

商業デブリ除去実証(CRD2) フェーズ I と 赤外カメラ

JAXA研究開発部門第一研究ユニット
/CRD2フェーズ II プロジェクトチーム
岡田 尚基



本日のお話



- CRD2フェーズ I プロジェクトの紹介

- プロジェクトの目的
- デブリ除去の必要性
- 民間事業者とのパートナーシップ
- センサによる接近
- 衛星運用実績

- CRD2の試験に使われた赤外カメラ用の模擬画像シミュレータの紹介

- 研究の背景
- シミュレータの機能
- モデル化
- 実画像による評価



- CRD2フェーズ I プロジェクトの紹介

- プロジェクトの目的
- デブリ除去の必要性
- 民間事業者とのパートナーシップ
- センサによる接近
- 衛星運用実績

- CRD2の試験に使われた赤外カメラ用の模擬画像シミュレータの紹介

- 研究の背景
- シミュレータの機能
- モデル化
- 実画像による評価

商業デブリ除去実証(CRD2)とは



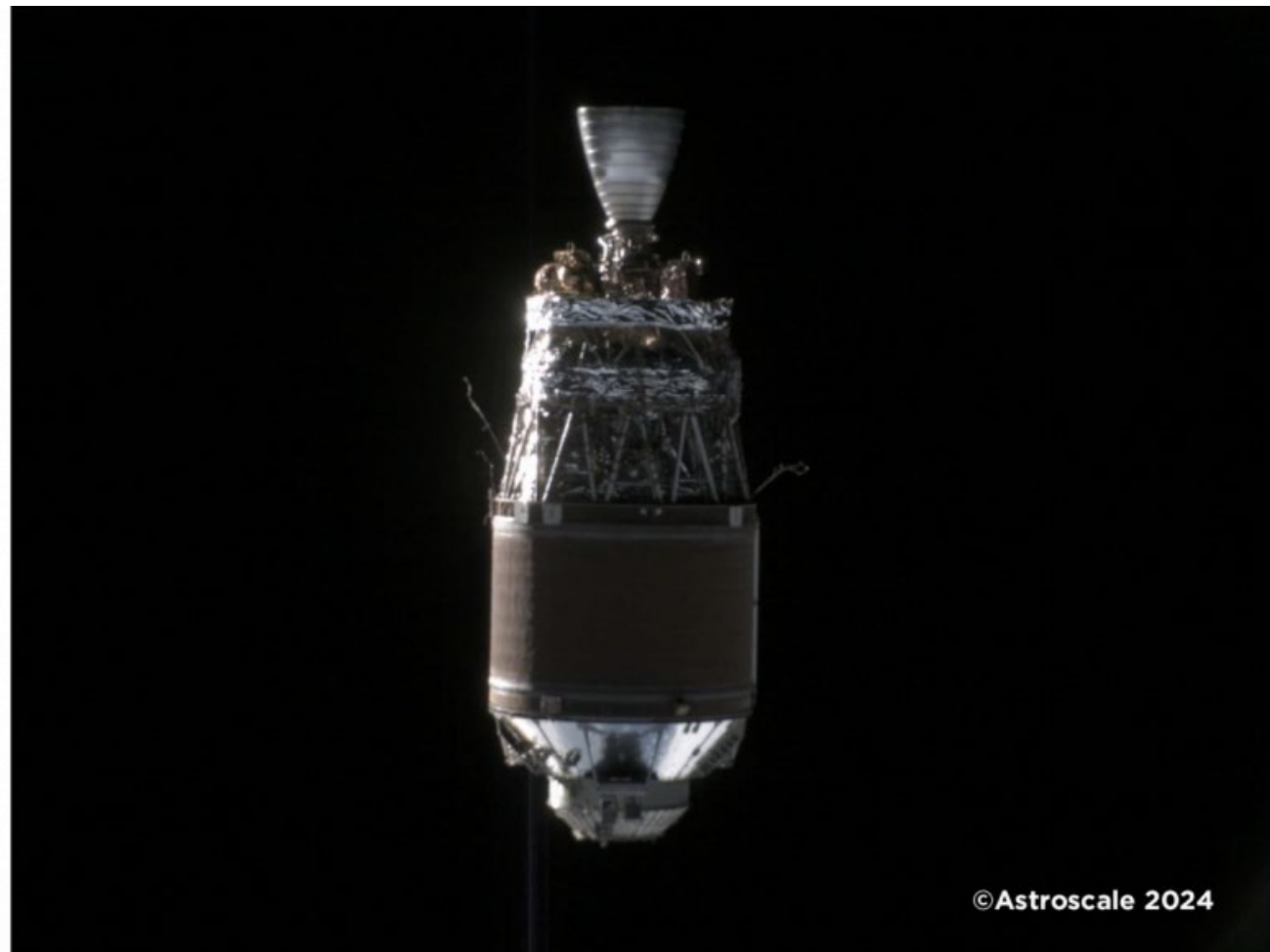
商業デブリ除去実証

Commercial Removal of Debris Demonstration (CRD2)

深刻化するスペースデブリ問題を改善するデブリ除去技術の獲得と、日本企業の商業的活躍の後押しの二つを目的とする、JAXAの新しい取り組みです。

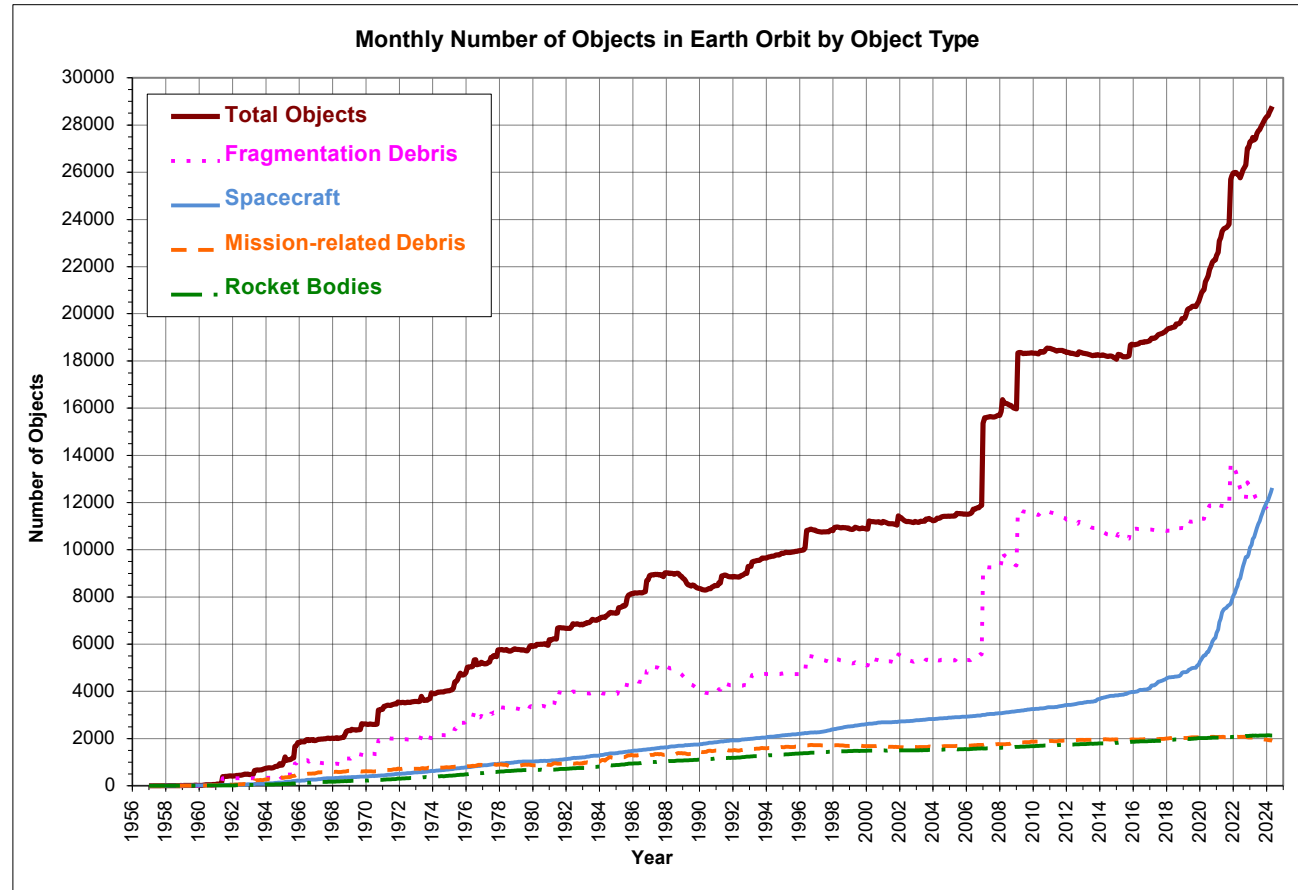
スペースデブリの積極的除去(Active Debris Removal: ADR)は、その効果・必要性について学会や宇宙機関会合等で議論されてきたものの、実現する技術を実証・獲得できていないことが大きく国際的な枠組み作りは具体的に進捗してきませんでした。

CRD2は、日本由来の大型デブリの除去を、民間企業と協力して実施することで、この国際的議論の具体的な進展と、日本企業の軌道上サービス市場への訴求力向上の実現を目指すJAXAのプログラムです。



CRD2フェーズ I で得られた軌道上デブリの撮影画像(2024年5月)

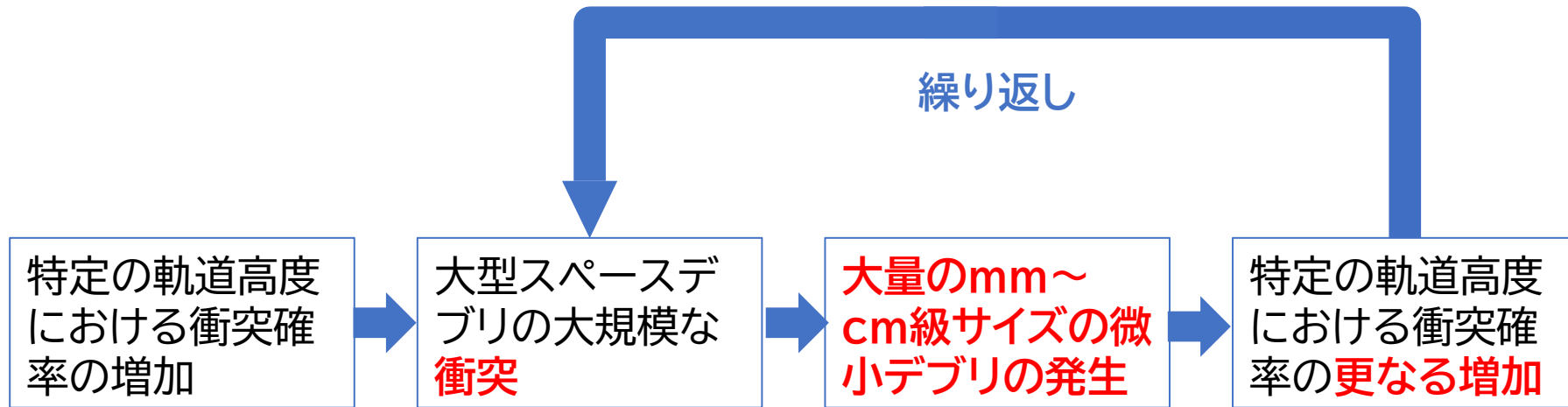
スペースデブリの現状



Monthly Number of Cataloged Objects in Earth Orbit by Object Type as of 9 June 2024. This chart displays a summary of all objects in Earth orbit officially cataloged by the U.S. Space Surveillance Network. "Fragmentation debris" includes satellite breakup debris and anomalous event debris, while "mission-related debris" includes all objects dispensed, separated, or released as part of the planned mission

NASA Orbital Debris Program Office, Quarterly News, Volume 28,
Issue 3, July 2024.

積極的スペースデブリ除去(ADR)のメカニズム



高高度に微小デブリが撒き散らされると、現時点では現実的な対処方法なし

このイベントを未然に防ぐことが重要

➡ 混雑軌道の大型スペースデブリの除去が有効

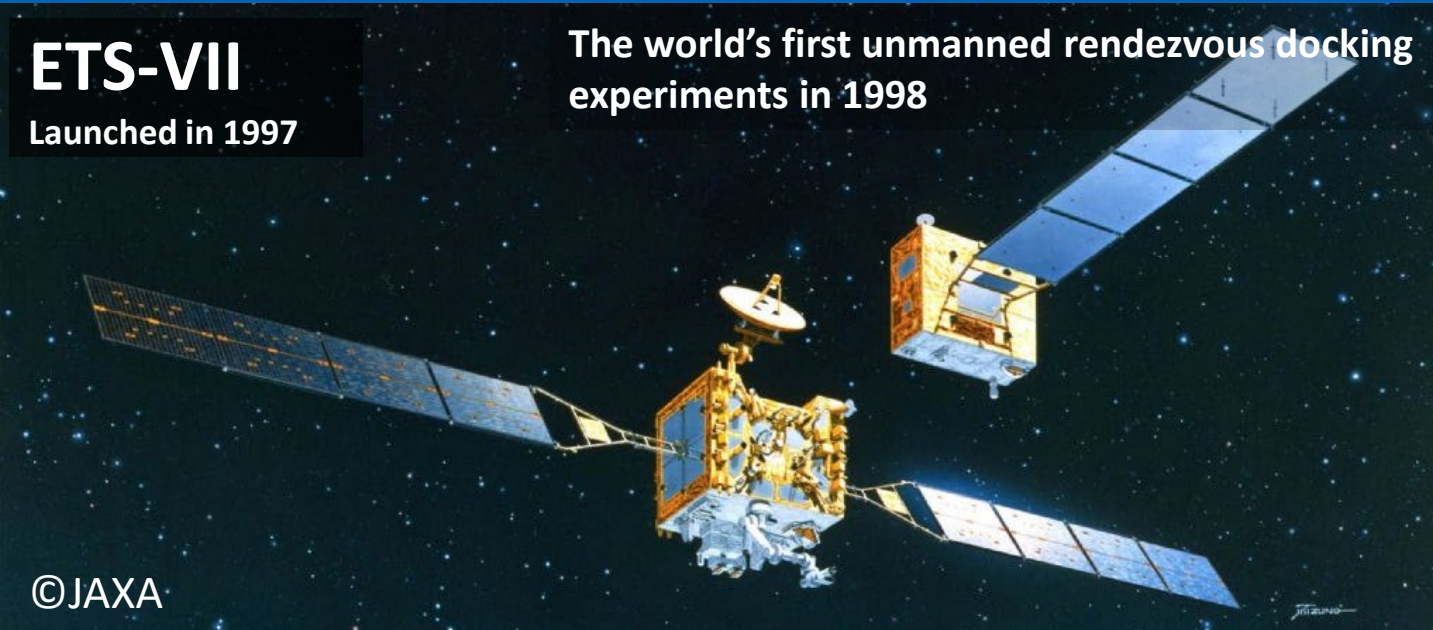
積極的スペースデブリ除去の技術的課題

協力的ターゲットの特徴



ETS-VII
Launched in 1997

The world's first unmanned rendezvous docking experiments in 1998



©JAXA

HTV
Have been launched from 2009



©NASA/JAXA

Total 9 flights were successfully accomplished from 2009.

