

## 波動粒子相互作用の観測

粒子同士の衝突のない宇宙プラズマにおいては、エネルギー散逸は究極的には波動粒子相互作用によって行われる。プラズマ・電磁場とともに、波動観測が重視される所以である。*Geotail* において世界で初めて本格的に発展したのが全ての観測機器データを活用する総合解析であり、それがもたらしたのは、主に電子スケール・ダイナミクスの優れたモニターとなる波動データを全体ダイナミクスの中に位置付けていくという新しい問題意識である。

### 静電的孤立波の発見

**“BGK モードのような奇妙なモードは実在するか？”**

*Geotail* 以前は、磁気圏尾部のプラズマシート境界層で観測される Broadband Electrostatic Noise (BEN) は、文字通り広帯域の静電波が重ねあわされてもので静電的なプラズマ不安定性の準線形理論による説明が試みられていた。*Geotail* の波形捕

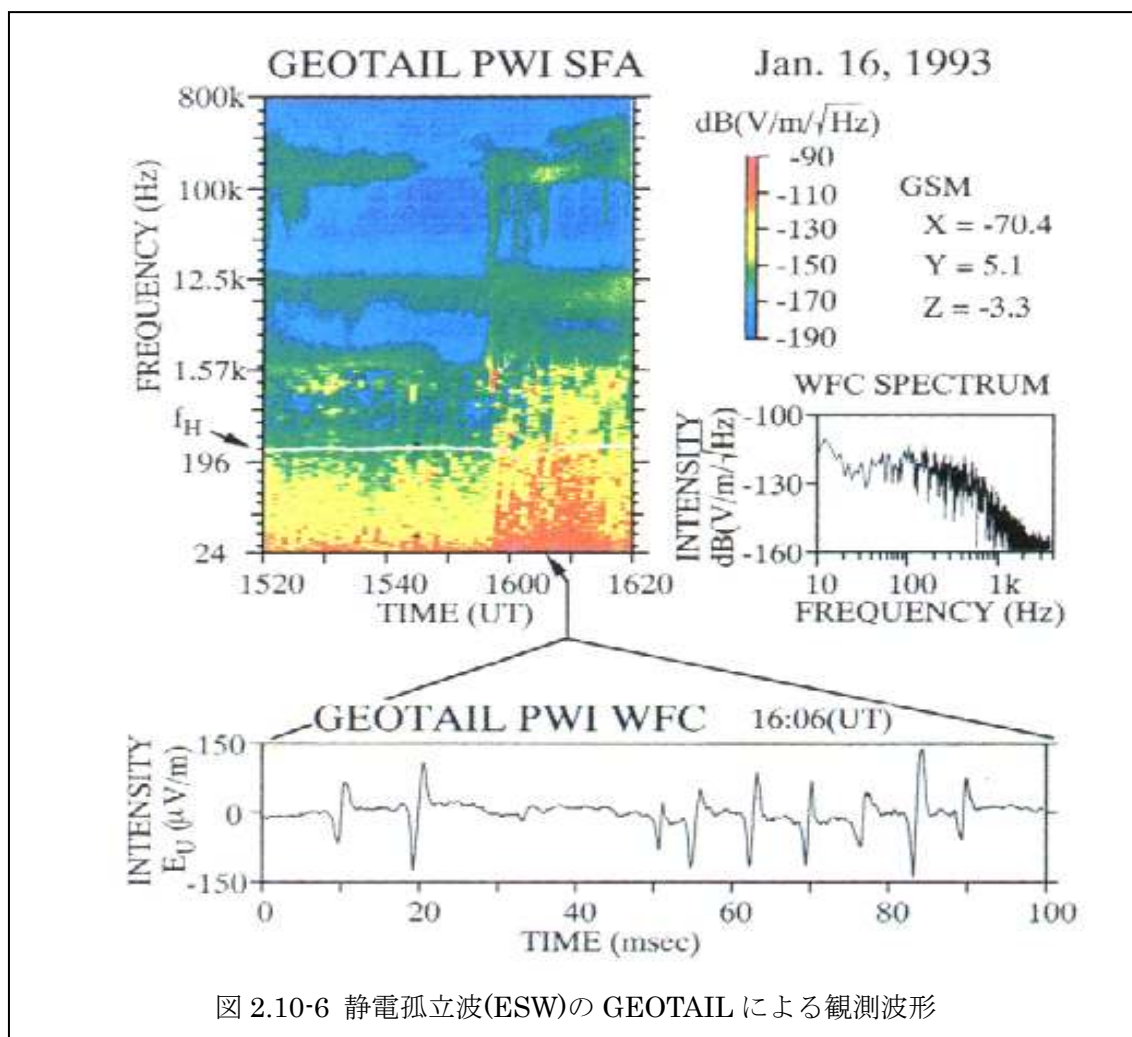


図 2.10-6 静電孤立波(ESW)の GEOTAIL による観測波形

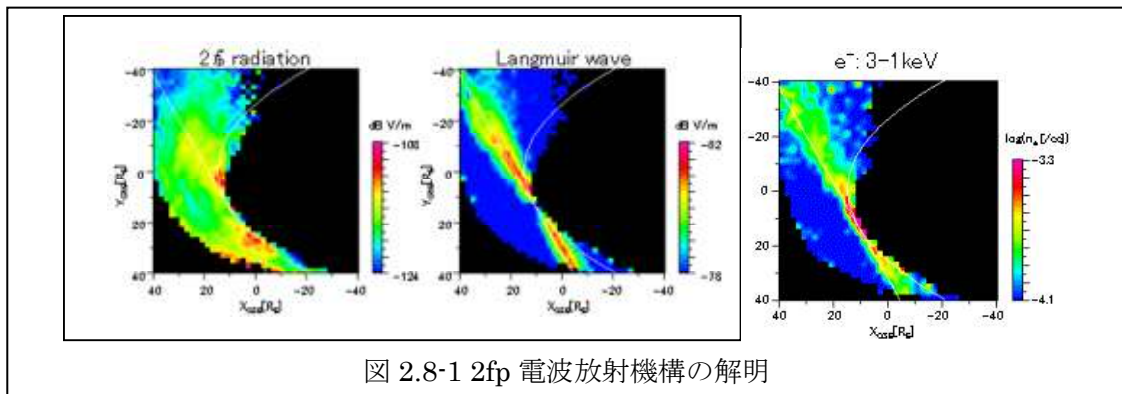
捉器 (WFC) は、それがノイズではなく位相のそろった孤立波であることを発見した。静電孤立波 (Electrostatic Solitary Wave) と名づけられたこの波形は、電子ビーム不安定性の非線形発展として位相空間に現れる電子ホールであること計算機実験・データ解析・理論を組み合わせた総合的な解析により明らかになった。この静電孤立波はプラズマシート境界層のみならず、磁気圏の様々な領域でも観測され、宇宙プラズマ中の典型的な非線形構造の一つとして認知され、Geotail 後の衛星観測には波形観測器が標準搭載される契機となった。