技術 FL 2022 年度の成果

- 技術 FL チームリーダ 山田和彦
- 軽量薄膜太陽電池パドル 森 治
 - 超小型惑星 EDL 永田靖典
- 赤外線センサ(InGaAs)高性能化 片坐宏一

スターリング冷凍機の高信頼化・長寿命化及び駆動回路系による擾乱制御技術 山崎典子 精密協調制御の試験検証技術 伊藤琢博

宇宙研では、2020年度から「宇宙科学の技術フロントローディング(以下、技術 FL)」 という活動を開始している。技術 FL は、将来の先進的で魅力的な宇宙科学ミッションを創 出するための鍵となり、かつ、宇宙科学全体を見て波及効果が高いと思われる共通的な技術 に先行的かつ集中的に投資して、プロジェクトに直結するレベルまで技術を高め、直近のミ ッションの立ち上げに推進力を与えつつ、将来にむけた魅力的なミッションを創出する活 動を両輪とした活動を進めている。

2020 年度から開始された技術 FL 活動が、最初に力を入れたのは、日本が発祥である超 小型衛星技術の太陽系探査へ適用を促進し、今後の惑星探査の自由度や頻度を革新的に高 める超小型級の太陽系探査の実現にむけたキーコンポーネントの開発に取り組んだ。その 成果は、超小型探査機用の 1U サイズに統合された AOCS (姿勢制御系) ユニットと、MEMS ジャイロの技術を活用した MEMS-IRU(慣性基準装置)の EM 開発完了という形で実を結ん でいる。これらの成果は、すでに、いくつかの超小型探査機計画(長周期彗星探査計画(Comet Interceptor)や超小型外惑星探査計画(OPENS)など)の検討の中に取り込まれ、技術 FL の 本来の目的の一部を達成しつつある一方で、実際に他の探査機(月探査機 LUPEX) や低軌 道衛星(九工大 6U 衛星)への搭載が決まったこともあり、宇宙科学全体への波及効果も見 えてきている。

2022 年度で、3年目を迎えた技術 FL 活動は、活動当初から継続的に取り組んできた技術課題について具体的な成果がまとまりつつある一方で、FY2022 年度から始まった GDI における次期中型計画の議論と連動して、技術 FL で取り組むべき技術課題の選択と集中化を進めてきている。

本稿では、2022 年度の技術 FL の具体的な成果について、代表して下記の5つの課題について、各課題の担当者から、その成果や今後の展開などについて紹介してもらう。

1) 軽量薄膜太陽電池パドル(担当:森治)

IKAROS やOKEANOS で培ったスピン型ソーラー電力セイル技術をブーム型膜展開 構造物に応用することで世界最軽量の SAP(太陽電池パドル)を実現し、宇宙機に広 く適用することを目指しています。特に、外惑星領域探査や超小型/小型探査の可能性 を大きく広げることが期待できます。

- 2)超小型惑星 EDL (大気圏突入,空力減速,着陸)技術(担当:永田靖典)
 - 日本はこれまでに惑星着陸による直接探査が行えておらず、世界的に見てもその機 会は非常に少なく限られたものでしかありません。超小型着陸機が実現されれば、超小 型機による惑星探査の幅が大きく広がり、機会が増えることも期待できます。その実現 の鍵となる技術が、収納・展開可能なインフレータブル型エアロシェルです。形を変え ることができつつも、大気圏突入に耐えられる頑丈さと、軽量・大面積を兼ね備えたも のになっています。本活動を通してこれを実用レベルまで高めることを目指していま す。
- 3)赤外線センサ(InGaAs)高性能化(担当:片坐宏一) 天文観測衛星に用いる国産赤外線センサの宇宙仕様化へ向けた開発を行っている。
- 4) スターリング冷凍機の高信頼化・長寿命化及び駆動回路系による擾乱制御技術(担当: 山崎典子)

高感度観測を目指すなら原理的に冷やすべき。ということで、それってミッション機器?と言われつつも将来につながる技術を目指しています。

5)精密協調制御の試験検証技術(担当:伊藤琢博)

