

極光帯—プラズマポーズ領域の ULF 波動の特性

林 幹治*・小口 高*・国分 征*・鶴田浩一郎**

渡辺富也***・R. E. HORITA****

ULF Wave Characteristics in the Auroral Zone through the Plasmopause

Kanji HAYASHI*, Takasi OGUTI*, Susumu KOKUBUN*, Koichiro TSURUDA**,
Tomiya WATANABE*** and R E HORITA****

Abstract: Geomagnetic pulsations in the auroral zone through the plasmopause were examined on the basis of IMS observation data obtained in Canada. It was shown that the geomagnetic pulsations in the daytime are reasonably accounted for in terms of HM waves propagating from outside, and that the pulsations in the dawn sector, on the other hand, are likely due to the fluctuations in the ionospheric electric currents related to the pulsating auroral precipitations. It was also shown that the wave characteristics of Pc 1 pulsations in the dusk sector are consistent with the confinement of their initial source region in a small extent, spreading through the upper ionospheric duct.

要旨 カナダ, マニトハ州において, IMS 観測の一環として実施した, 極光帯からプラズマポーズにかけての地磁気脈動の観測結果から, 次の事柄が知られた。

昼間帯の地磁気脈動は, がいして広範囲にわたってよい相関を示し, 磁気圏における HM 波の効果と見なしてよいが, 明け方の地磁気脈動は相関距離が短く, 脈動型オーロラに伴う電離層電流のゆらぎによるものと考えられる。また, 夕方側によく見られる Pc 1 型脈動は, その波源は小さな領域に限られており, 広範囲の拡がりは主として上部電離層のダクト伝搬によるものと思われる。

1. 序 論

ULF 波動の多くは, 極光帯近傍に対応する磁気圏領域に起源を持つと考えられている。このあたりから磁気圏の内側に伝搬する HM 波動がプラズマ圏境界域でマクロな構造的共鳴

* 東京大学理学部地球物理研究施設, Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, 11-16, Yayoi 2-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

** 東京大学宇宙航空研究所, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153.

*** Department of Geophysics and Astronomy, University of British Columbia, 2075 Wesbrook, Vancouver 8, B. C., Canada V6T 1W5.

**** Department of Physics, University of Victoria, Victoria, B. C., Canada V8W 2Y2.

を起こし、これがそのあたりの脈動のピークに対応する、と考えるのが一般的である。確かにそのような部分は存在すると思われるが、実際にその領域での観測に基づいた実証は、必ずしも十分行われているとは言えない。

この領域の地上における ULF 波動の特性を総合的に理解するために、IMS 観測の一環としてカナタフリティニューコロンビア大学と共同でマニトバ州に数点の ULF 観測点を置き、そのうち 1-2 点ではオーロラ TV および VLF-DF の観測をあわせ実施した。

2 観 測

1975 年夏にトンフソンおよびスターレイクにおいて予備調査を行い、1976 年 8-9 月、1977 年 2 月、1977 年 9 月の三回にわたりチャーチルよりウィニペクに至る間に数点を選んで観測を行った。観測項目、観測点を表 1 に、観測点の分布を図 1 に示す。

3 二種の ULF 変動特性

この領域の Pc 2 より周期の長い ULF 変動は、二つのグループに分類できることが知られる。その一つは昼間側で顕著に見られる Pc 3, 4, 5 等の周期領域のもので、その特徴は広い緯度範囲にわたって変動が

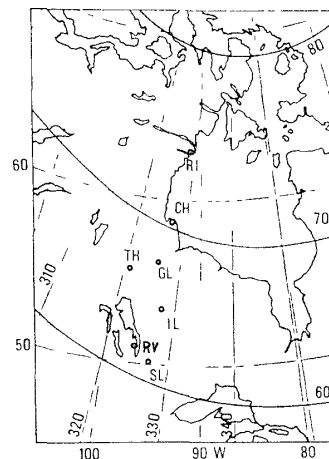


図 1 ULF 観測点の分布, CH チャーチル, GL キラム, TH トンプソン, IL アイランドレイク, RV リハートン, SL スターレイク

Fig 1 Distributions of the ULF stations, CH. Churchill, GL Gullam, TH Thompson, IL Island Lake, RV Riverton, SL Star Lake

表 1 観測ステーション, 観測期間, 観測項目一覧表
Table 1 Stations, periods of campaign and observation items

