

## Pc5 脈動を用いた地磁気共役点の推定

加藤賢一<sup>1</sup>・利根川 豊<sup>1</sup>・佐藤夏雄<sup>2</sup>

### Estimation of Geomagnetic Conjugate Points by Using Pc5 Pulsations

Ken-ichi KATO<sup>1</sup>, Yutaka TONEGAWA<sup>1</sup> and Natsuo SATO<sup>2</sup>

**Abstract:** In the present paper, we have attempted to estimate the geomagnetic conjugate points by the method of TONEGAWA and SATO using Pc5 geomagnetic pulsation data obtained simultaneously at three stations in Iceland and at three stations in Antarctica (including Syowa Station) during the period of March and May in 1988. It is assumed in the estimation that Pc5 pulsations are odd mode standing oscillations of the field line and have linear phase variations among the stations in the horizontal plane. The result shows that conjugate points of Syowa Station estimated from Pc5 events are concentrated around the point calculated from the magnetic field model of TSYGANENKO, within the range of  $\pm 3^\circ$  in the longitude, *i.e.*, less than  $1/5$  wave length, and  $\pm 0.5^\circ$  in the latitude.

**要旨:** 本論文では、地磁気脈動の特性と観測点間の位相差を利用した TONEGAWA and SATO の方法を用いて、アイスランド3観測点と南極3観測点で1988年3月と5月に同時観測された午前側の Pc5 脈動から地磁気共役点の推定を試みた。その際、Pc5 地磁気脈動の特性を奇数次モードの定在波であり、そして水平面での位相変化は線形であると仮定した。このような方法を用いた結果、Pc5 脈動から求めた地磁気共役点と TSYGANENKO の地球磁場モデルから求めた地磁気共役点はよい一致を示した。その範囲は経度方向  $\pm 3^\circ$ 、これは  $1/5$  波長以下、また緯度方向は  $\pm 0.5^\circ$  内に位置している。

### 1. はじめに

地磁気共役点は、地球磁場モデル—例えば、IGRF モデルや TSYGANENKO (1987) の地球磁場モデル—を用いることによって理論的に知ることができる。また、観測的に地磁気共役点を知るには、地磁気共役点付近で観測されたオーロラ形態の位置関係から求めることができる。しかし、天候などに左右されるため同時に両共役点で観測されることはまれである。別な方法として、Pg 地磁気脈動の特性と観測点間の位相差を用いることによって、TONEGAWA and SATO (1987) は地磁気共役点の導出を行っている。この導出方法からは、地磁気

<sup>1</sup> 東海大学工学部航空宇宙学科. Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokai, Kitakaname 1117, Hiratsuka 259-12.

<sup>2</sup> 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

脈動は水平面での位相変化が線形であると仮定すると、片半球の 3 観測点から波数ベクトルが導出でき、さらに脈動を定在波であると仮定することにより、波数ベクトルを導出した半球側の反対半球の地磁気共役点が求められる。しかし、彼らはこの導出方法に出現頻度の少ない **Pg** 脈動を用いているため、その脈動から求めた地磁気共役点の統計的な解析が十分に行われていない。そこで本論文では、TONEGAWA and SATO (1987) の方法を用いて、地磁気脈動の中でも連続的で規則的な周期 150~600 秒を持ち、出現頻度の高い **Pc5** 地磁気脈動から地磁気共役点を求めた。

今回の研究に用いられた **Pc5** 地磁気脈動は、一般に午前側では定在振動モード、午後側では圧縮性振動モードである (YUMOTO *et al.*, 1983; ANDERSON *et al.*, 1990) とされている。特に定在振動モードの **Pc5** 地磁気脈動は、多くの研究者により次のような基本的特性が観測的に明らかにされている; 1) 振幅の大きさがピークとなり緯度が高くなると観測される周期は長くなることから、磁力線の固有振動である (SAMSON and ROSTOKER, 1972), 2) 同一イベントでは、すべての緯度の観測点で同じ周期である (ELLIS, 1960; OBERTZ and RASPOPOV, 1968), 3) 地磁気共役点間の地磁気観測データの位相関係から、奇数次モードの固有振動である (KOKUBUN *et al.*, 1976), 4) **Pc5** 地磁気脈動に伴った低エネルギー粒子のフラックス変動から、磁力線の基本モード定在波である (KOKUBUN *et al.*, 1977; CUMMINGS *et al.*, 1978)。

また、定在振動モードの **Pc5** 地磁気脈動の緯度や経度方向の位相変化は、モデル計算や地上観測データから示されている。緯度方向の位相変化は、HUGHES and SOUTHWOOD (1976) と WOLKER *et al.* (1979) によって共鳴理論からモデルが示され、POULTER (1982) や SAKA *et al.* (1982) がそのモデルを支持する観測を示している。経度方向の位相変化は OLSON and ROSTOKER (1978) が周波数 ( $f$ ) と東西方向の位相差の関係を  $m=(1.4\pm 0.4)f+0.26$  で示した。ここで、 $m$  は東西方向の波数である。また、彼らは午前側では西から、午後側では東から伝搬するような位相変化であることも示している。

このような **Pc5** 脈動の特性と TONEGAWA and SATO (1987) の導出方法を用いて、昭和基地の地磁気共役点付近に位置するアイスランド側 3 点で同時観測された **Pc5** 脈動の位相差より波数を求める。そして、その波数と昭和基地を含めた南極側 3 点で同時観測された **Pc5** 脈動の共役点間の位相差から、南極側 3 点それぞれの地磁気共役点を導出した。ここで用いられている **Pc5** 脈動は、定在振動モードが卓越し出現頻度の高い午前側のイベントのみである。また、TSYGANENKO (1987) の地球磁場モデルから求められる地磁気共役点についての地磁気緯度経度方向や空間的な分布の比較を行った。

## 2. データと導出方法

本論文で使用したデータは誘導磁力計で観測された地磁気 **H**, **D** 成分である。観測点は、

南極側昭和基地 (SYOW), マラジョージナヤ基地 (MOLO), あすか観測拠点 (ASUK), そして昭和基地の共役点付近に位置するアイスランド側フッサフェル (HUSA), チョルネス (TJOR), イッサフィヨルド (ISAF) の計 6 点である. これら 6 観測点の地理, 地磁気座標 (IGRF 1985 model から求めた) を表 1 に示す. 解析した期間はこの 6 点で同時観測された 1988 年 3 月と 5 月である. これら 6 点で観測された Pc5 脈動 (周期 170 s) の 1 例として 1988 年 5 月 7 日 0730–0830UT のイベントを, 図 1 に示す. この図に見られるように, あすか観測拠点にはノイズがしばしば表れるが, スペクトル解析を行った結果 (ここでは示していない), Pc5 帯には影響を与えていなかった.

