

K-9M-55号機による電離層電流系の観測*

小川 徹**・藪崎 努**

Measurement of Sq ionospheric currents by means
of K-9M-55 Rocket

By
Toru OGAWA and Tsutomu YABUZAKI

Abstract: The Sq ionospheric currents over Kagoshima at near noon was measured by means of an optically pumped Cs magnetometer.

The results obtained in the present measurement can be summarized as follows.

(1) The currents flowed westward. (The north-south component were not measured.)

(2) The east component of the current density was 29.7 A/Km.

From the result (1), we see that the measurement was performed in the north side of the center of the global Sq current vortex. This fact can also be seen in the daily variation of the height of the E-layer measured at the launching site, and in the daily variation of the geomagnetic field at Kanoya.

Finally it must be noted that the current density obtained in the present measurement is in good agreement with that estimated from the global Sq current system, which is based on the ground magnetic data.

1. ま え が き

従来、電離層電流系の研究は、地上における地磁気日変化の観測を基にしたいわばモデル的構造に関するものが多く行われてきた。しかし、この様な地上観測を基にした研究では常に、電流が水平に流れている事、大気の運動や電場が高さに無関係で一定であること等、多くの仮定を強いられ、また電流系の高度分布については全く情報が得られない。また地磁気日変化から仮想した電離層平面電流を求める際に、base line をどこにという点も大きな問題点であったと思われる。この様なことから、ロケットによる磁場測定から電流系を直接測定することが世界各地でなされてきた。しかし多くのロケット観測は電流の比較的強い赤道

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 京都大学工学部

及び極地方で行なわれ、equatorial electrojet auroral electrojet や field aligned current 等に関して多くの結果が得られているが、電流の弱い中緯度での観測は極めて少い。

我々は既に、K-9M-32号機による観測(1970年9月27日15時42分JST)で、電流系による磁場変化を0.1ガンマの精度で測定することができ、中緯度に於ける夕方の電流系の高度分布を高精度で得る事ができた[1]。この結果と赤道近傍及び高緯度での観測結果とを結び合せると次の様な興味深い事実がわかった。

- 1) 電流層の高さ、厚さが磁気緯度とともにかなり系統的に変化していること[2]。
- 2) 従来、赤道近傍でのみ観測された120~130 kmでの第2の電流層が中緯度でも、かなり弱いが存在しているらしいこと。
- 3) 中緯度における電流層の厚さが、標準大気モデルを用いて計算した電気伝導度から予想されるものよりかなり薄いこと。

以上の議論をするのにも中緯度のデータがあまりにも少なすぎ、従って local time により如何に変化するかといった情報は全く無い。

ここで報告するのは1976年9月16日11時00分JSTに打ち上げたK-9M-55号機による観測結果である。本ロケット観測はダイナモ領域における総合実験として行なわれたものであって、我々は特に、中緯度に於ける電流系の中心近傍での高度分布等を詳しく調べるのを目的としている。

2. 観測装置

磁場観測装置の主体となるのはセシウムを用いた光ポンピング磁力計である。この磁力計は原理的には、原子のゼーマン効果を利用したもので、光ポンピングのテクニックを用いる事により、ゼーマン周波数で発振する発振器となっている。このゼーマン周波数は原子定数を介して磁場の強度に比例することから、絶対測定、連続測定が可能なスカラー磁力計である。セシウムを用いた理由は、他のアルカリ原子に比べて最も低い方向依存性、温度依存性を持つからである[3]。

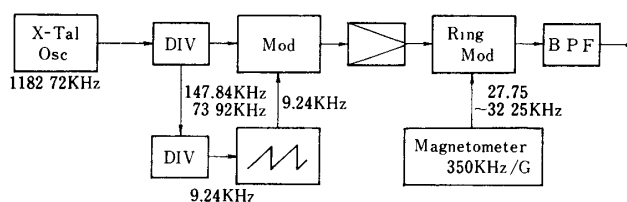
セシウム光ポンピング磁力計の発振周波数は 3.5 Hz/nT ($\text{nT} = \text{gamma}$)である。従ってロケットの飛しょう中に発振周波数は 25 kHz 程度変化する。この大きな周波数変化の中で 0.03 Hz 程度の情報を損うことなく地上に送る為に、第1図の様な装置を用いた。即ち予想される周波数を丁度テレメータのバンドに入る様に分割させた。この際サブキャリアは用いない。磁場変化に伴って周波数がテレメータのバンドの端に来ると折れ返り、再びバンド内に入る様にした。

