

ロケット観測による超高層の研究

前 田 憲 一

1. は し が き

昭和 35 年 7 月われらのロケット Kappa は遂に高度 186 km に達し、9 月には 200 km の高度に飛んで E 層を抜け、さらに F 層下部に突入してイオン密度と宇宙線強度の観測に成功した。5 年前のはじめからこの事業に関係した者の一人として、感激と喜びにたえない。昭和 30 年のはじめにわが国としてロケット観測による超高層の研究が関係方面の支持を得、東大生産技術研究所(生研)がこれに協力して観測用ロケットの研究開発を担当することになった時から数えて約 5 力年を経て今日の成果に達したわけで、経費その他各般の制約を克服した関係者の努力は敬服の外なく、同時にわが国の宇宙空間科学技術の開発に明るい将来を約束するものである。

2. 研究連絡組織の推移

生産技術研究所内の研究組織は別として、われわれ超高層の物理学的研究の側に立つ者達が生研側とどのように結びついて研究を進めてきたかを回顧してみよう。前述の昭和 30 年にはすでに学術会議内に長谷川万吉教授を長とする国際地球観測年 研究連絡委員会 (IGY 研連委) が組織されており、これと生研との協議により生研内にロケット研究連絡会 (ロ研連) を作り、当時の生研所長星合正治教授の下に生研側関係者とわれわれ物理関係者とが集って研究連絡をはじめた。その後 IGY 研連委内にロケット分科会が他の多数の分科会と同時に作られ、筆者はその世話役となったので、この意味からもロ研連との連絡役となった。翌 31 年に学術会議内に兼重寛九郎教授を長とするロケット観測特別委員会が設けられ、これの中に生研側の関係代表者や超高層物理関係者その他が含まれることとなってロ研連は解消し、新委員会の中に専門別の四つの小委員会 ((1) ロケット機体、エンジン、推進等 (2) 追跡 (3) 観測計器、テレメータ、回収 (4) ロクーン) を設けて研究連絡を進めた。研究が進むにつれて実際に観測用としてのロケットの飛ばし試験や本番観測の段階に近づいてきたので、同委員会の中にロケット観測実施連絡小委員会が組織され、以後はこの小委員会の手で IGY の観測の準備と実施が行なわれることとなった。この間文部省内に各省連絡協議会が設けられ、生研はこれの協力を得て今日まで秋田県道川海岸の使用とロケットの発射が円滑に進むように不断の連絡が保たれてきたのである。

IGY 終了 (昭和 33 年 12 月) 後も前記特別委員会

は存続したが、実際の観測事業は名目上は生研の中に含まれることとなり、物理関係者も生研内の臨時的な身分を与えられて観測を行なうこととなり今日に至った。

この関係での集まりはロケット観測協議会 (ROKK) と名づけられ生研所長福田武雄教授がその長である。これに先立ちロケットや人工衛星を有力な手段とする宇宙空間研究の重要性が国際的に認識され、昭和 33 年末に CO SPAR ((Committee on Space Research) が UNESCO の下に設けられ、わが国でも翌年早々宇宙空間研究連絡委員会 (昭和 35 年 6 月以降宇宙空間研究特別委員会として改編、ともに委員長は兼重寛九郎博士) が学術会議の中に設けられ、前述のロケット観測特別委員会は解消した。

3. 観測対象について

これまでに述べたところは物理関係者に関連する国内研究連絡組織の推移であるが、これは主として観測実施の面から見たもので、観測対象の選定など純粹に超高層の物理学的研究の面から問題を検討することについては、別に述べる必要がある。

