

## 低緯度地磁気脈動と電離層

坂 翁介\*・飯島哲二\*・糸長雅弘\*・石津美津雄\*・北村泰一\*

### Ionospheric Effects on Low Latitude Geomagnetic Micropulsations

Ousuke SAKA\*, Tetsuji IJIMA\*, Masahiro ITONAGA\*  
Mitsuwo ISHIZU\* and Taichi KITAMURA\*

**Abstract:** Low latitude geomagnetic micropulsations have been observed at ASO (22°N, 198°E in geomagnetic coordinate) by use of a superconducting magnetometer, and signals in the period range from 50 to 120 s (P1 2 and Pc 4) were analyzed in comparison with the ionospheric sounding data. It is found that the increment of the *D* component of the pulsations appears coincident with the *E* layer ionization enhancement, and at the same time there appears a change of polarization ellipticity from linear to elliptical. It is suggested that the polarization change is attributable to the coupling of the *H*- and the *D*-components by the Hall current in the *E* layer.

**要旨:** 低緯度 (ASO: 地磁気緯度 22°N) における P1 2, Pc 4 型の地磁気脈動に対する電離層の影響を調べた。地磁気脈動は超伝導磁力計によって測り、電離層のデータは *E* 層, *F*2 層の臨界周波数の時間平均値を用いた。解析の結果、朝方に起こる電離層臨界周波数の増加を境にして、その前後で脈動の偏波軸の方向およびだ円率にちがいが出ることがわかった。つまり南北に主軸をもつ直線偏波が、電離層の出現ののち、だ円偏波へと変化する。この結果は、低緯度地磁気脈動に対して *E* 層が、重要な役割をはたしていることを示している。その役割についてモデルを作り議論した。

### 1. はじめに

我々は、低緯度地磁気脈動がどのようにして磁気圏から伝搬してくるのかを調べるため、ASO において超伝導磁力計による観測を続けている。脈動は磁気圏内の現象であるため、地上観測からその有様を調べる場合、電離層、大気圏の影響を考慮しなければいけない。電離層および大気圏の効果は、脈動の伝搬形態に大きく依存するため、地上観測から逆に磁気圏内の脈動の形態を推測することが可能になる。ここでは ASO での観測結果から、夜明けにともなう電離層電子密度の上昇が、脈動の偏波を変化させていることを示す。この結果

\* 九州大学理学部物理教室, Department of Physics, Kyushu University, 33, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812.

が、脈動の伝搬形態とどういう関連があるのか、簡単なモデルを立て議論する。

## 2. 観測結果

1976年12月より翌年12月までの間欠的な観測から、以下の5例について脈動が記録され、そのすべての場合に電離層効果が現れた。それらは、日本時間で1976年12月1日0時より8時、同年12月2日0時より8時、1977年5月21日2時より12時、同年7月13日0時より9時、および同年12月1日3時より10時に得られた、いずれも夜から午前にかけての現象で、電離層テータと比較する場合に都合が良い。

図1にそれぞれの観測日の結果を、電離層E、F2層の臨界周波数の時間平均値と共に並べて示した。ASOの脈動テータは、原始データ(直流より1 Hzまでの帯域を持つ)に周期20秒と200秒で18 dB/octの切れをもつ帯域通過フィルターをかけたのちプロットしたものである。比較のため南極昭和基地(Syowa)のH成分を並記した。ここで議論するのは、