- 姿勢制御機能 : あり
- 通信機能 : あり
- GPS受信機 : あり
- 画像処理用マーカ : あり
- レーザ用リフレクタ : あり
- ドッキングメカ : あり

積極的スペースデブリ除去の技術的課題

非協力的ターゲットの特徴



CRD2 Phase I

CRD2 Phase-II

- Non-cooperative rendezvous with a large Japanese space debris (Phase I)
- Capture and removal of the large non-cooperative target (Phase II)

©JAXA

姿勢制御機能	:なし
通信機能	:なし
GPS受信機	:なし
画像処理用マーカ	:なし
レーザ用リフレクタ	:なし
ドッキングメカ	:なし

商業デブリ除去実証(CRD2)プロジェクト成立の背景



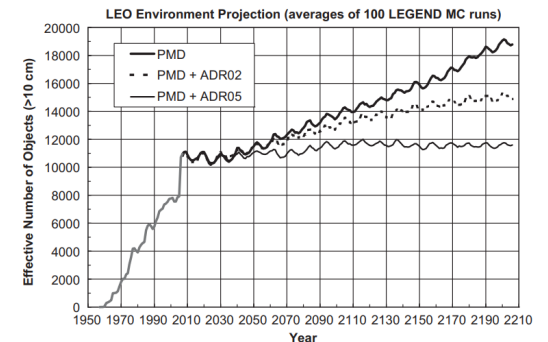
「3つの潮流」が合流することで、プロジェクトとして
成立した背景があった

「ETS-VII技術実証の次の技術開発テーマ」としての、
「非協力的ターゲットへのランデブ技術」の研究
(2000年頃より)



ETS-VII「おりひめ・ひこぼし」自動ランデブドッキング実験

「スペースデブリ研究」における、「混雑軌道から大型
デブリを除去する」ことによる積極的デブリ除去(ADR)
の有効性についての議論
(2010年頃より)



Liou, J-C., Nicholas L. Johnson, and N. M. Hill. "Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal." Acta Astronautica 66.5-6 (2010): 648-653.

NASA の COTS (※) プログラムをモデルとした「民間事
業者の事業化を後押しする制度設計」の議論
(2018年頃より)

(※) COTS: Commercial Orbital Transportation Services

Commercial Orbital Transportation Services (COTS) Program

Key Concepts



- Change in approach from contractors to **Partners**
- Limited government investment
- Buy a ticket, not a vehicle
- Performance-based, fixed-price milestones
- Non-contract approach to avoid the rigorosity imposed by the Federal Acquisition Regulations (FAR)
 - Space Act Agreement(SAA)

Garguilo, Dan. "International Space Station Requirement Verification for Commercial Visiting Vehicles." INCOSE Texas Gulf Chapter Meeting. No. JSC-CN-38918. 2017.

デブリ除去と「民間事業者の事業化を後押しする制度設計」

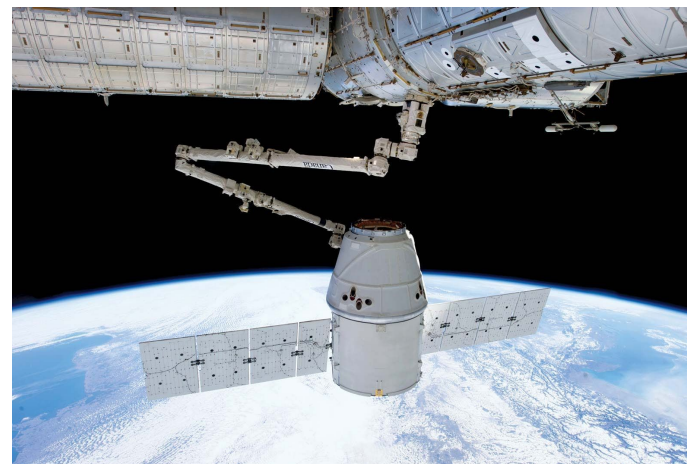


- 2000 年代より, NASA がそれまで官主導だった宇宙開発に**パラダイムシフト**を起こし, ISS への輸送系開発を民間企業主導で行う**COTSプログラム**を, 著しい成功に導いた.
- JAXAの研究チームでは, 国際競争力確保の観点で**日本の宇宙開発にこの潮流を導入する試み**が必要と感じていたが, その中で, 次のような理由で, **ADR(積極的デブリ除去)**は JAXA がこのような新しい取り組みを行う**初期の舞台として好適**であると考えた. (2018年当時)

(※) COTS: Commercial Orbital Transportation Services



Space-X社 Falcon-9 ロケット



Space-X社 Dragon 輸送機



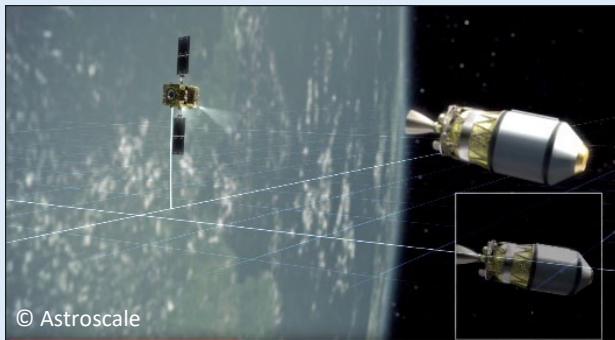
- 事業化意欲のある民間企業が日本に複数社存在
- まだ市場がなく、かつ、近未来の市場創出の期待感があり、民間企業への投資が活発
- 技術的に未踏であるが、JAXA がサポートすれば、民間企業主体で実施し得る技術的困難さ
- 獲得技術の使い道が広く、民間企業がこの実証をステップとして、ADR（積極的デブリ除去）からより広い軌道上サービスへ事業の幅を広げる構想を組み立てやすい
- 米国は ADR に強くコミットしておらず、欧州は積極的だが一旦計画が頓挫しており(e.Deorbit)、いま動けば世界的に先駆的な取り組みとできる可能性(2018年当時)

商業デブリ除去実証(CRD2)の構成

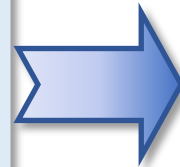


Phase I と Phase II で構成される

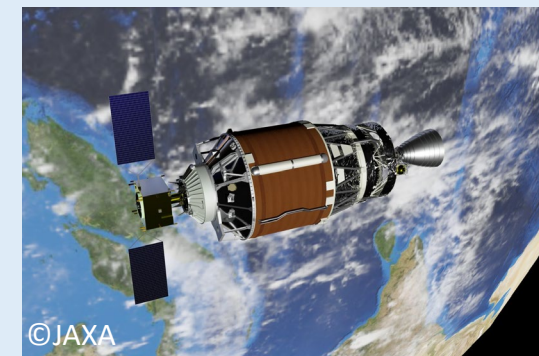
Phase I 2023年度打上げ キー技術実証



- 非協力的ターゲットへのランデブ、近傍制御、映像の取得



Phase II 2027年度 打上げ予定 デブリ除去技術実証



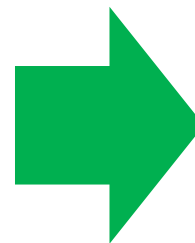
- 非協力的ターゲットへのランデブ、近傍制御、映像の取得
- 大型デブリ(ロケット上段)の除去

民間事業者の事業化を後押しする新たな試み



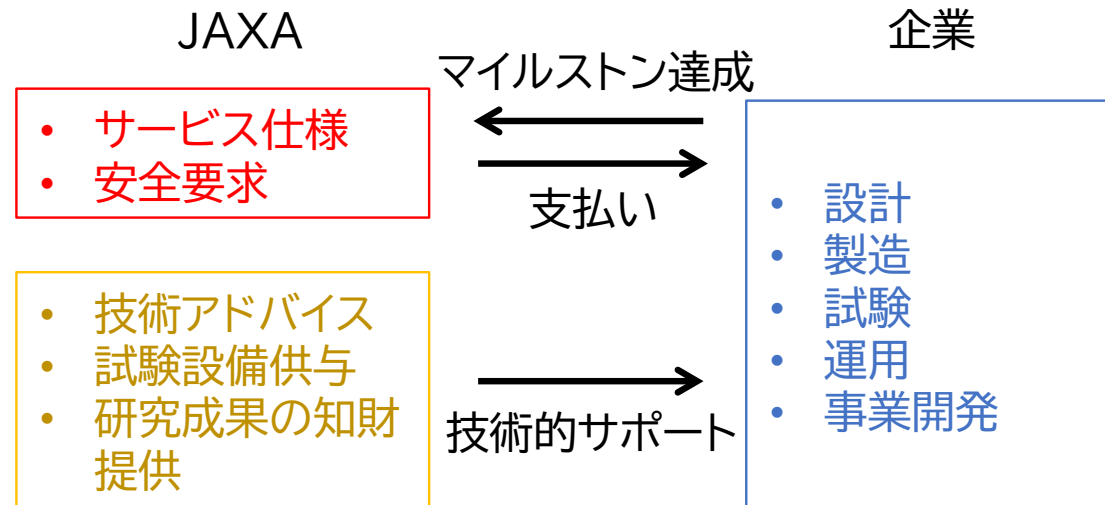
— 新たな試み —

- JAXAは「衛星」ではなく、「サービス」と「研究開発成果」を調達する
- マイルストーン・ペイメント
- 企業はJAXAから技術的サポートを受けられる



企業の
事業化を
強く促進

パートナーシップ型契約



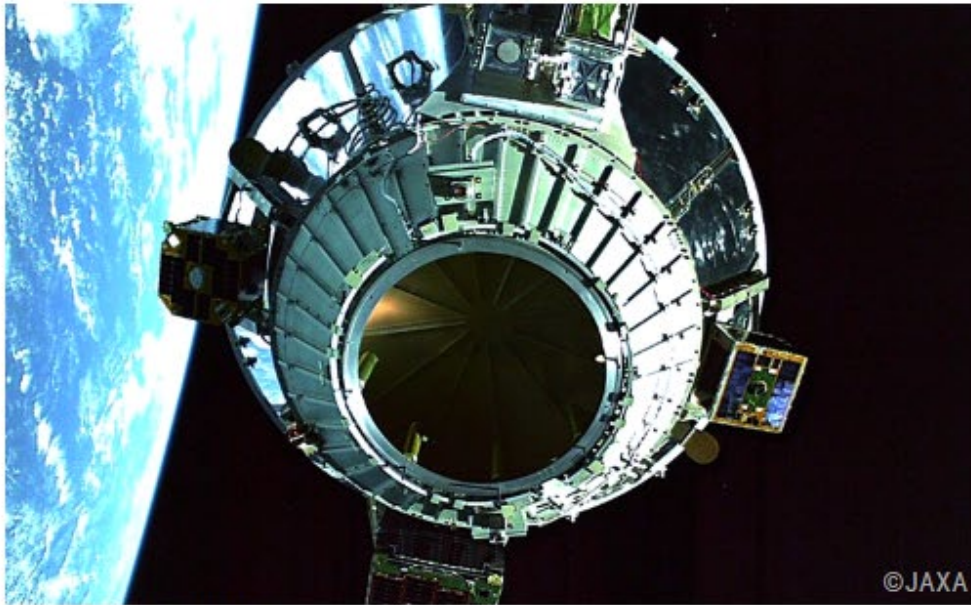
CRD2のターゲットスペースデブリ



H2A R/B, SSC^{*1} :33500, International designator: 2009-002J

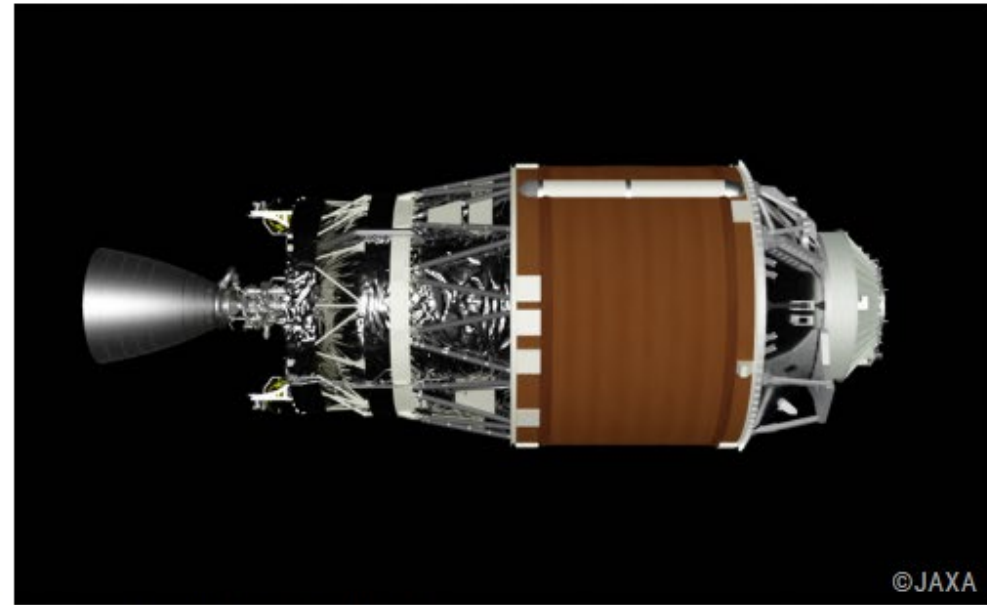
GOSATを打ち上げたロケット上段

H2Aロケット上段は、全長約11m、直径約4m、重量約3トンの大きさがあります。



SSC : 33500 H2A R/B

(2009年にGOSAT衛星から分離時に取得した映像)



