

## C3

## JAXA のデブリ除去技術研究

### Technology Development in JAXA to Realize Active Debris Removal

○山元透、デブリ除去研究サブチーム(JAXA)

○Toru Yamamoto, ADR research team (JAXA)

JAXA では、低コストで経済的に持続可能なデブリ除去の実現を目指し、研究開発プログラムを組織している。プログラムは、デブリ除去シナリオ研究、デブリ除去要素技術研究、そしてデブリ除去からの自然な派生としての軌道上サービスロボティクス技術研究により構成されている。要素技術研究はさらに三つに分かれ、デブリ除去に必須の新規性ある技術である非協力ランデブ技術、非協力物体捕獲技術、デオービット技術の研究テーマを定義し、研究開発を行っている。プログラム全体として、シナリオと要素技術の研究成果を、ひとつのデブリ除去技術実証ミッションの提案にまとめ上げることを目標としている。発表では、この研究プログラムの目的・目標、全体像および個別の要素技術研究の位置付けについて紹介するとともに、今後の計画の展望について述べる。

The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has organized and structured a research program which aims at realization of the low-cost ADR. The program consists of an ADR scenario study, key-technology development, and on-orbit servicing technology research and development as straight-forward spin-off of ADR technology toward near-future robotic servicing missions. The key-technology development has three major themes: non-cooperative rendezvous, non-cooperative capture, and deorbiting massive targets. The research program aims to integrate the ADR scenario study and the key-technology development into the technology demonstration mission plan that has technical scalability and can be a seamless step for the future low-cost ADR practical realization. In this presentation, the objectives and overall structure of the research program will be shown, and the way-forward will be discussed.

# JAXAのデブリ除去技術研究 Technology Development in JAXA to Realize Active Debris Removal

山元透、デブリ除去研究サブチーム(JAXA)

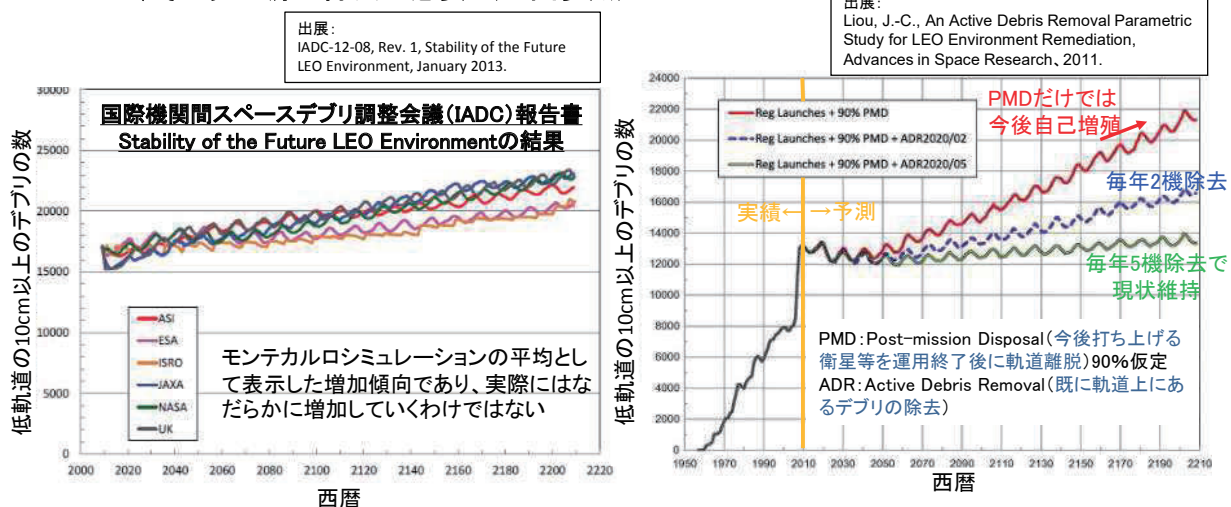
Toru Yamamoto, ADR research team (JAXA)