電子ホールは理論的には BGK モードと分類されるが、そのような奇妙なモードが宇宙プラズマの中にも実在することを立証した点が画期的な発見である。ESW の発見を契機として、世界中で電子ビーム不安定性の非線形発展および非線形プラズマ構造に関する 2 次元・3 次元の計算機実験が行われ、非線形プラズマ物理の素過程の研究が新たな展開を見せている。これらの業績で平成 18 年度文部科学大臣表彰の科学技術賞 (研究部門) に、松本紘・大村善治・小嶋浩嗣らによる”科学衛星による宇宙プラズマ静電孤立波の発見とその理論研究”が選ばれた (Matsumoto et al., 1994, 1999、Omura et al., 1994, 1996, 1999、Kojima et al., 1999、Umeda et al., 2004)。

#### フォアショック領域

##### “波動観測はショック面での電子について何を語るのか?”

Geotail は、磁気圏バウショック前面のフォアショック領域で静電的孤立波 (ESW) を多く観測し、その空間分布も明らかにした。フォアショック領域において、ESW はおもにショック面に沿った形で空間分布していることが、観測される ESW の性質は電子フォアショック領域とイオン・フォアショック領域では、異なっていることが明らかになった。前者では、電子ビームと同時に計測され電子ビーム不安定性の非線形発展の結果と考えられる一方、後者では、その振幅が数十 mV/m 程度と電子領域のものよりも二桁ほど大きく、イオンも関与する電流駆動型不安定性の非線形発展などの発生モデルが考えられる (Shin et al., 2007)。

