



間もなくランチャに装着される観測ロケット S-520-30号機。
2015年9月9日打上げリハーサル前、内之浦宇宙空間観測所。

宇宙科学最前線

夜空は明るい!?
近赤外線背景放射の謎をめぐって

JAXA国際ショナルトップヤングフェロー
井上芳幸

宇宙の歴史をひもとく鍵：
宇宙背景放射

「夜空は暗い」というのは我々にとっては当たり前のことである。この当たり前の事実には19世紀の天文学者オルバースは疑問を抱いた。なぜ夜空は暗いのか？ 宇宙が無限に広がっていけば、どこを向いても星の表面が見えて、夜空全体が太陽面のように明るく輝くはずである、と。これは有名な「オルバースのパラドックス」といわれるものである。宇宙が有限であることから、このパラドックスは解決済みである。

確かに、夜空は暗い。しかし、実は真っ暗ではない。微弱ながらも空一面に光っている放射が存在し、「宇宙背景放射」と呼ばれている。空全体で輝

く宇宙背景放射とは、何であろうか？ 実は、宇宙背景放射は、宇宙開びやくから現在までの宇宙の歴史が集約されたものである。言い換えると、宇宙背景放射の研究を通して、宇宙の歴史をひも解くことができる。

ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射は、特に有名である（詳しくは『ISAS ニュース』2015年8月号 (No. 413) の松村知岳氏の記事参照）。しかし、宇宙はマイクロ波だけでなく、電波、赤外線、可視光、X線そしてガンマ線で満たされている。宇宙背景放射の起源を解明できれば、宇宙で各波長の放射を支配している天体の歴史をひもとける。例えば、可視・赤外線の宇宙背景放射は宇宙の基本構成要素である星や銀河の歴史を、またX線の宇宙背景放射からはブラックホールの形

成史を振り返ることができる。

『ISASニュース』2005年2月号 (No. 287) に、松本敏雄氏 (JAXA 名誉教授、現・台湾中央研究院) が、「夜空は明るい!?—宇宙最初の星の光を探る—」と題する記事を書いている。本稿では、我々が普段見ている可視光の隣の波長域である近赤外線 (0.75~1.4 μm) に焦点を当て、松本氏が執筆してからの10年間の宇宙近赤外線背景放射に関する進展および論争を、我々の研究も交えて紹介したい。松本氏の記事と合わせて読むと、科学の進展が垣間見え、面白いだろう*1。

直接観測による初代星の兆候の発見?

図1に、最新の宇宙近赤外線背景放射の観測結果をまとめる。本稿の内容は、この図1枚に集約されている。一見して分かるように、近赤外線領域では、観測データがばらばらである。これが、近赤外線背景放射が大問題であるゆえんである。実は、これらのデータは二つに分類できる。中抜きデータは、背景放射を「直接」観測した結果である。一方で、中塗りデータは背景放射の構成要素と目される個々の銀河からの光を実際に足し算した結果である。我々の銀河形成の理論モデルから期待される銀河由来の背景放射強度を黒の実線で示している。理論モデルと銀河観測はおおよそ一致しており、銀河からの寄与はほぼ理解できたといえよう。一方、直接観測の結果は銀河からの光より何倍も明るい。これは、宇宙の中に我々の知っている星・銀河以外の未知の近赤外線の光源があることを示唆している。

この超過成分をめぐる、さまざまな議論がされてきた。2005年の松本氏の記事に紹介されるように、宇宙で最初にできた星々である初代星が超過成分の起源であるというのが、一つの説である。仮に初代星が起源であれば、近赤外線背景放射は宇宙で最初に生まれた星々の研究において重要な知見をもたらしたであろう。しかし、初代星説は大きな問題をはらんでいる。

初代星が形成された時期の宇宙では電子と陽子は結合しており中性であったが、その後宇宙は、これらの初代星が放つ紫外線などによってほぼ電離されたとされている (宇宙の再電離→8ページ「今月のキーワード」)。実は、再電離の観測から初代星説は現在、ほぼ棄却されている。仮に初代星が近赤外線背景放射超過を説明するほど大量に存在しているとすると、宇宙の電離度の観測と大きく矛盾してしまうためである。実際に我々は、宇宙背景放射観測衛星 Planck による最新の宇宙再電離のデータと後に述べるガンマ線観測からの制限を組み合わせて、初代星形成率に対する制限を課しているが、

近赤外線背景放射を説明するには2桁ほど星形成率が足りない。初代星説は否定され、超過成分の起源の探求は振り出しに戻ってしまった。

ところで、そもそも超過成分の存在は本当なのであるか? 実は、近赤外線背景放射の直接観測には、黄道光成分の取り除きが大きな課題となっている。黄道光とは、我々の太陽系内に存在する塵による太陽光の散乱光である。黄道光は近赤外線背景放射よりはるかに明るく、黄道光の見積りを間違えると、超過成分が現れかねない。そこで、直接観測ではない間接的方法で近赤外線背景放射を調べる手法の確立が求められていた。

ガンマ線観測は超過成分を否定

ガンマ線と聞くと、赤外線よりはるかにエネルギーが高く、近赤外線背景放射研究とはまったく無関係に思えるかもしれない。しかし実は、ガンマ線が近赤外線背景放射研究において重要な意味を持つ。特にこの10年は、ガンマ線観測から近赤外線背景放射研究が大きく進展している。

宇宙空間を伝搬する高エネルギーガンマ線 (およそ100 GeV [ギガ電子ボルト。ギガは 10^9] 以上) は、可視・赤外線背景放射と電子・陽電子対生成反応*2を起こし、吸収される。このガンマ線の吸収量は、背景放射の明るさに依存する。そのため、遠方天体のガンマ線観測から吸収量を推定できれば、背景放射強度を間接的に測ることが原理的に可能である。2000年代後半からガンマ線望遠鏡の観測技術が進み、100 GeV以上のガンマ線を感度よく観測できるようになった。特に遠方に存在するブレーザー*3といわれる天体の観測が盛んに行われ、吸収を受けたブレーザーのスペクトルが得られるようになった。