2016.10.19 Space Debris Workshop

1

## デブリ除去の必要性

- デブリの自己増殖(ケスラーシンドローム)
  - 統計的な予測としてデブリは増加する事が予測されている(左図参照)
- 混雑軌道の大型デブリを年間5~10個程度除去すれば現状レベルを維持できると予測
  - 数mm~数cmの破片デブリは衝突回避も防御もできない上、微小デブリ除去は効率が悪いいため、その発生源の除去が必要(右図参照)



– 爆発なし・PMDの成功率90%、としても、高度700~1000 km付近で5年から9年に一度壊滅的衝突が発生

– 90%のPMDに加え、年間5機ずつ混雑軌道の大型デブリを除去すれば環境が維持できるとの検討結果  
– 除去開始が遅れると、衝突回避も防御も除去もできない微小デブリが増加

2

## Essential issue: Targets are heavy

- Removal of properly selected 5-10 debris per year from crowded orbits is supposed to be effective to suppress the increasing tendency
- The properly selected targets are inevitably heavy (typically 1.4 – 8 ton)
- We need approx. 500 kg fuel to remove a 8 ton debris from 900 km to 500 km by ISP = 250 s propulsion system
- It is known that spacecraft cost is strongly correlated with spacecraft mass



$$\Delta V = g \text{ ISP} \ln \frac{m_i}{m_f}$$

By nature, It is not easy to realize effective ADR with low-cost spacecraft

3

## デブリ除去研究に関するJAXAの狙い

### 目標:

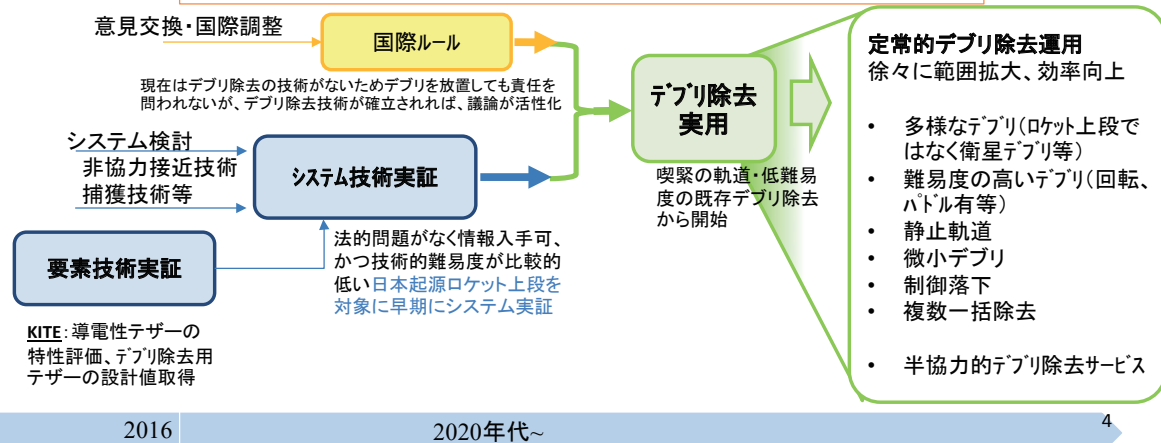
- 大型デブリの除去技術(混雑軌道の大型デブリ除去の必要性に対する対応)
- 早期にシステム技術実証(2020年代初頭を目指して各国が宇宙実証計画中のため)
- 低コスト(小型衛星)な除去技術を獲得(実用化において継続可能なコスト)

### アウトカム・アウトプット:

- 持続的な宇宙開発を実現し世界に貢献
- デブリ除去・軌道上サービス事業による産業振興、国際的プレゼンス強化を実現
  - 世界に先駆けて実証することでデブリ除去技術を確立
  - デブリ除去実証実績により、デブリ除去の議論が活性化(国際的なルール作り等)
  - JAXAは、技術で国際議論を先導することが可能

