



宇宙科学最前線

小惑星探査機「はやぶさ2」を搭載したH-IIAロケット26号機の打上げ。
12月3日13時22分04秒、種子島宇宙センター。右上は「はやぶさ2」の分離。
5個のターゲットマーカーが確認できる。

宇宙空間における
粒子加速問題と木星磁気圏

惑星分光観測衛星プロジェクト／
宇宙航空プロジェクト 研究員

吉岡和夫

宇宙空間を満たす希薄なガスは、イオンと電子から成るプラズマで構成されているため、電磁場の影響を受けます。また逆に、プラズマの運動は電磁場を変動させます。さらに、希薄な状態では、粒子同士の頻繁な衝突がありません。そのため、一部の少数の粒子が極めて高いエネルギーを獲得できるようになります。実際、宇宙空間を満たす高エネルギー粒子（宇宙線）の存在量は宇宙環境を規定する基本量の一つですが、それらは星が一生の最後に起こす超新星爆発に伴ってできる衝撃波で加速されると考えられています。また、太陽のコロナ大気も、爆発現象で加速された粒子が飛来することで、惑星周辺の宇宙環境を変動させています。このように、宇宙空間における粒子加速の仕組みを理解することは、宇宙物理学における重要

問題の一つです。

我々の太陽系は、太陽から噴出されるプラズマ（太陽風）で満たされています。一方、地球や木星は、巨大な磁石のような磁場を持っています。これらの磁力線（図1の青線）はプラズマを捕らえ、その運動を制約するため、太陽風から見ると障害物です。こうして起こる太陽風と惑星磁場の衝突が、惑星周辺に「磁気圏」という領域をつくります。磁気圏の中は、太陽風プラズマで変形された惑星の磁力線と、太陽風や惑星大気に起源を持つプラズマで満たされています。今回の研究の舞台である木星磁気圏は、磁場が非常に強い、周期10時間という高速自転とともに磁力線も回転している、衛星イオの火山から出たガスが高密度プラズマとして木星周辺を漂っている、という三つの大きな

特徴を持っています。

木星近傍の磁力線は、棒磁石と同じように双極子に近い形状をしており、大きな変形はありません。この領域を内部磁気圏と呼びます(図1 A)。一方、木星から離れた領域では、自転の遠心力で磁力線が引き伸ばされます。ここでは磁力線が柔軟に変形できるため、通常は交錯し得ない磁力線同士が衝突・結合します(磁気リコネクション)。その結果、引き伸ばされたゴムのようにエネルギーを蓄えた磁力線が、プラズマ粒子に運動エネルギーを与え、約10keV(1万ボルトで加速された電子と同等)の高温電子がつくられます(図1 B)。

ところで、磁場の強い領域へプラズマが侵入すると電磁波が生じ、この波に乗って、電子はさらに加速されます。また、「磁場強度と粒子エネルギーの比は一定を保つ」というプラズマの性質を考慮すると、もし非常に磁場強度の高い木星内部磁気圏にプラズマが侵入できれば、特に大きな加速が期待できます。さらに、内部磁気圏の双極子磁場はプラズマにとってバリアのように振る舞いそれらを捕らえるため、木星の近傍では高エネルギー粒子をため込めるはずですが。このようにして高エネルギー粒子が捕獲された領域を放射線帯(地球ではバン・アレン帯)と呼びます(図1 C)。木星の場合、放射線帯の電子エネルギーは50MeVにも達することが知られています。木星は、太陽系における最大・最強の粒子加速器として働いているのです。

さて、「強い磁場はバリアのように振る舞いプラズマを捕らえる」と書きました。これは逆に言えば、「プラズマの侵入が容易でない」ことを意味します。つまり、放射線帯粒子の加速メカニズムを理解する上での関門は、本当に「内部磁気圏への電子の侵入」が定常的に起きているのか、という疑問でした(図1 D)。これまでその観測的証拠を捉えた例はありませんでしたが、我々は惑星分光観測衛星「ひさき」のデータを用いて世界で初めて

その証拠をつかむことに成功しました。その鍵は衛星イオでした。

イオプラズマトーラスとスペクトル診断

木星の内部磁気圏に位置する衛星イオでは、木星からの潮汐作用の影響で、太陽系で最も激しい火山活動が誘発されており、火山ガスは宇宙空間に達しイオン化しています。その結果、イオは毎秒1トンにも及ぶプラズマ供給源の役目を果たしています。ところで、イオの木星に対する公転速度は秒速17kmです。一方、イオ軌道における木星磁場の回転速度は秒速71kmもあります。つまり、ひとたびイオン化した火山ガスは、相対的に秒速54kmでイオを追い越していく磁力線に捕らえられ、加速されます。こうして木星磁場に捕捉されたプラズマはイオの軌道に沿ったドーナツ状に木星を取り囲みます。これをイオプラズマトーラスと呼びます。