全システムの感度は

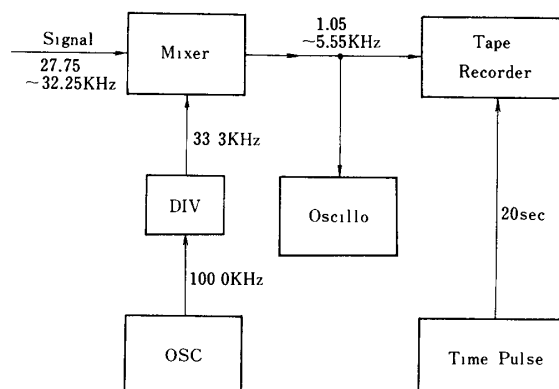
$$\delta F = \frac{1}{n} \frac{2\pi}{r_{cs}} \frac{1}{T_s} \quad (\text{nT}) \quad (1)$$

ただし n は倍周器の、通倍数、 r_{cs} は C_s 原子の磁気回転比($\frac{r_{cs}}{2\pi} = 3.5 \text{ Hz/nT}$)、 T_s はロケットのスピン周期である。

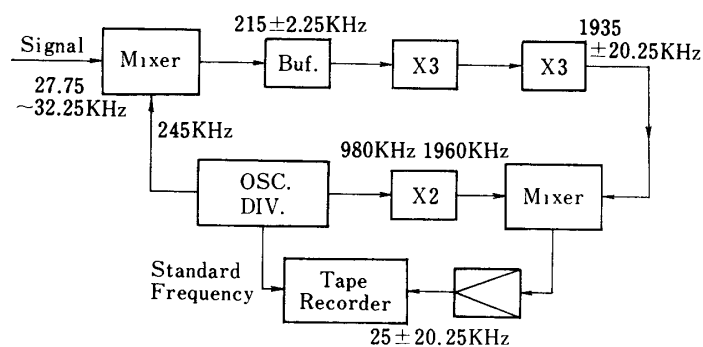
$n = 9$ 、 $T_s = 0.46 \text{ sec}$ 、とすれば感度は約 0.1 nT である。



第1図 ロケット搭載装置ブロック図



第2図(a) 低速度記録装置



第2図(b) 高速度記録装置

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他に、第2図に示す様な2つの記録系を用いた。その1つが(a)で、テレメータの出力周波数を beat down させテープレコーダに記録させる。もう一つの system では(b)に示す様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倍に逡倍し、データレコーダに記録させる。この様にして、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。また2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為に、標準周波数を別のチャンネルに記録させる。

3. 観測結果

K-9M-55号機では、ロケットの全飛しょう時中磁力計はほぼ正常に作動した。しかし、この観測では、磁力計のセンサ部をロケット開頭後突き出しを行わなかった事、また構造上、他の観測器の部分がセンサの近くに設置された事等の為に、従来の観測になく大きな残留磁場の影響を受けてしまった。第3図にロケット開頭直後のテレメータ復調信号を示す。比較の為にK-9M-32号機の場合も同時に示した。残留磁場の大きさはロケット軸方向では705 nT、直角方向では247 nT であり、これを従来の観測の場合と比較したのが第1表である。この表からも明らかに残留磁場が従来のものに比べ5~10倍程度大きい。