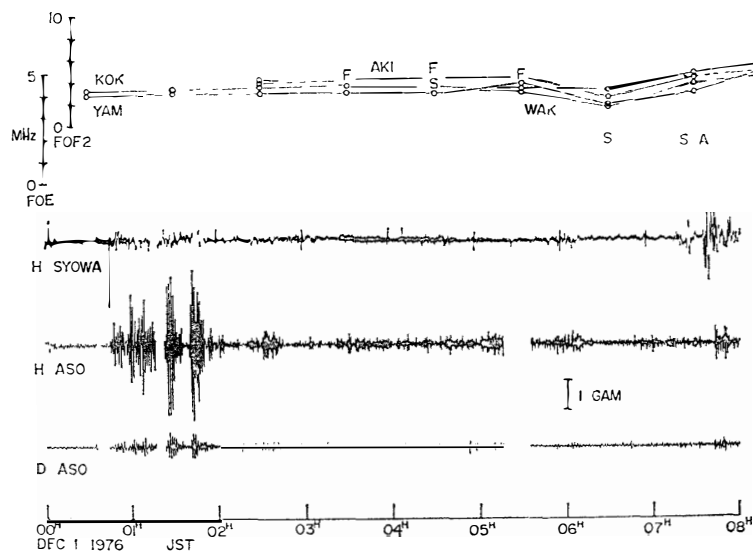


図 1a 1976年12月1日のASOで観測した脈動の水平成分とその時の電離層E、F2層臨界周波数テータ。電離層テータは稚内、秋田、国分寺、山川、沖縄の各観測所の時間平均値を用いた。比較のため昭和基地の脈動H成分も示している。

Fig 1a Micropulsations and ionospheric sounding data of December 1, 1976. Sounding data are from five stations (Wakkanai 35°N, 207°E, Akita, 30°N, 206°E; Kokubunji 26°N, 206°E, Yamagawa 20°N, 198°E, Okunawa 15°N, 196°E in geomagnetic coordinates) H component of Syowa Station, in Antarctica, is presented for comparison Symbols in the FOE and FOF2 plots indicate impossible measurements due to a lower than layer (A), absorption in the vicinity of  $f_{min}$  (B), presence of spread echoes (F) and interference (S)

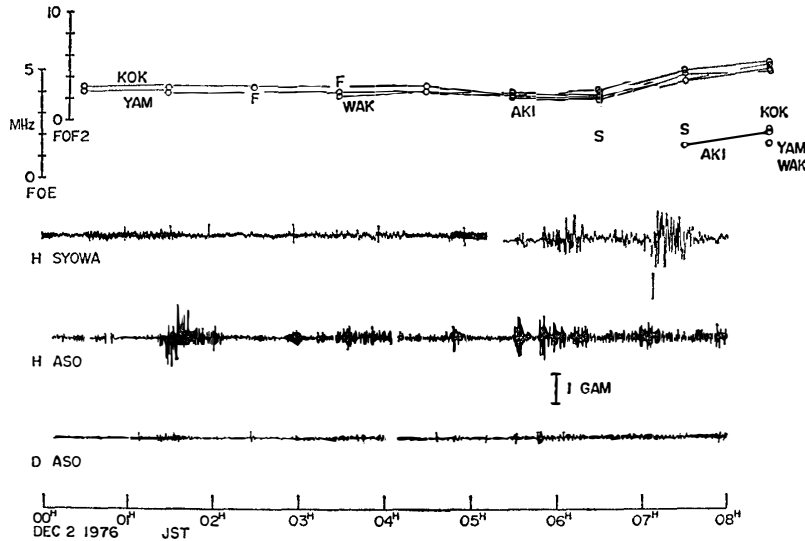


図 1b 1976 年 12 月 2 日の ASO の脈動水平成分と電離層データ  
 Fig. 1b. Micropulsations and ionospheric sounding data of December 2, 1976. See Fig. 1a legend.

