

## 極光帯における Pi 脈動と関連現象

桑 島 正 幸\*

### Pi Pulsations and Associated Phenomena in the Auroral Region

Masayuki KUWASHIMA\*

**Abstract:** Concurrent observations of the geomagnetic variations by means of a fluxgate magnetometer and an induction magnetometer were carried out at Syowa ( $-66.7^\circ$ ,  $72.4^\circ$  in corrected geomagnetic coordinates) and Mizuho Stations ( $-68.7^\circ$ ,  $72.9^\circ$  in corrected geomagnetic coordinates) in Antarctica during the period from August 29 to September 29, 1973, by the 14th Japanese Antarctic Research Expedition. In association with the substorm onset, expansion and recovery phases, various kinds of Pi pulsations were observed at the two stations. In the present paper, preliminary results of the Pi 2 and Pi (c) pulsations are reported. The Pi 2 period is closely associated with the auroral breakup position in the following way that it becomes shorter (longer) when the auroral breakup occurs at lower (higher) latitude. In association with Pi (c), the substorm associated Pc 3 are observed at Syowa and Mizuho Stations.

**要旨** 第14次南極観測越冬隊では、1973年8月29日から9月29日の期間に昭和基地（補正磁気緯度  $-66.7^\circ$ ，経度  $72.4^\circ$ ）とみすほ基地（ $-68.7^\circ$ ， $72.9^\circ$ ）において、誘導磁力計とフラックス・ゲート磁力計を使っての地磁気2点観測を行った。磁気圏サブストーム時には、2観測点において各種のPi型磁気脈動が観測されたが、今回はそのうちPi 2とPi (c)について報告する。

### 1. は し め に

極光帯を通る磁力線は、赤道面上において磁気圏テイルと直接的に連なっていることが想定され、磁気圏サブストーム時には、それに伴って発生する各種波動が、磁力線に沿って極光帯に到来すると考えられる。超長波の領域 (ULF) では、これらは磁気流体波として観測される。サブストーム時に極光帯を中心にして観測される磁気流体波は、一般にPi型磁気脈動と呼ばれ、さらにPi 2, Pi burst, Pi (c), AIP, Pi d および IPDP などに分類される。しかしながら、これらのPi脈動の波動特性はいまだ十分には解明されていない。その理由の一つとしては、波動は発生領域から地上までに至る長い距離を伝搬してくるものであり、したがって

\* 気象庁柿岡地磁気観測所 Kakioka Magnetic Observatory, 595 Kakioka, Yasato-machi, Niihari-gun, Ibaraki 315-01

その特性を一点の観測から完全に把握することが難しいということがあげられる．緯度方向または経度方向に沿って規則性をもって配置される数点の観測点による同時観測が必要となる．

IMS 期間において、南極昭和基地を中心に行われている地上多点観測の前期的なものとして、1973 年の 9 月に 14 次隊によってみずほ基地、昭和基地での地磁気 2 点観測が行われた．みずほ基地は昭和基地よりも地磁気子午線に沿って約  $2^\circ$  高緯度側に位置しており、地磁気現象の緯度効果を調べる上で重要な観測点である．サブストーム時において  $P_1$  脈動が、極光帯で同じ子午線上に沿って位置している 2 点で、どのような相似性あるいは相違性をもって出現しているかを見るのがこの論文の目的である． $P_1$  脈動の中でも、今回は  $P_1 2$  と  $P_1(c)$  についての解析結果を報告する．

## 2. 観測と解析

$P_1 2$  は極光帯はもとより中低緯度に至るまで広い領域にわたって出現することが報告されており (SAITO, 1969; SAITO *et al.*, 1976), したがって  $P_1 2$  の解析については、みずほ・昭和基地に加えてこれら 2 点よりも高緯度に位置する Mawson, さらには Molodezhnaya, Novolazarevskaya, SANAE および Hermanus 等の地磁気資料を参照した．これらの観測点の地磁気的位置を表 1 および図 1 に示す．表 1 からわかるように Mawson, 昭和・みずほ基地は典型的な auroral station であるが、SANAE は  $L=4$  となって plasmopause 付近に位置することが期待され、また Hermanus はみずほ・昭和基地とほぼ同じ子午線に沿って中低緯度に位置す



図 1 観測点の磁気的位置

Fig. 1 Geomagnetic location of the observing stations used in the present paper

表 1 観測点の磁気的位置

Table 1 Geomagnetic location of the observing station

Station	Corrected geomagnetic	
	Latitude	Longitude
Mawson	-70 6°	93 2°
Mizuho Station	-68 7°	72 9°
Syowa Station	-66 7°	72 4°
SANAE	-60 0°	43 6°
Hermanus	-41 0°	79 7°
Reykjavik	66 6°	71 2°