さて、ブレーザーのガンマ線観測により、背景放射に関する重要な進展があった。松本氏の記事が出た翌年の2006年に、アフリカ・ナミビアにある高エネルギーガンマ線望遠鏡 H.E.S.S. のチームがブレーザーの観測から、近赤外線背景放射の強度は銀河からの寄与と同程度であると結論づけ、それまでの直接観測の結果を否定した。同様の手法は、H.E.S.S. だけでなくほかのガンマ線望遠鏡などによっても着々と進み、より詳細な制限が課され、ほぼ同様の結果が得られている。スペイン領カナリア諸島にある高エネルギーガンマ線望遠鏡 MAGIC による制限の一例を、図1に緑線で示してある。

余談であるが、私はもともと活動銀河核の高エネルギー放射機構や宇宙論的進化、そして宇宙「ガンマ線」背景放射の研究に取り組んでいた (今も好きなテーマの一つである)。ここに述べたように、ガンマ線天文学において近赤外線背景放射は重要

である。しかし、ガンマ線の研究を進めるにつれて、可視・赤外線背景放射の研究に疑問を抱き、大学院後半ごろからこのテーマに関わっている。結果、赤外線 (10^{-2} eV) からガンマ線 ($\sim 10^{14}$ eV) まで約16桁にわたるエネルギー範囲の宇宙背景放射の研究に携われることになり、非常に幸運であったと思う。

ガンマ線観測による制限は正しいか？

さて、ガンマ線観測により近赤外線背景放射強度の直接観測の結果は否定されたが、そもそもガンマ線を用いた手法は問題ないのであろうか？ ガンマ線から背景放射の強度を推定する際には、吸収前のスペクトルを「仮定」する。べき関数などの単純な形を設定し、TeV (テラ電子ボルト。テラは 10^{12}) 領域で急激に明るくならないという仮定を置く。この仮定は妥当であろうか？

銀河形成理論の進展により、銀河由来の可視・赤外線背景光による吸収量は詳細に見積もられている。このようなモデルを用いれば、ブレーザーのガンマ線スペクトルを吸収前のガンマ線スペクトルに焼き直すことができる。しかし、例えば1ES 0229+200というブレーザーのガンマ線スペクトルは、従来考えられていたようなブレーザー放射機構では説明ができておらず、新しい放射機構が考えられ始めている。このような天体はいくつか報告されており、ブレーザーの吸収前のスペクトルは完全に理解できているわけではない。そのため、現状のガンマ線からの近赤外線背景放射強度の推定値も不定性が大きいといえよう。2018年に次世代ガンマ線望遠鏡Cherenkov Telescope Array (CTA) が稼働し始める。CTAによるブレーザーの高感度な観測により、ブレーザーの放射機構の理解が進む。特に、我々の見積りによれば、CTAによって得られるブレーザーの統計情報を用いて放射機構の普遍性を調べることができる。ガンマ線から精度よく可視・赤外線背景放射を決定できる日も近いであろう。

直接観測による超過成分の傍証

さて、不定性はあるが、ガンマ線による間接観測という手法がこの10年で確立されてきた。一方、近赤外線背景放射の直接観測はどうであろうか？ この10年間の直接観測における重要な進展は、空間揺らぎ観測である。つまり、空の明るさの非等方性(むら)の観測である。赤外線天文衛星のSpitzerや「あかり」、ロケット実験CIBERによって1~5 μm の範囲で、銀河では説明できない空間揺らぎの超過成分が見つかっており、これは銀河以外の成分が近赤外線背景放射に埋もれている傍証であ

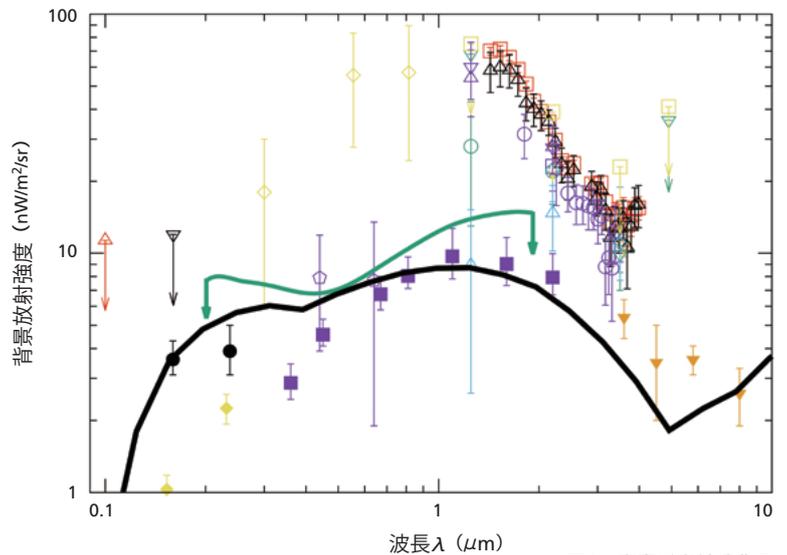


図1 宇宙近赤外線背景放射スペクトル
中抜き点が直接観測、中塗り点が銀河の重ね合わせ。黒線が銀河形成理論から期待される寄与、緑線がガンマ線観測からの上限の一例。

る。特に、揺らぎのスペクトルを見ると、星に似たRayleigh-Jeans則(黒体放射の波長が長い領域での放射スペクトル)に従うことが分かっている。この特徴は、スペクトル超過にも見られている。

空間揺らぎの起源であるが、最新の理論では、銀河と銀河の衝突によって銀河ハロー領域まではじき飛ばされた星によるものであるといわれている。しかし、銀河衝突ではじき飛ばされる星の数や空間分布はよく分かっておらず、スペクトルの超過成分まで説明できるかはよく分かっていない。ハロー領域に散らばった星によるという説の検証が、直接観測の今後の課題の一つであろう。例えば、銀河から離れた領域での超新星爆発の発生頻度を調べれば、ハローに散らばった星の数を調べることができる。

