



膜展開式軌道離脱装置実証衛星 FREEDOM

2017年3月4日

株式会社中島田鉄工所

■ 中島田鉄工所

- 所在地 : 福岡県八女郡**広川町**
- 設立 : 昭和26年10月(創業**明治44年**5月)
- 資本金 : 4500万円
- 代表者 : 代表取締役社長 中島田正宏
- 従業員数 : 約140名
- 事業内容 : **ヘッダー・パーツフォーマー**の
設計・製作・販売・アフターサービス



機械工場



組立工場

■ ヘッダー・パーツフォーマーとは？

- 金属をプレスしてネジやボルトの頭部を製作する機械のこと。
- 「ヘッダー(Header)」の語源は「ねじの頭を整形すること」に由来。



航空機・自動車用ボルト



携帯電話・計算機・時計用パーツ

■航空宇宙関連事業

2005年頃	新規事業開拓・技術向上のため航空宇宙関連の勉強会に出席し始める。 九州大学の研究に部品加工で協力し始める。
2009年 ～2011年	九州大学と共同で非火薬式分離機構を開発する。
2010年	東北大学と共同で 膜展開式軌道離脱装置DOM の開発を始める。
2013年	九航協の活動として航空機部品を試作する。
2014年4月	東北大学と共同で 超小型衛星FREEDOM の開発を始める。
2014年9月	国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟から 超小型衛星を放出するミッション にFREEDOMが選定される。



DOMシリーズ



超小型衛星用非火薬式分離機構

Nakashimada Engineering Works, Ltd.



航空機部品

■超小型衛星FREEDOM

FREEDOM

“Falling and Re-Entering Equipment called DOM”

(DOMと呼ばれる，落下し再突入するための装置)

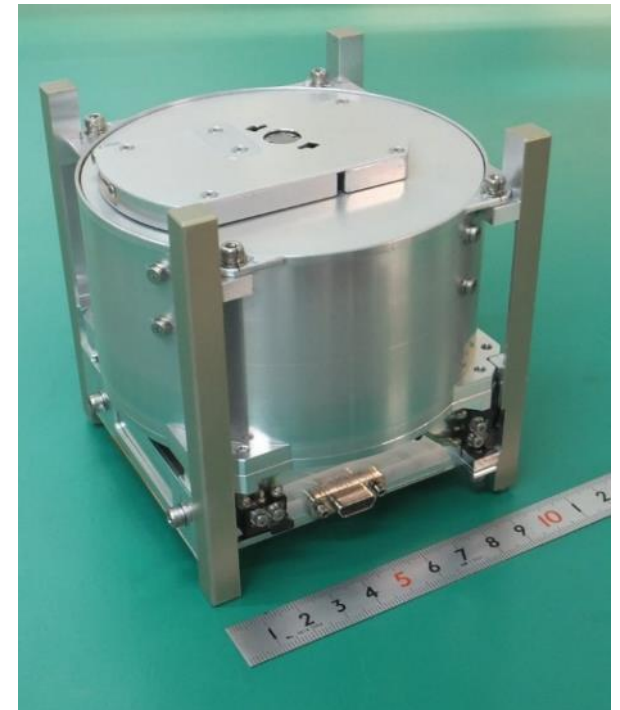
に由来。

DOM

“De-Orbit Mechanism”