る観測点である。

今回の解析の中心はみずほ・昭和基地での同時観測で得られた資料の対比であるが、2点で設置された観測装置のブロック図を図2に示す。2点に共通に設置されたのは induction magnetometer と fluxgate magnetometer である。Induction magnetometer では 10000 回巻きのコイルの中心に、高透磁率芯を入れたセンサーで pick up される信号 ( $\sim 1 \mu\text{V}$ ) は、前置増幅器および後置増幅器によって約 120 dB 増幅され低速 PWM アナログテープレコーダーに連続記録されると同時に、ペンレコーダーによって記録状態が monitor される。観測装置全体の周期特性は  $\omega H$  で換算して、5 秒から 200 秒の間で flat であり、したがって  $P_1 2$ ,  $P_1 (c)$  について2点の比較解析に十分なだけの性能を有する。Fluxgate magnetometer については、みずほ・昭和基地ともに rapid-run の形でペンレコーダーに記録される。送り速度は前者で 180 mm/h、後者では 300 mm/h であり、negative bay の上に重畳している  $P_1 2$  成分を見る上で十分である。

解析システムはアナログテープ記録された資料を処理するものと、デジタル化された資料を処理するものとに大別される。アナログテープ記録は 100~800 倍に step up されて、FFT 方式のスペクトルアナライザーによって解析される (SD 360, スペ

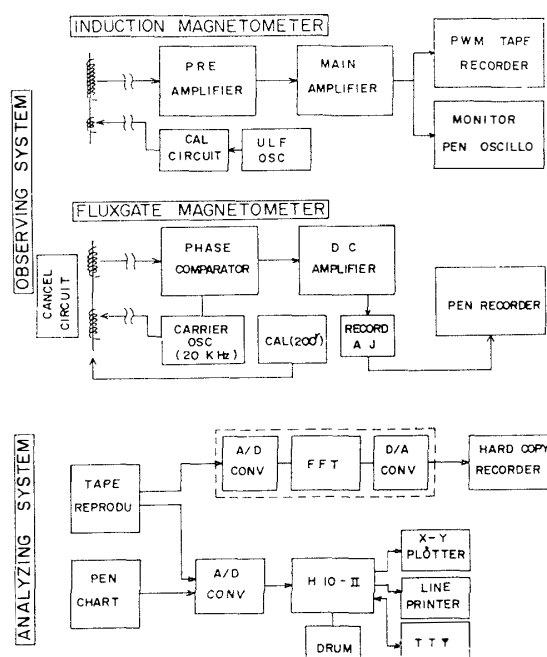


図 2 観測および解析システムのブロック図

Fig 2 Block diagram of the observing and analyzing system

クトルダイナミックス社製)。また、アナログ記録のうち、ペンレコーダーに書かれたものについては、カーブリーダーによって紙テープにパンチされ、さらに国立極地研究所計算機システム (Hitac 10 II とデバイス) を利用して、ディジタルスペクトラム解析や polarization などが調べられた。結果はラインプリンターや  $X$ - $Y$  プロッターに出力される。以下に解析結果の概要を述べる。

### 3. $P_1$ 2 型磁気脈動の特性

サブストーム時に、みずほ・昭和基地でどのような現象が観測されているかということを示したのが図 3 である。図 3 はアナログテープ記録した磁気脈動の  $H$  成分についてのダイナミックススペクトラムと、同時の地磁気  $H$  成分とを 2 点についてそれぞれ表している。また、NOAA から出されている AU, AL index についてもあわせてプロットしている。時間軸は右から左に進むようにとってあるので注意されたい。この例におけるサブストームは 9 月 10 日 23 時 54 分頃 (UT) に始まっている。これは昭和基地での  $H$  成分の急激な減少の開始によっても裏付けられる。同時に  $P_1$  脈動が enhance されて出現しているのが、ダイナミックススペクトラムからわかる。サブストーム開始時に極光帯でみられる  $P_1$  脈動は、 $P_1$  burst と  $P_1$  2 との重ねあわせとして考えるべきであろう (SAITO, 1969)。サブストーム開始には極光帯の電離層には auroral electrojet が流れ、また荷電粒子の降下の効果も加わって、random な磁場変動が生ずることが予想される。これが  $P_1$  burst である。同時に磁力線を伝わって到来する磁気流体波の成分も存在するはずであり、これを  $P_1$  2 として考えることにしよう。 $P_1$  burst は、random な auroral current によって引き起こされると考えられるから、極光帯の auroral electrojet 付近では顕著に出現するとしても、その場所から遠く離れた観測点では、振幅は小さいことが予想される。一方、 $P_1$  2 の成分は波動によって引き起こされるわけであり、波動の伝搬という特性を考慮すると広い領域にわたって観測されることが予想される。このことは  $P_1$  2 を調べるには、極光帯での資料ばかりでなく、極光帯から遠く離れた観測点の資料とも対比させながら解析を進めていく必要性を意味する。サブストーム開始時刻付近の  $P_1$  脈動について、みずほ基地 (MIZ), 昭和基地 (SYO) と共に plasmopause 付近にあると推定される SANAE (SAN) と中低緯度の Hermanus (HER) での記録を対比させてみたのが図 4 である。図 4 では極光帯において、特に顕著に出てくる  $P_1$  burst の成分を取り除くために、band-pass filter を通したものについてトレースしてある。サブストーム開始時刻と推定される 23 時 54 分頃に、 $P_1$  が突然 enhance されて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