### JAXAの主要な技術:

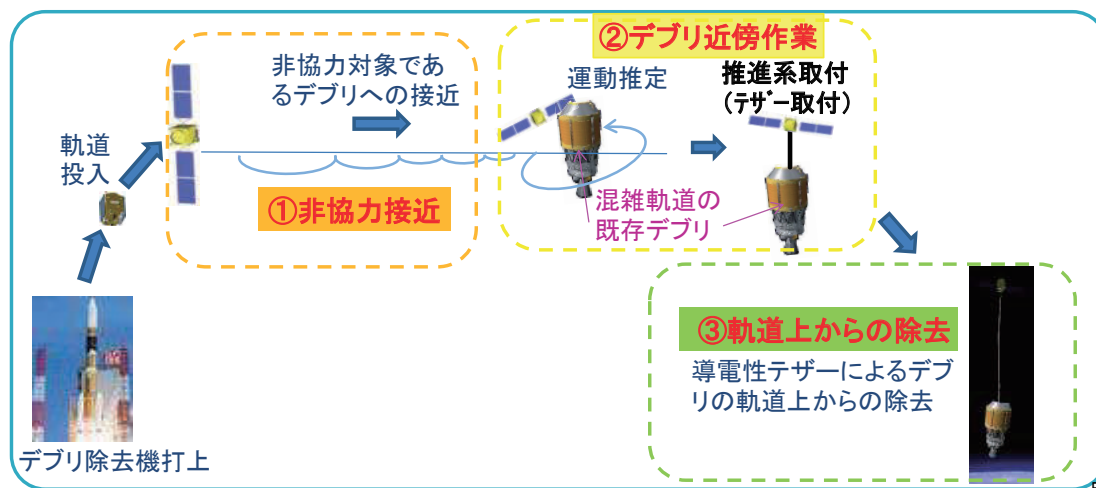
- ETS-VII、はやぶさ等による非協力接近技術基盤
- KITEによる導電性デザー技術(燃料不要のため小型衛星で実現可)
- ロケット上段構造を利用したシンプルかつ精度制御要求の低い独自の高い捕獲技術研究 等



## デブリ除去技術の課題

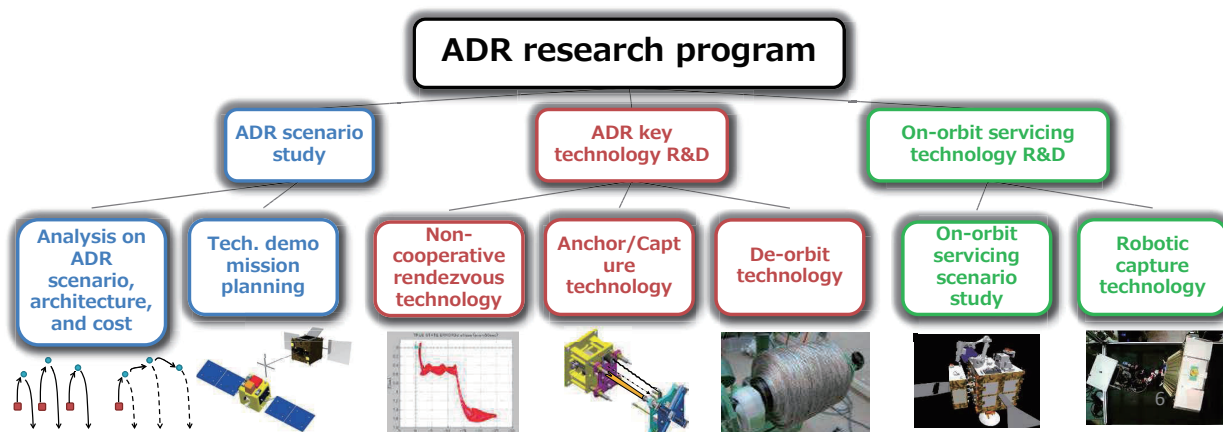
- デブリは自由運動をしており、軌道上での捕獲が考慮されていないため、以下の課題がある。
  - ① 非協力物体(\*)への接近、
  - ② 近傍作業(運動推定・推進系取付)、
  - ③ 軌道上からの除去等
- 世界でもデブリ除去の必要性は認識され、特に欧州が試作・試験を進めている。中国も実証実施との報道
- 世界で小型ターゲットを対象としたデモンストレーションが提案されているが、大型デブリ除去は高コストのため実現していない