地球磁気圏からはさまざまな kHz 帯の電波放射が見られるが、衝撃波で加速された keV 電子が放射する「2fp 電波放射」に関して Geotail は大きな成果を上げた。本電波



は、太陽電波バーストと共通機構によると見られるが、その励起機構は確定していなかった。Geotail 観測は、電波源が「高エネルギー電子ビーム」・「強ラングミュア波」領域と一致することを直接示しただけでなく、放射電波強度と局所静電波強度との間に非線形関係があることを初めて示した (図 2.8-1)。さらにこの非線形性モデルを計算機実験し、三波共鳴過程による電波放射機構が確定した。つまり、地球衝撃波・太陽電波バーストなどに伴う「2fp 電波放射機構」が確立された。この精密な理解により、今後の様々な天体への適用が可能となり、「空間スケールの違いは電子の加速効率にどう影響するか」といった根源的な問題へとアプローチすることができる (Kasaba et al., 2000)。

### 磁気圏境界での観測

#### “波動観測は磁気圏昼側・高エネルギー電子の何を語るのか？”

磁気圏境界内側において多数のコラス放射が観測された。Chorus は磁気赤道付近において高エネルギー (数十 keV) のサイクロトロン共鳴電子との相互作用により発生すると考えられており、ホイストラムモードで地球磁力線に沿って高緯度方向へ伝搬する ELF/VLF 帯 (数百～数 kHz) の電磁波である。Geotail PWI の波形捕捉受信器 (WFC) により、数秒の間に周波数が上昇／下降する詳細なスペクトル構造や  $k$  ベクトル、ポインティングベクトルなどの伝搬特性が定量的に解析された。その結果、磁気赤道付近で発生し、南北の高緯度方向へと伝搬していく様子が非常にはっきりと確認された。一方、Chorus emission のスペクトルデータと、同時に Geotail LEP/CPI により計測された

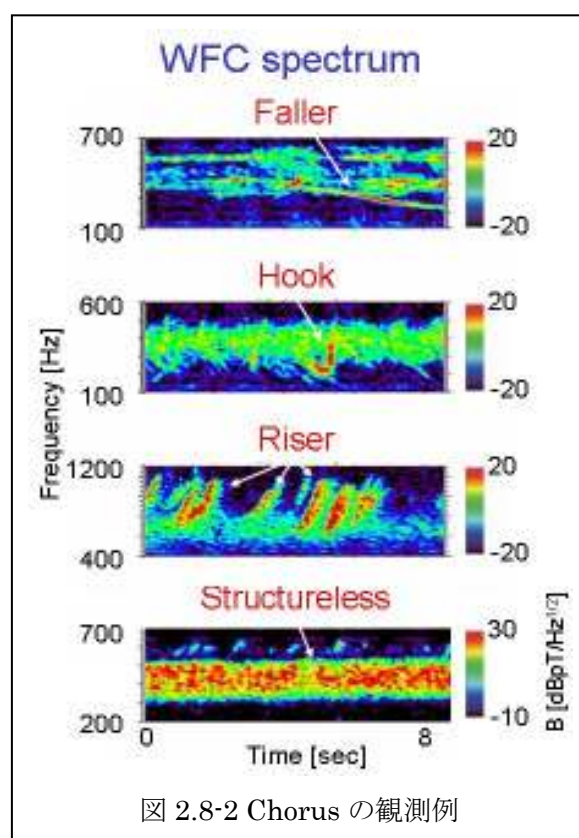


図 2.8-2 Chorus の観測例

サイクロトロン共鳴電子の速度分布関数 (温度異方性) から直接計算した波動の線形成長率を比較したところ、Chorus が強いところでは、逆に成長率が下がっているように見える傾向が示された。これは、最初 Chorus を発生させた温度異方性の高い共鳴電子が、波動の成長につれて急激にピッチ角拡散を受けて温度異方性が減少してしまい、計測された速度分布関数 (数秒平均) は、その後の状態を見ているためではないかと考えられた。実際に Chorus の発生・伝搬に関する粒子シミュレーションによっても、波動の成長及びそれに伴う共鳴電子のピッチ角拡散が 1 秒以内の非常に短い時間で起こっている可能性が確認された。