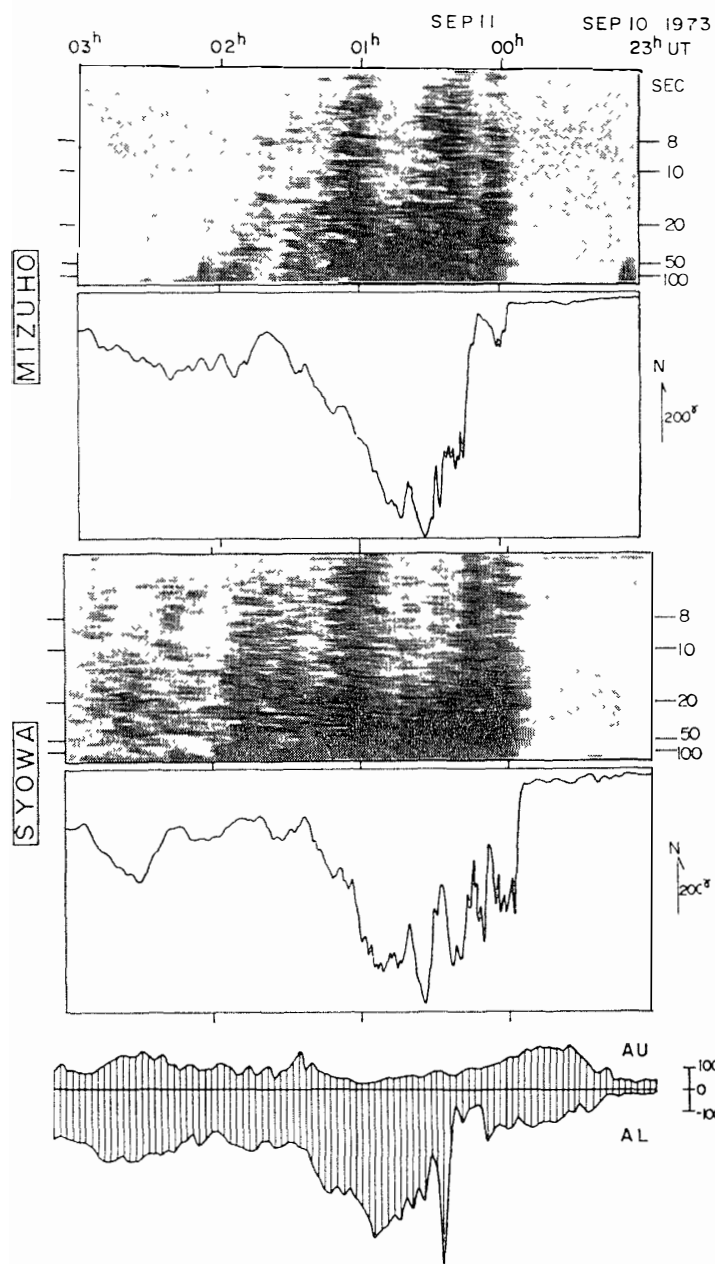


図 3 みすほと昭和基地での脈動  $H$  成分のダイナミックスペクトラムと地磁気  $H$  成分および NOAA から出されている AU, AL 指数

Fig 3 Dynamic spectra of ULF  $H$ -component and simultaneous records of the geomagnetic  $H$ -component at Mizuho and Syowa Stations, AU and AL indices from NOAA