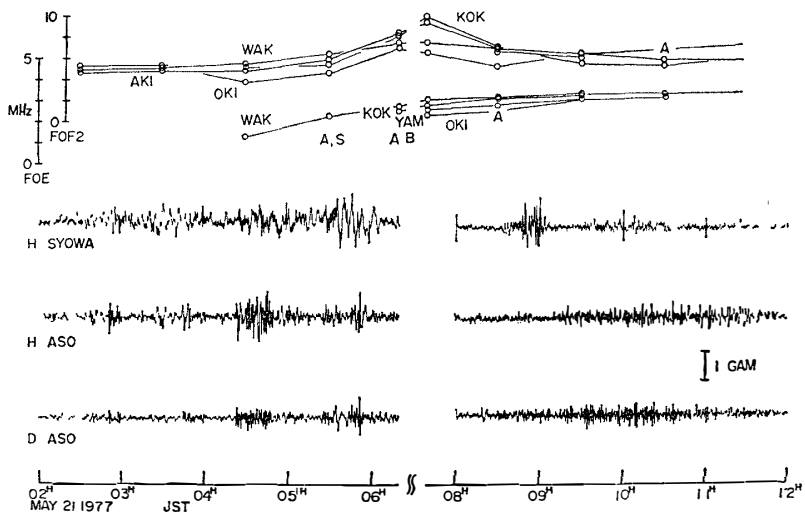


図 1c 1977 年 5 月 21 日の ASO の脈動水平成分と電離層データ。6 時より 8 時までの間脈動現象は出現していない  
 Fig. 1c. Micropulsations and ionospheric sounding data of May 21, 1977. No pulsation activities were observed from 6 to 8 LT. See Fig. 1a legend.

ASO の D 成分の振幅と臨界周波数の相関関係である。E, F2 層の電子密度が、夏は 5 時、冬は 9 時頃より日の出の影響で上昇する。それと同時に、今まで小さかった ASO の D 成分の振幅が大きくなり H 成分にほぼ等しくなる。これは、1977 年夏の 2 例 (Fig. 1c, d) および 1977 年冬の例 (Fig. 1e) に示されているが、残念ながら 1976 年冬の 2 例 (Fig. 1a, b)

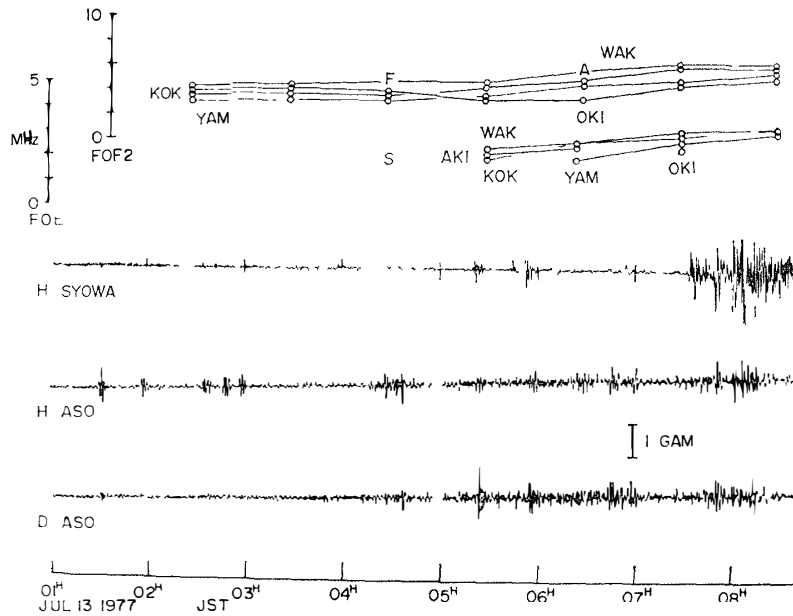


図 1d 1977 年 7 月 13 日の ASO の脈動水平成分と電離層データ  
 Fig 1d Micropulsations and ionospheric sounding data of July 13, 1977 See Fig 1a legend

