

C12

**当社のデブリ除去の取り組みと
デブリ捕獲システム超小型実証衛星（DRUMS）の運用状況**
Our Debris Removal Efforts and the Operational Status
of the Debris Removal Unprecedented Micro-Satellite (DRUMS)

○菅原靖敬, 松下悠里, 山崎裕司, 森田大地, 町野泰章, 丸山辰也, 田中稔久
(KHI 航空宇宙システムカンパニー)

○SUGAWARA Yasutaka, MATSUSHITA Yuri, YAMASAKI Hiroshi, MORITA Daichi, MACHINO Yasuaki,
MARUYAMA Tatsuya, TANAKA Toshihisa
(Space Systems Engineering Department, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

我々のデブリ除去の取り組みと、軌道上での要素技術実証のために開発したデブリ捕獲システム超小型実証衛星（DRUMS）の運用状況について報告する。

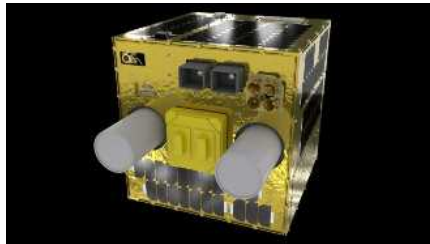
We will report on our debris removal efforts and the operational status of the Debris Removal Unprecedented Micro-satellite (DRUMS) we developed for demonstrating elemental technologies on-orbit.

C12

22KT021307

Our Debris Removal Efforts and the Operational Status of the Debris Removal Unprecedented Micro-Satellite(DRUMS)

当社のデブリ除去の取り組みとデブリ捕獲システム 超小型実証衛星 (DRUMS) の運用状況



10th Space Debris Workshop, November 30th, 2022

Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

2022/11/30 @第10回スペースデブリワークショップ 川崎重工業株式会社

 **Kawasaki**
Powering your potential

What is DRUMS はじめに

DRUMS (*Debris Removal Unprecedented Micro-Satellite*)

・ Kawasaki Heavy Industries, Ltd. developed DRUMS for demonstrating elemental on-orbit technologies of ADR.

川崎重工業はADR要素技術の軌道上実証を目的として、超小型衛星DRUMSを開発

・ DRUMS was launched on November 9th 2021 as one of the payloads of “Innovative Satellite Technology Demonstration Program”.

革新的衛星技術実証プログラム2号機に選定され、2021年11月9日にイプシロンロケット5号機にて軌道投入

Agenda 目次

1. Background 背景
2. Overview of mission and DRUMS system
ミッション概要とDRUMSシステム
3. Operation 運用
4. Evaluation results by on-orbit measurements
軌道上評価
5. Conclusion おわりに



Work at launch site (Aug. 2021)
射場作業 (2021/8)

<https://fanfun.jaxa.jp/topics/detail/19220.html>



launch (Nov. 9th 2021)
打上げ (2021/11/9)

