

# 月の科学と月からの科学

## (月惑星)科学業界と産業界との連携

関根康人

日本惑星科学会・惑星探査専門委員会 委員長  
東京工業大学・地球生命研究所 副所長/教授

# 自己紹介

関根康人 (せきね やすひと)

東京工業大学 地球生命研究所 教授



- 専門: 惑星科学・アストロバイオロジー
- 主に火星や氷衛星の国際科学探査に関わる (Cassini, JUICE, Mars Ice Mapper, DragonFly)
- JAXA宇宙研宇宙理学委員、日本惑星科学会・惑星探査専門委員会 会長
- 惑星科学会の「来る10年の月惑星探査検討会」(Decadal survey)を取りまとめ役

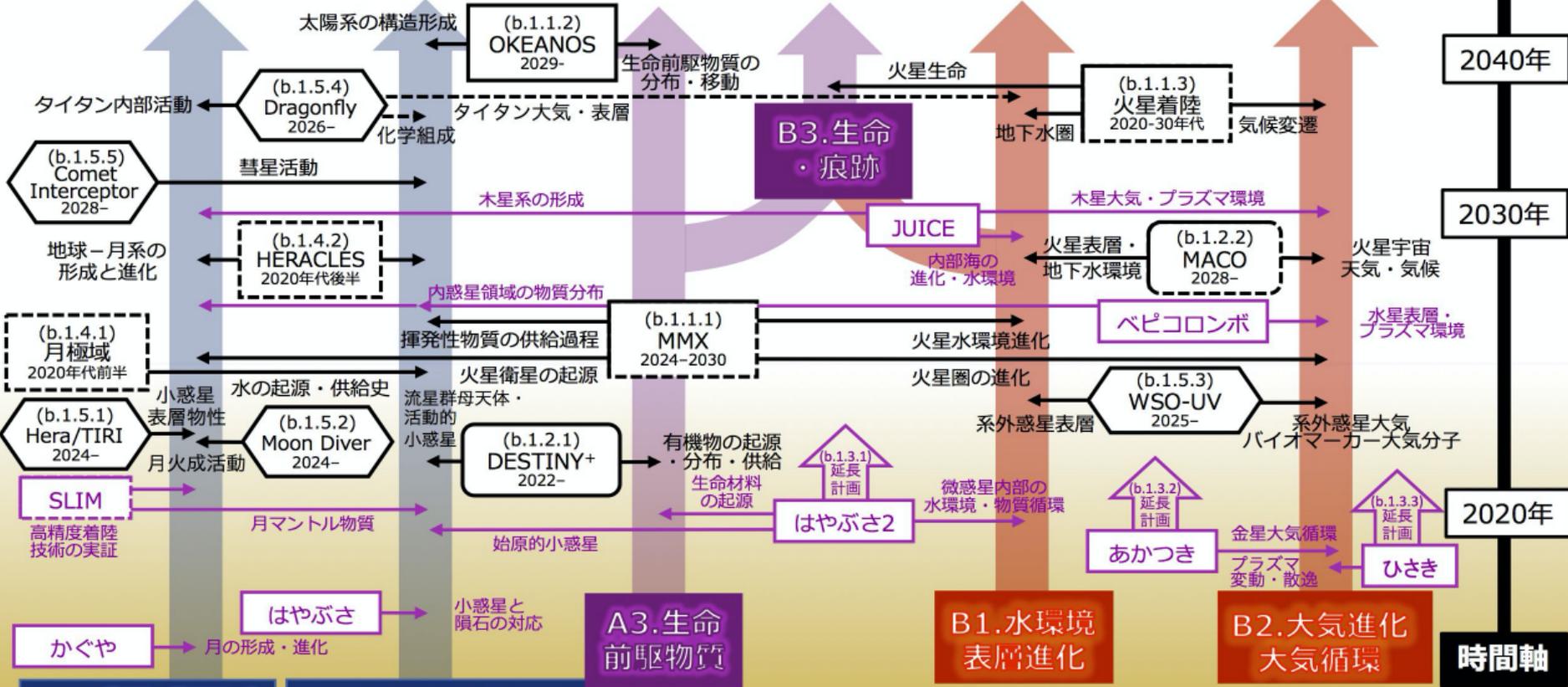


# 宇宙に開かれた生命惑星観、フロンティア拡大

## 太陽系における生命生存可能環境 (CHASE) の理解

### A. 形成

### B. 持続性



A1. 惑星-衛星系の形成・分化

A2. 惑星材料・揮発性物質の分布・供給

(c) 惑星探査  
コンソーシアム

凡例

プログラムの小型 (b.1.2)

