

高緯度から中緯度に至る ULF 観測から考察される Pi 2 型磁気脈動の発生機構

桑 島 正 幸*

A Model of Magnetic Pi 2 Pulsations Based on a ULF Observation from High- to Middle-Latitudes

Masayuki KUWASHIMA*

Abstract: Spectral characteristics of magnetic Pi 2 pulsations are studied in detail by using data obtained simultaneously over a wide latitudinal range from the auroral region ($L=8.9$) through low-latitudes ($L=1.8$). Pi 2 is observed simultaneously with the onset of a substorm expansion over the wide latitudinal range with a common predominant period showing a primary amplitude maximum at the auroral oval and a secondary one near the plasmopause. The Pi 2 period generally becomes shorter (longer) when the associated auroral breakup starts at lower (higher) latitudes. Pi 2 is also observed simultaneously at a pair of conjugate stations in the auroral region with similar waveforms. These observational results indicate that the most plausible model of Pi 2 is the torsional hydromagnetic oscillation of the geomagnetic field lines anchored on the auroral oval.

要旨: 極光帯 ($L=8.9$) から中緯度 ($L=1.8$) まで、ほぼ同じ子午線に沿って位置する観測点で得られた資料をもとにして、Pi 2 型磁気脈動の波動特性を調べた。Pi 2 は substorm expansion の開始と同時に極光帯から中緯度に至る広い領域にわたって観測される。Pi 2 の amplitude, spectral および polarization の特性や、共役点のふるまいを見ると、auroral oval に根をもつ磁力線の torsional oscillation によって Pi 2 が発生してくるという model が考えられる。

1. 序

数多い Pi 型脈動の中で、Pi 2 型磁気脈動は特に多くの研究者によって解析されてきた。Pi 2 の重要な特徴の 1 つは、それが substorm expansion の開始に関連して、地上の高緯度から低緯度に至る広い領域で、また磁気圏内においても観測されることである (SAITO, 1969; SAITO and SAKURAI, 1970, FUKUNISHI and HIRASAWA, 1970; PERKINS *et al*, 1972, OLSON and ROSTOKER, 1975; LANZEROTTI *et al*, 1976; SAITO *et al*, 1976; PYTTE *et al*, 1976)。しかしな

* 気象庁地磁気観測所女満別出張所。Magnetic Observatory, 62 Showa, Memambetsu-cho, Abashiri-gun, Hokkaido 099-23

がら、Pi 2 の波動特性についてはいまだに十分には解明されていない。これは、同じ子午線に沿って高緯度から低緯度に分布する観測点で得られる資料をもとにした Pi 2 の解析が不十分なことと、とくに高緯度において substorm expansion に伴って観測される Pi 2 の波形が複雑なために解析が難しいことによる。このことをふまえながら、本論文では今までに明らかにされていない Pi 2 の波動特性を明らかにしていくを試みる。

解析に使用する基礎資料は、Syowa meridian-chain stations において 1973 年、8 月 29 日-9 月 29 日の 1 カ月間にわたって得られた induction magnetogram である。Syowa meridian-chain stations は Mawson ($L=8.9$), Mizuho Station ($L=7.5$), Syowa Station ($L=6.1$), SANAE ($L=4.0$) および Hermanus ($L=18$) の 5 つの station からなる。これらの station で得られた induction magnetogram は curve tracer によってデジタル化される。Band-pass filter によって、negative bay や Pi burst 成分を除いてから Pi 2 の波動特性が解析される。2 節では Pi 2 の spectral, 3 節で amplitude, 4 節で polarization, 5 節で conjugacy についての特性を明らかにし、6 節でまとめをする。

2. Pi 2 の Spectral 特性

Syowa meridian-chain stations において観測された典型的な Pi 2 の例を図 1 に示す。Substorm expansion が 8 月 31 日 00 h 06 m UT に開始するがこれと同時に Pi 2 が極光帯から中低緯度に至る広い領域にわたって出現しているのがわかる。Mizuho Station, Syowa Station の極光帯においても、低緯度側と同様に damped type の sinusoidal な oscillation が観測されている。図 1 で、SANAE および Hermanus の振幅は、Mizuho Station に比較してそれぞれ 5 倍および 10 倍に拡大して表示していることに注意されたい。

