

## 超小型衛星の高機能化に関する試験研究事業（第3報）

行武 栄太郎\* 磯 直樹\*\* 小暮 誠\* 関山 燎\*\*

## 1. はじめに

## 1.1 宇宙産業の現状

現在、宇宙産業の世界市場規模は約40兆円程度あり、数十年後には現在の2～3倍程度の100兆円以上の市場規模に急拡大することが予測される。国内でも宇宙産業の急成長が期待されている。

これまで、宇宙産業に係るビジネス支援は国家主導型の宇宙開発事業として進んでいたが、近年では民間主導型のビジネスモデルへの転換期を迎えている。

人工衛星の分野では、低価格化が進む民間企業によるロケット打上げサービスにより、打上げの機会が拡大することで、人工衛星の生産数が増加している。特に納期が短く低価格で設計・製造が可能な小型・超小型衛星の開発が進んでおり、国内でもベンチャー企業による小型人工衛星の打上げが実施されている。しかしながら、人工衛星の設計・製造に用いる部品の大半は海外からの輸入品で構成されているため、各部品の調達が不安定であることが国内での宇宙ビジネス発展の妨げになっている。

## 1.2 超小型衛星

人工衛星は重量で区分されており、総重量100kg未満は超小型衛星とされている。超小型衛星の中でも100mm角の立方体を1ユニット（1U）として構成されるCubeSatは製作期間が短く、低コストで製作・運用が可能である。そのため、民間企業がCubeSatの開発に積極的に参入しており、その市場が急速に拡大している。

CubeSatに搭載する機器（カメラやセンサ等）の高性能化に伴い、データ通信量の増大、姿勢制御の高精度化、ミッション運用期間の拡大等が求められている。

## 2. 目的

当センターでは、茨城県が推進している『いばらき宇宙ビジネス創造拠点プロジェクト』における技術的な支援を進めており、種々課題を解決するための試験評価技術の蓄積を活用して超小型衛星の高機能化を目指す。

本研究では、超小型衛星に搭載可能で大容量通信を可能とする技術開発、及び長期運用を可能とする推進技術開発を目的とした。想定する超小型衛星サイズは、今後の主流になると予測されるCubeSat（3U～6Uサイズ）、総重量30kg以下とした。

大容量通信を実現するには、アンテナ技術の開発が必要である。また、データ通信の信頼性を高めるためには、アンテナの指向性を制御する精度の高い姿勢制御装置（リアクションホイール）が必要となる。さらには、超小型衛星の長期運用を可能とする小型かつ宇宙空間で使用可能な電気式推進装置（ホールスラスタ）の開発が必要である。そこで、アンテナ基板、リアクションホイール機構、ホールスラスタ装置の3つの技術分野における試験研究を3カ年（令和2年度～令和

4年度）計画で実施した。

第1報（令和2年度）<sup>1)</sup>では

- ① 大容量通信を実現するため、アレー方式のアンテナ構造について検討し、利得が向上し、通信量の増加が期待できることを確認した。
- ② リアクションホイールを用いた姿勢制御系を検討し、1Uに収まる1軸姿勢制御システムの機構を実現した。
- ③ 推進装置では、1Uに収まるホールスラスタの設計・製作を実施し、推力の発生を確認した。

第2報（令和3年度）<sup>2)</sup>では

- ① 通信容量の向上及び安定化を図るため、積層型アンテナ基板を試作し、高い利得を実現した。
- ② 3軸姿勢制御系を1U筐体に収める小型化を進め、姿勢制御システムの設計・製作を実施した。
- ③ 連続運転10s以上で安定した推力が得られるホールスラスタの設計・製作に成功した。

今年度は、超小型衛星（CubeSat）への搭載を想定したアンテナ技術、姿勢制御技術、及び推進技術の特性評価を目的とし、以下の試験評価を実施した。

- ・ アンテナ技術：積層型アレー方式のアンテナによる動画等の大容量通信を想定した通信評価
- ・ 姿勢制御技術：3軸リアクションホイールを搭載した1U筐体の振動対策と評価
- ・ 推進技術：実運用を想定した電気推進装置（ホールスラスタ）の特性評価

## 3. 研究内容

3.1 アンテナ技術（アレー方式アンテナ）<sup>3)</sup>

## 3.1.1 目標

現行の4倍の通信容量を目標に、多値変調に対応可能な高利得アレーアンテナを開発してきた。しかしながら、アンテナを超小型衛星筐体に搭載することでアンテナ利得の低下が懸念される。

本研究では、超小型衛星筐体へアンテナ搭載時のアンテナ利得を低下させない配置方法を検討する。また、超小型衛星筐体搭載時において、通信評価を行い、多値変調に対応可能か確認を行う。さらには、開発したアンテナを使用して、PCに接続されたウェブカメラで撮った映像（動画）の送信と受信を行い、実際に通信できるか確認するとともに現行パッチアンテナとの優位性を評価した。

## 3.1.2 衛星筐体へのアンテナ搭載検討・評価

開発した高利得アレーアンテナを衛星筐体に搭載した場合のアンテナ特性をCAE解析（ANSYS Electronics Enterprise）及び試作モデルで確認した。