https://www.mext.go.jp/b_menu/da/ijin/detail/1421560_00002.html

1. Background 背景

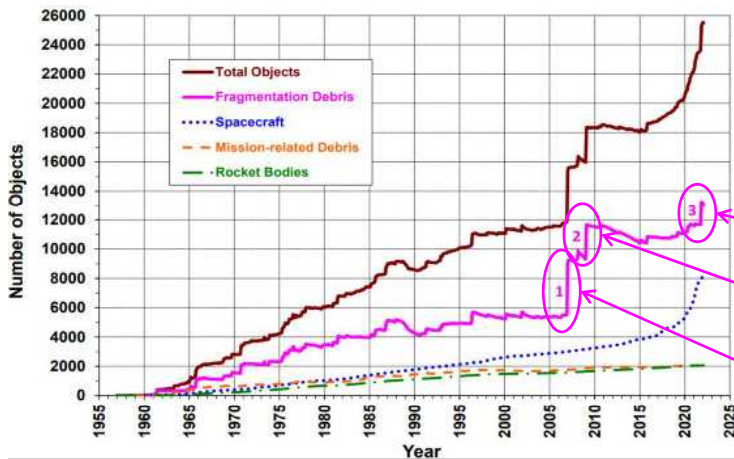
1. 1 Increasing space debris スペースデブリの増加

Negative impact of debris collision/explosion in orbit 軌道上でデブリが衝突/爆発する悪影響

- ① Debris collision with an operational satellite can cause catastrophic damage.
運用中の衛星にデブリが衝突した場合、致命的な損傷を引き起こす可能性がある
- ② Deteriorated orbital environment will constrain future satellite launches
軌道環境が悪化し、将来衛星の打上制約となる

Current orbital environment 現状の軌道環境

- Collision flux between debris and operational satellite is approximately 0.01/m²/year in SSO at 600-800km altitude.
600-800km帯の太陽同期軌道では、デブリと運用衛星の衝突フラックスは0.01/m²/年オーダー
 - The number of orbital objects has been increasing due to large constellation.
近年は大規模コンステレーションの構築等で打上物体数が増加
- ⇒ The risk of Kessler Syndrome is growing このまま軌道環境を放置するとケスラー症候群が発生する危険性



Improvement of orbital environment is an urgent issue.
軌道環境改善は喫緊の課題

- 1 Russia's ASAT test (2021)
ロシア衛星破壊兵器実験(2021)
- 2 2009 satellite collision
米露通信衛星の衝突事故(2009)
- 3 China's ASAT test (2007)
中国衛星破壊兵器実験(2007)

NASA Orbital Debris Quarterly News, Vol.26, Issue 1, pp. 2, 2022.

1. Background 背景

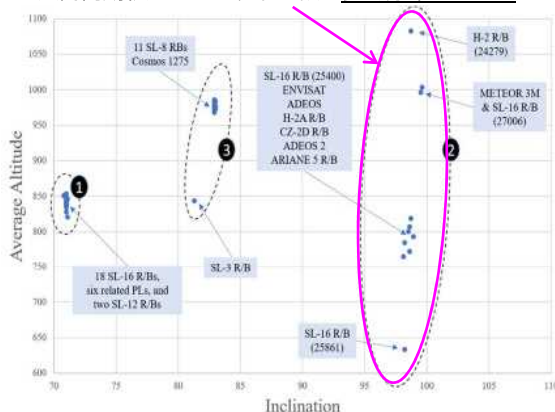
1. 2 Target debris 対象物体

Improvement of orbital environment in LEO 低軌道の軌道環境改善

- Larger debris removal (ex. upper stages, large satellites) with a risk of large impact in collision occurrence are effective to avoid Kessler Syndrome.
大型デブリ (ロケット上段、大型衛星) の除去が有効
 - Most conventional upper stages have no deorbit functions.
既存大型デブリの多くは自身で軌道離脱するシステムを持たない/機能していない
- ⇒ ADR servicing is required, which contains rendezvous, capture and deorbit.
⇒ 除去衛星がデブリ付近まで接近・捕獲・軌道降下する一連のADRサービスが必要

Upper stages of rockets ロケット上段

- Upper stages have similar characteristics in their shapes and the satellite separation parts. These characteristics enable to share a capturing mechanism.
形状が類似しており、ミッションごとに形態が異なる衛星と比較して捕獲しやすい
- Many upper stages are distributed in SSO
太陽同期軌道にロケット上段が多く分布している



