

K-9M-32 号機による磁場観測*

藪崎 努** 塚田 紀昭** 小川 徹**

1. ま え が き

地磁気静穏日日変化 S_q は、超高層大気が地球磁力線を切って運動することによることは古くからよく知られており、地上における地磁気日変化の観測から S_q 電流系のモデル的構造に関して多くの研究がなされてきた。しかし、地上観測に基づいた研究では常に、電流が水平に流れていること、電離層の厚さが地球半径に比べて十分薄く、大気の運動や電場が高さに無関係で一定であるという大きな仮定を強いられ、これが従来のダイナモ理論の最弱点とされてきた[1][2]。最近のロケット観測では、電離層中の風は高さによってその風速、風向も変化していることが明らかにされ、高さにより、電子密度、正イオン密度、中性粒子密度、衝突周波数、地磁気の大きさ、方向も変化することから、電離層内の電気伝導度 σ_1 , σ_2 が変化し、 σ_2/σ_1 も大きな高度依存性を持つことが示されている[3]。このようなことから、ロケットに磁力計を搭載し、直接電離層電流の測定が行なわれてきた。このようなロケット観測により得られる情報は、電離層電流系の高度、厚さ、電流密度の高度変化など、地上観測では得られないものであるが、ロケット観測は、今まで equatorial electrojet[4]~[9], auroral electrojet[10]~[13] や northern polar cap[14]等比較的電流の大きい領域で行なわれているが、電流の弱い中緯度での観測は観測器の精度、感度が向上した1964年以後であり[15]~[17]、精密な観測結果は少ない。筆者らは、超高層磁場から地球の球関数近似磁場を差引いた磁場の時間的空間的変化成分を検出することを目的として1965年以来7回のロケット観測を行ってきた[18]。1969年8月に打ち上げたK-9M-27号機では、高度300km付近での wavy な変化を観測することができたが[19]、まだ S_q 電流の検出はなされていなかった。この論文では1970年9月27日15時42分(JST)に鹿児島県内之浦から打ち上げたK-9M-32号機による観測結果を報告する。ロケット飛しょう時間は約10分、最高々度は約347kmであるが、鹿屋における地磁気観測データによれば、ロケット飛しょう時中、磁場の時間的変化は小さく(0.5 γ 以下)したがってロケット観測データにおける0.5 γ 以下の磁場はほとんど空間的磁場変化であると考えられる。このように磁場が静穏であったために、高度約100km付近、電離層E層における S_q 電流による磁場変化が精密に観測された。

2. 観 測 装 置

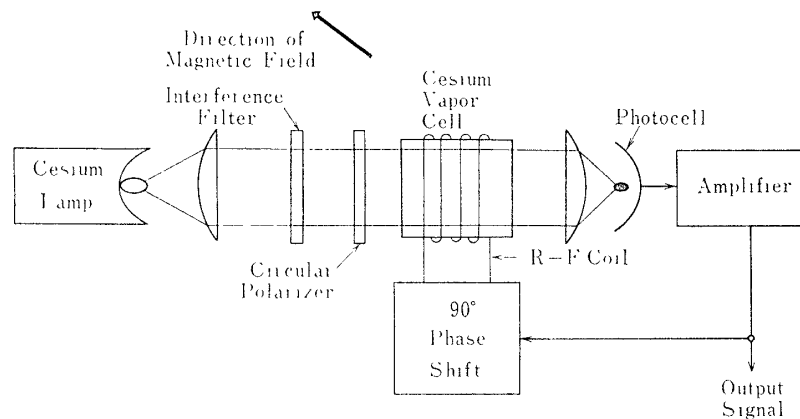
観測装置の主体となる磁力計はセシウム原子を用いた光ポンピング磁力計を用いた。光ポ

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学工学部

ンピング磁力計はアルカリ金属等の原子の共鳴を利用したもので、感度、精度のうえで他の磁力計に比べてすぐれており、さらに連続測定、絶対測定が可能であるという特長を有し、小型軽量で消費電力も少ない点などを考慮に入れると超高層磁場の高精度測定には現在のところ最も適しているものと考えられる。磁力計に使用するアルカリ金属の中でセシウム原子を選定した理由は、種々のアルカリ金属についてゼーマン、スペクトルの構造を検討した結果、セシウムが最も方向依存性、温度依存性が少ないことによる[20]。