まとめると、近赤外線超過の起源は分かっていないのが現状である。理論家としては恥ずかしい限りである。ただし、ガンマ線による間接観測や空間揺らぎの直接観測が、この10年間で進展してきた。特に、松本氏や松浦氏らの国際共同研究グループによる直接観測を目的としたロケット実験のCIBERやCIBER2により、新たな知見がもたらされようとしている。これらにガンマ線望遠鏡による観測を組み合わせ、多角的に研究を進めることで、今後、近赤外線背景放射超過の謎に迫ることができるであろう。松浦周二氏(関西学院大学)には本稿執筆の上で貴重な意見を頂いた。この場を借りてあらためてお礼申し上げます。

(いのうえ・よしゆき)

→ 8ページ
「今月のキーワード」
もご覧ください。

*1 「ISASニュース」には、宇宙背景放射に関してこれまでも多くの記事がある。例えば、マイクロ波領域に関する記事は松村知岳氏(2015年8月号, No. 413)、遠赤外線に関する記事は松浦周二氏(2011年11月号, No. 368)。X線領域に関する記事は上田佳宏氏(2004年2月号, No. 275)。ガンマ線領域に関する記事はまだないが、筆者が「物理学会誌」に記事を書いたので、そちらを参照されたい。日本の宇宙科学研究が宇宙背景放射研究にこれまで多大な貢献をしてきたことは特筆すべき事実である。

*2 電子・陽電子対生成反応: 光の相互作用により、エネルギーから電子(粒子)と陽電子(反粒子)が生成される現象。

*3 ブレーザー: 銀河の中心に存在する太陽の100万から100億倍もの質量を持つ超巨大ブラックホールに周辺物質が降着すると、莫大な重力エネルギーを解放する。これにより母銀河よりはるかに明るく輝く天体を、活動銀河核と呼んでいる。ブレーザーは、活動銀河核の一種で、宇宙最大の粒子加速器である相対論的ジェットを我々に向けて噴き出している天体である。ジェットという粒子加速器で加速された高エネルギー粒子からの放射およびジェットの相対論的効果により、ブレーザーは電波からガンマ線まで非常に明るく輝いている。

水星探査計画 BepiColombo 日欧プロジェクトマネージャ対談 後編

プロマネはつらいよ

—— BepiColombo^{*1}で行われるサイエンスについて、日欧でやり方に違いはありますか。

Hajime：私たちが開発しているMMO（水星磁気圏探査機）^{*2}も半分の機器はヨーロッパから供給されているので、やり方に違いはないよ。

Ulrich：日欧どちらのミッションも相補的なんだ。いくつかは冗長になっている。もちろん、君たちは我々より磁場観測に重点を置いているが、我々の探査機も磁場に関する機器を搭載している。それによって、我々は君たちの観測を確認することができるし、比較することができるんだ。また、君たちがサイエンスを行うときに、我々の観測結果を必要とするかもしれない。我々はもちろん観測結果を交換することにオープンだ。それによってミッションの相乗効果が生まれる。私はそれが楽しんだ。



ESA
BepiColombo
プロジェクトマネージャ
Ulrich Reininghaus

Hajime：そのために僕たちはSWT（サイエンスワーキングチーム）会合を年1回開催し、成果を最大化するための議論をしている。

Ulrich：SWT会合では、本当にオープンに議論するように運営されているよね。そういえば、昨年は東京で開催したよね？

Hajime：そう、昨年の第11回は東京だった。

Ulrich：私もほかのヨーロッパの関係者と参加したんだけど、日本の人はみんな、話が終わって議論になるまでじっと聴いているんだよね。それが、基本的な違いの一つかな。ヨーロッパの人は、問題があったり疑問があったりすると、すぐに質問するよ。君たちは質問する前に、慎重に考えるだろう？ すぐには質問しないよね。

Hajime：それは、僕らが英語を話すのにいくらか困難さがあるためだと思う。

Ulrich：僕の目には、君たちの間で議論が少ないように見える。君たちの場合、話が終わって議論の場になって初めて質問が出てくるんだよね。ヨーロッパではそれが無い。疑問が生じるとすぐに質問！だ(笑)。

—— BepiColomboの開発で最も困難だったことは何でしょうか。

Hajime：MMOは、もちろん太陽だ。太陽に近いことが最大の問題だ。ほとんどすべての問題が「熱」からきていると言っても過言ではない。僕たちは太陽電池において、とても厳しい問題に直面し

た。幸運にも僕たちは自分たちが開発した太陽電池を搭載することができたが、本当に厳しい問題だった。

Ulrich：私もまったく同じ答えだ。厳しい環境、つまり熱と放射線、それらが複合する環境に置かれるため、たくさんの技術的問題があった。まず材料だ。性能の限界まで使うことが多く、材料の融点を超えることもある。だから、本当に注意しなければならなかった。太陽電池の開発は本当に困難を極めた。太陽電池が紫外線で劣化するんだ。そんなことは想定外で、技術的研究の初期段階から本当に大きな問題だった。もう一つは、外表面の材料だ。例えば、MPO（水星表面探査機）^{*3}の外表面材料のために耐熱断熱材の開発をしなければならなかった。最終的にセラミックの繊維を採用したが、そのため粒子状物質が大きな問題になった。それから、探査機のいろいろなところから蒸発して出てくるガスが観測装置を汚染するのを防がなければいけない。紫外線と高温対策に関連してやらなければいけなかったことすべてが、君たちにとっても我々にとっても最も大きなチャレンジだったし、今もそうだ。

——ところで、日本に何回行ききましたか。

Ulrich：3回だね。昨年のSWT会合では君たちと一緒に議論できてとても良かったけれど、少しエスケープできる時間があってよかったです(爆笑)。

——どこかに行かれましたか。日本の印象は？

Ulrich：ずっと東京にいた。少し郊外にも行ったけれど、大阪などに行く機会はなかった。いろいろな所に行きたかったんだけど、すでにプロジェクトマネージャになってしまっていて、こちら（ESTEC）の会議に出なくては行けなくてね。もう1週間滞在したかったよ。でも東京は、私にはとてもとても興味深い都市だ。田舎育ちの私にとっては、特に人混みがとても印象的だった。もう一つ印象的だったのは規律だ。もし規律がなかったら、東京では大変な問題だろう。でもそうはならず、よく統制されていて、整然と列に順番に並んでいる。