SSC : 33500 H2A R/B想像図

CRD2フェーズIプロジェクトの開始



- 2020年1月、RFPを経てCRD2フェーズIパートナー企業としてアストロスケールを選定
- 2020年3月に契約締結、プロジェクトを開始



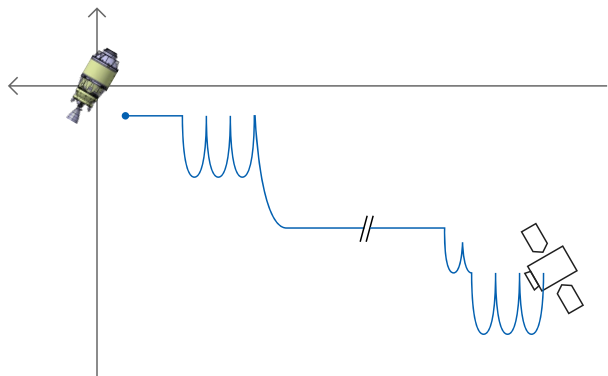
フェーズI サービス仕様、安全要求



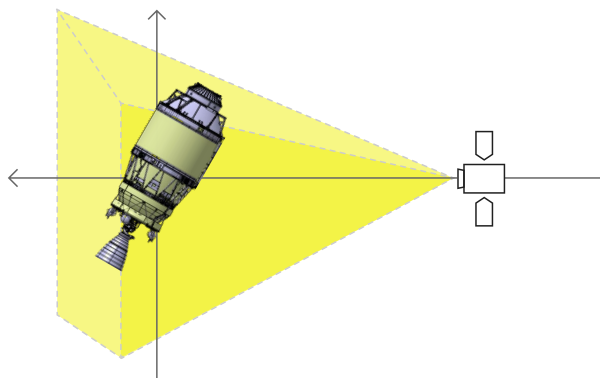
サービス仕様

- 下記4サービスの仕様を規定

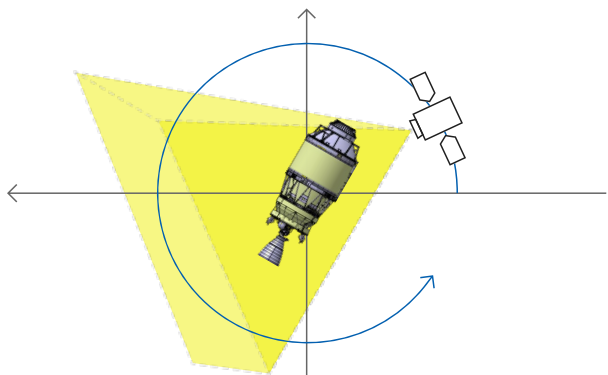
(1) デブリ接近計画に対する実績の確認サービス



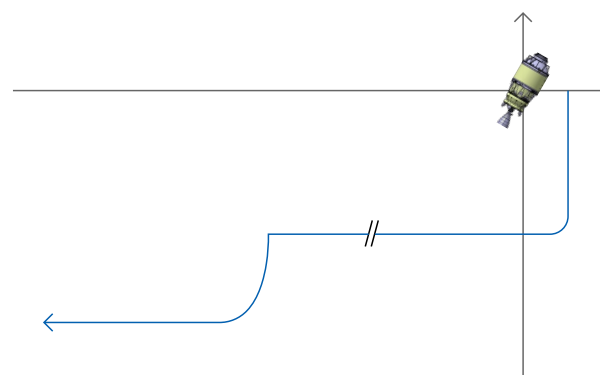
(2) 対象デブリの定点観測サービス



(3) 対象デブリの周回観測サービス



(4) ミッション終了サービス



安全要求(※)

- ターゲットとの衝突による意図しないデブリの発生、およびデブリ防止機能の喪失を、「クリティカルハザード」と位置づけ
- 安全領域への意図せぬ侵入や、接近経路の逸脱に対して、1 故障許容設計とする
- デブリを発生させない設計とする

(※)安全要求として適用したJAXA共通技術文書
JERG-2-026:軌道上サービスミッションに係る安全基準
JMR-003:スペースデブリ発生防止標準

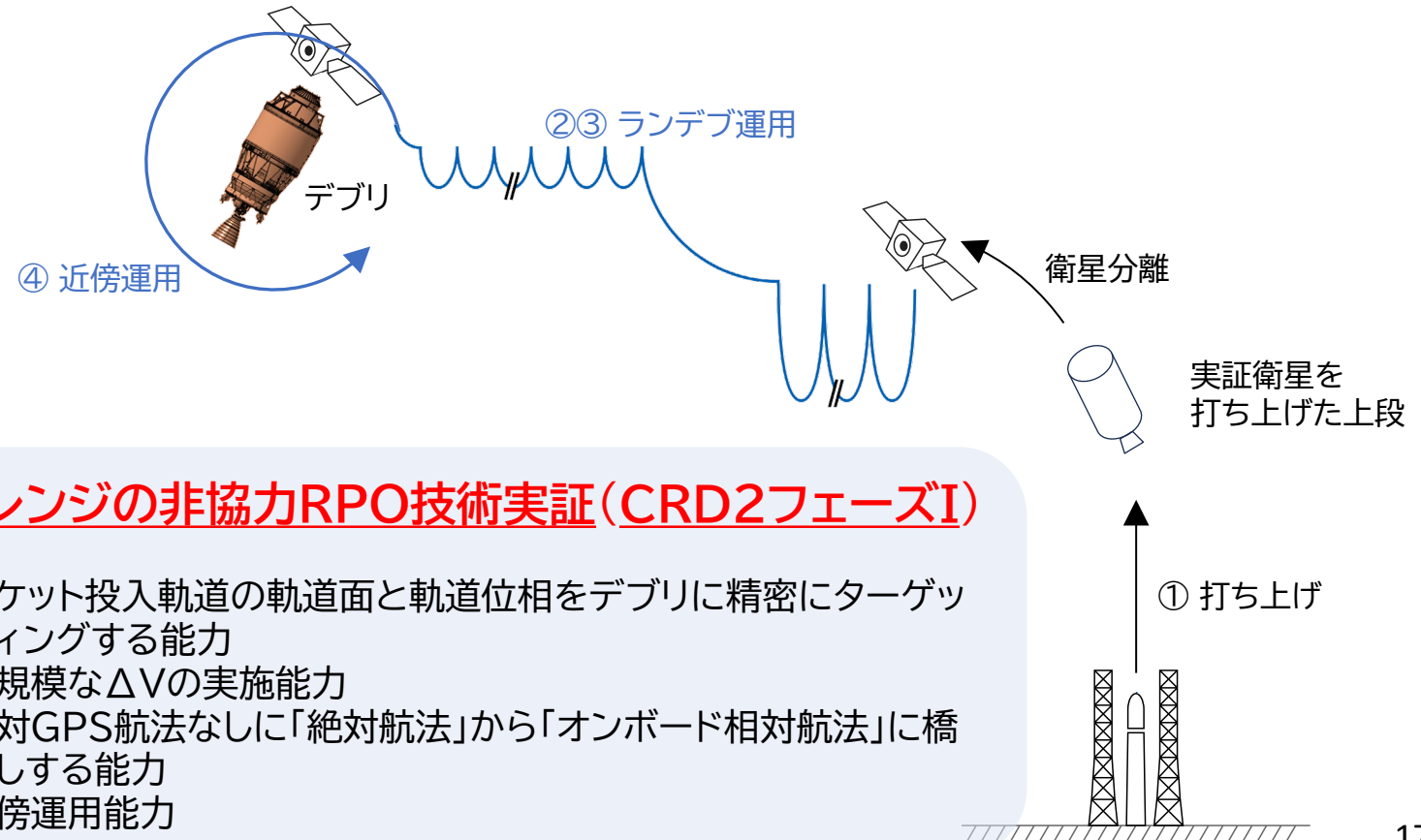
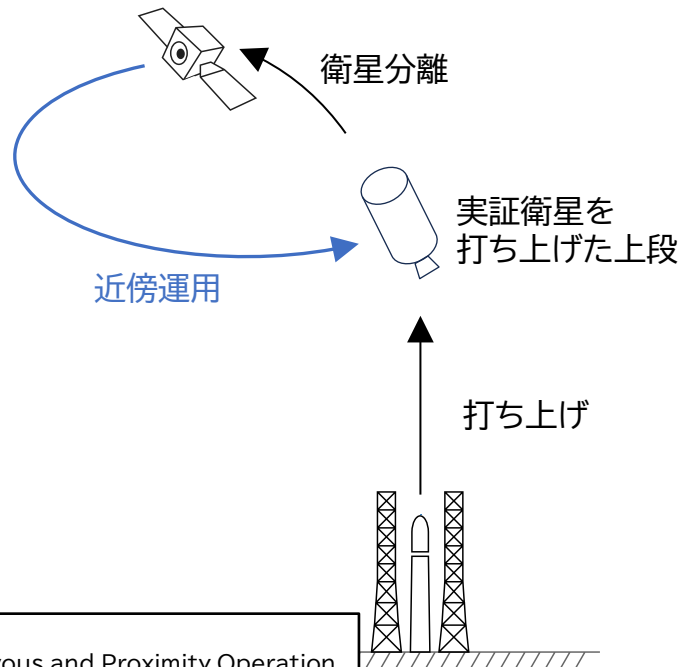
フェーズI サービス仕様を通じた獲得技術の狙い



様々な軌道上サービスミッションに応用可能な フルレンジ非協力ランデブ・近傍運用(RPO)技術 の獲得

フルレンジではない技術実証の例

- 近傍運用能力しか実証できない



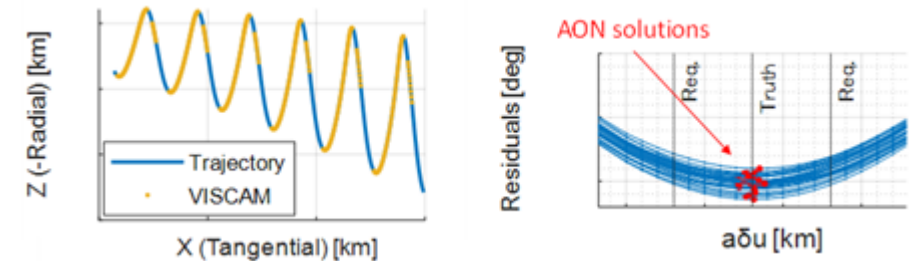
フルレンジの非協力RPO技術実証(CRD2フェーズI)

- ① ロケット投入軌道の軌道面と軌道位相をデブリに精密にターゲットリングする能力
- ② 大規模な ΔV の実施能力
- ③ 相対GPS航法なしに「絶対航法」から「オンボード相対航法」に橋渡しする能力
- ④ 近傍運用能力

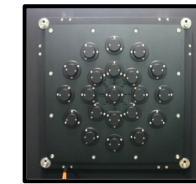
フェーズI JAXAによる技術支援



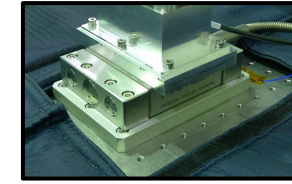
- ランデブ・近傍運用、衛星開発にかかる技術アドバイスを計200件以上提供
 - RPO(ランデブ・近傍運用)が安全であるための設計・解析方法・検証の基本的考え方について、JAXA有識者の経験・知見を踏まえたアドバイスを実施
 - 非協力的ターゲットへの接近のキー技術である「相対GPS航法」が使えない条件で「絶対航法」と「オンボード光学センサ」の間のギャップを埋めるAON(Angles-Only Navigation)の研究・解析・アドバイス
 - ターゲット情報の解析・観測・提供
 - H2A15号機上段機の製造者であるMHI殿からご提供頂いた情報を活用
 - ターゲット表面材料の紫外線照射試験等で光の反射率の劣化の予測データを提供
 - ターゲットの地上からの観測を実施、想定される姿勢運動の情報を提供
- 一般的な衛星環境試験設備の他、研究開発部門所有の特殊な試験設備を、試験ノウハウと共に多数供用(擾乱計測設備、迷光試験設備、恒星模擬装置、急減圧試験装置、GPS信号シミュレータ等)
- 軌道上サービス技術実証プラットフォーム“SATDyn”の開発・運用
 - 2台のロボットアームと10m×7mのXYステージから成る、大型モーションシミュレータ設備
 - センサ・搭載計算機ハードを用いた近傍運用の統合的検証試験等に適用
- 研究成果の知財提供(次ページ参照)



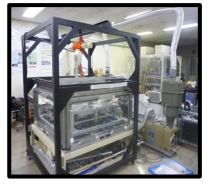
AON(Angles-Only Navigation) 研究成果の提供



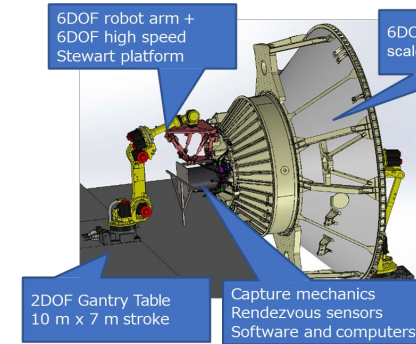
恒星模擬装置



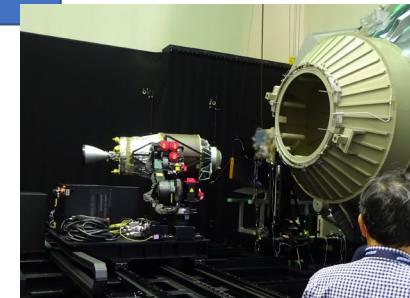
擾乱測定装置



急減圧試験装置



軌道上サービス技術実証プラットフォーム SATDyn



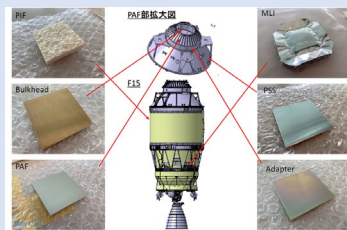
SATDynにおける近傍運用の閉ループ試験

フェーズI JAXAによる技術支援



(A) 非協力的ターゲットの光学特性モデリング

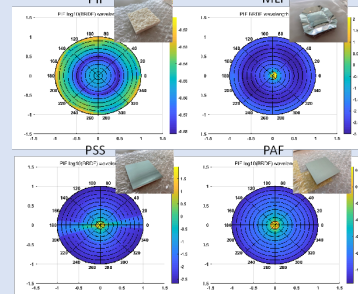
ランデブ用光学リフレクタ等の反射特性が既知かつ良好なマーカーが存在しない非協力的ターゲットの光学特性を定量的に把握



表面材料サンプルを入手・反射特性を測定



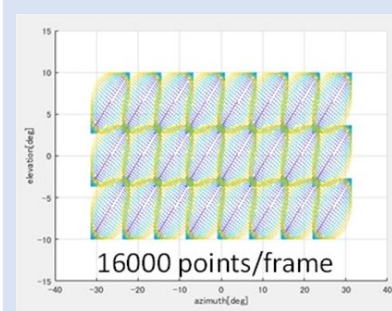
軌道上での反射特性劣化を紫外線照射試験で把握



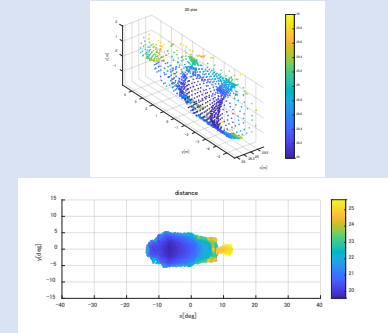
材料のBRDF(双方向反射率分布関数)を把握、ターゲット光学特性モデルが作成可能に

