

# 中緯度電離層電流の高度分布\*

小川 徹\*\*・北野 正雄\*\*・藪崎 努\*\*

(1982年11月4日受理)

## Height Distribution of Ionospheric Current at Middle Latitude

By

Toru OGAWA, Masao KITANO and Tsutomu YABUZAKI

**Abstract :** The ionospheric currents over Kagoshima are observed by means of optically pumped cesium magnetometers at the different local times and seasons.

The observational results are compared with theoretical values deduced from the ionospheric conductivity and neutral wind system. The results are summarized as follows.

- (1) Total electric currents observed are nearly equal to the values deduced from the ground geomagnetic observations.
- (2) Peak currents observed are about twofold than the theory.
- (3) The thickness of the current sheet is about one-half of the theoretical value.

The reasons of these discrepancies are discussed and further observational and theoretical studies are suggested.

### 1. はじめに

ロケットによる電離層電流系の観測は地上の磁場観測では得られない電流の高度分布が明らかになる点で、また人工雲による風観測が数 KM の微細構造の観測であるに対し数 10 KM の中規模の平均流を観測出来る特長を持っている。一方中緯度の磁場観測は赤道や極地域の観測よりも磁場変化が数分の一に過ぎないため、正確な高度分布を観測出来なかった。しかし光ポンピング磁力計の進歩[1]とロケット-地上間のデータ処理の精密化による精度向上を図った結果[2]電離層電流が最大となる 11:00 LT 附近のみならず、16:

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 京都大学超高層電波研究センター

00 LT 附近のような弱い電流まで測定可能となって来た[3]。本論文は3回にわたる観測結果をまとめるとともに、最近のISレーダなどによる風系観測の結果[4][5]との比較を試み、将来の観測課題と計画をものべるものである。

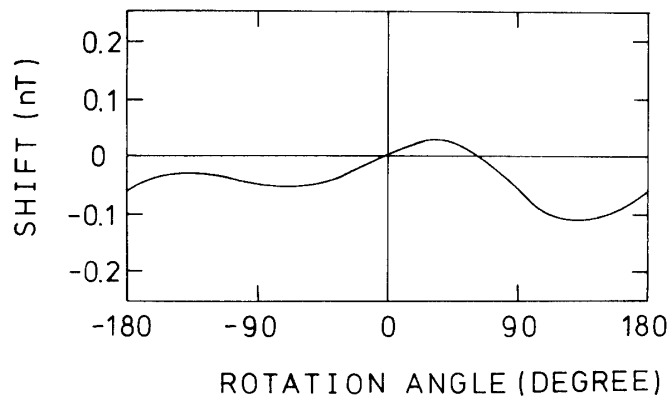
## 2. 観測装置

ロケット搭載磁場観測装置は光ポンピングセシウム磁力計を用いた。その理由は次の通りである。

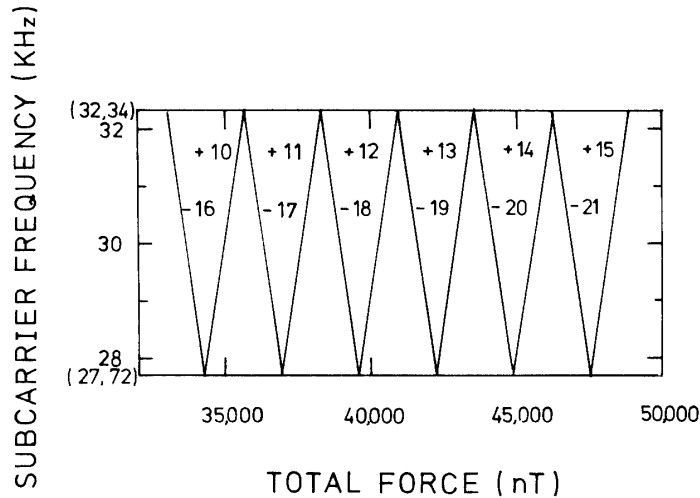
- (1) 本方式は一種の磁場・周波数変換器と考えられ、しかもその変換定数は原子定数であるため安定度が極めて高い。
- (2) 中緯度における電流による弱い磁場変化を充分検出出来る感度をもっている。
- (3) 本方式の磁力計は基本的にはスカラー磁力計であり、ロケットのような早いスピン運動に対応出来る周波数レスポンスを持っている[6]。
- (4) ロケットの残留磁場のスピン軸に垂直な成分および誘導磁場の影響はスピン周期にわたり平均することにより容易に取り除くことが出来る。また残留磁場の平行成分はニューテーションの効果により求めることが出来る。
- (5) 周波数測定は現在の諸技術の中で最も精度の高いものであるから、ロケット・地上の全測定システムを通じて磁力計センサーのもつ感度を十分に伝達し得る。

