

研究開発ミッション

(デブリ除去技術実証, ライダー観測技術, 再使用型宇宙輸送システム)

の検討状況について

平成30年8月2日

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
理事 今井 良一

1. はじめに(本日の報告内容)



- JAXA研究開発部門では、宇宙基本計画、第4期中長期計画に従い、新たな価値を実現する宇宙産業基盤・科学技術基盤の維持・強化を目的とする研究開発を実施している。
- 本報告では、現在JAXA研究開発部門で進めている研究開発(イノベーションに向けたキー技術の実証)ミッションとして、

1. デブリ除去技術の実証
2. ライダー観測技術
3. 再使用型宇宙輸送システム

の検討状況について報告する。

2. デブリ除去技術の実証



2.1 宇宙基本計画上の位置づけ

- 宇宙基本計画(平成28年4月1日閣議決定):
 - 4.(1)① i) 宇宙空間の安定的利用の確保において「デブリ除去技術の開発等に取り組み、宇宙空間の利用環境を改善する。」と記載されている。
- 宇宙基本計画工程表(平成29年12月12日 宇宙開発戦略本部決定):
 - 「平成30年度以降に、我が国由来の衝突の危険性が高いスペースデブリの対策を主眼に、除去システムの確立に向けて段階的な技術の開発を行う。」とされている。
- 宇宙基本計画の工程表改訂に向けた重点事項(平成30年6月22日宇宙政策委員会):
 - 「平成31年度から、我が国由来の衝突の危険性が高いスペースデブリの対策を主眼に、除去システムに係る技術の軌道上実証計画を進める。計画の推進に当たっては、民間活力を利用する。」とされており、工程表に軌道上実証が位置付けられる調整がなされている。

2. デブリ除去技術の実証

2.2 宇宙デブリ問題の概要

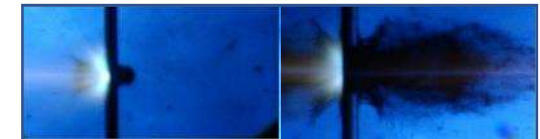
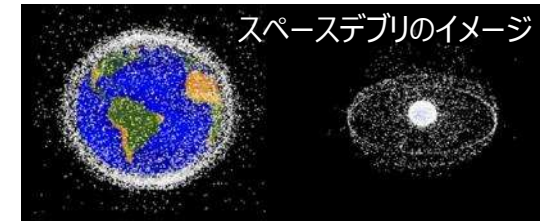
- 宇宙デブリは持続的な宇宙開発にとって喫緊の課題:

- 発見・追跡可能な比較的大きな宇宙デブリは約23,000個 (上図)
- 10mm程度のデブリは50~70万個、1mm程度は一億個以上とも言われている

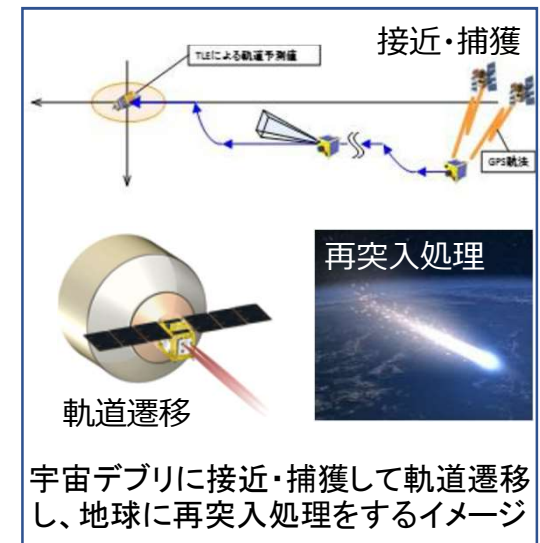
- ISS、人工衛星等の衝突回避運用は全世界で年100回以上
- 衝突すれば宇宙機や人工衛星の破壊につながる (中図)

- 新たな宇宙デブリを生まないためには、「宇宙デブリ同士を衝突させない」ことが重要

- 効果的な対策として、衝突の危険性が高い大型の宇宙デブリの除去技術を研究開発している (下図)
- また、宇宙デブリ対策は、宇宙の新しい事業分野になることが期待される。