機器提供小規模 (b.1.5)

戦略的中型 (b.1.1)

国際宇宙探査 (b.1.4)

打上済 or プロジェクト化

探査ボックスの縦軸の位置は打ち上げ年ではなく、サイエンス目標が達成される年を表す

人材育成・探査立案・解析技術・機器開発

日本惑星科学会 大学・研究機関・民間企業

# 月の科学I: 地球の大気海洋・生命の起源

- ジャイアントインパクトと呼ばれる**原始地球への惑星衝突事件**。このときの放出物で月形成
- 衝突する惑星の大きさ、速度に**複数シナリオ**
- 各シナリオで原始地球に残る大気組成や海水量が異なる。**地球の大気や海洋、生命の起源を決定した運命の事件**

シナリオに決定打を打つには

- **初期地殻の組成・形成年代**
- **月マンタルの組成**
  - ← これら残るピンポイント地点からサンプルリターン
- **月のコアサイズ決定**
  - ← ネットワーク月震計設置

# 月の科学II：初期太陽系の大変動の記録

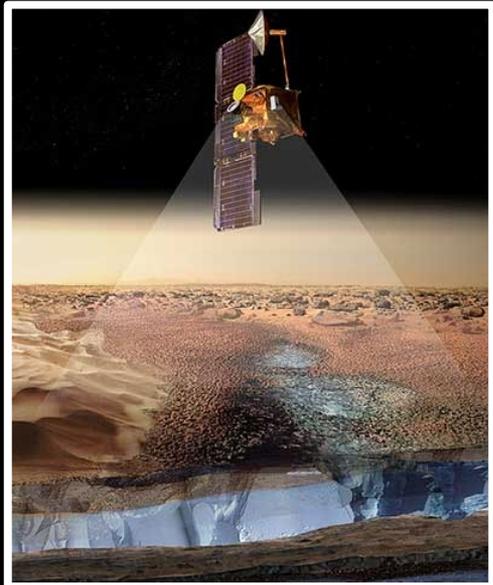
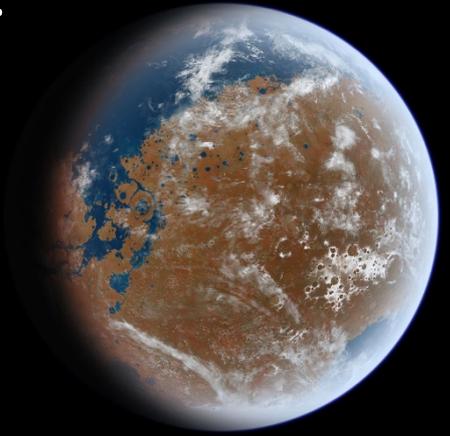
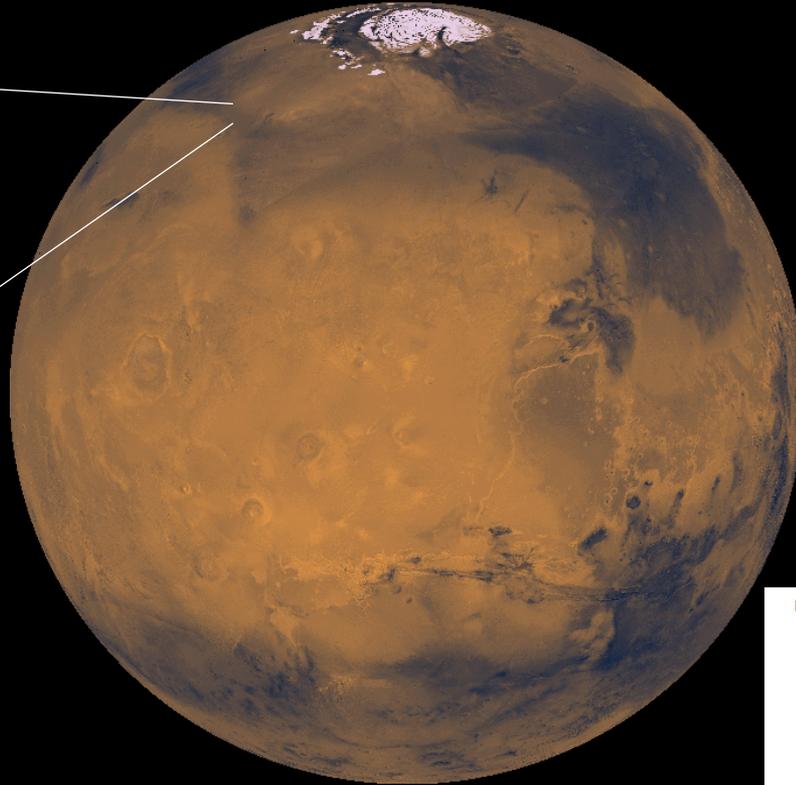
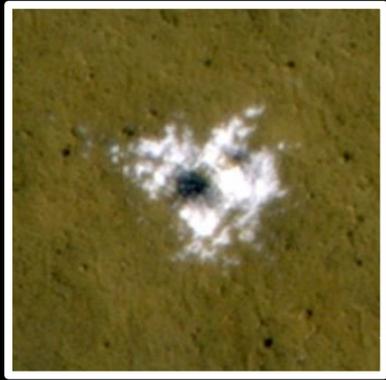
- 初期太陽系で起きたとされる**原始木星・土星の大移動**
- 現在の太陽系の姿をデザイン。小惑星の軌道を大きく変えて、**隕石重爆撃**を引き起こす
- 小惑星の衝突で**月にも水**をもたらすか？

