

## GEOTAIL 衛星で観測された Continuum Radiation 波動の遮断周波数の自動検出

村田 健史 愛媛大学工学部情報工学科

人工衛星のテレメトリには限界があり、データを送信できる量は制限される。そこで、人工衛星上で処理し、送信データ量を少なくするオンボード処理が重要となる。本研究ではプラズマ密度検出のオンボード処理を目指した自動解析を試みた。人工衛星 GEOTAIL の SFA(Sweep Frequency Analyzer)によって観測される Continuum Radiation の低周波数側遮断周波数を自動検出する。その結果、あらかじめ地球磁気圏の密度の時間・空間変化の情報を考慮することにより、高い確率で遮断周波数の検出が可能であることが分かった。

### Detection of Lower Cutoff of Continuum Radiation Observed with GEOTAIL Spacecraft

Ken T. Murata: Faculty of Engineering, Ehime University

The quantity and quality of the data transferred from spacecraft are increasing as technologies develop. However, the amount of transferred data is limited. Herein, we propose automatic analysis algorithm that will lead to onboard analysis: we detect the lower cutoff of Continuum Radiation from SFA (Sweep Frequency Analyzer) onboard GEOTAIL. The cutoff frequency usually provides the local plasma density in the vicinity of satellite. Consequently, we successfully detect the cutoff frequency with high accuracy if temporal and spatial changes in plasma densities are taken account into the algorithm.

#### 1. まえがき

科学衛星 GEOTAIL は、日本、アメリカ、ヨーロッパを始めとする各国の研究者の協力で国際太陽地球系物理(STP: International Solar-Terrestrial Physics) 計画という、複数の衛星データにより地球磁気圏の構造、および太陽から地球へのエネルギー注入プロセスを解明するための計画の一環として 1992 年 7 月 24 日に打ち上げられた。GEOTAIL はほぼ黄道面上に位置し、地球の半径の数倍から約 200 倍の広い範囲で地球磁気圏尾部を観測し続けている。

本研究では人工衛星 GEOTAIL から地球に送られてくるプラズマ波動データを解析し、オンボード処理を目指したプラズマ密度の自動検出を行う。プラズマ密度は宇宙プラズマの研究にとって重要な基礎物理量の一つである。GEOTAIL 衛星において直接プラズマ密度情報をもたらすのは、低エネルギー粒子観測装置(LEP や CPI)である。しかし、地球磁気圏にはローブやプラズマシートなどの様々な領域が存在しており[1]、低エネルギー粒子のカウント数は人工衛星の地球磁気圏での領域によって

は、プラズマ密度を正確に評価できない領域が存在することが分かっている。

本来、プラズマ密度はプラズマ周波数から求めることができる。プラズマ周波数を知ることができる波動に Continuum Radiation(C.R.)と呼ばれるプラズマ波動が存在する。この C.R.の低周波数側遮断周波数(カットオフ)が多くの場合、プラズマ周波数に一致しているためである。

これまで、研究者は自ら目視で SFA データからカットオフを求めなくてはならなかった。これには膨大な労力が必要となり、また主観が伴うなどの問題点がある。本研究ではこのカットオフを自動で検出できるシステムを設計、構築する。

#### 2. Continuum Radiation の特徴

C.R.は 100kHz 以下の周波数帯域で準定常的に観測される波動で、1973 年に Brown によって発見された[2]。C.R.は地球近傍のプラズマポーズから発生しているプラズマ波動である。地球近傍から衛星まで伝搬した C.R.は衛星近傍の電子プラズマ周波数より低い周波数については遮断され、衛星まで届くことはできない。したがって、宇宙プラズマでは一般に C.R.の低周波数

側遮断周波数は衛星近傍のプラズマ周波数に一致していると考えられている。これより、C.R.の遮断周波数を求めることにより衛星近傍でのプラズマ周波数を求めることができる。プラズマ周波数  $f$  とプラズマ密度  $n$ の間には

$$f = 9\sqrt{n}$$

という関係があるため、プラズマ周波数を求めることにより、プラズマ密度を求めることができる。

## 2.1 SFAによる観測

C.R.は GEOTAIL 衛星が観測を行う地球磁気圏内では、ほとんどの領域において観測される。GEOTAIL/PWI(Plasma Wave Instruments)班のプラズマ波動ダイナミクススペクトル観測器 SFA[3]によると、図 1 のように横軸に時刻、縦軸に周波数、色で信号強度を表すカラープロットで表示される。SFA は 8 秒ごとに観測されるダイナミクススペクトルである。縦軸の周波数は低周波数側からバンド 1(24 ~ 196Hz)、バンド 2(196 ~ 1570Hz)、バンド 3(1.57 ~ 12.5kHz)、バンド 4(12.5 ~ 100kHz)、バンド 5(100 ~ 800kHz)に分けられ、各バンド内は等間隔の 128 点のデータとなっている。