るのがわかる 図 4 の  $P_1$  について, 23 時 54-59 分についてスペクトラムをとったのが図 5 である. 図からわかるように, 60 秒付近のところに広い領域にわたっての共通な peak があり, これが  $P_1 2$  に相当すると考えられる みすほ基地の  $H$  成分では  $P_1 2$  の成分が顕著でない. このサブストームは昭和基地よりも低緯度側で breakup が発生したと推定され, そのためみすほ基地は breakup area からはるか高緯度側, 言いかえると tail like field line の area に位置することになり, このような状況がみすほ基地のスペクトラムにおける  $P_1 2$  の成分が顕著でないことと関係していると考えられる. みすほ基地の  $H$  成分のスペクトラムでは,  $P_1 2$

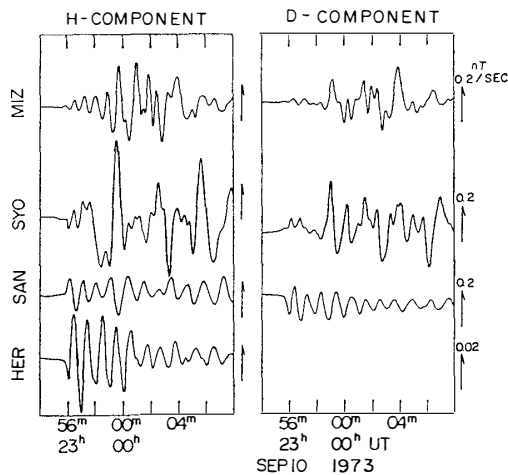


図 4 極光帯から中低緯度に至る広い領域で同時に観測された  $P_1$  脈動

Fig. 4.  $P_1$  pulsations simultaneously observed over the wide area from the auroral region to the low latitude. Original waves are band-pass filtered

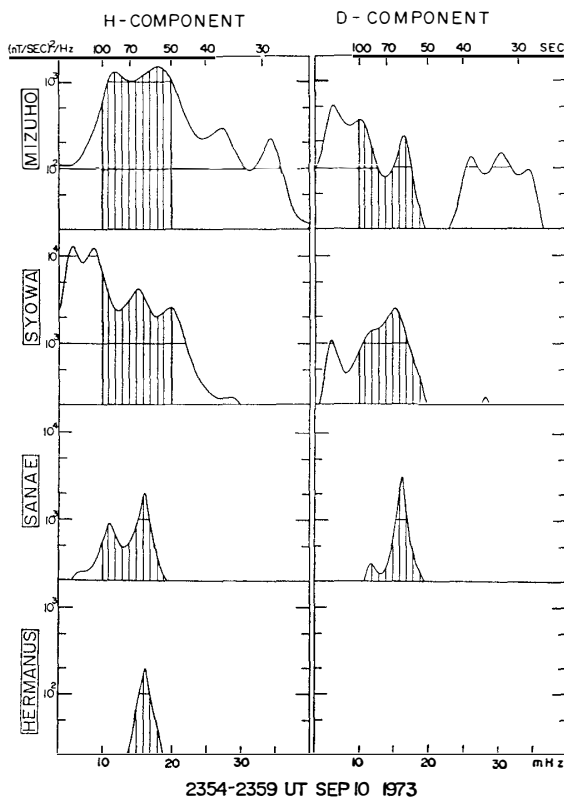


図 5 図 4 の  $P_1$  のパワースペクトラム

Fig. 5 Power spectra of  $P_1$  pulsations in the interval 2354–2359 UT on September 10, 1973.

の成分が他の成分によってかくれてしまっていると見るべきであろう。 $P_1$  のスペクトルの強さは, auroral breakup area, つまり auroral oval 付近に位置すると推定される昭和基地で最も大きい。このことは  $P_1$  の source region が auroral oval にあるという model を考えると合致する。

つぎに  $P_1$  の周期は何によって決定されるかということを調べてみよう。一つの model として、前に述べたような  $P_1$  が auroral oval で発生するという model が正しいとすれば、auroral oval の位置 (auroral breakup の起きた場所) と  $P_1$  の周期との間に何らかの関係があるはずである。これを調べたのが図 6 である。図 6 で横軸は auroral breakup の起きた場所の磁気的な緯度を表し、縦軸に  $P_1$  の周期をとっている。Auroral breakup の起きた場所は、オーロラルダイアグラム (HIRASAWA and NAGATA, 1972), オールスカイカメラおよび極光帯の数点の観測点で得られる地磁気変動 (KUWASHIMA, 1975) から推定する。 $P_1$  の周期は、図 5 のようにある距離をへだてて位置する数点の観測点で共通して出現している成分をもって決定する。図 6 から auroral breakup の位置と  $P_1$  の周期との間に規則性のあることが読みとれる。つまり、auroral breakup が低緯度側で起こると  $P_1$  の周期は短くなり、逆に auroral breakup の起こる位置が高緯度側に移っていくと、

