

S-310-5号機による電離層電流系の観測*

藪崎 努**・北野正雄**・小川 徹**

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

By

Tsutomu YABUZAKI, Masao KITANO and Toru OGAWA

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 present observation can be summarized as follows.

- (1) Sq current layer has no vertical fine structures.
- (2) The second layer which seems to exist in the evening is covered by thick main layer at near noon.
- (3) Total westward horizontal current is 33.8 A/km.

Results of vector observation of the magnetic field are also discussed.

1. ま え が き

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Sq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) ベクトル磁力計により電流の3成分を観測する。

観測は順調に行われ、データ解析も一部を除いて終了している。この報告では観測の結果を述べ、合わせて将来の改善すべき点を論ずる。

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学工学部

2. 観測理論

スカラー磁力計にバイアス・コイルを附加して磁場の3成分を観測する方法は種々あるが〔3〕,〔4〕,〔5〕,〔6〕,中緯度の電離層電流系により生じるような弱い磁場変化の場合は,種々の原因により生じる観測誤差を含めて詳細な検討が必要である.磁力計のセンサー部における磁場は図1のように,

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_C + \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_B \quad (1)$$

となる.ただし, $\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_C, \mathbf{F}_R, \mathbf{F}_B$ はそれぞれ永久磁場,電離層電流による磁場,残留磁場およびバイアス磁場である. $\mathbf{F}_R, \mathbf{F}_B$ はロケットと共に回転するから,もし $\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_R, \mathbf{F}_B$ の各成分が既知で, \mathbf{F} のスカラー量 $|\mathbf{F}|$ がスピン1周期内の3点以上で観測されれば \mathbf{F}_C の方向と強さを知ることができる.以下,各磁場について問題点を考える.

(1) 永久磁場

永久磁場はIGRF(International Geomagnetic Reference Field)により緯度変化を含めて3成分が与えられるが,現実の永久磁場とは数10 nTの差があるとされている.従って,各点でのIGRFの値そのものは誤差が多いので,電流系よりかなり離れた点のIGRF値を基準として各点の値の差のみを有意と考えるべきである.

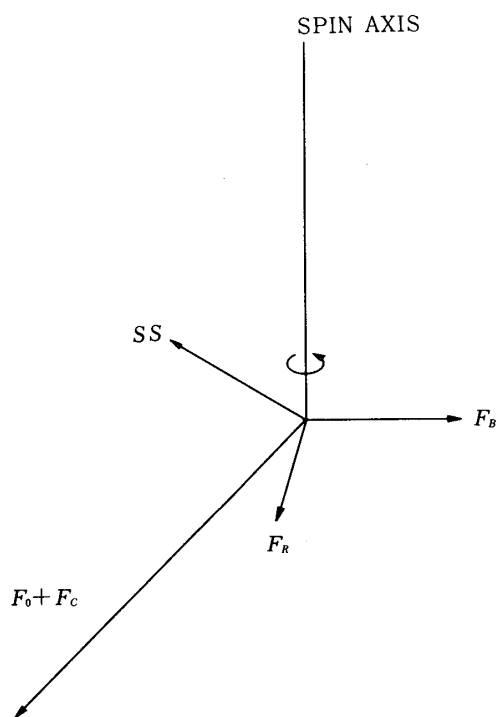


図1 磁場および太陽センサーの配列

一方、観測点の位置は精測レーダにより与えられるが、IGRFを計算後 Smoothing を行う必要がある。実際はロケットの20 sec 程度の飛翔時間内では、2次曲線近似で十分 0.1 nT 以下の偏差に収めることができる。

(2) 電離層電流による磁場

本観測の目的の磁場である。この磁場が地球上の静止座標に対しいかなる値となるかを知らなければ地球物理学的意味がない。従って、ロケット座標から静止座標への変換が重要となる。これについては後でべる。ただ、場所的に一様な電流によって生じる磁場は相殺されるから、非一様な電流系のみしか観測はできない。

(3) 残留磁場

最近のロケット観測は1機毎に特定のテーマによる総合観測が行われている。また、主としてエレクトロニクス装置の集積化により、搭載計器数が多くなって来つつある。これにつれて、磁力計センサー位置での残留磁場は増加の傾向にある。しかし、観測の意義を高めるためには有効な搭載計器数を少くして残留磁場を弱くするよりは、センサー突出し機構を含めた磁力計の構造を改良したデータ解析の際に、残留磁場を削除し得るような方法を考えるべきであろう。幸い本計画はセンサーとしてスカラー磁力計を用いているから、apogee 附近でバイアス磁場を零とすれば、ロケットスピンによる磁場変化よりスピン軸に垂直な方向の残留磁場を、また、コーニングによりスピン軸に平行な残留磁場を知ることができる。

(4) バイアス磁場

バイアス磁場の強さ、方向、安定度は観測対象 F_c により決まる。中緯度の電流系観測の場合は 10^4 nT 程度の強さのバイアス磁場をスピン軸に垂直方向に印加すればよい。磁場の安定度 10^{-4} 以上必要である。安定度および強さは技術的に十分達成できるが、方向誤差が問題である。スピン軸に対し垂直面からはずれれば、軸方向にバイアス磁場が生じ前述の残留磁場成分に誤差が加わる。また、垂直面内の太陽センサーからの角度誤差は解析方法によっては方向決定誤差となり得る。幸い前者はデータ解析の際、補正することができ、後者はデータ解析の方法により必ずしも必要な情報ではなくなる。

ロケット座標を図2に示す。ただし、この座標はスピン運動には追従しない。ロケット座標から見れば F_0 はコーニング運動をすることとなる。 z 軸はスピン軸であるが方向は下向きに取る。 y 軸は z 軸と F_0 とが最小の角、即ち $\mu_m - \beta$ を成す時 z 軸および F_0 と同一平面上に取る。 x 軸は $0 - xyz$ が右手座標系になるように定める。ここで注意すべきは、コーニングの中心と z 軸との間の角 μ_m およびコーニング運動の半角 β は一定ではないことである。その理由は F_0 の方向がロケットの飛翔と共に変化し、また、空気抵抗によりロケットの姿勢が変化するからである。従って観測磁場 $|F|$ は次式で与えられる。

$$|F| = (F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^{1/2} \quad (2)$$

