



宇宙科学最前線

JAXA 宇宙研の BepiColombo MMO プロジェクトマネージャ早川 基 教授(左)と
ESA BepiColombo プロジェクトマネージャのウルリッヒ・ライニングハウス氏。
背景は、水星に到着した探査機の想像イラスト (©ESA)。

ロケットエンジン開発における 材料工学最前線

宇宙飛翔工学研究系 研究主幹・教授

佐藤英一

JAXA第一宇宙技術部門H3プロジェクトチーム
主任開発員

堀 秀輔

材料屋=死の商人？

世に「御輿^{みこし}に乗る人、担ぐ人、そのまた草鞋^{わらじ}をつくる人」なる言い方がある。宇宙研に籍を置く材料屋という立場の私などは、御輿(科学衛星)に乗って観測をする天文学者、御輿を担ぐシステム工学者、草鞋(打上げロケット)をつくる構造屋ときた後の、草鞋のわらをたたいている、というようなことになるうか。

新しい、軽くて強い材料の開発が本来の材料屋の仕事であろうが、新材料の開発は非常に時間のかかるものであり、なかなか宇宙科学プロジェクトのスケジュールの中では難しい。一方で、ロケットや衛星などの宇宙機では材料をかなり特殊な条件で使うことが多い。

従って、宇宙機独自の条件での材料特性の評価が大切な仕事になってくる。そして、その条件下で材料は劣化せず健全に使うことができるのかどうか、非破壊的に材料・構造の信頼性を評価することも求められている。

皮肉なことに、宇宙プロジェクトで大きな失敗が続くと材料や品質保証に注目が集まり、材料分野へ予算が集まり研究・開発が促進され、その後、成功が長らく続くとコスト削減が図られる、という歴史が繰り返されてきた。古くは1979～80年の実験用静止通信衛星「あやめ1号・2号」の連続失敗の後、固体ロケットモータ^{※1}推進薬に対する放射線探傷技術が開発され、大型X線CT設備が種子島宇宙センターに導入された。1998～2003

年のH-IIロケット5号機、8号機、M-Vロケット4号機、H-IIAロケット6号機のほぼ連続した打上げ失敗では、材料基礎データの不足と非破壊検査の不足が強く指摘された。筆者が主に関わったM-Vロケット4号機への対策においては、黒鉛の超音波探傷の研究が推進され、成果は公的な規格（JIS Z 2356, ISO 10830）として整備されるとともに、先進的な黒鉛用アレイ型超音波探傷システムが開発された。H-IIAロケット6号機への対策としては、厚肉複合材用非接触超音波検査設備が開発された。H-IIロケット8号機の失敗は世間的に大きな話題となったが、物質・材料研究機構（NIMS）と協力して今に続くエンジン関連材料データベースの整備が開始された。

当事者としては、事故があると忙しくなる死の商人を演じたいわけではなく、材料基礎データの蓄積と非破壊信頼性評価は欠くべからざるものであるとして、途切れない研究・開発が大切であると強く訴えているところで

図1 物質・材料研究機構（NIMS）、産業技術総合研究所（AIST）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）3機関連携による研究協力体制

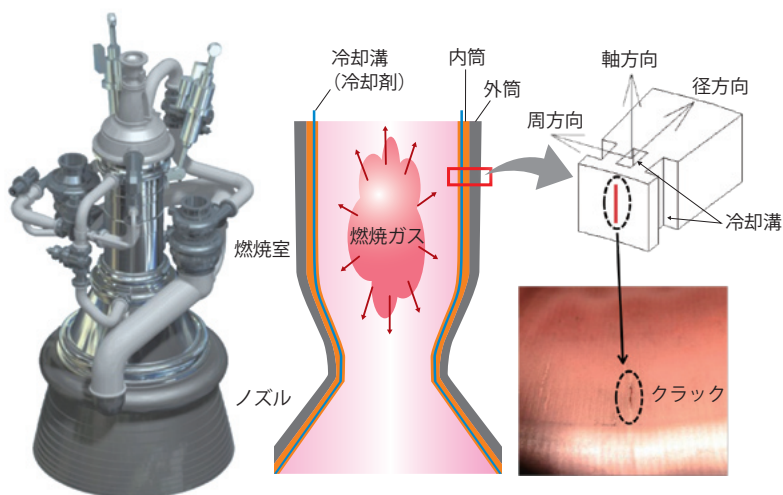
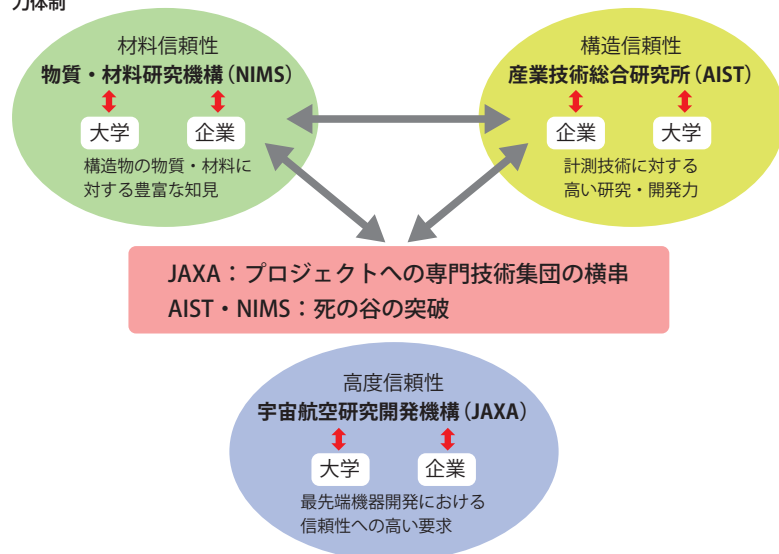