図1.1の高利得アレーアンテナモデルを図1.2のように衛星筐体モデル上に配置し、アンテナと筐体はネジでの固定を想定しアルミニウム合金製柱で接地されて

いる。筐体とアンテナの距離をパラメータに、反射特性、最大利得を電磁界解析によって求め、最適な距離を算出した。

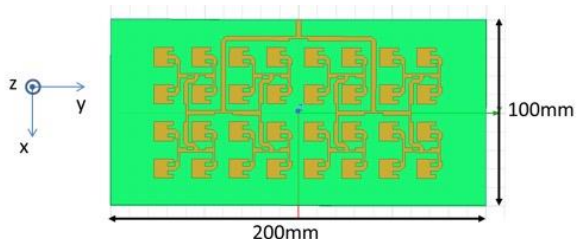


図 1.1 高利得アレーアンテナ (4×8 素子アレー)

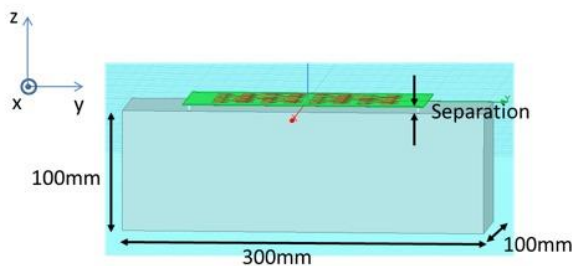


図 1.2 衛星筐体搭載時の解析モデル

図1.3に高利得アレーアンテナモデルを衛星筐体モデルに搭載したことを模擬した際の解析結果を示す。反射特性は距離8mm以上で大きく変化し、最大利得は9mm以上で大きく低下する。よって、低背化も考慮し、できる限り距離を小さくすることが望ましいため高利得アレーアンテナと衛星筐体との距離を0mm (接地) とした。

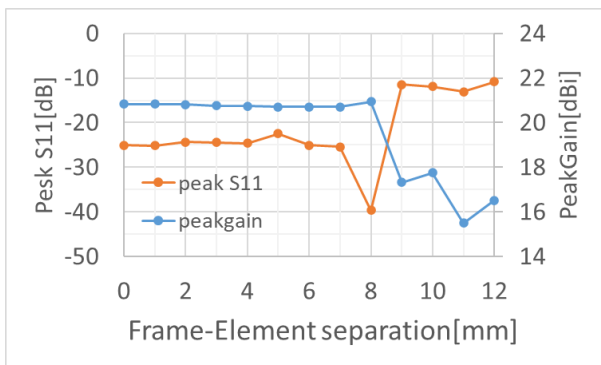


図 1.3 反射特性と最大利得

図1.4に試作した高利得アレーアンテナを衛星筐体に設置した模擬衛星筐体を示す。3U筐体を模擬したモデルに試作したアンテナを搭載した。アンテナへの給電は高周波同軸ケーブルを筐体下部から内部を通して供給した。

図1.5に図1.4に示した模擬衛星筐体モデルでの利得及び指向性の解析結果と測定結果を示す。測定結果から、最大利得20.1dBi (解析20.9dBi) であり、搭載前の最大利得20.1dBi (解析20.1dBi) と比較し、ほぼ同等の結果が得られた。

図1.6に高利得アレーアンテナを搭載した模擬衛星筐体モデルでの評価結果を踏まえて試作した積層型高利得アレーアンテナを搭載した超小型衛星 (3U) を想

定した試作筐体を示す。第2報で開発した積層型高利得アレーアンテナを筐体に搭載した時のアンテナ利得及び指向性を確認した。

図1.7に利得及び指向性の解析結果と測定結果を示す。測定結果から、最大利得は21.5dBi (解析22.5dBi) であり、搭載前の最大利得21.3dBi (解析22.9dBi) と比較し、ほぼ同等の結果が得られた。



図1.4 高利得アレーアンテナ搭載モデル (第1報)

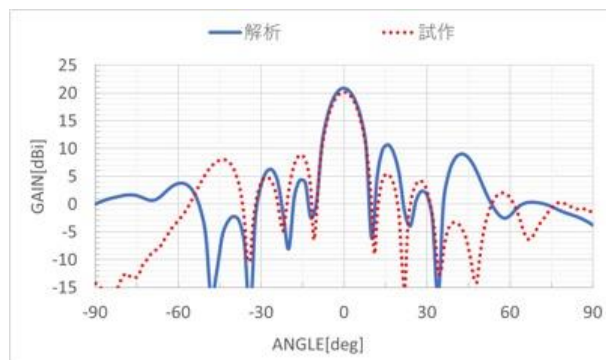


図 1.5 高利得アレーアンテナの指向性



図 1.6 積層型高利得アレーアンテナ搭載モデル (第2報)

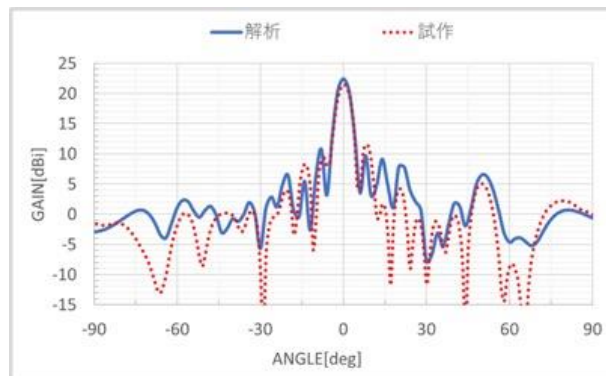


図 1.7 積層型高利得アレーアンテナの指向性

### 3.1.3 パッチアンテナとの比較検証

本研究で開発した積層型高利得アレーアンテナと現行パッチアンテナとで筐体搭載によるアンテナ特性の比較のため通信評価を行い、多値変調に対応可能かを検証した。

図1.8に通信評価の測定系を示す。ベクトルシグナルジェネレータからデジタル変調された信号を発生させて被試験アンテナを介して電波を送信し、検査用アンテナで受信することで、ベクトルシグナルアナライザでコンスタレーションと、変調精度 (EVM: Error Vector Magnitude) の受信品質を評価する。現行パッチアンテナと比較し、多値変調である256QAM等でも良好な受信品質が得られるか確認した。

