

S - 310 - 5号機による電離層電流系の観測 (II)\*

小川 徹\*\*・北野 正雄\*\*・藪崎 努\*\*

(1981年12月26日受理)

Observation of the Ionospheric Currents by  
Means of S - 310 - 5 Rocket (II)

By

Toru OGAWA, Masao KITANO and Tsutomu YABUZAKI

**Abstract:** The ionospheric currents over Kagoshima at 11:00 LT were observed by means of an optically pumped cesium magnetometer.

The results obtained in the observation can be summarized as follows.

- (1) We performed the first vector observation in the middle latitude.
- (2) The ionospheric current is very weak except from 102 km to 115 km height at 11:00 LT.
- (3) There is some possibility of the existence of a weak subsidiary current layer at about 130 km and 150 km.
- (4) The horizontal current is especially weak in the height range of 82 - 100 km and 135 - 150 km, and current density is less than 0.1 Amp/km<sup>2</sup>.
- (5) These observational results shows that the thickness of the main current layer is about a half of the value estimated from the distributions of the ionospheric conductivity and wind system.

### 1. はじめに

S-310-5号機は電離層の総合観測を目指して、1979年1月31日午前11時(JST)に打上げられ、我々は光ポンピングセシウム磁力計による電流系の観測を担当した。最近、磁力計センサーを含む飛翔体磁場観測システムの進歩により、中緯度のような弱い電流系についても精密な観測が可能になって来たが、今回の観測目的は次の通りである。

- (1) 高さ分解能を大きくして電流の詳細な高さ分布を明らかにする。
- (2) K-9M-32号機により、中緯度の夕方時に初めて観測された $S_q$ 電流の第2層 [1] が電流最大時の午前11時頃にも存在するかどうかを観測する。
- (3) K-9M-55号機により、秋分附近で初めて観測された field-aligned current の水平拡散によると思われる電流 [2] を冬期に観測する。
- (4) ベクトル磁力計 [3] [4] により電流の3成分を観測する。
- (5) 電離層の導電率、風系などから存在が予想される高度115-150 kmの電流系の有無を明らかにする。

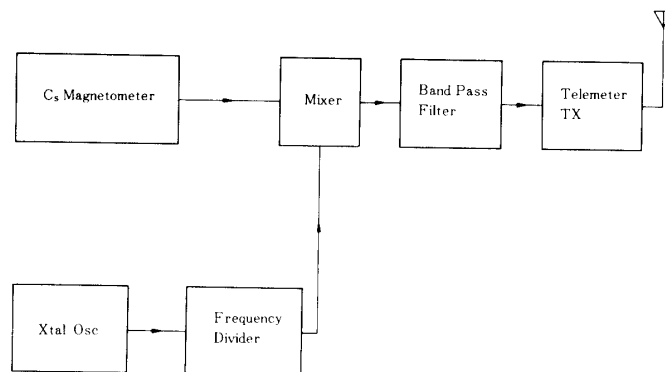
この中で既に(1), (2), (3)については報告したので [5] [6], 今回は(4), (5)について解析結果を報告する。またデータ解析により、

- (1) ロケットの姿勢
- (2) 地磁気の reference field

についても一部結果を得たので合わせて報告する。

### 2. 観測装置および解析方法

観測装置はロケット観測用に開発した光ポンピングセシウム磁力計 [7] を用いた。ロケットによる磁場のベクトル観測が、地上観測および衛星観測と異なる重要な点は、ロケットのスピンのにより磁力計のレスポンス周波数を極めて高くしなければならないことである。即ち磁力計のレスポンスが-3 dbになる周波数を $f_M$ , スピン周波数を $f_s$ , スピン軸に垂直な面内での角度誤差を $\Delta\phi$ とすれば、