4.3mmの板に、2.3mmの宇宙デブリを約5km/秒でぶつけた実験



2. デブリ除去技術の実証

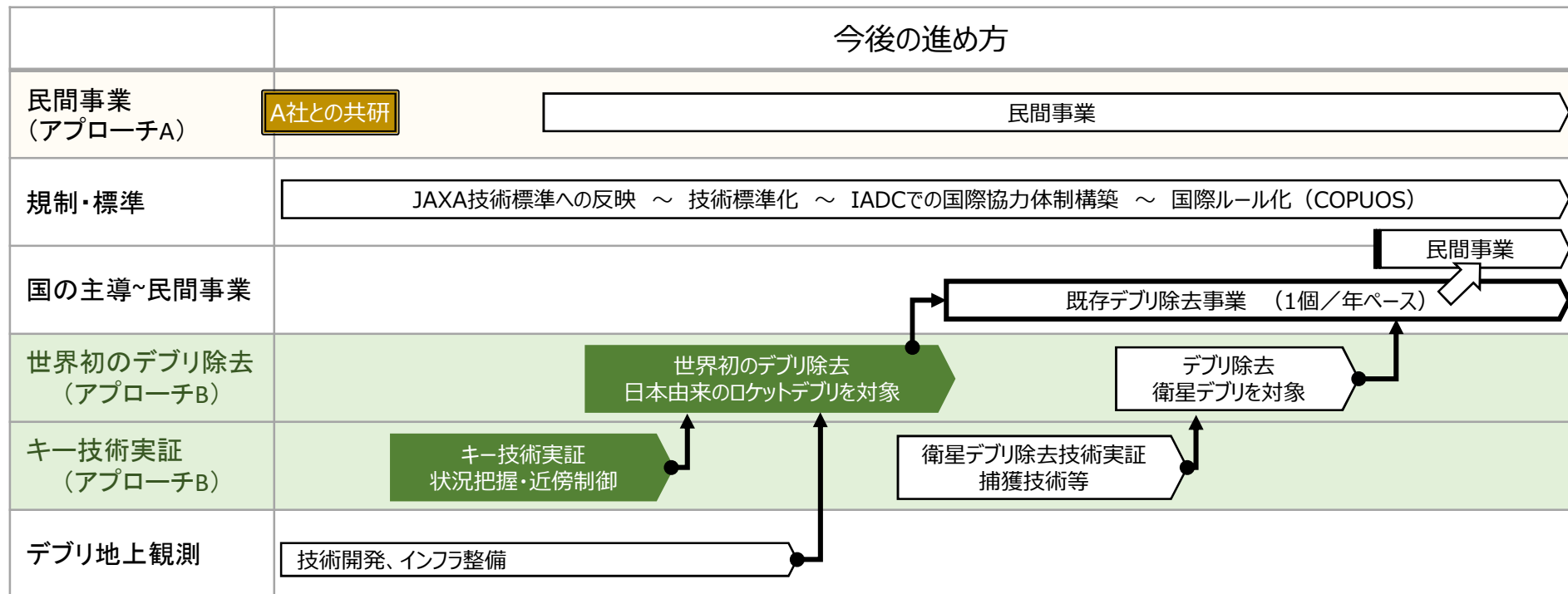


2.3 本研究の目標と計画

□ 目標：2020年代に宇宙デブリ除去を新たな宇宙事業として拓く

アプローチA: 宇宙デブリに対して、独自の事業化を目指す **企業と共同研究**を進めている。

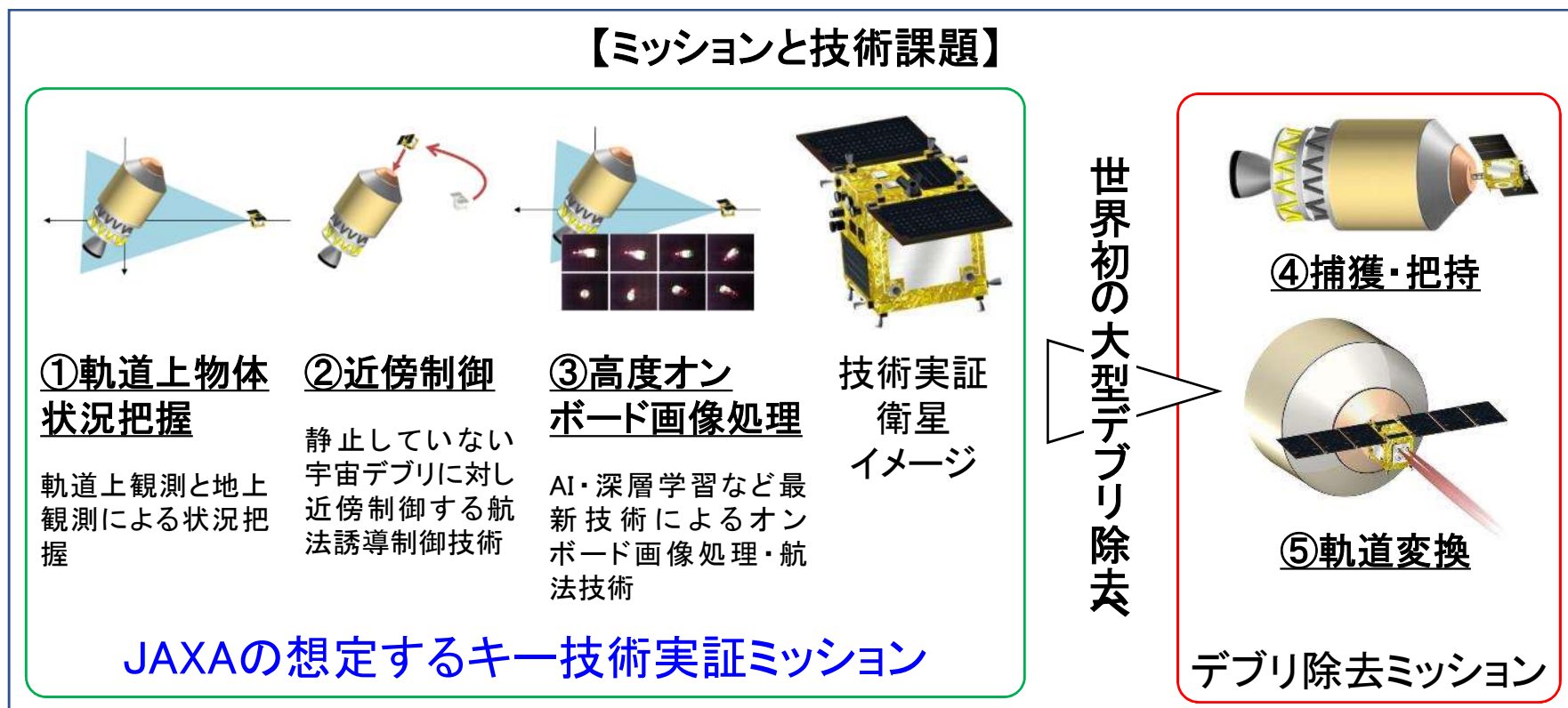
アプローチB: 既存の大型宇宙デブリ除去を世界に先駆けて行い、技術的な実現性を示すことで、その優位性を活かし、新しい事業分野を切り開く革新的なイノベーションに繋げる。



2. デブリ除去技術の実証

2.4 研究開発の概要

宇宙デブリ対策の事業化を目指す民間事業者と連携し、新たな市場の創出と我が国の国際競争力の優位性確保を目的とした技術実証として、我が国由来の大型ロケットデブリ除去の実現を目指す。



- 世界に先駆けて、軌道上デブリ除去うちでも効果が大きく、技術的に高度な大型デブリ除去の実証を行う。

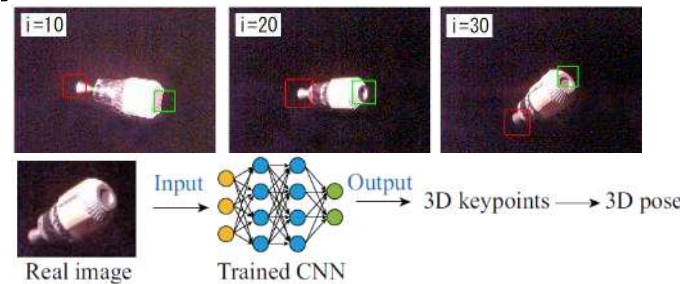
2. デブリ除去技術の実証

2.5 デブリ除去技術実証に向けたキー技術の研究開発状況

① 宇宙デブリ(非協力物体)へのランデブ(接近)技術

➤ 画像航法技術(オンボード画像処理)

深層学習を用いた畳み込みニューラルネットワーク(CNN)によるロバストオンボードデブリ画像認識・航法技術のソフトウェア研究および地上実験を実施



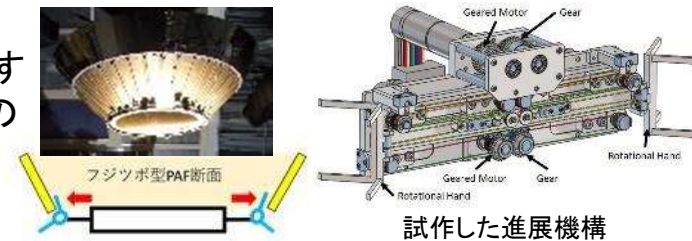
適用する
ミッションイメージ



② 非静止宇宙デブリの捕獲・把持技術

➤ 捕獲機構技術(伸展機構)

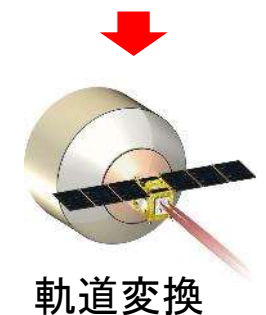
ロケット上段の衛星分離部(PAF)を確実に捕獲・把持する伸展機構の試作評価および運動している宇宙デブリの捕獲運用の地上検証技術研究を実施



③ 小型除去衛星による大型宇宙デブリの軌道変換技術

➤ 小電力・小型電気推進技術

大質量宇宙デブリを小型の除去衛星により軌道降下させるために必要となる小電力・小型で長寿命(Magnetic shieldingによる損耗低減)な電気推進システムの試作評価・地上試験を実施