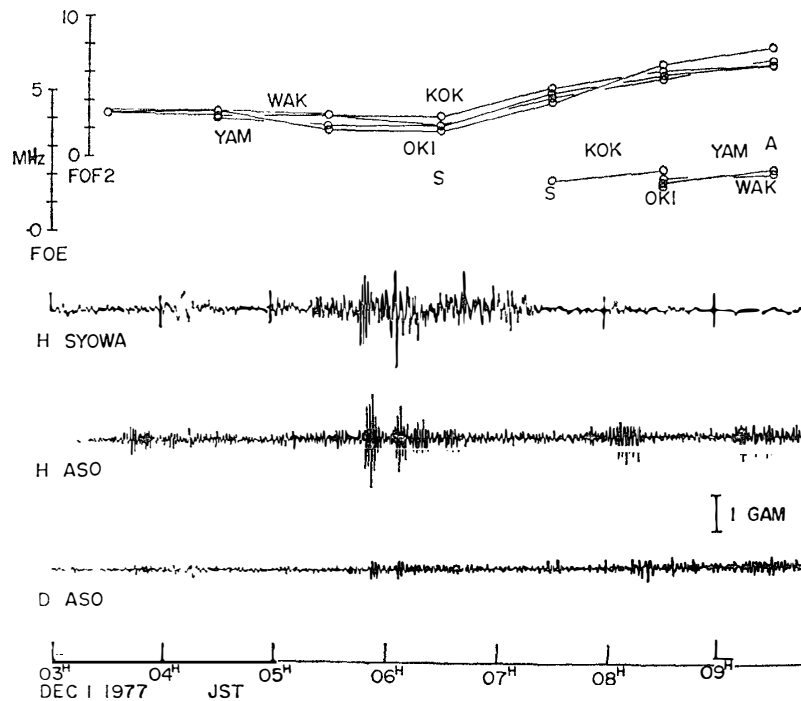


図 1e 1977 年 12 月 1 日の ASO の脈動水平成分と電離層データ  
 Fig 1e Micropulsations and ionospheric sounding data of December 1, 1977. See Fig 1a legend

では、日の出以前で観測および脈動現象自体が終っていて確認できない。しかし明らかに日の出以前は、 $D$  成分振幅が  $H$  成分に比べずっと小さい。我々は、国立極地研究所で開発された会話型波動解析プログラムを用いて個々の例についてくわしく調べた。その結果は、図 2 に示した。図中の phase は、 $H$  と  $D$  成分間の位相差を示す。正の場合は回転が時計回りである。Orientation は、主軸の傾きであり  $0^\circ$  であれば南北を、正になればそれより

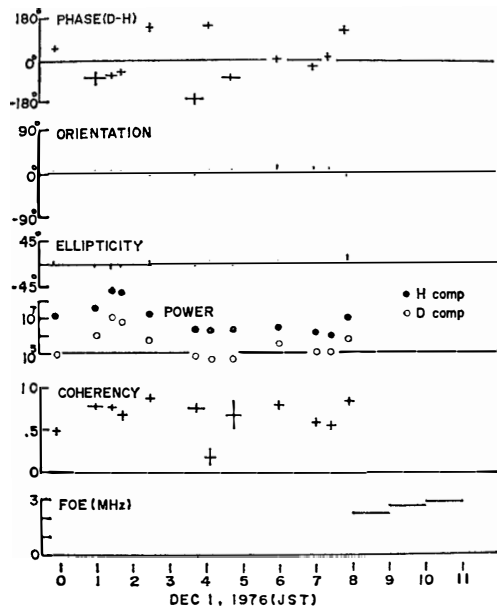


図 2a 1976 年 12 月 1 日のデータを解析した結果。  $D$  成分と  $H$  成分の位相差 (Phase), 主軸の方向 (Orientation), 偏波率 (Ellipticity), 各成分のスペクトル密度 (Power), 水平成分間の相関係数 (Coherency), および  $E$  層臨界周波数の 5 観測所での平均値をそれぞれ示した。

Fig. 2a. Detailed analyses of Fig. 1a. From top to bottom, it shows phase difference between  $H$  and  $D$  components, orientation of major axis (north-south and east-west correspond to  $0^\circ$  and  $\pm 90^\circ$ ), ellipticity of the polarization (linear and circular correspond to  $0^\circ$  and  $\pm 45^\circ$ , in which the plus and minus signs correspond to clockwise and counterclockwise, respectively), power density of  $H$  and  $D$  components, phase coherency of  $H$  and  $D$  components and critical frequency of  $E$  layer averaged over five stations.

時計回りに傾くことを示す。Ellipticity は、 $H$ - $D$  面内での円率を表す。  $45^\circ$  の時、時計回りの、  $-45^\circ$  のとき反時計回りの円偏波となる。  $0^\circ$  のときは直線偏波を表す。 Power は、各成分のスペクトル密度を表す。 Coherency は、  $H$ - $D$  成分間の相関を示している。相関がなくなると 0 になる。最後に  $E$  層の臨界周波数の日本国内 (稚内, 秋田, 国分寺, 山川, 沖縄) での平均値を示している。2カ所以上で観測された場合実線で示した。これらの図より、 $E$  層の出現もしくは  $F$  層電子密度増加を境にして、脈動  $D$  成分の振幅が  $H$  成分に等しくなり、その結果南北に主軸を持つ直線偏波が、より東西に主軸が傾いた円偏波へと変化することが確認される。特に夏と冬では、電離層電子密度増加の始まりの時間が約 4 時間ずれるが、それにともない脈動偏波変化の開始時間も同じだけずれる。これから、地上で観測される脈動偏波の変化が、プラズマ圏内の磁気流体波の偏波変化によるものでなく、脈動信号が、電離層を通過する際に受ける効果であると考えねばならないだろう。

