

太陽系の磁場を測る

松岡彩子 教授

(理学研究科 附属地磁気世界資料解析センター)

1. はじめに

太陽系の宇宙空間は、太陽や惑星電離圏に源を持つプラズマ（電離気体）で満たされている。プラズマのふるまいは磁場によって影響を受けるため、プラズマの運動やエネルギーの授受を論じる上で磁場の考慮は欠かせない。本稿では、太陽系の中の、磁場が関連する物理現象を概説し、それを測る技術やプロジェクトについて紹介する。

2. 地磁気と地球磁気圏

地球が南北に極を持つ磁場源であることは良く知られている（図1）。磁場の方向をたどっていくことで得られる経路を磁力線とよぶが、地球の近傍の宇宙空間では、南極から出た磁力線が赤道面を横切って北極に達し、「双極子」の形状を描く。

理想的な双極子では、磁力線は南北の軸について軸対象な形状となる。しかし地球の周囲では、固体地球に源を持つ磁場に加え、宇宙空間を流れる電流によっても磁場が発生している。この宇宙空間の電流は、地球の双極子磁場と太陽風との相互作用によって発生し、地球の昼側と夜側とで非対称な構造を持っている。その結果、太陽側の磁力線は地球の半径の10倍程度地球から離れた位置までしか達しないのに対し、反太陽側には地球半径の数十倍を超えて伸びている。地球とつながっている磁力線が占める空間を磁気圏とよんでおり、図2のように夜側に長く引き伸ばされた形状となっている。

地磁気世界資料解析センターでは、地球上の様々な観測設備で計測された磁場のデータを収集し、研究者に提供している。また、これらのデータから磁気圏の中の活動度を示す指数を計算し、公開している。赤道面を流れる電流の活動度はDst指数によって、極域のオーロラジェット電流の活動度は、AE指数によって表される。図3に、当センターで公表しているDst指数とAE指数のプロット例を示す。上のパネルは1989年3月の

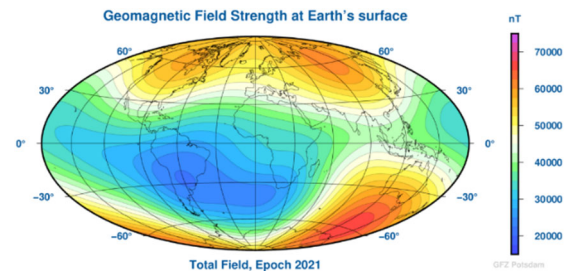


図1 地球表面の磁場強度分布
Credit : Helmholtz Centre Potsdam, GFZ
German Research Centre for Geosciences

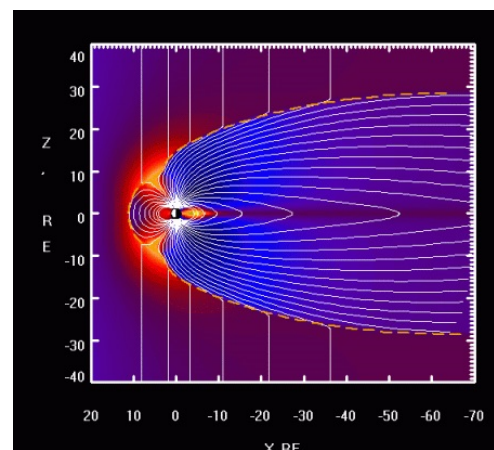


図2 地球磁気圏モデルによる磁力線の構造。左が太陽方向、上が北。地球半径を1としたスケールで描画している。Credit : N. A. Tsyganenko

Dst 指数の例である。3月13日に発生した大磁気嵐が、大きな Dst 指数として明確に示されている。

ここまでは主に、地球の周辺の宇宙空間における直流磁場について述べた。地球磁気圏の中は、交流、すなわち時間とともに変動する磁場現象も多く存在する。磁気圏と太陽風との境界である磁気圏界面や、オーロラ現象との関連の深い夜側のプラズマシートで解放されたエネルギーが、電磁波として磁気圏の中をエネルギーを伝搬することが、人工衛星の観測でわかっている（図4）。