図 1 に示される波動に含まれる周波数成分を確かめるために、00h 06 m-00h 11 m の区間で spectral 計算をした。結果を図 2 (左) に示す。Spectral 計算には maximum entropy 法を使用した。図 2 からわかるように、16 mHz 付近 (~ 63 秒) に共通の peak が見られる。4 つの station での平均は 15.84 mHz (63.1 秒) で標準偏差はわずか 0.27 である。このように高緯度から低緯度にわたって共通して観測される成分を Pi 2 とする。各 station における水平面内での Pi 2 の power の強さを計算して $(\sqrt{H(\omega)^2 + D(\omega)^2})$, 図 2 (右) に示してある。各々の値は、 L 値の関数としてプロットされる。図 2 (右) には auroral breakup が起きたと推定される領域も示してあるが、Pi 2 は auroral breakup の起きた付近で最大になるようである。Pi 2 の amplitude の緯度効果については 3 節でさらに詳しく解析する。

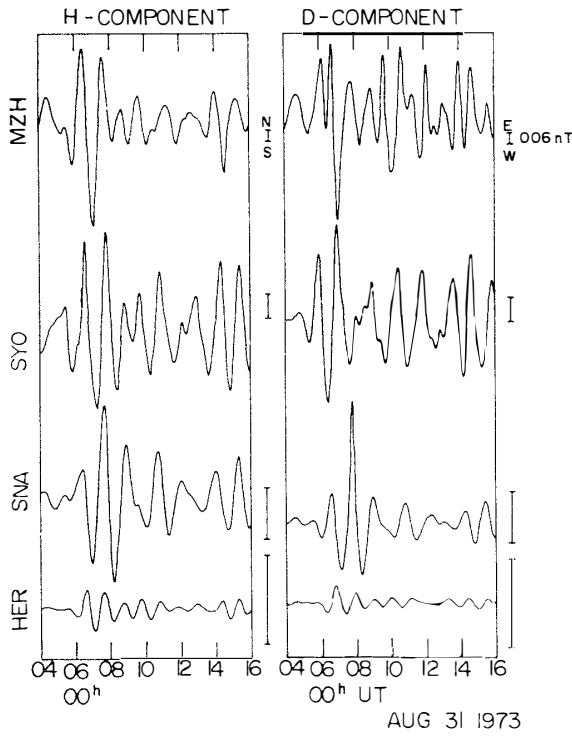


図 1 極光帯から中緯度に至る広い領域で同時に出現した P₁ 型磁気脈動
 Fig 1 Simultaneous appearance of P₁ pulsations over the wide latitudinal range from the auroral region through middle-latitude

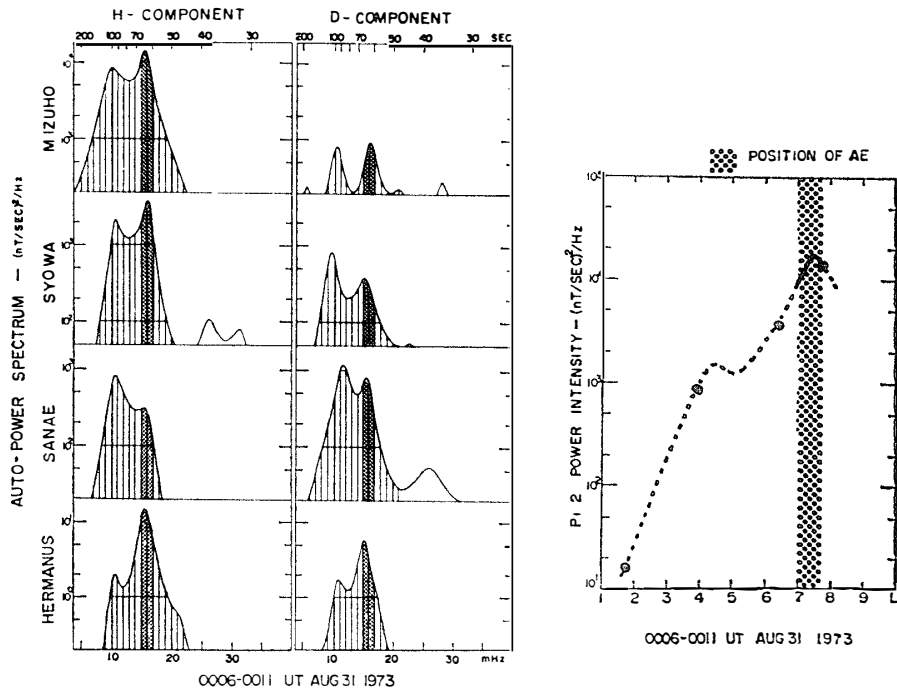


図 2 8月31日 00h 06m-00h 11m UT の間で求められた P₁ 型脈動のパワー・スペクトラム (左) と、水平面内での P_{1.2} のパワーの緯度分布 (右).