イオンは、核の電子配置で決まる固有波長の光(輝線)を發します。ただし、輝線發光には、太陽光照射や粒子との衝突により軌道電子のエネルギー準位を上げる(励起する)必要があります。高密度プラズマで満たされたイオプラズマトーラスでは、イオンと電子の衝突が主要な励起要因です。この輝線が、木星内部磁気圏を探るための重要な指標なのです。

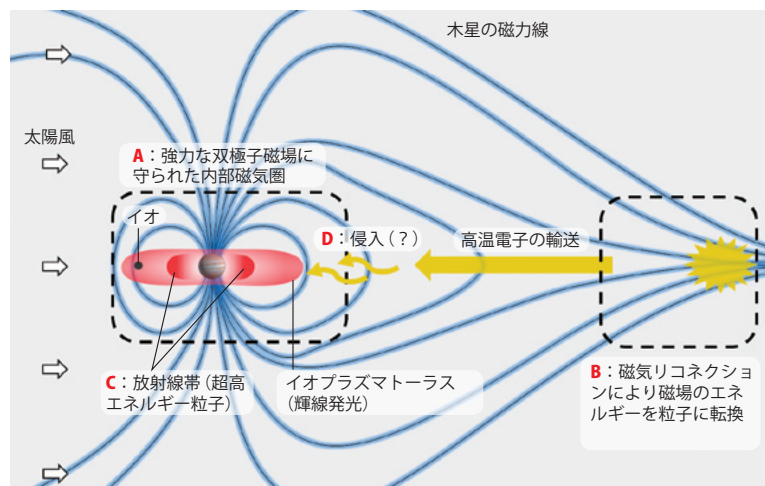
輝線強度はイオン密度に依存します。さらに、電子衝突励起による發光の場合は、イオン密度に加えて、励起させる側である電子の温度分布や密度の情報も含まれます。ここでの鍵は、特定の種類のイオンが、複数の輝線を同時に發するという事です。どの輝線が光りやすい、または光りにくいのか、といった条件は、衝突電子の温度分布と密度で決まります。したがって、複数の輝線の同時観測から、それ自体は發光することのない衝突電子の温度分布や密度を導出できるのです。この手法はスペクトル診断と呼ばれ、空間構造の把握が得意な光学観測を通して、電子やイオンの温度・密度を導出できるというメリットがあります。

なお、イオプラズマトーラスの主成分である硫黄イオンの輝線の多くは極端紫外と呼ばれる領域(波長50~150ナノメートル)にあります。したがって、この波長帯における高分解能分光観測が、木星内部磁気圏の電子温度や密度分布の導出のために必要とされており、我々が待ち望んでいたものでした。

「ひさき」の特長・「ひさき」の観測

実は、高精度な極端紫外分光観測は容易ではありません。まず克服すべき課題は、光学系の効率が低いという点です。極端紫外光は可視光に比べ

図1 木星磁気圏の模式図
木星内部磁気圏には衛星イオの火山ガスを起源とする高密度プラズマ領域(イオプラズマトーラス)があり、そのさらに内側には超高エネルギー粒子が集まっている(放射線帯)。これらのエネルギー構造を生成・維持するためには、外側(磁気圏尾部)で磁気リコネクションを介して磁場エネルギーを受け取った高温電子が、木星近傍まで輸送されてくる必要がある。しかし強固な磁場を守られた内部磁気圏までの侵入は自明ではない。



てエネルギーが高く、鏡面深くまで侵入するため反射率が低いのです。また、地球大気に吸収されるため、観測するためには宇宙空間まで出なければならず、十分な光量を得るための大型化には不向きです。そのため、これまでスペクトル診断に適したデータは得られていませんでした。そこで「ひさき」の開発チームは次のような工夫をしました。

- ・鏡の表面に高純度の炭化ケイ素を蒸着し、さらに高精度に研磨することで、主鏡反射率を向上させた。
- ・主鏡と同じ高反射率鏡に対して、1mm当たり1800本の割合で溝を掘り、高効率回折格子（分光素子）として用いた。
- ・感度劣化を防ぐために検出器を常に真空保管するシステムをつくり、打上げ直前まで真空引きを続けた（ロケット班、射場班、その他多くの皆さまのご協力に感謝致します）。
- ・観測器が捉えた惑星像の位置情報を姿勢制御系にフィードバックすることで、高精度の指向安定性を実現した。

これらの工夫の結果、「ひさき」の極端紫外分光器は、これまでのものと比べて数倍高い感度と、スペクトル診断に適した高波長分解能を実現しました（図2）。これらの革新的技術に加えて、「ひさき」が惑星専用の宇宙望遠鏡であり、同じ対象を長時間継続的に観測し続けられるという点も、優れたデータを得られた要因の一つでした。

内部磁気圏への高温電子侵入の証拠を捉えた

「ひさき」が捉えたイオプラズマトーラスの極端紫外データに対してスペクトル診断を適用した結果、外部磁気圏由来と考えられる高温電子が、徐々にその密度を減らしつつも、内部磁気圏の中にまで入り込んでいるという事実を世界で初めて突き止めました（Yoshioka et al. 2014, Science）。