終戦直後からわが国には文部省の研究助成金を得て組織された電離層総合研究協議会 (昨年より超高層総合研究協議会と改称) があり、萩原雄祐教授を中心として全国的な関係研究者の勉強の場を形成し、海外でも注目される数多くの研究成果を挙げてきた。その後学術会議内に萩原教授を長とする電離層研究連絡委員会が設けられ、両者は終始一身体的な活動を続けて今日に至っている。この二つの会はわが国におけるこの方面の学術の高いレベルを維持する母体であるが、この中から多くの代表者が前述のロケット観測の各種連絡組織に参加している。最初の観測対象の選定は IGY 研連委の中で協議され、その後ロケット観測特別委員会、次に宇宙空間研究連絡 (後に特別) 委員会という具合に移って行った。

この研究の初期段階では前記のロケット観測特別委員会において次のような観測項目が審議され了承された。この間関係者は電離層総合研究協議会等と連絡を保ったことはもちろんであるが、一方ロケットの飛ばし高度も不十分であるし、各種の点において未経験でもあったので、いきなり新機軸を出すとか独創性を発揮するということは無理であったが、各項目に対してそれぞれの理由やねらいはあったのである。

(1) 電離層のイオン密度

この量は地上から電波を発射する方法では測定できないし、当時ミシガン大学の人々による観測資料が一つあったが、その方法と結果に信頼性がなかった。一方 Kappa が電離層に突入する高度まで上昇するのはかなり先のことも推察されたので、イオン密度を適確に測定し得る方法を研究開発することから着手することになった。そこで電波研究所と電気通信研究所とが協同でこれを担当することとなった。

電離層のイオン密度は電波の反射にはほとんど寄与しないが、電離層の電気伝導度を支配する重要要素であって、電離層と地磁気変化とを結びつけるいわゆるダイナモ理論における中心的重要性を持つものである。またこのイオン密度は電離層の生成理論から推定されるが、むしろ現在ではイオン密度を実測することによって従来の生成理論を批判したり裏付けたりすべき段階にあるのである。このような意味からしてこの観測項目は、その観測方法の新規開発と超高層物理学上の新しい知見の獲得という二つの大きなねらいを持っていたのである。

(2) 気温・風向・風速

ラジオゾンデによる気温、風の観測はただだか 30 km 内外までであり、それより上では風の観測は 100 km 内外の高さにおける電波的方法による外なかった。初めの頃には米国の研究者によって行なわれた発音弾法による気温、風の観測値が少し発表されていた。これは地上 30 km から 80 km 位までの値である。この程度の高さは当時の Kappa の最初のねらいとも一致することと、次のような学問的理由からこの項目をとりあげることとした。すなわち地上から約 80 km 内外までの大気に対して太陽の熱吸収や潮汐現象にもとづく共鳴振動の理論が前から研究されているが、これには気温の垂直分布が重要因子であり、また理論の帰結としての風系の強弱や構造が問題である。またこのことがらはすぐ上方につながる電離層（特に E 層）内の風系にも密接に関係し、したがって前述のダイナモ理論における動力源としての風の構造につながる重要問題である。しかして風系は地球上の地域やその地点の地方時によって変化することも当然考えられるので、日本でこの種の観測を行なうことも意義のあることと思われる。観測方法は米国のものを踏襲するのが早道であり、その地上計測用の機器が偶然に入手できたので京都大学工学部と大阪市立大学工学部とが協同でこの観測を担当することとなった。

(3) 宇宙線、太陽輻射

この二種の項目はロケットの高度が必ずしも電離層に突入しなくても観測結果はそれだけの意味があること、経験を蓄積して将来の高級な観測、たとえば特定のエネルギー領域での宇宙線とか、sun follower を付けた波長の短い太陽輻射のスペクトル観測とかに備えるための予備的な実験の意味で着手することとなった。前者はとり

あえず宇宙線の総エネルギー量を測ることよりはじめ、後者は 0.2μ から 0.29μ までの波長帯をねらった写真観測をすることとし、それぞれ理化学研究所と東大の東京天文台が担当することとなった。

