

# 宇宙探査の科学的意義と 国際宇宙探査との関係

2017年6月28日

国際宇宙探査推進チーム

# 1. 基本的な考え方

- 「国家プロジェクトとしての国際宇宙探査」と「学術としての宇宙科学探査」との協調

地球型惑星の成り立ちを理解・解明するなどの学術としての「科学探査」と、活動領域の拡大を目指す「国際宇宙探査」は、互いに利点を活用しあう相補的な両輪として機能させる。

また、費用対効果の発揮及び成果を最大化させるため、無人・有人探査それぞれの特性・優位性を活かした取り組みを行う。

- 国際宇宙探査の機会を、「科学」に有効活用(2項)

- ✓ 「極域水氷探査」では、「生命前駆物質の分布・移動, 天体への供給」という科学中目標に寄与。

- ✓ 「活動領域拡大」の取り組みの結果得られる地球～月面間輸送の確立は、月面の広域に広がる様々な地点の科学探査を可能に。

- ✓ 「火星探査」では「鉱物－水－有機物の反応」「大気散逸現象」などの解明という中目標に寄与。

- 「科学探査」の成果を、「活動領域拡大」に活用(3項)

- ✓ SELENEの観測成果と科学的知見は、「極域水氷探査」や「月面拠点の構築」のベースデータ

- ✓ SLIMIは、ピンポイント月着陸の先駆的技術実証

- 「国際宇宙探査」の成果を、「科学」に活用(4項)

- ✓ 国際宇宙探査で磨かれた技術が、科学探査に活用



## 2. 宇宙探査における科学的意義 (1/10) — 惑星科学における大目標 —

- 宇宙科学のサイエンスは、天文学・宇宙物理分野、太陽・惑星系科学分野と大別され、国際宇宙探査は、太陽・惑星系科学分野を中心に議論がなされている。
- 惑星科学の大目標として、『太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解』のため、以下5つの中目標に分類。
  - (1) 生命前駆物質の形成・進化： 彗星, 始原的小惑星, 惑星間塵  
(水・有機物等がどこでいかに作られたか)
  - (2) 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動, 天体への供給： 月, 小惑星, 水星  
(水・有機物等が地球にいかに移動してきたか)
  - (3) 地下熱水環境： 鉱物—水—有機物反応系： 火星, 氷衛星, 始原的小惑星  
(水・有機物等がいかに反応して生命が作られるか?)
  - (4) 大気(海洋)散逸・光化学反応： 火星, 金星, タイタン, 系外惑星  
(他の惑星でなぜ環境が維持されなかったのか?)
  - (5) 惑星・衛星の形成・初期分化： 月, 水星, 火星, 分化小惑星  
(地球型惑星はいかに作られたか?)



## 2. 宇宙探査における科学的意義 (2/10) 一月・火星探査の目標一

- 宇宙科学のサイエンスは天文学・宇宙物理分野、太陽・惑星系科学分野と大別され、国際宇宙探査は、太陽・惑星系科学分野を中心に議論がなされている。
- 惑星科学の大目標として、『太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解』のため、以下5つの中目標に分類。

(1) 生命前駆物質の形成・進化:

彗星, 始原的小惑星, 惑星間塵

(2) 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動, 天体への供給:

月, 小惑星, 水星

(3) 地下熱水環境: 鉱物-水-有機物反応系:

火星, 氷衛星, 始原的小惑星

(4) 大気(海洋)散逸・光化学反応:

火星, 金星, タイタン, 系外惑星

(5) 惑星・衛星の形成・初期分化:

月, 水星, 火星, 分化小惑星



## 2. 宇宙探査における科学的意義 (3/10) —地球型惑星の成り立ちを理解・解明する探査—

### 今までの日本の探査

- 水星：  
「ベピ・コロombo」による、太陽系最内縁における惑星形成と表層進化  
(2018年打上げ予定)
- 金星：  
「あかつき」による、その大気ダイナミクスの調査(運用中)
- 月：  
「かぐや」における周回軌道からのリモセン調査(実行済)。「SLIM」による  
マントル物質の分光観測(国際宇宙探査の先行)(準備中)。  
→国際宇宙探査
- 火星：  
「火星衛星サンプルリターンミッション」による火星の形成過程の解明(衛星  
の起源、惑星材料物質の解明と並行して)  
→国際宇宙探査



## 2. 宇宙探査における科学的意義 (4/10)

### — 月探査の目標 —

#### 惑星科学の中目標

#### 月で何を調べるか？

#### 目標

惑星・衛星の形成・初期分化  
地球型惑星形成過程の骨格をなす天体衝突過程を理解する

- ・月(と地球)の科学組成、年代と構造の理解
- ・天体進化(火成活動)の理解
- ・クレータ年代学の高精度化
- ・地球、月、惑星間の比較

- A 地殻とマントル、コアの化学成層の把握
- B 冥王代地球の地質情報(元素組成)の把握
- C 火成活動の多様性と年代の把握
- E キークレータの年代確定

生命前駆物質の分布・移動, 天体への供給  
地球・月への水の供給を理解する

- ・水・揮発性成分の付加

- D 月・地球への水・揮発性成分の供給源、および供給量の把握

## 2. 宇宙探査における科学的意義 (5/10)

### — 月探査の代表的候補地 —

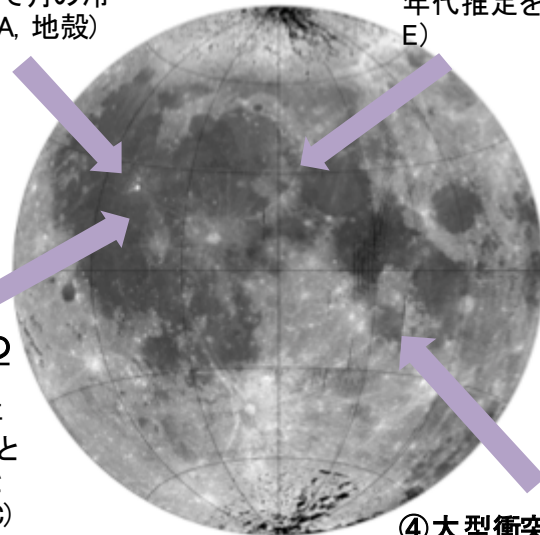
**① アリスタルコス・クレータ**  
熱源である放射性元素(トリウム)が最も濃集している地域。その量を測定することで月の冷却過程を解明。(目標A, 地殻)

**② アリスタルコス台地の周囲**  
最も若い溶岩の噴出年代や組成を測定することで火成活動の多様性と年代を把握する(目標C)

**⑧ 全球**

- 月震観測により、月の内部構造(地殻厚絶対値、コアサイズ、マントル組成・温度等)を把握する。(目標A, 地殻・マントルコア)
- 冥王代の地球からの隕石を探索し、地球上に残されていない原始地球の地質情報(元素組成)を把握する。(目標B)