大変動の規模や影響を知るには

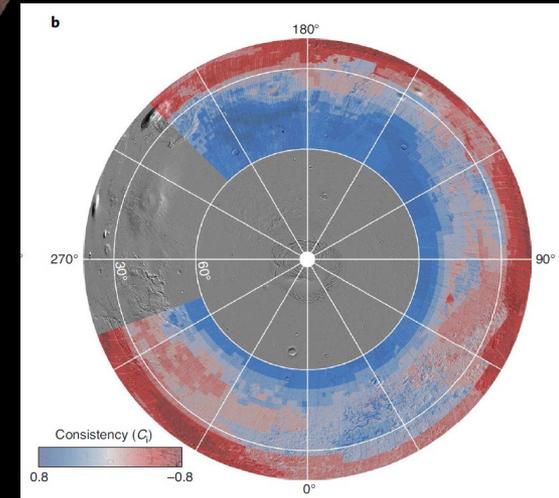
- **月巨大衝突盆地の形成年代決定**  
← 複数の衝突盆地からのサンプルリターン
- **月への水の供給過程の制約**  
← 水の同位体組成その場分析／サンプルリターン

# 月からの科学I: 火星の水と生命

40億年前に海だった火星の水、今は大部分が地下に凍土として存在



緯度45度以上であれば、地下3mまでにはほぼ全域に地下氷。場所によっては緯度30度でも (Morgan et al. 2021)