(4) 気圧

これは気圧の計測によって宇宙線測定値の校正に役立たせることが主であって、計測器の開発を含めて東大生研が担当することとなった。

(5) 電離層の電子密度

地上からするパルス法による電波観測でも電子密度がすべての高さに対して測れるわけではない。E 層下部や D 層の部分、E 層と F 層の中間領域、F 層の上側などはロケットによる直接計測によらねばならない。また夜間の E 層電子密度は従来の電波法では十分明確に測定できない。これらの問題は電離層の構造を明らかにする上にも、また電波伝播上の実際問題にとっても重要である。ロケットによる電子密度の観測法は米国の Seddon 氏の考案したものがあり、米国で実施されているが、さほど推奨に値する方法とも思われない。もし前述のイオン密度の直接測定に類する方法が開発されれば申し分ないので、その方面の努力をする一方、Seddon 法の準備も考慮することとなった。これの担当はイオン密度と同じである。

(6) 地球磁気

これについては当初米国の Singer 氏が磁気赤道付近で E 層の下部付近まで測定したデータが発表されていたが、これによると E 層下部からダイナモ説で重要なダイナモ電流が顕著に認められはじめることがわかった。これは従来の研究による推定と一致するのであるが、磁気測定をさらに E 層を抜け切る高さまで、または F 層内まで延ばさなければ十分ではない。その後この方面の観測が続行されていないようでもあるので、われわれはこの問題を取りあげることとした。このためにプロトン磁力計をロケットに搭載できるように研究することになり東大理学部がこれを担当することとなった。担当者の福島直氏はさらに計測方法を精密化して超高層磁場の微細な構造を測定することにより、電離層内の不規則性の問題に検討のほこ先を向けようと考えたのである。

以上のことは Kappa ロケットを使用するというたてまえて述べたのであるが、研究の初期の頃からロケーンの開発が小規模ながら並行的に進められていた。ロケーンは初めは風に流されて遠方へ行くという欠点はあるが、比較的安価で上昇高度が高いものが得られるという見込みのもとにこれが使用可能になれば、宇宙線、気圧、イオン密度、地磁気などの項目を観測することになった。

4. 観測の結果

第 1 表 気温・風観測表

	K6-TW-1	K6-TW-2	K6-TW-3	K6-TW-4	K6-TW-5	K6-TW-6	K6-TW-7	K6-TW-8	K6H-TW-9
全 長 (m)	5.389	5.304	5.352	5.351	5.443	5.616	5.616	5.600	6.870
重 量 (kg)	255.45	254.95	259.14	259.61	263.70	270.50	270.50	263	330
発 射 角 (度)	78	75	78	78	80	80	80	80	80
高 度 (km)	20 (概略値)	40 (概略値)	43.5	47.0	50.5	50.5	48.6	45.5	69.5
追 尾	レーダ 不良	レーダ 不良	レーダ 不良	レーダ 良好	レーダ 良好	レーダ, 赤外線 良好	レーダ良好 赤外線不良(雲)	レーダ, 赤外線 良好	レーダ, 赤外線 良好
年月日時	1958年 6月24日 11時10分	1958年 6月30日 17時12分	1958年 9月25日 12時15分	1958年 9月26日 13時10分	1958年 12月23日 12時23分	1959年 3月18日 12時5分	1959年 3月20日 12時12分	1960年 9月17日 11時48分	1960年 9月29日 11時46分
天候 概況 風速 風向 気温	快晴 2.5m/s, 315° 20°C	雨後晴 3.5m/s, 270° 21°C	曇 5m/s, 315° 24°C	曇 4m/s, 225° 26°C	やや曇 0.1m/s, 90° 9°C	快晴 5.5m/s, 0° 5.5°C	曇 4m/s, 340° 9°C	ほとんど無風 25°C	快晴 ほとんど無風 21°C
発音弾数	1 (1kg)	1 (1kg)	1 (1kg)	1 (1kg)	$2\left\{\begin{array}{l} (0.5\text{kg}\times 1) \\ (1\text{kg}\times 1) \end{array}\right\}$	$5\left\{\begin{array}{l} (0.5\text{kg}\times 4) \\ (1\text{kg}\times 1) \end{array}\right\}$	$5\left\{\begin{array}{l} (0.5\text{kg}\times 4) \\ (1\text{kg}\times 1) \end{array}\right\}$	$6\left\{\begin{array}{l} (0.3\text{kg}\times 3) \\ (0.6\text{kg}\times 3) \end{array}\right\}$	$6\left\{\begin{array}{l} (0.3\text{kg}\times 3) \\ (0.6\text{kg}\times 3) \end{array}\right\}$
発音高度 (km)	不明	不明	43.5	47.0	41.1 48.5	$\times, 34.0, \times,$ 44.8, 50.0	27.8, 33.1, 38.5, 44.0, 48.6		
マイクロフォン数	7	7	7	7	10	10	10	10	10
測風気球	6km迄	—	5km迄	3km迄	5km迄	4.5km迄	—	3km迄	7km迄
レーウィン・ゾンデ	30km迄	18km迄	20km迄	22km迄	24km迄	24km迄	21km迄	20km迄	26km迄
結 果	不良	不正確	不正確	不正確	かなり 良好	良好	良好	良好	良好

