

EQUULEUSは、地球一月系ラグランジュ点(地球と月の重力が釣り合う平衡点)のうちのL2点へ飛行し、L2点を周回する軌道から月の裏側と地球を観測します。超小型衛星の中でも、10×10×10cmを1U(Unit)と定義し、1U、2U、3U…のように規格化されたサイズで開発される衛星をCubeSatと呼びます。標準化された搭載機器開発が容易であることもあり、CubeSatの打上げ数が近年特に飛躍的に伸びてきていて、ついに深宇宙探査の世界にも乗り出そうとしています。

宇宙科学最前線

地球一月ラグランジュ点探査機EQUULEUSによる 深宇宙探査CubeSat実現への挑戦

東京大学大学院 工学系研究科 准教授
 (宇宙機応用工学研究所 客員准教授)

船瀬 龍 (ふなせりゅう)

はじめに

1990年代後半あたりに端を発する超小型衛星は、特にここ数年の宇宙ベンチャーの隆盛も相まって、爆発的に増えてきています。米国のユタ州立大学で毎年開催されている小型・超小型衛星に関する世界最大の国際会議「Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite」には、今年は政府機関も含む約800の組織・機関から約2,500名が参加し、約200社の企業がブースを出展しており、その活況ぶりが窺えます。

世界初のCubeSatは、筆者も開発に携わった2003年の東京大学・東京工業大学らによる1U CubeSatの打上げでした^{※1}。そのエポックメイキングな成功から16年後の2019年に、13機のCubeSatが、地球周回軌道を飛び出し、深宇宙探査に乗り出そうとしています。本稿では、そのうちの1機であるエクレウス(EQUULEUS: EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft)という地球一月ラグランジュ点探査ミッションの概要と、それを通じたCubeSatによる深宇宙探査ミッション実現への筆者らの取組みの一端を紹介します。

千載一遇の打上げチャンス

NASAが開発している次世代ロケットSLS(Space Launch System)は、将来的には小惑星や火星への有人飛行への利用が検討されている大型ロケットです。SLSの初号機は月フライバイ軌道へ有人宇宙船の試験機を打ち上げる予定ですが、月以遠に飛行する貴重な深宇宙打上げ機会の余剰重量を有効活用するため、13機の6U CubeSat(約10×20×30cm)が相乗りで打ち上げられることになりました。NASAのJPL、Marshall、Ames、Goddardの各フィールドセンターや米国内の大学・企業等が威信をかけて小惑星フライバイや月の極域探査などの野心的なミッションを提案する中、「将来の有人宇宙探査に貢献するミッションであること」を前提に、相乗りスロットがJAXAを含む国際パートナーにも割り当てられることになりました。JAXAからは、EQUULEUSと、おもてなし(OMOTENASHI: Outstanding MOon exploration TEchnologies demonstrated by NAno Semi-Hard Impactor)の2機のCubeSatが相乗りスロットを獲得しました。

※1 同じ2003年の打上げ機会に1U CubeSatが5機、3U CubeSatが1機打ち上げられましたが、軌道上で作動したのは東大・東工大それぞれの1U CubeSatとStanford大学の3U CubeSatのみでした。東大のCubeSat「X-IV」(サイ・フォー)は、打上げから14年経過した現在も軌道上で作動を続けており、CubeSatの軌道上寿命の世界記録を更新し続けています。

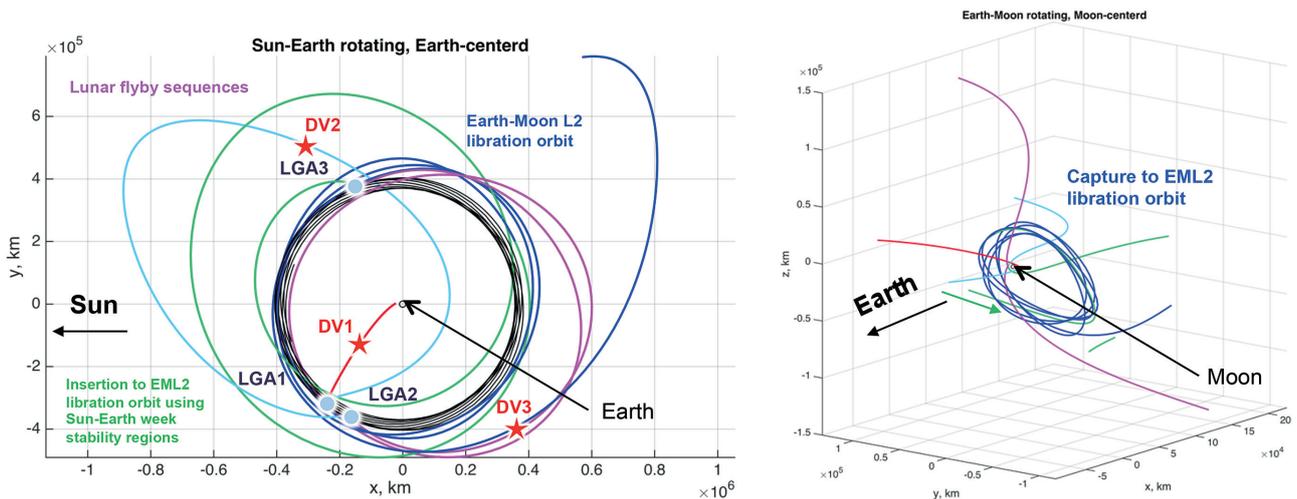


図1 EQUULEUSの軌道設計例

東京大学は、JAXA と共同で開発した PROCYON (「はやぶさ2」に相乗り) により世界で初めて 50kg 級の超小型深宇宙探査機バス技術の実証に成功しました。PROCYON よりもさらに小さな深宇宙探査機の実現を目指す EQUULEUS は、再び JAXA と東京大学の共同開発体制で開発することとなり、2016 年にプロジェクトがスタートしました。