(\*)非協力物体とは、ランデブッキングを実施するための能力・機器を有さない物体のこと。ランデブッキング実験を行ったETS-VII(1997年打上)では、ターゲット衛星、チェイサ衛星双方にドッキングに必要な機器を搭載し、相互に姿勢を制御していた。



## JAXA ADR research program

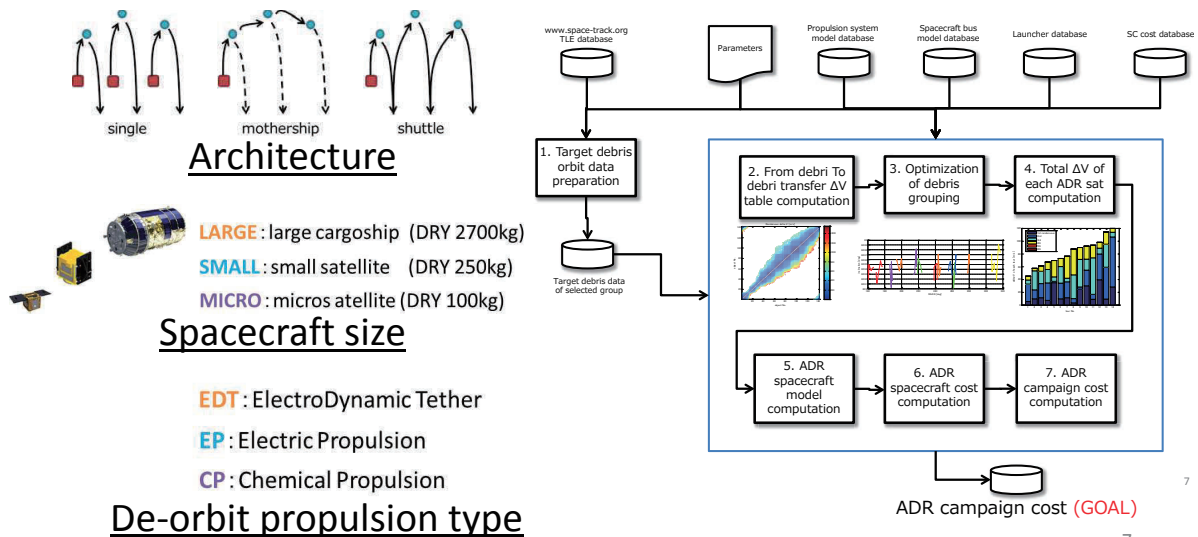
- JAXA has organized and structured a research program which aims at realization of the low-cost ADR mission
- The program consists of an ADR scenario study, ADR key-technology R&D, and on-orbit servicing technology R&D as a straight-forward spin-off of ADR toward near-future robotic servicing
- The ADR key-technology R&D has three major themes: non-cooperative rendezvous, capture technology for non-cooperative targets, and de-orbiting technology to remove massive targets