KHI aims to realize ADR for upper stages in SSO
KHIは太陽同期軌道のロケット上段を対象としたADR実現を目指す

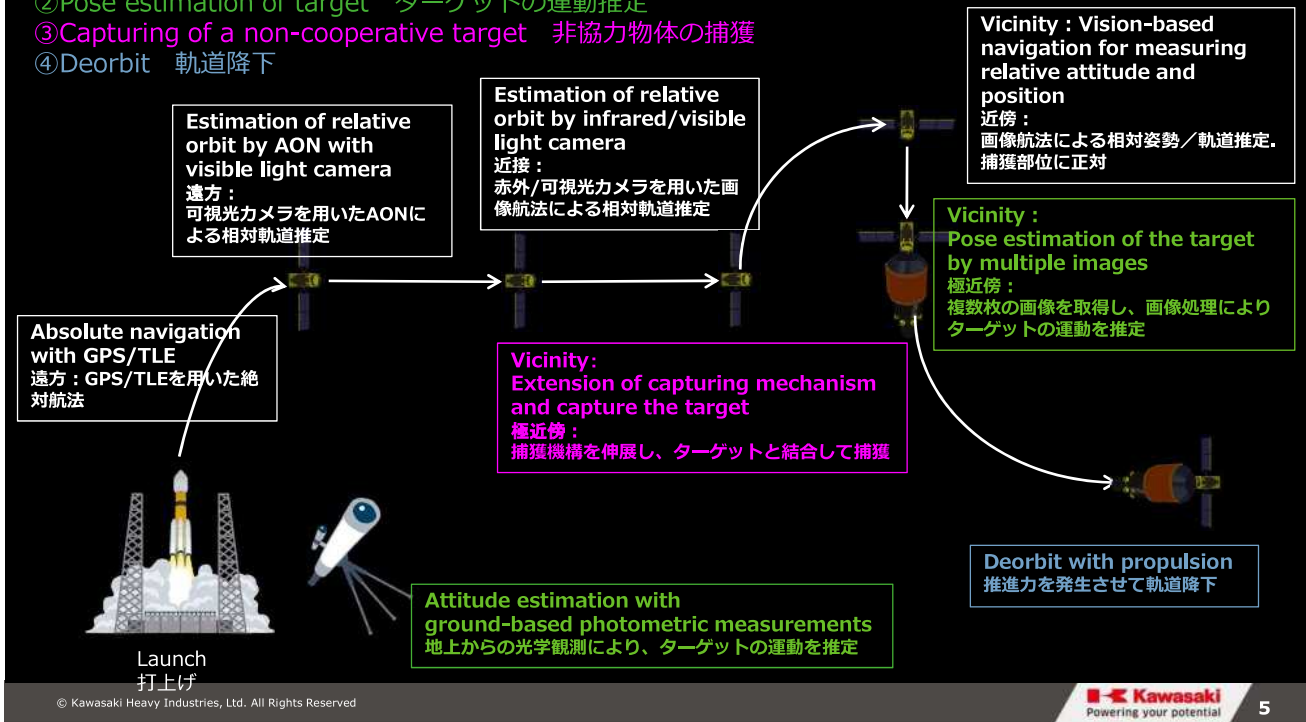
D. McKnight, et al.: 'Updating the Massiue Collision Monitoring Activity – Creating a Collision Risk Continuum', 8th European Conference on Space Debris, Vol.8, Issue 1, 2021.

1. Background 背景

1. 3 Key technologies キー技術

ADR key technologies ADRのキー技術

- ① Rendezvous to a non-cooperative target ⇒ change the approach method in relative distance range
非協力物体への接近→相対距離域で手法を切り替える必要がある
- ② Pose estimation of target ターゲットの運動推定
- ③ Capturing of a non-cooperative target 非協力物体の捕獲
- ④ Deorbit 軌道降下



2. Overview of mission and DRUMS system ミッション概要とDRUMSシステム

2. 1 Mission requirement ミッション要求

・ Since a micro satellite system has limited resources, two essential technologies (mission requirements) to be demonstrated were selected among many technologies to provide ADR servicing in orbit. ADR衛星のキー技術のうち、地上での実証が難しい技術をDRUMSで軌道上実証する。DRUMSは50kg級超小型衛星で、搭載できる機器が限られていることを考慮し、2点のミッション要求を設定。

(a) Non-cooperative approach : 非協力物体への接近技術

DRUMS demonstrates vision-based navigation for measuring relative positions between satellites and uncooperative objects in the vicinity of the target.