光ポンピング磁力計の原理図を第1図に示す。ランプからの光、 D_1 line および D_2 line は円偏光に変えられ Cs 原子 ($\sim 10^{-6}$ torr) を封入した吸収セルに入れらる。ここで光はセシウムの基底状態のゼーマン周波数で振幅変調される。変調された光は光検出器で復調され広帯域増幅器を通してセシウム吸収セルに巻かれた高周波コイルに帰還され、全体としてゼーマン周波数での発振器となる。ゆえに発振周波数を知れば磁場の絶対値を知ることがきまる。セシウムの場合発振周波数は 350kHz/gauss で与えられる。

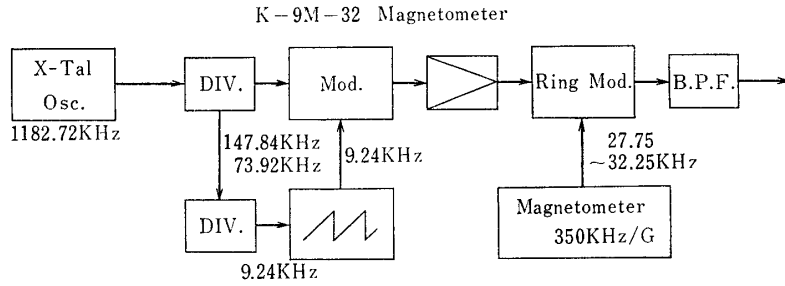


第1図 Self-Oscillating Optically Pumped Cs Magnetometer

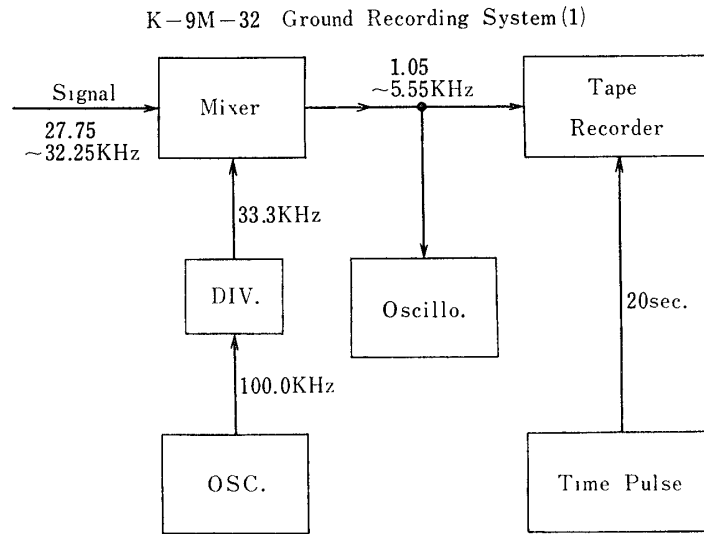
ロケット飛しょう時中この磁力計の周波数は 25kHz 程の変化をする。このような大きな変化の中で 0.1Hz 程度の情報を損うことなく地上に送るために、予想される周波数を数個に分割し適当な周波数合成を行なったあと、テレメータに入れる。すなわち水晶発振器の周波数を適当に周波数変換させ、第2図に示すように、搬送波 73.92kHz を中心に間隔 9.24kHz の多くの side band を作る。これと磁力計の出力とを mix し、その beat 周波数がテレメータの band である $27.75\sim 32.25\text{kHz}$ の band pass filter を通してテレメータに送る。この際サブキャリアは用いない。

一方地上においてはテレメータ出力周波数を直接復調して記録紙に書かせるほかに、記録系は二つの System を用いた。その一つは第3図に示すようにテレメータの出力周波数を beat down させ $1.05\sim 5.55\text{kHz}$ の変化としてテープレコーダに記録させる。