表 1 アイスランド 3 観測点と南極 3 観測点の地理, 地磁気座標 (IGRF 1985 model から求めた)

Table 1. Geographic and geomagnetic coordinates (calculated by the IGRF 1985 model) of three stations in Iceland and three stations in Antarctica.

観測点	地 理		不変磁気	
	緯 度	経 度	緯 度	経 度
フッサフェル	64.67	338.97	66.02	68.88
チェルネス	66.20	342.88	66.97	73.27
イッサフィヨルド	66.08	336.87	67.78	68.28
昭和基地	-69.00	39.58	-66.58	71.85
マラジョージナヤ基地	-67.66	45.85	-66.95	78.09
あすか観測拠点	-71.53	24.14	-65.48	58.82

図 1 に表れているように, 観測点間の位相を比較すると, 位相が遅れる方向または伝搬する方向が分かる. ここで, 水平面での位相変化を線形と仮定することによって, その方向つまり波数ベクトルは次式から求められる (TONEGAWA and SATO, 1987).

$$\begin{aligned}\phi_{Hj} - \phi_{Hi} &= \mathbf{K}_H \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i), \\ \phi_{Dj} - \phi_{Di} &= \mathbf{K}_D \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i),\end{aligned}\quad (1)$$

ここで,  $\phi_{Hj} - \phi_{Hi}$ ,  $\phi_{Dj} - \phi_{Di}$  は  $i, j$  観測点間の  $H, D$  成分の位相差を表し,  $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$  はそれぞれ  $i, j$  観測点の位置ベクトル (ここでは地磁気緯度経度に当たる) を表している.  $\mathbf{K}_H, \mathbf{K}_D$  は  $H, D$  成分の波数ベクトル, すなわち東西方向に  $1^\circ$  離れた観測点間の  $H, D$  成分それぞれの位相変化の大きさをベクトルで表している. このとき東西方向の  $\mathbf{K}$  ベクトルは  $m$ -number に相当する. 今, Pc5 脈動が定在波である (KOKUBUN *et al.*, 1977; CUMMINGS *et al.*, 1978) ことを仮定すると, 共役点では次式が満たされている.

$$\begin{aligned}\phi_{He} - \phi_{Hi} &= \mathbf{K}_H \cdot (\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_i) + C_H, \\ \phi_{De} - \phi_{Di} &= \mathbf{K}_D \cdot (\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_i) + C_D,\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\text{odd mode} & \quad C_H = 0^\circ, \quad C_D = \pm 180^\circ, \\ \text{even mode} & \quad C_H = \pm 180^\circ, \quad C_D = 0^\circ,\end{aligned}$$

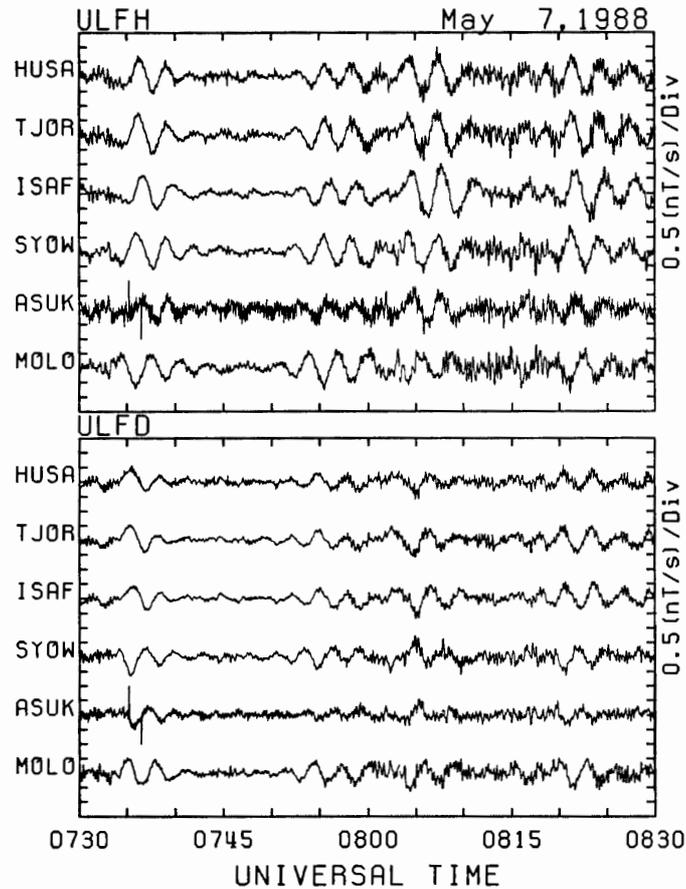


図 1 1988 年 5 月 7 日 0730-0830 UT に観測された Pc5 脈動 ( $T \sim 170$  秒) の H, D 成分

Fig. 1. The H and D components of Pc5 geomagnetic pulsations ( $T \sim 170$  s) observed by induction magnetometer at 0730-0830 UT on May 7, 1988.

ここで、 $\phi_{Hc} - \phi_{Hi}$ ,  $\phi_{Dc} - \phi_{Di}$  は共役点付近の観測点間の H, D 成分の位相差を表し、 $K_H$ ,  $K_D$  は式 (1) から求められる。 $r_c$  は導出される共役点の位置ベクトルを表す。

以上の解析方法を用いて、Pc5 脈動から共役点  $r_c$  の導出を行った。

### 3. 地磁気共役点の導出

本論文においては、式 (1) と式 (2) で用いる観測点間の位相差は、フッサフェルを基準として求めたものである。この位相差は、観測点間のクロススペクトル解析より、データウインドウ 10 分から得られたスペクトルピークにおける値とした。スペクトルピークの決定は、観測点ごとのピークにおける周波数が同じになる (ELLIS, 1960; OBERTZ and RASPOPOV, 1968) ように、全観測点間から求めたクロススペクトルの二乗和 (H, D 両成分とも加えた) から行った。

また、今回の導出において、午前側のイベントから  $Q$ -value (クロススペクトルの二乗和

での値から求めた) が 1.0 以上, 南極側観測点との coherence が 0.8 以上のときだけを選んでいる. 共役点を導出する際は, Pc5 脈動の振動モードは odd mode であると仮定した (KOKUBUN *et al.*, 1976). すなわち, 式 (2) での  $C_H$  は  $0^\circ$ ,  $C_D$  は  $\pm 180^\circ$  として解析を行っている.  $C_D$  の正負の判断は, 図の範囲内にプロットされるうち, TSYGANENKO (1987) のモデルから求めた共役点に近い方の値を選んでいる.

