

## 学生のページ

F  
For  
Students  
S自然プラズマ波動による  
宇宙のリモートセンシング

松本 紘 長野 勇

松本 紘 正員 京都大学宙空電波科学研究センター  
E-mail matsumot@kurasc.kyoto-u.ac.jp  
長野 勇 正員 金沢大学工学部情報システム工学科  
E-mail nagano@is.t.kanazawa-u.ac.jp

Remote Sensing of Space Plasma via Plasma Wave Observation. By Hiroshi MATSUMOTO, Member (Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Kyoto-fu, 611-0011 Japan), and Isamu NAGANO, Member (Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa-shi, 920-8867 Japan).

## 1. はじめに

21世紀からいよいよ国際宇宙ステーションを足掛りとして、本格的な人類の宇宙利用、宇宙文明への挑戦が始まろうとしている。その宇宙の99%はプラズマに満たされている。したがって、このプラズマ環境の学術研究は、宇宙開拓事業、宇宙文明の基礎を固める上で是非やり遂げなければならない。宇宙空間では高エネルギー粒子と熱プラズマ、磁場、電場などが相互作用を織りなし、華やかで複雑な現象が乱舞している。中でも、電磁波・プラズマ波は中性子星、銀河、恒星の生成・消滅に伴う大規模なプラズマ加速、加熱にかかわりながら、宇宙に充満している。今後30世紀に至るまで人類が宇宙文明を打ち立て、生活の場とする太陽系空間（太陽・惑星・惑星間空間）においても電磁波・プラズマ波は変幻自在とも思える多彩な現象を示している。これらの宇宙空間の構造、力学、エネルギー変化、爆発、加速、加熱などの千変万化の状態に関する最も感度の高い情報源が電磁波・プラズマ波である<sup>(1),(2)</sup>。

本稿では、超高温、超高密度の銀河プラズマ、恒星プラズマのリモートセンシング（天文学）に使われているX線、ガンマ線、紫外光、可視光、赤外光領域の電磁波は取り上げない。太陽系プラズマ、特に科学衛星で直接観測できる地球周辺の電磁波・プラズマ波動を取り上げることとする。科学衛星を現場に送り込み、数Hzから数MHzの電磁界をプラズマ粒子計測、直流磁場・電場計測と同時に観測することで、プラズマ力学過程の中でどのようにプラズマ波動が励起され、電磁波に変換され、伝搬してゆくかを詳細に研究することが行われている。宇宙開拓の準備として、地球周辺プラズマ環境についての学術的知識をもたすだけでなく、天文学で観測される光・電磁波がプラズマ世界のどのような星の世界の情報をもたらしてくるのかという、ある種の逆問題を明らかにできるという面からもその意義は高い。天文の世界では

その場所に行って観測できないため、理論やシミュレーションとリモート観測を比較して学問が進んでいる。ほぼ同じ原理で発生する電磁波のルーツを現場で計測できる太陽系の飛翔体探査では、そこで計測される宇宙（太陽地球系空間、地球周辺空間）の構造や力学などの情報を理論・シミュレーションと直接比較できるため、その根拠を確固たるものにできるという長所を持っている。本稿では宇宙科学研究所を中心とするGEOTAIL衛星ミッションに搭載した我々の自然プラズマ波動受信機が何を見たか、何をもたらしたかということの一端を紹介する。

## 2. プラズマ波動観測装置

GEOTAIL衛星は、1992年7月に米国ケネディスペースセンター（KSC）から打ち上げられた。この衛星には、主な装置として、直流電場、直流磁場、プラズマ、高エネルギー粒子・イオン、そしてプラズマ波動を観測する装置が搭載された<sup>(3)</sup>。プラズマ波動観測装置（PWI: Plasma Wave Instruments）のブロック図を図1に示す。観測する波動の周波数範囲は、電界については5.6Hz～800kHz、磁界については5.6Hz～12.5kHzである。電界センサとしては、全長100mの直交ワイヤアンテナ、磁界センサとしては、3軸サーチコイルが搭載された。波動観測は、スペクトルと波形の観測に大別できる。スペクトル観測器は、高周波数分解能で観測する周波数掃引受信機（SFA）と周波数分解能を犠牲にして時間分解能を高くした多チャネル受信機（MCA）からなる。これらは磁場と電場各1成分の観測である。一方、波形捕捉受信機（WFC）では、電場2成分、磁場3成分の5成分の波形を取得する。自然プラズマ波動の波形観測から得られる情報は、その波動の特徴を調べるために大変貴重であり、GEOTAILでは、このWFCによって、これまで発生メカニズムが不明であった波動の解明や、幾つかの新しいプラズマ波動の発見を成し遂げた<sup>(4)</sup>。ま

