

共同研究

# 超小型衛星の評価試験に関する研究

岡 英雄\* 上野 貴明\* 岡本 篤\*\* 末永 将善\*\* 柴田 克哉\*\*

Research on Test Method of Nanosatellite Evaluation

OKA Hideo, UENO Takaaki, OKAMOTO Atsushi, SUENAGA Masayoshi and SHIBATA Katsuya

日本の宇宙産業市場は、幅広いデータ活用事業が創出されるとして市場の拡大が想定されている。本研究では、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の革新的衛星技術実証4号機の実証テーマに選定された超小型衛星（3U キューブサット）の評価試験に関して、栃木県産業技術センター保有設備での試験手法について検討を行った。その結果、打上げロケットの機械的環境条件を模擬した振動環境試験では、試験周波数範囲内に試験装置の固有振動数が現れる問題はあったが、試験方法や評価方法を工夫することで要求レベルでの試験が実施でき、供試体の剛性及び振動体制を評価することができた。また、超小型衛星に搭載するアンテナの電波特性試験では、放射パターンや軸比の測定用具、計測用ソフトウェアを開発することで特性評価の効率化・半自動化を可能とした。

Key words: 超小型衛星, 3U キューブサット, 振動試験, 電波特性試験

## 1 はじめに

世界の宇宙産業の市場規模は、2007年からの10年で約2倍に拡大し、我が国の市場規模は、ほぼ横ばい状態が続いている。今後の市場予測としては、宇宙利用が一般的になり、幅広い分野でデータ活用事業が創出されると想定され、日本の宇宙産業市場は約59兆円（2050年）まで拡大することが見込まれている<sup>1)</sup>。

栃木県産業技術センターでは、2013-14年度に帝京大学と小型人工衛星に関する共同研究を実施した<sup>2)</sup>。その後、帝京大学は、県内中小企業と産学連携で開発した多目的宇宙環境利用実験衛星 TeikyoSat-4（愛称：おおり）を打ち上げる<sup>3)</sup>など、栃木県内においても宇宙関連産業への新規参入、市場拡大が想定される。

本研究は、帝京大学の TeikyoSat-4 に搭載する電源システムの一部を共同開発した株式会社大日光・エンジニアリングが、JAXA 革新的衛星技術実証プログラムに選定された超小型衛星<sup>4)</sup>の評価試験に関するものであり、企業単独では実施が難しい超小型衛星（キューブサットなど）の評価試験（機械的・熱的環境試験、電磁波・アンテナ特性評価）について、センターが保有している試験機器や設備を用いて、打上げロケットの環境条件や搭載機器又は衛星の運用条件に基づいた試験を行うための方法や環境の整備について検討した。

## 2 研究の方法

### 2.1 試験条件等

超小型衛星の評価試験条件は、打上げロケットや衛星ミッション、衛星運用計画などによって異なり、通常は衛星ごとのインターフェース管理文書（ICD）によって規定される。本研究では、JAXA が公開するイプシロンロケットユーザーズマニュアル（2018年7月A改訂版）<sup>5)</sup>などをベースに試験条件を設定した。図1に評価対象とする超小型衛星（3U キューブサット）の外観図を示す。

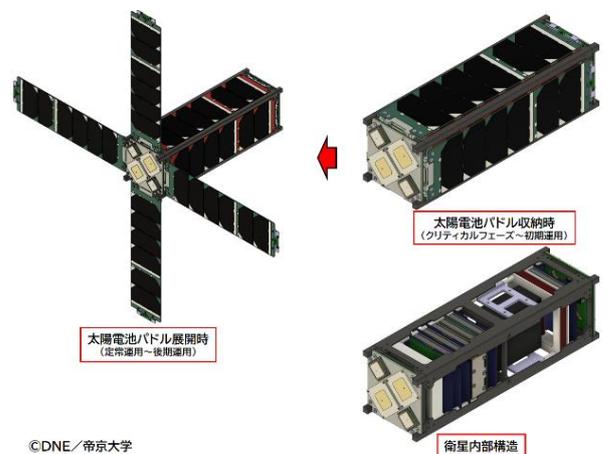


図1 超小型衛星の外観図  
(3U キューブサット：10×10×30cm<sup>3</sup>)

\* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

\*\* 株式会社大日光・エンジニアリング

イプシロンロケットユーザーズマニュアルには、キューブサットに対する機械的インターフェース要求や剛性要求に加えて準静的加速度，正弦波振動，ランダム振動の振動試験のAT (Acceptance Test) レベルが示されている。参考として，表1に剛性要求，表2に正弦波振動試験条件を記載する。

表1 剛性要求

衛星	固有周波数
1U～3U サイズ CubeSat	三軸共通 113[Hz]以上

表2 正弦波振動試験条件 (受入試験レベル)

衛星	三軸共通	
	周波数 [Hz]	正弦波振動 [ (m/s <sup>2</sup> ) 0-p]
CubeSat	43-53	9.8
	53-57	4.9
	スイートプレート:0.2[oct/min]	

AT レベルは，打ち上げ中に作用が予想される最大荷重での試験であり，この試験において有害な変形を生じないことが要求される。また，AT レベルに安全係数（例えば，1.25あるいは1.5）を乗算した荷重において設計の妥当性を確認する試験条件「認定試験 (QT) レベル」があり，この荷重において壊れないことが要求されている。一般的には，試作機はQT レベル試験を実施し，フライトモデルはAT レベル試験を行うことが多いとされている<sup>6)</sup>。

2.2 試験環境

今回の評価試験において，振動試験で使用した複合環境試験装置 (IMV (株) i250/SA5M)，電波特性試験で使用した3m法電波暗室 (株) トーキン EMC エンジニアリング製) の写真を図2に示す。

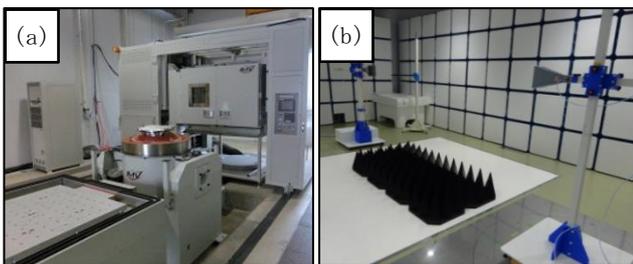


図2 (a)複合環境試験装置，(b)3m法電波暗室

2.3 試験項目

本研究では，図3に示したような超小型衛星 (キューブサット) の開発フェーズイメージ<sup>7)</sup> に合わせて，衛星構造の剛性評価やロケットの打上げ時に生じる振動への耐性を評価するための各種振動試験，搭載機器のワークマンシップの確認を目的とした機械的・熱的環境試験，衛星搭載アンテナの特性評価 (電磁波・アンテナ特性評価) について，ブレッドボードモデル (BBM) から熱構造モデル (STM) を対象として評価試験を実施した。

2.3.1 機械的・熱的環境試験

本衛星は，相乗りでの打ち上げとなることから，ロケット本体や他の衛星に悪影響を及ぼさないことを確認するため，打上げ時の振動環境への耐性や，実機の剛性評価が必須となる。主な振動試験<sup>8)</sup> について，表3にまとめる。

表3 振動試験項目

サインバースト試験	打上げ時の準静的加速度環境に対する宇宙機の耐性確認 (静荷重試験の代替手法)
正弦波振動試験 (5～100[Hz])	打上げ時の正弦波振動環境 (過渡的な振動環境により生じる負荷を模擬) に対する耐性確認
ランダム振動試験 (20～2000[Hz])	打上げ時の音響環境により励起されるランダム振動に対する耐性確認

本研究において大日光・エンジニアリングは，衛星単体をモジュールサーベイ試験することで，実機の剛性 (固有振動数) 評価を行った。また，搭載コンポーネントの振動耐性や高温・低温環境下での動作を確認するため，最小ワークマンシップレベルのランダム振動試験や恒温槽での温度試験を実施して評価を行った。

