



6. 太陽系プラズマの観測技術

6. Observational Technique of the Solar System Plasma

6.1 「その場」観測

6.1 In-situ Observation

齋藤義文, 小嶋浩嗣¹⁾, 笠羽康正²⁾, 阿部琢美, 笠原 慧, 松岡彩子

SAITO Yoshifumi, KOJIMA Hirotsugu¹⁾, KASABA Yasumasa²⁾, ABE Takumi,

KASAHARA Satoshi and MATSUOKA Ayako

宇宙科学研究所, ¹⁾京大大学生存圏研究所, ²⁾東北大学地球物理学専攻

(原稿受付: 2014年6月11日)

宇宙空間におけるプラズマの「その場」観測は、観測ロケットによる地球電離圏の観測に端を発し、人工衛星が地球近傍の周回軌道から、より遠い地球磁気圏の領域、そして他天体へとその探査領域を広げるに従ってその観測領域を広げてきた。太陽系プラズマの「その場」観測は、低周波から高周波の電場・磁場を含む「場」の観測と、eV程度の熱的・超熱的荷電粒子からMeVを超える高エネルギー荷電粒子を含む「粒子」の観測に大きく分けることができる。これらの「場」と「粒子」の「その場」観測を行う観測装置は、宇宙時代の幕開け以来、最新の技術を応用しながら探査する対象に適合する形で、高機能・高性能化、小型・軽量・省電力化が進められてきた。本節では、これらの「その場」観測装置の現状と、将来に向けての開発状況について述べる。

Keywords:

plasma, charged particle, magnetic field, electric field, plasma wave, radio wave

6.1.1 はじめに

宇宙空間はプラズマで満たされており、電磁場と荷電粒子の集団的な振る舞いが相互作用しながら時間発展している。この宇宙空間プラズマの世界は、地上での常識が通用しない世界であり、「その場」観測ができる太陽系探査データが貴重な価値をもつことになる。宇宙空間におけるプラズマの「その場」観測は、観測ロケットによる地球電離圏の観測に端を発し、人工衛星が地球近傍の周回軌道から、より遠い地球磁気圏の領域、そして他天体へとその探査領域を広げるに従ってその観測領域を広げてきた。これらの観測に必須となる搭載用観測装置は、広がる観測領域と共に、各々の領域における観測対象に適合する形で開発・改良がなされ、次第に観測性能を向上させながら現在に至っている。本節では、これらの「その場」観測用観測装置の現状と将来に向けての開発の状況について述べることにする。

6.1.2 「その場」粒子観測

宇宙空間における荷電粒子の「その場」計測装置は、計測手法の違いから、熱的粒子(数eV)、低エネルギー粒子(数eV~50keV)、中エネルギー粒子(数keV-数100keV)、高エネルギー粒子(数10keV-)のように観測装置の守備範

囲とする測定エネルギー範囲で分けることができる。この中で、熱的粒子、低エネルギー粒子、高エネルギー粒子の計測装置については「その場」観測が始まった1950年代当初から既に開発・搭載が行われていたが、中エネルギー粒子の観測装置は比較的歴史が浅い。本節においては、3つの異なる測定エネルギー範囲別に、「その場」粒子観測装置について述べる。

6.1.2.1 熱的粒子計測

太陽紫外線や高速の荷電粒子による惑星大気の大気圏の電離により生成されたプラズマは更に周囲の大気と衝突を繰り返して準安定状態に達し電離圏を形成する。地球型惑星の電離圏は熱エネルギーが1eV以下のプラズマが支配的で、宇宙探査の初期の時代から観測の対象となってきた。

もっとも古くから用いられてきた電離圏熱的プラズマの測定器がラングミュアプローブ[1]である。これは球型や円筒型の電極に対して数Vの範囲で変化させるDCバイアスを印加し、補集されるプラズマによって生じる電流-電圧特性から電子密度・電子温度等を推定する方法である。電気回路や取得データからの電子密度・温度推定のためのアルゴリズムが比較的単純なために最も頻りに衛星に搭載されてきた観測機器のひとつである。しかし、実際の測定においてはプローブ周囲のシースによる影響、プローブの

表面汚染や材質の不均一性、プローブの磁場中での高速運動によるローレンツ力等が誤差要因となり、正確な測定のためにはこれらを克服することが必要である[2]。

熱的エネルギーよりも高い1 eV~数 eVの領域を超熱的エネルギー帯とよんでいる。超高層大気中で電離により生成された光電子の周囲の粒子との衝突によるエネルギー交換過程を考える上で重要な帯域であるのに対し、測定が困難なためにデータが得られていなかったが、下山ら[3]は2次高調波法の原理に基づき検出器に2次電子増倍管を用いることで1 eV以上のエネルギー帯までの分布関数を推定することに成功した。測定の基準となる衛星電位を測定しつつ、更に高いエネルギー領域までの観測を可能にすること、非等方的なエネルギー分布観測のため、2次元的な測定を行えるようにすることが今後の課題である。