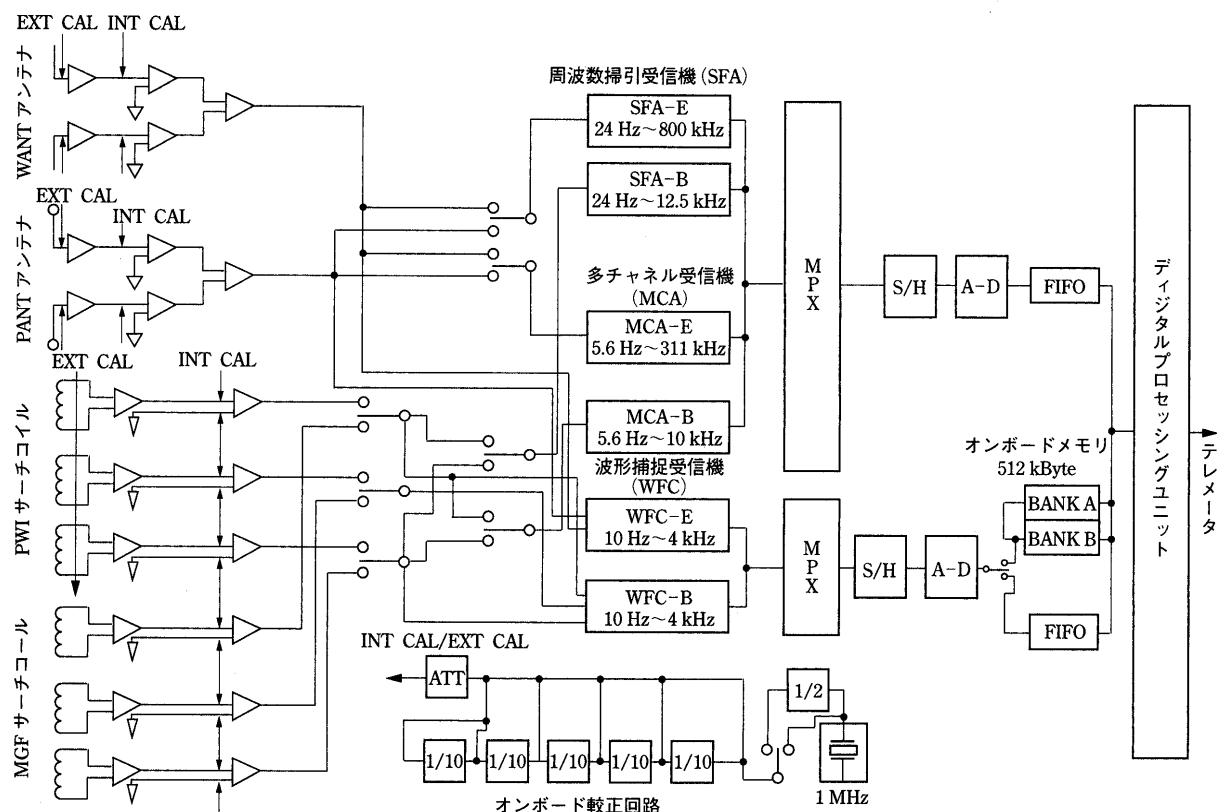


図1 科学衛星 GEOTAIL に搭載されたプラズマ波観測装置 (PWI) のブロックダイアグラム

た、PWI 装置は、数年の歳月を費やして、省電力化、小型化、軽量化等の幾つかの課題を克服して開発された。そして GEOTAIL では衛星全体の EMC 対策が組織的に取り組まれ、電磁波的に非常に静粛な環境が実現され、それも新しい発見へとつながることとなった。