3. ライダー観測技術



3.1 宇宙基本計画上の位置づけ

- 宇宙基本計画(平成28年4月1日閣議決定):

4.(2)①ii)衛星リモートセンシング」において、「今後、上記以外の新たなリモートセンシング衛星の開発及びセンサ技術の高度化に当たっては、我が国の技術的優位や、学術・ユーザーコミュニティからの要望、国際協力、外交戦略上の位置づけ等の観点を踏まえ、地球規模課題の解決や国民生活の向上への貢献など、出口が明確なものについて優先的に進める。」とされている。

- 宇宙基本計画の工程表改訂に向けた重点事項
(平成30年6月22日宇宙政策委員会):

「ライダー観測についても開発に向けた研究に着実に取り組む。」と明記されており、工程表にライダーに関する研究について盛り込む調整がなされている。

なお、日本学術会議からの提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」(平成29年7月)を実現する方策を示す「地球観測グランドデザイン」(平成30年4月、TFリモセン分科会) 五つの選定ミッションのうち、ライダー観測技術(MOLI)が新規ミッションの第2候補に選ばれている

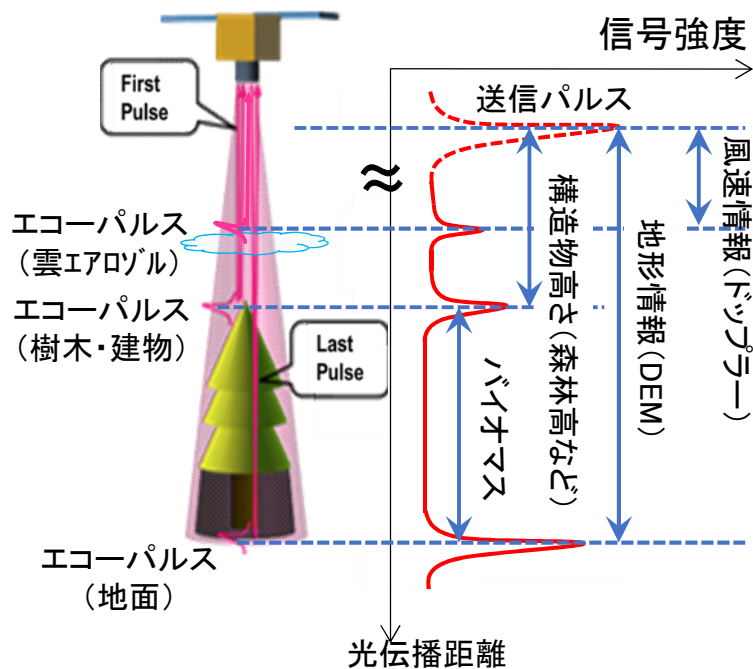
MOLI : Multi-footprint Observation Lidar and Imagerの略

3. ライダー観測技術

3.2 研究開発の目的と意義

ライダーの高精度な構造物の高さ計測機能と、L-band SAR等との統合利用により、森林バイオマス推定の高精度化(精度50%向上)を図り、パリ協定に基づくインベントリ(その中の吸収源)の高精度な情報提供等の可能性を実証する(植生ライダー)。また、宇宙用ライダーの実用化に向け長寿命化技術の実証(1年目標)を行う。

さらにレーザー光の走査技術、波長の高安定化を確立することで、①スキャン型ライダー、②ドップラーライダーの開発が可能になり、①:cmクラスの地形情報(数値標高モデル:DEM)の整備、②:高精度な風向風速情報の取得による航空路予測の高精度化や大気・気象観測に用いる大気大循環モデルへの応用等が期待できる。



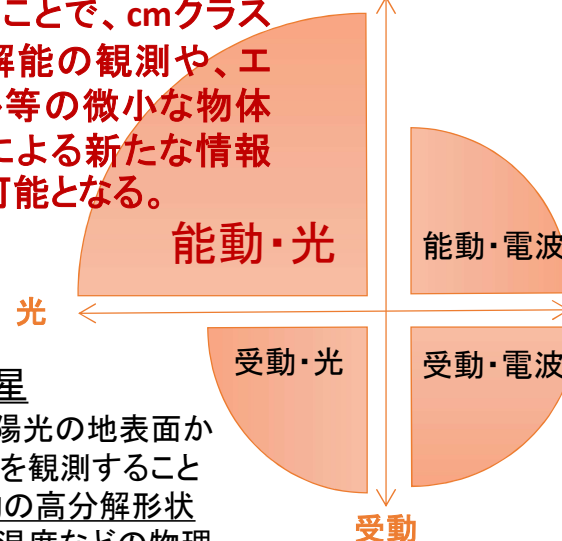
ライダー衛星

光を使うことで、cmクラス高度分解能の観測や、エアロゾル等の微小な物体の反射による新たな情報取得が可能となる。

光学衛星

原理: 太陽光の地表面から反射波を観測することで対象物の高分解形状観測や、温度などの物理状態を検出して識別する。

能動



レーダー衛星

原理: 電波の地表面、雲・雨からの反射波を連続的に観測することで地形、雲・雨の3次元分布を測定する。

放射計衛星

原理: 物体から放出される微弱な電磁波を観測することで、被雲によらず対象領域の温度、水蒸気量などの物理状態を検出する。

3. ライダー観測技術



3.3 森林バイオマス推定におけるライダー観測技術の貢献

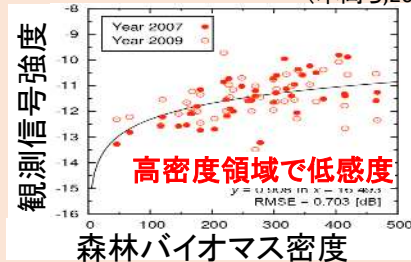
植生ライダーの効果

- パリ協定で義務となっているインベントリ(CO₂吸収源)の情報提供
- REDD+ ※の検証手段の解決策として提案
- 炭素循環の把握に不可欠な森林炭素量情報の獲得→気候変動メカニズム解明、気候予測精度向上

人工衛星による森林バイオマスの測定のロードマップと技術的展開

L-band SAR観測

(本岡ら,2012)



SAR単体では高密度地域での観測精度確保が困難

Landsat等の光学衛星
別途、高さ情報が必要

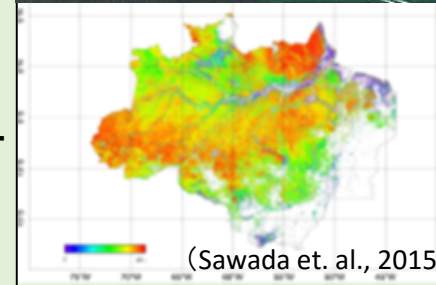
ISS搭載植生ライダー(MOLI※)の導入

高精度な点観測
(ライダー)
×
面的な情報
(光学画像、SAR)



