

1978年12月11日に科学衛星 JIKIKEN (EXOS-B)
によって観測された
ミニサブストームに伴う長周期 Pi2 磁気脈動*

齋藤 尚生**・湯元 清文**
青山 巖***・遠山 文雄***・高橋 隆男***

Typical Mini-substorm and Long-period Pi2 Event
Observed by The Jikiken Satellite on December 11, 1978
By
Takao SAITO, Kiyohumi YUMOTO,
Iwao AOYAMA, Fumio TOYAMA and Takao TAKAHASHI

Abstract: A typical long-period Pi2 event that was associated with a distinct mini-substorm took place at 1355UT (2255 in 135° east meridian time) on December 11, 1978, after a successive ten-day magnetically calm period. The event was observed simultaneously at both the Jikiken (Exos-B) satellite near an expanded plasmopause on the 21h LT meridian and a ground-based station, Onagawa, on the ~23h LT meridian. The plasmopause position before the substorm onset is estimated from the stimulated plasma wave experiment to be $L \geq 6.3$. A dynamic spectrum analysis of the data revealed that the observed main period of the Pi2 was 140 seconds at Jikiken, and both 140 and 220 seconds at Onagawa. The torsional oscillation model (namely, the plasma-sheet model) that an odd mode hydromagnetic torsional oscillation of the contracted dipole-like field-line that was excited by the distant plasma instability on a tail-like field-line is applied to explain the mechanism of the Pi2. The tail-like field-line whose apex was at $> 16.4 R_E$ is assumed to contract rapidly due to the instability to the dipole-like one with the apex at $9.2 R_E$. The period of 140 sec of the same Pi2 event observed at Jikiken is interpreted as a transient hydromagnetic surface wave excited secondarily on the plasmopause. This mechanism is discussed in comparison with the Pg model that a hydromagnetic surface wave on the expanded plasmopause excited by a

* 宇宙研特別事業費による研究論文
*** 東海大学工学部

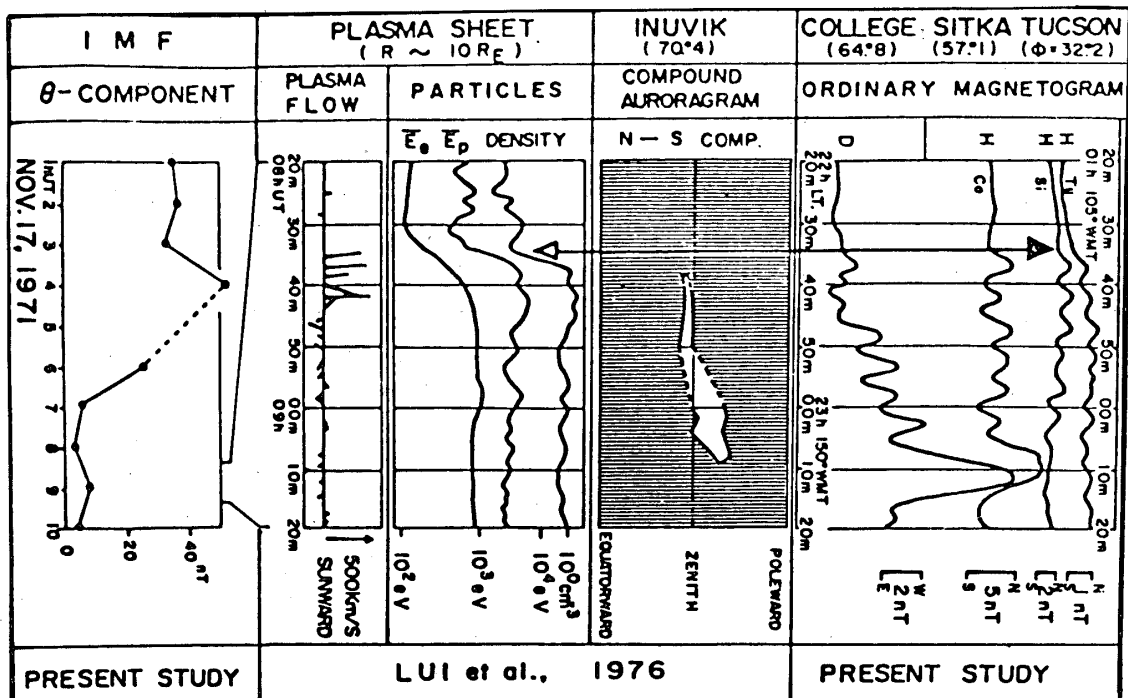
** 東北大学理学部

plasma instability on the plasmapause is observed as a giant pulsation in the auroral zone.