Periods	Sep 1975	Aug -Sep 1976	Feb 1977	Sep 1977
Station				
Churchill		A, U, V	A, U, V	U
Gillam		U		
Thompson	A, U	A, U, V		U
Island Lake		U		U
Riverton				A, U, V
Star Lake	U	U		U

A aurora, U ULF, V VLF-DF

coherent なことである。図2がその一例で、図に見られるように波形は必ずしも規則的ではないが、チャーチルからスターレイクまでの緯度範囲にわたって、一対一対応がつけられるほど、よい波形の類似性を示している。この事実は、この種の昼間側の脈動が磁力線に垂直な方向にもかなり長い波長を持ち、したがって、外部磁気圏から HM 波として地上に到達していると考えるのが妥当であることを示しているものと言える。すなわち、この種の脈動は、

その起源が外部磁気圏または磁気圏の外にあり、磁気圏内でのマクロな共鳴効果で地上における振幅、位相などの分布がきまると考えてよい (LANZEROTTI *et al*, 1974)

これに対して同じ領域でも明け方に見られる不規則な脈動は、その性質が著しく異なる。図3に示すのがその一例で、観測点毎に波形は変化し、対応のつけられない場合が多い。一般に、同時の記録では高緯度側で長周期成分が卓越し、低緯度側では短周期成分が強く、かつ短周期成分の位相が観測点ごとに著しく異なっているのが特徴

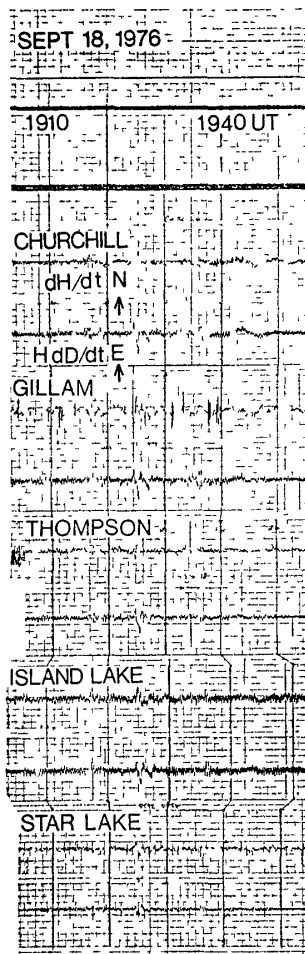


図2 昼間の脈動の例 (水平成分および偏角成分) チャーチルからスターレイクまで波形がよく似ていることが分かる。磁気圏より入射する波によるものと理解できる。1976年9月18日, 1905-1945 UT

Fig 2 An example of dayside geomagnetic pulsation. Wave form is similar from Churchill through Star Lake, suggesting that the pulsation is mainly due to incoming ULF wave. 1905-1945 UT, September 18, 1976

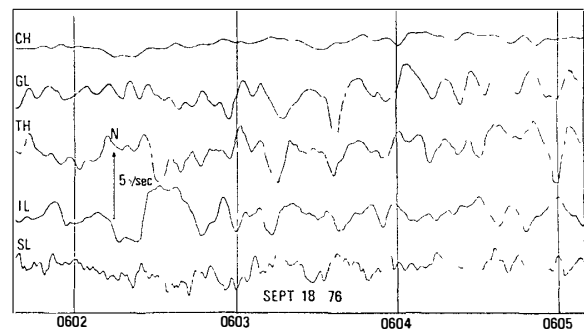


図3 明け方の脈動の例. 水平成分. 波形が不規則であること, 相関の悪いことがその特徴である。1976年9月18日, 060140-060510 UT.

Fig 3. An example of geomagnetic pulsation in the dawn sector. (H component). Wave form is generally irregular, and the correlation distance is as short as a few hundreds of km. 060140-060510 UT, September 18, 1976

である。変動のパワースペクトル(図4)はこの事情をよく表している。すなわち、スペクトル型はノイズ的であり、スターレイクにおけるスペクトルは、チャーチルのそれより著しく短周期側に張り出したパワーを持っている。