カットオフの自動検出の研究は我々の研究室で過去にも差分法やニューラルネットワークなどを用いて行われている[4]。しかし、いずれも決定的な手法には辿りつけていない。その理由としては、カットオフが衛星の位置により大きく変動することや、カットオフを求めるための SFA データに多くのノイズが含まれていること、C.R.を求めるにはバンド 3 とバンド 4 の全てのデータからではスペクトルパターンが複雑過ぎるなど、様々な要因が考えられる。

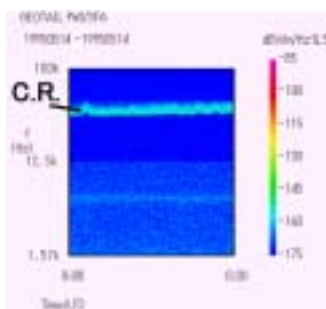


図 1: SFA プロットにおける C.R. のダイナミクススペクトル

## 2.2 プラズマ周波数の時間変化量の統計処理

プラズマ密度は短時間内に大きく変動することはないと考えられる。このため、カットオフ周波数も短時間内では大きく変動しないと考えられる。どの程度変化するかを知るため、LEP のプラズマ密度観測を用いて調べた。LEP は約 125 秒ごとに低エネルギーイオンのプラズマ密度の測定が可能である。図 3 は LEP でプラズマ周波数が 125 秒間でどの程度変化しているのかを

調べた結果である。期間は 1993 年 9 月から 1998 年 9 月までの 11,409,357 点において調べた。この結果より、本研究では約 10.9375kHz (SFA データのバンド 4 の周波数巾で 16 点) 以内にプラズマ周波数があると仮定するが、LEP において 125 秒後にプラズマ周波数の変化が仮定の範囲内にある確率は 99.5967% であった。これにより、特定の時間のカットオフ周波数が求まり、その次の時刻でカットオフを求めたいとすれば、求まっているカットオフの周波数の上下 16 点だけを調べるだけでカットオフを求めることができる。SFA は一時刻分で約 2.7kByte 程度の容量があるが、検出時に扱うデータ量は約 8 分の 1 の 0.34kByte 程度に小さくすることができる。この手法については次章で述べるが、このデータ量の削減はオンボード処理時には非常に有利な点となる。

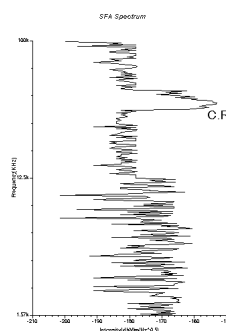


図 2: C.R. が観測されている時間のダイナミクススペクトル

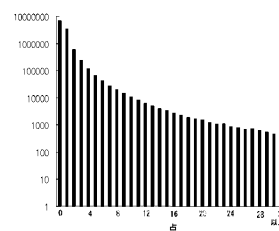


図 3: LEP において一時刻(約 125 秒後)の変化量(横軸は SFA のバンド 4 での周波数間隔での点数であるので、1 点は約 683Hz)

## 3. 自動検出法

本章では SFA データからカットオフを自動検出するための手法を詳しく説明する。本研究では、カットオフ検出の手法を 3 段階に分ける。まず、検出の前処理として SFA データのノイズ除去、その後に基準点の獲得、そして最後に基準点を使った時間方向への掃引を行う。

### 3.1 ノイズの除去

まず、STARS に SFA データを読み込み、ノイズ除去の前処理をする。これは、SFA データには図 4 のような時間・周波数方向共に連続しないスパイク状のノイズが含まれていることが多く、このノイズが誤検出の原因になるためである。この前処理にはエッジ成分を残したまま、スパイク状のノイズを除去することができる

ように工夫されたメジアンフィルタを用いる。

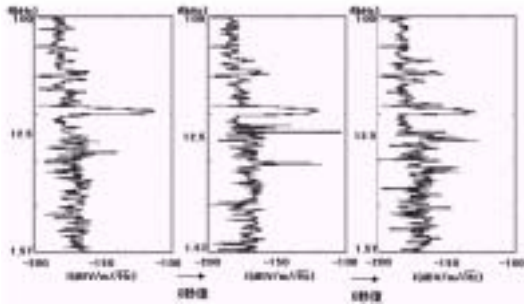
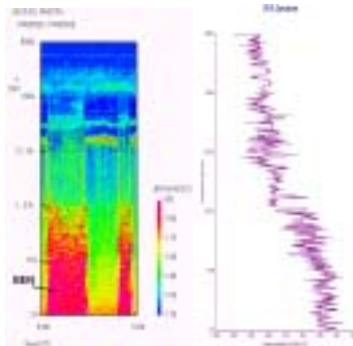