1. 緒 言

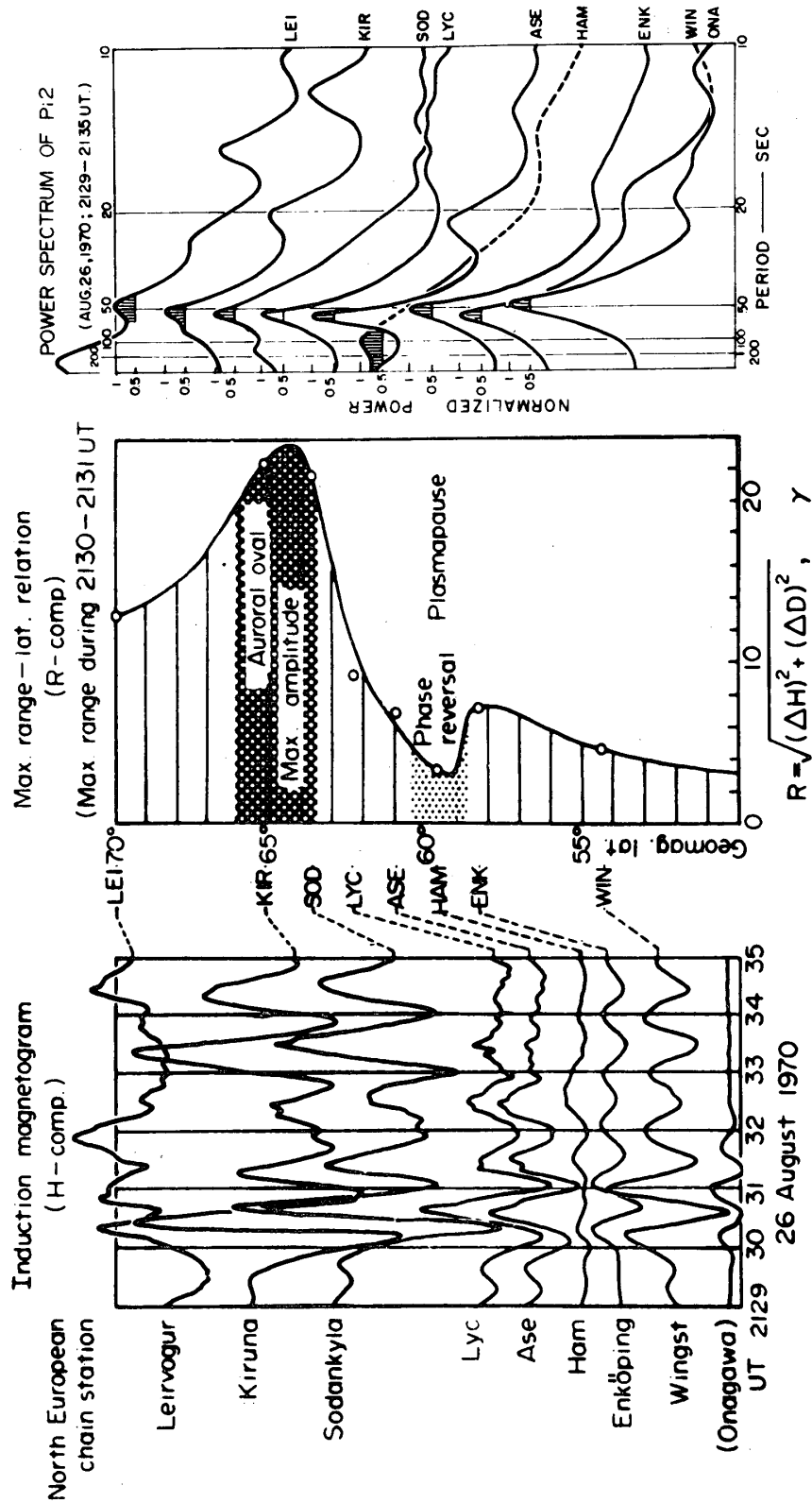
磁気圏内の様々な物理量の時間変動は、ほとんど総て substorm time の関数として記述されると言ってもよい。この様に substorm 現象は、磁気圏物理学における基本的擾乱として重要であるが、それだけに複雑な現象間の複雑な因果関係を解き明かしていくことは容易ではない。ところで複雑な現象を研究するには、極限にまで単純化された event を探し出してその機構を考え、その model に次第に複雑要素を加味していく方法がある。この立場から追求した substorm の極限状態が mini-substorm である。

この様な mini-substorm の典型的な一例を第1図に示す。図から明らかな様に mini-substorm といえども substorm としての signature は、全て揃っている。しかし、磁場変動をみるといわゆる湾型変化成分がほとんど零なので、一見 substorm とは似ても似つかない様相をしており、しかも長周期 Pi 2 を伴うというのが mini-substorm の特徴である (Saito, 1977; Saito et al., 1978)。即ち、周期 45~150 秒という国際分類 (Saito, 1978 の Table 1) からすれば長周期過ぎて Pi 2 の範疇に入らないけれど物理的には Pi 2 である様な脈動を伴い、しかも湾型変化成分がほとんど零であるにも拘わらず物理的には一人前の



第1図 Mini-substorm における Pi 2 と substorm signatures.