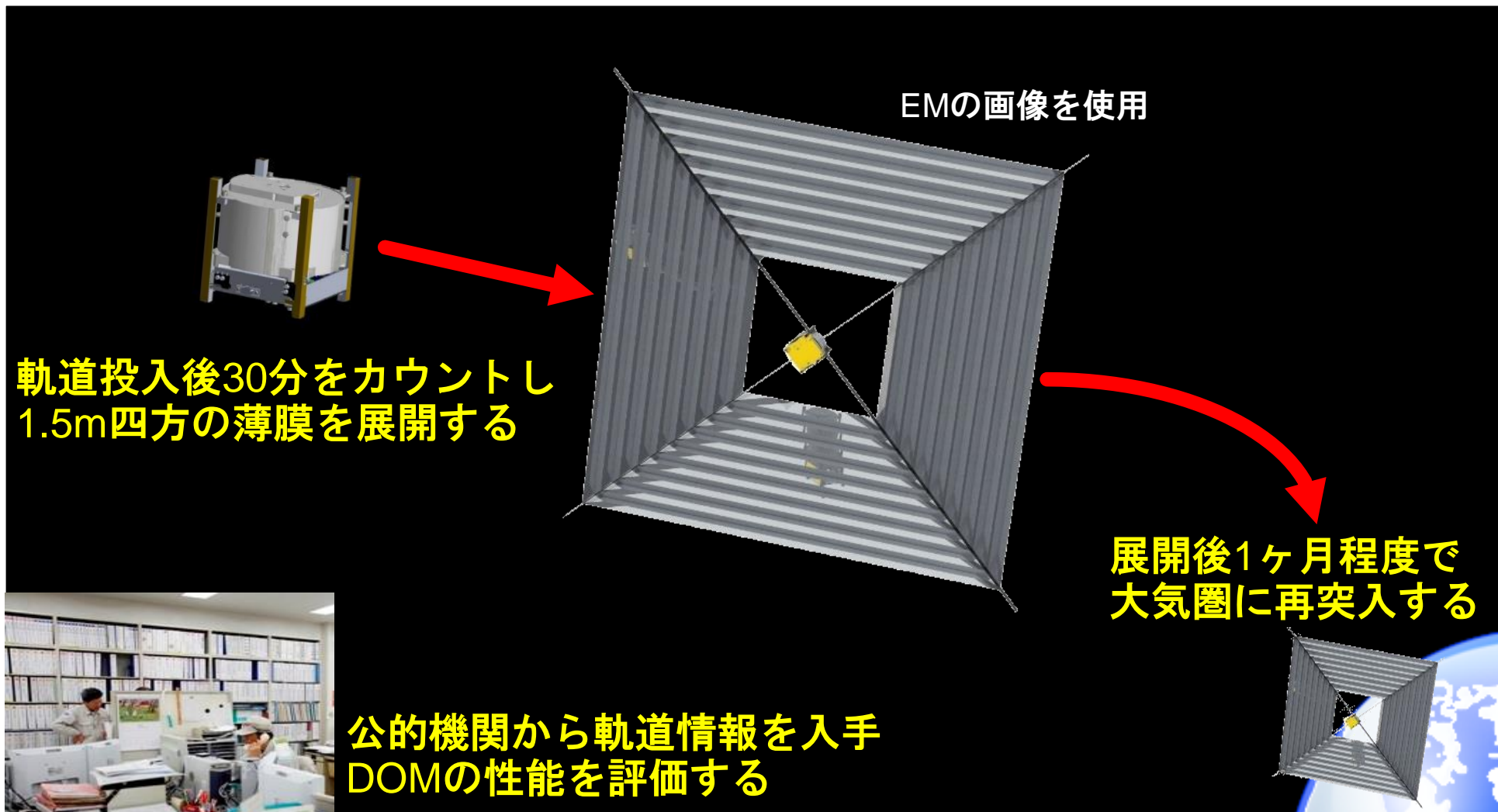
膜展開式軌道離脱装置

薄膜を展開し大気抵抗を増大させることにより
小型衛星を軌道から離脱させるための装置



FREEDOMの外観(膜収納時)

■FREEDOMのミッション



■ ミッション成功基準

■ ミニマムサクセス

- 公的機関からの情報による初期軌道の特定
- 1ヶ月間に渡る軌道の遷移情報の蓄積

■ フルサクセス

- 地球大気圏再突入までの軌道の遷移情報の蓄積
- シミュレーション結果との比較検証を通じた性能評価

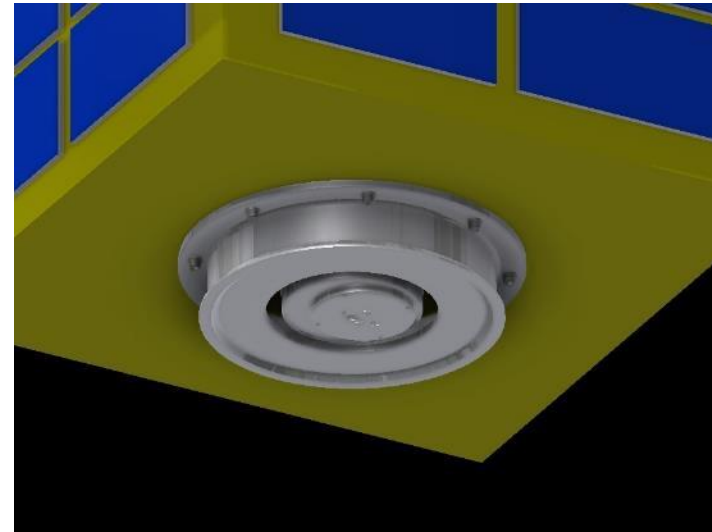
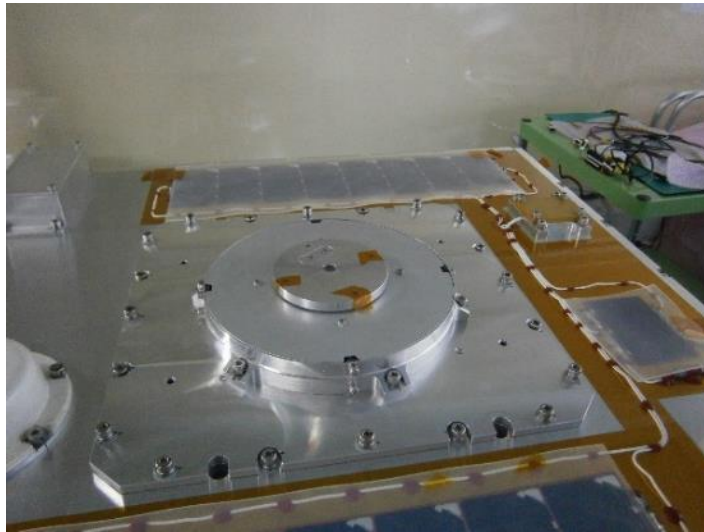
■ エキストラサクセス

- 1ヶ月以内の地球大気圏再突入
- 風見安定度が軌道遷移に及ぼす影響の究明

■期待される成果

膜展開式軌道離脱装置の実用化により

- 小型衛星の軌道離脱手段を確立
- 世界に先駆けた軌道離脱手段の標準化の促進に貢献



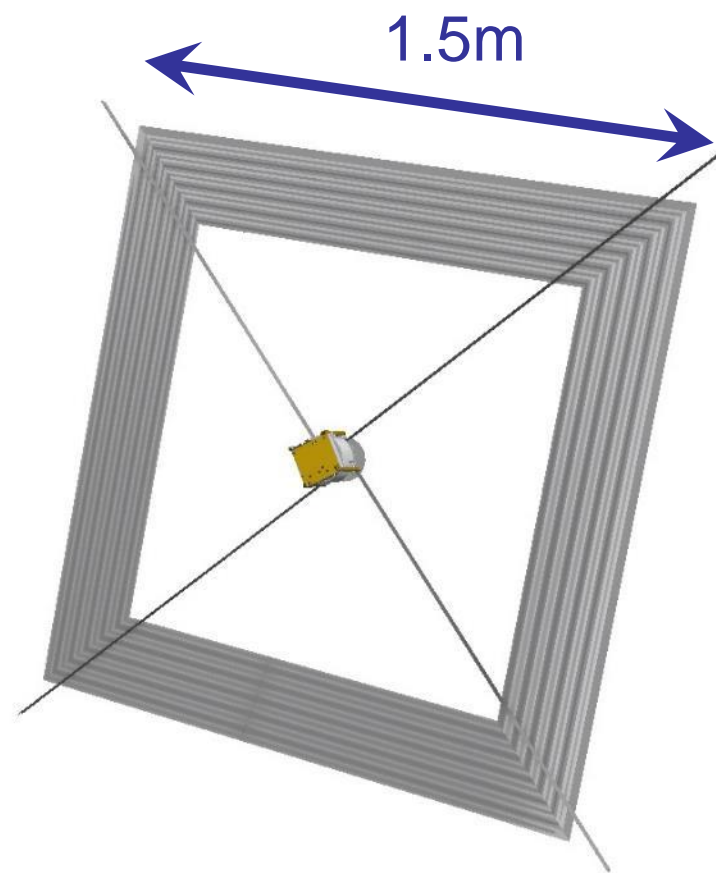
50kg級衛星に搭載されたDOM

Nakashimada Engineering Works, Ltd.