3. 太陽の磁場

太陽は、太陽系の中で最も強い磁場源である。太陽表面の磁場は特に黒点において強く、地磁気の約1万倍の数キロガウスの強度を持つ。

太陽の磁場は、太陽風とともに太陽系の中を広がっていく。太陽系の宇宙空間には大きな電流面が広がり、太陽から出た磁力線と太陽に向かう磁力線によってはさまれている。太陽は25日（赤道）で自転しているため、太陽系の中は渦巻き型（Parker スパイラル）の磁力線で満たされている。磁場の強度は、太陽からの距離とともに弱まり、太陽の近くでは距離の二乗に、遠くでは距離に反比例する。この様子は、ボイジャー1号、2号によって初めて観測的に明らかにされた。

4. 人工衛星による磁場の観測

磁場は太陽系内や地球・惑星周辺の宇宙空間の状態を表す基本的な物理量であり、磁気圏や太陽系探査の初期より人工衛星によって計測されてきた。本稿の後半では、人工衛星により磁場の観測を行う、現在および

近未来に実施されるミッションを紹介する。

4.1 ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)

地球の磁気圏内には、放射線強度の高い放射線帯とよばれる領域がある。光速に近い速度を持つ電子が飛び交っており、放射線のフラックスがダイナミックに時間変動する。

比較的地球に近い領域でありながら、その強烈な放射線環境のために、長い間本格的な観測が行われてこなかった。近年放射線に強い機器の開発が進み、アメリカの Van Allen Probes と、日本の「あらせ」により放射線帯の理解が飛躍的に進んだ。

図5は「あらせ」衛星の外観である。5メートルの長さを持つ伸展物が本体から伸び、その先端に磁場を測るセンサが搭載されている。このようにセンサを衛星から離すことにより、衛星が出すノイズの影

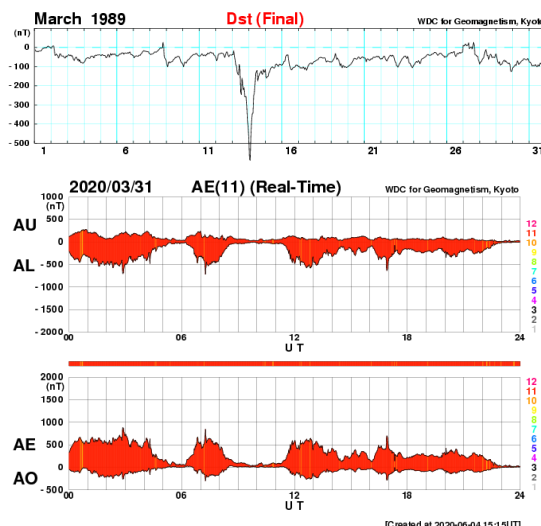


図3 京都大学理学研究科附属地磁気世界資料解析センターが提供している、Dst 指数(上)と AE 指数(下)。

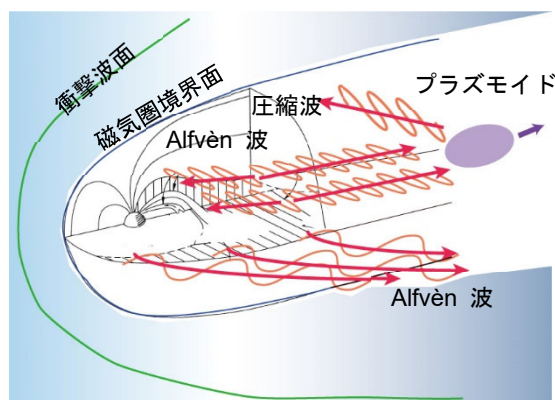


図4 衛星観測で明らかになった、地球磁気圏内で発生・伝播する電磁流体波の様子。

響を減らしている。

衛星本体からセンサまでの距離を離すことに加え、衛星自体が出す磁場ノイズの低減をはかっている。このような伸展物やノイズ低減の努力により、宇宙空間の微弱な磁場の測定を可能にしている。

