

特集 地球磁場 —地磁気と地球・宇宙科学—

地球磁場の微小変動・磁気脈動

Geomagnetic pulsations

利根川 豊

(東海大学)

櫻井 亨

(東海大学)

Yutaka TONEGAWA

Tohru SAKURAI

Key Words: Magnetic pulsation, ULF wave, hydromagnetic wave, magnetosphere, solar wind.

1 まえがき

地球表面での地球磁場(地磁気)の大きさは赤道で約3万1千 nT(0.31 ガウス), 極地方でも約6万 nTと身近にある磁石がその表面近くに作る磁場に比べ1000分の1程度の大きさである。しかし, 地球の磁気モーメントは巨大であり, その磁場は地表から遠く宇宙空間にまで伸びている。一方, 惑星間空間には太陽からの高速プラズマ流—太陽風—が常時流れている。その太陽風と地球磁場の相互作用で地球磁気圏が形成され, その際の発電作用により地球周辺の宇宙空間ではオーロラなどのダイナミックな電磁現象が引き起こされている [1] [2]。オーロラに伴う極地方の電離層電流をはじめ, 磁気圏境界面や磁気圏内部にも様々な電流が流れており, それら電流は地磁気の変動として地上で観測される。太陽のフレア—から発せられた高速高密度の太陽風が時として地球磁気圏に到達して引き起こす大規模磁気嵐時には, 1000 nT を越える磁場擾乱が極地方で観測される。それでも元々の地磁気の大きさに対しては60分の1程度の変動であるが, 古典的な磁力計でも観測できるので18, 19世紀には磁気嵐の研究が開始されている。

磁力計の発達に伴いさらに微少な磁場変動が観測されるようになった20世紀初頭には, 単に小振幅の磁場“擾乱”ではなく, 規則的な周期性を示す“波動”的な変動が見出され, 地磁気脈動と名付けられた。その後の系統的な地上観測および人工衛星による直接観測から多種類の地磁気脈動が現象論的に分類され, 理論的研究等からはそれらの大方は地球磁気圏内の磁場構造および磁場とプラズマの相互作用によって生ずる超低周波の電磁流体波であることが明らかになった。現

Table 1 The classification of magnetic pulsation.

Continuous Pulsations		Irregular Pulsations	
Type	Period Range (sec)	Type	Period Range (sec)
Pc 1	0.2-5	Pi 1	1-40
Pc 2	5-10	Pi 2	40-150
Pc 3	10-45	Pi 3	150 <
Pc 4	45-150		
Pc 5	150-600		
Pc 6	600 <		

在, 地磁気脈動は宇宙空間の情報を地上まで伝える重要な役割を担った現象としても注目されるようになっており, 詳細な発生伝播機構など未解決な問題に対する研究が続けられている。ここでは現在得られている知識を基に地磁気脈動について概説する。

2 地磁気脈動の分類

地球上で観測される地磁気脈動 (geomagnetic pulsation) はその波形および周期により Table 1 のように大きく二つの型に分けられている。一つはその波形が比較的連続的 (continuous) で規則的な周期性を持って出現するタイプ, このタイプを Pc 型脈動と呼んでいる。他方, 波形が不規則な (irregular) タイプの脈動を Pi 型脈動と呼んでいる。さらに, それぞれはその卓越周期によって細分化され, Pc 型脈動は Pc 1

から Pc 6 の 6 区分に, Pi は Pi 1, Pi 2, Pi 3 の 3 区分に分けられている. この分類は主に現象の特徴と卓越周期から分類され, 1964 年にこれらの呼び名が国際的に決められ (Pc 6 と Pi 3 の分類は 1973 年に付け加えられた), 現在でも標準的に用いられている.

しかし, 各呼び名の境界の周期は必ずしも物理的な意味を持っていない. 例えば, Pc 4 帯の周期を持つ脈動でも, その物理的発生機構は Pc 5 帯の脈動と同類の場合があり, それらをまとめて Pc 4/5 脈動と呼ぶこともある. 逆に, 同じ Pc 5 帯に周期を持つ脈動でも全く異なる発生機構の脈動もある. これらのことは, 従来の地上での磁場観測に加え, 人工衛星による宇宙空間での電磁場やプラズマ粒子の直接観測などにより, 最近明らかになってきたことである. 一方, 波形の違いによる分類である Pc と Pi は, 元々発生機構の違いに依存した分類であるといえる. Pc は主に磁気圏の昼側で, Pi は主に磁気圏の夜側のオーロラを伴う地磁気擾乱 (これに伴う磁気圏擾乱全体をサブストームと呼んでいる) によって生ずる波動である.