■主要諸元

FREEDOMの主要諸元

質量	1.3kg
サイズ	1U CubeSat
膜寸法	1.5m四方
軌道	高度400km・軌道傾斜角 51.6° の円軌道
ミッション期間	1ヶ月程度
ペイロード	膜展開式軌道離脱装置DOM1500
姿勢制御	制御しない
通信	通信しない
電力	ニッケル水素電池, 5V, 2450mAh, 一次電池のみ



FREEDOM FM の外観(膜展開時)

■実施体制

実行組織：FREEDOM開発チーム

代表機関：中島田鉄工所

- 実施責任者：宇戸大樹
- 社員3名が参加
- DOMの設計・製造・動作確認を担当



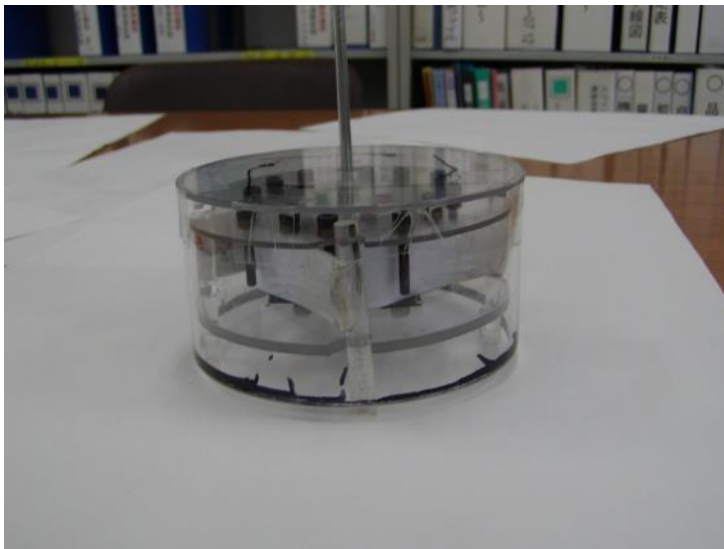
協力機関：東北大学

- 各種作業を計画・管理・主導
- 教員・学生 計2名が参加
- DOMを除く各系を担当
- 九州大学OBが活躍している



プロジェクト背景

- 近年世界的に**超小型人工衛星**による宇宙利用が活発化している。
- 一方、**スペースデブリ化防止**のため、運用が終了した衛星を軌道から除去することが重要になってきている。
- 「運用終了後**25年程度**での軌道離脱」**IADC**から勧告が出ている。
IADC: Inter-Agency Space Debris Coordination Committee
- 2010年、東北大学と中島田鉄工所は**DOM**の研究開発を開始。



開発初期のDOM(2010年12月頃)

■ プロジェクト背景

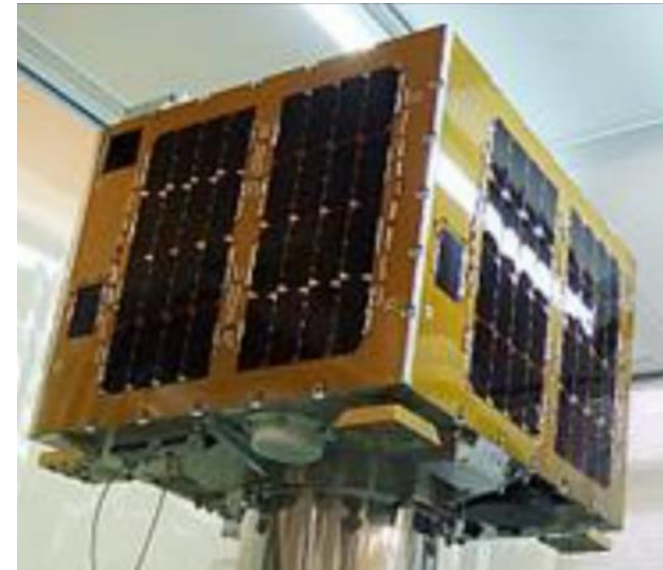
開発段階のDOMが過去に**2度**，軌道投入された。

CubeSat RAIKO（DOM500を搭載）



- 2012年10月 軌道投入
- コマンドが通らなくなり，DOMを駆動できなかった

RISING-2（DOM1500を搭載）



- 2014年5月 打ち上げ
- DOMの駆動は2016年以降の予定



DOMの確実な駆動とタイムスパン短縮のために
宇宙での膜展開のみのミッションが必要。

■プロジェクト背景

薄膜を展開するミッションが**世界各国**で**進行中**.
主導権をとるためには**宇宙実証の継続**が**不可欠**.

薄膜を展開するミッションの比較¹⁾

開発機関	JAXA(日本)	NASA(米国)	Surrey Space Centre(英国)他	MMA Design(米国)	日本大学(日本)
衛星名称	IKAROS	NanoSail-D2	Deorbisail	STPSat-3	SPROUT
膜面積	200m ²	10m ²	16m ²	14m ²	1m ²
膜サイズ	14m × 14m	3.2m × 3.2m相当	4m × 4m	3.8m × 3.8m相当	一辺1.5m 正三角形
衛星質量	300kg	4kg	3kg	180kg	7.1kg
支持部材	テザー, 先端マス	ブーム	ブーム	ブーム	インフレータブルチューブ
進捗状況	2010年6月 宇宙実証に成功	2011年1月 宇宙実証に成功	2015年7月 打ち上げ 膜展開は失敗	2013年11月 打ち上げ, 2016 年1月軌道離脱 成功	2015年10月 膜展開実施 完全な展開はならず

■ ミッション機器

DOM1500

- 薄膜を展開し**大気抵抗を増大**させることにより小型衛星を**軌道から離脱**させるための装置。
- 数字は膜のサイズを表している。膜のサイズ1500mm四方。



膜収納時外観(Φ110mm×75mm)