一方、熱的エネルギー帯のイオンについての測定法は電子の場合とは異なる。Retarding Potential Analyzer (RPA) [4]は電流測定用電極の前面に複数枚のグリッドを設け、印加電圧に応じた電流値変化を測定するものである。通常、電離圏イオンの熱速度は衛星速度に比べ小さく、見かけ上の運動エネルギーは質量に応じておおよそ決まるため、印加電圧を掃引した場合の電流変化には幾つかの極大が現れる。この電流特性から、イオンの密度や温度を推定できるという原理になっている。また、イオンのドリフト速度測定のためにはIon Drift Meterが用いられる。標準的な手法は4つに分割された平板電極において補集された電流の比を用いて、電極面に平行方向の速度成分を推定するものである。これらの熱的イオン観測のための測定器は1970年代から世界の数多くの人工衛星に搭載されてきた。

1980年代以降、熱的イオンに関しては質量分析とエネルギー分析を1台で行う測定器が開発され、多くの顕著な観測成果が報告されてきた。あけぼの衛星に搭載された超熱的イオン質量エネルギー分析器[5]はRPAとベネット型質量分析器とを組み合わせ、熱的~超熱的エネルギー帯のイオンの観測を可能にした。図1はその断面図である。衛星が正に帯電して熱的イオンの取り込みが難しい場合にグリッド1に負の電位を与え、引き込む役割を果たす。グリッド2~7はRPAセクションでエネルギー分析が行われ、グリッド8には高周波電圧、10および11には直流電圧が印加され、これらが質量分析器の役割を果たす。

以上に述べたように熱的プラズマ粒子の計測は比較的シンプルな原理に基づくものが多く、宇宙におけるその場観測が始まった初期の頃から衛星やロケットに搭載され、観測が行われてきた。しかしながら、測定器の運用面において課題が多く、個々の問題を克服することが測定精度の向上に直結することが特徴であり重要な課題となっている。

6.1.2.2 低エネルギー粒子計測

太陽系プラズマの「その場」観測における、低エネルギー粒子は数 eV から~50 keV 程度のエネルギー範囲であり、丁度太陽風プラズマの主成分のもつ運動エネルギーや、地球電離圏においてオーロラを光らせる粒子の運動エネルギー、地球磁気圏の多くの領域におけるプラズマのもつ熱エネルギーや運動エネルギーに相当することから、磁

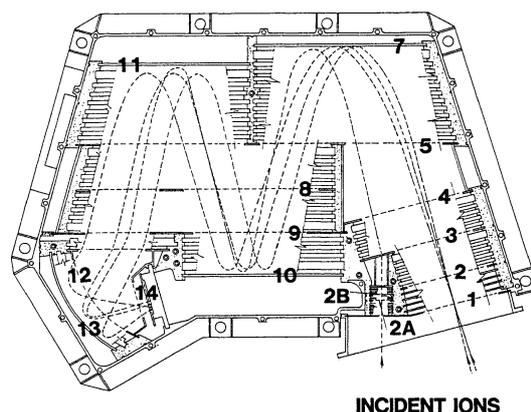


図1 超熱的イオン質量エネルギー分析器の断面図[5]。

気圏の構造やダイナミクスを解明するために必須の観測対象となって来た。このエネルギー範囲の荷電粒子の計測には、荷電粒子の経路上に電位を与えた電極を配置することで、電場で荷電粒子の軌道を偏向させて計測対象粒子のエネルギーを選択して計測する、静電分析器が広く使用されている。計測対象の粒子フラックスが低い場合には、荷電粒子を1個ずつ計測する必要があるが、このためには荷電粒子の電荷を増幅するための電子増倍管が使用されている。現在最も良く使用されているのは、CEM (Channel Electron Multiplier) や MCP (Micro Channel Plate) である。CEMは1次元の増幅しかできないが、MCPと比較して、広いダイナミックレンジがとれることや、バックグラウンドノイズが少ないことから現在でも広く使用されている。一方MCPは2次元の増幅が可能であるため、静電分析器と組み合わせて、少ないリソースで高角度分解能の測定ができるなどのメリットがあり、大多数の同種の観測装置で使用されている。