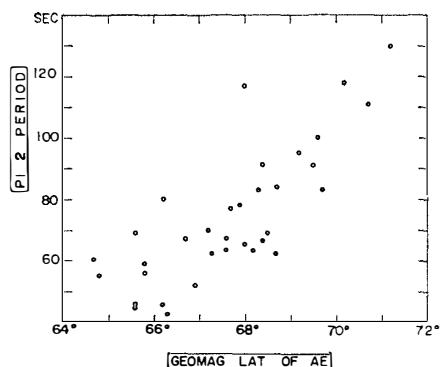


図 6 P12 の周期と auroral breakup の起こった位置との関係

Fig 6 Observed relation between the P12 period and the auroral breakup latitude.

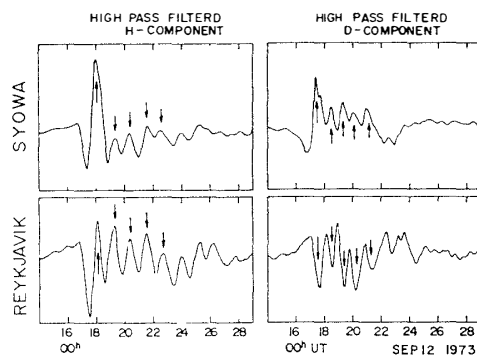


図 7 昭和基地と Reykjavik で同時に観測された P12

Fig 7 P12 pulsations simultaneously observed at Syowa Station and Reykjavik Original records are high pass filtered

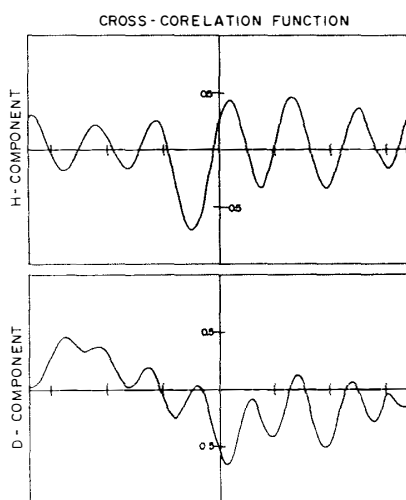


図 8 図 7 の P12 の相互相関関数

Fig 8. Cross-correlation functions of the P12 simultaneously observed at Syowa Station and Reykjavik.

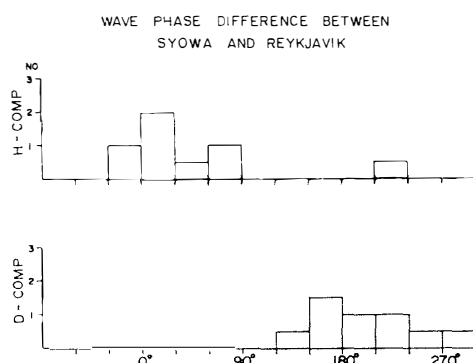


図 9 昭和基地と Reykjavik での P12 の位相の関係

Fig 9. Wavephase differences of the P12 between Syowa Station and Reykjavik.

それに伴って P12 の周期も長くなっていくという関係が図 6 からはっきりと読みとれる。

つぎに P12 の conjugacy について見てみる。昭和基地ときわめてよい conjugacy を持つ位置にある観測点として、Iceland の Reykjavik がある。昭和基地と Reykjavik で同時に得られた P12 の例を図 7 に示す。図 7 は rapid-run magnetogram から negative bay の effect を取り除くために、high-pass filter したものをトレースしている。図 7 からは、極光帯の共役点で P12 が同時に出現して、しかもきわめて似た波形をもっていることが読みとれる。この事実は極光帯で見られる P12 は、電離層のような地球近傍で発生しているのではなくて、む

しろ磁気圏内で発生して、それが磁力線を伝わって地表に到来し、きわめてよい conjugacy をもって両共役点で観測されたとする model を考えると合致する。図 7 で共役点に同時に見られる P<sub>1</sub>2 の wave-phase relation を見ると、*H* 成分は in-phase で振動しているが、*D* 成分では out-of-phase で振動している。このことは相互相関関数をとるとさらにはっきりする。図 8 にそれを示す。図 8 は図 7 の P<sub>1</sub>2 について 00 時 17-25 分について昭和基地と Reykjavik とで相互相関関数をとったものである。*H* 成分については 0.43 の peak で正の相関を示して、in-phase で振動していることを裏付け、また、*D* 成分については -0.65 の peak で負の相関を示し、out-of-phase の振動であることがわかる。P<sub>1</sub>2 の wave-phase relation を統計的に見たのが図 9 である。*H* 成分については phase difference が小さいが、*D* 成分では 180° の phase difference が見られる。これを SUGIURA and WILSON (1964) の elastic string model で考えると、P<sub>1</sub>2 は odd mode の field line の振動であると考えられる。図 6 および図 9 は、P<sub>1</sub>2 の発生機構として、auroral oval に根をもつ field line oscillation であるという結論を導くものである。