### 3. 地球周辺空間で観測されるプラズマ波動

GEOTAIL の軌道は、磁気圏尾部を探索するために、打ち上げから約 2 年間は、赤道面に沿って、地球の太陽側に近地点として 8~10Re (Re は地球の半径)、尾部側に遠地点として 220Re の超楕円軌道を取り、その後は、太陽風プラズマが地球磁気圏に衝突する Bow Shock、及び地球に近い尾部領域を調査観測するために遠地点が 30Re の近地球軌道に変更されている。

図 2 は、衛星が地球磁気圏尾部の約 80Re 付近に位置するとき、SFA で観測した電界成分のダイナミックスpektrルの例である。グレイの濃淡は、電界強度を示す。縦軸は周波数 (Hz)、横軸は時間 (国際標準時) である。100kHz 以

上に見られる太陽を起源とする Type III 太陽電波、局所的な電子プラズマ周波数 ( $f_p$ ) 付近で強く励起するラングミュア波 (LW)、 $f_p$  を下限周波数とし、その上に伸びる連続スペクトルを持つコンティニウム波 (CR)、

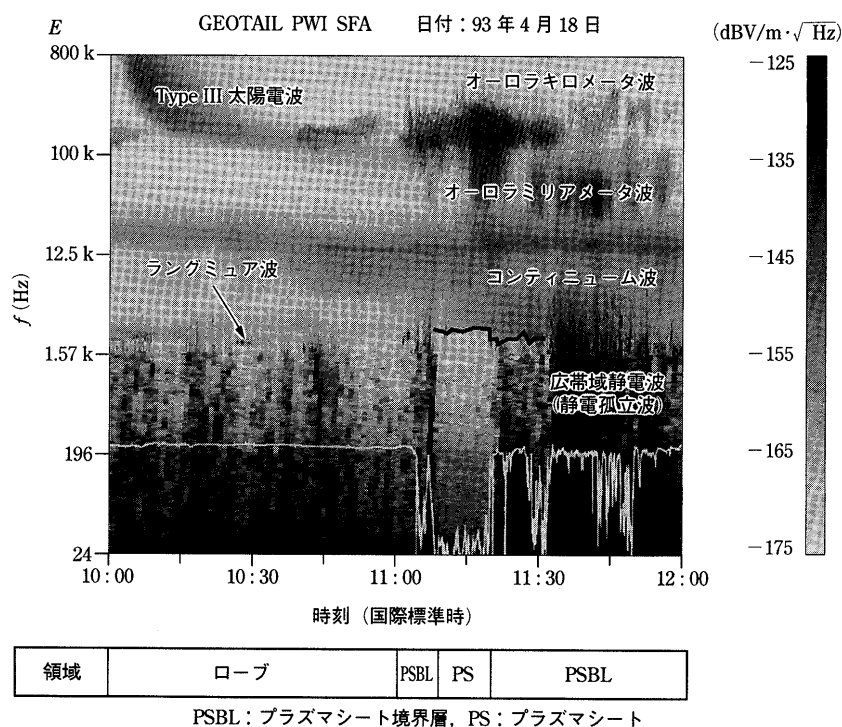
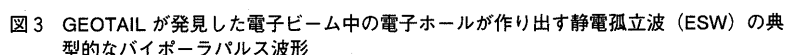
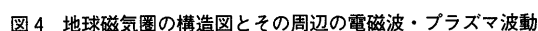


図2 GEOTAIL で観測された地球近傍プラズマ中の典型的なプラズマ波動のダイナミックスpektrル



るようになっている。

GEOTAIL の打ち上げから現在までに観測した自然プラズマ波動を、地球周辺の磁気圏構造図中に示す(図4)。地球磁気圏は、太陽風(太陽からのプラズマの流れで、その速度は、静穏時では約 400km/s)と地球磁場の相互作用で生成されている。太陽風が引きずる太陽の固有磁場と地球磁場の角度により、太陽風プラズマが地球磁気圏に流入する量が決められている。磁気圏内では、磁場とプラズマの動的な変化により、図4のような構造が近年の衛星観測により明らかになってきた。図2以外の自然プラズマ波動として、Bow Shock 付近では、2fp エミッション、昼側の磁気圏ではコーラスエミッショ