4.2 国際水星探査計画ベピ・コロombo「みお」

水星は地球より小さいながらも双極子型の磁気圏を持つ。太陽からの距離が近く、地球の放射線帯と同じく放射線環境が厳しいため長い間探査が進まなかった。NASA によるメッセンジャー衛星が初めて水星を周回して観測したのに続き、2機の衛星による水星の観測を目指してベピ・コロombo計画が進行中である。

国際水星探査計画ベピ・コロomboは、日本の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) とヨーロッパ宇宙機関 (ESA) による共同計画で、各機関によって製造された、水星磁気圏探査機「みお」(MMO) と水星表面探査機 MPO により水星を多角的に観測する。2018年10月に打ち上げられ、地球、金星、水星とのフライバイを繰り返した後、2025年12月に水星周回軌道に入る予定である。

「みお」とMPOにはそれぞれ2式の磁場観測器が搭載されている。図6は「みお」衛星の外観であるが、「あらせ」と同じく、磁場センサを衛星本体から離すための5メートルの長さの伸展物を伸ばしている。また、磁場ノイズを低減する多くの方策が施されている。

4.3 火星探査

火星は軌道が地球に近く、金星の続き探査が行われた惑星であるが、磁場の様子が明らかにされたのは比較的遅い。1997年にNASAのマーズ・グローバルサーベイヤー探査機により初めて火星の表面近くの磁場の観測が行われ、その結果は研究者の予想を大きく覆すものであった。火星には、地球や水星のような惑星規模の双極子型の磁場は無いが、表面に局所的に強く磁化している場所があることが発見された。日本もほぼ同じ時期に火星探査を計画し、1998年に「のぞみ」を打ち上げて火星の磁場の観測を目指したが、機器の不具合により残念ながら火星周回軌道に投入することが出来なかった。

現在日本のJAXAにより、火星の‘月’であるフォボスのサンプルを採取して地球に持ち帰る、火星衛星探査計画 (Martian Moons eXploration、MMX) が進んでいる。MMXの主要な目的は、フォボスの組成を明らかにし、フォボスがどのように火星の‘月’となったか (ジャイアントインパクト説と捕捉説) を説明することにある。MMXには磁場観測器が搭載されており、太陽風によるフォボスの表面物質の変性