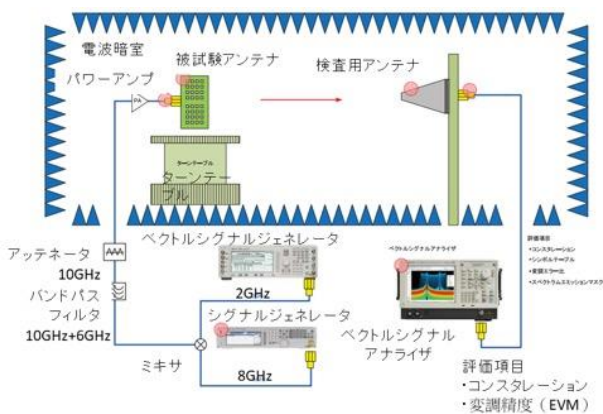


図 1.8 通信評価の測定系

図1.9、図1.10に現行パッチアンテナと開発アンテナのデジタル変調時 (QPSK、256QAM) のコンスタレーションと変調精度 (EVM) を示す。開発アンテナは、QPSK、256QAMにおいて、現行パッチアンテナと比較し、デジタル変調信号 (赤丸) にばらつきが少なく、変調精度

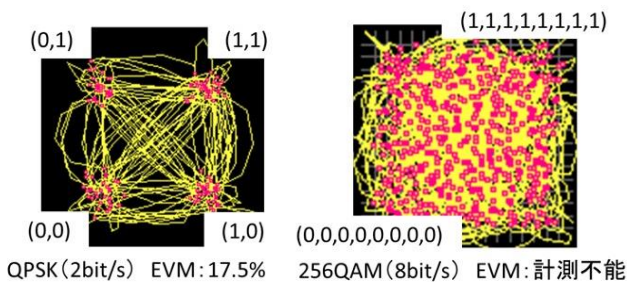


図 1.9 現行パッチアンテナのコンスタレーションと変調精度 (EVM)

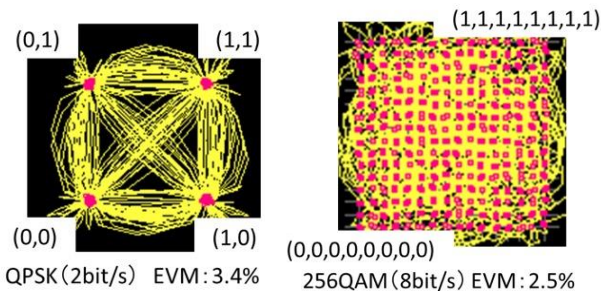


図 1.10 開発アンテナのコンスタレーションと変調精度 (EVM)

EVM も小さいため、理想信号との振幅と位相の誤差が小さいことがわかった。また、開発アンテナは 256QAM においても、安定した通信に必要な BER $10^{-4}$  以下となる変調精度 3% 以下を満たし、通信容量の大きい多値変調に対応できることが確認できた。なお、256QAM (8bit/s) は QPSK (2bit/s) の 4 倍の通信容量である。

### 3.1.4 映像の送受信による通信性能検証

開発した積層型高利得アレーアンテナを使用して、PCに接続されたウェブカメラで撮った映像 (動画) の送信と受信を行い、実際の通信状態を確認するとともに現行パッチアンテナと比較評価を実施した。

積層型高利得アレーアンテナ評価用の超小型衛星模擬筐体の外観を図1.11に示す。図1.12に超小型衛星とウェブカメラ映像 (動画) の送受信の評価系を示す。送信用PCに接続されたウェブカメラで撮った映像 (動画) を無線モジュールと開発アンテナを使用して送信し、受信アンテナと10GHz帯ローノイズアンプと10GHz帯バンドパスフィルタと無線モジュールを介して受信用PCで映像を受信した。使用する無線モジュール (PlutoSDR) は上限3.8GHzのため基本波を3.413GHzとして第3次高調波の10.240GHzを利用して送信し、受信側でローノイズアンプ2つとバンドパスフィルタ1つを用いて10GHz帯の信号のみを増幅して受信した。

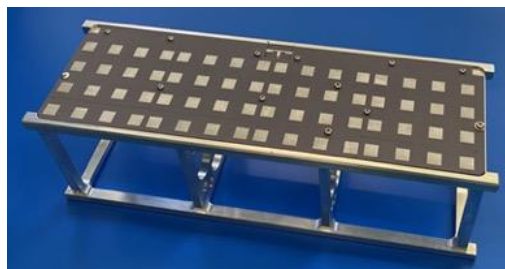


図 1.11 積層型高利得アレーアンテナ評価用超小型衛星模擬筐体



図 1.12 ウェブカメラ映像 (動画) の送受信の評価系

表1.1に図1.12に示す送受信の評価系を用いて通信評価した時の通信仕様を示す。通信規格はDVB-S2とし、周波数10.240GHzとし、通信状況を動画として確認した。