# Analysis on ADR scenario, architecture and cost

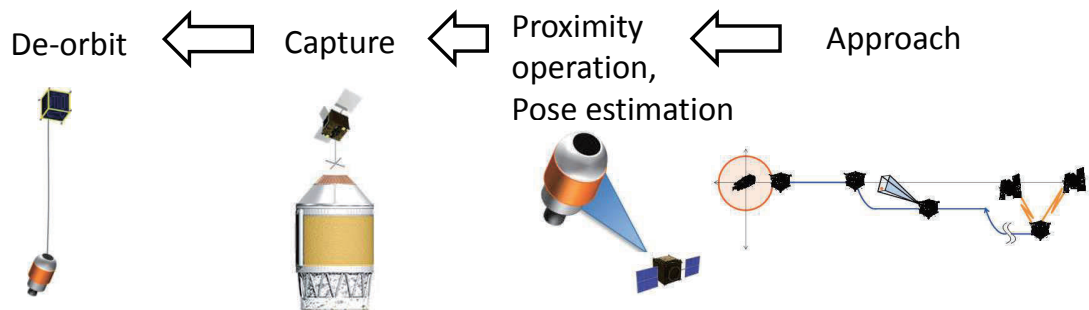
10/19 13:10 山元 透(JAXA)「デブリ除去シナリオの定量的トレードオフ」

- Trade-off of various ADR options and parameters (architecture, spacecraft size, de-orbit propulsion type, etc...) in terms of cost needed to remove a massive debris
- Search the cheapest combination of options and parameters that represents the cost-effective and technically feasible ADR mission



## Scenario of recent JAXA ADR design reference mission concept

- Rocket upper stages are selected as the targets
- Electrodynamic tether (EDT) is selected as the de-orbit device
- PAF is selected as the anchoring point of a EDT



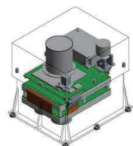
- Chaser spacecraft maneuvers to extend the EDT
- Chaser spacecraft functions as an end-mass of the EDT
- Debris and the chaser spacecraft descend by induced force of the EDT
- Vision-based relative navigation with respect to the PAF ring
- Anchoring a tip of EDT
- 30 m V-bar hold
- Vision-based relative navigation and pose estimation
- Target inspection and motion estimation
- Far range rendezvous using a target TLE and chaser GPS navigation solutions
- Angles-only relative navigation by cameras (visible and IR)
- Trajectory design features passive abort safety

8

## R&D: Non-cooperative rendezvous technology

10/19 14:30 村上 尚美 (JAXA) “軌道上デブリへのランデブシナリオ”  
10/19 14:50 片山 保宏 (JAXA) “デブリの運動推定技術研究”

- Vision-based navigation using cameras (visible and IR) is chosen as the primary navigation measure considering cost reduction
- Image processing algorithm for relative position measurement, pose estimation, and target motion estimation has been studied



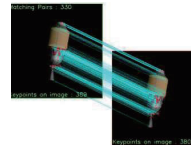
LIDAR, IR CAM  
under development



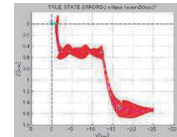
HIL simulator  
for vision based  
navigation



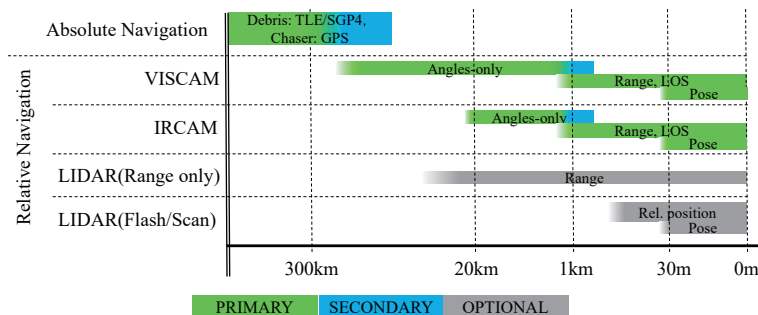
Vision based  
navigation to PAF  
on upper stage



Stereo vision-based  
pose estimation



Approach trajectory  
analysis for VIS/IR  
CAM based Angles-  
Only Navigation

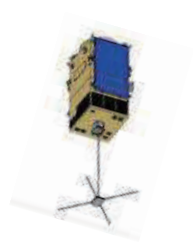


9

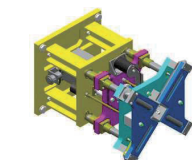
## R&D: Anchor/Capture technology

10/19 15:30 加藤 裕基 (JAXA) “ロボットアームによるデブリ捕獲技術研究”  
10/19 15:50 柴崎 浩一 (川崎重工) “PAFを利用したデブリ捕獲システムの概念検討状況”  
10/19 16:10 泉山 卓 (IHI) “小型鋸方式によるデブリ捕獲システムの概念検討”