衛星と非協力物体の相対位置を測定するため、可視光カメラを基調とする画像航法を実証

(b) Capturing technology : 非協力物体の捕獲技術

DRUMS demonstrates the extension boom of the capturing mechanism, which is the main component of the debris capturing system.

デブリ捕獲の主要構成要素である捕獲機構の伸展ブームおよび模擬捕獲を実証

DRUMS

DRUMS demonstrates vision-based navigation for measuring relative positions (DRUMS)相対位置を測定するため可視光カメラを基調とする画像航法を実証

DRUMS demonstrates the extension boom of the capturing mechanism (DRUMS) 捕獲機構の伸展ブームおよび模擬捕獲を実証

ADR key technologies

Estimation of relative orbit by infrared/visible light camera
近接: 赤外/可視光カメラを用いた画像航法による相対軌道推定

Vicinity: vision-based navigation for measuring relative attitude and position.
近傍: 画像航法による相対姿勢/軌道推定、捕獲部位に正対

Vicinity: Extend capturing mechanism and capture the target
極近傍: 捕獲機構を伸展し、ターゲットと結合して捕獲

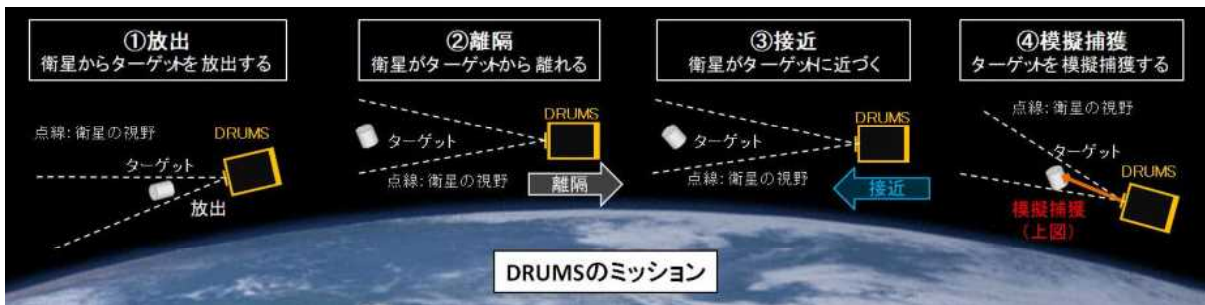
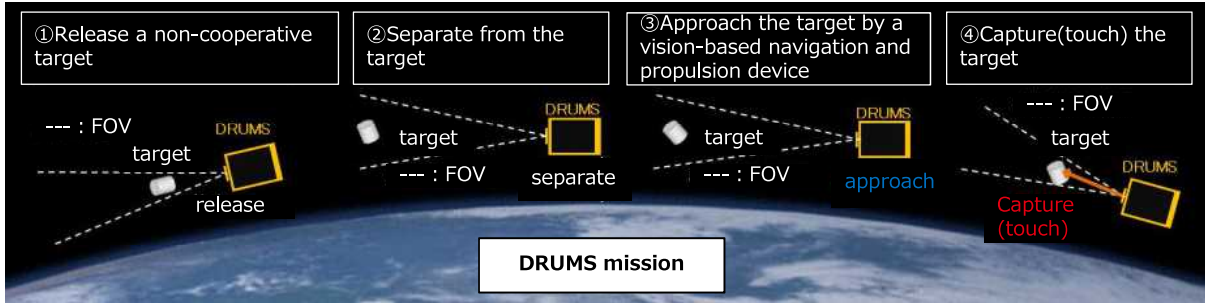
2. Overview of mission and DRUMS system ミッション概要とDRUMSシステム