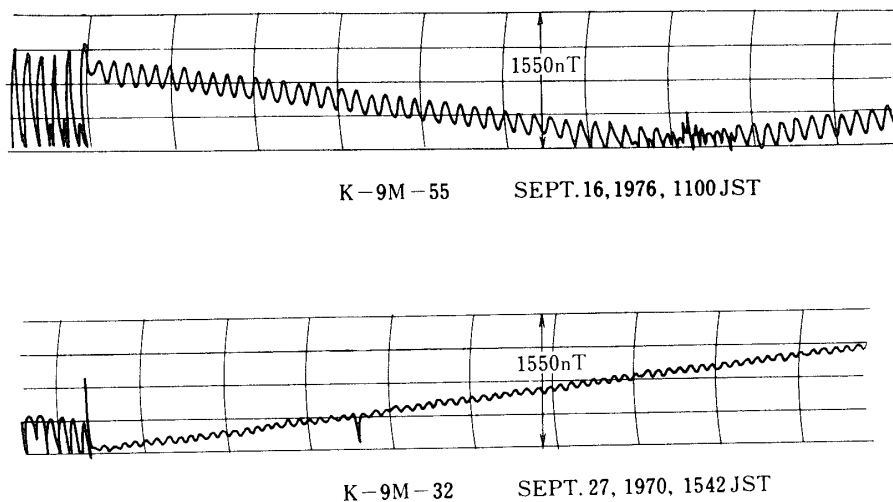
高度100 km 付近でのテレメータ周波数はほぼテレメータバンドの中央に来る様に設計した。しかしロケットスピン軸方向の大きな残留磁場により、その周波数がバンドの端になってしまい電離層電流系付近における解析をかなり困難にさせている。バンドの端では2周波が同時に存在するからである。

第3図にも見られる様に、大きな残留磁場の影響でテレメータ復調信号はロケット・スピン周波数で大きな変調を受けている。そこで、この影響を取り除く為に、プリセット・カウンタを用いてスピン1周期ごとの平均を取る事にした。

光ポンピング磁力計は全磁力(F)を観測できる。しかし正しい全磁力を知るためには残留磁場を差し引く必要がある。まずスピン周期についての周波数を求めればスピン軸に垂直な残留磁場成分(H_{\perp})は平均されて零となる。

次にスピン軸に平行な残留磁場成分 H_{\parallel} はロケットの Apogee 付近における磁場値の precession 効果と GA による precession の角度振幅および周期(第4図)とから求めることが出来る。Apogee 付近の磁場は第5図のようになった。この図から

$$H_{\parallel} = 705 \text{ nT} \quad (2)$$



第3図 開頭直後のテレメータ復調記号

第1表 ロケットの姿勢と残留磁場

ROCKET	SPIN	PRECESSION		RESIDUAL	FIELD
	PERIOD (SEC)	PERIOD (SEC)	ANGLE (DEGREE)	PERP (nT)	PARA
K-9 M-10	0.55	73	5	26	40
K-9 M-32	0.31	40	5	42	50
K-9 M-42	0.48-0.52	3.5	9-27	210	720
K-9 M-55	0.46	60	5	247	705

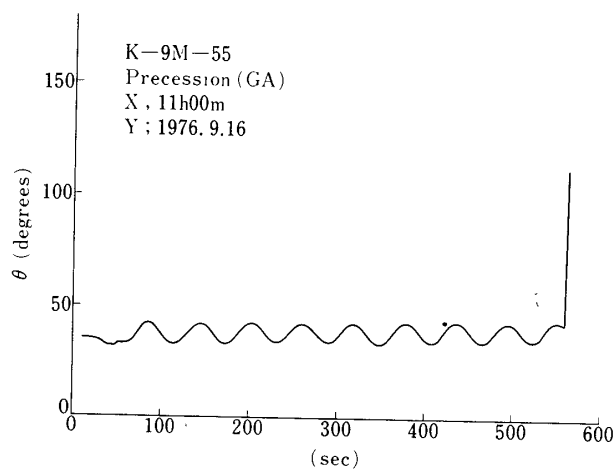
観測磁場と reference field の比較をするにはまず残留磁場のスピン軸方向成分 H_{\parallel} の影響を差引かねばならぬ。 H_{\parallel} の全磁力 F への影響は厳密には楕円関数となるが良い近似で余弦関数で充分である。

$$F_{\text{OBS}} = F_0 - \frac{H_{\parallel}}{2} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \cos \left(2\pi \frac{t - t_0}{T_P} \right)$$