(B) LiDAR模擬データ生成シミュレータ研究

全フェーズに渡るフルスケール模型でのLiDAR航法試験が困難、精緻な模擬データを生成するシミュレータが航法検証に必須



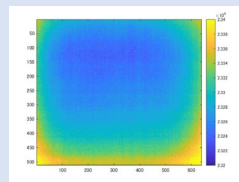
スキャンパターンモデル



LiDAR特性データとターゲット光学特性モデルを用いて、出力データの精緻な模擬を実現

(C) 赤外カメラ画像模擬データ生成シミュレータ研究

軌道上環境を模擬した地上での航法試験が困難、精緻な模擬画像データを生成するシミュレータが航法検証に必須

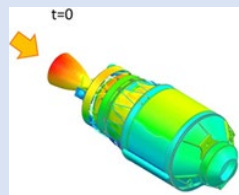


赤外カメラの特性把握試験

赤外カメラ特性データとターゲット熱分布を用いて、精緻な模擬画像を生成

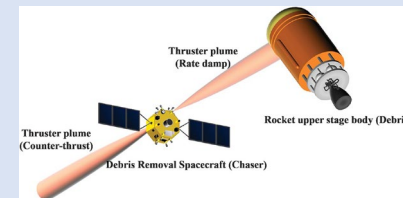


ターゲットの軌道上熱分布解析

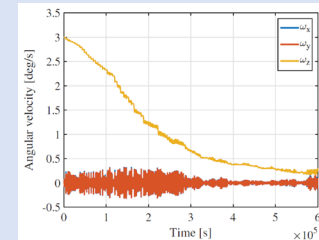


(D) ターゲットのスラスタプルームによる運動低減研究

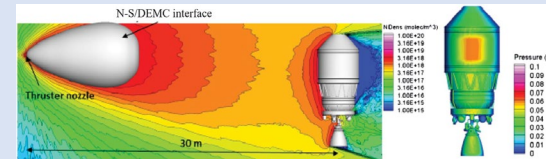
ターゲット姿勢運動が想定より速いケースにおいて、積極的に運動を低減し、ミッション実施可能とするオプション手段を提供



スラスタプルームを角運動量低減する方向に噴射。想定位置を保つために逆にも噴射する。



姿勢レート低減の例



スラスタプルームの与える力の数値流体力学による算出

ADRAS-J

- Demonstration satellite for CRD2 Phase I
- Designed, manufactured, tested, launched, operated and owned by Astroscale Japan
- Full-range Rendezvous and Proximity Operation (RPO) capability for non-cooperative targets

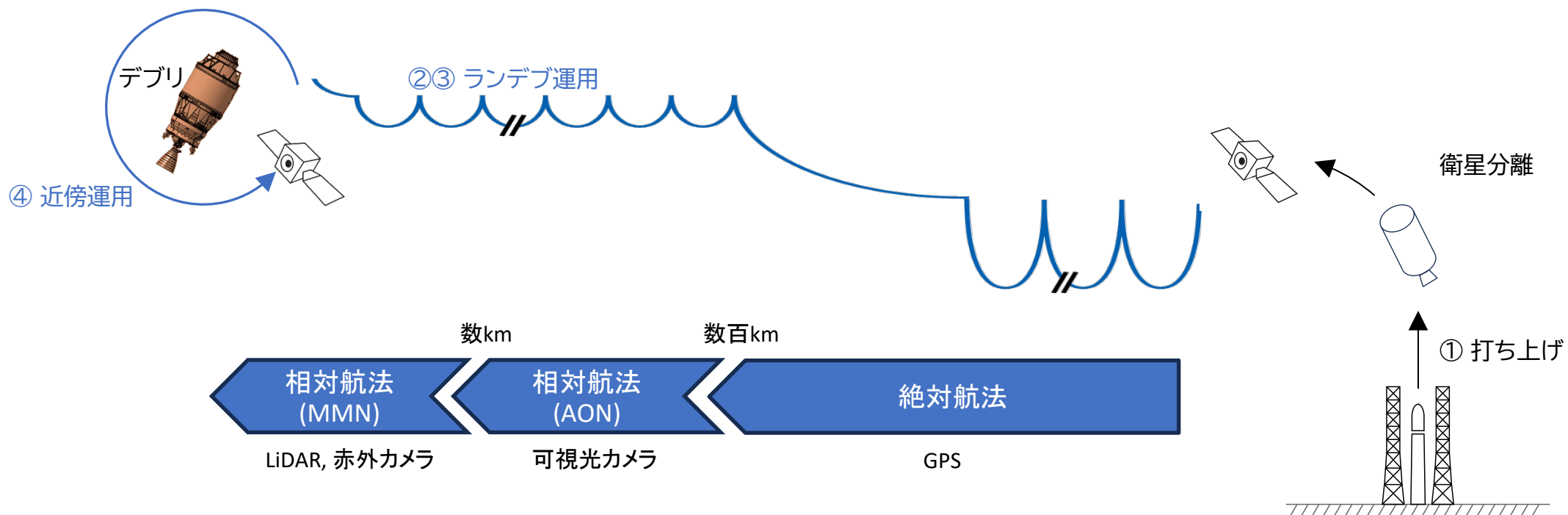


3,700mm x 810mm x 1,200mm
150kg

相対航法センサによる近傍接近



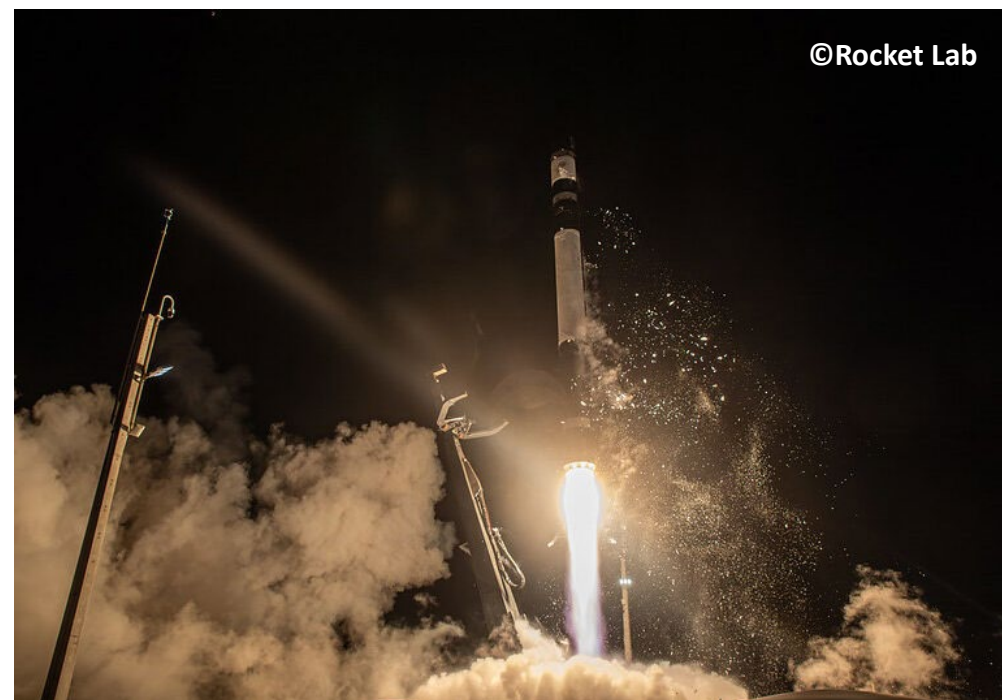
- 打ち上げ後、相対距離数百kmまでは地上観測によるターゲットの位置情報及びADRAS-J衛星のGPSデータを使い絶対航法により接近
- 相対距離数kmまでは可視光カメラによりターゲットの方角情報を得て相対航法(Angles-Only Navigation: AON)により接近
- 数kmから数十mでは赤外カメラ・LiDARを使いデブリの形状や姿勢の情報をを用いる相対航法(Model Matching Navigation: MMN)により接近



衛星運用実績



- 2024/2/18: Rocket LabのElectronロケットによりADRAS-J衛星打ち上げ
- 2/22: デブリへの接近を開始
- 4/9: 相対航法(AON)と近傍接近を開始
- 4/16: 相対航法(MMN)を開始
- 4/17: デブリの後方数百mへ接近
- 5/23: デブリ後方約50mへ接近、定点観測#1を実施
- 6/17: 定点観測#2を実施
- 6/19: 周回観測#1を実施
- 7/14: デブリ後方約50mに到達、定点観測#3を実施
- 7/15: 周回観測#2を実施
- 7/16: 周回観測#3を実施
- 7/17: 最終接近#1を実施、約20mまで接近
- 8/13: 周回観測#4を実施
- 11/30: 最終接近#2を実施、約15mまで接近
- 12/6 : デブリから離脱



衛星運用実績



- 2024/2/18: Rocket LabのElectronロケットによりADRAS-J衛星打ち上げ
- 2/22: デブリへの接近を開始
- 4/9: 相対航法(AON)と近傍接近を開始
- 4/16: 相対航法(MMN)を開始
- 4/17: デブリの後方数百mへ接近
- 5/23: デブリ後方約50mへ接近、定点観測#1を実施
- 6/17: 定点観測#2を実施
- 6/19: 周回観測#1を実施
- 7/14: デブリ後方約50mに到達、定点観測#3を実施
- 7/15: 周回観測#2を実施
- 7/16: 周回観測#3を実施
- 7/17: 最終接近#1を実施、約20mまで接近
- 8/13: 周回観測#4を実施
- 11/30: 最終接近#2を実施、約15mまで接近
- 12/6 : デブリから離脱



AONに用いたデブリの画像

衛星運用実績



- 2024/2/18: Rocket LabのElectronロケットによりADRAS-J衛星打ち上げ
- 2/22: デブリへの接近を開始
- 4/9: 相対航法(AON)と近傍接近を開始
- **4/16: 相対航法(MMN)を開始**
- 4/17: デブリの後方数百mへ接近
- 5/23: デブリ後方約50mへ接近、定点観測#1を実施
- 6/17: 定点観測#2を実施
- 6/19: 周回観測#1を実施
- 7/14: デブリ後方約50mに到達、定点観測#3を実施
- 7/15: 周回観測#2を実施
- 7/16: 周回観測#3を実施
- 7/17: 最終接近#1を実施、約20mまで接近
- 8/13: 周回観測#4を実施
- 11/30: 最終接近#2を実施、約15mまで接近
- 12/6 : デブリから離脱

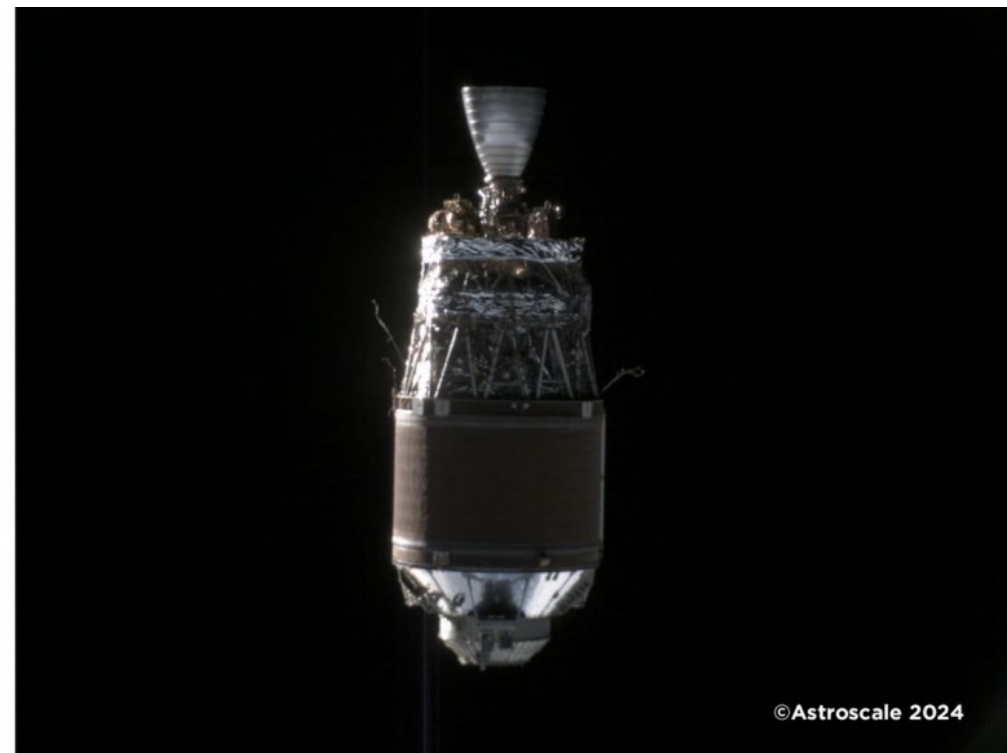


赤外カメラで撮影したデブリの画像

衛星運用実績



- 2024/2/18: Rocket LabのElectronロケットによりADRAS-J衛星打ち上げ
- 2/22: デブリへの接近を開始
- 4/9: 相対航法(AON)と近傍接近を開始
- 4/16: 相対航法(MMN)を開始
- 4/17: デブリの後方数百mへ接近
- **5/23: デブリ後方約50mへ接近、定点観測#1を実施**
- 6/17: 定点観測#2を実施
- 6/19: 周回観測#1を実施
- 7/14: デブリ後方約50mに到達、定点観測#3を実施
- 7/15: 周回観測#2を実施
- 7/16: 周回観測#3を実施
- 7/17: 最終接近#1を実施、約20mまで接近
- 8/13: 周回観測#4を実施
- 11/30: 最終接近#2を実施、約15mまで接近
- 12/6 : デブリから離脱



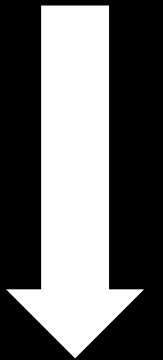
デブリの後方約50mからの撮影画像

定点観測画像（タイムラプス）（23th May 2024） from 50m V-bar



©Astroscale 2024

地球方向



衛星運用実績



- 2024/2/18: Rocket LabのElectronロケットによりADRAS-J衛星打ち上げ
- 2/22: デブリへの接近を開始
- 4/9: 相対航法(AON)と近傍接近を開始
- 4/16: 相対航法(MMN)を開始
- 4/17: デブリの後方数百mへ接近
- 5/23: デブリ後方約50mへ接近、定点観測#1を実施
- 6/17: 定点観測#2を実施
- 6/19: 周回観測#1を実施
- 7/14: デブリ後方約50mに到達、定点観測#3を実施
- **7/15: 周回観測#2を実施**
- **7/16: 周回観測#3を実施**
- 7/17: 最終接近#1を実施、約20mまで接近
- 8/13: 周回観測#4を実施
- 11/30: 最終接近#2を実施、約15mまで接近
- 12/6 : デブリから離脱