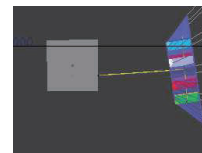
- Simple extendable boom or harpoon to anchor a tip of EDT
  - Low-cost, simple, wide envelope to ease non-cooperative capture
- Robotic capture option with minimal robotic arm and dedicated capture tool is also studied in parallel



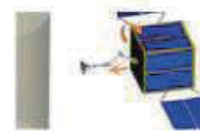
Anchoring a tip of  
EDT into closed  
space inside the PAF



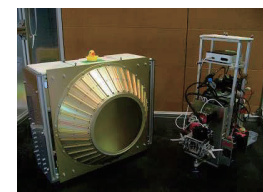
Simple  
extendable  
boom system



Contact dynamics  
simulation to investigate  
relative motion  
envelope that ensures  
successful capture



Harpoon concept



PAF target and a chaser  
model robot with a minimal  
arm and a capture tool



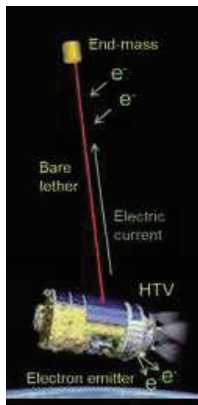
Robotic capture demonstration  
on an air-bearing table

10

## R&D: De-orbit technology

10/19 16:30 大川 恭志 (JAXA) “導電性テザーシステムの実用化に向けた研究”

- EDT is selected as a primary de-orbit method
  - ISP of EDT is eventually unlimited
  - EDT enables massive target removal by a light-weight chaser spacecraft
- EDT demonstration mission “KITE” will fly in FY2016
- EDT for practical ADR (5-10 km, 1 A current) is studied



KITE: EDT technology demonstration (2016)



End-mass



Spool reel



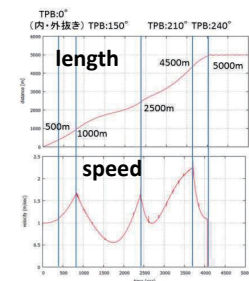
FEC head

KITE specifications

Platform	H-II Transfer Vehicle (HTV)
Mission duration	7 days (planned)
Orbit	20 km (or more) below ISS orbit Altitude 300-400 km
Tether length	700 m (approx.)
Tether current	10 mA (approx.)
Electron collector	Bare tether
Electron emitter	Field emission cathode (FEC)



Tether spool (2 km Al-SUS tether)



EDT extension dynamics simulation<sup>11</sup>

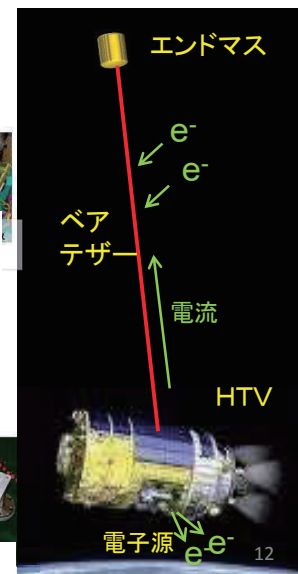
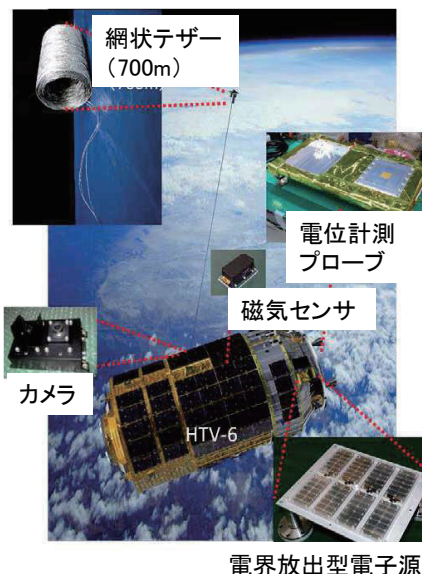
## HTV搭載導電性テザー実証実験

