

総合研究大学院大学 平成15年度 博士論文

SuperDARN HFレーダーによる
高緯度電離圏Pc3-4脈動現象に関する研究

総合研究大学院大学 数物科学研究科 極域科学専攻

新海 雄一

論文要旨

地球磁気圏では様々な電磁流体波が存在する。この中で、周期が 10 秒～150 秒 ($6.6\text{mHz} \sim 100\text{mHz}$) の脈動は Pc3-4 地磁気脈動に分類され、昼側の磁気圏および地上で頻繁に観測される現象である。頻繁に観測されるこの脈動を本論文では古典的 Pc3-4 脈動と呼ぶ。古典的 Pc3-4 脈動は地球磁気圏前面の Bowshock 上流のイオンサイクロトロン不安定性によって発生し、それが磁気圏シース領域を経て、地球磁気圏内に伝播してきていると考えられている。しかし、磁気圏シース領域内での Pc3-4 脈動の特性はあまり明らかになっていない。また、地上の磁力計や電離圏の観測から、Pc3-4 脈動の強度が磁気圏シース領域とつながっていると考えられる高緯度カスプ域で最大となることが報告されているが、その伝播機構についてもあまり明らかにされていない。本研究では、磁気圏シース領域と電離圏カスプ域を含む高緯度電離圏での Pc3-4 脈動を同時に観測し、その現象の特性を詳しく解析・研究することにより、Pc3-4 脈動の発生・伝播機構を明らかにすることを目的としている。

この目的の為に、南北両極域の広域電離圏を観測する SuperDARN HF レーダーと磁気圏シース領域を観測する GEOTAIL 衛星との同時特別観測を企画・実施した。この特別観測では、SuperDARN HF レーダーは Pc3-4 脈動を検出するために特定のビームのみを高時間分解能モードで観測した。特別観測は 2002 年 1 月から 2003 年 3 月までの間、GEOTAIL 衛星が SuperDARN HF レーダーの視野下を通過する軌道に合わせて 7 回実施した。また、2003 年からは、CUTLASS レーダーではステレオモードを用い、グローバルスキャン観測も同時に実施している。その結果、2002 年 2 月 12 日と 2003 年 2 月 17 日に明瞭な Pc3-4 脈動を観測することができ、その詳細な解析・研究を行った。

2002 年 2 月 12 日の観測では、これまでの HF レーダー観測では報告されていない Pc3-4 脈動現象が CUTLASS Iceland East レーダーで観測された。この脈動の周波数は $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ (約 50 秒～60 秒) であり、波数は 5～9 と小さかった。波数が小さい脈動は地上でも同様な地磁気脈動が観測されることが知られている。しかし、地上に存在する地磁気観測点では同じ周期の磁場変動は観測されなかった。また、エコーパワーがドップラー速度と同様に周期的に変動し、相互の位相差が 90° であった。この脈動現象に、過去の研究で Pc3-4 脈動の発生・伝播機構であると考えられている磁力線共鳴を適用した場合には、本観測で得られている脈動の特徴を十分に説明することはできなかった。そのため、エコーパワーが周期的な変動をしていることと、1keV 以下の電子のフラックスがエコー領域内で増加したことから、本観測で得られた電離圏電場脈動は、Pc3-4 脈動によって modulate された電子フラックスの振込みによって励起された電離圏電場の変動であると考えた。その結果、地上磁場との相関や、エコーパワーとドップラー速度の位相差、および脈動の伝播方向について説明することができた。このため、観測された電離圏電場脈動は、古典的な Pc3-4 脈動ではなく、電子の振込みによって発生した電場変動であると結論した。

2003 年 2 月 17 日に行われた観測では、より明瞭なエコーを得るために、CUTLASS HF レーダーの視野内にある EISCAT ヒーターによる電離圏加熱実験も合わせて行った。その結果、地磁気の南北方向を視野とする CUTLASS Finland レーダーにおいては周波数が $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ (約 60 秒～75 秒) の明瞭な Pc3-4 脈動が

観測された。一方、地磁気の東西方向を視野とする CUTLASS Iceland East レーダーでは、同じ加熱領域から周波数が $\sim 4.7\text{mHz}$ (約 212 秒) の Pc5 脈動が同時に観測された。この特性は、Pc3-4 脈動は南北方向に偏った振動を、Pc5 脈動は東西方向に偏った振動をしていることを示唆している。この Pc3-4 脈動は波数が 50 ~ 100 と大きく、この電離圏脈動に対応する地磁気脈動は地上の地磁気観測点で観測されていなかった。一方、Pc5 脈動は波数が ~ 10 であり、多くの地磁気観測点で観測されていた。また、この二つの脈動の開始時刻にはずれがあり、異なる発生機構による脈動が同一磁力線上に存在していたことを示唆している。この Pc3-4 脈動の発生機構は、脈動の特性が Giant Pulsation (Pg) とよく似ていることから、Pg と同じドリフト共鳴が候補にあげられる。この脈動は、位相の空間的変動が、ある時間を境に、位相遅れが低緯度側方向から高緯度側方向へと変化が逆転する特徴を持っていた。この位相変化の特性に関しては、同時に観測された Pc5 脈動の位相変化から、プラズマ圏境界付近における急激なプラズマ密度の増加による Alfvén 速度の減少によって説明できる。

以上のことから、本研究によって観測された 2 例の高緯度電離圏電場 Pc3-4 脈動は、これまでに地上や衛星で多くの観測・研究が行われてきている発生頻度の高い古典的な Pc3-4 脈動とは異なった特徴を持つ別なタイプの脈動であることが、電離圏での HF レーダーの観測によって初めて明らかになった。

以下、本論文の構成について述べる。論文は 5 章から構成されている。第 1 章では、地球磁気圏における脈動現象、および、これまでの Pc3-4 脈動に関する研究結果について概説し、本論文の目的と意義を述べた。第 2 章では、本研究に使用した観測機器について述べた。本論文で使用している極域電離圏の電場データは、CUTLASS レーダー、SENSU Syowa East レーダー、Kerguelen レーダーによって観測されたものである。さらに、宇宙空間でのデータとして GEOTAIL 衛星を使用し、地上磁場データとして IMAGE 磁場観測チェーン、SAMNET 磁場観測チェーン、Iceland Tjornes 観測点、Jan Mayen 観測点、南極 Davis 基地観測点を使用した。第 3 章では、観測の詳細と得られたデータの解析結果、および、観測された脈動現象の特徴について述べた。第 4 章では、本観測で得られた Pc3-4 脈動の考察を行った。第 5 章は、本研究のまとめである。

目次

概要	i
第 1 章 序論	1
1.1 地球磁気圏	1
1.2 電離圏	2
1.3 電磁流体波動	2
1.4 ULF (Ultra Low Frequency) 脈動	4
1.5 Pc3-4 型地磁気脈動	4
1.6 Giant Pulsation	6
1.7 レーダーによる Pc3-4 脈動観測	7
1.8 本論文の目的	8
第 2 章 観測機器	10
2.1 HF レーダー	10
2.1.1 概要	10
2.1.2 Single Pulse 観測	11
2.1.3 不等間隔マルチパルス観測	12
2.1.4 SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network)	13
2.1.4.1 CUTLASS (Co-operative UK Twin Auroral Sounding System) レーダー	15
2.1.4.2 SENSU (Syowa South and East HF Radars for the SuperDARN) Syowa East レーダー、Kerguelen レーダー	16
2.2 GEOTAIL 衛星	17
2.3 地上磁場観測網	17
2.4 EISCAT 電離圏加熱実験装置	21
第 3 章 観測結果	22
3.1 観測イベント 1 : 2002 年 2 月 12 日	23
3.1.1 観測概要	23
3.1.2 SuperDARN	24
3.1.2.1 CUTLASS Iceland East レーダー	24
3.1.2.1.1 エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅	24
3.1.2.1.2 脈動現象の周波数	26

3.1.2.1.3	波数および伝播方向	28
3.1.2.1.4	エコーパワーとドップラー速度について	29
3.1.2.1.5	グローバルスキャン観測	31
3.1.2.2	CUTLASS Finland レーダー	32
3.1.2.2.1	エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅	32
3.1.2.2.2	脈動現象の周波数	33
3.1.2.2.3	グローバルスキャン観測	35
3.1.2.2.4	対流速度分布	35
3.1.2.3	SENSU Syowa East レーダー	37
3.1.2.4	Kerguelen レーダー	39
3.1.3	GEOTAIL 衛星	39
3.1.4	地上磁場	40
3.1.4.1	IMAGE 磁場観測チェーン	42
3.1.4.2	SAMNET 磁場観測チェーン	44
3.1.4.3	Jan Mayen	45
3.1.4.4	Iceland	47
3.1.4.5	Davis	48
3.1.5	本観測のまとめ	50
3.2	観測イベント2：2003年2月17日	52
3.2.1	観測概要	52
3.2.2	SuperDARN	54
3.2.2.1	CUTLASS Finland レーダー	54
3.2.2.1.1	エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅	54
3.2.2.1.2	脈動現象の周波数	56
3.2.2.1.3	波数および伝播方向	58
3.2.2.2	CUTLASS Iceland East レーダー	61
3.2.2.2.1	エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅	61
3.2.2.2.2	脈動現象の周波数	63
3.2.2.2.3	波数および伝播方向	65
3.2.2.3	対流速度分布	66
3.2.3	GEOTAIL	67
3.2.4	地上磁場	69
3.2.4.1	WEED (Wave Excitation Experimental Diagnostic)	69
3.2.4.2	IMAGE 磁場観測チェーン	70
3.2.4.3	SAMNET 磁場観測チェーン	72
3.2.5	本観測のまとめ	74

第 4 章 考察	76
4.1 観測イベント 1	76
4.1.1 モデル 1	77
4.1.1.1 発生と伝播について	77
4.1.1.2 地上磁場との相関について	81
4.1.1.3 南北非共役性について	85
4.1.1.4 GEOTAIL で観測された磁場変動について	87
4.1.1.5 モデル 1 のまとめ	87
4.1.2 モデル 2	87
4.1.2.1 発生機構について	87
4.1.2.2 伝播および地上磁場との相関	90
4.1.2.3 南北非共役性	92
4.1.2.4 GEOTAIL 衛星で観測された磁場変動について	92
4.1.2.5 モデル 2 のまとめ	92
4.1.3 まとめ	92
4.2 観測イベント 2	94
4.2.1 地上磁場との相関について	95
4.2.2 発生機構と位相変化について	95
4.2.3 GEOTAIL 衛星で観測された磁場について	97
4.2.4 まとめ	98
4.3 本研究で得られた HF レーダーのエコーの特異性について	98
第 5 章 まとめと結論	101
5.1 2002 年 2 月 12 日イベント	101
5.2 2003 年 2 月 17 日イベント	103
5.3 総括	104
謝辞	105
参考文献	107

第1章 序論

1.1 地球磁気圏

地球はよく知られているように、双極子 (Dipole) の磁場を持っている。この磁場は太陽から噴出して来る高速のプラズマ流である太陽風 (Solar wind) によって閉じ込められている。この太陽風によって閉ざされた空間を地球磁気圏 (Magnetosphere) と呼んでいる。磁気圏は太陽風によって太陽側は圧縮され、その反対側は長く引き伸ばされた形をしており、長い尾を持つ彗星と似ている (図 1.1)。この長い尾はどこまで伸びているかは

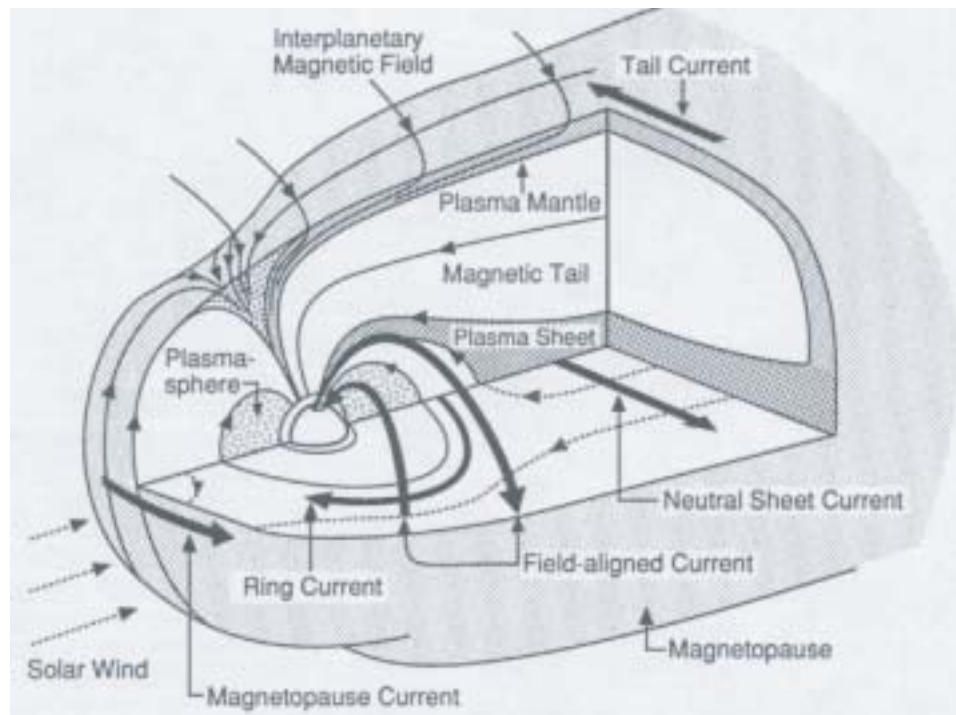


図 1.1: 地球磁気圏概略図

明らかにされていないが、GEOTAIL 衛星によって少なくとも地球半径の 200 倍 ($200R_E$: Earth Radi) 以上の長さを持つことが明らかにされている。地球磁気圏はプラズマによって満たされており、その性質の違いから、図 1.1 に示されるようにいくつかの領域に分けられている。地球から $4R_E$ までは、磁気圏の中は低温度・高密度 ($1 \sim 10\text{eV}$, $10^2 \sim 10^3/\text{cm}^3$) の領域で、プラズマ圏 (Plasmasphere) と呼ばれている。プラズマ圏の外縁から外側は放射線帯 (またはヴァンアレン帯) と呼ばれ、高温・低密度 ($100\text{eV} \sim 100\text{keV}$, $1 \sim 10/\text{cm}^3$) のプラズマで満たされている。この放射線帯には環状電流 (Ring current) と呼ばれる地球を取り巻く電流が流れてい

る。これは、磁気圏サブストームと呼ばれる現象によって作り出された高温の荷電粒子が、磁気圏の夜側から双極子磁場の領域に入り込み、地球の磁場の勾配による grad B ドリフトにより西向きの電流を作ることによって発生する。夜側の放射線帯の外側では、磁力線が太陽風によって長く引き伸ばされ磁気圏尾部 (magnetotail) を形成している。この尾部では、南北両半球から伸びる磁力線が反平行に存在している。この反平行の磁場によって挟まれた領域はプラズマシート (Plasma sheet) と呼ばれ、オーロラなどを発生させる高エネルギー粒子が存在する領域である。

一方、昼側では、太陽風の動圧と地球磁場の磁気圧の均衡によって、磁気圏境界面 (Magnetopause) が形成される。また、磁気圏境界面の前面では、高速のプラズマ流である太陽風によって Bow shock と呼ばれる衝撃波面が形成されている。この磁気圏境界面と Bow shock の間の領域は磁気圏シース領域 (Magnetosheath) と呼ばれ、磁気圏内のような磁場の支配的な領域ではなく、太陽風の動圧が支配的な領域となっている。そのため、磁気圏シース領域内は磁場とプラズマが非常に荒れて (turbulent) いる。この領域は電離圏のカスプ (Cusp) と呼ばれる領域とつながっていると考えられており、地球から夜側の尾部に向かう開いた磁力線と、昼側に向かう閉じた磁力線の境界領域であるため、磁気圏シース領域に存在するプラズマの一部が入り込むと考えられている。

1.2 電離圏

地上の上層大気は、中性分子や原子のほかに、太陽からの粒子の進入や電磁波などによって電離して発生するイオンや電子から構成されている。その中でも、高度 80km 以上の電子密度が高い領域を電離圏 (Ionosphere) と呼ぶ。電離圏では正イオンおよび電子の密度は高度と共に増加し、高度約 300km で最大となる。図 1.2 は、電離圏での電子密度高度分布を表したものである。電離圏は電子密度分布によっていくつかの層に分けられており、高度 80km ~ 90km を D 層 ($10^2 \sim 10^4/cm^3$)、90km ~ 130km を E 層 ($10^3 \sim 10^5/cm^3$)、130km ~ 700km を F 層 ($10^4 \sim 10^6/cm^3$) と呼んでいる。

一般に、地球磁気圏内では、太陽風との力学的・電磁氣的な相互作用によって、磁場および電場分布が生成される。磁気圏内のプラズマはそれらの分布や磁力線の曲率によって様々なドリフト運動を行う。このドリフト運動によって、磁気圏内では大規模なプラズマ対流が形成される。この対流に関連した電場は磁力線を解して極域の電離圏に投影され、電離圏におけるプラズマの対流運動を引き起こす。このことから、磁気圏と電離圏は非常に密接な関係を持っており、近年ではその相互作用 (Magnetosphere-Ionosphere Coupling) による物理過程が頻繁に議論されている。

1.3 電磁流体波動

地球磁気圏を含む宇宙空間のような磁場とプラズマによって満たされた領域では、電磁流体波 (Hydromagnetic wave) と呼ばれる電磁波が存在する。これは、電気伝導度が無限大になるような領域、すなわち磁場と粒子が

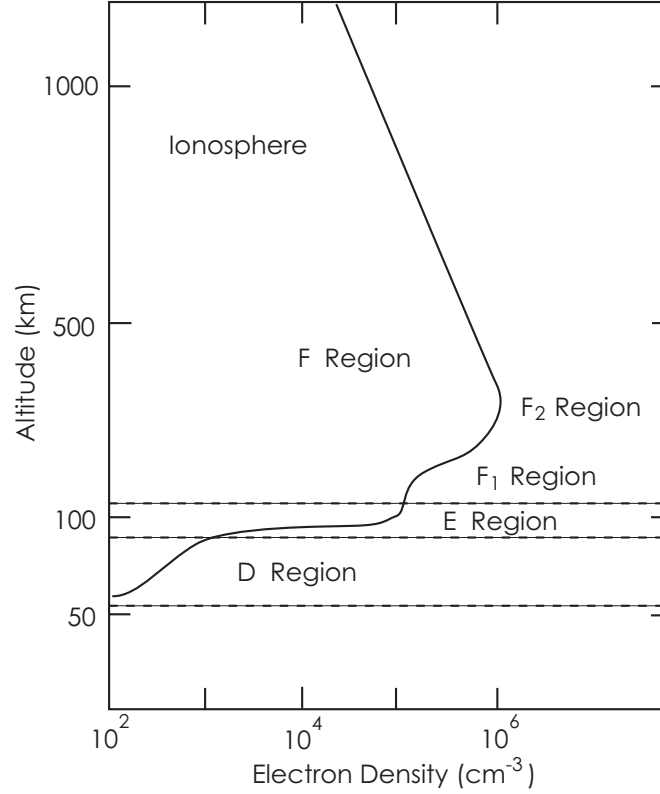


図 1.2: 高度に対する電子密度分布と電離圏領域

凍結するような領域において、流体として扱われるプラズマが磁力線と一緒に振動し、お互いの時間的変動が影響しあうような波動をさす。このとき、波動が磁力線に対して垂直方向に振動し磁力線沿いに伝播するような横波を Alfvén 波と呼び、以下の式によって表され、ローカルの磁場強度 $B[T]$ に比例し、密度の $1/2$ 乗に反比例するような位相速度を持つ。

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}} \quad (1.1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率 [$4\pi \times 10^{-7} N/A^2$]、 B は磁場強度 $[T]$ 、 ρ は密度 $[cm^3]$ を表している。この $V_A[m/s]$ を Alfvén 速度と呼ぶ。

一方、波動が縦波で磁力線を横切って進むような電磁流体波動は磁気音波と呼ばれ、プラズマ密度の膨張・圧縮が音波となって伝播していく。この波動の位相速度は

$$V = \frac{1}{2} \left[V_A^2 + V_S^2 \pm \sqrt{(V_A^2 + V_S^2)^2 - 4V_A^2 V_S^2 \cos^2 \theta} \right] \quad (1.2)$$

のように表される。ここで、 V_A は Alfvén 速度 $[m/s]$ 、 V_S は音波速度 $[m/s]$ 、 θ は磁場に対する波動の伝播角度を表している。式中の正負符号は二つのモードの波が存在することを表し、正であれば fast mode、負であれば slow mode の波動を表す。一般に、fast mode の波動は θ に対して独立した速度方向を持つが、slow mode の波動ではほぼ磁力線に沿うような方向に速度を持つことから、磁力線を横切るような波動は fast mode の波動として考えられる。

このような磁気流体波は、その発生機構によって様々な周波数で磁気圏内に存在しているが、この中でも 5Hz 以下のもっとも低い周波数帯に属するものが、本研究の対象である ULF (Ultra Low Frequency) 脈動と呼ばれる波動である。

1.4 ULF (Ultra Low Frequency) 脈動

地磁気脈動と呼ばれる地球磁場の微少な変動現象は、*Dungey*[1954] によって地球磁気圏内を伝播する電磁流体波動として理解され、現在に至るまでに様々な研究が行われてきた。この電磁流体波動の中でも、特に周期が 5Hz 以下の最も低い周波数帯に属するものを ULF (Ultra Low Frequency) 脈動と呼ぶ。地球の磁場は磁力線の両端が南北半球の電離圏を通過して地球磁気圏に入り込むため、電離層を固定端とするような弦振動として考えられる。一般に、ULF 脈動は太陽風と磁気圏との相互作用によって励起される磁力線の固有振動が主な発生機構であると考えられている。近年では、観測技術の発展によって、衛星や地上磁場観測網などを使用した研究が盛んに行われ、その発生機構および伝播機構などが明らかにされてきている。

ULF 脈動はその波形から二つの型に分類される。ひとつは規則的な連続型脈動の Pc (Continuous Pulsation) もうひとつは不規則型脈動の Pi (Irregular Pulsation) である。この二つの型は表 1.1 に示されているように周期によってさらに細かく分類され、それぞれ異なった特徴や発生機構をもつ。特に Pc3-4 型に分類される地磁気脈動は昼間側の磁気圏内および地上で頻繁に観測される現象であり、これまでも様々な角度から研究が行われている。

表 1.1: ULF 地磁気脈動の種類

型名	周期 (秒)	波形
Pc1	0.2 ~ 5	Continuous
Pc2	5 ~ 10	"
Pc3	10 ~ 45	"
Pc4	45 ~ 150	"
Pc5	150 ~ 600	"
Pi1	1 ~ 40	Irregular
Pi2	40 ~ 150	"

1.5 Pc3-4 型地磁気脈動

ULF 脈動の中でも特に Pc3-4 型地磁気脈動 (以下、Pc3-4 脈動と呼ぶ) は、昼間側の磁気圏内および地上の中低緯度から高緯度までの広い範囲で、衛星や地上の磁力計などによって頻繁に観測され、その発生機構や伝播機構について様々な研究が行われてきた。一般に、Pc3-4 脈動は太陽風のパラメータにコントロールされることが知られており、大勢の研究者によってその関係が示されている。[*Bol'shakova and Troitskaya*, 1968; *Russell et al.*, 1983; *Yumoto and Saito*, 1983,1984; *Yumoto et al.*, 1985; *Troitskaya et al.*, 1971; *Engebretson et al.*,

1987] *Russell et al.* [1983] や *Yumoto et al.* [1983] は、全磁力と Sun-Earth Line 方向の磁場 (BB_X) との関係で表される cone angle ($= \cos^{-1} \left(\frac{B_X}{|B|} \right)$) が 45° 以下であるときに、地上および地球磁気圏内で Pc3-4 脈動が頻繁に観測されることを示している。さらに *Russell et al.* [1983] や *Cao et al.* [1994] では、上記の条件を満たすような場所が Subsolar Point を中心に前後 3MLT (Magnetic Local Time) であることも示している。また *Troitskaya et al.* [1971] や *Yumoto et al.* [1984,1985]、*Engebretson et al.* [1986] は、惑星間空間磁場 (IMF: Interplanetary Magnetic Field) の強度が Pc3-4 脈動の周期をコントロールしていることを示し、さらに、統計的な解析からおよそ $f[\text{mHz}] = \sim 6.25 B[\text{nT}]$ の関係式が成り立つことを示している。これらの観測事実から、地上および地球磁気圏内で観測される Pc3 脈動の発生原因は、地球磁気圏前面にある Bowshock 上流 (upstream) および境界領域での、イオンサイクロトロン不安定性 (ion cyclotron instability) が原因だと考えられている。また、*Fairfield* [1969]、*Barnes* [1970]、*Greenstadt et al.* [1970a,b] は、Bow shock によって跳ね返されたイオンビームによって励起されるイオンサイクロトロン不安定性が、upstream 領域での低周波波動の原因になることを理論的に示しており、これが磁気圏シース領域を伝わり、地球磁気圏内および地上で観測される Pc3-4 脈動の原因になると考えられる。

ここで、地球磁気圏と IMF との間では不連続が生じていることを考えると、これら upstream 領域での波動は圧縮波のような全圧力の変動、特に磁力線を横切って進むことのできる fast mode のような波動しか地球磁気圏内に伝播することができない。このことは、これまでの多くの研究・観測結果から明らかにされている。[*Yumoto and Saito*, 1983,1984; *Yumoto et al.*, 1985; *Engebretson et al.*, 1987; *Odera et al.*, 1991; *Takahashi and Anderson*, 1992; *Takahashi et al.*, 1994]。 *Takahashi et al.* [1994] は GEOTAIL 衛星の観測結果から、昼間側の地球磁気圏内の圧縮波的な Pc3 脈動が fast mode の性質を持っていて、さらにその波動が地球方向へ伝播していることを示した。また *Yumoto and Saito* [1984] は、磁気圏内に侵入した圧縮波的な Pc3-4 脈動がローカルな磁力線と共鳴し、定在 Alfvén 波と結合して磁力線を伝わり、地上へと伝播することを示している。

このように Pc3-4 脈動は upstream 領域でイオンサイクロトロン不安定性によって発生し、磁気圏シース領域を経て、磁気圏内に侵入し、ローカルな磁場との共鳴によって地上に伝播するという説が有力である。しかしながら、*Song et al.* [1993] や *Song* [1994] は磁気圏シース領域内の Pc3-4 脈動のおよそ 10~20% 程度しか、地球磁気圏内に伝播していないことを、電磁場のエネルギーフラックス (Poynting Flux) を用いて示している。また、上述の研究結果が正しいとするならば、太陽風、磁気圏シース領域および地球磁気圏内が低擾乱状態であれば、非常にバンド幅の狭いスペクトルを持った Pc3-4 脈動が、発生領域付近すなわち Bowshock 近傍の磁気圏シース領域内で観測されることが期待される。*Engebretson et al.* [1991a, b] は ISEE 衛星を使った磁気圏シース領域 IMF の同時観測で、cone angle が小さく磁気圏内で Pc3 脈動が観測されたときに、磁気圏シース領域内の擾乱度が上昇し、低周波数帯のスペクトルパワーが上昇することを示したが、期待されるバンド幅の狭い Pc3 脈動は観測されなかったことを示している。一方、*Shinkai et al.* (2003) では GEOTAIL 衛星で得られたデータを使い、非常にバンド幅の狭い Pc3 脈動が昼側 Bow shock 境界付近および磁気圏シース領域内に存在することを示し、さらにその Pc3-4 脈動がイオンサイクロトロン不安定性によって発生した脈動であることを示唆している。

また、*Song et al.* [1990,1992,1994] は磁気圏シース領域内、特に磁気圏境界面近傍での Pc3 脈動は、fast mode よりむしろ slow mode の性質を持っていることを示し、これらが磁気圏境界面近傍における粒子密度の増加に伴う fast mode から slow mode へのモード変換によるものだと示唆している [*Song et al.*, 1990]。これら slow mode の性質を持った Pc3 脈動は磁力線沿いに伝播する性質を持っているため、磁気圏境界面沿いに伝播し、電離圏カスプ域に到達することが期待される。*Troitskaya* [1985] や *Bol'shakova and Tritskaya* [1984] は地上磁場観測による Pc3 周波数帯のスペクトルパワーが電離圏カスプ域で最大になることを示している。また、*Lanzerotti et al.* [1986] や *Engebretson et al.* [1986] は、電離圏カスプ域で観測されるスペクトル幅の狭い Pc3 脈動の発生頻度は、スペクトル幅の広い Pc3 脈動の発生頻度に比べ、より直接的に IMF のパラメータによってコントロールされていることを示している。これらの結果は、地球磁気圏内に侵入することのできなかった Pc3-4 脈動が、磁気圏シース領域内から直接カスプ域に伝播してきたことを示唆している。すなわち、電離圏カスプ域と磁気圏シース領域での Pc3-4 脈動を比較することで、より直接的な Pc3 脈動の特性について知ることができると予想される。

1.6 Giant Pulsation

Pc3-4 脈動の周波数帯に属する脈動で、特徴的な脈動として知られているのが、Giant pulsation (Pg) である。この脈動は、100 秒程度の周期で、主に朝方のオーロラ帯より低緯度側で観測され、10nT ほどの振幅を持っている。この脈動が他の ULF と違う点は、非常にきれいなサイン波的な波形を持っていることである [e.g. *Birkeland*, 1991]。また、通常の Pc3-4 脈動の振動方向と違い、南北成分に比べて、大きな東西成分の振幅を持っている。さらに、 $L=5 \sim 6$ 付近の複数の観測点で観測されることが知られており、脈動が緯度幅およそ 5° 程度に局在していることや、およそ $16 \sim 35$ 程度の経度方向の波数で西側に伝播していること、脈動の回転方向が高緯度では時計回り、低緯度では反時計回りであることなどがわかっている [e.g. *Takahashi et al.*, 1992]。このような主な特徴から、Pg は通常の ULF 脈動のような外部からの圧縮波とローカルな磁場との相互作用によるもの [*Green*, 1985; *Lee and Lysak*, 1990] ではなく、磁気圏内部の non-Maxwellian な粒子の不安定性によるものだと考えられており、その発生機構の一つとして、ドリフト共鳴 (Drift Bounce Resonance) [*Southwood*, 1973,1976] が提案されている。これは、サブストームなどによって磁気圏尾部から流入してきたプロトンが、磁気圏磁場の強度の勾配によって西向き勾配ドリフトを受け、環状電流を構成する粒子となり、その粒子が $\omega_{\text{wave}} - m_{\text{wave}}\omega_{\text{drift}} = N\omega_{\text{bounce}}$ のローカルドリフト共鳴条件 [*Southwood et al.*, 1969] を満たすことによって起きる。ここで、 N は整数 (通常 ± 1)、 ω_{wave} 、 ω_{bounce} 、 ω_{drift} は、それぞれ脈動の角周波数、プロトンのバウンス周波数、プロトンの東西方向のドリフト周波数である。しかしながら、他にもいくつかの発生機構が提案されており、決定的な発生機構はいまだにわかっていない。

また、一般に Pg は地球磁場の定在波だと考えられているが、その高調波モード (even か odd) についてはいまだにはっきりとした結論がでていない。even mode [*Chisham et al.*, 1992; *Poulter et al.*, 1983]、odd mode [*Takahashi et al.*, 1992; *Wright et al.*, 2001] の両モードでの観測例が報告されており、今現在も様々な議論がなされている。

1.7 レーダーによる Pc3-4 脈動観測

上述のような Pc3-4 脈動を含む地上磁場で観測される ULF 脈動は、電離圏電流によって励起される誘導磁場であることが知られている [Hughes and Southwood., 1976]。そのため、地上で観測される磁場の変動成分は、電離圏によって変更される。また、その地上で観測される磁場変動の振幅は、脈動自身の波数によって決まり、 e^{-kZ} に比例することも示されている。ここで、 k は磁場に垂直な成分の波数、 Z は E 層電場の高さ [km] である。これらの理由から、カスプ域や高緯度の Pc3-4 脈動と地球磁気圏シース領域内の Pc3-4 脈動を比較する場合は、地上磁場変動ではなく、直接電離圏の電場変動と比較することが望ましいと考えられ、これまでもいくつかの研究が行われている。

そのうちのひとつとして、VHF (超短波) レーダーを用いた高緯度地方における電離圏観測が 1960 年頃から行われてきた。これは、レーダーの送信波の半波長に等しい構造をもつ電子密度のゆらぎが存在するときに得られる散乱 (Coherent Scatter) を利用したものであり、地球磁場と送信波とが直交条件を満たすときに、送信経路を戻ってくるような反射を得ることができる。しかしながら、VHF 帯の周波数は 30MHz 以上の高い周波数帯であるため、電離圏をほぼ直進することができ、磁力線がほぼ地上に垂直に存在する高緯度地方において、E 層電場を観測することはできても、磁気圏と直接結びついていると考えられている F 層の高度では磁場と送信波との直行条件が満たされず、反射波がレーダーサイトに帰ってこない。そのため、VHF レーダーでは高緯度地域で F 層の電離圏電場を観測することが難しく、レーダーサイト近傍の比較的狭い視野のみの観測しか出来なかった。

そこで、1970 年代終わりに磁気赤道付近の地上観測に使用されていた、HF (短波) 周波数帯を使ったレーダーが高緯度電離圏電場の観測に使用されるようになった。VHF 帯に比べ周波数帯の低い HF 帯では、送信電波は電離圏内で水平方向に屈折する特性をもつため、極域に近い高緯度地方でも直行条件を満たすことができ、広い視野の電離圏電場の観測が可能となるためである。特に、近年では、Super Dual Auroral Radar Network (DARN) [Greenwald et al., 1995] と呼ばれる複数の HF レーダーによるコンソーシアムが作られている。これは、現在南北両極地方における大規模な電離圏対流を観測する目的で作られたコンソーシアムで、現在 10 カ国、計 15 基の HF レーダーによって構成されており、磁気圏電離圏結合や脈動現象などの様々な地球物理観測において、多大な成果を挙げている。

このような HF レーダーを使用した、高緯度電離圏電場の Pc3-4 周波数帯脈動研究が、近年、Baker et al. [1998] や Matsuoka et al. [2002] によって行われている。Baker et al. [1998] は南極の Halley 基地に設置された PACE (Polar AngloAmerican Conjugate Experiment) HF レーダー [Baker et al., 1989] で、Pc3-4 脈動を対象とした特別観測を約 2 ヶ月間行っている。この観測ではデータの時間分解能はおよそ 10 秒となっている。彼らは PACE HF レーダーの視野内に位置する South Pole 基地の磁力計が、狭いバンド幅の Pc3-4 脈動を観測したときに、PACE HF レーダーで観測された Pc3-4 脈動について報告している。これらの Pc3-4 脈動は現象の発生時間は短い、バンド幅の狭いスペクトルが得られ、さらに脈動の coherent length が非常に小さいことから、これらの Pc3-4 脈動が MHD (Magnetohydro Dynamics) ではない過程を用いて磁気圏シース内から伝播して

きているという *Engebretson et al.* [1990,1991] と同様の結果を得ている。一方、*Matsuoka et al.* [2002] では、SuperDARN HF レーダーと GEOTAIL 衛星との同時観測を行っている。この観測でも、通常観測では Pc3-4 脈動を観測することができないために、Pc3-4 脈動を対象とした特別観測を HF レーダー側で行っている。この観測での積分時間は 6 秒である。その結果、磁気圏シース領域と電離圏カスプ域で同時に観測された Pc3-4 脈動について、*Baker et al.* [1998] とほぼ同じ結果を得ている。さらにカスプ域で Pc3-4 脈動のスペクトルパワーが最大になるという結果を HF レーダーの解析結果から得ており、狭いバンド幅の Pc3-4 脈動の振幅パワー分布が、電離圏カスプ域の同定に使用できる可能性を示唆している。

これらの研究結果は、カスプ域で Pc3-4 脈動の振幅が大きいことや、バンド幅の狭い Pc3-4 脈動が観測されることなど、地上磁場観測で得られた結果と一致している。しかしながら、これらの観測では coherent length の小さい脈動しか観測されておらず、地上で観測されるようなグローバルな Pc3-4 脈動現象を説明するには不十分である。さらに、両方の観測とも Pc3 脈動をターゲットとした特別観測を行っているが、それでも時間分解能が十分でないため、電離圏での脈動の振る舞いについて詳細な解析を行うまでに至っていない。

一方、Pg については、近年 HF レーダーによる高緯度での高時間・空間分解能の観測が頻繁に行われている。*Wright et al.* [2001] は、DOPE (DOppler Pulsation Experiment) HF レーダーと IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) によって電離圏と地上で同時に観測された Pg について報告している。彼らは、POLAR 衛星による粒子の観測から、この Pg が even mode のドリフト共鳴によるものであることを示唆している。また、*Baddeley et al.* [2001] は、CUTLASS (Co-operative UK Twin Auroral Sounding System) Finland HF レーダーと EISCAT (European Incoherent SCATter) 電離圏加熱実験装置 (以下、EISCAT ヒーター) による電離圏加熱実験との観測から、地上での磁場変動を伴わない波数の高い脈動を観測している。この脈動は Pg と非常によく似た特徴を持っている。また、POLAR 衛星による観測から、通常の地上磁場で観測される Pg と同様に、10keV の粒子の存在が確認されたことから、この“Pg-like”の脈動もドリフト共鳴によるものであることを示唆している。さらに、*Wright and Yoeman* [1999] では、同様な CUTLASS Finland レーダーと EISCAT ヒーターによる観測において、位相波面のカーブした地上の磁場変動を伴わない Pg-like の脈動を観測している。この脈動は高緯度低緯度でそれぞれ位相が遅れており、これまでの Pg を含む ULF 脈動では説明できないような脈動であった。

このような高緯度電離圏における Pg の観測、特に EISCAT ヒーターによる電離圏への加熱を同時に行う観測は、これまで地上の磁場観測では得られなかった新しい観測結果を得ており、脈動観測の新しい観測手法として注目されている。

1.8 本論文の目的

以上のような背景から、本研究は、地上/電離圏/磁気圏シース領域における Pc3-4 脈動の波動特性について解明することを主目的とする。そのための手段として、HF レーダーと GEOTAIL 衛星との同時観測を行い、観測された Pc3-4 脈動について詳細に解析する。使用するレーダーは、北半球に設置された SuperDARN CUTLASS

HF レーダー（Finland、Iceland East）と、その磁気共役の関係にある南極に設置された SENSU（Syowa South and East HF radars for the SuperDARN）Syowa East レーダーと Kerguelen レーダーである。このとき 4 つの HF レーダーでは通常の観測モードとは異なる新観測モード（only you mode）と、さらに CUTLASS HF レーダーでは英国 Leicester 大学による新観測手法（ステレオモード）を用いる。また、北欧の Tromso に設置された EISCAT ヒーターによる電離圏加熱や、北半球の北欧地方に展開された地磁気観測網も用いることによって、地上/電離圏/磁気圏シース領域での Pc3-4 脈動の波数、伝播方向、南北共役性、および領域間の相互関係を明らかにし、Pc3-4 脈動の発生原因について考察を行う。

第2章 観測機器

本章では、使用する観測データおよび観測機器について説明する。

2.1 HF レーダー

2.1.1 概要

HF レーダーとは HF 帯の電磁波を用いたレーダー（RADAR：RADio Detecting And Ranging）を指す。以下、HF レーダーの簡単な原理について述べる。地球電離圏では、粒子は磁力線に沿ってのみ自由に動くことができると考えられるため、地球の磁力線に沿った不規則電子密度分布（FAI：Field Aligned Irregularity）があると考えられている。この電離圏に対して電磁波を送信すると、電離圏内の粒子による散乱（scatter）が起こる。このとき、ある体積内における粒子の密度構造 L が送信電波波長 λ の半分であった場合（ $L = \lambda/2$ ）に、後方散乱（backscatter）による反射波の振幅が最大となることが知られている。これを Bragg の条件という。このとき、送信と受信を同じアンテナで行う mono-static なレーダーを仮定すると、磁場と送信電波が直行する場合のみ、送信経路と反射経路が一致し、送信アンテナと同じアンテナで反射波を観測することが可能になる（図 2.1）。また、HF 帯の周波数は VHF 帯に比べ周波数が低く電離圏 F 層内のプラズマ周波数に近いと、F 層内で屈折をうけやすく、極域磁場との直行条件を満たしやすい。そのため、VHF 帯では観測することのできなかった地

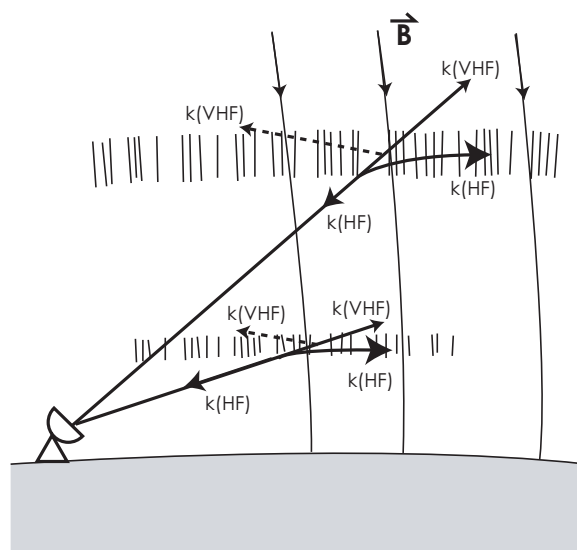


図 2.1: Coherent レーダーによる電離圏沿磁力線電場不規則構造からの後方散乱エコー

平線の向こう側（Over Horizon）を含めた広い領域を観測することが可能である。

2.1.2 Single Pulse 観測

受信される反射波（後方散乱エコー）は不規則密度分布の動き、すなわち電離圏対流により、送信電波からあるドップラーシフトをうけている。この受信波は送信波を

$$A_t \cdot \sin(\omega_0 t + \phi_0) \quad (2.1)$$

とすると、

$$A_r \cdot \sin((\omega_0 + \omega_d)t + \phi_1) \quad (2.2)$$

のように表されるとする。ここで

A_t : 送信波振幅 [V/m]

A_r : 受信波振幅 [V/m]

ω_0 : 送信波周波数 [radian/sec]

ω_d : 受信波ドップラーシフト [radian/sec]

ϕ_0 : 任意の送信波初期位相 [radian]

ϕ_1 : 任意の受信波初期位相 [radian]

t : 経過時間 [sec]

とする。この受信波は受信機内部で電氣的に処理され、IQ 出力と呼ばれる 2 信号の出力に分離される。

$$I = A \cos(\omega_d \cdot t + \phi_1) \quad (2.3)$$

$$Q = A \sin(\omega_d \cdot t + \phi_1) \quad (2.4)$$

ここで I は in phase、Q は quadrature phase を意味する。これらを接続された PC 上の A/D 変換ボードにて IQ 出力に対応する 2ch 分の信号をサンプリングしているのが HF レーダーということになる。ここで、得られた IQ 出力を計算上の理由から

$$Z(t) = I(t) + i(Q(t)) \quad (i = e^{-1}) \quad (2.5)$$

で表す。次に、信号を一回送信したとき（シングルパルス）を考えると、特定の時間に得られる受信波は、特定のレンジからの後方散乱エコーであると考えられる。この single pulse 観測を、検出され得るすべてのレンジからのエコーを受信した後に次のパルスを送信する、という手順を繰り返した場合を考える。すべてのデータから特定のレンジ（距離） r からのエコーのみを抽出し、時系列データとすると、上記の IQ 出力は

$$Z(r, t) = I(r, t) + iQ(r, t) = A(r) \cdot \exp(i(\omega_d(r) \cdot t + \phi_1(r))) \quad (2.6)$$

と表される。ここで、この時系列の十分に長い時間の平均、すなわち 1 パルスの観測を十分な回数行い平均してやり、自己相関関数 (ACF: Auto correlation Function) をとってやると、

$$ACF(r, t) = \langle (Z(r, t)^* \cdot Z(r, t + \tau)) \rangle \quad (2.7)$$

$$= A(r)^2 \cdot \exp(i(\omega_d(r) \cdot \tau)) \quad (2.8)$$

となる。ここで*は複素共役を、 $\langle \rangle$ は時間平均を表す。この ACF は線スペクトルのみを仮定しているが ($\omega = \omega_d$)、実際には ω についての積分となる。この自己相関関数は Winner-Khintchine の公式により、フーリエ変換することによってパワースペクトルとなることから、このフーリエ変換されたパワースペクトルはドップラースペクトルそのものを示すと考えられる。図 2.2 は、このドップラースペクトルを表したものである。この図にお

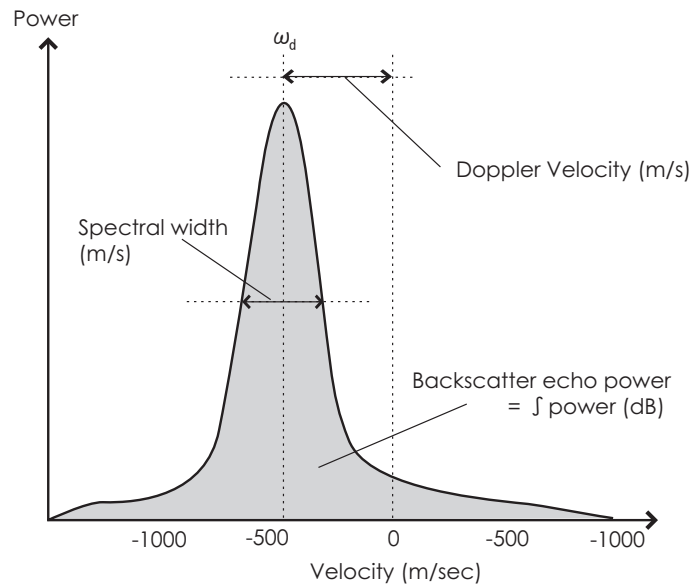


図 2.2: HF レーダーによって取得されるドップラーシフトと各パラメーターの概略図

いて、スペクトルのピーク周波数 ω_d はドップラーシフトされた速度の大きさを表すため、これが電離圏 F 層における対流の速度となる。さらに、このスペクトルピークの幅がスペクトル幅となり、一般に多くの周波数成分を含むほど大きくなる。また、このスペクトルの積分値がエコーパワーとなり、得られたエコーの強さを表している。