衛星フォーメーションフライト (FF) は、将来の天文・宇宙物理分野にブレークスル ーをもたらすと期待されています。その期待 (ゴール)と現在地のギャップを埋める最 初のステップとして、技術開発を加速させる「テストベッド」構築を本技術 FL で立ち 上げました。本テストベッドから独創的なミッションや技術が次々と羽ばたいていく 将来像を念頭におきつつ、若手主体で精力的に活動しております。

どういうミッションを考えているのか

太陽をエネルギー源とした従来よりも小型な探査機(およそ 200kg 以下)を用いて、木星 以遠の外惑星領域を探査するミッションを考えています。この宇宙機システムの利点とし ては、1)太陽電池をエネルギー源とした宇宙機の豊富な経験を活用できる、2)小型探査機 なのでイプシロンロケット級の小型ロケットで打ち上げられ、打上げ手段を増やせること があげられます。

そこで鍵となる技術は何か

太陽電池パドル(SAP)を軽量化する技術が鍵となります。木星以遠では、太陽との距離が 遠く、太陽光が地球近傍に比べて弱いです。そのため、SAP は必要な発電面積が大きくな り、軽量化を求められます。特に小型探査機の場合、軽量化の要求は一層厳しいものになり ます。私たちは、厚さ 0.1mm オーダーの膜展開構造物を用いた軽量薄膜太陽電池パドル(薄 膜 SAP)を研究開発しています。薄膜 SAP により、質量あたりの発生電力を世界最高性能 (200W/kg 以上)にすることを目指しています。

それについて、どういう開発計画であるのか

技術 FL での活動は完了しており、2020 年度から 2022 年度までの3 年間において、技術 成熟度(TRL)4,5 相当のエンジニアリングモデル(EM)を目指して、試作品を研究開発して きました。大まかには、想定する小型土星圏探査機 OPENS のミッション・システム検討に も加わりつつ、システムからくる薄膜 SAP への要求を調整しながら、1 年目は1 ㎡級薄膜 SAP、2 年目以降は9 ㎡級薄膜 SAP の試作・評価をしてきました。詳細には、構造様式の トレードオフ検討、薄膜太陽電池シートの薄化検討、膜上ハーネスルーティング・太陽電池 配置の検討、固有値解析、膜展開試験、ジンバル駆動試験、振動試験、太陽電池の健全性評 価(EL 検査)などを実施しました。

何が難しいのか

課題は様々ありますが、軽量化に伴い、下記が主に難しくなります。1) 膜展開構造に特 有ですが、確実に展開させるために打上げ前の地上実験・解析で検証すること、2) 膜上に 太陽電池を搭載した SAP としてインテグレーションし、各種環境試験をクリアすること

どういう成果を2022に得たのか

9 ㎡級薄膜 SAP の収納方法を改良し、筐体の構造設計・解析を行いました。膜の振動試 験の実施後に薄膜太陽電池が正常であることを確認しました。膜展開試験・ジンバル駆動試 験も行い、正常に機能を実現できることを確認しました。これらにより、薄膜 SAP による 軽量化の見通しが得られました。

今後はどういう展開なのか

技術 FL での成果を活かし、革新的衛星技術実証 4 号機ミッションコンポーネント

HELIOS-R、小型土星圏探査機 OPENS、深宇宙軌道間輸送機、次世代小天体サンプルリタ ーン探査機への適用を目指した研究開発を進めます。このほか、超小型・小型宇宙機にも広 く適用していく予定です。

また、太陽光発電と太陽光圧推進を兼ね備えた膜展開構造(ソーラー電力セイル)への応用 も視野に入れています。ソーラー電力セイルにイオンエンジンを組み合わせた小型探査機 ならば、イプシロンロケット打ち上げで外惑星領域(トロヤ群小惑星、ケンタウルス族小惑 星など)のランデブー探査ができると考えられ、検討を深めています。



ジンバル駆動試験



HELIOS (再チャレンジ)