Rocket Born Apparatus

図1 ロケット搭載装置

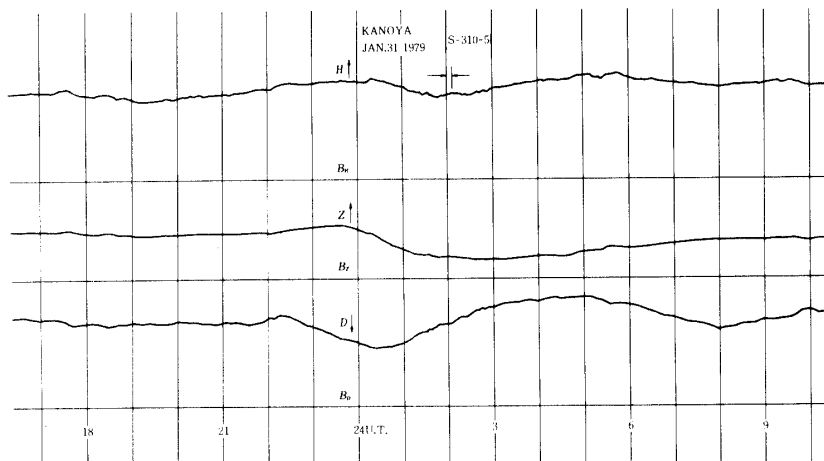


図2 地上磁場観測 (鹿屋)