工学ミッション：太陽—地球—月圏での軌道操作技術の実証

EQUULEUS の主ミッションは、太陽—地球—月圏における軌道制御技術の実証です。太陽や月の重力を利用することにより、リソース制約の厳しい CubeSat でも実現可能な軌道変換能力で地球—月系のラグランジュ点 (地球から見て月の裏側の L2 点。以下、EML2) へ効率的に航行することを目指しています。EQUULEUS は、図 1 に示すような軌道で EML2 周りの周期軌道へ航行する計画です。ロケットから分離され月フライバイ軌道へ投入されたあと、小さな速度変化 (低 ΔV) により約 1 週間後の月フライバイ時の近月点 (月の中心からの距離が最も近い点) を調整し、フライバイ後に月に再会できる軌道へ遷移します。その後、約 6 カ月をかけ、複数回の月スイングバイ (月の重力を使った軌道変更) を経由して EML2 周りの周期軌道へ到達して後述する各種科学観測を実施する計画です。

軌道決定誤差等の様々な誤差要因を考慮しても、一般的な月・深宇宙ミッションと比較して極めて小さい 70m/s 程度の ΔV 能力でミッションが成立しています。約 6 カ月という長い飛行時間が必要になるかわりに、月スイングバイを複数回実施することにより探査機自身の推進能力を節約することが可能なのです。

このような月スイングバイを活用した低 ΔV 航行技術の獲得は、超小型衛星が効率的に太陽—地球—月圏を航行するためには当然必要不可欠ではありますが、その意義は超小型衛星にとどまりません。将来の月やそのラグランジュ点近傍に設置されることが期待されている深宇宙港へのアクセスをより効率的にする (例えば、貨物輸送機の貨物重量を増やすことができる) 点でも、大きな意義があると考えられます。

3つの科学観測ミッション

EQUULEUS は 3つの科学観測ミッションを実施する計画です。1つめは、地球の磁気圏プラズマの全体像を地球から離れた距離から極端紫外光で撮像するミッションで、PHOENIX (Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet) という観測機器で観測します。このミッションは、JAXA の小型科学衛星「あらせ」(2016 年打上げ) や NASA の Van Allen Probe 等の実施するジオスペースの「その場観測」ミッションを補完するもので、ジオスペースの理解、すなわち、将来の有人月圏探査にとって重要な、地球周辺の放射線環境の理解を深めることにつながると考えられます。

2つめの科学観測ミッションは、月の裏面における月面衝突閃光の観測です。高速で月面に衝突する小隕石の発する一瞬の光を高速カメラで検知することによって、月面に降ってくる小隕石のサイズや頻度を評価でき、将来の月面上の有人活動やインフラに対する脅威を評価します。このミッションは、DELPHINUS (DEtection camera for Lunar impact PHenomena IN 6U Spacecraft) という観測機器で行います。

シス・ルナ空間 (地球から月軌道周辺までの空間) におけるダスト環境の評価が、3つめの科学観測ミッションです。DELPHINUS による 1 m ~ 10 cm オーダーの固体物質分布の観測と合わせて、地球・月の重力圏に一時的に捕獲される固体物質の起源、性質、総量を俯瞰的に理解できるようになることが期待されます。通常、宇宙空間に低い空間密度で存在するダストを効率的に検知するには、大きな観測面積が必要になりますが、超小型衛星ではそのような大きな専用のダスト検知センサの搭載は困難です。そこで EQUULEUS では、熱制御用に宇宙機に搭載する多層断熱材 (MLI: Multi-Layer Insulation) の層間に、薄膜状のダスト検知センサ (フィルム) を埋め込むことにより、サイズが小さいという超小型衛星の持つ本質的な課題を解消しています。MLI が衛星の衣服のようにも見えることにちなんで、科学観測機器と衛星バス機器を統合したこの「ダスト計測器」を CLOTH (Cis-Lunar Object detector within THERmal insulation) と命名しています。