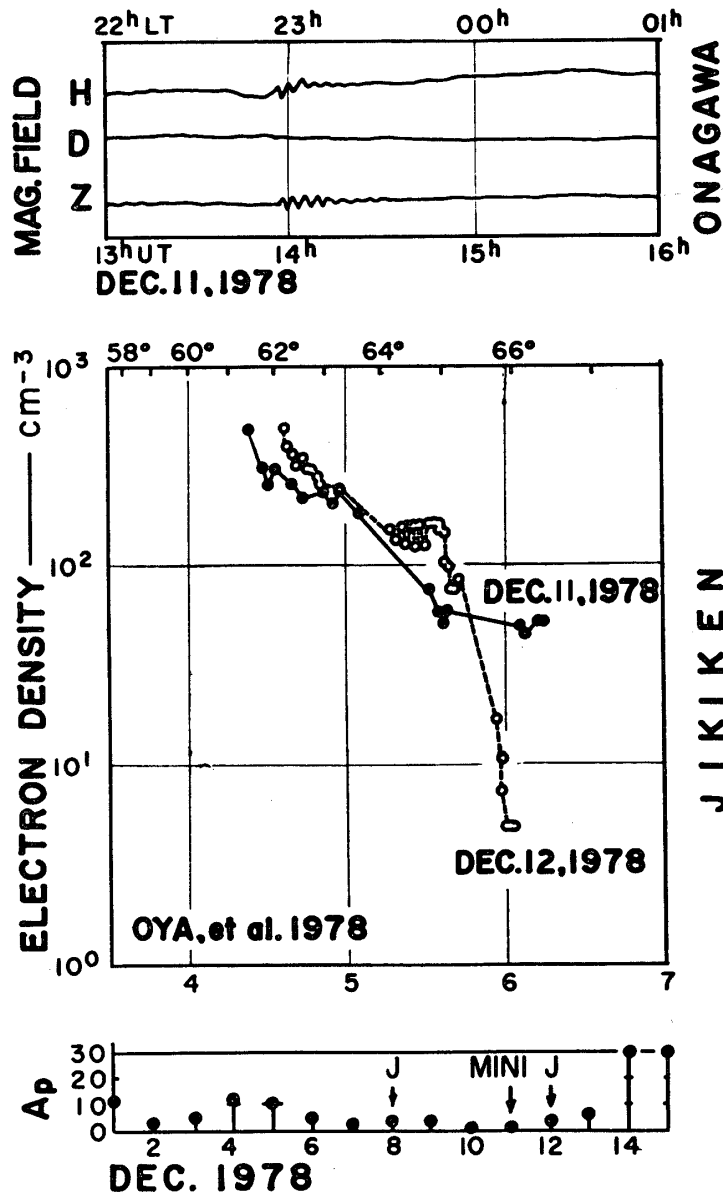
COHERENCE OF Pi2



第2図 Pi2の振幅および周期の緯度の緯度プロファイル。

substormであるというのが mini-substorm である。

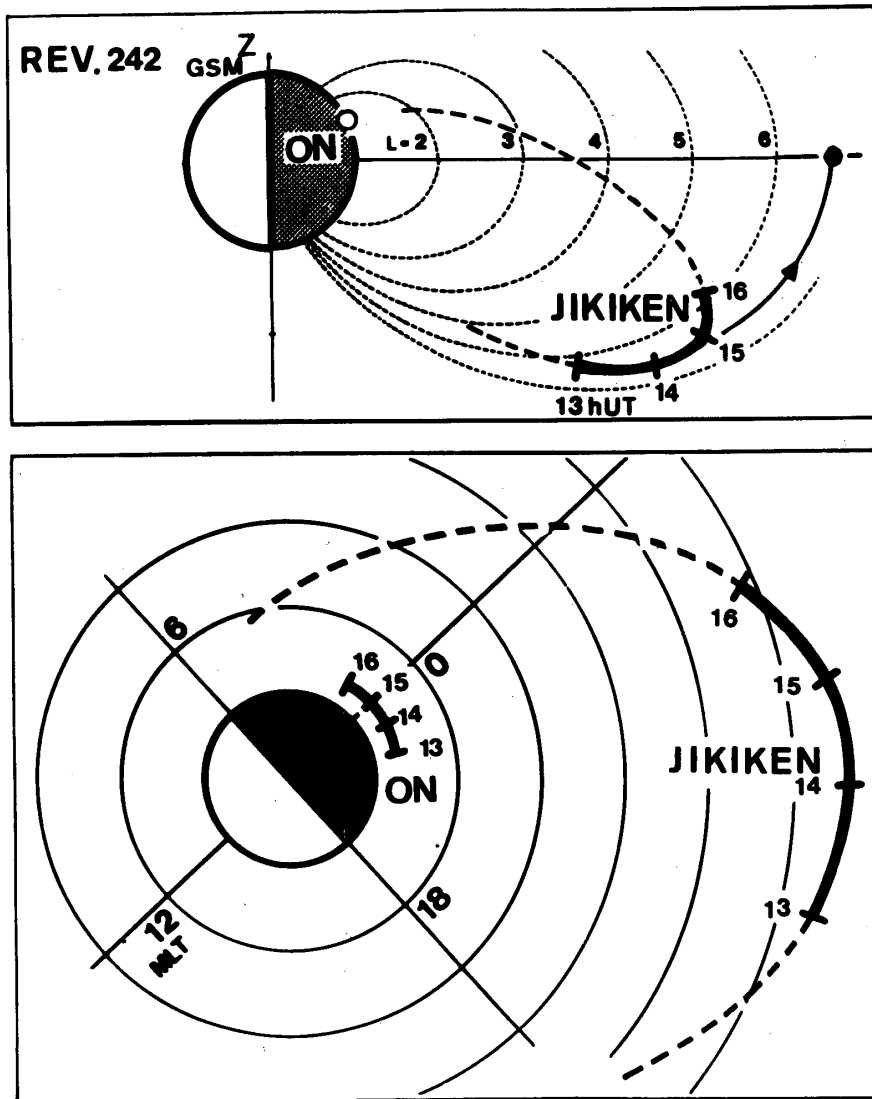
Pi 2 の緒性質の中で大事な点の一つは、その振幅が auroral oval に 1st peak があり、plasmopause 付近に 2nd peak があるということと、地上では極域から低緯度にかけて共通な Pi 2 周期成分が存在しているということである(第2図; Saito et al., 1976; Saito, 1979)。この点については既に日本では数年前から定説となっていたが、本年3月に東京で開催された International Workshop on Selected Magnetosphere Topics のsummary として EOS に特筆された(Russell, 1979)ことはむしろ遅きに失していると言えよう。