さて、エネルギー分析を行う静電分析器部分であるが、この部分の形状にも様々なものがあり、現在でも測定対象・目的に応じて様々な形状の分析器の開発が進められている。宇宙空間の「その場」計測で用いられる静電分析器には、大きく分けて荷電粒子のエネルギースペクトルを計測するエネルギー分析器と、イオンの質量種を弁別してエネルギースペクトルを計測するエネルギー質量分析器がある。エネルギースペクトルを計測するエネルギー分析器には円柱型静電分析器や球型静電分析器を含む形状の異なる様々な物があるが、現在主流となっているのは球型静電分析器である。球型静電分析器の中でも1970年代に開発されたTop-Hat型の静電分析器[6](図2に例を示す)は、360度の視野をもち、どの方向から粒子が入射しても同じ特性であるという非常に優れた特性をもっている。そのため、現在「その場」低エネルギー粒子の計測に用いられる観測装置の殆ど全てで、Top-Hat型かあるいはそれを用途に応じて変形した静電分析器が用いられている。

一方、イオンの質量分析も行うイオンエネルギー質量分析器にも様々な物が存在するが、現在低エネルギー粒子用イオンエネルギー質量分析器の主流となっているのは静電分析器と、観測装置内の一定の距離をイオンが飛行する時間を計測するTOF (Time Of Flight) 質量分析器を組み合

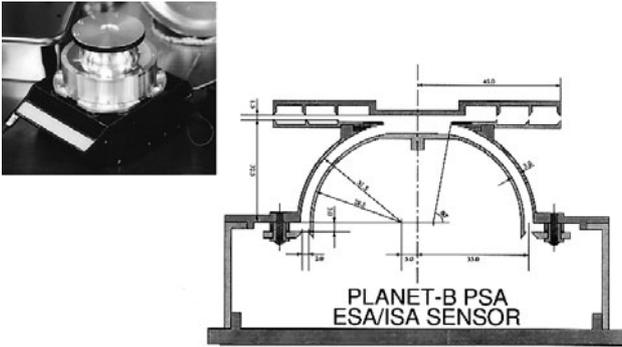


図2 Top-Hat型静電分析器の例 (NOZOMI衛星搭載 PSA-ESA/ISA).

わせたもの[7](図3に例を示す)であり、少ない重量で、かつ高い時間分解能でイオンの質量分析が可能になっている。もともとTOF型質量分析器は、高エネルギー粒子用観測装置として用いられていたが、TOF計測のためのスタートまたはストップタイミング信号の生成に超薄膜カーボンフォイル(数10Åの厚さ)を使用することから、低エネルギー粒子に用いる場合にはカーボンフォイルを粒子が通過する際に粒子が失うエネルギーや、角度散乱が質量分解能を悪化させる要因となっている。地球磁気圏近傍の観測では、観測対象となる重いイオンは殆ど存在しないため、主成分の水素イオン、ヘリウムイオン、酸素イオンくらいを分離できる質量分解能($m/\Delta m \sim 5$)があれば多くの情報を得ることができる。しかしながら、他天体周辺のプラズマ環境の観測を行う場合、例えば地球の月の場合には、電離アルカリ大気の計測などが重要となるため、より高い質量分解能が要求される。それに対応して開発されたのが、LEF-TOF (Linear Electric Field-Time Of Flight)型質量分析器[8](図4に例を示す)である。線形電場の中を飛行する粒子の運動が単振動であることを利用して、カーボンフォイルを粒子が通過する際の角度散乱や、エネルギー損失の影響を抑える事で、水星磁気圏探査衛星 Bepi-Colombo/MMOに搭載される同種の質量分析器 MPPE-MSA

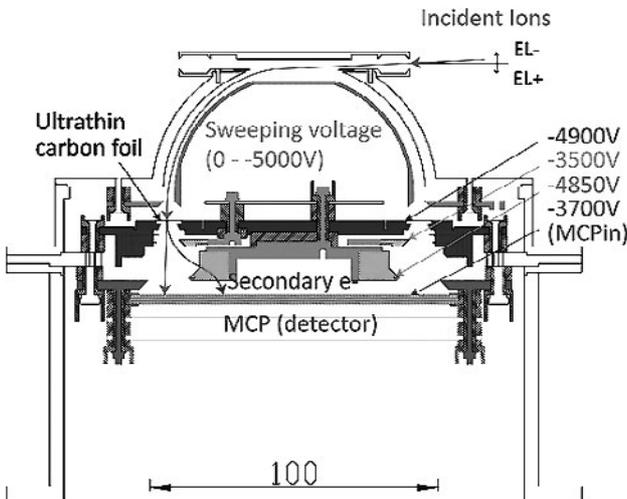


図3 TOF型質量分析器の例 (ERG衛星搭載 LEP-i) (宇宙科学研究所・浅村和史博士提供)。

[9]では要求される高い質量分解能($m/\Delta m \sim 40$)を実現している。

以上のように、宇宙時代の幕開け以来、様々な構造、原理の低エネルギー粒子観測装置が開発されてきており、現在も高性能・高機能、かつ小型・軽量・省電力の観測装置をめざして活発な観測装置開発が続いている。将来の衛星観測に向けて、今後開発を進めるべき方向は以下の通りである。