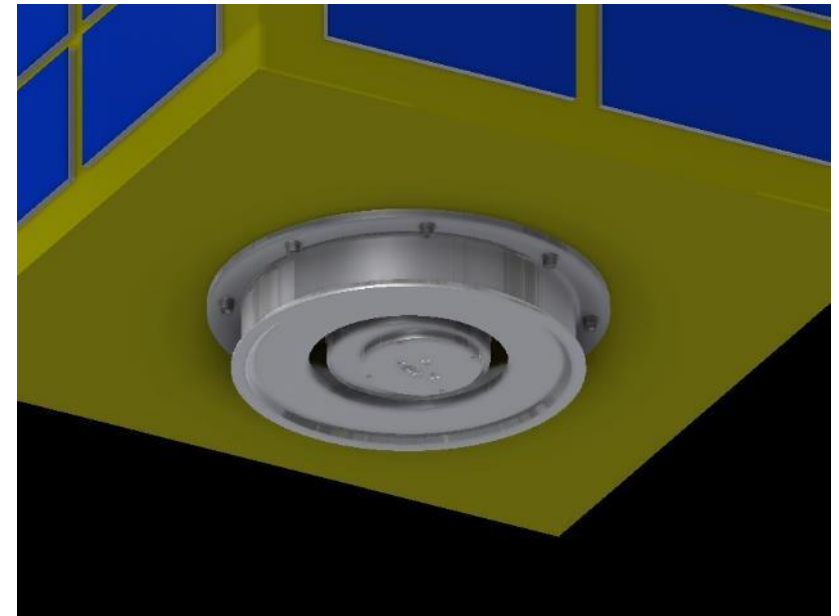
膜展開後外観(EMの写真)