Fig 2 Power spectra of the P₁ pulsations calculated in the interval of 0006-0011 UT on August 31 (left) and the latitudinal profile of horizontal P_{1.2} power intensity (right)

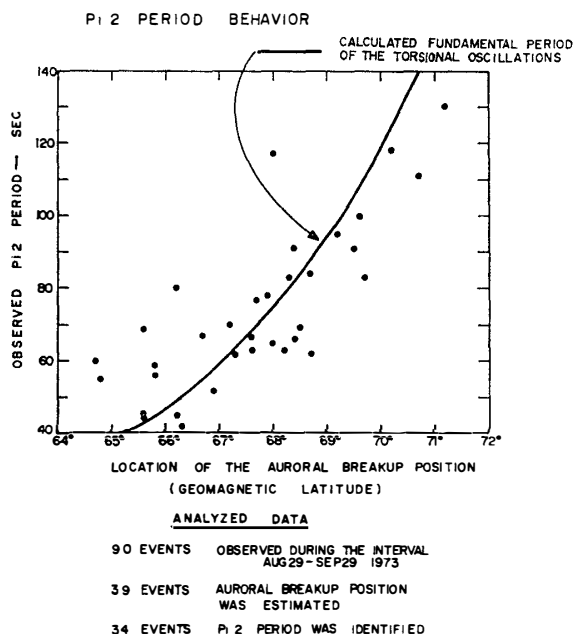


図 3 観測された Pi 2 の周期 (黒点) と, 計算された磁力線の torsional oscillation の基本周期 (実線)

Fig. 3. The observed Pi 2 periods (solid circles) and the fundamental periods of the torsional oscillation of the field-line (solid line).

図 2 (右) で示されているように, Pi 2 と auroral breakup region との密接な関連が示唆される。そこで Pi 2 の周期と, auroral breakup の起きた緯度との関連を調べる。結果を図 3 に示す。1973 年 8 月 29 日から 9 月 29 日の 1 カ月間で 90 の substorm が観測されたが, その中で auroral breakup の起こった緯度が 39 events について正確に決定することができた。この 39 events のうち 34 events について Pi 2 の周期を決定することができた。図 3 では Pi 2 の周期を auroral breakup の起きた緯度の関数としてプロットしてある。Auroral breakup の起きる緯度が高くなるにつれて Pi 2 の周期が長くなるという関係がでている。図 3 には, 磁力線の torsional oscillation の fundamental mode の周期の理論計算値が実線で示されている。粒子密度については, CHAPPELL (1972) を参照した。観測される Pi 2 の周期が, 理論計算値と良くあっていることに注目したい。

3. Pi 2 Amplitude の緯度効果

図 2 (右) に示されるように, Pi 2 は auroral breakup が起きた領域で最大振幅値をもつ傾向がある。このことは, ほかの研究者によっても示唆されている (RASPOPOV *et al.*, 1972; SAITO *et al.*, 1976)。そこで, Pi 2 amplitude が auroral breakup region で最大になるという仮定のもとに, Mizuho Station, Syowa Station 付近で起きた 24 個の substorm events について, Mizuho Station, Syowa Station で観測される Pi 2 の power の値を満足しながら, auroral breakup region で最大をもつ 2 次曲線を求める。具体的には, Pi 2 の振幅値を y ,