- 1) 超小型衛星、編隊飛行衛星に搭載できる超小型高性能観測装置の開発
- 2) 電子スケールの現象を高い感度で計測するための(3次元の分布関数をミリ秒以下の時間分解能で計測する)観測装置の開発
- 3) 他天体周辺に存在する同位体イオンを計測できる超高質量分解能質量分析器

6.1.2.3 高エネルギー粒子計測

地球・惑星磁気圏プラズマの起源は太陽風、惑星電離圏、そして月(衛星)表層などであり、そのエネルギーはeV-keVという、低エネルギーのレンジに分類される。ところが磁気圏とその近傍においては、オーロラ領域、放射線帯、磁気圏前面衝撃波領域、そして磁気圏尾部の磁気リコネクション領域など、いたるところで、数10 keVからMeVにも及ぶ高エネルギー電子・イオンが観測される。このように、地球(および木星や土星といった磁化惑星)は天然の荷電粒子加速器となっており、その加速メカニズムを理解するために種々の高エネルギー粒子観測器が開発されてきた。

高エネルギー粒子のもっとも古い「その場」観測例は Explorer-I に搭載されたガイガー管によるもの[10]であるが、現在では、エネルギー計測性能などの要求から半導体検出器(シリコン)が使用されることがほとんどである。ただし、数MeV以上の電子を計測対象とする場合、シリコン検出器では厚みが足りない(電子が貫通してしまい、入射エネルギーを正しく計測できない)ため、代わってシンチレータが用いられる。イオンを計測する場合には、シリコン検出器の前段にTOF型質量分析機構を用いる場合と、 $\Delta E \times E$ 方式を用いる場合がある。前者は、低エネルギー計

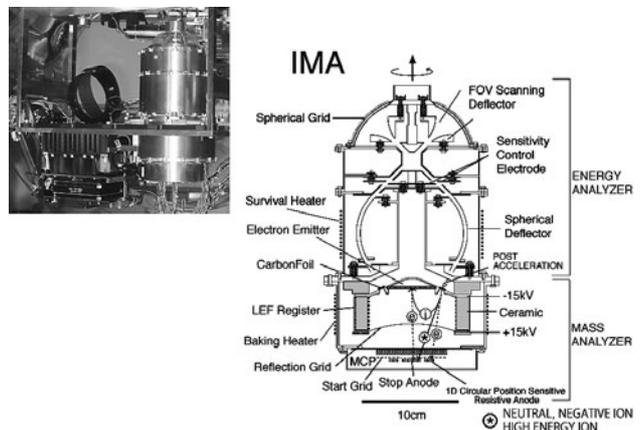


図4 LEF-TOF型質量分析器の例 (Kaguya衛星搭載 MAP-PACE-IMA)。

測の場合と同じくカーボンフォイルから出る2次電子を利用したものである(図5)。後者は、薄い検出器をイオンが貫通する際に落とすエネルギー ΔE がイオン質量(粒子種)および入射エネルギー E に依存することを利用したものである。

宇宙での高エネルギー荷電粒子計測「その場」観測に際しては、検出器自体よりもセンサーヘッドのオプティクスに設計の重点が置かれることが多い。低エネルギー帯の観測同様、広い視野であらゆる方向から飛来する粒子を観測することが理想だからである。また、低エネルギー側の観測とエネルギーレンジをつなぐため、検出エネルギーの下限を下げる事も重要である。そのためには、検出器の入射面側の不感層(入射粒子の落としたエネルギーが検出されない領域)をできるだけ薄くすることになる。しかしながら実際には、太陽光の入射をさえぎるために入射面を保護する事も多く、このため、いわゆる高エネルギー粒子観測器の計測エネルギーレンジ下限は、電子や陽子に対しては通常、30-50 keV程度となる。さらに酸素イオンのような重粒子に対しては100 keVを越えてしまうため、低エネルギーイオン観測器との連続的なエネルギー分布取得は非常に難しいのが現状である。電子や陽子に関しても、30-50 keV付近の粒子計数において精度を出すことは難しく、高エネルギー粒子計測器で取得したエネルギースペクトルが、低エネルギー粒子分析で得られるエネルギー分布と必ずしも連続的につながらないことがほとんどである。