#### 4. P<sub>1</sub>(c) と Pc 3 型脈動との関連

ここでは、サブストーム終相において見られる P<sub>1</sub>(c) から Pc 3 型脈動が発生してくる可能性について述べる。図 10 は磁気脈動のダイナミックスpektrum と同時の *H* 成分の変動、および NOAA から出されている AU, AL index を示している。昭和では 9 月 16 日 00 時 30 分頃から negative bay が始まり、それに伴う P<sub>1</sub>(c) がダイナミックスpektrum 上に見られる。P<sub>1</sub>(c) は昭和基地では 04 時頃まで顕著に見られるが、一方、みずほ基地でのダイナミックスpektrum では P<sub>1</sub>(c) はさほど顕著ではない。このことは P<sub>1</sub>(c) は電離層で発生するものであり、したがって、出現領域も局所的であるとされる従来の P<sub>1</sub>(c) に対する考え方とも一致する (SAITO, 1969)。一方、ダイナミックスpektrum 上で昭和・みずほ基地共、03 時から 04 時にかけて Pc 3 型の周期 20 秒付近の脈動が見られる。この Pc 3 型脈動は、P<sub>1</sub>(c) と異なり両観測点で同時に見られ、つまり出現領域がより広いことから、電離圏オリジンというよりも磁気圏にオリジンがあると考えの方が適当であろう。図 10 を contour で表したのが図 11 で、昭和基地で見ると 00 時から 04 時に見られる P<sub>1</sub>(c) から Pc 3 が出現しているさまが見られ、また、P<sub>1</sub>(c) は昭和基地にのみ顕著で、出現が局所的であるのに対して、Pc 3 は昭和・みずほ基地共に共通して出現しているのが特徴的である。今の段階では P<sub>1</sub>(c) から Pc 3 が生じてくるのか、または、両者はまったく無関係であるのかということを断定はできないが、