図2 液体ロケットエンジン（左）、燃焼室の構造（中）、燃焼室壁に生じたクラック（右）

ある。その意味で、2008年にNIMS、産業技術総合研究所（AIST）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の3機関による非破壊信頼性評価に関する研究協力協定が締結されたことは、継続的な研究・開発を進める上で非常に意義の高いものであると考える（図1）。これにより、JAXAプロジェクトとしてはALL-JAXAを超えたALL-JAPANの専門技術集団を貫く「横串」を通すことができ、またNIMS、AISTにとっては研究開発と事業化の間に横たわる「死の谷」を越える一助とすることができる。

本稿では、この枠組みの中で行っている液体ロケットエンジン燃焼室壁の材料劣化・余寿命評価・非破壊検査に関する最近の成果について簡単に紹介する。

液体ロケットエンジン燃焼室壁のクリープ疲労損傷

JAXAでは、高信頼性と大幅な低コスト化が要求される新型基幹ロケット（H3ロケット）用LE-9エンジンの開発を行っている（図2左）。その中で、エンジン燃焼室壁は液体水素（LH₂）冷却溝を有する銅（Cu）-クロム（Cr）-ジルコニウム（Zr）系銅合金を内筒とし、外側をニッケル合金で包んだ二重構造となっている（図2中）。この冷却溝壁は、3000℃の燃焼ガスとマイナス250℃のLH₂にさらされ、起動停止ごとに大きな温度変化とそれに伴う過大な熱ひずみが生じる。過去に別エンジンの地上燃焼試験において、20回程度の燃焼サイクルの後に冷却溝LH₂側からの亀裂の発生が確認されている（図2右）。現在のロケットでは、エンジン製作後複数回の燃焼試験実施後にフライトに臨むので、この亀裂の検出、劣化損傷過程の解明および余寿命評価はロケットエンジンの信頼性確保に不可欠である。

実機燃焼室壁の亀裂発生点における3次元有限要素解析がJAXA情報・計算工学センターでなされているので、その結果を精査した（図3左）。燃焼室壁は起動直後に温度が500℃近くまで急上昇し、270秒の定常燃焼の後、温度が急減すること、そしてこれに伴い起動停止時に塑性域^{*2}に達する圧縮変形と引張変形を受け、定常燃焼中には徐々に外筒の温度が上昇することによる極低速引張変形（材料学的には引張クリープ変形に相当する）を受けることが分かった。

クリープ疲労^{*3}は発電プラントの配管などで問題になるが、その場合の疲労振幅は塑性域には達することはなく、クリープ疲労試験

もひずみ保持（応力緩和）型試験で代用されることが多かった。疲労振幅が格段に大きいエンジン燃焼室壁の条件でも、ひずみ保持型クリープ疲労試験ではこの材料は100サイクル以上の寿命を有し、クラック生成を再現できなかったのに対し、応力保持型クリープ疲労試験を行ったところ20サイクル弱で破断に至ることが再現された（図3右）。応力保持型クリープ疲労試験では、サイクルごとにクリープひずみが累積し、単純クリープ試験より1桁以上短い累積時間で破断している。さらに大振幅疲労も考慮した線形加算則による推定より大幅に少ない寿命で破断している。

クリープ疲労試験の途中での材料内部を観察してみると、クリープモードでの損傷（粒界ポイド）と疲労モードでの損傷（疲労クラック）の両者の蓄積が認められた（図4）。すなわち、試料表面で発生し粒界に沿って材料内部へと進展した疲労クラックと、クリープ中に生成し成長・合体した粒界ポイドとが連結することで、銅合金の劣化損傷が急速に進展していることが分かった。

エンジン燃焼室壁の非破壊検査および余寿命評価

エンジン燃焼室壁においてはクリープ疲労による損傷蓄積が避けられないことから、エンジン各燃焼サイクルにおける損傷度を非破壊的な手法により定量的に測定・評価することが求められる。クリープ疲労最終段階のミリメートルオーダーのクラックを検出してそのエンジンを使用停止にすれば、大きな事故を未然に防ぐことができる。それ以前の段階で、サブマイクロメートル以下の粒界ポイドの成長度を評価することができれば、そのエンジンのその後の使用可能サイクル数（余寿命）を評価することができる。

クラックの非破壊検査については、エンジン燃焼室壁は冷却溝を有する複雑構造であり、冷却溝の形状エコーに埋もれている検査面裏側の傷エコーを検出することが課題となっている。現在、レーザ超音波可視化法による超音波探傷法および非線形超音波探傷法の適用を検討中である。特に後者の非線形超音波法は、大振幅正弦波バースト波により材料内の異常部を揺り動かしたときに発生する超音波波形のゆがみを高調波として検出し、超音波センサを走査しながらその振幅をマッピングすることにより異常部を可視化する。音響インピーダンス差を用いないので、冷却溝の形

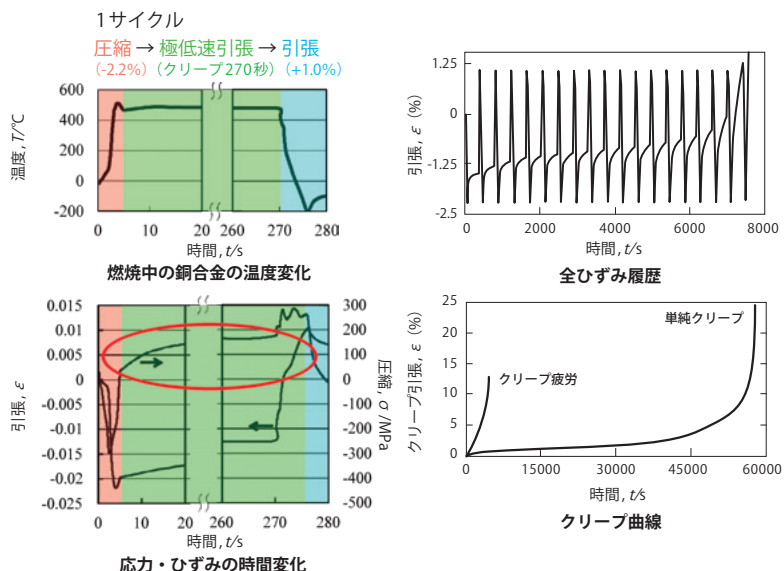
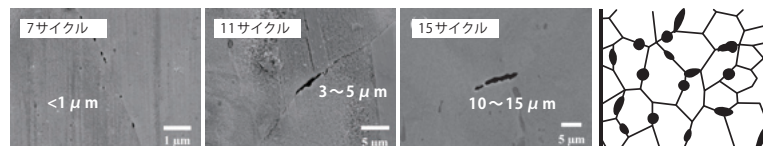
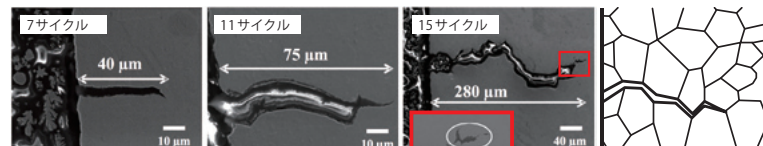