観測精度50%向上

※ 森林総合研究所とJAXA
で森林観測手法検討に
関する協定を締結済み



高精度な全球バイオマスマップ

(参考)MOLIで培った技術の展開例

スキャン型ライダー

- ✓ 構造物高計測
 - 森林観測
 - 3次元地図の作成
 - i-Constructionの発展に寄与

ドップラーライダー

- ✓ 風向風速観測
 - 気象予報の高精度化
 - 航空機の航路最適化による燃料削減を実現

※MOLI: Multi-footprint Observation Lidar and Imager. ~ ISS/JEM(きぼう)の曝露部に搭載し、クイックかつタイムリーな軌道上実証を目指す。

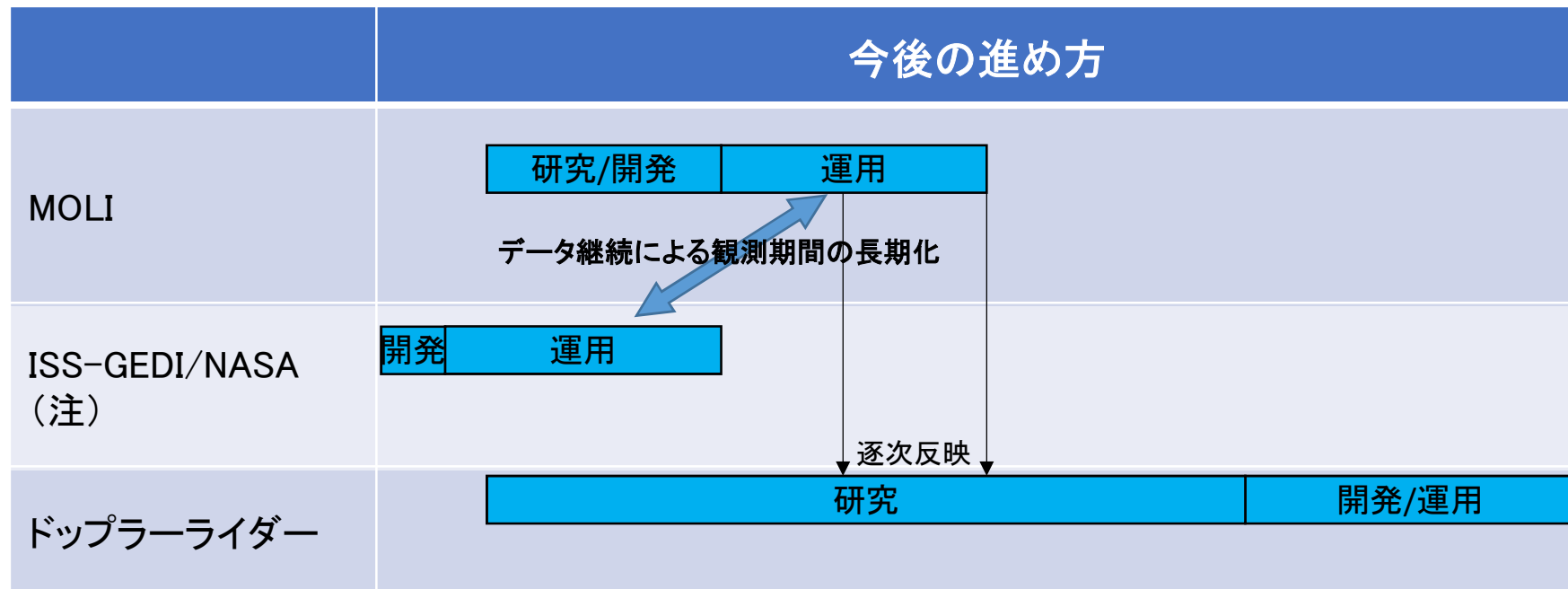
※REDD+: Reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countriesの略。国連の枠組みの下で、途上国の森林減少等の防止により地球温暖化を抑制する取り組み。

3. ライダー観測技術



3.4 研究計画

- ・MOLIについては、相乗効果が見込めるNASAのGEDI計画と連携し、利用価値を検証する。
- ・MOLIの技術成果は適宜ライダー技術の研究に反映し、実用センサに向けた技術の蓄積や、新たなセンサ(ドップラーライダー、スキャンライダー等)の研究開発に反映する。



(注)ISS-GEDI/NASA:

NASAがISSに搭載を計画している森林観測ライダー。2018年11月に打上予定。MOLIデータとGEDIデータを繋げて観測データを長期化する協力について調整中(LOI締結)。

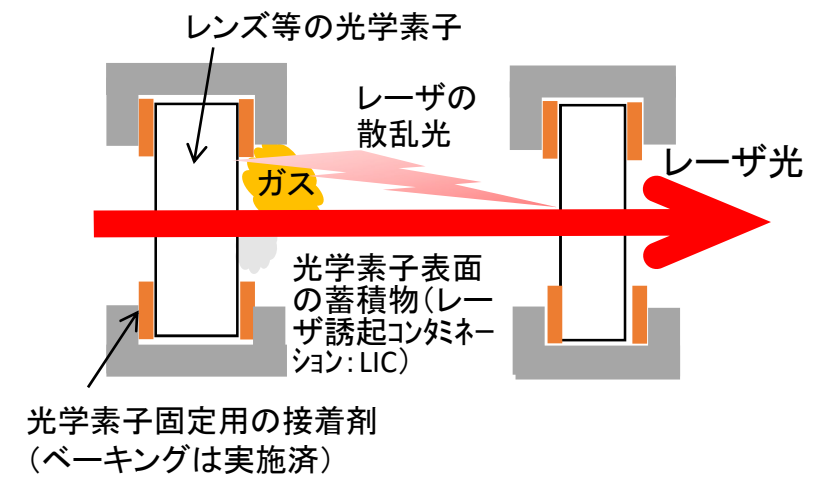
3. ライダー観測技術



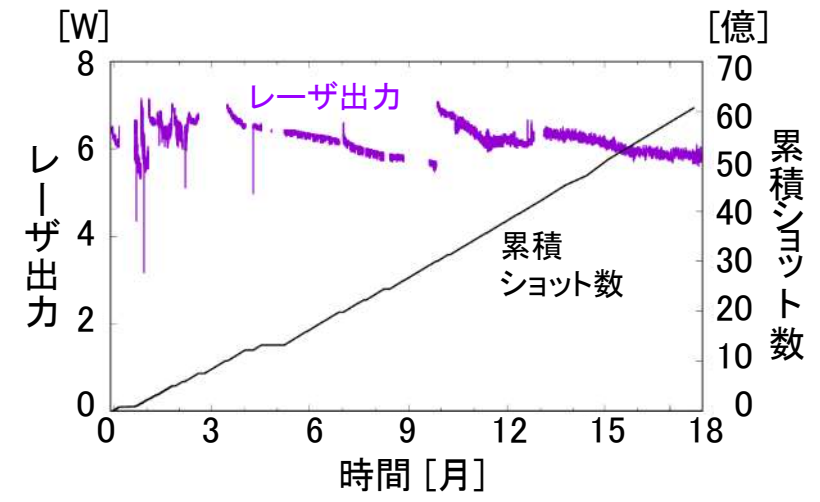
3.5 キー技術の研究状況

宇宙用高出力レーザーの長寿命化技術

- レーザ出力6W(現時点の世界最高クラス)で寿命1年が目標
 - ドップラーライダーの実現にはさらに10~15Wの高出力化が必要
- ① レーザ焼損故障のメカニズム解明
 - レーザの散乱光が光学系の構成材に当たりガスが発生
 - 漂ったガスがレーザー光に照射されて化学変化を起こし光学素子表面に付着して蓄積
 - 蓄積物の焼損による光学素子表面コーティングのダメージ
 - ② メカニズムに対応した対策の実施
 - ガス発生抑止のためにレーザーを与圧容器に封入(ガスの分解効果のある気体(酸素)で封入)
 - ガスが発生しにくい接着剤を最小限の使用に留める設計
 - レーザ光束の出力密度を小さくして、焼損の危険性を低減
 - ③ 長寿命化の達成
 - 高出力パルスレーザー試作試験用モデル(BBM)(6Wクラス)で60億ショット(MOLIミッションの1.5年のショット数)に到達。ショット数は世界最高クラス
 - ④ MOLI EM相当品の研究開発(2019年度実施予定)
 - レーザBBMを小型・軽量化、耐振化し、地上試験モデル(EM)相当品を研究開発



