

超小型衛星「ひろがり」、ついにミッションを達成！ ～「ひろがり」運用報告～

大阪府立大学（学長：辰巳砂 昌弘）小型宇宙機システム研究センター（略称：SSSRC、センター長：小木曾 望）と室蘭工業大学（学長：空閑 良壽）航空宇宙機システム研究センター（略称：APReC、センター長：内海 政春）は、新規展開構造物の軌道上計測システムの実証、及びアマチュア無線帯（VHF）での高速通信技術の実証を目指し、超小型衛星「ひろがり」を共同開発しました。「ひろがり」は2021年2月14日にアメリカのNASA ワロップス飛行施設より打ち上げられた後、同年3月14日に国際宇宙ステーション（ISS）から放出され、現在も運用を継続しています。



運用中の「ひろがり」（イメージ）

<超小型衛星「ひろがり」のミッションと成果>

ミッション1：ミウラ折り板構造の展開・形状計測 ～将来の大面積構造を「ひろげる」～

近年、人工衛星はより高度なミッションを行うために、太陽電池パネルなど輸送制約において高い収納性が求められる大面積構造物搭載の必要性が増加しています。これを実現するためには、厳しい宇宙環境下で大面積構造物が形状精度要求を満たしているかどうかを軌道上で計測する必要があります。「ひろがり」では、折り紙工学におけるミウラ折りを発展させ、厚みを考慮した二次元展開板構造物を隙間なく収納し、宇宙空間で平面展開します。また、二次元格子を利用した光学的な表面形状計測システムを搭載し、その有用性を軌道上実証します。宇宙空間でのミウラ折り構造物の応用例は過去にもありましたが、板厚を考慮できた折り紙工学の視点では世界初の実証です。

【成果1】ミウラ折りを発展させた二次元展開板構造物の展開と実証

「ひろがり」に展開コマンドを複数回にわたり送信した結果、2021年4月4日に初めて二次元展開板構造物（以下、パネル）の展開を確認しました（図1）。また、その後数十回にわたる撮影画像の時系列比較で、パドルやタケノコバネ、パネルが徐々に展開・伸展していることを確認しました。ここでは、パネルの外縁が拡大し、本来の展開状態に近づいていること、宇宙環境によるヒンジテープやパネル材の劣化は見られないことの2点を確認しました。

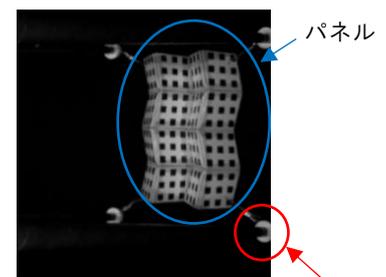
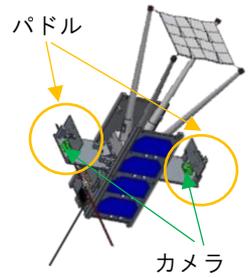


図1 展開板構造物 タケノコバネ
(2021/04/04 撮影)

【成果 2】 二次元格子を利用した光学的な表面形状計測システムの実証

パネルの軌道上展開を、「ひろがり」の機体に設置した 2 台のカメラで撮影した画像にて確認した後、光学的形状計測手法である格子投影法の原理を応用した手法により画像解析を行いました。解析では、全体を撮影した画像を圧縮して 1 度で送信する「全体撮影モード」と、撮影領域を 5 分割して高い解像度を維持したまま複数枚に分けて送信する「5 領域分割撮影モード」の 2 種類を用い、それらの計測結果を比較し、軌道上運用における本形状測定法の実用性を評価しました。



2 種類の撮影モードを用いてダウンリンクした画像（図 2、図 3）を用いて、表面形状の計測を行いました（図 4、図 5）。図 4、図 5 における解析結果はそれぞれ図 2、図 3 のパネルを正面から見たもの、右側側面から見たものです。片側のパドルが完全には展開されなかったため片方のカメラの画像にはパネルの一部が映っていませんでした。そのため、パネル全体の表面形状の計測は出来ませんでした。そのため、パネル全体の表面形状の計測は出来ませんが、図 4、図 5 着色部分（右から 1 列目のパネルと推定）の形状を計測することができ、両方の画像においてパネルの折り目を確認できました。また、図 4 と図 5 の側面図を比較すると「5 領域分割撮影モード」（図 4）の方が形状のバラつきが少なく折り目を鮮明に捉えています。以上の結果から、パネルの表面形状の計測では、高解像度を維持できる「5 領域分割撮影モード」で撮影した画像を用いることが有効であることがわかりました。