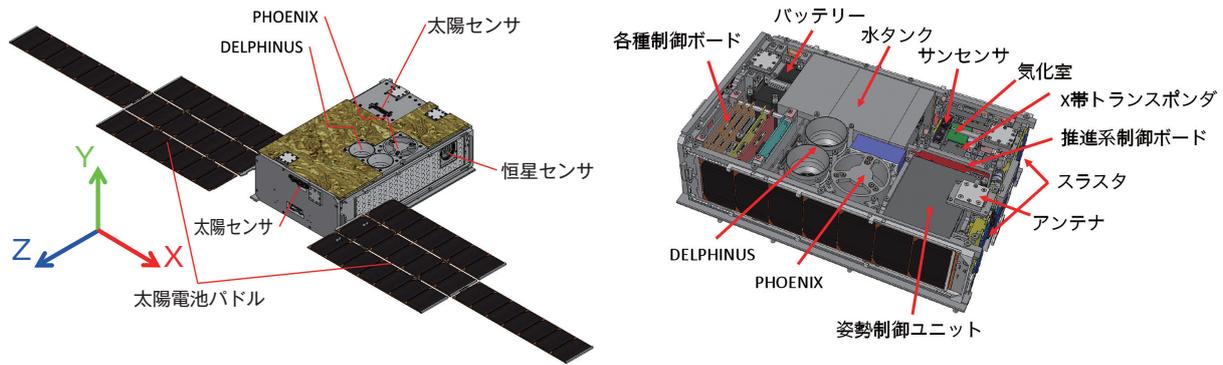


図2 EQUULEUSの外観図と内部機器配置図

ミッション選定のココロ

この3つの科学観測ミッションの選定の裏には、実は周到な考えがあります。PHOENIXは、仮に打上げ直後の最初の軌道制御運用に失敗して、月フライバイ軌道からそのまま深宇宙へ脱出してしまっても、ある程度の期間は観測でき、最小限の成果を得ることができます。次に、最初の月スイングバイ制御がうまくいったとして、EML2へ向かうその後の複雑な軌道操作運用が首尾よく運ばなかったとしても、地球一月圏近傍に探査機が留まることはできるので、PHOENIXだけでなくCLOTHの観測成果も十分に出すことができます。DELPHINUSも、EML2から常時月面を観測することで真価を発揮しますが、そうでなくとも部分的には観測可能期間を確保できます。CubeSatという極めてリソースの厳しい宇宙機でラグランジュ点に飛行するという、困難ですが成功すれば(「はやぶさ」流の加点方式で言うと)何百点満点をあげられるような工学ミッションを主軸に据えつつ、プロジェクト全体としての成果がall or nothingにならないよう、航行途中も成果を上げられるような科学観測ミッションを可能な限り搭載しているのです。このように、精一杯の背伸びをしながら、同時に、不慮の事故でミッションが全損にならないよう着実な成果を確保することが、挑戦的なプロジェクトをうまく回す肝なのだろうと筆者は考えています。

開発の現状：超高密度な探査機設計

2017年9月現在、EQUULEUSは、2019年に予定されている打上げに向けて、順調に開発を進めています。現在は、探査機全体のEM(Engineering Model:実際に打ち上げる探査機を作る前に製作し、試験に供することで設計の妥当性を確認するためのモデル)の組み上げと環境試験を完了し、試験結果を踏まえてFM(Flight Model:実際に宇宙に打ち上げるモデル)の設計を進めているところです。

探査機の外観図と内部機器配置を図2に示します。内部機器配置図で多くの面積(体積)を占めているのが推進系です。EQUULEUSでは、水を推進剤としたレジストジェット推進系AQUARIUS(AQUA ResIstojet propUlsion System)を、軌道制御と姿勢制御(角運動量管理)用に新たに開発しています。水を推進剤としている理由は、推進剤として極めて安全で、取り扱いが容易であるからですが、一方で、水をレジストジェットに用いるにあたっては、液体の水を気化させるために必要

な熱量が大きいことが課題となります。EQUULEUSでは、CubeSatの限られた電力リソース制約(それでも通常のCubeSatよりはるかに大きい50Wの発電能力がありますが)の中でシステムを成立させるため、常時大きな発熱のある通信機器を水の気化室周辺に配置し熱結合させることにより、気化熱に割くヒータ電力を最小限に抑え、電力収支を成立させています。

その他のコンポーネントは、COTS品(汎用的に手に入る民生用の市販の既製品)を調達するか、過去の衛星ミッション(「ひさき」、IKAROS、PROCYONなど)の搭載機器の設計をベースに開発しています。姿勢制御装置と太陽電池パドルは、CubeSat用のCOTS品を調達しています。太陽電池パドルは、探査機のX軸周りにパドルを回転させる1軸のジンバルも兼ね備えています。軌道運動に伴って探査機と太陽・地球・月の位置関係が日々変化する中で、パドルを太陽になるべく正対させて十分な電力を得ながら、探査機本体の姿勢を観測対象である地球or月にポイントングすることを可能にしています。姿勢制御装置は、0.7Uの体積の中に計算機、慣性基準装置、恒星センサ、リアクションホイール(3台)を内蔵するという、超高密度実装がなされた優れものです。2003年当時はずいぶん地球低軌道で最低限の生存機能と極めて限定的な観測機器しか搭載できなかったCubeSatですが、このような小型で高機能なコンポーネントがCubeSat向けに次々と現れてきているのがここ数年の超小型衛星業界の世界的な状況で、CubeSatは本格的な宇宙科学・探査ミッションを実現するためのツールになろうとしているのです。

さいごに：超小型衛星による深宇宙探査の将来

2014年に東京大学とJAXAが共同開発し打ち上げた超小型探査機「PROCYON」は、世界で初めて50kg級という非常に小さい規模で、深宇宙からの通信や軌道変換機能を持った深宇宙探査機を実現しました。PROCYONの実現と前後して、世界では、さらに小さいCubeSat級の深宇宙探査機の研究開発が活発に行われ始めていて、SLS相乗り等の具体的な開発・打上げ計画が多数進行中です*2。日本としてもPROCYONで得た優位性を活かし、激化する探査機の超小型化競争の最前線にEQUULEUSを通じて“参戦”しているところです。超小型衛星による本格的な深宇宙探査ミッションを可能にすることで、深宇宙を多数の超小型探査機が航行するような世界を実現し、宇宙科学・探査の高頻度な成果創出に貢献していきたいと考えています。

