

# 低域電離層イオン組成観測用質量分析器の開発

畚野信義\*・伊藤富造  
小嶋学・山田弘善

## 1. 緒言

第2次大戦後、飛しょう体という強力な手段を得て、超高層物理学は飛やく的な進歩を遂げた。上層の大気あるいはプラズマについてもさまざまな事実が見出され、多くのデータが蓄積されてきた。しかしこれら直接測定も多くは、真空測定技術の延長であって、真空度が $10^{-4}$ Torr となる高度約 100km より下ではそのまま応用することはむずかしく、また発射後あまり時間のたっていないロケットや搭載機器からの放出ガスの問題、割合密度の高いところで高速走行する飛しょう体上での測定の問題等があり、高度約 60km から 100km にわたる *D* 層から *E* 層下部については信頼性のある測定の例が少ない。イオン組成の測定については、質量分析器の容器を上空でロケットから打ち出し、放出ガスの影響を避けた実験があり、高度 100km 付近に多量の金属イオンを検出し[1]、これがスボラディック *E* 層と密接な関係をもつことが知られてから、下部電離層について注目があつまった。しかし技術的困難さから、本格的な観測にはなかなか手がつけられなかった。近年高速排気系と質量分析器の組合わせによる実験が試みられるようになり[2][3]、100km 以上の高度範囲とまったく異なる様相の結果が得られはじめた。第1図(a),(b)はひると夜の測定結果の例である[4]。これら一連の測定結果から 23: Na<sup>+</sup>, 24: Mg<sup>+</sup>, 25: Mg<sup>+</sup>, 26: Mg<sup>+</sup>, 27: Al<sup>+</sup>, 28: Si<sup>+</sup>, 32: S<sup>+</sup>, 34: S<sup>+</sup>, 39: K<sup>+</sup>, NaO<sup>+</sup>, 40: Ca<sup>+</sup>, MgO<sup>+</sup>, 46: NO<sub>2</sub><sup>+</sup>, 48: O<sub>3</sub><sup>+</sup>, 56: Fe<sup>+</sup>, CaO<sup>+</sup>, 58: Ni<sup>+</sup>, 60: Ni<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub><sup>+</sup>, 64: SO<sub>2</sub>, 72: FeO<sup>+</sup> 等のほか 19<sup>+</sup>, 37<sup>+</sup>, 55<sup>+</sup>, 73<sup>+</sup> の H<sup>+</sup>(H<sub>2</sub>O)<sub>*n*</sub> というようなものの存在が考えられる。また *D* 層で優勢な負イオンについては[5]、62<sup>-</sup>, 80<sup>-</sup>, 98<sup>-</sup>, 116<sup>-</sup>, 134<sup>-</sup>, 152<sup>-</sup> というものが検出され、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(H<sub>2</sub>O)<sub>*n*</sub> なる形のものではなかろうかと考えられている。これら提起された問題について今後さらに多くの観測と検討が行なわれる必要がある。

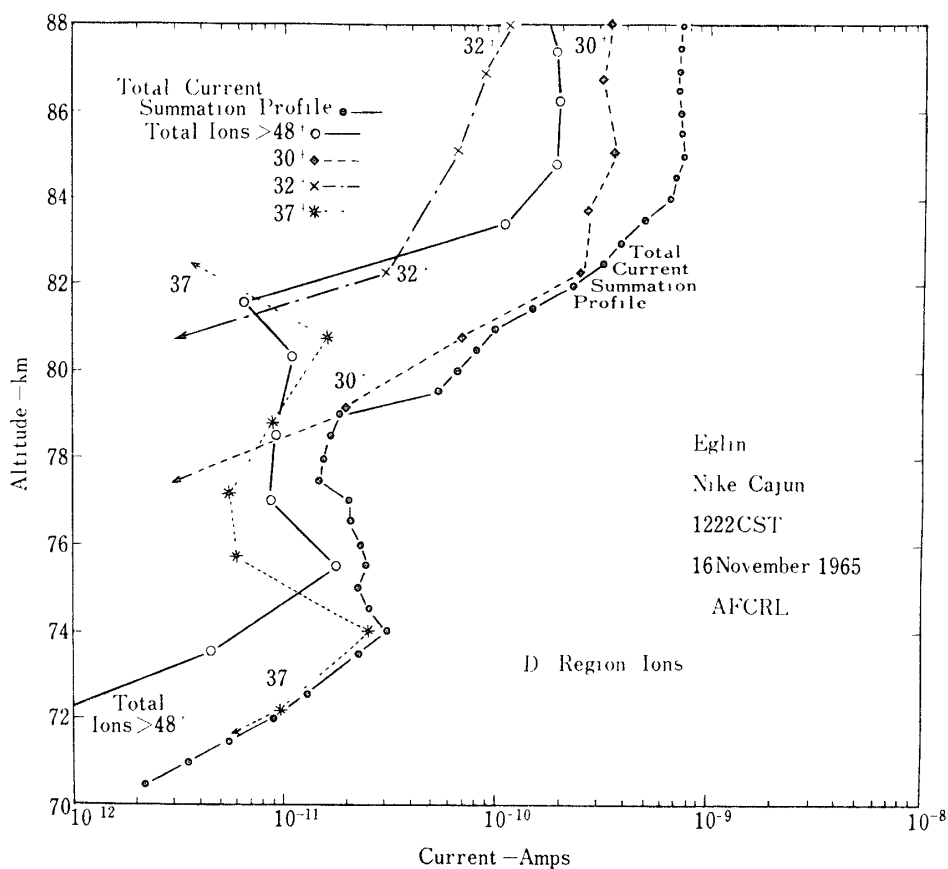
われわれも高速排気系の中に特殊な Quadrupole 型質量分析器を納め、到達最高高度 110 km の S-210 型ロケットに搭載し高度 60km からのイオン組成の測定を行なうことを計画した。