イオプラズマトーラス近傍の磁力線とプラズマは、木星の高速自転とともに回転しており、強い遠心力（木星から離れる向きの力）が働いています。一方、トーラス中のプラズマは非常に高密度ですが、木星から離れるにつれて密度は下がります。つまり、トーラスを構成するプラズマには外向きの遠心力が働いているにもかかわらず、内側ほど重いガスがある状態になっているのです。これは、重力が働く中で、重い流体が軽い流体の上に乗っている状況と似ています。そのような状態では、軽いものは上へ、重いものは下へと移動する中で、複雑な対流現象（不安定性）を引き起こします。このような考えに基づくと、イオプラズマトーラスとその外側の領域の間では、（重力の代わりに）

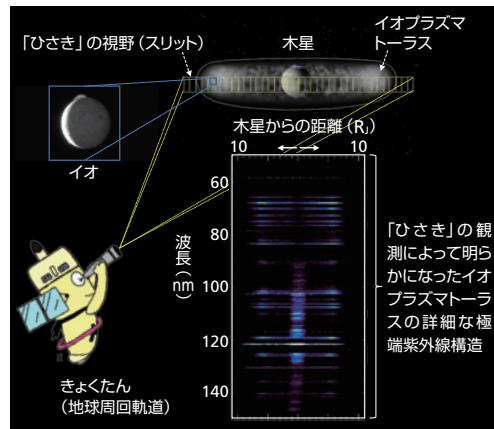


図2 「ひさき」によるイオプラズマトーラスの観測

「ひさき」の視野（スリット）をイオプラズマトーラスと平行に設置し、高波長分解能の極端紫外スペクトルを取得した。スリットを区切る枠は空間分解能（空間ピクセル）を表す。色の帯はそれぞれ、さまざまなイオン（主に硫黄）が放つ輝線に対応する。きよくたんは、「ひさき」のマスコット。（左上のイオの画像：©NASA/JHU APL/SwRI）

遠心力が駆動する不安定性がプラズマの流れを引き起こしているのではないかと、という予想が成り立ちます。「ひさき」のデータから導かれた高温電子の分布は、このような対流が駆動する高速輸送を仮定すると、とてもよくつじつまが合うものでした。この結果は言い換えれば、高密度なイオプラズマトーラスがあるからこそ（つまり、イオがあるからこそ）、強力な磁場のバリアを破るほどの大規模な対流（不安定性）が誘発されることを示唆します。こうして侵入した高温電子は、さらに効率よく電子を加速する電磁波動現象を引き起こし、結果的に太陽系最強の木星放射線帯が形成・維持されている、と考えることができます。

これからの木星探査

現在、世界ではJUNOとJUICEという二つの大きな木星探査ミッションが進行中です。

JUNOは、2016年夏の木星周回軌道への投入を目指して航行中のNASAの探査機です。最接近時には4300km（木星半径の2/3以下）まで木星表面に近づきますが、一方で遠地点距離は木星半径の25倍と楕円の極軌道を取ります。そのため、特に木星表面の詳細な情報や、高緯度領域の様子が明らかになることが期待されます。また、磁気圏と大気の相互作用や、太陽風などの外的要因と磁気圏内活動の因果関係を理解するための重要な知見をもたらしてくれることでしょう。

JUICEは、2022年に打上げが予定される欧州（ESA）主導の木星系探査計画です。エウロパ、ガニメデ、カリストという氷衛星の世界を、地下海における生命居住の可能性という課題を意識しつつ探査することが主目的です。これらの衛星は木星磁気圏の中にどっぷりとつかっていることから、またガニメデは固有磁場を持ち木星磁気圏の中にさらに独自の磁気圏を持つことから、プラズマ物理学の観点からの探査も非常に興味深いものです。

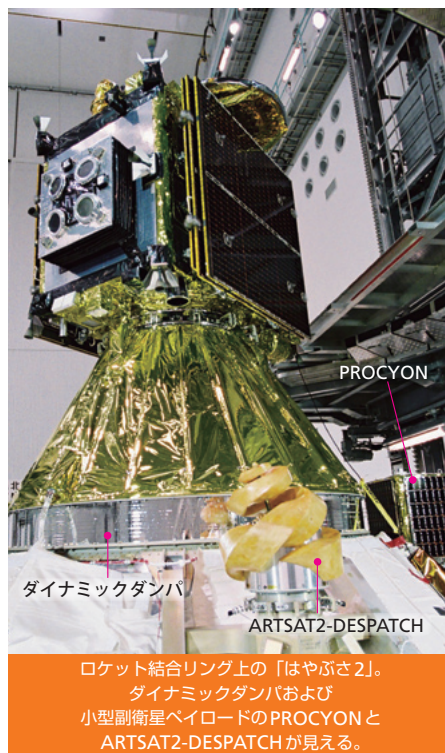
このように、木星探査が充実しようとしている時代の端緒で、「ひさき」が木星磁気圏物理の理解を深める貢献をしたことは意義深いものであると思います。（よしおか・かずお）