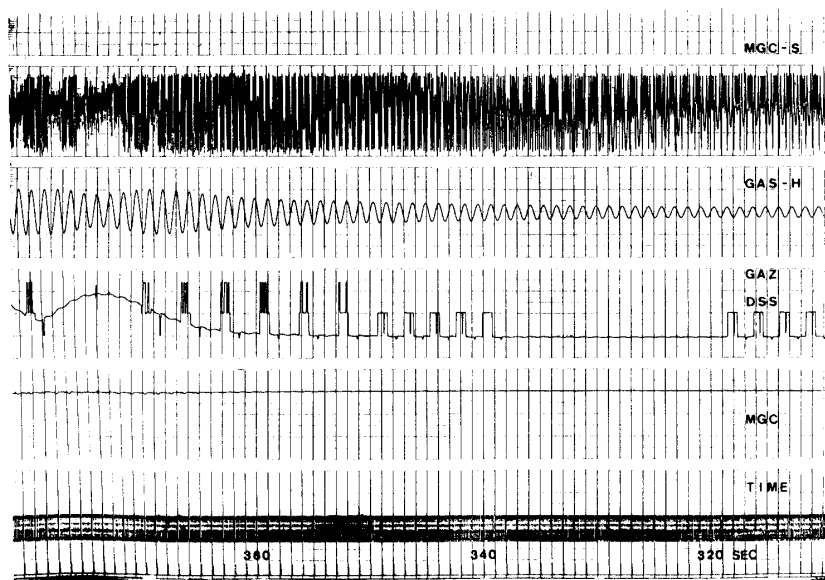


図3 テレメータ出力

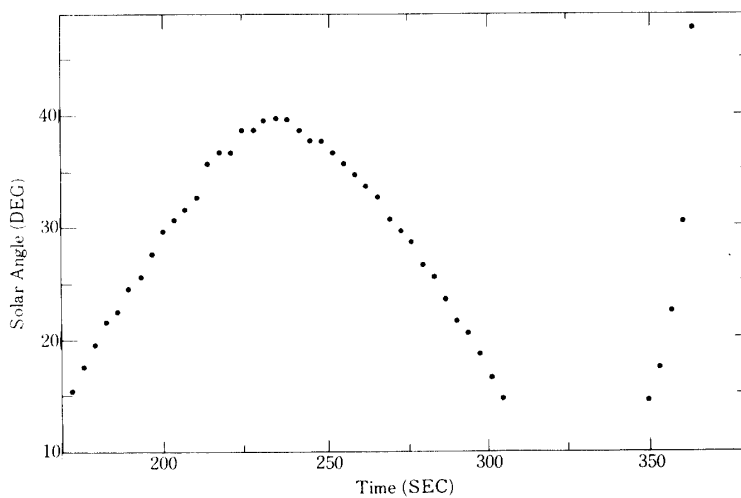


図4 太陽センサー出力

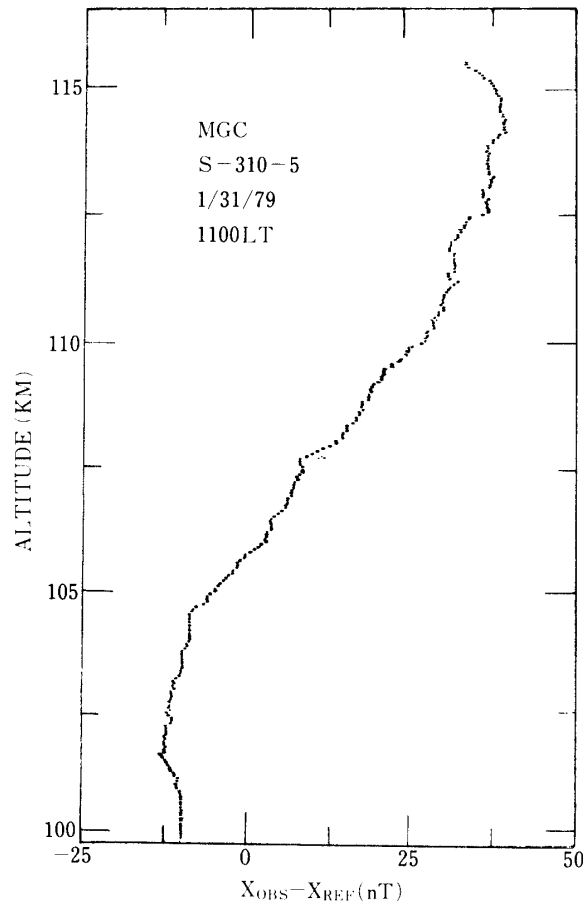


図5 磁場変化 (北向き成分)

$$f_M > f_s / \tan(\Delta\varphi) \quad (1)$$

例えば  $f_s$  を 1 Hz,  $\Delta\varphi$  を  $0.1^\circ$  とすれば  $f_M$  は 500 Hz 以上でなければならない。原子発振方式光ポンピング磁力計のレスポンスはゼーマンスペクトルの半値幅および feedback 回路の周波数特性で決まるが、後者は広帯域素子を用いれば問題にならないので、前者で決定される。スペクトル幅はセシウム槽の温度、ポンピング光の強度、観測磁場の不均一度などにより異なるが [7], 500~1,000 Hz 程度である。従って(1)の要求は充分満足している。

テレメータによる観測データの伝送は磁力計の精度を劣化しないよう考案されている [8] テレメータは IRIG Ch 15 をサブキャリアを除いて使用したが、周波数帯域が狭いため図1のような周波数変換によってデータ伝送を行った。このシステムは後でのべるように磁場のスカラー観測の高さ分解能の向上には十分であったが、ベクトル観測にはデータがかなり制限されたので、より広い帯域のテレメータの使用が望ましい。

テレメータの受信出力は広帯域倍周器で9倍の周波数に変換され、リアルタイムで基準信号と共に ANALOG-7 に  $30''/s$  で記録される。データ処理は記録時の  $1/8$  の速度で再生し、基準信号はプリセットカウンターを通してカウンター・ゲートの制御を行う。ゲートの時間幅は高さ分解能と精度の双方を考慮して決定される。カウントの結果は大型計

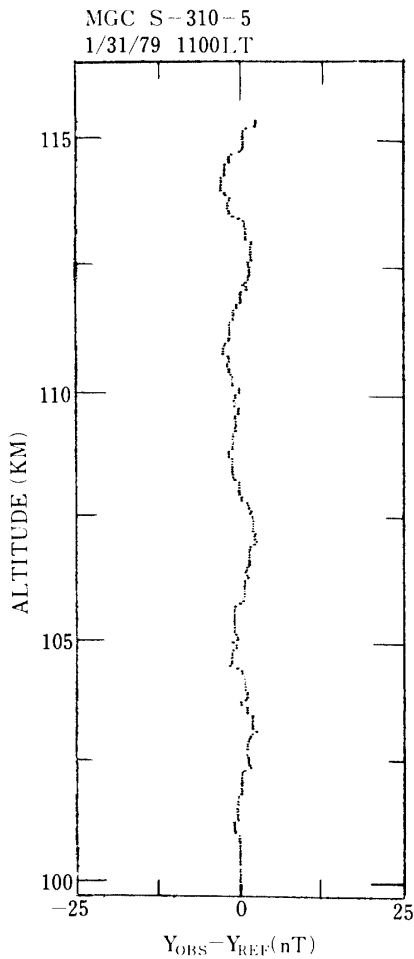


図6 磁場変化 (東向き成分)