何れにせよ, 地磁気脈動の周期は 0.2 秒以上から 1000 秒ほどまで広い範囲に及ぶ. では, その振幅はどうであろうか. 地磁気脈動の振幅とその周期を比較して見ると, 振幅は周期の逆数である周波数に対し, ほぼ反比例して減少する. Pc 5 帯では 100 nT の振幅をもつのは稀ではないが, Pc 1 帯では高緯度でも 1 nT 乃至それ以下の振幅しかない微少な変動である.

3 Pc 型脈動

3.1 Pc 1 型脈動

Pc 1 の周期は 0.2~5 秒 (周波数では 0.2~5 Hz) であり, 振幅は 1 nT 程度あるいはそれ以下で, 緯度により異なる伝播形式を示す. 低緯度では主に電離層のダクト伝播によって高緯度から低緯度へと伝播し観測されている. 磁気圏内での発生領域は主にプラズマポーズ近傍で, その領域での陽子のサイクロトロン共鳴によって発生した波動が磁力線に沿って磁気赤道帯から高緯度電離層に伝播し, 磁気音波となって電離層ダクトを通して低緯度へ伝播すると解釈されている. また, 発生領域での陽子のエネルギーによっていろいろな波形および地方時で出現している. その発生の直接的な原因はオーロラを伴うサブストームによって放出された比較的エネルギーの高い陽子が原因であるとされている. これらのサブストーム起源の陽子がプラ

ズマポーズに近づくとプラズマ圏の低エネルギー陽子との間でサイクロトロン共鳴を起こし, イオンサイクロトロン波を励起する. このサイクロトロン波が磁力線に沿って伝播し, 電離層に到達したものが Pc 1 として観測される.

Pc 1 の典型的な波形は Fig.1 に示すような真珠のネックレスタイプの波形をしているのでパールタイプ Pc 1 と呼んでいる. 同図中段に示すように, そのダイナミックスpekトルは興味ある扇型となる. このスペクトル構造の一つ一つが個々の Pc 1 波群に相当し, それらが磁力線に沿って南北両半球の電離層を往復伝播することによって全体として扇型のスペクトラム構造となる. 即ち, 一つの波群はある周波数幅を持っており, 波動の分散性 (伝播速度の周波数依存性) により, 独特のスペクトル構造が形成される.

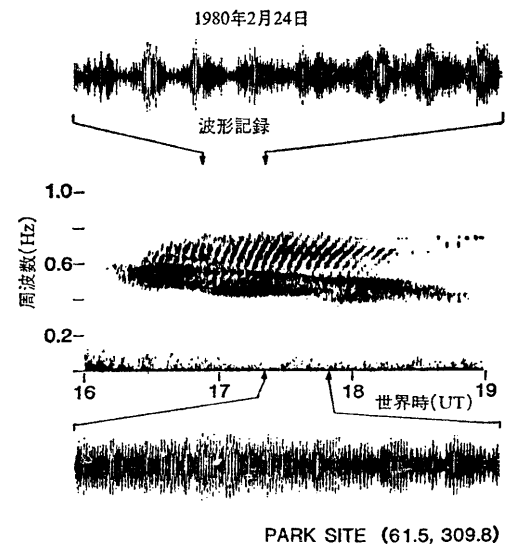


Fig. 1 Waveform and dynamic power spectrum of a pearl-type Pc 1 pulsation (After [3]).

このような Pc 1 波動は, 磁気圏尾部で起こるサブストームを起源とする高エネルギー陽子が, 夜側磁気圏をドリフト運動し, プラズマポーズでサイクロトロン共鳴を起こし, 異なる時刻帯の磁力線に沿って磁気圏赤道帯から電離層へと伝播し, それぞれの時刻帯で特有のスペクトル構造となって現れるのである.