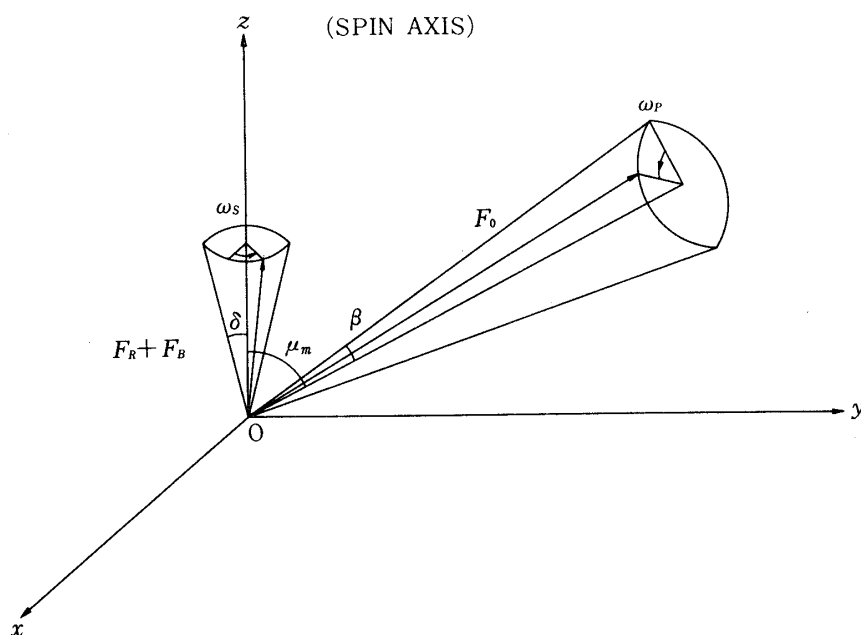


図2 ロケット座標

$$\begin{aligned}
 F_x &= F_0 \sin \beta \sin \omega_p (t - t_1) + F_{RB} \sin \delta \sin \{ \omega_s (t - t_0) + \varphi_s \} + F_{Cx} \\
 F_y &= F_0 (-\sin \beta \cos \omega_p (t - t_1) \cos \mu_m + \cos \beta \sin \mu_m) \\
 &\quad - F_{RB} \sin \beta \cos \{ \omega_s (t - t_0) + \varphi_s \} + F_{Cy} \\
 F_z &= F_0 (\sin \beta \cos \omega_p (t - t_1) \sin \mu_m + \cos \beta \cos \mu_m) + F_{RB} \cos \delta + F_{Cz} \\
 \left. \begin{aligned}
 \beta &= \beta_0 + \beta_1 \exp \{ \beta_2 (t - t_0) \} \\
 \mu_m &= \mu_0 + \mu_1 \exp \{ \mu_2 (t - t_0) \}
 \end{aligned} \right\} \\
 F_{RB} &= | \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_B |
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\tag{4}$$

$$\tag{5}$$

ただし、 t_1 は \mathbf{F}_0 が yz 平面内にある時刻、 t_0 はロケットが電離層下端を通過する時刻、 φ_s はその時のスピン位相である。 ω_p 、 ω_s はそれぞれコーニングとスピンの角周波数である。 β_1 、 β_2 および μ_1 、 μ_2 は空気抵抗によるロケットの姿勢変化を表わす係数である。

次に、地球固定座標 $0 - XYZ$ とロケット座標 $0 - xyz$ の変換を考える。 X, Y, Z をそれぞれ N, E 、下向きにとり X 軸の x, y, z 軸に対する方向余弦を $\alpha_{1,2,3}$ などとすれば、

球面3角形の公式により,

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \cos A \cos a + \sin A \sin a \cos(\widehat{SMX} + \widehat{SMx}) \\
 \beta_1 &= \cos B \cos a + \sin B \sin a \cos(\widehat{SMY} - \widehat{SMx}) \\
 \tau_1 &= \cos C \cos a + \sin C \sin a \cos(\widehat{SMZ} - \widehat{SMx}) \\
 \alpha_2 &= \cos A \cos b + \sin A \sin b \cos(\widehat{SMX} - \widehat{SM}y) \\
 \beta_2 &= \cos B \cos b + \sin B \sin b \cos(\widehat{SMY} + \widehat{SM}y) \\
 \tau_2 &= \cos C \cos b + \sin C \sin b \cos(\widehat{SMZ} + \widehat{SM}y) \\
 \alpha_3 &= \cos A \cos c + \sin A \sin c \cos(\widehat{SMX} - \widehat{SM}z) \\
 \beta_3 &= \cos B \cos c + \sin B \sin c \cos(\widehat{SMY} + \widehat{SM}z) \\
 \tau_3 &= \cos C \cos c + \sin C \sin c \cos(\widehat{SMZ} + \widehat{SM}z)
 \end{aligned} \tag{6}$$

ただし, A, B, C は \mathbf{F}_0 と X, Y, Z 軸との間の角, a, b, c は x, y, z 軸との間の角である. また例えば, SMX は原点 O を中心とする球面と太陽方向, \mathbf{F}_0 , X 軸それぞれとの交点を S, M, X とすれば \widehat{SM} と \widehat{XM} とのなす角である.