表 1.1 通信仕様

通信規格	DVB-S2
周波数	10.240GHz
シンボルレート	1MS/s (帯域 1MHz)
デジタル変調	8PSK
誤り訂正 FEC	3/4

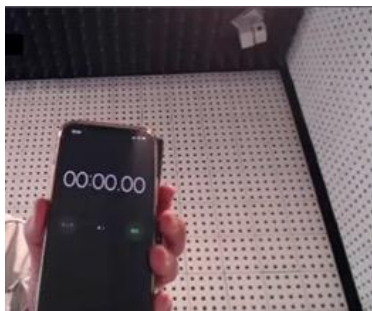


図1.13に送受信の通信評価結果を示す。現行パッチアンテナの場合には受信が不安定で、動画がモザイクとなりフリーズ状態となることが確認された。一方、積層型高利得アレーアンテナの場合では安定した受信ができていたことが確認できた。さらには、実際の衛星運用を想定した場合の姿勢制御用リアクションホイールから発生するノイズによる通信性能への影響を確認するため、姿勢制御用リアクションホイールを作動させ、高利得アレーアンテナに近接させた状況での通信特性の評価を実施し、同様に安定した受信ができていたことが確認できた。

これらの結果より、本研究で開発した積層型高利得アレーアンテナを超小型衛星へ搭載しても大容量通信が得られる可能性が示唆された。



現行パッチアンテナの場合



積層型高利得アレーアンテナの場合

図 1.13 各種アンテナでの送受信評価

### 3.2 姿勢制御技術（リアクションホイール）

#### 3.2.1 目標

姿勢制御システムの小型・軽量化を進めるとともに、衛星運用において課題となる振動低減のための対策とその効果を評価した。また、3軸のリアクションホイールとその制御システムを1U 筐体内に収納した模擬衛星（CubeSat）を試作し、仮想無重力空間で動作検証を実施した。

#### 3.2.2 剛性強化と防振材の適用

リアクションホイールの衛星筐体へ与える振動を低減するために、以下の(a)(b)に示す各種方式で試作品を製作し、振動評価試験を実施した。

##### (a) 剛性強化

架台取り付けの4カ所に図2.1に示す剛性強化策を実施した。また、軽量化と剛性強化を両立させるために、殆どの部品を軽金属に置換え、構造的にも衛星筐体の

フレーム化を実施した。

##### (b) 防振材の適用

リアクションホイールの振動（縦揺れ／横揺れ）が衛星筐体に伝わらないようにするため（振動源のアイソレーション）、防振材の適用を検討した。図2.2に振動低減構造を考慮した構造図を示す。筐体パネルに取付ける支柱を振動が抑えられるインシュレータに置換える構造が理想であるが、リアクションホイールのように超低重量（200g以下）の振動源や無重力環境での使用に適用できる部品は見当たらないため、以下の①②の2通りを検討した。

##### ①縦揺れに対する防振構造

防振アイソレータ（材質：ゴム）と防振ワッシャー（材質：ウレタン）を組合せた構造とした。

（注：適正荷重品が存在しないため、縦揺れの高周波振動低減用を適用）

##### ②横揺れに対する防振構造

適正荷重品である防振ブッシュ（材質：タイカ社製αゲル）を架台の取り付け部に装着した。

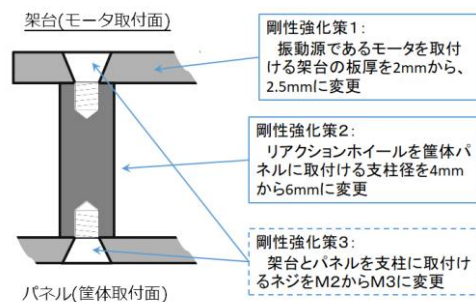


図 2.1 振動低減対策（剛性強化）

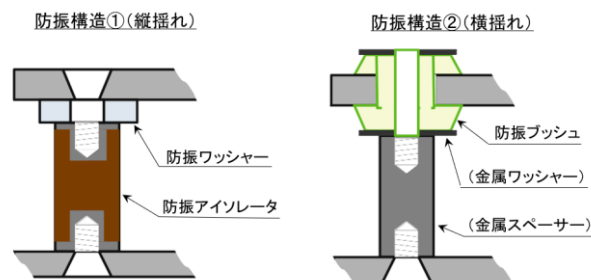


図 2.2 振動低減対策（防振材の適用）

#### 3.2.3 振動評価試験

振動低減対策の効果を実証するため、振動特性評価モデルを構築した（図2.3）。アルミフレームの衛星筐体（試作品）の中心部にリアクションホイールを取付け、防振パッド上に設置し、フレームの4点（F1～F4）とパネルの4点（P1～P4）での振動を上部から振動計で測定した。また、加速度センサを用いて、フレーム（F1）における3方向（XYZ）の振動を計測した。

表2.1に各構造の振動測定結果を示す。第2報の試作品と比べて、剛性強化の効果が1～2割程度の低減を示したが、低周波の振動（20～100Hz）が抑制できる防振ブッシュを適用した②横揺れに対する防振構造は、振動を10分の1程度に抑えられるという結果が得られ

た。なお、①縦揺れに対する防振構造において、防振ブッシュと同じ材質を使った防振アイソレータは、荷重が掛からず、引張／せん断方向の力が加わる環境では使用できないため、高周波の振動しか抑制できない防振アイソレータを使用して試験を実施した。

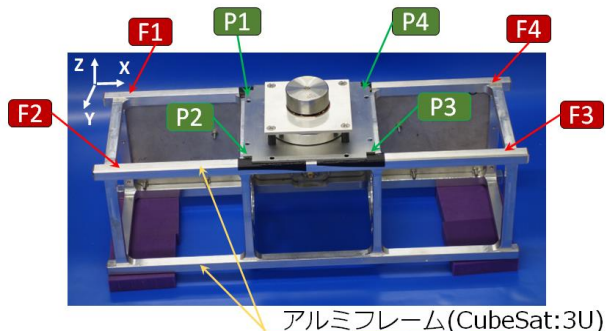


図 2.3 衛星の振動測定部位

表 2.1 振動測定結果 (単位 : m/s<sup>2</sup> peak)