上述のように相関距離の短いのがこの種の脈動の大きな特徴であるが、もう一つの特徴はこの種の脈動の、特に短周期成分が局地的なオーロラ脈動とよい対応を示すことである。図4のスペクトルからも知られるように、低緯度側での特徴的な周期は数秒-十数秒であるが、この周期性は典型的なオーロラ脈動の周期と一致する。図5に典型的なオーロラ脈動と、地磁気脈動の例を示す。図は、TVカメラで得られたオーロラ画像から、さまざまな点でのオーロラの脈動の時間変動をとり出したものであり、同時に示された地磁気脈動は、オーロラ高度を100 km としてほぼ観測点の天頂に対応する位置に挿入してある。つまり、ある点で観測された地磁気脈動が、どの部分のオーロラ脈動に対応するものであるかを見るために、相対的位置関係によって並べたものと考えてよい。図から分かるように、オーロラ脈動は空間的に同時に起こるものではなく、パッチはそれぞれ独立に脈動し (CRESSWELL and DAVIS, 1966), そのあるものが近くで起こると近傍の地磁気脈動が、そのパッチとコヒーレントに現れる。二点での地磁気脈動の相関は、脈動するオーロラパッチの空間的スケールによるように見える。

上に述べた明け方の脈動の特徴、つまりノイズ的であること、相関距離が一般に短いこと、10秒バンドが卓越すること、局地的なオーロラ脈動とよく対応することは、この種の脈動が少なくとも地上で観測する限り、広範囲にわたる HM 効果そのものを見ているのてないことを示している。逆に、オーロラ脈動に伴う電離層電気伝導度の変動を介して、局地に電流

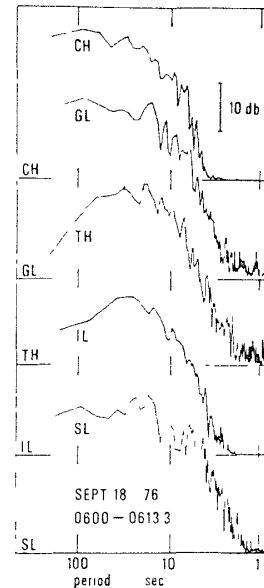


図4 明け方の脈動のスペクトル 緯度が下がるにつれて(特にSL)10秒以下のバンドが卓越する このバンドがオーロラ脈動に対応する 1976年9月18日,0600-6013.3 UT

Fig 4 Amplitude spectrum of geomagnetic pulsation in the dawn sector The band with the period less than 10 sec appears at the lower latitude stations, especially at Star Lake, and it usually corresponds to the band with the same period of auroral pulsation 0600-0613.3 UT, September 18, 1976

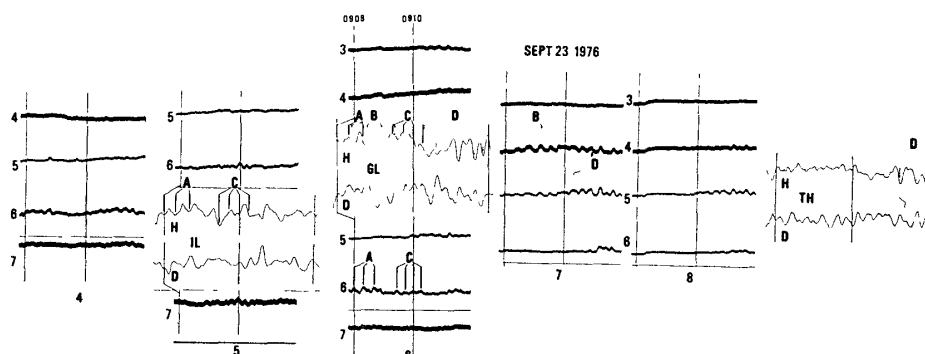


図 5 オーロラ脈動と地磁気脈動. オーロラは、チャーチルから見て方位角7度毎、高度角3度毎の格子点上の明るさの変動を示す. 方位角番号5がほぼ磁気の南に当たる. 地磁気脈動は、ほぼそれぞれの観測点の天頂に当たる位置に挿入してある (オーロラ高度を100 kmと仮定). 地磁気脈動はいくつかの領域のオーロラ脈動の重ね合わせてよく表現されているように見える. 1976年9月23日, 090855-091055 UT.