3.2 Pc 2/3 型脈動

Pc 2 の周期は 5~10 秒 (周波数では 0.1~0.2 Hz) で, 主に太陽活動の極大期に現れる地磁気脈動である. 通常は Pc 3 帯の高周波帯として現れるのでここでは主に Pc 3 の性質について述べよう. Pc 3 の周期は

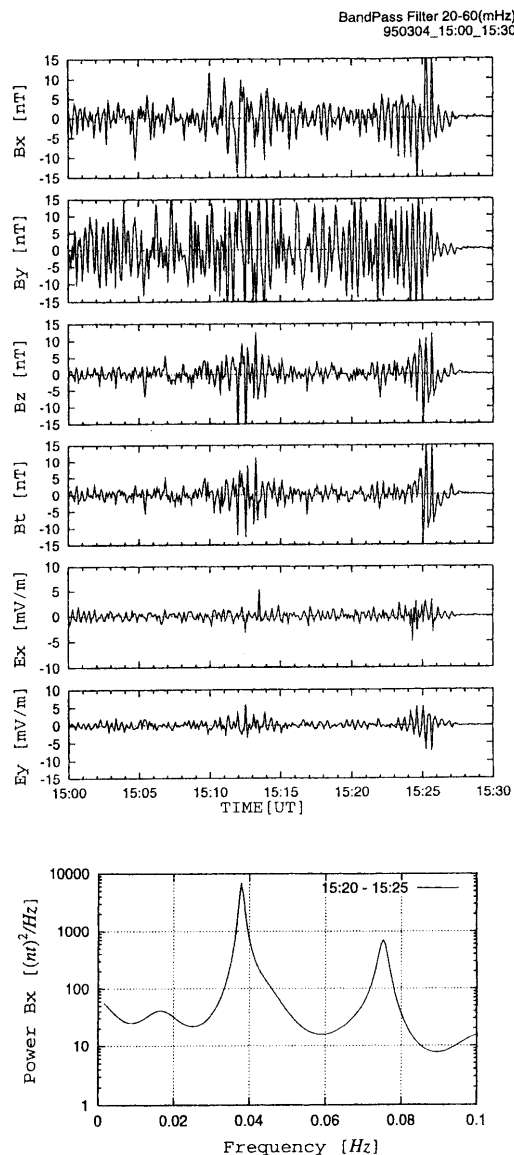


Fig. 2 Waveform and power spectrum of Pc 3 observed by the GEOTAIL satellite.

10～45 秒 (周波数では 0.1～0.02 Hz) で、主に昼側に出現する地磁気脈動である。

この周期帯の波動は他の周期帯の波動が磁気圏境界及び磁気圏内にその起源を有するのに対して、磁気圏外の太陽風中にその起源があることが人工衛星による直接観測によって明らかにされてきた。即ち、地球磁気圏前面の定在衝撃波面 (bow shock) で加速された陽子が太陽風中の惑星空間磁場に沿って加速運動する時に放出するサイクロトロン波が起源となり、それらが磁気圏境界を通り磁気圏内に伝播していると考えられている。さらに、磁気圏内に侵入して来たエネルギーの一部は磁力線共鳴を起こし地上へ伝播し、他の一部のエネルギーは磁気音波的性質を持って磁力線を過

て伝播し、地上で観測されると考えられている。

Pc 3 波動が太陽風中で生起することは、太陽風中の磁場強度と地上で観測される Pc 3 の周波数との間に極めて良い比例関係があることや、太陽風中の磁場の傾きに依存して Pc 3 の強度が変化すること等が明らかにされた事によってその起源が太陽風中のプロトンサイクロトロン共鳴により生ずると推測されるに至っている。一方、近年人工衛星の直接観測でも太陽風中に高エネルギー陽子が発見され、それに伴うサイクロトロン波がちょうど Pc 3 の周波数帯で発見されたこと等によってなお一層上記の推測を直接的に支持する証拠が確立されるに至った。

日米共同で打ち上げられた磁気圏探査衛星 GEO-TAIL が、磁気圏前面を飛翔した時に観測した Pc 3 波動の波形とそのスペクトルを Fig.2 に示す。スペクトルには Pc 3 の周波数帯に顕著なピークが出ている事が判る。また、Fig.3 は熊本にある東海大学宇宙情報センターに設置されているフラックスゲート磁力計で観測された地磁気脈動の微分波形で、朝 (～04 時 JST) から日中 (～15 時 JST) にかけて周期 20～30 秒の Pc 3 波動が連続的に観測されていることが判る。

3.3 Pc 4/5 型脈動

Pc 型脈動で最も周期の長い部類の Pc 4～Pc 5 脈動はその振幅も大きく、最も古くから観測されてきた脈動の一つである。大振幅 (しばしば 100 nT 以上) の Pc 5 が多く観測されるのは、高緯度オーロラ帯の特に朝方である。少し周期の短い Pc 4 脈動は Pc 5 よりやや低緯度のサブオーロラ帯で振幅が最大となる傾向がある。この脈動周期の緯度依存性は、極地方を通る地球磁力線の定在振動で説明すると都合が良い。