レーザー焼損のメカニズム



レーザー出力の時間変化(レーザーBBM)

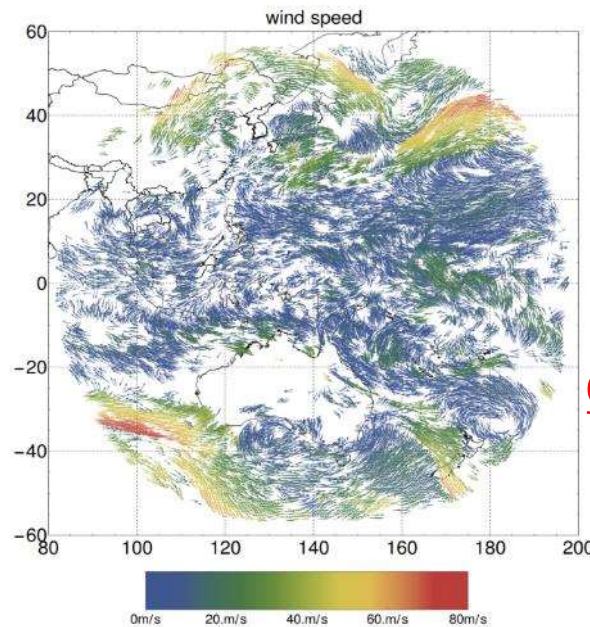
3. ライダー観測技術



(参考) ドップラーライダーの利用構想

①風向風速データ

飛行経路最適化
システムへの利用

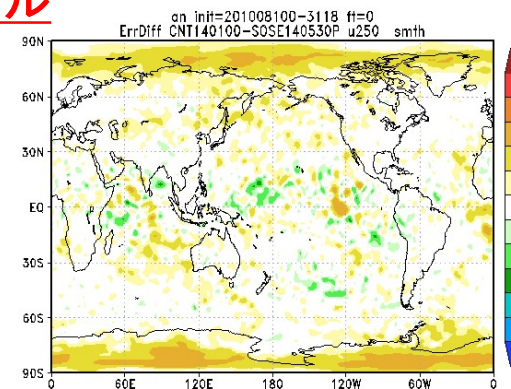


出典：
S-Booster2017 超
低高度衛星搭載
ドップラーライダー
による飛行経路・
高度最適化システ
ム構築

ドップラーライダーの効果
航路最適化による使用燃料の削減 (宇宙ビジネスアイデアコンテ
ストS-Booster2017大賞受賞提案)
現在の予測誤差3~4m/sを1m/s改善し、航空機燃料を1%削減する

②大気大循環モデル

数値気象予報の
改良



ドップラーライダーデー
タによる風速予報値の
改善効果例
(暖色系が改善効果が
高い部分)

ドップラーライダーデータを用いて、

①風向風速データ

②大気大循環モデル

を全球で高精度化

ドップラーライダーの効果
数値予報の精度改良 (気象予報、台風進路予測の高精度化)

3. ライダー観測技術 補足資料



段階的な技術開発



	研究(地上実験)	MOLI	ドップラーライダー	スキャン型ライダー、 (差分吸収ライダー)
レーザパワー	6W(MOLI BBM)	6W(軌道上機器)	~15W(LEO)	15W(LEO)
レーザからの排熱	約50cm ² 内で発生する80Wの排熱	約50cm ² 内で発生する80Wの排熱	MOLI以上の発熱量対策	MOLI以上の発熱量対策
レーザ長寿命化(LIC対策)	MOLI BBMで1.5年の動作実証	軌道上での1年以上の動作	MOLI実績を基にした高出力化対応	MOLI実績を基にした高出力化対応
レーザ波長の安定化	N/A	N/A	相対値で±0.1MHz(約1 fm相当)以下	絶対値で±0.1MHz以下(差分吸収ライダー)
受信検出系	4素子APD試作	4素子APD	光ヘテロダイン検波 高速低雑音検出器	2次元アレイ検出器 (スキャン型ライダー)
ライダー送受アライメント	N/A	±200μrad以下	±100μrad以下	±100~200μrad程度
ライダー走査技術	N/A	N/A	N/A	走査技術