■ 50kg級衛星用の装置

- 本来DOMは50kg級衛星用に開発された装置である。
- DOMはPAF239Mの内部に搭載可能。

PAF239M：50kg級衛星用ロケットインターフェースシリンダ

- 50kg級副衛星用標準軌道離脱手段として実利用化の可能性が非常に高い。
- 世界に先駆けた軌道離脱手段の標準化の促進に貢献できる。

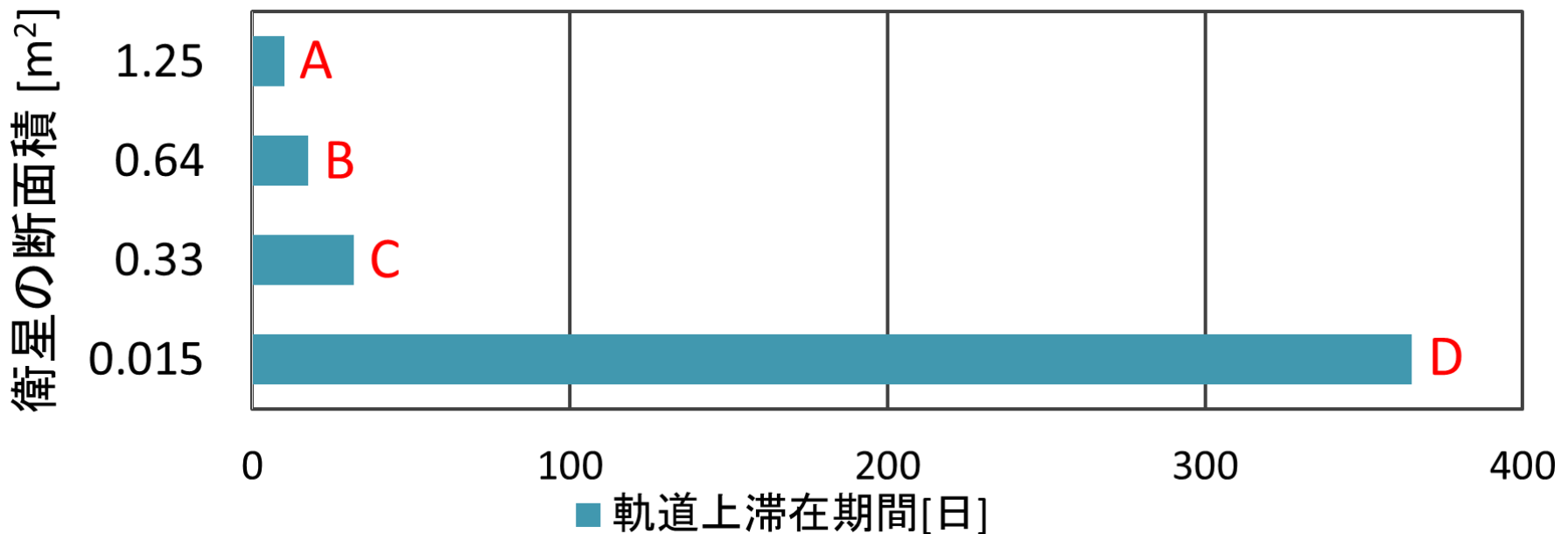


搭載イメージ図

■軌道寿命予測

高度400kmから放出するとして計算すると、

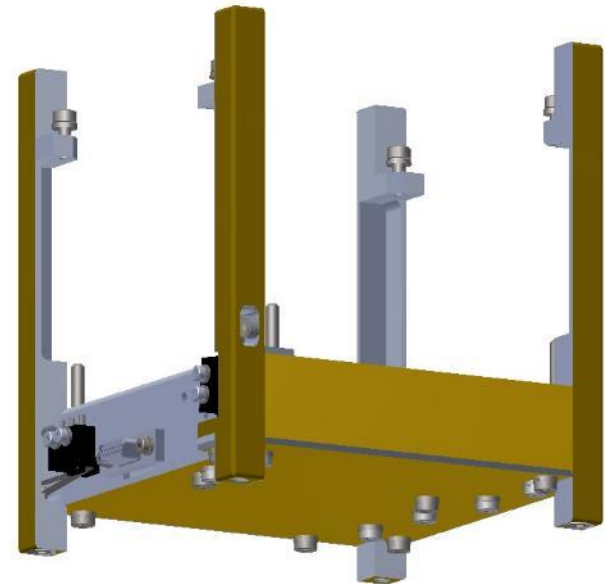
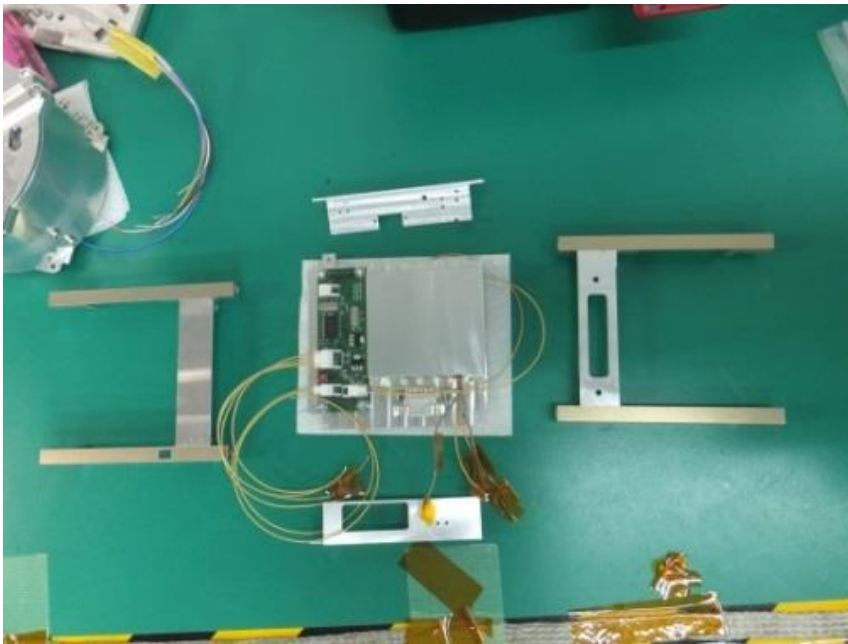
- A) 膜が展開し、最も有効に機能する状態となった場合：約10日
- B) 膜が展開し、全期間において平均的に機能した場合：約17.5日
- C) 膜が展開したものの、効果が弱かった場合：約32日
- D) 膜が展開しなかった場合：約1年



FREEDOMの軌道寿命予測(高度400kmから放出した場合)

■ 構体・機構系

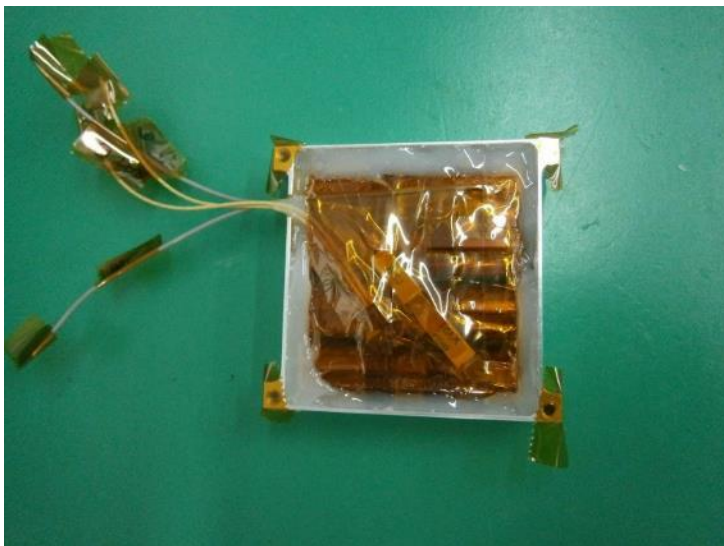
- レールパーツ2個とパネルパーツ3個で構成。
- 材質はアルミ合金(A5052, A7075)。
- パネルの厚さは1~2mm。
- レールは8.5mm角。



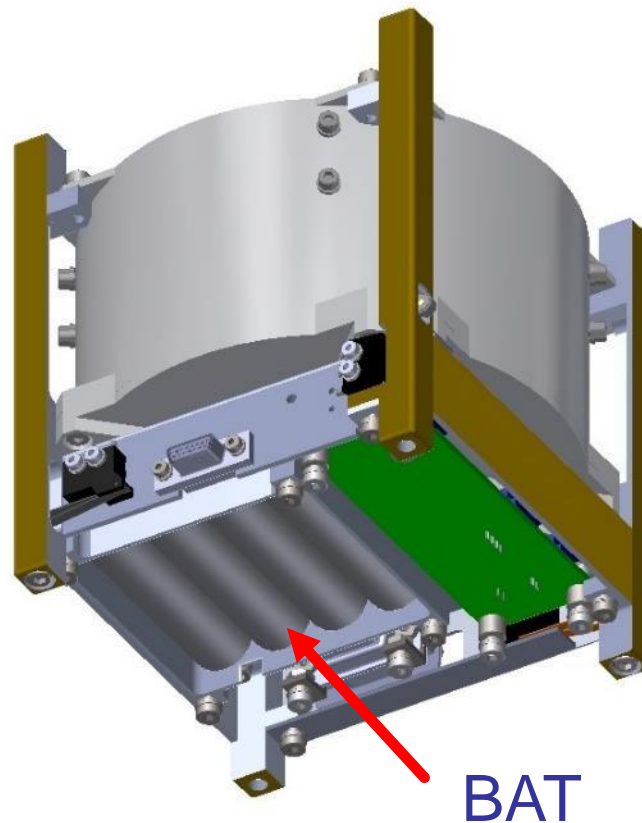
FREEDOM構体

■電源系

- エネルギープロ単三 4直.
- 電圧5V, 容量2450mAh.
- PTC(Positive Thermal Coefficient)素子2個.