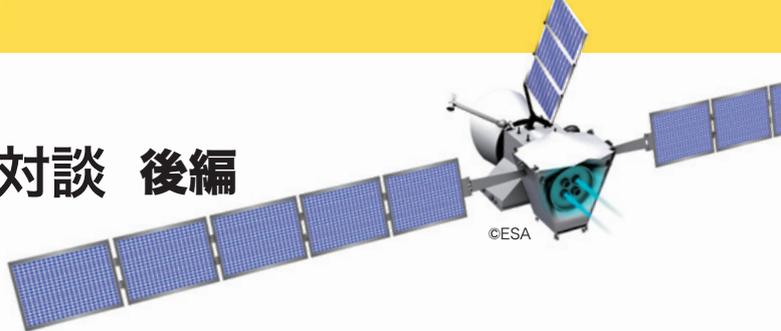
Hajime：確かに東京では、人は順番待ちで整然と列に並び、車が混雑時に合流するときにも1台ずつ交互に入っていくね。

——東京では、どこへ行かれましたか。

Ulrich：東京の中心部。それから、巨大な東京を一望するためにいくつか摩天楼にも上った。そのほかには、私は歩くのが好きで、いくつか神社や仏閣のエリアを歩いた。そして、そこそこで演じられているパフォーマンスを見た。我々の文化とはまったく異なっていて、とても印象的だった。日本庭園にも行った。我々のとはとても違って、良いと思ったね。

——季節は？

Ulrich：一度は桜の季節。妻と一緒に、満開にはちょっと早かったけれど、とても印象的だった。別のときは、もう少し遅い時期だった。僕はそれまであまり日本に行く機会はなかったけれど、前回はBepiColomboの概況を伝えに行ったんだ。特に、MMOのESAへの輸送やそれに関する我々の決定事項を伝えたかったんだ。「君



9月号に引き続き、6月22日にオランダにある欧州宇宙機関 (ESA) の宇宙技術研究センター (ESTEC) で行われた、ESA の BepiColombo プロジェクトマネージャの Ulrich Reininghaus (ウルリッヒ・ライニングハウス) 氏と JAXA 宇宙科学研究所の BepiColombo MMO プロジェクトマネージャの早川 基 (Hajime) 氏の対談をお届けします。司会はプロジェクト研究員の村上 豪氏が務めました。

たち、そんなに急いで来ることはないよ。なぜなら……」と(笑)。

——早川さんは、ESTECには何回来ていますか。印象は？

Hajime：この15年間で、ESTECには毎年3～4回、欧州宇宙運用センター(ESOC)^{※4}は毎年1回くらいかな。僕は田舎が好きで、ESTECのあるノルドヴェイクは好きだね。

——オランダでほかに好きな場所はありますか。

Hajime：難しい質問だね……(笑)。4月に来て時間があつたら、キューケンホフに行くかな。チューリップの季節だしね。一番よく行くのは、デルフトとデン・ハーグだね。

Ulrich：デルフトは古くて小さくて素晴らしい町だね。

——私もこの週末、デルフトに行こうと思っているんですよ。

Ulrich：それはいいね。ぜひそうすべきだよ。

——BepiColomboの今後の活動について紹介していただけますか。

Ulrich：MPOに関しては、熱真空試験を半年前にを行い、熱解析が終わったところだ。予想通り、結果は良好だ。いくつかの観測機器は認定試験モデル^{※5}を熱真空試験に使っているの、最終的にはフライトモデルに交換しなければいけない。MPOの組み立てが終わったら、次はシステム試験だ。ESOCとの通信試験、それから電気試験を行う。また、同時にMTM(電気推進モジュール)^{※6}を組み立てる。来年の春には、MTMとMMOを組み合わせて打上げ・巡航形態に組み上げる。そして打上げ・巡航形態での電気試験、機械環境試験、それからアンテナやブームの展開試験を行う。その後、分離試験。もちろん、重力の影響をキャンセルするためにクレーンを使う。さもないと、重くて分離できないからね！その後、試験後の健全性を確かめるための試験をさらにいくつか行い、すべて良好だと確認ができれば、MPOを開けてすべての機器をフライトモデルに取り換える。並行してMTMの熱真空試験の準備をする。MTMの一部機器をフライトモデルに置き換えて、熱真空試験を行う。これが、我々のしなければいけないことだ。その後、太陽電池のフィットチェックを行ってから、射場のあるクールー(フランス領ギアナ)に行く。

——クールーへの輸送後は、どのような試験がありますか。

Ulrich：非常に限られている。いくらかの健全性チェック、輸送後のチェック。ずっと少ないが、ヨーロッパで行ったのと同じ試験だ。なるべくヨーロッパで試験を行いたいからだ。探査機にESOCからのコマンドが通るかどうかが確かめるシステム試験などを行う。それから、推進剤充填。これは我々の最も大きなチャレンジだ。な

ぜならこの作業は危険で、並行作業ができないからだ。残念ながらすべてクールーの同じ建物内で行われるため、一つずつ順番に行う作業にならざるを得ない。必然的に長期間の射場作業になる。そして、アリアン5ロケットに搭載して打ち上げる。

——最後に、BepiColombo探査機へのメッセージをお願いします。

Ulrich：これはメッセージではなく希望だが、このミッションが成功することを心から望んでいる。このミッションは長い旅をする。軌道にもよるが、6～8回の惑星フライバイがある。我々は、サイエンティストにフライバイのときに何かできることはないかを聞いて、まとめようとしている。7年半のクルーズの後、水星に着いたら、サイエンティストにはこのミッションに最善を尽くしてもらいたい。やっ、そこで初めてエンジニアは報われるんだ。我々エン



JAXA 宇宙科学研究所
BepiColombo MMO
プロジェクトマネージャ
早川 基

ニアは、日々仕事の成功が得られるわけではない。何年にもわたって書類仕事をし、その後ハードウェアを調達し、システムに組み上げる。そして、なるべく実際に近い環境で試験を行い確認する。我々は実際の環境を完全に模擬することはできない。エンジニアは、ミッションが成功することで初めて報われるんだ。MPOだけでなく、MMOの専門家も同じだ。彼らは熱心に働いてきたんだ。