観測された磁力計は特にスピンによる回転誤差を小さくするよう光ポンピングの光軸や高周波磁場方向を精密に設計してあり、図1のように誤差をほぼ0.1 nTにしてある。このような高精度のデータをそのまま地上へ伝送することは、テレメータのバンド幅では不可能である。そのため図2のように磁力計の出力周波数を多くの帯域に分割しテレメータバンド幅内に納めてある。この方法は周波数の折り返し附近でデータが失われる欠点があるが、位相も含めて伝送情報量を低下させない特長がある。一方、地上におけるデータ処理は図3の方式で行なった。これは本質的にはテレメータ出力周波数の通倍を目的としているが、位相制御方式に比較して位相制御誤差による周波数ゆらぎがない点で勝れている。また直接通信方式に比較して信号対雑音比が向上している。

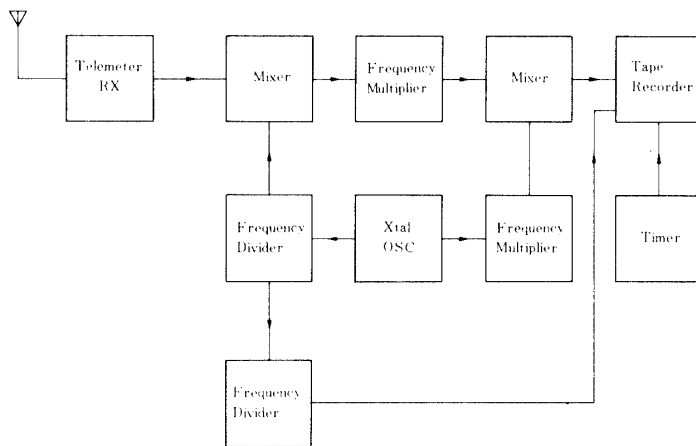
高速テープレコーダに取得されたデータは低速で再生され、スピン周波数により制御さ



第1図 ロケット搭載・光ポンピングセシウム磁力計の回転誤差



第2図 ロケット上の全磁力とテレメータ入力周波数 (15チャンネル)



第3図 地上データ処理装置

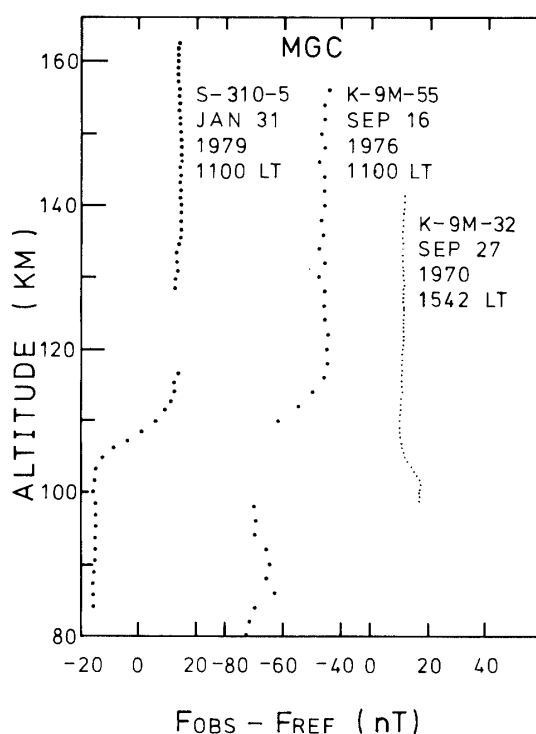
れたプリセットカウンタで計数された後に計算機で処理される。

### 3. 観測結果

ロケット観測は第1表のように K-9M-32, K-9M-55, S-310-5 各号機で行われた。表には打ち上げ時刻における地磁気  $K_p$ -index, 太陽フラックス  $S_a$  および山川における  $E_s$  層突抜け周波数が示してある。K-9M-32, K-9M-55 打ち上げ時には  $E_s$  層は観測されていない。観測は電流が最大となる 11:00 LT 附近(秋期および冬期)と電流が比較的微弱な 16:00 LT 附近(秋期)で行われた。観測データを処理し K-9M の2機は IGRF を, S-310-5 号機の場合は MGST 4/81 をそれぞれ引き去った結果を図4に示す。各データに一部欠落があるが、これは図2に関してのべたテレメータ帯域の端での折返しによるものである。K-9M-55 号機の場合  $F_{REF}$  との差が大きいが、IGRF の偏差によると推される。S-310-5 号