## 2. 質量分析器

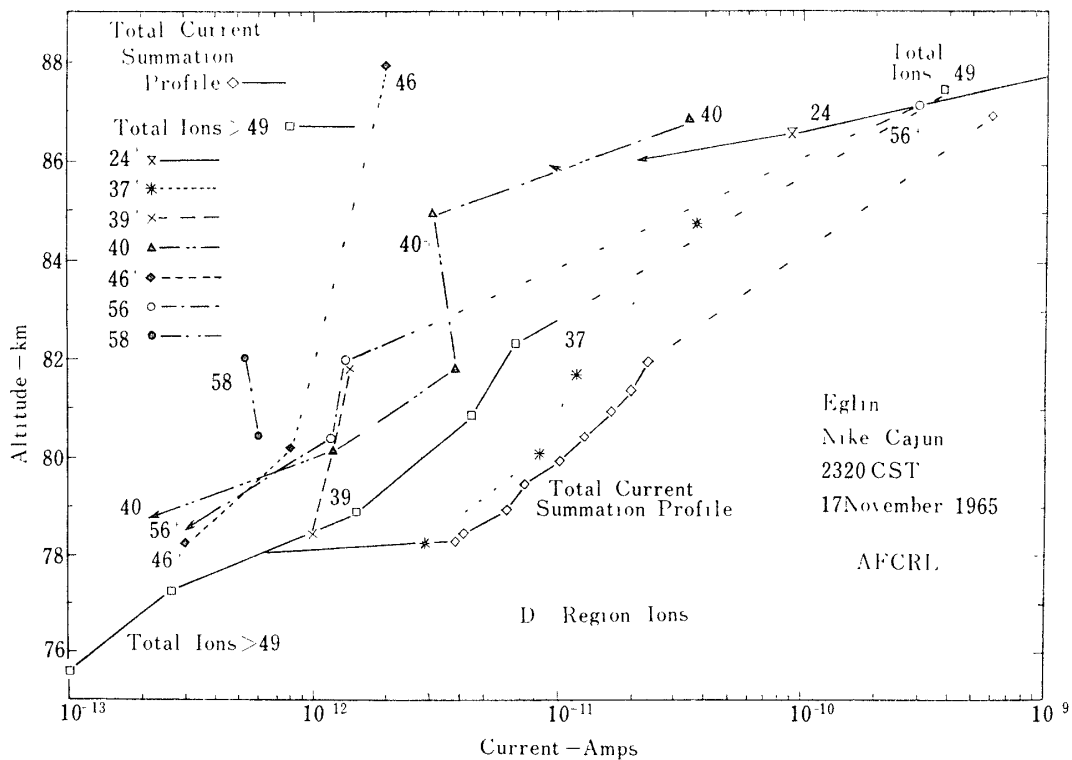
使用する質量分析器としては、Quadrupole 型を採用することにした。この分析器は回路が

---

\* 電波研究所



第1图 (a)

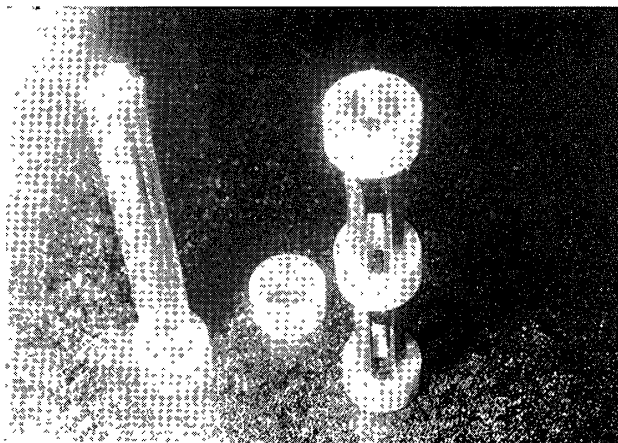


第1图 (b)

ふくぎつになり、動作が不安定になりやすく、消費電力も比較的大きい。使用目的が短時間の飛しょう実験であり、センサが小型にできることが、この場合にはほかにかえられない長所となる。その動作原理は、4本の円柱に高周波と直流の電圧を重畳して印加し、それらの中心に荷電粒子をとおすと、その運動は高周波電圧、周波数、直流電圧、電極の大きさと間隔、荷電粒子の質量等の条件により収束または発散することを利用するものであるが、その詳細はほかにゆずる[6]。

## 2.1 センサ

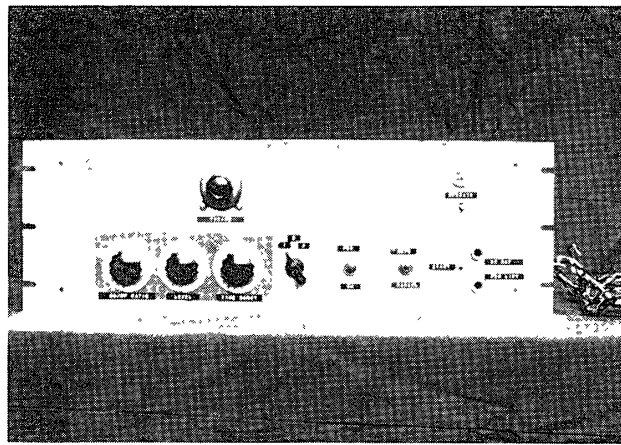
センサは、最初通常のように円柱をならべるものを試作してみたが、小型にするほど、より機械的精度が要求され、ロケット用としての強度を保つことも必要であるので、東大宇宙研の林研究室で開発された[7][8]、円筒分割方式のものを利用することとした。これはアルミの円柱の外側に銅を電気鋳造し、4本のみぞを掘る(第2図左)、ステアタイトなどの絶縁物のリングを残った銅の部分に固定したあと、酸またはアルカリでアルミを溶かすと4本の銅の電極が絶縁物についた形でできあがる(第2図右)。この方法によると、質量分析器の性能に影響を与える電極の位置の精度、ねじれなどは問題とならず、機械的強度も十分持たせることができる。この電極は、図からもわかるように通常の円柱にくらべ曲面が逆になっているため高調波電場成分が発生するが、軸近傍では小さく、特に高い分解能を必要としないわれわれの目的には十分である。またこの型は円柱のものにくらべ、同じビーム半径に対し相当小型にすることができる。