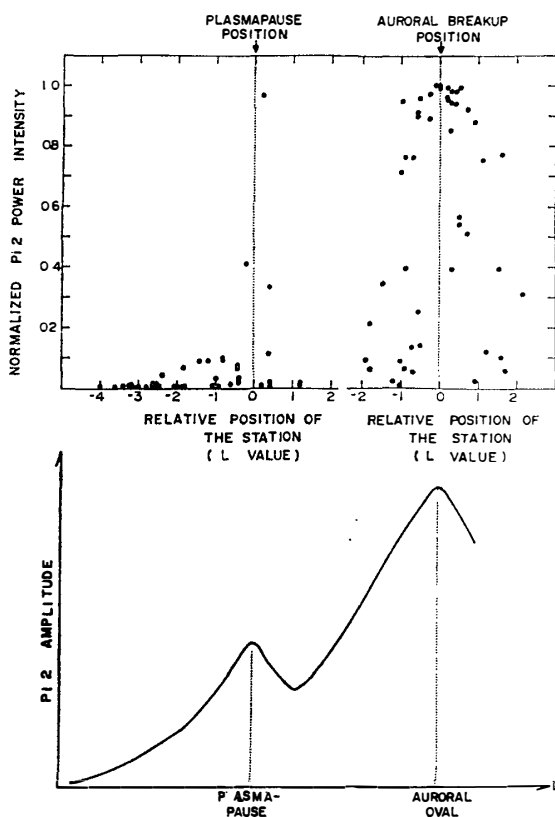


図 4 (上) 規格化された Pi 2 のパワーの強さ。みずほ基地および昭和基地については、auroral breakup region に対する相対的な位置で、また SANAE および Hermanus については plasmopause に対する相対的な位置でプロットしてある。(下) 図4(上) から推測する Pi 2 amplitude の緯度効果。

Fig. 4. Normalized Pi 2 power intensities as a function of relative position both to the auroral breakup position for the Mizuho and Syowa Stations data, and to the plasmopause position for the SANAE and Hermanus data (upper). Schematic relation between the Pi 2 amplitude and the L-value derived from the analyzed result (bottom).

auroral breakup region に対する観測点の相対的な位置を x とし、また auroral breakup region における Pi 2 の最大振幅値を b とし、2次曲線 $y = -ax^2 + b$ を求める。Mizuho Station と Syowa Station についての値を y と x に与えてやることにより b が求まる。次に、このようにして計算された Pi 2 power intensity の最大値を使って、Mizuho Station, Syowa Station, SANAE および Hermanus の Pi 2 の power intensity を normalize する。その結果は、Mizuho Station, Syowa Station については、auroral breakup region に対する相対的な位置の関数として、また SANAE, Hermanus については plasmopause に対する相対的な位置 (BINSACK, 1967) の関数としてプロットされる。結果を図 4 (上) に示す。図 4 でわかるように Pi 2 の amplitude は、auroral breakup region (auroral oval) から遠ざかるに

つれて小さくなるが, plasmopause に近づくとふたたび大きくなる. そして plasmopause から遠ざかるにつれて, またふたたび小さくなる. このような傾向は図 4(下) にまとめられている. Pi 2 amplitude は auroral breakup region (auroral oval) で第 1 の最大を示し, また plasmopause で第 2 の最大を示す.

4. 極光帯における Pi 2 Polarization の特性

1 節でも指摘したように, 極光帯において substorm expansion 時に観測される Pi 脈動には Pi 2 のほかに Pi burst および negative bay の成分が含まれる. これらを除去するために, band-pass filter の操作をして Pi 2 成分を取り出してから, polarization のふるまいを調べる. Polarization は 磁力線に沿って right-handed, left-handed および uncertain に分類される. さらに Pi 2 が観測された観測点が, auroral electrojet に対して低緯度にあったか高緯度にあったかを考慮する. Auroral electrojet の位置は, Syowa Station の auroral diagram と all sky camera, および Syowa Station, Mizuho Station と Mawson の magnetogram を利用する. 具体的な方法については KUWASHIMA (1978) を参照されたい. 結果は magnetic local time の関数として, 図 5 に表示されている. 図 5 で, polarization は percentage で表示されている. 図 5 では, くわえて Pi 2 の出現頻度分布も表示されており, 出現の最大は

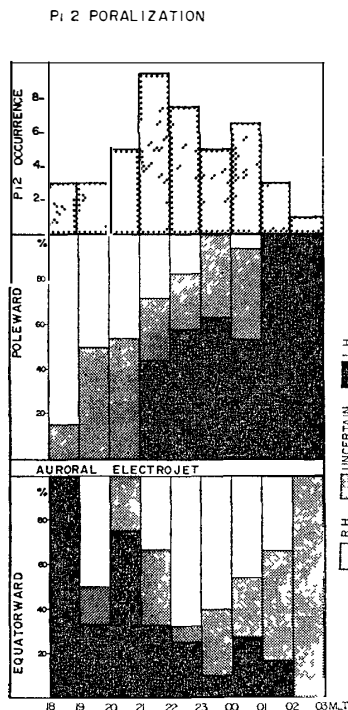


図 5 1973 年 8 月 29 日から 9 月 29 日の間に昭和基地およびみすほ基地で観測された Pi 2 の出現頻度(上). Pi 2 polarization と auroral electrojet の位置および出現時間との関連(下). Pi 2 polarization はパーセント表示である. Pi 2 polarization は, auroral electrojet および Pi 2 の出現数の最大になる時間帯 (21 h-22 h MLT) を境にして 4 つの領域に分けられる.