第3図 “じきけん” によって観測された plasmopause のprofile と 女川で観測された mini-substorm.

2. Dec. 11, 1978の mini-substorm

mini-substormは、今まで幾例も見出されている (Saito & Sakurai, 1970; Saito, et al., 1976 ; Sakurai & Saito, 1976 ; Sakurai, 1977) が、その最も典型的な例の一つが“じきけん”衛星の飛翔中に観測された。第3図上が女川地磁気観測所の fluxgate magnetometer で観測された問題の mini-substormである。図に示される様に 1355 UT 以後、湾型変化に類する磁場変化はほとんど認められず、唯一の磁場変動である周期~220秒の減衰型振動も、国際分類 (Pi 2 ; 40~150秒) をそのまま機械的に適用するならば Pi 2 ではない。それにもかかわらず 13h 55m UT から始まるこの現象は“物理的”には立派な mini-substorm であり Pi 2 であるというのが我々の主張である。第3図下は 1978

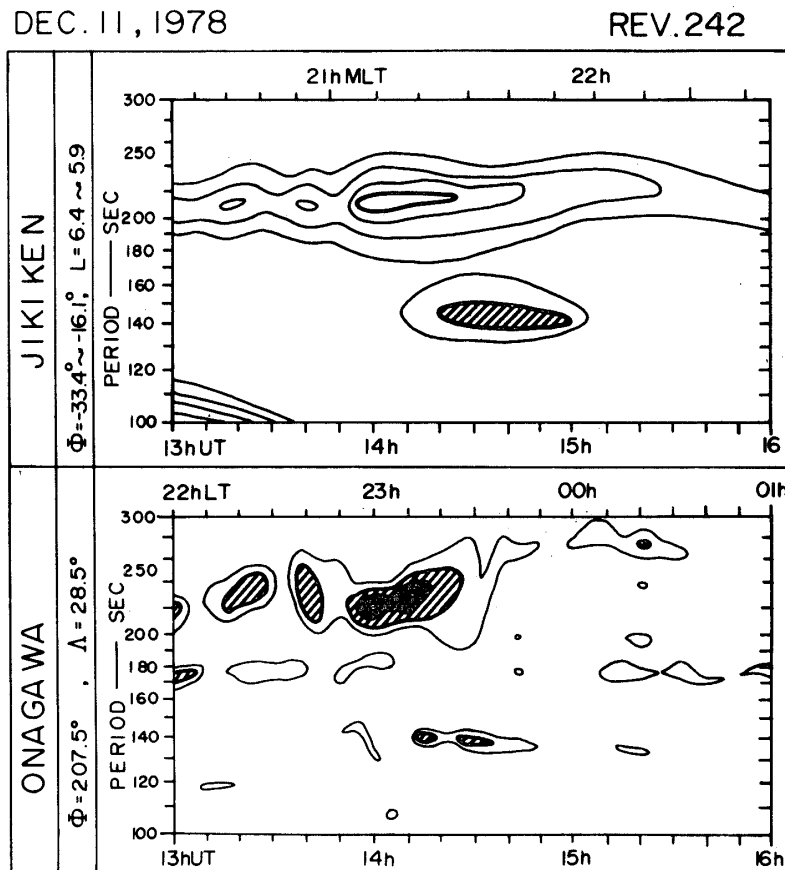


第4図 mini-substormが発生したときの“じきけん”の位置

年12月中の Ap index を示すが、この mini-substorm は Ap の極めて静穏な期間が～5日続いた後に発生し、 $K_p=O_0$ という極限状態で起った点でも正に教科書的な mini-substorm である。しかもこの現象の起きた日に、大家ほか(1978)によって“じきけん”における能動実験 (SPW) が行われたが、その結果は第3図中に示すごとく、11日における plasma-pause latitude は 66.5° 以上、即ち通常の auroral zone より高緯度であり、plasma-pause が異常にふくれ上っていたという教科書的な極限状態に発生したのである。

この mini-substorm が起きた時の“じきけん”の位置を第4図に示す。L = 6以上ふくれ上った plasmasphere のまさにその plasma-pause 付近に“じきけん”は位置し、local time では 21時 meridian 付近に位置している。この時の女川観測所は、ほとんど 23時 meridian 上の位置にある。