磁気圏内の磁化されたプラズマ中を電磁流体力波 (Alfvén 波) が磁力線に沿って伝播し、南北両半球の電離層で反射することにより磁力線の共鳴振動を生じる。Fig.4 に示すように、磁力線が弦の振動のように振れることになり、その基本周期は磁力線 (弦) の長さ、磁場の強さ (張力)、磁気圏プラズマ密度 (弦の質量) で決まる。これを地球の磁力線に適用すると、極地方の磁力線振動 (定在 Alfvén 波) の基本周期が Pc 4/5 脈動の周期とよく一致する。このことは Dungey により 1954 年に初めて指摘された。

Pc 4/5 脈動が磁力線共鳴振動の基本モードで説明されるならば、高緯度で観測される Pc 3 脈動はその高調波である可能性がある。この仮説は、磁気圏内で

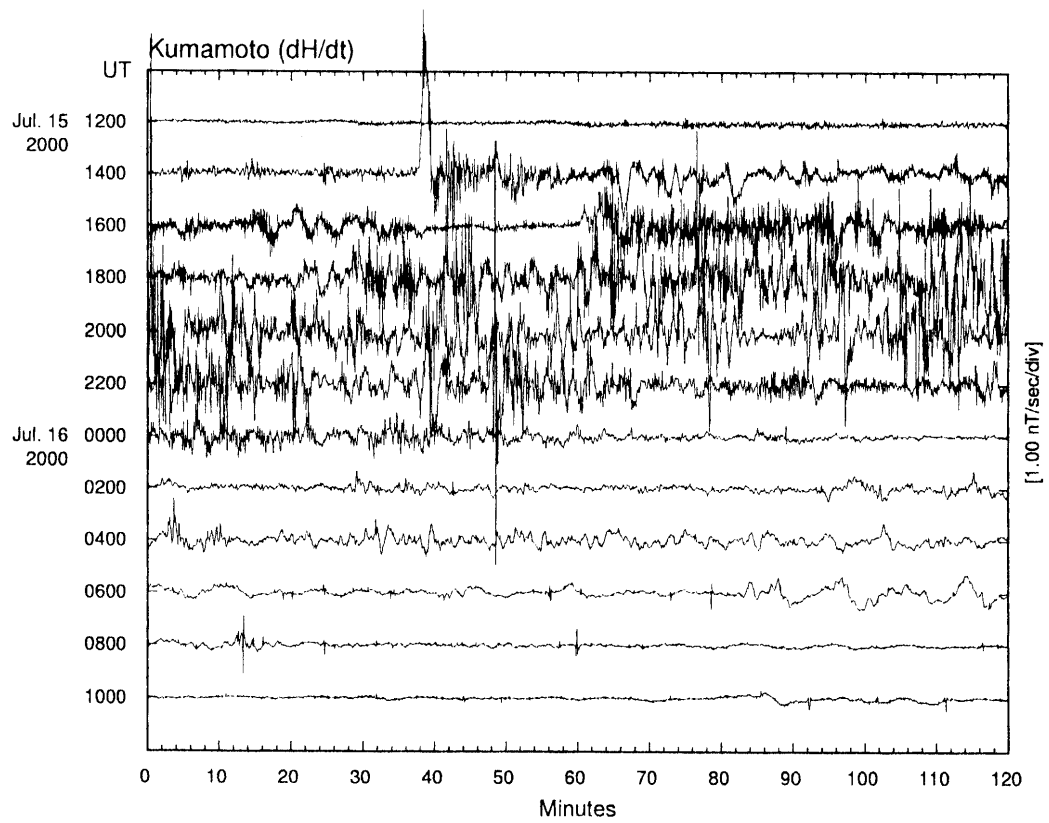


Fig. 3 Pc 3 pulsations observed on the ground, Kumamoto.