2.2 Mission sequence ミッションシーケンス

On-orbit demonstration of ADR key technologies ADR要素技術の軌道上実証

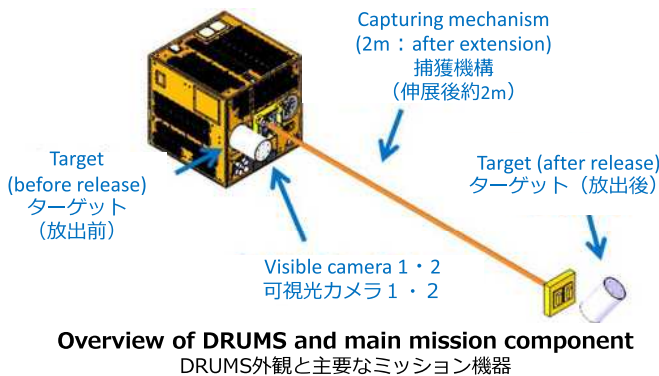
・ Relative orbit control from proximity approach to capture is identical to ADR satellite operation

DRUMSの近接接近から模擬捕獲までの相対軌道制御は、ADR衛星運用と同一



2. Overview of mission and DRUMS system ミッション概要とDRUMSシステム

2.3 DRUMS system DRUMSのシステム構成



Specification of DRUMS DRUMS主要諸元

Size 寸法	600mm×600mm×800mm
Mass 質量	65kg
Orbit 軌道	SSO (太陽同期軌道), 560km

Attitude control sensors 3軸姿勢制御に使用するセンサ組み合わせ

Solar intensity = 100% 日照	Sun sensor, Magnetic sensor, Gyro sensor 太陽センサ, 地磁気センサ, ジャイロセンサ
Solar intensity < 100% 日陰	Earth sensor, Magnetic sensor, Gyro sensor 地球センサ, 地磁気センサ, ジャイロセンサ

Bus system バス系

- ・ The bus system has the basic subsystems, such as the attitude control subsystem, the power control subsystem, the heat control subsystem, and the communication subsystem
姿勢制御、電源・熱制御、地上局との通信機能等、衛星の基本機能を担当
- ・ The attitude control subsystem has sensors (three Ss, a GAS, a three-axis GYRO, an ES, a GPS)
姿勢センサとして、太陽センサ、地磁気センサ、ジャイロセンサ、地球センサを搭載

Mission system ミッション系

- ・ Orbit control is demonstrated in addition to attitude control
ミッションでは、姿勢制御に加えて軌道制御も実施
- ・ The mission system has the navigation sensors (an IMS, and three-axis ACC), actuators (12 thrusters), the capturing mechanism, and the target release mechanism
航法センサ (画像センサ、加速度センサ)、アクチュエータ (スラスタ)、捕獲機構、ターゲット放出機構を搭載