第2図

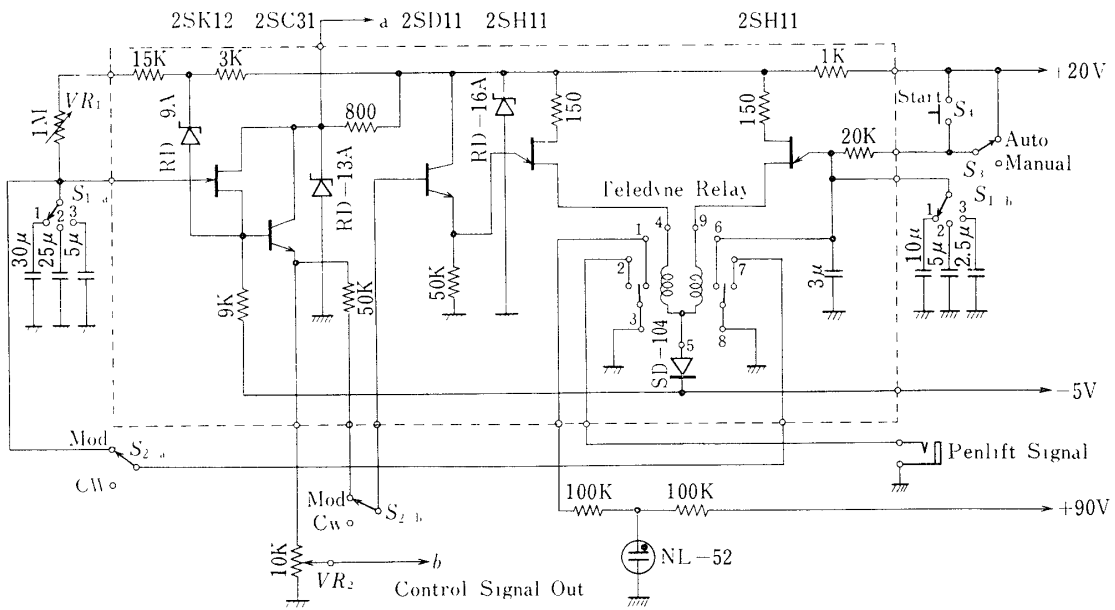
## 2.2 制御回路

この型の質量分析器の電極には、重畳する高周波と直流電圧の比を一定に保ちながら絶対値を大幅に掃引するものを加えねばならない。このとき高周波電圧は直流電圧の大体6倍の値を必要とし、高周波電圧の最大値は数百ボルト必要である。また4本の電極の中心すなわちビームの中心の電位に対し、隣合う電極には互に正負対称な直流および高周波電圧が加わらねばならない。このような必要から付属回路は相当ふくぎつとなる。これの動作の安定性を失わずに簡単化しなければならない。第3図は最初に試作したもので、第4図にその回路を示す。ロケット用の低電圧電源から効率よく高周波の高い電圧を得ること、相当大きい容



第3図

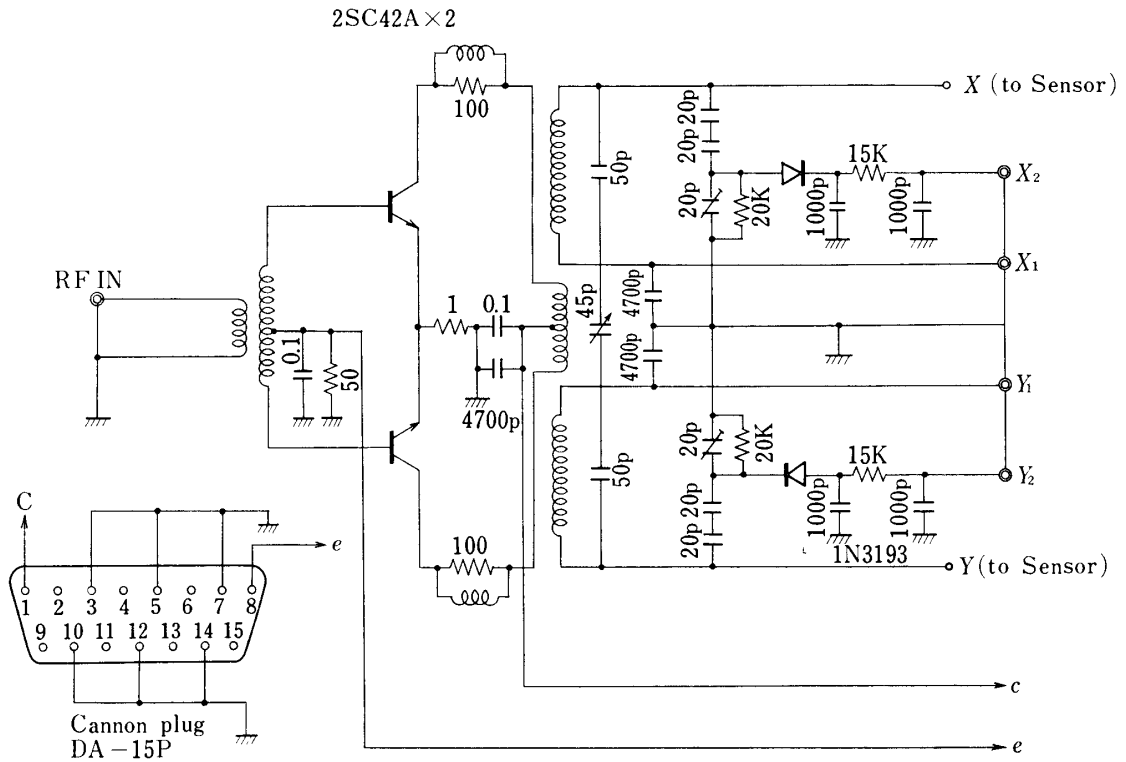
量性負荷となるセンサへ能率よく高周波電力を送ること、直流と高周波の比、印加電圧の正負の対称性を全掃引範囲にわたり正確に保つことなどに非常な苦心が払われた。特に電力節約の点からセンサと高周波の最終段を一体となったものを試作した。第5図でうえの小型のものが高周波の最終段部分である。この回路図を第6図に示す。これらの回路は、周波数2～3 MHz 供給電源 30volt, 300mA で約 1kV peak to peak の高周波電圧をセンサに印加することができる。高周波と直流電圧の比は整流ダイオードの特性に依存するため、特性のそろった、立上り特性のよいものが慎重にえらばれた。