2.1.3 不等間隔マルチパルス観測

SuperDARN をはじめとする HF レーダーでは、実際には上記のようなシングルパルス観測は行っていない。これは「相関時間: Correlation Time」という概念があるためである。これは、得られた複数の電離圏エコーがどの程度相関を持っているかということを考慮したものである。仮に、1 時間に 1 パルスを送信するようなレーダーでは、それぞれの電離圏エコーには何の相関もないことになり、データ自身の相関を考慮する ACF によって得られるデータは物理的には全く無意味なものになってしまう。そのため、この相関時間よりも十分に短い

時間間隔でデータをサンプリングする必要がある。一般に高緯度電離圏 E 層および F 層の FAI からの後方散乱エコーの相関時間は、2～30 ミリ秒程度と考えられている。もし電離圏エコーが 3000km 遠方の地平線の向こうから来るとするならば、シングルパルス観測を行うためには少なくとも 20 ミリ秒以上の間隔をあける必要があるが、これは相関時間とほぼ同じであるために、有用な ACF を求めることができない。もし有用な ACF を求めようとするならば、相関時間に比べて十分に短い時間間隔でパルスを送信する必要がある。これが、マルチパルス観測を必要とする理由である。

ここでマルチパルス観測を行う場合の問題として「range ambiguity」があげられる。これは、複数のパルスを相関時間内に送信した場合に得られる特定レンジからのエコーが、サンプリングされるよりも前に送信されたエコーを含むために起こる。そのため、通常のレーダー観測においては不等間隔のマルチパルス観測 [Farley, 1972] が行われている。これは 3 つ以上の複数の不等間隔パルスを送信し、得られたエコーの中から任意の二つ以上をサンプルすることによって、様々な且つ重複のないエコーを得ることができるというものであり、ACF によるドップラースペクトルの算出が可能となる。図 2.3 にその例を示す。このとき、ACF を行う時間幅を積分時間 (integration time) と呼ぶ。

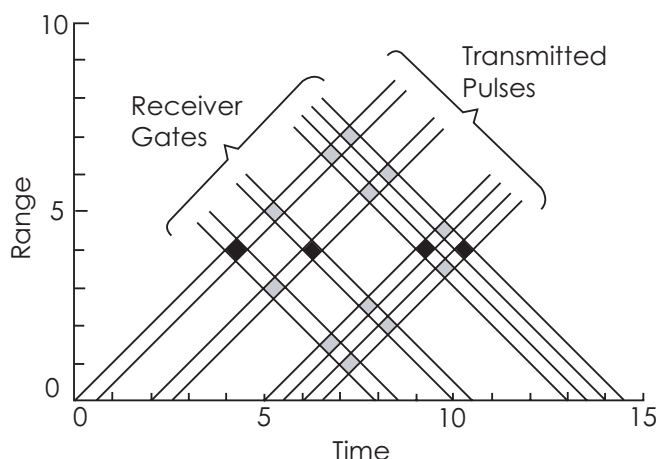


図 2.3: 不等間隔マルチパルス観測におけるパルス列

2.1.4 SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network)

SuperDARN[Greenwald et al., 1995] とは地球の南北両半球極地方に設置された国際 HF レーダー網のことを指す。現在、南極地方に 6 基、北極地方に 9 基のレーダーが設置されており、10 カ国 (オーストラリア、イギリス、カナダ、フィンランド、フランス、日本、南アフリカ、スウェーデン) の国際協力の下、運営されている。図 2.4 に SuperDARN 全てのレーダーの視野範囲を示す。このレーダー網の特徴として、ほぼ同じレーダーコントロールプログラムで運営されていることがあげられる。そのため、各レーダー間で得られたデータは同一手法を用いて算出されたデータとすることができ、簡単に比較することができる。また、それぞれの研究機関により、日々プログラムが更新され、新しい観測計画や観測方法が提案・提供されている。

Field of view of SuperDARN

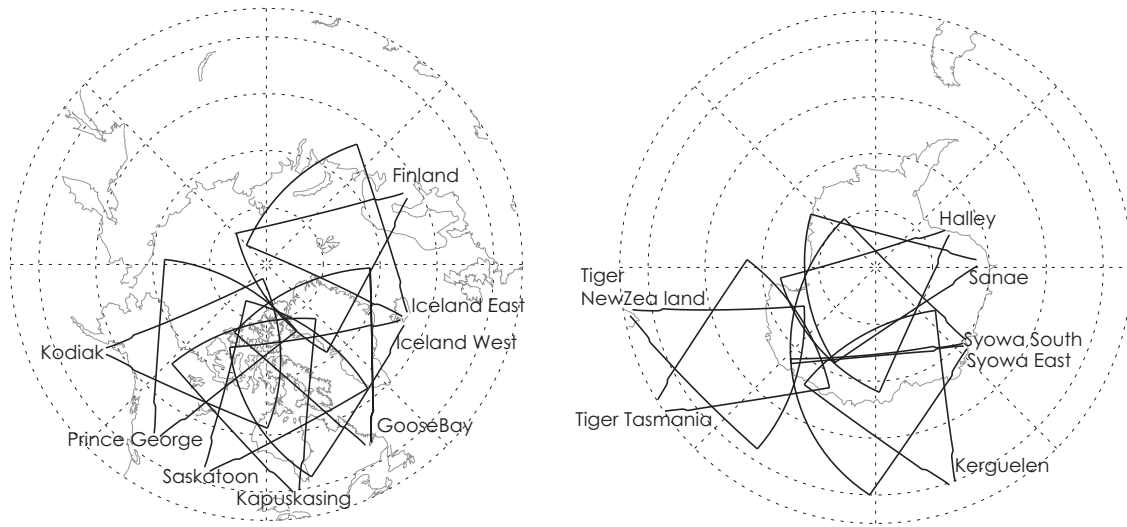


図 2.4: Super Dual Auroral Radar Network の南北両半球における観測視野図

SuperDARN ではほぼ同じレーダー設備を使用している。すべてのレーダーでは、16 基の log-periodic アンテナを持ち、それぞれが $8 \sim 20\text{MHz}$ の出力を持つ。これらのアンテナによって送信される電波は Phasing Matrix によって電氣的に制御され、時間と位相をずらすことによって 16 のビーム方向を持っている。一つのビームの azimuth 幅は送信ビームの周波数に依存し、 2.5° (20MHz) $\sim 6^\circ$ (8MHz) となっているが、SuperDARN で行うほとんどの観測は送信電波の周波数を $10\text{MHz} \sim 14\text{MHz}$ としているために、送信ビームの azimuth 幅はおよそ 4° となっている。この azimuth 幅は高度 1500km において、およそ 100km 程度と考えられる。さらに、ほとんどのレーダー基地では、16 基のアンテナのほかに平行した 4 基のアンテナが設置されている。これらのアンテナはメインのアンテナから 100m ほど離されており、この二つのアンテナ郡で得られた受信波の位相差を計測することにより、電離圏からのエコーの到来角を決定する。これにより、エコーを返してきた電離圏のおおよその高度を知ることができる。

ほぼすべてのレーダーでは、ブロードバンド ($8 \sim 20\text{MHz}$) の送信機を使用しており、これらの最大出力は $500\text{W} \sim 800\text{W}$ となっている。これらの送信機の代表的なパルス幅は 300μ 秒で、空間分解能 (range separation) にして約 45km となっている。また、一番初めのエコーが帰ってくる時間、すなわちサンプリングを開始する時間 (第 1 レンジ) は 1200μ 秒で、距離にして約 180km としている。SuperDARN では最大 75 レンジまでの観測を行っており、この第 1 レンジとパルス幅を設定することによって、より詳細な、または広域な観測を行うことが可能である。さらに SuperDARN は上述の不等間隔マルチパルス観測を行っており、100 ミリ秒間に 7 つのパルスを送信している。

SuperDARN の通常観測では、16 本のビームを順に送信し、ひとつのビームの積分時間は 7 秒となっているため、1 スキャン (走査) におよそ 112 秒かかる。すべてのレーダーでは、2 分毎にビームのスキャンを開始し

ているため、各ビームの時間分解能は2分ということになる。基本的に、北半球の西側を向いているレーダーでは時計回りに、東側を向いているレーダーでは反時計回りにスキャンを行う。これは各レーダーペアにおいて、同時に同じ領域を観測することを考慮したものである。南半球でのスキャン方向はその逆となる。

SuperDARN における最も重要な特徴は、ほぼ 365 日、24 時間連続してデータが取得できるという点である。1ヶ月のうちおよそ 50% は、16 本のビームを使い 2 分毎にスキャンを行うコモンモードの観測である。さらに月の 20% は、積分時間を短くし、観測ビームを限定するような special mode の観測を行っている。さらに残りの 30% は各 PI (Principal Investigator) による discretionary mode の観測が行われる。これらの観測計画は観測を行う月のおよそ 2ヶ月前に決定される。

本研究において使用する SuperDARN は北半球に設置された CUTLASS レーダーと南半球に設置された SENSU Syowa East レーダーと Keruguelen レーダーである。以下それぞれのレーダーについての特徴および関係を示す。

2.1.4.1 CUTLASS (Co-operative UK Twin Auroral Sounding System) レーダー

CUTLASS レーダーとはイギリスの Leicester 大学によって建設された Iceland East レーダーと Finland レーダーのペアである。図 2.5 に CUTLASS レーダーの観測視野を示す。これら二つのレーダー視野は、Finland レーダーが磁気緯度方向を、Iceland East レーダーが磁気経度方向を向いているため、電離圏対流の振る舞いを調べる際に、非常に有用なデータを得ることができる。また、CUTLASS レーダーの観測視野は磁気緯度 60° 以上にあり、電離圏カスプ域を含む。このため、昼側磁気圏シース領域との同時観測に非常に適している。この二つのレーダーは現在 SuperDARN の中でも特に優れたシステムのひとつである「ステレオモード」という観測手法を用いている。この手法では、一つのアンテナを用いて、二台分のレーダーの役割を果たすことができる。以下に簡単な原理を示す。SuperDARN の受信機はおよそ 20kHz の受信周波数帯域幅を持っている。こ

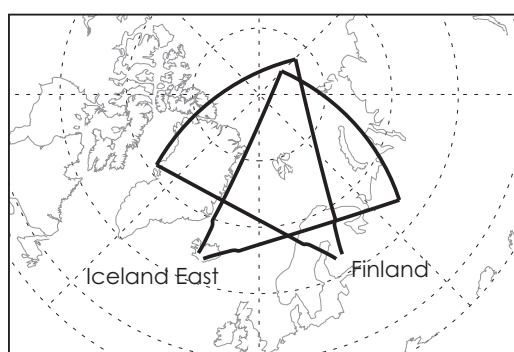


図 2.5: 北半球における CUTLASS (Finland、Iceland East) HF レーダーの観測視野図

の周波数帯域幅以上の差を持つ二つの電磁波 A、B を送信し、受信されるエコーを A、B それぞれの送信周波数を中心とした受信帯域幅をもつ 2 機の受信機で同時に受信することにより、それぞれがドップラーシフトを受けた電離圏エコー ($A+\delta A$ 、 $B+\delta B$) とみなすことができる。このとき A、B の送信に使用するパルス列は全く同じであるが、ハードウェア上の制限により、それぞれの送信波が干渉しない時間分ずらして送信する必要

がある。CUTLASS レーダーでは、 400μ 秒の時間差をおいている。また、送信される電磁波 A、B はそれぞれの Phasing Matrix を持ち、スキャン方向やビーム方向をそれぞれ設定することができ、パルス幅も A、B それぞれで設定することが可能である。さらに、得られた電離圏エコーはそれぞれが独立したものであると考えられるために、ACF を行う際の積分時間をそれぞれで設定することが可能である。このため、積分時間、スキャン方向、ビーム方向、パルス幅の違う観測モードを同時に実行することが可能となっている。本論文では、便宜上 A、B をそれぞれチャンネル 1、チャンネル 2 と呼んでいる。

2.1.4.2 SENSU (Syowa South and East HF Radars for the SuperDARN) Syowa East レーダー、Kerguelen レーダー

SENSU Syowa East レーダー（以後、Syowa East レーダーと呼ぶ）は国立極地研究所によって南極の昭和基地に建設された HF レーダーであり、視野はほぼ磁気経度方向で東側に向いている。一方、Kerguelen レーダーはフランスの LPCE/CNRS によって南極域の Kerguelen 島に建設された HF レーダーであり、視野は磁気緯度方向で高緯度側に向いており、Syowa East レーダーとほぼ同じ領域を観測している（図 2.6）。

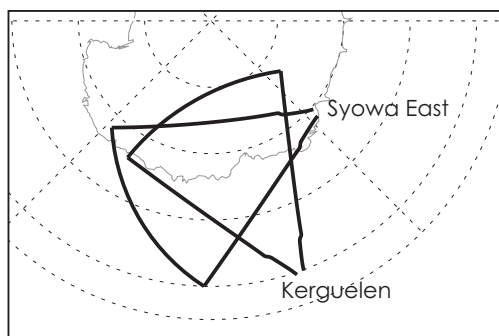


図 2.6: 南半球における Syowa East レーダーと Kerguelen レーダーの観測視野

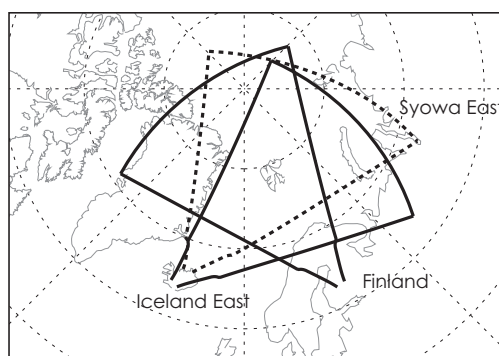


図 2.7: 北半球における CUTLASS HF レーダーの観測視野と、AACGM 座標系を用いて北半球にマッピングした Syowa East レーダーの観測視野

この二つのレーダーの特徴として、CUTLASS レーダーの視野と磁気共役の関係にあることがあげられる。図 2.7 に CUTLASS レーダーの視野および AACGM (Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic Coordinate) モデルを用いた Syowa East レーダーの視野の北半球への投影図を示す。近年、これらの二つのレーダーと CUTLASS レーダーを用いたオーロラや電離圏対流、Pc5 脈動などの南北 (非) 対称性の研究が盛んに行われている。

2.2 GEOTAIL 衛星

GEOTAIL 衛星は 1992 年 7 月 24 日にデルタ II ロケットによって打ち上げられた衛星である。その主目的は地球磁気圏尾部の詳細な探査であり、打ち上げからおよそ 1 年半で約 $210R_E$ という遠地点に達し、磁気圏尾部における数々の興味深い現象を観測している。現在は遠地点約 $30R_E$ 、近地点約 $8R_E$ で地球を周回しているため、磁気圏内、磁気圏シース領域および惑星間空間の詳細な研究に用いられている。

GEOTAIL 衛星は、CPI (Comprehensive Plasma Instrument)、EFD (Electric Field Detector)、EPIC (Energetic Particle and Ion Composition)、HEP (High Energy Particle)、LEP (Low Energy Particle)、MGF (Magnetic Field Measurements)、PWI (Plasma Wave Investigation) の合計 7 つの観測機を搭載している。本研究で使用するのには MGF と LEP である。

MGF[Kokubun *et al.*, 1994] は 50Hz 以下の磁場変動観測に用いられ、フラックスゲート磁力計とサーチコイル磁力計から構成されている。フラックスゲート磁力計において、磁場データは毎秒 16 回サンプリングされ、1 スピン時間である 3 秒ごとに平均される。このフラックスゲート磁力計は $\pm 16\text{nT}$ 、 $\pm 64\text{nT}$ 、 $\pm 256\text{nT}$ 、 $\pm 4096\text{nT}$ 、 $\pm 16384\text{nT}$ 、 $\pm 65536\text{nT}$ の 7 つのダイナミックレンジを持っており、磁気圏内や太陽風中などの各観測レンジに合わせることができる。サーチコイル磁力計は $0.5 \sim 1\text{kHz}$ の周波数レンジを持っており、データは毎秒 128 サンプリングされる。サーチコイル磁力計はリアルタイム観測時のみ使用される。

LEP[Mukai *et al.*, 1994] は磁気圏および惑星間空間におけるプラズマ、エネルギー電子とエネルギーイオンの観測に用いられ、LEP-EA、LEP-SW、LEP-MS の 3 つのセンサーを持つ。LEP-EA と SW はそれぞれ磁気圏内ホットプラズマおよび太陽風中イオンの 3 次元速度分布を、また LEP-MS は 3 次元のイオンの composition を観測する。

2.3 地上磁場観測網

本観測では複数の地上磁場観測観測網を使用している。以下に各磁場観測網の観測点の緯度・経度、CGM (Corrected GeoMagnetic) 座標系での緯度・経度、サンプリング時間を示す。また、図 2.8 に各ステーションの位置を表した地図を示す。

表 2.1: IMAGE (International Monitor of Auroral Geomagnetic Effects) [Luhr *et al.*, 1984]
 の各観測点の緯度・経度

IMAGE (International Monitor of Auroral Geomagnetic Effects) Sampling Time : 10 sec				
ステーション ID	地理緯度 [degree]	地理経度 [degree]	磁気緯度 [degree]	磁気経度 [degree]
NAL	78.92	11.95	75.25	112.08
LYR	78.20	15.82	75.12	113.00
HOR	77.00	25.60	74.13	109.59
HOP	76.51	25.01	73.06	115.10
BJN	74.50	19.20	71.45	108.07
SOR	70.54	22.22	67.34	106.17
TRO	69.66	18.94	66.64	102.90
AND	69.30	16.03	66.45	100.37
KEV	69.76	27.01	66.32	109.24
MAS	69.46	23.70	66.18	106.42
KIL	69.02	20.79	65.88	103.79
LEK	68.13	13.54	65.40	97.50
ABK	68.35	18.82	65.30	101.75
IVA	68.56	27.29	65.10	108.57
MUO	68.02	23.53	64.72	105.22
KIR	67.84	20.42	64.69	102.64
LOZ	67.97	35.08	64.23	114.49
SOD	67.37	26.63	63.92	107.26
PEL	66.90	24.08	63.55	104.92
RVK	64.94	10.98	62.23	93.31
LYC	64.61	18.75	61.44	99.29
OUJ	64.52	27.23	60.99	106.14
DOB	62.07	9.11	59.29	90.20
HAN	62.30	26.65	58.71	104.61
NUR	60.50	24.65	56.89	102.18
UPS	59.90	17.35	56.51	95.84
TAR	58.26	26.46	54.47	102.89

表 2.2: SAMNET の各観測点の緯度・経度

SAMNET (Sub Auroral Magnetometer NETwork) Sampling Time = 5 sec				
ステーション ID	地理緯度 [degree]	地理経度 [degree]	磁気緯度 [degree]	磁気経度 [degree]
KIL	69.02	20.79	5.90	103.69
HLL	63.77	-20.56	64.32	67.58
OUL	65.10	25.85	61.67	105.23
OUJ	64.52	27.23	61.02	106.07
FAR	62.05	-7.02	60.67	77.35
HAN	62.30	26.65	58.75	104.54
LER	60.13	-1.18	57.96	80.92
NUR	60.51	24.66	56.94	102.12
UPS	59.90	17.35	56.53	95.76
KVI	59.50	17.63	56.09	95.82
GML	57.16	-3.68	54.81	77.57
CRK	57.09	-2.64	54.64	78.36
BOR	58.03	38.33	54.11	113.22
ESK	55.32	-3.20	52.63	77.20
YOR	53.95	-1.05	50.83	78.40
HAD	50.99	-4.48	47.52	74.65

表 2.3: その他の各観測点の緯度・経度

ステーション ID	地理緯度 [degree]	地理経度 [degree]	磁気緯度 [degree]	磁気経度 [degree]
Davis	-68.60	78.00	-74.55	99.99
Tromso (WEED)	69.66	18.94	66.64	102.90
Jan Mayen	70.90	-8.42	70.28	83.13
Husafell	64.67	-21.03	65.36	67.80
Tjornes	66.20	-17.12	66.44	72.11
Aedey	66.09	-22.65	67.13	67.52

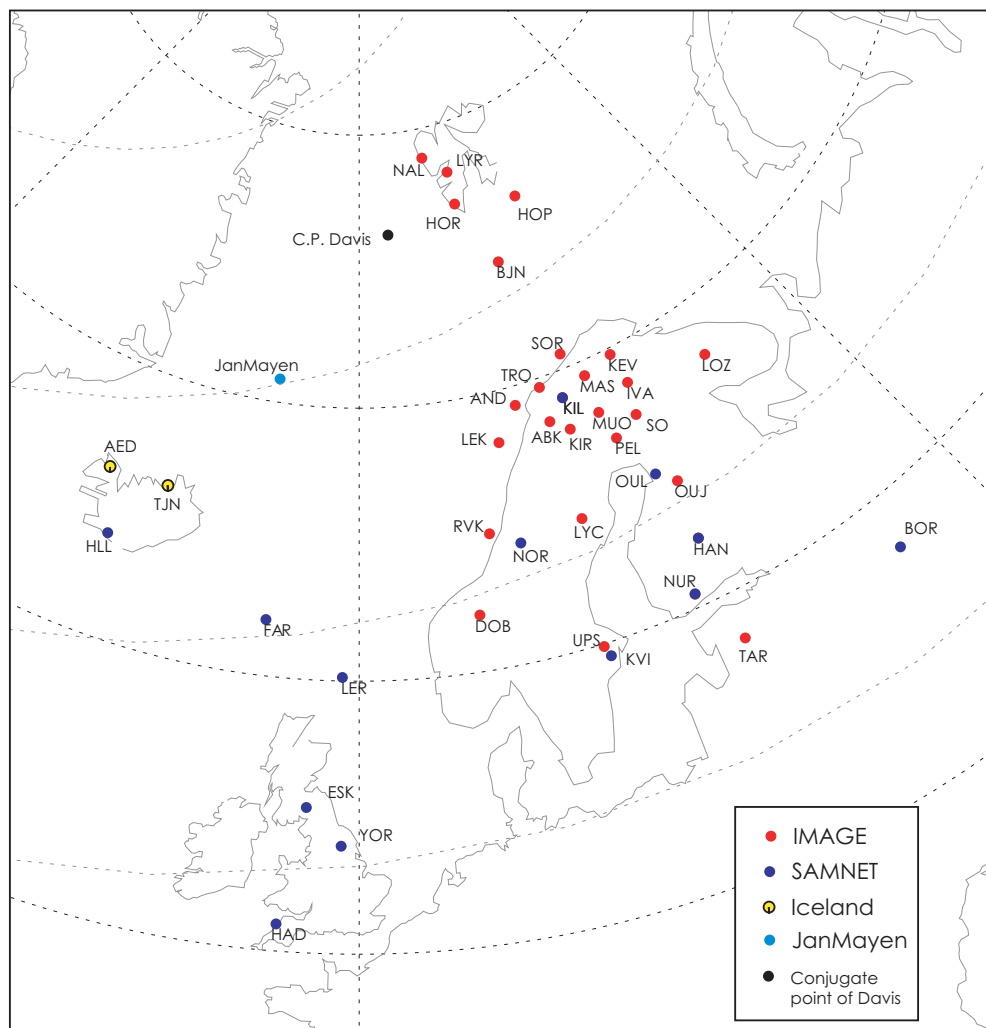


図 2.8: 本研究において使用した全地磁気観測点

2.4 EISCAT 電離圏加熱実験装置

現在 EISCAT (European Incoherent SCATter) の電離圏加熱実験装置 (Heater) は、Norway の Ramfjordmoen (北緯 69.6° 、東経 19.2°) に建設された HF 周波数帯の電磁波を使った電離圏加熱実験装置で、1993 年 1 月から EISCAT 施設のひとつとなった。

この装置は最大 1.2MW の CW (Continuous Wave) を $3.85\text{MHz} \sim 8\text{MHz}$ の周波数帯で送信することができる。また、送信周波数、polarization、ビーム方向、最大パワーは加熱実験前に設定され、実験中もパワーや polarization、ビーム方向などを変えることができる。通常ビーム方向はほぼ直上になっている。当初、電磁波による電離圏の FAI の生成は、観測されることを全く期待されなかった現象であり、これまで様々な研究が行われているが、その発生機構についてはいまだ解明されていない [Rietveld *et al.*, 1993]。しかしながら、これまでの多くの研究から、PDI (Parametric Decay Instability) が FAI を起こすきっかけになると考えられている。また、PDI の成長時間 (growth time) は非常に短い (1ms) ために、PDI によって起こされた波が TPI (Thermal Parametric Instability) によって成長するとも考えられている。

本研究で行っているような加熱実験装置による電離圏加熱実験と、加熱領域と数百 km ほど離れた HF レーダーによる電離圏 F 層観測は Hedberg *et al.* [1983] をはじめ、様々な研究者によって行われてきた。これら HF レーダーとの観測実験では、EISCAT ヒーターによって送信される電磁波は通常 O-Mode (Ordinary Mode) であり、HF レーダーの観測対象である電離圏 F 層のプラズマ周波数とほぼ同じ周波数で送信される。送信された電磁波は O-mode reflection height の直下にある upper hybrid height 付近の電子擾乱 (FAI) を生成する。生成された FAI は通常密度を変化させることなく、電子密度擾乱のみを成長させると考えられており、HF レーダーによって観測されるドップラー速度は送信電磁波によるものではなく、自然現象であると考えられている。

第3章 観測結果

本研究で扱う観測データは GEOTAIL/SuperDARN 同時観測期間中に得られたデータである。この同時観測は、GEOTAIL 衛星の予測軌道が昼側磁気圏シース領域付近を通過するときの Tyganenko89 モデルを用いて地上へ投影した軌道投影点が CUTLASS レーダーの視野内にあるときに行う。このとき、CUTLASS レーダーでは、GEOTAIL 衛星の軌道投影点に沿うビームを選定し、その決められたビームのみで送受信を行い、さらに積分時間を短くすることで、高時間分解能観測を実現した。同時に、CUTLASS レーダーと磁気共役の関係にある南半球の Syowa East レーダーと Kerguelen レーダーでも同様にして特別観測ビームを設定し、高時間分解能観測を行っている。通常この観測では、時間分解能を高くした一本のビームのみで観測するために、広範囲の電離圏領域の観測は出来ない。しかしながら、CUTLASS レーダーにおいては 2002 年よりステレオモードが導入

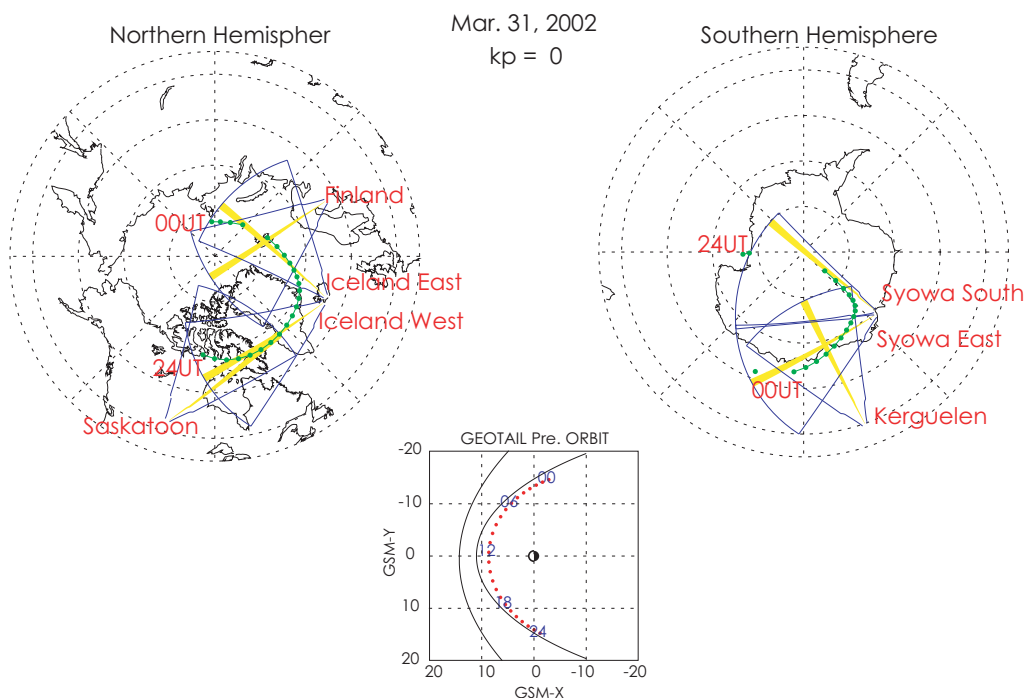


図 3.1: 2002 年 3 月 31 日に行われた、GEOTAIL/SuperDARN 同時観測における観測外略図。上の二つはそれぞれ、北半球、南半球で観測に使用した SuperDARN HF レーダーの観測視野と GEOTAIL 衛星の軌道投影点を 1 時間ごとに表している。黄色で表されているのは各レーダーにおける特別観測ビームである。下の図は GSM 座標系の XY 平面を表しており、GEOTAIL 衛星の予測軌道が 1 時間ごとに描かれている。軌道投影点および予測軌道に描かれた数字は UT (Universal Time) を表している。

されているため、本研究における同時観測ではステレオモードを使用してコモンモード観測も同時に行い、時間分解能は低いもののグローバルな電離圏の動きを同時に見ることも可能となっている。図 fig3.1 は 2002 年 3 月 31 日に実施した特別観測における GEOTAIL 衛星の GSM 座標系 XY 平面上における予測軌道、および南北両半球での GEOTAIL 衛星の軌道投影点と SuperDARN の観測視野を示している。ここで、黄色で書かれているビームは特別観測ビームとして設定したビームであり、緑の点は GEOTAIL 衛星の 1 時間毎の軌道投影点を表している。また、GEOTAIL 衛星の軌道上の数字は UT (Universal Time) を表している。この特別観測では、北半球の Saskatoon と Iceland West、南半球の Syowa South のレーダーも同時に高時間分解能観測を行っている。このように、GEOTAIL 衛星の予測軌道から、GEOTAIL 衛星の観測領域と磁力線で結ばれていると考えられる電離圏領域の電場変動を観測することにより、磁気圏と電離圏で同時に Pc3-4 脈動を観測し、その特性から発生機構を解明することが、本観測の目的である。

本論文では、2002 年 2 月 12 日に行われた同時観測イベントで得られた約 18mHz のスペクトルピークをもつ電離圏電場変動、および 2003 年 2 月 17 日に行われた EISCAT ヒーターを使った特別観測で得られた約 16mHz のスペクトルピークを持つ電離圏電場変動についての解析について報告する。

3.1 観測イベント 1 : 2002 年 2 月 12 日

3.1.1 観測概要

これまでの高緯度電離圏における Pc3-4 脈動 (周期 100 秒以下) の観測例 [Matsuoka et al., 2002; Baker et al., 1998] では、その大まかな振る舞いや磁気緯度によるパワーの違いなどがわかっているが、時間分解能が低いために脈動自身の詳細な特徴を解析するまでに至っていない。そのため、本観測では、SuperDARN の特徴のひとつである広範囲の空間分解能を犠牲にしても、時間分解能を上げることを優先し、16 本のビームのうち、1 本のビームのみ (以下、これを特別観測ビームと呼ぶ) を送受信する「only you mode」を実施した。また、特別観測ビームの選定において、これまでの地上磁場と磁気圏シース領域での Pc3-4 脈動に関する研究と比較するため、地上磁場観測網のいずれかの上空になるように考慮した。すなわち、北半球の CUTLASS レーダーでは IMAGE 磁力計チェーンの Longyearbyen (LYR) 上空を観測する Iceland East ビーム 5 と Finland ビーム 9、南半球の Syowa East と Kerguelen の両レーダーでは中国の南極中山基地、およびオーストラリア Davis 基地上空を観測するビーム 7 とビーム 6 をそれぞれ設定した。図 3.2 は本イベントにおける GEOTAIL 衛星の予測軌道、および南北両半球での GEOTAIL 衛星の軌道投影点と各レーダーの観測視野を表している。また、各レーダーでの観測モードの詳細を表 3.1 に示す。

以下、得られたデータに関しての詳細な解析結果を示す。

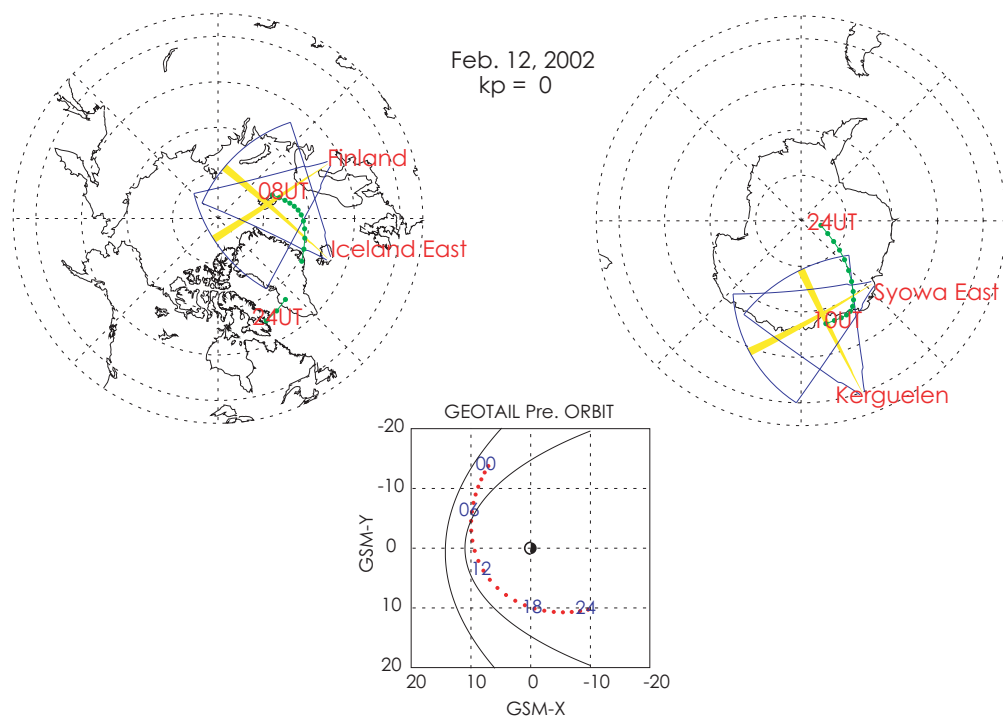


図 3.2: 002 年 2 月 12 日に行った GEOTAIL/SuperDARN 同時観測における観測外略図。

表 3.1: 2002 年 2 月 12 日の観測モードの詳細

ステーション名	Finland	Iceland East	Syowa East	Kerguelen
積分時間	3 秒	3 秒	3 秒	3 秒
特別観測ビーム	9	5	7	6
パルス幅 (レンジ分解能)	300 μ 秒 45km	300 μ 秒 45km	300 μ 秒 45km	300 μ 秒 45km
第 1 レンジ (第一レンジ距離)	1200 μ 秒 180km	1200 μ 秒 180km	1200 μ 秒 180km	1200 μ 秒 180km

3.1.2 SuperDARN

3.1.2.1 CUTLASS Iceland East レーダー

3.1.2.1.1 エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅

図 3.3 は、Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 で得られたエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅のレンジ - 時間 - 強度 (RTI: Range Time Intensity) プロットである。すべての図において、横軸は時間軸で 0400UT から 0600UT までの 2 時間分を表している。縦軸はレンジ番号で、レンジ 1 から 75 までを示している。

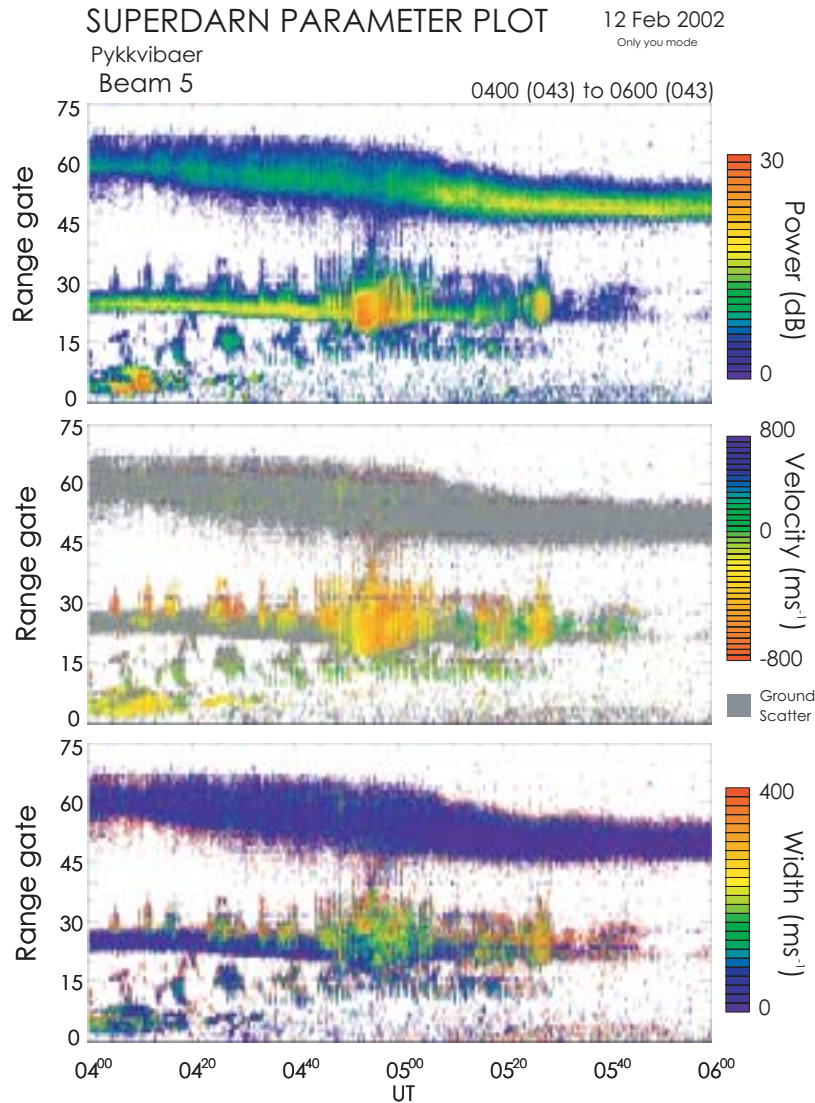


図 3.3: 2002 年 2 月 12 日 0400UT ~ 0600UT に得られた Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 における RTI プロット。上からエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅となっており、それぞれ右のカラーバーによって強度が表されている。横軸は時間で 0400UT ~ 0600UT の時間帯を表している。縦軸はレンジ番号を表しており 0 ~ 75 までとなっている。

エコーパワーの観測結果 図 3.3 の上段において、色はエコーパワー強度を表しており、右のカラーバーに示される通り、0dB から 30dB までを 30 等分割して表している。このエコーパワーにおいて特徴的なのは、0440UT 頃から 0510UT 頃までに、およそレンジ 15 からレンジ 35 にかけて、非常に明瞭な縦縞の構造が現れていることである。これは、電離圏エコーの強さが周期的に変動していることを意味している。今回、地上との関連を確認するために使用する予定のレンジ 43 付近 (IMAGE LYN 上空) では、残念ながら有意なエコーは観測されていなかった。

ドップラー速度の観測結果 図 3.3 中段において、色は速度を表しており、右のカラーバーに示される通り、 -800m/s から 800m/s までを 40 分割して表している。このとき、レーダーサイトへ向かう方向を正、レーダーサイトから遠ざかる方向を負としている。また、図中で灰色のエコーは、地上反射波だと考えられるエコーである。これは通常の SuperDARN レーダー解析ソフトウェアで、速度が 30m/s 以下、スペクトル幅が 35m/s 以上であるとき、地上反射波と定義されている。今回のイベントに関しては、地上反射波は解析から除外している。この図において特徴的なのは、エコーパワーと同様に、0440UT 頃から 0510UT 頃までに、およそレンジ 15 から 40 にかけて、明瞭な縦縞の構造が確認されることである。これは電離圏でのプラズマの運動速度、すなわち電離圏電場の周期的変動を観測したものであると考えられる。

スペクトル幅の観測結果 図 3.3 の下段において、色はスペクトル幅を表しており、右のカラーバーに示される通り、 0m/s から 400m/s までを 20 等分割して表している。このスペクトル幅において特徴的なのは、上述の二つの値が周期的な変動を示したおよそ 0440UT ~ 0510UT までの間、 200m/s 程度の値を示していることである。

これらの 3 つの観測数値から、0440UT から 0510UT 付近で観測された電離圏エコーの変動は、電離圏電場脈動を観測したものであると考えられるため、この時間帯におけるドップラー速度変動などの詳細な解析を行った。

3.1.2.1.2 脈動現象の周波数

図 3.4 は 0440UT から 0510UT のドップラー速度の RTI プロットである。より細かく変動を見るためにカラーバーは -700m/s から 700m/s を 50 等分割に、縦軸もレンジ 10 から 45 までとしている。この図において、

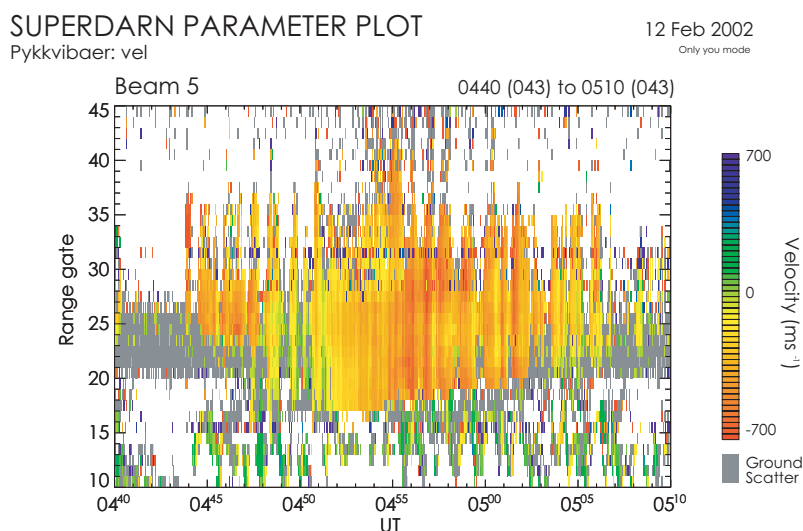


図 3.4: Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 におけるドップラー速度の RTI プロット。時間幅を 0440UT ~ 0510UT で表しており、縦軸はレンジ 10 からレンジ 45 までとなっている。

0445UT ~ 0507UT までに周期的な速度変動を見ることができる。また、レンジ 15 からレンジ 20 より下のレンジにおいて逆方向の運動が認められ、周期的な変動をしているように見える。

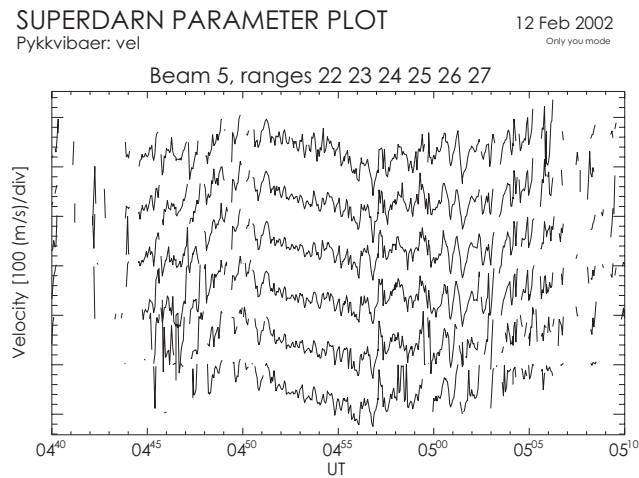


図 3.5: Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 におけるドップラー速度の時系列プロット。下から順にレンジ 22 からレンジ 27 までとなっている。横軸は 0440UT ~ 0510UT までを表しており、縦軸は速度を表している。

図 3.5 は、同時間帯におけるレンジ 22 から 27 の速度変動を示したもので、縦軸は速度、横軸は時間を表す。図 3.4 と同様に、0445UT ~ 0507UT に周期的な速度変動を見ることができる。

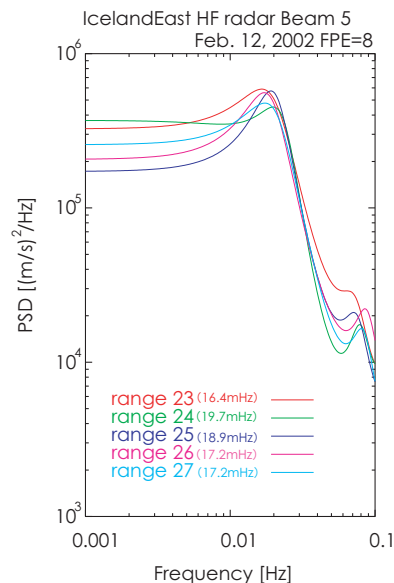


図 3.6: 次数 8 の Burg 法によって求められた、Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 番におけるレンジ 23 からレンジ 27 までのドップラー速度のパワースペクトル。時間幅は 0455UT から 0502UT となっている。横軸は周波数、縦軸はパワーを表しており、それぞれ対数スケールで表している。

これらのデータは、レンジによっては地上反射波やノイズが多く、連続した時系列のデータを抽出することが難しい。そのため、比較的長時間にわたり多くのエコーが観測されている 0455UT から 0502UT までのレンジ 23 から 27 について周波数スペクトルを算出した。周波数解析には最大エントロピー法 (MEM) の 1 つである Burg 法を用いた。

図 3.6 は、次数 8 の Burg を用いて算出したレンジ 23 から 27 の周波数スペクトルである。横軸は周波数を、縦軸はパワーをそれぞれ対数スケールで示している。各レンジは色によって表されており、レンジ番号横の括弧内の数字はピーク周波数を表している。この図から、16.4mHz から 19.7mHz 付近に明瞭なスペクトルピークを持ち、この現象が Pc3-4 脈動に分類されることがわかった。また、全てのレンジでほぼ同じパワーを有しており、これらの脈動が少なくとも 5 つのレンジ、すなわち $45 \times 5 = 225\text{km}$ のスケールを持っていることを示唆している。