このような方法で行った解析結果を, 以下に示す.

### 3.1. 1988 May 7 0730–0830 UT イベントの解析例

式 (1) を用いて, 1988 May 7 0730–0830 UT (図 1) の期間中にアイスランド 3 観測点で得られた地磁気脈動データの解析から求めた  $1^\circ$  当たりの位相変化の大きさの時間変化を図 2 に示す. ここで  $1^\circ$  当たりの位相変化の大きさとは, 緯度および経度方向  $1^\circ$  当たりに変化する位相差の大きさの割合を表す. この図でプロットされている時刻は, データウインドウの初めの時刻である. そのデータウインドウは 5 分ずつスライドしながら導出を行っていく. また, 欠測となっているところは, ピークが求まらなかったデータウインドウを表し

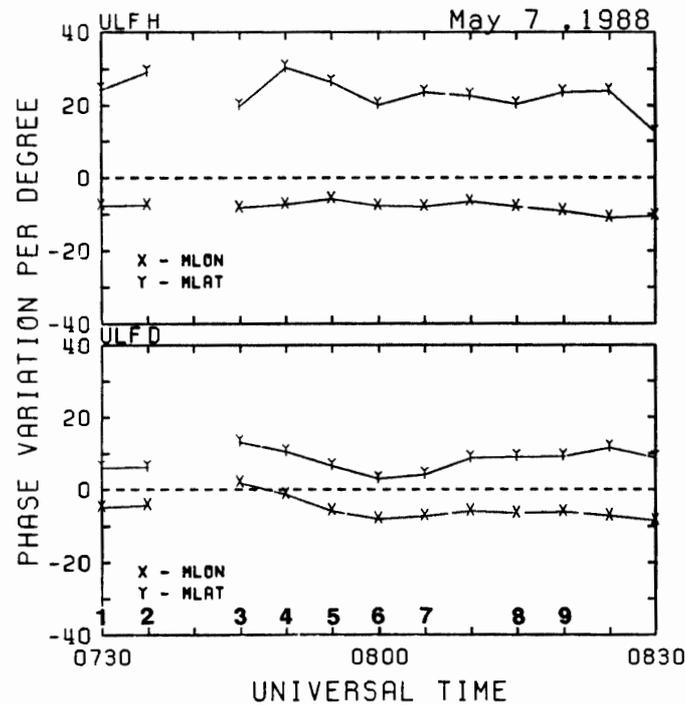


図 2 図 1 のアイスランド 3 点で観測された Pc5 脈動から導出された H と D 成分の位相変化の時間的変化. 図中の X と Y は各成分の東西と南北方向に対する距離間隔  $1^\circ$  当たりの位相変化の大きさを表した.

Fig. 2. Temporal dependence of phase variation of the H (upper panel) and the D (lower panel) components estimated from Pc5 geomagnetic pulsations observed at the three stations in Iceland at the event in Fig. 1. X and Y plotted in this figure show phase variations of geomagnetic north-south and east-west directions as a unit of phase difference (degree) at a spatial separation of one degree.

ている。図 2 の上の図は H 成分の位相変化を表し、下の図は D 成分の位相変化を表している。それぞれの図の X は、その成分における東西方向の位相変化を示し、+ 側が東方向の伝搬となる。ここで、この値は東西方向の波数、または *m*-number に相当する。Y は南北方向の位相変化を示し、+ 側が北方向への伝搬を示している。

図 2 から、H, D 成分ともに西方向の伝搬を示している、その波数 (*m*) は 5-10 (波長  $36^\circ \sim 72^\circ$ ) の大きさである。この波数の大きさと OLSON and ROSTOKER (1978) が示した周波数との関係式から求めた波数とを比較すると、OLSON and ROSTOKER の関係式では *m* ~ 6-11 (周波数 5.9 m Hz (170 s)) 程度になることから、これらとかなりよい一致を示している。また、H, D 成分ともに北方向にいくほど位相が遅れる変化を示しているが、その  $1^\circ$  当たりに変化する位相差の大きさは H 成分では 20-30 (波長  $12^\circ \sim 18^\circ$ ) であるのに対して、D 成分では 5-10 (波長  $36^\circ \sim 72^\circ$ ) である。このように、H 成分の位相変化の大きさが D 成分よりもおおきくなる傾向は、HUGHES and SOUTHWOOD (1976) や WOLKER *et al.* (1979)