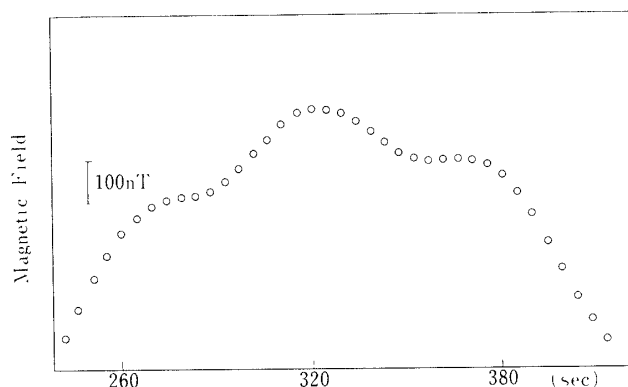
ただし F_0 は光ポンピング磁力計の磁場, θ_1, θ_2 はそれぞれスピン軸と地球磁場とのなす角 θ の最小値および最大値, T_P は precession 周期, t_0 は $\theta = \theta_1$ となる時刻の中で開頭時刻に最も近い時刻を選ぶ。

一方 F_{REF} は (1975 + 1.71) 年における IGRF を計算した。 $F_{\text{OBS}} - F_{\text{REF}}$ を第6図に示す。

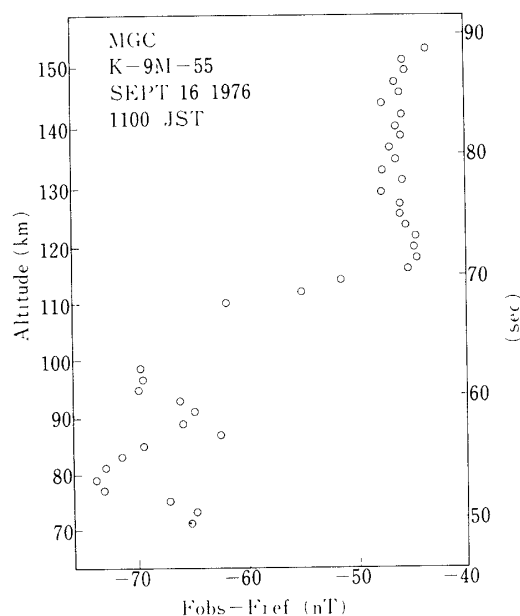
高度 70 km より 90 km 付近まではアンテナの伸展などでスピン周期が一定でなく (第7図) 観測値も変動が見られる。98 km 付近より 110 km 付近までは前に述べたように残留磁場が大きいためテレメータ周波数の切りかえ点になって観測できない。110 km 以上は正常な観測が出来ているが、125 km 以上ではやや変動が大きい。



第4図



第5図



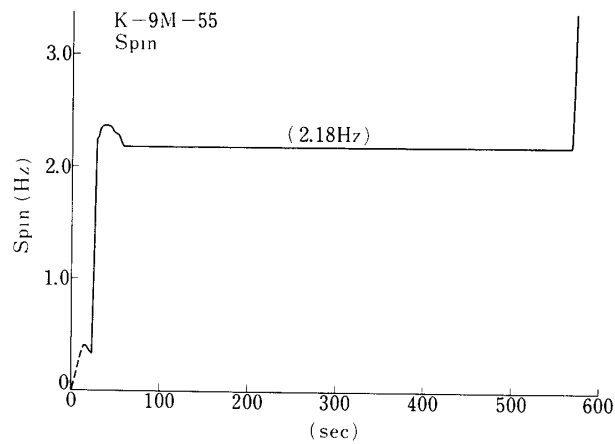
第6図

観測結果より電流系の上下での磁場の差は $\Delta F = 25.2 \text{ nT}$ である。また以前観測された高度115 km 付近の第2電流層の存在は確認できなかった。

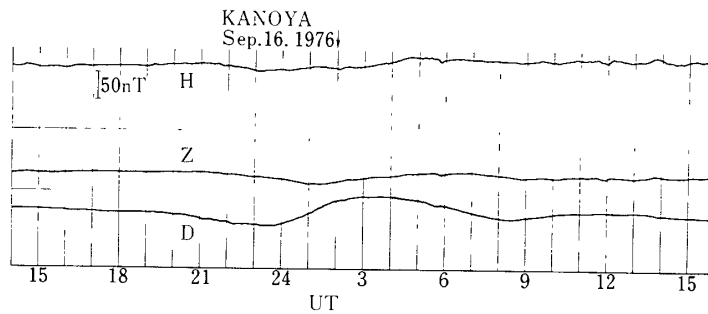
電流系の高度分布は電流系の中心部のデータが欠如してしまったため不明である。しかし電流系の上部と下部のデータから磁場の差は観測出来、電流の方向を真西とすれば全電流は 29.7 A/km となる。また電流系の中心の位置は観測点より緯度で 5° 程度南方と推定される。