小惑星探査機「はやぶさ2」打上げ

燃料・酸化剤を充填し全備質量600kgに仕立てられた探査機は、11月13日にロケット結合リングと締結され、保護カバーなどの“Non-Flight Item”をすべて取り外し、インパクト（衝突装置）の安全ピンも引き抜かれた。とうとう我々の手から離れてしまうという惜別の情にかられながらも、ロケット打上げサービス社へ探査機を引き渡した。クレーンで高々とつり上げられ、まばゆくきらめく「はや2」の勇姿を仰ぎ見た。フェアリングで覆ってしまえば、もはや全貌を見ることはできないのだ。

射点上空に分厚い氷結層が予測されることから、11月28日に開催された打上げ準備確認会にて、当初設定の11月30日打上げは翌日へ順延と判断された。翌日の天候判断会議でも、秒速20mを超える最大瞬間風速が予想されたので、またもや延期。満を持して三度目の設定は12月3日。逐次更新される天気予報はいずれも、曇天ながら打上げ条件を満足することを指し示した。サンプルコンテナ内を清浄に保つため常時実施していたガスバージを終了するため、12月2日深夜にフェアリングに設けられたマンドアから作業者が体を乗り出して探査機に近寄り、配管を引き抜いた。フェアリング内の暗がりにある「はや2」を、マンドア越しにわずかにのぞき見る事ができた。もはやこれが今生の別れ、見納めだ。

打上げ6分前、とうとう「探査機準備完了」を宣言して



ロケット結合リング上の「はやぶさ2」。
ダイナミックダンパおよび
小型副衛星ペイロードのPROCYONと
ARTSAT2-DESPATCHが見える。

しまった。12月3日13時22分04秒（日本時間）、H-IIAロケット26号機は勢いよく上昇していった（表紙）。総合指令棟の屋内にいる私にも、ロケットの轟音と振動が伝わってきた。これは、宇宙大航海に出帆する「はや2」を祝う銅鑼の響。

いったん地球周回パーキング軌道を経由し、約100分後1周して日本近傍に再来した際に2段ロケットを再着火し、地球脱出軌道に乗り換えて深宇宙へと投入された（ロングコースト手法）。探査機分離のビデオ画像では、－Z面に取り付けられた5個のターゲットマーカーが視認できた。放出された探査機は、太陽の光の中に消えていった（表紙右上）。この後、すぐさま太陽電池パネル展開、2液式スラス

タによる太陽捕捉、スロースピン姿勢安定が確立された。その模様は、NASAゴールドストーン追跡局からの受信データで確認された。しばらく遅れてJAXA内之浦追跡局および臼田追跡局にても送受通信がなされ、地上からのコマンドにてスラスタ3軸姿勢安定を経てリアクションホイール3軸姿勢安定を計画通り確保した。サンプルホーン伸展およびイオンエンジンのジンバル固定解除も無事実行され、クリティカルフェーズを難なく突破した。「はや2」は、小気味よい動きを存分に見せつけてくれた。

これより、新船「はや2」を駆り地球－小惑星往復探査に着手する。（國中 均）

CIBERによる宇宙赤外線背景放射の「空間的ゆらぎ」の発見

私たちは、米国カリフォルニア工科大学などの研究者らと共同で進めてきたNASAの観測ロケット実験CIBER（サイバー：Cosmic Infrared Background Experiment）により、近赤外線の宇宙背景放射に普通の星や銀河などによる影響では説明できない大きな空間的「ゆらぎ」が存在することを発見しました。この発見について米科学誌『Science』に発表した論文では、「ゆらぎ」を示す未知の放射は、銀河系外からの宇宙赤外線背景放射の明るさの

およそ半分を占めていると結論づけました。

今回の論文では、銀河同士の衝突や潮汐作用により引き剥がされた古い星々が、銀河の周辺（ハロー）や銀河間空間に大量に浮遊しており、発見した「ゆらぎ」の物理的特徴はそれらの光が視線方向に重なり合うことで説明できるとも主張しています。この科学的解釈によれば、宇宙赤外線背景放射の観測が知られざる銀河間空間の新たな研究手段になるとともに、「隠れたバリオン^{*1}」や「隠れ

た衛星銀河」などの、あるはずなのに見つからない物質についての宇宙論的な課題に関わる点で魅力的です。ただし、科学的解釈の最終結論に至るには、今も解析を続けているほかのCIBERデータからの追加情報や、次期ロケット実験CIBER-2ほか、将来ミッションによるさらに詳細な観測データが必要であると考えています。

今回存在が明らかになった背景放射成分を解明したあかつきには、CIBERの当初からの目標である宇宙初期の星々による背景放射がいよいよ見えてくるはずです。今後も私たちの宇宙背景放射研究にご期待ください。