2.3.2 電磁波・アンテナ特性評価

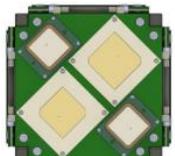
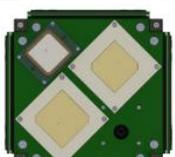
衛星が想定 of ミッションを成功させるには，衛星に搭載されたアンテナによって確実に通信できるようにしなければならない。本衛星 (3U キューブサット) では，側面が太陽電池パドルとなることから，アンテナが搭載できるのは上下面の各 10cm×10cm の面積に限られている。その中に，地上局との通信に用いる S バンド (2～4GHz) とイリジウムシステム人工衛星局との通信及び GNSS 受信に用いる L バンド (1～2GHz) のアンテナを合計 7 個搭載する予定である。表4に搭載予定のアンテナ



図3 超小型衛星の開発フェーズイメージ

配置と、図4に本衛星の宇宙空間での通信イメージ図を示す。上下面に同じアンテナを配置するのは、姿勢が乱れた時にも通信できるようにするためである。本衛星の回線設計を成立させる上で、できるだけ性能の良いアンテナを搭載する必要があるため、各種アンテナの特性やグラウンドプレーンサイズの影響を把握するため試作を繰り返し、それぞれの放射パターン、軸比、VSWRの測定を行って比較した。

表4 搭載予定のアンテナ (イメージ)

衛星上面 (+Zsc 面) 	【アンテナ 4 個】  Lバンド 受信 Lバンド 送受信兼用 Sバンド 送信・受信
衛星下面 (-Zsc 面) 	【アンテナ 3 個】  Lバンド 送受信兼用 Sバンド 送信・受信

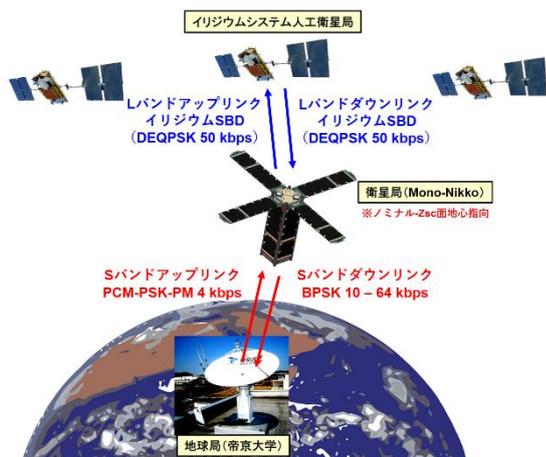


図4 宇宙空間での通信イメージ

### 3 結果及び考察

#### 3.1 機械的・熱的環境試験

##### 3.1.1 モーダルサーベイ試験

STM衛星構造の剛性(最低次固有振動数)を評価するために評価用の治具を作製し、複合環境試験装置で、モーダルサーベイ試験(試験条件:周波数5~2000Hz,加速度レベル0.5Grms,試験時間60s)を実施した。試験中の様子を図5に、試験結果を図6に示す。試験結果のPSD応答波形から、衛星構造(一次構造)の最低次固有振動数が表1の剛性要求(113Hz以上)を満たしていることが確認できた。

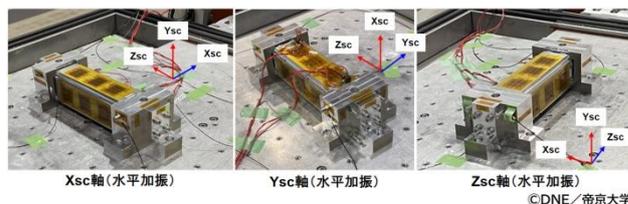


図5 衛星単体での剛性評価の様子

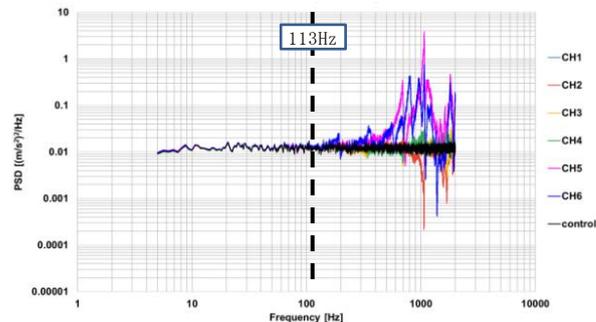


図6 モーダルサーベイ試験結果(Ysc軸)