“じきけん”で観測された space 磁場変動と女川で観測された地上磁場変動をスペクトル解析すると第5図の様になる。上側が“じきけん”，下側が女川の frequency versus time の mini-substorm の dynamic spectrum である。先ず、女川 data についてみると、～220

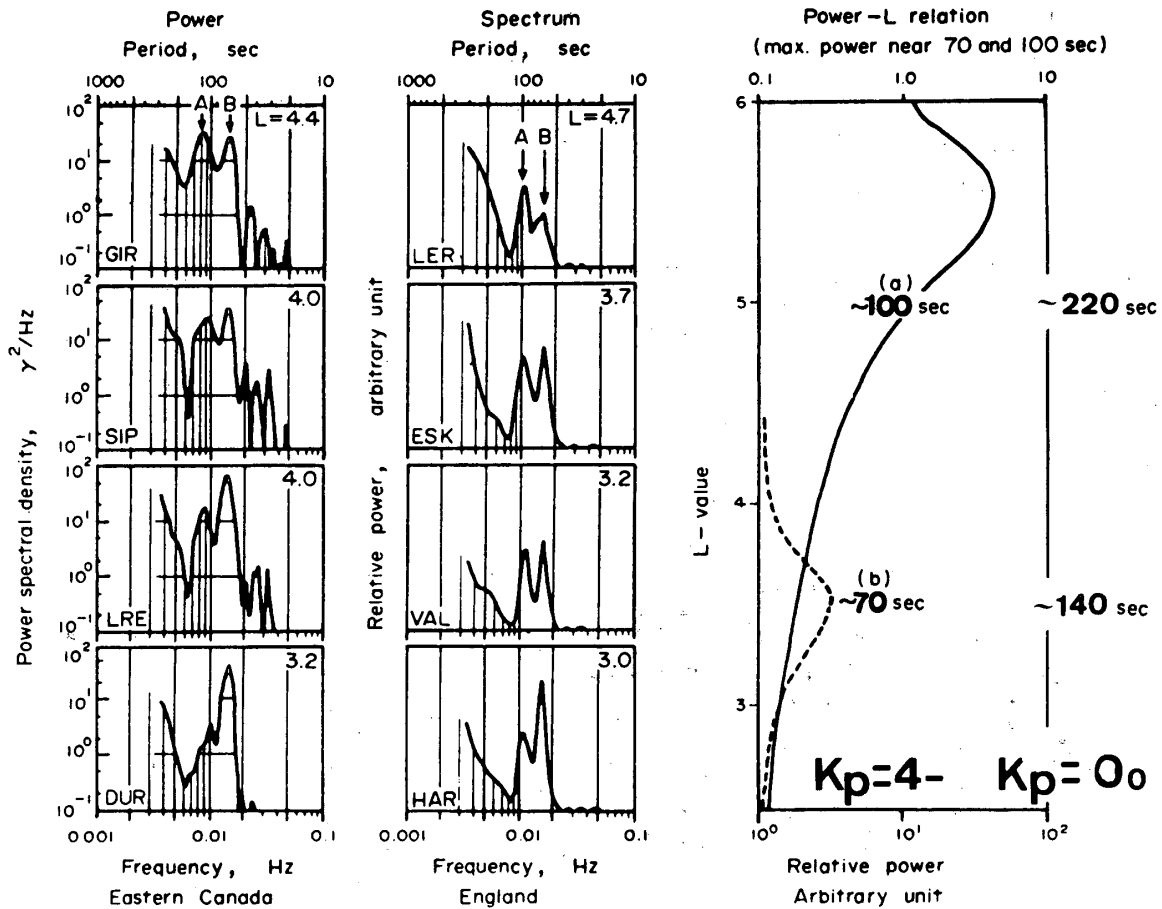


第5図 “じきけん” および女川で観測された mini-substorm に伴う磁場変動の dynamic spectrum

秒の signal が mini-substorm の出現とは無関係に何 10 時間も連続的に出ているが、これは satellite の spin に関する artificial な noise と考えられる。もう一方の mini-substorm 期間中にだけ起きた ~ 140 秒の significant な signal は、地上と周期がぴったり一致している。従って、この ~ 220 秒と ~ 140 秒の磁場変動は、前者が auroral oval shell 上に励起された波で、後者が plasmopause の所で二次的に励起された波と解釈される。ところで“じきけん”における ~ 220 秒の波の存在は、artificial noise によってはっきりしないが、一般的に space での磁場変動は equator で ~ 0.5 R_E の shell に localize されている (Hughes et al., 1978) ので、“じきけん”でこの ~ 220 秒の波が観測されていなくとも解釈に矛盾はない。