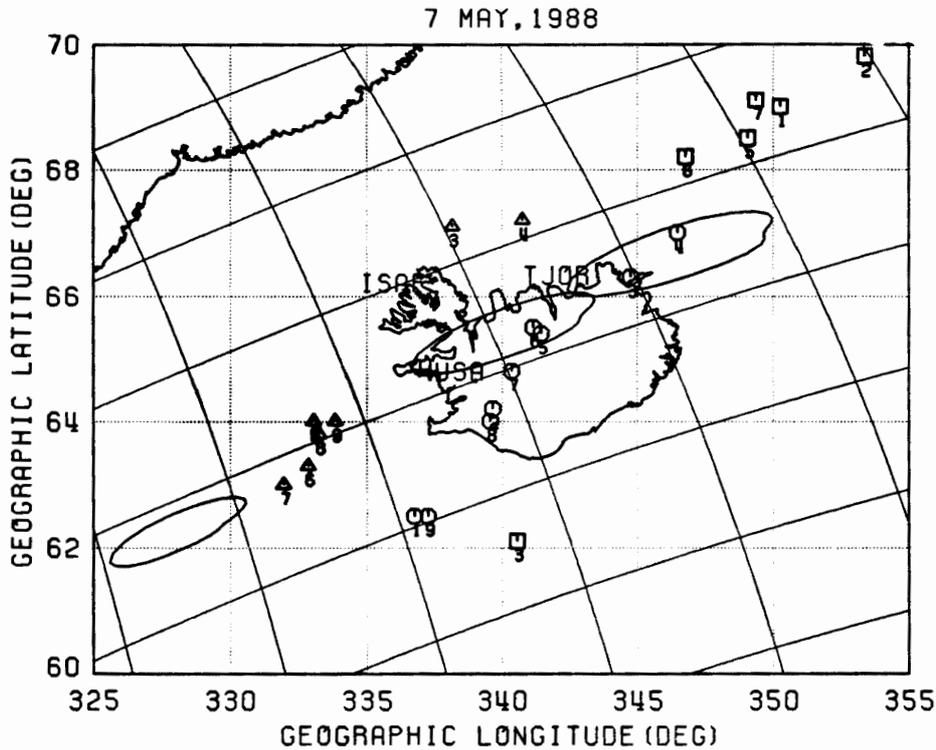


図 3 図 2 の  $1^\circ$  当たりの位相変化の大きさから導出した昭和基地、あすか観測拠点、マラジョージナヤ基地の共役点。○, □, △ は昭和基地、あすか観測拠点、マラジョージナヤ基地の共役点を表す。楕円は TSYGANENKO (1987) モデルから求めた 5 月 7 日  $K_p=1$  の時の 3 観測点に対応する共役点の日変化である。

Fig. 3. Geomagnetic conjugate points of Syowa (SYOW), Asuka (ASUK), Molodezhnaya (MOLO) estimated by using phase variation per degree in Fig. 2. The ellipse is the daily variation of geomagnetic conjugate point of three stations which is derived from TSYGANENKO (1987) global geomagnetic field model on May 7 for  $K_p=1$ .

が示した図から、共鳴点から低緯度への H, D 成分の位相変化の関係と一致している。これらの位相変化の大きさは、SAKA *et al.* (1982) によって示された、地磁気緯度  $65^\circ$  付近における H, D 成分それぞれの  $1^\circ$  当たりの位相変化の大きさ 25 と 7 程度の値ともよい一致を示している。以上のように、式 (1) による Pc5 脈動の位相変化の大きさ (または波数) は、これまでの他の著者によって求められた値と同程度であった。

この  $1^\circ$  当たりの位相変化の大きさ (または波数) の時間変化 (図 2) と式 (2) から、昭和基地、マラジョージナヤ基地、あすか観測拠点の共役点を求めたものが図 3 である。昭和基地、マラジョージナヤ基地、あすか観測拠点に関して Pc5 脈動から求められた共役点は、それぞれ図中の ○, □, △ のプロットで表している。また、その各プロットの下に書かれている数字は、図 2 の時刻の上にかかれている数字の時における共役点であることを表している。点線は地理座標、実線は IGRF 1985 model から求めた地磁気座標を経度方向  $5^\circ$ 、緯度方向  $2^\circ$  ごとに表したものである。楕円のように描かれている曲線は、TSYGANENKO (1987) の地球磁場モデル (long version) から計算された 5 月 7 日の *Kp*-index が 1 (1988 年 5 月 7 日 0600–0900 UT の *Kp*-index は 1 であった) のときの共役点の日変化を表し、左からあすか観測拠点、昭和基地、マラジョージナヤ基地にそれぞれ対応している。

図 3 中の Pc5 地磁気脈動から導出した地磁気共役点 (以降、Pc5 脈動からの共役点と呼ぶ) と TSYGANENKO (1987) の地球磁場モデルから求めた地磁気共役点 (以降、Tsyganenko モデルによる共役点と呼ぶ) との比較から、Pc5 脈動からの共役点はあすか観測拠点では Tsyganenko モデルによる共役点よりも地磁気東方向、マラジョージナヤ基地では地磁気北東方向、そして、昭和基地では地磁気東方向と南西方向にあることが判明した。このように観測点ごとに Pc5 脈動からの共役点は Tsyganenko モデルによる共役点に対して少し異なる。また、各観測点で観測された Pc5 脈動の経度方向の 1 波長は  $36^\circ \sim 72^\circ$  であることから (図 2)、プロットされた箇所はすべて Tsyganenko モデルによる共役点から  $1/2$  波長内 (ほとんど  $1/4$  波長内) に位置している。

### 3.2. 2 カ月データ (1988 年 3 月と 5 月) からの解析結果

前述した方法を用いて、1988 年 3 月と 5 月中の午前側で観測された Pc5 脈動データに対して、南極側 3 点の共役点の導出を行ったものが図 4~6 である。図 4 は昭和基地に関して、図 5 はあすか観測拠点に関して、図 6 はマラジョージナヤ基地に関して共役点を導出したものである。各図の形式は図 3 と同じであるが、各観測点の Tsyganenko モデルによる共役点の日変化がふたつ示されている。Tsyganenko モデルによる共役点の日変化は季節や *Kp* の違いによって大きく変化する (ONO, 1987) ことは知られているが、本研究では Pc5 脈動のイベントが観測された時の日付/時刻と *Kp*-index の中から日変化の最も小さくなる時と大きくなる時のものを選んでいく。つまり、解析期間のイベント中の *Kp*-index で日変