これらの角度は次式で与えられる.

$$\cos A = X/F, \cos B = Y/F, \cos C = Z/F \tag{7}$$

X, Y, Z, F はそれぞれ地磁気の3成分および全磁力である.

$$\left. \begin{aligned}
 \cos a &= \sin \beta \sin \omega_p(t - t_1) \\
 \cos b &= -\sin \beta \cos \omega_p(t - t_1) \cos \mu_m + \cos \beta \sin \mu_m \\
 \cos c &= \sin \beta \cos \omega_p(t - t_1) \sin \mu_m + \cos \beta \cos \mu_m
 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \cos(\widehat{SMX}) &= \frac{\cos A_s - \cos A \cos(\widehat{SOM})}{\sin A \sin(\widehat{SOM})} \\
 \cos(\widehat{SMY}) &= \frac{\cos B_s - \cos B \cos(\widehat{SOM})}{\sin B \sin(\widehat{SOM})}
 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

$$\cos(\widehat{SMZ}) = \frac{\cos C_s - \cos C \cos(\widehat{SOM})}{\sin C \sin(\widehat{SOM})} \quad \Bigg\}$$

ただし,

$$\cos(\widehat{SOM}) = \cos A \cos A_s + \cos B \cos B_s + \cos C \cos C_s \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos A_s &= \sin \Theta_s \cos \Phi_s \\ \cos B_s &= \sin \Theta_s \sin \Phi_s \\ \cos C_s &= \cos \Theta_s \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

であって Θ_s , Φ_s は太陽の天頂角および方位角である. 次に, ロケット座標では Oz と太陽方向の間の角は精密に観測されるが, 太陽センサーが太陽方向を向くスピン位相の観測は精度が下るのが普通である. 従って, 前者のみの情報で F_0 の方向を知るには

$$\left. \begin{aligned} (\widehat{SMx}) &= -(\widehat{SMz}) + (\widehat{xMz}) \\ (\widehat{SMy}) &= (\widehat{SMz}) + (\widehat{yMz}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\cos(\widehat{SMz}) = \frac{\cos c_s - \cos c \cos(\widehat{SOM})}{\sin c \sin(\widehat{SOM})} \quad (13)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} \cos(\widehat{xMz}) &= -\cot a \cot c \\ \cos(\widehat{yMz}) &= -\cot b \cot c \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

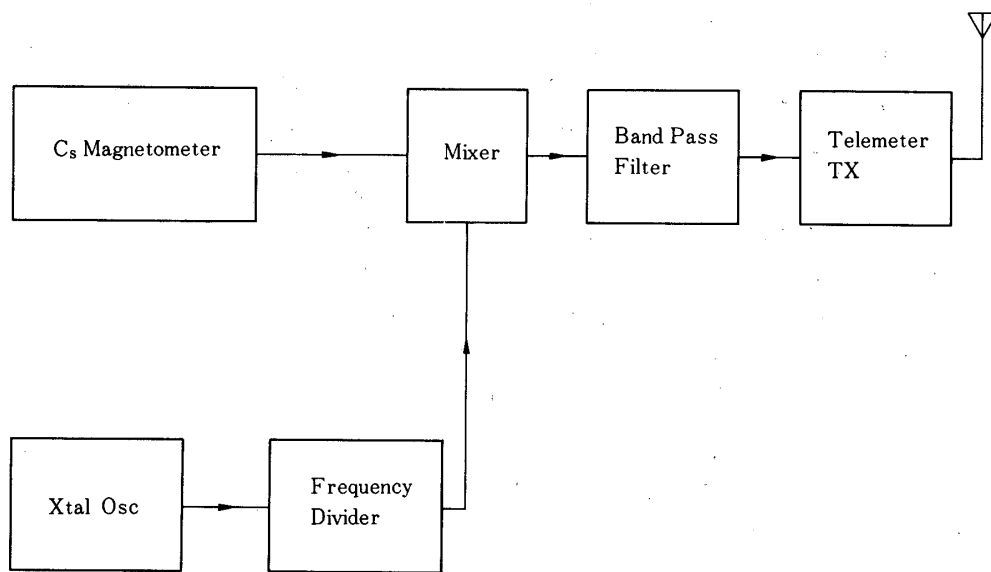
以上を用いて方向余弦が求まれば

$$\begin{pmatrix} F_{cx} \\ F_{cy} \\ F_{cz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{cX} \\ F_{cY} \\ F_{cZ} \end{pmatrix} \quad (15)$$

などの変換が可能となる.

3. 観測装置

ロケット搭載装置は従来の磁力計とほぼ同型で, 安定度約 0.1 nT の光ポンピングセシウ



Rocket Born Apparatus

図3 搭載装置ブロック図

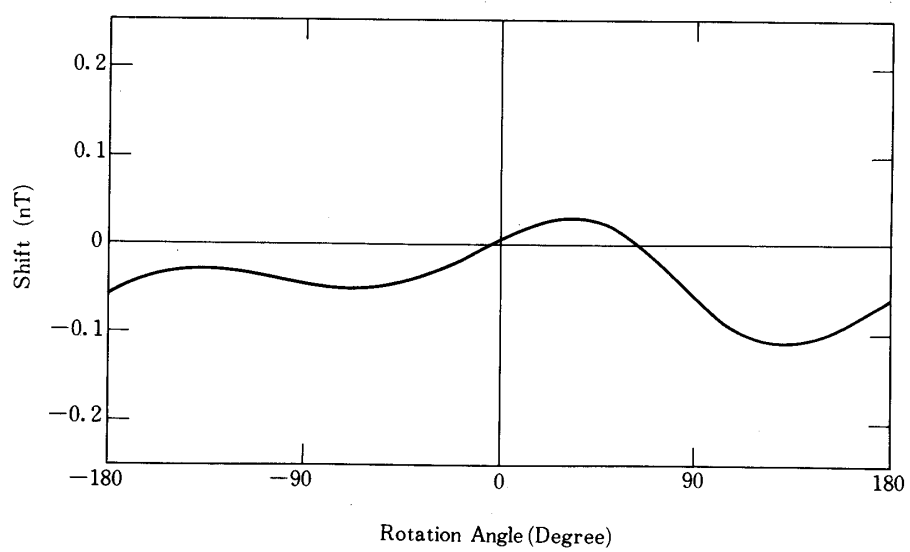


図4 磁力計センサーの回転誤差

ム磁力計〔7〕を用いた。ロケット搭載装置のブロック図を図3に示す。センサーの性能としては高さ分解能を向上し、またベクトル成分測定のために回転誤差を小さくした(図4)。

