

平成 27 年度 宇宙科学シンポジウム

P-118

火星着陸探査に向けた活動報告

2016/01/06

藤田和央

JAXA 研究開発部門 第二研究ユニット

佐藤毅彦

JAXA 宇宙科学研究所

火星着陸技術実証ワーキンググループ

火星着陸探査の意義／火星着陸探査検討の経緯

2

■ 火星着陸探査の意義

- 火星着陸探査による新たな知の獲得(前生命環境の解明, 地球外生命の発見, ...)
- 2030 年以降に想定される国際協働火星有人探査における主導的地位の確保
火星着陸探査の実施によって火星有人探査に至るロードマップが充足する(次ページ)

■ 火星着陸探査の検討の経緯

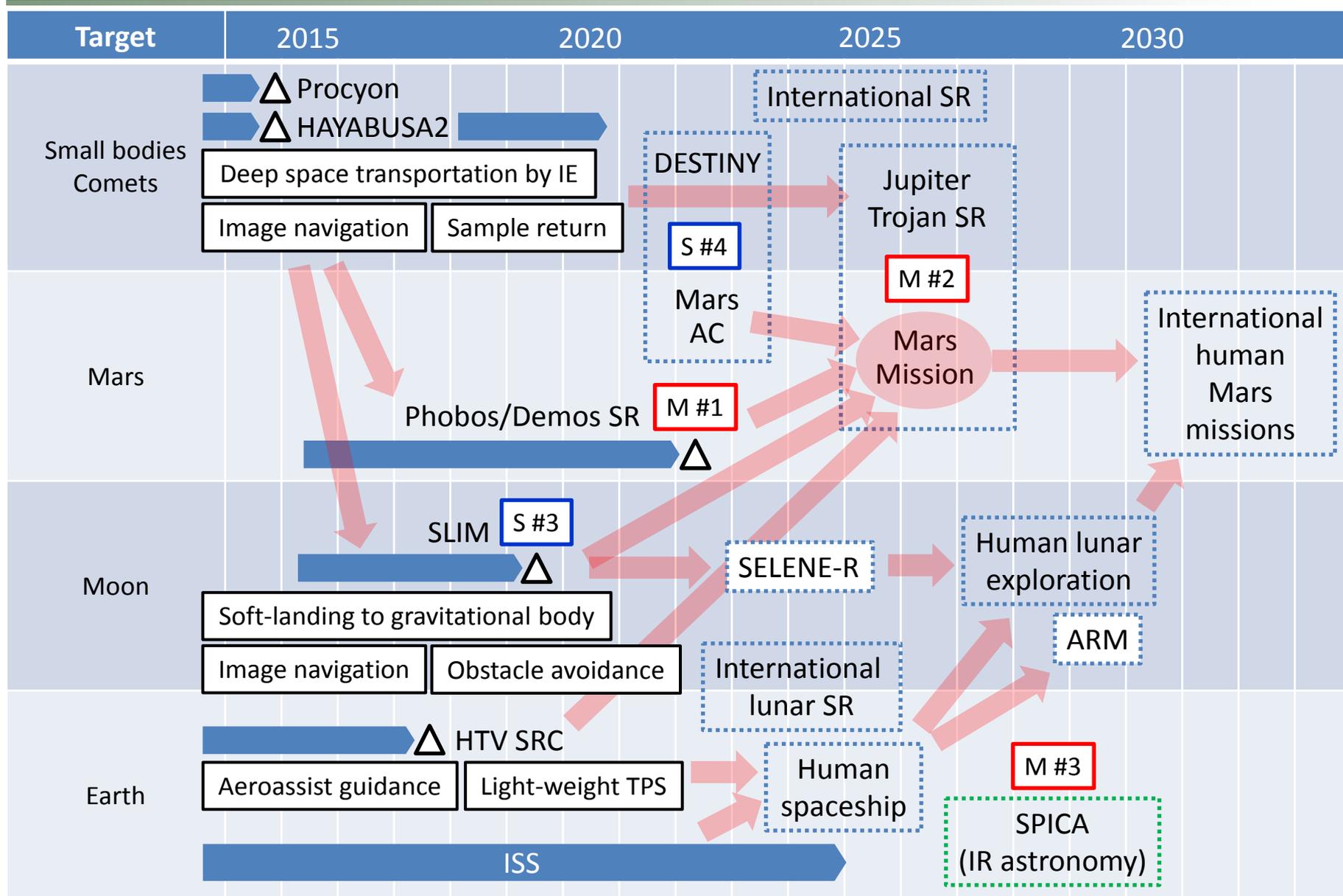
- 2008 年より火星複合探査(MELOS) WG において, 周回機, 着陸機, ローバ, 飛行機等を網羅した総合探査として検討を開始
- 2012 年より周回機ミッションを分離し, 表層探査に特化して検討を継続
- 2014 年より火星着陸探査技術実証を主目的とする工学委員会 WG として再スタート。理工連携検討の旗印の下, 集中スタディ(含・技術開発)を実施し
 - 現時点で実現可能性が高い複数の探査機プラットフォーム
 - 現時点で世界と戦える複数の科学観測ミッション提案を再精査し, 外部委員を交えた客観的評価によって優先順位を設定し, 選択と集中によって, 現在の内外情勢に最も適合したミッションスコープへ先鋭化
- FY26 戦略的中型ミッション AO へ提案するも, 2020 年ミッションとしては承認されず



