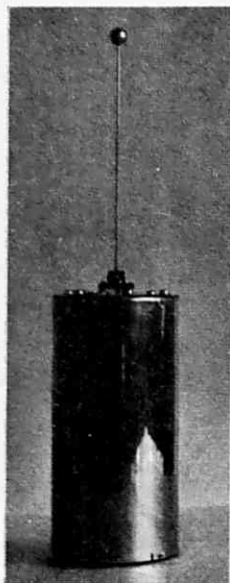
(3) 電離層直接観測器 III 型 (K-9L 型用) K-8-9 号機について、昭和 36 年 12 月の暮もおしせまった 26 日、道川実験場から K-9L 型機が打ち上げられた。これは 3 段ロケットで初めて電離層の最大電子密度の高さを超える 350 km まで上昇するものと期待された。

このロケットのメインは直径 165 mm であってかつ許容されるペイロードの重量も小さいので、今回はレゾナンスプローブのみを搭載して電子密度と電子温度の測定のみを行なうこととした。電離層の観測は地上から衝撃波電波を打ち上げて行なわれているので、この方法ではいわゆる電離層のうら側はしるよしもない。にもかかわらず電離層中の電子の高さ分布がどのようになっているかを知ることは、電離層の平衡状態に関する研究、ひいては電離層の動力学的研究に必要な因子の決定に必要な欠くべからざるものである。また電子温度の分布の測定も電離層のエネルギーの収支の研究に必要であり、レゾナンスプローブが純粹にわが国の発明によることも考慮してこの観測を行なったものである。測定器としてわれわれが I 型以来とってきた直径 140 mm という大きさは、K-9L 型機においても非常に有用であった。ということは今後 K-6 クラスの大きさのロケットにも搭載しうることを意味するものである。ちなみに昭和 37 年春日米第 1 回共同実験として II 型を改造した II B 型をナイキケジューンに搭載した。

このように電離層直接観測器 III 型はレゾナンスプローブそのものであって、一つの団体に電源および電子回路を含み、先端中央に 1 本のプローブを装着したものである。総重量約 3.5 kg であって 2 チャンネルで情報を伝



第 3 図 電離層直接観測器 II 型ブロック図

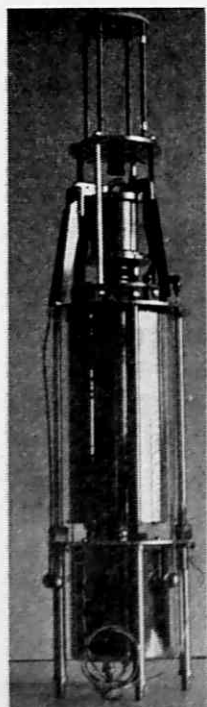


第4図 電離層直接  
観測器 III型

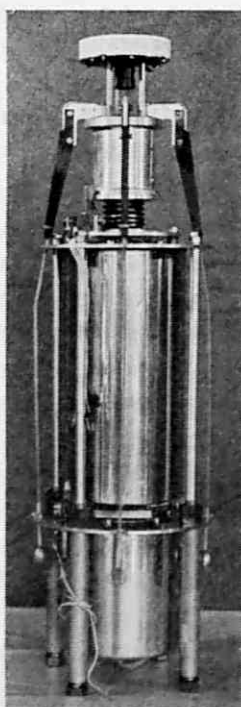
送しうる。K-9L型のメインロケットはスピンスタビライジングであって7c/s以上のスピンのをもつので、III型においては、スピントストを行なったが測定器およびプローブともになら異常は生じなかった。なお測定器の器壁とロケット内壁との間隔が10mm程度であるので熱の影響も考えられたが、実際の飛しょうに際してもなら異常なく作動した。第4図にこのIII型の全景を示す。

(4) 電離層直接観測器IIA型(K-8-10号機用) 前に述べたK-8-9号機が頭部の開頭に失敗したので、それを補うためにK-8-10号機が昭和37年5月24日19時50分道川から発射された。不幸にもこのロケットはブースタの故障により失敗に終わったがこの時に搭載されたのが第5図に示すIIA型である。

このロケットには地磁気を応用した姿勢計がつけてあって飛しょう中のロケット軸の方向がわかるので、測定器の先端にガードリングをもった平面プローブを設け、負の一定電圧をかけておいて正イオンの測定に使用し



第5図 電離層直接  
観測器 IIA型



第6図 電離層直接  
観測器 IIC型

た。夜間観測であるので、光電子放射がないことと、平面プローブがロケットの飛行方向に一致したとき、イオンの補集機構が非常に簡単であるので、球状プローブの特性を調べるのに都合がよい。特にこの平面プローブは裏側はテフロンで絶縁してあるので、イオンプローブに対する速度の影響を調べることができる。その他のプローブはII型とまったく同じである。