7/15周回観測撮影画像



7/16周回観測撮影画像

周回観測画像#1 (15th July 2024)



周回観測画像#2 (16th July 2024)



フェーズIプロジェクト目標達成状況



「サービス仕様」の設定意図である「フルレンジ非協力RPO技術の実証」が、民間の軌道上サービス事業者により達成された

※ RPO: Rendezvous and Proximity Operations(ランデブ及び近傍運用)

✓ success

(1) デブリ接近計画に対する実績の確認サービス

- 地表からターゲットデブリまでの近接接近までをカバーする非協力フルレンジRPO技術の実証が達成された

✓ success

(2) 定点観測サービス

- 軌道上サービスの近傍運用で必要となるターゲットの非協力的物体に対する高精度な相対位置保持制御能力の実証が達成された

✓ success

(3) 周回観測サービス

- 軌道上サービスの近傍運用で必要となるターゲットの非協力的物体に対する高精度な周回能力、特定部位へのアクセスのために周り込む能力、高精度な相対6自由度制御能力の実証が達成された

✓ success

(4) ミッション終了サービス

- ターゲットから安全に離脱し、ターゲットに衝突せず、かつ、25年ルールを遵守する高度に移動した



- CRD2フェーズ I プロジェクトの紹介

- プロジェクトの目的
- デブリ除去の必要性
- 民間事業者とのパートナーシップ
- センサによる接近
- 衛星運用実績

- CRD2の試験に使われた赤外カメラ用の模擬画像シミュレータの紹介

- 研究の背景
- シミュレータの機能
- モデル化
- 実画像による評価

デブリ除去ミッションと赤外カメラ



- 積極的デブリ除去(ADR)ミッションでは、非協力ターゲットと自身の衛星との相対的な位置・姿勢を推定する必要がある。
- センサとして考えられるのは可視光カメラ、赤外カメラ、LiDAR等

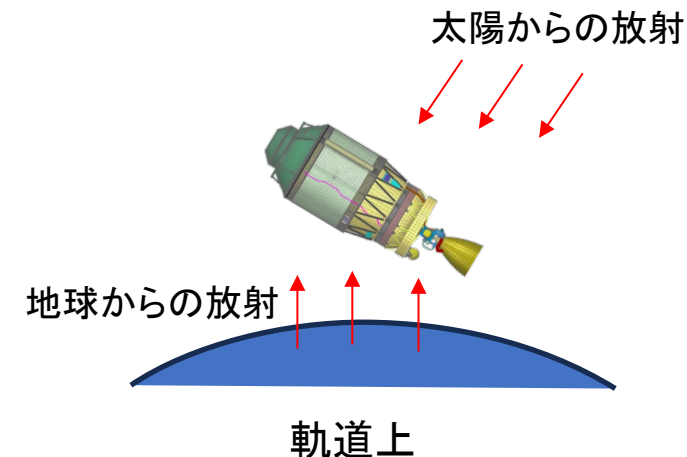
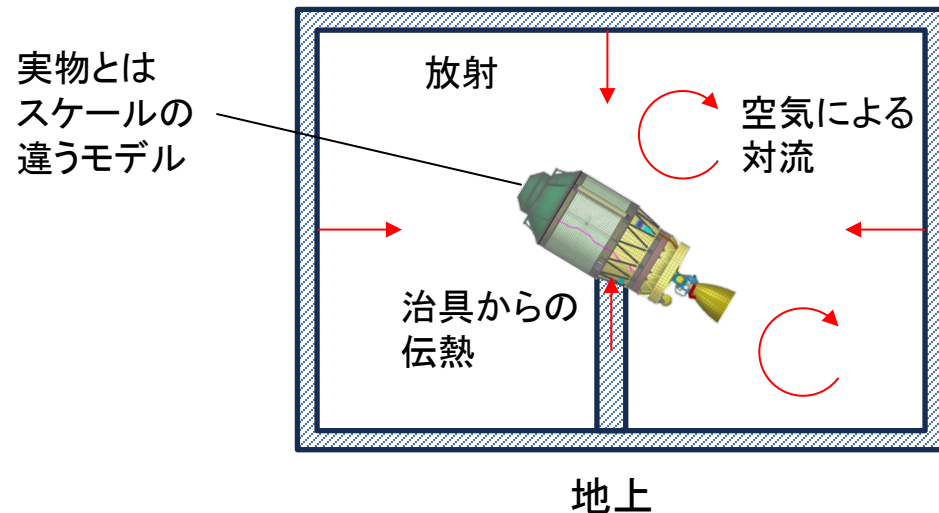
センサ	長所	短所
赤外カメラ	夜でも見える ライティング条件に感度が低い	画像品質(解像度、均一性)が低い
可視光カメラ	画像品質(解像度、均一性)が高い	夜は見えない ライティング条件に敏感
LiDAR	測距精度が高い	使用可能距離が比較的限定される

- 低軌道を周回するデブリは高頻度で日照(昼)・日陰(夜)を繰り返すため、日照条件に影響されにくい赤外カメラはADRミッションの相対航法に適している。

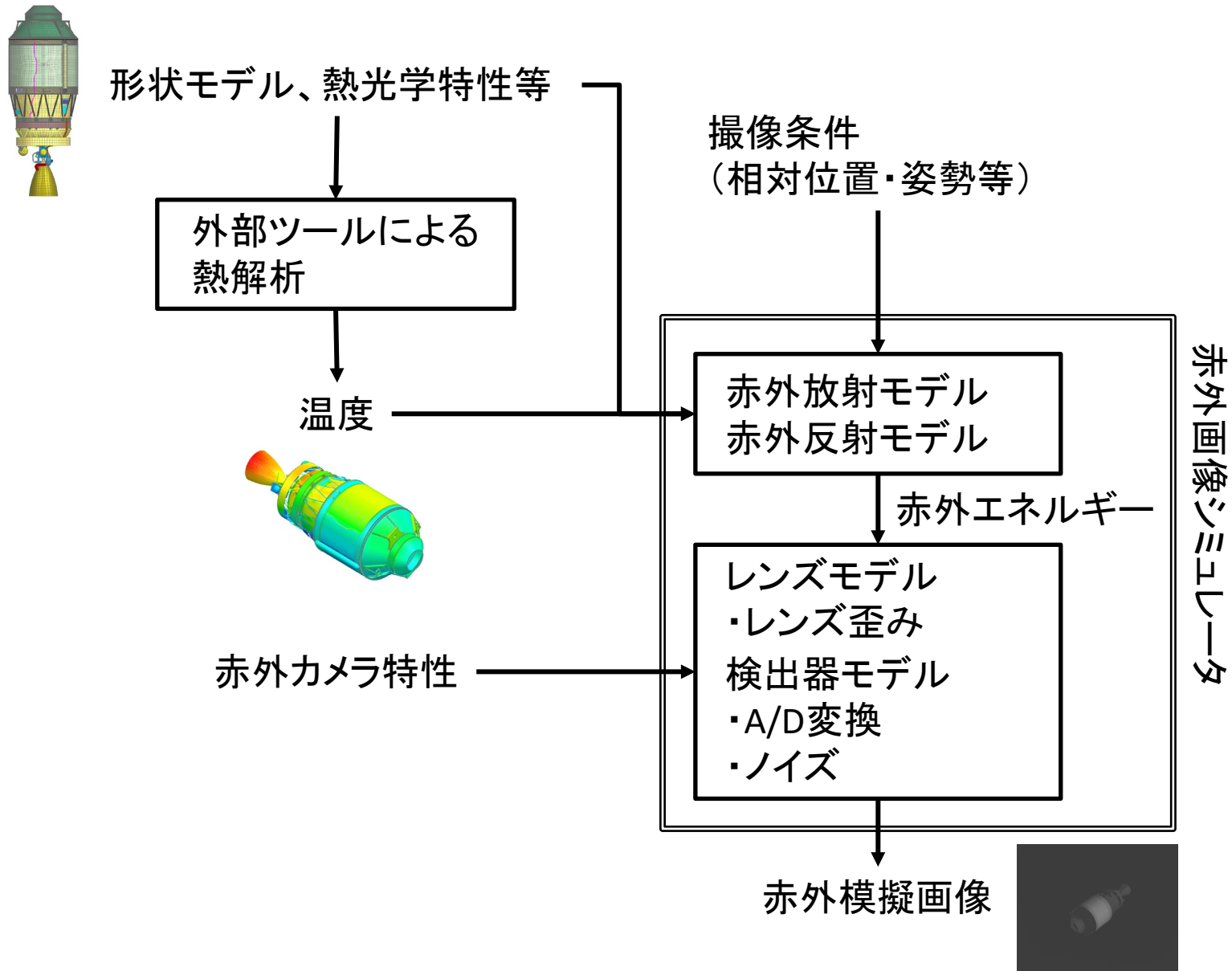
赤外カメラを使う際の検証の難しさ



- 人工衛星は一度打ち上げると修理が非常に困難なため、打ち上げ前に宇宙環境を想定した試験を可能な限り実施する (Test as You Fly)
- 衛星に搭載するソフトウェアの検証試験も同じ
- 赤外カメラによる航法アルゴリズムの検証のためには、軌道上でのターゲットの見え方を地上で再現できなければならないが、カメラから見える対象の温度環境を再現することは難しい
- そこで、赤外カメラ航法の検証のために、赤外カメラの模擬画像を作り、試験に使うことを検討



赤外画像シミュレータ概要



画素への赤外入射エネルギー



• 入力エネルギー P [W]

画素いっぱいに対象が存在する場合、入射エネルギーは対象までの距離や角度によらず、放射輝度のみで決まる。

$$P = L \cdot A \cos \theta_0 \cdot \underbrace{\frac{\pi(D/2)^2}{r^2}}_{\text{ターゲットから見たレンズの立体角 [sr]}} \cdot \tau = L \cdot \frac{\pi b^2}{4F^2} \cdot \tau$$

見かけの面積 [m²]

ターゲットから見たレンズの立体角 [sr]

L : ターゲットの放射輝度 [W/sr/m²]

A : 画素が見ている面積 [m²]

θ_0 : 面と視線のなす角

D : 口径 [m]

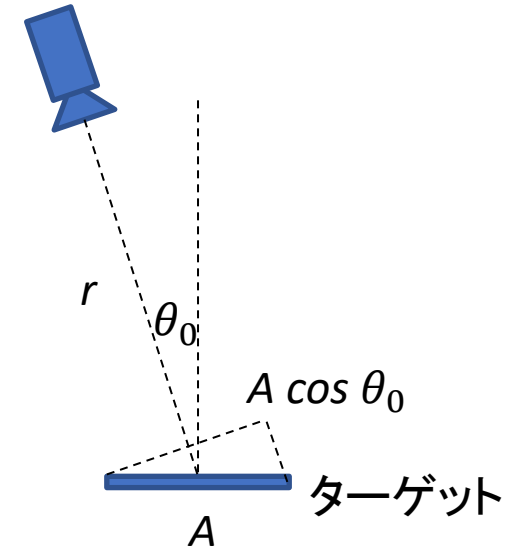
r : 距離 [m]

τ : 透過率

b : 画素の1辺の長さ [m]

F : F値

赤外カメラ



• 放射輝度 L

$$L = L_{thermal} + L_{reflect}$$

↑
放射

↑
反射

$$L_{thermal} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\lambda, T) d\lambda$$

↑

波長 λ 、温度 T における黒体放射 (Planckの法則)

$$L_{reflect} = \left(k_d \frac{1}{\pi} + k_s \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \theta_r \right) E \cos \theta_i \quad \leftarrow \text{Modified Phong model}$$

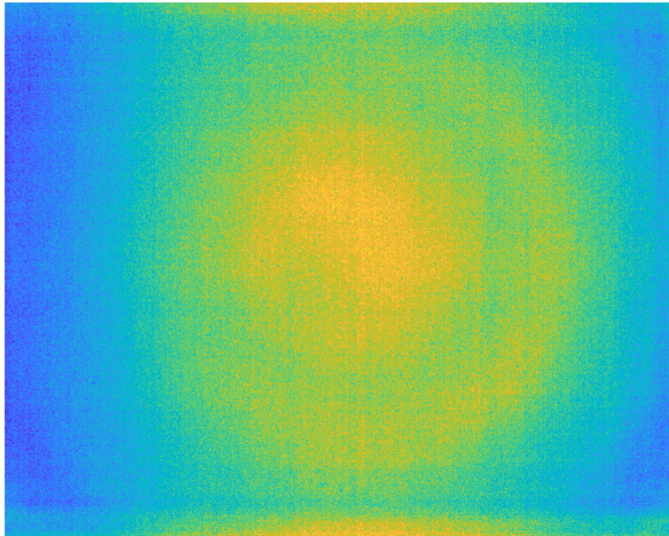
- $L_{thermal}$ はターゲットの赤外放射率 ε と温度 T から計算
- $L_{reflect}$ は赤外吸収率 α と放射照度 E から計算

カメラ特性の計測

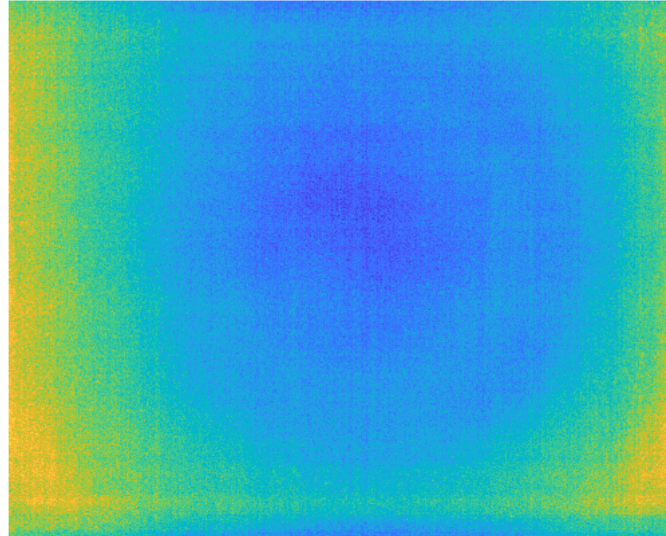


- 赤外カメラは画素ごとの感度ばらつきが大きいいため、画素ごとにゲイン・オフセット・ノイズを設定できるようにした。
- データは温度制御した黒体を画角全体に入れて撮影した画像から作成