2. Overview of mission and DRUMS system ミッション概要とDRUMSシステム

2. 3 DRUMS system DRUMSのシステム構成

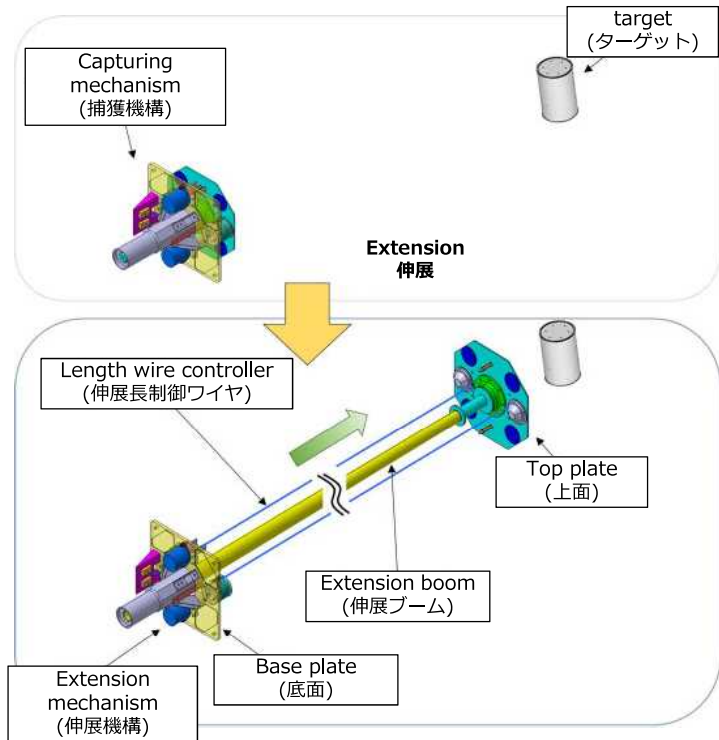
Capturing mechanism 捕獲機構

・ DRUMS has the basically same functional system as that for actual ADR missions. Equipment consists of top plate, base plate, extension mechanism, length wire controller and extension boom.

DRUMSの捕獲機構は、実際のADRミッションにおける捕獲機構と、基本的な構成は同じ（上面、底面、伸展ブーム、伸展長制御ワイヤから構成）

・ The boom is extended when it is determined that the target has stabilized within the assumed range of distance and direction.
ターゲットの距離および方向が想定される範囲内で安定したとき、伸展ブームを伸展する。

・ The state of capturing is planned to record by using visible camera in order to confirm whether the capturing system functions successfully.
捕獲機構が正常に作動しているか、モニタカメラで確認する。



3. Operation 運用

Ground Station 地上局

・ A control room was established at Kawasaki Heavy Industries' Gifu Plant to operate DRUMS.
川崎重工工業岐阜工場内に管制室を設置し、DRUMSを運用

・ Operators uses monitors produced in-house
自社製の運用モニタを使用

・ In parallel with the DRUMS project, ground station is also used to analyze and provide satellite data
DRUMSプロジェクトと並行し、衛星データの解析や提供等にも活用

・ Ground station sharing service is also implemented
地上局のシェアリングサービスも実施

<KHI Ground Station>
Manufacturer: SAFRAN (France)
Parabola diameter: 3.7 m
Weight: 1t
Tracking: Program & Auto Tracking
Frequency: S-band (2GHz band) Send/Receive
X-band (8GHz band) Receive