回転速度 (rpm)	剛性強化		防振材適用①		防振材適用②	
	フレーム	パネル	フレーム	パネル	フレーム	パネル
2,000	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.9
5,000	1.7	1.8	3.0	2.8	0.8	0.8
8,000	6.6	5.8	5.0	5.7	0.5	0.9

加速度センサの振動波形を、表 2.1 と同じ方式／回転速度で一定期間モニタリングした結果、すべての状態において、縦揺れ／横揺れを含め、同じ傾向であり、特異な振動は見られなかった。宇宙環境で防振材を使用する場合、熱やアウトガスなど様々な検討が必要であるが、構造的には、横揺れに対する防振構造に示すように、機械的振動 (20~100Hz) を吸収する材料を一定の圧力をかけて取付ける振動アイソレータが、リアクションホイールには適していることが確認できた。

### 3.2.4 模擬衛星 (CubeSat:1U) の試作

図 2.4 に CubeSat 仕様の 1U 筐体 (アルミニウム合金フレーム) 内に pitch/roll/yaw の 3 方向の姿勢制御用リアクションホイールと、その制御装置を搭載した模擬衛星を示す。本模擬衛星は、3 台のリアクションホイールが筐体内部の壁面に実装され、一連の姿勢制御



図 2.4 模擬衛星試作品の外観

動作の確認を目的として、必要最小限の部品で構成される。筐体パネルには内部の動作が確認できるように透明なアクリルを用いた。衛星筐体の主な仕様を以下に示す。

- ・筐体サイズ : CubeSat1U
- ・内部容積 (1U) : 96×96×96mm
- ・筐体材料 : アルミニウム合金 (6000 系)
- ・筐体パネル : アクリル
- ・重量 : 866g (衛星全体)

衛星筐体内には、以下の機器を壁面収納の形態で取付け、①~③の機能を実装している。

- ・リアクションホイール (3 台搭載)
- ・モジュールボックス (図 2.5 左側)
- ・慣性センサ (図 2.5 右側)
- ・模擬衛星コントローラパネル

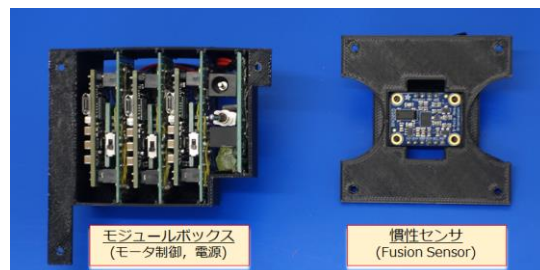


図 2.5 各モジュール 6 の外観

#### ① ホイールの回転速度制御機能

リアクションホイールは、薄型 (アウターローター型) のブラシレス DC モータに 3 個のホール素子を取付け、モータコントローラで最大 10,000rpm の回転速度を検知・制御する構成である。省配線化を目的に、衛星コントローラから PWM (Pulse Width Modulation) 信号の指令で 0~10,000rpm の回転速度を制御する。

#### ② 慣性計測機能 (IMU: Inertial Measurement Unit)

IMU は、加速度／ジャイロ等のセンサを搭載し、計測値に様々な補正を行い、pitch/roll/yaw の 3 次元慣性運動を検出する装置である。本衛星では、衛星コントローラの CPU 負荷を低減させるため、加速度／ジャイロ／磁気を計測する 9 軸センサを搭載し、チップ単体で各種補正演算を行う Fusion Sensor (BOSCH 社 BN0055 チップ) を搭載した慣性センサを採用し、I2C インターフェイス (Inter-Integrated Circuit) で衛星コントローラと pitch/roll/yaw の計測値を通信する方式とした。

#### ③ 外部 (仮想基地局) との通信機能

衛星単体の内部動作を把握するため、本衛星では、模擬衛星コントローラに LCD 表示器を搭載し、衛星の姿勢とリアクションホイールの回転速度を表示すると同時に、仮想基地局へ無線通信 (Bluetooth) を行う機能を実装した。また、模擬衛星の姿勢と同期して、画面上の衛星画像がリアルタイムで回転するソフトウ



エアを開発した。(図 2.6)

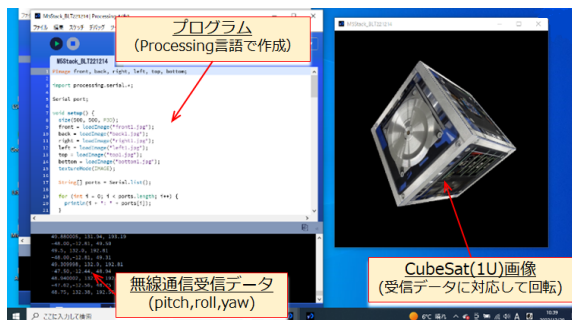
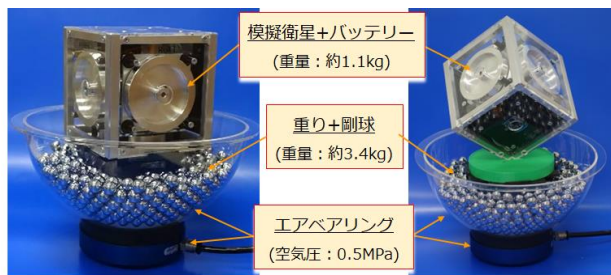