また電流系の上部付近のデータから推定すると最大電流密度は 5.5 A/km^2 程度となる。

次に観測値を鹿屋の地上観測を比較して見ると次のようになる。当日は $K_p 2 - 2^+$ (3時間値)で第8図に見られるように数 nT の不規則変動があった。電離層電流による地上観測



第7図 スピン周波数



第8図 地磁気日変化(鹿屋)

の水平成分の変化 ΔH_E とロケット観測の ΔF_R とは

$$\Delta H_E = \frac{1}{\alpha} \Delta F_R \sec I \quad (4)$$

である。ただし α は大地の induction の効果で0.6程度である。 I は伏角である。

$\Delta F_R = 25.2 \text{ nT}$ であるから $\Delta H_E = 30.7 \text{ nT}$ となる。またその方向は南向きである。この値は図のようなH成分の日変化の様相からほぼ妥当と思われる。

4. 結論及び考察

以上得られた結果を用い、また電離層電流が水平に流れていると仮定し、電流密度等を求めてみた。既に述べた様に、光ポンピング磁力計はスカラー磁力計であるので、測定される微小磁場変化は、大きな永久磁場の南北方向成分である。従って求められる電流は東西成分という事になる。

以上得られた結果をまとめてみると、

- (1) 電流の東西成分は西向きであった。
- (2) 電流密度の東西成分は 29.7 A/km であった。

(3) 電流系の高度分布は中心部のデータが得られていないので不明である。

電流の方向が西向きであった事から、 S_q 電流系全体での我々の観測位置は、丁度電流系の中心の北側であった事が考えられる。この事は地上(内之浦)における電離層観測結果とも一致し [4]、また鹿屋における地磁気日変化も同様な事を示している。

この観測で得られた電流密度を地上観測によるもの(平均値)との比較を行ってみた。Matsushita [5] により計算された S_q 電流系の map から、電流系の中心の北側では、電流の方向は当然西向きであり、その密度を求めてみると約 40 A/km となっている。ロケット観測による瞬時的なものと、多くの地上観測によりモデル的に得たものを比較し議論する事は一概にはできないが、ほぼ一致が見られた。

電流計の高度分布については高度 100 km 付近のデータが欠けているので不明な点が多い。また第2の電流層が存在は確認出来なかった。

以上述べた様に K-9M-55 号機により電離層電流系の中心近傍での直接観測ができた。高度 100 km 付近のデータは、大きな残留磁場の影響で解析が困難であったが一応の結果を得られた。

光ポンピング磁力計の様なスカラー磁力計では、磁場変化分の地球永久磁場に垂直な成分に関しては全く情報が得られない。最近のロケット観測から電離層中の風も高度とともに方向・大きさもかなり変化する事が示され、また S_q 電流系の中心付近では field aligned current の存在も予想されているので、今後は筆者らが提案したベクトル磁力計 [6] で電流の方向をも観測する予定である。

謝 辞

本観測は電離層ダイナモ領域総合観測の一環として行われたもので実験主任大林辰蔵教授を初め平尾邦雄教授、小山孝一郎博士、その他宇宙研の関係各位に感謝致します。

またデータの整理の一部に協力下さった京都大学工学部北野正雄氏に感謝致します。

1977年7月20日

参考文献

- [1] T. Yabuzaki and T. Ogawa, J. Geophys. Res. 79, 1999 (1974).
- [2] 藪崎, 小川, 宇宙観測シンポジウム 1974年6月
- [3] T. Yabuzaki and T. Ogawa, J. Appl. Phys. 45, 1342 (1974).
- [4] 五十嵐・相京, 電離層研究会 1976年12月
- [5] S. Matsushita, physics of Geomagnetic Phenomena, Vol. 1, ed. by S. Matsushita and W. H. Campbell, PP, 301-424, Academic, N. Y., 1967.
- [6] 小川, 宇宙観測シンポジウム (1967年2月).
藪崎, 塚田, 小川, 東大宇宙研報告, 6, 149 (1970).