図3 燃焼室壁の燃焼1サイクルにおける負荷（左）とクリープ疲労試験結果（右）

単純クリープ 粒界ポイドが成長・合体することで、大きなポイドになる。



単純疲労 サイクル進行に従い、粒界クラックが進展する。



途中止め試料の断面SEM（走査電子顕微鏡）像

クリープ疲労 進展した粒界クラックと成長・合体した粒界ポイドが連結したとき（15サイクル）、急激に損傷が進行し始める。

図4 エンジン燃焼室壁のクリープ疲労における損傷進展過程

状エコーの影響がなく、エンジン燃焼室壁の非破壊検査へ適用できる見込みが大きい。

余寿命評価については、サブマイクロメートル以下の粒界ポイドや微細クラックを検出する必要があるため、非常に難易度が高い。現在、陽電子消滅法や渦電流探傷法について、全国の大学の専門家と共同研究を始めたところである。

この特殊なクリープ疲労現象の解明により、新型基幹ロケットエンジンの設計・評価において、損傷蓄積メカニズムを踏まえた上で、より信頼性の高いロケットエンジンを開発することが可能となった。そして、クラックの非破壊検査と損傷蓄積の余寿命評価は、現在のロケットエンジンの安全性・信頼性を高めるばかりでなく、将来の再使用型エンジン実現に必須なブレークスルーの一つであり、ぜひとも実現させるべく努力している。

（さとう・えいいち、ほり・しゅうすけ）

※1 固体ロケットモータ：ロケットは、大きく固体ロケットと液体ロケットに分けられる。「あやめ1号・2号」のキックモータ、M-Vロケット4号機第1段モータ、H-IIAロケット6号機SRB-Aは前者の固体モータ、H-IIロケット5号機第2段エンジン、H-IIロケット8号機第1段エンジンは後者の液体エンジンである。

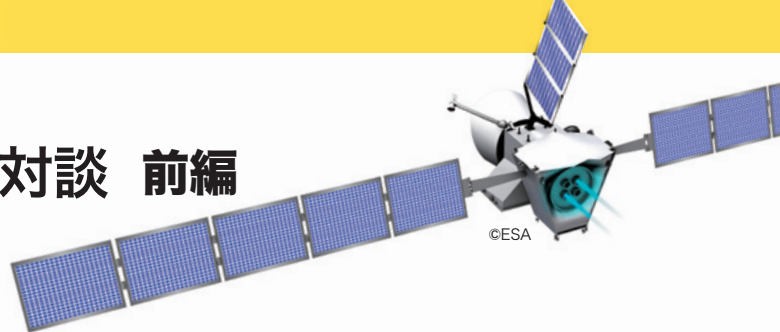
※2 塑性域：金属材料に力をかけていくと、最初は弾性的な変形のみを起こすが、あるところから塑性変形も生じるようになる。

※3 クリープ疲労：材料が高温で受ける負荷のうち、繰り返し変形中にクリープ現象（外から力を加えなくても、時間とともに変形量が増える現象）を含む場合をクリープ疲労と呼び、発電プラントなどにおける材料劣化の主要因の一つとなる。

→ 8ページ
「今月のキーワード」
もご覧ください。

水星探査計画 BepiColombo 日欧プロジェクトマネージャ対談 前編

プロマネはつらいよ



——まず、BepiColombo^{※1}プロジェクトの歴史についてお聞きします。現在は日欧国際共同として進めています、ESA側ではいつ始まったのですか。

Ulrich：いつ始まったか……。遠い遠い昔……。私がまだプロジェクトにいなかったときから始まっているよ(笑)。12年前、2003年だったと思う。

Hajime：2000年10月にESAのSPC（科学プログラム委員会）でCornerstone Mission^{※2}に選ばれたんだよね。

Ulrich：すべてがスタートしたのは2003年だけど、もちろん科学者の世界ではずっと前から検討が進んでいた。ヨーロッパでは、さまざまな国の科学者がBepiColomboに貢献したいと考えていたんだ。そして日本を含め、確か40を超えるグループから科学観測機器と観測計画の提案が集まったと思う。そ



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

の中から11の提案が採用された。それらが今回搭載されているものだ。

——Ulrichさんは、いつからBepiColomboに参加したのですか。

Ulrich：2010年くらいからだね。その前は、Herschel^{※3}プロジェクトで衛星開発のマネージャをやっていたよ。Herschelを打ち上げた後、配置転換でBepiColomboの組み立て試験と調達マネージャになったんだ。

——大学での専攻は？

Ulrich：専攻は物理学で、電気工学も同時に勉強した。でも物理学は途中までになってしまった。ある時期、物理学を続けるかどうか迷ったんだけど、最終的には就職がもっと重要だと考えるようになったんだ。電気工学は就職のための勉強、物理学は僕の中の興味のための勉強といったところかな。

——プロジェクトマネージャになったのはいつですか。

Ulrich：正式には半年前だ。でもプロジェクトマネージャの仕事は、前任者のJan van Casterenが病気であまり働けなくなってしまったので、その代理としてすでに2年続けているよ。