(5) 電離層直接観測器IIC型(K-9M-1号機用) 昭和37年11月25日11時01分鹿児島実験場では、初めての電離層ロケットK-9M-1号機が発射された。これはK-9M型ロケットのテストフライトであったが、その予定到達高度は約400kmペイロード50kgという非常に優秀なロケットであり、最近電離層用ロケットの成績があまりよくなかったので、電離層直接観測器IIC型を搭載して、F層最大電子密度層以上までの電離層の観測を行なうことにした。本器は第6図に示すように最上部にイオンおよびエレクトロン用トラップをもち、側に3本のプローブをもっており、そのうち2本は対称的位置におかれたレゾナンスプローブであり、それと直角の位置にイオン用の網状球プローブ1本が配置されてある。

これまで何度かの観測において、イオンプローブはもちろん、レゾナンスプローブにおいてもロケットのスピンの周期に対応した周期をもった変動が必ず見られた。データの上からはレゾナンスプローブで求められた電子密度のほぼ規則的な変動値の上限値が合理的であると考えられる。これを確かめる第一歩としてレゾナンスプローブをロケットの両側において観測を行ない、もしまったくロケットの姿勢のみによるならば、二つのプローブの観測結果はお互いに反対の位相をもっているし、また空間的な変動によるものであればこの関係は見られないはずである。

イオンならびにエレクトロン用トラップは第7図に示されてある。これは上から2枚のグリッドと1枚の円形のコレクタをもっている。各電極の間隔は5mmであって有



第7図 イオンおよびエレクト  
ロントラップ

効面積は直径80mmであり、セパレーターおよびケースはテフロンで作られてある。今第1グリッドに-2.6Vから+6.5Vまでの可変直流電圧をかける。そうするとプラズマ中のイオンおよびエレクトロンはそれぞれの電圧に応じて加速され、一部分は第1グリッドに流れこんで、電流電圧の特性を示す。これをテレメータを使

ってつたえる。第 1 グリッドを通過した粒子は、イオン測定の場合は  $-37.5V$ 、電子測定の場合は  $+10.5V$  の電圧をかけられた、第 2 グリッドによってふるいわけられかつ加速される。さらにイオンの測定の際には、正イオンは  $-10.5V$  の電位をかけられたコレクタに到達する。このイオン電流の量はテレメータの他のチャンネルによって伝送される。この時の電流は純粹のイオン電流であり、第 1 グリッドに与えられた電圧との関係からイオン密度およびイオン温度をもとめることができる。ここで第 2 グリッドはコレクタに対し  $27V$  だけ負の電位におかれている。このためにコレクタから出た光電子は第 2 グリッドの電位でおしもどされて再びコレクタにもどり、光電子放射の影響はうちけされる。これは電離層の高さにおいては放出される光電子の大部分のエネルギーが  $20 eV$  以下と考えられるからである。電子の観測に際しては、コレクタは  $37.5V$  の電位を与えられて、ここには電子のみ集められ、電圧電流特性から電子密度および電子温度が求められる。以上のイオンおよび電子の測定は時間別に行なわれ、この II C 型においては  $1/2$  秒ごとに切りかえられる。

このようなトラップを用いて、再びイオンプローブの特性を調査することを試みたのであるが、不幸にしてこの時も成功しなかった。

#### (6) その他の電離層直接観測器

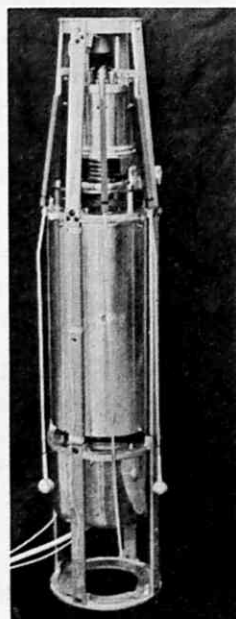
電離層直接観測器 II B 型 (ナイキケジュン用)

電離層直接観測器 II D 型 (エアロビ用)

これらの観測器は直接にこの報告には無関係かもしれないが、いずれもカッパロケット用観測器の変形であるので、ここに簡単に紹介するのも無意味なことではないであろう。II B 型は直径  $170 mm$  のケジュンロケットに搭載するために、II 型を改造したものであって第 8 図に示す。測定項目は電子密度および電子温度であって、電子温度プローブも搭載するために 2 本のプローブを必要としたが、I 型のような構造では必要なプローブ長をうることができなかったので II 型と同じプローブ突出機構