——早川さんは、いかがですか。

Hajime：データが得られるまでに、まだあと9～10年あるけれども、BepiColomboで良いデータが得られ、MESSENGER^{※7}が提示した謎を解明してもらいたい。MMOは僕にとって二つ目の惑星間ミッションで、一つ目の火星探査機「のぞみ」が失敗しているので、BepiColomboがうまくいくことを本当に願っている。

——今日はどうもありがとうございました。

※1 BepiColombo：日欧国際共同水星探査計画。水星の天体力学研究や水星探査軌道研究に多大な貢献をしたGiuseppe Colombo博士にちなんで名づけられた。彼の愛称がBepi。

※2 MMO：Mercury Magnetospheric Orbiter(水星磁気圏探査機)。BepiColombo計画で日本が開発し運用する探査機で、主に水星の固有磁場、磁気圏、大気の観測を行う。

※3 MPO：Mercury Planetary Orbiter(水星表面探査機)。BepiColombo計画でヨーロッパが開発し運用する探査機で、主に水星の表面地形、鉱物・化学組成、重力場の精密計測を行う。

※4 ESOC：European Space Operations Centre(欧州宇宙運用センター)。ESAの衛星や探査機の運用を行っている機関。ドイツのダルムシュタットにある。

※5 認定試験モデル：フライト環境に耐えられることを試験で確認するハードウェアである。ハードウェアとしてはフライトモデルと同様に製造されるが、フライト環境よりも厳しい環境で試験されるため、フライトには供されない。

※6 MTM：Mercury Transfer Module(電気推進モジュール)。水星までMMO、MPOを運搬するモジュール。イオンエンジンを搭載している。

※7 MESSENGER：NASAが2004年に打ち上げた水星探査機。2011年から2015年まで観測を行った。2015年4月30日に水星に衝突しミッションを終えた。

平成27年度第一次気球実験

平成27年度第一次気球実験は、7月30日から連携協力拠点である北海道の大樹航空宇宙実験場において実施されました。

8月5日に測風ゴム気球を放球した後、翌6日に「成層圏大気クライオサンプリング実験」を実施しました。この実験は、温室効果気体をはじめとするさまざまな大気成分の濃度や同位体比の測定に、得られた試料空気を供することを目的としたものです。液体ヘリウムを利用したポンプで大気成分のほとんどすべてを凝縮固化して採集するクライオジェニック法を用いて、希薄な成層圏大気を固化して大量に採集します。気球の上昇中および浮遊飛翔中の11の高度で、大気採集を行いました。今後は、採集された大気試料を最先端の分析装置を用いて詳しく解析していきます。

並行して、中層大気中の微生物の形態と高度分布を観測することを目的とした「成層圏における微生物捕獲実験」の準備を進めました。これまではポンプで吸い込んだ成層圏大気をフィルタでこして微生物を捕獲する方法を用いていましたが、今回は観測装置が気球から切り離されてパラシュートで降下する間に、原理的にコンタミネーションが起きないインパクト式という新しい方法で微生物採取に取り組む実験でした。お盆休み明けの8月20日、翌日に放球できそうだという状況

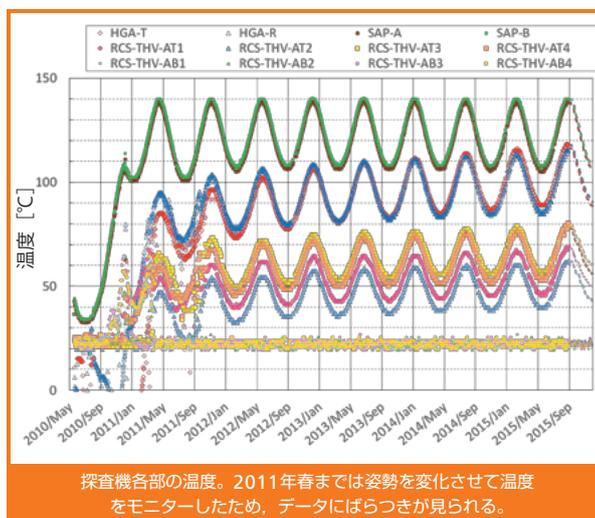
に至ったのですが、残念なことに、最終試験中に捕獲装置にトラブルが発生しました。問題解決に必要な時間を考えると高層風が実験に適さなくなってしまうことが予測されたため、今季の実施を見送ることとなりました。

今年度の第一次気球実験の最後は、「国際宇宙ステーション (ISS) からの放出衛星 (EGG) の搭載機器の動作確認および運用確認試験」でした。将来の地球帰還システムへの応用が期待されている展開型柔軟エアロシェルによる大気圏突入システム開発の一環として、ISS放出超小型衛星EGGのエンジニアリングモデルをゴム気球で飛翔させ、民間の衛星通信経路による太陽電池パネル展開やガス放出シーケンス試験を実施するものです。8月22日早朝に放球されたゴム気球によってEGGエンジニアリングモデルが高度31.7kmにまで上昇する間、予定された動作確認および運用確認試験が行われました。この結果は、今後のEGG実験機のフライトモデルの製作や運用計画の立案に生かされていきます。

今年度は4～5月にオーストラリアでの気球実験を実施したため、北海道大樹町では今回の夏の実験のみとなりました。ご協力いただいた関係者の皆さまに深く感謝致します。(吉田哲也)

金星探査機「あかつき」の近日点通過

金星探査機「あかつき」は、2010年12月に金星周回軌道に投入することができず、太陽を巡る新しい軌道に入ってしまった。この軌道は周期約200日で、最も太陽に近づく距離は約0.6天文単位(1天文単位は太陽と地球の距離。約1億4960万km)です。「あかつき」は地球を飛び立った時点で太陽から約1400W/m²の光を浴びており、その後いったん太陽から遠ざかる軌道を取ったため、約1200W/m²にまで下がりました。金星(太陽



距離約0.7天文単位)にたどり着いたときには約2650W/m²であり、設計時に想定した最大熱入力(2800W/m²)です。しかし、現在の軌道の近日点では、約3650W/m²という設計を大幅に逸脱する条件となります。