Fig 5 An example of auroral pulsations (designated as A, B, C and D) along with the concurrent geomagnetic pulsations at Island Lake (IL), Gillam (GL) and Thompson (TH). Auroral pulsations at the grid points viewed from Churchill are shown with 7° in azimuthal and 3° in elevational separations. The elevation number (written at the left of each segment) 7 indicates 3° of elevation and the number decreases with increase in elevation. The azimuth number (written in the bottom) 5 is roughly coincident with the magnetic south and increases with azimuthal angle. The records of the concurrent geomagnetic pulsations at Island Lake, Gillam and Thompson are shown on the same coordinate system roughly at the zenith of each station at 100 km in altitude. The geomagnetic pulsations at each station likely correspond to several neighboring auroral patches in pulsation. 090855-091055 UT, September 23, 1976

のゆらぎを生じ、これが磁場変動として観測されていると考えれば、その方がはるかによく事実を説明することができる. 明け方の脈動は、電離層電流のゆらぎによるものと結論してよいであろう.

ここで問題は、このようにして生まれた電離層電流のゆらぎが、磁気圏にどのような効果を及ぼすかである. 地磁気変動の一部は当然 HM 波として磁気圏にフィードバックされ、再び粒子散乱を介してオーロラ脈動にはねかえっているはずだからである. また粒子束と磁場変動の結合のためには、ホイスラーモードの電磁波あるいは静電波なども介存しているはずである. これに関連して明け方にはコーラスの10秒バンドもしばしば見られる. しかし、磁気圏と電離圏とを結ぶ系での複雑なフィードバック効果は、まだ総合的に理解できるまでには至っていない. またオーロラの10秒バンドも十分よく分かっているとは言い難い.

4. Pc 1 脈動の特性

プラズマポーズから極光帯にかけての領域では、またしばしば Pc 1 脈動が起こる. 起こ

る時間は午後から真夜中にかけて、夕方側が多く、生起緯度および周波数に顕著な時間依存性が現れる すなわち、午後から夕刻にかけて、生起緯度は高い方から周期の長い (~4 秒) Pc 1 が起こり始め、次第に夜中に近づくにつれて活動の中心が低緯度側に移り、周期が短かく (~1 秒) なる 局地的なオーロラの expansion に先立って (おそらく空間的に) 低緯度側で一層強い Pc 1 が現れることも多い。これは、真夜中側で起こった expansion に伴って加速