OPENS

深宇宙OTV 次世代小天体SR親機



次世代小天体SR子機



超小型ソーラー電力セイル探査機

技術 FL:超小型惑星 EDL(大気圈突入,空力減速,着陸)技術

永田靖典

超小型惑星 EDL 技術では、10kg 程度の超小型探査機クラスでの惑星着陸機の実現を目 指している.これまでの火星探査では着陸機が 100kg 超の大型ミッションとなり、探査の 機会も探査する地点も非常に限られたものとなっている.これに対して、近年、超小型ク ラスの衛星技術が急激に進歩し、地球近傍だけでなく、惑星間空間(深宇宙空間)での利 用も始まっており、大型ミッションの先遣隊としての超小型機の利用が始まっている.超 小型クラスの惑星着陸機を実現することができれば、超小型機での惑星探査の可能性が大 きく広がる.機体が小型であるため、複数の着陸機で複数地点を探査することや、ピギー バック方式によって探査の機会を増やすことも可能となり、これにより新たな惑星探査ミ ッションの創出も期待される.また、先遣隊としての利用はこれまでと同様の惑星探査に おいても有効と考えられ、大型ミッションの意義・価値を高めるとともにリスクを下げる ことにつながる.

惑星着陸を達成するには、宇宙空間からの大気圏突入(Entry)、空力減速・緩降下 (Descent)、着陸(Landing)を達成する必要があり、これらは総称してEDLと呼ばれる. これまでの EDL 技術では、耐熱材料やパラシュートなどが使われており、複雑なシステム かつ多くのリソースを必要とするが、これを超小型クラスで実現することは難しく、技術 革新が必要である.超小型 EDL 技術において、「展開型のインフレータブル型エアロシェ ル」はブレークスルーとなりうる有力な技術と考えている.展開型エアロシェルは、コン パクトに収納された状態で打ち上げられ、大気圏突入前に軽量大面積のエアロシェルを展 開することで、効率良い空力減速と空力加熱の緩和を実現できる.これは大気密度の薄い 火星で特に有効であり、大気圏突入、空力減速の部分を達成できるため、これと最後の着 陸の技術を組み合わせることで EDL を達成できることになる.

インフレータブル型エアロシェルについては、これまでに観測ロケットなどの複数のフ ライト機会によりコンセプト実証が行われてきた.本活動では、このエアロシェル技術を 実用レベルまで向上させることを目指し、小型火星着陸機に適用可能なインフレータブル 型エアロシェルの技術を確立させ、その性能検証を行う.インフレータブル型エアロシェ ルは、インフレータブル構造を維持するために高い内圧に耐えられる気密性や、空力加熱 に対する耐熱性といった高い品質が必要となる.これを実現するための素材は特殊で、耐 熱繊維の織物やフィルムを組み合わせて製造されているが、寸法精度など製造上の再現性 がとりにくいため、容易に製造できるものではない.そのため、必要なサイズのものを実 際に製造していく中で、経験と知見を積み重ねて、製造技術として確立していく必要があ る.また、サイズが巨大であるため、製造したものの性能検証には、フライト実験により 実際の飛行環境下での検証が必要となる.

これまでに直径 1.2m インフレータブル型エアロシェルの製造技術を向上させ,2021 年 に観測ロケット実験によりその性能検証を行ってきた.2022 年度では,その製造手法をス ケールアップして,直径 2.5m インフレータブル型エアロシェルの製造を成功させた(図 1). 完成した直径 2.5m エアロシェルは,フライト実験に使用できるレベルであることを確認し ている.この性能検証に向けたフライト実験の準備も進めており(図 2),2023 年度に観測 ロケット実験による直径 2.5m エアロシェルの性能検証を行う予定である.

今後,高品質なインフレータブル型エアロシェルを安定的に製造できるように製造技術 を洗練させていくと同時に、製造手法のスケールアップによるさらなる大型化と、耐熱性 を向上させたエアロシェルの製造を目指していく.さらに、このエアロシェルを利用した 火星 EDL システムの検討も今後進めていく予定であり、その中でも着陸システムや各種搭 載機器といった EDL システムのおける重要技術については重点的に取り組んでいく.