■ FY27 の活動状況

- FY27 戦略的小型ミッション AO への小型探査・実証ミッション提案を検討
- 次期中型ミッション(FY30 の AO, 2026 頃の打ち上げを想定)への提案に向けた準備
- 小型ミッションの実現／将来の中型ミッション創生に向けた技術開発を推進

国際協働火星有人探査に至るロードマップ(案)



戦略的小型ミッションの検討(1/2)

4

■ 前提／制約条件

- イプシロン増強型(SLIM 同等)を想定 ⇒ 火星到着時の探査機重量は WET で 140 kg 程度
- 日本が行うにふさわしい科学的価値・技術挑戦を伴うこと
- 将来の探査へのプリカーサとなること／ロードマップに整合すること



■ 小型火星ミッション候補

- 火星オービタによるリモートセンシング : 技術的挑戦に乏しい
- 超小型ランダ／ローバによる着陸技・探査技術実証 : 科学的価値に乏しい
- エアロキャプチャによるデータリレーオービタ投入 : 技術挑戦であり将来性もあり

■ エアロキャプチャによるデータリレー・オービタの検討

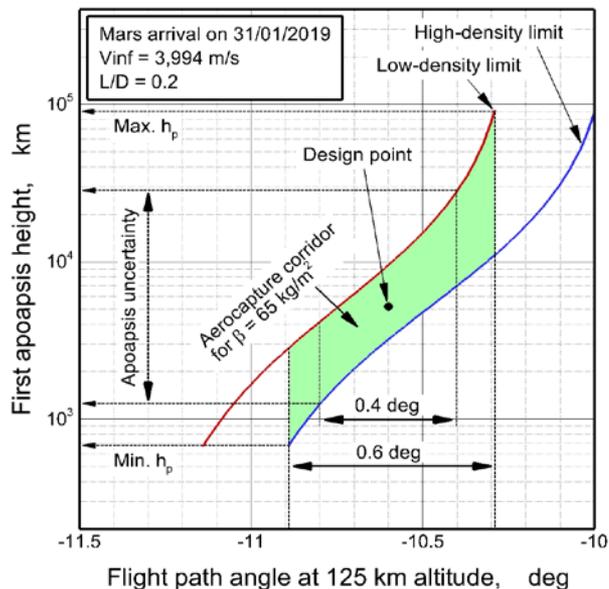
- ミッション要求
 - ・ 火星地上系と U 帯で通信し地球へ X 帯でデータリレーを行う
 - ・ 火星地上のリモートセンシング測器(高解像度カメラ等)を搭載
- 前提／制約条件
 - ・ 地球出発時 WET で 140 kg
 - ・ 火星到着時 $V_{inf} = 4.0 \text{ km/s}$
 - ・ Viking type aeroshell を利用
 - ・ ポスト・エアロキャプチャ・マヌーバ $\Delta V < 100 \text{ m/s}$
 - ・ $h_p > 300 \text{ km}$, $h_a < 30 R_M$, エアロキャプチャ・コリドー幅 $\Delta \gamma < 0.4^\circ$
- 検討手法
 - ・ エアロキャプチャシステム設計ツールによる(AIAA-2013-0729)

戦略的小型ミッションの検討(2/2)