第4図 (a) Control Signal Generator



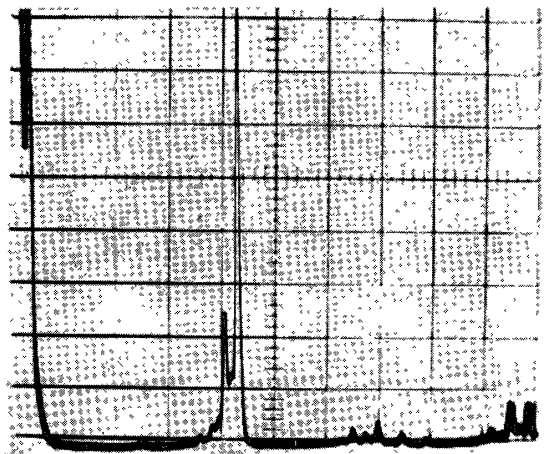




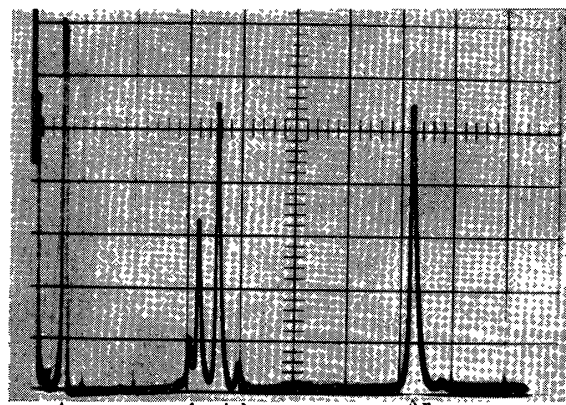
第6図 (c)

2.3 性能試験

これらのセンサと制御回路を用いて、質量分析器としての性能試験を行なった。第7図は40cm ベルジャー中でいわゆる axial beam 型イオン源をつけて残留ガスを測定したものである。大部分が水であることがわかる。第8図はこれに He, Ne, Ar を加えたものの質量ス

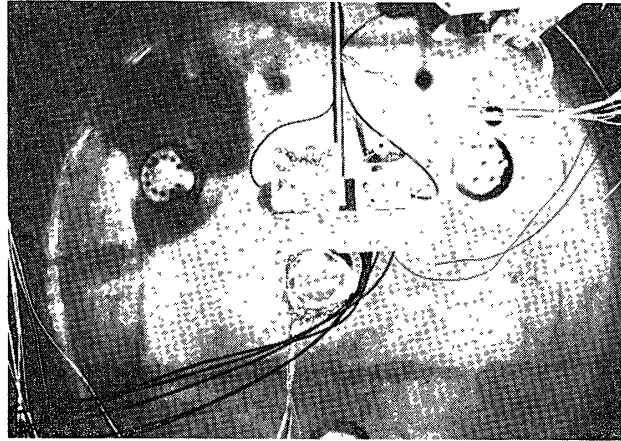


H<sub>2</sub>O  
第7図



He H<sub>2</sub>O Ne<sup>20</sup> Ne<sup>22</sup> Ar  
第8図

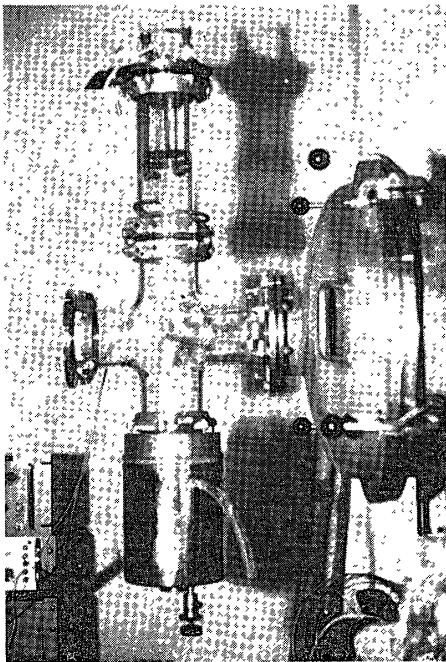
ペクトルである  $\text{Ne}_{20}$  と  $\text{Ne}_{22}$  が分かれて検出されている。第9図は、スペースチェンバ中でプラズマビームを流して実験を行なっているところである。図中央の右上にある四角いものが電源最終段でそのうえの細い丸く見えるものがセンサである。センサの長さは10cmである。



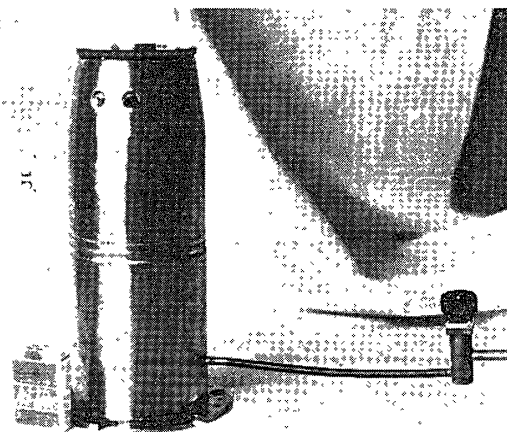
第9図

### 3. 排気系

高度約 60km からの測定を行なうとすると、その高度での真空度は大体、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Torr である。これを質量分析器の動作可能な  $10^{-4}$ Torr より高い真空度にしなければならない。流入孔を小さくすることは、イオンの流入量も少なくなり、イオンのみを電界で分析器へ集中しても感度の点で問題がある。そこで外気圧  $10^{-2}$ Torr のとき約 1cc Torr/sec の流量と