#### 3.1.2 QTレベル振動試験

表3に記載の各振動試験について、STM衛星構造を打上げ状態に模擬するケースに収納し、QTレベルで実施した。各試験結果より、制御加速度は規定した試験公差の範囲内に収まっていることを確認し、当センターの装置で試験を実施できていることを確認した。試験中の様子を図7に示す。



図7 認定試験(QT)レベル振動試験の様子

各振動試験を実施した後、STM衛星構造の破損やファスナの緩みがないか、目視ができない位置の加速度センサが離脱していないか等を確認する必要があるため各試験の前後でモーダルサーベイ試験を実施する手法を採用した。表5に試験フローを図8に各モーダルサーベイ試験のPSD応答波形(重ね合わせ)を示す。PSD応答波形に大きな差が無いことから、STM衛星構造に異常が無いことを確認できた。

表5 試験フロー

1	モーダルサーベイ試験①
2	準静的加速度試験
3	モーダルサーベイ試験②
4	正弦波振動試験①
5	モーダルサーベイ試験③
6	正弦波振動試験②
7	モーダルサーベイ試験④
8	ランダム振動試験
9	モーダルサーベイ試験⑤

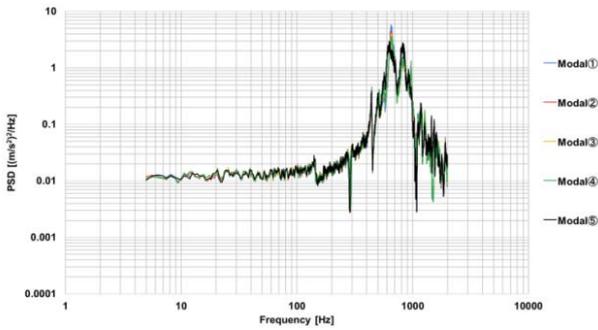


図8 各モードサーベイ PSD 応答波形 (Zsc 軸)

3. 1. 3 試験用治具

供試体を加振機に取り付けるための治具については、加振周波数範囲内において固有振動数を有しないことが重要であり、事前にモーダル解析等で検討を行ったのち製作する必要がある。本研究では、モーダル解析結果と機械的インターフェース要求に基づいて複合環境試験装置に衛星を取り付けるための治具を製作した。図9にモーダル解析結果と製作治具の外観写真を示す。

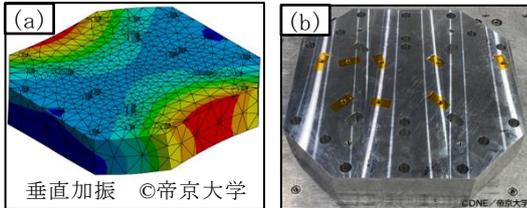


図9 振動試験ケース加振治具

(a) モーダル解析結果, (b) 外観写真

3. 1. 4 熱的環境試験

本研究では、衛星に搭載する電源 BBM ユニットに対して、ワークマンシップの確認を目的とした恒温槽での温度試験を実施した。図10に電源ユニット (BBM 品) の外観写真とバッテリーの温度計測点、表6に評価結果 (抜粋) を示す。今後さらなる検証は必要ではあるが、今回設定した評価項目に対して正常動作を確認した。

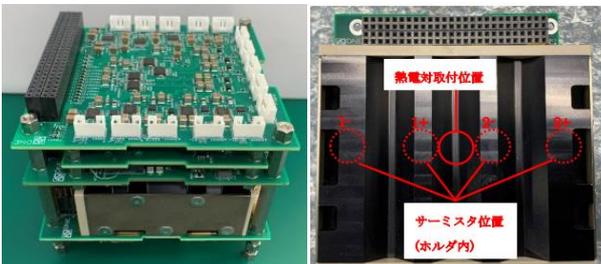


図10 電源ユニット BBM

表6 電源ユニット動作確認

試験条件	確認項目	判定
低温	バッテリーが規定温度を下回った場合、温度補償用ヒータが ON 動作するか？	○
低温	温度補償用ヒータが ON 動作時かつバッテリーが規定温度を上回った場合、温度補償用ヒータが OFF 動作するか？	○
低温	バッテリー充電が規定温度未滿で停止、規定温度以上で実行されるか？	○
高温/ 低温	設計負荷電流を出力した際の電圧変動が規定範囲に収まっているか？	○