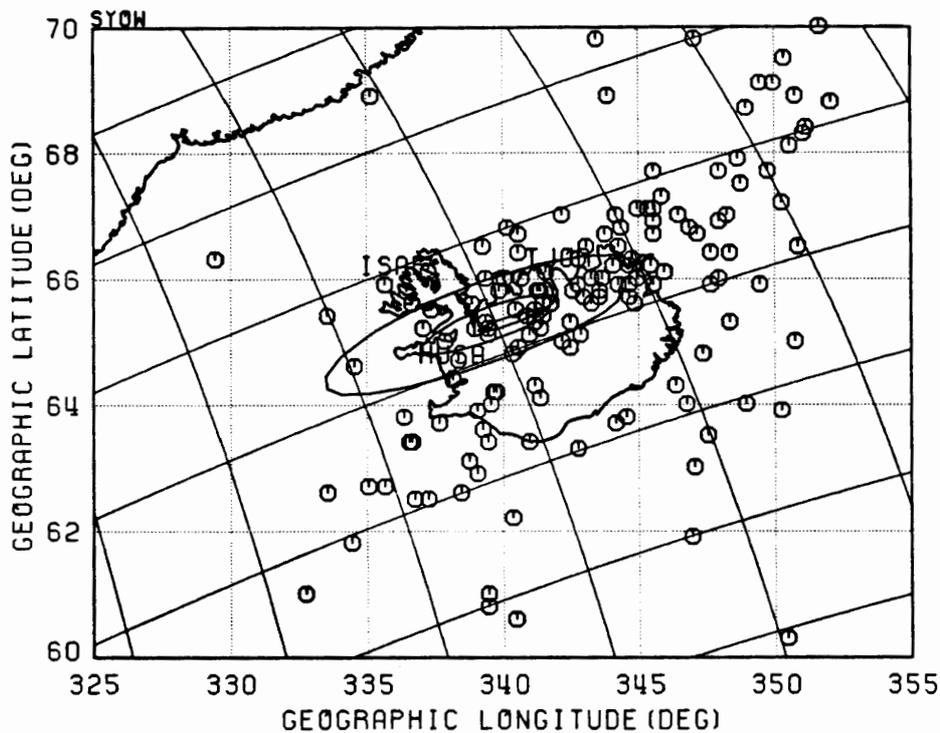


図 4 1988 年 3 月と 5 月に観測された Pc5 脈動から導出した昭和基地の共役点。小さい楕円は TSYGANENKO (1987) モデルから求めた 3 月 27 日  $Kp=3$  の共役点の日変化であり、大きい楕円は 5 月 10 日  $Kp=3$  のものである。

Fig. 4. Geomagnetic conjugate points of SYOW estimated from Pc5 pulsations observed during March and May in 1988. The daily variation of geomagnetic conjugate point derived from TSYGANENKO (1987) global geomagnetic field is also shown in this figure. The small ellipse is the daily variation on March 27 for  $Kp=3$  and the large one is that on May 10 for  $Kp=3$ .

化を表したうち、最も小さかった時 (3 月 27 日の  $Kp$ -index が 3 の時) の日変化を小さい楕円で、最も大きかった時 (5 月 10 日の  $Kp$ -index が 3 の時) のものを大きい楕円で示している。各図の Pc5 脈動からの共役点と Tsyganenko モデルによる共役点の比較を行うと、図 4 での昭和基地の Pc5 脈動からの共役点は、全体的に 2 つの Tsyganenko モデルによる共役点の日変化の特に午前側の近傍に位置している。そして Tsyganenko モデルによる共役点に対してずれるものは、地磁気南方向から東北方向にかけて顕著に見られる。図 5 のあすか観測拠点では、Tsyganenko モデルによる共役点の地理的東側から北側までを比較すると、昭和基地に比べ全体的に分散的であり、Tsyganenko モデルによる共役点の近傍にプロットされているものが少ない。図 6 のマラジョージナヤ基地では、Tsyganenko モデルによる共役点の地理的西側から南側までを比較すると、あすか観測拠点に比べると Tsyganenko からの共役点の近傍に多い。しかし、昭和基地ほどではない。そして、あすか観測拠点とマラジョージナヤ基地の Pc5 脈動からの共役点は、昭和基地が示すような Tsyganenko モデルによる共役点からのずれのような特徴は見られない。

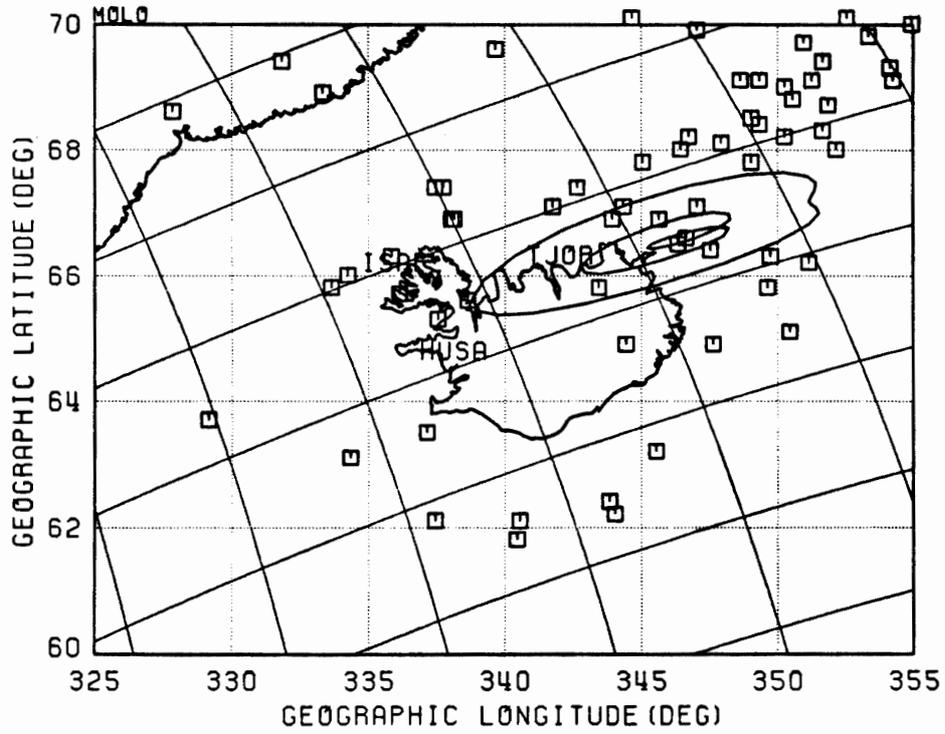


図 5 図 4 と同様にあすか観測拠点の共役点  
Fig. 5. Same as Fig. 4 for ASUK.