*2 その他に、いくつかの深宇宙探査CubeSatが計画・開発されています。NASAの火星探査機InSightミッションに相乗りする2機の6U CubeSat「MarCO」は2018年の打上げを予定しており、無事に打ち上げられればMarCOが世界初の深宇宙CubeSatとなる見込みです。なお、深宇宙からの通信能力や自ら軌道変換する能力をもって深宇宙を航行した衛星としては、(CubeSatではない)50kg級の「PROCYON」が今日現在、世界最小です。

「たんぽぽ」2年度試料が地球帰還、3年度試料は宇宙曝露中



2017年7月21日にExHAM-1号機へ「たんぽぽ」3年度試料を取り付けるフィッシャー飛行士（提供：JAXA/NASA）。

2007年に提案され、2015年から国際宇宙ステーション・「きぼう」曝露部で始まったアストロバイオロジー宇宙実験「たんぽぽ計画」では、宇宙塵やスペースデブリを捕らえる3ダースの捕集パネルと、極限環境微生物や有機物試料を宇宙空間に曝す3枚の曝露パネルを使った、最長4年間の運用が進行中です。

2017年秋の段階では、初年度試料は詳細分析の真っ最中、2年度試料は同年9月にドラゴン補給船12号機(SpX-12)の地球帰還カプセルにて回収されたばかりです。10月下旬からISASにてその初期分析を始めるべく、今夏に専用クリーンブースを先端宇宙科学実験棟に移設して、2年度試料受入れの準備が進んでいます。曝露パネルについても、10月中旬に各試料を全国の共同研究者へ配

分する予定です。さらに3年度試料は宇宙飛行士の支援を受けて(図)、同年7月から宇宙空間に曝露しています。

2016年9月から2017年7月までの10カ月で、2つの簡易宇宙曝露実験装置(ExHAM)から回収された合計11枚の初年度捕集パネルの初期分析を行い、約120個の超高速衝突痕を同定しました。捕集パネルのアルミニウム蓋上の微小クレーター内部の衝突残留物の元素組成に基づく予備判定では、宇宙塵：スペースデブリ：起源不明の比率はおよそ5：2：1であり、微粒子分布モデルと整合しています。科学優先順位の高い約3割の衝突痕試料はすでに摘出されて全国の共同研究者へ配分されており、宇宙塵中の有機物、地球エアロゾル中の微生物などを探る詳細分析が進められています。年内に各研究課題に関する初期科学成果を学術誌へ投稿する見込みです。また8月末のISAS特別公開では、「たんぽぽ」の地球帰還試料を初めて展示し、実際に宇宙から帰還した実験装置に触れたり、観察してもらうことができました。

このように、複数年度にまたがる運用・初期分析・科学成果の創出を、全国の研究室をつなぎ次世代の研究者を育てながら続けていくことで、日本のアストロバイオロジー研究コミュニティにおける宇宙科学の経験値を上げていくことも、「たんぽぽ計画」の重要なミッションなのです。(矢野 創)

平成29年度第一次気球実験

大気球実験は例年5月上旬から6月中旬までと8月中旬から9月上旬までの2シーズン実施されますが、今年度は予定する4実験全ての飛翔高度が30km以下であったため、その付近の高層風の状態が実験に適した6月上旬から8月中旬までの1シーズンの実施となりました。

計画4実験のうち2実験は6月上旬に実験準備が整い、放球チャンスを待つこと暫く、6月23日、24日の2日間、両実験に適した高層風が得られる予報となりました。しかし、ここ10年以上大気球を連日で放球したことはありません。2日続きの気球放球に向けて、実験手順の見直し、回収体制の調整、関係機関への事前連絡など慎重に準備を整えて、23日にB17-02「成層圏における微生物捕獲実験」、翌24日にB17-04「新型ロードテープ気球飛翔試験」を実施しました。「成層圏における微生物捕獲実験」は所期の気球飛翔を達成したものの



放球直前の大気球B17-04号機

の着水後に何らかの原因で試料採集部に海水が侵入し微生物の確認に至りませんでした。新型ロードテープ気球飛翔試験では新しい国産



最先端の研究を紹介する講演会(於：大樹高等学校)。

ロードテープが大気球の製造に有用なことを実証できました。

7月半ばに残り2実験の準備が整い、B17-01「気球VLBI実験」の放球準備を7月24日未明に始めましたが、

予期せぬ放球に適さない地上風の状態が放球直前から継続し、やむを得ず放球を中止しました。この実験は昨年度も実施を見送っており残念な結果となりました。またB17-03「皮膜に網をかぶせたスーパープレッシャー気球の性能評価」も気球飛翔に適さない高層風の状態が継続したため実施を見送ることとなりました。

実験期間中に、大気球実験グループの小財正義開発研究員による「宇宙天気」に関する講演会も大樹高等学校で行われました。大樹町とJAXAの連携協力協定に基づき町に滞在する若手研究者が高校生に最先端の研究を紹介する活動で、昨年からはまったものです。こうした活動も通じて大樹町での研究活動への理解をより浸透させていきたいと考えています。(吉田 哲也)