以上のような数10 keV帯の観測ギャップを埋めるため、中間エネルギー粒子分析器というものが開発されている。ここで静電分析器を用いる場合、低エネルギー計測と同様のTop-Hat型をそのまま適用しようとする、センサーのサイズが非常に大きくなってしま(計測エネルギーが球面の半径に比例するため)ので、衛星搭載のためには形状に工夫が必要になる[11]。また、低エネルギー粒子検出に用いられるMCPは、中間エネルギー帯での電子に対する検出効率が低く不確実性も大きい、検出器としてあまり適さない。そこで、MCPに代わる検出器として、アバ

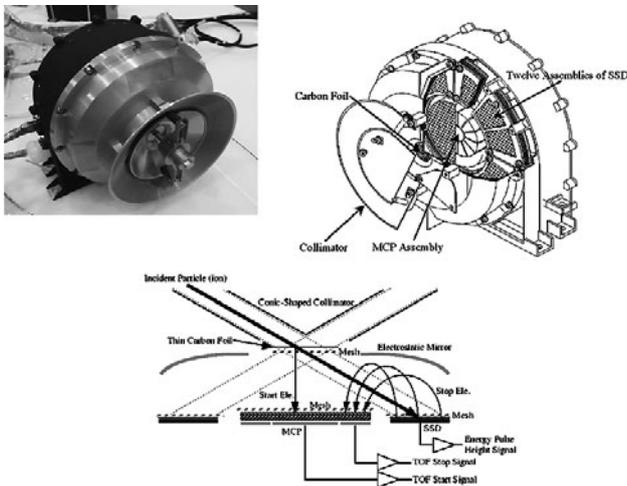


図5 高エネルギーイオン分析器の例(水星探査機MMO搭載HEP-i[9])。

ンシェフォトダイオードが注目されている。この検出器は、内部での信号増幅により高いS/N比が得られるため、数keVの電子を検出する事も可能である[12]。ゲインが印加電圧や温度により大きく変化するなど、扱いの難しい素子であるが、うまく使いこなせばこれまで観測ギャップの中に隠れていた現象の新たな発見なども期待できる。

6.1.3 「その場」電場・磁場観測

6.1.3.1 電場計測

地球や惑星の磁気圏および惑星間空間には、プラズマの振舞に起因して、様々な時間スケールをもつ電磁界が存在する(環境に依存するが、 $<1\text{ Hz} \sim \text{数十 MHz}$)。遅い変動はプラズマの大規模輸送や加速を引き起こし、早い変動はプラズマの密度・熱的特性・分布関数の情報をもたらす。微弱な電磁界の検出には、高効率のセンサーと低ノイズのレシーバーが必須であるが、衛星・探査機では更に「計測器の母体」となる(1)衛星・探査機システムの低電磁ノイズ化、(2)センサー・レシーバーの軽量・省電力・耐宇宙環境化の両面が必要である。本節では、(2)における最近の開発事例を紹介する。本技術の展開としては他に電離層・地中レーダー等があるが、次機会に譲る。

a. レシーバー：アナログASIC化

地上機器における軽量・省電力化は、一般に「デジタル化」によって実現が図られる。電磁場受信器は、観測帯域の選択・制限およびanti-aliasingに要する各種フィルタ、センサーからの微弱信号をとらえる高ゲインプリアンプ、センサー・プリアンプからの長距離伝送(センサーは衛星・探査機から外界へ伸展するため、レシーバーまで数m規模の伝送線を要する)を受ける低ノイズアンプなどの「アナログ回路」が受信器に占める割合が他観測機器に比べて大きく、デジタル化だけでは軽量・省電力化は難しい。

我々はアナログASIC(Application Specific Integrated Circuit)を用いたアナログ受信器の小型化に取り組んでいる[13]。OPAMP等の個別部品を使用して回路を組む従来常識から、シリコン上にMOSFETやキャパシタ等を設計し、専用チップとして作り上げる。そのため、潜在的にはロジック部も含めた必要全機能を一チップ内に実装可能となり、劇的な小型・省電力化が実現する。最近の微細化CMOSプロセスの発展によって、「周波数を高くしにくい」「ノイズが大きい」といった課題は改善された。

図6は試作開発した5mm角のアナログASICにより実現したマッチ箱サイズの受信器である[14]。図の基板上、左上にアナログASICが実装されている。このASICでは、100 kHzまでの電磁界6成分波形を観測できる。また制御信号によりゲインを0/20/40 dBで切替可能である。通常の受信器だとこのレベルを実現するには、A4基板サイズ・数百g規模が必要だが、これをマッチ箱サイズ・25gに軽量化できた。