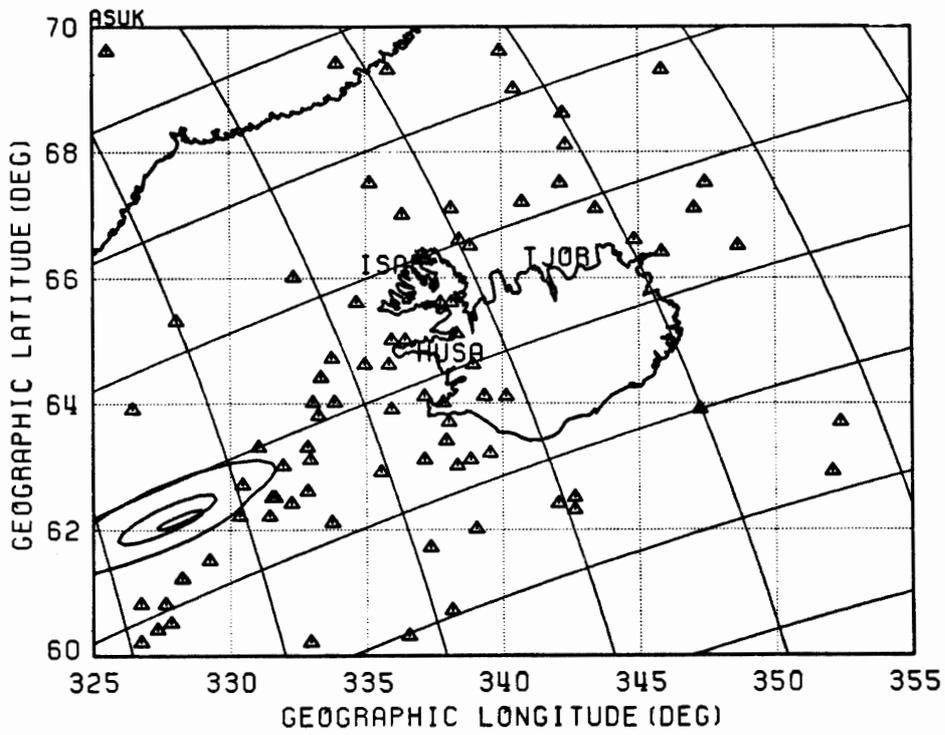


図 6 図 4 と同様にマラジョージナヤ基地の共役点  
Fig. 6. Same as Fig. 4 for MOLO.

### 3.3. 地磁気座標上における共役点の緯度、経度及び空間的頻度分布

図 4 で地理座標上にプロットされた Pc5 脈動からの共役点を, IGRF 1985 model から求めた地磁気座標上に表したものが, 図 7 である. 図 4 と同じ Tsyganenko モデルによる共役点の日変化が 2 つ示されている. 図の右には緯度に対する頻度分布を, 図の上には経度に対する頻度分布を表わしている. 頻度分布は, 緯度では  $1^\circ$  ごと, 経度では  $2^\circ$  ごとに分けてもとめた. 横軸の経度幅  $40^\circ$  は, 波数が  $m=9$  の時の波長の長さに相当する.

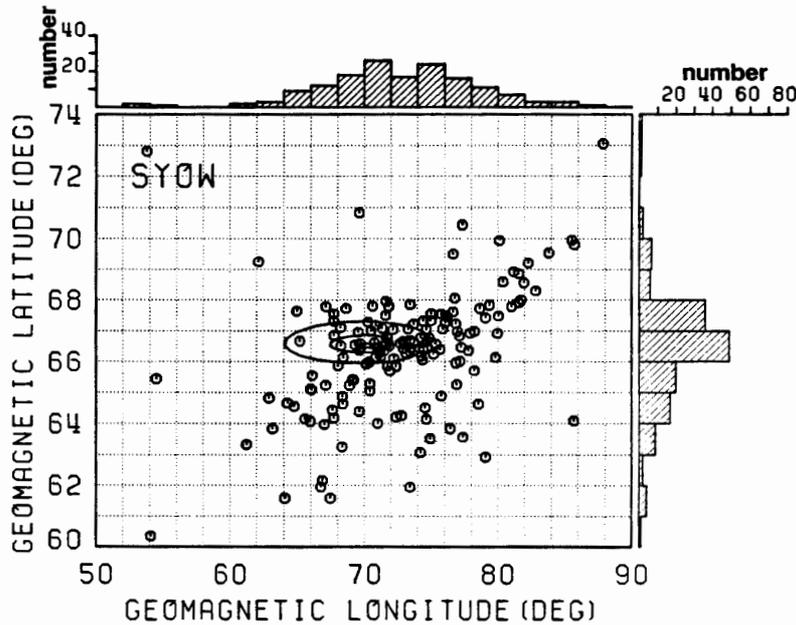


図 7 図 4 の Pc5 脈動から推定した昭和基地の共役点の地磁気座標と緯度経度方向の頻度分布

Fig. 7. Histograms of conjugate points of SYOW as a function of invariant latitude and that of geomagnetic longitude rearranged from Fig. 4.

図 4 と同じように, Pc5 脈動からの共役点は Tsyganenko モデルによる共役点の周りに多く分布している. その頻度に対しては, 緯度方向は Tsyganenko モデルによる共役点と重なる  $66^\circ \sim 68^\circ$  に多く表れ, 経度方向は  $m=9$  の波長から考えると, およそ  $1/2$  波長内にすべて位置する. 特に Tsyganenko モデルによる共役点の午前側に重なる  $1/5$  波長内に, 頻度の高いものが多くあらわれる. そして, Tsyganenko モデルによる共役点よりずれるものは, 南方向から北東方向にかけて顕著に表れている. その中でも南北方向にずれるものは, 北方向 (北東方向を除いて) では Tsyganenko モデルによる共役点より  $1^\circ$  程度内の緯度に分布するのに対し, 南方向では  $5^\circ$  程度内の緯度に広く分布しているような, 分布の違いが表れている.

図 7 の経度緯度における頻度分布を空間的濃淡表示にしたものが図 8 である. 図の形式は図 7 と同じであるが, 右の濃淡で頻度の度合いを示している. 図には表していないが白は

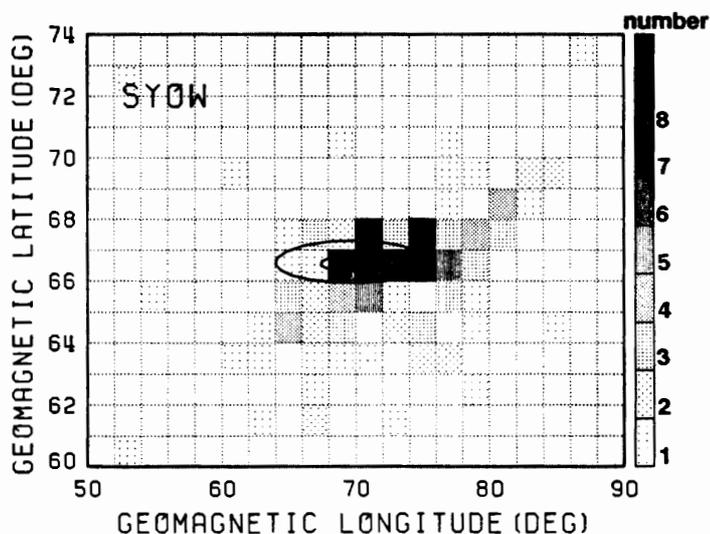


図 8 図 7 の昭和基地の共役点の空間的な頻度分布  
 Fig. 8. Spatial distribution of conjugate points of SYOW rearranged from Fig. 7.