3. Pi 2 model

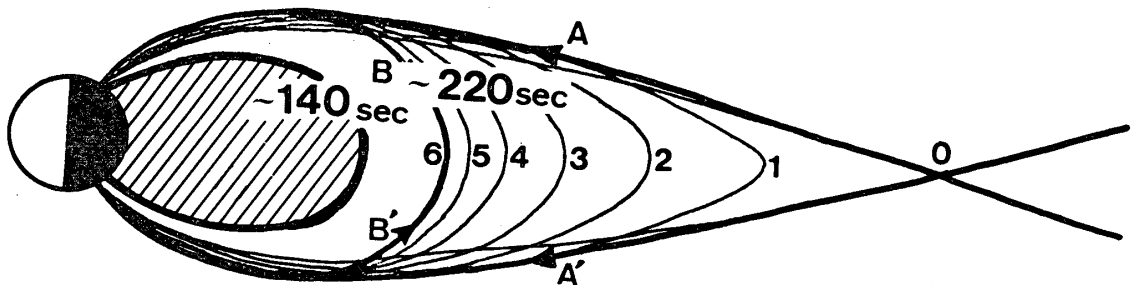
前節で述べた 220 秒と 140 秒という double peak の解釈が正しいかどうか、一般の Pi 2 について確認する。第 6 図は、Eastern Canada (Fukunishi, 1975) と England (Stuart,



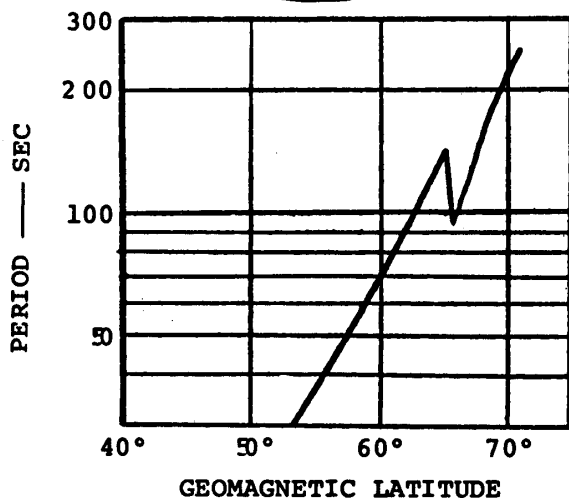
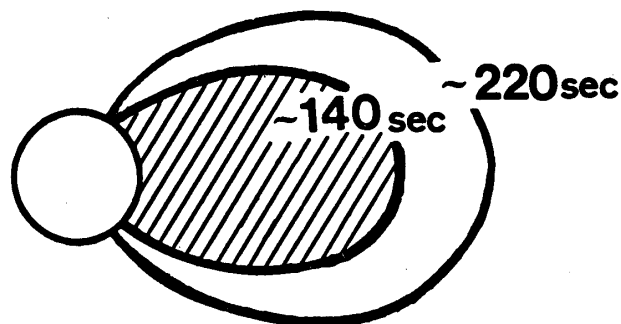
第 6 図 Pi₂ 振幅と周期の latitudinal profile とその K_p 依存性

1974)の別々の chain station で観測した,別々の日の Pi 2 の L -値に対する power spectral density の分布を同一の座標系で書き直したものである (Saito et al., 1976). 両者とも A B で示す様な double peak が存在し, しかもそれぞれの peak の L -値に対する変化は, 第6図右側の様に別な所で maximum になる様な profile を示し, 高緯度側の peak が auroral oval shell 上で励起された波, 低緯度側の peak が 2 次的に plasmopause 付近で励起された波と解釈される (Saito et al., 1976). 従って, 第5図で示された double peak の存在は, Pi 2 amplitude の latitudinal profile と一致し, 又, $K_p = 4+$ のときに比べて今回の mini-substorm の様に $K_p = 0_0$ のときは, 励起される磁力線の L -値は大きい方に shift して, それぞれ ~ 220 秒と 140 秒になることもつじつまが合っている.

そこで次にこの double peak の周期を吟味してみる. Pi 2 model を第7図に示すが, その model によると磁気圏尾で X 型中性線が形成されて substorm が発生すると, aurora 粒子と共に Alfvén wave が磁力線 A に沿って 0 点から極域電離層まで到達し, 地上で auroral 及び ULF substorm の onset として観測される. Alfvén 波は極域電離層で反射されて磁力線沿いに再び磁気圏に戻るが, このとき磁気圏尾の磁力線は既に tail-like (0) から dipole-like (6) に変化しており, (6) の dipole-like になった磁力線上で Alfvén mode の standing oscillation が励起される. 一方, 二次的に plasmopause 付近でも standing oscillation が励起される (Saito, 1979 ; Saito & Yumoto, 1979). “じきけん” による直接観測 data にもとづいて, plasmopause の latitude ϕ を 65° とし, 磁力線の apex での radial distance R_p , 磁場 B_p 及び density N_p を第8図の様に設定したとき, plasmopause 近傍での Alfvén 波による odd mode standing oscillation の周期は 140 秒となる. 一方, auroral oval の緯度を 70° と仮定し, appropriate な R , B , N の値を仮定すると, odd mode standing oscillation の周期は 220 秒となる. 以上のことは第5図で示された Pi 2 の double peak の存在する観測事実をうまく説明でき, Pi 2 の odd mode model が正しいことを示唆している.