図 4: 時間・周波数方向共に連続しないスパイク状のノイズのスペクトルの時間変化

スパイク上のノイズ以外に検出の妨げになる波動現象としては図5に示される BEN(Broadband Electrostatic Noise)、図6に示される NEN(Narrowband Electrostatic Noise)、図7に示される AKR(Aurora Kilometric Radiation)がある。これらの波動のスペクトルは C.R.のスペクトルと似ているため、本研究では誤検出を防ぐためこれらの3つの波動が発生している時刻については C.R.のカットオフ検出を行わない。したがって、C.R.の検出に先立ち BEN、NEN、AKR が発生している時刻を特定する。



BEN は主にバンド 1 からバンド 3 にかけて見られ、信号強度  
図5: 左: NEN が発生している時刻の SFA プロット 右:  
NEN のダイナミックスペクトル

の大きなスペクトルが特徴である。そこで、バンド 1 とバンド 2 の信号強度の平均を求め、BEN と判断する閾値を上回れば BEN が発生している時刻とする。NEN はバンド 2 とバンド 3 に現れ、不連続のスペクトルを持つ。そこで、バンド 3 においてスペクトルの強い周波数を上から 10 点求め、周波数のばらつき具合を調べ、設定した閾値を超えるものを NEN が発生している時刻とした。AKR はバンド 4 とバンド 5 で観測される。AKR のスペクトルは信号強度が強い周波数帯が C.R.に比べ広いため、信号強度の

強い周波数帯が AKR であると判断する閾値を超えれば AKR と判断する。判断基準となる閾値は検出者が設定できるシステムになっている。

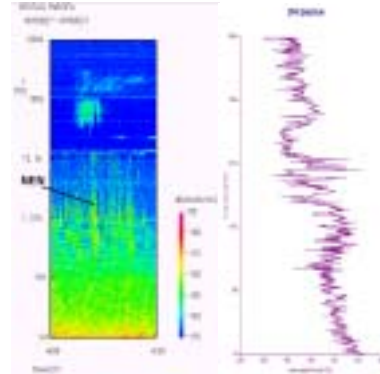


図6: 左: NEN が発生している時刻の SFA プロット 右: NEN のダイナミックスペクトル

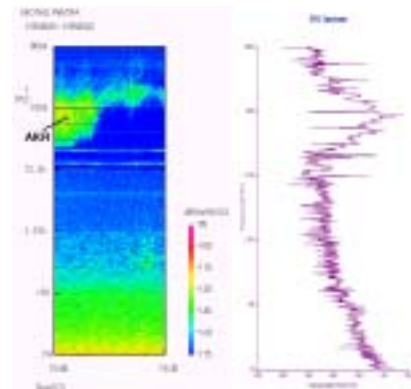


図7: 左: AKR が発生している時刻の SFA プロット 右: AKR のダイナミックスペクトル

### 3.2 基準点の獲得

C.R.の低周波数側カットオフは主にバンド 3 とバンド 4 (1.57 ~ 100kHz) に見られる。しかし、バンド 3 とバンド 4 の全ての情報を固定して用いた場合、無駄な情報を多く含むことにより、正確な検出を行うには不利となる。そこで、特定の時刻の基準となるカットオフ周波数を検出する。次に 2.2 節で述べたように、その基準の点の情報を用いてその他の時刻の検出を行う。図で示すと図8のようになる。

まず、検出対象とするカットオフ周波数を 1 点または複数点求める。これを基準として対象時間内のカットオフを求める。基準周波数の求め方は 2 つに分かれる。一つ目は Langmuir Wave(LW.)を利用した完全な自動検出である。LW.のスペクトルは C.R.に比べスペクトル強度が強くバンド 3 とバンド 4 の全デー

タからでも用意に見つけることができる。LWの検出は図9で示されるように二値化処理を用いて行う。これは閾値をだんだん下げていき、閾値を超える点が連続してバンド4の周波数中で3点(約2.06kHz)以上現れるとLWとして検出するというものである。バンド4の周波数中で3点というのは経験から定めた。