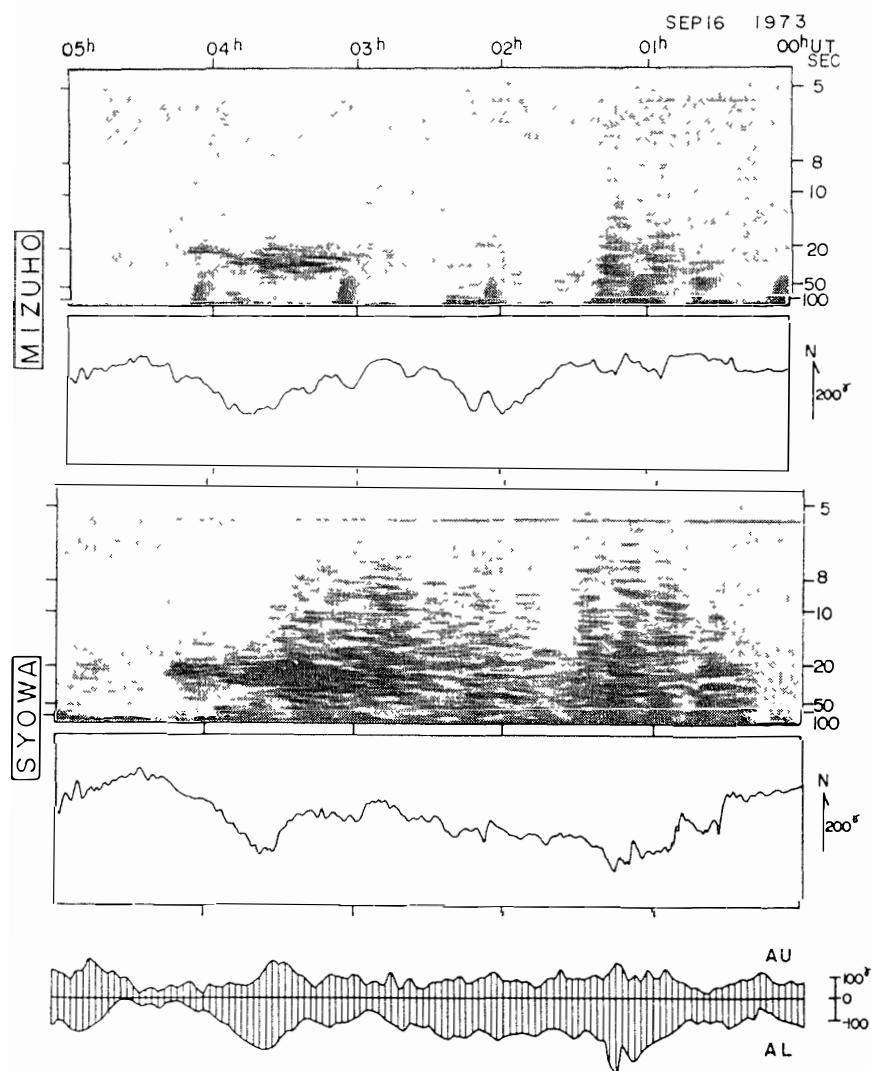


図 10 みずほと昭和基地での脈動  $H$  成分のダイナミックスpektrumと地磁気  $H$  成分および NOAA から出されている AU, AL 指数

Fig 10. Dynamic spectra of ULF  $H$ -component and simultaneous records of the geomagnetic  $H$ -component at Mizuho and Syowa Stations, AU and AL indices from NOAA

著者は図 10, 図 11 に見られる Pc 3 が  $P_1(c)$  と関係がある, つまり substorm と関連しているのではないかと疑いをもって解析を進めてみる. 図 10, 図 11 のような  $P_1(c)$  から生じてくる Pc 3 について, 出現回数をとったのが図 12 である. ここで対象とする Pc 3 は, 昭和基地またはみずほ基地のどちらか, または両方で  $P_1(c)$  がみられる時に, それに重なって出現しているものである (図 10 参照). 図 12 からは,  $P_1(c)$  から生じてくるような Pc 3 が, magnetic local time にして 02 時~05 時に最も多く見られることを示している. この時間帯は, 一般に Pc 3 の出現頻度が真昼付近にあるとする従来の統計結果と比較してかなり早い. このことは, 図 12 で見ている Pc 3 は, 従来一般的に言われている Pc 3 に比べて, 異なる性

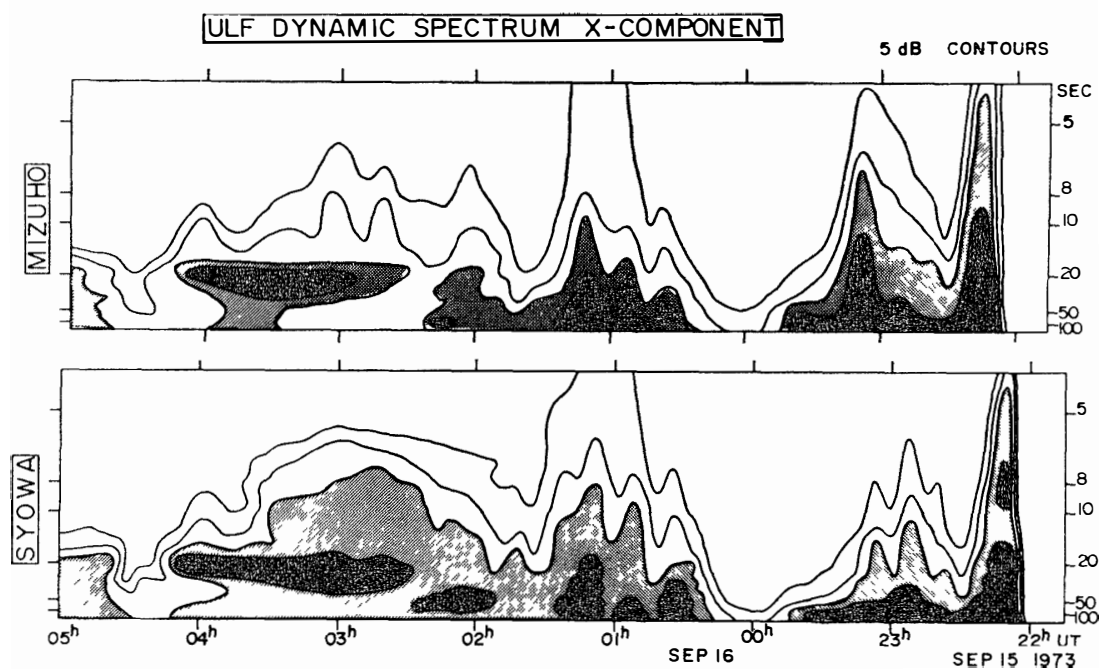


図 11 みすほと昭和基地での脈動  $H$  成分のダイナミックスペクトラム

Fig 11. Dynamic spectra of ULF  $H$ -component recorded at Mizuho and Syowa Stations (5 dB contours)