第7図 Pi 2 model



ϕ	65°	70°
R_p	5.6	9.2
B_p	180	41
N_p	55	3

第8図 Pi 2 model にもとづいた周期の期待値

4. 討論と結語

“じきけん”で観測期間中に極めて教科書的な長周期 Pi 2 が観測されたが、その解析結果からこの磁場変動は、substormの極小限界 (bay component をほとんど含まず、Pi 2の範疇からはみ出した long-period Pi 2 だけの substorm) を示す mini-substorm であると判定された。この様に substorm の原型とも言える mini-substorm を解析した結果、次の点が明らかになった。

(1) もし、 $X = -R$ の点で X-type neutral line が形成され、inward flow によって t 秒後に $X = -R_p$ の点まで field line が縮まったと仮定すると、

$$t \equiv 2(T_{obs} / 4) + t' \dots\dots\dots ①$$

地球半径を a とすると、

$$t = (R - R_p) a / V_{obs} \dots\dots\dots ②$$

第1図から $V_{obs} = 300 \text{ Km/s}$ とし, 第8図から $R_p = 9.2$ とすると

$$R = 0.047 t' + 16.4 \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

$t' \approx (R - R_p) a / V_A$ (V_A ; Alfvén 速度) > 0 なので
 $R > 16.4 R_E$ でなければならぬ, 即ち substorm を励起する X-type neutral line の発生場所は, 極小限界 substorm においては $|X| > 16.4 R_E$ でなければ説明つかない (実際には(2)で述べる様に $X = -20 R_E$ 程度の値をとると考えられる). 従って, 極大限界に近い substorm においては $X \approx -5 R_E$ である (国分, 1978) という観測事実とあわせると $|X|$ の範囲は $5 \sim 20 R_E$ となるので, $X = -15 R_E$ という固定観念は改められなければならぬ. このことは例えば OPEN-J の軌道決定 (大林&西田, 1979) という具体的問題に関連しても大変重要な結論である.

- (2) substorm が発生すると magnetotail の磁力線の形は, tail-like から dipole-like に変るということは早くから考えられていた (McPherron et al., 1973) が, その速さについてはほとんど知られていなかった. しかし今回の mini-substorm 時の Pi 2 の場合, ③式において仮に $R = 20 R_E$ という大きな値を仮定したとしても $t \approx 230$ 秒にしかならない. 一方, 極大限界に近い substorm においては, $X = -5 R_E \cdot T_{obs} = 40 \text{ 秒} \cdot V_{obs} = 100 \text{ Km/s}$ とすると, ①②式から

$$R_p = -0.015 t' + 4.7 \quad \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

となり, 仮に $R_p = 4.5 R_E$ という小さな値を仮定しても $t = 31$ 秒に過ぎない. 即ち, 今回の解析結果からすると tail-like の磁力線は僅か 0.5 ~ 4 分程度で dipole-like に縮まっていなければならないという新たな結論が導き出された. このことは substorm の機構を考える上で大変重要な結論である.

- (3) plasmasphere が $\sim 6 R_E$ にふくれるにはこれまでは 1 カ月位を必要とする (Carpenter, 1968) とされてきたが, 今回の mini-substorm の解析結果から 1 週間位で十分であることが実証された. 又, 今回の解釈結果は SPW の実験結果が正しかったことも裏付ける.
- (4) Pi 2 は plasmasphere の内側だけで観測される現象であり, その外側の特に aurora 粒子が降りこむ領域では, 全く noisy な Pi 2 が観測されて Pi 2 成分は存在しないという説が, 一部ではかなり長く信じられてきたが, 今回の解析によっても, Pi 2 の main source は midnight auroral oval 上にあるという従来からの我々の説 (Saito, 1961; Saito & Matsushita, 1968; Saito & Sakurai, 1970; Saito et al., 1976) が正しいことを実証した.
- (5) Pi 2 は一般に短周期であり, 従って極めて station distribution の悪い induction magnetometer でしか観測出来なかった為に, 真に worldwide な波動分布が明らかにされた例は皆無であった. しかし今回の Pi 2 現象は, ordinary magnetogram でも容易に指摘できる長周期現象であり, しかも noon meridian に近い auroral zone station である Kiruna でも $\sim 4 \text{ nT}$ 程度の振幅で観測されている (Kiruna Geophysical Data,

1979) 位 world-wide な現象である。従って、Pi 2の(特に原型的 Pi 2の)波動特性を研究する上でも、今回解析したPi 2は極めて教科書的な見事な event である。