——プロジェクトマネージャになって、どう思いましたか。

Ulrich：日々責任におびえているよ(笑)。プロジェクトマネージャになる前は技術的な責任しかなかったけれど、今はたくさんの責任がある。スケジュール通りに実行することはもちろん、財務的にも商業的なことにも責任がある。たくさんの方が同時並行で進んでいて、数年前は専門外で詳しく知らなかったことも含めて、今はすべてのことをやらなきゃいけない。

——すごいと思います。

Ulrich：そうかい？ 僕は自分がしていることに幸せを感じている。ご存知のようにBepiColomboにはまだやらなければいけないことがあるけれど、我々のチームは成功できると思っている。あなた方は、朝のミーティングなどBepiColomboのオペレーションに毎日参加してくれている。それはとてもよいことだと思う。ESA側がMMO（水星磁気圏探査機）^{※4}を正式に扱い始めるのはまだ先だけれど、MMOはすでにESTECのクリーンルームにある。一步一步着実に進行しているんだ。

Hajime：やっと、ここまで来たよ(笑)。

Ulrich：そう！よくやったね！自慢していい。

——BepiColomboプロジェクトのメンバーは何人ですか。

Ulrich：ESAのチームは、20名ちょっとが直接のプロジェクトメンバーだ。加えて、ESAのラボで働いている技術サポート15名がパートタイムで支援してくれている。フルタイムに換算すると25名かな。

——そのほかに、たくさんの企業が関わっていますよね。

Ulrich：もちろん。企業なら何百人、何千人というよ。たくさんの層（注：元請けや下請け）があるしね。あなた方は、とても有利だよ。すべてが日本国内にあって、母国語でいろいろな議論や交渉ができる。僕たちはブローケン・イングリッシュを話さなきゃいけない(笑)。違った文化や言語を持っているヨーロッパ中の国々から参加があるからね。言語と戦わなければいけないんだ。

——日本側はどうですか。まずはMMOの歴史から。

Hajime：日本の水星探査ミッションは1997年から研究が始まり、2000年から2001年まで続け、その成果をいくつかの国際会議で公表している。同じころESAではBepiColomboのStudyが行われていて、ESA側からBepiColomboに参加しないかというお誘いを受けたんだ。なぜなら、BepiColomboは2機の探査機、MPO（水星表面探査機）^{※5}とMMOから構成されていて（注：MSEという水星着陸探査機も計画されていた）、MMOが我々の水星探査機の観測目的・搭載観測機器とほぼ同じだったんだ。だから、双方にとってメリットがあるということになり、一緒にやることになった。

——プロジェクトマネージャになったのはいつですか。

Hajime：確か、2006年9月。約9年になるね。

——専門は？ またBepiColombo MMOのプロジェクトマネージャになる前は何をされていたか。

6月22日にヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の宇宙技術研究センター (ESTEC) で、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) 氏による対談が行われました。日欧の文化の違いやプロジェクトでの苦労など、とても興味深いお話を聞くことができました。今月と来月の2号にわたって掲載します。司会はプロジェクト研究員の村上 豪氏が務めました。

Hajime：専門は宇宙プラズマ物理学、特に磁気圏物理学。BepiColombo MMOプロジェクトのスタート時には、プロジェクトサイエンティストだった。その前は、火星探査機「のぞみ」のプロジェクトマネージャを1年半くらいやったかな。
——BepiColombo MMOのプロジェクトメンバーは何人ですか。

Hajime：非常に少ないよ。フルタイムのメンバーは2人。僕の本務は、太陽系科学研究系の教授だ。実際は99%以上の仕事はBepiColomboだから、ほぼフルタイムなのだけれど、オフィシャルにはフルタイムではない。たくさんの人が「パートタイム」で働いている。特に工学系の人たちはね。

——プロジェクトマネージャになって、どう思いましたか。

Hajime：そうねえ……、技術開発に関して言うと、僕たちとESAはチキンレースをしているようなものだったね (爆笑)。どちらもたくさんのトラブルがあってね。このレースにいつも勝っているのは、どちらだと思う？

Ulrich：ああ、疑いなく君たちが勝っているね…… (笑)。

Hajime：幸運にも、僕たちが勝っているね。どちらもBepiColomboでは「熱」が最も重要だと分かっている。最初にそう認識して、準備もしたんだけど、プロジェクトが始まるとその困難さは想定していたものよりずっとずっと大きかった。たくさんトラブルがあった。ESAもそうだね？

Ulrich：そうだよ。君たちは幸運にも解決したね。我々もたくさん問題を解決してきたけれど、まだまだ仕上げまでにやるべきことがある。それが我々の頭の痛いところなんだ。

——日本との共同ミッションをどう思いますか。

Ulrich：我々のチームと君たちのチームとのインターフェースは、とてもうまくいっている。お互いを信頼している。だから、君たちに毎日のチーム会議に参加してもらうのは当然のことだ。そこでは、短期的計画や中期的計画、日々解決される問題について議論されている。これは我々にとって「オープンさ」の象徴だ。また当然、君たちのオープンさも期待している。もちろん、それが相互理解にとっても良いことなんだ。我々には、いくつか共同でやらなければいけない活動があるからね。初めてHajimeに会ったときは、とても思いやりのある人だと思った。もちろん君のチームも、とてもオープンだった。議論しなければいけないときはオープンに議論をした。日本の人たちと一緒に仕事をした僕の経験は、非常にいいものだよ。Hajimeはヨーロッパと仕事をしたのは初めてかい？

Hajime：こんなサイズのプロジェクトは初めてだ。

Ulrich：それで、君の感想は？

Hajime：最初の3年は、日本側のメンバーと「机をたたいて部屋を出ようか」と日本語で話していたことが何度あったよ。

Ulrich：それ本当？

Hajime：文化が日本とヨーロッパでだいぶ違うからね。最初はきつかった。でも君が言ったように、BepiColomboでは日欧双方がとてもオープンで、お互い隠し事はない。それはとても大事なことだ。だから君たちを信頼している。最初は君たちのバックグラウンドが分からず、なぜそんな要求をするのか理解できなかった。あまりに多くの要求をしてくるものと、戸惑ったものだ。でも今では、なぜそんな要求をするのかが分かっているのだから、君たちから要求があったときに、本当に要求されていることを理解して交渉や適切な対応ができる。