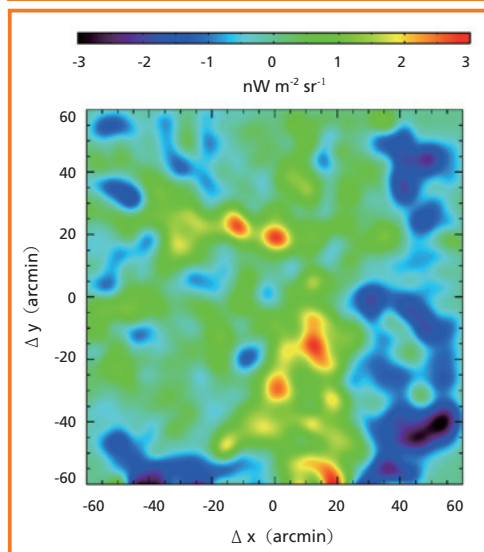
CIBERは、衛星プロジェクトだけではカバーし切れない重要な研究を、スピーディーかつタイムリーに行うことを目指して進めてきました。しかし、ふたを開けてみると、観測装置やロケットの技術的問題による打上げ遅延や上空での予期しない大気光や迷光の影響など、なかなかも

くろみ通りにはいかないことをあらためて学びました。私だけでなく、CIBERチームの大学院生や若手研究者が汗水垂らして観測装置を仕上げ精魂込めて観測データを解析した結果、今回の重大な科学成果にたどり着いたのです。

それに関する喜ばしいニュースとしてお伝えしたいのは、CIBERチームがNASAから「Group Achievement



天の川を背景にしたCIBER最終実験のロケット打上げ。
2013年6月、米国バージニア州NASA
ワロップス飛行施設にて。



宇宙赤外線背景放射の「ゆらぎ」の
空間パターンの一例^{※2}

Award」という表彰を受けたことです。NASAミッションなどに関して優れた業績を収めたグループに贈られるもので、「優れたチームワークを発揮し4回のロケット実験を成功させ、宇宙に関する新たな知見を得た」というのが今回の表彰理由です。私の大学院生時代からの同期生かつ友人でありCIBER実験の責任者であるカリフォルニア工科大学のJames Bock教授や、私たちの共通の恩師であり宇宙研の観測ロケットを用いた初期の実験から現在のCIBERまで宇宙赤外線背景放射の研究を開拓した松本敏雄JAXA名誉教授ほか、各国の研究機関の科学者、技術者、学生らで結成したチームの全員が表彰の対象です。私にとって、「チーム」として皆さんと一緒に表彰されたことが、この上なくうれしいことです。今後もCIBERのチームスピリットを受け継ぐCIBER-2ほかの計画を進め、宇宙背景放射の謎に挑みます。(松浦周二)

※1 バリオン：我々の世界をつくっている「通常の」物質。赤外線などの電磁波で観測できると考えられている。

※2 宇宙赤外線背景放射の「ゆらぎ」の空間パターンの一例：CIBER Imagers (赤外線カメラ)の波長1.1マイクロメートルの画像から星や銀河を取り除き、約0.1度の空間構造が目立つような画像処理を行ったもの。視野は2度四方。(Zemcov et al., Science, 346, pp.732-735 (2014), Supplementary Materials より)

第8回ひので科学会議(Hinode 8)報告

8回目となる「ひので科学会議(Hinode 8)」が11月2～6日の5日間にわたって、米国オレゴン州ポートランドにおいて開催されました。Hinode 8はその名の通り太陽観測衛星「ひので」に関する研究成果を発表・議論する国際会議ですが、今回は米国の主催で、NASAのLiving With a Star (LWS) プログラムと2013年に観測を開始した太陽観測衛星IRISの科学会議と共同での開催となりました。太陽物理に加え、宇宙天気や太陽-地球間物理な

ど多岐にわたる話題(口頭150件超、ポスター100件超)について発表がなされ、多様な科学者と密な議論ができました。反面、口頭講演がパラレルセッション形式で開催されたため、いろいろな部屋を行ったり来たりしなければならず、落ち着いて聴けた時間は少なく感じました。

パラレルセッションのためすべての話は聴けませんが、議論された話題の一部を紹介します。まず盛んに議論されたのが、ここ数年の太陽活動極大期中に得られた太

陽フレアなどの活動現象の観測についてです。本極大期がこれまでと違う点は、「ひので」やIRISによる空間分解したスペクトル観測によって、イメージングのみでなくドップラー速度などの物理量を直接測定できることです。各発表は個々のデータの解析が多かったのですが、複数の衛星データをを用いた統合的な解析研究の重要性を感じました。

次に活発であったのが、太陽活動周期についてです。残念ながら、現段階で「ひので」の観測に基づいて長期変動について言及しているものはほとんどなかったのですが、「ひので」が継続観測した8年分のデータを今後系統的に解析することの重要性を認識しました。



口頭講演会場のひとこま

最後に、彩層と呼ばれる太陽表面上空にある層についても、IRISと「ひので」の共同観測で得られたデータの解析や輻射流体力学数値計算との比較が盛んに行われていました。彩層は、「ひので」の高空間分解能撮像観測により、そのダイナミックな描像が明らかになってきました。彩層の偏

光スペクトル観測は、これからの太陽物理学における大きなディスカバリースペースであることを再認識させられました。この将来観測の実現を目指す、次期太陽観測衛星SOLAR-Cのサイエンスについての討論も1日かけて行われ、その実現に諸外国の多くの研究者が期待を寄せているのだと感じました。