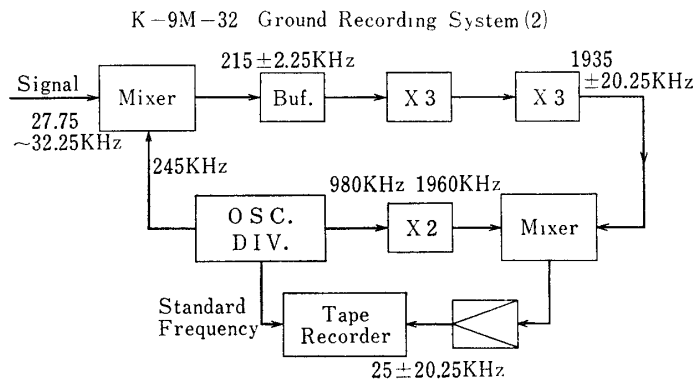
また、もう一つの system では第4図に示すように、テレメータの出力周波数を広帯域周波数逡倍器を用いて9倍に逡倍させ、 $25\pm 20.5\text{kHz}$ に入るようにし高速のテープレコーダに記録させるこのようにして、磁力計出力の位相変化に含まれる情報を周波数に変換し実質的に感度を向上させた。この二つのテープレコーダには、回転むらによる誤差を相殺するた



第2図 ロケット搭載装置



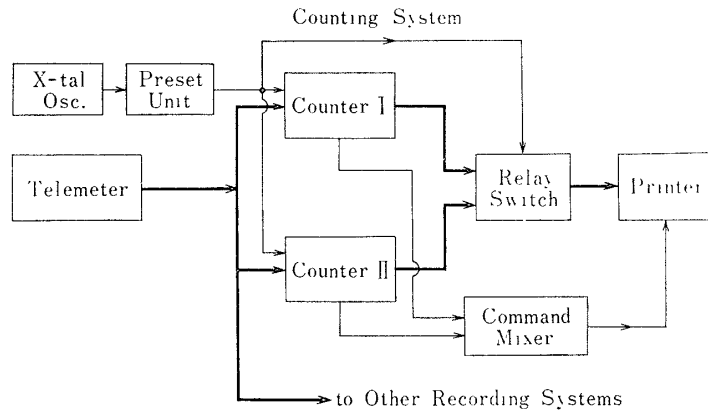
第3図 地上記録システム(1)



第4図 地上記録システム(2)

めに標準周波数を別のチャンネルに記録させている。

ロケット本体や搭載された他の測定器の残留磁場の影響はかなり大きい。そこで突出し機構を設けたがまだかなりの影響はやむを得ない。そこで今回は、第5図に示すように real timeでロケットの1スピンドで平均することを行なった。すなわちプリセットカウンターを用いてロケット1スピンドごとに一つのパルスを作る。



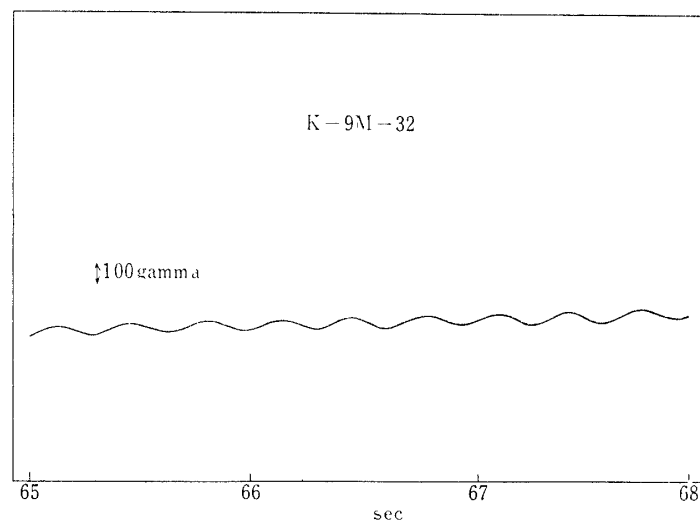
第5図 データ処理装置信号周波数をロケット，スピン周期で平均する。

プリセットする周波数はロケットの nose cone 開頭直後のスピン周期から求める。このパルスで二つのカウンタを交互に働かせ、一方のカウンタがカウントしている間、他方のカウンタは print out する。このようにすることにより print 時間にも測定を休むことはなくなる。