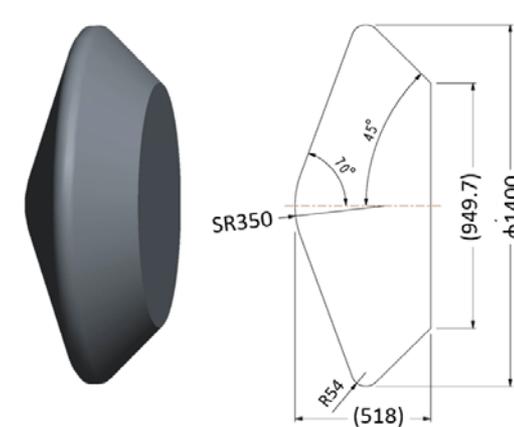
5

■ 検討結果

軌道計画



探査機 (エアロシェル) 形状



システム構成

S/S	Component	Mass, kg
Aeroshell		30
COM		16
	X 帯	10
	U 帯 (火星地表用)	6
AOCS / DHS		10
RCS		32
	Propellant	17
	HW (4N RCS × 6)	15
TCS		2
EPS		13
STR		23
INT		7
Margin		7
Total		140

■ 技術課題

- 上記検討結果は「バス系機器が質量分配表の通り構成できれば」という仮定の下で成立するものであり、現時点ではこれを実現可能な(既存の)機器構成は存在しない
- 特に軽量化が必要とされるのは、エアロシェル、推進系、バス機器である
- 超小型衛星で実績のあるバス機器の利用は有効と考えられる。ただし、探査で実績の乏しい機器を利用することに伴うリスク増への対処を検討する必要がある

現時点では、小型ミッションとして十分なミッション提案を行うことが困難と考える

将来の火星着陸探査に向けた技術課題の分析(1)

6

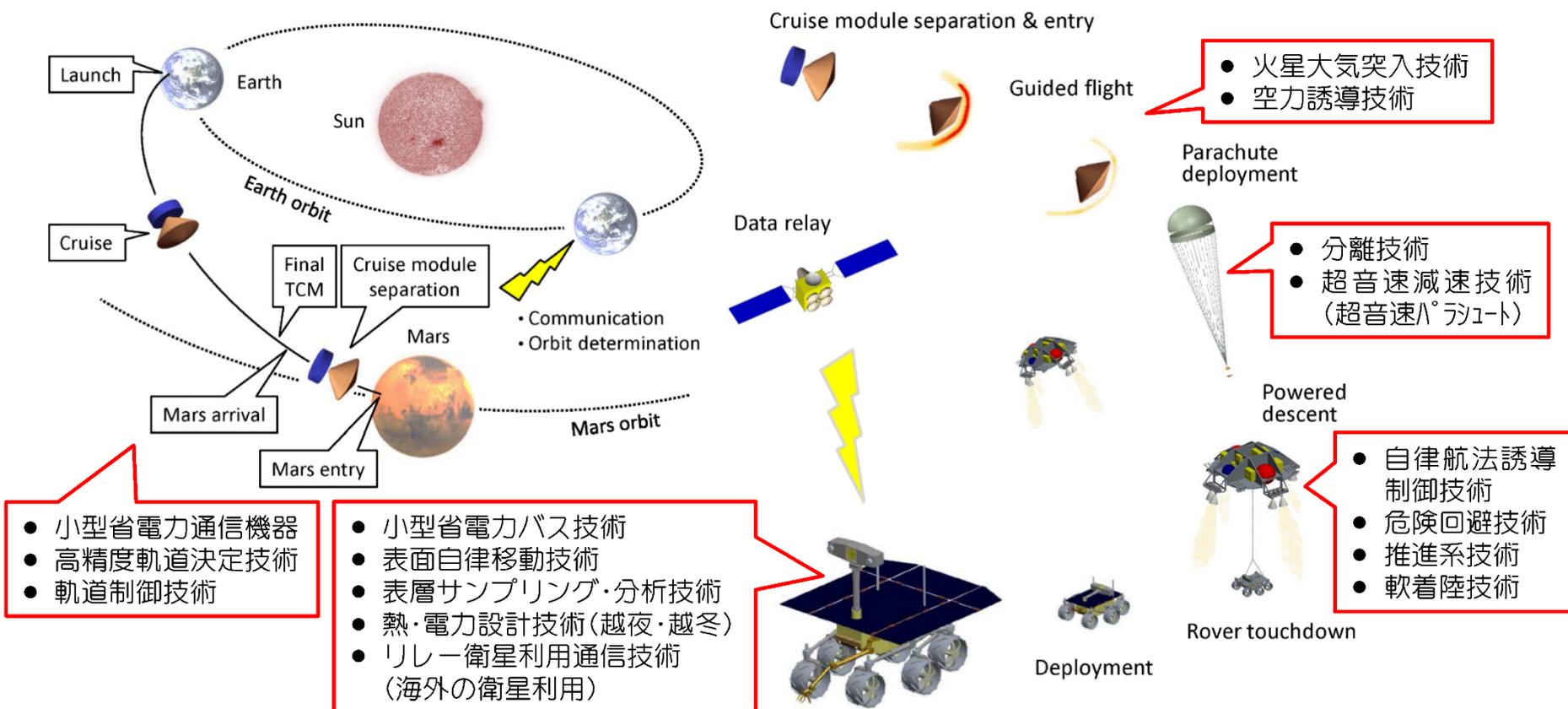
- **モデル・ミッションスコープ(WGにおいて中型ミッションとして検討したもの)**
火星着陸探査で、どのような探査を行うべきか、どのようなプラットフォームを利用すべきか、という点については多様な意見があり、未だ確定しているとは言えない。まずは火星WGにおいてFY2015に検討された4つのスコープが一定のリファレンスとなると考えられるため、以下に示す。
 - ① 火星飛行機を用いた広域(>100km)飛行探査
 - ② 中規模のローバを用いた狭域(~50km)の詳細探査(生命探査, 年代探査など)
 - ③ 複数の小型・走破型ローバを用いた2次元広域(ネットワーク)探査
 - ④ 複数の遠隔ランダを用いた広域(ネットワーク)探査
- **モデル・ミッションスコープ(火星WGの外で独自に検討されているもの)**
上記に加えて、探査ハブ等でも議論が行われているものとして
 - ⑤ FSランダ(flock of stochastic landers)を用いた分散型広域探査また独自のプラットフォームとして検討が進められているものとして
 - ⑥ 柔軟・展開型エアロシェルを用いた大気突入モジュール
 - ⑦ 柔軟・展開型モーフィング翼を用いた火星飛行機
 - ⑧ 飛翔型広域ロボット(jumping scouter)
 - ⑨ 壁面登坂型ロボット
 - ⑩ 火星ペネトレータなどが挙げられる。なお⑩の火星ペネトレータは、①~④の一部あるいはオプション機器として、WG内での検討も行われていることに注意されたい。