10/19 16:50 奥村 哲平 (JAXA) “KITE-システムと実験概要-”

低コスト・早期のデブリ除去技術獲得を目指し、その最初のステップとしてHTV(このとり)6号機で導電性テザー(EDT)の伸展特性、電流駆動特性の取得を目指した実証実験(KITE)を予定。次のステップでの実際にデブリを除去する小型衛星の設計に活かす計画

ミッション主要諸元

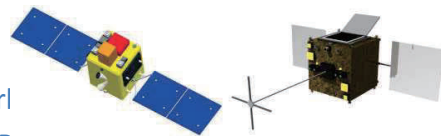
項目	暫定値(調整中)
軌道	ISS軌道下方20km以上(高度300~400km円軌道、傾斜角52°)
ミッション期間	7日程度
テザー長	700 m
テザー電流	最大10 mA
ミッション機器質量	44 kg (エンドマス: 20 kg、HTV側: 24 kg)
ミッション機器電力	37.5 W (エンドマス: 0 W、HTV側: 37.5W)



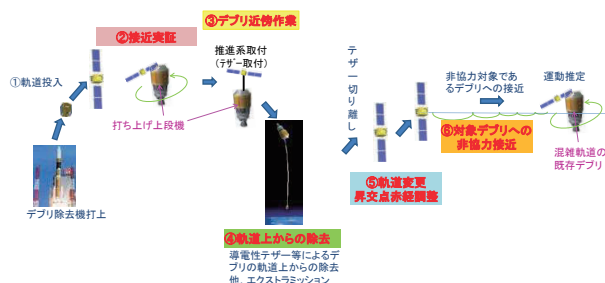
# Technology demonstration mission planning

10/19 13:30 岡本 博之 (JAXA) “デブリ除去衛星のミッションシナリオの検討”  
 10/19 13:50 廣田 賢治 (NEC) “デブリ除去衛星の小型化検討”  
 10/19 14:10 青木 広太郎 (三菱重工) “ロケット上段計測システム及び  
 小型デブリ除去衛星の概念検討”

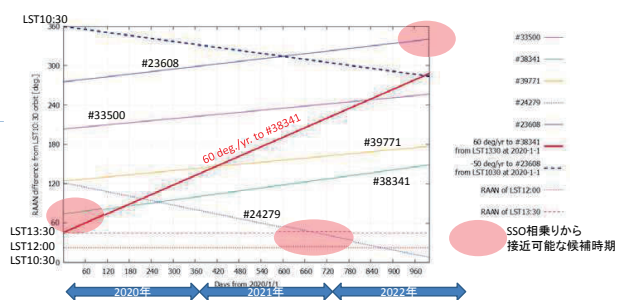
- ADR scenario study and key technology R&D are integrated into ADR technology demonstration mission planning
- Goal of the demonstration is establishment of ADR technologies to remove actual heavy debris flying in orbit
- We intend this work as preparation for proposal of ADR demonstration mission



Concept study of ADR technology demonstration spacecraft



ADR technology demonstration mission scenario study



Target debris selection for the ADR demonstration mission

13

## Conclusions

- JAXA has initiated a systematic research program to realize practical and low-cost ADR
- Assessment on ADR scenario, architecture, and cost is performed and will be continued to seek the best combination of options for practical and cost-effective ADR implementation
- Technology R&D for the ADR mission is in progress:
  - Non-cooperative rendezvous technology
  - Anchor/Capture technology
  - De-orbit technology
- Technology Readiness Level (TRL) of EDT will be increased by the coming KITE demonstration mission
- We expect coming outputs of the systematic research program will be compiled into proposal of the ADR demonstration mission

14