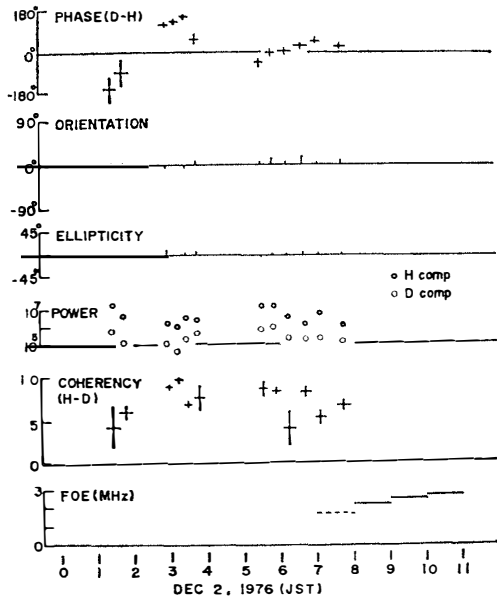


図 2b 1976 年 12 月 2 日のデータを解析した結果  
 Fig 2b. Detailed analyses of Fig 1b See Fig. 2a legend

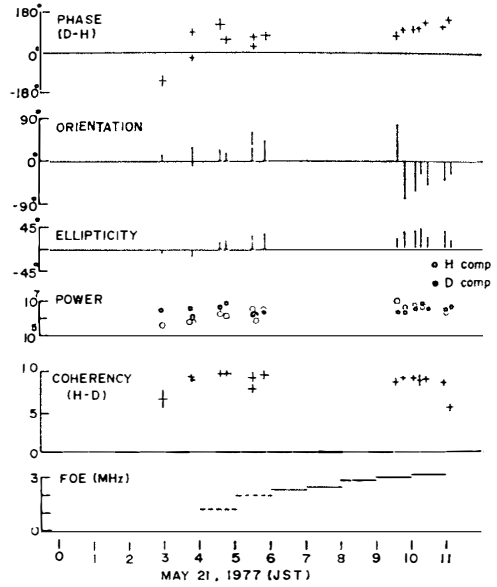


図 2c 1977 年 5 月 21 日のデータを解析した結果  
 Fig 2c. Detailed analyses of Fig 1c See Fig. 2a legend

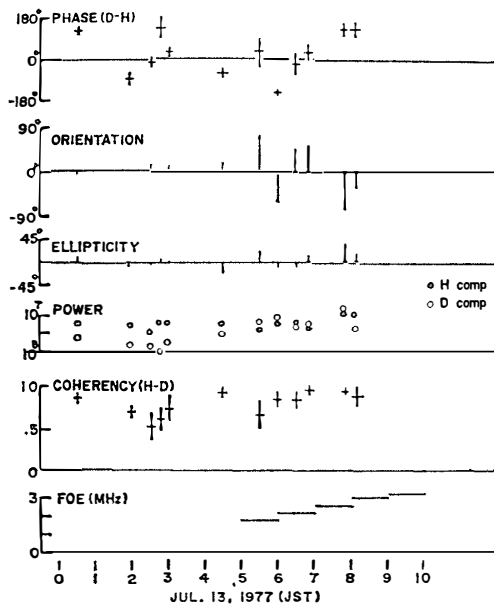


図 2d 1977 年 7 月 13 日のデータを解析した結果  
 Fig 2d. Detailed analyses of Fig 1d See Fig. 2a legend