第10図

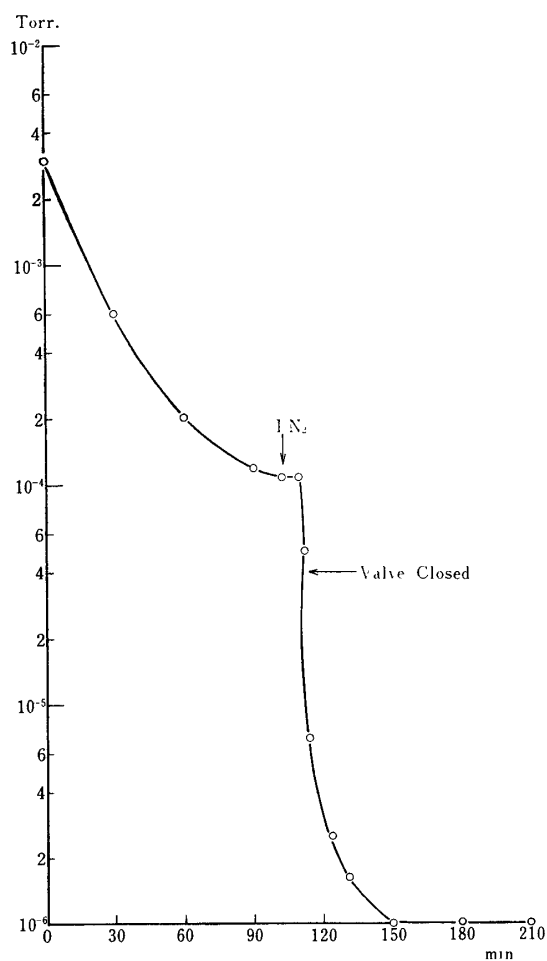


第11図

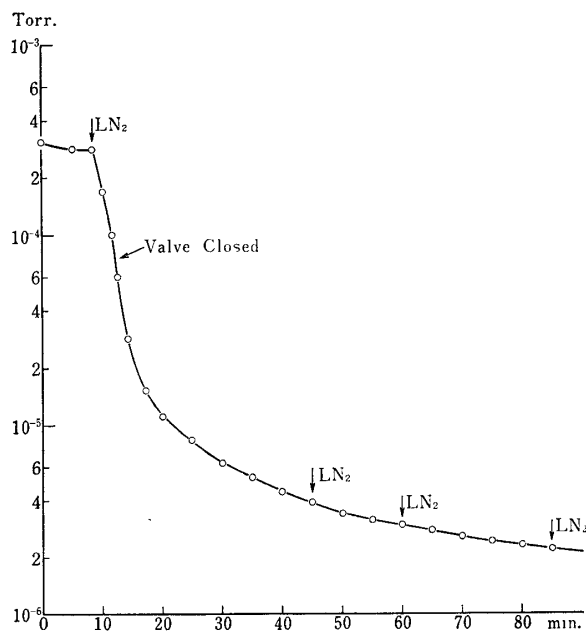


計算される約  $1\text{mm}\phi$  の孔から流れ込む中性気体を排気することに目標をおいた。考えられる高速排気系は、活性炭、モレキュラーシーブ等を液体窒素で冷却するソーブションポンプと、バリウム、チタン等の吸着によるゲッターポンプが可能である。前者は排気速度はややおそいが、排気容量はモレキュラーシーブが同じ重量の気体を吸うといわれ非常に大きい。一方後者は排気速度は非常に速いが、容量の点で心配がある。そこでまずソーブションポンプを試みることにした。第10図のピアレックス・ガラス・パイプの下についているものが試作された。これによる実験結果が良好であったので S-210 型ロケットに合わせて、やや小型のものを製作した。第11図に示すようなもので、これの下半分は回路が納められ気密構造で、飛しょう中1気圧に保たれる。これらの特性は、モレキュラーシーブの種類、活性化の程度履歴等の条件により異なるが、その代表的な特性を示すと、液体窒素注入後の排気特性は第12、13図のようになる。これから吸着剤の冷却には時間がかかることがわかる。十分に冷却することにより到達真空度は  $10^{-7}\text{Torr}$  台も可能である。

飛しょう実験を行なう場合には、ロケットの発射 30 分前程度以後には液体窒素を注入す



第12図



第13図

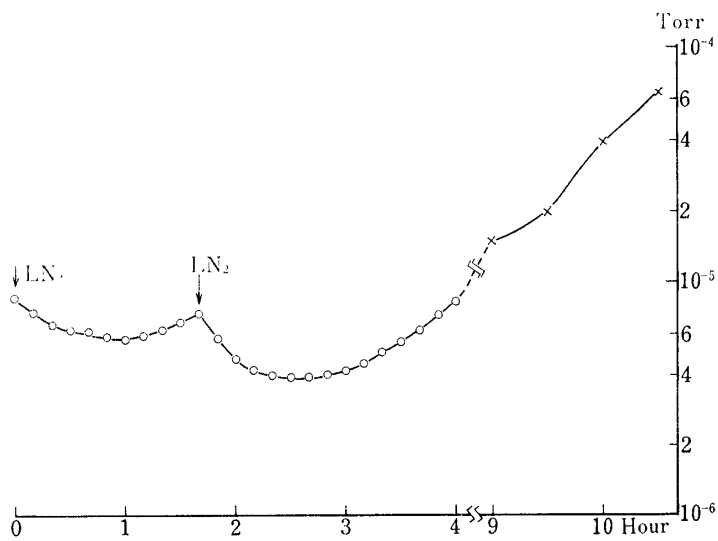
ることは、発射スケジュールの点から無理であるから、飛しょう時間、不測の事情のための発射時刻の延期等を考えて、液体窒素注入後1時間は所要の性能を保つことが要求される。第14図にこの特性の実測値が示され、十分な能力を持つことがわかる。