MOS構造は耐放射線に関する危惧が宇宙利用という観点で存在するが、使用プロセスを $0.25\ \mu\text{m}$ と小さくすることで耐放射線性に強くした結果、100 kradまでの放射線量では機能に問題がないことを確認した。

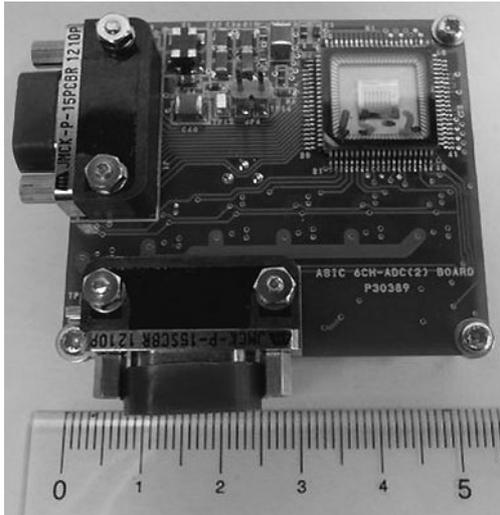


図6 アナログASICにより実現したマッチ箱サイズのプラズマ波動受信器。

これまでに、上述の受信器部に加え、電界・磁界プリアンプのASIC化にも成功した[15]。MOSFET構造のため、トランジスタを用いる従来OPAMPでは機能しなくなる液体窒素温度でも機能したので、将来の外惑星探査等の更なる厳しい環境下に対しても展開可能性を秘める。実際、欧州木星探査機に搭載予定のフランスチーム磁場プリアンプでは、この技術を援用した耐低温型アンプが初適用される予定である。更に「観測波形データ圧縮」等のデジタル部混載に向けて研究開発を進めている。

b. 電界センサー：伸展物開発

宇宙空間における電場計測は、低周波では「2点のプラズマ電位計測」、高周波では「電磁波計測」であり、電界センサーはこの両特性を併せもつ必要がある。両者とも衛星・探査機内に収納されたセンサーでは計測不能で、その外へ長大なアンテナを機械的に伸展する必要がある。一方、磁場センサーは衛星・探査機直近で計測できないものの、システム全体を流れる電流に起因する磁界ノイズは避けがたく、やはり数m規模の伸展物の先端に搭載することで初めて必要な感度を実現できる。後者は一般的な「伸展ブーム」の開発と課題を同じくするため、ここでは前者について述べる。方式には衛星・探査機をスピンさせて展開する「ワイヤアンテナ」（一般に数十m長）と、自立可能な「リジッドアンテナ」（一般に数m長）がある。

前者の「スピン面展開型ワイヤアンテナ」には、日本で開発されたGEOTAIL型と、米欧で開発された「CLUSTER型」がある (e.g.[16])。前者はプリアンプを衛星内に搭載し、AC (>数十 Hz) ではワイヤ全体をアンテナとして機能させ (宇宙空間とはC結合) し、DC (<数十 Hz) では先端球のみをプラズマに露出させてプラズマ電位を計測する (宇宙空間とはR結合)。長大なワイヤ全体をアンテナとすることで優れたAC電波計測性能を持つが、DC電位計測では衛星由来光電子の影響を受ける。一方、欧米の「CLUSTER型」では、プリアンプは図7の「ガード電極」内すなわち衛星外に置かれる。AC計測では球プローブ・ガード電極間ワイヤのみアンテナとなるため感度が低

下する。しかし、先端球をセンサとするDC計測では、衛星・プリアンプ間ワイヤを衛星電位としガード電極をより負電位に設定することで、衛星由来光電子の先端球への流入を抑止して良好なDC計測特性を得る。いずれも打上後の宇宙での長いワイヤ構造物を遠心力で展開する必要があり、これを実現する機械構造と電機構造には特段の配慮と整合を要している。

後者の「リジッドアンテナ」は、遠心力を使えない3軸制御衛星やスピン軸平行アンテナで用いられ、「衛星・着陸機での要伸展機器の技術基礎」の意義ももつ。摩擦が増大する真空中で安全確実に伸展を要する。米で長年の蓄積がある (e.g.[17])。国内には観測ロケットでのスピン面内展開用アンテナを除き実績がなかったが、近年2方式の開発を実施してきた。1つは「BeCu/CFRP素材リボンアンテナ」で、上記観測ロケット用アンテナの技術拡張である。ラッチ機構で先端蓋を外した後、アンテナ材のバネ力で自己伸展するもので、数百g程度の重量で2m程度の展開を果たす。もう1つは、図8に示す素材ステムアンテナである。これはアンテナ素材を平面展開してドラムに巻き、モータ駆動で筒形状に再構成しつつ伸展する。遠心力による座屈に耐えて5mまで安定して伸展させることが可能であることを実証してきたが (e.g.[18])、モータを含む伸展機構のため1つ2kg程度の重量となる。次期欧州木星探査計画では、ポーランドチームとアンテナ素材の自己伸展力で展開させる200g程度の2mアンテナを開発中である。