図 2.6 仮想基地局の表示画面

### 3.2.5 リアクション動作検証システムの開発

衛星全体の姿勢制御動作を正確に確認するには、無重力環境で評価する必要がある。ここでは、エアベアリングを用いて、衛星全体を空気圧で浮かし、水平方向を無負荷で回転できる状態を作り、宇宙空間を模擬した環境で簡易的にリアクション動作を検証できるシステムを開発した(図 2.7)。

図 2.7 左図は、1 軸のリアクション動作を検証するシステムで、右図は 3 軸の同時制御動作を検証するシステムである。エアベアリングは、上部のボウルに 50kg の重りを乗せて、約 0.5MPa の供給圧で約 8 $\mu$ m 浮上する仕様品を採用しており、安定して浮上させるためには、重りの重心をボウル底面から 10cm 以内にする必要がある。このため、模擬衛星の下部に、バッテリー以外に約 3.4kg の重りと剛球を搭載して、重心を低く抑えることで重心のバランスを整えた。



(a) 1方向の動作検証 (b) 3方向の動作検証

図 2.7 リアクション動作検証システム

リアクション動作の検証は、重量 4.5kg の超小型衛星を想定して、エアベアリング上のボウルへの搭載物の合計重量が、約 4.5kg となるように設定した。

リアクション動作の評価試験結果の一例を図 2.8 に示す。本試験は、3 軸動作時の 1 軸 (Z 軸) を以下のパターンで変化させることにより模擬衛星を回転させ、その角度変化を IMU センサで 0.1 秒単位に計測した。

なお、 $\pm 310$ rpm のモータ回転速度変化が角運動量の  $\pm 1.2$ mNms に相当する。この角運動量変化によって 4.5kg の模擬衛星に反力が生じ、模擬衛星が回転する。

#### 制御パターン

- ① 0~10 秒 モータ回転速度：5,000rpm

- ② 10~20 秒 モータ回転速度：4,390rpm
  - ③ 20~40 秒 モータ回転速度：5,000rpm
  - ④ 40~50 秒 モータ回転速度：5,310rpm
  - ⑤ 50~70 秒 モータ回転速度：5,000rpm
- 以後、②~⑤の繰り返し

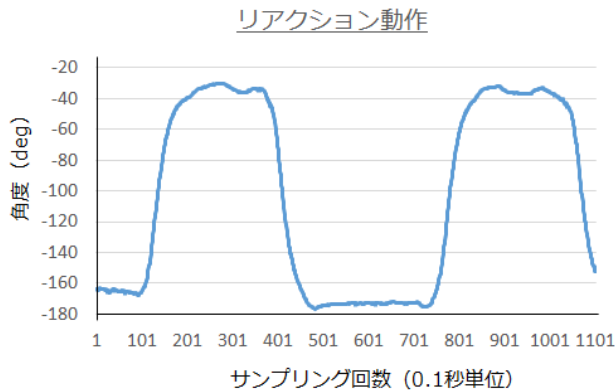


図 2.8 リアクション動作の評価試験結果例

上記制御パターンの動作は、模擬衛星の正方向回転/停止/負方向回転/停止を繰り返すため、理想的には、図 2.8 は台形波形の動作となるが、理想的な動作となっていない要因として以下のことが考えられる。

- モータコントローラの加減速に、100rpm/s の速度勾配を設定しているため、徐々に反力が加わる状態となる。
- エアベアリングの重心軸が完全には一致してないため、加減速時に水平方向以外に微小な振動が発生する。

本動作検証システムは、上記課題があるものの、回転する状態にした場合、長時間継続して回転を続けるため、無重力の動作に近い環境は構築できていると判断できる。

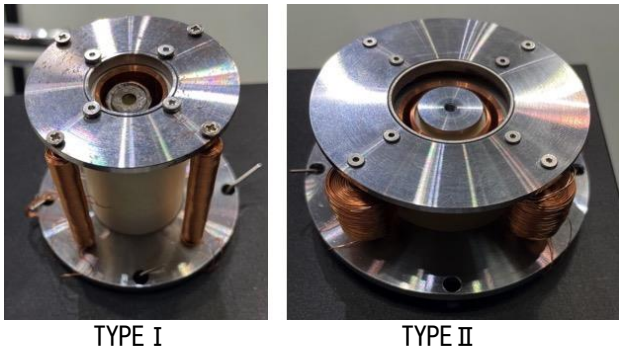
### 3.3 推進技術 (ホールスラスト)<sup>4)</sup>

#### 3.3.1 目標

本小型ホールスラストは、1U サイズの CubeSat に収まり、総重量 30kg 程度の超小型衛星が軌道高度 200km 以上で 2 年間以上安定して巡航できる推進特性 (推力：約 3mN 以上、連続運転時間 10s/回以上) を目標としている。本研究では、昨年度開発した小型ホールスラスト (推力：3mN 以上、連続運転時間 10s/回以上) のロバスト性、及び特性評価を実施した。

#### 3.3.2 ホールスラストのロバスト性評価

図 3.1 に本研究で試作した小型ホールスラストの外観を示す (左側：TYPE I、右側：TYPE II)。ロバスト性評価には、TYPE I を改良して薄型化し、安定した推力が得られる TYPE II を用いた。薄型化することで、超小型衛星の筐体内スペースの有効活用が可能となる。改良した小型ホールスラスト (TYPE II) の CubeSat (3U) 搭載イメージを図 3.2 に示す。