観測回数が一番多かった気温、風の観測から述べてゆこう。

(1) 気温・風

測定方法の詳細その他は、他の文献^{1)~5)}にゆずるが、要するにロケットに搭載した何本かの発音弾を一定の時間的プログラムを与えられたタイマーによって、約 30km 付近から 1 発ずつ次々と射出して爆発させ、最後の発音弾はロケットが最高高度に達した時に爆発させる。この個々の爆発の時刻と場所をロケットの追尾機器や赤外線検出機で知るとともに、地上数カ所に設けたマイクロフォンで音波を受けて到来時刻を記録する。これらの値から各高度の音速と風向、風速を理論的計算で求め、音速からは気温が計算されるというわけである。米国では発音弾の数が多く 20 本近くもあるので、ある発音弾と次の発音弾の地点間の高度差が僅小である関係上、その区間は気温も風も一定と見なし得ることになって、データからの気温・風の計算法が簡略である。しかしわが国の場合は初めのうちは 1 個、後に 2 個、5 個と増したが、本年の観測でも 6 個になった程度であるので、2 発音点間の気温・風の分布を 2 次式的と仮定して計算を行なった。このために理論式を新しく作ったが、計算は極めて労力を要することとなった。この理論的研究はわれわれの創始によるものと自負していたが、英国のロンドン大学でも同様の理論を立てていたことが後でわかった。

本年 9 月における 2 回の観測を含めて前後 9 回の実験になるが、その要点を表示すると第 1 表のようになる。当初からの方針として、観測は 1 年間の代表的季節として春夏秋冬のそれぞれ中心期において日中正午前後をねらった。一二この原則にはずれるものもあるが、だいたいその通りに運んだものと思う。

表からも見られるように第 4 観測まで (TW-1 から TW-4 まで) は資料は得られない状態であり、第 5 観

測以降のものはすべて数値計算の価値があるということになる。目下計算中のものもあり、計算ずみのものもまだ発表していないのでこの機会に一部を紹介しておきたい。1 例として昭和 33 年 12 月 23 日 (WT-5) の結果を第 1 図 (a) および (b) に示す。(a) 図は気温で (b) 図は風向・風速である。図中地上から 24km までは秋田地方気象台の Rawin Sonde による観測結果であり、風はその方向と大きさがベクトルの示され、線のそばの数字は風速 (単位 m/sec) を示している。

最近ソ連の文献には気温の観測結果が発表され (発音弾法ではない)、一方米国の行なった Fort Churchill (カナダ) や White Sands での観測も発表されているが、これに日本の資料を加えて検討するのが今後の研究課題である。しかしまだ学問的検討には不十分であり、後述するような一定の方針と計画によって観測を続行し資料を集積しなければならない。