つぎに所定の高度に達し、開孔機構を動作させ、外気が流入しはじめたとき内部が必要な真空度に保たれているかどうか、すなわち排気速度の実験結果を第15, 16図に示す。 $T_0$ は、流入口の外側の真空度で、一つの実験中一定に保たれる。外気に対し2~2.5けた高真空を相当長時間にわたって維持することができることがわかる。第16図の $T_0=10^{-1}$ Torrの場合は前の実験の影響が現われたものと考えられる。実際の飛しょう実験において、高度約60kmで開口した場合、真空度が $10^{-2}$ Torrより低い高度範囲を通過する時間は、上昇時降下時各10秒程度と考えられ、約4分の観測時間の大部分は $10^{-3}\sim 10^{-4}$ Torr台である。したがって排気容量については大きすぎるほどであり、排気速度の点でも十分な性能を持つことがわかる。このような排気法を用いる際留意すべき重要な点は、十分よく活性化された吸着剤を用い、事前の加熱ガス出しを十分にやること、加熱と冷却の温度差の幅は約400°Cにも達するため、熱ひずみによる真空の漏れのないような材料と構造を選ぶことである。加熱については、吸着剤中へヒータを入れたが、液体窒素注入孔から熱風を圧送循環させる方法が均一な加熱の点から最良であった。

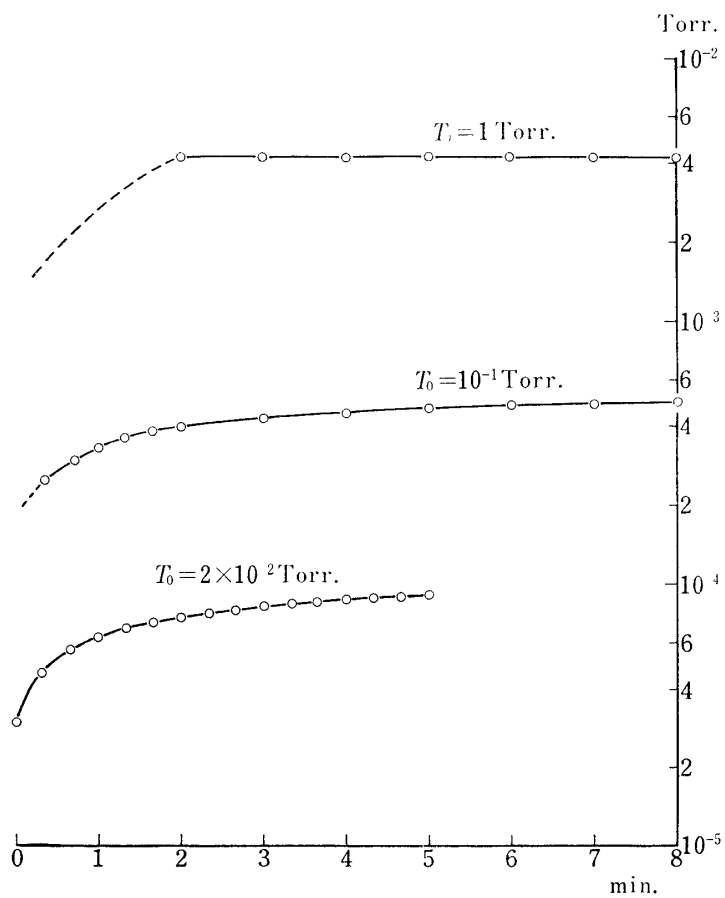
#### 4. 飛しょう実験

第17図は上半分が質量分析器センサ、下半分が二次電子増倍管である。センサは第2図右側のもの、二次電子増倍管はガラス封じの市販品(浜松テレビ製)を購入し実験グループにより組立てられた。このセンサ部分は第11図のクライオスタット(東理社理化研究所製)中に第18図のように納められる。センサのまわりには吸着剤が充填される。第19図は上部のふたと開口機構で、上部ふたはエポキシガラス製、1mmφの孔をもつ取入れ電極には約6voltの負電圧が与えられた。クライオスタット容器の下半分に入る制御回路類は、第3~6図の試作品を基礎にして搭載用に小型化された。(松下通信製)第20図に直径約14cmのプリント板3枚にまとめられた回路部を示す。電気系ブロックダイアグラムを第21図に示す。2系統の対数増幅器を持ち、約6けたのダイナミックレンジを持つ。質量数10~70の範囲を2秒で掃引測定する。組立て後排気試験、環境試験、イオン源をつけた真空槽内で校正、電気総合試験等が約1か月以上にわたり行なわれた。測定器は組立、試験の後排気密封されて内之浦へ運ばれた。実験場においても単独およびロケット頭胴部への組込後も補助排気が続けられ、最後に補助排気用銅パイプは油圧圧着器により切断密封された。第22図は組付けられたS-210-5頭胴部を示す。質量分析器容器の上部には、電子密度、電子温度測定用プローブがとりつけられ、ノーズコーン脱頭後両側へ開き、分析器開口機構が作動する。

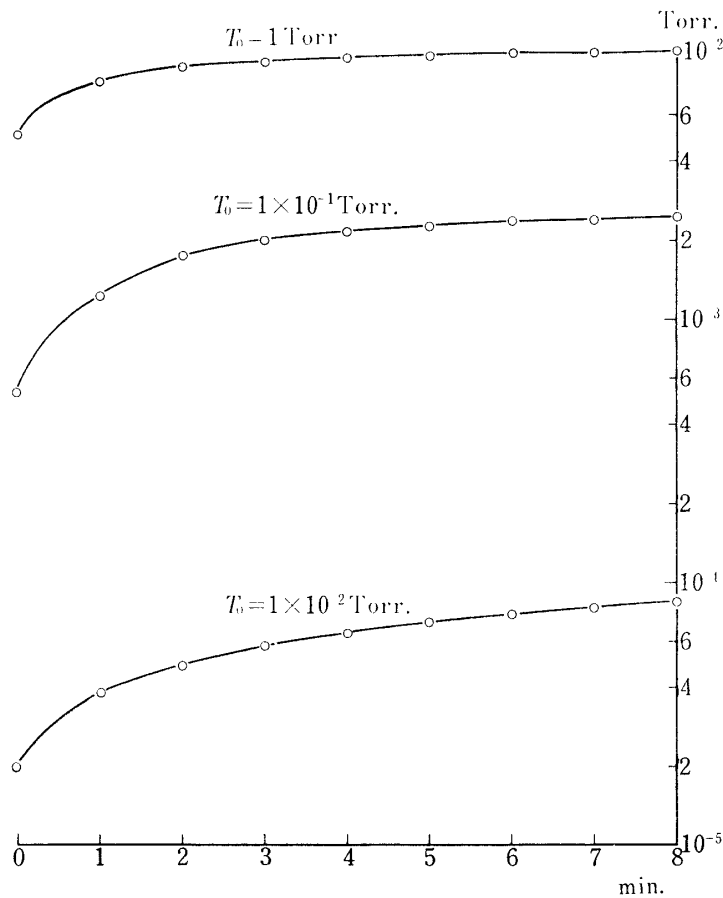
実験当日発射約2時間前から約30分ごとに液体窒素を注入した。1970年9月28日10時20分S-210-5号機は発射されたが、ロケットノーズコーンが脱頭しなかったため観測を行なうことができなかった。