テレメーター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〕。テレメーターはIRIGの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に図5のような周波数変換を行ってデータ伝送を行った。このシステムは後での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ーの使用が望ましい。

地上設備のブロック図を図6に示す。テレメーター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。データ処理は図7のように記録時の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・ゲートの制御を行なう。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。

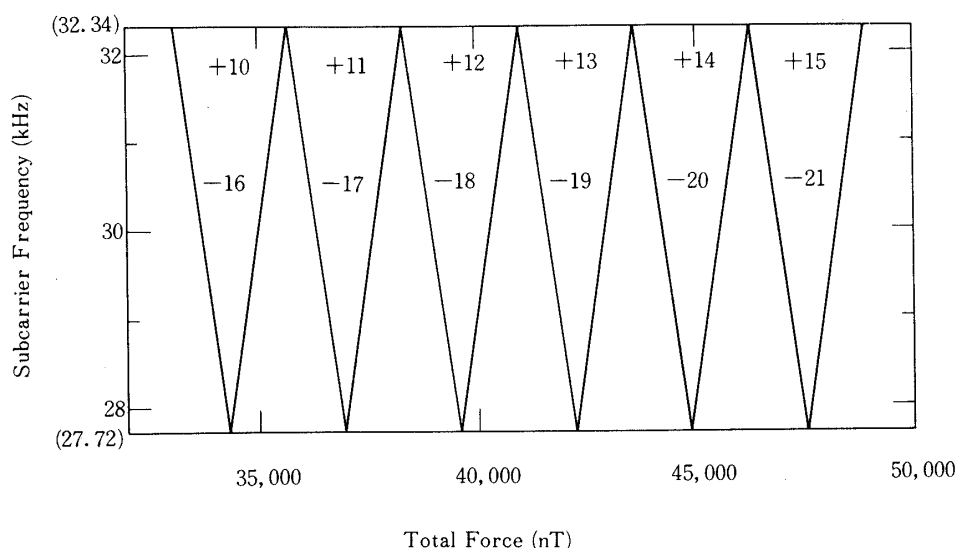
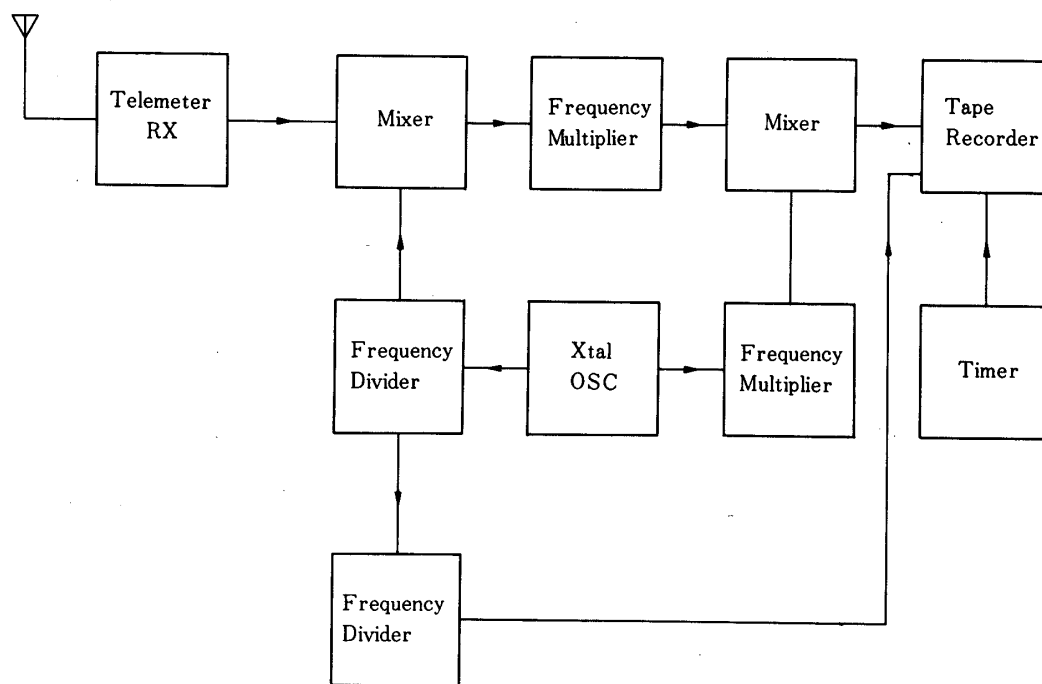
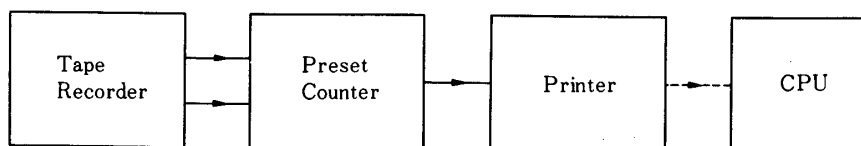


図5 テレメーター入力における帯域圧縮



Recording System

図6 地上装置ブロック図



Data Analysis System

図7 データ処理ブロック図

4. 観 測 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8に示す. これにより, ロケットは Sq 電流の中心の ほぼ真北を飛翔したものである. また, K_p -index は 4, S_a は 144.0 であった.