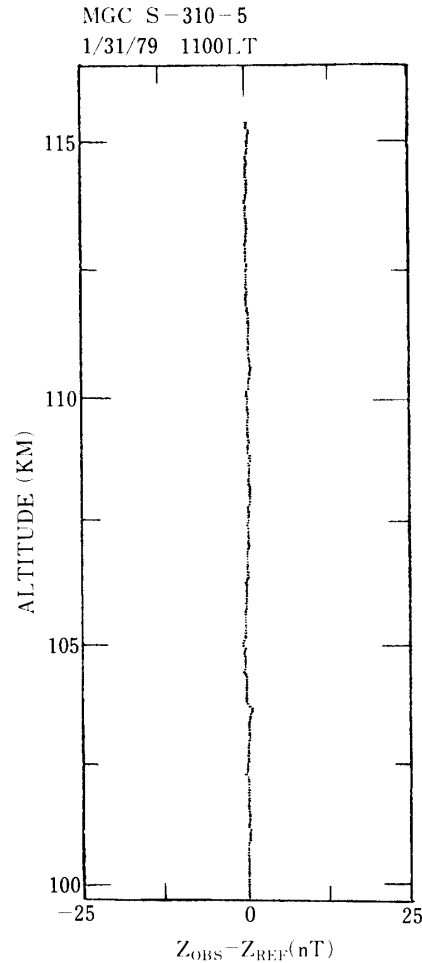


図7 磁場変化 (下向き成分)

算機にストアされ、グラフィック・ディスプレイ装置を用いて解析される。

### 3. 解析結果

ロケットのスピン周期は 1.15 sec, コーニング角は  $\pm 21.5^\circ$  であった。当日の鹿屋のマグネットグラムを図2に示す。これにより、ロケットは  $S_q$  電流の中心のほぼ真北を飛翔したものである。  $K_p$ -index は4-,  $S_q$  は 144.0 であった。

#### 3.1 ベクトル観測

下降時はバイアス磁場を印加してベクトル観測を試みた。テレメータ出力のペン書き記録を図3に示す。前に図1に関して述べたように、テレメータ入力に1スピン周期毎に12ないし14回の多くの折返しが見られる。カウンターゲートの時間幅はスピン周期の1/25であるから、カウンター出力データの内、半数あるいはそれ以上が無効となる。また、同時に搭載された太陽センサーの観測結果を図4に示す。センサーの感度は  $\pm 1^\circ$  であった。ロケット下降時のE領域通過時(X+350秒付近)は欠測しているが他の時刻の値を外挿することができる。データ解析はロケット座標での観測値を地球座標に変換し、reference fieldと比較する方法を用いた [6]。