を採用することにした。カッパ 8 型ロケットはスピニングが与えられないがナイキケジュンは  $7 c/s$  のスピニングが与えられている。カッパ 8 型に搭載したときにはノーズコーンの開頭からプローブ突出機構の作動までの時間差 (プローブがノーズコーンにあたらないために  $0.2 \sim 0.5$  秒の時間差が必要である) はノーズコーンとトリガーピンとをつなぐ糸の長さを調節することによって得られた。しかしナイキケジュンにおいては  $7 c/s$  のスピニングのために、そのような糸を使ったのでは糸が本体にまきついてしまってピンをひきぬくことができない。そのためにエレクトロニックタイマを用いて時間差をとり、ピンをひきぬくためには火薬を入れたペロウズで作動するピストンを用いた。

II D 型はエアロビー 150 につまれたもので、イオン密度の測定もふくませたと、さらに NASA のラングミュアプローブもつけたので、計 4 本のプローブをもつ形となった。これを第 9 図に示す。

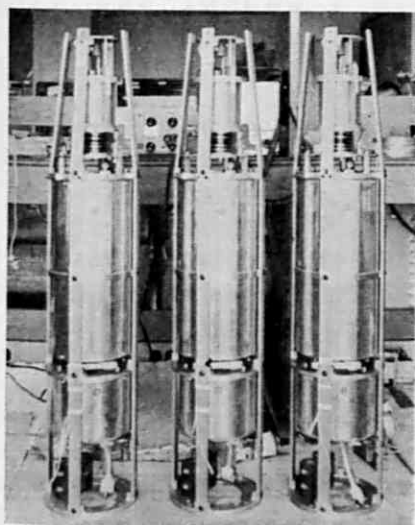


第 9 図 電離層直接観測器 II D 型

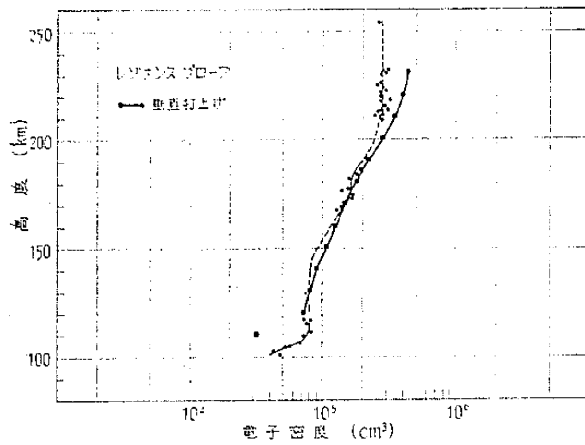
### 3. 観測結果のあらまし

(1) 正イオン密度分布 正イオン密度については、最初の K-8-3 および 4 号機の際はプローブに与える電圧は可変電圧であったが、その後は  $-22.5V$  の固定電圧として連続観測にしている。その結果は良好であってイオン密度の高度変化を忠実に測ることができている。その結果おおむね電子密度分布とひとしい分布を得ているが、E 層下部においてはやや不一致を示すことが多い。K-8-6 号機は 4 号機についてただ一回観測に成功した例であるが、スボラディック E 層の電子密度分布が 3 重のうすい層構造をしているのに一致してやはり 3 重構造を示している。昼間観測においては K-8-3 号機の時と同じく E 層上部には密度の低下する層が見られない。

(2) 電子密度分布 レゾナンスプローブは K-8-5 号機に見られたように昼間においては約  $95 km$  の高さから作動を始める。これはこの高度以下においては電子の衝突周波数がプラズマ周波数より大きくなり電子の運動が減衰させられてしまうので、レゾナンスプローブの特性を示すことができないのである。ロケットで測られた電子密度の高度分布は、同時に地上からのパルス電波の垂直打上げ法によるデータとくらべることができる。後者のデータはいわゆる見かけの高さのデータであるので、ロケットの資料とくらべるには真の高さになおさなければならない。現在最も確からしいと思われる方法で真の高さを算定した結果と、ロケットのデータとの比較を第 10 図に示す。これは K-9L-2 号機の資料を