**月表側**

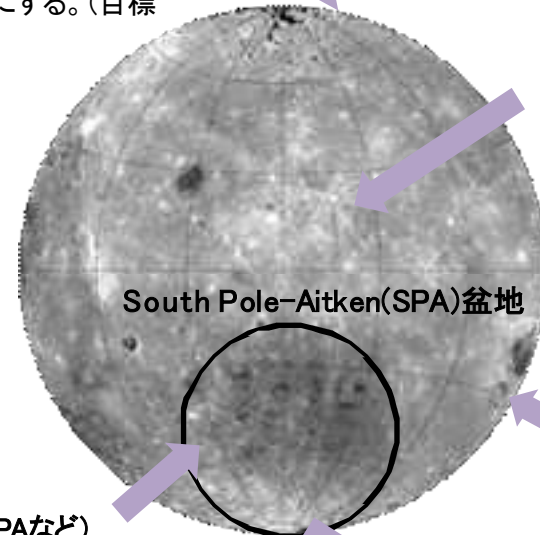


**③ アリステリス・クレータ**  
30億年より若いと推定されるクレータの一つ。このクレータの放射年代測定により、月面各域のクレータ密度に基づく絶対年代推定を可能にする。(目標E)

**④ 大型衝突痕(SPAなど)**

月の大型衝突痕。掘削により露出した地殻下部やマントルの構成物質分析により、月の構造の解明に寄与する。(目標A, マントル)

**月裏側**



**⑤ 極域(目標D)**

**⑤ 極域**

永久日陰等低温領域に水氷が存在する可能性。その同位体測定により水の起源の解明に寄与する。(目標D)

**⑦ ジャクソンクレータの中央丘**  
月の最古かつ代表的な地殻。この構成物質分析により、月の組成・構造と固化年代の解明に寄与する。(目標A, 地殻)

**⑥ オリエンターレ盆地**

最も新しい大型衝突痕であり、地殻深部物質が大規模に露出。これを分析することにより、月全球・地殻物質の組成・構造の解明に寄与する。(目標A, 地殻)