3.1.2.1.3 波数および伝播方向

磁気経度方向および磁気緯度方向の波数や位相変化は、脈動の性質を表現する重要な物理量である。一般に磁力線共鳴モデルによる ULF 脈動では、磁気経度方向の位相変化は脈動自身の伝播方向を示すと考えられ、磁気緯度方向の位相変化は、脈動の発生領域からの伝播経路の長さ (L-shell) によって起こる見かけ上の位相変化と考えられている。すなわち、脈動が磁気圏内外から磁力線に沿って伝播する場合、低緯度側の脈動に比べて高緯度側の脈動の位相が遅れて観測されると考えられる。

本論文では *Tonegawa and Sato* [1987] の方法を用いて波数を求める。この方法では、脈動の位相は比較する観測点間で磁気緯度方向および磁気経度方向ともに線形に変化すると仮定し、三つ以上の磁場観測点の磁気緯度差ならびに磁気経度差から、磁気緯度方向と磁気経度方向の波数を算出する。計算式は以下のとおりである。

$$\phi_j - \phi_i = k \cdot (r_j - r_i) \quad (3.1)$$

ここで、 i, j はそれぞれ i 番目と j 番目の観測点を示す。 θ は観測点の磁場の H 成分または D 成分の変動の位相、 k は無次元の磁気緯度方向 (k_x) と磁気経度方向 (k_y) の脈動の波数、 r は各観測点の磁気緯度 (r_{lat}) と磁気経度 (r_{lon}) である。ここで、波数 $k(k_x, k_y)$ を求めるには、未知数が二つであるため、連立方程式として解く必要があることから、3 つ以上の観測点間での比較が必要となる。しかしながら、本観測で得られた Pc3-4 脈動は特別観測ビームでのみ観測された現象であるため、比較する観測点 (レンジ) が直線上に並ぶことから、特別観測ビームの視野方向の波数のみを知ることができる。Iceland East レーダーの視野は、ほぼ磁気経度方向を向いていると考えられるため、この方法によって、電離圏における磁気経度方向の波数および位相変化、すなわち伝播方向を知ることが可能と考えられる。本論文では、レンジ間の位相差を MEM のひとつである Akaike 法を用いて解析した。

図 3.7 は、次数 8 の Akaike 法による、周波数 16mHz ~ 19mHz におけるレンジ 25 に対するコヒーレンスと位相の解析結果である。この図から、すべてのレンジにおいて、0.9 以上の高いコヒーレンスがあることがわかる。次に位相差を見てみると、レンジ 25 の両側で位相が遅れている。そのため、レンジ 25 を境にしてそれ

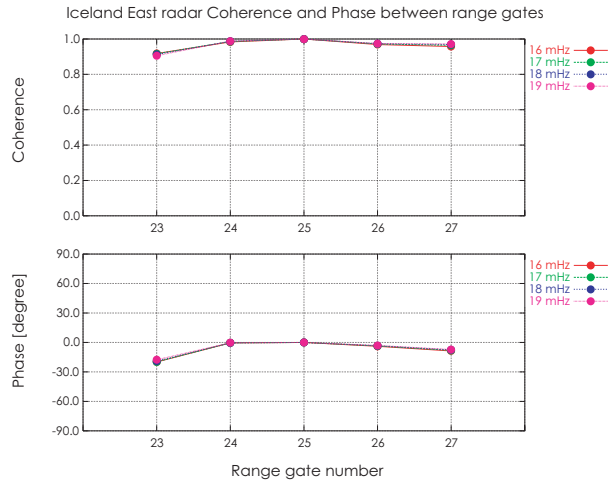


図 3.7: 次数 8 の Akaike 法によって求められた、Iceland East HF レーダーの特別観測ビーム 5 における、レンジ 25 に対するレンジ 23 からレンジ 27 のドップラー速度のコヒーレンス（上図）と位相（下図）。時間幅は 0455UT から 0502UT となっている。横軸はレンジを表しており、縦軸はそれぞれコヒーレンスと位相を表している。

それぞれの波数を求める。レンジ 23 とレンジ 25 の磁気緯度・磁気経度は、それぞれ $(72.18^\circ, 87.78^\circ)$ $(72.66^\circ, 89.93^\circ)$ であるので、磁気経度差は 2.09° となり、式 3.1 からおよそ -9 という波数が得られる。ここで、負の波数は西側のレンジの位相が遅れていることを示し、脈動が西側へ伝播していることを意味する。レンジ 25 と 27 では位相がおよそ 10° 変化している。レンジ 27 の磁気緯度・磁気経度は $(73.10^\circ, 92.20^\circ)$ であるので磁気経度差は 2.27° となり式 (3-1) からおよそ 5 という波数が得られた。正の波数は東側のレンジの位相が遅れていることを示し、脈動が東側へ伝播していることを意味している。これらの結果から、観測された脈動はレンジ 25 を境に、逆方向に伝播する脈動であり、それぞれ波数 -9 と 5 であることがわかった。

3.1.2.1.4 エコーパワーとドップラー速度について

前述の通り、本イベントで得られた Pc3-4 脈動では、ドップラー速度だけでなくエコーパワーにも周期的な変動が確認された。

図 3.8 の上段は、Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 における 0450UT から 0505UT のエコーパワーの RTI プロットである。縦軸はレンジ 10 からレンジ 40 までを、カラーバーは 0dB から 30dB までを 30 等分割で表している。この図から非常に明瞭な脈動成分がエコーパワーにもあるのがわかる。図 3.8 の下段は、Iceland East レーダーのレンジ 25 におけるドップラー速度とエコーパワーの時系列データをそれぞれ表したものである。ドップラー速度の縦軸は上側が負の速度となっている。また、それぞれの図中の点線は、二次曲線近似によって得られたそれぞれのトレンド（直流成分）である。ドップラー速度とエコーパワーのトレンドの変化が良く似ており、全体的なエコーパワーの上昇とともに、全体的なドップラー速度も上昇することを示している。さらに、この二つの値の周期的な変動は位相が少しずれている。

図 3.9 は次数 10 の Akaike 法によって求めたドップラー速度に対するエコーパワーの位相を示したものであ

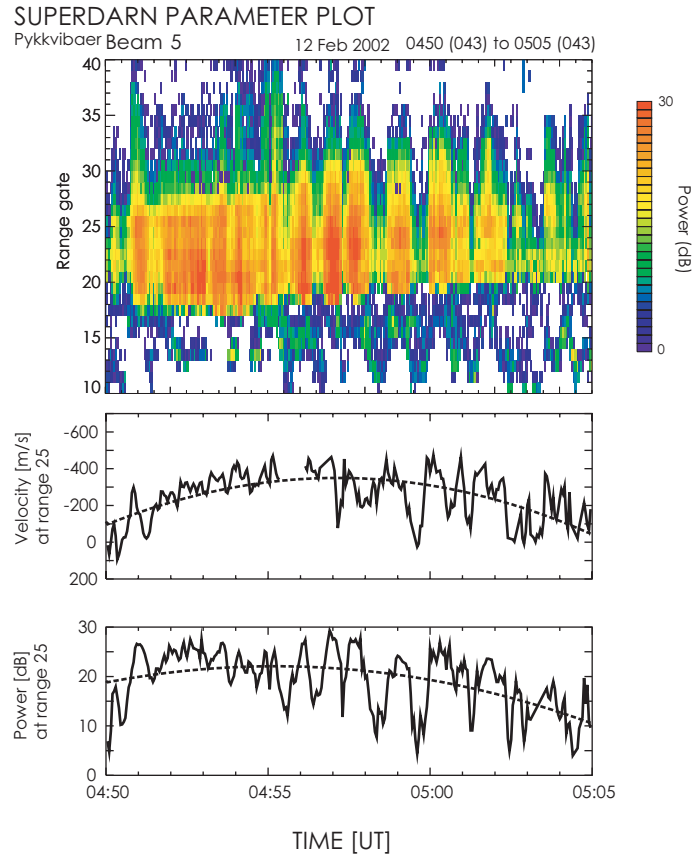


図 3.8: Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 における、0450UT から 0505UT までのエコーパワーと、ビーム 5 のレンジ 25 におけるドップラー速度およびエコーパワーの時系列プロット。

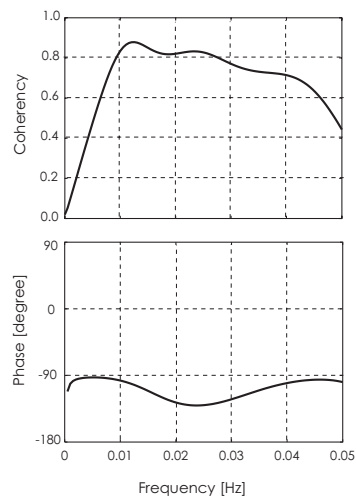


図 3.9: Iceland East レーダーの特別観測ビーム 5 における、ドップラー速度に対するエコーパワーのコヒーレンスと位相差。横軸は $0\text{Hz} \sim 0.05\text{Hz}$ まで表している。

る。この図から、 16mHz から 19mHz でおよそ 90° から 120° ドップラー速度の位相がすすんでいることが判明した。

3.1.2.1.5 グローバルスキャン観測

CUTLASS レーダーでは冒頭で述べたようにステレオモード観測を行っている。そのため、チャンネル 1 で特別観測を行い、チャンネル 2 をコモンモードで運用することによって、通常観測のときと同じような時系列のグローバルスキャンのデータを見ることが可能である。このチャンネル 2 のコモンモードでは、積分時間が 3 秒であるので、1 本のビームの時間分解能は約 48 秒となり、通常のコモンモードよりも高い時間分解能を持っている。図 3.10 は 0445UT から 0503UT までの 1 スキャン毎のグローバルスキャンのデータを示したものであ

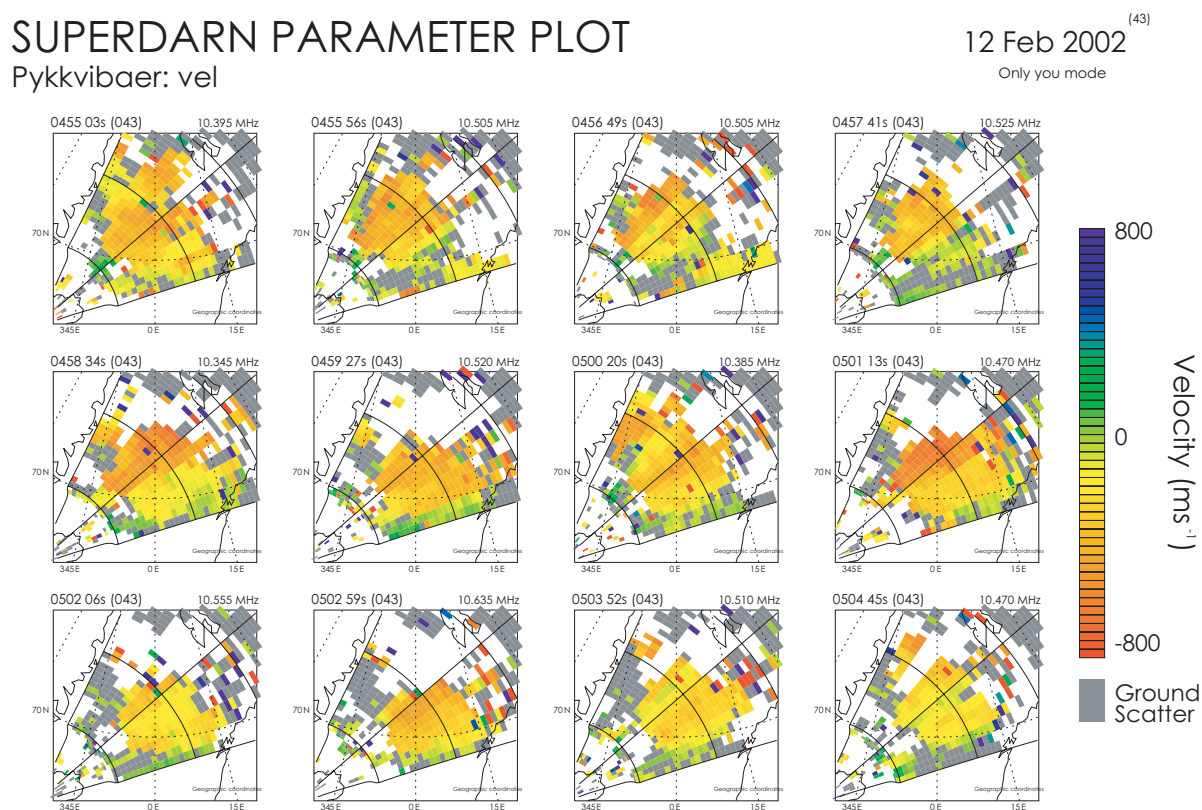


図 3.10: Iceland East レーダーのステレオモードによって得られた、ドップラー速度のグローバルスキャンデータプロット。左から右、上から下に時間順に表示しており、0455:36UT (一番左上) から 0504:45UT (一番右下) までとなっている。速度は右のカラーバーによって表されている。

る。図は極座標表示で、地理緯度 65° から 80° 、地理経度 -15° から 15° 付近を表している。速度はカラーバーによって、 -800m/s から 800m/s を 40 等分割で表している。この図から特別観測ビーム 5 を含むパッチ状の東方向への速度を示したエコーがあるのがわかる。これは、特別観測ビームで得られた Pc3-4 脈動が、他のビームの観測領域でも起こっている可能性を示唆する。さらに、低緯度側のビーム 12、ビーム 13 周辺を境に逆方

向の運動を見ることができ、高緯度側で東向き、低緯度側で西向きの流れがあることを示している。これは、この付近で電離圏対流のシアーがあることを意味している。

3.1.2.2 CUTLASS Finland レーダー

3.1.2.2.1 エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅

図 3.11 は、2002 年 2 月 12 日 0400UT から 0600UT に Finland レーダーの特別観測ビーム 9 で得られたエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅の RTI プロットである。

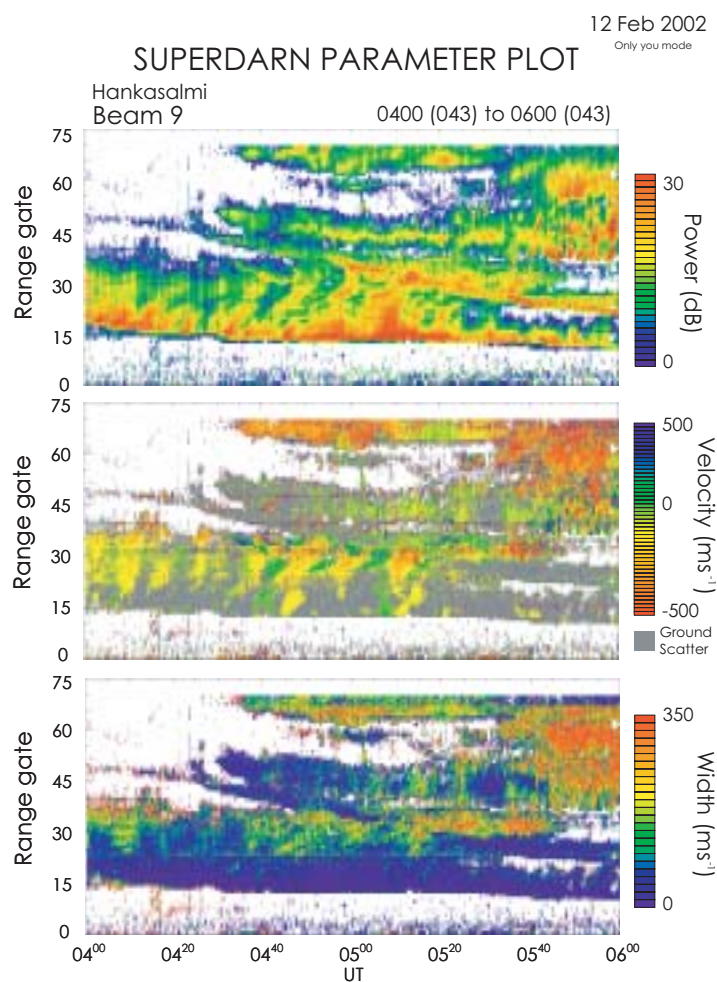


図 3.11: 2002 年 2 月 12 日 0400UT ~ 0600UT に得られた Finland HF レーダーの特別観測ビーム 9 におけるエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅の RTI プロット。

エコーパワーの観測結果 図 3.11 の上段においてカラーバーは 0dB から 30dB を 30 等分割してエコーパワーを表している。このエコーパワーにおいて特徴的なのは、多くのレンジからエコーが長時間観測されていることと、さらにレンジ番号の低いほうから高いほうへ時間ともにエコーパワーが遷移していくようなエコーが見

られることである。また、これらのエコーはレンジ 20 からレンジ 30 付近で周期的なエコーパワーの変動を見せているが、Iceland East レーダーで得られた変動に比べ周期の長い変動であることがわかる。

ドップラー速度の観測結果 図 3.11 の中段においてカラーバーは -500m/s から 500m/s を 50 等分割して速度を表している。エコーパワーの周期的な変動にあわせて、ドップラー速度の方向が変わっているのがわかる。さらに、エコーパワーで見ることの出来た高緯度側へのエコーの遷移と同様に速度も時間と共に高緯度に遷移しているのがわかる。また、地上観測点の IMAGE LYR 上空に位置するレンジ 37 付近でもエコーは見られたが、周期的な変動を見せたレンジは LYR よりも低緯度側であり、LYR 上空のエコーはほとんど地上反射波であった。

スペクトル幅の観測結果 図 3.11 の下段においてカラーバーは 0m/s から 350m/s を 25 分割してスペクトル幅を表している。このスペクトル幅で特徴的なのは、Iceland East レーダーで見られたのと同様に、エコーパワーとドップラー速度が周期的な変動を見せているレンジでは、高い値を示していることがあげられる。以上

のことから、Finland レーダーでは Iceland East レーダーで観測された明瞭な脈動を見ることはできなかったが、Iceland East レーダーが観測したエコー領域とは違う領域で、長周期の脈動を観測していることが判明した。

3.1.2.2.2 脈動現象の周波数

図 3.12 は Finland レーダーで観測されたドップラー速度の RTI プロットであり、Iceland East レーダーで明瞭

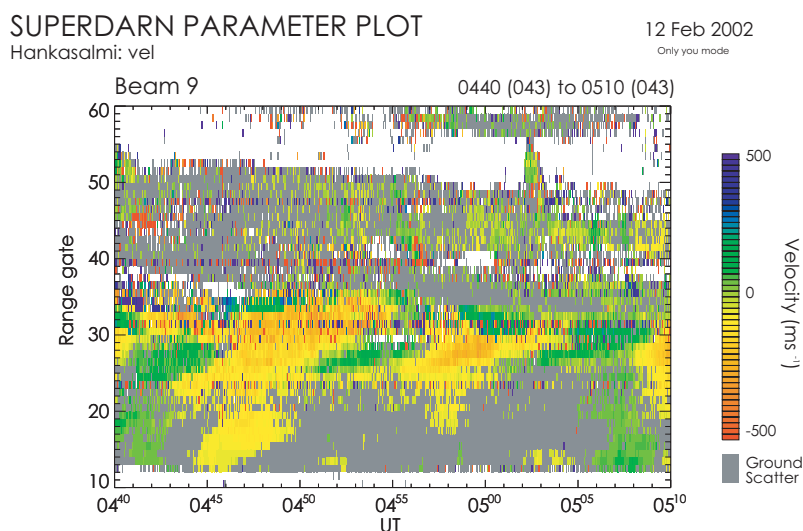


図 3.12: Finland HF レーダーの特別観測ビーム 9 におけるドップラー速度の RTI プロット。時間幅を 0440UT ~ 0510UT で表しており、縦軸はレンジ 10 からレンジ 60 までを表している。

な脈動成分が観測された 0440UT から 0510UT までを示したものである。より細かく変動を見るためにカラーバーは -500m/s から 500m/s を 50 等分割で表しており、縦軸もレンジ 10 から 60 までとなっている。この図からおよそレンジ 23 ~ 32 に長周期の脈動があり、それが低緯度から高緯度へ伝播していくのがわかる。

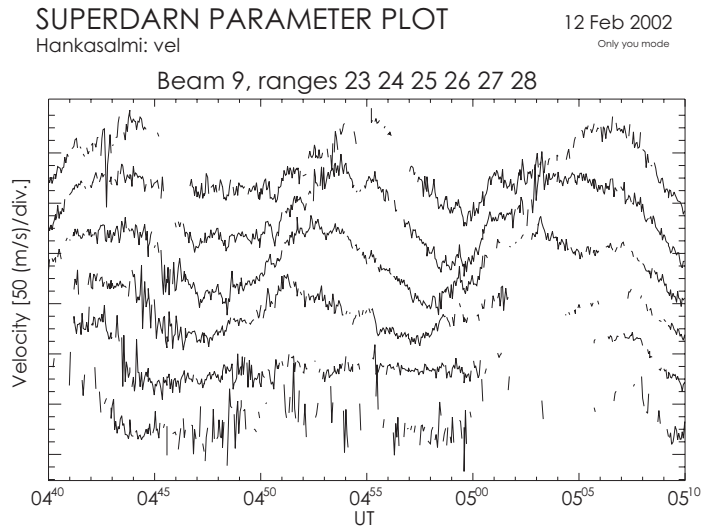


図 3.13: Finland HF レーダーの特別観測ビーム 9 におけるドップラー速度の時系列プロット。時間幅は 0440UT から 0510UT となっており、下から順にレンジ 3 からレンジ 28 までを表している。

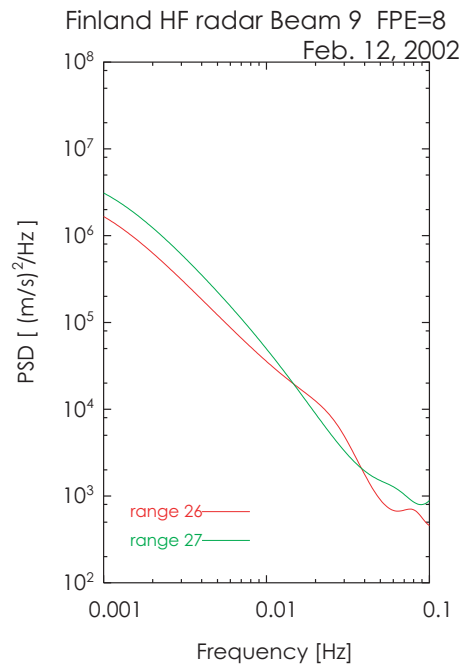


図 3.14: 次数 8 の Burg 法によって求められた Finland HF レーダーの特別観測ビーム 9 におけるレンジ 24 からレンジ 27 までのドップラー速度のパワースペクトル。時間幅は 0455UT から 0502UT となっている。

図 3.13 はレンジ 23～29 の同時帯における時系列データを示したものだが、ここでも長周期の脈動を確認することができる。また細かい変動も数多く見られたが、Iceland East で見られたような明瞭な脈動は得られていなかった。そのため、この細かい変動が Iceland East レーダーで観測したような脈動のスペクトルピークを

持っているのかを調べるために、Iceland East レーダーと同様に、Burg 法を用いて周波数スペクトルを求めた。図 3.14 は、次数 8 の Burg を用いて、0455UT ~ 0502UT までのレンジ 26、27 について周波数スペクトルを表したものである。Iceland East レーダーで観測された $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ の周波数帯を含む全ての周波数において、明瞭なスペクトルピークは見られない。このため、Iceland East レーダーで観測された電離圏電場脈動が Finland レーダーでは観測されていないことがわかった。

3.1.2.2.3 グローバルスキャン観測

図 3.15 は Finland レーダーで得られた 0454UT から 0503UT までの 1 スキャン毎のグローバルスキャンのデータを表示したものである。地理緯度、経度は図 3.10 と同じである。また、左上の赤い線で囲まれたグローバル

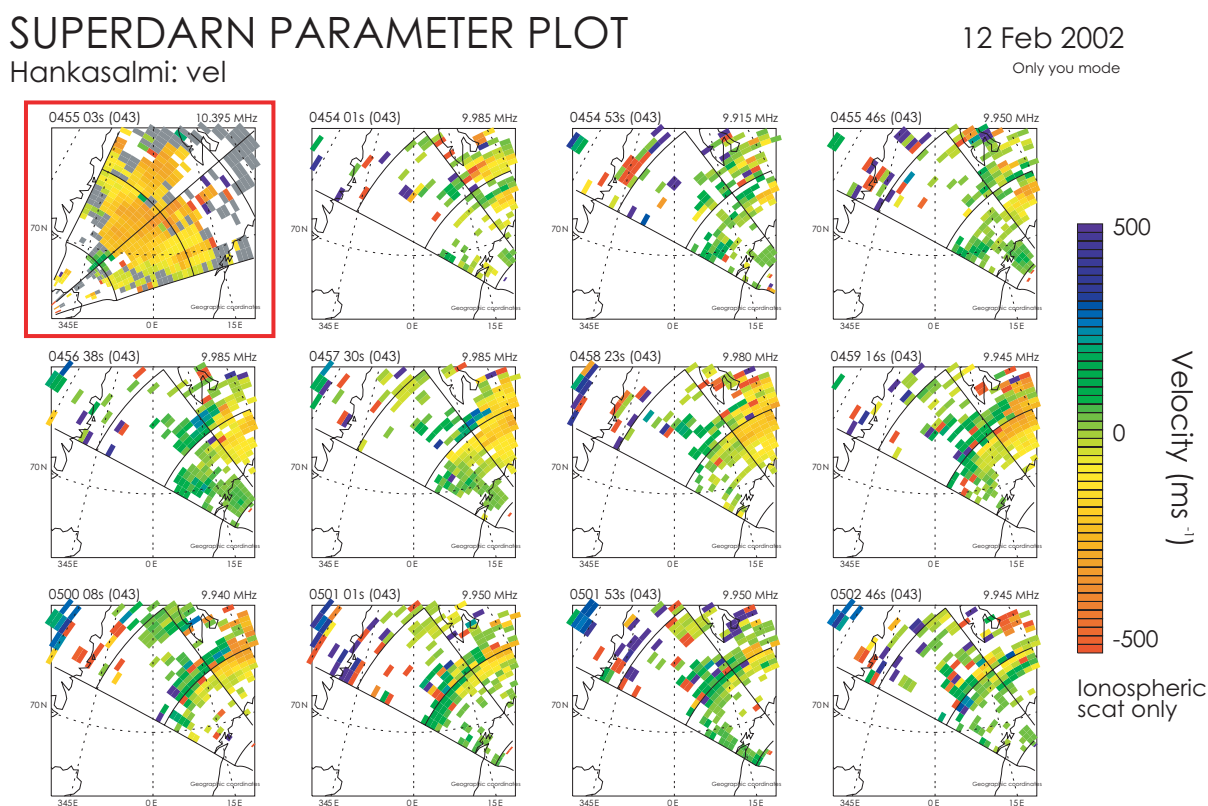


図 3.15: Finland HF レーダーのステレオモードによって得られた、0454:01UT から 0502:46UT までのグローバルスキャンデータプロット。一番左上の図は、比較のために Iceland East HF レーダーの 0455:03UT におけるグローバルスキャンデータプロットである。

スキャンのデータは 0455UT における Iceland East レーダーのコモンモード観測によって得られたものである。この図から、Finland レーダーのエコー領域は Iceland East レーダーのそれとは異なり、Iceland East レーダーで観測されたエコー領域について Finland レーダーではほとんどエコーが得られていないことがわかった。

3.1.2.2.4 対流速度分布

SuperDARN では、グローバルな電離圏対流の観測から電離圏における対流速度分布 [Shepherd and Ruohoniemi, 2000] を 10 分ごとに作成している。図 3.16 は、0450UT から 0500UT における北半球での対流速度分布である。青丸で示す領域は Iceland East レーダーによって Pc3-4 脈動が観測されたエコー領域である。この図から、

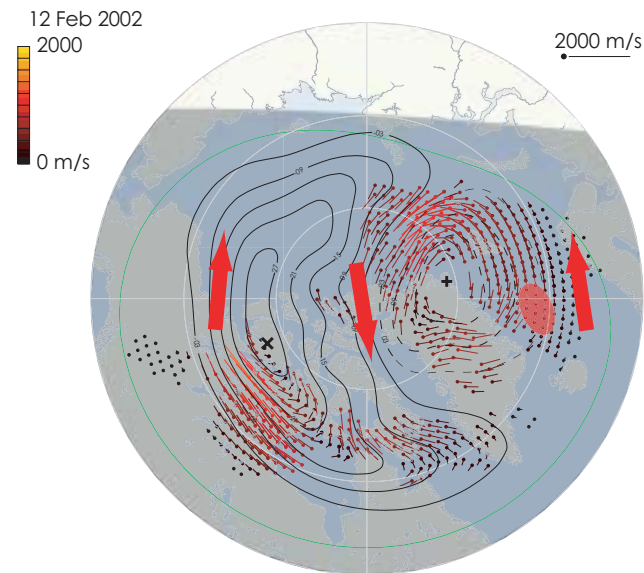


図 3.16: SuperDARN による北半球極域地方における対流速度分布 [Shepherd and Ruohoniemi, 2000]。

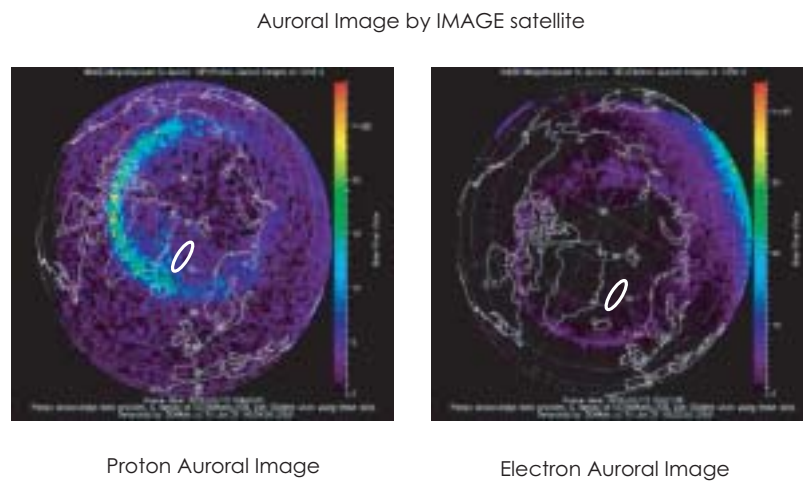


図 3.17: IMAGE 衛星によって観測された、2002 年 2 月 12 日 0501UT 付近での、北半球極域地方のオーロライメージ。左側はプロトンオーロラ、右側はエレクトロンオーロラを示している。

Pc3-4 脈動が観測されたエコー領域は電離圏対流における地球磁気圏尾部方向からのリターンフローの領域に対応していることがわかった。これは、観測された Pc3-4 脈動が磁気圏内、すなわち閉磁力線領域内で起こっ

た現象であることを示唆している。さらに、図 3.17 は IMAGE 衛星によって観測された 0500UT 付近における電子およびプロトンのオーロラ画像である。白丸で示す領域が Iceland East レーダーによって Pc3-4 脈動が観測されたエコー領域である。この図から、Iceland East レーダーにより観測された Pc3-4 脈動はオーロラオーバルよりも高緯度側での現象であることがわかった。

3.1.2.3 SENSU Syowa East レーダー

図 3.18 は、Iceland East レーダーと磁気共役の関係にある Syowa East レーダーの特別観測ビーム 7 で観測したエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅の RTI プロットである。この図から、Iceland East レーダー

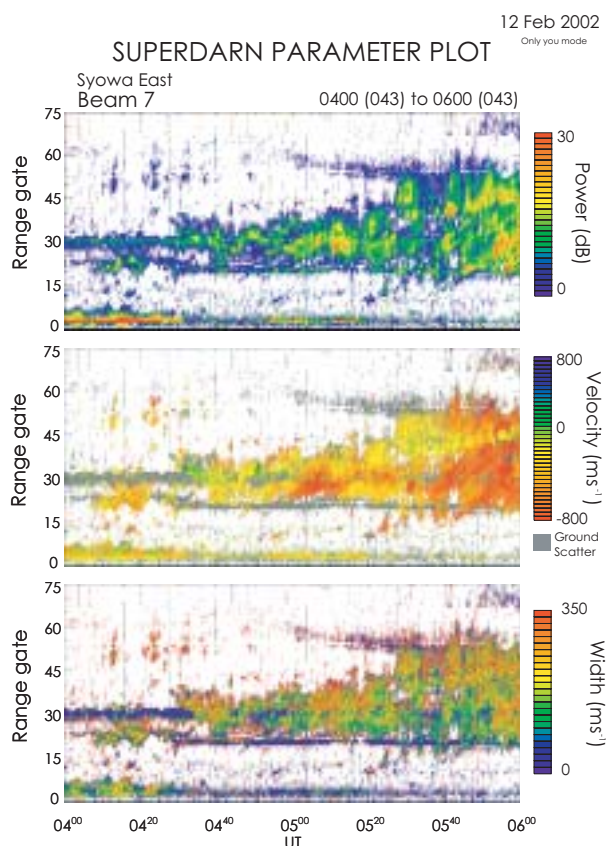


図 3.18: 2002 年 2 月 12 日 0400UT ~ 600UT に得られた Syowa East HF レーダーの特別観測ビーム 7 におけるエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅の RTI プロット。

で Pc3-4 脈動が観測されたレンジ 20 からレンジ 27 の磁気共役点である、レンジ 22 からレンジ 25 でエコーパワー、ドップラー速度ともにエコーが見られスペクトル幅の増加が見られたが、周期的な速度およびパワーの明瞭な変動を見ることはできなかった。

図 3.19 は Iceland East レーダーで Pc3-4 脈動が観測された 0440UT から 0510UT までの Syowa East レーダーでの時系列データである。この図からも周期的な変動は確認されず、バースト的な変動が目立つ。

また図 3.20 は、次数 8 の Burg を用いて算出したレンジ 24 からレンジ 27 の周波数スペクトルである。この

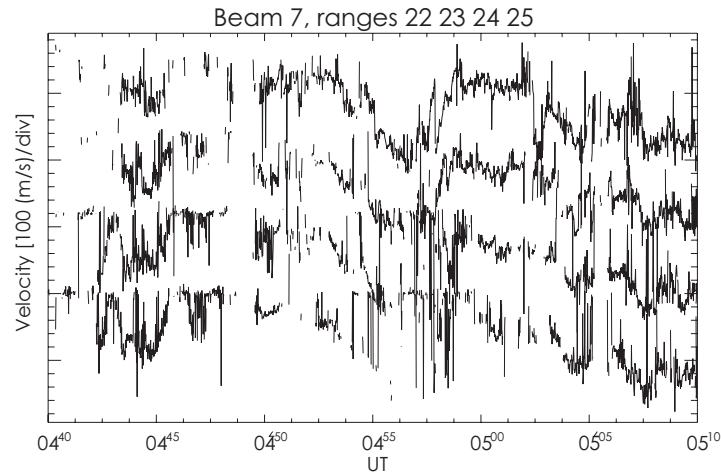


図 3.19: Syowa East HF レーダーの特別観測ビーム 9 におけるドップラー速度の時系列プロット。時間幅は 0440UT から 0510UT となっており、下から順にレンジ 22 からレンジ 25 までを表している。

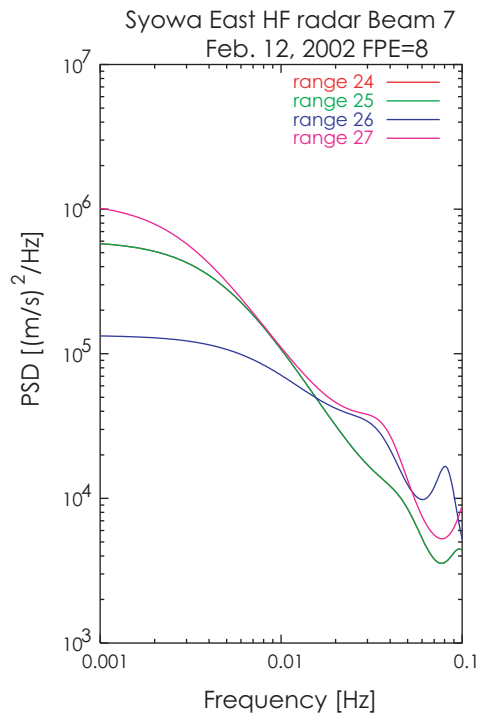


図 3.20: 次数 8 の Burg 法によって求められた Finland HF レーダーの特別観測ビーム 7 におけるレンジ 24 からレンジ 27 までのドップラー速度のパワースペクトル。時間幅は 0455UT から 0502UT となっている。

図からも明瞭なスペクトルピークを認めることはできなかった。

以上の結果から、Iceland East レーダーと磁気共役の関係にある Syowa East レーダーでは、Iceland East レーダーで観測された $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ にスペクトルピークを持つ Pc3-4 脈動は観測されていないことが判明した。

3.1.2.4 Kerguelen レーダー

次に、同じく磁気共役の関係にある Kerguelen レーダーについて見ていく。図 3.21 は特別観測ビーム 6 について、0400UT から 0600UT までのエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅を示したものである。この

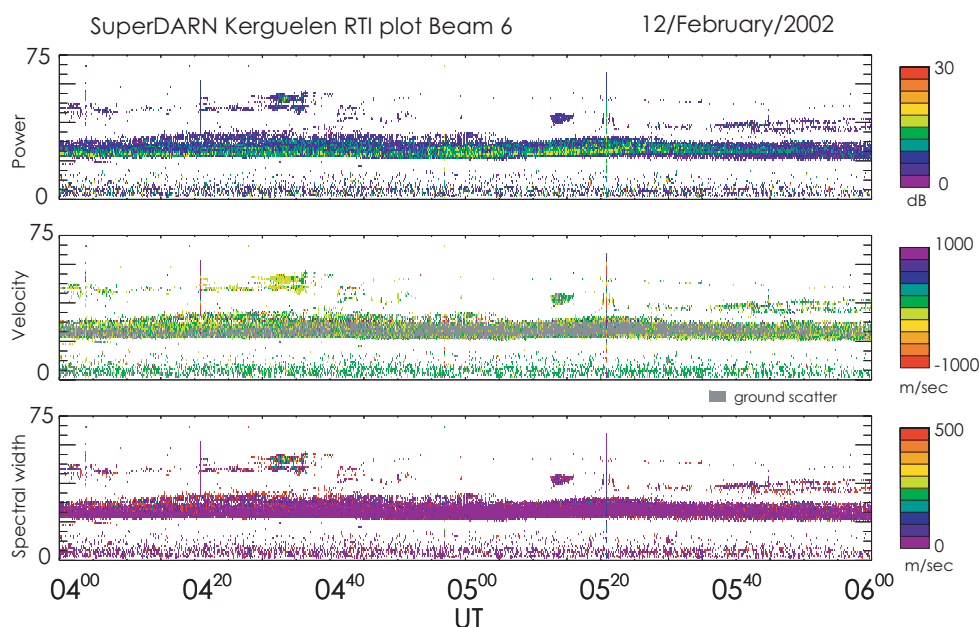


図 3.21: 2002 年 2 月 12 日 0400UT から 0600UT に得られた Kerguelen HF レーダーの特別観測ビーム 6 におけるエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅の RTI プロット。

図から、これまでの 3 つのレーダーで見られたような、エコーパワーやスペクトル幅の増加は見られず、ドップラー速度においても、ほとんどが地上反射波となっており、Kerguelen レーダーでは有用なエコーが観測されなかったことがわかった。

3.1.3 GEOTAIL 衛星

図 3.22 は、2002 年 2 月 12 日 0400UT から 0600UT の GEOTAIL 衛星の GSM 座標系 XY 平面における軌道と、Tyganenko89 モデルによる北半球の地上 100km への軌道投影点を示したものである。Iceland East レーダーで明瞭な Pc3-4 脈動が観測された 0440UT から 0510UT に、GEOTAIL 衛星は Tyganenko89 モデルでは計算できない領域、すなわちシース領域に位置していた。しかしながら、0800UT からの軌道投影点から、0500UT で

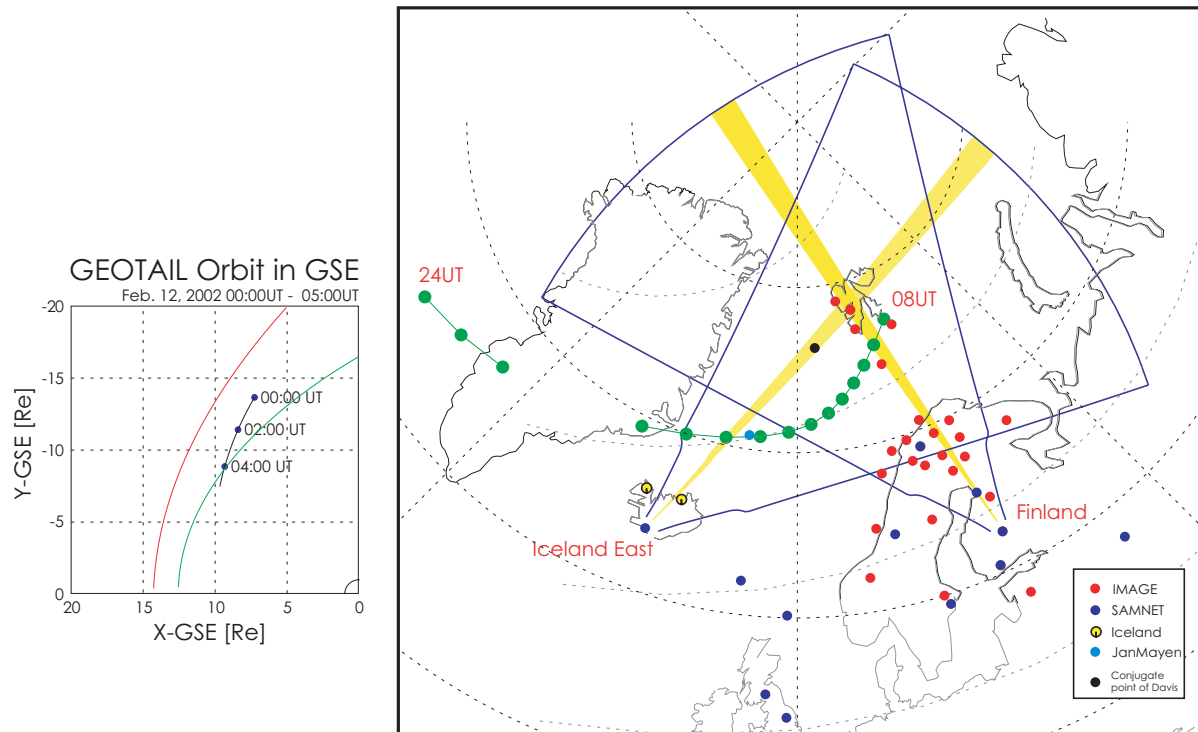


図 3.22: 2002 年 2 月 12 日 0000UT から 0500UT までの GSM 座標系 X-Y 平面における GEOTAIL 衛星の軌道図 (左) と、GEOTAIL 衛星の軌道投影点および CUTLASS HF レーダーの観測視野 (右)。黄色で描かれたビームはとく罰観測ビームを表している。

の位置は、Iceland East レーダーで明瞭な Pc3-4 脈動を観測したエコー領域から離れていることが予想される。また GSM 座標系の軌道図から、およそ 0400UT ~ 0600UT には磁気圏境界面近傍に位置しているものと推定される。

図 3.23 は 0430UT から 0530UT までの GEOTAIL 衛星による磁場データを GSM 座標系で示したものである。この図から、 B_z の反転が頻繁に起きていることや磁場強度などから GEOTAIL 衛星がシース領域に位置していることがわかる。ここで、Iceland East レーダーによって Pc3-4 脈動が観測されはじめた 0440UT 付近に磁場の Z 成分の急激な南向きへの変化が見られる。また、Iceland East レーダーで脈動が観測されなくなる 0505UT 付近まで磁場が南向きであることから、この南向きの磁場が電離圏に対して何らかの作用を及ぼした結果、電離圏で脈動が観測されたと考えられる。

これらの磁場データからは、シース領域の特徴である激しい磁場変動のため、明瞭な脈動成分をみることはできない。そのため、周波数解析により脈動成分の検出を試みた。図 3.24 は、次数 20 の Burg 法で求めた、0440UT から 0510UT の磁場 3 成分の周波数スペクトルである。様々なスペクトルピークが存在しているが、Iceland East レーダーで観測されたような $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ に明瞭なスペクトルピークを持つ脈動は観測されていない。

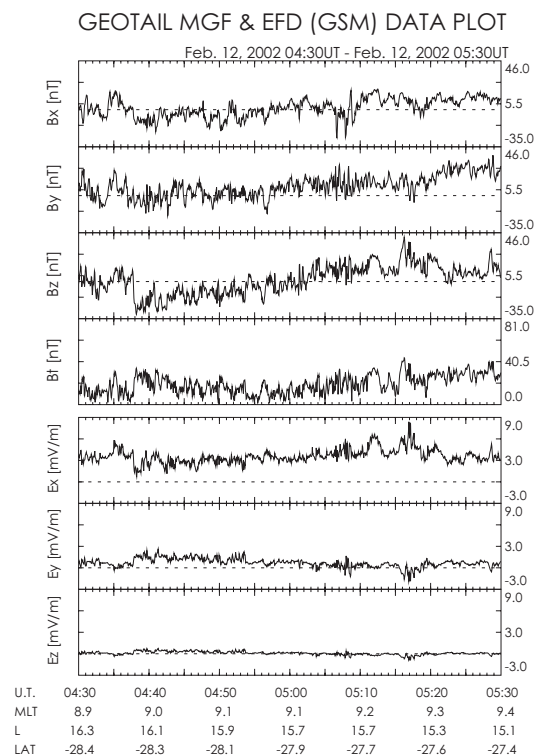


図 3.23: 2002 年 2 月 12 日 0430UT から 0530UT に GEOTAIL 衛星によって観測された GSM 座標系における磁場と電場の時系列プロット。上が磁場 (B_x, B_y, B_z, B_t)、下が電場 (E_x, E_y, E_z) を表している。