(2) 太陽輻射

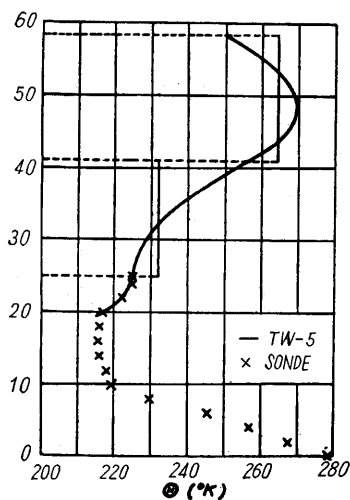
この観測は前後 4 回行なったが、いろいろな原因で資料は得られなかった。詳細は他の文献^{6), 7)}にゆずる。

(3) 宇宙線 (気圧を含む)

この観測は前後 4 回 (後の 2 回は気圧観測を含まず) 行なってそれぞれ資料を得た。第 3, 第 4 観測では、イオン密度の観測と同じロケットによったため 190km 付近までの資料が得られている。第 1, 第 2 観測の結果は文献^{8), 9)}に記載されている。また詳細は他の文献^{4), 5), 10)}にゆずるが、この結果は従来米国で得られたものとよく似ているので、当初のねらいであった予備的研究という目的を十分に果たし得たもので、将来の研究に対する自信と見通しを与えるものである。

(4) イオン密度

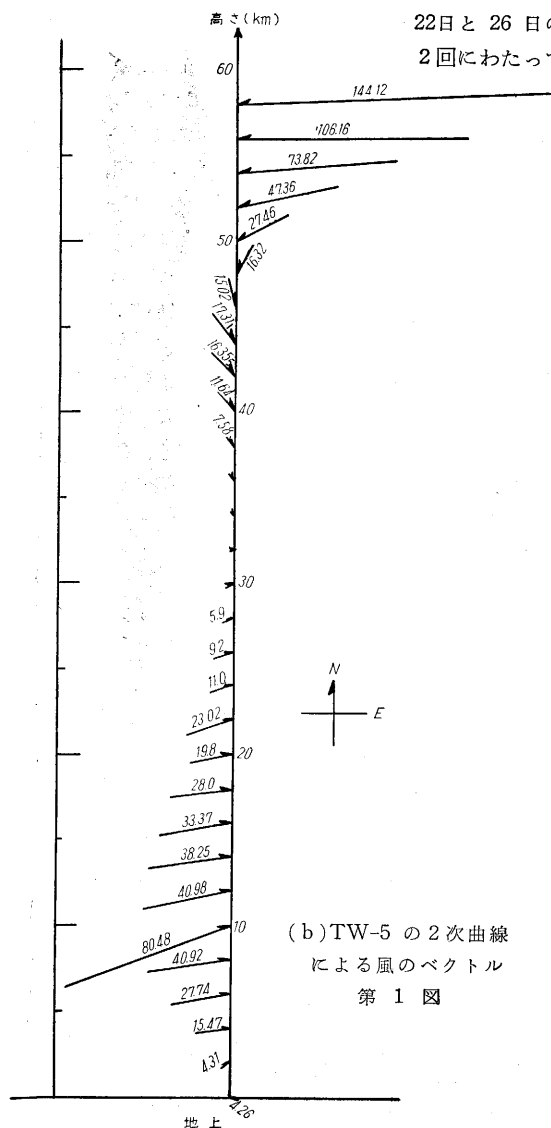
日本独自で世界最初の成功という点で重要な意味のあるイオン密度の測定器については他の文献¹⁰⁾にゆずる



(a) TW-5 による気温の分布

が、この測定器は放電の実験的研究に用いられる探針法を改良したもので、特に探針から太陽輻射のために出る光電離による電子放射を極力軽減、抑圧するために、球形金網状としてこれに金メッキを施すなどの苦心が払われている。