**⑨ 裏側中低緯度(参考)**

惑星科学ではないが、地球の電波が遮断される利点を生かして、大規模な低周波電波天文観測を行い、宇宙誕生の謎を解く。

SLIMにおいても、代表的候補地に着陸を予定。

## 2. 宇宙探査における科学的意義 (6/10)

### — 火星探査の意義・代表的候補地 —

# 原始惑星の記録を保存 惑星・衛星の形成・初期分化の解明

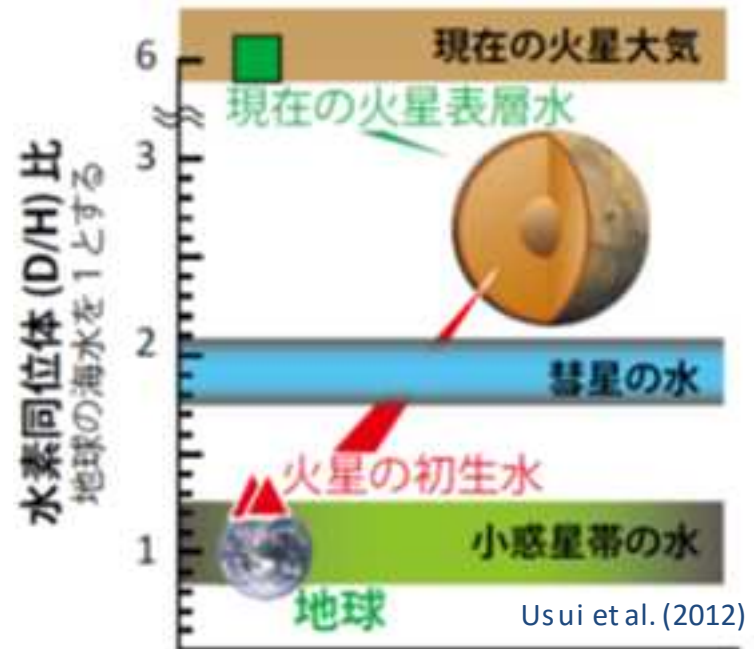
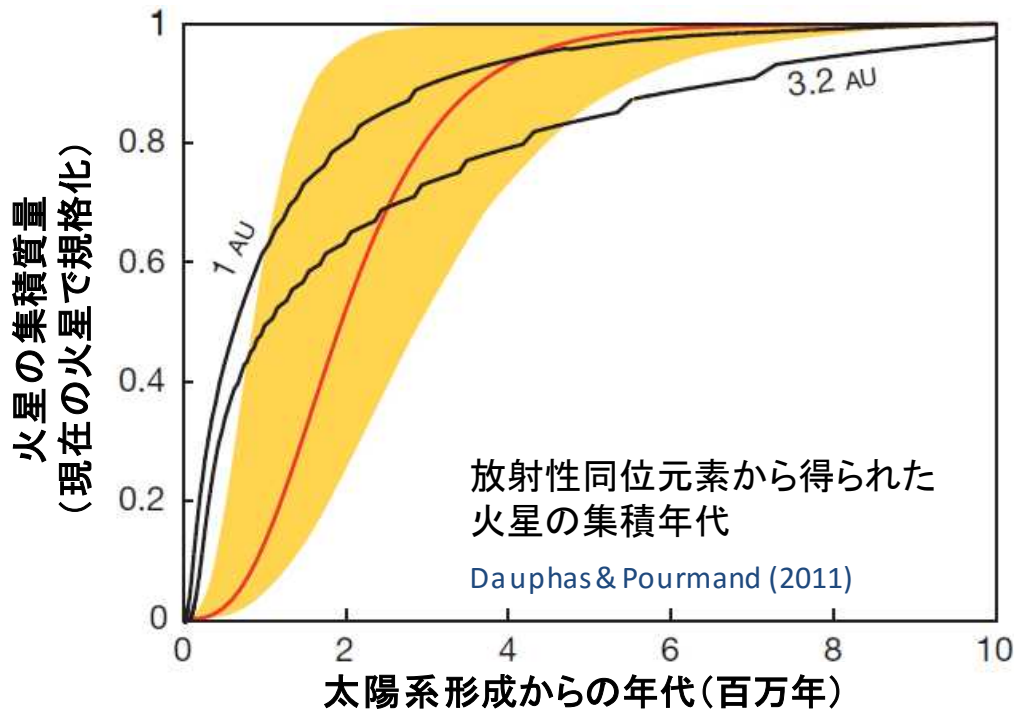
- 地球型惑星は、形成最終ステージで、1/10地球サイズの天体(原始惑星)の衝突合体を経験
- 火星(1/10地球)は原始惑星の“生き残り”の可能性
- 地球では失われた、惑星形成途中の情報(水の獲得など)を保持