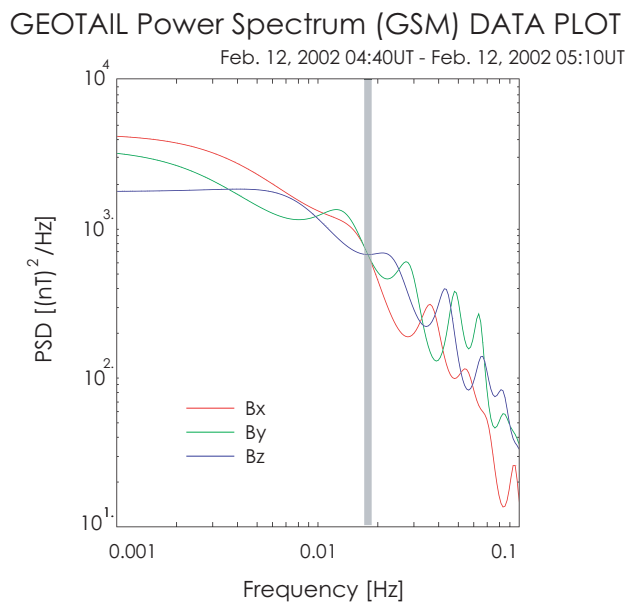


図 3.24: 次数 20 の Burg 法で求められた、0440UT から 0510UT に GEOTAIL 衛星で観測された磁場のパワースペクトル。

3.1.4 地上磁場

ここでは、Iceland East レーダーによって Pc3-4 脈動が観測された 0440UT から 0510UT を中心に磁場データの解析を行った。Iceland East レーダーは視野がほぼ磁気経度方向を向いているため、観測された明瞭な電場脈動が起こす誘導磁場変動は、主に磁気緯度方向（X 成分、もしくは H 成分）に現れると考えられる。各観測点の位置関係は図 3.22 に示したとおりである。

3.1.4.1 IMAGE 磁場観測チェーン

図 3.25 は IMAGE で観測された X 成分、Y 成分の磁場変動を表したものであり、上から磁気緯度の高い観測点順に示している。縦軸は磁場強度、横軸は時間軸を示しており、0430UT ~ 0530UT の時間帯を表している。

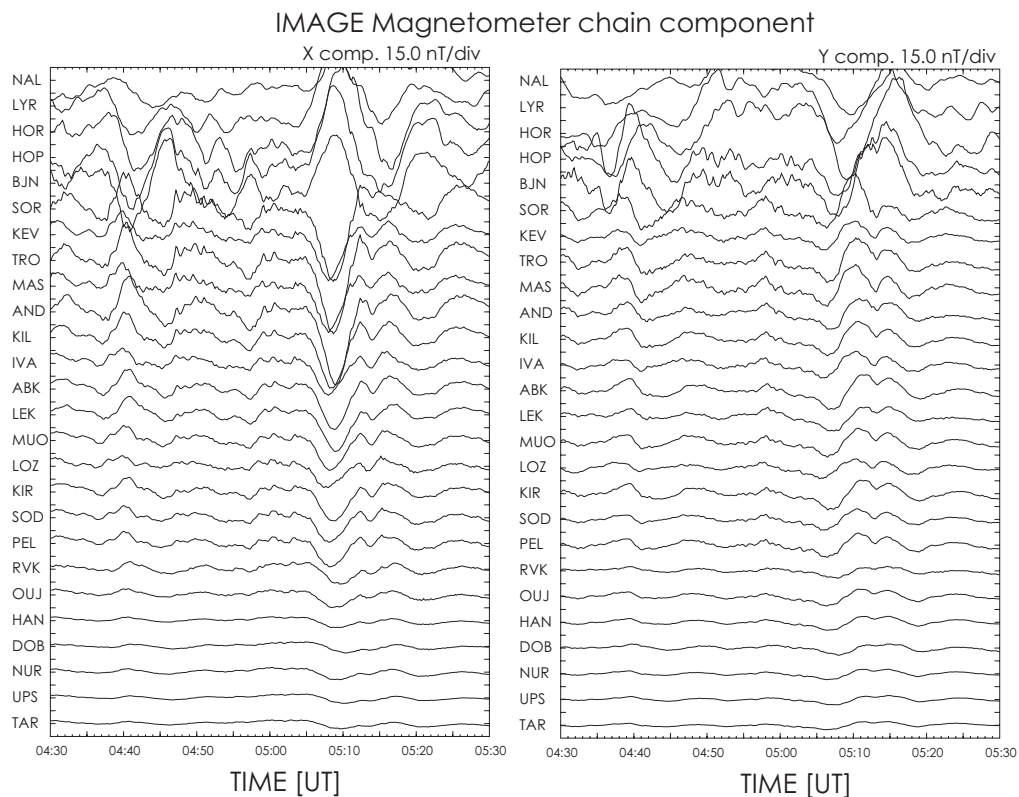


図 3.25: 2002 年 2 月 12 日 0430UT から 0530UT に、IMAGE 磁場観測チェーンによって得られた地磁気 X,Y 成分の時系列プロット。上から順に磁気緯度の高い観測点から低い観測点を表している。縦軸は磁場強度、横軸は時間を表している。

この図から Bear Island (BJN) と Soroya (SOR) で位相が反転しているのがわかる。これは BJN と SOR の間を境にして電離圏で逆向きの電流が流れていることを示しており、これは、Iceland East レーダーで確認された ビーム 14 付近の速度の境界とほぼ一致する。個々の磁場変動を見ていくと、1 分程度の短周期の脈動を高緯度側で見ることができる。そこで、この周期的な変動が Iceland East レーダーで観測された電場脈動による変動

なのかを確認するために、Burg 法を用いて周波数スペクトルを求めた。

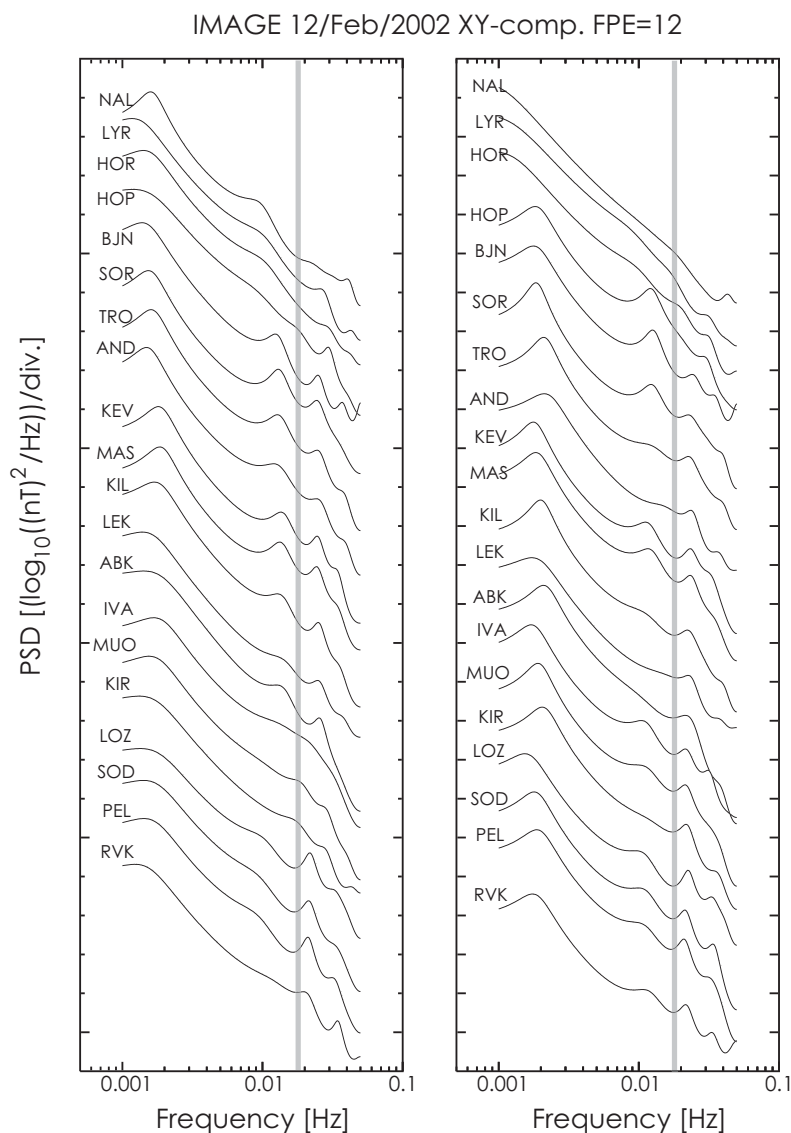


図 3.26: 次数 10 の Burg 法によって得られた IMAGE 磁場観測チェーンの各観測点における磁場のパワースペクトル。左が X 成分、右が Y 成分となっている。時間幅は 0440UT から 0510UT までとなっている。灰色の帯は Iceland East HF レーダーで得られたスペクトルピークの周波数である $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ を表している。

図 3.26 は次数 10 の Burg 法で算出した 0440UT ~ 0510UT における周波数スペクトルである。高緯度から低緯度までの観測点を上から順に並べてある。ここで、灰色の帯は Iceland East レーダーで見ることのできた $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ の周波数帯を示している。この図から、Leknes (LEK) から BJN の X 成分におよそ 12mHz の明瞭なスペクトルピークが存在することがわかった。また、Y 成分でも低緯度から高緯度までおよそ 12mHz 付近のスペクトルピークが見られる。さらに、低緯度から高緯度までの観測点で、 20mHz から 25mHz 付近のスペクトルピークを両成分で見ることができる。しかしながら、どの観測点においても Iceland East レーダー

で観測した脈動のスペクトルピーク ($16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$) において明瞭なピークは見られなかった。

以上のことから、IMAGE チェーンによる磁場観測では、電離圏において観測された電場脈動と同じ周波数帯の脈動は観測されておらず、 12mHz 付近と $20\text{mHz} \sim 25\text{mHz}$ にスペクトルピークを持つ脈動を観測していたことがわかった。

3.1.4.2 SAMNET 磁場観測チェーン

図 3.27 は SAMNET で観測された H 成分、D 成分の磁場変動を上から磁気緯度の高い観測点順に示したものである。縦軸は磁場強度、横軸は時間を示しており、0430UT ~ 0530UT の時間帯を表している。両成分におい

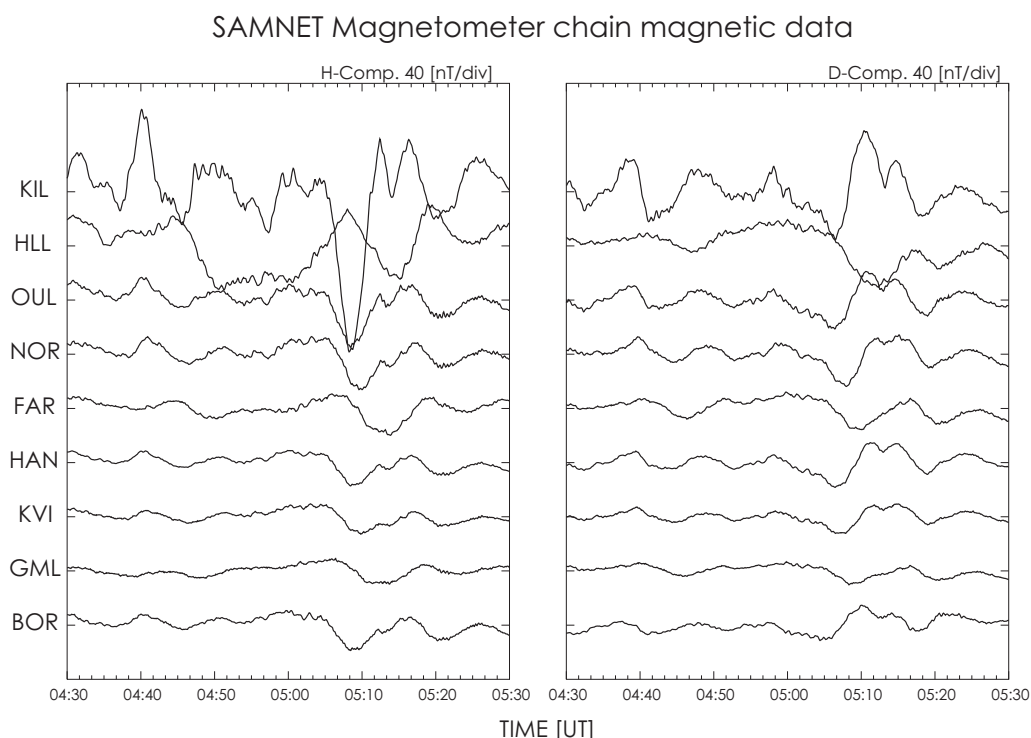


図 3.27: 2002 年 2 月 12 日 0430UT から 0530UT に SAMNET 磁場観測チェーンによって得られた地磁気 H,D 成分の時系列プロット。上から順に磁気緯度の高い観測点から低い観測点を表している。縦軸は磁場強度、横軸は時間を表している。

て Hella (HLL) の位相だけが逆になっているのがわかる。これは、スカンジナビア半島とアイスランドの間を境にして、電離圏で逆向きの電流が流れていることを示している。IMAGE と同様に、高緯度側の観測点では 1 分程度の周期的な変動が見える。そこで、IMAGE のデータと同様に Burg 法によって周波数スペクトルを算出した。

図 3.28 は、次数 15 の Burg 法を用いて算出した、各ステーションの 0440UT ~ 0510UT における磁場の周波数スペクトルである。灰色の帯で示されているのは Iceland East レーダーで見ることのできた $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ のスペクトルピークである。この図の H 成分において、Kilpisjarvi (KIL)、Faroes (FAR)、Borok (BOR) で

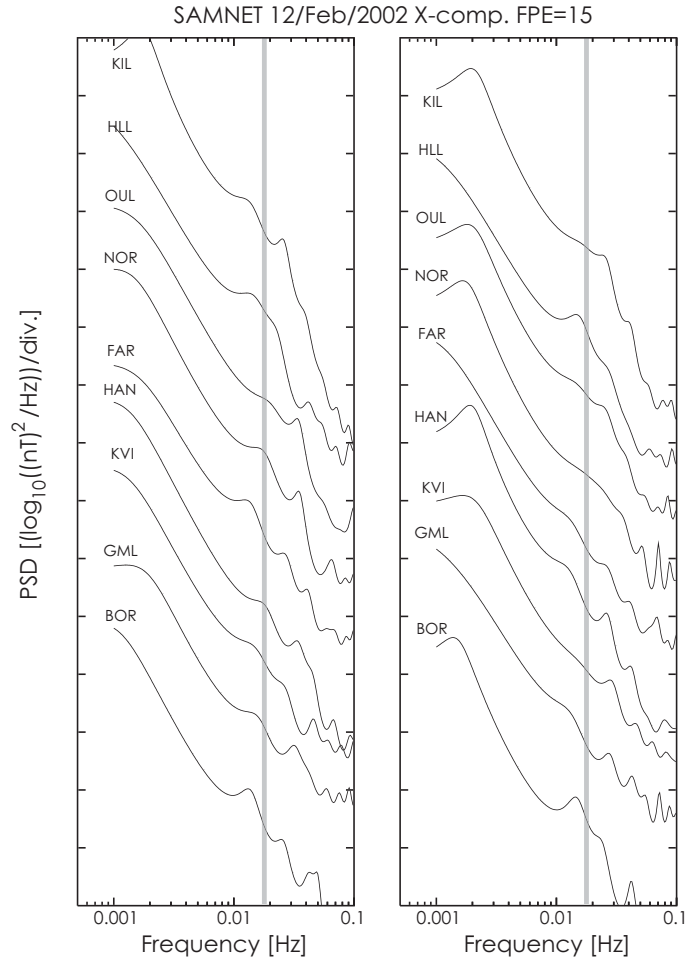


図 3.28: 次数 15 の Burg 法によって得られた SAMET 磁場観測チェーンの各観測点における磁場のパワースペクトル。左が H 成分、右が D 成分となっている。時間幅は 0440UT から 0510UT までとなっている。灰色の帯は Iceland East HF レーダーで得られたスペクトルピークの周波数である $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ を表している。

は Iceland East レーダーで得られた電離圏の電場脈動の周波数とは違う $12\text{mHz} \sim 13\text{mHz}$ のスペクトルピークを見ることができる。また、ほかの観測点では band-limited なパワーを見ることはできるが、スペクトルピークとして認められるものではなかった。一方、D 成分においても HLL、Hankasalmi (HAN)、BOR で電離圏電場脈動の周波数とは異なる 14mHz 付近のスペクトルピークを見ることができたが、ほかの観測点でははっきりとしたスペクトルピークは確認できなかった。

以上のことから、SAMNET による磁場観測では、電離圏において観測された電場脈動と同じ周波数の脈動は観測されておらず、 $12\text{mHz} \sim 13\text{mHz}$ にスペクトルピークを持つ脈動をいくつかの観測点で観測していたことがわかった。

3.1.4.3 Jan Mayen

Jan Mayen は磁気緯度 69.61° 、磁気経度 83.05° に位置するため、Iceland East レーダーのビーム 8 レンジ 17 の真下に位置し、 $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ の Pc3-4 脈動が見られたエコー領域の直下に近い。そのため Iceland East レーダーによって観測された Pc3-4 脈動と同じスペクトルピークをもった明瞭な磁場変動が得られていると期待される。

図 3.29 は Jan Mayen における H 成分と D 成分の磁場変動を表したものである。縦軸が磁場強度、横軸が時

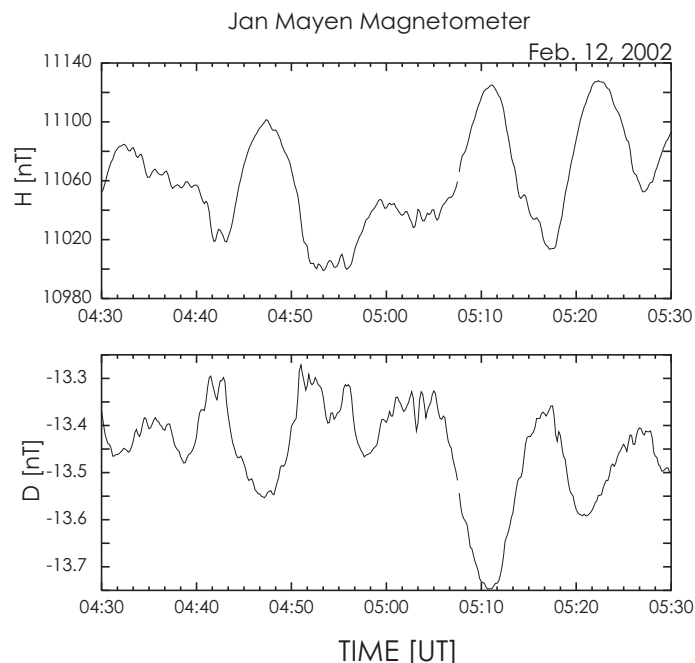


図 3.29: 2002 年 2 月 12 日 0430UT から 0530UT に Jan Mayen 磁場観測点で得られた地磁気 HD 成分の時系列プロット。上が H 成分、下が D 成分を表している。横軸は時間、縦軸は磁場強度を表している。

間となっており、0430UT ~ 0530UT の時間帯を表している。ここで、H 成分と D 成分ではダイナミックレンジが大きく違い、H 成分が D 成分に比べて非常に大きいことに注意してもらいたい。この図から両成分で 10 分程度の周期を持つ長周期の変動と、1 分程度の周期をもつ変動があることがわかる。そこで、Burg 法を用いて周波数スペクトルを計算した。図 3.30 は次数 10 の Burg による磁場の周波数スペクトルである。灰色の帯で示されているのは Iceland East レーダーで見ることのできた $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ のスペクトルピークである。X 成分と Y 成分ではダイナミックレンジの違いが大きいため、Y 成分のパワーを 10^4 倍してあることに注意してもらいたい。X 成分で 1.3mHz と 11mHz の明瞭なスペクトルピークを、Y 成分では 1.4mHz と 12mHz の明瞭なスペクトルピークを見ることができる。この $11\text{mHz} \sim 12\text{mHz}$ のスペクトルピークは IMAGE や SAMNET でも見ることができたスペクトルピークに近い。一方、Iceland East レーダーで観測された Pc3-4 脈動のスペクトルピークである $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ には明瞭なスペクトルピークは見られない。

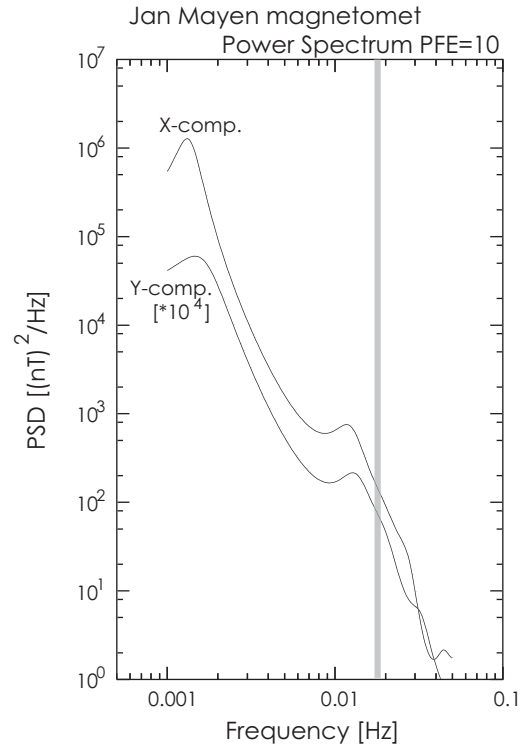


図 3.30: 次数 10 の Burg 法によって求められた Jan Mayen 磁場観測点における磁場のパワースペクトル。時間幅は 0440UT から 0510UT までとなっている。灰色の帯は Iceland East HF レーダーで得られたスペクトルピークの周波数である 16.4mHz ~ 19.7mHz を表している。

このことから、Iceland East レーダーで観測された電離圏電場脈動のエコー領域に近い Jan Mayen でも、IMAGE や SAMNET と同様に、電離圏の電場脈動と同じ周波数の脈動は観測されておらず、11mHz ~ 12mHz に周波数にスペクトルピークを持つ脈動を観測していたことがわかった。

3.1.4.4 Iceland

Iceland における磁場観測は 2002 年 1 月から 4 月の期間、観測機器の故障により H 成分のみの観測となっている。また、2 月 12 日における観測では、Husafell、Aedey での磁場は観測されていない。

図 3.31 は Iceland の Tjornes における H 成分の磁場変動を表したものである。縦軸は磁場強度、横軸は時間で 0430UT ~ 0530UT の時間帯を表している。サンプリング時間は 3 秒で再サンプリングしている。この図から、約 10 分程度と約 1 分程度の周期をもつ変動が見られる。そこで、Burg 法を用いて周波数スペクトルを算出した。図 3.32 は次数 20 の Burg 法による 0440UT ~ 0510UT の周波数スペクトルを表したものである。灰色の帯で示されているのは Iceland East レーダーで見ることのできた 16.4mHz ~ 19.7mHz のスペクトルピークである。この図から、Iceland East レーダーで得られた 16.4mHz ~ 19.7mHz とは違う、15.7mHz のスペクトルピークを見ることができる。

このことから、Iceland では、他の磁場観測点と同じように、Iceland East レーダーで観測された電場脈動の

周波数とは違う 15.7mHz の脈動を Tjornes で観測していたことがわかった。

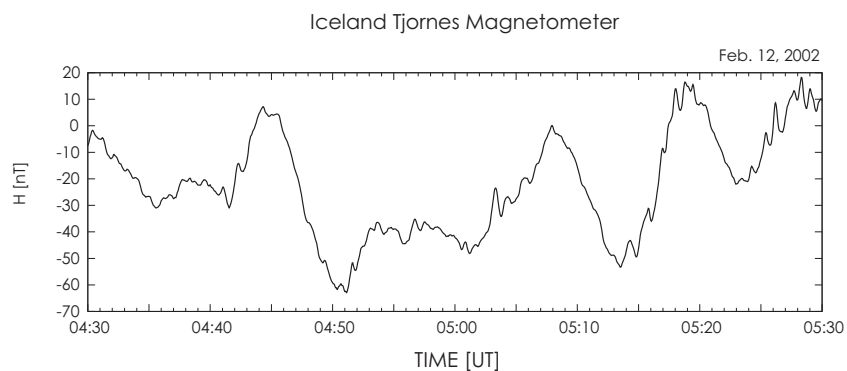


図 3.31: 2002 年 2 月 12 日 0430UT から 0530UT に Iceland Tjornes 磁場観測点で得られた磁場 H 成分の時系列プロット。横軸は時間、縦軸は磁場強度となっている。

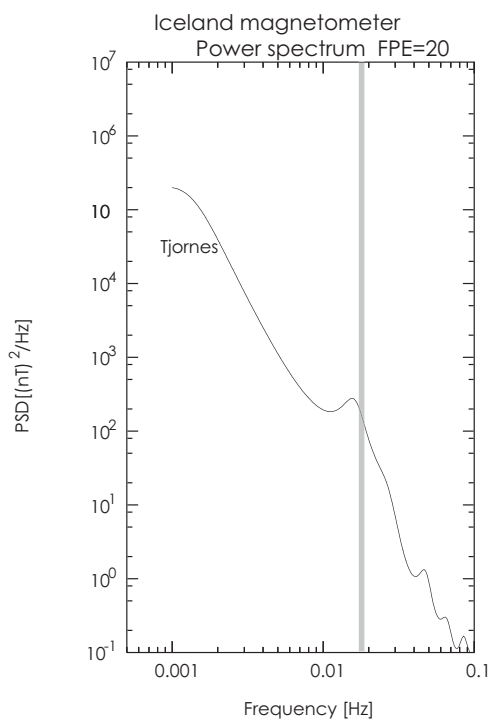


図 3.32: 次数 20 の Burg 法によって得られた Iceland Tjornes 磁場観測点における磁場のパワースペクトル。時間幅は 0440UT から 0510UT までとなっている。

3.1.4.5 Davis

南極 Davis 基地は Iceland East レーダーで Pc3-4 脈動が観測されたエコー領域付近と磁気共役の関係にある。

図 3.33 は Davis 基地のインダクション磁力計で観測された磁場の H 成分、D 成分を表したものである。

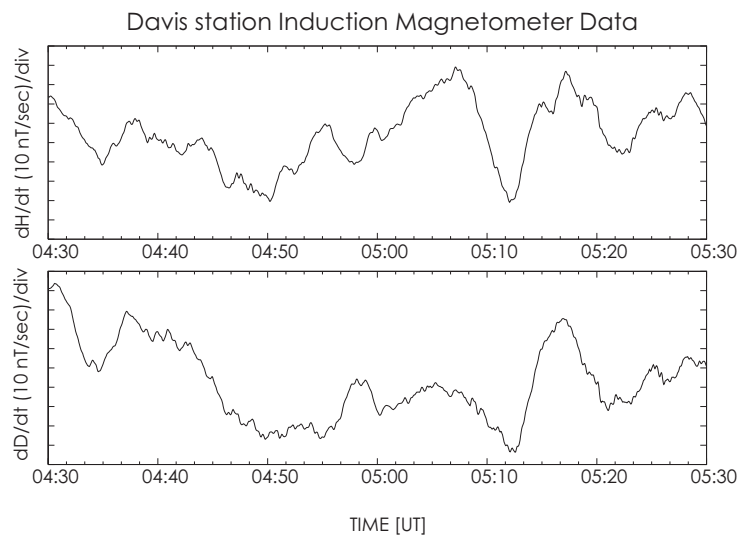


図 3.33: 2002 年 2 月 12 日 0430UT から 0530UT に南極 Davis 基地で得られた地磁気 H,D 成分の時系列データ。横軸は時間、縦軸は磁場強度を表している。

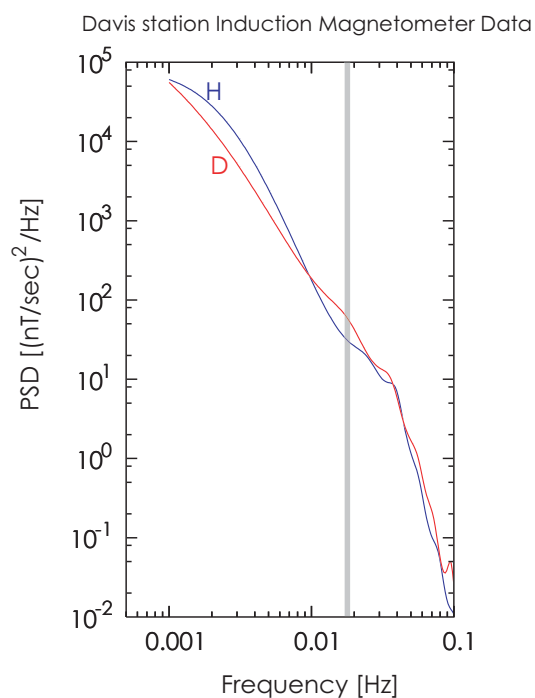


図 3.34: 次数 20 の Burg 法によって求められた、南極 Davis 基地における磁場のパワースペクトル。時間幅は 0440UT から 0510UT までとなっている。

縦軸は磁場強度変動分、横軸は時間となっており、0430UT～0530UTを表している。サンプリング時間は3秒で再サンプリングしている。この図から明瞭な周期的変動を見ることはできない。図 3.34 は次数 20 の Burg 法による 0440UT～0510UT の周波数スペクトルを表したものである。灰色の帯で示されているのは Iceland East レーダーで見ることのできた $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ のスペクトルピークである。この図から、 $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ を含む全ての周波数帯において、スペクトルピークを見ることはできない。

このことから、Iceland East レーダーで観測された電離圏電場脈動は、南半球の Davis 基地磁場データでは観測されていなかったことがわかった。

3.1.5 本観測のまとめ

以下に本イベントで得られた解析結果についてまとめる。

- 2002 年 2 月 12 日の GEOTAIL/SuperDARN 同時観測において、0440UT～0510UT に Iceland East レーダーが明瞭な電離圏電場脈動を観測した。
- この脈動は 16.4mHz から 19.7mHz のスペクトルピークを持っていた。
- この脈動は特徴的な位相を持っており、レンジ 25 を境にして東側では東方向へ、西側では西方向への伝播方向を持っていた。また、これらの脈動はそれぞれおよそ -9 と 5 という波数を持っていた。
- Iceland East のステレオモードによるグローバル観測から、ビーム 13 と 14 周辺に速度のシアが見えた。また、特別観測ビームを含む数本のビームでパッチ状のエコーが観測されていた。
- エコーパワーにおいても同周期帯の脈動成分を見ることができた。このエコーパワーの変動はドップラー速度の変動に対して 90° の位相遅れを持っていた。
- Finland レーダーではこのような明瞭な脈動は見られなかったが、Pc5 周波数帯の周期の大きい脈動を見ることができた。
- Finland レーダーのステレオモードにおいて、Iceland East レーダーの特別観測ビームによって観測されたエコー領域からはエコーを観測できていない。
- SuperDARN による対流速度分布から、本イベントの Pc3-4 脈動が地球磁気圏尾部からのリターンフローの領域、すなわち閉磁力線領域で起こっている現象であることがわかった。さらに、IMAGE 衛星によって、オーロラオーバルよりも高緯度側でおきている現象であることもわかった。
- CUTLASS レーダーの磁気共役レーダーである Syowa East と Kerguelen の両レーダーでは、このような脈動を見ることはできなかった。

- GEOTAIL 衛星は、磁気圏シース領域に位置しており、Iceland East レーダーで観測された脈動と同様な脈動現象は観測されていなかったが、Iceland East レーダーで脈動が見え始める 0440UT 付近で磁場の z 成分の急激な変動を観測していた。
- IMAGE 磁場観測チェーンでは、Iceland East レーダーで見ることのできた電離圏脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つ磁場変動は見られなかったが、 12mHz 付近と $20\text{mHz} \sim 25\text{mHz}$ にスペクトルピークを持つような脈動を観測していた。
- SAMNET 磁場観測チェーンでは、電離圏の電場脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つ磁場変動は見られなかったが、いくつかの観測点において IMAGE と同じような $12\text{mHz} \sim 13\text{mHz}$ にスペクトルピークを持つような脈動が観測されていた。
- Iceland East レーダーで電離圏電場脈動が観測されたエコー領域に近い Jan Mayen 磁場観測点では、Iceland East レーダーで見ることのできた電離圏の電場脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つような磁場変動は見られなかったが、 $11\text{mHz} \sim 12\text{mHz}$ のスペクトルピークを持つような脈動を観測していた。
- Iceland に設置された磁場観測点 Tjornes では、Iceland East レーダーで観測された電離圏電場脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つ磁場変動は見られなかったが、 15.7mHz にスペクトルピークを持つような脈動を観測していた。
- エコー領域とほぼ磁気共役の関係にある Davis 南極基地の磁力計では、Iceland East レーダーで観測されたような脈動は観測されていなかった。

3.2 観測イベント2：2003年2月17日

3.2.1 観測概要

2002年2月12日を含む、これまでに行った GEOTAIL/SuperDARN 同時観測では、電離圏の電子密度擾乱が十分でないため SuperDARN で有意な電離圏エコー、すなわち観測データを得られないことが多かった。この解決策として、CUTLASS レーダーの視野内の Tromso (北緯 69.6° 、東経 19.2°) に設置された EISCAT ヒーターによって、電離圏に強制的に電子密度擾乱を起こすことがあげられる。これまで、HF レーダーと EISCAT ヒーターによる観測・実験はいくつか行われているが、ULF 帯の脈動を対象とした観測はあまり行われていない。本観測は、EISCAT ヒーターによる継続的な電離圏加熱と SuperDARN による加熱領域の高時間分解能観測を行うことによって、より明瞭な電離圏エコーを得て、より詳細な Pc3-4 脈動の解析を行おうとするものである。

2002年2月12日に行われた同時観測では、 $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ の明瞭な周期的電場変動を得ることができたが、ステレオモードによるグローバル観測から、特別観測ビーム周辺でも同様な脈動が観測されていることが示唆された。そのため、本観測では、EISCAT ヒーターによって電離圏の電子密度擾乱が上昇すると考えられる Tromso 上空を観測するビーム3本を特別観測ビームとして設定した。さらに、観測領域を加熱領域に絞るため、パルス幅を 100μ 秒 (レンジ距離 15km 相当) にし、第1レンジを Finland レーダー、Iceland East レーダーそれぞれで 480km 、 1470km とした。また、本観測ではステレオモードによるグローバルな観測は行わず、IMAGE Longyearbyen (LYR) 上空を含む3本のビームのみを通常のパルス幅、第1レンジでスキャンすることによって、地上磁場との関連を同時に見ることにした。積分時間はどちらのチャンネルも2秒となっており、一本のビームの時間分解能は6秒となっている。今回、EISCAT ヒーターによる加熱領域を狙った観測では、北半球の CUTLASS レーダーでのみ特別観測を行っている。図 3.35 に本イベントにおける GEOTAIL 衛星の

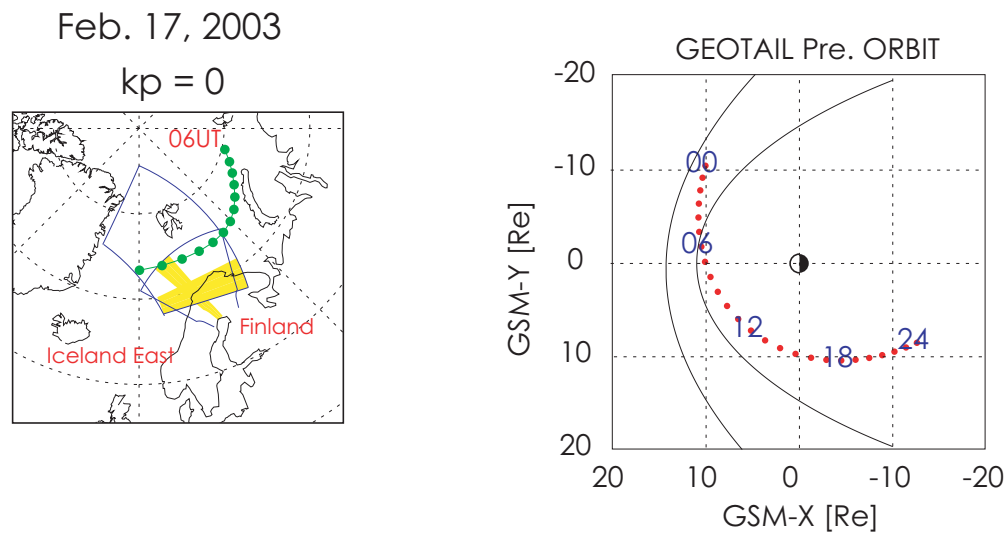


図 3.35: 2003 年 2 月 17 日に行った GEOTAIL/SuperDARN 同時観測における観測外略図。

予測軌道、および北半球における GEOTAIL 衛星の軌道投影点と CUTLASS レーダーの観測視野を示す。黄色で示されたビームは特別観測ビームである。また、本イベントの特別観測モードに関する詳細を表 3.2 に示す。なお EISCAT ヒーターによる電離圏加熱は 1300UT から 1900UT まで継続して行われている。

表 3.2: 2003 年 2 月 17 日の観測モード詳細

ステーション名	Finland	Iceland East
積分時間	2 秒	2 秒
特別観測ビーム チャンネル 1	4、5、6	13、14、15
チャンネル 2	7、8、9	10、11、12
パルス幅 チャンネル 1	100 μ 秒 (15km)	100 μ 秒 (15km)
チャンネル 2	300 μ 秒 (45km)	300 μ 秒 (45km)
第 1 レンジ チャンネル 1	3200 μ 秒 (480km)	9800 μ 秒 (1470km)
チャンネル 2	1200 μ 秒 (180km)	1200 μ 秒 (180km)

図 3.36 は加熱中である 1350UT に得られた Finland レーダー、Iceland East レーダーのチャンネル 1 で得られた 1 スキャン分のエコーを地図上に重ねたものである。この図において、青い丸印は EISCAT ヒーターの設置されている Tromso の位置を示している。両レーダーでエコー領域がずれているが、Finland レーダーでは Tromso 上空の領域からのエコーを観測していることがわかる。また、Iceland East レーダーでも加熱実験開始から継続してエコーが同じ領域から得られているため、これらのエコーは電離圏加熱によって電子密度擾乱が上昇した領域からのものだと考えられる。以下、この加熱領域から得られたデータに関する詳細な解析結果を示す。また、両レーダーのチャンネル 2 については、そのほとんどが地上反射波であったため、今回の解析からははずしている。

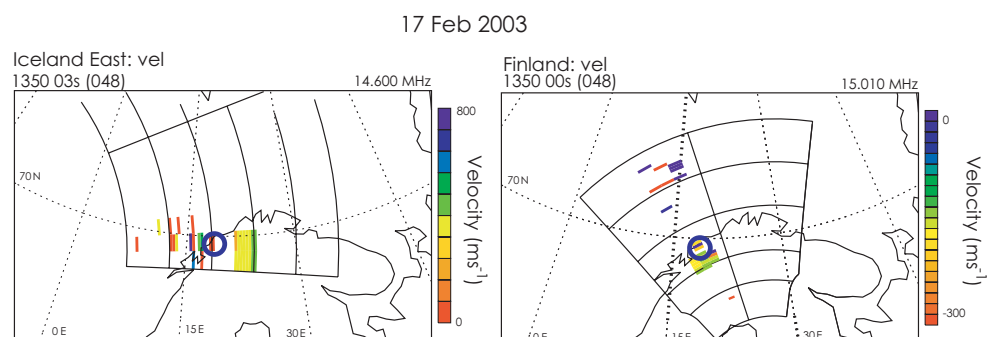


図 3.36: Finland HF レーダー（右）と Iceland East HF レーダー（左）によって観測された EISCAT ヒーターによる加熱領域。青い丸印は EISCAT ヒーターの位置を示している。

3.2.2 SuperDARN

3.2.2.1 CUTLASS Finland レーダー

3.2.2.1.1 エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅

図 3.37,3.38,3.39 はそれぞれ 1300UT ~ 1400UT に Finland レーダーの特別観測ビームであるビーム 4 から 6 で得られた、エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅の RTI プロットである。本観測で期待される電離圏エコーは、図 3.36 に示したように、EISCAT による加熱領域、すなわち Tromso 上空と考えられ、Finland レーダーではビーム 4, 5, 6 のレンジ 30 付近が相当する。図 3.37,3.38,3.39 の縦軸は、各ビームとも加熱領域だと考えられる領域を含むレンジ 25 からレンジ 50 となっている。

エコーパワーの観測結果 図 3.37 においてカラーバーは 0dB から 30dB までを 30 等分割してエコーパワーを表している。ビーム 4, 5 において電離圏加熱が始まった 1300UT から継続的にエコーがあり、さらに 1330UT からエコー強度が強くなっているのがわかる。また、ビーム 6 ではほとんどエコーが得られていないことから、

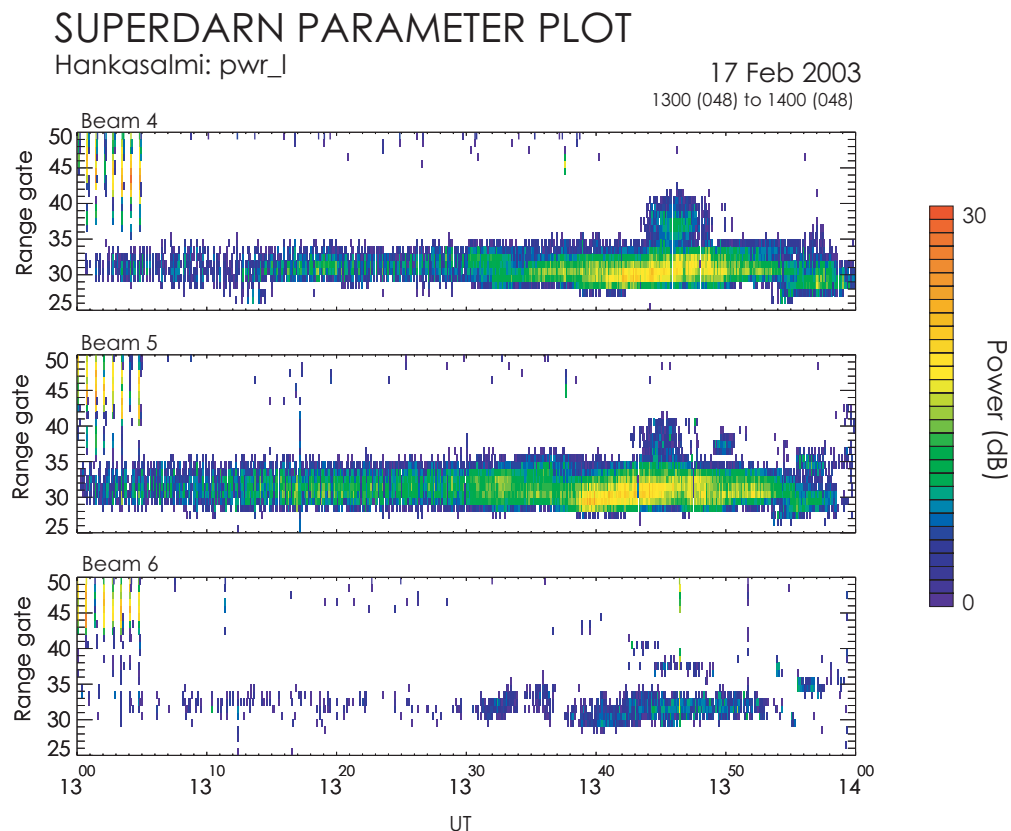


図 3.37: 2003 年 2 月 17 日 1300UT ~ 1400TU に Finland HF レーダーの特別観測ビームで得られたエコーパワーの RTI プロット。上から順にビーム 4、ビーム 5、ビーム 6 を表している。横軸は時間で 1300UT から 1400UT までの時間帯を表している。縦軸はレンジを表しており、レンジ 25 からレンジ 50 までとなっている。

加熱領域からはずれていると考えられる。

ドップラー速度の観測結果 図 3.38 においてカラーバーは -300m/s から 300m/s を 50 等分割して速度を表している。ビーム 4、5 において、エコーパワーの上昇が見られた 1330UT 付近から、レンジ 30~35 付近で明瞭な周期的変動が見られる。この変動はイベント 1 と比較すると振幅の小さい変動であるが、加熱領域であると考えられるレンジ 29~34 付近でおよそ 1 時間近くに渡り見る事ができる。また、この周期的変動はビーム 6 でも少ないながら見る事ができる。

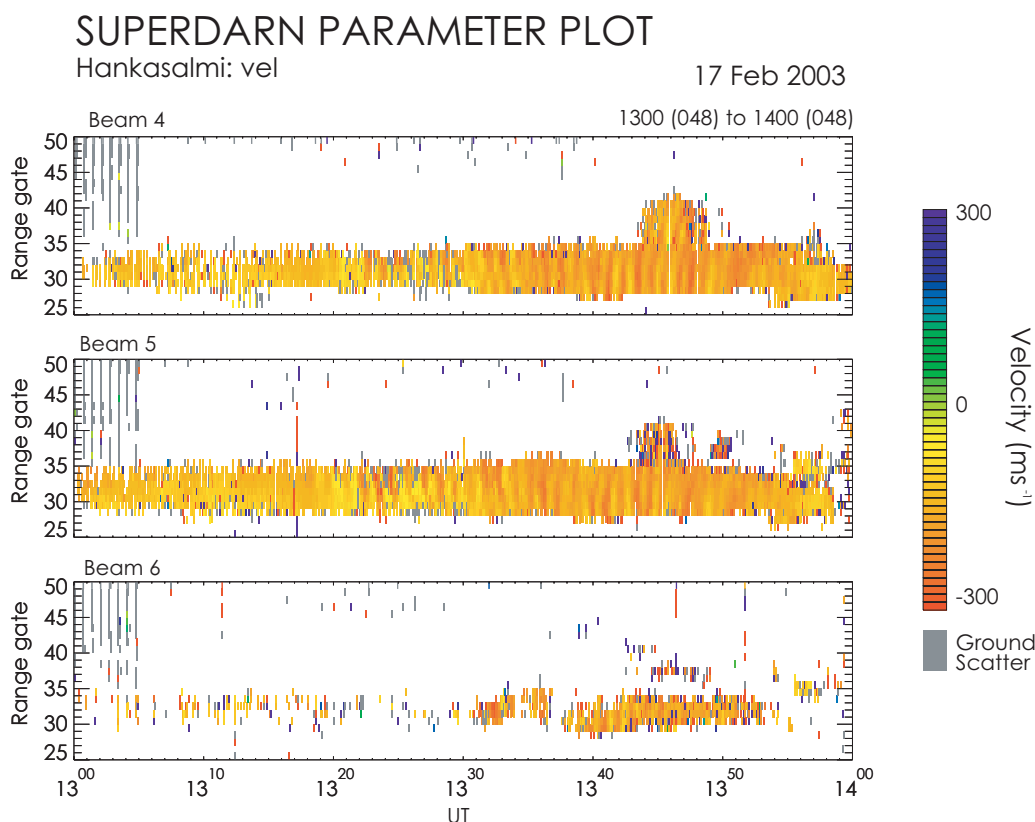


図 3.38: 2003 年 2 月 17 日 1300UT~1400TU に Finland HF レーダーの特別観測ビームで得られたドップラー速度の RTI プロット。