第9回 SELENE国際シンポジウム

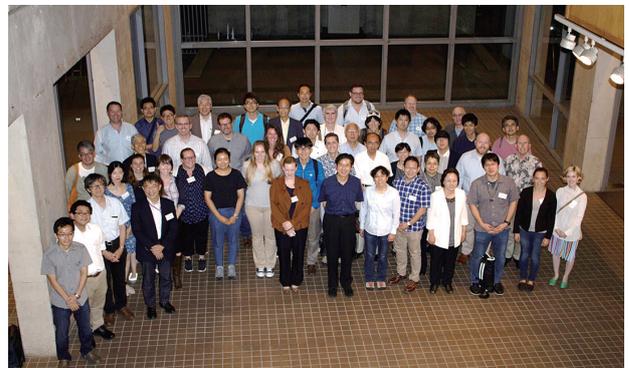


月に向かうSELENE(「かぐや」)を載せたH-IIAロケット13号機(筆者撮影)。

2007年9月13日は、月周回衛星SELENE(「かぐや」と命名)の打上げ予定日でしたが、台風接近に伴う悪天候のために一日の延期が決まりました。そして翌14日に、SELENEを載せたH-IIAロケット13号機は、種子島宇宙センターから無事に打ち上げられました。私は青空に吸い込まれていくロケットを見ながら、「月の起源と進化の謎が、どんな風に解き明かされていくのだろうか?」と心を躍らせたことを、はっきりと覚えています。

それからちょうど10年を経過した2017年9月13日~14日の2日間、第9回SELENE国際シンポジウム(SELENE Symposium 2017)が、早稲田大学の西早稲田キャンパスにて開催されました。第9回というのは、国際シンポジウムの前身のSELENEワーキングチーム国際会議からの通算ですが、今回は総勢100名のうち、海外から参加者が26名と過去最高になりました。

た。今回の参加者の特徴は、SELENEの機器開発に携わった人々を第一世代と呼ぶならば、「かぐや」の打上げ後に、学生として或いは若手研究者として月の研究に興味を抱いて「かぐや」の公開データに触れてみたという、まさに第二世代と呼べる若い研究者が多くを占めたことにあります。実は「かぐや」のデータを用いた論文数は、世界の月探査機と比べても高い伸び率を示しており、いずれアポロにも追いつくのではという勢いです。「かぐや」によって、月がジャイアントインパクトにより生まれ、地球からは見えない裏側から地殻が形成され、…などといった月の起源と進化史が一層明確になりつつある。そんな最先端の研究の現場にいる楽しさを味わえる、熱気を帯びた議論がなされました。そして「いよいよ、月に関する究極の教科書を書こう!」、そんな決意を新たに2日間のシンポジウムが終了しました。(岩田 隆浩)



SELENE国際シンポジウムの集合写真。

X線天文衛星代替機計画のミッション定義

X線天文衛星代替機計画は、国際的な協力のもとに達成されるはずだったASTRO-H(「ひとみ」)の科学成果を回復するミッションとして提案されました。

平成28年2月に打ち上げられたASTRO-Hは、打上げ約1カ月後の3月に通信異常が発生し、同年4月に運用を断念しました。短期間ではありましたが、ASTRO-Hに搭載されたミッション機器のひとつである「軟X線分光検出器」は要求を上回る超高分解能X線分光を達成していることが軌道上で実証され、ペルセウス座銀河団中心領域の観測データからは、超巨大ブラックホールによるガスの加熱という長年の課題を解く重要な手がかりが得られました(本研究成果は、2016年7月7日付英国科学誌『Nature』に掲載されました)。ASTRO-Hによって得られた初期観測結果はまた、天体の物理状態の理解にいたるためには、未だ高温プラズマからの重元素輝線の基礎物理の理解が不足していることをも明らかにしました。X線天文衛星代替機は、世界に開かれた汎用X線天文台として、さまざまな分野にわたる宇宙物理をさらに推し進め、2020年代の物理学の広範な発展の一翼を担うことが期待されています。

宇宙機計画を立ち上げるに際して、最初に実施する活

動が「ミッション定義」です。これはミッションの基本的な要求をとりまとめるプロセスであり、以降のシステムズエンジニアリングプロセスのベースラインとなるものです。システムの開発に際しては「誰のために、何のために、いつまでに、どのような製品・成果物を提供するのか」が明確である必要があります。時に相反する科学要求、政策要求、種々の制約等を調整し、合意の結果を「ミッション要求書」にまとめます。

X線天文衛星代替機計画では、2020年代の関連計画を踏まえて科学・政策的意義を再検討し、ASTRO-Hが目指した2つのサイエンスの柱である「超高分解能X線分光撮像」と「広帯域分光撮像」のうち、前者を最優先課題と位置づけました。このサイエンスを実現するために必要な4つの科学目標、5つのミッション要求を設定し、「ミッション要求審査」「プロジェクト準備審査」を経て「X線天文衛星代替機ミッション要求書」を制定しました。

今後は、ミッション要求を実現するシステムを定義する活動を開始します。ASTRO-Hの異常の直接要因並びに背後要因に対する対策を講じ、確実な開発を進めていきます。(前島 弘則)