(1) ロケット上昇時の観測結果

上昇時はバイアス磁場を印加せずに高分解能のスカラー磁場観測と残留磁場観測を行った. データ処理のタイミングは1スピン周期の約 $1/25$ で行った. この結果高さ分解能は ± 50 m, 磁場精度は ± 0.67 nT となる.

E領域での観測結果を図9に示す. E領域の磁場変化は 31 nT であって, 当日の地磁気変化がやや荒れているため, 地上観測との比較は困難であるが, 対応はほぼ良好と思われる. 磁場の高さ変化は滑らかであって電離層電流の垂直方向分布には細かい構造がないことが分かる. 磁場観測では水平分布は平均されるから構造の有無は不明である. また, 夕方の観測で存在すると思われる Sq 電流の第2層は, 今回の昼間の観測では第1層の厚さが増加して第2層附近まで連続となっていることが分かった. さらに今回は電流系中心の ほぼ真北での観測となったため, field aligned current の水平拡散によると推定される磁場変化は見出せなかった. 図9の磁場変化を平滑化し微分すれば東西方向の電流成分が求められる. その結果を図10に示す. 電流の零位置が斜になっているのは, reference

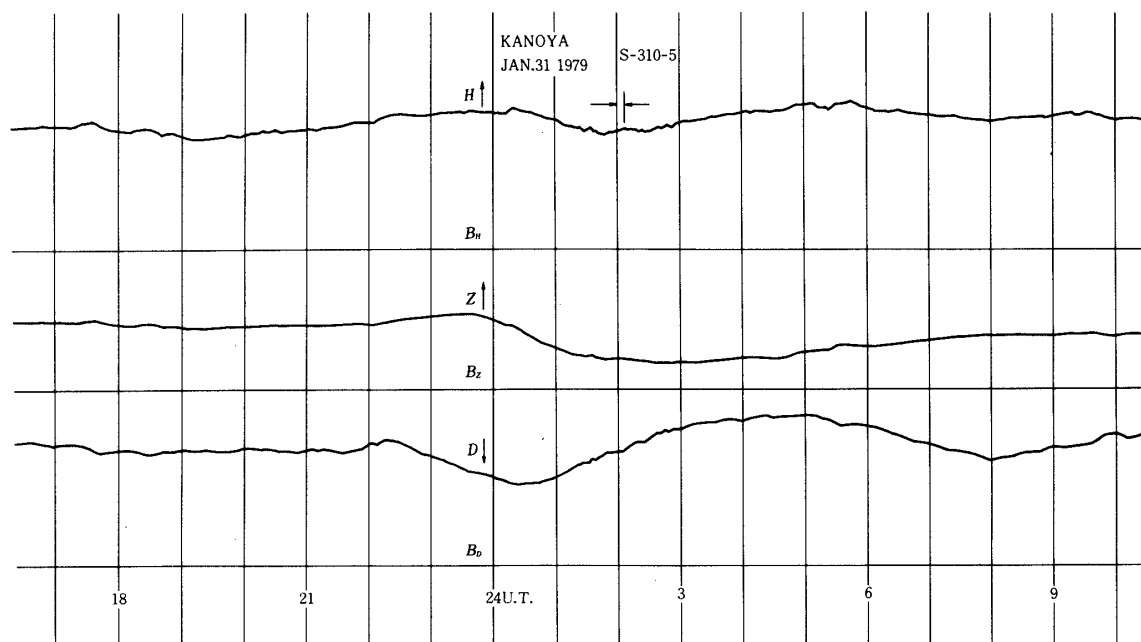


図8 Normal run magnetogram (KANOYA)