- ピンポイント着陸
  - 難アクセス領域の探査
  - 氷/有機物回収その場分析
- ⇒ 月極域氷探査と共通技術

100 m



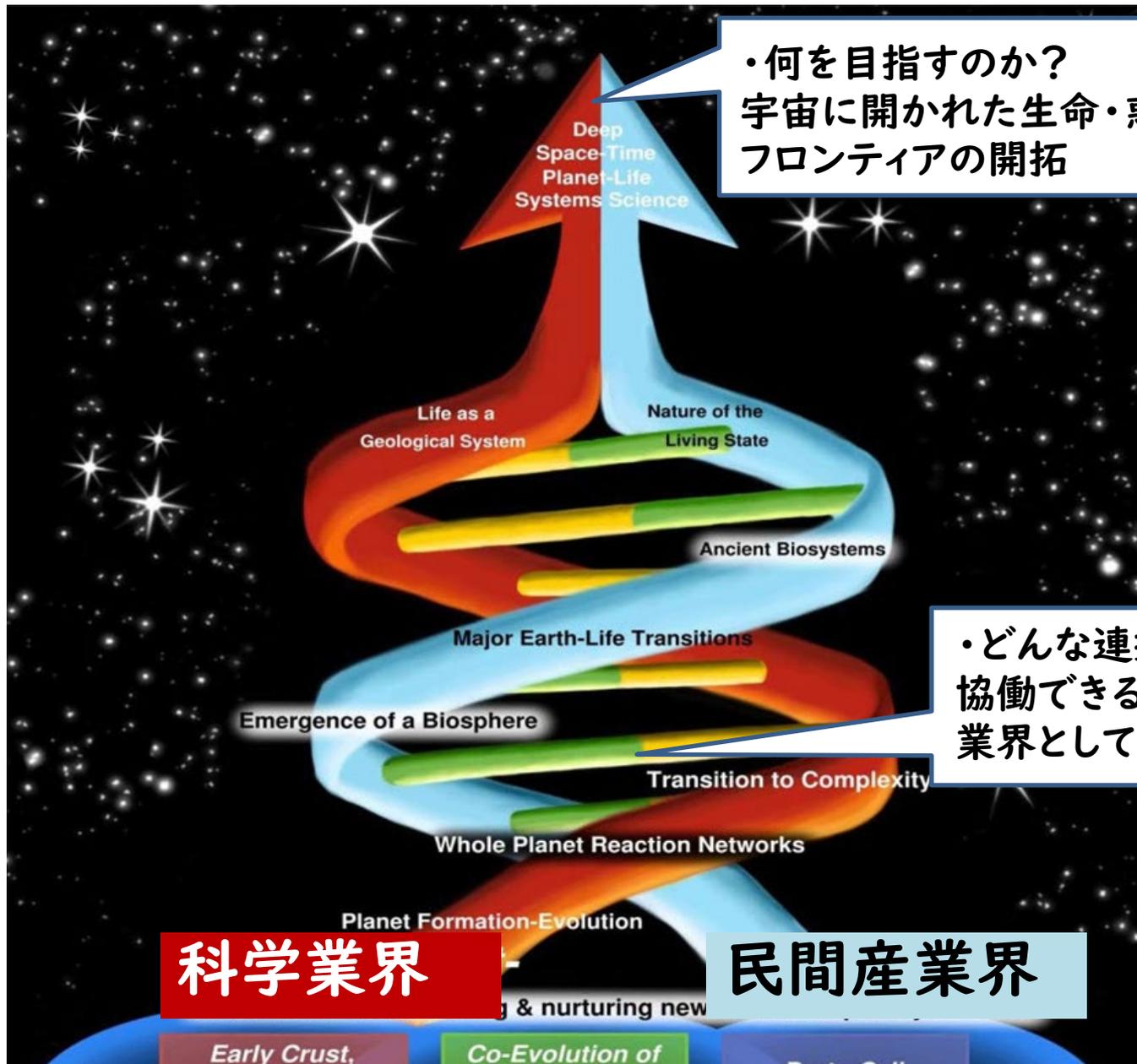
# 産業界と科学界との連携に向けて

- 目指すビジョンの共有化
- アルテミス月科学三本柱に加え、科学/産業の自由度と多様性を
  - 三本柱：月サンプルリターン、月内部構造、月面天文台
  - 前者2つは前述「月の科学I・II」と整合
  - 他方、月・火星で共通する難アクセス地域での水探査は抜ける
- 難アクセス領域での地下構造・物質探索 - 高頻度とチャレンジ性
  - 月も火星も氷があるのはクレータの底や崖の地下
  - 月での水資源獲得技術(超ピンポイント着陸、崖・地下探索、その場分析)は、火星生命の探査のための技術でもある
- 産学連携での宇宙開発の在り方とは
  - 共通技術の開発、地下探索や月地質など「学」の知見も「産」に
  - そのために間に立つコーディネータ(学会)の必要
  - 協働できるネタを今こそ仕込む必要

バックアップ

# 民間とアカデミアの連携

時間軸



・何を指すのか？  
宇宙に開かれた生命・惑星・文明観  
フロンティアの開拓

・どんな連携可能か？  
協働できるネタを仕込む  
業界としてgive&take

# RFI回答文書(2019年改訂版)の紹介

惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表(2019年改訂版)