「公募型小型計画」の公募開始

ISASは「公募型小型計画」の公募を9月11日に発出しました。これは宇宙基本計画行程表にある「公募型小型計画」の3号機又は4号機をめざすミッションの公募です。ミッションの主な要件は、イプシロンロケットを打上げ手段とし、日本が主体もしくは日本が重要な寄与をする科学衛星・探査機を用いたもので、JAXAが支出する総資金の上限が150億円、とこれまでの「公募型小型計画」の考え方を引き継いでいます。ただし、ASTRO-H衛星の喪失を受けてJAXA全体で取り組んでいる「プロジェクトに関する業務の改革」(ISASニュース2017年9月号の久保田氏の記事参照)、および2013年度の「公募型小型計画」1号機の公募以来のLessons learnedを踏まえて、プロジェクト化までのプロセスを見直しています。

2013年度以前は、ミッションがその大きな目標を達成するために獲得すべきものの定量的な定義(ミッション要求)と、ミッション要求を実現するために装置(システム)はどうあらなければならないか(システム要求)を同時に提案してもらい、審査後に2つの要求を確定することとしてきました。ミッションの複雑化と大型化により、両方を研究者のボトムアップで作るワーキンググループで検討することは難しくなってきたことから、2013年度改革ではミッション要求までを公募での審査対象とし、そこで選定された提案に対してISASが支援する検討(Phase A1)を行い、システム要求までを対象とする審査を行うことにしました。同時に、最初の審査では複数の候補を選定し、次の審査でプロジェクト化するものを一つ選ぶ、というdownselectionの考え方も導入しました。今回の「プロジェクトに関する業務の改革」は、より確度の高いところまで検討を進めた上でプロジェクト化することをめざして、ミッション要求を決定する以前のミッションコンセプト検討段階(Pre-phase A)の充実をうたっています。そのために、ミッションコンセプト検討段階の後半にJAXAが入った検討を実施すること、新たにCML(Concept Maturity Level)という指標を用いてコンセプト検討の充実度を計ること、の2つが導入されています。前者の考え方は、ISASが2013年度以来すすめてきたPhase A1の考え方をJAXAレベルで位置付けるものであると言えます。

これを受けて今回の公募ではプロジェクト化までのプロセスのさらなる改善をすすめています。その基本的な

考え方は「良いミッションコンセプト候補を選び、育てる」です。良いミッションコンセプトとは、該当分野の科学(理学および工学)の大目的を踏まえてミッションの意義価値が高いことが第一ですが、加えて予想される開発・プロジェクト実施リスクなどの様々なリスクおよび開発経費の大きさと、得られる成果の大きさの間でバランスがとれていることも必要です。JAXA全体の新しい考え方に合わせて、最初の審査をコンセプト検討段階の真ん中に移動しました。立上げプロセス改善のLessons learnedからは、立上げの途中に設けられる複数のゲートでそれぞれ何を満足しなければならないのかが明確でない、ということが重要課題として指摘されました。これをCMLという指標を使って明確化し、同時に、提案書もCMLに沿ってミッションコンセプト検討結果を報告してもらう形式に改めました。

CMLはNASA/JPLが約10年かけて作りあげた考え方です。しかしCMLの各レベルの定義文を見てもその価値はよくわかりません。JPLは22個の検討領域を定義し、その領域毎に各CMLレベルで満たすべき要件をCML matrixとして作り運用しています。そこにCMLの真価があると考えます。JAXAはJAXA自身のCMLを定義しました。ISASはそれをさらに進めてJPLのCML matrixを基に、これまでのミッション検討の経験を踏まえてJAXAおよび宇宙科学のやり方に合うCML checklistを作成しました。さらにJPLのCML matrixにはない試みとして、CML checklistの各項目の間の依存性を示し、コンセプト検討の初期段階で検討するとよい項目を、典型的な検討の時間順に並べ替えたリストも作成しました。具体的な内容を紹介します。たとえば科学目標という検討領域では、「該当分野の科学(理学および工学)の大目的の中における提案ミッションの意義を1つの文で記述すること」がCML1の要求であり、「提案ミッションで実施する実験・観測・分析などを、ミッションの科学目的との関係を明確にして記述すること」がミッション提案段階で要求されるCML3の項目の一つとなっています。CML checklistはコンセプト検討の助けになると考えていますが、まだISAS内の検討から生まれた初版であり、今後、実際の審査やコンセプト検討活動からのfeedbackを受けて、よりよいものにしてゆく必要があると考えています。

(満田 和久)

後川 昭雄 宇宙科学研究所名誉教授が従四位、瑞宝小綬章を受章

後川先生は、半導体電子工学、集積回路工学、宇宙電子部品工学、信頼性工学等の多岐にわたり、幅広い分野で研究業績を挙げられました。また、東京大学において開始された我が国の科学衛星計画に当初から参加し、太陽電池、集積回路素子、化学電池等の各種宇宙電子部品の研究、開発、環境試験を含む信頼性に関する工学的研究、