Fig. 5. Occurrence frequency of Pi 2 event observed at Syowa and Mizuho Stations during the period from August 29 to September 29, 1973 (upper panel) Pi 2 polarizations observed on the poleward side and on the equatorward side of the auroral electrojet are summarized in the percentage-magnetic local time coordinates (lower two panels).

21 h–22 h MLT にあることがわかる。Pi 2 の出現頻度が最大になる時間帯 (21 h–22 h MLT) より前では、Pi 2 の polarization は auroral electrojet よりも equatorward で left-handed が多く、poleward では right-handed が多いが、21 h–22 h MLT 以後では equatorward で right-handed, poleward で left-handed が多くなっている。このように、auroral electrojet 付近における Pi 2 の polarization は、4 つの領域に分けられる傾向を示す。HASEGAWA and CHEN (1974) や SOUTHWOOD (1974) によれば、磁気流体波動の polarization は、amplitude の最大の region を境にして、また伝搬の向きが逆になる region を境にして逆転することが理論的に予測される。図 4 に示したように、Pi 2 amplitude は auroral electrojet の付近で最大をもつ。もしも Pi 2 の波が Pi 2 の出現頻度が最大になる時間帯 (21 h–22 h MLT) を境にして、それよりも前では westward に、またそれよりも後では eastward に伝搬すると仮定

すれば、Pi 2 の polarization は、図 5 に示すような 4 つの領域に分けられることが理論的な立場からも期待される。

5. 極光帯における Pi 2 の Conjugacy

Syowa Station および Reykjavik の rapid-run magnetogram を基礎資料として、極光帯における Pi 2 の conjugacy を調べる。Syowa Station および Reykjavik は極光帯にいくつかある conjugate station の中でも最もよい conjugate relation にある。両者で得られた rapid-run magnetogram は negative bay の成分を取り除くために high-pass filter の操作を経る。その結果の 1 例を図 6 の上部に示す。Syowa Station と Reykjavik で Pi 2 が同時にしかもきわめて similar な波形をもって出現しているのがわかる。しかしながら波型は similar であっても位相関係には大きなずれがみられ

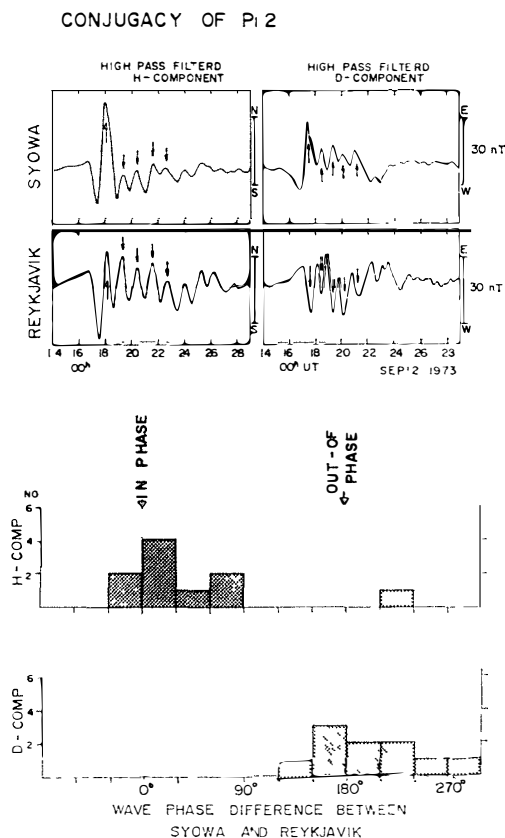


図 6 共役点で同時に観測された Pi 2 (上) と、共役点での Pi 2 の位相関係 (下).
Fig 6. Simultaneous appearance of Pi 2 at the conjugate points (upper) Wave-phase relation of Pi 2 at the conjugate points (bottom)