新規開発

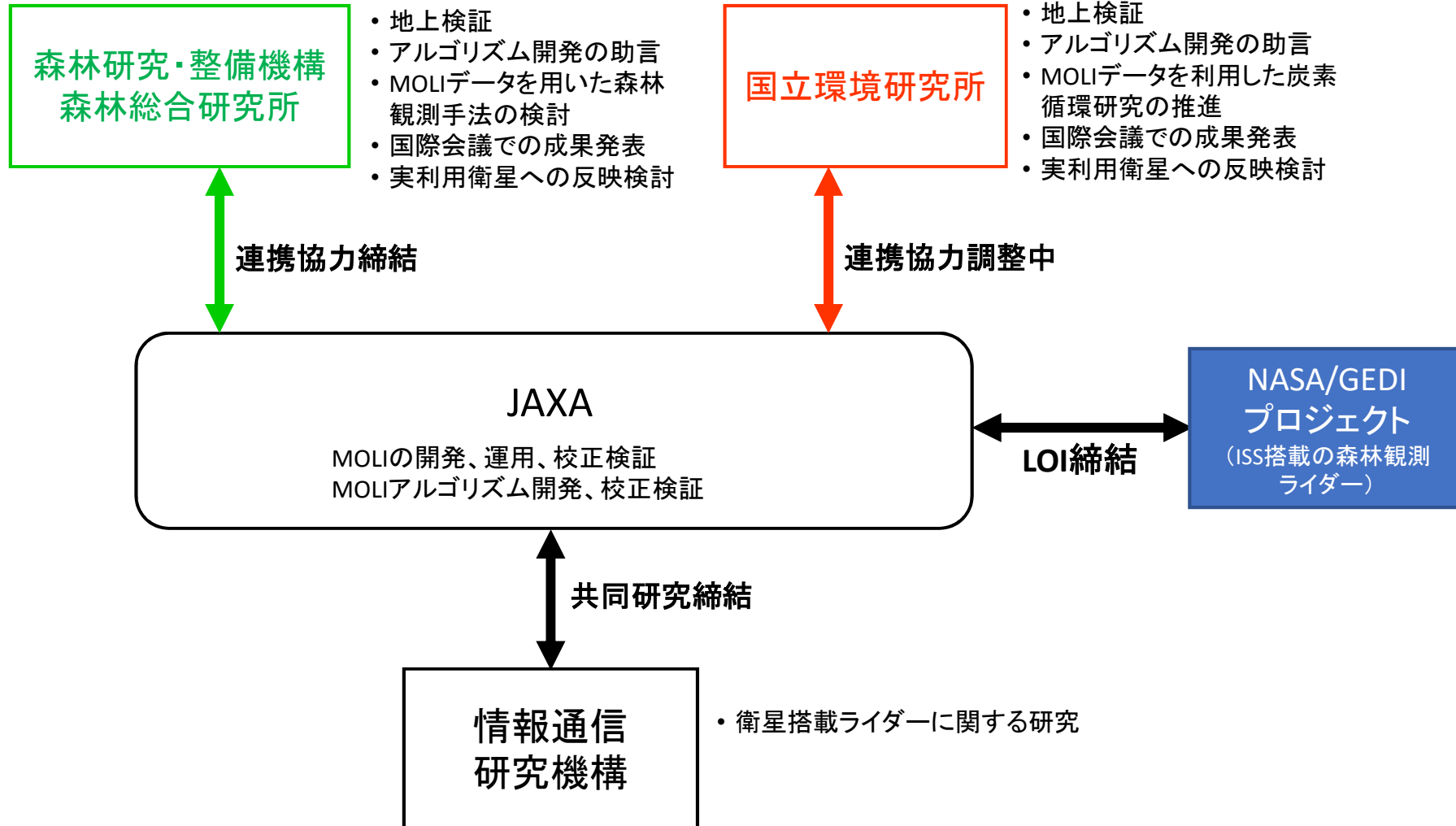
高機能化

MOLI等で開発した技術を使用

3. ライダー観測技術 補足資料



MOLIに関する、現在の外部機関との協力体制



4. 再使用型宇宙輸送システム



4. 1 宇宙基本計画上の位置づけ

- 宇宙基本計画(平成28年4月1日閣議決定):

「4.(2)② iii) 将来の宇宙利用の拡大を見据えた取組」において「新型基幹ロケット等の次の宇宙輸送技術の確立を目指し、再使用型宇宙輸送システムの研究開発を推進する。」と記載されている。

- 宇宙基本計画工程表(平成29年12月12日 宇宙開発戦略本部決定):

「部分的再使用システム／2020年代以降に新規技術の実証を行うための実験機の検討等」が記載されている。

- 宇宙基本計画の工程表改訂に向けた重点事項:
(平成30年6月22日宇宙政策委員会)

「平成31年度までに再使用型宇宙輸送システムの小型実験機の飛行試験を実施し誘導制御技術・推進薬マネジメント技術等のデータを得て、H3ロケット等の次の宇宙輸送技術構築に向けて国際競争力を有する再使用型宇宙輸送システム検討を推進する」が記載されている。

4. 再使用型宇宙輸送システム

4.2 1段再使用に向けた段階的な開発・飛行実験

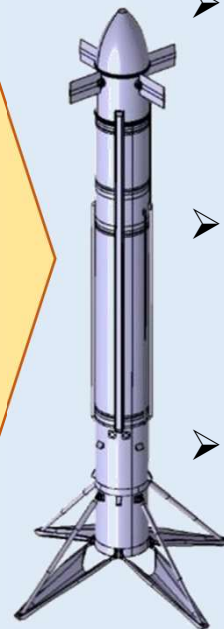
- 1段再使用化用技術の獲得を目指して、2段階の飛行実験を計画。
- これまでのJAXAの研究成果(宇宙科学研究所の再使用研究用エンジン(2015年までに100回の燃焼試験を実施)、航空部門の低層風の予測(DREAMS成果)や統計的誘導制御技術(D-SEND成果)等)を取り込み、成果の受け手となる企業とも連携した体制で研究を進めている。

実験フェーズ1(RV-X)



- 飛行実験: 2018年度後期～
 - ✓ JAXA単独の研究として、能代ロケット実験場で実施。
- 目的:
 - ✓ 着陸段階での誘導制御技術の実証などを行う。
- 実証技術:
 - ✓ 着陸段階の基礎データ取得
 - ✓ 再使用エンジンのデータ取得

実験フェーズ2(CALLISTO※)

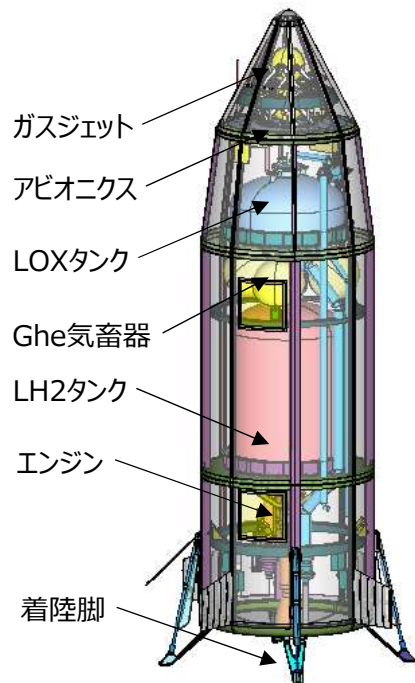


- 飛行実験: 2020年度～
 - ✓ ギアナ宇宙センター(仏領)で実施
 - ✓ 仏CNES、独DLRとの3機関共同で実施し早期かつ確実な技術獲得を図る。
- 目的:
 - ✓ 1段再使用化に向けた早期かつ確実な技術獲得および経済性に関するデータ蓄積を行う。
- 実証技術:
 - ✓ 打上げから着陸までの一連の飛行を通じて、誘導制御技術・推進薬マネジメントを実証。

4. 再使用型宇宙輸送システム

4.3 飛行実験フェーズ1 (RV-X) の目的と概要

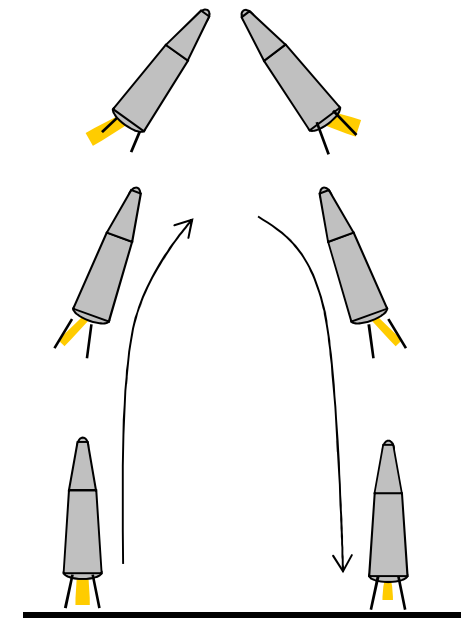
- 着陸段階での誘導制御技術の飛行実証を第一の目的とし、さらに再使用／繰り返し飛行運用のシステム構築手法とエンジンの寿命管理設計技術の習得を図る。
- 宇宙科学研究所 (ISAS) で進めてきた再使用エンジンの研究を継承し、宇宙基本計画を受けて、2016年よりCALLISTOに技術反映を行うべく、この再使用エンジン技術を核とした着陸段階の技術実験を行うため、垂直離着陸飛行可能な機体 (RV-X) の製作を進めている。2018年度内に地上燃焼試験を行い、高度100m程度までの飛行試験#1を予定。