しかし、この方法はLWが観測されている時刻にしか適用できない。そこで二つ目の基準獲得方法として、マウスの入力を利用する方法を用いる。SFAのカラープロットを解析者が見て、カットオフ周波数がはっきりと分かる時刻においてカラープロット上の点をクリックする。それによってその点を基準とする方法である。

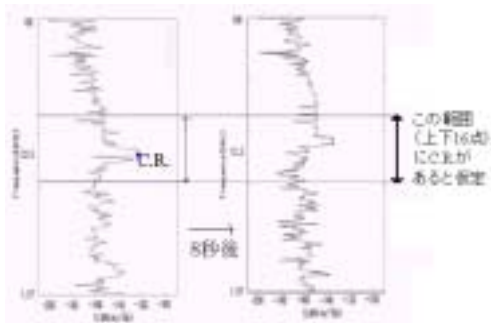


図8: 時間方向での検出周波数の設定

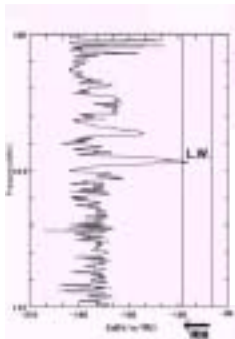


図9: LWのスペクトルとLW検出のための閾値設定法

### 3.2 時間方向への掃引

次に、基準点近傍の時刻の基準の周波数に近い周波数だけのデータからカットオフを求め、手順は図8に示した通りである。検出対象の周波数中が狭められているため、図9のLWを求めた手法で十分カットオフを求めることができると予想される。ここでは経験から閾値を上回る点がバンド4の周波数中で5点(約3.418kHz)以上連続になればC.R.として検出するようにした。さらに、求めたカットオフの情報を用いて次の時刻のカットオフを求め、これを繰り返していく。基準の時刻の前の時刻についても同じことを行う。これは、プラズマ周波数が短時間内には急激に変化することはないという仮定を踏まえた上での検出法である。ただし、バンド3とバンド4では周波数間隔が異なるため、データ

を一度バンド4の周波数間隔に変換する。つまり、バンド3のデータは128点あるが、これをバンド4の周波数間隔の変換すると16点になる。したがって、この時点ではバンド3のデータ16点とバンド4のデータ128点の144点から検出を行う。検出点がバンド3にある場合にはその点を基準としてバンド3の周波数間隔で再度検出を行う。

## 4. 結果

以上の手続きにより、無造作に選んだ例に対してこの検出法を適用した。図10はカットオフがバンド4にあり、目視で用意に読み取れる例である。このときには検出は正確に行われた。図11はカットオフがバンド3にあり、目視で読み取ることのできる例である。この場合もまた正確に検出が行われた。今回用いた日時に対してはカットオフがバンド3かバンド4にあり、目視で遮断周波数を読み取れる時刻においては、信頼性の高い結果が得られた。しかし、図12のように目視により辛うじてカットオフを読み取ることのできる場合には誤検出してしまふこともあった。

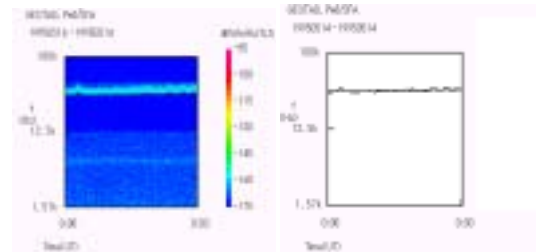


図10: 1995年5月14日0:00~0:30の検出結果

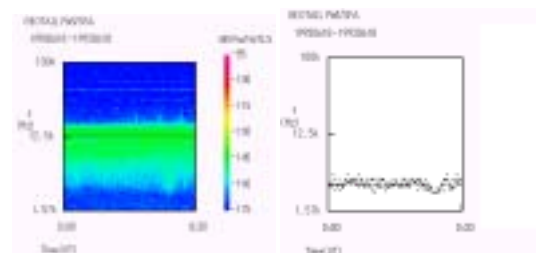


図11: 1993年6月18日0:00~0:30の検出結果

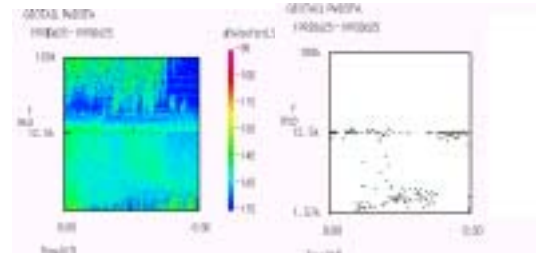


図12: 1993年6月25日0:00~0:30の検出結果