第 14 图



第 15 图



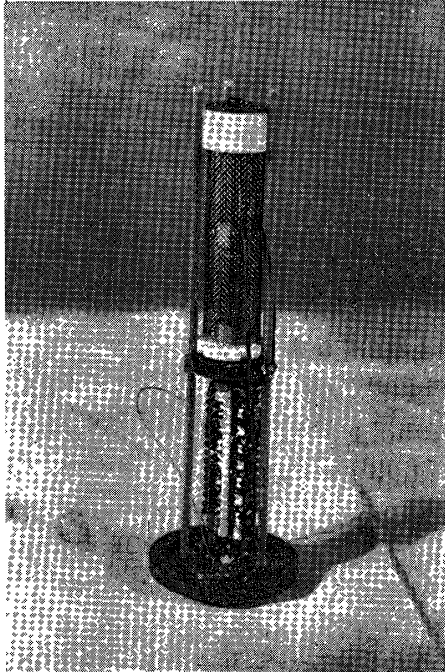
第16図

### 5. 結 言

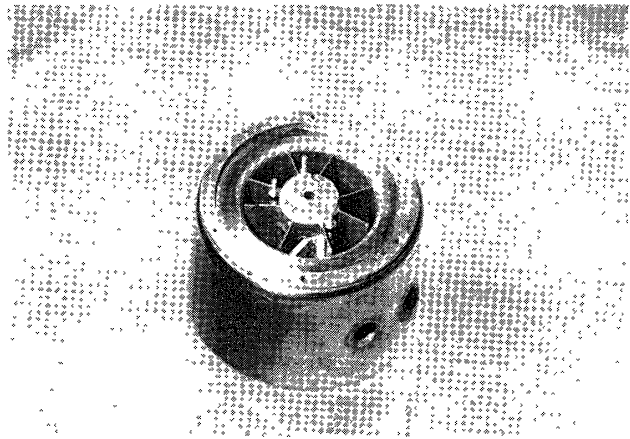
上記のように、残念ながら観測は不首尾に終わったが、一連の開発研究の過程で多くのデータと経験が得られ、今後この種の実験をすすめてゆくうえで貴重な資料となった。さらに改良が必要な諸点としては、①クライオスタット上部の熱絶縁、②有効吸着面、特に流入口近傍の吸着面積増大のための吸着剤装填法、③開口機構、④高周波回路動作の安定性、特に低温特性、⑤回路各部の耐電気衝撃特性等が考えられる。また液体窒素の使用は手数を要し、低温がトラブルの原因ともなるので、さきに述べたもう一つの高速排気系ゲッターポンプについても検討を終り、現在試作実験を行なっている。これら高速排気系と真空測定技術の応用により観測がすすめられ、下部電離層のみならず、電離圏と対流圏の結合の解明の貴重な資料となるであろう。

最後に、制御回路の開発、試作については、宇田川諒悦君（元電波研、現在松下通信）の努力に負うところが大きい。また実験に際して宇宙研スペースチェンバ実験室の川原、玉田両君、搭載機器製作について、松下通信、久保井、梅橋両氏と東理社理化研究所、飴野氏の協力を得た。ここにあらためて謝意を表する。

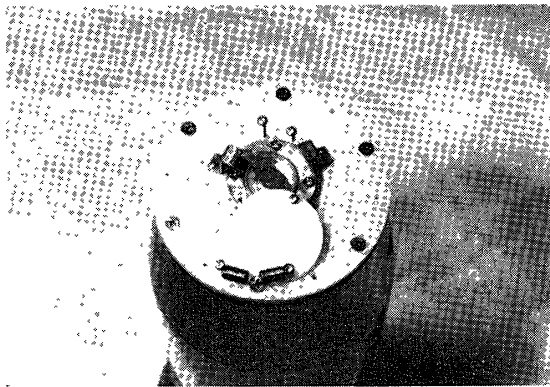
1970年1月14日 新設部(科学)