第1表 ロケット打上げ日時と諸指数

	K-9M-32	K-9M-55	S-310-5
	9/27/1970 1542LT	9/16/1976 1100LT	1/31/1979 1100LT
K <sub>p</sub>	3	2 <sup>-</sup>	4 <sup>-</sup>
S <sub>a</sub>	80	75.8	130
f <sub>o</sub> E <sub>s</sub>	x	x	5.4MHz



第4図 磁場観測結果

機の場合も IGRF75 との差は約 100 nT であった。

鹿屋における地磁気水平成分  $H$  の日変化と比較したのが第2表である。  $\Delta F_R$  はロケット観測による全磁力のダイナモ領域の上側と下側との差、  $\Delta H_R$  は  $\Delta F_R$  が地上の  $H$  に及ぼす効果で

$$\Delta H_R = \frac{\Delta F_R}{2\alpha \cos I} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、  $\alpha$  は誘導係数で 0.6、  $I$  は伏角で  $40^\circ$  とした。  $\Delta H_g$  は地上観測の  $H$  の日変化である。 K-9M-32号機ではロケット発射前後に小規模の地磁気擾乱があり  $\Delta H_g$  は誤差が多い。

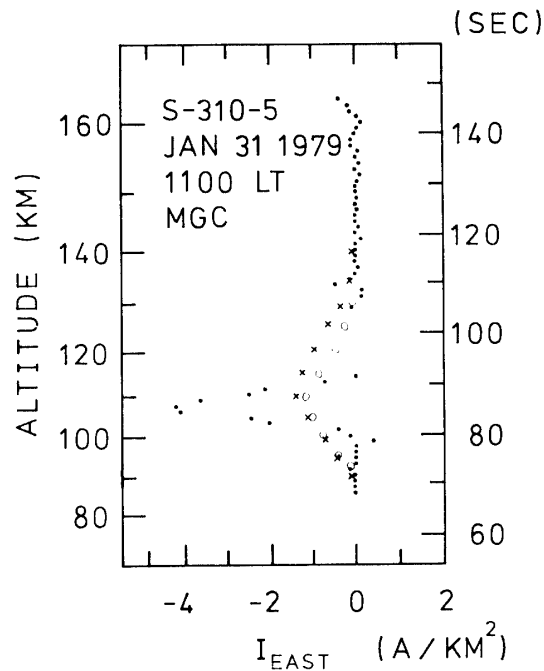
$\Delta H_R$  と  $\Delta H_g$  とを比較すると  $\Delta H_g$  が  $\Delta H_R$  より 40% 前後大きいことが分る。ロケット直下点と鹿屋との距離は約 50 Km に過ぎないから  $\Delta H$  の差は地域差では説明出来ない。一方ロケット直下点と山川とは約 100 Km の距離があるから、ロケットが観測したダイナモ領域に弱い  $E_s$  層が存在した可能性もある。

次に電流層の厚さについて考察する。図4で明らかなように電流層の厚さは電流の最大時においても 10 Km 程度であることが分かる。

図5はS-310-5号機で得られた磁場を高さ  $h$  で微分して東向き電流の高度分布を求めたものである。電流密度は西向きで、高度 109 Km でピーク値 4.2 Amp/Km<sup>2</sup> に達していることが分る。また電流層の半値全幅  $\Delta h$  は 8 Km、電流層全体の厚さは 14 Km である。K-9M-55号機では前にのべたテレメータの折り返しのため電流層下端のデータが欠けているが、図5より明らかなようにS-310-5号機の場合と高度分布は大差ないことが分る。またK-9M-32号機は1542 LTの観測であるから電流層はさらに薄い。

第2表 ロケット観測と地上観測との比較

	K-9M-32	K-9M-55	S-310-5
$\Delta F_R$	7.0	25.2	27.5
$\Delta H_R$	8.0	28.7	31.3
$\Delta H_g$	(8.0)	21.1	21.4



第5図 S-310-5号機によるダイナモ領域電流高変分布

以上の観測結果を電離層の電気伝導度および風系から求めた理論値と比較して見る。中緯度における電流の東向き成分は垂直電流を無視すれば  $E_x$ ,  $E_y$  は,

$$j_y = -\frac{\sigma_H}{\sin I}(E_x - U_y F \sin I) + \sigma_P(E_y + U_x F \sin I) \dots \dots \dots (2)$$