将来の火星着陸探査に向けた技術課題の分析(2)

7

■ 技術課題の抽出

上記の①～⑩を手掛かりとして、将来の火星着陸探査に必要な技術課題の分析を行う。この過程では、各ミッションスコープ、プラットフォームを利用するミッションにおけるミッションシナリオをイメージし、各ミッションフェーズにおいて必要となる技術を抽出する。下は②中規模のローバを用いた狭域(～50km)の詳細探査の一例である。



将来の火星着陸探査に向けた技術課題の分析(3)

8

■ 技術課題の抽出結果

#	技術項目		対象	技術の現状と課題
1	深宇宙小型省電力通信機器		共通	現在の X, Ka 帯の通信技術でもミッションは実現可能。しかし、通信系能力の向上はミッションの品質を劇的に向上するため、更なる向上が望ましい。
2	深宇宙高精度軌道決定/軌道制御		共通	JPL と連携した現在の軌道決定技術でもミッションを実現可能。しかし、オンボード軌道決定機能などロバスト性を向上する機能の導入が望ましい。
3	小型省電力探査バス		共通	現在のバス技術でも中型ミッションは実現可能だが、小型ミッションとして探査を行うことは困難であり、早急な解決が望まれる。
4	大気突入技術	軽量アブレータ	①～④, ⑧, ⑨	HTV 搭載小型回収カプセルによる実証 (2017) を計画しており、現在の開発の延長としてミッション実現が可能である。
		柔軟エアロシエル	⑤～⑦, ⑩	TITNAS, EGG による実証 (2019) を計画しており、今後幾つかの課題が解決されれば、現在の開発の延長としてミッション実現が可能と期待される。
5	空力誘導技術		①～④, ⑧, ⑨	HTV 搭載小型回収カプセルによる実証 (2017) を計画しており、現在の開発の延長としてミッション実現が可能である。
6	超音速パラシュート		①～④, ⑧, ⑨	現在日本は本技術の習熟度が十分ではなく、ミッション実現に支障を来す。今後へリ、気球、観測ロケット実験を含む開発計画を進める必要がある。
7	自律航法誘導制御 障害物回避技術 軟着陸技術		①～④, ⑧, ⑨	現在日本は本技術を有していないが、今後、着陸 FTB による技術蓄積 (2015～) と、SLIM による実証 (2019) によって、ミッション実現が可能と期待される。
8	推進系技術		共通	過去に軌道投入に失敗するなど課題もあるが、SLIM および火星衛星サンプル計画の推進系開発の中で解決されると期待される。