スペクトル幅の観測結果 図 3.39 においてカラーバーは 0m/s から 200m/s までを 20 等分割してスペクトル幅を表している。エコーパワーの上昇が見えた 1330UT 付近で高いスペクトル幅が観測されているが、イベント 1 に比べ全体的に低い値となっている。これらの 3 つの観測値から 1320UT 付近から 1400UT に観測されたエコーは、EISCAT ヒーターの加熱による電離圏電子密度擾乱の上昇によって照らし出された電離圏電場脈動を観測したものであると考えられるため、この時間帯におけるドップラー速度変動の詳細な解析を行う。

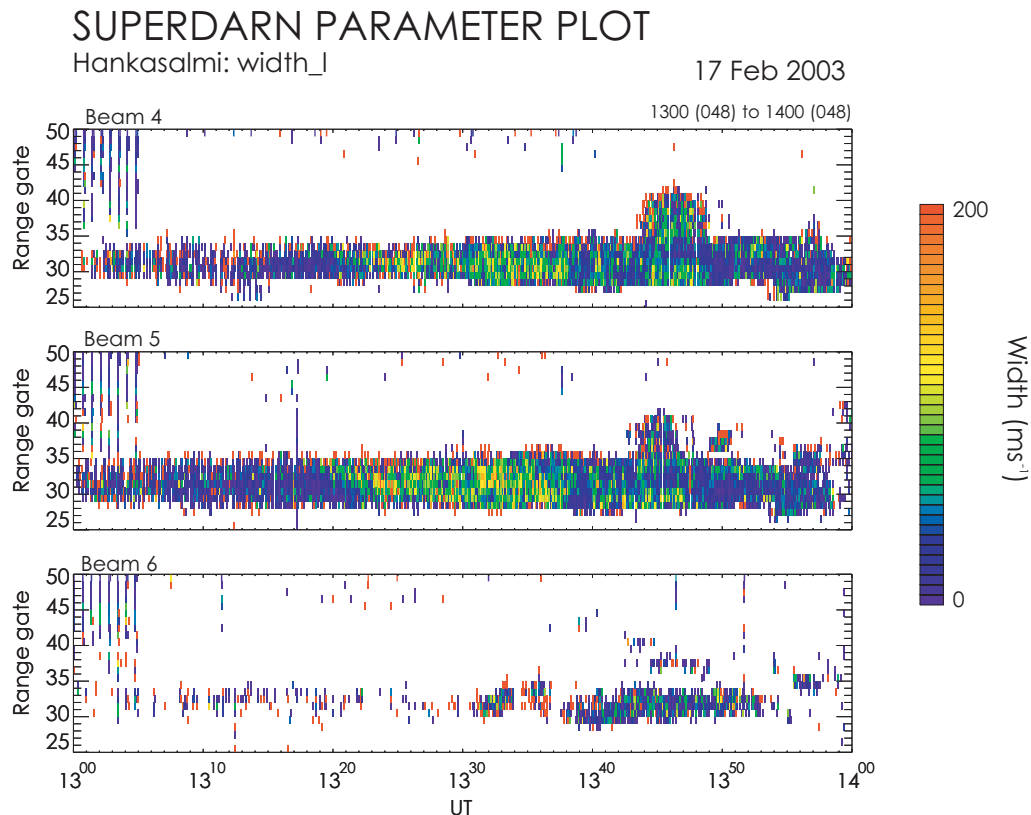


図 3.39: 2003 年 2 月 17 日 1300UT ~ 1400TU に Finland HF レーダーの特別観測ビームで得られたスペクトル幅の RTI プロット。

3.2.2.1.2 脈動現象の周波数

図 3.40 はビーム 4、5 の RTI プロットで 1330UT から 1400UT までを表したものである。縦軸はレンジ 25 からレンジ 40 までとなっている。カラーバーは $-300\text{m/s} \sim 0\text{m/s}$ を 40 等分割して速度を表しており、レーダーから遠ざかる方向のみになっていることに注意してもらいたい。この図から、周期的な速度変動を見ることができる。

また、図 3.41 は同時時間帯におけるレンジ 30 から 32 までの速度変動を示したものである。この図からも 1340UT 付近に周期的な速度変動を見ることができる。これらの速度変動はレンジ 29 から 34 までのすべてのレンジで見ることができる。ここで、図 3.40 において、1340UT 付近を境に縦縞構造の傾き、すなわちレンジ間の位相差が変わっていることが見て取れる。このため、1330UT から 1340UT までと、1340UT から 1350UT までに分けて、それぞれに対して周波数解析を行った。

図 3.42 は上段にビーム 4、下段にビーム 5 のレンジ 30 から 32 のスペクトルを表したもので、左側が 1330UT ~ 1340UT、右側が 1340UT ~ 1350UT のスペクトルになっている。各図において色はそれぞれのレンジ番号を、括弧内の数字はピーク周波数を示している。どのスペクトルにおいても 15mHz 付近に明瞭なスペクトルピー

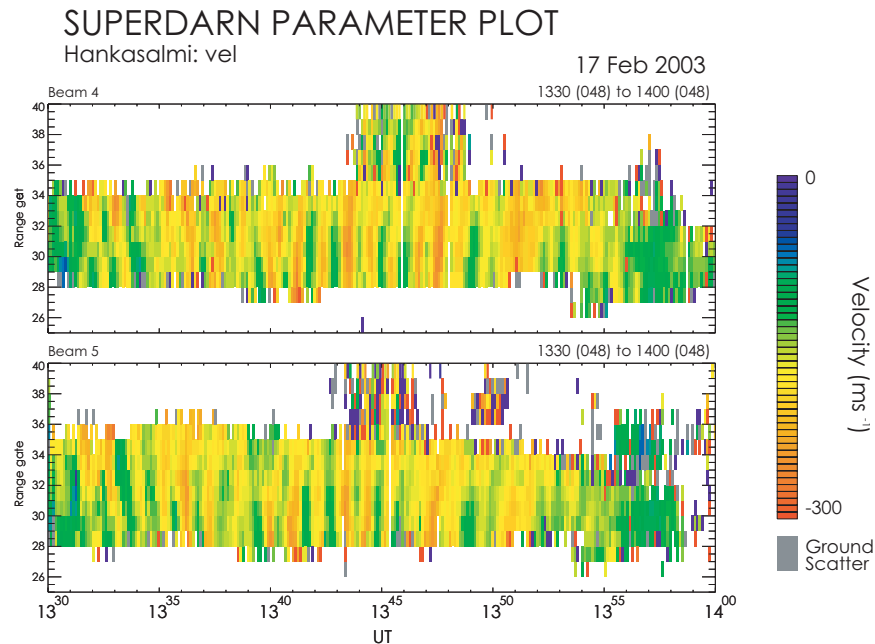


図 3.40: Finland HF レーダーの特別観測ビーム 4 (上) とビーム 5 (下) におけるドップラー速度の RTI プロット。時間幅は 1330UT ~ 1400UT、縦軸はレンジ 25 からレンジ 40 となっている。

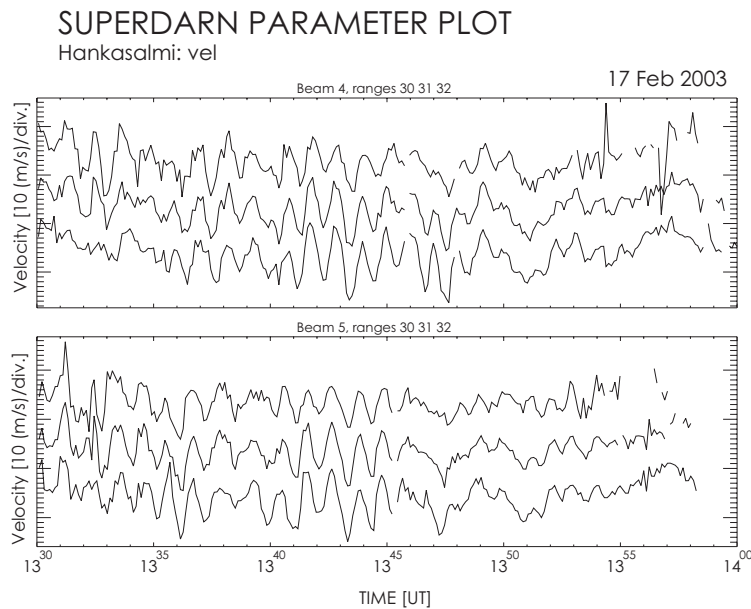


図 3.41: Finland HF レーダーの特別観測ビーム 4 (上) とビーム 5 (下) におけるドップラー速度の時系列データ。それぞれ、レンジ 30 からレンジ 32 までを下から順に表している。横軸は時間で 1330UT から 1400UT までの時間帯を表している。縦軸は速度を表している。

クを持ち、観測された現象が Pc3-4 脈動に分類されることがわかった。

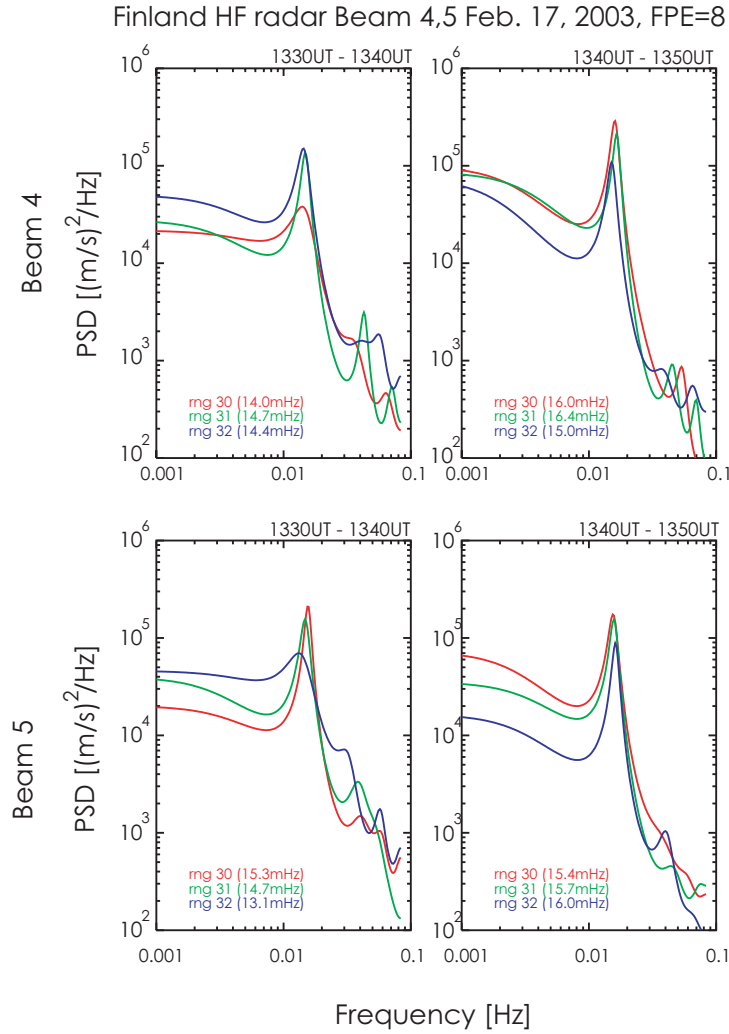


図 3.42: Finland HF レーダーの特別観測ビーム 4 (上) とビーム 5 (下) におけるレンジ 30 からレンジ 32 までのドップラー速度のパワースペクトル。左側が 1330UT から 1340UT まで、右側が 1340UT から 1350UT までの時間帯のパワースペクトルとなっている。

3.2.2.1.3 波数および伝播方向

次に、この脈動の波数および伝播方向について求める。ここで、本イベントでは隣り合う二本のビームで明瞭な脈動を観測しているため、イベント 1 と同様に *Tonegawa and Sato* [1987] の方法を用いることによって、レンジ間の比較とビーム間の比較から磁気緯度・磁気経度方向の波数を得ることができる。表 3.3 は周期的な変動が観測されたレンジの磁気緯度・磁気経度である。図 3.43(a) は次数 8 の Akaike 法によって算出した、ビーム 4 におけるレンジ 31 に対するコヒーレンスを上段に、位相を下段に表している。また左側は 1330UT ~ 1340UT のコヒーレンスと位相を、右側は 1340UT ~ 1350UT のコヒーレンスと位相を表している。図 3.43(b) は同様の形式でビーム 5 について表したものである。この図から、どちらのビーム、どちらの時間帯においてもコヒーレンスが非常に高いことがわかる。位相について見てみると、1330UT ~ 1340UT ではレンジが低いほう、すな

表 3.3: Finland レーダーのレンジ 30～32 までの磁気緯度・磁気経度

	ビーム 4		ビーム 5	
レンジ番号	磁気緯度	磁気経度	磁気緯度	磁気経度
30	66.33	102.36	66.49	103.40
31	66.46	102.30	66.62	103.37
32	66.59	102.25	66.75	103.39

わち低緯度側が遅れ、1340UT～1350UT ではレンジの高いほう、すなわち高緯度側が遅れている。これは、図 3.40 で見ることでできた位相の変化を示しており、1340UT 頃を境に位相が反転していることがわかった。

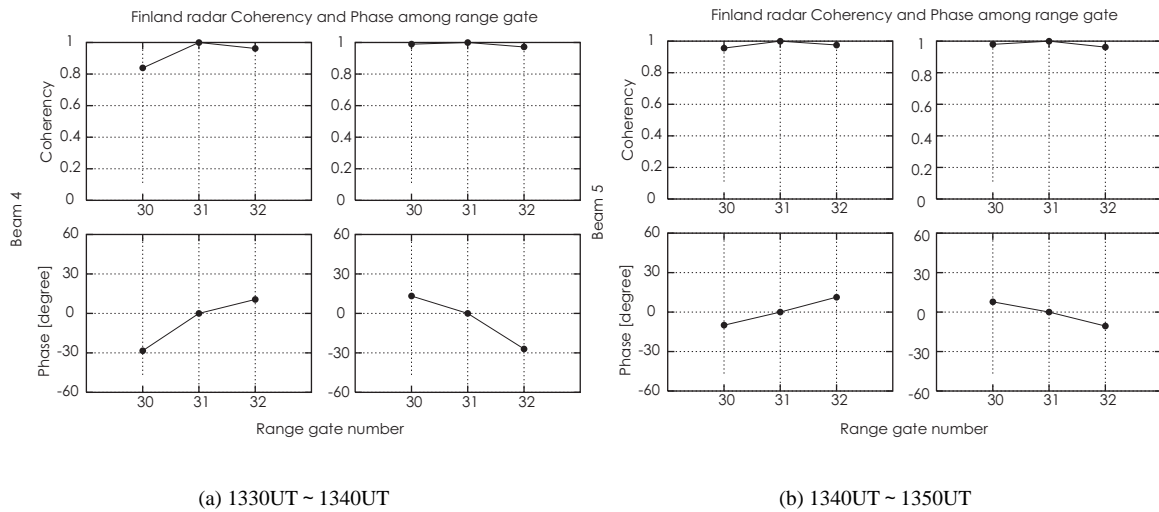


図 3.43: Finland HF レーダーの特別観測ビーム 4 のレンジ 31 に対するレンジ 30 からレンジ 32 ま でコヒーレンス（上）と位相（下）

図 3.44 はビーム 4 に対するビーム 5 の同レンジにおけるコヒーレンスと位相である。全てのレンジにおいて高いコヒーレンスがあり、位相が正であるのがわかる。これは、全てのレンジにおいて東側（ビーム 5）の位相が進んでいることを示している。

以上のような関係から、波数を算出する。ここでは、ビーム 4 のレンジ 30 とレンジ 31、ビーム 5 のレンジ 30 の 3 点を用いて波数の計算を行った。

図 3.43(a) と図 3.44 から、1330UT～1340UT におけるビーム 4 のレンジ 31 に対するレンジ 30 の位相はおよそ -28° 、ビーム 4 のレンジ 31 に対するビーム 5 のレンジ 31 の位相差はおよそ 80° であることがわかる。表 3.3 に示されている各レンジの磁気緯度、磁気経度と式 3.1 から、以下のような連立方程式が成り立つ。

$$-28 = (k_x, k_y) \{ (66.46, 102.30) - (66.33, 102.36) \} \quad (3.2)$$

$$80 = (k_x, k_y) \{ (66.46, 102.30) - (66.62, 103.37) \}$$

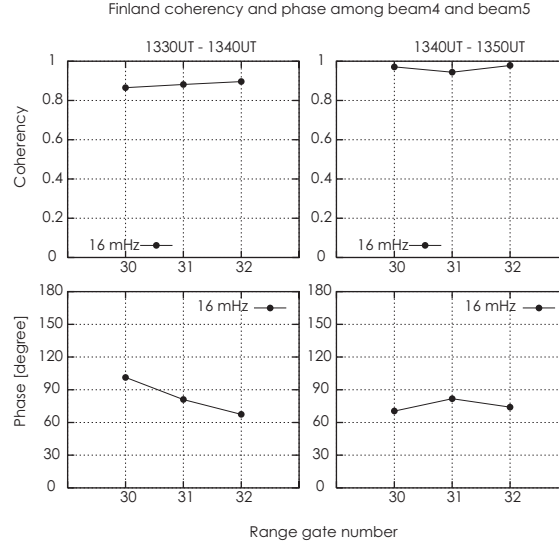


図 3.44: Finland HF レーダーの特別観測ビーム 4 に対するビーム 5 のコヒーレンス（上）と位相（位）。それぞれ、等緯度レンジに同士による比較となっている。左側が 1330UT から 1340UT まで、右側が 1340UT から 1350UT までの時間帯の Coherence と位相を表している。横軸は比較したそれぞれのレンジを表し、上段がレンジ 4、下段がレンジ 5 となっている。

上記の式から、磁気緯度方向、磁気経度方向の波数は、それぞれ -265 と -109 となる。ここで負の波数は磁気緯度方向では低緯度側の位相が遅れていることを示し、磁気経度方向では西側の位相が遅れていることを示すことから、1330UT ~ 1340UT では低緯度側の位相が遅れ、西側に伝播する Pc3-4 脈動であることがわかった。

次に 1340UT ~ 1350UT における波数を計算する。図 3.43(b) と図 3.44 から、ビーム 4 のレンジ 30 とレンジ 31 の位相差はおよそ 13° 、ビーム 4 のレンジ 30 とビーム 5 のレンジ 30 の位相差は 70° であることがわかる。これらの位相差から以下の式が成り立つ。

$$17 = (k_x, k_y) \{ (66.46, 102.30) - (66.33, 102.36) \} \quad (3.3)$$

$$70 = (k_x, k_y) \{ (66.46, 102.30) - (66.62, 103.37) \}$$

上記の式から、磁気緯度方向、磁気経度方向の波数は、それぞれ 107 と -51 となる。このため、1340UT ~ 1350UT では、高緯度側の位相が遅れ、西側に伝播する Pc3-4 脈動であることがわかった。

その他のレンジの組み合わせにおいてもほぼ同様の結果が得られ、磁気緯度方向、磁気経度方向のどちらにおいても高い波数を持つ脈動であることがわかった。

3.2.2.2 CUTLASS Iceland East レーダー

3.2.2.2.1 エコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅

図 3.45,3.46,3.47 は 2003 年 2 月 17 日 1300UT から 1400UT に Iceland East レーダーの特別観測ビームであるビーム 13 から 15 で得られたエコーパワー、ドップラー速度、スペクトル幅の RTI プロットである。縦軸は、Tromso 上空に相当するビーム 14 のレンジ 27 を含む、レンジ 10 からレンジ 50 までとしている。

エコーパワーの観測結果 図 3.45 においてカラーバーは $0\text{dB} \sim 30\text{dB}$ を 30 等分割したエコーパワーを表している。ここで、1335UT 頃からビーム 14、15 のレンジ 40 から 50 付近に帯状のエコーが見える。このエコーは、ビーム 15 において 1300UT 頃から断続的に強いエコーパワーが観測されていることから、加熱領域からのエコーであると考えられる。また、ビーム 13 は、Finland レーダーのビーム 6 と同様にエコーが見えなくなっていることから、加熱領域からずれた領域であると考えられる。

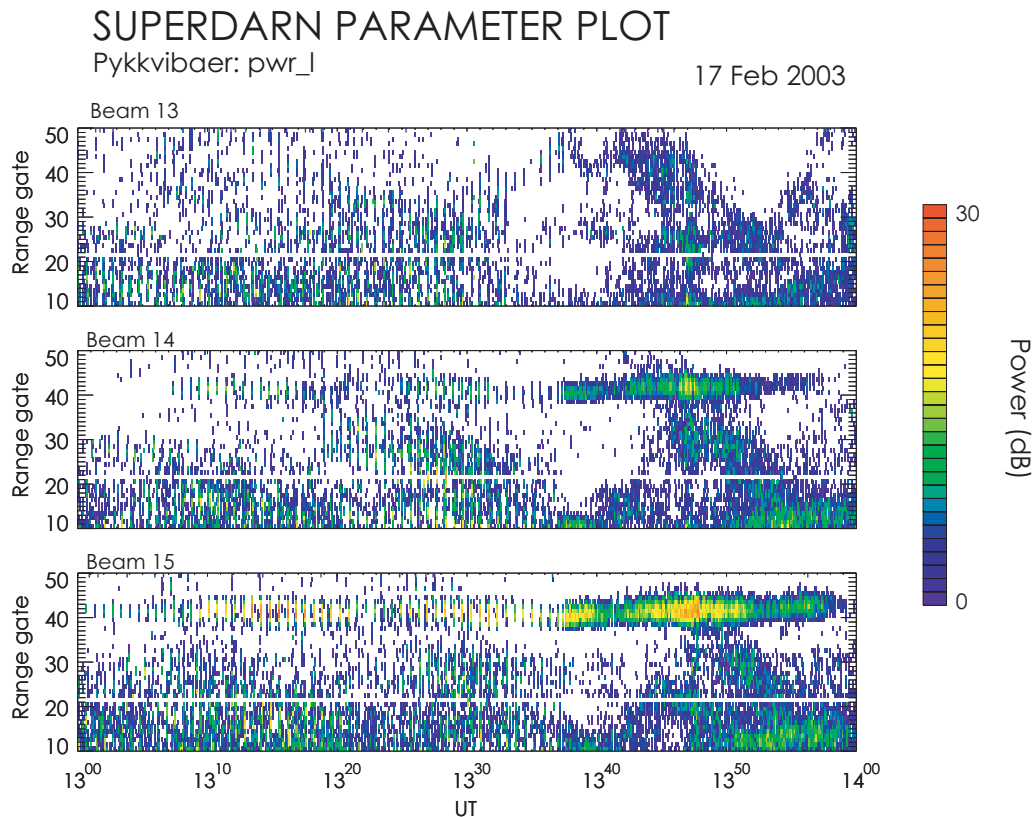


図 3.45: 2003 年 2 月 17 日 1300UT ~ 1400TU に Iceland East HF レーダーの特別観測ビームで得られたエコーパワーの RTI プロット。上から順にビーム 13、ビーム 14、ビーム 15 を表している。横軸は時間で 1300UT から 1400UT までの時間帯を表している。縦軸はレンジを表しており、レンジ 10 からレンジ 50 までとなっている。

ドップラー速度の観測結果 図 3.46 においてカラーバーは -800m/s から 800m/s までを 50 等分割した速度を表している。ビーム 14、15 において、エコーパワーで見ることのできた加熱領域からのエコーであると考えられるレンジ 40 付近で、周期的な変動を見ることができる。これは Finland レーダーで観測された脈動に比べ、長い周期の変動であることがわかる。これらの変動も振幅は小さいが、Finland レーダーで脈動が見られた 1330UT~1400UT で見ることができ、Finland レーダーで見られた脈動と同時に同じ領域で発生している脈動だと考えられる。

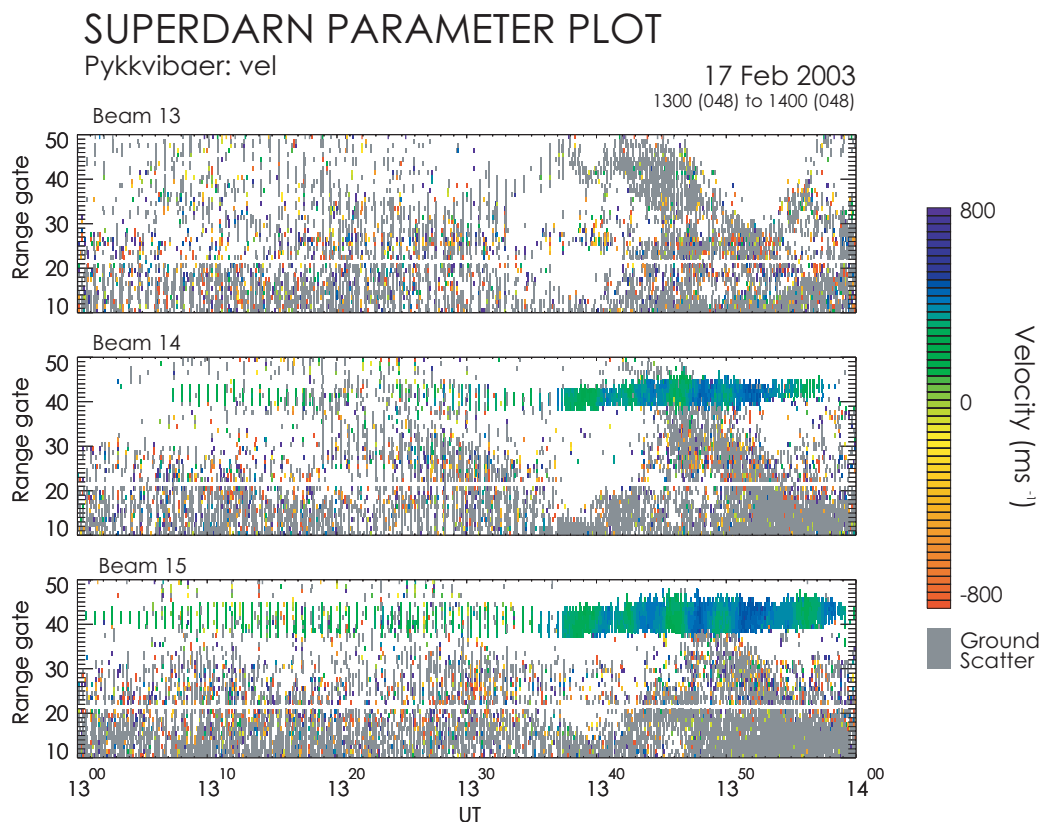


図 3.46: 2003 年 2 月 17 日 1300UT~1400TU に Iceland East HF レーダーの特別観測ビームで得られたドップラー速度の RTI プロット。

スペクトル幅の観測結果 図 3.47 においてカラーバーは 0m/s から 200m/s までを 20 等分割したスペクトル幅を表している。ドップラー速度で周期的な変動が見えているビーム 14、15 のレンジ 40 付近でスペクトル幅の上昇が見えるが、Finland レーダー同様にイベント 1 に比べ全体的に低い値となっている。

これら 3 つの観測値から、ビーム 14、15 のレンジ 40 付近で観測された周期的な変動は EISCAT ヒーターの電離圏加熱による電離圏電子密度擾乱の上昇によって照らし出された、電離圏電場の脈動であると考えられるが、Finland レーダーで得られた周期と同じ周期の脈動をこれらの図から見ることはできなかった。以後、観測された脈動について詳細な解析を行っていく。

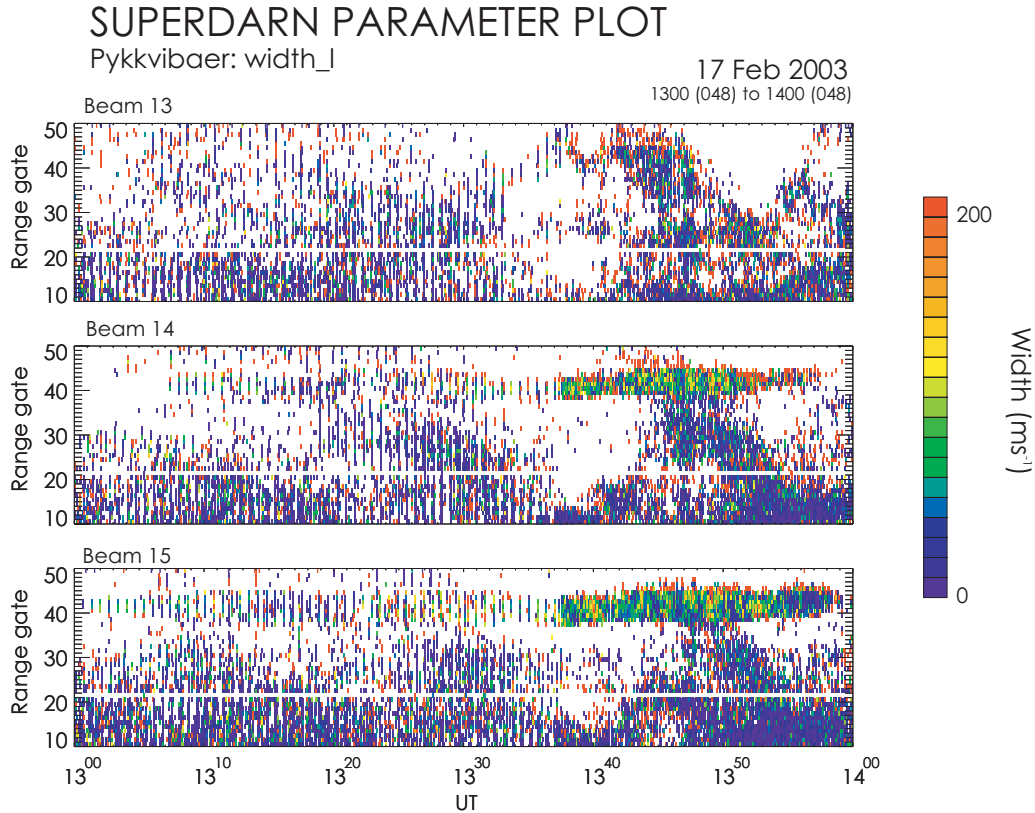


図 3.47: 2003 年 2 月 17 日 1300UT ~ 1400TU に Iceland East HF レーダーの特別観測ビームで得られたスペクトル幅の RTI プロット。

3.2.2.2.2 脈動現象の周波数

図 3.48 はビーム 14、15 の 1330UT から 1400UT における RTI プロットである。縦軸はレンジ 35 から 50 ままでを表している。カラーバーは $200\text{m/s} \sim 600\text{m/s}$ を 40 等分割した速度を表しており、レーダーに近づく方向のみになっていることに注意してもらいたい。この図から明瞭な長周期の変動を見ることができる。図 3.49 はレンジ 39 からレンジ 41 までの同時間帯の速度変動を表したものである。この図からも長周期の変動が 1338UT 付近からあるのがわかる。図 3.50 は次数 8 の Burg によって算出した 1338UT ~ 1350UT の周波数スペクトルである。それぞれレンジ 40 から 42 ままでを表しており、左がビーム 14、右がビーム 15 となっている。どちらのビームにおいても Finland レーダーで観測された脈動の周波数である $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ にはスペクトルピークが見られなかったが、ビーム 14 のレンジ 41、42 を除いたレンジでは $4.6\text{mHz} \sim 4.7\text{mHz}$ の Pc5 帯に属するスペクトルピークを見ることができた。

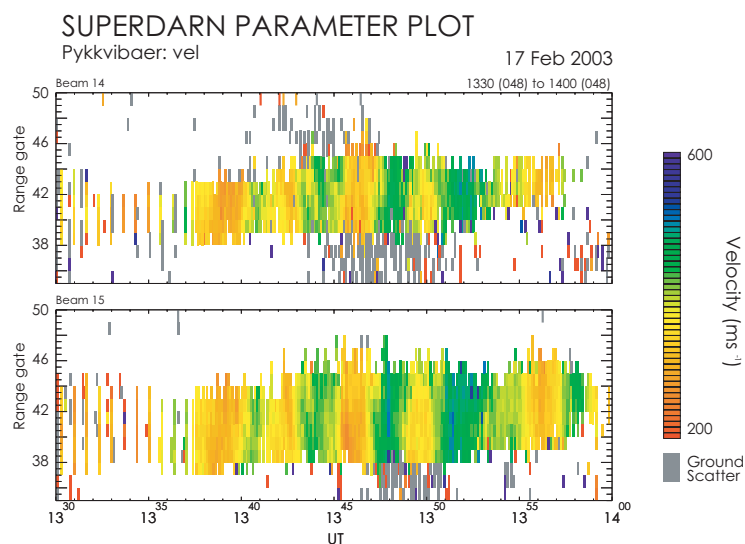


図 3.48: Iceland East HF レーダーの特別観測ビーム 14 とビーム 15 におけるドップラー速度の RTI プロット。時間幅は 1330UT ~ 1400UT、縦軸はレンジ 34 からレンジ 50 となっている。

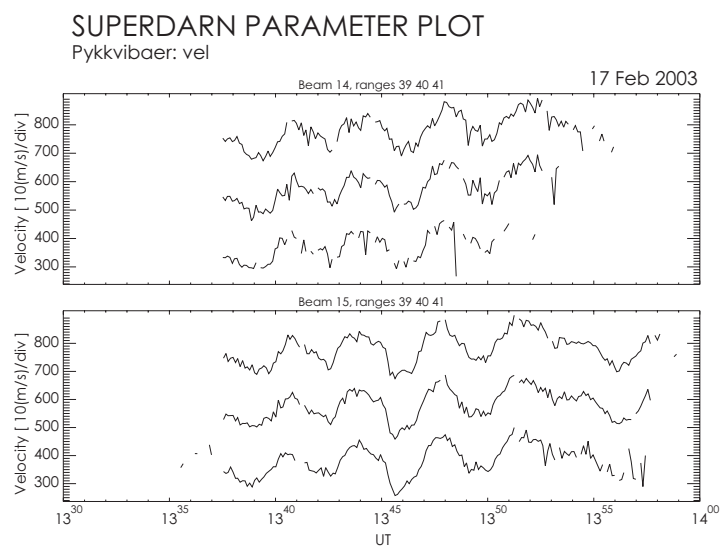


図 3.49: Iceland East HF レーダーの特別観測ビーム 14 (上) とビーム 15 (下) におけるドップラー速度の時系列データ。それぞれ、レンジ 39 からレンジ 41 までを下から順に表している。横軸は時間で 1330UT から 1400UT までの時間帯を表している。縦軸は速度を表している。

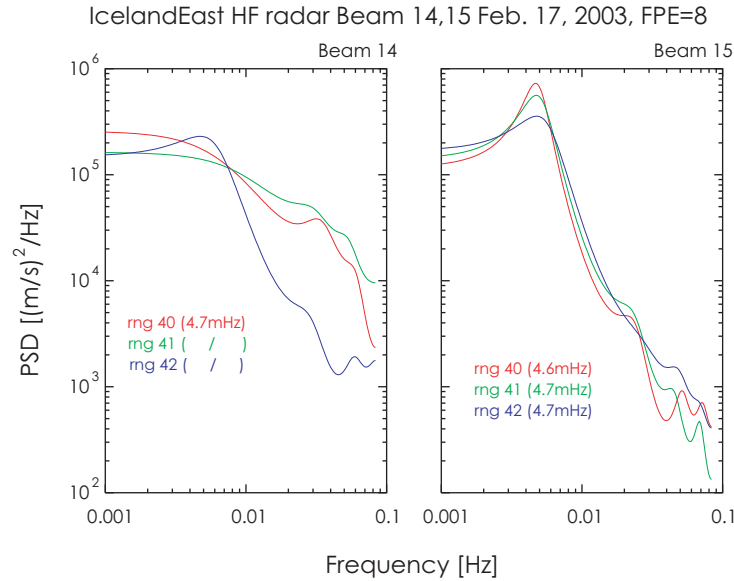


図 3.50: Iceland East HF レーダーの特別観測ビーム 14 (左) とビーム 15 (右) におけるレンジ 40 からレンジ 42 までのドップラー速度のパワースペクトル。時間幅は 1338UT から 1350UT となっている。

3.2.2.2.3 波数および伝播方向

次に観測された Pc3-4 周波数帯の脈動の波数および伝播方向について求める。Iceland East レーダーでも隣り合う二本のビームで脈動を観測しているため、レンジ間の比較とビーム間の比較から、磁気緯度・磁気経度方向に対しての波数と伝播方向を算出することが可能である。ビーム 14、15 の各レンジの磁気緯度・磁気経度は表 3.4 のようになっている。

図 3.50 から、ビーム 14 において明瞭な Pc5 脈動スペクトルピークを持つレンジは、レンジ 40 のみであるため、ビーム 14 のレンジ 40 と、ビーム 15 のレンジ 40 とレンジ 41 を用いて波数を求める。図 3.51 はビーム 15 におけるレンジ 41 に対するコヒーレンスと位相を次数 8 の Akaike 法で算出したものである。この図から、高いコヒーレンスがあり、西側のレンジが進んでいることがわかった。レンジ 41 に対するレンジ 40 の位相差は、およそ 6° である。また、ビーム 14 のレンジ 40 に対するビーム 15 のレンジ 40 の位相はおよそ 10° であっ

表 3.4: Iceland East レーダーのレンジ 39～レンジ 42 までの磁気緯度・磁気経度

	ビーム 14		ビーム 15	
レンジ番号	磁気緯度	磁気経度	磁気緯度	磁気経度
40	66.37	107.83	65.35	106.85
41	66.34	108.13	65.32	107.13
42	66.31	108.42	65.28	107.40

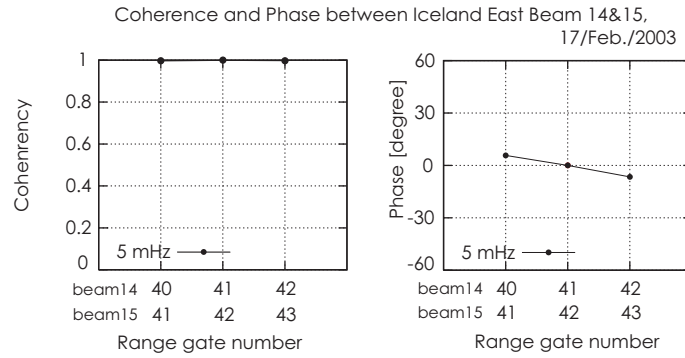


図 3.51: Iceland East HF レーダーの特別観測ビーム 14 に対するビーム 15 のコヒーレンス (左) と位相 (右)。それぞれ、等緯度レンジに同士による比較となっている。横軸は比較したそれぞれのレンジを表している。

た。この位相差から、以下の式が成り立つ。

$$6 = (k_x, k_y) \{ (66.35, 106.85) - (65.32, 107.13) \} \quad (3.4)$$

$$10 = (k_x, k_y) \{ (66.35, 106.85) - (66.37, 107.83) \}$$

上記の式から、磁気緯度方向、磁気経度方向の波数は、それぞれと -10 と 20 となる。このため、1340UT ~ 1350UT では、低緯度側の位相が遅れ、東に伝播する Pc5 脈動であることが判明した。

3.2.2.3 対流速度分布

図 3.52 は、1340UT から 1350UT における北半球での対流速度分布である。青丸で示された領域は Iceland

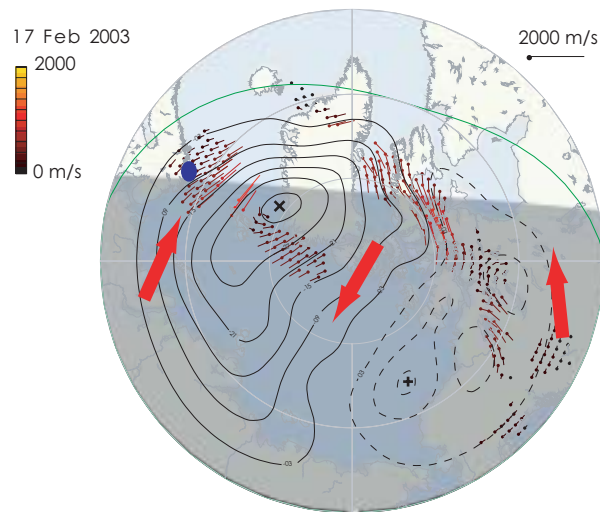


図 3.52: SuperDARN による 2003 年 2 月 17 日の北半球極域地方における対流速度分布。時間は 1350UT から 1400UT となっている。

East レーダーによって Pc3-4 脈動が観測されたエコー領域である。この図から、Pc3-4 脈動が観測されたエコー領域は電離圏対流における地球磁気圏尾部方向からのリターンフローの領域であることがわかる。これは、イベント 1 と同様に、観測された Pc3-4 脈動が閉磁力線領域内で起こった現象であることを示唆する。

3.2.3 GEOTAIL

図 3.53 は 2003 年 2 月 17 日 1200UT ~ 1500UT の GEOTAIL 衛星の GSM 座標系における軌道と、Tyganenko89 モデルによる地上 100km への軌道投影点を表している。この図から、Finland レーダー、Iceland East レーダーで観測された EISCAT ヒーターの電離圏加熱によって照らし出されたエコー領域と GEOTAIL の軌道投影点の位置が離れていることがわかる。また、GSM 座標系の軌道図から、GEOTAIL 衛星が午後側 Flank side に位置していたことがわかる。

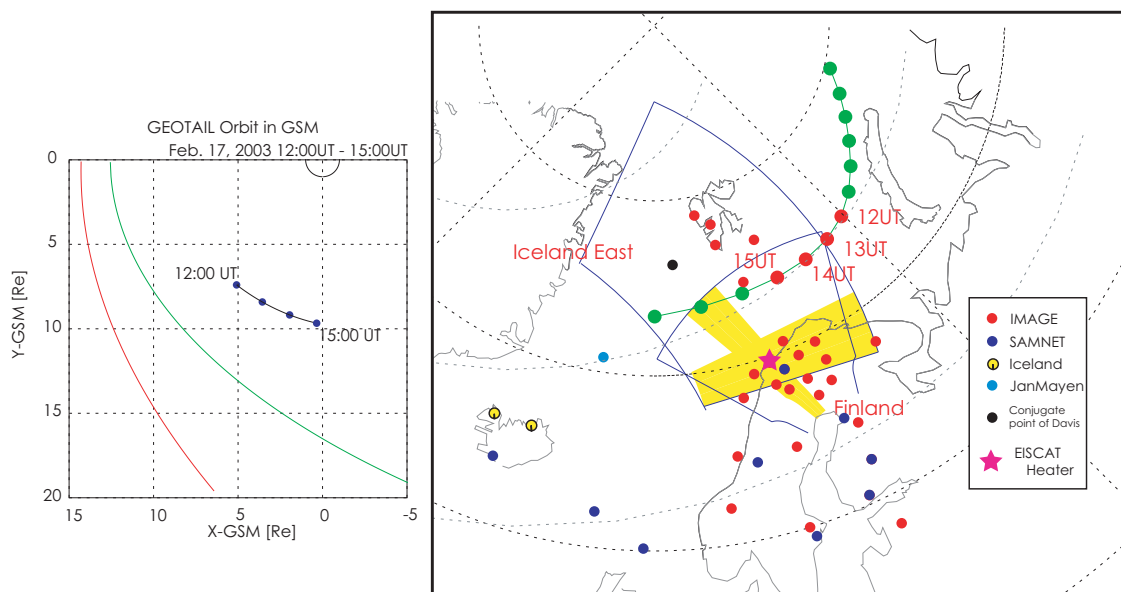


図 3.53: 2002 年 2 月 12 日 1200UT から 1500UT までの GSM 座標系 X-Y 平面における GEOTAIL 衛星の軌道図 (左) と、GEOTAIL 衛星の軌道投影点および Finland HF レーダーの観測視野と EISCAT ヒーターによる加熱領域 (右)。

図 3.54 は電離圏加熱が始まった 1300UT から、1400UT までに GEOTAIL 衛星によって観測された磁場・電場データを示したものである。1300UT から 1330UT まで明瞭な 5 分程度の周期をもった脈動が見られる。しかしながら、Finland レーダー、Iceland East レーダーで明瞭な周期的速度変動のエコーがあった 1330UT 付近から、脈動がなくなっている。このため、1300UT ~ 1330U と 1330UT ~ 1400UT の二つの時間帯にわけて周波数スペクトルを計算した。図 3.55 は次数 20 の Burg 法で求めた 1330UT ~ 1330UT と 1330UT ~ 1400UT の磁場の周波数スペクトルを表したものである。1300UT ~ 1330UT では 4mHz ~ 5mHz のスペクトルピークが見える。これは Iceland East レーダーで見ることのできた Pc5 脈動の周波数とほぼ一致する。しかし、1330UT ~ 1400UT になると、ピークの鋭さがなくなっている。これは、Iceland East レーダーで 4 ~ 5mHz の電離圏電場の脈動が