3. 2 電磁波・アンテナ特性評価

3. 2. 1 放射パターン測定

3m 法電波暗室を使用して、搭載予定の L バンド, S バンドアンテナの放射パターン測定を行った。アンテナ間距離 3m, 高さ 1.5m, ターンテーブル側に搭載予定の被測定アンテナ (送信) を固定し、測定の標準アンテナ (受信) にはホーンアンテナ (Schwarzbeck BBHA9120B) を使用した。測定には試作ソフトウェアを開発し、ターンテーブル回転 5° 刻みで、3 回の測定データ平均値を記録することを可能とした。この結果、放射パターン形状の把握と半値幅の推定を効率化することができた。図11に試作ソフトウェア画面と測定結果例を示す。

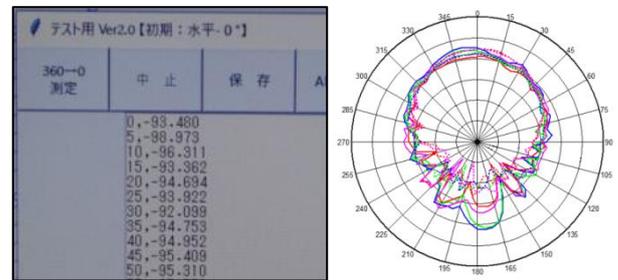


図11 ソフトウェア画面, 放射パターン比較結果例

3. 2. 2 アンテナ軸比測定

前項の放射パターン測定と同じ環境を使用して、アンテナの軸比測定を行った。軸比の測定に対応するため、ステッピングモーターと分度器を 3D プリンタで作製した治具でアンテナマストに固定できるようにした。測定ソフトウェアは、任意の角度ごとに電動あるいは手で回転させて記録する方式で開発した。測定コンフィグレーションを図12に、測定ソフトウェアと比較結果例を図13に示す。

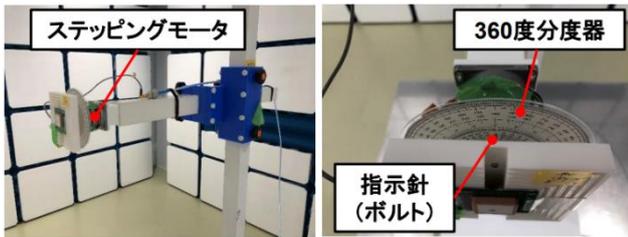


図 12 軸比測定コンフィグレーション

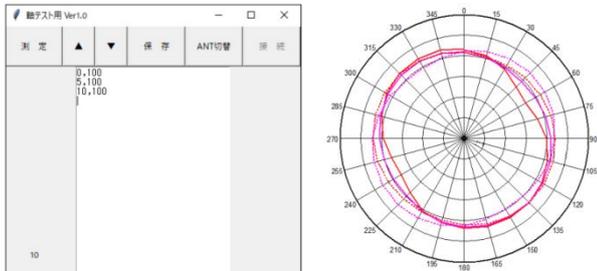


図 13 軸比測定ソフトウェア，軸比比較結果例

放射パターン測定と軸比の測定については，Sバンドのアンテナ数個を測定したグラフを掲載した。この測定結果から，本ソフトウェアによる測定データからアンテナの特性把握と比較ができることを確認した。

### 3. 2. 3 VSWR 測定

アンテナと同軸ケーブルのインピーダンス整合の評価や利得算出のため，ネットワークアナライザ (Agilent Technologies E5070B) を使用して電圧定在波比：VSWR測定を行った。図 14 に測定コンフィグレーションと測定結果例を示す。本衛星では，原則中心周波数で VSWR 値が送信アンテナで 1.5 以下，受信アンテナで 1.2 以下を設計要求とした。