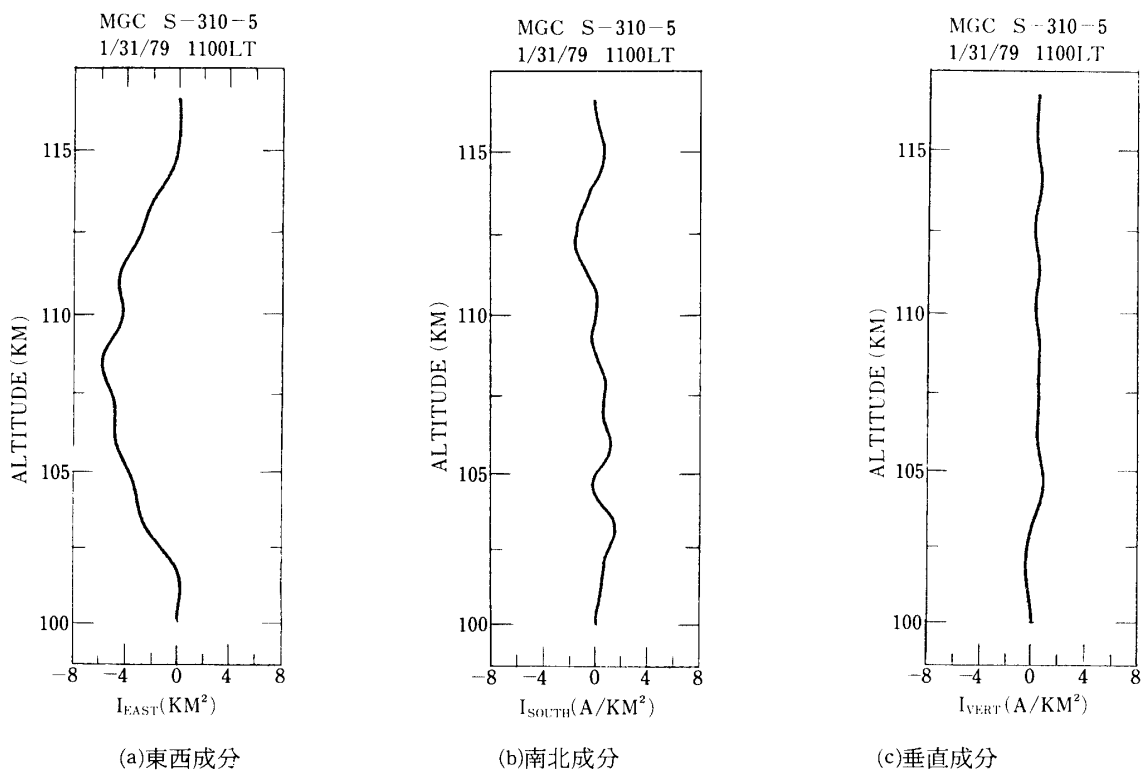


図8 電離層電流

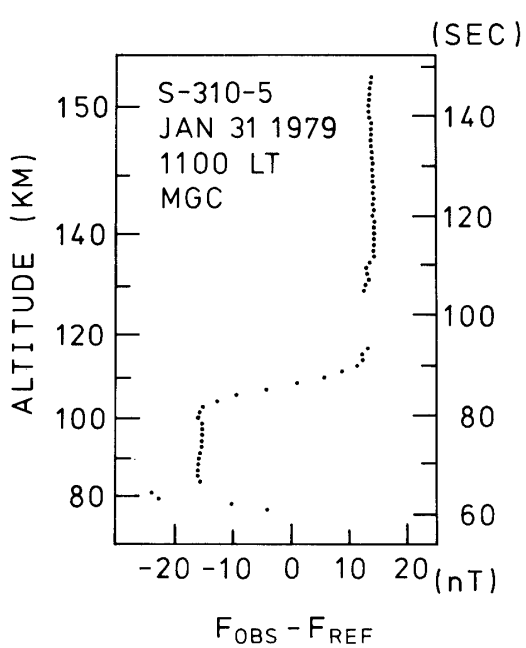


図9 全磁力観測

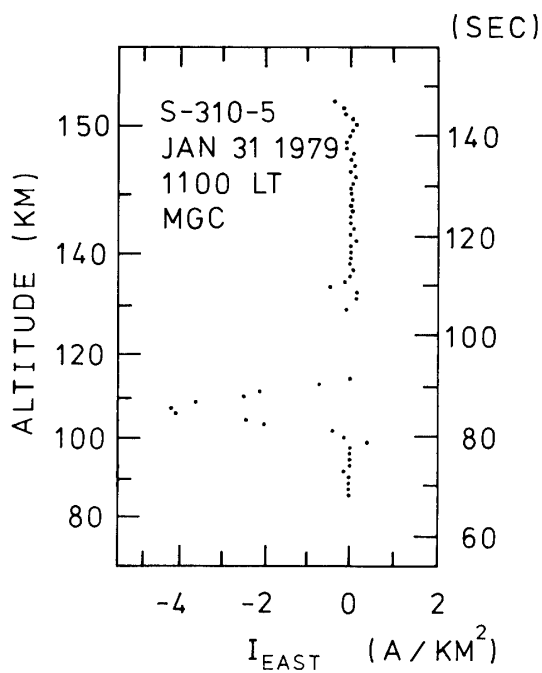


図10 電流の高度分布 (東西成分, 80-150 KM)