順調に行けば、2018年度末に、高度100mまでの飛行試験を実施

主要諸元

直径	1.8m
全長	7m
乾燥質量	2000kg
全備質量	2900kg



飛行試験#1

4. 再使用型宇宙輸送システム

4.4 フェーズ2 (CALLISTO) の目的

RV-X用エンジンを活用し、再使用型宇宙輸送システムの技術確立の上でキーとなる技術を飛行実験により実証する(下図)

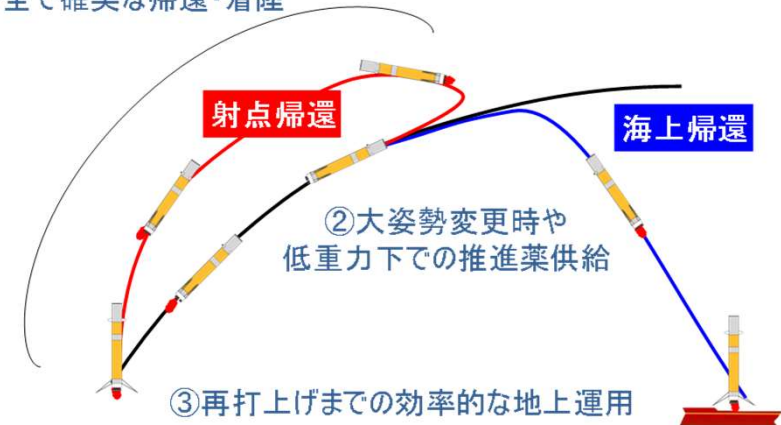
① 帰還誘導制御技術の実証と1段再使用の飛行プロファイルに沿ったデータ蓄積を行う(右図)

- 独自の帰還誘導制御技術により着陸のロバスト性を高める。将来的には、高い定時打上げ確率を実現し、ピンポイント誘導により、安全を確保した着陸を可能にする
- 世界最高水準にある推進薬挙動に関する数値解析技術を検証し、推進薬保持のためのガスジェット装置の削除などを目指す

② 実用機の競争力強化に資する、エンジン再整備の効率化技術に取り組み、データを蓄積する

- 実運用に近い実証を行うことで経済性に関するデータが蓄積できる

①安全で確実な帰還・着陸



想定する1段再使用の運用プロファイルと主要課題

技術課題

CALLISTOの範囲

1段再使用に係る帰還制御を含む基本データ蓄積と基本技術獲得

再整備費用の削減

複数回飛行可能で短期間で整備できる実用型再使用エンジン

低コスト化: 構造重量と製造費の削減、アビオニクス製造費の削減



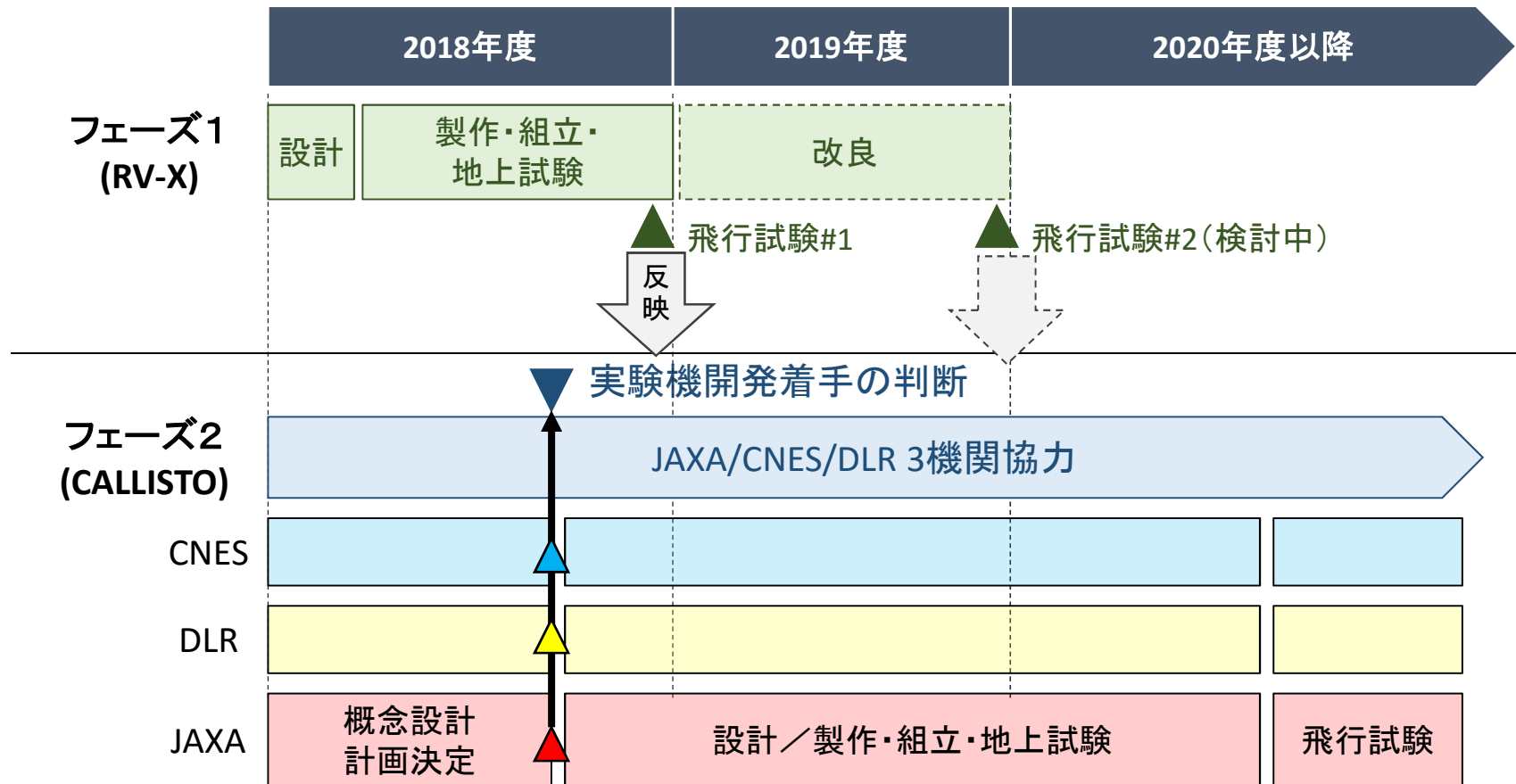
再使用型宇宙輸送システム技術の確立

4. 再使用型宇宙輸送システム



4.5 計画(想定)