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

——ESAプロジェクトとJAXAプロジェクトの違いについて、どう思いますか。

Hajime：JAXAプロジェクトではなく宇宙研の科学衛星プロジェクトとの違いになるけれど、最も大きな違いは文書の数だね。

Ulrich：僕もそれを言いたかった。我々の文書は、君たちのよりはるかに多いよね。我々は、例えば試験報告書に書かれた手順や書かれている内容に、より依存している。それに対して君たちは、「試験をした。結果良好」と言うだけ (笑)。もちろん、僕たちは信用するよ。僕たちは、試験が良好で良い報告書というのがいいんだけど。それは、我々の「レビュー文化」と関係しているんだ。MMOに問題があるときには、我々のチームメンバーは文書を見たいし、読みたいと思う。彼らがそこに行き、「証明できた」と言えば、簡単なんだがね。

(10月号に続く)

※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 Cornerstone Mission：ヨーロッパで実施される大型のサイエンスミッション。BepiColombo以降はレクラスミッションと呼ばれるようになった。

※3 Herschel：ESAが2009年に打ち上げた赤外線宇宙望遠鏡

※4 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。

※5 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。

「のしろ銀河フェスティバル2015」開催

能代ロケット実験場がある秋田県能代市で「のしろ銀河フェスティバル2015」が8月1日と2日に開催されました。我々 JAXA も実行委員会の一員として参加し、能代エナジウムパーク、能代市子ども館に加え、能代ロケット実験場も会場として公開しました。実行委員会会長である能代市の齊藤滋宣市長の開会あいさつに始まり、各会場の来場者は2日間合計で3500人を超えました。

エナジウムパークでは「宇宙科学セミナー」と「宇宙学校スペシャル」が開催され、佐伯孝尚先生による日本の小惑星探査についての講演や、細田聡先生、大川拓也先生による宇宙の星たちについての授業がありました。子ども館では、宇宙服の展示とブルースーツの試着、水ロケットの製作・打上げ体験が行われました。また今年は、あきた宇宙コンソーシアムの主催で「モデルロケット1000機同時打上げ」を能代市の下浜埠頭にてフェスティバルと同時開催し、見事打上げに成功しました。1000機以上ものモデルロケットが同時に打ち上がる様子は圧巻で、普段ロケットの仕事に携わる我々も含めて会場は大いに盛り上がりま



能代ロケット実験場公開の様子

した。

能代ロケット実験場では、場内を公開して我々が能代で行っている研究を紹介したほか、入浴剤を使った手づくりロケットの打上げや、手持ちのアンテナを空に向けて衛星からの信号を受信する(写真)など、銀河フェスティバルのテーマである「のしろで宇宙が近くなる」を体験していただきました。また、今回ロケット実験場に初登場したゆるキャラ? 「ロケットくん」が子どもから大人まで皆さんに大人気で、「飛んで!」「しゃべって!」などいろいろ無理な注文を受

けていました。

能代はバスケットボールや野球などスポーツが盛んなほか、海山に囲まれて自然が豊かで、ハタハタや豚なんこつなど食べ物もとてもおいしい街です。また、海岸線に風力発電がずらっと並び、エネルギー問題にも積極的に取り組んでいます。これからも能代で宇宙をもっともっと身近にする研究を進めるとともに、このようなイベントを通じて環境やエネルギーなどさまざまな問題について一緒に考える機会が増えるといいなと思いました。(野中 聡)

宇宙科学の戦略的な推進のために

『ISAS ニュース』編集委員会よりタイトルのような内容で原稿を依頼された。それを書くためには、初めに戦略的推進とは何であるかを考えなければならない。その答えの一つは「プログラム化」、すなわち本年1月に策定された新「宇宙基本計画」において「太陽系探査科学分野については、効果的・効率的に活動を行える無人探査を、ボトムアップの議論に基づくだけでなく、プログラム化も行いつつ進める」と述べられた「プログラム化」であろう。

新「宇宙基本計画」には「プログラム化」をボトムアップと相対する存在のごとく表現されてしまっているが、私は必ずしもそうではないと考えている。私は、プログラムを、JAXAの定義に従って「大きなビジョンに基づいた大きな目的達成のために、単一のプロジェクトだけを考えるのではなく、必要に応じて複数のプロジェクトを組み合わせた工程を考え、さらに、これらのプロジェクト実現に必要な技術開発の戦略的な推進を含めて行う総合的な取り組み」と定義したい。これまでJAXAは、宇宙科学全体

を一つのプログラムとして定義し、技術開発からプロジェクトまでをひとまとめに推進してきた(宇宙科学プログラム)。しかし、各分野の科学目標の高度化・複雑化とともに目的達成に必要な技術的ハードルも高くなり、同時に、プロジェクトの大型化・高額化により実施頻度が低下したことから、宇宙科学全体よりももう少し小さな研究領域ごとに、しかし細かくならない程度の粒度の研究領域ごとに、上記のプログラムの視点で宇宙科学全体の状況も見ながら戦略を立てていくが必要になってきている。

上記の新「宇宙基本計画」の文言には、その一端が現れていると見ることができる。これまでも宇宙理学委員会・宇宙工学委員会、および、それらの下に設置された合同委員会において、研究領域ごとの戦略的議論は行われてきた。私は2013年以降のこれらの議論に参加してきたが、残念ながらそこで十分に実りのある議論ができたとは思えない。そうなってしまったのには複数の理由があると思われるが、私は本質的には、①限られた人数の研究分

野の代表が、②パワーポイント的な資料に基づいて口頭で述べた内容から行った議論では、事実と論理に立脚した地に足の着いた議論であるという確証が十分得られず、そこから自信を持って「これが戦略である」と結論することは不可能であった、ということだったと考えている。