昭和 35 年 9 月 22 日と 26 日の 2 回にわたって

(b) TW-5 の 2 次曲線による風のベクトル
第 1 図

観測されたが、いずれも 190 km 付近までに達した。第 1 回は昼間、第 2 回は夜間で、データからみて最初恐れていた探針からの電子放射の影響が無視できるという話である。結果の詳細についてはいずれ関係者の名で発表されるはずであるが、去る 9 月 30 日に行なわれた予備報告によると、観測結果は満足すべきものであるように思われる。この観測で一応昼間と夜間のイオン密度が 190 km 付近まで求められたことは世界でも最初のもので、今後の観測継続にともなっているいろいろな学問的検討の資料として貴重なものとなるであろうと信ぜられる。

(5) ロケーン関係については別項を参照されたい。

5. 今後の研究計画

最初に述べた宇宙空間科学の国際的委員会 COSPAR はすでに 3 回の総会を開き、去る 1 月には宇宙空間に関する国際シンポジウムを仏国ニースで開催し、この方面の急激な学術的発展を証明しつつある。わが国でも内閣に宇宙開発審議会が設けられ、日本としてこの方面の学問、技術をいかに進めるべきか、また国際協力のあり方などをあらゆる観点から考究し、さしあたっての方針について答申した。従来から超高層研究の面で蓄積されたわが国学界の高いレベルを考え、一方ロケットの技術も急速な進歩を示すに至った現段階において、学術関係者はもちろん国全体としても将来宇宙空間に関する学問、技術を研究開発する方向に向かっているものと思われる。このような周囲の情勢に応じて宇宙空間研究特別委員会と超高層総合研究協議会は共同して宇宙空間物理学の将来計画のシンポジウムを開催した。シンポジウムは去る 9 月 30 日と 10 月 1 日の 2 日間にわたり、全国的な関係研究者の参集のもとに熱心な研究発表と討議を行なった。この討議の内容を通じて現在われわれの最も関心を持つ Kappa ロケットによる研究の計画を通観することができる。シンポジウムの最後に、ロケット観測に関するものについて種々協議を重ねて筆者がしめくくった研究計画は次のようなものである。

(1) 超高層の実体と構造

1) 大気組成

比較的下層ではオゾン層、水蒸気の問題、上層では大気の組成を研究する。ロケットからゾンデを落下させるとか、質量分析器をロケットに搭載する。高度は 30 km 位から電離層にまでおよぼす。

2) 気温・風

従来の方法を継続するほか、80~110 km に対して Chuff 法と超音波法を開発する。Na の気化による方法も分光観測の経験者の手で開発する。なお特にこの種の研究は世界中の各種の緯度の地域で同時観測をするのが最も有効であるとの観点から、このことを COSPAR を通じて関係各国に提案することが考慮されている。

3) 電離層および外気圏の物理的性質

従来の方法でイオン密度を測るほかに、最近開発された resonance probe 法で電子密度を測る。さらに万能プローブの構想を実際化して電子とイオンを一挙に測定する方法を開発する。これらの方法は電離層のみでなくその上側の外気圏 (300 km 以上) にも使用できる。

(2) 場の強さと構造

1) 電 場

電離層および外気圏にある電場を測ろうとするものがあるが、いまのところ自信のある方法は提出されていない。しかし一二検討の価値ある方法があるのでこれを研究する。超高層の電場の問題は未開拓の分野で、これが信頼性のある方法で測られたら学問的に大きな寄与となるであろう。

2) 磁 場

電離層および外気圏の磁場を測ろうとするもので、従来行なわれている方法の開発であるが、そのねらいは電離層内の電流系、電離層の遮蔽効果、磁気脈動など新しい目標を含んでいる。

また磁気計測の技術を用いてロケットの aspect を知ることができる見込みであるから、磁気 aspectmeter を開発する。

(3) 放射および放射

1) 電磁波領域の放射

外気圏内で自発的に電磁波の放射が生起しているはずであるから、これを適当な周波数帯域で測定する。これは電離層を抜けた外気圏で観測する。これにはロケットの姿勢やアンテナの問題その他がある。