6.1.3.2 磁場計測

宇宙空間には、様々な強度の磁場が存在し、プラズマの挙動に影響を与えている。「その場」観測の対象である太陽系内で、最も強い磁場をもつ天体は太陽 (黒点における

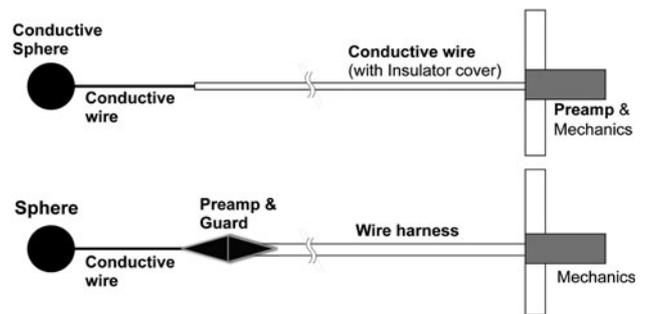


図7 ワイヤアンテナ：GEOTAIL型(上)・CLUSTER型(下)。

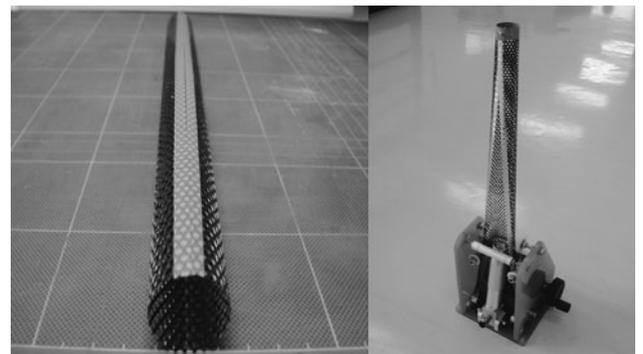


図8 CFRP素材ステム式リジッドアンテナ：左。

磁場強度数百 mT) であり、その次に強いのは木星 (表面の磁場強度数百 μT) である。一方で、太陽や木星のごく近傍は人工衛星を送り込むことが技術的にきわめて難しく、「その場」観測が事実上できない領域でもあるため、人工衛星等の飛翔体によって「その場」観測される磁場は比較的強度が小さく、多くの場合地球の表面の磁場 (数万 nT) よりも弱い。

宇宙空間の「その場」観測によって行われる宇宙科学研究の対象となる 0.1~数万 nT の磁場の 3 次元ベクトルを正確に測定する方法として、ほとんどの飛翔体でフラックスゲート方式磁力計が採用されてきた。これは、パーマロイ等の高透磁率をもつ磁性体の磁気飽和特性を利用した方法であり、直流から 100 Hz 程度までの周波数の磁場の測定に適している。図 9 にフラックスゲート方式磁力計の一般的なダイアグラムを示す。磁性体のセンサーをある周波数で励磁すると、センサーの周囲に巻いたコイルによって、外部磁場の強度と方向に応じた、励磁信号の 2 倍の周波数の信号 (ピックアップ信号) が検知される。後段の回路によって、センサーの周囲の磁場強度をゼロにする帰還をかける。

将来の宇宙空間「その場」観測プロジェクトでは、このフラックスゲート方式磁力計の高性能化とともに、センサーの小型化、回路のデジタル化や集積回路化が行われている。このような開発により、更なる小型化・省電力化を行い、重量・電力リソースの小さい、難易度の高いミッションへの搭載性の向上を図っている。

6.1.4 「その場」粒子・場の複合観測

波動粒子相互作用における個々の粒子とプラズマ波動とのエネルギー授受は、波動の電界ベクトル (E) と粒子の速度ベクトル (V) のスカラー積、即ち、 $qE \cdot V (= d/dt(1/2mV^2))$ で表すことができる (q は電荷量)。つまり、電界ベクトルと粒子速度ベクトルの位相差が、 $E \cdot V$ の符号を決めているのであり、つまり、その位相により、エネルギーが粒子からプラズマ波動にいくのか、プラズマ波動から粒子にいくのかが決まる。しかし、これまでの科学衛星では、プラズマ波動は波形、ないしは、スペクトル、プラズマ粒子は、速度モーメント、カウント数、ないしは、速度分布関数として独立して観測されており、 E と V の位相差情報は消失してしまっていた。そこで、我々はこの $E \cdot V$ を直接衛星で観測する仕組み「波動粒子相互作用解析装置 (WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer)」を提案した [19, 20]。この WPIA では、プラズマ波動波形観測の瞬時値、および、粒子センサーがとらえた一つ一つの粒子に対する速度ベクトル