## 目次

前書き	3
(a) 目標(将来ビジョン)	4
(a.1) 今後10—20年の世界のサイエンスの動向と海外プロジェクトの動向	4
(a.1.1) 月探査	4
(a.1.2) 水星探査	4
(a.1.3) 金星探査	5
(a.1.4) 火星探査	5
(a.1.5) 小天体探査	5
(a.1.6) ガス惑星・氷惑星探査	6
(a.1.7) 氷天体(氷衛星、Kuiper-Belt天体)探査	6
(a.1.8) 系外惑星	7
(a.2) 日本の戦略・狙うサイエンス・期待される成果	7
(b) 具体的戦略	9
(b.1) 惑星探査プログラム案	9
(b.1.1) 戦略的中型提案	10
(b.1.1.1) 火星衛星探査計画(MMX) [2024年]	10
(b.1.1.2) ソーラー電力セイル探査機(OKEANOS)による外惑星領域探査の実証 [2030年頃]	11
(b.1.1.3) 戦略的火星探査:火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 [2030年代前半]	12
(b.1.2) プログラム的小型計画案	13
(b.1.2.1) 深宇宙探査技術実証機(DESTINY+) [2022年]	13
(b.1.2.2) 戦略的火星探査: 周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査(MACO)計画 [2028年頃]	14
(b.1.3) 延長計画	15
(b.1.3.1) はやぶさ2	15
(b.1.3.2) あかつき	16
(b.1.3.3) ひさき	17
(b.1.4) 国際宇宙探査	18
(b.1.4.1) 月極域探査計画 [2020年代前半]	18
(b.1.4.2) 月探査用貨物輸送ミッション実証機(HERACLES) [2020年代後半]	19
(b.1.4.3) 戦略的火星探査 [2020~30年代]	20
(b.1.5) 機器の提供による国外探査計画・小規模計画	20
(b.1.5.1) 小惑星探査機Hera/熱赤外カメラTIRI [2024年]	20
(b.1.5.2) NASA Discovery計画Moon Diverへの小型観測機器プロープ提供 [2024年]	21
(b.1.5.3) 系外惑星大気の紫外線分光観測 [2025年頃]	22
(b.1.5.4) 土星衛星離着陸探査計画(Dragonfly) [2026年]	23
(b.1.5.5) Comet Interceptor (ESA Fast mission) [2028年頃]	24
(b.1.6) 将来探査コンセプト提案	24
(b.1.6.1) 火星オービターコンセプト	24
(b.1.6.2) 月の地下空洞直接探査 [2020年代]	25
(b.1.6.3) 火星の地下空洞直接探査 [2020~2030年代]	26
(b.1.6.4) 長周期トランジット系外惑星探査・超小型衛星計画 [2026年頃]	27
(b.1.6.5) 系外惑星の主星に対する紫外線モニタリング [2020年代]	28

- 89名の日本惑星科学会会員(及び20名の協力者)からなる「RFI回答文書改訂作業部会」によって改訂

(b.1.6.6) 超小型衛星による太陽系近傍恒星周りの系外惑星トランジット観測 [2024年頃]	29
(b.1.6.7) 近赤外線分光観測による小惑星の含水鉱物探査(Watery / Hydrated Asteroid Measurements: WHAM) [2020~30年代]	30
(b.2) 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発	31
(b.3) 将来サンプルリターン探査における化学分析とキュレーションの長期展望	32
(b.4) 惑星保護	32
(c) 惑星探査を支える人材の育成(惑星探査コンソーシアム)	34
(d) 工程表(ロードマップ)	36