Ground Station (Gifu Plant KHI)
地上局（川崎重工工業岐阜工場内）

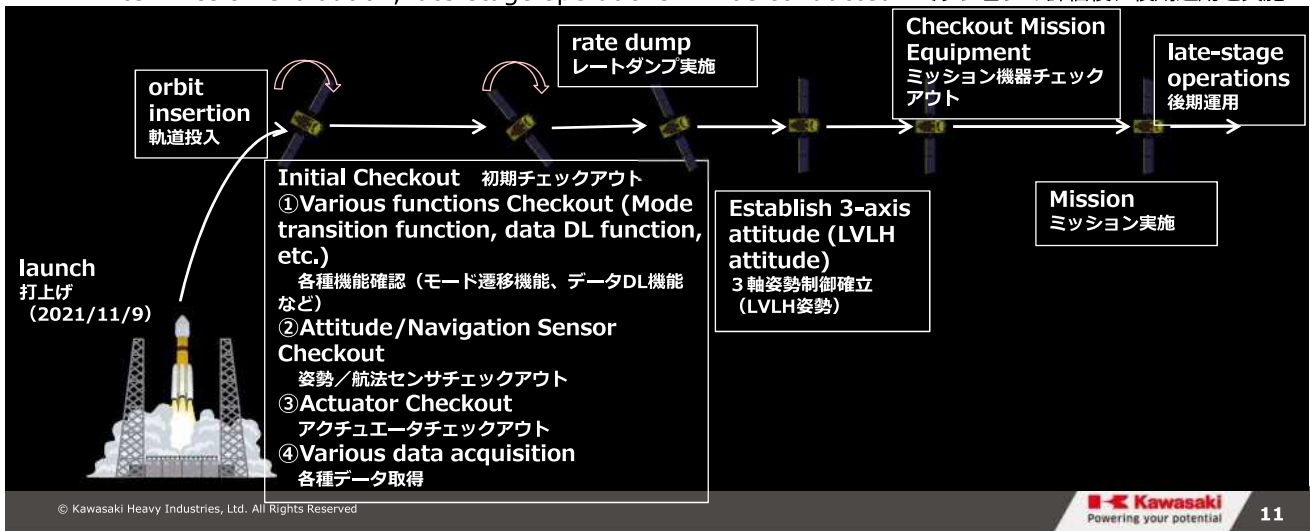


Operation room
管制室

3. Operation 運用

Overview of DRUMS operations DRUMS運用の全体像

- After launching from the rocket and entering orbit, an initial check-out was conducted to confirm the basic functions of the satellite
ロケットから打上げ、軌道投入後、衛星の基本機能を確認する初期チェックアウトを実施
- Rate dump operation and 3-axis attitude control operation were conducted to stabilize DRUMS attitude
DRUMSの姿勢安定化のため、レートダンプ運用、3軸姿勢制御運用を実施
- Checkout of mission equipment was conducted prior to mission
ミッション実施前にミッション機器のチェックアウトを実施
- Mission will be implemented ミッションを実施
- After mission evaluation, late-stage operations will be conducted ミッションの評価後、後期運用を実施

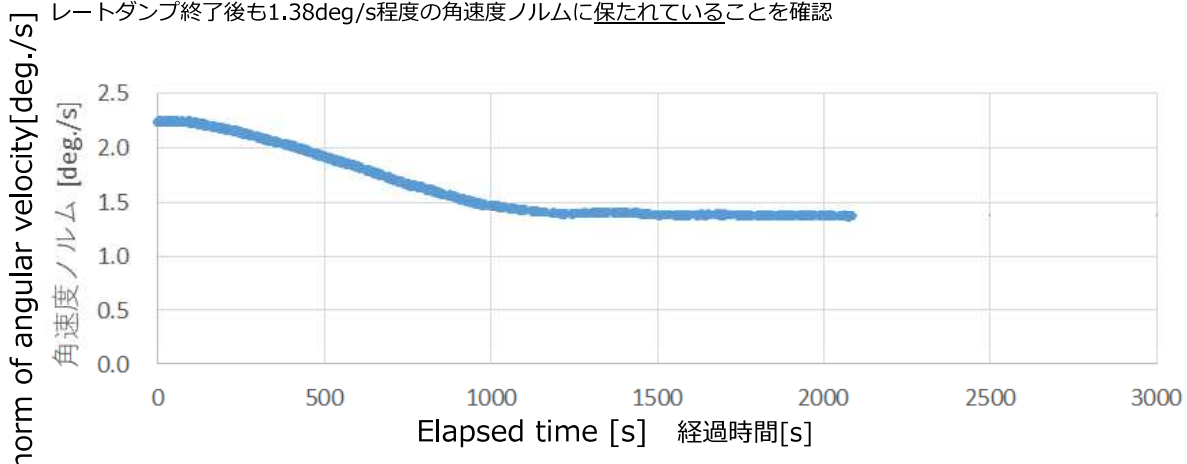


4. On-orbit evaluation 軌道上評価

4. 1 Evaluation of Rate Dump functions レートダンプ機能評価

rate dump operation レートダンプ運用

- After the launch, a rate dump operation was conducted to reduce the angular velocity of the satellite.
打上げ後、衛星の角速度を低減するため、レートダンプ運用を実施
- After starting the rate dump, the angular velocity was reduced to the set value of 1.38 deg/s in about 1200 seconds.
レートダンプ開始後、約1200秒で設定値の1.38deg/sの角速度ノルムに低減
- The norm of angular velocity was maintained at about 1.38 deg/s even after the rate dump.
レートダンプ終了後も1.38deg/s程度の角速度ノルムに保たれていることを確認