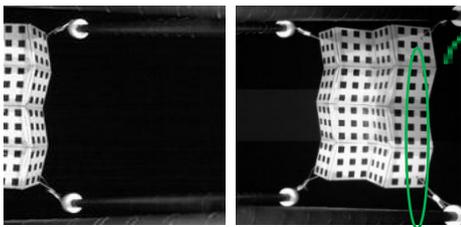
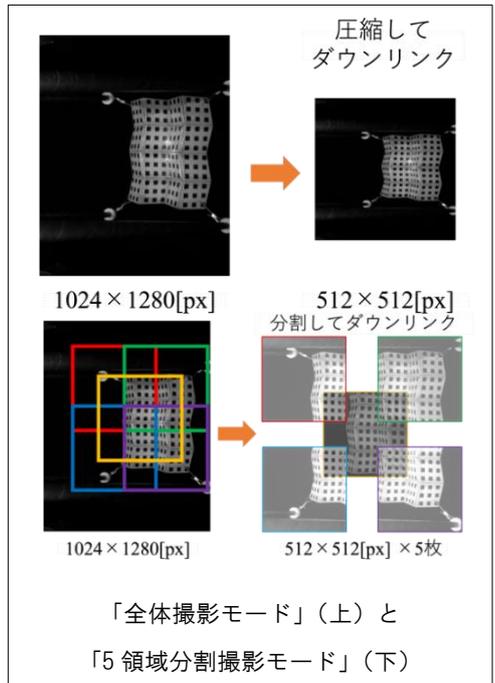


図 2 「5 領域分割撮影モード」で撮影した画像



図 4 (図 2 の) 表面形状の計測結果

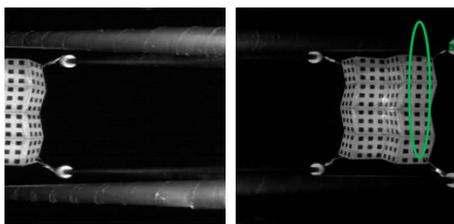


図 3 「全体撮影モード」で撮影した画像

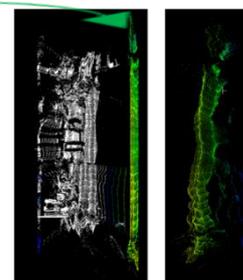


図 5 (図 3 の) 表面形状の計測結果

また、定期的に撮影・解析を繰り返し行い、表面展開形状の時刻歴変化の観察も行いました。撮影時刻の異なる画像を解析した結果、パネルの形状や撮影状況の時間変化が解析結果に影響することを確認しました（図 6）。以上より、軌道上運用における本形状測定法の実用性の確認と同時に、計測手法の新たな課題を見出すこともできました。さらに、補足的に画像内距離を測定し、計測カメラが搭載されたパドルやパネルの展開角度推定を行い、時間の経過による展開角度の増加も確認されました（図 7）。

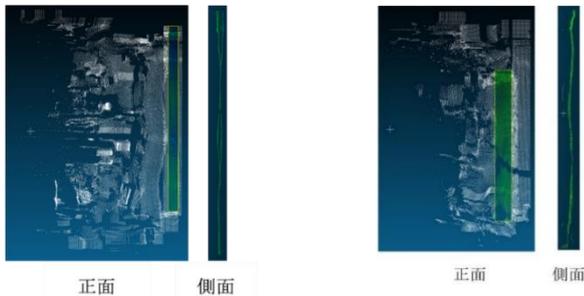


図 6 異なる時刻撮影画像の解析結果



図 7 画像内距離測定によるパネル展開角度の推定値の推移

ミッション 2：アマチュア無線帯での高速データ通信～アマチュア無線の幅を「ひろげる」～

従来の多くのアマチュア無線衛星は UHF、VHF で 1.2kbps、9.6kbps の通信速度を利用していました。これらには、主にパケットロスが生じた際に地球局からの再送要求が必要となる AX.25 が用いられ、衛星運用のコストが大きくなる要因になっていました。そこで「ひろがり」では、より高速な 13.6kbps GMSK、19.2kbps 4FSK を採用し、さらに、誤り訂正能力を持つリード・ソロモン符号を用いたプロトコル（以下、「RS」）、およびリード・ソロモン符号に畳み込み符号を組み合わせたプロトコル（以下、「RS+畳み込み」）を採用しました。これらの通信技術の有用性を実証し、より高効率な通信を目指します。