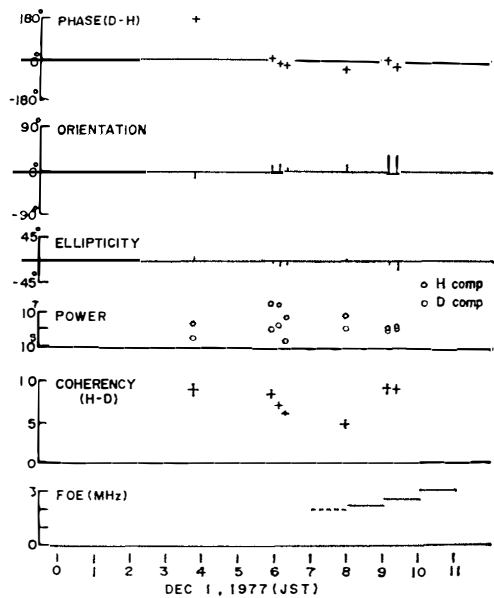


図 2e 1977 年 12 月 1 日のデータを解析した結果  
 Fig 2e. Detailed analyses of Fig 1e See Fig. 2a legend.

## 3. 理論的取り扱い

低緯度で観測される脈動が、高緯度の磁力線の共鳴振動と同じ機構でないことは、低緯度磁力線の共鳴周波数の計算値が観測される周波数より1桁ほど大きいことによって推測される。そのため低緯度脈動が、高緯度よりの電離層電流の単なるもれとして言葉で解釈されてきたが、それをより物理的に理解するところみが、ここでの目的である。

脈動の偏波が、夜明けにともなう電離層電子密度上昇により、南北の直線偏波から、東西方向へ傾いた円偏波へと変化することは、極域からの磁気音波の単純な伝搬ととらえることが困難であることを示している。そのためここでは、脈動が磁気音波という形でプラズマ圏内で共鳴していると仮定し、それが電離層でどのように変形され地上に伝わるかを考える。ここでは、McCLAY (1970) のモデルを使い、南北方向の磁場 ( $B_x$ )、東西方向の電場 ( $E_y$ ) をともなう磁気音波 (ポロイダルモード) をプラズマ圏内で仮定する。伝搬方向は、垂直方向 ( $Z$ ) とする。これはまず電離層で反射される。次に、電離層  $E$  層によるトロイダルモード ( $E_x, B_y$ ) の輻射を考える。これはこのモデルの特徴であり、電離層電気伝導度が、テンソルになるためトロイダルモードとポロイダルモードが結合するために出てくる性質である。コールドプラズマ近似を使いそれぞれ次の様にかける。

輻射トロイダルモード

$$E_x = \frac{\omega}{\mu_2} \alpha_{2R} e^{\mu_2(z-d)},$$

$$B_y = \alpha_{2R} e^{\mu_2(z-d)},$$

入射、反射ポロイダルモード

$$E_y = \frac{\omega}{\mu_1} (\alpha_{1I} e^{-\mu_1(z-d)} - \alpha_{1R} e^{\mu_1(z-d)}),$$

$$B_x = \alpha_{1I} e^{-\mu_1(z-d)} + \alpha_{1R} e^{\mu_1(z-d)}.$$

ここで  $x$  方向は南、 $y$  方向は東、 $z$  方向は鉛直上向きである。時間の項  $e^{-i\omega t}$  ははぶいた。 $d$  は電離層高度、 $\omega$  は波の角周波数、 $\alpha_{1I}, \alpha_{1R}$  はポロイダルモードの入射、反射強度、 $\alpha_{2R}$  はトロイダルモードの輻射強度、 $\mu_1, \mu_2$  はポロイダル、トロイダルモードの鉛直方向の波数。

次に大気圏内の解は、その伝搬形態によるが、このモデルの場合水平方向の変化が、垂直方向の変化に比べずっと小さいと仮定すれば電場に関する方程式は次の様になる。

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E = 0,$$

これは、次の様な簡単な解を与える。

$$E_x = i\omega\beta_2 z, \quad B_y = \beta_2$$

$$E_y = -i\omega\beta_1 z, \quad B_x = \beta_1$$

ここで、 $z$  は地上からの距離、 $\beta_2, \beta_1$  は磁場の東向き、南向き成分の強度を表す。時間の項  $e^{-i\omega t}$  ははぶいた。電離層の厚さが薄いとして、プラズマ圏と大気圏の解を接続し地上での  $D/H$  比を調べる。電場に関しては連続という条件を用い次の様にかける。