将来の火星着陸探査に向けた技術課題の分析(4)

9

■ 技術課題の抽出結果(続)

#	技術項目		対象	技術の現状と課題
9	探査ロボット技術 表面自律移動技術	ローバ	②, ③	BBMによるフィールド試験を通じた継続的な開発によって高い技術準備状況を維持しており、現在の開発の延長としてミッション実現が可能である。
		特殊ロボット	⑧, ⑨	コンセプト提案、試作品による部分的な原理の実証に留まっており、ミッション実現のためには、今後計画的な研究開発を進める必要がある
10	サンプリング技術 (アームなど)		共通	BBMによるフィールド試験を通じた継続的な開発によって高い技術準備状況を維持しており、現在の開発の延長としてミッション実現が可能である。
11	計測・分析技術		共通	個々の測器についてはばらつきがあるが、おおむね順調に開発が進められており、現在の開発の延長としてミッション実現が可能である。
12	熱・電力制御技術 (越夜・越冬技術)		共通	本技術は探査機設計のための最重要技術であるが、現在日本は本技術の習熟度が十分ではなく、計画的な研究開発を進める必要がある
13	重力天体を想定した 構造・機構系技術		共通	現在日本は本技術の習熟度が十分とは言えないが、課題はさほど困難とは言えず、既存の技術の延長としてミッション実現が可能であると考えられる。
14	惑星保護技術(滅菌 設備・検査設備)		共通	本技術は火星探査を含む生命探査に必須の最重要技術であるが、現在日本は本技術の有しておらず、計画的な研究開発を進める必要がある
15	地上アンテナ局など 地上インフラの整備		共通	現在の通信技術でもミッションは実現可能。しかし、日本の通信能力は諸外国と比較して圧倒的に低く、また通信系能力の向上はミッションの品質を劇的に向上するため、更なる向上が望ましい。

技術開発の基本戦略と現状(1)

10

■ 各技術課題の研究戦略・担当部署・予算措置の現状

#	技術項目		対象	研究開発戦略	担当	関連ミッション	予算措置
1	深宇宙小型省電力通信機器		共通	小型, 高効率 X, Ka 通信系の開発	ISAS	Procyon	戦略予算など
				光通信技術の開発	RDD	—	一般研究
2	深宇宙高精度軌道決定/軌道制御		共通	JPL/DSN と連携した習熟度向上	ISAS	HAYABUSA2, InSight	プロジェクト
				リアルタイム軌道モニタの開発	RDD	HAYABUSA2, AKATSUKI	一般研究
3	小型省電力探査バス		共通	探査機開発と連携した機器開発	ISAS	ERG, SLIM	プロジェクト
				小型省電力バス機器の研究	RDD	—	一般研究
4	大気突入技術	軽量アブレータ	①～④, ⑧, ⑨	熱防御材料の開発, BBM 開発 プロジェクトを利用した実証	RDD HSTD	小型回収カプセル	一般研究 プロジェクト
		柔軟エアロシェル	⑤～⑦, ⑩	熱防御材料の開発, BBM 開発 プロジェクトを利用した実証	ISAS	TITNAS, EGG	戦略予算 プロジェクト
5	空力誘導技術		①～④, ⑧, ⑨	空力誘導アルゴリズムの開発 プロジェクトを利用した実証	RDD HSTD	小型回収カプセル	一般研究 プロジェクト
6	超音速パラシュート		①～④, ⑧, ⑨	風洞試験, BBM の開発, 観測ロケット等を利用した飛行実証	ISAS	—	戦略予算
7	自律航法誘導制御 障害物回避技術 軟着陸技術		①～④, ⑧, ⑨	画像航法, 自立誘導制御, 障害物回避技術の開発. FTB による部分実証と SLIM による飛行実証	ISAS	SLIM	プロジェクト
					RDD		一般研究
8	推進系技術		共通	信頼性向上の研究	RDD	SLIM, PDSR	一般研究
				プロジェクトによる実証	ISAS		プロジェクト