(飯田佑輔)

西田篤弘名誉教授に瑞宝重光章

——瑞宝重光章の受章、おめでとうございます。

西田：多くの人々に助けられました。宇宙研では大先輩の大林辰蔵、小田稔、同僚の鶴田浩一郎、向井利典、工学部門の松尾弘毅、上杉邦憲、中谷一郎。国内の研究者では国分征、大家寛、松本紘、上出洋介。さらには、北米、欧州、ロシア、アジアに多くの僚友を得ることができました。すべて宇宙研を拠点としたため、ここに職を得たことが最大の幸運でした。

——日本の宇宙空間科学をけん引し、国際化した業績をお持ちです。

西田：地球を取り巻き太陽活動の影響を受けて大変動する宇宙空間に関する研究を進めてきました。その分野が揺籃期だったころに発表した論文が、基本的文献になっています。50年後の今では、宇宙空間科学は太陽系科学の一環と見るべきです。同様に、科学研究に国境という境目はなく、海外研究者とも日常的に意思疎通を図るべきです。業績発信で知名度を高め、日常的な討論で国際コミュニティの一員としての立場を築く。共同研究に参加するだけでなく、立ち上げることも重要。同志でもあり競争相手でもある相手から、学識、技術と成果によって信頼を勝ち取ること。それらの観点から、磁気圏や電離圏など地球周辺



西田篤弘名誉教授

空間の構造やそこで起きる物理過程を観測するGEOTAIL計画は大きな成功を収めました。多数の若手研究者が国際的に評価されたのもうれしいことです。

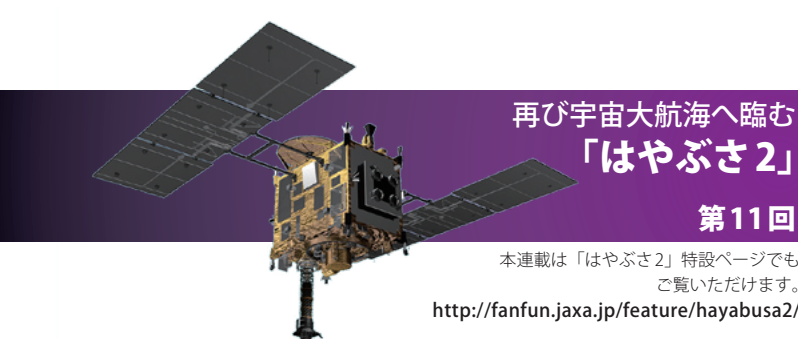
——宇宙研の今後の在り方について。

西田：宇宙研は第一級の科学者集団であり、研究の最前線に位置すること、各自が業務に埋もれず研究者として生きることが大事です。長期的視野で技術開発を奨励すること、大中小規模ミッションのバランスよい遂行、海外ミッションへの参加を併用することも必要でしょう。

太陽系探査は宇宙科学の最もホットな課題である一方、宇宙研では火星探査機「のぞみ」計画、金星探査機「あかつき」計画の不具合で停滞感があるのは非常に残念。JAXA全体で積極的に取り組んでほしいと思います。科学の研究は新発見を目指すもの、科学ミッションには未知の要素が含まれるわけで、安全が過度に重視されないこと、リスクを取る判断ができることが大事。そこでも、研究者としての信頼感が根本です。

AOGS（アジア・大洋州地球科学会）での活動でアジアの科学者と交流した経験から、今後のアジア諸国との連帯強化にも期待します。

(聞き手：藤本正樹)



再び宇宙大航海へ臨む 「はやぶさ2」

第11回

本連載は「はやぶさ2」特設ページでも
ご覧いただけます。

<http://fanfun.jaxa.jp/feature/hayabusa2/>

「はやぶさ2」はJAXAの探査機では初めて、バス通信系のトランスポンダ（電波中継器）にDDOR（Delta Differential One-way Range）計測用のマルチトーン信号送信機を搭載しています。DDORとは、遠く離れた2局の地上アンテナで電波を同時に受信して信号の受信時刻差を計測することにより、天球面上の探査機の位置を計測する技術です。天球面上で探査機の近傍に位置する遠方の活動銀河核電波源（キューサー）と探査機を10～15分ごとに切り替えて交互に観測することにより、角分解能数ナノradian（1 AU [約1億5000万 km] 先で数百mの位置精度に相当）という非常に高い精度で探査機位置を測定できます（従来の手法では1マイクロradian程度）。

「はやぶさ2」のターゲットである小惑星1999 JU₃への誘導は、NASA JPLが提供している惑星暦DE430の軌道情報に基づいて行います。DE430が準拠している慣性座標系ICRF2はキューサー位置に基づいて定義されているので、DDORの利用によって、より直接的にターゲットへ誘導できるようになります。DDORの計測精度は近年のデジタル受信技術の性能向上によって年々向上しており、特にNASAの火星探査ミッションなどの精密誘導が求められる惑星探査ミッションでは必要不可欠の技術になっています。