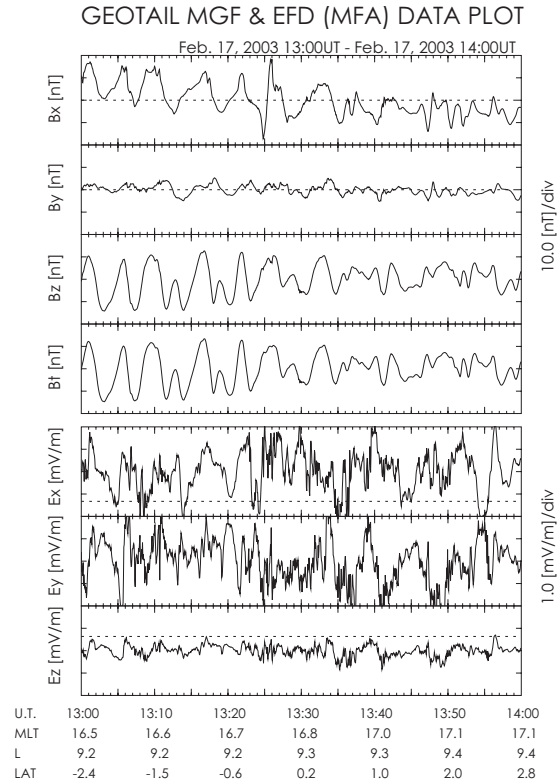


図 3.54: 2003 年 2 月 17 日 1300UT から 1400UT に GEOTAIL 衛星によって観測された GSM 座標系における磁場と電場の時系列プロット。上が磁場 (B_x, B_y, B_z, B_t)、下が電場 (E_x, E_y, E_z) を表している。

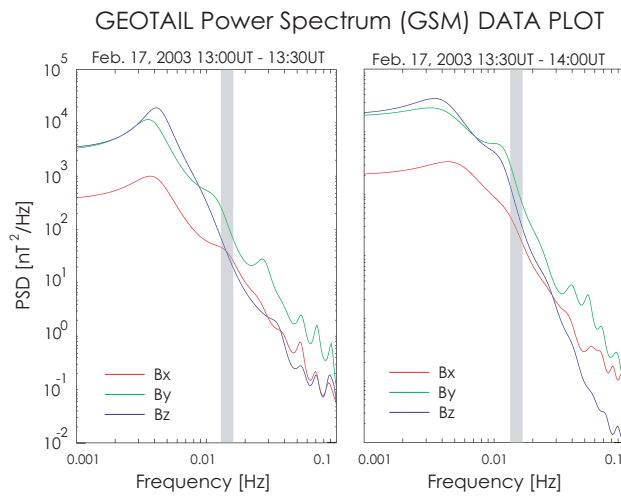


図 3.55: 次数 20 の Burg 法による GEOTAIL 衛星で観測された磁場のパワースペクトル。左側が 1300UT から 1330UT まで、1330UT から 1400UT までの時間帯となっている。

観測され始めた時間を境に、磁気圏で同じ周波数の脈動が支配的ではなくなることを意味する。一方、Finland レーダーで観測された脈動と同じ短周期のスペクトルピークを持つ脈動は観測されていない。

以上のことから、磁気圏午後側では、Finland レーダーによって観測された電離圏電場脈動と同じ周波数の脈動は観測されていないことが判明した。

3.2.4 地上磁場

ここでは、加熱領域からのエコーが観測された 1330UT から 1400UT を中心に磁場データを見ていく。本イベントでは EISCAT ヒーターに近い磁場観測点を対象にし、2002 年 11 月から Tromso に設置された WEED 磁力計と、IMAGE、SAMNET の解析を行った。各観測点の位置関係は図 3.53 に示したとおりである。

3.2.4.1 WEED (Wave Excitation Experimental Diagnostic)

WEED (Wave Excitation Experimental Diagnostic) は 2002 年 11 月ごろから EISCAT ヒーターのある Tromso に設置された Induction Magnetometer である。サンプリング周期は 10.0005Hz である。図 3.56 は Finland レーダーと Iceland East レーダーの両レーダーで電離圏電場脈動が観測された 1300UT ~ 1400UT の磁場変動を表したものである。データは 20.1 秒毎の移動平均によって平滑化され、3 秒ごとに再サンプリングしている。この

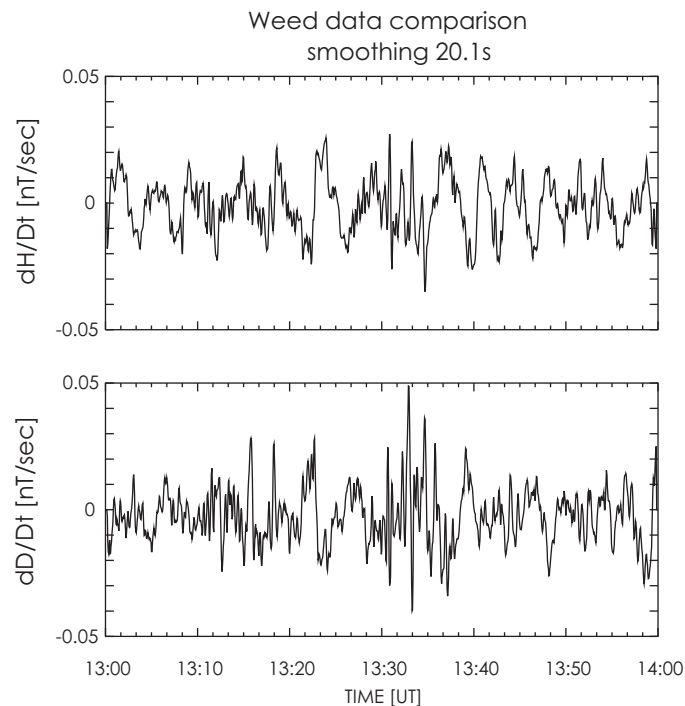


図 3.56: 2003 年 2 月 17 日 1300UT から 1400UT に Wave Excitation Experimental Diagnostic (WEED) で得られた磁場 H,D 成分の時系列データ。データは 20.1 秒ごとの移動平均によって平滑化され、3 秒ごとにリサンプリングされている。

図において、両成分で周期的な変動を見ることができるが、振幅が非常に小さいことがわかる。図 3.57 は次数 20 の Burg 法を用いた 1330UT ~ 1400UT における周波数スペクトルである。灰色の帯は Finland レーダー観測

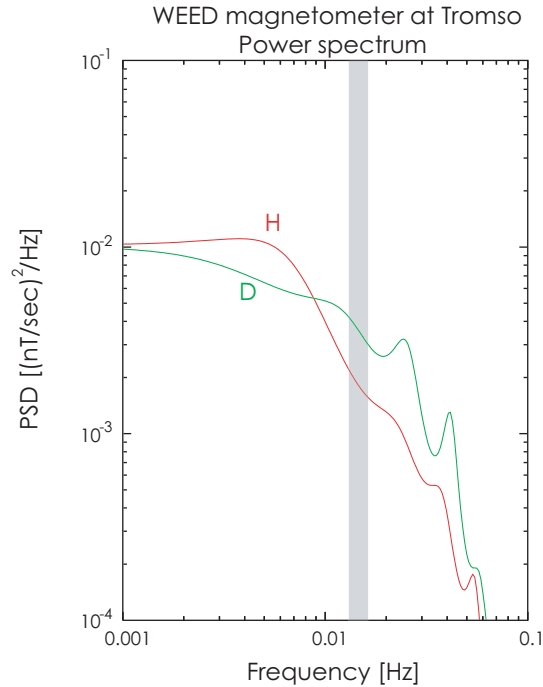


図 3.57: 次数 20 の Burg 法で求められた、1330UT から 1400UT に WEED 磁力計で観測された磁場のパワースペクトル。

された Pc3-4 脈動の周波数である $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の周波数帯を示している。H 成分において、Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動の周期である $4\text{mHz} \sim 5\text{mHz}$ 付近にわずかにスペクトルピークを見ることができる。また、D 成分では 24mHz に明瞭なスペクトルピークを見ることができる。しかし、Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動と同じ周波数のスペクトルピークは見ることができない。

このことから、WEED では Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動と同じ周波数をもつ脈動は観測していなかったが、Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動と同じ周波数を持つ脈動が観測していることがわかった。また、D 成分に 24mHz の脈動を観測していることがわかった。

3.2.4.2 IMAGE 磁場観測チェーン

図 3.58 は IMAGE によって取得された 1300UT ~ 1400UT での磁場変動を表したものである。1338UT 付近から X 成分に周期 3 分程度の明瞭な脈動があるのがわかる。これは Iceland East レーダーで 4.5mHz の脈動が観測され始めた時間と一致する。しかしながら、それ以外の脈動成分は両成分においてこの図から見ることはできない。図 3.59 は図 3.28 と同様に次数 10 の Burg 法を用いた 1330UT ~ 1400UT における周波数スペクトルである。灰色の帯は Finland レーダーで見ることのできた $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の Pc3-4 脈動の周波数帯を示している。この図から、EISCAT ヒーターのある Tromso (TRO) からは明瞭なスペクトルピークは見ることができないが、Kevo (KEV)、Abisko (ABK) の X 成分に Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動とほぼ同じ周波数のスペクトルピークを見ることができる。このスペクトルピークは両観測点とも、およそ 16.3mHz であった。

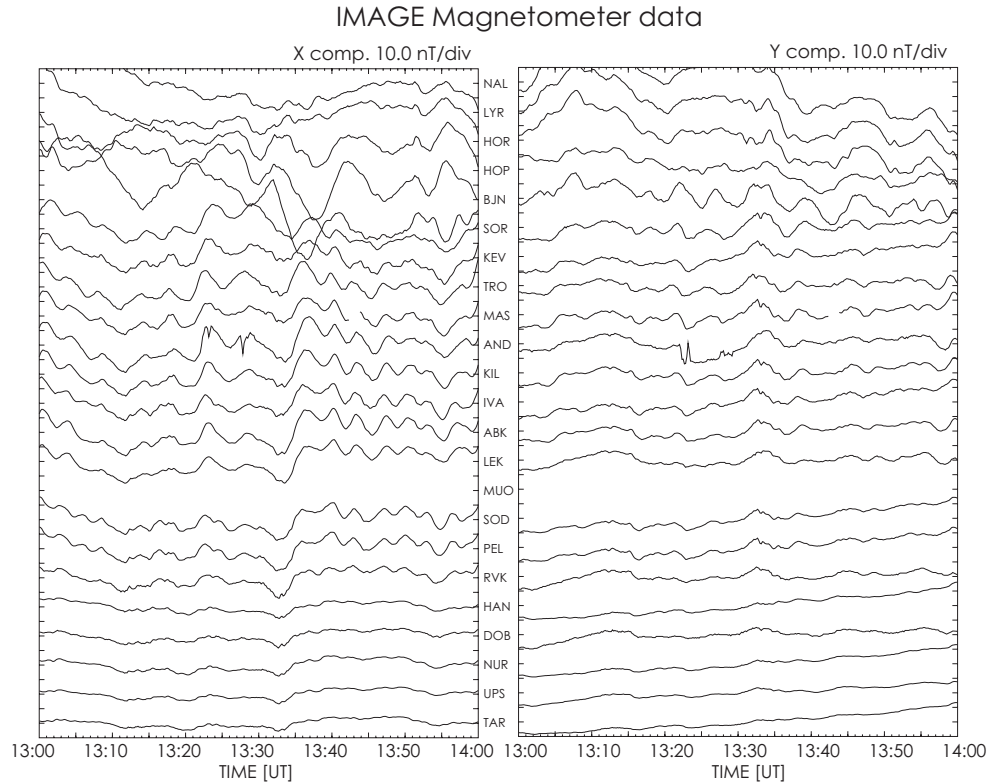


図 3.58: 2003 年 2 月 17 日 1300UT から 1400UT に、IMAGE 磁場観測チェーンによって得られた地磁気 X,Y 成分の時系列プロット。上から順に磁気緯度の高い観測点から低い観測点を表している。縦軸は磁場強度、横軸は時間を表している。

これら二つの観測点は EISCAT ヒーターに近い観測点であるが、Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動は南北方向の振動であり、対応する地上の脈動は Y 成分（東西成分）に現れると考えられることから、これらの二つの観測点で観測された脈動は Finland レーダーで観測された脈動とは異なるものであると考えられる。また、KEV より低緯度の観測点では $17\text{mHz} \sim 20\text{mHz}$ 付近にスペクトルピークを持つ脈動を観測していることがわかった。さらに、SOR を境にして高緯度では $1.5 \sim 2.1\text{mHz}$ のスペクトルピークが、低緯度側では $3.2\text{mHz} \sim 4.3\text{mHz}$ のスペクトルピークを見ることができる。この低緯度側のスペクトルピークの周波数は、Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動の周波数と一致する。D 成分においては、やはり低緯度側で $17\text{mHz} \sim 20\text{mHz}$ のスペクトルピークを見ることができる。また、ほぼ全ての観測点において $2\text{mHz} \sim 3\text{mHz}$ のスペクトルピークがあることがわかった。

以上のことから、IMAGE による磁場観測では、加熱領域の直下である TRO を含むすべての観測点において、Finland レーダーによって観測された Pc3-4 脈動と同じ $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の周期をもつ脈動は、観測されていないことがわかった。さらに、Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動と同じ 4.5mHz の脈動が SOR より低緯度側の観測点の H 成分で観測されていることがわかった。また、H 成分では SOR より高緯度側で $1.5\text{mHz} \sim 2.1\text{mHz}$ の、D 成分では $2\text{mHz} \sim 3\text{mHz}$ のスペクトルピークをもつ脈動が観測されていることがわかった。

IMAGE Power spectrum 17/Feb/2003 FPE=12

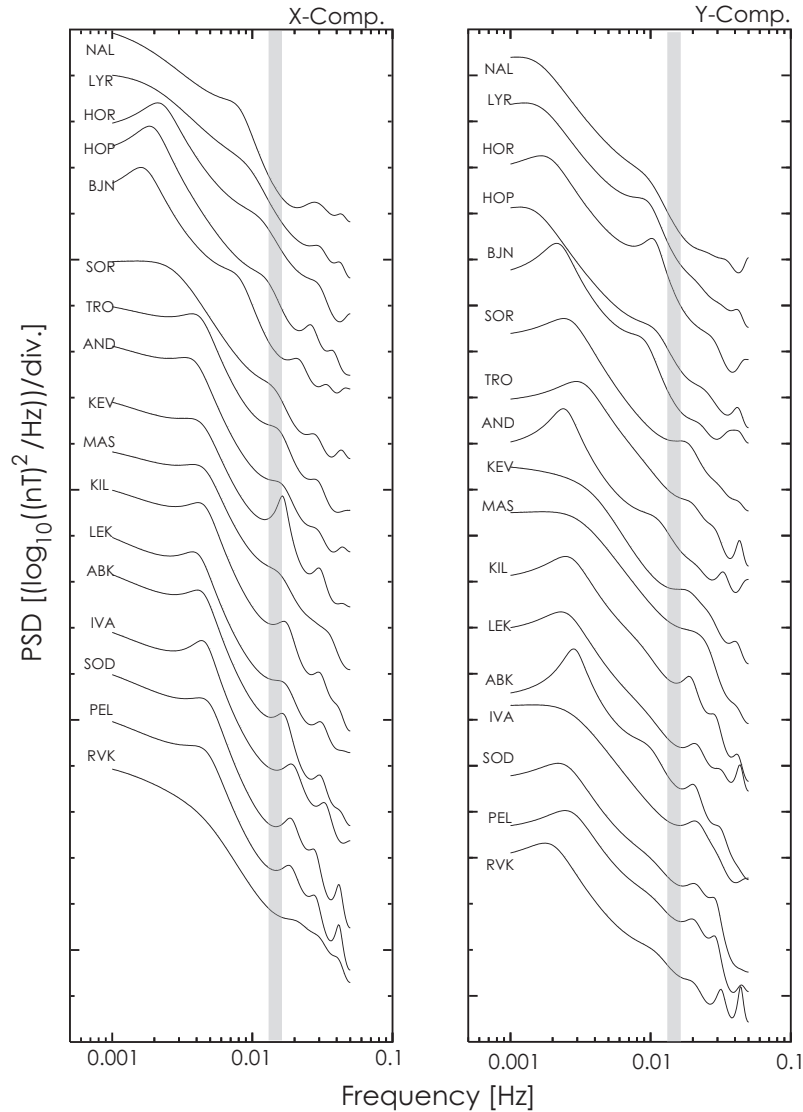


図 3.59: 次数 10 の Burg 法によって得られた IMAGE 磁場観測チェーンの各観測点における磁場のパワースペクトル。左が X 成分、右が Y 成分となっている。時間幅は 1330UT から 1400UT までとなっている。灰色の帯は Finland HF レーダーで得られたスペクトルピークの周波数である $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ を表している。

3.2.4.3 SAMNET 磁場観測チェーン

図 3.60 は各ステーションで得られた 1300UT ~ 1400UT までの磁場変動を高緯度から低緯度まで示したものである。IMAGE 同様に磁場の変動からは Finland レーダー、Iceland East レーダーで得られたような周期の変動を見ることはできないが、KIL の H 成分で周期 3 分程度の変動を見ることができる。

図 3.61 は次数 15 の Burg 法を用いた 1330UT ~ 1400UT における周波数スペクトルであり、灰色の帯は Finland レーダーで見ることのできた $13\text{mHz} \sim 16\text{mHz}$ の周波数帯を示している。この図において、BOR の H 成分と

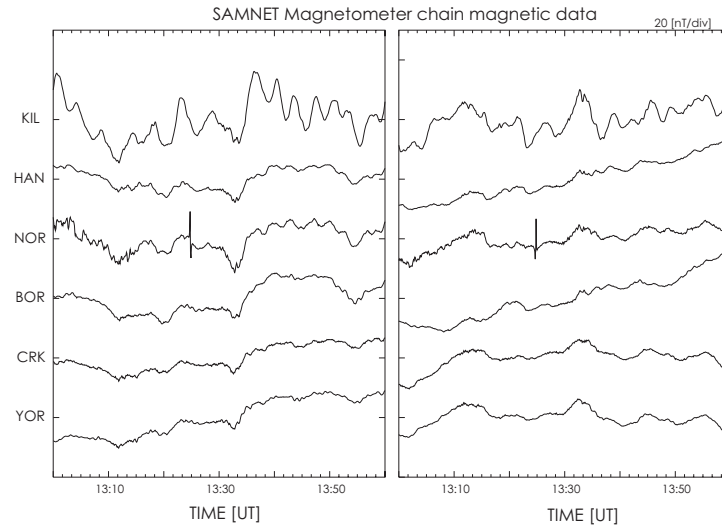


図 3.60: 2003 年 2 月 17 日 1300UT から 1400UT に SAMET 磁場観測チェーンによって得られた地磁気 H,D 成分の時系列プロット。上から順に磁気緯度の高い観測点から低い観測点を表している。縦軸は磁場強度、横軸は時間を表している。

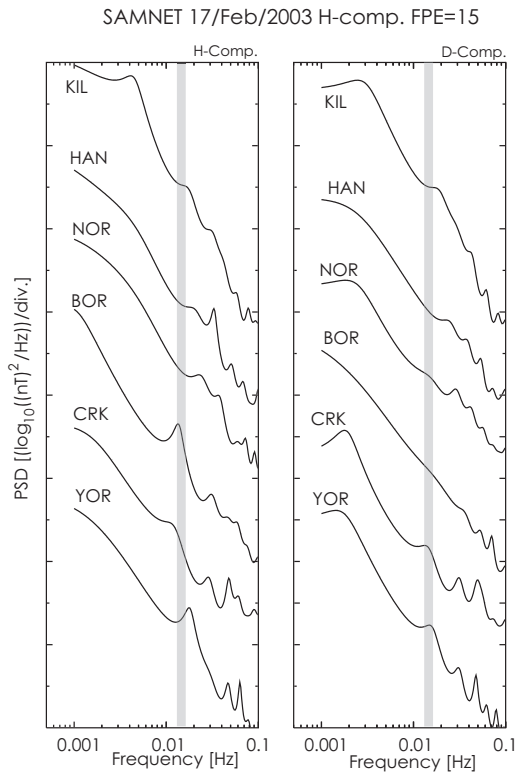


図 3.61: 次数 15 の Burg 法によって得られた SAMET 磁場観測チェーンの各観測点における磁場のパワースペクトル。左が H 成分、右が D 成分となっている。時間幅は 0440UT から 0510UT までとなっている。灰色の帯は Iceland East HF レーダーで得られたスペクトルピークの周波数である $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ を表している。

Crooktree (CRK)、York (YOR) の D 成分に $13\text{mHz} \sim 16\text{mHz}$ のスペクトルピークを見ることができる。しかしながら、これらの観測点は IMAGE の KEV や ABK のような加熱領域に近いステーションではない。また、KIL の H 成分では 4.5mHz の、KIL、CRK の D 成分ではそれぞれ 2mHz と 3mHz のスペクトルピークを見ることができる。

以上のことから、SAMNET による磁場観測では、Finland レーダーによって観測された Pc3-4 脈動と同じ周期をもつ脈動が 3 つの観測点で観測されていることがわかった。さらに、 $2\text{mHz} \sim 4\text{mHz}$ のスペクトルピークを持つような脈動を観測している観測点もあることがわかった。

3.2.5 本観測のまとめ

以下に本イベントで得られた解析結果についてまとめる。

- 2003 年 2 月 17 日に行われた EISCAT ヒーターによる電離圏加熱と GEOTAIL/SuperDARN の同時観測において、1330UT ~ 1400UT に Finland レーダーが EISCAT ヒーターによる加熱領域と考えられる領域から明瞭な電離圏電場 Pc3-4 脈動を観測した。
- この Pc3-4 脈動は 13.1mHz から 16.4mHz のスペクトルピークを持っていた。
- 1340UT を境に位相の反転が見られ、1340UT 前では低緯度側の位相が遅れ、1340UT 以降では高緯度側の位相が遅れていた。さらに、どちらの時間においても西側へ伝播していることがわかった。
- 波数は磁気緯度方向におよそ 100 ~ 250、磁気経度方向におよそ 50 ~ 100 であった。
- Iceland East レーダーでこのような Pc3-4 脈動は観測されなかったが、同じ領域と考えられる EISCAT ヒーターによる加熱領域から、同時間帯に $4\text{mHz} \sim 5\text{mHz}$ のスペクトルピークをもつ Pc5 脈動を観測した。そのため、Pc3-4 脈動は南北成分のみに、Pc5 脈動は東西成分のみに振動することがわかった。
- この Pc5 脈動は東側への伝播方向を持っており、その波数はおよそ 20 であった。また、この Pc5 脈動は低緯度側の位相がおくれていることがわかった。
- SuperDARN による対流速度分布によって、本イベントが地球磁気圏尾部からのリターンフロー領域、すなわち閉磁力線領域で起きている現象だということがわかった。
- GEOTAIL 衛星は 1300UT ~ 1330UT において 4mHz の Pc5 脈動を観測していたが、電離圏で電場脈動が観測され始めるのとほぼ同時に脈動が見られなくなっていた。このとき、GEOTAIL 衛星は磁気圏夕方側の flank side に位置しており、軌道投影点は加熱領域から離れた位置にあった。
- 加熱領域の真下であると考えられる Tromsø に設置された WEED 磁力計では、Finland レーダーで見られた電離圏電場脈動と同じスペクトルピークをもつ Pc3-4 脈動は見られなかったが、Iceland East レーダー

で観測されたような 4mHz の Pc5 脈動と、 24mHz にスペクトルピークを持つ脈動を観測していることがわかった。

- 地上磁場観測網の IMAGE では Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動と同じスペクトルピークを持つ磁場変動が KEV、ABK で見られたが、この脈動は X 成分のみで観測されており、Finland レーダーで観測された南北方向の Pc3-4 脈動に対応するものではなかった。その他の観測点では、 $17\text{mHz} \sim 20\text{mHz}$ の脈動が観測されていたが、Finland レーダーで観測されたような周波数の Pc3-4 脈動は見られなかった。また、SOR より低緯度の観測点では Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動と同じ 4mHz の脈動を観測していた。さらに SOR より高緯度の観測点では、 $1.4\text{mHz} \sim 2.1\text{mHz}$ のスペクトルピークを持つ脈動を観測していたことがわかった。
- 地上磁場観測網の SAMNET では低緯度の観測点で、Finland レーダーで見られた Pc3-4 脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つ脈動を観測していたが、その他の観測点では観測されていなかった。また、KIL では Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つ脈動を観測していたが、そのほかの観測点では、NOR、CRK、YOR で $2\text{mHz} \sim 3\text{mHz}$ の脈動が観測されていたのみで、Iceland East レーダーで観測された $4\text{mHz} \sim 5\text{mHz}$ の Pc5 脈動は観測されていなかった。

第4章 考察

ここでは各イベントで得られた観測結果について考察を行っていく。

4.1 観測イベント1

2002年2月12日に行われた GEOTAIL/SuperDARN 同時観測において、0440UT~0510UT に 16.4mHz ~ 19.7mHz のスペクトルピークを持つ磁気経度方向の電離圏電場脈動が Iceland レーダーの特別観測ビームによって観測された。図 4.1 は、このイベントの観測結果についてまとめた略図である。本イベントは、図 4.1(d) に

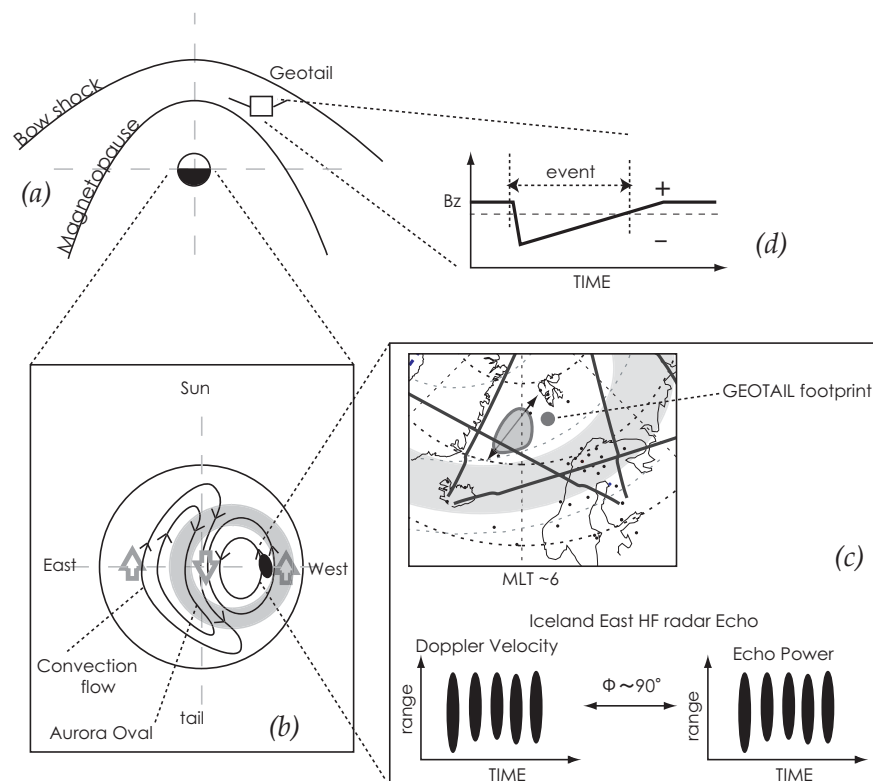


図 4.1: 2002 年 2 月 12 日のイベントにおける現象の特徴、および背景の概略図。

示されているように、IMF が南向きになっている期間中に起こっている。このときの電離圏対流は図 4.1(b) のようになっており、脈動現象はオーロラ オーバルより少し高緯度側に位置し、夜側からのリターンフローの領域、すなわち閉磁力線領域である、赤い丸で示された領域で発生している。この脈動の特徴としては、非常に明瞭な電場変動であることと、ある領域を境にして逆方向の伝播方向をもつことがあげられる。さらに、ドッ

プラー速度だけでなく、エコーパワーにも同様の変動が見られ、ドップラー速度にくらべ、90° の位相遅れを持っていることがわかった。また、脈動の波数が小さいにもかかわらず、電離圏電場変動に伴う地上の磁場変動が全く見られなかった。

このような特徴をもつ脈動に対して、本論文では次の二つのモデルについて考察を行った。

4.1.1 モデル 1

まず、これまでの過去の研究から得られているような、磁場の変動として脈動が伝わってきた場合について考察を行う。

4.1.1.1 発生と伝播について

本観測で得られたような $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ に周波数ピークを持ち、主に朝方で観測される脈動として Giant Pulsation (Pg) があげられる。このため、本イベントで観測された Pc3-4 脈動について、Pg の発生・伝播機構と考えられている、図 4.2 に表されるようなドリフト共鳴 (Drift bounce resonance) によるモデルを適用することを試みた。一般に Pg は地上および電離圏で明瞭な脈動として観測され、その周期は約 100 秒であり Pc4 周

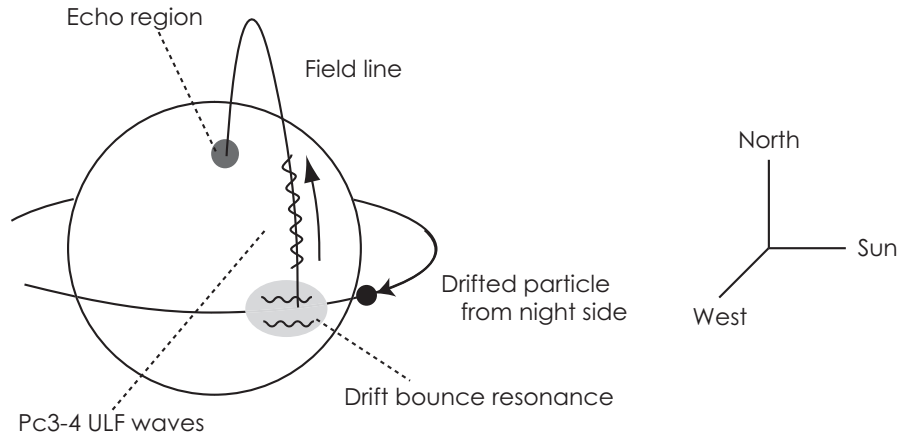


図 4.2: ドリフト共鳴による Pc3-4 脈動の発生・伝播機構モデルを本イベントに適用した場合の概略図

波数帯に属する。また、近年では電離圏のより詳細な空間スケールの観測から、経度方向に高い波数をもつ Pg が観測されている。この Pg は、高い波数を持つことから、強い減衰を受けて地上で観測されないため、Pg-like の脈動として報告されている。この Pg (Pg-like を含む) は、一般にサブストームによって磁気圏尾部から流入した粒子が grad B ドリフトによって環状電流を形成しながら西方向に drift していき、以下の共鳴条件を満たすとき、ローカルな磁場と共鳴することによって起きるドリフト共鳴が原因であると考えられている。

$$\omega - m\omega_b = N\omega_d \quad (4.1)$$

ここで ω は脈動の角周波数、 m は経度方向の波数、 ω_b 、 ω_d は共鳴点におけるバウンスとドリフトそれぞれの角周波数を表している。また、 N は高調波のモード (even か odd か) を表す整数で一般に $N = 0, \pm 1$ が適用される。また、上記のような発生機構から、ドリフト共鳴が起きるのは、環状電流が流れていると考えられる $L=3 \sim 6$ (プラズマ圏境界近辺) であると考えられている。

Wright *et al.* [2001] では、地上磁場と DOPE (DOppler Pulsation Experiment) による電離圏の観測において、 P_g が観測されているときに POLAR 衛星で観測された となるような Bump-on-tail のイオン分布から、およそ $10keV$ のエネルギーを持った粒子が P_g の原因となっていることを報告している。ここでは粒子の分布関数を、は粒子のエネルギーを表している。また、Baddeley *et al.* [2002] は、Finland レーダーと EISCAT ヒーターによる電離圏加熱を行う観測において、地上で観測されないような小さいスケール ($m=45 \pm 10$) を持った P_g でも、同様に $10keV$ のエネルギーを持つ粒子が原因となっていることを示している。

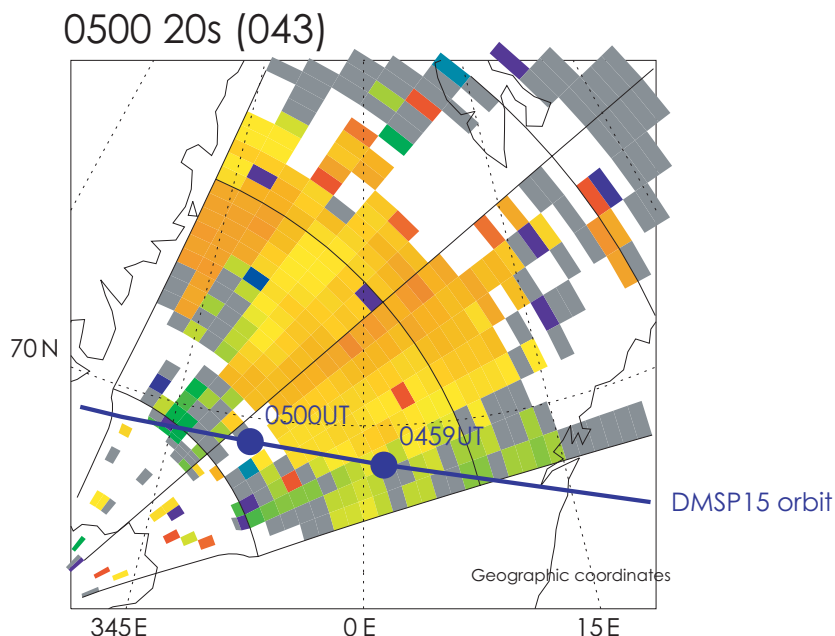


図 4.3: 2002 年 2 月 12 日 0500:20UT における Iceland East HF レーダーのグローバルスキャンデータと、DMSP (F15) 衛星の軌道投影点。軌道投影点上の時間は UT を表している。

本観測では、0500UT 付近に DMSP 衛星の北半球への軌道投影点が特別観測ビームのエコー領域付近を通過しているため、これらの観測結果と簡単な比較をすることが出来る。図 4.3 は Iceland East レーダーの 0500UT におけるグローバルスキャンに、DMSP 衛星の軌道投影点を重ねたものである。このとき DMSP 衛星は磁気圏の南半球側に位置している。0459UT ~ 0500UT に DMSP 衛星の軌道投影点がエコー領域付近を通過するのがわかる。また図 4.4 は 0456UT ~ 0502UT に DMSP 衛星によって観測されたイオンと電子のエネルギー分布図である。この図から、DMSP 衛星の軌道投影点がエコー領域に入ったと思われる 0459UT 頃から、 $10keV$ 付近のイオンの分布が上昇しているのがわかる。残念ながら、DMSP 衛星では観測された粒子のピッチ角のデータが入手できていないため、ドリフト共鳴の共鳴条件を満たすような粒子かどうかを議論することは出来ない

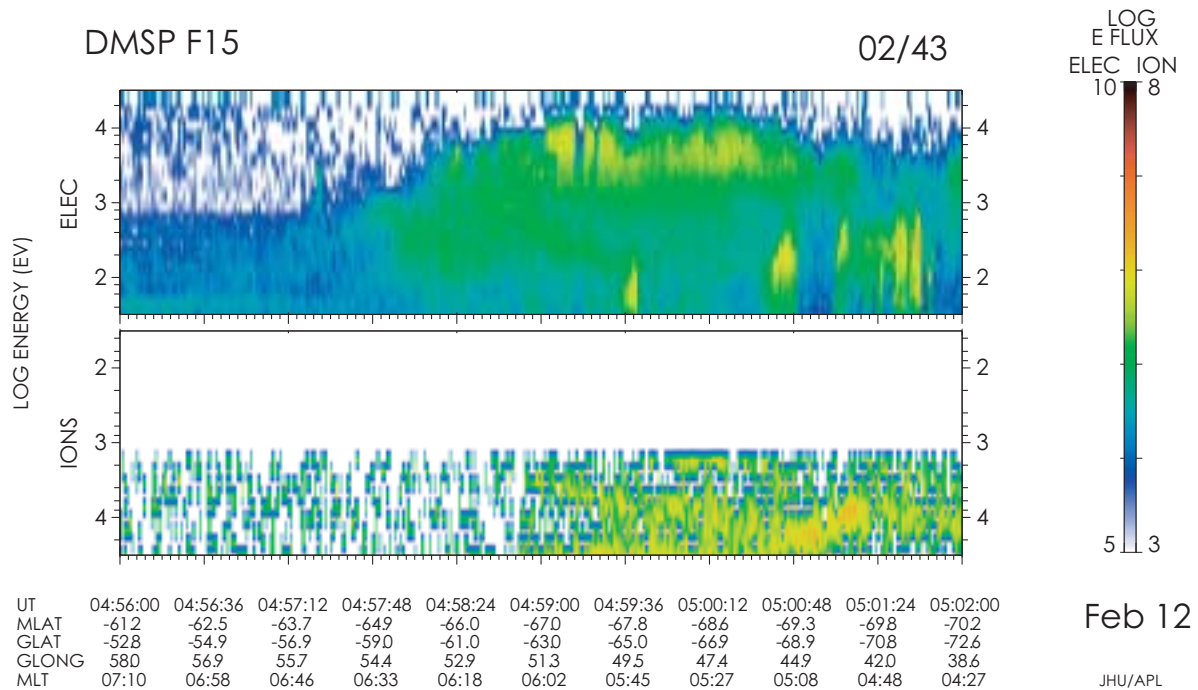


図 4.4: 2002 年 2 月 12 日 0456UT から 0502UT までに DMSP (F15) 衛星によって観測されたイオンと電子のエネルギー粒子密度分布。横軸は時間、縦軸はログスケールによってエネルギーを表している。

が、Wright *et al.* [2001] や Baddeley *et al.* [2002] で Pg の発生原因であるとされたエネルギーイオンと同じエネルギーをもったイオンの増加が見られることから、本観測で得られた脈動がドリフト共鳴によって発生した可能性があると考えられる。

さらに、図 4.5 は IMAGE 磁力計ネットワークで観測された 0000UT ~ 1200UT までの磁場を示したものであるが、0100UT 頃から 0400UT 頃まで規模は小さいがサブストームが起きているのがわかる。ドリフト共鳴は、上述のようにサブストームによって内部磁気圏に流入した粒子が原因であると考えられているため、このサブストームは本イベントで観測された脈動がドリフト共鳴で発生したことを示唆する。

しかしながら、本観測では図 3.7 に示されるように、レンジ 25 を境にして反対方向の伝播方向を持っていた。ドリフト共鳴は流入した粒子が西方向にドリフトしていきローカルな磁場と共鳴することによって起こるため、一般に地上もしくは電離圏で観測される場合、西向きに伝播する脈動として観測される。そのため、本イベントで観測されたような脈動を説明することは不可能である。

ここで、特別観測ビームの方向について考える。本イベントで観測された脈動は Iceland East レーダーのビーム 5 によって観測されている。このビーム 5 はほぼ磁気経度方向を向いていると考えられるが、実際にはわずかに北方向を向いている。表 4.1 は Iceland East レーダーのビーム 5 におけるレンジ 23 ~ 27 の磁気緯度・磁気経度を示している。もし、脈動が緯度方向に対して高緯度、低緯度とも遅れるような脈動であった場合、この表から、レンジ 25 を境にして位相が遅れるような脈動を観測することは可能である。通常ドリフト共鳴が原因

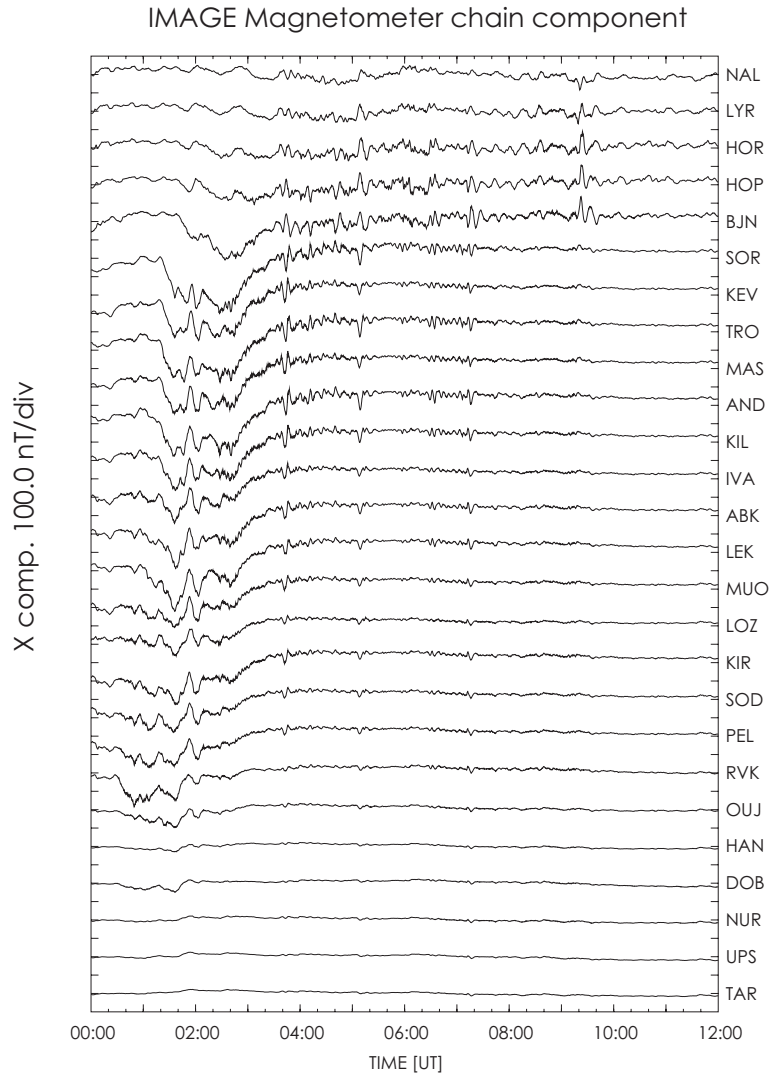


図 4.5: 2002 年 2 月 12 日 0000UT から 1200UT に IMAGE 磁場観測チェーンによって得られた地上磁場 X 成分の時系列プロット。上から順に高緯度の観測点から低緯度の観測点を表している。縦軸は磁場強度、横軸は時間を表している。

となり地上磁場の固有振動を励起する磁力線共鳴による脈動は、L-shell が大きいほど伝播経路が長くなるため位相が遅れる。そのため、高緯度側では常に位相が遅れると考えられている。しかしながら、これまでの研究で、低緯度側で位相が遅れるような Pc5 脈動が報告されており [Yoeman *et al.*, 1992; Fenrich and Samson, 1997; Waldock *et al.* 1983]、これは次のようにして説明される。通常、磁力線を伝播してくる波の速度は Alfvén 速度で表される。この Alfvén 速度は式 1.1 に表されるように、密度に反比例するため、プラズマ圏境界付近では Alfvén 速度が急激に減衰する。このため、観測された脈動がプラズマ圏境界付近を伝播してくるとき、地上および電離圏で観測される脈動は低緯度側の位相が遅れて観測される。

このような機構を、本イベントで観測された脈動に対して適用した場合、レンジ 25 付近にプラズマ圏境界が存在すれば、結果としてレンジ間の位相がレンジ 25 を境に遅れる可能性が示唆される。

表 4.1: Iceland East レーダーのビーム 5 におけるレンジ 23 からレンジ 27 までの磁気緯度・磁気経度

レンジ番号	磁気緯度	磁気経度
23	72.18	87.78
24	72.42	88.85
25	72.65	89.93
26	72.88	91.05
27	73.10	92.20

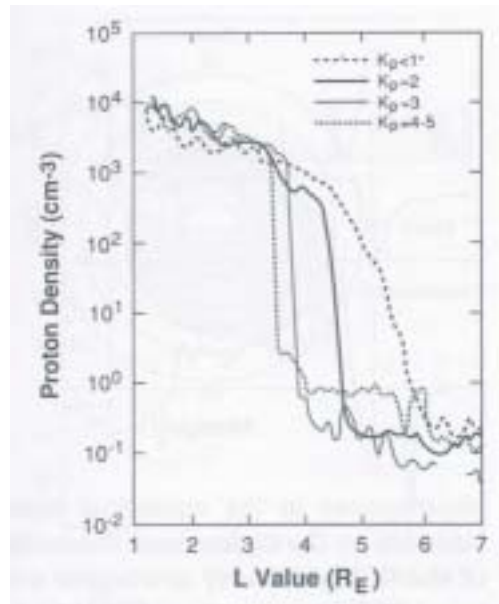


図 4.6: 地磁気擾乱度 (k_p) ごとの L 値によるプロトン密度の変化。(Adapted from Chappell [1972])

しかしながら、一般にこのような高緯度にプラズマ圏境界が位置していることは考えにくい。図 4.6 は Chappell [1972] によって示された、地磁気活動度 (k_p) 毎のプロトンの密度分布である。横軸は L 値、縦軸は密度を表している。本イベントが起こっている 0440UT ~ 0510UT では、 $k_p=2+$ であったため、プラズマ圏境界は図 4.6 よりおよそ $L=4.5$ の位置にあると考えられる。本イベントで脈動が観測された領域は $L \sim 7$ 程度に位置しているため、プラズマ圏境界の密度勾配による位相の遅れによって、Iceland East レーダーでの逆向きの伝播方向を説明することは出来ないと示唆される。

4.1.1.2 地上磁場との相関について

一般に、地上で観測される磁場の変動は電離圏電場の変動により引き起こされるため、周囲 120km 程の電離圏の変動を積分した値を観測することが知られている。さらに、電離圏での脈動は e^{-kZ} の減衰を受けて地上で観測されることが Hughes and Southwood [1976] によって示されている。ここで、 k は磁力線に垂直方向の波数ベクトル [km^{-1}]、 Z は電離圏 E 層の高度 [km] である。これは、脈動の波数ベクトルが大きいほど地上で磁

場変動として観測されにくいことを示している。通常、 k は経度方向の波数 m ($=Lk$ L は系の長さ [km]) という無次元量に置き換えられる。一般に、地上で明瞭に観測できる波数は ~ 20 までと言われている。Poulter and Allan [1983] は STARE VHF レーダーによる電離圏の観測から、約 $9\text{mHz} \sim 10\text{mHz}$ のスペクトルピークを持つ波数 17 の脈動を観測している。このとき、脈動が観測された領域のほぼ直下にある磁場観測点では、電離圏電場脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つ明瞭な磁場脈動を観測している。本観測で得られた電離圏電場脈動の経度方向の波数は -9 と 5 であった。これは、Poulter and Allan [1983] で観測された脈動の波数より小さく、Hughes and Southwood [1976] によれば十分地上で観測される脈動であることが判明した。