- (6) この論文で取扱った脈動は、distant magnetotail で発生した plasma instability により二次的に plasmopause で励起されて、 ~ 140 sec の脈動が plasmopause で観測されたと解釈した。ところで distant tail でなしに、膨んだ plasmopause 近傍で instability が生じて、非常に sinuoidal な脈動が plasmopause latitude 近傍のみで観測されるという機構が考えられる。 1930年代から、Rolf, Sucksdorff, Harang, Annexstadt 等により数多くの報告がなされているにも拘わらず、その機構が解明されていない。giant pulsation (Saito, 1964 & 1969) はこの様な原因によると考えれば、giant pulsation に関する次の観測諸事実がうまく説明出来る。
- (A) 観測される周期は 100 ± 50 sec である。
- (B) auroral zone 付近の極く狭い緯度範囲 ($\sim \pm 6^\circ$) でしか観測されない。
- (C) 波形が極めて sinuoidal で、その envelope は shuttle type である。
- (D) sunspot minimum phase の、地磁気静穏時にのみ観測される。
- (E) その頃の発生頻度は 1 ~ 12 回/年、振幅は ~ 10 nT である。
- (F) substorm には associate しない。
- (7) 第8図の curve における切りこみは、 K_p が大きくなると plasmasphere が収縮するので左下方に移動し、従って $K_p \sim 9$ 程度の大 storm 時には、中低緯度で数秒 ~ 10 秒程度の torsional mode の波が観測される可能性がある。 日本で aurora が観測されたことで有名な Sept. 13, 1957 大磁気嵐の main phase で、1050-1640 UT に女川で観測された周期 3 ~ 4 秒の短周期 Pc 現象 (RI SRJ, 12, 138, 1958) や、Sept. 23, 1957 大磁気嵐の main phase で、0805-0920 UT に女川で観測された周期 6 ~ 9 秒の短周期 Pc 現象は、今日の知識から振返ると、この様な機構によるものと考えられる。

1979年9月17日

参 考 文 献

- [1] Carpenter, D.L.; Recent research on the magnetospheric plasmopause, Radio Sci., 3, 719, (1968).
- [2] Fukunishi, H.; Polarization changes of geomagnetic Pi2 pulsations associated with the plasmopause, J. Geophys. Res., 80, 98, (1975).
- [3] Hughes, W.J., R.L. McPherron and J.B. Barfield; Geomagnetic pulsations observed simultaneously on three geostationary satellites, J. Geophys. Res., 85, 1109, (1978).
- [4] Kiruna Geophysical Institute; Data summary 78/10-12, Kiruna Geophysical Data, Printed in Sweden, ISSN 0453-9478, (1979).
- [5] 国分征; 静止衛星高度における Substorm Signature-II, 第64回日本地球電気磁気学会予稿集, P-28, (1978).
- [6] McPherron, R.L., M.P. Aubry, C.T. Russell and P.J. Coleman, Jr.; Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968, J. Geophys. Res., 78, 3068, (1973).

- [7] 大林辰蔵・西田篤弘 ; OPEN-J 計画について, 科学衛星シンポジウム, 5月24日~26日, 121-128, (1979).
- [8] 大家 寛・小野高幸・鎌田哲夫 ; プラズマ波励起実験 (SPW), 磁気圏プラズマ波動に関するシンポジウム, P. 188, (1978).
- [9] Russell, C.T.; The international workshop on selected topics of magnetospheric physics, EOS, 60, No. 20, May 5, (1979).
- [10] Saito, T.; Oscillation of geomagnetic field with the progress of Pt-type pulsation, Sci. Rept. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys., 13, 53, (1961).
- [11] Saito, T.; Mechanisms of geomagnetic continuous pulsations and physical states of the exosphere, J. Geomag. Geoelec., 16, 115-151, (1964).
- [12] Saito, T.; Geomagnetic pulsations, Space Science Reviews, 10, 319-412, (1969).
- [13] Saito, T.; Study of mini-substorm as a suitable research theme during IMS, Proc. IMS Symp., held at ISAS, Tokyo Univ. on 14-16, July, 203-212, (1977).
- [14] Saito, T.; Long-period irregular magnetic pulsation, Pi3, Space Sci. Rev., 21, 427-467, (1978).
- [15] Saito, T.; Pi2-type pulsations associated with magnetospheric substorms, Magnetospheric Study 1979, 104-110, (1979).
- [16] Saito, T. and S. Matsushita; Solar cycle effects on geomagnetic Pi2 pulsations, J. Geophys. Res., 73, 264, (1968).

- [17] Saito, T. and T. Sakurai; Mechanism of geomagnetic Pi2 pulsations in magnetically quiet condition, Sci. Rept. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys., 20, 49, (1970).
- [18] Saito, T., T. Sakurai and Y. Koyama; Mechanism of association between Pi2 pulsation and magnetospheric substorm, J. atoms. terr. Phys., 38, 1268, (1976).
- [19] Saito, T., T. Sakurai, T. Tamura and K. Yumoto; Magnetospheric disturbances and ULF-Hissgram and prediction of mini-substorm, Proc. IMS Symp., held at ISAS, Tokyo Univ. on 12-14, July, (1978).
- [20] Saito, T. and K. Yumoto; Examination of the odd mode of Pi2 based on an analysis of ULF signals received at the Syowa station, Proc. Symp. on Polar Ionospheric and Magnetospheric Observations, held at National Insti. of Polar Research, Tokyo on 14-16, February, (1979). (In press)
- [21] Sakurai, T.; Role of low-latitude Pi2 on identifying the onset of magnetospheric substorm, Proc. IMS Symp., held at ISAS, Tokyo Univ. on 14-16, July, 213, (1977).
- [22] Sakurai, T. and T. Saito; Magnetic pulsation Pi2 and substorm onset, Planet. Space Sci., 24, 573, (1976).
- [23] Stuart, W.F.; A mechanism of selective enhancement of Pi2's by the plasmopause, J. atmos. terr. Phys., 36, 851, (1974).