0 を表わす。濃くなるごとに頻度を増して右の数字に対応し、黒は 8 以上を表している。頻度は経度幅  $2^\circ$ 、緯度幅  $1^\circ$  の幅内にあるものからとめた。

空間的な頻度分布から見ても、Tsyganenko モデルによる共役点の午前側の範囲に当たる経度  $70^\circ \sim 76^\circ$ 、緯度  $67^\circ$  に 8 以上の頻度が多く表われ、そして次にその周りに多く表れている。その分布の現れかたは、北方向では頻度が多く  $1^\circ$  以内に分散し、南方向では頻度が少なく広範囲に分散している。

#### 4. 考 察

Pc5 脈動から推定した共役点の位置は、昭和基地が最も分散は小さく Tsyganenko モデルによる共役点に近い、逆にあすか観測拠点やマラジョージナヤ基地は分散が大きく Tsyganenko モデルによる共役点から離れている。その原因の可能性としては、HUGHES and SOUTHWOOD (1976) と POULTER (1982) が示した H, D 成分の緯度方向の位相変化において、線形と仮定できる緯度は狭く、線形として求めた位相変化の大きさが異なってしまったため、このように分散の大小が特に緯度方向の相緯として現れたと考えられる。本論文では、その位相変化の大きさが線形と仮定できる範囲は、アイスランド 3 観測点の近傍と思われる。したがって、この 3 点に近いほど位相変化の大きさは、実際の値と一致すると思われることから、その 3 観測点の近傍に共役点がある昭和基地は、共役点の遠いあすか観測拠点やマラジョージナヤ基地よりは分散が小さくなると考えられる。

このように、ほかの 2 観測点と比較すると昭和基地の Pc5 脈動から推定した共役点は、より Tsyganenko モデルによる共役点に近い。しかし、その昭和基地から推定した共役点は、Tsyganenko モデルによる共役点よりも地磁気南方向から北東方向にかけてずれている。そ

の中でも北東方向にずれるものは顕著である。この北東方向のずれに関する原因の考察として、Tsyganenko モデルの正当性の検討も必要であるが、ここでは昭和基地の地下に生じた誘導電流（海岸線効果と考えられる）からの位相変化によって、生じる効果を検討してみた。この位相変化については定量的にどの成分が進み、遅れているのかわからないが、H-D 間位相差から H 成分が進むか、もしくは D 成分が遅れる (KATO *et al.*, 1991)。ここで、この北東方向のずれを示すのに、H, D 成分の位相変化を  $\Delta\phi_H$ ,  $\Delta\phi_D$  を用いると、式 (2) より、

$$\begin{aligned}\Delta\phi_H &= \mathbf{K}_H \cdot \Delta\mathbf{r}_e, \\ \Delta\phi_D &= \mathbf{K}_D \cdot \Delta\mathbf{r}_e,\end{aligned}\quad (3)$$

で表される。 $\mathbf{K}_H$ ,  $\mathbf{K}_D$  は式 (2) での値、 $\Delta\mathbf{r}_e$  は位相変化によって生じた共役点の位置座標のずれをそれぞれ表すベクトルである。さらに、 $\Delta\mathbf{r}_e$  は緯度方向  $\Delta X$  と経度方向  $\Delta Y$  となり、 $\mathbf{K}_H$ ,  $\mathbf{K}_D$  はそれぞれ緯度方向  $\mathbf{K}_{HX}$ ,  $\mathbf{K}_{DX}$  と経度方向  $\mathbf{K}_{HY}$ ,  $\mathbf{K}_{DY}$  に書き換えると、式 (3) は次のように現される。

$$\begin{aligned}\Delta X &= (\mathbf{K}_{YD}\Delta\phi_H - \mathbf{K}_{YH}\Delta\phi_D)/D, \\ \Delta Y &= (\mathbf{K}_{XH}\Delta\phi_D - \mathbf{K}_{XD}\Delta\phi_H)/D, \\ D &= \mathbf{K}_{XH}\mathbf{K}_{YD} - \mathbf{K}_{YH}\mathbf{K}_{XD}.\end{aligned}\quad (4)$$

地下の誘導電流によって生じた位相変化は、 $\Delta\phi_H$  は正、 $\Delta\phi_D$  は負である。そして前述より午前側での波数は、 $\mathbf{K}_{XH}$  と  $\mathbf{K}_{XD}$  は  $-10 \sim -5$ 、 $\mathbf{K}_{YH}$  は  $20 \sim 30$ 、 $\mathbf{K}_{YD}$  は  $5 \sim 10$  程度である。これらと式 (4) から、 $D$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  は正となる。つまり、昭和基地の地下に生じた誘導電流は、Pc5 脈動からの共役点を北東方向にずれを生じさせているものと推測される。

位相変化が線形であると仮定できる範囲、つまりアイスランド 3 観測点近傍に、昭和基地の共役点はあるので、ほかの観測点よりも Pc5 脈動からの共役点は分散的でなくなり、実際の共役点とより一致すると考えられる。そして、たとえば昭和基地の近傍の地下の誘導電流から生じたと考えられる位相変化が位相差に含まれていると、Pc5 脈動からの共役点は分散的ではないが、ずれが顕著に表れる。このような位相変化を考えると、昭和基地の Pc5 脈動からの共役点は、Tsyganenko モデルによる共役点にかなり近いところに分布すると考えられる。また、本研究では TSYGANENKO (1987) の地球磁場モデルから求めた共役点との比較を行ったが、このモデルは一般的に日付/時刻そして Kp-index それぞれに対しての平均的なものであるため、実際とは異なると思われる。このことが、Pc5 脈動からの共役点が Tsyganenko モデルによる共役点に対して、北東方向を含めたほかの方向へのずれとなって表れていると考えられる。

これらのことから、Pc5 脈動から推定した共役点は Tsyganenko モデルによる共役点と統計的によい一致を示し、そして実際の共役点にかなり近いのではないかと結論される。

## 5. ま と め

TONEGAWA and SATO (1987) の方法を用いて, Pc5 脈動の定在振動特性と水平面における位相変化を線形とする仮定から, アイスランド側に波数を求め, そして南極側 3 点の共役点の推定を行った. そして, Pc5 脈動から推定した共役点と TSYGANENKO (1987) のモデルから求めた共役点を統計的に比較した結果, 次のようなことがまとめられる.