TYPE I TYPE II  
図3.1 試作した小型ホールスラスタ外観

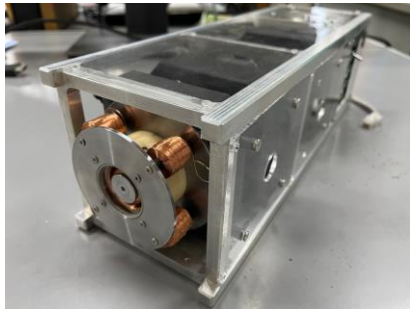


図3.2 小型ホールスラスタCubeSat (3U) 搭載イメージ

本小型ホールスラスタは4基の電磁石コイルから構成されている。ホールスラスタは静電加速型の電気推進装置であり、磁場を発生させる電磁石コイルの正常な作動が重要である。設置された4基の電磁石コイルが正常に作動することで目標としている推進特性（推力：3mN以上）が得られることを令和3年度までの評価で確認している。

本研究では、実運用中に電磁石コイルに不具合が発生し、4基の電磁石コイルが正常に作動しない場合を想定したロバスト性を評価した。

図3.3に電磁石コイルの作動パターン及び磁束密度測定箇所を示す。電磁石コイルの不具合（停電）を模擬するために、5パターン（a:4基作動、b:1基が停止、c:向かい合う2基が停止、d:隣り合う2基が停止、e:3基が停止）の電磁石コイル作動状態での磁束密度分布をテスラメータ(TM-801:カネテック社製)で測定した。測定箇所はリング状の推進剤放出部を4等分した箇所(①~④)とし、隣り合う電磁石コイルの中間地点からリング状のプラズマ発生箇所と最も接近した箇所とした。電圧・電流値は推進力が本研究の目標値3mNを実現する10V/0.6A一定として磁束密度の変化を評価した。なお、電磁石コイルには、純鉄棒(φ5mm)に絶縁被覆した純銅(φ0.26mm)の銅線を約1000回巻いたものを使用した。

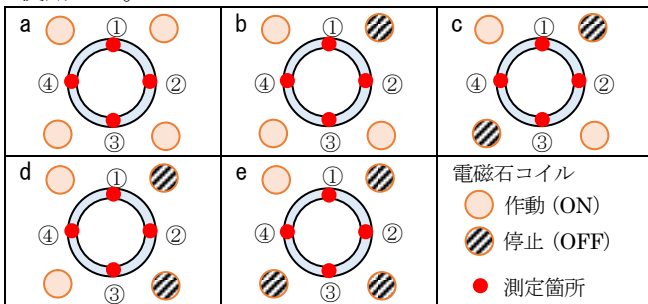


図3.3 電磁石コイルの作動パターン及び測定箇所

図3.4に電磁石コイルの各作動パターンにおける磁束密度の変化を示す。電磁石コイルが1基停止すると、停止した側の磁束密度は低下するが、作動している側の磁束密度に大きな変化は確認されない。しかし、2基停止すると、4箇所とも磁束密度が低下する傾向が確認された。磁場は距離の2乗に比例して減衰するため、パターンdの②では他の箇所と比べ磁束密度が小さくなると考えられる。更に、パターンeでは3基の電磁石コイルを停止することで磁束密度は大きく低下した。

また、電磁石コイル各作動パターンにおいて推進剤をキセノンガス(Xe)とし、推進剤流量:7sccm、放電電圧:100V、電磁石コイル電流:0.6Aで推力評価を実施した。電磁石コイルが1基停止した状態では安定したプラズマが発生し推力が得られたが、4基の電磁コイルが作動した場合と比較して、40%程度の推力低下が確認された。2基停止した状態では、パターンc、d共にプラズマの発生が不安定となり、推力が得られないことが確認された。3基停止した状態ではプラズマが発生しないことが確認された。これらの結果より、試作した小型ホールスラスタで推力を得るには、最低3基以上の電磁コイルの正常に作動する必要があることが確認された。なお、本小型ホールスラスタには、同仕様の電磁石コイルを最大8基搭載可能である。

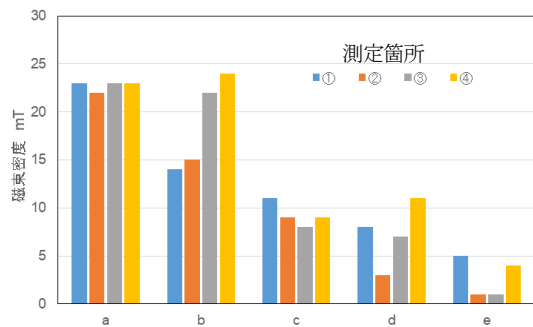


図3.4 各作動パターンにおける磁束密度の変化

### 3.3.3 ホールスラスタの性能評価

本研究で試作した小型ホールスラスタの性能評価として、3種の入力パラメータ（推進剤流量、放電電圧、電磁石コイル電流）を用いて、推力に及ぼす影響を系統的に評価した。性能評価にはTYPE IIの小型ホールスラスタを用い、推進剤はキセノンガス(Xe)とした。推進剤流量は7、8、9sccm、放電電圧は100、150、200V、電磁石コイル電流は0.2、0.4、0.6、0.8Aの各条件で性能評価を実施した。