太陽からの光の強弱により探査機全体の温度も上下します。例えば太陽電池パドルの温度は、地球を飛び立ったと

きは45°Cくらいで、金星軌道にたどり着いたときは約110°Cまで上がりました。これが近日点を通るたび

に約140°Cまで上昇するわけです。太陽電池パドルの設計仕様は上限180°Cとなっていますから、これ自体は問題はありませんが、スラスターのバルブなどいくつかの機器で設計仕様を上回る温度となるものがあります。最も安全な姿勢として、高利得アンテナが設置されている面を常に太陽に向けて航行する方針が決定されたのは、2011年春のことです。この後、再び金星にたどり着くまでは高利得アンテナで地球と通信を取ることはできな

くなり、運用上多くの制約を生むことにもなりました。

8月30日に最後（9回目）の近日点通過をし、その後、徐々に探査機各部の温度は下がってきています。今後はプロジェクトとして、金星周回軌道投入およびその後の観測運用に全力を傾けることができます。今回も「あかつき」の無事を祈ってくださる方々から多くのお言葉を掛けていただきました。ありがとうございます。

(中村正人)

太陽観測ロケット実験 CLASP の打上げ成功

日本時間9月4日午前2時1分（米国山岳部夏時間9月3日午前11時1分）、宇宙研、国立天文台、NASAをはじめとする国際チームは、太陽観測ロケット実験CLASP（Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter）を、米国ニューメキシコ州ホワイトサンズ・ロケット発射場より打ち上げました。CLASPは、真空紫外線であるライマンα光の偏光分光観測により、太陽大気の磁場を測定する国際共同実験です。

太陽では、磁場をエネルギー源として大小さまざまなエネルギー解放現象が発生していることが知られています。太陽の磁場を測定することは、太陽の物理状態をより正確に知り、太陽で起こっている現象を理解するために不可欠です。これまで、太陽観測衛星「ひので」をはじめとする観測機器により、太陽表面（光球）や、太陽大気のうちでも比較的下層に当たる彩層下部の磁場の測定が行われてきました。CLASPでは、太陽ライマンα光の初めての偏光分光観測により、より上層である彩層上部・遷移層にお

けるベクトル磁場の測定を行います。

CLASPでの偏光観測は、望遠鏡で集光した太陽ライマンα光の直線偏光の向きを、連続回転する波長板により時間変化させることで実現しています。波長板を連続回転させる機構には、宇宙研がメーカーと共同で次期太陽観測衛星SOLAR-Cに向けて開発した、高精度のモーターを使用しています。また、日本で組み立てられた観測装置は、今年4月に相模原キャンパスで振動試験を行ってから米国に出荷されました。

CLASPは打上げに成功し、波長板モーターを含め観測機器は予定通りに動作して、観測は成功しました。観測ロケットは飛行時間が短く、観測が行える時間は5分程度に限られていますが、5分間データが途切れるこ

となくロケット姿勢安定性も申し分ない、極めて良質な観測データを得ることができました。近いうちに多数の科学成果を発表することを目指し、現在チーム全体でデータ解析に取り組んでいます。

(石川真之介)



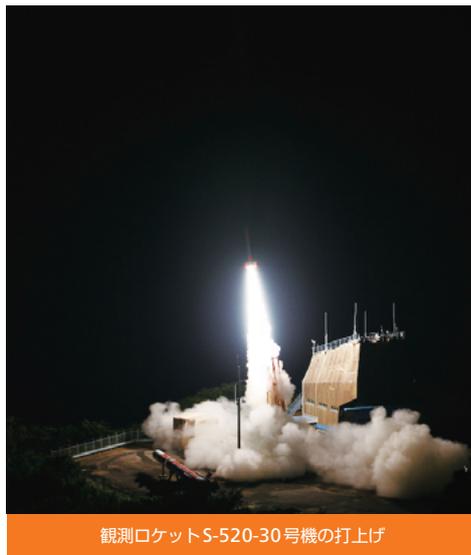
観測ロケットS-520-30号機の打上げ成功

酸化ホウ素宇宙ダストの核生成過程の解明を目的として、観測ロケットS-520-30号機が9月11日20時にJAXA内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。ロケットの飛行および搭載機器の動作は正常で、打上

げ283秒後に最高到達高度312kmに達した後、打上げ550秒後に内之浦南東海上に落下して実験が計画通り終了しました。その飛行中に、搭載した小型姿勢制御装置により約7分間の微小重力環境が得られました。

本飛行では、微小重力環境を利用して、地球やそのほかの太陽系天体の材料となった微粒子がつくられる初期状態の再現実験（研究代表者：北海道大学 木村勇氣准教授）を実施しました。具体的には、宇宙空間を模した3台の小型チャンバー内でそれぞれアルミナ（酸化アルミニウム）とシリカ（酸化シリコン）をヒーター加熱により蒸発させ、その後凝縮により固体微粒子が微小重力環境下で生成し成長する過程を直接測定しました。測定には2台の二波長干渉計および1台の浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定装置が用いられ、上記チャンバーはそれらに1台ずつ組み込まれました。

二波長干渉計を用いた実験では、物理定数である酸化物の吸着係数と表面自由エネルギーを精度よく決定してアルミナとシリカそれぞれの核生成の起こりやすさを求め、天体より放出されたガスから最初に核生成する粒子がアルミナであるか否かを検証します。浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定装置を用いた実験で



観測ロケットS-520-30号機の打上げ

は、アルミナが核生成して浮遊しさらに大きな粒子へと成長する過程において赤外線吸収スペクトル測定を行い、天体のスペクトル観測でのみ現れる13 μm 帯ピークがアルミナに由来するか否かを明らかにします。従前はこのような直接観測装置がなく、地上でダストの候補物質を媒質（臭化カリウム）に埋め込んで赤外線吸収スペクトルを測定していたために、測定データが埋め込みによる凝集や表面構造の変化などの影響を受けていました。

本実験は宇宙研の宇宙環境利用科学委員会が支援したワーキンググループ・研究チームの活動の一環として計画・推進され、参加研究機関は北海道大学、東京大学、東海大学、JAXAでした。今後、各研究機関において得られたフライトデータの詳細解析が実施される予定です。なお、関係者各位のご尽力に加え長坪観音様の霊験もあってか、打上げ当日の天候にも恵まれてフライトオペレーションが予定通り無事終了しました。関係各位に深く感謝致します。（稲富裕光）