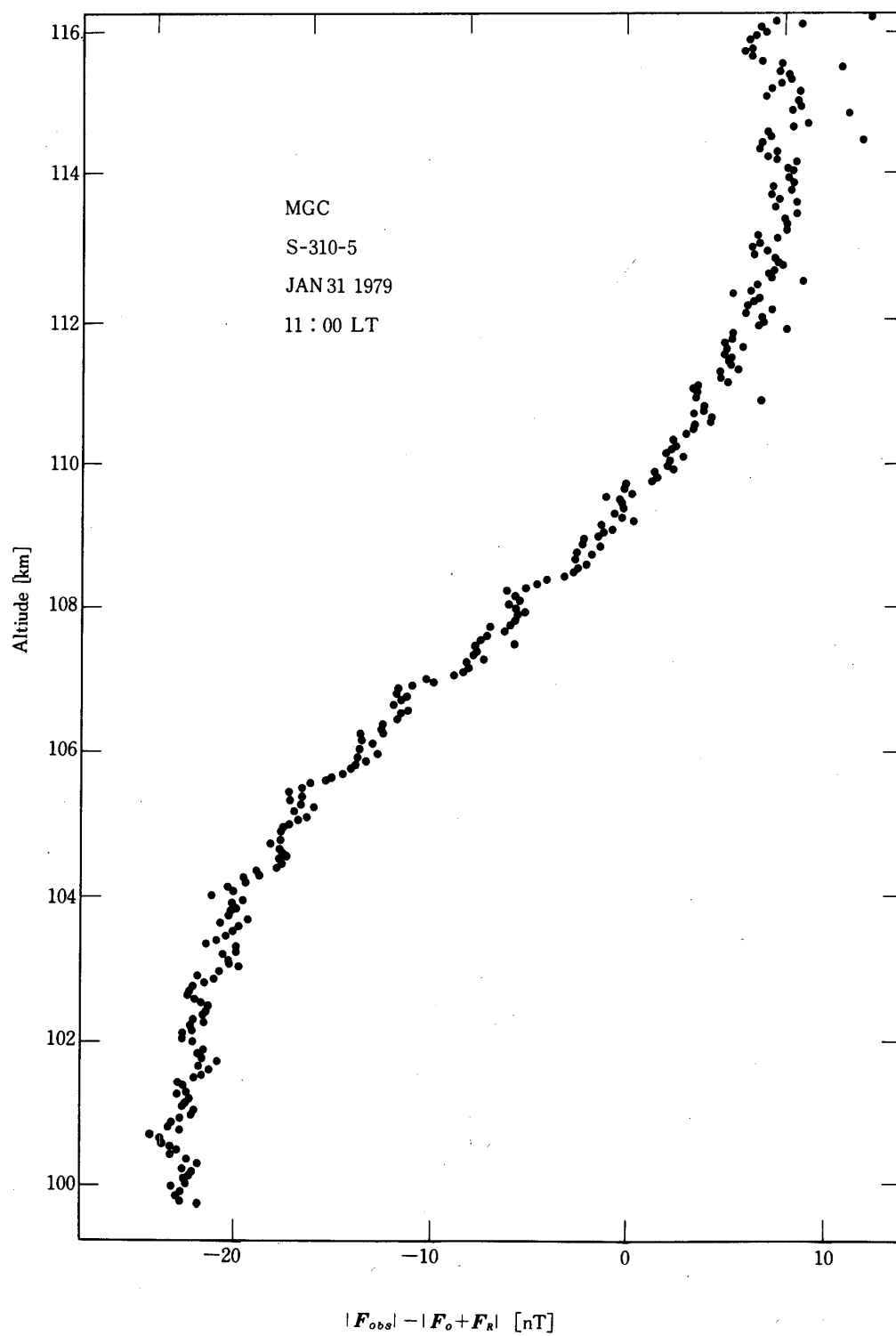


図9 ロケット上昇時の磁場変化 (スカラー観測)

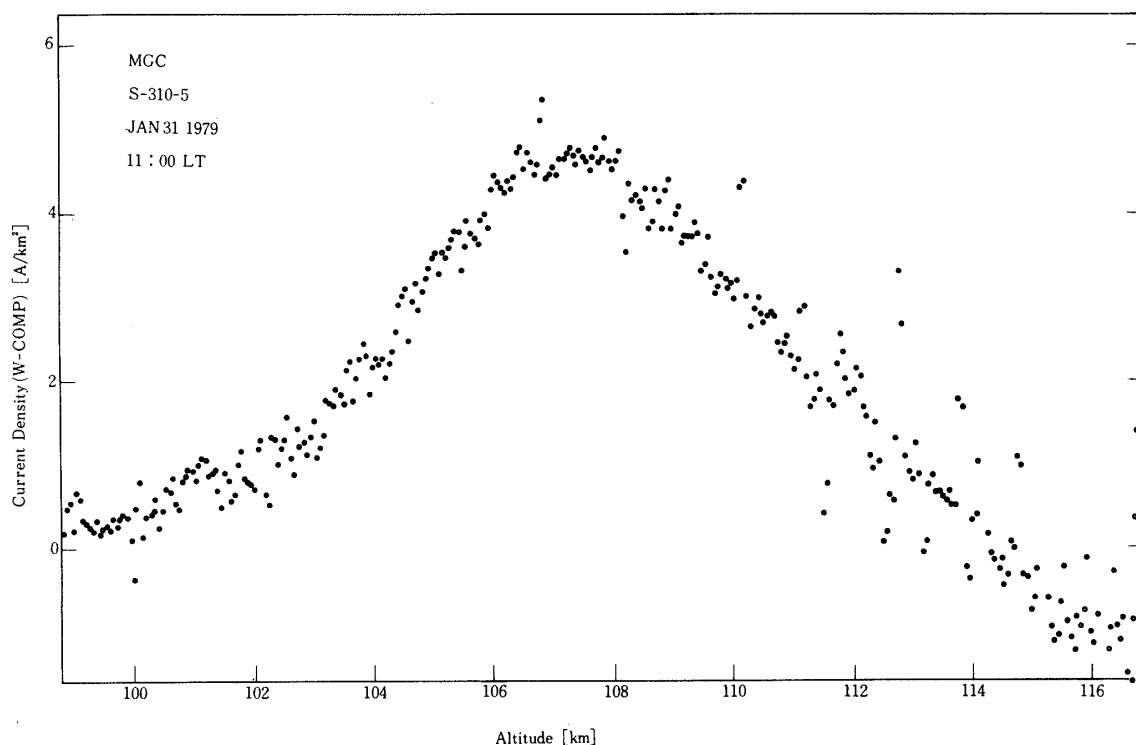


図10 電離層電流の東西成分

field の偏差のためと思われる. この図より得られる電流の諸元は次の通りである.

- (a) 電流下限 102 km
- (b) 最大電流高度 107.5 km
- (c) 最大電流密度 4.92 A/km^2
- (d) 電流上限 115 km
- (e) 全電流密度 33.8 A/km

なお, 残留磁場のスピン軸に対する垂直成分は 111 nT, 平行成分は 880 nT であった.

(2) ロケット下降時の観測結果

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. テレメーター出力のペン書き記録を図11に示す. 前に図5に関してのべたように, テレメーター入力に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12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. さて, 2節の理論を用いてグラフィック・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図13に示す. 横軸はスピン周期で目盛っている. データは相当発散しているが, これは無効になったカウンター出力である.