技術開発の基本戦略と現状(2)

11

■ 各技術課題の研究戦略・担当部署・予算措置の現状(続)

#	技術項目		対象	研究開発戦略	担当	関連ミッション	予算措置
9	探査ロボット技術 表面自律移動技術	ローバ	②, ③	BBM 開発, フィールド試験による実証, プロジェクトでの実証	ISAS 大学	SLIM, PDSR	戦略予算など プロジェクト
		特殊ロボット	⑧, ⑨	コンセプトモデル試作, フィールド試験による実証	ISAS RDD 大学	—	戦略予算 一般研究 共同研究など
10	サンプリング技術 (アームなど)		共通	BBM 開発, フィールド試験による実証, プロジェクトでの実証	ISAS 大学	SLIM, PDSR	戦略予算など プロジェクト
11	計測・分析技術		共通	コンセプトモデルによる原理実証, BBM 開発, フィールド試験	ISAS 大学	PDSR	戦略予算 各 PI の予算
12	熱・電力制御技術 (越夜・越冬技術)		共通	探査機開発と連携した機器開発	ISAS	SLIM, SELENE-R	プロジェクト
				着陸探査機用バス機器の研究	RDD	—	一般研究
13	重力天体を想定した 構造・機構系技術		共通	探査機開発と連携した機器開発	ISAS	SLIM, SELENE-R	プロジェクト
14	惑星保護技術 (滅菌 設備・検査設備)		共通	プロジェクトと連携した技術開発・設備の整備	ISAS	HAYABUSA2, TANPOPO	プロジェクト
				パイロットプラントによる技術習熟, 技術者養成, 規定策定	RDD ISAS	TANPOPO	一般研究
15	地上アンテナ局など 地上インフラの整備		共通	将来の科学ミッションを見据えた地上インフラの整備	ISAS STCC	—	設備費

上記の技術分析をもとに、今後の技術開発戦略を策定し、実践する計画である

技術開発の紹介(1/3)

12

■ 着陸 FTB による自律的軟着陸技術の開発

- SLIM, SELENE-RP 等の月着陸センサ (短距離測距 LIDAR, Flash LIDAR, NavCam, PanCam 等) の特性の検証, フィルタリング機能の調整, 着陸アルゴリズム (画像航法・障害物回避) の検証, 軟着陸技術 (脚機能など) の検証, SLIM シミュレータの精度検証などによって, ミッションの成功を支援する
- 上記の技術発展として, 火星着陸モジュールの着陸最終フェーズの航法誘導・障害物回避マヌーバ・軟着陸技術を獲得する

着陸 FTB 外観図



2016 年 3 月
初飛行予定

着陸 FTB 諸元

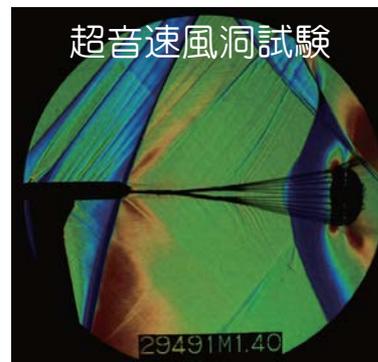
重量 (DRY), kg	90
重量 (WET), kg	120
搭載アビオ重量, kg	12
全高, m	1.5
全幅, m	1.5
スラスタ形式	コールドガスジェット
スラスタ基数	200N 主スラスタ 8 2N 姿勢制御スラスタ 4
推力方向	鉛直下向き
スラスタ制御	開閉パルスのデューティ比調整
離着陸シーケンス	離陸 → 最大高度 (高度 10 m) → 降下 → ホバー (高度 5 m, 10秒以上) → 着陸
落下シーケンス	高度 125 m より自由落下 → 減速 → 誘導 → 着陸

技術開発の紹介(2/3)