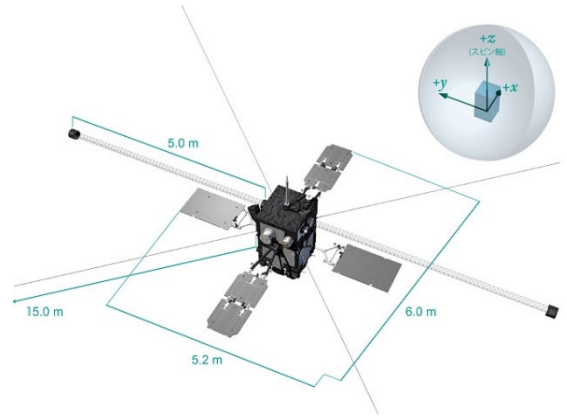


図5 ジオスペース探査衛星「あらせ」。5メートルの長さを持つ伸展物の先端に、磁場を測るセンサが搭載されている。Credit: JAXA

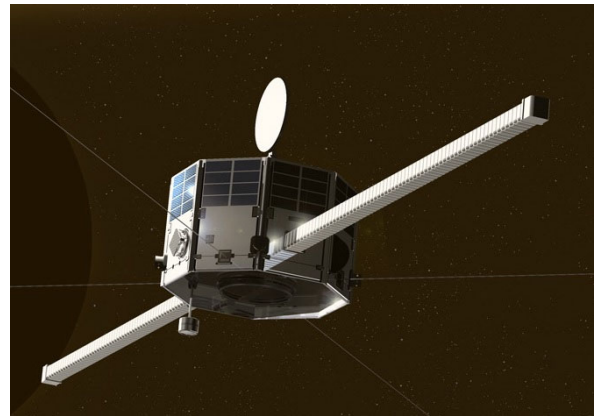


図6 国際水星探査計画ベピ・コロombo「みお」。5メートルの長さを持つ伸展物の先端に、磁場を測るセンサが搭載されている。Credit: JAXA

(宇宙風化) の理解に有用な情報を得ることを目指している。

4.4 木星氷衛星探査計画 JUICE

木星は地球よりも大きな双極子磁場を持ち、従って大きな磁気圏を形成している。木星の衛星のガニメデもまた双極子型の磁場を持ち、木星の磁気圏の中を周回して木星の磁場と相互作用し、複雑な磁場構造を形成している。

ガニメデには地下の海があると考えられている。それを調べることは木星圏がどのように分化し現在の姿になったかを理解する上で必要であるだけでなく、生命が発生する可能性のある場所としても注目されている。ESA が実施する木星氷衛星探査計画

(JUICE) はガニメデを周回してこれらの課題の解決に挑む (図7)。本稿執筆時点で、2023年4月13日に打ち上げを予定している。JUICEには2式のベクトル磁場観測器と1式の磁場強度観測器が搭載されている。ガニメデの地下の海に流れる電流により生じる磁場を観測し、地下海の状態(氷か液体の水か)や、電気伝導度からわかる成分を調査する。

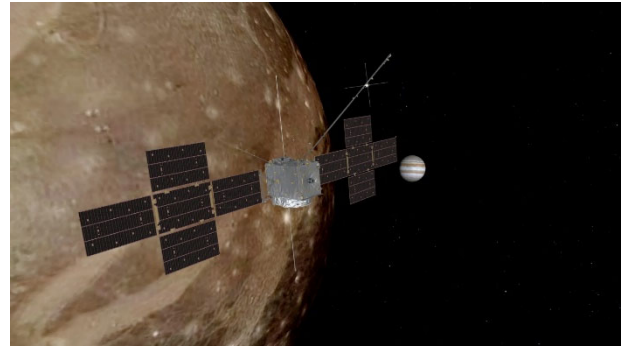


図7 木星氷衛星探査計画 JUICE のイメージ図。木星の衛星ガニメデを周回し、磁場などを観測する。Credit: ESA

4.5 Comet Interceptor

Comet Interceptor は、長周期彗星や恒星間天体のような、太陽による組成変性を受けていない原始的な彗星を、3機の衛星で探査する計画である。このような彗星は地球軌道に近づくまで認識されない。このため、ターゲットとなる彗星をあらかじめ決めて会合するように衛星を打ち上げるのではなく、ターゲットを決めずに衛星を打ち上げてラグランジュ点(L2)に待機させておく。地球軌道に近づく彗星から適したターゲットを選定した後、衛星の軌道を変更してフライバイ観測を行う。3機の衛星のうち1機を日本のJAXAが、2機をESAが製造する。日本の衛星は24U(1Uは10cm立方の直方体)程度の大きさの小型衛星で、プラズマ計測パッケージ、可視カメラ、水素コロナ撮像器の3つの観測器を搭載する。プラズマ計測パッケージは、イオン質量分析器と磁力計から成り、彗星から放出されるイオン組成や太陽風との相互作用を調べる。2029年の打ち上げが計画されている。

5. まとめ

太陽系内の様々な場所で磁場を測り行う研究は、太陽系の宇宙空間を満たすプラズマの物理過程と密接に関連した電磁エネルギーの授受だけでなく、太陽系の惑星・衛星の構造、進化の過程にも及んでいる。今後は地上及び地球周辺の観測を更に充実させ、より進んだ科学研究や社会インフラへ及ぼす影響など周辺分野への拡充を図ると同時に、未踏の領域を探査する人工衛星に磁場観測器を搭載して、新たな研究分野の開拓を目指している。