る。すなわち H 成分では両観測点で in-phase の oscillation が読みとれるが、 D 成分では out-of phase の関係がみられる。このことをより詳しく調べるために、個々の Pi 2 event について、Syowa Station における Pi 2 を reference wave として、Reykjavik の Pi 2 に対する相関関数を計算して、両者の間の位相のずれを求めた。結果を、図 6 下部に示す。 H 成分は大部分が -30° から $+90^\circ$ の範囲内にあり平均すれば $+25^\circ$ となって、in-phase の関係にあることがわかるが、 D 成分については $+120^\circ$ から $+300^\circ$ にあって平均値は $+201^\circ$ となり out-of phase の関係にあることがわかる。この結果は、SAKURAI (1970) のそれとも一致する。

もしも、Pi 2 が磁力線の standing oscillation によって引き起こされているとすれば、conjugate relation は SUGIURA and WILSON (1964) による elastic string model によって説明することができる。図 6 に示される結果は、Pi 2 が odd-mode の磁力線の standing oscillation によって引き起こされていることを強く示唆するものである。

6. まとめと考察

本論文での主な結果は次のようにまとめられる。

- 1) Pi 2 の周期は auroral breakup の起こる緯度と密接に関連して、起こる緯度が高くなると共に Pi 2 の周期は長くなる。
- 2) 観測される Pi 2 の周期は、夜側の auroral oval に根をもつ磁力線の torsional oscillation の基本周期に似ている。
- 3) Pi 2 amplitude は、auroral oval に第 1 の最大をもち、plasmopause に第 2 の最大をもつ。
- 4) 極光帯付近の Pi 2 の polarization のふるまいは、auroral oval に根をもつ磁力線の共鳴振動によって説明できる。
- 5) Pi 2 は、極光帯の共役点で similar な波形をもって出現する。位相関係から Pi 2 は、odd-mode の磁力線の standing oscillation であると推定される。

1)-5) の結果から図 7 に示されるような、Pi 2 の model が考えられる。よく知られているように、substorm expansion は magnetotail における磁力線の reconnection と密接に関連している。Reconnection region では磁場の energy が粒子の energy に変換されてプラズマ不安定が引き起こされると共に、磁力線の形も急激に tail-like から dipole-like に移り変わってくる。MALTSEV *et al.* (1974) や NISHIDA (1979) は、tail での reconnection によって起きるプ

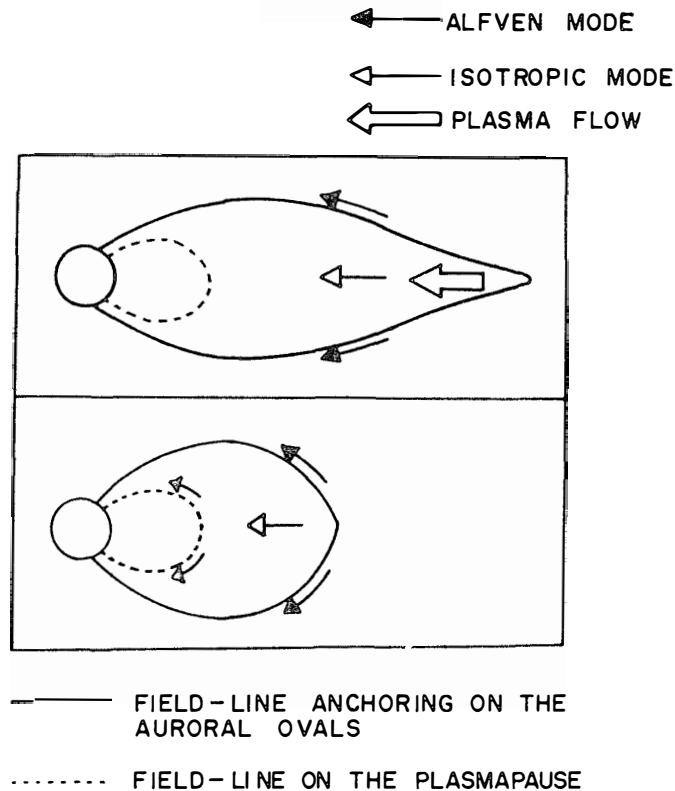


図 7 考えられる Pi 2 のモデル

Fig. 7. Schematic diagrams showing the generation mechanism of Pi 2.