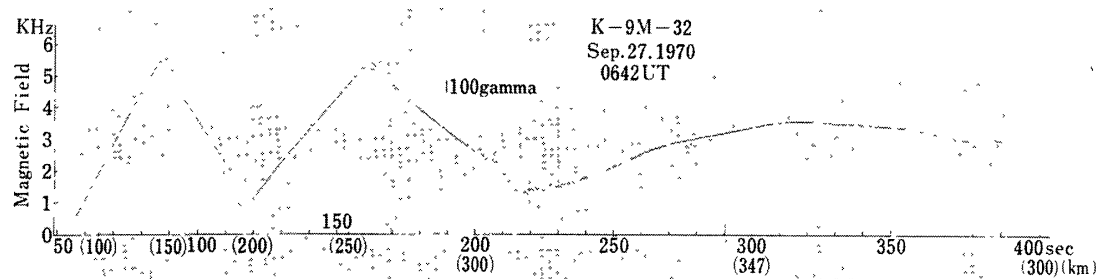
3. 観測結果

K-9M-32 号機による観測では、ロケット上昇時のデータはほぼ完全に得ることができたが、下降時には装置の不調のため、S/N が下りよいデータを得ることができなかった。第6図はテレメータ出力復調後のペンレコーダの記録の1部である。ロケットの残留磁場の影響はセンサ突出し以前は約 $\pm 50\gamma$ 程度であり、約30cm 突出したあとには1/3程度減少したが、まだ大きいことが明らかになった。

そこでテレメータの出力を第5図に示す装置に入れ、ロケットのスピンで平均を取った。第7図はロケット・nose cone 開頭直後から頂点近くまでの結果である。nose cone の開頭は発射後52秒で、磁力計の打出し機構の働いたのは57秒であり、約300秒で最高高度約



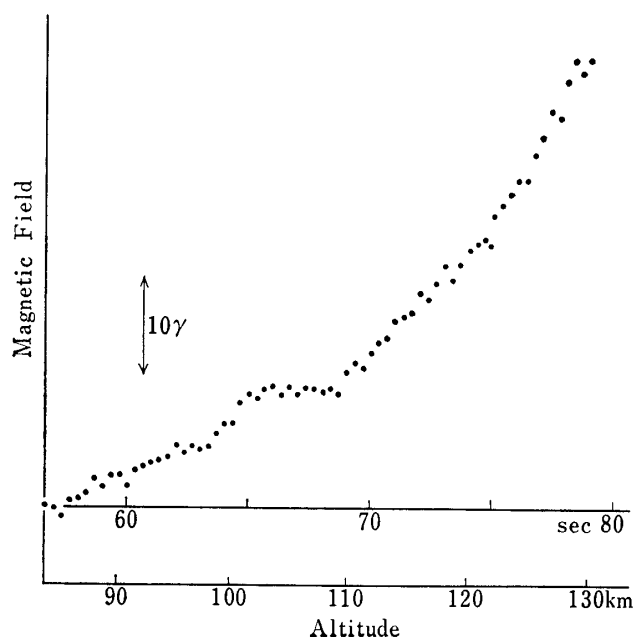
第6図 テレメータの復調信号



第7図 磁場観測結果

347km に達している. なお図中の折り返し点付近での点のばらつきは, この付近では二つの周波数が混入することによるが, 波形を電磁オシロで解析すれば完全なデータが得られる. なおロケット下降時には信号の S/N が次第に悪くなり, よいデータは得られなかった.