この状況を変えるには、①②の裏返しが必要である。すなわち、できるだけ多くの人々が参加して、各分野の考え方を文章と図を用いた論理的に整合性の取れた文書としてまとめてもらうことから始める必要がある。NASAはDecadal Surveyとして、ESAはCosmic Visionとして、各研究分野の戦略を各分野の研究者が多く参加する形でまとめてもらう活動を推進してきている。NASAはそれを何度も実施することでやり方を改良し、近年はプロジェクト候補の実現性評価まで資金を投資して実施している。対して日本では、前記のように委員会がまとめる、JAXAが人を選んでまとめてもらう、あるいは、学会などが音頭を取って分野ごとに議論を行ってまとめる、ということでは行ってきたが、宇宙科学の全分野について広く意見を文書としてまとめてもらう、ということでは行っていない。

以上の状況を見て2014年末に「研究領域の目的・戦略・工程表提供のお願い」という文書を出した。正式な通知前の説明会から数えても提出まで約2ヶ月半という短い

準備期間であったにもかかわらず、各研究コミュニティから質の高い文書を提出していただいた。今回は初めての試みでもあり、提出いただく際の研究分野の粒度をどの程度にすべきかを規定できないなど、手探り状態であった。宇宙研は提出いただいた文書を分析する「宇宙科学・探査プログラム検討チーム」を所長決定により設置し、分析と集約を行ってきた。これまでに、研究領域を大きくし、その大きくした領域ごとに、(a) 研究領域の大きな目的、(b) 大目的を達成するためのより具体的な中目的、(c) 中目的を達成するための手段、という3階層への整理を試みている。その結果は、宇宙理学・工学委員会の会議資料としてwebに掲載されており、班員であれば閲覧可能である。班員の方々は、ぜひご覧いただきたい。

各研究領域の目的・戦略・工程表を提供していただいた目的は、「研究領域の大きな目標を達成するために最も良い施策を、宇宙科学全体の視点に立ちながら宇宙研が立案し実行することに役立てる」ことである。それは「研究領域の目的・戦略・工程表」の目的と戦略の先鋭化とともに進める必要がある。そのために3階層への整理の考え方を各研究領域の方々と共有する必要があると考えており、すでに一部の研究領域の方々とは話をさせていただいたところである。

(満田和久)

第14回「君が作る宇宙ミッション」(きみっしょん)開催

8月3日から7日まで、高校生向け体験型イベント「君が作る宇宙ミッション」(きみっしょん)を相模原キャンパスにて開催しました。「自ら考え、自ら決定し、自ら作業する」をモットーに、高校生が主体的に将来の宇宙ミッションの立案・検討を行うものです。課題作文により選抜された

高校生25名が4班に分かれ、総勢46名の大学院生のサポートのもとでミッションの立案に取り組みました。4日目夕方に行われた最終発表会では30名以上の職員の方々に参加いただき、時間が足りないほどに活発な質疑応答が行われ、アンケートでも厳しい指摘や温かいコメントを頂きました。高校生がこれほどの大人数の研究者と密接に関わり合えることは、ほかにはない、きみっしょんの大きな特長です。

今年度のきみっしょんでは、「将来を考えるきっかけを与える」ことを目標とし、さまざまな取り組みを行いました。



相模原キャンパスのM-Vロケット前で記念撮影

津田雄一 准教授の特別講義では、小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」や小惑星探査機「はやぶさ2」を例に、研究者がどのように宇宙ミッションをつくるのかを講義していただきました。新しい取り組みとして、大学院生スタッフが自分の研究を紹介する「院生ミニ講義」や、スタッ

フが高校生から進路相談を受ける「座談会」を設けました。普段の高校生活では出会うことのない大学院生・研究者との議論や対話は、将来を考える上で貴重な経験となったはずです。

きみっしょんには、理学・工学の大学院生がスタッフとして参加しており、大学院生間の貴重な交流の場となりました。「どのように高校生のミッションづくりをサポートすべきか」を半年以上かけて徹底的に議論してきたことは、自身の研究を見直すことにもつながっており、駆け出しの

研究者である我々大学院生スタッフにとっては確実に大きな成長の機会となりました。宇宙科学研究の現場である宇宙研の強みを生かした宇宙教育イベントとして、きみっしょんをこれからも継続してほしいと思います。

最後に、きみっしょんの実施・運営にご協力いただきました職員・関係者の皆さまに感謝申し上げます。

(第14回君が作る宇宙ミッション事務局
外岡学志, 馬場俊介, 増田紘士)

SPICA 国際科学評価委員会 開催

次世代赤外線天文衛星 SPICA はここ数年、より実現性を高めるために、国際協力の枠組みの大改革に取り組んできました。望遠鏡や観測装置の性能を含め、衛星の仕様にも大きな変更が行われ、打上げ時期も2020年代後半へと変更になりました。これに伴い、SPICAの科学目標も再検討が必要になりました。そこで、SPICA

チームでは、「居住可能な惑星を育むに至った、重元素と固体による宇宙の豊穡過程を解明すること」という大テーマのもと、「銀河進化を通じた重元素と固体による宇宙の豊穡過程」および「惑星系の形成と居住可能な環境への発展」の解明を2大科学目標として再定義し、その先鋭化を進めてきました。

7月15日、SPICAの新しい目標の価値を評価するための国際科学評価委員会が、フランス・パリにある国際会議場CAP15で開催されました。評価委員は、世界の第一線の科学者である、M. Rowan-Robinson教授(インペリアル・カレッジ・ロンドン)、M. Bureau教授(オックスフォード大学)、D. Elbaz博士(フランス原子力・代替エネルギー庁サクレセンター)、P. Barthel教授(フローニンゲン大学カプタイ