ン、電子サイクロトロン高調波、マグネトシースでは、マグネティックノイズバーストが発生する。これらの波動の発生メカニズムは、近年発達した計算機シミュレーションにより研究が進められている。また、伝搬の解析には、レイトレーシング技術や Full wave 計算法が使われている。

#### 4. リモートセンシングとしての 自然プラズマ波動

CR の低域遮断周波数は、衛星近傍のプラズマ周波数となるため、CR を観測することで、電子密度の構造が正確に測定できる。図2の11:12 (UT) 付近に見られる遮断周波数は5.0kHzで、密度に換算すると0.3個/ccとなる。これまで観測したすべての軌道のうち、尾部のある位置での断面でこの方法を適用すると磁気圏の構造が分かる<sup>(4)</sup>。AKRはオーロラの発生と相関が大であるため、この波動の強度とオーロラ活動の指標が一致していることが確認された。一方、伝搬しにくい静電波動は衛星の近傍で発生したと考えられ、宇宙構造の境界が明白に分かる。その例が図2に示す11:10~11:20 (UT) の区間で、BENの発生がない。これは、明らかにプラズマシートを示している。

#### 5. む す び

以上のようにGEOTAIL衛星に搭載したプラズマ波動観測装置で観測した磁気圏尾部中の自然プラズマ波動の一部を紹介した。現在、地球周辺の宇宙で、GEOTAILのほか、米国(NASA)、ロシア(IKI)、ヨーロッパ(ESA)から打ち上げられた衛星が連携して観測している。これらのデータはインターネットを介して相互に利用できる体制が整えられている。一つの波動を複数の衛星で観測することで、波源の位置の同定や、より空間精度の高い宇宙の構造が明らかになろうとしている。この研究を通じて、高度なデジタル処理技術、計測システム、計算機実験等の技術が習得でき、更に世界の研究者と触れ合

う機会が多く、若い学生諸君の知的好奇心を刺激することは間違いない。この分野に興味を持って頂ければ幸いである。

#### 文 献

- (1) 大林辰蔵, 宇宙空間物理学, 物理学選書5, 裳華房, 1971.
- (2) 松本 紘, 宇宙開拓とコンピュータ, 情報フロンティアシリーズ⑩, 情報処理学会(編), 共立出版, 1996.
- (3) H. Matsumoto, I. Nagano, R. Anderson, H. Kojima, K. Hashimoto, M. Tsutsui, T. Okada, I. Kimura, Y. Omura, and M. Okada, "Plasma wave observations with GEOTAIL spacecraft," J. Geomag. Geoelectr., vol.46, pp.59-95, 1994.
- (4) H. Matsumoto, H. Kojima, Y. Omura, and I. Nagano, Plasma Waves in Geospace: GEOTAIL Observations, Geophysical Monograph, no.105, pp.259-319, 1998.
- (5) H. Matsumoto, H. Kojima, T. Miyatake, Y. Omura, M. Okada, I. Nagano, and M. Tsutsui, "Electrostatic Solitary Waves (ESW) in the Magnetotail: BEN Wave forms observed by GEOTAIL," Geophys. Res. Lett., vol.21, pp.2915-2918, 1994.



まつもと ひろし (正員)

昭40京大・工・電子卒。昭42同大学院工学研究科修士課程了。昭52同大学超高層電波研究センター教授、平4~10同センター長、平12改組により同大学宇宙電波科学研究センター教授、現在に至る。文部省宇宙科学研究所客員教授併任。郵政省通信総合研究所客員研究官。工博。専門はスペースプラズマ物理学、宇宙電波工学、宇宙エネルギー伝送。昭50日本電磁気学会田中館賞、平10アメリカ地球物理学会フェロー、平11情報通信月間推進協議会志田林三郎賞、平12アンテナ・伝播国際シンポジウム論文賞。地球電磁気・地球惑星圏学会会長、評議員。国際電波科学(URSI)会長。JGRアジア・太平洋地域編集長。アメリカ地球物理学会、IEEE シニア各会員。



ながの いさむ (正員)

昭43金沢大・工・電子卒。昭45同大学院工学研究科修士課程了。昭58~59米国ジェット推進研究所NRC研究員。昭62金沢大電気・情報工学科教授。この間プラズマ中の電波伝搬、衛星搭載用波動計測装置の開発に従事。工博。昭62地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞、平12北國文化賞受賞など。