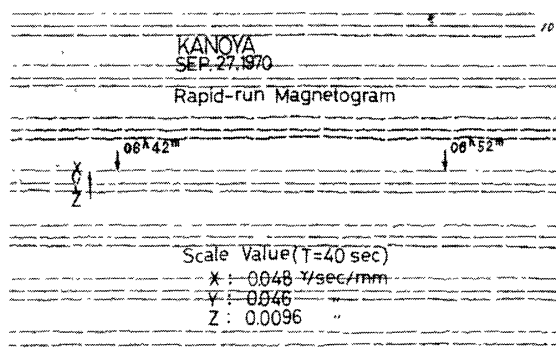
次にこの結果を基にして, 特に高度 100km 付近での磁場変化を求めた. すなわち, 第7図において 90km 付近で接線を引き, その接線からと実測データの差を求めた. その結果が結果が第8図である. 次第に差が増加しているのは直線で近似したからである.



第8図 高度 100km 付近の磁場変化 (rapid run magnetogram)

この結果から明らかに高度 101km から 109km にわたって磁場変化約 8.8γ が存在する. 地上観測ではあとに示すが, このような磁場変化は観測されておらず, したがって磁場の空間的变化であり, 磁場変化の高度から考えて S_q 電流による磁場であろうと考えられる. さらに 97~98km 付近で 1γ 程度の磁場変化があり, この付近にも他の電流系が存在するのではないかと考えられる.

なお, 図中, 約 0.5γ 程度のデータのふらつきが存在するが, 地上ではこの周期大きさの磁場変動は観測されていない. しかしデータの読み取り誤差は 0.2γ 程度であるので,

第9図 S_q 鹿屋における地磁気変化

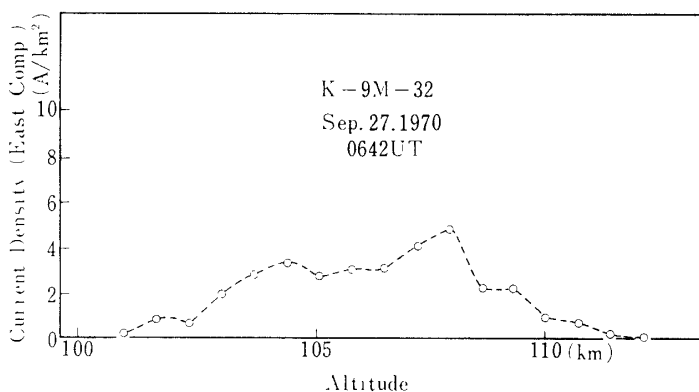
この原因は実際磁場がふらついているのであること 搭載された磁力計自体の測定誤差の二つが考えられるがそれぞれの原因かは明らかでない。なお地上における磁力計の不安定性はこのような短時間では 0.1γ 以下である。

第9図はロケット飛しょう時付近の鹿屋での rapid run magnetogram による地磁気変化を示す。この地上視測からロケット飛しょう時中磁場は静穏で、特にロケットが 100km 付近を通過する短時間では、磁場変動は 0.1γ 以下と考えられる。

4. 考 察

中緯度の電離層中を流れる電流はほぼ水平で垂直成分は無視できるものと考えられている[22]。この水平に流れる電流の方向が一定で、その電流密度も水平方向では変わらないとし、電流系が電離層の高さに比べて十分大きいと仮定すれば、それにより生じる磁場は常に水平方向で、強度は電流系より下あるいは上方では一定となる。このような仮定の基に、第6図で得られた磁場から電流密度の高度変化を求めてみた。

光ポンピング磁力計で得られる情報は磁場の total force である。したがって地球双極子磁場に比べて十分弱い電離層電流による磁場のうちわれわれが測定しているのはその地球双極子磁場方向成分 ΔH である。しかし上述の仮定から、電離層電流は水平方向にあるので、100km 付近の伏角を I とすれば、磁場の北成分は $\Delta H/\cos I$ で与えられる。なお 100km 付近での I は約 43° であった。第8図に適当な base line を引き、電離層電流による磁場変化成分 ΔH のみを求めれば各高度における磁場変化の北成分が求まり、したがって各高度における電流密度の東向き成分 J_E が算出される。このようにして求めたのが第10図である。この図から明らかに、高度約 100km から次第に増加し 105km から 108km まで比較的平坦な変化をし、それ以上の高度では再び減少している。この事実はずきのよに考えられ