13

■ 超音速パラシュートの開発

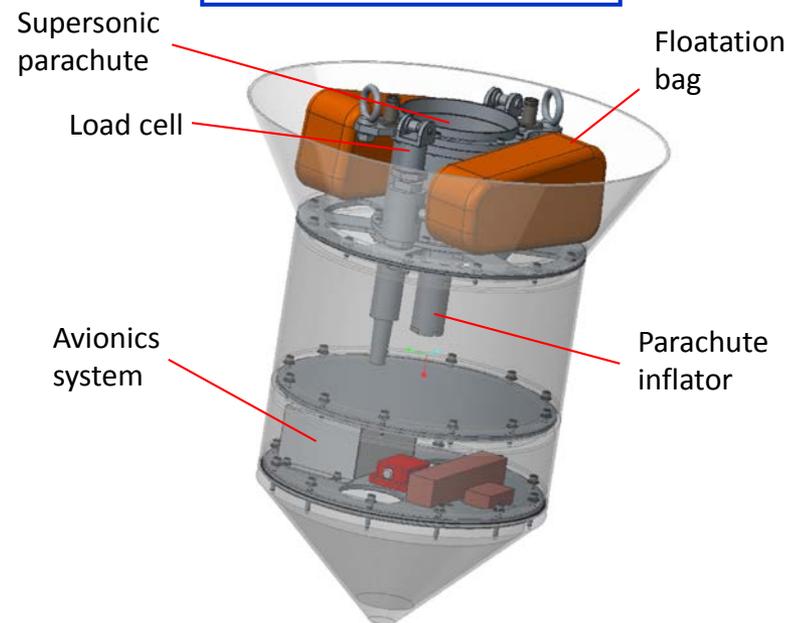
- 風洞試験による基礎データ取得と実験室モデルの性能検証完了
- パラシュート BBM 放出実験(2015年5月完了)
- ヘリ落下試験(2016年7月予定)
- 観測ロケットによる実証(2017年頃)



能代実験場における
パラシュート放出試験



ヘリコプターを用いた
パラシュート試験機

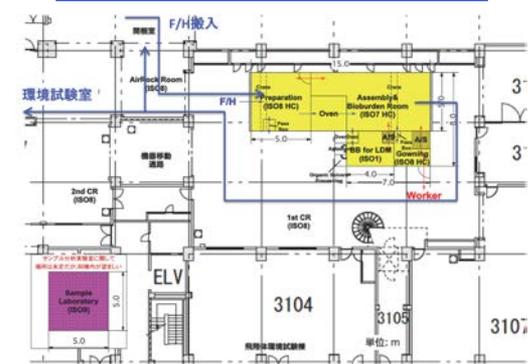


技術開発の紹介(3/3)

■ 火星探査に向けた惑星保護技術の開発

- COSPAR カテゴリ 4c に準拠した開発・設備計画を作成し, 各方面と調整, 2014 年に工程表を作成, コスト見積を完了. 2020 年打上を想定した原案では, 2016 年より 1.5 力年, 5 億円で ISAS CR 内に設備を設置できる計画であった
- パイロットプラントを調布・宇宙 3 号館内に設置
- 滅菌・バイオバーデン技術の習得・技術者養成を推進中
- 規定・基準書の作成を推進中

ISAS CR 内設置イメージ



PP パイロットプラント



PP プラント設置行程表(2020 年打上の場合)

年度	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
規定遵守・管理技術	管理文書作成		管理規定運用・修正				
			技術者の指導・養成			汚染確率・衝突確率等の解析	
環境維持	施設計画立案		計画管理・監査・修正			射場CR設営・改修	
			CR設営・改修		施設の運用		
滅菌技術	滅菌処理技術開発		滅菌処理装置導入		滅菌処理・運用		
			メーカー指導		メーカー指導・監督		
検査技術	BB 検査技術開発		BB 実験室設営		実験室運用・整備		
			有機物サンプル管理・保管				
概算(円)	200万	200万	4.3億	3200万	3200万	3200万	3200万

火星EDL技術実証探査

製造・総合試験

▲ 打上

まとめ

15

- 現在想定可能なイプシロンロケット増強型の能力で実施可能な、火星探査の小型ミッション検討を実施した。
- 最も有望なミッションとして、エアロキャプチャによるデータリレー／リモートセンシング・オービタが考えられ、そのシステム成立性の検討を行ったが、厳しいリソースの中で「条件付き」であれば成立する可能性のあることが示された。条件とは、バス系を含むコンポーネントの小型化である。
- 将来の(中型を含む)火星着陸探査の実現に向けて、技術課題の整理と現状の分析を実施し、今後の技術研究開発の指針を得た。
- 上記の分析に基づいて、現在実施している将来の重力天体探査創出のための研究開発を幾つか紹介した(着陸 FTB による自律的軟着陸技術の開発, 超音速パラシュートの開発, 惑星保護技術の開発)