第 8 図 電離層直接観測器 II B 型



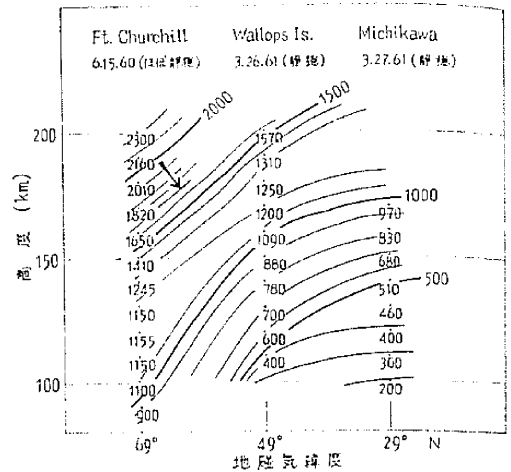
第 10 図 K-9L-2 によるデータと地上観測との比較

用いたものである。K-9L-2 はそれ自体 350 km まで達したが、テレメータ系の部分的障害によりデータは断続的にはば 250 km までしか得られていない。しかしこれは最高のものであるので比較を行なわなかったが、両者の対応はかなり満足すべきものである。200 km 以上になってロケットのデータがやや小さくなるが、これはアメリカの例にもよく見られることであり、恐らく真の高さに直すさいの課程に、なんらか問題があるのではないと思われる。他の実験においても電子密度の測定はきわめて満足すべきものである。

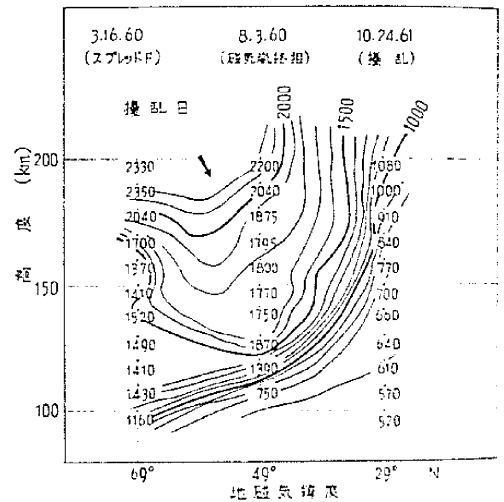
(3) 電子温度分布 レゾナンスプローブ法による電子温度の観測もすばらしい結果をおさめつつある。日米協力実験の行なわれた第 1 の理由もここにあったのである。ワロップス島で行なわれた実験の結果、日米両国で使われている電子温度測定法の比較がなされたので、フォートチャーチル、ワロップスおよび秋田の電子温度の高度分布をそれぞれの地点の地磁気緯度について調べた結果は非常に興味深い。第 11 図および第 12 図にそれぞれ電離層状態の静穏な日および擾乱日についての等温図を示してある。これによれば静穏日には高緯度地方(オーロラ帯)のみ中緯度地帯にくらべて電子温度が非常に高く、擾乱日になるとそのような高温の部分がワロップス島のあたりまで下がってくることを示している。このように電子温度は地磁気緯度や擾乱により、広く変化するものである。わが国の新しい鹿児島宇宙空間観測所は地磁気緯度がほぼ 20 度であって、現在インドに作られつつあるロケット発射場をのぞいては地磁気緯度の最も低い発射場である。この意味で鹿児島観測所での観測に非常に期待するとともに、秋田実験場再開ないしはそれにかかわる北の実験場の開設を地球物理学的見地からのぞむものである。

4. む す び

今回は特に電離層直接観測器のうつりかわりについて重点的に述べた。これは現在われわれがこの観測器をさらに発展させて他の多くの要素も含めて、より理想に近い観測器にすすめようとしているからである。他の測定要素として近い将来につくわえられるものは電子エネ



第 11 図 電子温度分布と地磁気緯度との関係(静穏日)



第 12 図 電子温度分布と地磁気緯度との関係(擾乱日)

ギ一分布測定器、質量分析および電離層内電場測定器であって、いずれもかなり基礎実験がすすみつつあるものである。さらに現在わが国におけるロケットの性能向上により、さらに長時間の飛しょうが考えられることおよび将来人工衛星による電離層の擾乱の調査を行ないたい希望があるので、これらの測定器をより軽量にかつより長寿命にするための研究が現在確実なテンポをもって進められていることを付言したい。

最後に以上の観測および研究がなされるにあたり、東京大学生産技術研究所、株式会社横河電機製作所の甚大なご協力を得ていることに対し最大の謝意を表するとともに、他の多くの機関の方々にも多大のご支援をいただいていることに対し誌上をお借りしてあつくお礼申し上げます。さらにこれらの研究は電波研究所電離気体研究室において進められており、青野次長よりはたびたびご意見をいただき、秋田電波観測所、山川電波観測所および第 1 電波課のご支援をいただいていることを付記して厚く感謝する。

(1963 年 3 月 30 日受理)