今月のキーワード

宇宙の再電離

ビッグバンによる宇宙創成からしばらくの間、宇宙は非常に高温だったために、電子と陽子は独立に飛び回って全体がプラズマの状態であった。38万年ほどたって宇宙の温度が3000度程度まで下がると、電子と陽子が結合して中性の水素原子となった。それまで光（光子）はプラズマ中の電子によって散乱（トムソン散乱）されるため直進できず、あたかも厚い雲の中にいるような状態であった。一方、水素原子が光を散乱する効果は非常に小さいため、宇宙の中性化に従って、光は遠方まで直進することができるようになった。これを「宇宙の晴れ上がり」と呼んでいる。このとき宇宙空間を自由に飛び交うようになった光が、現在「宇宙マイクロ波背景放射」として観測されているものである（『ISAS ニュース』2015年8月号 [No. 413] 松村知岳氏の記事参照）。

宇宙がさらに冷えると、水素やヘリウムのガスが重力に

より集まることが可能になり、宇宙で最初の星ができたはずである。この宇宙最初の星々が放つ紫外線やX線により、宇宙空間にある水素原子は再びそのほとんどが電離されてプラズマの状態に戻ったと考えられる。これを「宇宙の再電離」と呼ぶ。その後も現在に至るまで星々は生まれ続け、その放射により現在でも宇宙は全体で見ると、おおよそ99.99%の水素が電離された状態にある。しかし、生まれてから138億年の間に宇宙は大きく広がってプラズマの密度は著しく下がったため、現在の宇宙はほぼ透明である。

宇宙の再電離が始まったころの、まだプラズマの密度が高い時期の散乱の効果をも、WMAPやPlanckといった遠赤外線～電波の波長で精密な観測を行う衛星によって測定することで、当時の電離状態が分かり、そこから宇宙初期に生まれた星の数が推測されるのである。

（山村一誠・井上芳幸）



第6回

軌道を見守る 軌道決定グループ

吉川 真

宇宙機応用工学研究系 准教授

地上系というのはロケットや人工衛星・探査機と比較すると目立たない存在ですが、それでも臼田宇宙空間観測所の64mアンテナや衛星管制室など“絵になる”ものはいろいろあります。しかし、「軌道決定」というと、関係者しか知らないような“地味中の地味”的存在です。ここでは、この軌道決定グループについてご紹介したいと思います。

「軌道」というものの自体、一般的にはあまり分かりやすいものではないですが、それでも、例えば探査機が目的の天体まで行く軌道とか、人工衛星の地球周回軌道などを図に描くことができます。しかし、これらは「軌道設計」（あるいは「軌道計画」）というグループの仕事なのです。では、軌道決定グループが何をしているかというと、探査機や人工衛星が打ち上がった後、それらがどこをどのような速度で動いているのかを推定する仕事をやっています。分かりやすく言うと、打ち上がった後にどのような軌道に沿って動いているのかを調べているのです。

軌道決定では、使う装置は普通のコンピュータですし、結果として出てくるのは位置・速度などの数値です。図も出力されますが、その図はO-C（オー・マイナス・シー）と業界用語で呼ばれるものです。Oは観測値、Cは理論値で、実測された値と推定した値の差（残差）をプロットしてあります。軌道がうまく推定されればこの値はゼロになり、そうでない

とゼロから離れた値になってしまうだけの図で、まったく面白くない図です。しかし、このO-Cこそが最終的には、例えば惑星探査機が目的地に到着できるかどうかの鍵を握っていることとなります。

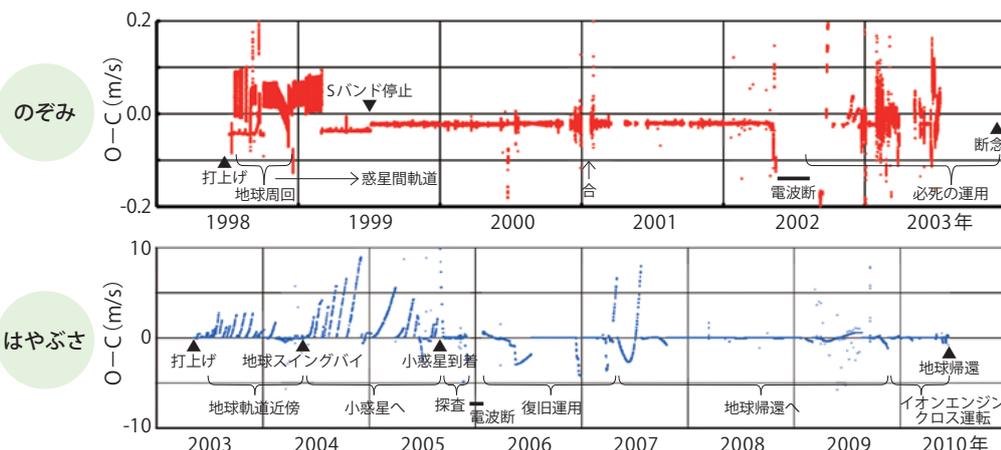
ここでは、このO-Cを利用して面白い図をつくってみました。それは、火星探査機「のぞみ」（1998～2003年）と小惑星探査機「はやぶさ」（2003～2010年）について、打上げからミッション終了までの全期間にわたるO-Cの図です。ここでのO-Cは、レンジレートから換算した視線方向の速度についてのものです。O-Cですから、軌道がきちんと推定されれば値はゼロになるだけで面白くない図になってしまいますが、ここでは最終的なO-Cではなく、ちょっと特殊なO-Cにしてみました。すると、探査機がどのような状況にあったのかが見えてきます。

「のぞみ」の場合、地球周回軌道から惑星間軌道に出せばらくは平穏な運用が続き、その間「合」を体験し、そして電波が途絶え、復活し、自律機能を使って厳しい運用をしていた……という波瀾万丈なミッションが見えてきます。「はやぶさ」では、イオンエンジンによる軌道制御を頑張っていて、小惑星に到着・滞在、トラブルが発生し通信が途絶え、復活、復旧運用がありしばらくは平穏な運用、そして地球帰還に至る、ということになります。ゼロのまわりの数値の変動で探査機の状態（探査機がどのように頑張っていたか）が分かるわけです。このように軌道決定グループは、探査機が打ち上がると常に軌道を通して探査機の様子を、まるで我が子のように見守っているのです。