BAT (Battery Unit)



充放電可能な電池だが、
一次電池としてのみ使用する。

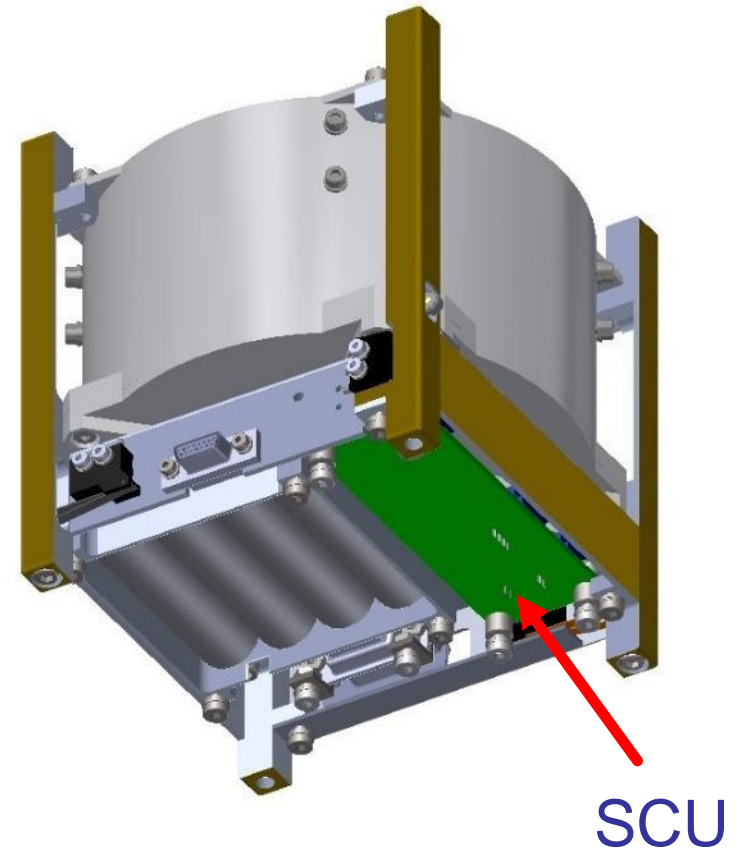
■ 衛星制御系

衛星制御装置SCUの機能

- 放出から一定時間(30分)の**待機**.
- DOMの**展開信号**の出力.
- 展開後の**動作停止**.



SCU (Satellite Central Unit)

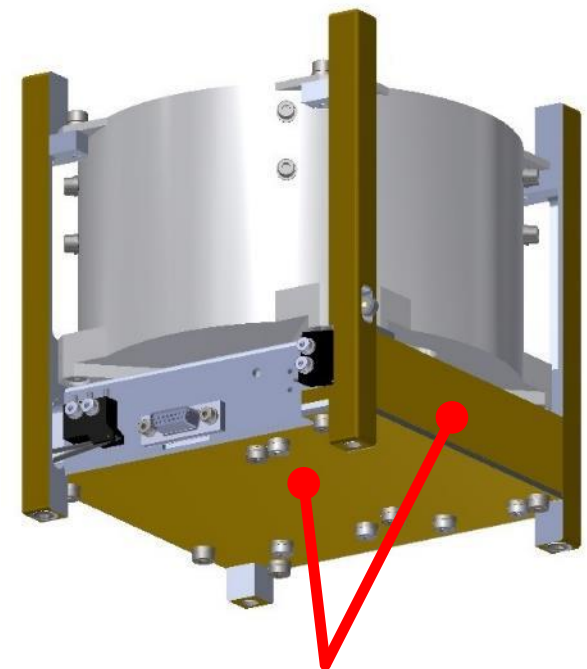


■ 熱制御系

- 熱制御方式は**受動制御**.
- **カプトンテープ**を貼る割合を調整することにより、衛星の温度を運用可能な領域に制御する。

表面材質の熱光学特性

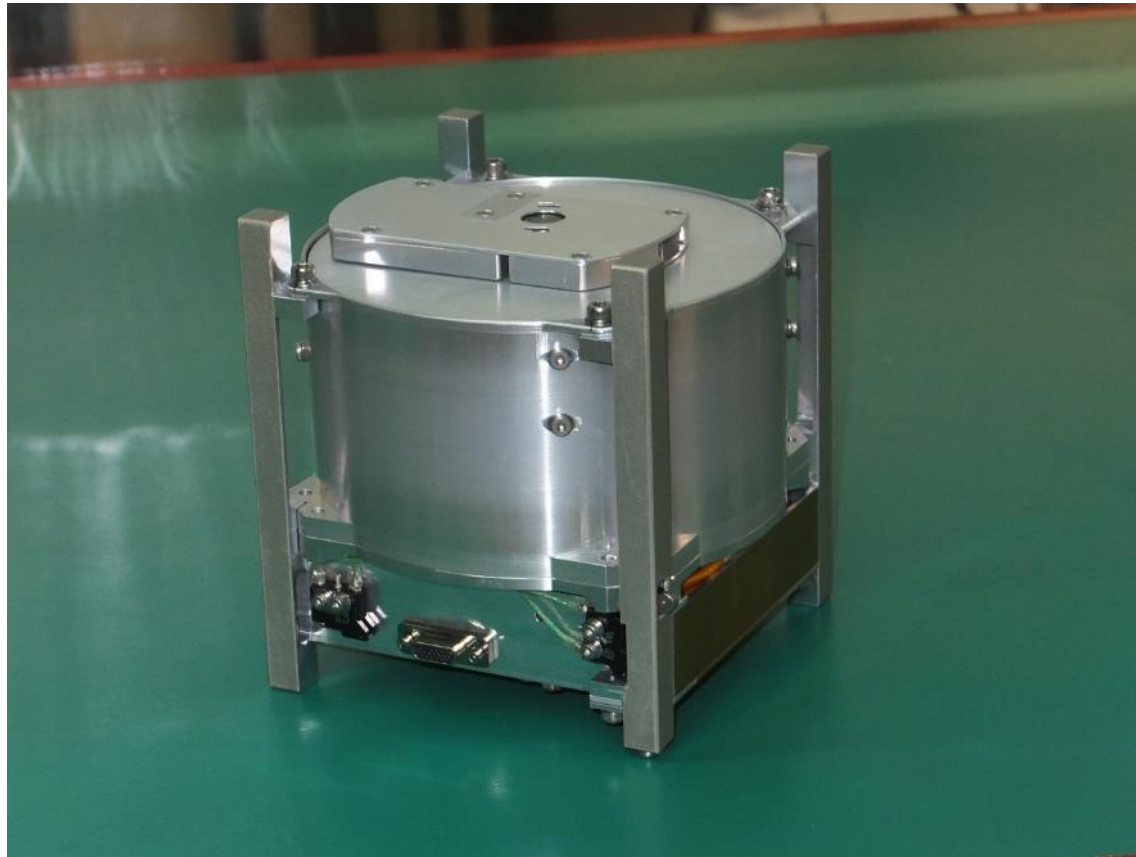
材質	平均太陽光 吸収率 α	平均赤外 放射率 ε	効果
Aluminum	0.26	0.03	吸熱
Kapton	0.52	0.76	放熱