また、Walker et al. [1979] は、STARE レーダーによって観測された電離圏 Pc5 脈動について、Biot-Savart の法則を用いて地上磁場変動を見積もっている。彼らは、電離圏 Pc5 脈動の変動から見積もられた地上磁場変動と、地上磁場観測点で実際に観測された Pc5 脈動の変動がよく一致することを示している。本イベントでは簡単なモデルによる地上磁場変動の大きさを次のように求めた。観測によって得られたドップラー速度変動の振幅 400m/s と、IGRF (International Geomagnetic Reference Field) モデルによるエコー領域でのローカルな磁場強度 $\sim 50000\text{nT}$ から、 20mV/m の電離圏電場変動が見積もられる。この電場変動と、京都大学 World Data Center for Geomagnetism で提供されている電離圏電気伝導度モデルによって算出された高さ方向に積分された電気伝導度 2.282S を用いて、特別観測ビームで観測されたエコー領域でのみ流れている線電流であると仮定した場合、電離圏 E 層における電流はおおよそ 450A であると見積もられる。Biot-Savart の法則から地上での磁場変動を求めた結果、おおよそ 1nT という値が得られた。また、Walker et al. [1979] では、14MLT 付近で起こった 400m/s 程度の電離圏 Pc5 脈動の振幅によって 30nT 以上振幅を持つ地上磁場 Pc5 脈動が観測されている。この値の差は、考えている領域の広さや、電気伝導度の差によると考えられるが、本観測で得られたエコー領域だけの電流だとしても、少なくとも 1nT 以上の地上磁場の変動が期待される。

しかしながら、本イベントでは観測された電離圏電場脈動と同じ周波数にスペクトルピークを持つ地上磁場の脈動は、脈動が観測された領域近くに位置する Jan Mayen を含めた全ての観測点で観測されていない。この結果は、これまでに考えられている波数による説明では解釈することができない。そのため、以下のような場合について考察した。

図 4.7 は、本イベントで使用した地磁気観測点の地図上に、Iceland East レーダーによって 0459UT に得られたグローバルスキャンのデータを重ねたものである。もし、特別観測ビームによって観測された脈動が、このパッチ状のエコー領域のみで起きている現象だと仮定すれば、ほぼ全ての観測点で Iceland East レーダーで観測された脈動と同周波数の脈動は観測されないと考えられる。しかしながら、Jan Mayen 観測点は、最も脈動が観測されたエコー領域に近く、わずかながらこのパッチ状のエコー領域の内側に位置しているため、脈動を観測できると示唆される。ここでエコー領域の高度について考える。このグローバルスキャンのデータは、エコー領域を高度 400km と仮定して描かれている。しかしながら、もしエコー領域が高度 200km であったと仮定した場合、図 4.8 のようになり、Jan Mayen はパッチ状のエコー領域の外端に位置することになる。このように、エコー領域の高度によってレンジの位置する緯度・経度が変化するため、パッチ状のエコー領域の外端に位置する、Jan Mayen でも Iceland East レーダーで観測された脈動と同周期の脈動を観測することができない

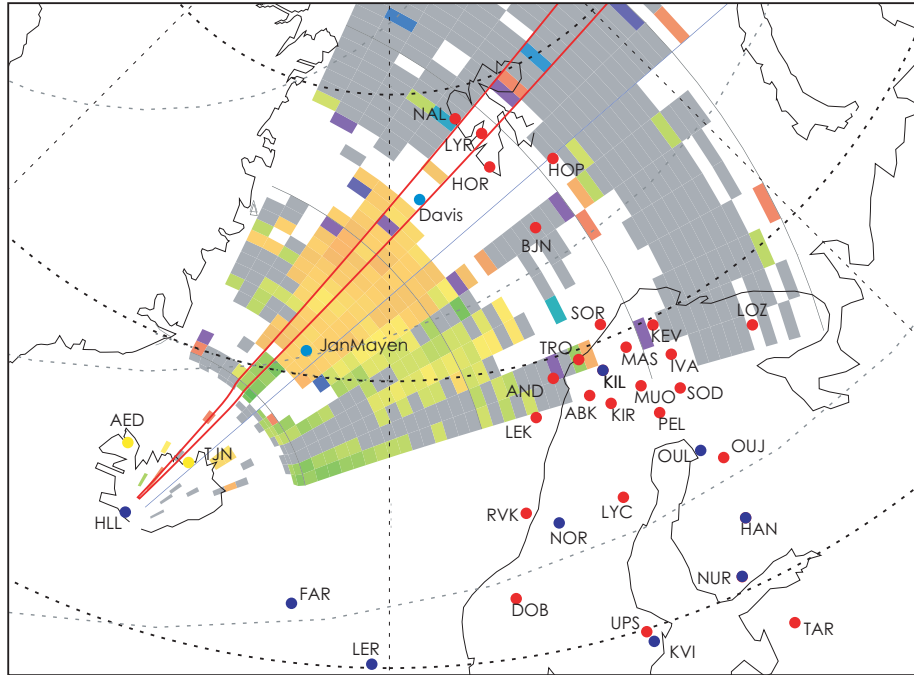


図 4.7: Iceland East HF レーダーのグローバルスキャンで観測された 0457UT におけるドップラー速度と、地上磁場観測点。グローバルスキャンのデータは高度 400km をエコー領域として計算している。グローバルスキャンデータ中に見える赤い線は、特別観測ビームのビーム幅を表している。

可能性が示唆される。

また、本イベントでは、一本の特別観測ビームでのみ高時間分解能観測を行っており、緯度方向の波数を知ることができない。しかしながら、もし特別観測ビームと隣り合うビームの間に逆位相、すなわち 180° の位相差があるとし、高緯度方向の位相が遅れているとした場合、式 3.1 から、磁気緯度方向におよそ 160 から 220、磁気経度方向におよそ 45 から 60 という波数を持つことになる。このため、隣り合うビーム間で逆位相に近い脈動が存在する場合、すなわち脈動が緯度方向に非常に高い波数を持っている場合、地上磁場では観測されない可能性が示唆される。

さらに、ほぼ全ての地上磁場観測点では Iceland East レーダーで観測された脈動とは違う周期の脈動が観測されている。特に、Jan Mayen では明瞭な 11mHz ~ 12mHz のスペクトルピークが図 3.29 によって示されている。これは、Iceland East レーダーで観測された脈動とは違う周期の脈動が広い範囲で存在することを意味する。そこで次のような場合について考察した。

図 4.9 は、Iceland East レーダーにおける特別観測ビームのドップラー速度の RTI プロットである。この図では縦軸は磁気緯度となっており 70° から 72° までを、横軸は Iceland East レーダーで周波数解析を行った 0455UT ~ 0502UT の時間帯を表している。ここで赤い矢印で示されている緯度は、Jan Mayen の位置している磁気緯度 70.28° である。この図から、レンジ 25 付近で見られた明瞭な脈動現象とは反対方向の速度を持っていることがわかる。また、エコーは少ないが、わずかに周期的な変動を見ることができる。ここで、もし、これらが脈

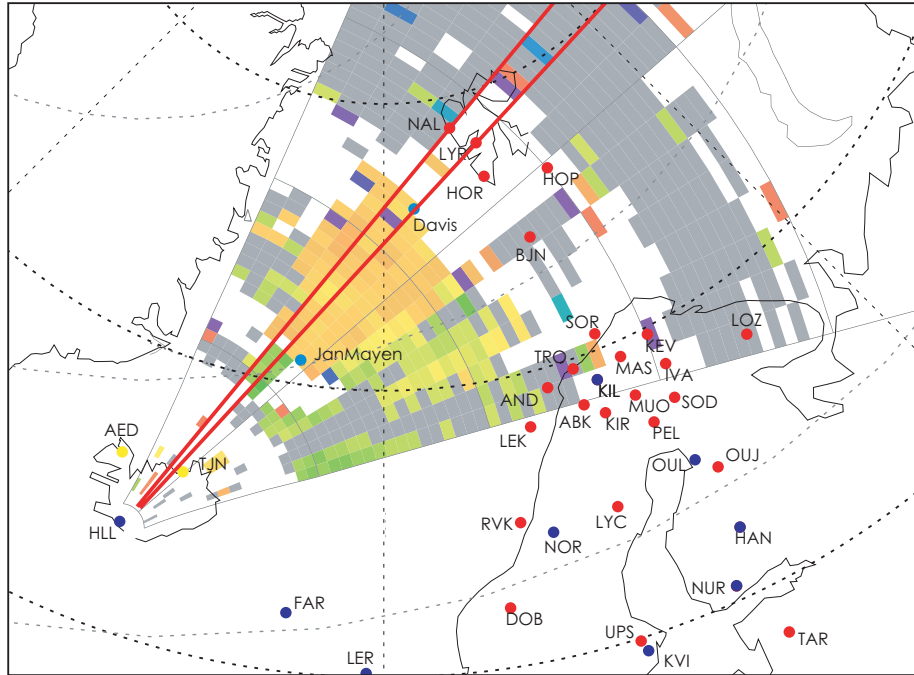


図 4.8: 図 4.7 と同様のプロットを、高度 200km からをエコー領域として計算したグローバルスキャンデータで表したものの。

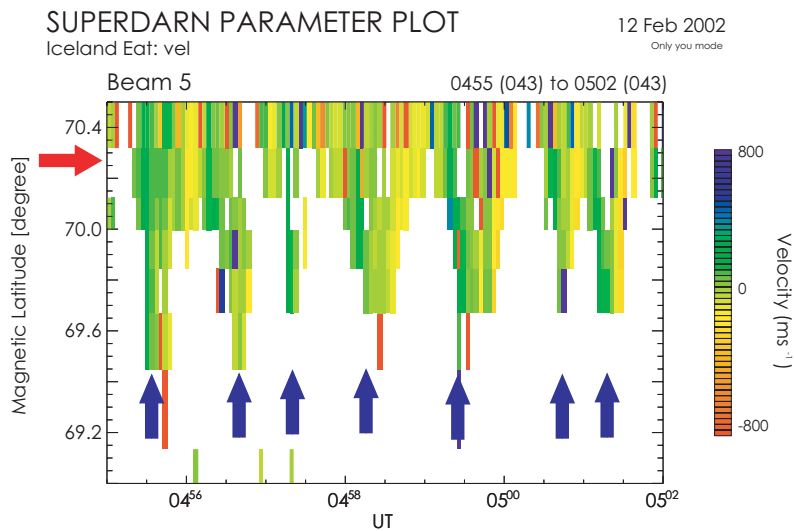


図 4.9: Iceland East HF レーダーの特別観測ビーム 5 におけるドップラー速度の RTI プロット。縦軸が磁気緯度で表されており、 69° から 70.5° までとなっている。横軸は時間幅を 0455UT ~ 0502UT で表している。

動現象を表しており、図中の青の矢印によって表されているような、速度の大きいときが振動のピークであったとすると、この周期はおよそ 30 秒 ~ 75 秒程度となり、周波数にして $13\text{mHz} \sim 30\text{mHz}$ の脈動ということになる。この周波数帯は、Jan Mayen で観測された脈動の周波数を含む。このため、Jan Mayen で観測された脈動

が Iceland East レーダーの低緯度側のレンジで観測された脈動によるものであることが示唆される。また、このような反対方向の速度は図 3.9 よりビーム 13、14、15 付近でも観測されている。さらに、本イベントにおいて、多くの地上磁場観測点で観測されている脈動は $12\text{mHz} \sim 13\text{mHz}$ と $20\text{mHz} \sim 25\text{mHz}$ であったことから、これらの反対方向の速度が上記のような $13\text{mHz} \sim 30\text{mHz}$ の脈動成分を有していたとすれば、この脈動が地上磁場観測点で観測された脈動を起こす可能性があると考えられる。

以上のような考察から、Iceland East レーダーで観測された電離圏電場脈動は磁場観測点がない領域に局在していたために、観測点では脈動を観測できなかった可能性が示唆された。また、地上磁場観測点で観測された周波数の違う脈動は、局在した脈動とは逆方向の速度を持つ、同時に発生していた別の脈動を観測していた可能性が示唆された。

4.1.1.3 南北非共役性について

本イベントでは、CUTLASS HF レーダーの磁気共役レーダーである、南極に設置された Syowa East レーダーと Kerguelen レーダーの電離圏電場データ、および、脈動が観測されたエコー領域の磁気共役点である南極 Davis 基地での磁場データについても解析を行ったが、Iceland East レーダーで観測された Pc3-4 脈動は、南極においてまったく観測されていない。通常、ドリフト共鳴が原因となり磁力線の固有振動を励起する磁力線共鳴による脈動であった場合、南北両半球の磁気共役点ではほぼ同じ脈動が観測される。しかしながら、本イベントでは、Syowa East レーダーで明瞭なエコーが観測されていたにも関わらず、脈動が観測されていない。また、Davis 基地においても、脈動は観測されていない。

Saito et al. [1989] は、磁気共役点の関係にある Iceland 磁力計と南極昭和基地において、Pc3-5 脈動のパワーの日変化および季節変化について報告している。彼らは、統計的な観測結果から、Pc3-5 脈動は夏半球よりも冬半球のほうが、相対的にパワーが大きいことを示している（図 4.10 参照）。さらに、Iceland Tjornes と昭和基地での Pc3-5 脈動では、春もしくは秋において、午前側では北半球のパワーが、午後側では南半球のパワーが相対的に大きいことを示している。彼らは、これらの効果が、太陽によって照射された電離圏が、磁気圏から地上へと伝播する脈動を減衰もしくは遮蔽してしまうことによるものであると示唆している。本イベントで得られた Pc3-4 脈動は 2 月 12 日の朝方に観測されており、*Saito et al.* [1989] の定義では春となることから、北半球での Pc3-4 脈動のパワーが南半球に比べて大きいことになる。しかしながら、*Saito et al.* [1989] では、データ収集の際に磁気共役点で同時に Pc3-5 脈動が観測されているイベントのみを抽出しているため、本イベントのように磁気共役点でまったく観測されていないイベントについては対象外となる。また、図 4.10 に示されているように、このような朝方のパワーが強い傾向が見られるのは 0500UT 頃からであり、本イベントで Pc3-4 脈動が観測された 0440UT ~ 0510UT では、ほとんどその効果はないと言える。さらに、これらの結果は Pc3 脈動、もしくは Pc5 脈動において顕著な傾向として得られおり、本イベントで観測されたような $10\text{mHz} \sim 20\text{mHz}$ 程度の Pc3-4 脈動に関しては、あまり顕著な結果としては得られていない。このため、*Saito et al.* [1989] が示唆しているような太陽の照射によって電離圏が脈動の伝播を遮蔽するような効果は、本イベントで観測された

Pc3-4 脈動においては少ないと考えられる。

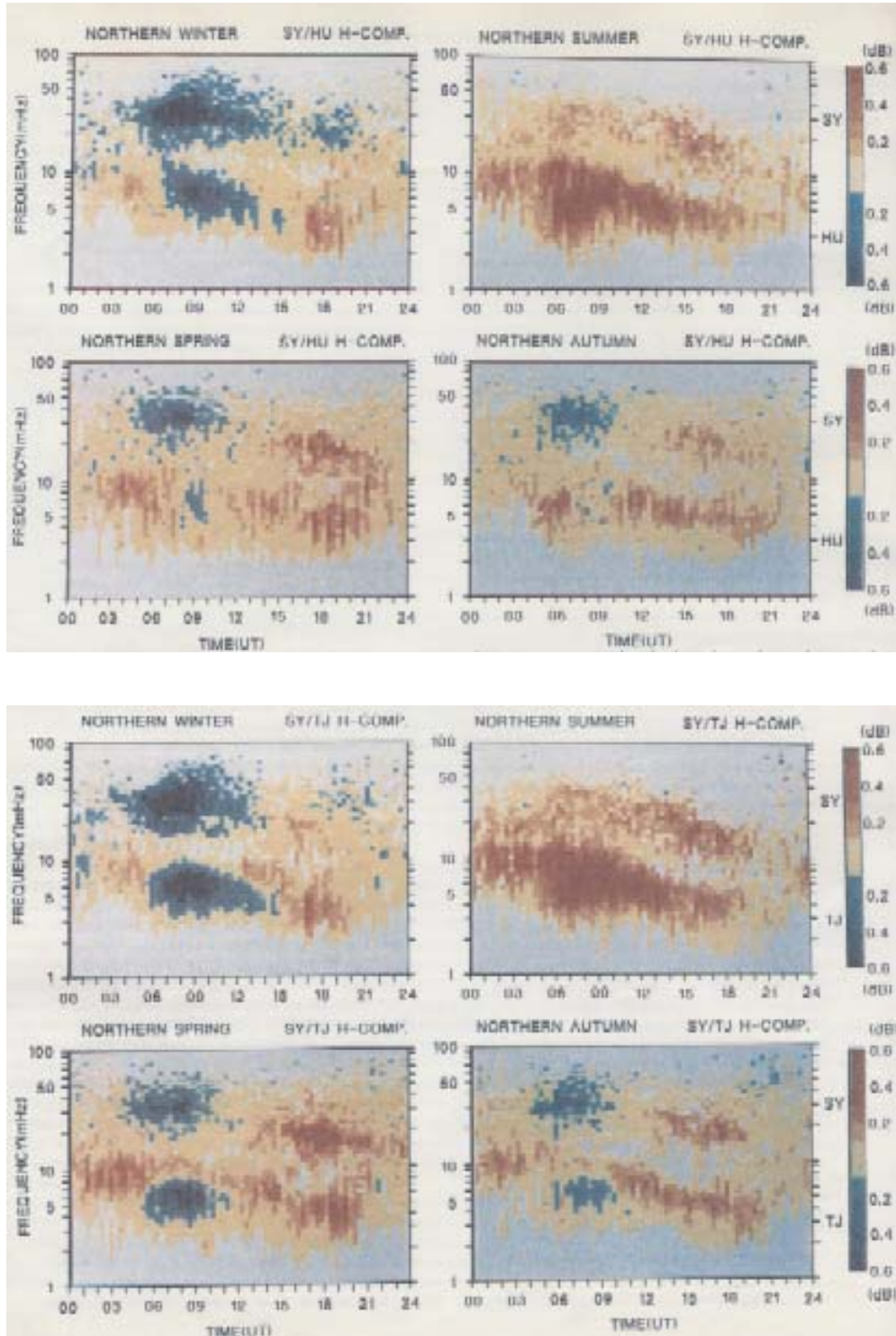


図 4.10: 磁気共役点観測による Pc3-5 脈動パワー比の日変化および季節変化。上段が昭和基地と Iceland Husafell のパワー比を、下段が昭和基地と Iceland Tjornes のパワー比をあらわしている。(Adapted from Saito et al. [1989])

以上のことから、本イベントで観測された Pc3-4 脈動は北半球のみで発生している現象であることが示唆され、同時にドリフト共鳴などの磁力線共鳴による脈動ではない、別の発生伝播機構による脈動である可能性が示唆される。

4.1.1.4 GEOTAIL で観測された磁場変動について

GEOTAIL 衛星では、Iceland East レーダーによって Pc3-4 脈動が観測され始めた 0440UT 頃から磁場が南向きに变化するのが観測されており、脈動が観測されなくなる 0505UT 頃までの間、南向きの磁場を観測している。このとき、GEOTAIL は昼側シース領域の 9MLT に位置しており、観測された磁場はほぼ IMF と同等と考えることができる。また、このとき地球から太陽方向に $230R_E$ 離れた惑星間空間に位置していた ACE 衛星でも同様の磁場の変動を観測している。この磁場の南向きへの変化によってリコネクションが起こり、太陽風の粒子が地球磁気圏内に多く流入することによって、電離圏内の電子密度擾乱が増加し、HF レーダーによって脈動が観測されたのではないかと考えられる。

4.1.1.5 モデル 1 のまとめ

これまでの地上や衛星観測から得られている古典的な Pc3-4 脈動と同様に磁力線の共鳴現象によって脈動が電離圏まで到達する場合について考察を行った。しかしながら、このような磁力線共鳴モデルでは、本観測で得られた脈動の位相変化、地上磁場との相関、および南北非共役性などの特性を十分に説明することができないことが明らかになり、これまでの古典的な Pc3-4 脈動とは違う脈動である可能性が示唆された。

4.1.2 モデル 2

4.1.1.5 のように、これまでの観測や研究によって得られている古典的な Pc3-4 脈動の発生や伝播機構では、本イベントで得られているような脈動の位相関係や地上磁場との関係を十分に説明することはできないことから、別の発生、伝播機構による脈動である可能性が示唆された。

ここで、本イベントではエコーパワーがドップラー速度と同様に周期的に変動していることに着目し、粒子の振込みによって電場変動が起きた場合について考察する。

4.1.2.1 発生機構について

本イベントでは、前述のように、ドップラー速度だけではなく、エコーパワーにも Pc3-4 脈動を見ることができた。エコーパワーの増加は、電離圏の不規則電子密度分布 (FAI) が増加した結果であると考えられ、この FAI を増加させる原因のひとつとして電子の振込みが考えられる。もし、この電離圏に振り込んできた電子が、何らかの機構によって Pc3-4 脈動に modulate され、その脈動成分を有していたとすれば、その振込みによってできる電場変動が、電離圏電場 Pc3-4 脈動として HF レーダーによって観測されるのではないかと考え

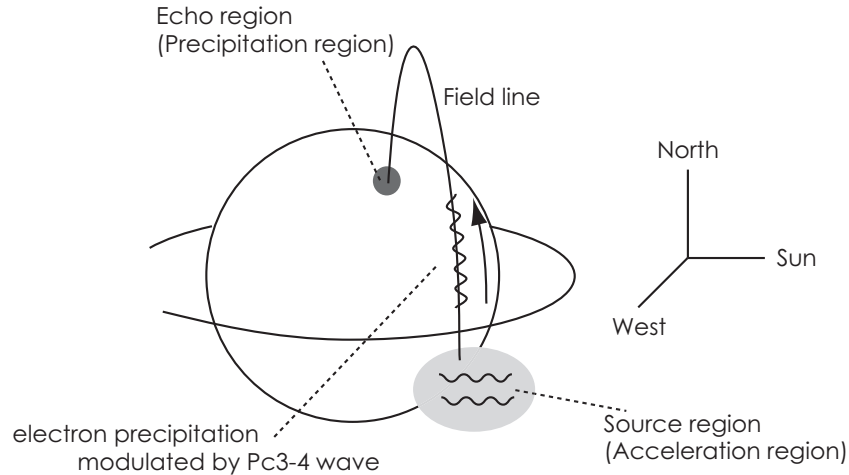


図 4.11: 電子振込みによって発生する電離圏電場変動

られる（図 4.11 参照）。このような発生機構の例として、*Engebretson et al.* [1990] が、フォトメーターによるオーロラの観測や地上磁場の観測から、磁力線共鳴による伝播ではなく、電子フラックスが電離圏に直接侵入するような Pc3-4 脈動に関して報告している。彼らは、地上のカスプ/クレフト（Cleft）域付近で Pc3-4 脈動が観測されている期間に観測された、発光強度の振動が Pc3-4 脈動周期の振動成分を持つ局所的なオーロラについて、オーロラを発光させるような 1keV 以下の振込み電子が、シース領域内に存在する Pc3-4 脈動によって modulate されて電離圏に到達したために観測されたのではないかとしている。また、*Sato and Matsudo* [1986] と *Sato and Kokubun* [1981] では、 10^{-2}nT のごく小さな振幅の地上磁場変動を伴う Pc3-4 周期の Type-2 準周期的 VLF エミッションについて、磁気圏で Pc3-4 脈動の modulation を受けた振込み電子による電離圏電気伝導度の modulation が原因であるとしている。

このような電子の振込みは、振り込み領域の FAI を増加させると考えられている。このため、何らかの機構によって Pc3-4 脈動に modulate された 1keV 以下の電子が電離圏に振り込んだと仮定すれば、本イベントで HF レーダーによって観測された明瞭で局所的な電離圏 Pc3-4 脈動を説明できる可能性が示唆される。また、本イベントでは、図 4.4 に示されるように、エコー領域付近で 1keV 以下の電子の振込みが増大していることが DMSP 衛星によって観測されている。残念ながら、DMSP 衛星の軌道投影点は 1 分強でエコー領域から出て行ってしまうため、観測された電子の振込みが Pc3-4 脈動の成分を有しているかどうかは議論できないが、少なくとも観測された電子フラックスによる FAI の増加が示唆される。

図 4.12(a) は電子フラックスの振込みによってドップラー速度が変動する機構について示したものである。まず、局所的な電子フラックスの振込みによって FAI が上昇し、振込み領域以外のところに比べ電離が進む。この領域は、背景電場、すなわち電離圏対流電場によって分極され、電離圏対流電場とは反対方向の分極電場を生み、結果として電離圏対流電場を減少させる。すなわち、電離圏対流電場が減少すれば HF レーダーによって観測されるドップラー速度も減少すると考えられる。このため、この電子フラックスの振込みが Pc3-4 脈動によって modulate されて周期的に変動すれば、エコーパワーとドップラー速度で同じ周期の Pc3-4 脈動が現れ

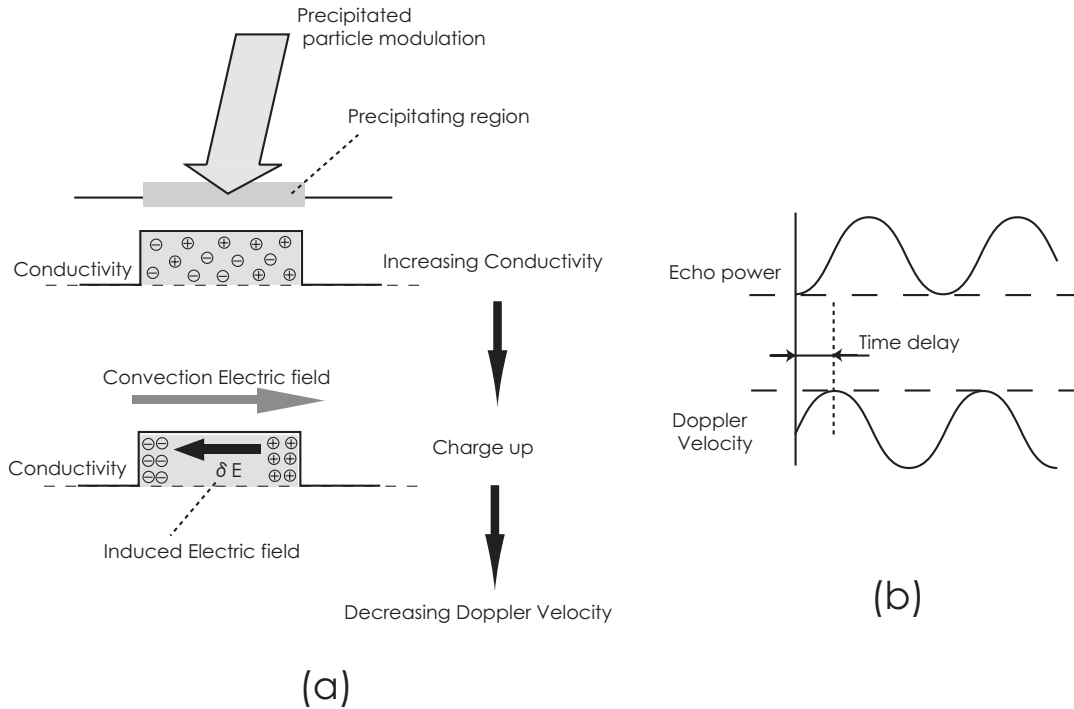


図 4.12: 電子の振込みにによって変動するドップラー速度とエコーパワーの関係についての概略図

と考えられる。

また、本イベントではドップラー速度とエコーパワーに位相差が見られた。これは、上述のような電場の変動を考えた場合、振込みにによって FAI が上昇し、エコーパワーが上昇してから、ドップラー速度の減少が起きるまでの時間差であり、図 4.12(b) に示されているように、ドップラー速度がエコーパワーに対して位相が進んでいるという状態は、ドップラー速度の減少し始める時間がエコーパワーの上昇し始める時間に対して遅れていると言い換えることができる。実際に電子フラックスの振込みにによって FAI が生成されるまでも数秒の時間遅れが存在し、さらに、その振込み領域が電離するまでも数秒の時間遅れが存在する [Roble and Rees, 1977]。この時間遅れが、本イベントで観測された位相差である可能性が示唆される。

さらに、通常、SuperDARN レーダーによって観測される Pc5 脈動のような磁場の振動として電離圏に伝播すると考えられている脈動では、HF レーダーのエコーパワーは図 4.13 のようになる。これは 2002 年 1 月 17 日に Finland レーダーで得られた 0400UT から 0600UT までのドップラー速度とエコーパワーを示したものである。この図において、ドップラー速度では Pc5 脈動の変動が見えるのに対して、エコーパワーでは全体的なエコーパワーの上昇は見られるものの、周期的な変動は見られない。このことから、本イベントで得られた Pc3-4 脈動は磁場の変動として電離圏に伝播した脈動ではない可能性が示唆される。

以上のことから、本イベントで HF レーダーによって観測された電離圏電場 Pc3-4 脈動は、これまでの磁力線共鳴モデルによる Pc3-4 脈動の伝播とは異なり、むしろ Pc3-4 脈動によって modulate された電子フラックスの振込みによるものである可能性が示唆される。

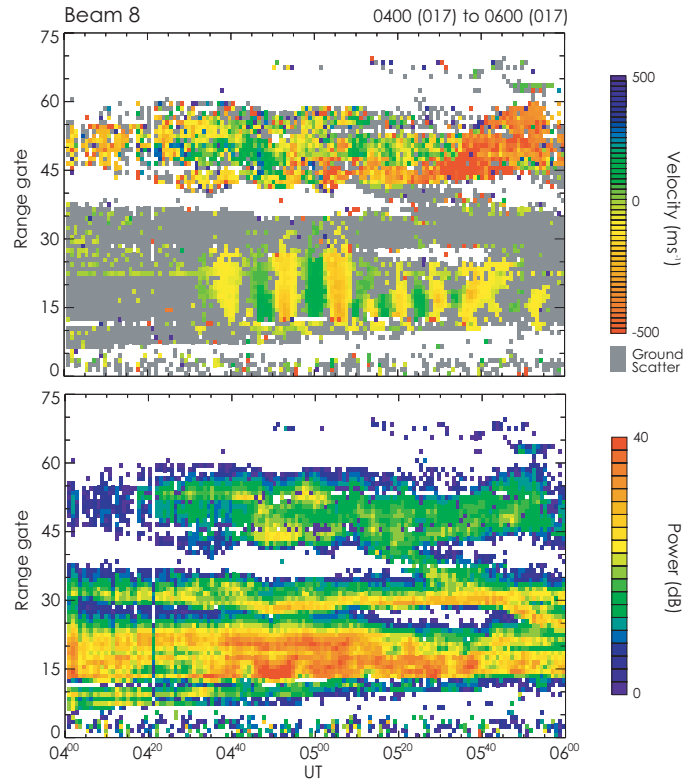


図 4.13: SuperDARN によって観測された古典的な Pc5 脈動。上段はドップラー速度、下段はエコーパワーとなっている。

4.1.2.2 伝播および地上磁場との相関

前節のような電子フラックスによる電離圏電場の変動においても、電気伝導度が上昇することによって電流が流れるため、その電流に伴う磁場変動が地上で観測されと考えられる。しかしながら、本イベントでは地上磁場の変動はどの観測点においても観測されていない。これは次のように考察される。

図 4.14 は、磁気圏内で Pc3-4 脈動の modulation を受けた電子フラックスが電離圏に伝播する様子を示した略図である。ここで、磁気圏内における脈動の発生領域が非常に狭く、電子フラックスを modulate するような Pc3-4 脈動が非常に大きな波数を持っていたと仮定する。これらの電子フラックスは、それぞれ磁力線に沿って電離圏へと振り込む。このとき、地上で HF レーダーが観測していた領域が図 4.14(b) のような領域であったとすると、エコー領域内で得られるドップラー速度変動は、Pc3-4 脈動の周期と大きな波数をもつ脈動の一部分であることになる。前述のように、地上磁場の変動は脈動の波数によってその振幅が決まり、 e^{-kz} の減衰を受ける。このため、図 4.14(a) のような脈動であった場合、地上では磁場変動が観測されない可能性が示唆される。

また、このように、Pc3-4 脈動に modulate されて振り込んだ電子フラックスの塊を HF レーダーが観測していたとすれば、本イベントで見られた図 4.15(a) のような RTI プロットで表される、ある点を境にした両方向への位相遅れは、電子フラックスの塊の中で起きている現象であると考えられる。もし、この電子フラックス

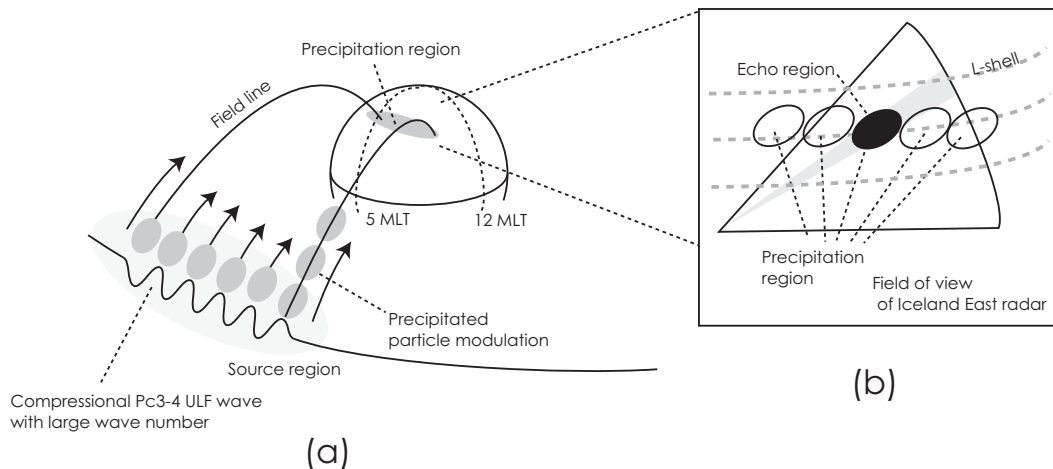


図 4.14: 大きい波数の Pc3-4 脈動によって modulate された電子の振込みによる電離圏電場脈動についての略図。

の塊の中で、図 4.15(b) に示されるような、ある点から振込み電子フラックスの塊が広がっているとすれば、電子フラックスの振込みは L-shell の長さに依存しないほど速い速度で電離圏に到達するため、緯度方向に対して位相が見られることになる。本観測で使用している Icelnad East レーダーのビーム 5 は、モデル 1 でも述べているように、わずかに磁気緯度方向を向いている。このため、このような位相差が電子フラックス内に存在すれば、本イベントで観測されたような位相差を説明することができると示唆される。

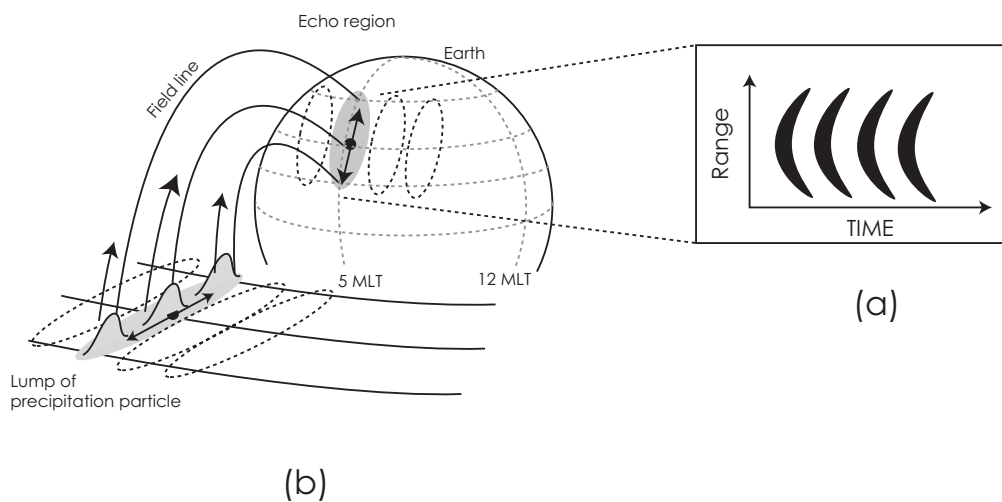


図 4.15: 発生領域における位相差と、その位相差による電離圏電場の位相および RTI プロットの概要図。

また、地上磁場で観測された、電離圏電場脈動とは違う周波数成分を持った脈動については、モデル 1 と同様に、脈動が観測されたエコー領域以外、すなわち電子の振込み領域以外の領域で起こっている脈動現象の影響であると考えられる。

4.1.2.3 南北非共役性

本イベントは、図 4.1 に示したように磁気圏の閉磁力線領域で起きていることから、上述のような発生機構を考えた場合、電子フラックスは磁力線に沿って南北両半球に振り込むと考えられる。しかしながら、Pc3-4 脈動の観測された Iceland East レーダーと磁気共役の関係にある Syowa East レーダーでは、Pc3-4 脈動は全く観測されていなかった。これは、以下のように説明できる。

本イベントが観測された 2 月 12 日は、北半球は冬半球であり 0500UT 付近は日照がない領域となる。また、南半球は夏半球であり 0500UT 付近は日照がある領域となる。電離圏の電気伝導度は日照によって大きく変動し、日照のある領域は日照のない領域に比べて電気伝導度が高い。つまり、これは日照のない北半球の電離圏電気伝導度に比べ、日照のある南半球の電離圏電気伝導度が高いことを意味している。このため、電離圏で Pc3-4 脈動が観測された、日照のない電気伝導度の低い北半球では、電離圏に振り込んだ電子フラックスによってできる電気伝導度は、振り込み領域周辺の電気伝導度に比べ非常に高く、それによってできる分極電場も大きくなる。一方、日照のある電気伝導度の高い南半球では、電離圏に振り込んだ電子フラックスによってできる電気伝導度は、振り込み領域周辺の電気伝導度と比べ非常に小さく、それによってできる分極電場も小さくなる。

このため、日照のない北半球では、大きな分極電場のために HF レーダーによって顕著な電場変動として観測され、日照のある南半球では、小さい分極電場のために HF レーダーによって電場変動が観測されなかった可能性が示唆される。

4.1.2.4 GEOTAIL 衛星で観測された磁場変動について

GEOTAIL 衛星によって観測された南向きに変化する磁場変動は、モデル 1 と同様に、電離圏の電子密度擾乱が増加し、さらに、電離圏対流を増幅させたと考えられる。さらに、この南向きへの変化が、HF レーダーによって Pc3-4 脈動が観測され始める時間と一致することから、Pc3-4 脈動によって modulate された電子の振込みのきっかけになった可能性が示唆される。

4.1.2.5 モデル 2 のまとめ

Pc3-4 脈動によって modulate された電子の振込みによる電場変動であった場合について考察を行った。その結果、本観測で得られている、古典的な Pc3-4 脈動では説明することのできないいくつかの特徴について、本モデルを用いることで説明できることが示唆された。

4.1.3 まとめ

本イベントで得られた $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ の電離圏電場脈動は、これまでに報告例のない高緯度電離圏電場 Pc3-4 脈動であった。本イベントの現象について、磁場の脈動として伝播するような古典的な Pc3-4 脈動であるモデル 1 と、Pc3-4 脈動によって modulate された電子の振込みによる電場変動というモデル 2 の二つのモデル

ルについて考察を行った。その結果、電子の振込みによる電場変動であるとするモデル2の方が、古典的な伝播・発生機構であるモデル1より、本イベントの現象をよく説明できるということが明らかになった。図4.16は、本イベントの発生機構について、モデル2を適用した場合の略図を示したものである。

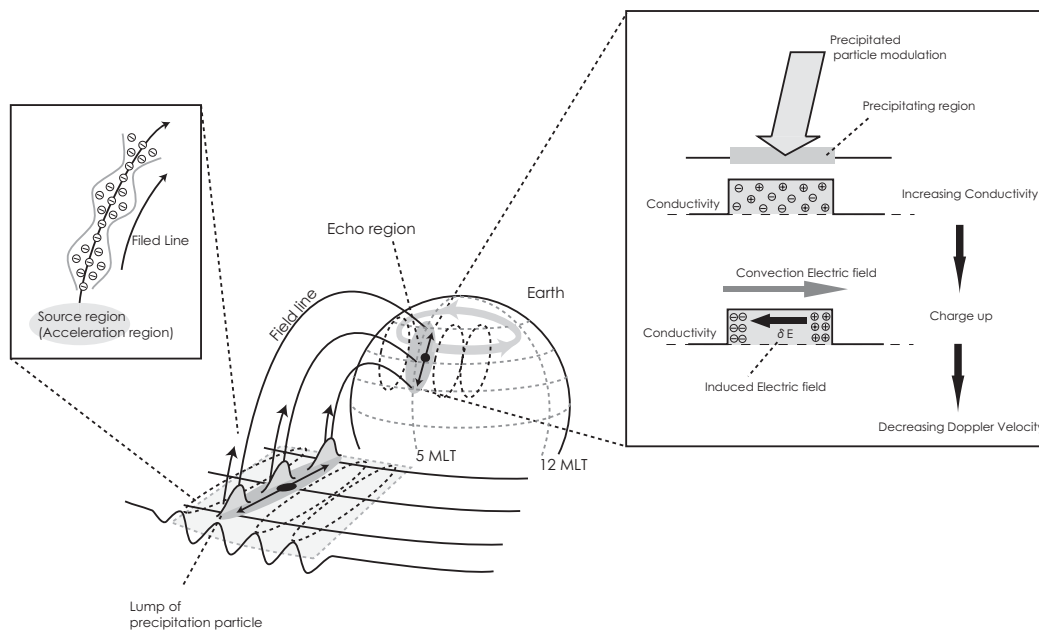


図 4.16: イベント 1 に、モデル 2 を適用した場合の発生・伝播機構に関する概略図。

4.2 観測イベント2

2003年2月17日に行われた GEOTAIL/SuperDARN 同時観測と EISCAT ヒーターによる電離圏加熱実験の特別観測において、1330UT~1400UT に EISCAT ヒーター上空の加熱領域から $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の Pc3-4 脈動が Finland レーダーによって観測された。図 4.17 は、このイベントについてまとめた略図である。本イベント

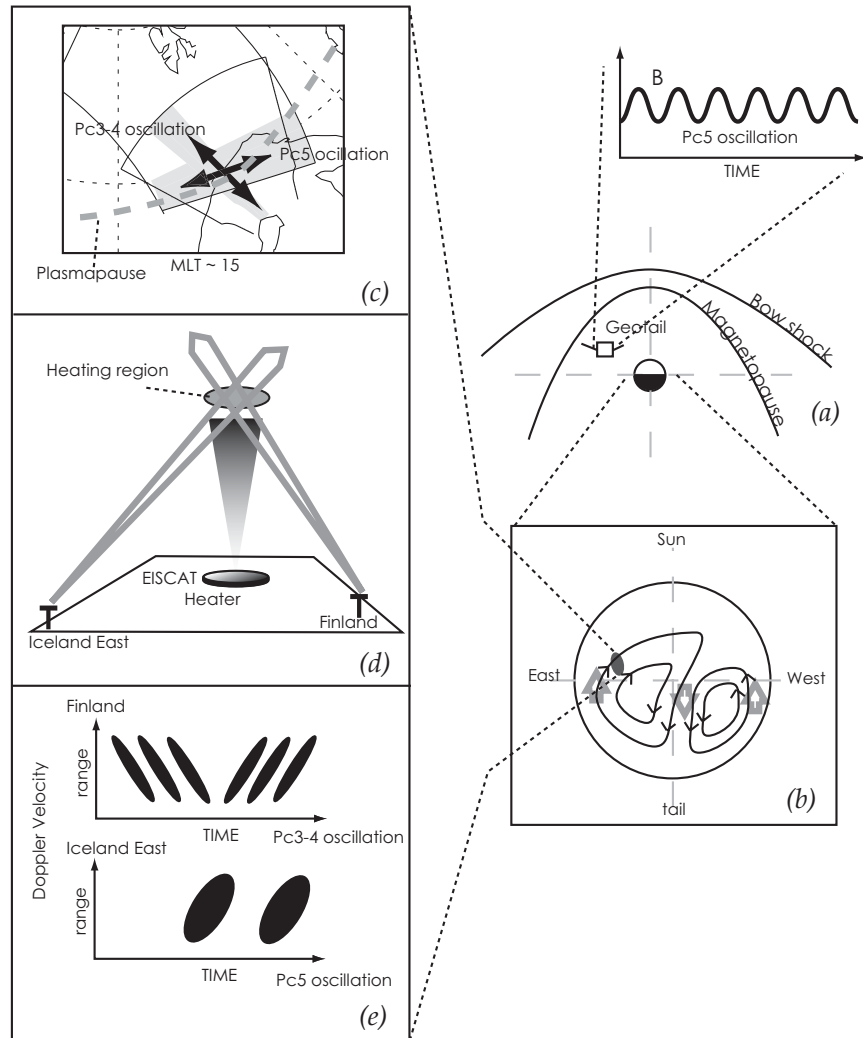


図 4.17: イベント 2 における現象の特徴、および背景に関する概略図。

トは、図 4.17(d) に示されているように、EISCAT ヒーターによる加熱実験を伴っている。このとき、電離圏対流は図 4.17(b) のようになっており、午後側の地球磁気圏尾部方向からのリターンフロー領域、すなわち閉磁力線領域である、赤い丸で示された領域で発生している。本イベントでは、Pc3-4 脈動と Pc5 脈動が同時に同じ領域から観測されており、緯度方向と経度方向にそれぞれ偏った振動をしていることが判明した。さらに、Pc3-4 脈動では、ある時間を境にして位相関係が変化するという特長が見られた。また、GEOTAIL 衛星は、電離圏で脈動が観測され始める直前まで Pc5 脈動を観測している。このような特徴をもつ脈動に対し、本論文では以下のような考察を行った。