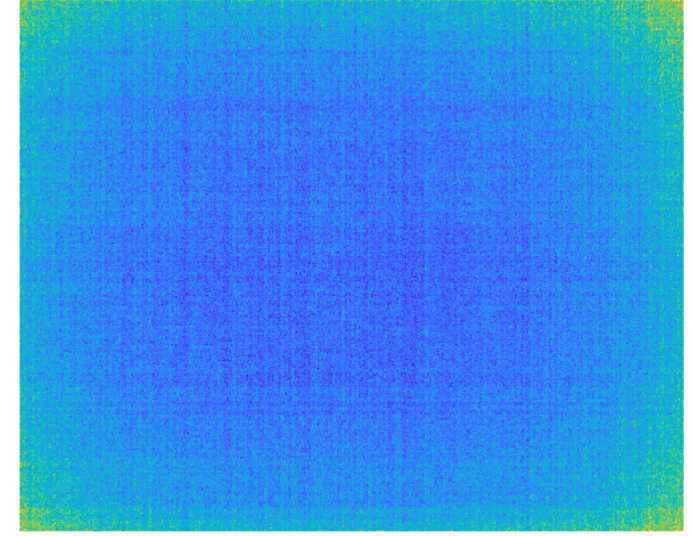
Gain



Offset



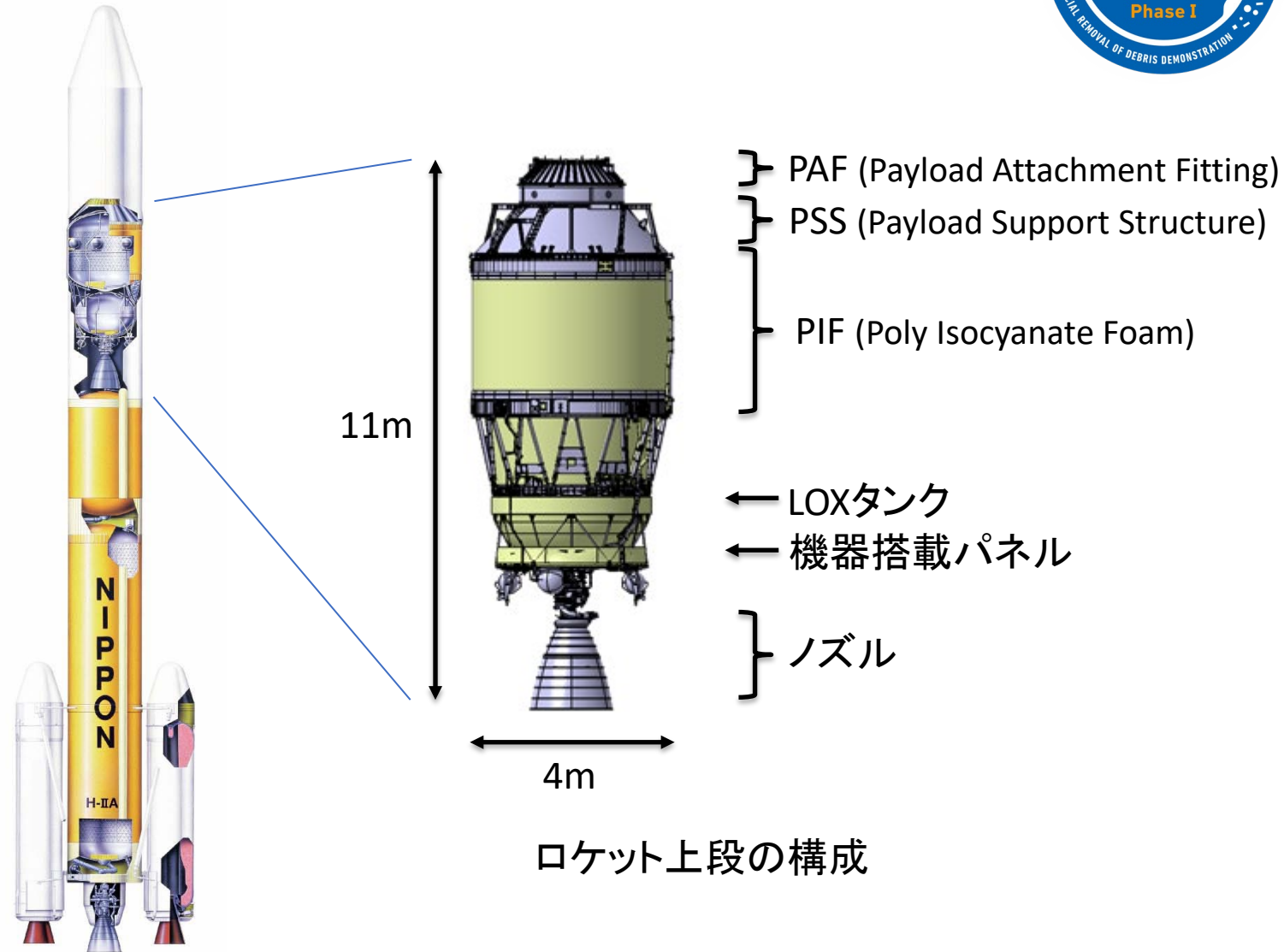
σ



CRD2のターゲット



- 2009年にGOSAT衛星を打ち上げたH-IIAロケット15号機の上段
- 軌道高度: 約600 km
- 軌道傾斜角: 約98 deg
- PAF側が地球を向いて回っている
- 各部の材質:
 - PAF, PSS, ノズル: 金属
 - LOXタンク、機器搭載パネル: MLIに覆われている
 - PIF(断熱材): 非金属



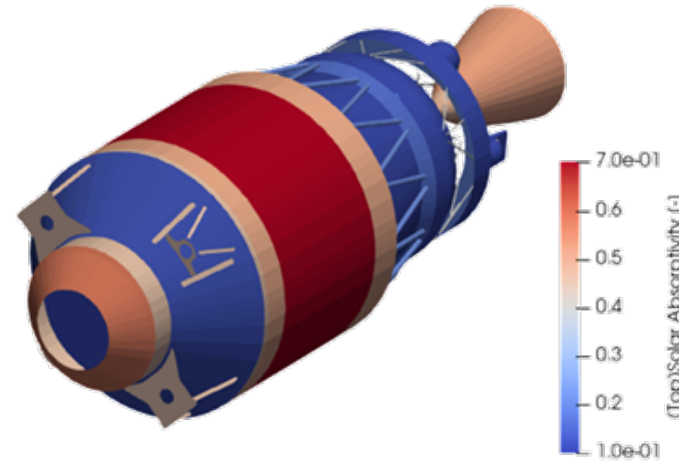
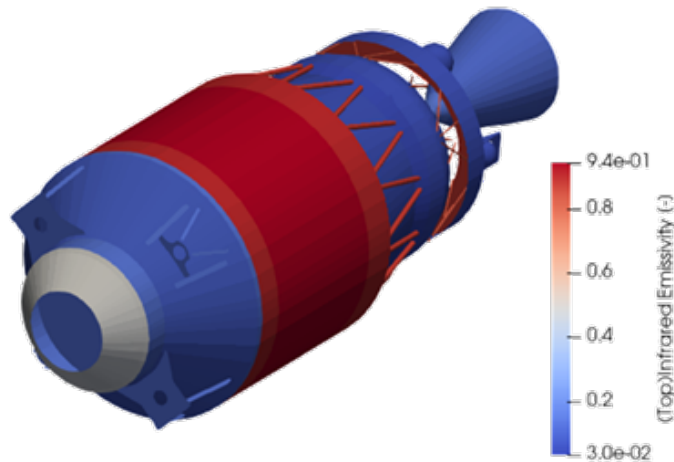
ターゲットの熱モデルの作成



- 熱モデルは過去の打ち上げ時に温度計測をし、コリレーションしたモデルをベースにした。
- 熱光学特性(α 、 ε)は基本的に設計時の情報を使用
- PIFについては紫外線による劣化が想定されていたため、同じ素材に対し紫外線照射し、計測した熱光学特性を適用



紫外線照射前のPIF(左)と照射後のPIF(右)



作成した熱モデルの赤外放射率 ε (左)と赤外吸収率 α (右)

その他のシミュレータ機能



- カメラモデル・熱モデルの作成により基本的な(理想的な)模擬画像の作成はできるようになった。
- 赤外カメラの航法アルゴリズムの検証という観点では、画像処理に悪影響を及ぼすノイズ等にロバストであることを試験する必要がある。
- シミュレータには以下の機能も追加
 - 画像のゲイン・オフセット・ノイズのバランスを変えてノイジーな画像を作る機能
 - ターゲット以外に地球が画角に入った場合の画像を作る機能

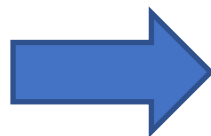
ノイズの付加



- 赤外カメラは画素ごとの感度の不均一性が大きく、検出器やレンズの温度の影響も受ける。
- 赤外カメラにはこのような状態でも画像の品質を保つために、フラットフィールド補正(FFC)と呼ばれる、画像を均一にする機能が備わっているものもある。
- ただし、温度変化の大きな宇宙環境ではこのような機能が十分に働かないことも想定されるため、ノイジーな模擬画像を作り地上試験で検証できるよう画素のゲイン・オフセット・ノイズのバランスを変化させられるようにした。



ノイズの強調

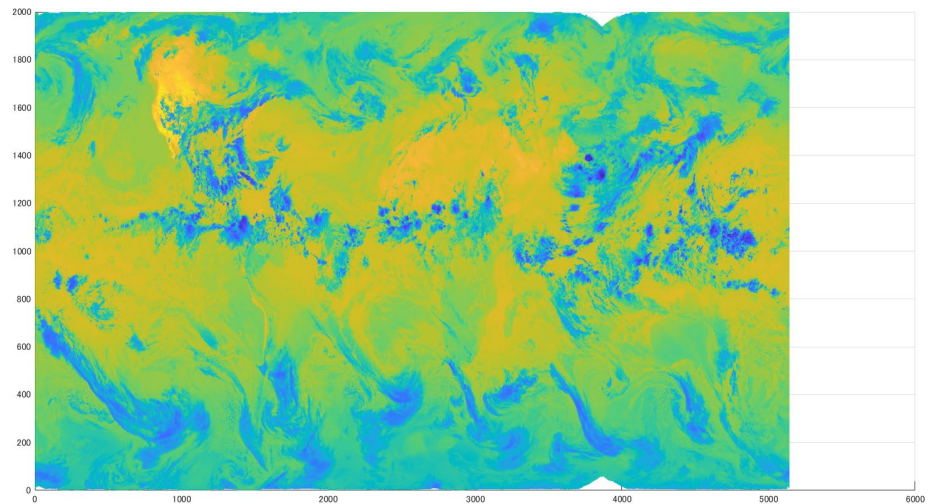


- 画像周囲が明るくなる
- グリッド上のノイズが見える

地球背景の画像

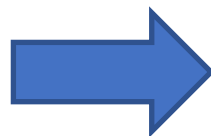


- 低軌道では地球が視野の多くを占めることになる。
- 地球を赤外カメラで撮影した画像として、気象衛星のデータが公開されている(NOAAが提供している複数気象衛星の画像を結合したデータGridSatやNICTのひまわり衛星データアーカイブ等)
- これらの輝度温度のデータをテクスチャとしてシミュレータに読み込ませ、各画素への入力エネルギーを計算するようにした。



輝度温度 [K]

import



赤外模擬画像

軌道上実画像によるシミュレータの評価

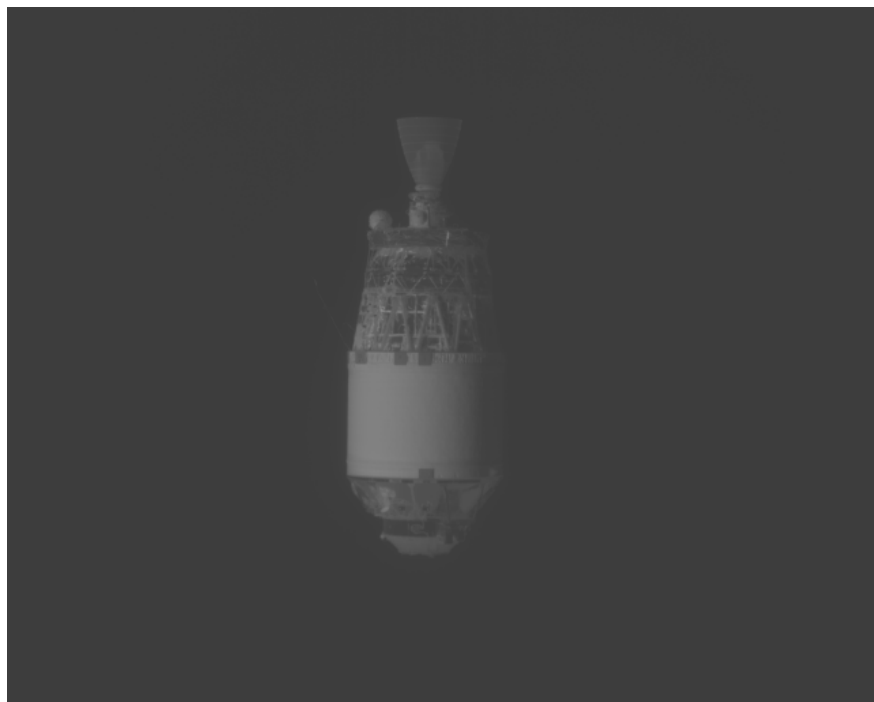


- この赤外画像シミュレータは、CRD2フェーズ I プロジェクトのADRAS-J衛星の地上試験に取り込まれ、赤外カメラによる航法アルゴリズムの検証に使われた。
- しかし、「実際に軌道上でどのような赤外画像が撮影されるのか」については、(赤外カメラ以外のセンサも同様だが)行って撮影してみないとわからない部分があった。
- ADRAS-Jにより得られた実画像を使い、打ち上げ前に作っていたシミュレータがどこまで本物に近かったのか、評価(答え合わせ)を実施