カプトンテープ(熱制御材)
適用領域

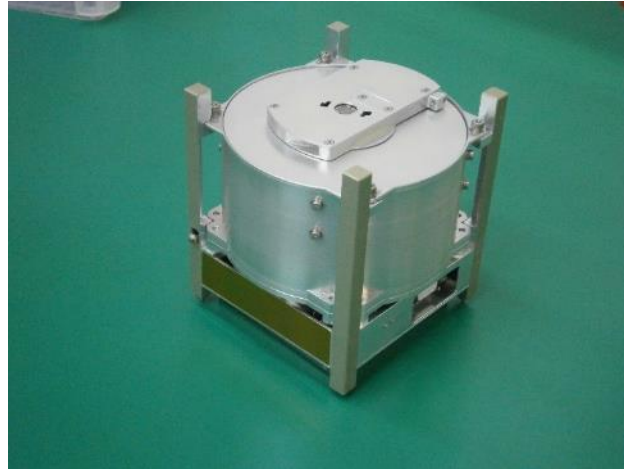
■FREEDOMの開発状況

2015年12月，FM(フライトモデル)の開発を完了した。



最終組み立て後のFREEDOM FM

■引渡し前作業 2016年11月4日～6日 東北大学



外観検査



ねじの緩み検査



BAT充放電

■ JAXA衛星引渡し・インテグレーション

- 2016年11月7日～9日
- JAXA筑波宇宙センター



引き渡し時のFREEDOM (C)JAXA



衛星搭載ケースJ-SSOD (C)JAXA

■打ち上げ・ISSへの輸送

- 2016年12月9日 22時26分47秒
- 種子島宇宙センター
FREEDOMを搭載した「こうのとり」6号機打ち上げ
- 2016年12月14日 3時24分
「こうのとり」が国際宇宙ステーションに結合



「こうのとり」6号機の打ち上げ

撮影: 畑村透

■軌道放出

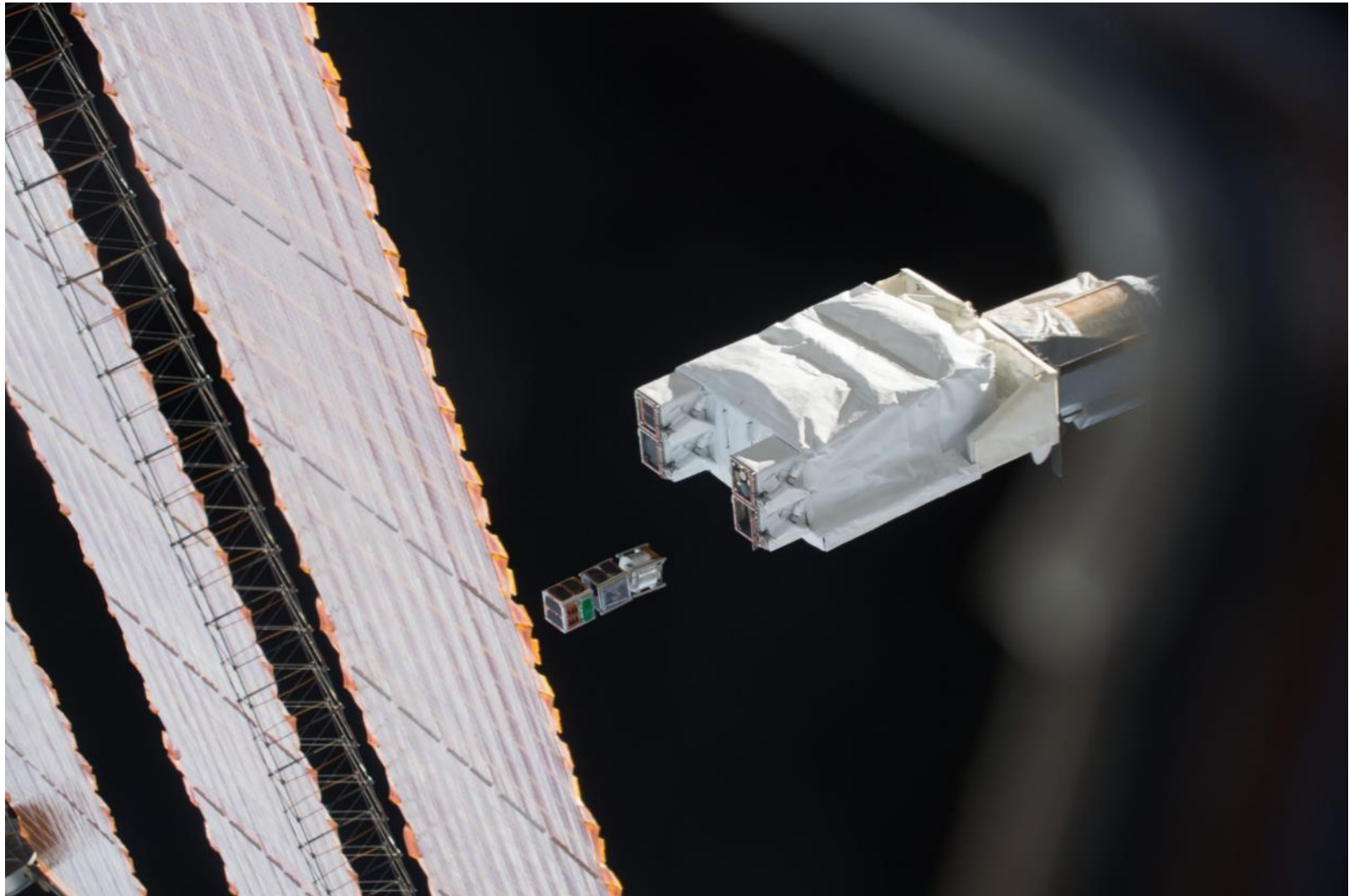
2017年1月16日 18時10分

- 「きぼう」日本実験棟.
- 高度400km, 軌道傾斜角 51.6° の円軌道.
- JAXAが開発した**能力向上型J-SSOD** (JEM Small Satellite Orbital Deployer) により放出.
- 同じ日に**6機**のCubeSatが放出された.