ルを、衛星機上のデータレコーダに記録しておき、それらを順次、機上の CPU で読み出して、 $E \cdot V$ を計算したり、あるいは、電界ベクトルと粒子速度ベクトルの位相差を計算したりするものである。こうすることによって、従来は失われてしまっていた波動と粒子との位相差情報が保存されたままデータを取得することができる。我々はこの WPIA を我が国の次期放射線帯観測衛星 ERG に搭載し、放射線帯のダイナミックな変化に大きな寄与をしていると考えられている波動粒子相互作用を直接 WPIA で捉えようとしている [21]。このような波動粒子相互作用の直接的・定量的観測は世界初の試みであり、これまでの衛星観測とは異なる高い次元での波動粒子相互作用の研究が展開できるのではないかと期待されている。

6.1.5 おわりに

本節で述べたように、太陽系プラズマの「その場」観測装置は現在も活発に開発が進められている。「粒子」「場」の計測ともに、リソースが厳しく制限される惑星探査や複数衛星による編隊観測に向けて小型・軽量・低消費電力化の開発が進められている。これに加えて、「粒子」計測の場合には、広エネルギー範囲化、高時間分解能化、高質量分解能化を含む高性能化がその開発の中心であり、一方で「場」の計測の場合には、新しい素材を利用した軽量の伸展物の開発等が行われている。更に、「その場」粒子と波動の複合観測を行うための観測装置など新しい観測手法の開発も進んでおり、「その場」観測の観測装置開発は観測領域の拡大に対応して今後も進化を続けていくことが期待される。

参考文献

- [1] I. Langmuir and H. Mott-Smith, Jr., Gen. Elec. Rev. **616** (1924).
- [2] T. Abe and K.I. Oyama, *An Introduction to Space Instrumentation* (TERRAPUB, Tokyo, 2013) p.63.
- [3] M. Shimoyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **82**, 074501 (2011).
- [4] W.B. Hanson *et al.*, Radio Sci. **8**, 333 (1973).
- [5] B.A. Whalen, J. Geomag. Geoelectr. **42**, 511 (1990).
- [6] C. Carlson *et al.*, Adv. Space Res. **2**, 67 (1983).
- [7] M. Wuest, Geophys. Monograph Series **102**, 141 (1998).
- [8] S. Yokota *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **76**, 014501 (2005).
- [9] Y. Saito *et al.*, Planet. Space Sci. **58**, 182 (2010).
- [10] V. Allen and L.A. Frank, Nature **183**, 430 (1959).
- [11] Kasahara *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 123303 (2006).
- [12] Ogasawara *et al.*, Nuc. Instrum. Met. **A566**, 575 (2006).
- [13] H. Kojima *et al.*, Adv. Geosci. **21**, 461 (2010).
- [14] H. Fukuhara *et al.*, Measurement Sci. Tech., doi: 10.1088/0957-0233/23/10/105903 (2012).
- [15] M. Ozaki *et al.*, IEEE Sensors J. **14**, 421 (2013).
- [16] Y. Kasaba *et al.*, Planet. Space Sci. **58**, 238 (2010).
- [17] J.R. Wygant *et al.*, Space Sci. Rev. **179**, 183 (2013).
- [18] J. Koyanagi *et al.*, Adv. Composite Materials **23**, 115 (2014).
- [19] H. Fukuhara *et al.*, Earth Planets Space. **61**, 756 (2009).
- [20] Y. Katoh *et al.*, Ann. Geophys. **31**, 503 (2013).
- [21] 三好由純他: プラズマ・核融合学会誌 **89**, 535 (2013).

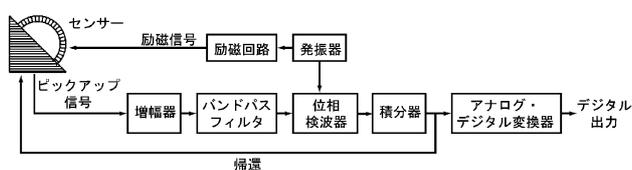


図 9 フラックスゲート方式磁力計の一般的なダイアグラム。ピックアップ信号は、励磁信号の 2 倍の周波数成分をもつ。