図1:直径2.5m(左)と直径1.2m(右)のインフレータブル型エアロシェル



図2:直径2.5mインフレータブル型エアロシェルの性能検証のための実験機

赤外線センサ(InGaAs)高性能化

2023年4月3日

宇宙物理学研究系 片坐 宏一

赤外線を使って宇宙を見ると、可視光では見ることのできない多様な宇宙の姿を見ることが できます。例えば、宇宙空間に分布しているガスや塵に隠されて可視光では見えない天体を 詳しく観測するのに赤外線は適しています。しかし、特定の波長以外の赤外線の多くは地球 大気に吸収されて地上まで届かないため、宇宙に打ち上げた赤外線望遠鏡を用いて観測が 行われてきました。

赤外線観測の肝となるのは、赤外線に感度を持つセンサ(検出器)です。センサの性能の違いがミッションの価値を決定づけるとも言えます。ここで、近年のセンサ開発のトレンドとして、 受光素子と読み出し IC を金属バンプで接合したハイブリッド型センサ技術が必要不可欠になっています。特に赤外線 CMOS ハイブリッド型センサは、世界的に見ても米国1社に依存している状況にあります。また、既存の主要な赤外線センサの1つは水銀・カドミウム・テルル(HgCdTe)が用いられており、有害物質である水銀やカドミウムを含まない代替品が求められています。そこで、我が国が自主的に赤外線観測ミッションを行えるように、宇宙で使用できるセンサ技術を発展させることが必要です。これは、今後の多様な宇宙科学・探査ミッションの創出や、そのための開発リスク低減に資するものです。

私たちは、我が国の独自性の確保や国際的プレゼンスの向上のために、インジウム・ガリウム・と素(InGaAs)を用いた赤外線受光素子とCMOSハイブリッド型センサの宇宙仕様化へ向けた開発を行っています。すでに、国立天文台と国内半導体メーカが共同で、地上望遠鏡への搭載を目的とした InGaAs を用いた低ノイズ・高感度の赤外線 CMOS ハイブリッド型センサの開発に成功しています。このセンサは、国内の口径 1m クラスの大学所有の地上望遠鏡への搭載実績があり、将来的にはさらに大口径の地上望遠鏡で用いることも検討されています。

InGaAs センサは、インジウム・リン(InP)基板の上に、半導体製造の薄膜結晶成長技術を用いて InGaAs の結晶を成長させることで製造されます。InP 基板は、赤外線は透過するものの、 放射線が当たると基板中で蛍光発光が起こります。宇宙空間で運用する人工衛星はたくさん の宇宙放射線の影響を受けますが、宇宙からの微弱な光を捉えることを目的とした宇宙用セ ンサとしては、この放射線による InP 基板の蛍光発光は、観測にとって重大なノイズになります。 そこで、InGaAs を結晶成長させた後の InP 基板を除去して、その上で受光効率を上げるため に表面に反射防止コートを施すことにしました。また、読み出し IC についても、耐放射線性の 強化や低ノイズ化による性能向上を目的として、新規に回路設計を行いました。

2021 年度は InP 基板除去および反射防止コートの技術実証を目的として、128×128 ピクセルの小規模センサの試作を行い、2022 年度にかけて冷却性能評価試験を実施してきました。 センサの受光効率は想定通りの性能を示しており、また InP 基板除去によって蛍光発光を抑

8

えられていることも確認できました。2022 年度は、約 2000×2000 ピクセルの大規模センサの 試作を行い、2023 年 3 月末に試作品が納入されています。2023 年度はこの大規模センサの 性能評価を進めるとともに、放射線照射試験や機械環境試験を実施して、人工衛星に搭載す るセンサとしての総合評価を行います。また、複数個の試作を重ねることで、製造性の確認も 行います。これらの試作結果から、2023 年度末には EM(エンジニアリングモデル)相当品の完 成を目指します。これは、天文観測用低ノイズ InGaAs センサとしては画素数が世界最大のも のになる予定です。このセンサは、天文観測だけでなく、惑星探査、気象衛星・地球観測衛星 などへの適用も期待されますが、直近では赤外線位置天文観測衛星 JASMINE への搭載を見 込んでいます。