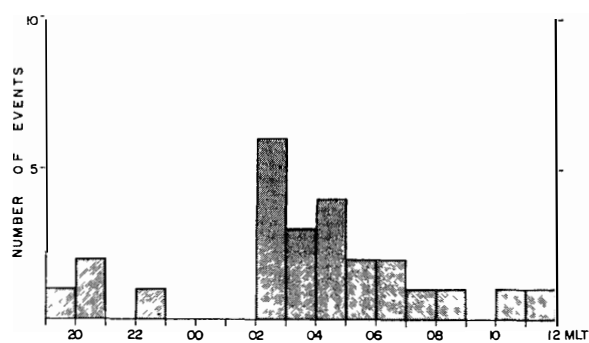


図 12 サブストームに関係するとみられる  $Pc\ 3$  の発生頻度

Fig 12. Occurrence frequency of the substorm-associated  $Pc\ 3$  event

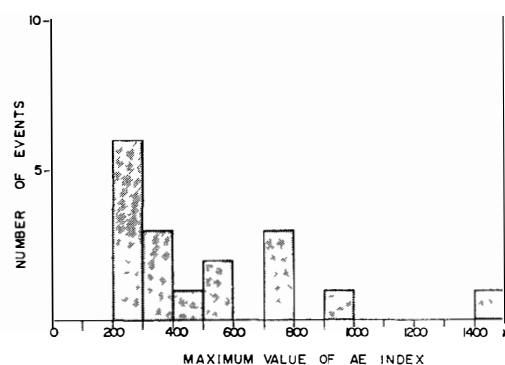


図 13 サブストームに関係するとみられる  $Pc\ 3$  が観測される時の AE 指数の最大値

Fig. 13 Substorm activity dependence of the event

質の現象を見ている可能性を示唆する。このような  $Pc\ 3$  型脈動とサブストームとの関連を見るために、 $Pc\ 3$  が発生している時間で観測された AE index の最大値の大きさを調べてみた。結果を図 13 に示す。AE index が 0~200 の間、つまりサブストームの activity が比較的弱い時には、 $P_1(c) \rightarrow Pc\ 3$  という現象は見られないが、ある程度 AE index が大きくなる、つまりサブストームの activity が強くなると現象がでてくる。このことは、ここで問題にしている  $Pc\ 3$  が、サブストームと何らかの関連をもっていることを示唆する。

## 5. お わ り に

Pi 2 については、発生機構に対する image がかなりはっきりとしてきた。つまり Pi 2 は、auroral oval に根をもつ line of force の oscillation であるという model で、観測事実を説明できるということである。しかしなぜ、oscillation が起きなければならないかという問題については未解決である。この問題と共に、Pi 2 が極光帯から plasmapause を経て中低緯度に至る過程も、今後明らかにしていく必要がある。

Pi (c) から Pc 3 が生じてくるのか、あるいは両者がまったく無関係であるのかについては、著者は今後サフストームとの関連、また Pi (c) と Pc 3 の波動特性を明らかにしながら解決していきたいと思っている。McPHERRON and COLEMAN (1971) によって satellite でも似たような現象が観測されており注目していきたい。

## 謝 辞

本研究の観測資料を得るにあたっては、第 14 次越冬隊の各隊員にお世話になり心から謝意をあらわす。また本研究におけるディジタルスペクトラムの作成は、国立極地研究所の計算機システムにより行われたものである。

## 文 献

- FUKUNISHI, H (1973) Observations of geomagnetic pulsations in the winter of 1970 at Mizuho Camp Nankyoku Shiryo (Antarct Rec), **47**, 39-45.
- HIRASAWA, T and NAGATA, T. (1972). Constitution of polar substorm and associated phenomena in the southern polar region JARE Sci Rep, Ser. A, **10**, 1-74.
- KUWASHIMA, M (1975) Some characters of substorm-associated geomagnetic phenomena in the southern polar region (I). Mem. Kakioka Mag. Obs, **16**, 95-110
- McPHERRON, R. L and COLEMAN, P. J, Jr. (1971) Satellite observations of band-limited micropulsations during a magnetospheric substorm J Geophys Res, **76**, 3010-3021
- 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.

(1978 年 6 月 10 日受理)