宇宙用電源の研究、耐放射線性LSIの研究等において指導的な役割を果たし、科学衛星計画の発展に大きな道筋を作られました。

本年8月5日にお亡くなりになったことは大変残念ですが、今後も宇宙科学の発展を見守ってくださることと思います。

「嵐の中に響くさえずり??」

●PWE担当 笠原 禎也

プラズマ波動・電場観測器 (PWE) は、電場・磁場の振動 (波) を測る観測器です。「あらせ」から伸展したワイヤプローブアンテナが電場を、マスト先端に取り付けられたサーチコイルが磁場を測定します。PWEは1つの観測器ながら、前述の電・磁場センサに加え、3つの受信器、それらを制御する2つのCPUという大規模な観測器です。さらに、観測中は常時取得する通常データと、衛星内にいったん蓄積し、選別したデータだけを地上に下ろすバーストデータの2種類があり、非常に煩雑な観測計画と運用手順を要します。もともとPWEは開発期間・予算の制約上、水星探査機MMOのプラズマ波動観測器 (PWI) の資産を極力踏襲した設計となる「はず」でした。が、科学者は常に欲張りです。観測機能を次々と積み上げ、新規要素を盛り込みました。あまた飛び交う磁気圏衛星に囲まれてもピカリと光る観測器たるべき、というチームの心意気の表れでしょう。

当初私は、MMO/PWI同様、機上ソフトの開発責任者という立場でした。機上ソフトは観測器の「魂」ともいえ、いかにハードウェアが素晴らしくても、ソフトの善し悪しが観測性能を大きく左右します。開発にあたり、波動データの解析で数々の成果を挙げているO. Santolik博士のもとに長期滞在し、多くの助言を頂いたことが大変助けとなりました。

2015年秋、それまでPIだった笠原 康正さんから、今後はお前がPIをやれ、と打診されました。最初、大変面食らいましたが、同年春に学生時代から26年つきあった「あけぼの」が運用終了し、その後を託された「あらせ」が打上げまで1年を残す中、意を決してお引き受けしました。機上ソフト担当として、それまでも機器全体の掌握は必須でしたが、チーム内の意見を集約し、あらゆる判断を迫られる重責を負い、その後はまさに怒濤の日々でした。

「あらせ」が「宇宙のさえずり=コーラス」を捉え、その神々しい音色を耳にした時、宇宙嵐がなぜこんな美しい波を起こすのか、謎の入り口にやっと立てたという思いと、それを解き明かすことが、我々を支えてくださったプロジェクトの皆様、メーカーの皆様への恩返しだと改めて意を強くしております。



「あらせ」初のコーラスをゲット！
PWE初期チェックアウト翌朝のデータ確認会。

(笠原から松田 昇也さんへ)

宇宙で活躍する観測器を自ら仕上げたい！ その意欲を胸にこの世界に飛び込んできた松田さん、実際にやってみていかがでしたか？

「観測器に『魂』を吹き込む」

●PWE機上ソフトウェア担当 松田 昇也

私がプラズマ波動・電場観測器 (PWE) の機上ソフトウェア開発に携わるようになったのは、2015年春のことです。最初は、非常にご多忙な笠原先生のお手伝い程度だったはずなのですが、一度首を突っ込むと抜け出せない性格が抑えきれず、気が付けば僅か2年ほどの間に随分と深いところまで来てしまいました。思い返せば幼き頃から電波に縁があったようで、アマチュア無線にはまった小学生の頃、自宅の庭に高さ25m程のアンテナを立ててご近所様に迷惑をかけた出来事は、PWEを完成させるという重要任務に生かされているのだと思います。

先に笠原先生が書かれているように、観測器にとって機上ソフトウェアとは、その性能・性格を決定づける、いわば魂のようなものです。例えば、ファミコンにゲームカセットを挿せば、その機械はどんなゲームにも早変わりするわけですが、ゲームの質を左右するのはカセットに書き込まれたソフトウェアです。衛星搭載観測器の機上ソフトウェアも同様で、ハードウェアの潜在能力を存分に引き出し、おもしろい観測を実現するための重要な役割を担っています。「あらせ」に搭載された科学観測器のなかでも、PWEは特に機上ソフトウェアに依存している機器の一つといってもよいでしょう。1秒間あたり数百万サンプルにも及ぶ膨大なデータを絶えず観測し続けるため、機上での圧縮処理やスペクトル解析によるデータ量の削減が必須課題になります。一方、ソフトウェアに依存している分、処理の高度化や高速化を柔軟に図れ、エンジニアの力量次第で無限の可能性を引き出せる点が大変魅力的です。となれば、極限まで挑戦してみたいのが技術者の性というものです。

性能向上を目指したために、幾度となく金沢と相模原を往復し、衛星試験棟にこもって寝ずの番をしましたが、宇宙で活躍する魅力的な観測器を完成させるためなら何の苦でもありませんでした。最近ではその日々が恋しく、次の衛星ミッションのお手伝いが出来る日々を心待ちにしています。「あらせ」が貴重な科学データに遭遇する日を心待ちにしながら、次の機上ソフトウェアの構想を練りつつある今日この頃、もうすっかり観測器開発の虜になってしまいました。

(松田から東尾 奈々さんへ)

お若くしてXEP開発を主担当された東尾さん、若さゆえの開発精神や心意気をお持ちだと思いますので、ぜひ教えてください。

《次号に続く》

X線天文衛星代替機とグリーンベルトの夕食事情

宇宙物理学研究系 特任教授
埼玉大学 理学部教授

田代信 (たしろ まこと)