さて、どのようにして探査機の軌道を推定するのかという質問をよく受けます。基本は、レンジ（地上局と探査機との距離）とレンジレート（視線方向の速度）の観測値を使って、探査機の位置と速度を割り出していくこととなります。具体的な説明には少し誌面が必要なのでまた別の機会に譲りたいと思いますが、最近では、新たな手法としてDDOR（Delta Differential One-way Range）と呼ばれるものを導入したりして、軌道決定の精度を1～2桁向上することも行っています。

ミッションにおいては、超裏方の軌道決定グループですが、今日もO-Cを見ながら探査機の状態を見守っています。

（よしかわ・まこと）



ミッション全期間にわたるO-C火星探査機「のぞみ」と小惑星探査機「はやぶさ」の視線方向の速度（レンジレートから換算）についてのO-Cを示す。ここでのO-Cは、ミッションの状況が分かるようにしたもので、例えばバイアスを除去していなかったり、イオンエンジンの推力推定を行っていなかったりするものである。O-Cの値そのものより、振る舞いの仕方を見てほしい。

特別編 JAXA 2015 BIG 3 から JAXA BIG 3 に

大底弘宜 大瀬戸篤司 大野 剛

今回は、2015年度採用の3人組が相模原キャンパスで過ごした研修の日々をまとめました。

JAXAの2015年度入社職員は、「JAXA 2015」と呼ばれている。その中で我々、大野、大瀬戸、大底の3人は、「JAXA 2015のBIG 3」と自称している。理由は明白。我々3人がJAXA 2015の中で、最も優秀だから（言わずもがな、本当は全員苗字に「大」が付いているからというだけにすぎない）。新人研修の一環である現場実習において、その3人が同じグループになったことは奇跡である（人事部のいたずらではないかと邪推している）。本稿では、我々3人が5月に相模原キャンパスで過ごした13日間について振り返ることとしたい。

研修先は、宇宙科学技術・専門技術の各グループ。内容は、「プロジェクトのサブシステムを担当する部署の業務内容を体験することにより、業務内容への理解と現場感覚の養成を目指すこと」を目標に、座学と実技で構成されていた。

初日。午前はイントロダクションを兼ねて、研修受け入れ責任者である廣瀬和之先生のお話を伺った。「白黒のはっきりとした答えのない『灰色の問題』にどのように対処するか」といったエンジニアとしての心得を教えていただいた。そのようなお話を拝聴できる機会は少なく、技術者である大野と大瀬戸にとっては本研修の中で最も有意義な時間であった。

初日の午後は、電子部品・デバイスと通信系に関する座学と、超小型深宇宙探査機PROCYONの運用見学を行った。現在運用中の日本の深宇宙探査機は数えるほどしかなく、稀有な経験であった。

次の3日間は、あきる野実験施設での低毒貯蔵性液体推進系実験に参加した。「指示されたタイミングでスイッチを押す」「大きなバケツいっぱいの水を運ぶ」など単純な仕事であったが、現場を実体験し、危険を伴う実験での安全管理や意思統一の重要性を学んだ。

また、宇宙研らしいインハウス開発体験を目的とし、太陽センサの開発を4日間かけて行った。精度や動作環境などの要求から仕様と設計を決め、自らはんだ付けすることでセンサを製作した。さらに、ソーラーシミュレータを用いた試験と性能評価を行った。事務系の大底にとっては、このときの経験が最も印象深い。現在は筑波の契



BIG 3、相模原を闊歩する。
左から大底、大瀬戸、大野。

約部に配属されているが、依頼される案件の内容を漠然とでもイメージすることができる。それは、研修のために用意された課題であったとはいえ、一連の開発を体験できたからである。

次に、自励振動ヒートパイプの製作と実験をし、次期X線天文衛星ASTRO-Hの熱真空試験を見学する期

間が4日間あった。自励振動ヒートパイプは、基本的な動作原理は明らかにされているものの、その動作を普遍的に記述する理論はまだ確立されていないという。ものづくりが好きな大瀬戸は、理論よりもまずは製作し実験してみることの重要性をあらためて認識した。ASTRO-Hの熱真空試験では、フライトモデルの美しさと存在感が強烈に印象に残っている。

最終日は、観測ロケットに関する座学を受け、実際のロケットに搭載されるバッテリーの充電実習を行った。9月に観測ロケット実験運用研修に参加した大野にとっては、このとき得た知識が大いに役立ち、また自分が充電したバッテリーが搭載されたロケットの打

上げに参加できるとは夢にも思わなかった。これが13日間の現場実習の全容である。この期間を通して我々3人が学んだことは、相互理解と仲間・同僚の大切さである。技術者同士の連携の重要性はもちろん、技術系と事務系が互いを理解し合うことで、業務の効率化につながるのではないかと感じた。その意味では、本研修は事務系の大底にとって非常に良い経験であったし、一方、技術系の大野と大瀬戸は事務系の業務をわずかでも体験してみたかったと感じている。研修中は多くの先生方、先輩方にお世話になり、たくさん学ばせていただいた。JAXAという比較的小さな組織の中で、あれだけ多くの方々にと顔と名前を覚えていただいたことは大変うれしく、今後はぜひ仕事でもお世話になればと考えている。心から感謝申し上げたい。そして最後に、3人の同期としての絆を深めることができた。よく笑い（時には怒られるのではないかとと思うほどよくふざけ）、本当に楽しく充実した時間であった。

これからは「JAXA 2015のBIG 3」から「JAXAのBIG 3」になれるよう、頑張ります。

（おおそこ・ひろき、おおせど・あつし、おおの・ごう）

ISAS ニュース No.415 2015.10 ISSN 0285-2861

発行／国立研究開発法人 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ビピア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記

ジオスペース探査衛星ERGの各種試験が進んでいます。健全な試験は健康な肉体から。日々の必要十分な栄養摂取と睡眠時間・運動時間の確保を心掛けたいと思います。（笠原 慧）

*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