- 1) アイスランドの 3 観測点で観測された午前側 Pc5 脈動の緯度経度方向それぞれ  $1^\circ$  当たりの位相変化の大きさ(または波数)は, これまでのほかの著者の結果と同程度である.
- 2) 南極観測点の共役点が, アイスランド 3 観測点の近傍, または線形と仮定できる範囲にある時, Pc5 脈動から求めた共役点の分布の分散は小さくなる.
- 3) 昭和基地の Pc5 脈動から推定した共役点と TSYGANENKO (1987) の地球磁場モデルから求めた共役点はよい一致を示している. 最もよい一致を示し頻度が高くなるのは, 経度方向の範囲では  $70^\circ \sim 76^\circ$  (これは  $1/5$  波長以下内である.), 緯度方向では  $66^\circ \sim 67^\circ$  である.
- 4) 昭和基地の Pc5 脈動から求めた共役点が, Tsyganenko モデルから求めた共役点より地磁気北東方向へずれるのは, 昭和基地の地下に生じた誘導電流による位相変化の効果と考えられる.

## 謝 辞

国立極地研究所の受託学生として研究のご機会を与えてくださいました東海大学の青山巖教授, Tsyganenko の地球磁場モデルのプログラムを使用させていただいた国立極地研究所の小野高幸助教授, アイスランドの地磁気観測にご支援頂いたアイスランド大学の Th. SAEMUNDSSON 教授, 南極昭和基地において地磁気観測を行った第 28 次南極越冬隊の方々, 本研究に対し有益なご指導およびご指摘を与えて下さった国立極地研究所の平澤威男, 江尻全機教授そして超高層部門の方々には, 深く感謝致します. また, 本研究は国立極地研究所情報科学センターの計算機をもちいて, 解析を行いました, その際有益なご指導を与えて下さった国立極地研究所情報科学センターの内田邦夫技官には, 深く感謝致します.

## 文 献

- ANDERSON, B. J., ENGBRETSON, M. J., ROUNDS, S. P., ZANETTI, L. J. and POTEMRA, T. A. (1990): A statistical study of Pc3-5 pulsations observed by the AMPTE/CCE magnetic fields experiment 1. Occurrence distributions. *J. Geophys. Res.*, **95**, 10495-10523.
- CUMMINGS, W. D., DEFORREST, S. E. and MCPHERRON, R. L. (1978): Measurements of the Poynting vector of standing hydromagnetic waves at geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.*, **83**, 778-793.
- ELLIS, G. R. A. (1960): Geomagnetic micropulsations. *Aust. J. Phys.*, **13**, 625-632.
- HUGHES, W. J. and SOUTHWOOD, D. J. (1976): An illustration of modification of geomagnetic pulsation structure by the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **81**, 3241-3247.
- KATO, K., AOYAMA, I., TONEGAWA, Y., SATO, N. and SAKA, O. (1991): Phase shift of Pc5 magnetic pulsation produced by induced currents around Syowa Station. 90th SGEPS Fall Meeting

Abstract, C31-P24.

- KOKUBUN, S., McPHERRON, R. L. and RUSSELL, C. T. (1976): Ogo 5 observations of Pc5 waves: Ground-magnetosphere correlations. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5141–5149.
- KOKUBUN, S., KIVERLSON, M. G., McPHERRON, R. L., RUSSELL, C. T. and WEST, H. I. (1977): Ogo 5 observations of Pc5 waves: Particle flux modulations. *J. Geophys. Res.*, **82**, 2774–2786.
- OBERTZ, P. and RASPOPOV, O. M. (1968): Study of the spatial characteristics of type Pc5 geomagnetic pulsations. *Geomagn. Aeron.*, **8**, 424–427.
- OLSON, J. V. and ROSTOKER, G. (1978): Longitudinal phase variations of Pc5 micropulsations. *J. Geophys. Res.*, **83**, 2481–2488.
- ONO, T. (1987): Temporal variation of the geomagnetic conjugacy in Syowa-Iceland pair. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **48**, 46–57.
- POULTER, E. M. (1982): Pc5 micropulsation resonance region observed with the STARE radar. *J. Geophys. Res.*, **87**, 8167–8173.
- SAMSON, J. C. and ROSTOKER, G. (1972): Latitude-dependent characteristics of high-latitude Pc4–Pc5 micropulsations. *J. Geophys. Res.*, **77**, 6133–6143.
- SAKA, O., KIM, J. S. and SUGIURA, M. (1982): A cross spectral variations of high-latitude Pc5 pulsations in the morning sector. *J. Geophys. Res.*, **87**, 9129–9134.
- TONEGAWA, Y. and SATO, N. (1987): A conjugate area study of giant geomagnetic pulsations. *Proceedings of Chapman Conference on Plasma Wave and Instabilities in Magnetospheres and at Comets, Sendai*, 317–320.
- TSYGANENKO, N. A. (1987): Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels. *Planet. Space Sci.*, **35**, 1347–1358.
- WOLKER, A. D. M., GREENWALD, R. A., STURAT, W. F. and GREEN, C. A. (1979): STARE auroral radar observations of Pc5 geomagnetic pulsations. *J. Geophys. Res.*, **84**, 3373–3388.
- YUMOTO, Y., SAITO, T. and SAKURAI, T. (1983): Local time asymmetry in the characteristics of Pc5 magnetic pulsations. *Planet. Space Sci.*, **31**, 459–471.

(1991年12月16日受付; 1992年1月20日改訂稿受理)