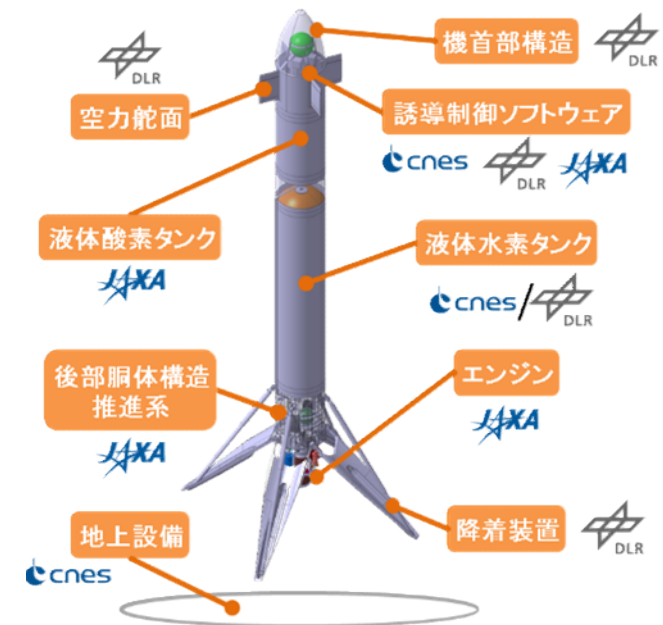
- 2018年度: 現在、他の2機関と合同で概念設計作業を進めており、予算措置を確認しだい実験機の開発着手を判断する。
- 2019年度: 設計を進め、実験機製作及び組立・地上試験に着手する。
- 2020年度以降: 飛行試験に着手する(3機関で詳細スケジュールを検討中)。



4. 再使用型宇宙輸送システム

4.6 CALLISTO計画の概要

期間	2017年度に検討開始、2020年度以降に飛行試験実施
実験場	ギアナ宇宙センター(仏領ギアナ)
体制	資金面の効率化と広大な実験場、各機関の知見の糾合による高いレベルの実証を目的に、CNES/DLRとの国際協力で実施する。
分担方針	<p><u>誘導制御ソフトウェア</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 誘導制御は使い捨てとは異なる特有部分があるため重要 <p><u>推進系システム(LOXタンク)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 液体推進薬保持技術の確認を行う <p><u>エンジン</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 飛行による負荷が大きく、地上での再整備作業を左右するサブシステム <p><u>機体インテグレーション</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 再使用による機体のストレスデータ健全性評価方法を獲得する



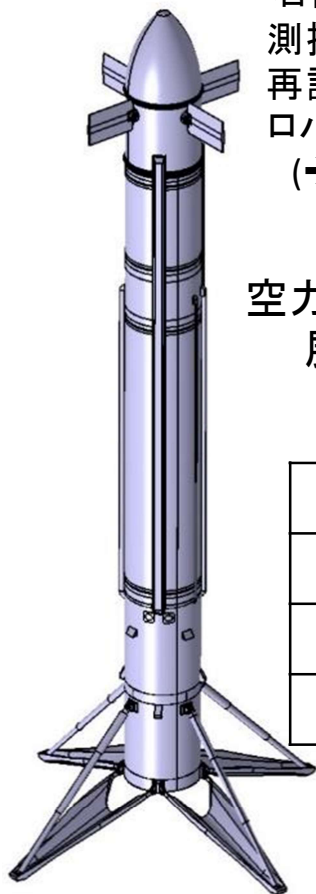
実験機の検討例と各機関の主な分担

4. 再使用型宇宙輸送システム



4.7 キー技術の研究状況

- 実験機システム：：ミッション成立性および実験機システムの成立性を確認した。
- キー技術：誘導制御技術(統計的最適化等)



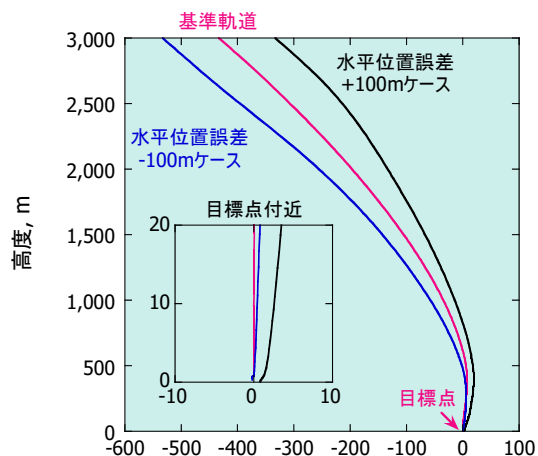
右記以外にも、JAXAの低層風予測技術、風データを用いた軌道再設定技術により、風に対するロバスト性向上を検討中。
 (→JAXA DREAMSおよびD-SEND等の成果の活用を検討中)

空力舵面および降着装置
 展開時の機体形態

主要諸元

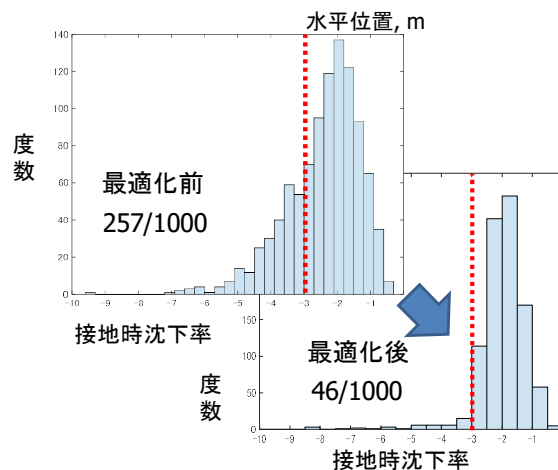
直径	1.1m
長さ	13m
乾燥質量	1520kg
全備質量	3400kg

誘導制御検討結果



←着陸フェーズ誘導の検討例

中緯度の実測風データ(数時間間隔で計測したデータセット)を用いた基準軌道再設定とシミュレーションにより、計測時からの変動も考慮した上で、風に対する着陸精度の耐性向上の見込みがあることを確認



←専用の並列計算機を用いたJAXA独自のモンテカルロ評価を活用した誘導ロジックの統計的最適化の例：接地時沈下率を3m/s以内に制約することを目標として最適化。最適化前は、制約を満たさない確率が257/1000であったものが、最適化後には46/1000に減少し、機体を喪失する確率を最小化。

補足資料：海外動向

- 1段再使用化の動きが定着
- Space-X社
 - 2015年12月の成功以来、32回のうち26回(*1)、Falcon9の1段を着陸させることに成功(2018年7月23日現在)
 - *1: 着陸場に11回、ドローン船に15回
 - Falcon9の最終バージョン(Block5)では、ドローン船に着陸させる場合でも、GTO5.5トンの打上能力を持つ。
 - これまで、14回、中古の1段による打上げを行っているが、大幅なコストダウンは行われていない模様。ただし、将来的に再使用による価格削減の可能性があるとの情報を発信している*。
- *) SpaceNews 2016.10.Mar : SpaceX says reusable stage could cut prices 30 percent, plans November Falcon Heavy debutより
- Blue Origin社
 - 2016年9月、1段再使用の大型ロケットNew Glennを発表。2020年に初飛行を計画
 - 2017年3月、Eutelsatが最初の顧客となることを公表
 - 2段式と3段式があるが、2段式の場合、GTO13トンの打上能力を持つ。



Falcon Heavyのブースタの着陸
(©SpaceX)



New Glennのイメージ
(©Blue Origin)