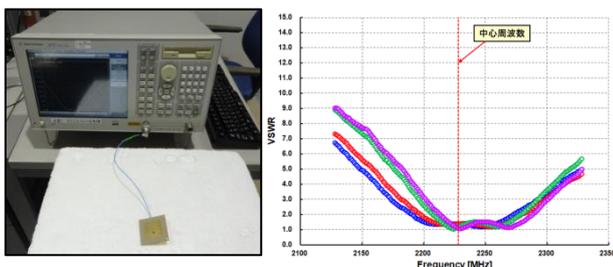


図 14 VSWR 測定コンフィグレーションと測定結果例

## 4 おわりに

本研究では，超小型衛星 (3U キューブサット) に対して，機械的・熱的環境試験，電磁波・アンテナ特性評価の試験をセンター保有の試験機器・設備を用いて実施できるかを検証した。結果について以下にまとめる。

- (1) センターの試験設備 (3m 法電波暗室，複合環境試験装置) において，超小型衛星 (3U キューブサット) の評価試験が実施可能と確認できた。
- (2) 剛性評価では，衛星単体のモーダルサーベイ試験を実施することで，STM 衛星構造 (一次構造) の固有

振動数が打上げロケットの剛性要求を満足することを確認した。また，QT レベルの振動試験では，STM 衛星構造に破損やファスナの緩み等が発生していないことを確認した。衛星構造の健全性確認手法として，3U キューブサットの場合でもモーダルサーベイ試験による評価が有効であると確認できた。

- (3) 電波特性試験では，必要な機能を有するソフトウェアを開発し測定環境を構築することで，特性評価の効率化・半自動化を実現した。その測定結果から，アンテナの特性把握と比較が可能であることを確認し，測定の妥当性を確認した。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり超小型衛星の試験手法・評価手法に関するご指導並びに技術支援をいただいた帝京大学理工学部航空宇宙工学科 准教授 河村 政昭氏に深く感謝申し上げます。

また，本事業で用いた測定機の一部は公益財団法人 JKA の補助事業によるものであり，競輪マークを記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 総務省宇宙通信政策課．“「宙を拓くタスクフォース」の取りまとめについて”．総務省．2019-5．  
<https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kiban/kiban-dai47/pdf/siryoku4.pdf>，(参照 2023-4)
- 2) 上野貴明ら：“栃木県産業技術センター研究報告”，pp22-27，(2013)：pp32-37，(2014)
- 3) 河村政昭ら：“多目的宇宙環境利用実験衛星「TeikyoSat-4」の運用状況と今後の開発計画”，第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集，日本航空宇宙学会，2023．
- 4) 柴田克哉ら：“バッテリー異常検知システム実証衛星 Mono-Nikko の開発状況”，第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集，日本航空宇宙学会，2023．
- 5) JAXA．“イプシロンロケットユーザーズマニュアル 2018 年 7 月 A 改訂版”．JAXA．2018-7．  
<https://www.jaxa.jp/projects/rockets/epsilon/pdf/EpsilonUsersManual.pdf>，(参照 2023-4)
- 6) JAXA ISAS 竹内伸介著：“日本航空宇宙学会誌 (p63) 「ええろすぺーす ABC 衛星の機械環境」”，59 巻 (2011) 685 号”．J-Stage．2019-4．  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kjsass/59/685/59\\_63/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kjsass/59/685/59_63/_pdf/-char/ja)，(参照 2023-8)
- 7) 九州工業大学．“衛星開発プロジェクト 九工大か

ら宇宙へ！超小型人工衛星「ふたば」!!”。九州工業大学. 2020-2. [https://www.kyutech.ac.jp/archives/001/202002/siryo2-1\\_20200130.pdf](https://www.kyutech.ac.jp/archives/001/202002/siryo2-1_20200130.pdf), (参照 2023-8)

- 8) JAXA 安全・信頼性推進部. “振動試験ハンドブック 2022年3月29日C改訂”. JAXA. 2022-3. <https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-130-HB003C.pdf>, (参照 2023-4)



本研究は、公益財団法人 JKA 補助事業により整備した機器を活用して実施しました。