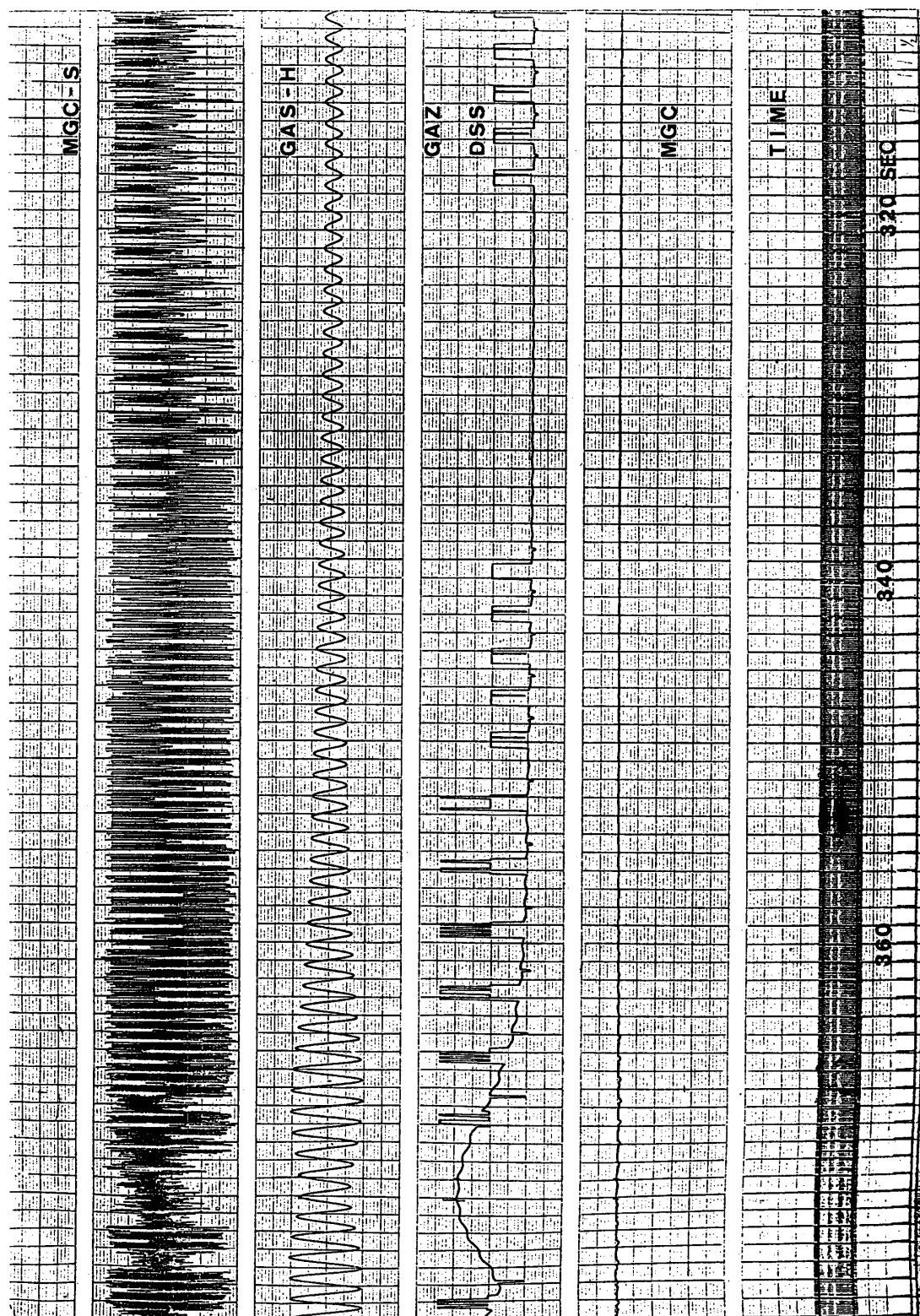


図11 テレメーター出力のペン書き記録

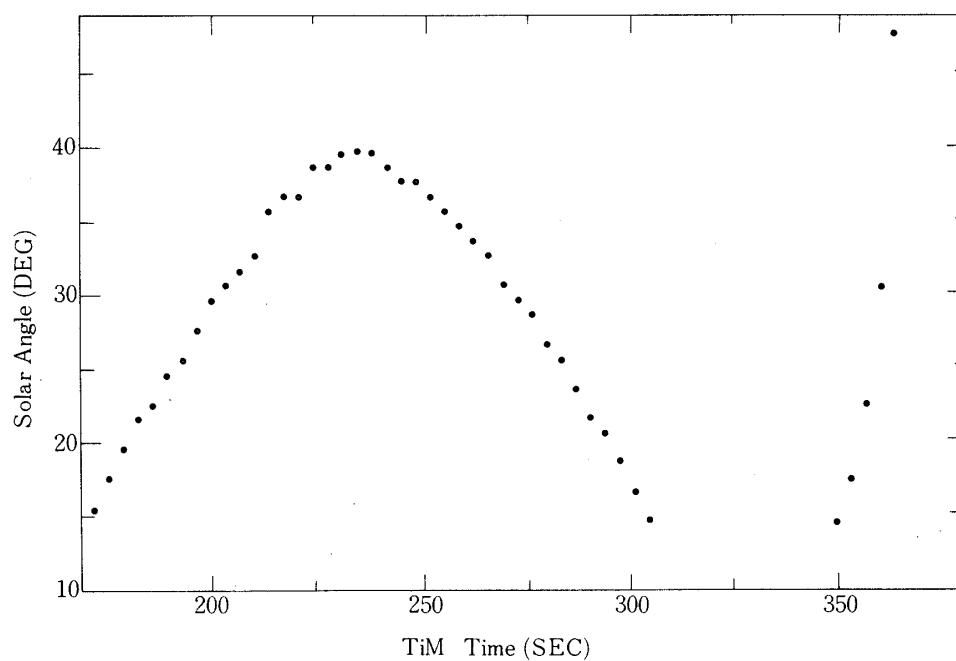


図12 デジタル太陽センサー (DSS) による太陽のエレベーション角

図14は、ロケット座標 $0-xyz$ の各軸方向にそれぞれ $+25 \text{ nT}$ の磁場変化が生じた場合、1 スピン周期にわたりロケット高度 100 km において磁力計の出力変化をシミュレートしたものである。また、図15は同じ条件で地球座標 $0-XYZ$ の各軸に A, B, C のような磁場変