ただし「はやぶさ2」の場合は、DDORによって探査機の絶対位置が正確に求まったとしても1999 JU₃の位置が正確には分からないので、着陸のための誘導に使うことはできません。電波航法（レンジ、ドップラ、DDORによる航法）で小惑星近傍5000km程度まで接近した後は、光学航法カメラ（ONC）で小惑星の方向を測定し、相対航法（OP-NAV）で接近する必要があります。このフェーズでは、DDORと光学観測を組み合わせ、小惑星と探査機の軌道を同時に推定し誘導に利用することを計画しています。小惑星到着後も小惑星の軌道暦精密化のための計測を定期的に行います。

「はやぶさ2」の軌道決定で困難な点の一つに、イオンエンジン稼働中の軌道決定が挙げられます。「はやぶさ2」ではイオンエンジン推力や姿勢の状況を伝えるテレメトリを効率化する工夫が加えられており、「はやぶさ」のときよりも効果的に軌道決定を行える見込みです。イオンエンジンの加速度推定の不定性が大きくどうしても軌道決定ができない時期であっても、DDORとレンジ計測を組み合わせる「3次元位置計測」を一定の頻度で行えば、誘導に大きなずれがないかをモニタできるであろうと考えています。

「はやぶさ2」の軌道決定で新しい点の一つとして、Ka帯（約32GHzの周波数の電磁波）の利用が挙げられます。現在ICRF2はX帯（約8GHzの周波数の電磁波）のキューサー位置で定義されています。キューサーは宇宙論的距離に位置していて地球から見た見掛けの大きさは1ナノradian程度と非常に小さいですが、DDOR計測ではこの大きさが有意な位置計測誤差になってしまいます。一般的にキューサーは高周波になるほど構造がコンパクトであり、Ka帯ではX帯に比べ1/3程度の大きさです。そのため将来のさら

軌道決定・DDOR

竹内 央 「はやぶさ2」プロジェクト 軌道系担当

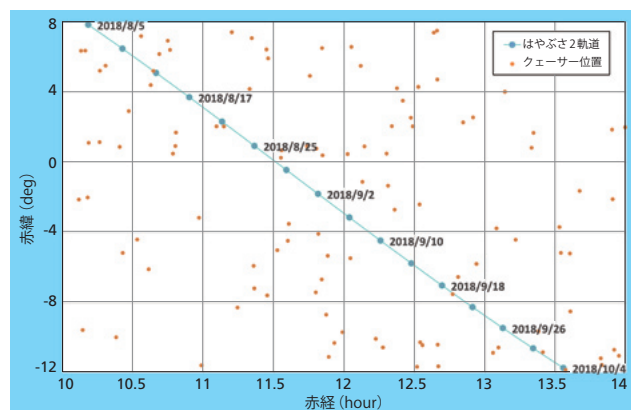


図1 1999 JU₃近接フェーズにおける探査機の天球面軌跡と近傍キューサー



図2 臼田宇宙空間観測所の64mアンテナ（奥）と電離層補正用GPSアンテナ（手前）

なる高精度な座標系として、2018年ごろの完成を目指して準備中のICRF3ではKa帯のキューサー位置が定義される予定になっています。「はやぶさ2」が小惑星に到着するころには、世界で初めてICRF3に基づいてKa帯DDORによる軌道決定が行われるかもしれません。

DDORを軌道決定に利用するためには数十ピコ秒の時刻精度の観測モデルが必要になりますが、従来のJAXAの深宇宙軌道決定ソフトウェアは数ナノ秒レベルの精度しかありませんでした。そこで小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」のDDOR実験のために筆者が開発したソフトウェアのアルゴリズムをJAXAのシステムに技術移転し、精度向上を図りました。大気遅延補正は、従来、臼田・内之浦局の過去の気象の平均値を用いて行っていました。新システムでは、ヨーロッパ中期予報センターが毎日提供している全球数値気象モデルに基づいて補正量を計算します。このモデルは「はやぶさ2」の第一可視運用でも使用され、金星探査機「あかつき」の第一可視などのときよりもずっと低い、仰角数度の時点で捕捉を開始することができました。電離層補正は臼田にあるGPS観測点の解析データを利用します。そのほか、最新の地球回転モデルや最新の地球局位置モデル（東北地方太平洋沖地震後の臼田局位置の余効変動モデルを含む）の採用、太陽系重心天文座標系の定義や時系変換の計算における一般相対論の厳密な適用などの改善を図り、DDORを使用するに足る精度にまでソフトウェアを改良することができました。（たけうち・ひろし）



そう えん 桑園

加藤輝雄 元 科学衛星運用・データ利用センター長

富岡製糸場が2014年6月に世界遺産に登録され、さらに10月に国宝に内定した。富岡といえば、IHIエアロスペースの富岡事業所があり、この製糸場の近くを車で何回も通過した。M-Vロケットの計器部適合試験や科学衛星との結合試験での出張の折である。地図で確認すると100mも離れていない道を通っていたのに見学の機会を逸したことは、誠に残念である。とはいえ、知った土地の建物が世界遺産になったことは、我が町のことのようによい気がする。