表1 観測結果

(1) 日時：1979年1月31日	11:00 JSJ	
(2) $K_p$ : 4 $\bar{}$ , $S_a$ : 144.0		
(3) $S_q$ 電流系	上昇時	下降時
電流下限	102 KM	101 KM
最大電流高度	107.5 KM	105-109 KM
最大電流密度	5 A/KM <sup>2</sup>	6 A/KM <sup>2</sup>
電流上限	115 KM	114 KM
全電流密度	33.8 A/KM	40 A/KM
(4) 高度分解能	50 M 1.1 KM	1.3 KM
(5) 磁場観測精度	0.67 nT 0.1 nT	5 nT
(6) 残留磁場	111 nT (スピン軸に垂直方向) 938 nT (スピン軸に平行方向)	
(7) コーニング角	$\pm 21.5^\circ$	

以下グラフィック・ディスプレイにより種々のパラメータを決定しつつ計算した結果をのべる。磁場の X 成分 (北向き成分) は図 5 の通りで電流層の上下に約  $\pm 27$  nT の磁場変化が明瞭に認められる。Y 成分 (東向き成分) は図 6 の通りで高度により変動がかなりあるが電流層の上側ではやや減少し、下側ではやや増加していることがわかる。また Z 成分 (下向き成分) は図 7 に示すが、観測誤差の範囲で変化のないことが分る。

以上 3 成分から電流の各成分をおさめたものが図 8 である。東西成分は西向き電流が高度 105 - 109 km で最大 6 A/km<sup>2</sup> に達し、高度 101 km から 114 km まで分布している。これに対し南北成分は高度変化が大きい、やや北向き成分が卓越している。従ってロケットは  $S_q$  電流系の中心北側のやや東側を通過したこととなる。

また上下成分は観測誤差の範囲で零である。これらの結果を上昇時の結果と合わせて表 1 のようになり、地上観測とほぼ一致することが分る。

### 3.2 高精度観測

電離層の高度 115 km より 150 km の領域は導電率分布 [9] や風系 [10] によって電流の存在が推定されていたが、ロケットによる直接観測は精度が充分でなかったため明確な結論は出ていなかった。

S-310-5 号機に搭載された光ポンピング磁力計は、レスポンスが kHz 程度と極めて早く、しかも全磁力を直接観測出来るのでこの様な目的には最適である。しかも機上及び地上のデータ変換システム動作が極めて良好に作動して、全磁力の観測精度はスピン周期で平均して 0.1 nT に達していた。

観測結果は図 9 に示す通りで高度 102 - 112 km に強い電流層が存在している。高度 118 - 126 km はテレメータのチャンネル制限のためデータが得られなかったが 118 km 附近と 126 km 附近との  $F_{obs} - F_{REF}$  が殆ど同じであるから、厚さ 2~3 km 以下の極めて薄くし

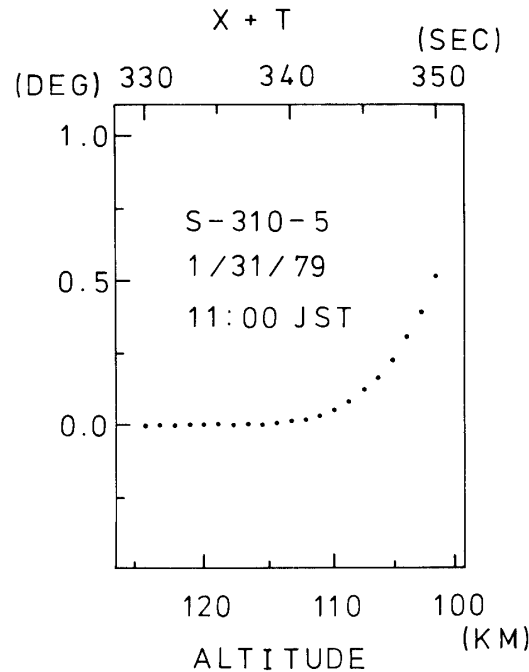


図11 ロケット下降時の姿勢変化

かもこの高度の範囲を積分すれば互いに打消し合うようなやや不自然な電流層以外には存在しないと結論出来る。82 km 以下はロケットのデスピヤセンサー突出しの効果で磁場は不安定である。図9の観測結果より電離層電流の高度分布を求めると図10となる。高度126 km 以上では130 km 及び150 km 附近に弱い電流層が認められるが、110 km 附近の主電流層に比較して無視出来る程度である。