## 新たな連続成分の発見

### **“波動観測は磁気圏にある密度勾配層の何を語るのか？”**

Geotail による尾部領域観測では、新しい電磁波の連続成分が観測され Lobe trapped continuum radiation (LTCR) と名付けられた。LTCR は、ローカルの電子プラズマ周波数から高周波側に広がる構造をもち、その詳細なスペクトル構造や偏波が Geotail PWI の波形捕捉受信器 (WFC) によって解析された。その結果、電磁波としての伝搬方向の空間分布の手掛かりが得られ、さらに、レイトレーシングによる波動の伝搬通路解析を行った結果、その発生領域が、60R<sub>E</sub> 付近の尾部領域で、しかも朝側、夕方側に偏って分布することが明らかになった。発生源の位置で大きな密度勾配が LTCR の発生には必要であり、磁気圏構造の観点からたいへん興味深い。

AKR (Aurora Kilometric Radiation) と同様の数 100kHz 帯において、数時間以上にわたって観測される新しいキロメートル帯の連続波 Kilometric Continuum を発見した。統計的には、磁気緯度 $\pm 5$  度以内で受かる受信確率が大きく、極域で発生している AKR に対し、Kilometric Continuum は磁気赤道付近で発生していると考えられる。この発見は、その後、広く関心を持たれることとなり、IMAGE、WIND、POLAR、Cluster-II、INTERBALL、AKEBONO などのデータを駆使してプラズマ圏境界面での電子密度の動的振る舞いに関して新しい知見を与えている (Hashimoto et al., 1999, 2005)。

## 磁気リコネクション領域における観測

### **“波動による散乱は必要な異常抵抗を生み出すか？”**

無衝突プラズマにおいて磁気再結合が起こるためには、磁気リコネクション領域において、無衝突であるという立場からすれば異常な磁場散逸をになう物理プロセスが必要である。理論的には様々な「異常現象」が提案されてきたが、その中でも有力候補であったのは、電流層中心での LHD 波動（低域混成ドリフト波動）による「異常抵抗」説である。Geotail 衛星による磁気リコネクション領域の詳細観測は、異常抵抗源の探査を可能にしたが、実際、磁気リコネクション領域の磁気中性面付近の高ベータ領域においても LHD 波動が存在することをはじめて同定した。しかし、詳細な理論解析によって抵抗値を推定したところ、観測された LHD 波動の強度ではサブストーム現象のトリガーを説明できる程の磁場散逸をもたらしすることができないことが明らかになった。

(Shinohara et al., 1998)

LHD 波動は電流層中心では弱く十分な電気抵抗を発生させられないが、一方で、中心から離れた電流層の端では強度が強くなる傾向も明らかになっている。この事実を受けて、たとえ磁気中性面において LHD 活動が弱くとも電流層中に強い LHD が励起されていれば素早い磁気リコネクションの駆動が可能である、という理論も提出されており、将来の重要な観測課題となっている。

[参考文献]

- [05-12] Hashimoto et al. (2005), J. Geophys. Res.
- [99-16] Hashimoto et al. (1999), J. Geophys. Res.
- [00-21] Kasaba et al. (2000), J. Geophysics. Res.
- [99-24] Kojima et al. (1999), Nonlinear Proc. in Geophys.
- [99-33] Matsumoto et al. (1999), Geophys. Res. Lett.
- [94-24] Matsumoto et al. (1994), Geophys. Res. Lett.
- [01-46] Omura et al. (2001), Astrophys. Space Sci. J.
- [99-43] Omura et al. (1999), J. Geophys. Res.
- [96-31] Omura et al. (1996), J. Geophys. Res.
- [94-38] Omura et al. (1994), Geophys. Res. Lett.
- [07-10] Shin, K., et al. (2007), Earth, Planets Space.
- [98-71] Shinohara et al. (1998), J. Geophys. Res.
- [04-48] Umeda et al. (2004), J. Geophys. Res.