$$\frac{\omega}{\mu_2} \alpha_{2R} = i\omega\beta_2 d,$$

$$\frac{\omega}{\mu_1} (\alpha_{1I} - \alpha_{1R}) = -i\omega\beta_1 d$$

磁場に関しては、ホールおよびペダーセン電流により作られる磁場を考慮して次の様にかける。

$$S_P \frac{\omega}{\mu_1} (\alpha_{1I} - \alpha_{1R}) - S_H \frac{\omega}{\mu_2} \alpha_{2R} = (\alpha_{1I} - \alpha_{1R}) - \beta_1,$$

$$S_P \frac{\omega}{\mu_2} \alpha_{2R} + S_H \frac{\omega}{\mu_1} (\alpha_{1I} - \alpha_{1R}) = -\alpha_{2R} + \beta_2.$$

ここで、 $S_P = \mu_0 \Sigma_P$ ,  $S_H = \mu_0 \Sigma_H$  ( $\Sigma_P, \Sigma_H$  は、積分されたペダーセン、ホール伝導度、 $\mu_0$  は透磁率)。 (NISHIDA, 1979)。

大気圏内の  $D/H (= \beta_2/\beta_1)$  は、式を変形して結局次の様にかける。

$$D/H = \frac{iS_H \omega d}{iS_P \omega d + i\mu_2 d - 1},$$

ここで、 $\Sigma_H \sim \Sigma_P \sim 20 \text{ U}$ ,  $\omega \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,  $V_A \sim 10^6 \text{ m/s}$ ,  $d \sim 10^5 \text{ m}$  と仮定すれば、 $\mu_2 d \ll S_P \omega d \ll 1$  となり  $D/H$  比は近似的に次の様にかける。

$$D/H \sim -iS_H \omega d \sim -0.3i,$$

この結果は、脈動  $D$  成分の地上での振幅および偏波が、ホール伝導度の大きさの変化で支配されることを示している。電離層電子密度の増加にともない  $D$  成分の増加が起こり、それにともない偏波が直線よりだ円に変わるという ASO での観測結果は、定性的には説明できた。

#### 4. 考 察

ASO における Pi 2, Pc 4 帯地磁気脈動の偏波が、日の出にともなう電離層電子密度上昇に呼応して直線よりだ円偏波に変わる現象が、電離層ホール電流の効果であることが、上記モデルにより推測される。しかし、このモデルでは、夜明け後の  $D/H$  比は観測結果の 1/3 程



度しか上昇せず十分ではない。これはモデルを単純化しすぎた結果であろうと思われる。まず第1にプラズマ圏内での解を、無限一様プラズマ中での伝搬型の磁気音波の型を仮定した。これはプラズマ圏内での脈動を、径方向に伝搬する音波の空洞共鳴としてとらえたからである。しかし、このモデルは必ずしも明確ではない。当然あり得る磁場の曲り、密度の非一様性、方位角方向の波の構造を考慮すれば、単純な音波のみの存在ではあり得ない。McCLAY (1970) モデルでは、プラズマ圏内での空洞共鳴を解く場合プラズマポーズを導体と考え完全反射を仮定したが、しかしそこは直接の波動の励起領域と考えられ、完全反射ではなく、より現実的な境界条件を与えなければいけない。しかしいくつかの困難は残るが  $D/H$  比が  $\Sigma_H$  に比例し、偏波が直線よりだ円に変わるといふモデルの結果は観測結果をうまく説明する。今後観測を蓄積し、定量的な議論に発展させなければいけない。

#### 謝 辞

著者らの気付かなかったいくつかの問題点を指摘された西田篤弘助教授に感謝の意を表したい。解析には国立極地研究所の会話型波動解析プログラムを使った。その際お世話になった佐藤夏雄、藤井良一、岩淵美代子各氏に感謝の意を表したい。

#### 文 献

- McCLAY, J. F. (1970): On the resonant modes of a cavity and the dynamical properties of micro-pulsations. *Planet. Space Sci.*, **18**, 1673-1690.
- NISHIDA, A. (1978): *Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere* New York, Springer-Verlag, 230 p.

(1979年3月22日受理)