我が町のことといえば、私が生まれ育った東京都日野市には、富岡製糸場とは直接関係しないが養蚕・蚕糸研究に関連した施設があった。蚕糸試験場日野桑園である。私が通学した中学校に隣接して広大な桑園があり、蚕室6棟に庁舎と職員の宿舎を備えた施設であった。ここで桑や蚕の品種改良などの研究がされていた。中学生のときは、建物を含め施設全体を桑園と呼んでいた。

先日、この桑園に行ってみた。我が家から自転車で15分ほどの所にある。かつての広大な桑園はスポーツ公園や小学校の敷地となり、「ふれあいホール」なる多目的体育館が建っている。それに隣接して仲田の森蚕糸公園があり、子どもたちの遊び場になっている。その中に古びた大きな建物が一棟残っていた。第一蚕室である。資料によれば、昭和7年建築の鉄筋コンクリートスレート瓦ぶき2階建て、延べ床面積は570m²で、当時のモダン建築であったという。このような蚕室が第六まであったというから、当時の規模の大きさと蚕糸関連研究の重要性がうかがえる。

中学生のころこの蚕室に来た記憶はないが、隣にあった宿舎(官舎)に同級生が住ん

でいたことを思い出す。なぜか、その同級生宅でオレンジジュースをごちそうになったことを覚えている。当時、粉末ジュースの素というのがあった。それを水に溶かすとオレンジジュースやらができるという代物で、夏の飲み物として一般的で結構はやってたから、多分それであろう。フレッシュジュースなど夢のまた夢の時代である。それはともかくとして、この地に当時の広大な桑園を思い起こすようなものは、第一蚕室のほかにも何も残っていない。ただ、スポーツ公園の一角に「蚕糸研究ゆかりの地」と記した石碑があるのみである。その前に立って、かつてここに広大な桑園があったこと、基盤の目のように整然と並んだ桑の木が延々と続いていたこと、そんな光景を思い浮かべる。

どこにでもあったそんな桑畑も近ごろ見なくなった。それでも1989年に宇宙科学研究所が相模原に移転したころは、まだ周辺の国道沿線に桑畑が残っていた。そこも今はレストランや住宅地になっている。相模原市もかつては養蚕業が盛んであったと聞く。きっと、あちこちに桑畑があったに違いない。

かつて日本の基幹産業であった生糸産業の衰退とともに消えていった桑園、そして桑の紫色の実の甘酸っぱい味を思い出すと、何やら物悲しい。

さて、蚕糸試験場日野桑園のその後であるが、もともと杉並区高円寺にあった農林省の蚕糸試験場(元・農商務省原蚕種製造所)の附属施設で、高円寺の蚕糸試験場の筑波移転に伴い昭和55年に日野桑園も閉鎖された。つくば市に移転した蚕糸試験場はその後、独立行政法人農業生物資源研究所に統合されたもようである。農業生物資源研究所のホームページによれば、



東京都日野市の市民の森スポーツ公園に建つ石碑

遺伝子組換え研究センターで蚕糸研究が続けられており、蛍光シルクの研究開発や医薬品の研究開発などがなされているとのこと。かつて日野桑園で行われていた蚕や桑の品種改良は、今や遺伝子組み換え操作で行われているという。

かつては世界一を誇った生糸の生産量も最盛期の1%以下であり、養蚕業は衰退の一途をたどっている。しかし、蚕・シルク研究のレベルは世界一であるという。シルクにはUVカット、保湿性、制菌性などの機能性があることが近年発見され、新たな可能性が生まれている。そのうち絹製の宇宙服などもできるかもしれない。肌着ぐらいなら十分可能性がありそうである。

以上、桑園をテーマとしてとりとめもなく記したが、日本の近代化を支えた生糸産業が当時の最先端の技術を導入し、産業の振興や研究開発に尽力してきたことを思うと、今の宇宙関連産業や研究に通ずるものがあるように思える。また、桑畑の地に宇宙関連施設ができ、かつて養蚕地と消費地や輸出港とを結んでいた絹の道が、今やその宇宙関連施設間を結んでいるような気がする。JR横浜線も長野や山梨からの生糸や絹製品を横浜に運搬する目的で開業したという。身近なところに蚕糸産業の遺産があり、その恩恵を知らず知らずに受けていることを感じる。(かとう・てるお)

ISAS ニュース No.405 2014.12 ISSN 0285-2861

発行/独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

発行責任者/ISASニュース編集委員会 委員長 山村一誠

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット (<http://www.isas.jaxa.jp/>) でもご覧になれます。

デザイン/株式会社デザインコンピビア 制作協力/有限会社フォトンクリエイト

編集後記

12月号の編集をしている間に「はやぶさ2」が無事打ち上げられました。小惑星のサンプルを地球に持ち帰るという偉業のためには、一つ一つ物事を確実にやり抜く努力が不可欠です。皆さんは、6年後の自分に何をやりますか? (竹前俊昭)

*本誌は再生紙(古紙100%)、植物油インキを使用しています。

R100
古紙配合率100%再生紙を使用しています