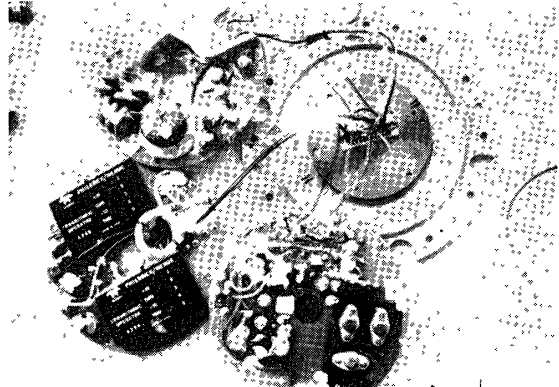
第17图



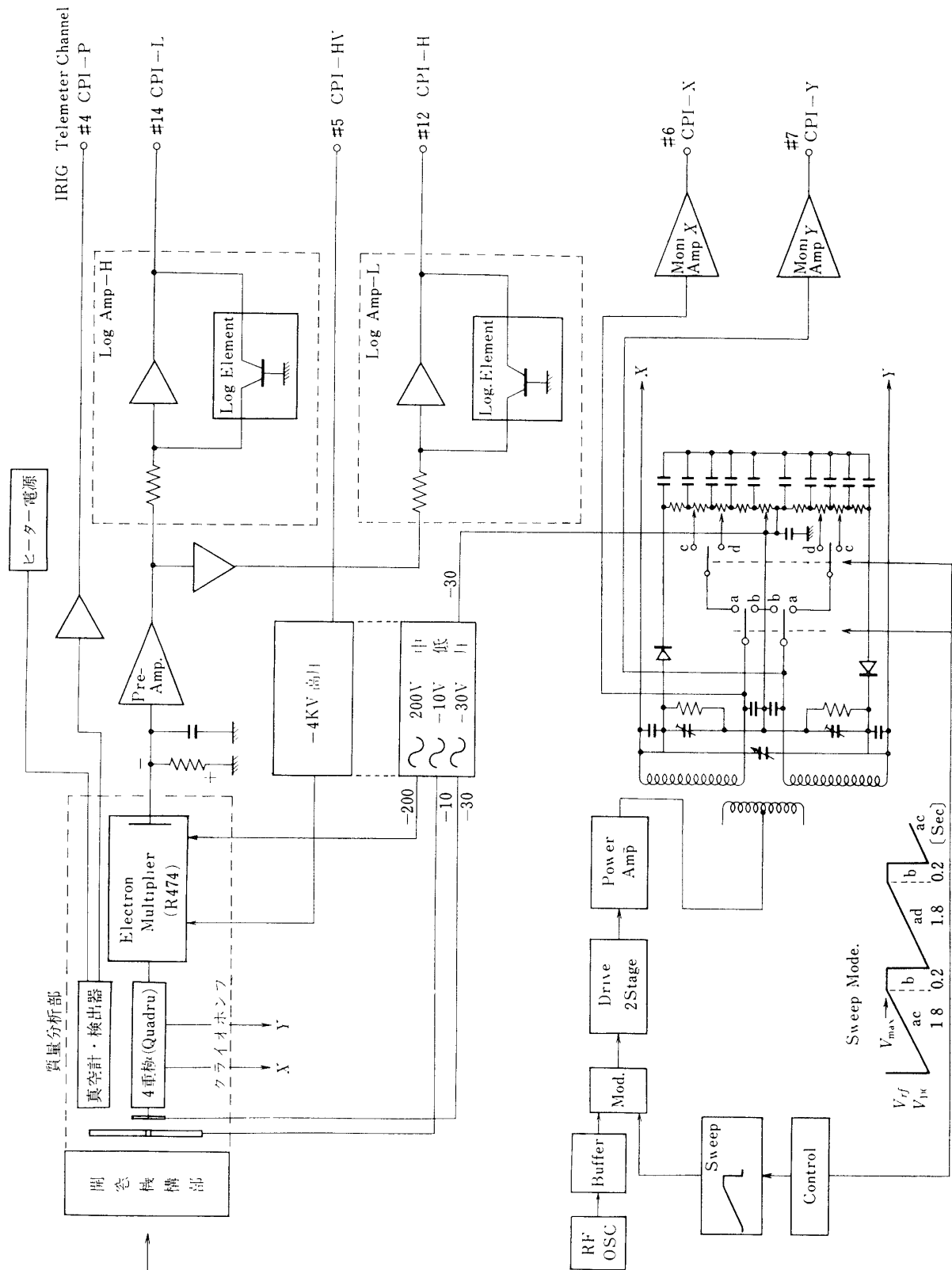
第18图



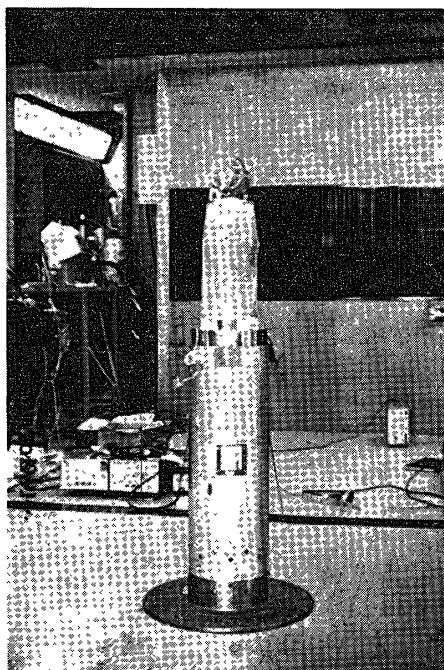
第19图



第20图



第21図



第22図

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Istomin, V.G.: "Magnesium and Calcium in the Earth's Upper Atmosphere" NASA Tech. Transl. F-69, 1961.
- [ 2 ] Narcisi, R.S. and Bailey, A.D. : "Mass Spectrometric Measurements of Positive Ions at Altitude from 64 to 112 Kilometers" J. Geophys. Res. **70**, 15, 1965, 3687~3700.
- [ 3 ] Goldberg, R.A. and Blumle, L.J.: "Positive Ion Composition from a Rocket-Borne Mass Spectrometer" J. Geophys. Res. **75**, 1, 1970, 133~142.
- [ 4 ] Narcisi, R.S.: "Ion Composition of the Mesosphere" Space Res. VII, 186.
- [ 5 ] "United States Space Science Program" Report to COSPAR, May 1970.
- [ 6 ] たとえば畚野信義. "質量分析" 宇宙科学観測装置のシンポジウム 1967年2月22~24日 東大宇宙研
- [ 7 ] Hayashi, T. and Sakudo, N.: "Quadrupole Field in Circular Concave Electrodes" Rev. Sci. Instr. **39**, 7, 1968, 958~961.
- [ 8 ] Hayashi, T. and Sakudo, N.: "Quadrupole Field in Circular Concave Electrodes with Finite Thickness" Rev. Sci. Instr. **40**, 7, 1969, 923~924.