1月16日に「きぼう」から放出されたCubeSat

放出時刻	衛星名	サイズ	開発機関
18時10分	ITF-2	1U	筑波大学
	WASEDA-SAT3	1U	早稲田大学
	FREEDOM	1U	中島田鉄工所/東北大学
18時20分	EGG	3U	東京大学
19時40分	AOBA-VeloxIII	2U	九州工業大学/Nanyang Technological University
19時50分	TuPOD	3U	JAMSS/GAUSS社/Tancred小学校・INPE/OSN社

■軌道放出



「きぼう」から放出されたITF-2, WASEDA-SAT3, FREEDOM (C)JAXA/NASA

■軌道放出



「きぼう」から放出されたITF-2, WASEDA-SAT3, FREEDOM (C)JAXA/NASA

■最初のTLE

2017年1月18日

- 16日に放出された6機の衛星のTLE(Two Line Element)が公開された (NORAD Catalog ID: 41930 - 41935).
- その中に1つだけ、**大気抵抗**の大きさを表す**B*項**が大きいものがあった (NORAD Catalog ID: 41930).
- 41930のB*項は、他の5機の10倍程度.

$$B^* = \frac{1}{2} \frac{C_D A}{m} \rho_0 R$$

C_D : 抗力係数 A : 断面積 ρ_0 : 近心点における大気密度 R : 地球の半径

m : 質量

■ 41930の地球大気圏再突入

2017年2月7日

- 41930の軌道高度が約250km以下に降下.
- 公的機関による軌道追尾が終了.
- その後約1日で大気圏に再突入したと考えられる.
- 軌道上滞在時間は約22日.

(その他の5機は高度400km付近を飛行)

■ 41930はどの衛星か

各衛星の展開膜の有無と放出後の状況³⁾

衛星名	展開膜	状況(2月7日時点)
AOBA-VeloxIII	-	通信に成功
ITF-2	-	通信に成功
TuPOD	-	通信, 子衛星の放出に成功
EGG	あり	通信に成功, 膜展開していない
FREEDOM	あり	?
WASEDA-SAT3	あり	1月30日の時点で膜展開していない

➡ **41930はFREEDOM**であると考えられる。

2月9日, 公的機関(Space-Track)が提供する軌道情報においても, 41930がFREEDOMであると識別された。

■ ミッション達成状況

FREEDOMのミッション達成状況

	成功基準	現状の成果
ミニマム サクセス	公的機関からの情報による初期軌道の特定	達成
	1か月に渡る軌道の遷移情報の蓄積	達成
フル サクセス	地球大気圏再突入までの軌道の遷移情報の蓄積	達成
	シミュレーション結果との比較検証を通じた性能評価	達成
エキストラ サクセス	1か月以内の地球大気圏再突入	達成
	風見安定度が軌道遷移に及ぼす影響の究明	今後詳細を解析

■まとめ

- **FREEDOM**は膜展開式軌道離脱装置**DOM**の宇宙実証を目的とする**1U CubeSat**である。
- 1月16日，**FREEDOM**を含む**6機**の衛星が「きぼう」日本実験棟から放出された。
- **6機**の衛星のうち**1機**だけ当初より**大気抵抗が大きいもの**があり，それが**FREEDOM**であると識別された。
- 2月6日，**FREEDOM**は高度**250km**以下となり，その後**1日**程度で地球大気圏に再突入したと考えられる。
- **FREEDOM**は**薄膜展開**と**軌道離脱**ミッションに**成功**した。

■ 謝辞

- 実験開始までの長期に渡りたくさんの方々の援助に支えられて、このような成果を得ることができました。これまでに世話になりました皆様に深く感謝いたします。
- 今回の成果は、JAXAが実施する制度である国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟からの超小型衛星の放出機会提供(無償の仕組み)を利用することで達成することができました。JAXAならびに関係者の皆様に重ねて深く感謝いたします。

ご清聴ありがとうございました。

持続可能な宇宙利用のため
FREEDOMとDOMを
何卒よろしくお願いします。

注

- 1) JAXA 「小型ソーラー電力セイル実証機IKAROS」 <<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/ikaros/index.shtml>>(2015年9月7日閲覧),
NASA “Small Satellite Mission” <http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html>
(2015年9月7日閲覧),
University of Surrey “Deorbisail” <http://www.surrey.ac.uk/ssc/research/space_vehicle_control/deorbisail/index.htm> (2015年9月7日閲覧),
ARRL “DeorbitSail Satellite Unsuccessful in Deploying Sail” <<http://www.arrl.org/news/deorbisail-satellite-unsuccessful-in-deploying-sail>> (2016年5月16日閲覧)
MMA Design “DragNET De-orbit System” <<http://www.mmadesignllc.com/products/dragnet-de-orbit-system>> (2016年12月3日閲覧),
日本大学 “SPROUT” <<http://sat.aero.cst.nihon-u.ac.jp/sprout>> (2016年5月16日閲覧)
より作成.
- 2) 鈴木弘一 『はじめての宇宙工学』 P14表2.1, 2007. より作成.

注

- 3) 九州工業大学「九工大 人工衛星開発プロジェクト ～あおば～」 <<http://aoba2016.blog.fc2.com/>> (2017年2月28日閲覧),
筑波大学「ITF-2運用情報」 <<https://operationitf-2.blogspot.jp/>> (2017年2月28日閲覧),
GAUSS “GAUSS Srl” <<https://www.gaussteam.com/tag/tupod/>> (2017年2月28日閲覧),
ISAS/JAXA「柔軟構造大気突入システムの開発」 <<http://gd.isas.jaxa.jp/~kzyamada/MAAC/>>
(2017年2月28日閲覧)
早稲田大学 “Waseda-sat3” <https://twitter.com/Waseda_sat3/with_replies> (2016年12月3日
閲覧),
より作成.