プラズマ不安定によって加速された高エネルギー粒子が、磁力線に沿って電離層に降下し電場を生ぜしめるが、それが磁力線に沿って南北両半球の電離層間を往復することにより、磁力線の standing oscillation が生ずることを理論的に予測している。このような過程のもとで auroral oval に根をもつ磁力線に沿って Alfvén 波が誘起され、磁力線の振動を引き起こす。この結果として、auroral oval で Pi 2 amplitude の第 1 の最大が観測される。Reconnection region では Alfvén 波と共に isotropic な波も存在しうる。Isotropic な波は磁力線を横切って地球側に伝搬してくるが、plasmopause での急激な粒子密度の変化によって、Alfvén 速度が急激に変化する領域ができ、そこでは wave が trap されやすい。この結果として plasmopause で第 2 の波の最大値が観測される。このような定性的な model を今後さらに定量的に検討していきたい。

文 献

- BINSACK, J. H. (1967): Plasmopause observations with the MIT experiment on IMP 2. J. Geophys. Res., 72, 5231-5237.
 CHAPPELL, C. R. (1972): Recent satellite measurements of the morphology and dynamics of the

- plasmaphere. *Rev. Geophys. Space Phys*, **10**, 951–979.
- FUKUNISHI, H. and HIRASAWA, T. (1970): Progressive change in Pi 2 power spectra with the development of magnetospheric substorm. *Rep. Ionos. Space Res. Jpn*, **24**, 45–65.
- HASEGAWA, A. and CHEN, L. (1974): Theory of magnetic pulsations. *Space Sci. Rev.*, **16**, 347–359.
- KUWASHIMA, M. (1978): Wave characteristics of magnetic Pi 2 pulsations in the auroral region—Spectral and polarization studies. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Ser. A (Aeronomy)*, **15**, 79 p.
- LANZEROTTI, L. J., FUKUNISHI, H. and MACLENNAN, C. G. (1976): Observations of magneto-hydrodynamic waves on the ground and on a satellite. *J. Geophys. Res.*, **81**, 4537–4545.
- MALTSEV, Yu. P., LEONTYEV, S. V. and LYATSKY, W. B. (1974): Pi 2 pulsations as a result of evolution of an Alfvén impulse originating in the ionosphere during a brightening of aurora. *Planet. Space Sci.*, **22**, 1519–1533.
- NISHIDA, A. (1979): Possible origin of transient dusk-to-dawn electric field in the nightside magnetosphere. to be published in *J. Geophys. Res.*
- OLSON, J. V. and ROSTOKER, G. (1975): Pi 2 pulsations and the auroral electrojet. *Planet. Space Sci.*, **23**, 1129–1139.
- PERKINS, D. M., WATANABE, T. and WARD, S. H. (1972): Relations between geomagnetic micropulsations and magnetotail field changes. *J. Geophys. Res.*, **77**, 159–171.
- PYTTE, T., MCPHERRON, R. L. and KIVELSON, M. G. (1976): Multiple-satellite studies of magnetospheric substorms; Radial dynamics of the plasmasheet. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5921–5933.
- RASPOPOV, O. M., TROITSKAYA, V. A., BARANSKY, L. N., BELEN'KAYA, B. N., KOSHELEVSKY, V. K., AFANS'YEVA, L. T., ROX, J. and FAMBITOKOYA, N. L. (1972): Properties of geomagnetic Pi 2 pulsation spectra along a meridional profile. *Geomagn. Aeron.*, **12**, 772–775.
- SAITO, T. (1969): Geomagnetic pulsations. *Space Sci. Rev.*, **10**, 319–412
- SAITO, T. and SAKURAI, T. (1970): Mechanism of geomagnetic Pi 2 pulsations in magnetically quiet condition. *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5 (Geophys.)*, **20**, 49–70.
- SAITO, T., SAKURAI, T. and KOYAMA, Y. (1976): Mechanism of association between Pi 2 pulsation and magnetospheric substorm. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **38**, 1265–1277.
- SAKURAI, T. (1970): Polarization characteristics of geomagnetic Pi 2 micropulsations. *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5 (Geophys.)*, **20**, 107–117.
- SOUTHWOOD, D. J. (1974): Recent studies in micropulsation theory. *Space Sci. Rev.*, **16**, 413–425.
- SUGIURA, M. and WILSON, C. R. (1964): Oscillation of the geomagnetic field lines and associated magnetic perturbations at conjugate points. *J. Geophys. Res.*, **69**, 1211–1216.

(1979年5月13日受理)