図3.5に放電電圧一定(100V)で電磁石コイル電流値を変化させた場合での推力と推進剤流量との関係を示す。電磁石コイル電流値が0.6A以下では電流値が大きくなるにつれ推力は大きくなるが、電流値が0.6A以上では推力が小さくなった。そこで、磁束密度と電磁石コイル電流値との関係を確認したところ、本研究で使用した電磁石コイル電流値0.6A以上ではプラズマ発生部での磁束密度の増加が小さくなることが確認された。これらの結果より推力と電磁石コイル電流(磁束密度)の関係性が確認できた。また、推進剤流量が大きくなるにつれて推力も大きくなるのが各電磁石コイル電

流値において確認された。推進剤流量9sccm以上ではさらに推力の増大が期待できる。

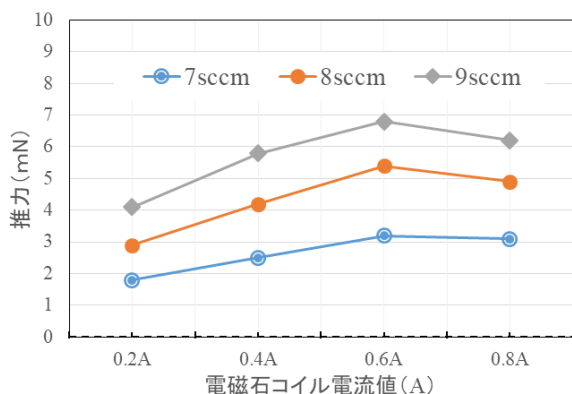


図3.5 電磁石コイル電流値と推力との関係

図3.6に電磁石コイル電流一定 (0.6A) で、図3.5で最も推力を得られた推進剤流量 (9sccm) での放電電圧と推力との関係を示す。放電電圧が大きくなると推力も大きくなるが、推力15mN以上の値は示さない。放電電圧200Vではホールスラスタのプラズマ発生箇所及び中央部での発熱が大きく、プラズマ発生箇所及びコア材が赤色化 (推定: 700°C以上) するほど加熱されることが観察された。そのため、磁気回路が加熱されることで磁束密度が低下することが要因で推力の上昇が停滞すると推察される。なお、放電電圧200Vの試験評価においては、試作したホールスラスタ本体の温度が大きく上昇することで、電磁石コイルの絶縁被覆の破損やプラズマ発生部箇所部品の一部が破損することも確認された。ホールスラスタは真空中で使用するため、放熱が困難であり、長期運用を実現するためには放熱特性を考慮した構造設計も重要である。

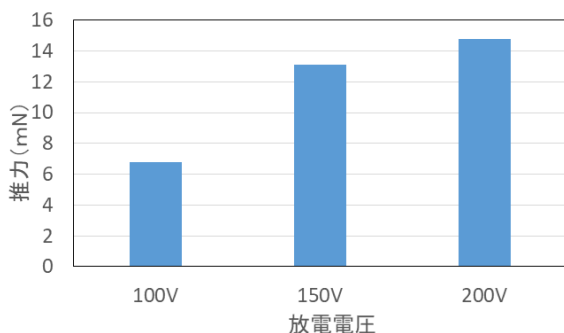


図3.6 放電電圧と推力との関係

#### 4. まとめ

超小型衛星の高機能化を目的に、アンテナ技術、姿勢制御技術、及び推進技術について検討した。

##### ・アンテナ技術

試作した積層型高利得アレーアンテナの超小型衛星筐体搭載時のアンテナ特性評価では、筐体搭載時においても現行パッチアンテナと比べ4倍の通信容量に対応可能であることが確認された。また、デジタル変調を用いた通信評価では、4倍の通信容量時においても良好な受信品質が得られた。映像の送受信評価では、現行パッチアンテナと比較し、安定した受信ができて

いることが確認できた。

##### ・姿勢制御技術

小型で精度の高い姿勢制御を実現できるリアクションホイールの小型化に必要な基盤データを蓄積した。また、3軸のリアクションホイール制御を評価できる姿勢制御評価システムを構築した。この評価システムを活用することで、3軸リアクションホイールの運用には高周波振動への対策が重要であることを確認した。

##### ・推進技術

試作した小型ホールスラスタ (TYPE II) でのロバスト性評価では、推力を得るには3基上の電磁石コイルが正常に作動する必要があることが確認できた。また、推進剤流量、放電電圧、電磁石コイル電流等が推力に与える影響を系統的評価することで、ホールスラスタの性能特性を明らかにした。

#### 5. 今後の取組

3カ年の本研究では、超小型衛星による多様なミッションを実現するために必要となる通信技術、姿勢制御技術、及び推進技術に関する試験研究を実施した。今後は、これらの基盤技術の実用化を目指すため、宇宙環境試験や耐久試験等による実運用へ向けた評価を進めたい。さらには、これら基盤技術をつなぐシステム制御技術の検討も進め、高機能な超小型衛星のシステム構築を目指したい。

#### 6. 参考文献等

- 1) 行武栄太郎、石川裕理、磯直樹、小暮誠、関山燎、超小型衛星の高機能化に関する試験研究事業 (第1報)、茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告、49、1-6、2021
- 2) 行武栄太郎、石川裕理、磯直樹、小暮誠、関山燎、超小型衛星の高機能化に関する試験研究事業 (第2報)、茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告、50、1-6、2022
- 3) 磯直樹、行武栄太郎、小暮誠、関山燎、石川裕理、第66回宇宙科学技術連合講演会講演集「超小型衛星 (CubeSat) 搭載用高利得積層パッチアレーアンテナの研究開発」、2022
- 4) 行武栄太郎、石川裕理、横田茂 第66回宇宙科学技術連合講演会講演集「超小型衛星 (CubeSat) へ搭載可能な小型推進装置の開発」、2022