SPICA 国際科学評価委員会の様子

ン天文学研究所)、A. P. Jones博士(フランス国立科学研究センタースペース天体物理学研究所)、M. Harwit名誉教授(コーネル大学)、G. Helou博士(カリフォルニア工科大学赤外線データ処理解析センター所長)、満田和久教授(宇宙科学研究所)の8名です。SPICAチームからは、日本とオランダから9名が参加しました。

朝9時すぎに始まった評価委員会は、宇宙研の常田佐久所長のあいさつと藤本正樹 宇宙科学国際調整主幹の趣旨説明の後、SPICAチームによる発表と活発な質疑応答が5時間以上続きました。最後に、10項目から成るExecutive Summaryが評価委員から発表されました。SPICAの新たな目標は高い価値を有するという評価とともに、いっそう価値を高め、幅広いサポートを得るための重要課題が提言されました。SPICAチームでは、これらの課題に対処しながら、ミッション定義審査に臨んでいます。

なお、国際科学評価委員会の開催に当たり、宇宙研内外の多くの皆さまにご協力を頂きました。SPICAが素晴らしいミッションとして無事に羽ばたけるよう、今後ともご支援をお願いします。(SPICAチーム 磯部直樹)

今月のキーワード

固体ロケットと液体ロケット

現在実用になっているロケットは、その燃料の種類によって、固体ロケットと液体ロケットに分けられる。

固体ロケットは、合成ゴムにアルミニウムなどを混ぜた燃料と、酸化剤となる過塩素酸アンモニウムなどを練り合わせて、ロケット本体に詰めたものである。着火すると、ロケット本体内で燃えて、ノズルから高温の燃焼ガスが噴き出す。着火後に推進力を変更することは難しいが、構造が単純、保存がしやすいという点で、小型ロ

ケットには有利である。

液体ロケットは、液体水素などの燃料と液体酸素などの酸化剤を別々のタンクに入れ、両者を混ぜ合わせることで燃焼させる。そのため、タンク、燃焼室、ノズル、配管、および燃料を押し出すための高圧ガスタンクあるいはターボポンプが必要である。燃料効率がよく、推進力の調整もできるが、構造が複雑で一般的にコストが高い。(橋本樹明)



第5回

静かなるネゴシエーターたち 運用調整

長谷川晃子

科学衛星運用・データ利用センター 衛星運用グループ

「では、調整会議を始めます」「8月24日、『ひさき』, 11m, 3:50~, 5:45~……」「8月25日は……」「すみません, 8月24日ですが, GEOTAILを1時間半延長したいと思います」「運用者アサインは問題なさそうですね」「今週の日曜日は停電作業がありますが, 伝送システム担当よりもう少し余裕が欲しいとのことで, 『ひので』の早朝バスをオフライン運用でお願いしたいのですが」「いいですよ。では, このバスをオフライン運用で」「承知致しました」「来週ですが, 台風が鹿児島に近づいているようです」「荒天対策会議はいつ行われるか, 聞いていますか」「確認して, あらためてお知らせします」「暴風域の時間帯は運用休止となるので, この日あたりは, あまり重要な運用は予定しない方がよさそうですね」……

毎週木曜日, こんなやりとりが宇宙研の片隅で行われています。今回は, 地上系の中でもあまり表には出てこない, 運用調整の作業について紹介します。

現在, 宇宙研で運用している科学衛星・探査機(以下, 衛星)は, 地球の磁気圏を観測するGEOTAIL, X線を観測する「すざく」, 太陽を観測する「ひので」, オーロラを観測する「れいめい」, 今年12月に金星周回軌道への再投入を試みる「あかつき」, 太陽の光を受けて航行する宇宙ヨットIKAROS, 惑星を遠隔観測する「ひさき」, みんなの熱い想いを乗せて小惑星に向かう「はやぶさ2」, 東京大学と宇宙研が共同開発した超小型深宇宙探査機PROCYONと, 9機あります。

9機の衛星に対し, 運用に使用できるアンテナの数は限られています。第2回「探査機・衛星追跡地上局の設備」で紹介した, 臼田(長野県)の64m, 内之浦(鹿児島県)の34m, 20m, 11mの4つです(海外にもアンテナはありますが, 普段はこの4つのアンテナで運用を行っています)。

実は, 衛星を運用できる時間は限られています。皆さんが夜, 星空を眺めるとき, すべての星座が見えるわけではありませんよね? そう, 地平線があるからです。衛星が地平線から昇ってきて地平線に隠れて見えなくなるまでを「可視時間(見えている時間)」と呼びます。衛星の運用ができるのは, 可視時間の間だけです。地球のまわりを回る近地球衛星は, 可視時間が10~

		[JST]	[UT]	10	11	12	13	14
11/28	Mon	2011-332	01:55	02:17	02:28			
11/29	Tue	2011-333	01:34	01:44	02:00	02:40	04:02	04:03
11/30	Wed	2011-334	00:51	01:00	02:03	03:55	03:52	03:14

コンタクトパスのシート。各プロジェクトの希望と妥協が書き込まれている。

15分しかありません。一方, 「あかつき」のような深宇宙探査機は地球から遠く離れるので, それぞれ異なるものの, 7~14時間あります。

運用調整では, 各衛星の可視時間帯と要求をもとに, 「いつ, どの衛星を, どのアンテナで, どのくらい運用するのか」を決めていきます。ただし, すんなり決まるのではなく, 調整には大きく分けて二つの制約があります。

- ①アンテナの故障・メンテナンス: そのアンテナは使用できないため, ほかのアンテナに割り振る必要があります。
- ②運用者アサインの調整: 運用するのは機械ではなくオペレータなどの「人」なので, 無理のない調整が必要になります。例えば, 22時から深夜2時まで運用する場合, 電車で通勤している人は運用が終わっても始発まで帰ることができません。また, 早朝5時から運用を開始する場合は, 終電で出勤して数時間待機してからやっと運用を始められることになります。そんな状態が毎日続くと, とても大変ですよ。