図1: 冷却評価試験を実施した 128×128 ピクセルの 小規模 InGaAs センサ。



図 2: 約 2000×2000 ピクセルの大規模 InGaAs センサ(CMOS 読み出し IC 部分)。

技術 FL「スターリング冷凍機の高信頼化・長寿命化及び駆動回路系による擾乱制御技術 」

山崎典子

2020 年度から、技術 FL の柱の 1 つである宇宙での冷却技術開発の一部としてスターリング冷凍機の 冷凍機の高信頼化・長寿命化及び駆動回路系による擾乱制御技術を進めている。

電波から赤外線、可視光、X 線にいたる様々な波長で、センサ内部や望遠鏡を冷却することは高感度天 体観測にかかせない技術となっている。熱雑音は、ホワイトノイズなので信号処理などでの逃げ手がな く、冷すことが本質的である。冷却センサは昔から赤外線では使われてきたが、X 線領域でも「ひとみ」、 XRISM でマイクロカロリメータの利用が始まる。さらに現在計画中の LiteBIRD をはじめ、今後の日本 あるいは世界の天文衛星では冷却技術は不可欠であろう。

スターリング冷凍機というのは、19 世紀から使われている熱機関スターリングエンジンの逆回転で、 力学運動で気体を圧縮、熱交換させることで熱を奪い冷却するヒートポンプの一種で、特に2段サイクル にすることで、およそ100K、20Kの温度を得ることのできる冷凍機として宇宙研では「あかり」「ひとみ」 で用いられてきた。直接 20K でセンサを駆動したわけではなく、液体ヘリウム冷媒やジュールトムソン 冷凍機という周辺を冷却し冷媒寿命を延ばす役割などを担ってきた。しかし、冷媒でミッション寿命を 制限されてはつまらない。冷凍機だけでより長い時間運転できることが望ましい。また、「ひとみ」では 冷凍機による振動がセンサのノイズとなり、取り付け部にダンパを入れるなどの工夫が必要であった。 このように、スターリング冷凍機には、より長寿命化・高信頼・低擾乱化などの改善の必要がある。

ここでポイントとなるのが、冷却のためにガスを圧縮するピストンの動作である。宇宙用 2 段スター リング冷凍機では、ボイスコイルモータを対抗型にして、ピストンを 15-20Hz で 20mm 程度動かしてい る。ピストンがシリンダに当たって擦れると振動が大きくなり、また摩耗するので長期運転はできない。 隙間が大きすぎると、ガスが抜けて圧縮ができない。試行錯誤の結果 20um 程度を維持して動かせばよ いことが分かった。つまりピストンを動かす際の軸の傾きを 1000 分の 1 以下に保つことが必要である。 以前用いていたボールベアリングはガシャガシャとした擾乱も大きく、板バネで前後を押さえることと した。10 年間では 100 億回近く動くバネの材質、形状から設計を行なった。ここまでの工夫で冷凍機の 運転音ははっきりと小さくなった。さらに加速度計などで擾乱を測定し、駆動回路にフィードバック機 構を組み込むことでの低擾乱化を図っている。衛星への機械的擾乱源としては姿勢制御用のリアクショ ンホイールもよく問題となるが、この制御に取り組んだ研開本部の知見も借り、ロジックの開発を行な った。

2022 年度には、新板バネ方式のスターリング冷凍機、制御回路の試作を行なった。冷凍機の方は、入力 電力あたりの気体圧縮効率が少し悪く、モータの改良を今後試みる。ピストン駆動そのものには問題が 無さそうなので、制御回路との組み合わせ試験など順次進めていく予定である。

このスターリング冷凍機システムは、耐環境性なども含め宇宙機に対応可能なように設計され、まず は LiteBIRD での実用を目指している。今後はさらに冷却温度を下げる、あるいは冷却能力(現在は 1W @100K, 200mW@20K)の向上により、より大きな望遠鏡を冷却する、10K 程度のセンサをスターリング 冷凍機だけで冷却する、あるいは数 K~数 10mK のセンサを効率よく冷却できるシステムに適用する、な ど様々な応用が考えられる。宇宙での冷却技術は、スターリング冷凍機だけでなく、他の種類の冷凍機、 断熱材/伝導材、設計と検証方法など様々な技術の組み合わせが必要である。宇宙科学探査交流棟に展示