赤外カメラで撮影された画像



- 相対航法による接近フェーズで赤外画像を撮影
- 日照中、日陰中の代表的な画像を以下に示す。



日照中

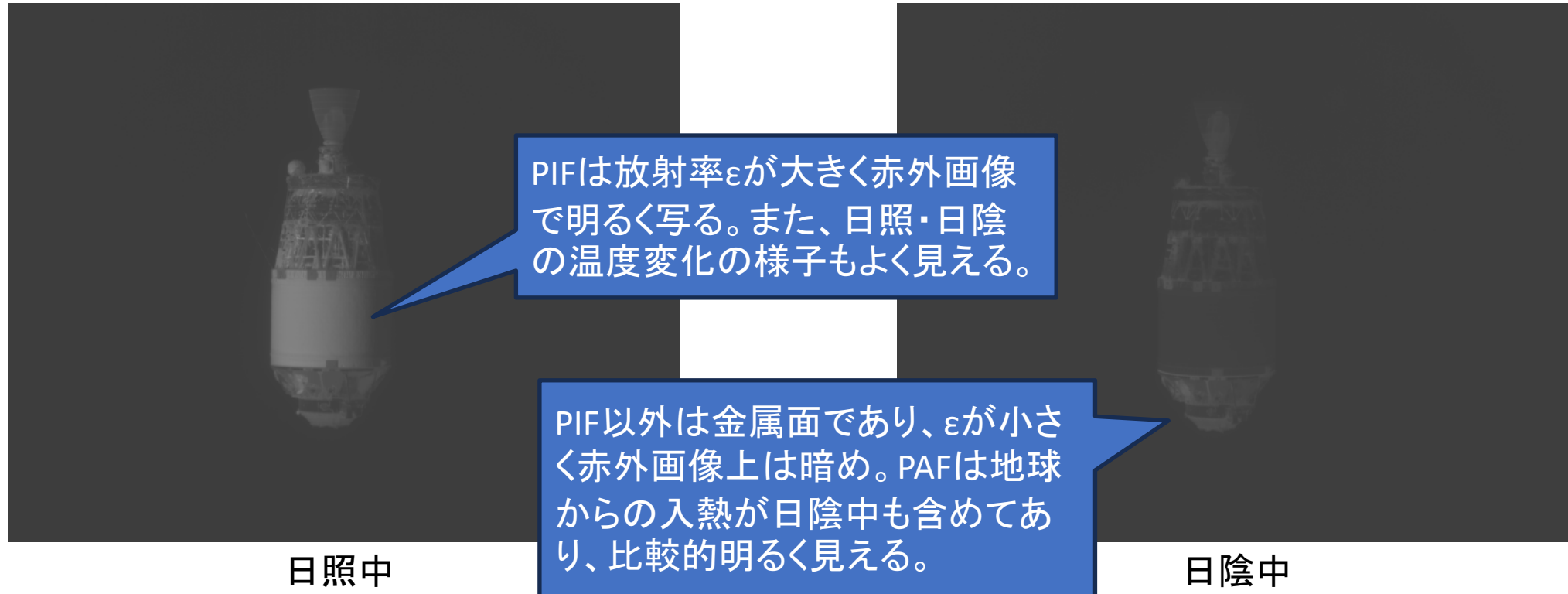


日陰中

赤外カメラで撮影された画像



- 相対航法による接近フェーズで赤外画像を撮影
- 日照中、日陰中の代表的な画像を以下に示す。

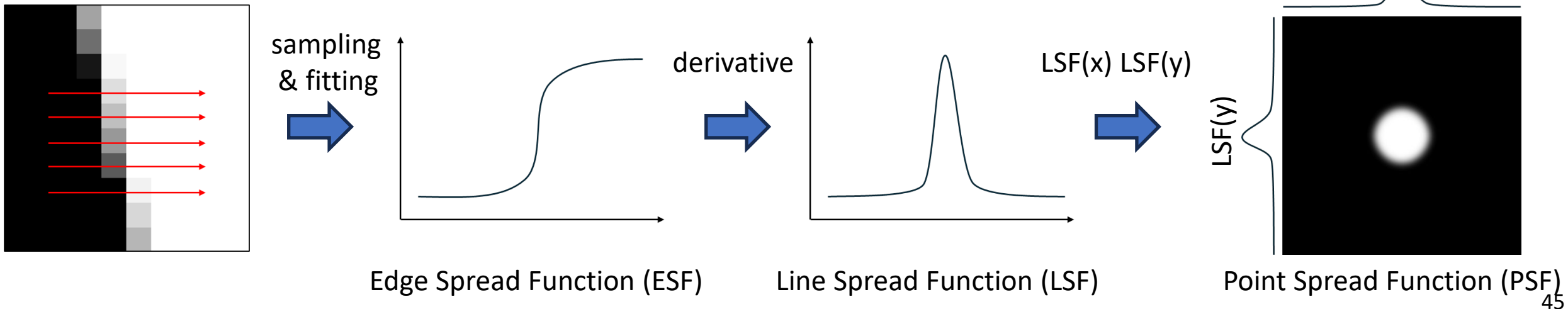


• 背景の変動

- 撮影画像を時系列で見えていくと画像全体の明るさが連続的・不連続的に変化している様子が見えた。
- この変化はカメラの温度変化や、カメラの補正機能によるものと考えられる。
- この輝度変化は後で行う輝度の時刻変化の評価の際には差し引く必要がある。

• PSFの推定

- PIFと宇宙空間の直線エッジ部分を使い、点広がり関数(PSF)を推定



- PSF推定(続き)

- 推定したPSFを使い、Wiener deconvolution によりぼやけのない画像を作成
- 多少人工的なノイズが乗ってしまうが、よりシャープな画像を得ることができる。



元画像



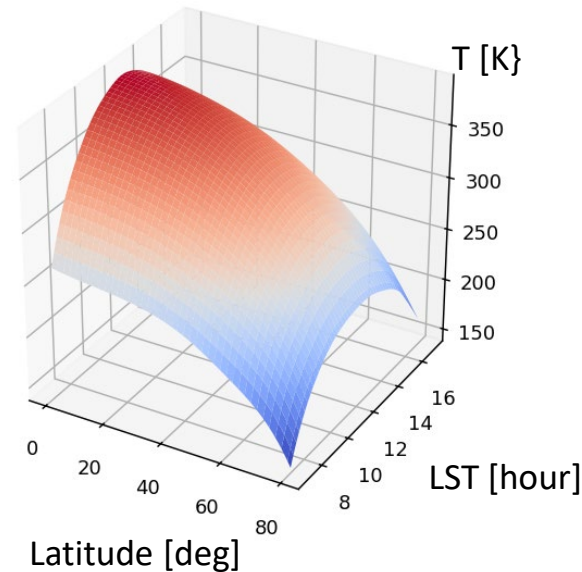
処理後の画像

カメラモデルの評価

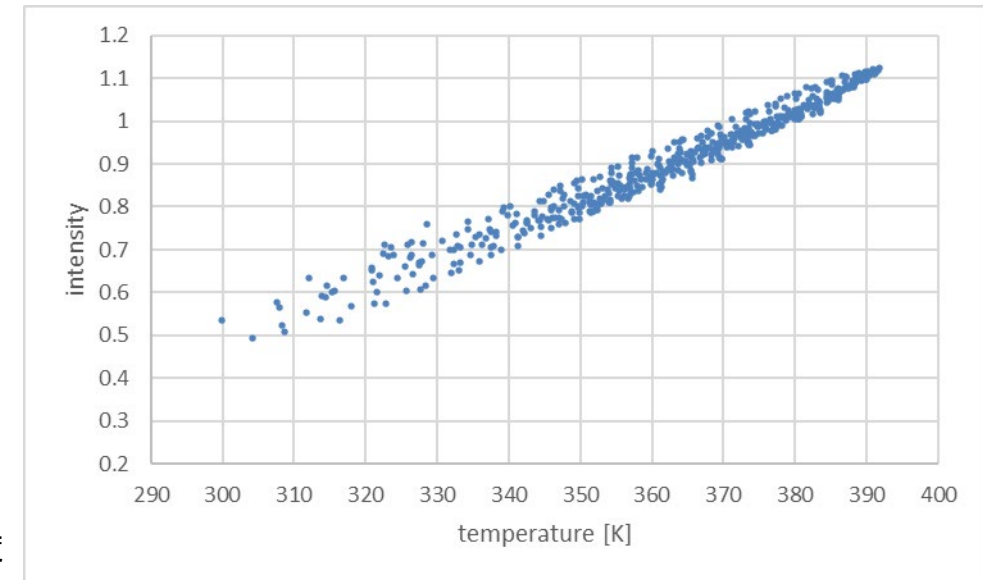


• 輝度校正

- 月は輝度温度が比較的安定しており、かつ明らかにになっている物体
- 月が写っている画像から、輝度温度と画素値の関係を得ることができる。



参考文献*のデータから補間した月面の輝度温度

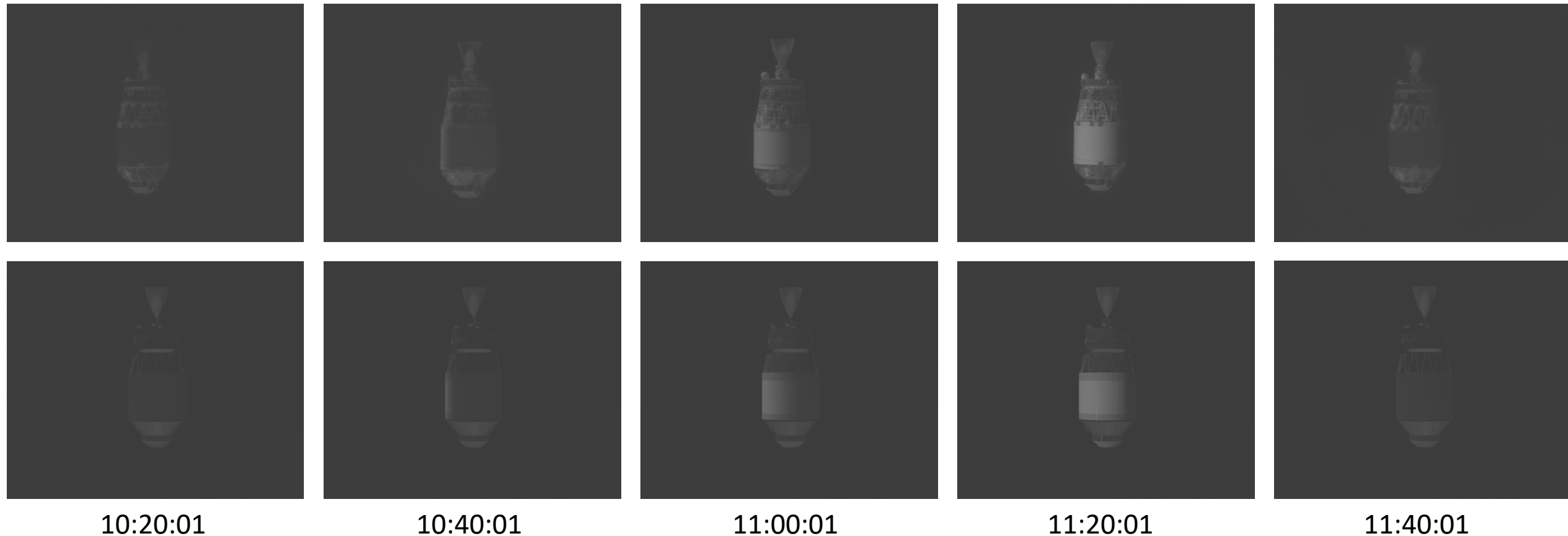


*Williams, J.-P., Paige, D.A., Greenhagen, B.T. & Sefton-Nash, E. (2017). The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment, *Icarus* 283, pp300-325.

実画像と模擬画像の比較



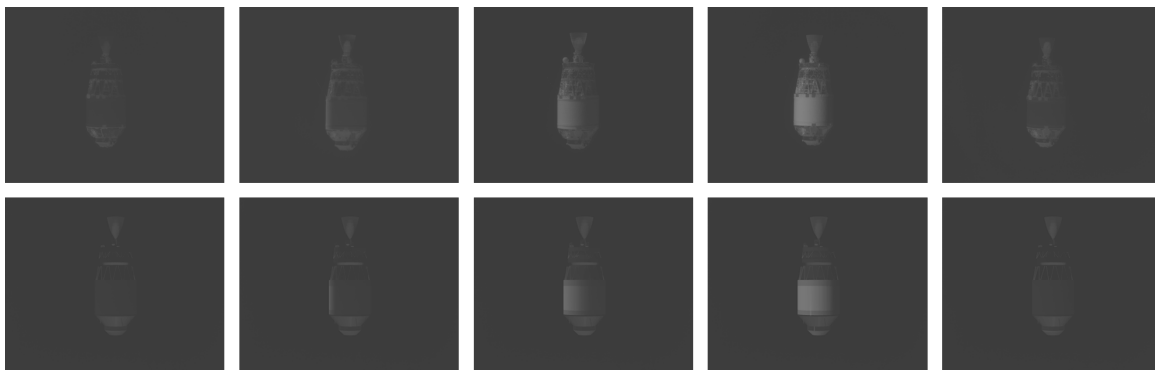
- 軌道一周回分の赤外画像列を抽出(上段)
 - 日照開始から次の日照開始まで
- 同じ条件で熱解析を行い模擬画像を作成(下段)



熱モデルの評価



- ターゲット上の代表点を選び、各部位の画像上の輝度値変化を実画像と模擬画像で比較(右図)
- 全体的にはおおむね一致
- 各部位の輝度プロファイルについて以下で詳細に見ていく。