ただし,  $\sigma_H$ ,  $\sigma_P$  は Hall および Pederson 伝導度,  $E_x$ ,  $E_y$  はそれぞれ静電場の南向き, 東向き成分,  $F$  は全磁場,  $I$  は伏角,  $U_x$ ,  $U_y$  は中性粒子の速度成分である [7]. 中緯度において  $j_z=0$  の場合の  $j_y$  を Salah and Evans の風系モデル [8] を用い, 伝導度の  $\sigma_H$ ,  $\sigma_P$  は IS レーダなどによる推定値を用いて求めると図 5 の×印となる.  $\Delta h$  は 20 Km 程度となり, 観測値の約 2 倍となる. しかし電流のピーク値は約 1/2 であるから, 全電流はほぼ一致し, 地上の磁場観測では区別がつかない.  $\Delta h$  が異なる原因については,

- (1) 風系モデルが不適當である.
- (2) 垂直電流を無視した結果である.

などが考えられる. まず(1)につき検討する. 地理緯度 30° 附近で高度 100—125 Km に最も影響するのは 2, 4 モードであり Salah and Evans のモデルは IS レーダによる温度観測を根拠としているが, その精度は充分とはいえない. そこで最近の IS レーダ観測 [5] とも比較したが図の○印となり, 高度分布はやや改善されたが電流ピーク値はかなりの差が認められた. また Richmond らの風系モデル [9] についても同様の比較を試みたが観測値よりさらに不一致となった. 今後, 100-120 km の IS レーダによる高い高度分解能での風系の観測が必要である.

次に(2)について考察する. 最近 Takeda and Maeda により電離層電流の 3 次元構造の計算が行われている [10]. 彼らは Salah and Evans の風系モデルを用いているが, 垂直電流を無視していないのでその結果が期待される. 現在までには地理緯度と磁気緯度が一致している場合についての, 結果が公表されている. そこで緯度 30° までの外挿を試みたが, 観測との一致はあまり良くない. 地理緯度と磁気緯度が不一致の場合の中緯度の結果が待たれる. 一方, 電離層電流の高度分布をさらに明らかにするためには日没, 日出時や夜間における人工雲と磁力計によるロケット同時観測が必要と考えられる.

#### 4. 結 言

3 機のロケットによる中緯度電離層電流系の観測と風系モデルなどとの比較を行なった結果次のことが明らかとなった.

- (1) 電離層電流の全電流量は地上の地磁気観測と比較して 40 % 大きい程度である.
- (2) しかし電流のピーク値は電離層の電気伝導度や風系からの予想よりは約 2 倍である.
- (3) 一方電離層の厚さは予想の約 1/2 である.

これらの差異を説明するためには将来の課題として,

- (1) IS レーダなどによるダイナモ領域同系の精密観測
- (2) 人工雲による風系とロケット磁力計による磁場の同時観測

## (3) 3次元電流系理論の発展

などが考えられる。

終わりに数度にわたるロケット実験に際し御世話になった東京大学宇宙航空研究所（当時）の各実験主任をはじめ関係各位，データを提供して頂いた地磁気観測所，電波研究所の方々に感謝致します。

## 参 考 文 献

- [1] T.Yabuzaki and T.Ogawa, Journ. Appl. Phys. **45**, 1342 (1974).
- [2] 藪崎, 塚田, 小川: 東大宇宙航空研報告 **7**, 103 (1971).
- [3] T.Yabuzaki and T.Ogawa, Journ. Geophys. Res. **79**, 1999 (1974).
- [4] C.Mazaudier, *ibid*, **87**, 2459 (1982).
- [5] C.Mazaudier and M.Blanc, *ibid*, **87**, 2465 (1982).
- [6] 例えば小川, 北野, 藪崎: 宇宙科学研報告, 特集2号, 3 (1982).
- [7] 例えば R.M. Harper, Journ. Geophys. Res., **82**, 3233 (1977).
- [8] J.E. Salah and J.V. Evans, *ibid*, **82**, 2413 (1977).
- [9] A.D. Richmond, S.Matsushita and J.D. Tarpley, *ibid*, **81**, 547 (1976).
- [10] M.Takeda and H.Maeda, *ibid*, **85**, 6895 (1980), ; **86**, 5861 (1981).