第10図 S_q 電流密度の東向き成分の高度変化

る. x 軸を南向き, y 軸を東向きに座標系をとると, われわれの観測された東向き電流成分 i_y は次のように書ける[23]. すなわち

$$i_y = -\sigma_{xy}E_x + \sigma_{yy}E_y$$

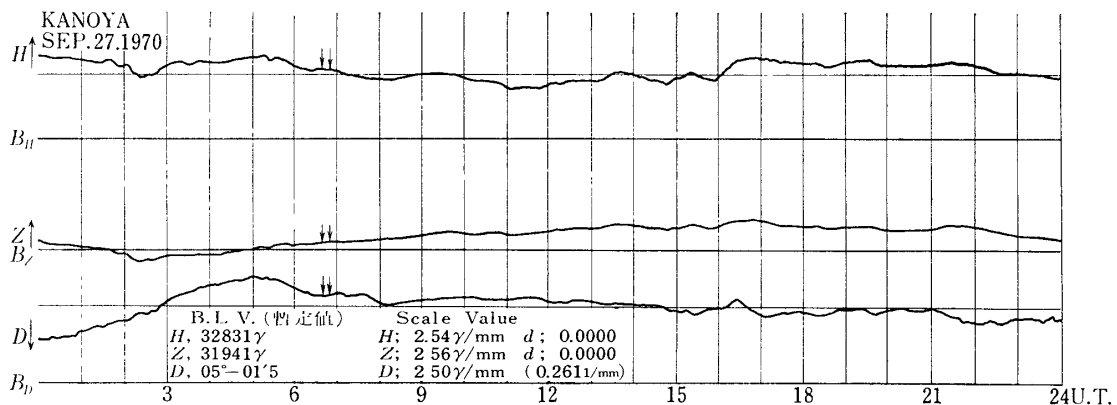
$$\text{ただし } \sigma_{xy} = \frac{\sigma_0\sigma_2\sin^2 I}{\sigma_0\sin^2 I + \sigma_1\cos^2 I}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_0\sigma_1\sin^2 I + (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)\cos^2 I}{\sigma_0\sin^2 I + \sigma_1\cos^2 I}$$

ところが 100km 付近では $\sigma_{xy} \gg \sigma_{yy}$ であるので, 東向き電流は σ_{xy} と E_x とで定まり, σ_{xy} は中緯度の代表的な大気モデルについて計算されている[22].

もし電場が北向きで 100km~110km で一定で, また電子密度もこの高さであまり大きな変化がなければ, σ_{xy} は 100km~110km でほとんど変化しないことになり定性的に実験結果が説明される. しかし K-9M-32 号機では電子密度が測定されていないのでロケット飛しょう時のこの領域の電子密度分布は明確でない.

なお第 10 図から求めた平均の東向き電流密度 J_E は約 $2.5\text{A}/\text{km}^2$ である.



第 11 図 鹿屋における地磁気変化 (normal run magnetogram)-H 成分に描いた base line はロケット観測による

このように電離層電流による磁場の北方向成分が直接求めることができたので, 地上での地磁気日変化の水平成分 (H 成分) に base line を引くことができる. 第 11 図は鹿屋における地磁気変化である. しかしロケット観測では D 成分に base line を引くことができないので, 日変化として最も適当と思われる base line を描いてみた. その結果, ロケット飛しょう時には, 磁場の東西成分は西向きで 12.3γ となる. このように磁場の南北成分はロケット観測から, また東西成分は地上観測から求め, 電離層電流の方向を求めると, 北から 25° 東向きとなった. なおこの電流方向は地上観測から計算されたものとはほぼ一致し[21], 電流の大きさも大体妥当なものと思われる.

5. 結 言

以上述べたように K-9M-32 号機により電離層 S_q 電流の直接観測を行なうことができた.