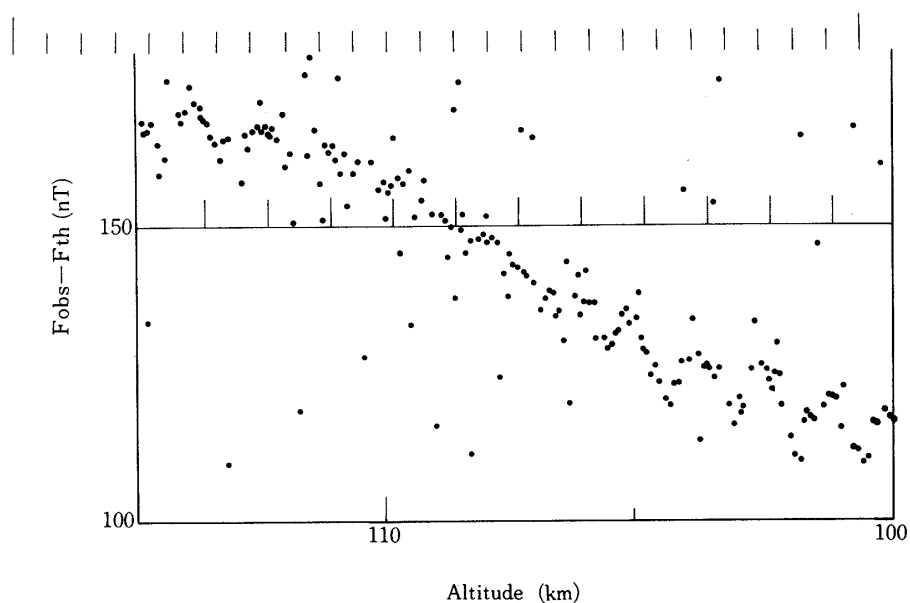


図13 ロケット下降時の磁場変化 (ベクトル観測)

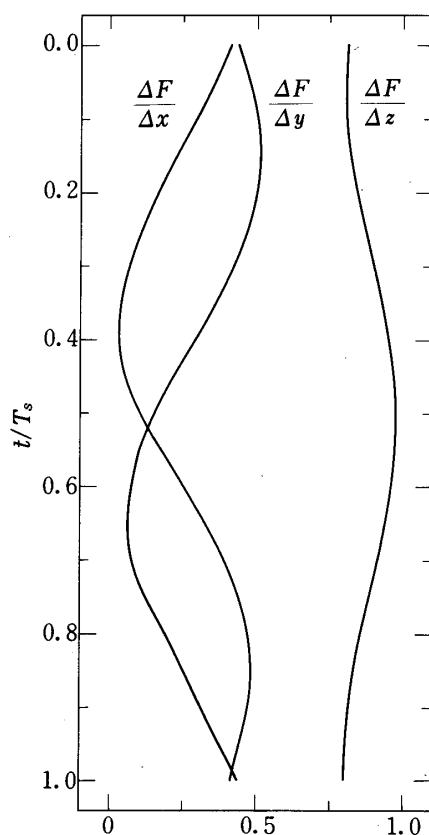


図14 ロケット座標における磁場変化のシミュレーション

化が生じた場合の $|\mathbf{F}|$ の変化を示している。このような操作を各スピン毎に行い図12と対応させれば、電離層電流による磁場変化の各成分が求められるはずである。現在までの所、データの散乱などのため完全な対応は取れていないが、電離層電流の東西成分による磁場変化は約35 nTで南北成分も数 nT 存在するようである。垂直成分が存在するかどうかは更に精度を向上した解析が必要であるのでその準備を進めている。

5. 結 言

S-310-5号機による電離層電流系の観測について、主として観測理論と電流による磁場変化のスカラー量の観測結果とをのべた。さらに、ベクトル量の観測についても一部のべた。その結果は次の通りである。

- (1) 正午前後の電流系は厚さ10数 km の単一層であって、夕方に存在するらしい第2層もその中に含まれている。
- (2) 電流の高度分布は単調であって、垂直方向の微細構造は存在しない。
- (3) 今回の観測はたまたま電流系中心より真北附近で行われたため、field aligned current の水平拡散による電流層は見出せなかった。

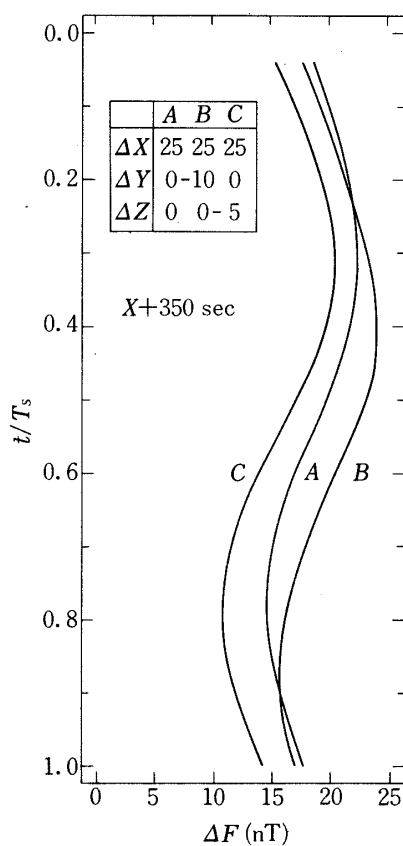


図15 地球座標における磁場変化のシミュレーション

- (4) 電流系のベクトル観測は、さらに精密なデータ処理が必要である。
- (5) 将来の問題として次の諸点があげられる。
 - (a) テレメーターのチャンネル幅を広くするため、ワイドバンドテレメーターの利用が望ましい。
 - (b) 太陽センサーの感度を $\pm 0.1^\circ$ に向上させる。

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、地磁気観測データー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ーを提供下された遠山氏に感謝します。

1979年 9月17日

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] P.A. Cloutier and R.C. Haymes, J. Geophys. Res. **73**, 1771 (1968).
- [6] P.A. Cloutier et al., *ibid*, **75**, 2595 (1970).
- [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).