#### 4. その他の結果

以上の電流系の観測以外に副産物としてロケットの姿勢と reference field について興味あるデータを得たので報告する。

##### (1) 高度100 km 附近におけるロケットの姿勢

下降時のロケットは空気抵抗の大きい姿勢で運動しているので、落下と共に姿勢が急速に変化して来る。図11は本観測の結果得られたもので100 km 附近で正常な nutation よりほぼ0.5°変化していることが分る。

##### (2) Reference Field

地磁気の Reference Field は種々提案されているが、全地球規模のことでもあり、局所的にはかなりの誤差が見出されていた。しかし1979年11月に打上げられた MAGSAT 衛星の結果は速報 [11] ではあるが、本観測と非常によく一致することを確めた。表2は IGRF 75 (経年変化を含む) [12] と WC 80 [13] と共に本観測と比較したものである。MAGSAT は経年変化が未だ公表されていないので、表2の値はさらに小さくなる可能性がある。なお WC 80 は係数  $h_3$  にミスプリントがあると推定される。ただし  $\Delta F$  は本観測に基づく電離層電流による全磁力変化である。



表2 本観測と各種 Reference Field との比較

REFERENCE FIELD	$F_{OB} - F_{REF} - \Delta F$			S-310-5 (MGC)
	LOG (DEG)	LAT (DEG)	ALT (KM)	
	LOG (DEG)	131.43	132.73	$h'_3$
	LAT (DEG)	30.84	29.16	(nT)
	ALT (KM)	101.26	101.46	
IGRF 75 (8)*		89 nT	115 nT	-343.5
MAGSAT (13)*		21	10	-331.4
WC 80 (12)*			320	-38

\* maximum degree and order of spherical harmonic expansion

### 5. 終わりに

S-310-5号機により、初めて中緯度の電離層電流系のベクトル3成分が観測された。その結果、詳細はまだ検討を要する点もあるが、ハードとソフトの両面にわたり観測方法は確立されたと思われる。

今回得られた思果を要約すると次のようになる。

- (1) 電流の3成分観測に初めて成功した。東西及び南北成分の高度分布が明らかとなり、垂直成分は観測誤差範囲で零であった。
- (2) LT 1100 附近の電離層電流系は高度 102 - 115 km の主電流層以外は極めて弱い。
- (3) 130 km, 150 km 附近に弱い電流層が認められる。
- (4) 82 - 100 km 及び 135 - 150 km は特に電流が弱く  $0.1 \text{ A/km}^2$  以下である。
- (5) これらの観測結果は導電率や風の高度分布から予想される電流分布に比べて厚さが  $1/2$  以下で、115-150 km に顕著な電流層が存在しないことが大きく異なっている。

ロケット観測にあたりお世話になった実験主任、大林教授をはじめ宇宙研の方々に感謝します。また、地磁気観測データを提供下された河村所長をはじめ地磁気観測所の方々、ロケット姿勢計のデータを提供下された遠山氏に感謝します。さらに MAGSAT のデータを提供下された WDC-A の J. I. Vette 所長に感謝します。

### 参考文献

- [1] T. Yabuzaki and T. Ogawa, J. Geophys. Res. 79, 1999 (1974).
- [2] 小川, 藪崎: 東大宇宙航空研報告 14, 1247 (1978).
- [3] 小川: 宇宙観測シンポジウム (1967年2月).
- [4] 藪崎, 塚田, 小川: 東大宇宙航空研報告 6, 149 (1970).
- [5] 藪崎, 北野, 小川: 宇宙観測シンポジウム (1979年6月).
- [6] 同上: 東大宇宙航空研報告 15, 431 (1979).
- [7] T. Yabuzaki and T. Ogawa, Journ. Appl. Phys. 45, 1342 (1974).
- [8] 藪崎, 塚田, 小川: 東大宇宙航空研報告 7, 103 (1971).
- [9] 例えば K. Maeda and H. Matsumoto, Rept. Ionosph. Space Res. Japan 16, 1 (1962).
- [10] 例えば J. Fontanari and D. Alcayde, Radio Sci. 9, 275 (1974).
- [11] MAGSAT Information Bulletin No. 4 (1980).
- [12] EOS 57, 120 (1976).
- [13] ibid. 61 (1980).