中緯度における S_q 電流のロケット観測は少なく、さらに観測時 LT 16 時頃は電流が弱いので直接測定は、筆者の知るかぎりない。

ロケット観測では地上観測で求められない電流系の高さ、厚みさらに電流密度の高度分布などを知ることができる。しかし、ロケット観測によるデータの数は限られ、そのデータのみにより電流系全体を知ることが不可能である。したがってロケット観測では地上における多くの観測データに base line を与え、それにより、地上観測で得られる電流系全体の模様をより完全なものに近づけるのが、最大の意義となろう。

しかし、光ポンピング磁力計のようなカラー測定器で得られるのは、磁場変化分の地球双曲子方向成分で、それに垂直な方向成分に関してはまったく情報が得られない。また、最近のロケット観測では、電離中の風も高さとともに方向が変わることが示されている。そこで、微小磁場をベクトル的に測定する必要があるので、今後は、さきに筆者らが提案した方法[24]で、微小磁場の方向も測定してゆくつもりである。

謝 辞

最後に、鹿屋における地磁気データに便宜を与えてくださいました地磁気観測所、柳原一夫所長、河村 謙氏に深く謝意を表わします。ロケットのスピンレイトの観測で大変お世話になりました。宇宙研、林 友直氏に感謝いたします。またいろいろ有益な議論と助言をいただきました本学前田憲一教授に深く感謝致します。

また地上装置の作成に当り協力してくださった、本学・筒井 稔氏と観測データの整理、計算に協力していただきました本学・学生古川賢三君に感謝します。

1971 年 1 月 14 日

参 考 文 献

- [1] K. Maeda and S. Kato: Space Sci. Rev. **5**, 57 (1966).
- [2] H. Maeda: J. G. G. **18**, 173 (1966).
- [3] K. Maeda and H. Matsumoto: Rep. Ionos. Space Res. Japan **16**, 1 (1962).
- [4] S. F. Singer, E. Maple and W. A. Bowen: JGR **56**, 265 (1951).
- [5] L. J. Cahill, J. G. R. **64**, 489 (1959).
- [6] T. S. G. Sastry: J. G. R.: **73**, 789 (1968).
- [7] J. P. Heppner, J. D. Stolarik and L. H. Meredith: J. G. R. **63**, 277 (1958).
- [8] R. Hutchinson and B. Shuman: J. G. R. **66**, 2687 (1961).
- [9] B. M. Shuman, J. G. R.: **75**, 3889 (1970).
- [10] L. H. Meredith, L. R. Davis, J. P. Heppner and O. E. Berg: Ann. IGY, **12**, 631 (1961).
- [11] A. J. Zmuda: J. H. Martin and F. T. Hewring: J. G. R. **71**, 5033 (1966).
- [12] P. A. Cloutier, H. R. Anderson, R. J. Park, R. R. Vandrak, R. J. Spizer and B. R. Sandel: **75**, 2595 (1970).
- [13] E. P. Wentworth: J. G. R., **75**, 5415 (1970).
- [14] L. J. Cahill: J. G. R. **64**, 1377 (1959).
- [15] K. Burrows and S. H. Hall: Nature, 204, 721 (1964).

- [16] T. N. Davis, J. D. Stolarik and J. P. Heppner: J. G. R. **70**, 5883 (1963).
- [17] 加藤, 青山, 遠山 東京大学宇宙航空研究所報告, 第6巻第1号(B)142 (1970).
- [18] 小川 東京大学宇宙航空研究所報告 第2巻第3号 1135 (1966).
- [19] 藪崎, 塚田, 小川・宇宙観測シンポジウム p.227 (1969年11月)
- [20] 藪崎, 中段, 小川: 電気通信学会, 量子エレクトロニクス研究会資料 (1966)
- [21] S. Matsushita: Physics of Geomagnetic Phenomena (Ed. Matsushita, Campbell, Academic Press, N. Y. 1967) p.301.
- [22] 上山 東京大学宇宙航空研究所報告 第2巻第3号(B)1173 (1966).
- [23] M. Hirano: J. G. G. **4**, 7 (1952).
- [24] 藪崎, 塚田, 小川 東京大学宇宙航空研究所報告 第6巻第1号(B)149 (1970).