4. On-orbit evaluation 軌道上評価

4. 2 Verification of Control Functions 制御機能の確認

Three-axis attitude control operation 3軸姿勢制御運用

- Establish three-axis (sun-oriented and Earth-oriented) posture with LVLH as reference posture
LVLH姿勢を基準姿勢とする、3軸姿勢（太陽指向及び地球指向）を確立
- Confirm that both the power balance and communication with the ground station are stable
電力収支および地上局との通信、ともに安定した状態であることを確認

Function of thruster checkout スラスタの機能確認

- By blowing thrusters and checking the rotational motion with a gyro-sensor, confirm all channel thrusters work properly
スラスタを噴射し、ジャイロセンサで回転運動の様子を確認することで、全チャンネルのスラスタが正常に機能することを確認

Checking the directional control function 指向制御機能の確認

- Confirm that DRUMS can be directed to the moon and earth
月や地球方向にDRUMSを指向制御できることを確認
Directional accuracy is currently being evaluated
指向精度は現在評価中

4. On-orbit evaluation 軌道上評価

4. 3 Image acquisition by image sensor and monitor camera 画像センサ、モニタカメラによる画像取得



©KHI
Moon image by image sensor
画像センサによる月画像



©KHI
Earth image by monitor camera
モニタカメラによる地球画像

Currently, we are preparing for the mission by performing the following on image sensors used for image navigation and monitor cameras for capture demonstration recording.

現在、画像航法に使用する画像センサ、捕獲実証記録用のモニタカメラに対して下記を実施し、ミッションに向けた準備を実施している。

- Confirmation of relative position calculation function using moon as a target
月をターゲットに見立てた相対位置計算機能の確認
- Exposure time, gain adjustment
露光時間、ゲイン調整

5. Conclusion おわりに

- The on-orbit evaluation results of DRUMS are presented.
DRUMSの軌道上評価結果を示した

The rate dump function, the 3-axis attitude control function, and the imaging function of the monitor camera were confirmed to operate as designed.

レートダンプ機能、3軸姿勢制御機能、モニタカメラの撮像機能等が設計通りに作動していることを確認した

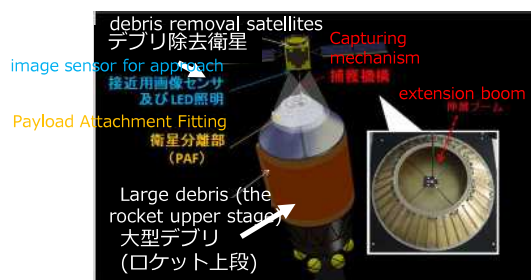
- We will acquire ADR key technology in DRUMS.
DRUMSでADRキー技術を獲得する

We will demonstrate "Approaching non-cooperative objects" and "Capturing non-cooperative objects" in orbit.

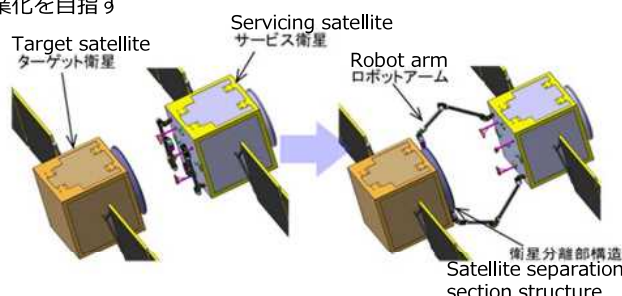
「非協力物体への接近技術」、「非協力物体の捕獲技術」の軌道上実証をする



- We aim to commercialize future debris removal satellites and on-orbit servicing satellites.
将来のデブリ除去衛星、軌道上サービス衛星の実用化/事業化を目指す



Future debris removal satellites
将来デブリ除去衛星



Orbital service satellite
軌道上サービス衛星

世界の人々の豊かな生活と地球環境の未来に貢献する

“Global Kawasaki”