# 来る10年の月惑星探査検討会2(2021年)

## ● 第1段階提案リスト (月・火星・地球型惑星パネル)

- 非接触での水検出能力をもつ中性子・ガンマ線センサ
- 重力天体定点着陸技術
- 月・惑星の地形測量・地盤調査システム
- 重力天体での三次元移動探査技術
- 地震探査で明らかにする太陽系天体の内部構造
- カリウム・アルゴン年代計測装置
- 月・火星縦孔露頭における月熔岩岩体調査のための多足型移動体システムによる探査
- 月・火星における多肢再構成作業ロボットによる探査
- 「月高地原始地殻領域の探査」で迫る巨大衝突による天体形成と進化の真の理解
- 月の縦孔・地下空洞直接探査による、月の火成活動／溶岩被覆様式の解明
- 月の縦孔・地下空洞における古代磁場の理解
- 月の中低緯度地域からの揮発性物質サンプルリターン
- 月の縦孔・地下空洞の利用可能性に資する科学
- 太陽系初期の大動乱期復元に向けた月面衝突盆地からのサンプルリターン探査
- 戦略的火星探査:周回機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画(MIM)
- ネオン-アルゴン分離装置搭載質量分析計による火星大気ネオンその場測定
- 火星の地下空洞における生命探査
- 地球外生命体そのものの探査
- 火星地下氷圏の探査とサイエンス
- 産業水資源バリューチェーン創出のための基盤技術の確立
- 分散展開超小型プローブ群による偵察探査(SPUR)
- 複数の小型衛星を用いた金星衛星間電波掩蔽観測(CROVA)

22提案

# 来る10年の月惑星探査検討会2(2021年)

## ● 第1段階提案リスト(小天体パネル)

- CAESAR
- 始原天体マルチフライバイ探査
- 親機・子機探査システムを用いた次世代サンプルリターン探査
- 小天体高頻度マルチフライバイ探査ミッション
- 恒星間天体の探査
- 木星トロヤ群小惑星探査

6提案

## ● 第1段階提案リスト(外惑星・系外惑星パネル)

- 土星円環探査計画
- 惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画(LAPYUTA)
- 大型宇宙望遠鏡による系外惑星観測
- ガリレオ衛星の物質探査
- 地球外生命体そのものの探査
- 可視光赤外波長域での系外惑星サイエンス
- LOTUS
- Titan探査機Dragonflyにおける地震探査に向けた検討
- 月面天文台:低周波電波干渉計による月面からの宇宙物理観測

9提案

# 来る10年の月惑星探査検討会2(2021年)

## ● 第1段階提案リスト(複数パネル候補)

- 惑星保護技術
- 質量分析技術
- 超小型探査機による太陽系探査
- レーザー誘起プラズマ発光分光装置(LIBS)
- ラマン分光計
- 地下レーダー探査・誘電率構造探査
- 地球外生命そのものの探査
- 月惑星・小天体の内部構造探査のための重力偏差計(小型衛星搭載の加速度計方式)の開発
- 月惑星・小天体の内部構造探査のための重力偏差計(ローバー搭載の自由落下方式)の開発
- 月惑星探査アーカイブサイエンス
- 惑星探査機搭載用サブミリ(テラヘルツ)波分光観測測器の開発・展開

|| 提案

計46提案

# JAXAの当面の国際宇宙探査シナリオ

火星他

月

地球

人類の活動領域の拡大

ピンポイント着陸技術  
重力天体表面探査技術

小天体資源探査他  
サンプルリターン



MMX: 2024年度  
重力天体  
表面探査技術

★初期火星探査

★本格探査

- 火星の生命探査
- 火星の科学探査

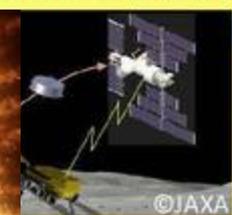
- 火星の利用可能性調査
- 長期にわたる火星の科学探査

ピンポイント  
着陸技術

ピンポイント  
着陸技術



小型月着陸実証機  
(SLIM)  
(2021年度)



月移動  
・月極域の  
・月面拠点

探査(2026年頃～)  
調査とサンプルリターン  
に向けた技術実証等

月の本格的な探査・利用  
無人探査機/有人能力の協調による効率的資源探査・科学探査  
・多種多様な主体による月面活動

月面活動

深宇宙補給技術

有人滞在技術

補給ミッション/月探査支援  
(2026年頃～)  
・小型探査機放出  
・月面観測他

Gateway第一段階  
(2022年-)

- 月面探査の支援
- 深宇宙環境を利用した科学

有人滞在技術

Gateway第二段階

- 火星探査に向けた技術実証

民営化を推進

国際宇宙ステーション