地球外の宇宙から降り注ぐ電磁波を受けてその強度と偏波を測定する。これも外気圏で測定される。

2) 光

天空の輝度、星野の色指数、夜光中の赤外放射、太陽からの超紫外および軟X線などの観測を行なう。これらには sun follower とか aspectmeter の必要なもの、計測器自体の基礎研究を要するものなどが含まれているが、夜光の赤外観測は比較的实现の可能性が近い。

また太陽系外からの紫外 (1000~1500Å°), 赤外 (28 μ) 観測も重要であるが、いまのところ技術的に相当な困難がある。

3) 放 射

宇宙線の観測を続行するほか、通常の宇宙線より低いエネルギーの放射いわゆる subcosmic rays の観測を行なう。このためには計測器の基礎研究を従来行ってきたがこれをさらに促進する。

もちろん上述の諸項目の中には実施の可能性についていろいろの段階のものが含まれているが、現在のわが国研究者の計画の集成ともいい得るのではないかと思う。上記の研究項目については総合研究協議会としても僅かながら研究費を割り当ててその促進を期したが、中には前述の ROKK を通じて生研から研究費の配布を受けたものも含まれている。今後これらの新しい計画に対して、研究費の獲得、生研ないし ROKK との結びつきの問題も考えねばならず、ロケット技術関係者に対してこれらの要望に答えるために期待したい種々の技術的問題も出て来つつある。この意味において近いうちに、ロケット関係者 (ロケット電子工学関係をも含む) と超高層物理関係者の合同研究会が持たれることが望ましいので、これについても計画を進めたいと思っている。

(1960.10.28)

参考文献

- 1) Y. Takeya and T. Okumoto: "A Method of Obtaining the Atmospheric Temperature and Wind from Sound Propagation in the Rocket Sounding", Journal of Geomagnetism and Geoelectricity (日本地球電気磁気学会誌), 10, No. 3, 118-125, 1959.
- 2) 前田憲一, 竹屋芳夫, 松本治弥, 奥本隆昭: "上層における気温・風の観測", 生産研究, 11, No. 8, 368-375, 1959.
- 3) K. Maeda, Y. Takeya, H. Matsumoto and T. Okumoto: "Measurement of the Atmospheric Temperature and Wind Velocity by the Kappa Rocket", Proceedings of 1959 International Symposium on Rockets and Astronautics, Report No. 48, 322-337, 1959.
- 4) Japanese Contribution to the International Geophysical Year 1957/8, National Committee for IGY, Science Council of Japan, Vol. 1, XI(a)Rockets, 88-102, 1958.
- 5) Japanese Contribution to the International Geophysical Year 1957/8, National Committee for the IGY, Science Council of Japan, Vol II, XI(a)Rockets, 146-152, 1960.
- 6) Y. Miyazaki and H. Takeuchi: "Cosmic Ray Observation by Kappa-VI Rocket", Rep. Ionos. Res. Japan, 12, 475-477, 1958.
- 7) 宮崎友喜雄, 竹内一, 今井喬, 大塚好造, 成田昭三, 刈谷志津郎: "カッパ 6 型-CP 1, 2 号機の宇宙線観測", 生産研究, 11, No. 8, 389-391, 1959.
- 8) 富永五郎, 岡田繁, 金文沢: "カッパ 6 型-CP 1, 2 による気圧観測", 生産研究, 11, No. 8, 392-393, 1959.
- 9) G. Tominaga and S. Okada: "Pressure Measurement in the Upper Atmosphere by Rocket", Proceedings of 1959 International Symposium on Rockets and Astronautics, Report No. 39, 280-284, 1959.
- 10) T. Ichimiya, K. Takayama, Y. Koike and T. Muraoka: "Measurement of Positive Ion Density in the Ionosphere," Proceedings of 1959 International Symposium on Rockets and Astronautics, Report Nos. 49, 50 and 51, 338-353, 1959.