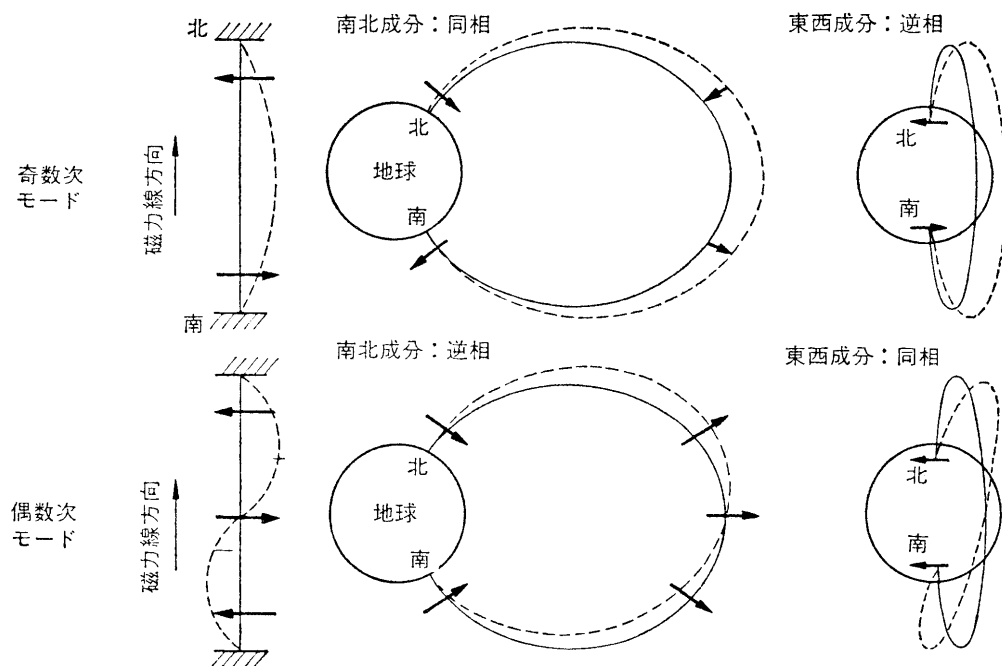


Fig. 4 Cartoons of the field line resonance model (After [3]).

の衛星観測と地上での共役点観測 (磁力線で結ばれた南北両半球 2 地点での同時観測) などにより確認され, Pc 3~5 帯の地磁気脈動は基本的に磁力線の共鳴振動として理解されている. しかし, その磁力線共鳴を引き起こすエネルギー源である発生原因は, Pc 3 と Pc 4/5 帯では一般に異なる.

前節で述べたように, Pc 3 脈動の起源は定在衝撃波面よりさらに上流側, 太陽風中のイオンサイクロトロン波と考えられているが, これでは Pc 4/5 帯の周期を説明することはできない. Pc 4/5 脈動発生源の第一候補としては, 磁気圏の境界面における Kelvin-Helmholtz 不安定性が考えられてきた. 風が水面に波を立てるように, 太陽風および磁気圏プラズマの速度差によって磁気圏境界面に表面波が生じる. その波長は主に境界層の厚さで決まり, それが太陽風で下流側へ流されていると考えると Pc 4/5 脈動の周期を説明することができる. この表面波が非伝播モード (evanescent mode) で磁気圏内部に浸透し, 磁力線の固有周期と一致する場所で共鳴振動を励起する (Fig.5).

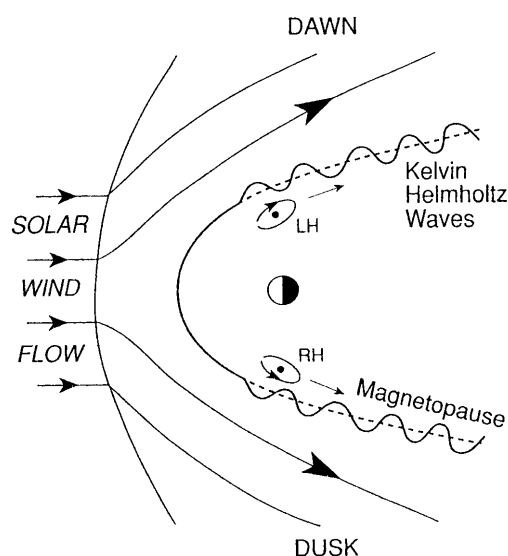


Fig. 5 Kelvin-Helmholtz waves on the magnetopause (After [4]).

現在このモデルは, 電離層も含めた現実的な磁気圏を考慮した磁力線共鳴理論と共に, 周期のみならず振幅, 位相, 偏波など地上と磁気圏内で観測される多くの Pc 4/5 の波動特性を説明することができる一方, 脈動の発生頻度が午前と午後で非対称であることを説明しきれないなど, 問題点も残されている.