旧盆にあたる8月15日から3日間、アメリカ・メリーランド州グリーンベルトにあるゴダード宇宙飛行センター (GSFC) を訪問した。昨年秋から携わるようになったX線天文衛星代替機 (XARM) 計画にかかわる打ち合わせが目的である。XARMは、GSFCとともに開発したX線天文衛星ASTRO-H (「ひとみ」) のリカバリーミッションである。コンセプトや組織から装置にいたるまでASTRO-Hの遺産を引き継いだプロジェクトであるが、今回はJAXA-NASAの宇宙機関同士のジョイントプロジェクトと位置付けられた点が異なる。より深まったNASAの関与を、ひとつのXARMチームとしてまとめ上げるべく、毎月の電話会議と相互訪問を繰り返しながら、役割・責任分担と開発の進め方を議論してきた。この1年で3度目の訪問だ。

最初は、ASTRO-Hを失った痛恨の思いを抱えながら始まった。10年におよぶ共同開発の歩みを振り返り、教訓を共有し、改善策を議論してきた。今回は、ここまで進めてきた、情報共有のしくみ、検証計画、衛星運用計画、科学成果を出すためのチームの構成、データ処理と配信方法といったコンセプトをおさらいしながら、具体的なスケジュールを含めた議論を行った。またこれらに加えて、豊富な経験をもつNASAの過去の事故の事例の紹介と分析、それを踏まえた改善について、なかなか聞くことの出来ない興味深い事例紹介もあった。

XARM全体の議論と前後して、今回は、GSFCと共同開発する搭載観測装置Resolveのチームミーティングもあったので、3日間の日程は、パラレルセッションを含めて非常にタイトだった。昼食も会議場でサンドイッチやピザを食べる30分ですませ、寸暇を惜しんでの会議だ。せめて夕食は、と思うところだが、首都郊外とはいえ都会を遠く離れたグリーンベルトでは、レストラン選びもむずかしい…と、思いこんでいたら、時代は変わり、GSFCからすこし車で走ったところに、おしゃれな「ラウンジ」ができたらしい。そこが2日目に予定された懇親会の会場と案内された。そこで、初日の夕食は、ホテルから歩けるメキシコ料理屋で手軽にすませて、翌日に期待することにした。

いざ「ラウンジ」に行くと、照明を落とした店内にソファが配され、ちょっとおしゃれに着飾った若者でいっぱい。DJが



昨年12月訪問時のスナップショット。日欧のロケット模型を前に、左から準備チーム長の前島 弘則氏、筆者、経営推進部の和田 恵一氏。休日にNASA-PIのリチャード・ケリー博士にスミソニアン航空宇宙博物館別館を案内していただいた。写真は博士自慢のNikonによるもの。

ヒップホップをかけている。おお。なんと都会的な！用意された個室には、長テーブルがおかれ、すでに食器と「本日のメニュー」がおかれている。みると、ケイジャン料理をアレンジした「ニューアメリカン」だそうで、期待が高まる。しかし、…うるさい。その部屋はDJブースの巨大なスピーカーの背後にあり、仕切りは薄く部屋自体がスピーカーの共鳴箱と化していた。会話をそのままならない。これは面白い経験だが、5分で十分だ。食事のあいだ中となると、閉口する。水曜日はライブの日で、一晩中この調子だということを確認したNASAのプロジェクトマネージャーは、ただちに、リーダーシップを発揮し、会場の変更を手配してくれた。もちろん、遠来の同僚である我々に配慮も忘れない。遠くに引きずり回すこともしない。急遽設定された新しい会場は、我々の宿の近くのメキシコ料理屋。つまり、昨日行ったところだ…。昨夜の手抜きがうらめしい。とはいえ、勝手知ったるレストランで、アットホームな雰囲気でのびのびと懇親に努めることができた。ちなみに彼らが以前、相模原に来たときのディナーは、淵野辺の居酒屋だったので、結果として、よいバランスだったのかもしれない。ともかく「懇親」という目的は十分に果たすことが出来た。

テーマは「東奔西走」なので、最後に「西走」の話も少しだけ。GSFCへの2度目と3度目の訪問の間、5月に、ESAの協力を取り付けるため、オランダ・ノルドバイクにあるESTECに伺い、ESAの宇宙物理ワーキンググループに説明する機会をいただいた。山田 亨国際調整主幹 (当時) と一緒に、ASTRO-Hの事故とその対策、XARMのコンセプトと立ち上げの経緯についての事情を報告するとともに、XARMへのASTRO-Hと同規模の支援・参加を呼びかけた。たまたま暑い日だったこともあり、汗だくのプレゼンテーションをしたあと、我々は室外で沙汰を待つこととなった。この微妙な緊張感は、ウン十年前の博士論文の審査会以来だろうか。結果は、良好。なんといってもASTRO-Hが短い観測期間に残してくれた、あの画期的なX線スペクトルが、このプロジェクトの価値を雄弁に語ってくれた。ワーキンググループの面々の期待にあふれる表情を見ながら、これを引き継ぎ、さらに将来へとつなぎたいとの思いを強くした。



ISASニュース No.439 2017年10月号

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/宇宙科学広報・普及主幹 生田 ちさと

編集責任者/ISAS ニュース編集委員長 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/>) でもご覧いただけます。

デザイン制作協力/株式会社アドマス

編集後記

CubeSatの記事は私もとても興味深くよませていただきました。いよいよ月惑星探査にも「手作りで超小型」の時代がやってきそうです。日本の得意な技術が活かせるので、発展を期待しています。(田中 智)

*本誌は再生紙 (古70%)、
植物油インキを使用しています。



古紙/パルプ配合率70%再生紙を使用