(宇宙から帰ってきた実機)されている SFU/IRTS に始まり「あかり」「ひとみ」そして XRISM と積み 重ねてきた、日本の宇宙冷却技術を磨き、今後も国内外で最高感度観測を作り出していきたい。

10







組立完了した板バネ式スターリング	擾舌	乱制御機能を組み込んた	2
冷凍機用新型コンプレッサ		スターリング冷凍機ドライバ	
機体	(評	価用 B路線能力	電力
従来型(リニアボールベアリング使用)) 240mW@20K	90W
本研究(改良開発した支持構造)		240mW@20K	110W

精密協調制御の試験検証技術

伊藤琢博、岩城拓弥、横田健太朗、長野晃士、和泉究

どういうミッションを考えているのか

フォーメーションフライト(Formation Flight: FF)は、複数宇宙機が巨大な一つの観測システム として動作することを可能にする画期的な技術です。特に、制御精度が相対位置 1 µm を下回る 「超精密 FF 技術」を獲得することで、衛星間位置を 100-1000 km 離した重力波望遠鏡 (DECIGO/B-DECIGO)や、100-1000 m 離した赤外線干渉計などの巨大システムを宇宙空間に 構築できるようになり、天文・宇宙物理分野にブレークスルーをもたらすと期待されています。 最近では、日本が主導する超精密 FF 実証機 SILVIA の概念検討が進んでいます。

そこで鍵となる技術は何か

超精密 FF 技術は、相手衛星の位置や方位を計測する「精密センサ」、衛星や衛星内の理学機器を 動かす「精密アクチュエータ」、衛星・理学機器間を統合動作させる「精密協調制御」などに分類 できます。このうち、精密センサ/アクチュエータ技術は「要素技術」であり、地上/宇宙の望遠鏡 開発などを通して技術蓄積が進んでいます。一方、精密協調制御は要素技術やハードウェア/ソフ トウェアを統合した「システム技術」と言えます。超精密 FF 技術のボトルネックはシステム技術 として未成熟な点にあると本チームは考え、これを打破することが鍵と考えました。

精密協調制御の成熟のためには技術を徹底的に使い、信頼性を高めることが必要です。しかし、 宇宙ミッション機会は極めて限定的なので(時間もコストもかかる)、この機会だけに頼っていて は技術が枯れず、成熟化も進みにくいという課題がありました。そこで、宇宙空間での衛星運動 や衛星の計算機環境を模擬可能な「テストベッド」を地上に構築して、テストベッドを活用した 地上での試験検証により成熟を加速させるアイディアを構想しました。

どういう開発計画であるのか、何が難しいのか、どういう成果を 2022 に得たのか

精密協調制御用テストベッドを構築するためには、宇宙空間の衛星運動を超精密に模擬するモー ション装置系を構築すること、µm 級以下の精密協調制御を試験・検証するために十分な擾乱抑制 対策(地面振動の抑制等)を行うことがポイントです。2022 年度はテストベッドの鍵となるモー ション装置を実時間で動作させ、レーザ干渉計(理学機器を模擬)と超精密 FF アルゴリズムのプ ロトタイプを用いた µm 級制御実験を行い、テストベッド構想の概念実証に成功しました。今後、 擾乱抑制対策の設計検討と平行しつつモーション装置を増築し、2025 年度までにテストベッドを 完成させる予定です。

今後はどういう展開なのか

2025 年度の完成以降、本テストベッドを SILVIA、重力波望遠鏡、赤外線干渉計等のプロトタイ プ開発やフライトモデル試験の現場に投入する予定です。また、大学研究者を中心に、共同利用 設備として本テストベッドを活用できるよう整備する予定です。全国から理工学研究者・技術者 が本テストベッドに集い、自ら考案した機器/アルゴリズムを持ち込んで試験・検証し、独創的な ミッションや技術が次々と羽ばたいていく…そんな将来像を念頭において、本テストベッド開発 に取り組んでいく所存です。



図1 フォーメーションフライトに関する技術開発ロードマップ.赤字が本技術 FL 対象.



図2 テストベッド構想の概念実証の様子(動画). 左下が精密ステージ,その上部にはレーザ が搭載. 右側台に設置してある光センサにレーザ光が入射するように粗探索を行っている様子.