4.2.1 地上磁場との相関について

本イベントにおいて実施されたような EISCAT ヒーターによる電離圏加熱と HF レーダーによる電離圏 ULF 脈動観測は、近年頻繁に行われてきている [Yoeman *et al.* [1997]; Wright *et al.* 1998; Wright *et al.* 1999; Baddeley *et al.* 2002]。Yoeman *et al.* [1997] は本観測と同様に CUTALSS レーダーと EISCAT ヒーターを使った観測から、Finland レーダーで観測された周期 100 秒から 150 秒程度の脈動について報告している。彼らは EISCAT ヒーターと HF レーダーの共同観測が地球物理観測にとって非常に有用な手段となることを示している。Wright *et al.* [1999] では Finland レーダーと EISCAT ヒーターを使った観測で、午後側の 1330UT 頃に観測された、地上磁場では観測されていない波数 38 ± 6 の 10mHz の電離圏電場脈動について報告している。Baddeley *et al.* [2002] でも、同様に Finland レーダーと EISCAT ヒーターとの観測を行っており、地上磁場では観測されていない 13.9mHz の脈動について報告している。この脈動は朝方の 0900UT 頃観測され、波数 -45 ± 10 で西側に伝播していた。彼らはこの脈動が P_g とよく似た性質を持っており、POLAR によって観測されたイオン分布からおよそ 10keV の粒子によるドリフト共鳴が発生機構であることを示唆している。このように、電離圏加熱と HF レーダーによる電離圏 ULF 脈動観測では、地上磁場を伴わない波数の高い脈動が観測されている。

本観測では、1330UT ~ 1400UT に Finland レーダーによって $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の電離圏電場脈動が観測されている。この脈動は、波数 50 ~ 100 で西側へ伝播していたこと、同じ周波数の脈動が地上で観測されていないことから、過去に報告されている地上磁場の脈動を伴わない波数の高い脈動と同じような性質を持つ脈動である可能性が示唆される。

一方、Iceland East レーダーでは、 $\sim 4.7\text{mHz}$ の P_{c5} 脈動が同じ加熱領域から観測されている。これまでの研究において、Takahashi *et al.* [1992] が Iceland 磁力計と EISCAT magnetometer cross を使った地上磁場の観測から、 $L=6 \sim 7$ 付近で P_g と P_{c5} 脈動が同時に発生したイベントに関して報告している。彼らは、 P_g 脈動と P_{c5} 脈動の発生のタイミングが違うことから、二つの違った発生機構を持つ脈動が同じ磁力線に存在していたとしている。本イベントで Iceland East レーダーによって観測された 4mHz の脈動は、すでに Finland レーダーで $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の脈動が観測されているときに観測され始めた。この P_{c5} 脈動は IMAGE 磁場観測チェーンでも観測されているが、明瞭な脈動が観測され始めたのは、Iceland East レーダーで観測され始めた時間と一致する。このため、Takahashi *et al.* [1992] と同様に Finland レーダー、Iceland East レーダーで観測された、この二つの周波数の脈動は、それぞれ違った発生機構を持っていることが示唆され、波数の小さい 4.7mHz の P_{c5} 脈動のみが地上で観測されたのではないかと考えられる。

4.2.2 発生機構と位相変化について

上述のように本イベントで観測された脈動は、過去に P_g -like として P_g に似た脈動の性質をもっていることから、Baddeley *et al.* [2002] が示唆するようなドリフト共鳴によって発生したのではないかと考えられる。しかしながら、本イベントでは 1340UT 前では低緯度側の位相が遅れ、1340UT より後では高緯度側の位相が遅れるという非常に特徴的な位相変化が Finland レーダーで観測されている。このような位相変化を示す脈動

は *Fenrich and Samson* [1995] と *Yoeman et al.* [1997] によって報告されている。*Fenrich and Samson* [1995] は、SuperDARN HF レーダーを使った電離圏における Pc5 脈動の観測から、低緯度側の位相が遅れているイベントや、本イベントと同様に、高緯度側の位相の遅れから低緯度側の位相の遅れに変化するようなイベントについて報告している。彼らは、脈動が観測された緯度が $69^{\circ} \sim 75^{\circ}$ のような高緯度であったことから、プラズマ圏境界による Alfvén 速度の変化からこの位相変化を説明することは出来ないとしている。また、*Yoeman et al.* [1997] では、本イベントと同様に Finland レーダーと EISCAT ヒーターの電離圏加熱による観測から、高緯度と低緯度で位相が遅れるような湾曲した位相面をもつ脈動について報告している。彼らは、この位相の湾曲が、観測された脈動のスケールを表すことを示唆しているが、その機構については示唆していない。

本イベントでは、Finland レーダーで観測された $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の脈動と同時に、Iceland East レーダーで $\sim 4.7\text{mHz}$ の脈動について観測している。この二つの観測された脈動から、以下のように考察した。

すでに述べているように、ドリフト共鳴による脈動は、高緯度側の位相が遅れると考えられるが、プラズマ圏境界付近を伝播する場合は急激な粒子密度の増加によって Alfvén 速度が遅くなり、低緯度側の位相が遅れる可能性がある。そのため、もしプラズマ圏境界が 1340UT 頃に EISCAT ヒーター付近を通過したとすれば、Alfvén 速度が 1340UT を境に変化して、位相の遅れが逆転する可能性がある。ここで、上述のように、Iceland East レーダーによって観測された $\sim 4.7\text{mHz}$ の脈動が、Finland レーダーで観測された脈動と同じ磁力線を伝播してきたとするなら、Iceland East レーダーで同様の位相の遅れが見えられ、さらに Iceland East レーダーとほぼ同じ脈動を観測している IMAGE 磁場観測チェーンでも、EISCAT ヒーター付近の観測点でプラズマ圏境界による高緯度側の位相遅れが見えられ、と考えられる。

図 4.18 は IMAGE 磁場観測チェーンで観測された $\sim 4.7\text{mHz}$ の磁場脈動について、次数 10 の Akaike 法で算出した ABK 観測点に対する各観測点の位相とスペクトルパワーを、高緯度から低緯度まで上から順に並べたものである。ここで示されている観測点は、図 3.58 で $\sim 4.7\text{mHz}$ のスペクトルピークが見られた観測点である。この図から、ABK でスペクトルパワーが最大になっていることがわかる。このため、もしこの $\sim 4.7\text{mHz}$ の脈動がなんらかの発生機構によって磁力線の固有振動を励起するような共鳴現象による脈動であれば、ABK 付近に共鳴点があることが示唆される。一般に Pc5 脈動に属するような長周期の脈動は、磁気圏 flank side での太陽風と磁気圏の粒子密度差によって起こる Kelvin-Helmholtz 不安定性が原因だと考えられている。このため、Pc5 脈動は午前側では西向きの、午後側では東向きの伝播方向を持つ。本イベントにおいて、観測された Pc5 脈動は東向きの伝播方向を示していた。脈動が観測されたエコー領域近辺はおおよそ UT+2.5 の MLT であるため、脈動が観測された 1300UT には午後側 16MLT 付近に位置していることになる。このため、本イベントで観測された Pc5 脈動が、Kelvin-Helmholtz 不安定性によって発生したものである可能性が示唆される。

ここで、EISCAT ヒーターのある TRO の位相だけが、それ以外の観測点の位相変化と違うことに注目したい。TRO を除く全ての観測点では、ABK を中心にして高緯度側では位相が遅れ、低緯度側では位相が進んでいる。しかしながら、ABK の高緯度側に位置する TRO では位相が進んでいる。これは、プラズマ圏境界が TRO より低緯度側に存在し、低緯度側の観測点で観測される脈動の Alfvén 速度が遅くなっているためだと考えることができる。また、Iceland East レーダーでは、低緯度側の位相が遅れていることが、レンジ間およびビーム間

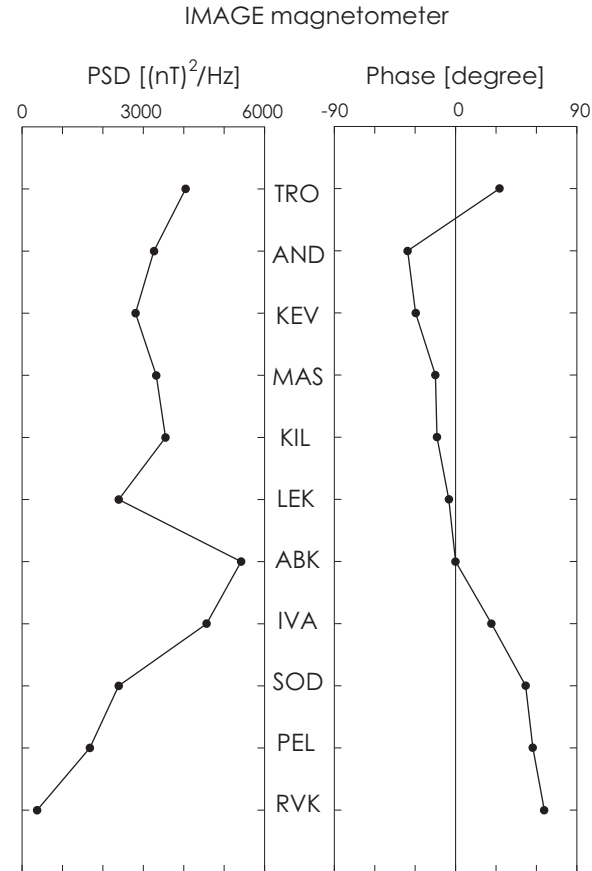


図 4.18: 2003 年 2 月 17 日に IMAGE 磁場観測チェーンで得られた各観測点における $5mHz$ の脈動のパワー（左）と、ABK 観測点に対する各観測点の位相差。上から順に高緯度から低緯度の観測点を表しており、横軸はそれぞれパワーと位相を表している。

の位相差から明らかになっている。

このため、もし、1330UT~1340UT 頃にプラズマ圏境界が高緯度側から低緯度側へ移動していたとすれば、Finland レーダーで観測されたような位相の変化を説明できる可能性が示唆される。

本イベントでは、残念ながら加熱されたエコー領域上空を通過するような衛星がないため、この脈動がドリフト共鳴によって発生したのかを確かめることは出来ないが、少なくとも何らかの発生機構によって磁力線の固有振動を励起するような共鳴現象による脈動であれば、観測された位相変化を説明できると考えられる。

4.2.3 GEOTAIL 衛星で観測された磁場について

本イベントでは、Finland レーダーで観測された $13.1mHz \sim 16.4mHz$ の脈動は、GEOTAIL 衛星では観測されていなかった。しかしながら、Iceland East レーダーで観測された $\sim 4.7mHz$ の脈動は、Iceland East レーダーもしくは IMAGE 磁場観測チェーンによって観測される直前まで、GEOTAIL 衛星によって観測されていた。このとき地上の GEOTAIL 衛星の軌道投影点は EISCAT ヒーターや IMAGE 磁場観測チェーンよりも高緯度に位置

している。IMAGE 磁場観測チェーンの観測において、TRO より高緯度側の観測点では $4\text{mHz} \sim 5\text{mHz}$ の脈動が観測されていないことから、本イベントで Iceland East レーダーによって観測された $\sim 4.7\text{mHz}$ の脈動とは、同じ周波数をもった違う脈動を観測していた可能性が示唆される。

4.2.4 まとめ

本イベントで Finland レーダーによって観測された $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ の電離圏電場脈動は、高い波数で西側に伝播しており、地上磁場でほとんど観測されていないことから、これまでの SuperDARN HF レーダーと EISCAT ヒーターを使用した観測で報告されている、 P_g に似た脈動であったと考えられる。また、1340UT 付近で見られた位相の変化は、同時に Finland レーダーで観測された $\sim 4.7\text{mHz}$ の脈動で見られた位相の変化から、EISCAT ヒーター付近に存在すると考えられるプラズマ圏境界が原因であることが示唆された。図 4.19 は、本イベントの発生機構についての略図を示したものである。

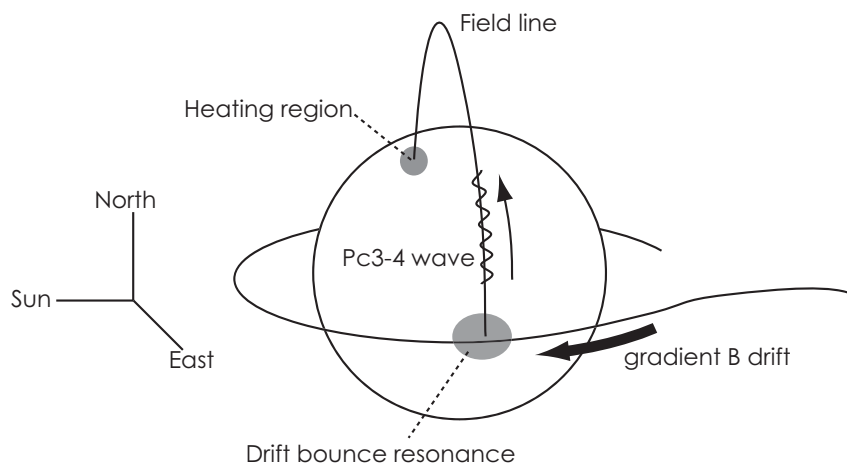


図 4.19: イベント 2 における、ドリフト共鳴による電離圏電場脈動についての概略図

4.3 本研究で得られた HF レーダーのエコーの特異性について

イベント 1 の観測で得られたような明瞭な電離圏電場 Pc3-4 脈動の観測例というのは、これまでに報告されていない。また、本研究では、2002 年から 2003 年にかけて計 7 回の特別観測を行っているが、本論文で報告している 2 例を除いた 5 例では、そのほとんどが地上反射波であるか、もしくはエコーが得られていなかった。そのため、本観測で得られた Pc3-4 脈動が、HF レーダーによって観測される電離圏電場脈動の中で、特異な現象であるかどうかを議論することは難しい。また、観測例が少ないため、このような明瞭な Pc3-4 脈動のエコーが、どの程度の頻度で観測される現象なのかを知ることは難しい。

そこで、CUTLASS レーダーによってしばしば行われている高時間分解能観測のデータを使用して、Pc3-4 脈動が地上で観測されている時間帯における HF レーダーの観測データを使用して、地上磁力計で観測される古

典型的な Pc3-4 脈動が、HF レーダーによってどのような電離圏電場変動として観測されるのかを調べた。

CUTLASS レーダーによる高時間分解能観測は、本観測のような衛星との同時観測ではないが、IMAGE の Loneyarbyen (LYR) 上空を狙った Iceland East レーダーのビーム 5 番と Finland レーダーのビーム 9 番によって行われており、積分時間は 6 秒となっている。これは、ステレオモードのチャンネル 2 を利用したもので、通常のコモンモードと同時に行われている。2002 年に行われた高時間分解能観測は 94 例あり、観測を行っている時間帯は様々である。この中で、一般的に Pc3-4 脈動が頻繁に観測されると考えられている 0600MLT から 1800MLT までの昼側領域で観測を行っているのは 38 例であった。この 38 例のうち、地上磁場観測点における磁場データで確認したところ、古典的な Pc3-4 脈動は 19 例確認された。この 19 例について HF レーダーで観測され電離圏エコーと IMAGE で観測された磁場データを調べた結果、全ての例において、地上で Pc3-4 脈動が観測されている領域上空からのエコーは、全く得られていないか、もしくは地上反射波であることがわかった。図 4.20 は 2002 年 5 月 19 日に行われた高時間分解能観測の例である。左側に Finland レーダーのビーム 9 で得

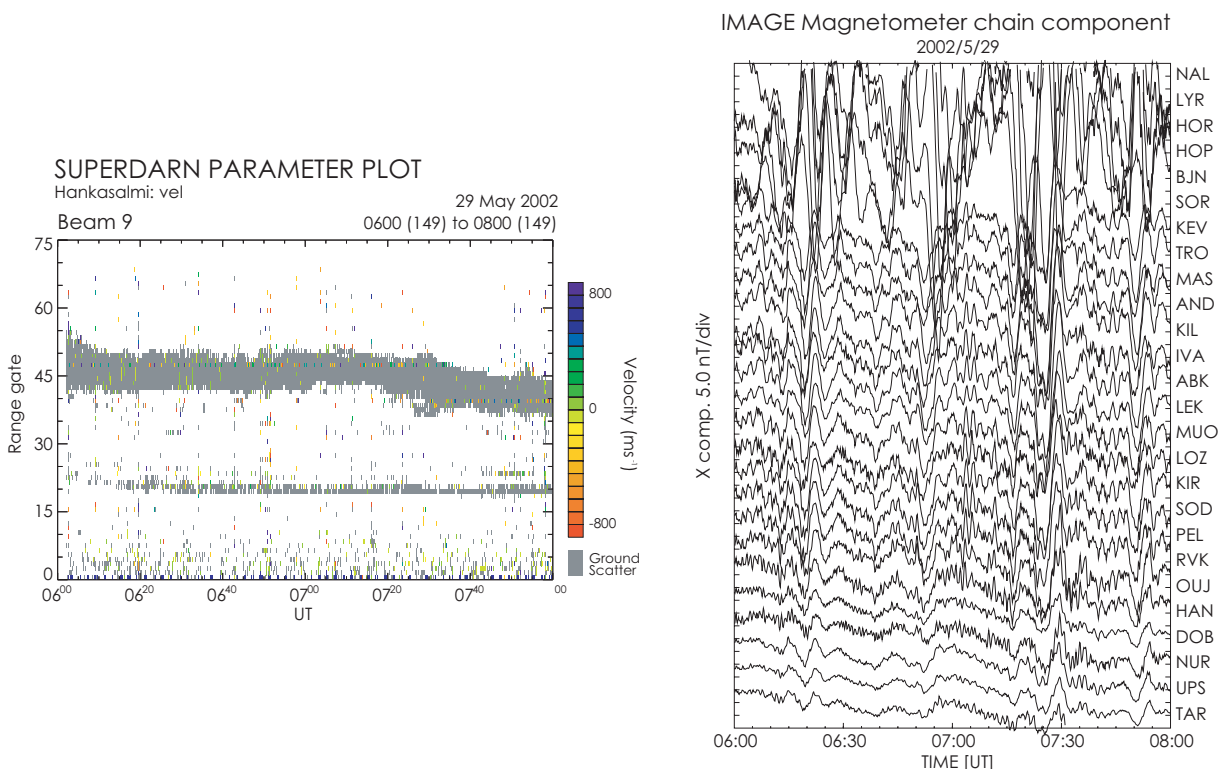


図 4.20: 地上で明瞭な Pc3 脈動が観測されている期間の、Finland レーダーの高時間分解能観測例。
左側が Finland レーダーの特別観測ビーム 9、右側が IMAGE 磁力計によって得られた Pc3-4 脈動

られたドップラー速度を、右側に IMAGE 磁力計で得られた磁場変動を示している。0600UT ~ 0800UT で明瞭な Pc3-4 脈動が地上 IMAGE 磁力計の複数の観測点で観測されているのが確認できる。しかしながら、Finland レーダーでは、Pc3-4 脈動を観測している複数の観測点の上空である、レンジ 20 付近からのエコーがほとんど得られておらず、また、エコーが得られている高緯度側についても地上反射波であるのがわかる。このほかの

例においても同様の結果が得られている。また、本観測で得られているような明瞭な電離圏電場の Pc3-4 脈動は、38 例中ひとつも確認されなかった。

このため、イベント 1 で得られた明瞭な Pc3-4 脈動は、HF レーダーの観測条件が整った下で Pc3-4 脈動が発生しているという、稀な観測例であった可能性を示唆している。

第5章 まとめと結論

本研究では、地上と電離圏および磁気圏シース領域における Pc3-4 脈動の波動特性を明らかにする目的で、SuperDARN HF レーダーと GEOTAIL 衛星との同時特別観測を企画し実施した。この特別観測では、SuperDARN HF レーダーは Pc3-4 脈動を検出するために特定のビームのみを高時間分解能モードで観測した。その結果、2002 年 2 月 12 日と 2003 年 2 月 17 日に非常に明瞭な電離圏電場 Pc3-4 脈動を観測することができた。本章では、それぞれの観測で得られたデータの解析結果および考察についてまとめる。

5.1 2002 年 2 月 12 日イベント

2002 年 2 月 12 日に行った GEOTAIL/SuperDARN 同時観測では、Iceland East レーダーによって明瞭な電離圏電場脈動が観測された。また、CUTLASS レーダーではステレオモードによるグローバルスキャン観測も同時に行っている。観測された脈動は以下のような特徴を持っていた。

1. 周波数は $16.4\text{mHz} \sim 19.7\text{mHz}$ であった。
2. レンジ 25 を境にして西側では西向きの、東側では東向きの伝播方向を持っていた。
3. 波数は 5 ~ 9 であった。
4. エコーパワーにも周期的な変動が見られ、ドップラー速度に対しておよそ $90^\circ \sim 120^\circ$ の位相遅れを持っていた。
5. グローバルスキャン観測データから、パッチ状のエコー領域内でのみ Pc3-4 脈動現象が起こっているものと推測された。
6. 脈動が観測されたエコー領域は、地球磁気圏尾部からのリターンフローの領域内、すなわち閉磁力線領域内で、オーロラオーバルよりも高緯度側に位置していた。
7. GEOTAIL 衛星では同じ周波数の脈動はまったく観測されなかった。
8. 地上磁場では $11\text{mHz} \sim 12\text{mHz}$ と $20\text{mHz} \sim 25\text{mHz}$ の地磁気脈動が観測されたが、Iceland East レーダーと同じ周波数の脈動は観測されなかった。
9. 磁気共役レーダーである Syowa East レーダーと Kerguelen レーダーでは Iceland East レーダーに対応する脈動現象は観測されなかった。また、脈動が観測されたエコー領域の磁気共役点に位置する南極 Davis 基地でも対応する地磁気脈動は観測されなかった。

10. DMSP 衛星では、エコー領域で 10keV 以下のイオンおよび電子のフラックスの増加が観測された。

上記の観測事実から以下のような二つのモデルについて考察を行った。

モデル 1 一般に、5~9 のような小さい波数をもつ脈動は地上でも観測されと考えられるが、今回の観測では地上磁場で同じ脈動は観測されていなかった。これは、ステレオモードによるグローバルスキャン観測データから、パッチ状のエコー領域が地磁気観測点の存在しない領域に見られたため、このパッチ状のエコー領域のみで起こっている局在化した脈動であることが原因であることが示唆された。さらに、地上磁場で観測されていた周波数の違う脈動は、観測された明瞭な Pc3-4 脈動とは違う領域でわずかに見られた周期的な変動によるものである可能性を示唆していた。また、観測された Pc3-4 脈動は Giant pulsation(Pg) の周波数と近いことから、Pg と同じドリフト共鳴による発生機構を持っているのではないかと考え、DMSP 衛星のデータから、エコー領域における降り込み粒子のエネルギーを調べた。その結果、過去の研究で Pg を起こすと考えられているエネルギー粒子と同じエネルギー帯のイオンの増加が確認されたことから、この脈動の発生機構がドリフト共鳴である可能性を示唆していた。しかしながら、観測された脈動は HF レーダーのレンジ 25 を境にして逆向きの伝播方向を持っており、ドリフト共鳴が原因で磁力線の固有振動を励起する機構では常に西向きの伝播方向を持つと考えられていることから、この伝播方向を説明できない。そこで、Iceland East レーダーのビーム 5 はやや高緯度側に視野を持つことと、プラズマ圏境界付近ではプラズマ密度の増加によって Alfvén 速度が減少し、低緯度側の脈動の位相が遅れるという過去の研究結果から、この脈動の位相変化を説明しようと試みた。しかし、今回観測された Pc3-4 脈動現象の発生領域は高緯度に位置し、プラズマ圏境界がそこに存在することは一般に考え難く、このような機構で説明することは無理であると判断した。また、通常のドリフト共鳴では、磁気共役点において同様の脈動が観測されと考えられるが、Iceland East レーダーの磁気共役レーダーである Syowa East レーダーではまったく脈動が観測されていなかった。このことから、観測された Pc3-4 脈動はドリフト共鳴による脈動では説明することのできない特徴を持った脈動であると結論した。

モデル 2 本イベントでは、エコーパワーにも Pc3-4 脈動の周期的な変動が見えたことに注目し、このエコーパワーの変動の原因は、周期的な電子フラックスの振込みによるものであると仮定し、考察を行った。エコー領域付近に軌道投影点を持つ DMSP 衛星が、エコー領域付近で 1keV 以下の電子のフラックスが増加するのを観測していた。このため、Pc3-4 脈動の modulation を受けた 1keV 以下の電子フラックスの振込みによって電離圏電場が modulate されるという過去の研究結果から、本イベントでも同様の機構により電離圏電場脈動が発生している可能性が示唆された。また、エコーパワーとドップラー速度の変動には位相差があったが、これは観測された電離圏電場の変動が振り込み電子によるものであるとすれば説明できることを示した。さらに、地上磁場で期待される磁場変動が観測されなかったことについて、観測されたエコー領域が磁気圏内で非常に大きな波数をもつ脈動の一部であれば説明できることを示した。本イベントで観測された特徴的な位相変化も、発生領域、すなわち電子の加速領域において、そのような位相変化が存在すれば、電離圏における位相差を説明できることが示唆された。以上のことから、観測された電離圏 Pc3-4 脈動は、磁気圏内の Pc3-4 脈動によっ

て modulate された電子フラックスの振込みによって励起されるモデル 2 の方がモデル 1 よりも妥当であると結論した。

なお、人工的な電子密度擾乱の生成やフィルタリングなどを行わない、このような高緯度電離圏電場の Pc3-4 脈動は、本研究によって初めて報告された現象である。

5.2 2003 年 2 月 17 日イベント

2003 年 2 月 17 日に行った GEOTAIL/SuperDARN 同時観測では、より明瞭なエコーを得るために、CUTLASS HF レーダーの視野内にある Tromsø に設置された EISCAT ヒーターにより電離圏の加熱を行い、強制的に電離圏の電子密度擾乱を増加する特別観測を行った。その結果、地磁気の南北方向を視野とする Finland レーダーでは明瞭な Pc3-4 脈動が、一方、地磁気の東西方向を視野とする Iceland East レーダーは明瞭な Pc5 脈動が、同じ加熱領域から観測された。このような二つのレーダーによって違う脈動が同時に観測された例はなく、本研究によって初めて観測されたものであると考えられる。観測された脈動は以下のような特徴を持っていた。

1. Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動の周波数は $13.1\text{mHz} \sim 16.4\text{mHz}$ であった。一方、Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動の周波数は $\sim 4.7\text{mHz}$ であった。この特性は、Pc3-4 脈動の振動は南北方向に、また、Pc5 脈動の振動は東西方向に偏っていることを示唆している。
2. Pc3-4 脈動の波数は 50 ~ 100 で西側に伝播していた。
3. Pc5 脈動の波数はおよそ 10 であり、低緯度側に伝播していた。
4. GEOTAIL 衛星では、Finland レーダーが Pc3-4 脈動を観測しはじめる直前まで、 $\sim 4\text{mHz}$ の明瞭な Pc5 脈動を観測していた。
5. 地上磁場では、Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動と同じ周波数の地磁気脈動は観測されていなかったが、Iceland East レーダーで観測された Pc5 脈動は多くの観測点で観測されていた。
6. Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動は、1340UT を境に緯度方向の位相が変化し、前半では低緯度側の位相が遅れ、後半では高緯度側の位相が遅れていた。

以上のような特徴から、以下の考察を行った。

今回の観測では、Finland レーダーによって観測された Pc3-4 脈動は加熱領域直下である WEED 磁力計を含む、全ての観測点で観測されていなかったが、Iceland East レーダーによって観測された Pc5 脈動は地上の多くの観測点で観測されていた。これは、波数の違いによるもので、波数の大きい Pc3-4 脈動は電離圏のスクリーニング効果によって地上では観測されず、波数の小さい Pc5 脈動だけが地上で観測されたものであると考えられる。また、Pc5 脈動が地上で観測され始めた時間と、Iceland East レーダーによって観測され始めた時間が一致し、Finland レーダーで Pc3-4 脈動が観測され始めた時間が違うことから、異なる発生機構を持つ脈動が同じ磁力線上に存在していたことを示唆していた。

この Pc 3-4 脈動の発生機構に関しては、過去の Pg 地磁気脈動現象と同様にドリフト共鳴を考えた。Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動は 1340UT を境にして伝播方向が変わっていた。そのため、イベント 1 と同様に、プラズマ圏境界付近のプラズマ密度の急激な増加による Alfvén 速度の減少によって説明することを試みた。今回観測された Pc3-4 脈動と Pc5 脈動は同一磁力線上に存在していたと考えられる。そこで、Pc3-4 脈動がプラズマ圏境界による位相の変化があるのであれば、Pc5 脈動でも同様の位相の変化が見られると考えられるため、Iceland East レーダーと同じ Pc5 脈動を観測している地上の IMAGE 磁場観測チェーンにおける Pc5 脈動の位相変化を調べた。その結果、比較した観測点のなかで最も高緯度に位置し EISCAT ヒーターの設置されている Tromsø 観測点だけが、高緯度の位相が遅れるという通常の位相変化とは異なる位相を示していた。このことから、Tromsø より低緯度にプラズマ圏境界が存在し、他の観測点はプラズマ圏内に位置していたことが示唆された。また、Iceland East レーダーによっても低緯度側の位相が遅れていることが観測されていた。このため、もし、プラズマ圏境界が 1340UT 頃に高緯度から低緯度に移動してきたとすれば、Finland レーダーで見られた位相遅れの変化を説明することができる。このため、Finland レーダーで観測された Pc3-4 脈動が通常のドリフト共鳴によるものだとしても、その位相変化を説明できることが示唆された。しかしながら、本観測では、加熱領域上空を通過するような衛星がならず、振り込んでいる粒子のエネルギー等を知ることができないため、この脈動がドリフト共鳴によるものかどうかを議論することはできなかった。

5.3 総括

本観測では、これまでの地上磁力計観測で得られている古典的な Pc3-4 脈動の発生・伝播機構を解明する目的で、SuperDARN HF レーダーを使った電離圏電場の特別観測を実施し、この観測により、異なる特徴を持つ 2 例の Pc3-4 脈動が観測された。この 2 例について詳細な解析を行った結果、一例については、これまでの古典的な Pc3-4 脈動とは全く異なる伝播・発生機構を持つ現象であったとの結論を得た。また、もう一例については、過去の研究結果とほぼ同じ特徴を持つ EISCAT ヒーターとの同時観測によって観測される Pc3-4 脈動であると結論されたが、同時に異なる方向からの視野を持つレーダー観測により、Pc5 脈動が同じ領域から観測されるという、これまでに観測例のない現象を見出すことができた。

今回実施した高時間分解能の HF レーダー観測は、地上磁場観測のように 24 時間連続でデータを取得できないことや、電離圏の状態によってデータが得られないことも多いことから、地上磁場観測のように統計的な議論をすることは難しい。しかしながら、これまで地上と磁気圏でしか観測されていなかった Pc3-4 脈動が、本研究で示したように、その両者の結合領域である電離圏において観測されたことにより、Pc3-4 脈動の発生・伝播機構に関して新たな描像を与えることができた。それは、今後の Pc3-4 脈動研究において新たな視点を与えるものと期待される。

謝辞

佐藤夏雄教授には主任指導教官として本学入学以来、本論文作成に至るまで、多大なるご指導を頂きました。ここに心より深く感謝いたします。

国立極地研究所江尻全機教授には、本論文の主査として、現象の解釈、表現方法等、多くのご助言、ご意見をいただきました。

九州大学湯元清文教授、東海大学利根川豊教授、国立極地研究所麻生武彦教授、宮岡宏助教授には、本論文審査員として、現象の解釈、表現方法において、多くのご意見、ご助言を頂きました。

国立極地研究所山岸久雄教授には、現象の解釈、表現方法、文献収集等、多くのご意見やご助言を頂きました。

国立極地研究所行松彰助手には、SuperDARN レーダーにおける特別観測の企画・立案や観測プログラムの作成からデータ処理、現象の解釈に至るまで、多大なるご協力を頂きました。

Leicester 大学の Mark Lester 教授、Tim Yoeman 助教授、Steve E. Milan 博士には、CUTLASS HF レーダーにおける特別観測の立案、実施からデータ処理、現象の解釈に至るまで、多大なるご協力とコメントを頂きました。

国立極地研究所門倉昭助教授、田口真助教授、菊池雅行助手、堤雅基助手、岡田雅樹助手、海老原裕輔助手、Bjorn Gustavsson 博士には、多くのご意見と議論をしていただきました。

東海大学工学部櫻井亨教授には、研究全般に関する多くのご助言・指導を頂きました。宇宙航空開発研究機構・宇宙科学研究本部の向井利典教授、松岡彩子助手や名古屋大学太陽地球環境研究所国分征名誉教授には GEOTAIL 衛星のデータ提供と解析処理に関して多くのご意見をいただきました。

New Castle 大学松岡均博士、名古屋大学太陽地球環境研究所小川忠彦教授、西谷望助手、拓殖大学巻田和男教授、東海大学遠山文雄教授、電気通信大学細川敬輔助手には、様々なご意見を頂きました。

総合研究大学院大学の村田洋三氏、九州大学の出口広樹氏、東海大学の坂田圭司氏には、共に研究を行い且つ様々な意見を頂きました。また、国立極地研究所の高濱信子女史、安養寺春子女史、岡田陽子女史には、研究生活全般に渡る環境整備をしていただきました。

本研究で中心的に使用したデータは SuperDARN/GEOTAIL 同時特別観測で取得されたものです。国際 SuperDARN 研究組織の議長を務める Johns Hopkins 大学応用物理学研究所 Raymond A. Greenwald 教授を初め、CUTLASS HF レーダー PI の Leicester 大学 Mark Leser 教授、Kerguelen レーダー PI の LPCE/CNRS Jan Paul Villain 博士、SENSU Syowa East レーダー PI の国立極地研究所佐藤夏雄教授に深く感謝いたします。GEOTAIL 衛星においては、宇宙航空開発研究機構向井利典教授を初めとする各観測装置 PI の方々に深く感謝いたします。また、EISCAT ヒーターの運用においては Max-Planck 研究所の Michael Rietveld 博士に多大なるご協力をいた

だきました。南極 Davis 基地の磁場データは New Castle 大学 Brian J. Fraser 教授のご好意により提供していただきました。地上磁場観測で使用した IMAGE 磁力計を運営されている各研究所に感謝いたします。また、地上磁場観測で使用した SAMNET 磁力計は Lancaster 大学によって運営されている Particle Physics and Astronomy Research Council National Facility です。SAMNET 磁力計データチームに感謝いたします。Iceland 磁力計観測は Iceland 大学 Thorsteinn Saemundsson 教授の支援を頂きました。WEED 磁力計においては、データの提供にあたり、Lester 大学の Darren Wright 博士にご協力いただきました。Johns Hopkins 大学応用物理研究所 Patrick Newell 博士には DMSP 衛星のデータ提供に感謝いたします。

最後に、私の研究に関して理解を示し、常に協力してくれた家族と、いつも私を傍で励まし支えてくれた渡邊由美子女史に対して、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Barnes, A. Theory of generation of bow-shock-associated hydromagnetic waves in the upstream interplanetary medium, *Cosmic Electrodyn.*, I, 90, 1970.
- [2] Baker, K. B., R. A. Greenwald, J. M. Ruohoniemi, J. R. Dudeney, M. J. Pinnock, N. Mattin, and J. M. Leonard, PACE - the Polar Anglo-American Conjugate Experiment, *it EOS*, 70, 785, 1989
- [3] Birkeland, K., Expedition Norveginne de 1899-1900 pour l'etude des auroras boreals. Resultats des recherches magnetiques, Videnskabselsk. Skr., I. Mat. Natuarvidensk, K., 1, 1, 1901
- [4] Bol'shakova, O. V., and V. A. Troitskaya, Relation of the interplanetary magnetic field direction to the system of stable oscillations (in Russian), *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 180, 343-, 1968
- [5] Cao, M., R. L. McPherron, C. T. Russell, Statistical study of ULF wave occurrence in the dayside magnetosphere, *it J. Geophys. Res.*, 99, 8731-8753, 1994
- [6] Chappell, C. R., Recent satellite measurements of the morphology and dynamics of plasmasphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10, 951-972, 1972
- [7] Dungey, J. W., Electrodynamics of the outer atmosphere, Ionospheric Research Lab., *Pennsylvania State University, Sci. rep.*, No 69, 1954, 1954.
- [8] Engebretson, M. J., C. -I. Meng, R. L. Arnoldy, and L. J. Cahill, Jr., Pc3 pulsations observed near the south polar cusp, *J. Geophys. Res.*, 91, 8909, 1986
- [9] Engebretson, M. J., L. J. Zanetti, T. A. Potemra, W. Baumjohann, H. Luhr, and M. H. Acuna, Simultaneous observation of Pc 3-4 pulsations in the solar wind and in the Earth's magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 92, 10053-10062, 1987.
- [10] Engebretson, M. J., B. J. Anderson, L. J. Cahill, Jr., R. L. Arnoldy, T. J. Rosenberg, D. L. Carpenter, W. B. Gail, R. J. Eather, Ionospheric Signatures of Cusp Latitude Pc 3 Pulsations, *J. Geophys. Res.*, 95, 2447-2456, 1990
- [11] Engebretson, M. J., N. Lin, W. Baumjohann, H. Luehr, B. J. Anderson, L. J. Zanetti, T. A. Potemra, R. L. McPherron, and M. G. Kivelson, A comparison of ULF fluctuations in the solar wind, magnetosheath, and dayside magnetosphere: 1. Magnetosheath morphology, *J. Geophys. Res.*, 96, 3441-3454, 1991a.

- [12] Engebretson, M. J., N. Lin, W. Baumjohann, H. Luehr, B. J. Anderson, L. J. Zanetti, T. A. Potemra, R. L. McPherron, and M. G. Kivelson, A comparison of ULF fluctuations in the solar wind, magnetosheath, and dayside magnetosphere: 2. Field and plasma conditions in the magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, 96, 3455-3464, 1991b.
- [13] Fairfield, D. H., Bow shock associated waves observed in the far upstream interplanetary medium, *J. Geophys. Res.*, 74, 3541-3553, 1969.
- [14] Farley, D. T., Multi-pulse incoherent -scatter correlation function measurements, *Radio Sci.*, 7, 661-666, 1972.
- [15] Fenrich, F. R. and J. C. Samson, Growth and decay of field line resonance, *J. Geophys. Res.*, 102, 20031-20039, 1997
- [16] Fenrich, R. C., J. C. Samson, G. Sofko, and R. A. Greenwald, ULF high- and lowm resonances observed with the Super Dual Auroral Radar Network, *J. Geophys. Res.*, 100, 21535, 1995
- [17] Green, C. A., Giant pulsations in the plasmasphere, *Planet. Space Sci.*, 33, 1155, 1985
- [18] Greenstadt, E. W., I. M. Green, D. S. Colburn, J. H. Binsack, and E. F. Lyon, Dual satellite observations of Earth's bow shock; III. Field determined shock structure, *Cosmic Electrodyn.*, 1, 316, 1970b.
- [19] Greenstadt, E. W., I. M. Green, D. S. Colburn, J. H. Binsack, and E. F. Lyon, Dual satellite observations of Earth's bow shock; II. Field aligned upstream waves, *Cosmic Electrodyn.*, 1, 279, 1970a.
- [20] Greenwald, R. A., K. B. Baker, J. R. Dudeney, M. Pinnok, T. B. Jones, E. C. Thomas, J. -P. Villain, J. -C. Cerisier, C. Senior, C. Nanuise, R. D. Hunsucker, G. Sofko, J. Koehler, E. Nielsen, R. Pellinen, A. D. M. Walker, N. Sato, H. Yamagishi, DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection, *Space Sci. Rev.*, 71, 761-796, 1995.
- [21] Hughes, W. J., and D. J. Southwood, The screening of micropulsation signals by the atmosphere and ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 81, 3234-3240, 1976
- [22] Kokubun, S., T. Yamamoto, M. H. Acuna, K. Hayashi, K. Shiokawa, H. Kawano, The GEOTAIL magnetic Field Experiment, 46, *J. Geomag. Geoelectr.*, 7-21, 1994.
- [23] Lee, D.-H., and R. L. Lysak, Effects of azimuthal asymmetry on ULF waves in the dipole magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 53, 1990
- [24] Lühr, H., S. Thurey and N. Klockner, The EISCAT-Magnetometer Cross. Operational Aspects-First Results. *Geophysical Surveys*, 6, 305-315, 1984:.

- [25] Mukai, T., S. Machida, Y. Saito, M. Hitahara, T. Terasawa, N. Kaya, T. Obara, M. Ejiri, A. Nishida, The Low Energy Particle (LEP) experiment onboard the GEOTAIL satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 669-692, 1994
- [26] Odera, T. J., D. Van Swol, C. T. Russell, and C. A. Green, Simultaneous observation of Pc 3,4 pulsations in the magnetosphere and on the ground, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1671-1674, 1991.
- [27] Poulter, E. M., and W. Allan, E. Nielsen, K.-H. Glassmeier, STARE radar observations of a Pg pulsation, *J. Geophys. Res.*, 88, 5668-5676, 1983.
- [28] Rietveld, M. T., H. Kohl, H. Kopka, P. Stubbe, Introduction to ionospheric heating at Tromso - I. Experimental overview, *J. atomos. Terri. Phys.*, 55, 577-599, 1993.
- [29] Roble, R. G., and M. H. Rees, Time-dependence studies of the aurora: effects of particle precipitation on the dynamic morphology of ionospheric and atomospheric properties, *Planet. Space Sci.*, 25, 991-1010, 1977
- [30] Shepherd, S. G. and J. M. Ruohoniemi, Electrostatic potential patterns in the high-latitude ionosphere constrained by the SuperDARN measurements, *J. Geophys. Res.*, 105, 23005-23014, 2000.
- [31] Russell, C. T. and J. G. Luhmann, T. J. Odera, W. F. Stuart, The rate of occurrence of dayside Pc 3,4 pulsations: the L-value dependence of the IMF cone angle effect, *Geophys. Res. Let.*, 10, 663-666, 1983
- [32] Saito, H., N. Sato, Y. Tonegawa, T. Yoshino, T. Saemundsson, Seasonal and diurnal dependence of Pc3-5 magnetic pulsation power at geomagnetically conjugate stations in auroral zones, *J. Geophys. Res.*, 94, 6945-6948, 1989
- [33] Sato, N., and T. Matsudo, Origin of magnetic pulsations associated with regular period VLF pulsations (Type 2 QP) observed on the ground at Syowa station, *J. Geophys. Res.*, 91, 11179-11185, 1986
- [34] Sato, N., and S. Kokubun, Interactions between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Regular period ELF-VLF emissions and their geomagnetic conjugacy, *J. Geophys. Res.*, 86, 9, 1981.
- [35] Song, P., C. T. Russell, J. T. Gosling, M. Thomsen, R. C. Elphic, Observation of the density profile in the mangetosheath near the stagnation streamline, *Geophy. Res. Let.*, 17, 2035-2038, 1990
- [36] Song, P., C. T. Russell and M. F. Tomsen, Waves in the inner magnetosheath: A case study, *Geophys. Res. Let.*, 19, 2191-2194, 1992
- [37] Song, P., C. T. Russell, S. P. Gary, Identification of low-frequency fluctuations in the terristrial magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, 99, 6011-6025, 1994
- [38] Southwood, D. J., A general approach to low-frequency instability in the ring current plasma, *J. Geophys. Res.*, 81, 3340, 1976

- [39] Southwood, D. J., The behavior of ULF waves and particles in the magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, 21, 53, 1973
- [40] Southwood, D. J., J. W., Dungey, and R. J. Etherington, Bounce resonant interactions between pulsations and trapped particles, *Planet. Space Sci.*, 17, 349, 1969
- [41] Takahashi, K., and B. J. Anderson, Distribution of ULF energy ($f > 80$ Hz) in the inner magnetosphere: A statistical analysis of AMPTE CCE magnetic field data, *J. Geophys. Res.*, 97, 10751, 1992.
- [42] Takahashi, K., N. Sato, J. Warnecke, H. Luhr, H. E. Spence, and Y. Tonegawa, On the standing wave mode of giant pulsations, *J. Geophys. Res.*, 97, 10717-10732, 1992
- [43] Takahashi, K., S. Kokubun, H. Matsuoka, K. Shiokawa, K. Yumoto, M. Nakamura, H. Kawano, T. Yamamoto, A. Matsuoka, K. Tsuruda, H. Hayakawa, H. Kojima, H. Matsumoto, GEOTAIL observation of magnetosonic Pc 3 waves in the dayside magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2899-2902, 1994.
- [44] Tonegawa, Y. and N. Sato, Conjugate area study of giant geomagnetic pulsations, paper presented at Chapman Conference on Plasma Waves and Instabilities in Magnetospheres and at Comets, *AGU, Sendai/Mt. Zao, Japan, Oct. 12-16*, 1987.
- [45] Troitskaya, V. A., T. A. Plyasova-Bakunina, and A. V. Gul'elmi, Relationship between Pc 2-4 pulsations and interplanetary magnetic field (in Russian), *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 197, 1312-, 1971.
- [46] Walker, A. D. M., R. A. Greenwald, W. F. Stuart, and C. A. Green, STARE radar observations of Pc5 geomagnetic pulsations, *J. Geophys. Res.*, 84, 3373-3388, 1979
- [47] Walker, A. D. M., J. M. Ruohoniemi, K. B. Baker, R. A. Greenwald, and J. C. Samson, Spatial and temporal behavior of ULF pulsations observed by the Goose Bay HF radar, *J. Geophys. Res.*, 97, 12187-12202, 1992.
- [48] Wright, D. M., T. K. Yeoman, P. J. Chapman, High-latitude HF Doppler observation of ULF waves. 1. Waves with large spatial scale sizes, *Ann. Geophysicae*, 15, 1548-1556, 1997
- [49] Waldock, J. A., T. B. Jones, E. Nielsen, D. J. Southwood, First results of micropulsation activity observed by SABRE, *Planet. Space Sci.*, 31, 573, 1983
- [50] Yeoman, T. K. Mao Tian, M. Lester, T. B. Jones, A study of Pc5 hydromagnetic waves with equatorward phase propagation, *Planet. Space Sci.*, 40, 797-810, 1992
- [51] Yumoto, K., and T. Saito, Relation of compressional HM waves at GOES 2 to low-latitude Pc 3 magnetic pulsations, *J. Geophys. Res.*, 88, 10041-10052, 1983.

- [52] Yumoto, K., and T. Saito, T. Tsurutani, E. J. Smith, S. Akasofu, Relationship between the IMF magnitude and Pc 3 magnetic pulsations in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 89, 9731-9740, 1984.
- [53] Yumoto, K., T. Saito, S. -I. Akasofu, B. T. Tsurutani, and E. J. Smith, Propagation mechanism of daytime Pc 3-4 pulsations observed at synchronous orbit and multiple ground-based stations, *J. Geophys. Res.*, 90, 6439-6450, 1985.