各衛星の可視時間と要求, アンテナのメンテナンス, 運用者アサイン, この三つに挟まれ, いつも頭を抱えながら調整しています。

運用調整が一番大変だったのは, 「あかつき」とIKAROSの同時打上げと「はやぶさ」の地球帰還が重なった, 2010年の5~6月でした。深宇宙探査機なので毎日, 大きな臼田の64mアンテナで運用したいと, 3機から要求がありました。「あかつき」とIKAROSは同時打上げのため可視時間はほぼ同じで, どちらか1機しか臼田のアンテナを使えません。「はやぶさ」からは, 重要運用のときは可視時間全部を使って運用したいとの話がありました。すべての要求を実現するのは不可能です。そのときは3機のメンバーが話し合い, それぞれ重要な運用日(IKAROSでは帆を広げるタイミングなど)を確認してみんなで妥協案を作成し, 何とか乗り切りました。

あれから5年……。今年12月には, 「あかつき」の金星周回軌道再投入と「はやぶさ2」の地球スイングバイが予定されています。うまく調整できるよう, コンタクトパスのシートとにらめっこの日々です。(はせがわ・あきこ)

想定外

太陽系科学研究系 助教 小林直樹



組み立て中のInSight ©NASA/JPL-Caltech/Lockheed Martin

InSight (インサイト) というミッションをご存知であろうか。Mars Pathfinderから始まるNASA Discovery Programの12番目として採用され、火星の本格的な内部構造を探るミッションである。安い・早い・うまいをモットーとしているDiscovery Programのため、日本が大震災に見舞われた翌年の2012年夏に採択され、2016年3月に打上げ、同9月から火星上で観測を始める。主な機器は火星の内部構造を探るための地球物理学観測機器で、広帯域地震計(仏・英)、熱流量計(独)、回転運動計測のための電波中継機(米)である。InSightの主力機器である広帯域地震計は、JAXAの月着陸探査機SELENE-2で検討していた広帯域月震計システムの長周期計として採用していたものをベースとしている。そのご縁から、筆者はパリ地球物理研究所(IPGP)で開発を進めている広帯域地震計のCo-I(共同研究者)としてInSightに参画することになった。2012年夏以降、このInSightのサイエンスチーム会議が年2回、主催国である米国と主要搭載機器を提供しているヨーロッパで交互に開催されている。6回目の会合が、5月11日から14日にかけてコロラド州Denver近くの山あいの街、Goldenで行われた。この短報はその参加記録である。

渡米直前にDenver付近の天候を調べると、朝方14℃、日中25℃を上回る気温であった。東京とそんなに変わらないと安心して出掛けた。が、Denver空港に降り立った瞬間目に入ってきたのは、地面を所々覆う白い物体。雪だ！予想外の寒さの中、乗り合いシャトルに乗って1時間ほどでホテルに着いた。予約時に調べたGoogleマップによればホテルは会場から1kmほどだったが、想定していた場所と違うことに気が付き、カウンターで尋ねてみた。なんと、そのホテルは会場から8km弱のところにあった。Googleマップが示していたのは高校とのこと。Googleマップに裏切られた！

想定外で始まった今回の出張だが、翌日からの会議はいつものごとくスケジュール遅延はあるものの粛々と進められた。初日にプロジェクト概況と主要機器の開発状況、以降、個別サイエンスの検討状況、今後の進め方などが議論された。最終日にはメディアトレーニングを半日かけて行った。

今回の会議の目玉は、Lockheed Martinの衛星組み立て現

場への見学ツアーである。現場は、会場があるGoldenから南南東に約30km離れたChatfield State Parkの外れに位置する。セキュリティのため事前に参加手続きが必要であった。会場からはレンタカーで移動した。入り口付近の駐車場に車を置き、ガイダンスの説明を聞き移動用のバスに乗り込んだ。1, 2分で衛星組み立て棟に到着。参加者は10名ほどのグループに分かれて、棟内に入っていった。廊下には火星探査機や衛星からの画像データが所狭しと飾ってある。

衛星を組み立てているクリーンルームには3階くらいの高さのテラスデッキがあり、そこから見学させていただいた。クリーンルームは巨大で、ちょっとした体育館くらいだろうか。その片隅でInSightの着陸機が組み立てられていた。お～！ほとんど組み上がっているではないか。その隣のスペースでは、一回り巨大な衛星が組み立てられていた。そう、「はやぶさ2」の良き競争相手であるOSIRIS-RExである。「はやぶさ2」より一回り大きい。InSightはPhoenixを継承した着陸機であるが、OSIRIS-RExはMAVENで開発されたバスシステムを利用している。どちらも惑星検疫が考慮されていなければならないが、巨大なクリーンルームにもかかわらず、きちんと配慮されているとのことであった。その後、運用中(MAVEN, JUNO, MRO, Spitzerなど)・運用予定の科学衛星の運用解析室などを見せてもらい、ロボットアームのEM/PM実験室と回り、最後にBanerdt氏がLockheed Martinの社員に向けてInSightの紹介講演を行い、一連のツアーを終えた。

帰りの車中でInSightのシステムマネージャから「はやぶさ2」の予算規模を聞かれた。突然のことに円ドル換算がすぐできず、「InSightの半分だ」と答えた。日本は衛星の規模、運用中の衛星の数、資金、どれを取ってもNASAの半分以下である厳しい現実を突き付けられた。そこで、人について、プロジェクトマネージャ養成などもシステムチェックに行っているのかと尋ねたら、NASAのJPL(ジェット推進研究所)でも機器レベルのPI(研究責任者)の経験を積んでプロマネに進んでいくという。現場主義的なところは宇宙研的であると感じた。厳しい道のりですが、日本の惑星科学の皆さん、頑張りましょう。(こばやし・なおき)

ISAS ニュース No.414 2015.9 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ニア 制作協力/有限会社フォトンクリエイト

● 編集後記 「『ISASニュース』をもっと国際化しよう」という目的で、BepiColombo日欧プロジェクトマネージャ対談を企画しました。私自身、このプロジェクトに熱担当として初期から関わっていますので、対談で語られていることを実感しています。後編もお楽しみに！(小川博之)

● *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