【成果】高速データ通信技術の実証

採用した通信方式について、従来の方式を含む 6 方式で性能を比較する通信実験を行いました。実験の結果、全ての通信方式について通信を成立させることができました。また、実験では、通信条件を昼夜および仰角の高低で 4 通りに分類し、「単位時間あたりにどれだけの量のミッションデータをダウンリンクすることができるか」を示す実効速度を算出し、低仰角における実効速度をまとめました（表 1）。高仰角であれば、衛星と地上局との距離が近くなるため通信条件としては有利になりますが、「ひろがり」のミッションでは、比較的通信に不利な低仰角の場合であっても、GMSK 13.6kbps AX.25 および GMSK 13.6kbps RS において、従来の通信方式における実効速度を上回ることが確認されました。

| 通信方式 | 日中の実効速度[kbps] | 夜間の実効速度[kbps] |
|-------------------------|---------------|---------------|
| GMSK 9.6kbps AX.25 (従来) | 4.2 | 4.7 |
| GMSK 13.6kbps AX.25 | 5.22 | 5.59 |
| GMSK 13.6kbps RS+畳み込み | 3.86 | 4.13 |
| 4FSK 19.2kbps RS+畳み込み | 3.20 | 3.57 |
| GMSK 13.6kbps RS | 7.51 | 7.92 |
| 4FSK 19.2kbps RS | 1.81 | 2.82 |

表 1 低仰角における各通信方式の実効速度

ミッション3：メッセージボックスサービス～アマチュア無線での交流を「ひろげる」～

メッセージボックスサービスを提供するためテスト運用を実施し、世界各国のアマチュア無線家の方々の協力のもと、サービスが機能することを確認しました。また、アマチュア無線家ではない方にも交流を「ひろげる」ために幅広い世代からメッセージを募集し、「ひろがり」を通して世界中へ発信しています。今後は、定常的なサービスを目指して運用を本格化していきます。なお、現在は運用を本格化し、アマチュア無線家の方々へ定期的にサービスを開放しています。

○サービスに関する詳細

アマチュア無線ミッション Web サイト

https://www.sssrc.aero.osakafu-u.ac.jp/hrg_amateur_mission/

<SDGs 達成への貢献>

大阪府立大学は研究・教育活動を通じて SDGs17 (持続可能な開発目標) の達成に貢献をしています。

本プロジェクトは SDGs17 のうち、「9：産業と技術革新の基盤をつくろう」、「17：パートナーシップで目標を達成しよう」に貢献しています。



<プロジェクト資金の支援に対するお礼>

超小型衛星「ひろがり」の開発ならびに大阪府立大学小型宇宙機システム研究センターの活動に対しては、「ふるさと納税制度」を活用した大阪府立大学への寄附制度である「つばさ基金」を通じて、学内外の多くの方々から寄附金をいただきました。また、室蘭工業大学ではクラウドファンディングを実施し、「ひろがり」プロジェクトに対する多大な支援と声援が集まりました。支援いただいた皆さまには、厚く御礼申し上げます。

<大阪府立大学 小型宇宙機システム研究センターについて>

学生が中心となって超小型人工衛星・小型ロケットなどの宇宙機を開発しているセンターです。1年生から大学院生までがお互いに協力し、活動しています。学生がカリキュラムをつくり、上級生が下級生に対して宇宙機の開発に必要な技術を教える活動や、地域の方々に宇宙を身近に感じてもらうためのアウトリーチ活動も行っています。



<室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センターについて>

地域産業界に航空宇宙機に関する「高度なシステム技術開発」の機会を提供し、小規模でも高度なシステムの実用化を目指して研究開発に取り組んでいます。また、具体的な「ものづくり研究」を実施することによって、学生の研究に対するモチベーションを高め、自発的な研究を促す教育環境を提供しています。実用に供せる小型の無人超音速航空機や、超小型人工衛星「ひろがり」の研究開発はその代表例です。



<参考 URL 等>

大阪府立大学 Web サイト

<https://www.osakafu-u.ac.jp/>

大阪府立大学 小型宇宙機システム研究センター Web サイト

<http://www.ssrc.aero.osakafu-u.ac.jp/>

大阪府立大学 つばさ基金 Web サイト

<http://www.kikin.osakafu-u.ac.jp/>

室蘭工業大学 Web サイト

<http://www.muroran-it.ac.jp/>

室蘭工業大学 ミッション部 Web サイト

<https://u.muroran-it.ac.jp/sslabor/HIROGARI.html>

室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター Web サイト

<http://www.muroran-it.ac.jp/aprec/index.html>

【本件に関するお問合せ】

○大阪府立大学 小型宇宙機システム研究センター

センター長 小木曾 望（こぎそ のぞむ）

TEL : 072-254-9245

E メール : kogiso[at]aero.osakafu-u.ac.jp

○室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

センター長 内海 政春（うちうみ まさはる）

TEL : 0143-46-5335 (5315)

E メール : uchiumi[at]mmm.muroran-it.ac.jp

※[at]を@に変換ください。