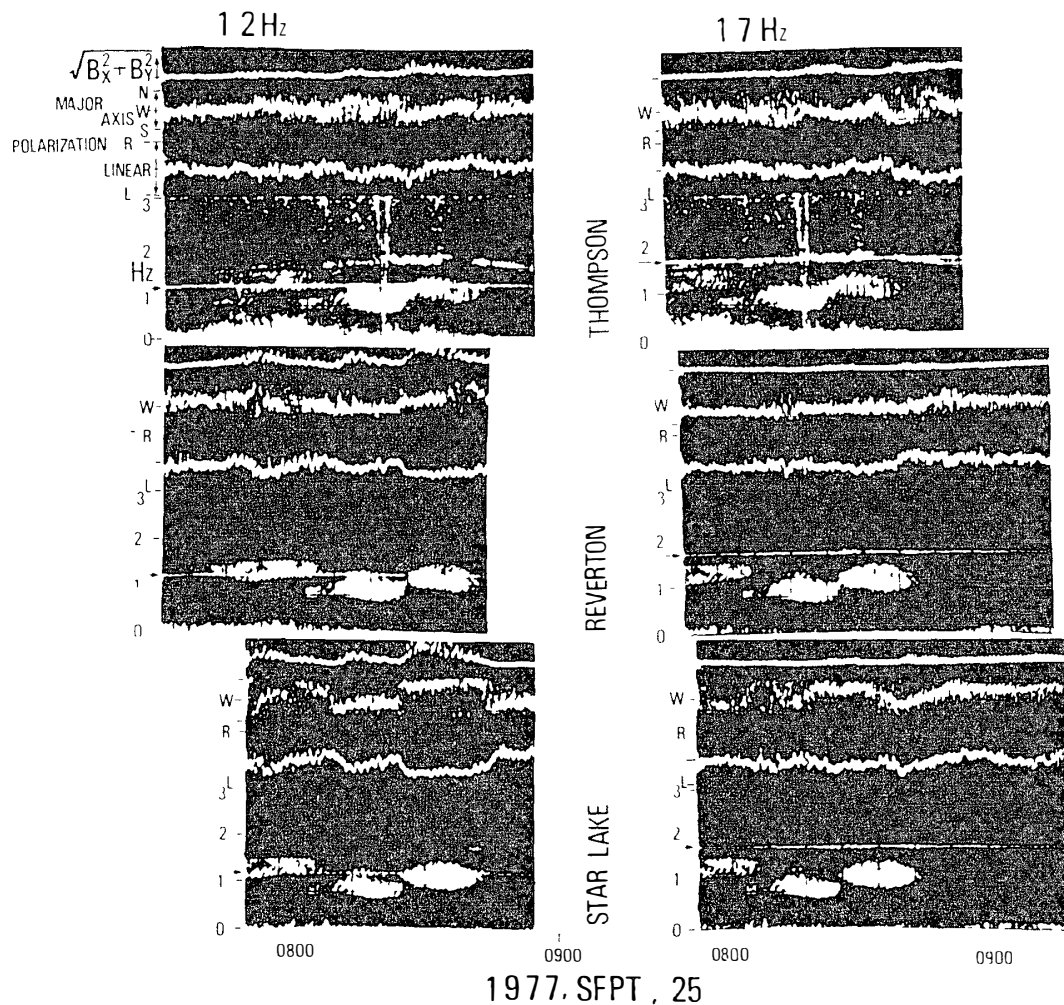


図 6 Pc 1 型脈動の強度、主軸方向、偏波、および周波数スペクトログラム 強度、主軸、偏波の演算を行った周波数は、周波数スペクトログラム中の横線で示されている。ステーションは、 Thompson, Riverton, Star Lake 強度の強い領域で左回り偏波であること、離れるにつれて主軸が東西の直線偏波になる傾向があることが分かる。1977年9月25日, 0800-0900 UT

Fig. 6 Temporal and spatial changes in amplitude, direction of the major axis of oscillation, polarization and period spectrogram of Pc 1 observed at Thompson, Riverton and Star Lake. This horizontal lines in the spectrograms indicates the period by which the amplitude, direction of the axis and the polarization are obtained. Polarization linear with decrease in the intensity elongated in the E-W direction.

されてたプロトンが、西向きにドリフトすることによって起こる、つまり、夕方の Pc 1 は夜側の expansion の結果を見ているものと理解される (FUKUNISHI, 1973). ここで顕著な発生緯度および周期の時刻依存は、プロトンのドリフト距離があまり長くないことを示していると言える。また同時に、ドリフトするプロトンは空間的に局在し、したがって Pc 1 の発生領域もまた実際にはかなり局在していることを示すものでもある。このことは、従来言われている電離層-磁気圏ダクトによる汎世界的な Pc 1 の伝搬と矛盾するものではない。活動の中心から周囲への伝搬は当然起こっているはずであるが、実際に電離圏近傍への入射領域は比較的狭いということである。

このことを端的に示していると思われるのが図 6 である。図には Pc 1 脈動の強度、偏波、主軸の向き、および周波数スペクトログラムが示してあるが、この範囲で言えることは、強度最大の点の近傍で偏波は典型的に左回りで、主軸はやや南北が長く、強度の弱い領域では右回りが現れたりもするが、一般には直線偏波に近づき、主軸は東西に延びる。この特性は、限られた領域に磁気圏から入射した Pc 1 波動が、次第にダクト伝搬に変わって行く過程で理解できるものである。

5. 結 論

極光帯—プラズマポーズ領域の地磁気脈動にはいろいろな種類があり、一口にはその起源を論ずることは難しいが、一般的性質について言えば、昼間側ではがいして遠方の波源から伝搬してくる HM 波の成分を見ていること、これに対して明け方側では、がいして電離層電流のゆらぎという近い波源を見ていることが結論される。また夕方によく見られる Pc 1 脈動については、その波源領域が空間的に限られており、その中では左回り偏波特性を示し、離れるにつれて直線偏波となり、ダクト伝搬の特性に変わって行くことが知られた。

文 献

- CRESSWELL, G. R and DAVIS, T N (1966)· Observations on pulsating auroras. *J Geophys. Res* , **71**, 3155-3163
- FUKUNISHI, H. (1973) Occurrence of IPDP events accompanied by cosmic noise absorption in the course of proton aurora substorm *J. Geophys Res* , **78**, 3981-3986.
- LANZEROTTI, L J., FUKUNISHI, H and CHEN, L (1974)· ULF pulsation evidence of the plasma pause. 3. Interpretation of polarization and spectral amplitude studies of Pc 3 and Pc 4 pulsating near $L=4$ *J Geophys Res* , **79**, 4648-4653.

(1978年6月10日受理)