10:20:01

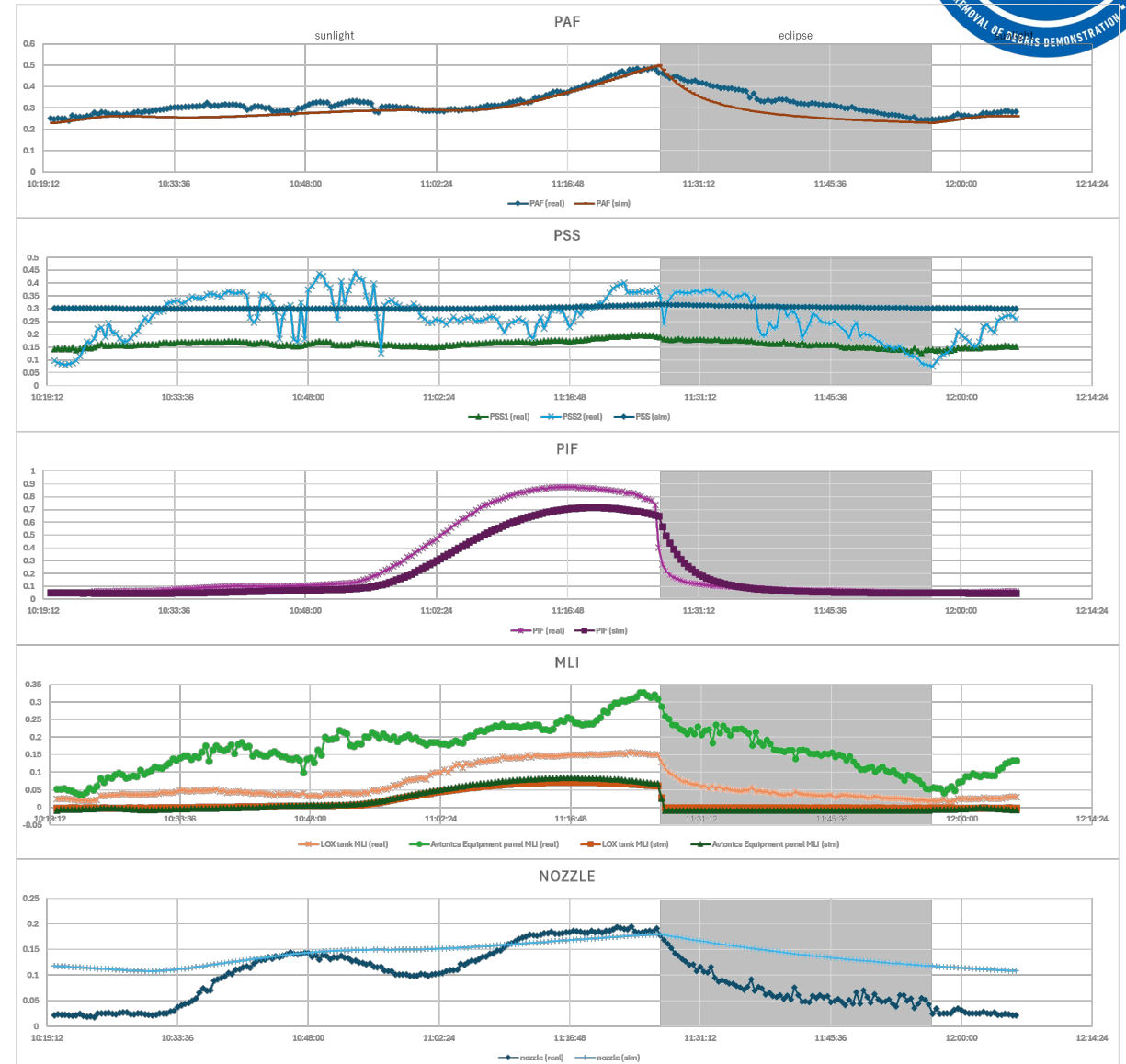
10:40:01

11:00:01

11:20:01

11:40:01

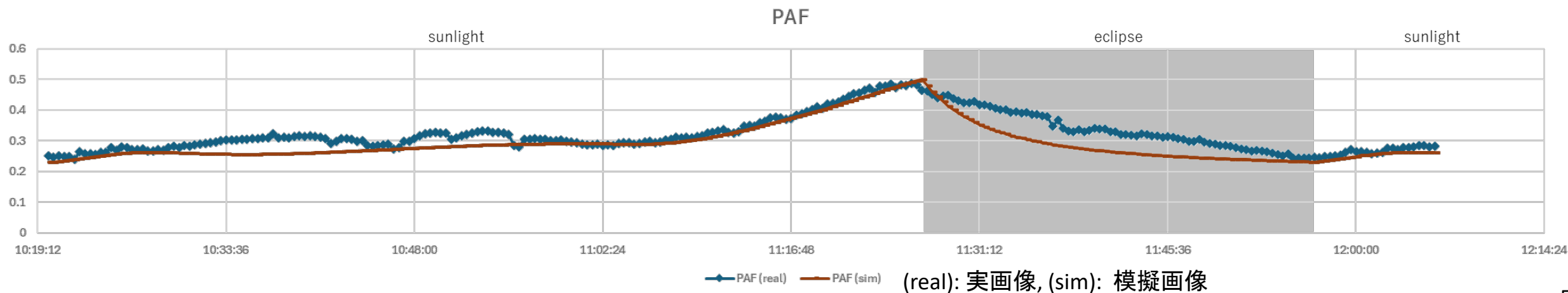
Actual (upper row) and simulated (lower row) images



輝度プロファイルの比較 - PAF



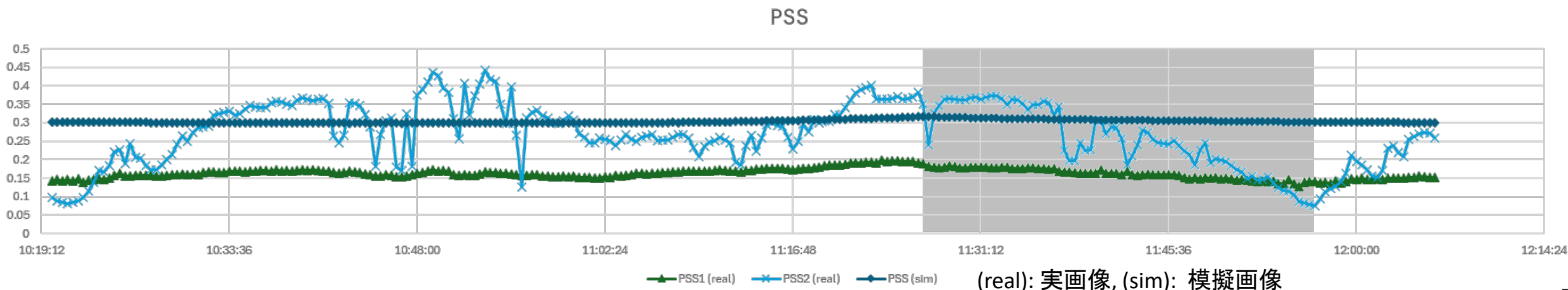
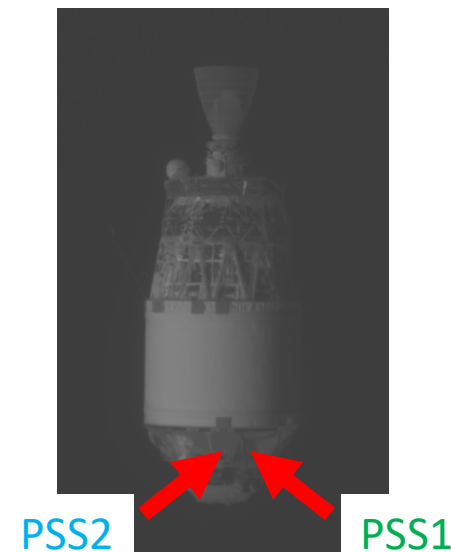
- 輝度の最大・最小はほぼ一致
- 輝度の増加の様子はかなり似ているが、減少は模擬画像の方が早い。



輝度プロファイルの比較 - PSS



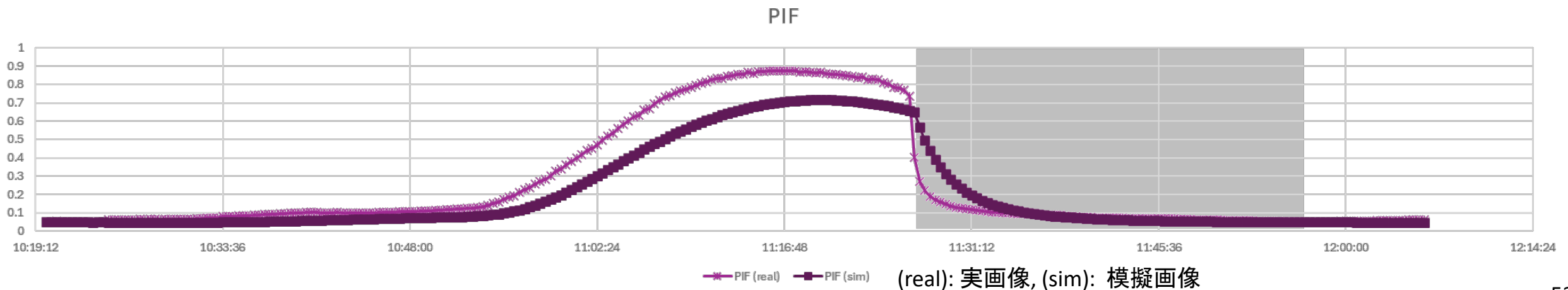
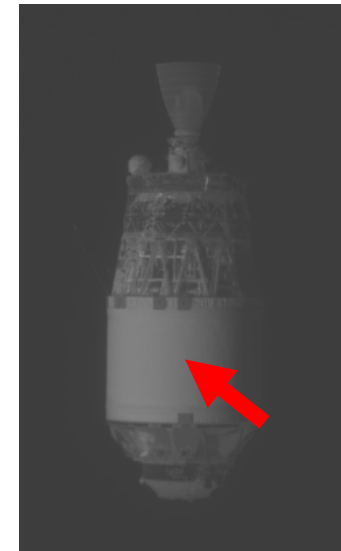
- PSSは地球の反射が強く見られる。実画像からは地球反射がない点(PSS1)とある点(PSS2)の2点を抽出
 - PSS2は時々刻々と、真下にある地球の様子が映りこんでおり、輝度変化が激しい
 - PSS1の輝度変化は緩やか
- 模擬画像では地球の映り込みは再現していないため輝度変化は緩やかであり、PSS1の変化に近い



輝度プロファイルの比較 - PIF



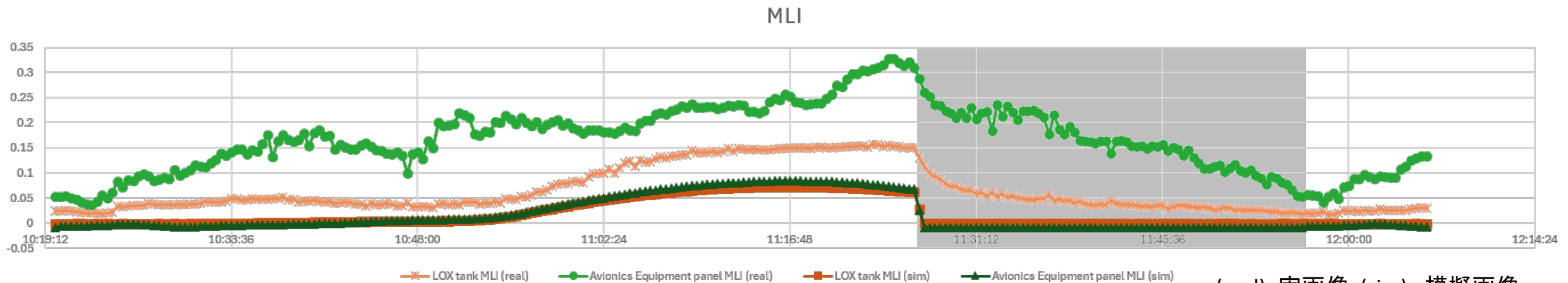
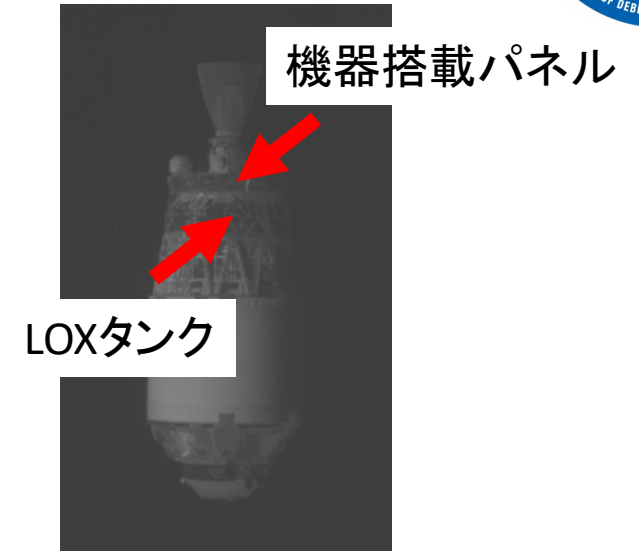
- 輝度変化の仕方はおおむね一致
- しかし、輝度の増加・減少の速度は模擬画像の方が遅く、最大輝度値も模擬画像の方が低い
- 実物の熱容量が作成した熱モデルより小さいか、太陽光吸収率が高い可能性



輝度プロファイルの比較 - MLI



- MLIに覆われている部位も実画像の輝度変化が大きい
- 実画像では強い地球反射が見られること、MLIの細かなしわにより抽出位置の細かなずれが輝度変化として見えることが原因と考えられる。

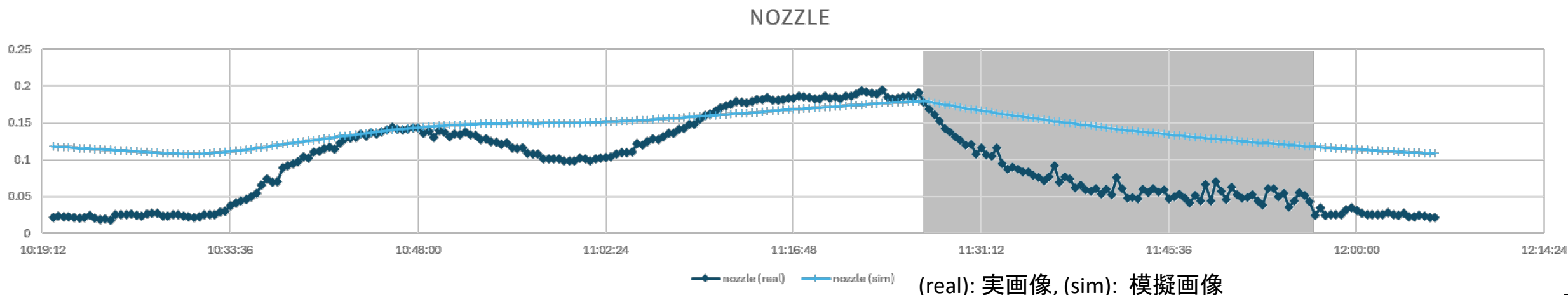


(real): 実画像, (sim): 模擬画像

輝度プロファイルの比較 - Nozzle



- ノズルについては実画像に比べ模擬画像の輝度変化が小さい
- 熱モデルではノズルを単純な板として表現しているが、これにより、厚みや形状の差が熱容量の差となり違いが生じたことが一つの要因と考えられる。



赤外画像シミュレータまとめ



- CRD2フェーズ I で得られた赤外カメラの実画像と、打ち上げ前に用意していたモデルによる模擬画像を比較。輝度プロファイルは全体的におおむね一致していた。
- デブリ除去ミッションにおいて、赤外カメラによる航法アルゴリズムの検証のために模擬画像を使うことは有効だったと言える。
- また、軌道上で10年以上が経過したターゲットに対する以下の熱モデル作成方針も妥当であった。
 - 金属部分の熱光学特性は打ち上げ前からほぼ変化していない
 - 断熱材については紫外線劣化した状態の熱光学特性を設定
- ターゲットの熱モデルの作成は、デブリ除去のためターゲットを把持する際、自身の衛星が受ける熱を把握するためにも必要

最後に



- 商業デブリ除去実証(CRD2)の取り組みと、軌道上赤外画像を模擬するシミュレータについて紹介
- CRD2はフェーズⅠからフェーズⅡへ
 - CRD2は大型デブリ除去を目指しフェーズⅡプロジェクトが進行中
 - 2027年度打ち上げ目標



ご清聴ありがとうございました