以上に述べた Pc 4/5 脈動は磁気圏内で磁場が東西方向に振れるトロイダルモードと呼ばれる横波的な波

動である. 一方, 磁気圏内には同じ周期帯に圧縮性の電磁流体波も存在する. 圧縮性波動は衛星観測により初めて見出され, その主な発生機構は磁気圏内の高エネルギー陽子と電磁流体波間の波動粒子相互作用と考えられている. 磁気圏内を西向きにドリフト (磁場勾配ドリフト) している陽子と, 長周期圧縮性波動が共鳴し成長する. その理論的考察は, 共鳴条件として圧縮性波動の東西方向の波長が, 前述のトロイダルモード磁力共鳴の場合に比べ非常に短いことを示唆している. 地上の長周期脈動は, 波動が電離層に誘起する電流による磁場変動であるので, 波長が電離層の高度 (約 100 km) 程度に短くなると, 電離層の遮蔽効果により地上では観測できなくなる. このため圧縮性脈動は地上観測が難しいと考えられる.

その他にも Pc 4/5 帯の磁気脈動の発生源としては, 太陽風磁場と地球磁場の準周期的な再結合過程に関連すると考えられるものや, cavity mode と呼ばれる磁気圏の空洞共鳴現象などが近年新たに提唱されている.

4 Pi 型脈動

オーロラ活動に伴う磁気擾乱 (サブストーム) に伴って特徴的な磁気脈動が起こる. この磁気脈動は波形や周期性において Pc 型磁気脈動と比較して不規則に現れるため, これを不規則 (Irregular) 磁気脈動 (Pulsations), 即ち Pi 磁気脈動と呼んで区別している. Pi 磁気脈動は, その卓越周期から短周期 (1~40 秒) の Pi 1 と長周期 (40~150 秒) の Pi 2 の 2 つに区分され, オーロラサブストームの開始時に起こっている. 短周期成分の Pi 1 は主に高緯度のオーロラ帯で観測されるのに対し, 長周期成分の Pi 2 は高緯度から低緯度まで広く観測されるためオーロラサブストームの開始時刻を知る極めて良いインデケータとして利用されている.

Pi 1 の成分はオーロラに伴う高エネルギー電子の電離層への振込みに伴う短周期波動であり, 長周期成分の Pi 2 はオーロラが起こっている磁気緯度を通る磁力線の共鳴振動の基本周期に相当すると考えられている. この Pi 2 の波動の伝播機構はかなりよく研究されてきており, 磁力線に沿って伝播するモードと磁力線を過って伝播する磁気音波モードとの二つのモードがある. 磁力線に沿って伝播した部分がオーロラ帯に, 後者の磁力線を過って伝播した部分が低緯度に伝播し, それぞれ地上で観測されると解釈されている.

5 むすび

地磁気脈動の観測の歴史は長い、それが Dungey (1954) の提唱で電磁流体波として捉えられ、その後の観測と理論の両面の研究により、様々な波動モードの存在と他の磁気圏物理現象との関連が明らかになったのはこの半世紀である。特に衛星による直接観測がその発展に寄与した役割は大きい。しかし、衛星観測は広い宇宙空間で点観測にすぎず、波動の空間構造を調べるために衛星観測と呼応した地上観測の重要性も再認識されている。さらに近年は、極域電離層の広範囲をカバーする、国際共同オーロラ短波レーダ網などが整備されつつあり、宇宙空間・電離層・地上を繋ぐ電磁流体波のより立体的な観測研究がなされている。

最後に、本稿で概説した磁気脈動以外にも地球周辺の宇宙空間では様々なプラズマ波動が飛び交っていることを付け加える。例えば磁気脈動の高周波帯には VLF 自然電波 (ちょうど人間の可聴域周波数帯) があり、宇宙の音とも呼ばれピッコロのような綺麗な音色を奏でている。それに対し、先に述べた Pc 5 のような低周波脈動は磁力線を弦とした宇宙のコントラバスとも言えよう。ここでは、その宇宙オーケストラのほんの一部の紹介となってしまったが、より詳しくは文献 [3] [4] によくまとめられているので、それらを参考にしていきたい。

参考文献

- [1] 國分征：太陽風と地球磁場, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.4 (2001), pp.450-456.
- [2] 平澤威男：オーロラと地球磁場, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.4 (2001), pp.457-463.
- [3] 国立極地研究所編：南極の科学 2. オーロラと超高層大気, 古今書院, (1983).
- [4] W.J. Hughes, Magnetospheric ULF Waves: A Tutorial With Historical Perspective, Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves, *Geophysical Monograph*, 81, American Geophysical Union, (1994), pp.1-11.