火星の集積は太陽系形成初期  
(500万年以内)に終了



地球の月形成:  
~数千万年後

小惑星帯からもたらされた初期の水が火星マントルに保存

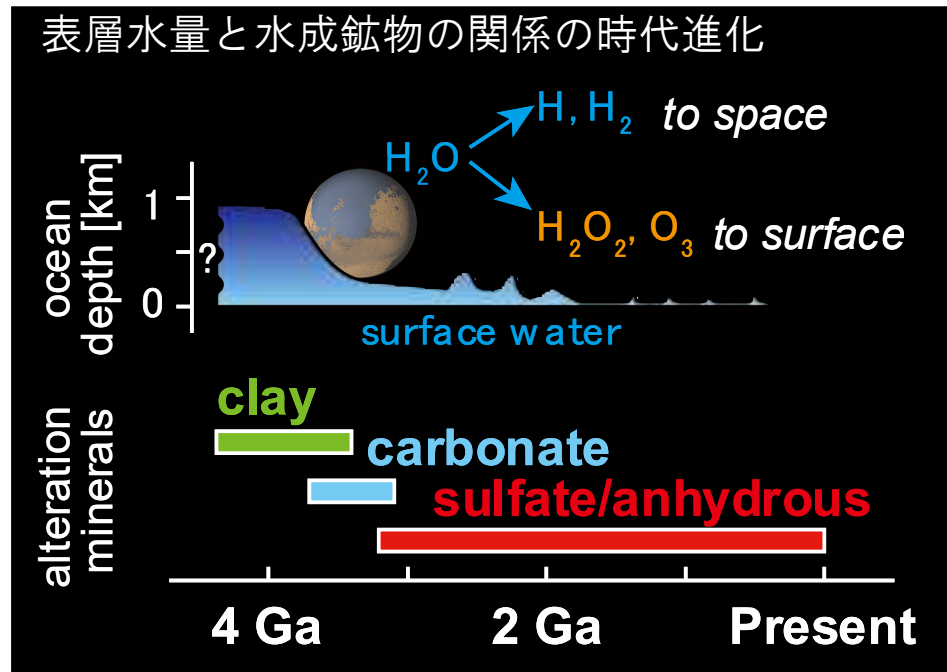




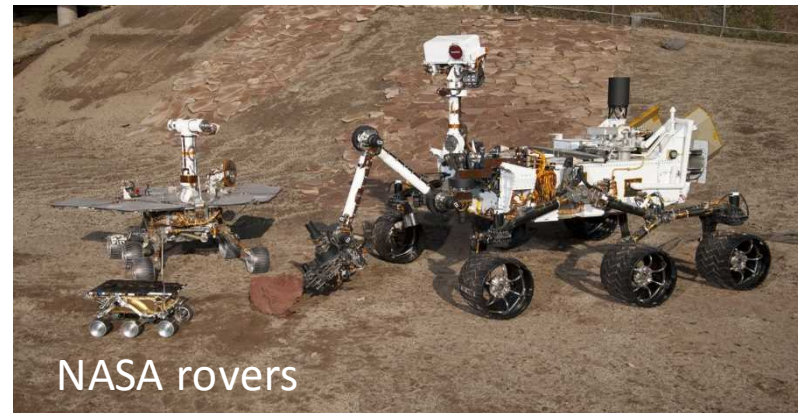
## 2. 宇宙探査における科学的意義 (7/10) — 火星探査の意義・代表的候補地 —

### 火星探査でこそ獲得できる知見は何か？

- 液体の水(海)を保持していたことが確実な唯一の地球外天体
- 温暖湿潤から寒冷乾燥化への大きな気候変動の地質学的証拠
- 生命環境の存在を示唆する有機化合物の発見



欧米は、生命の痕跡検出、  
サンプルリターンに向けて大型化

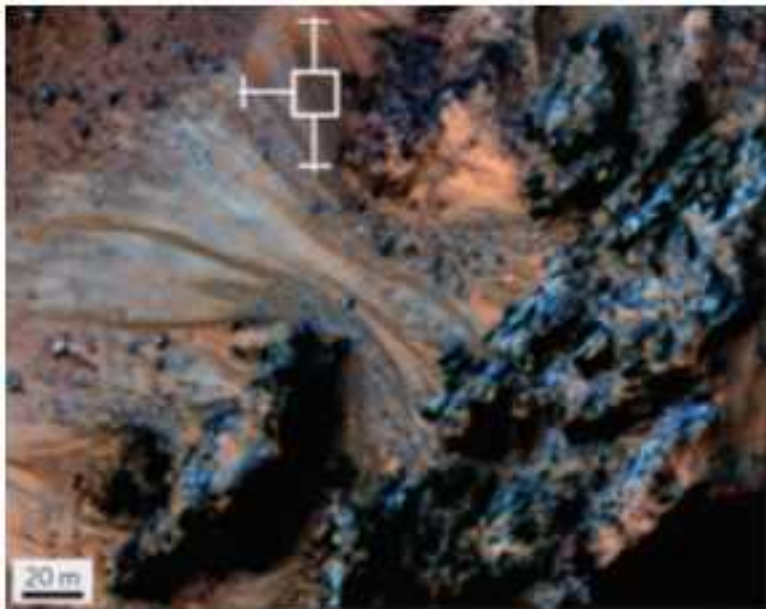


## 2. 宇宙探査における科学的意義 (8/10) — 火星探査の意義・代表的候補地 —

### 高傾斜地や高緯度地域での浅部地下圏へのアクセス 地下熱水環境：鉱物—水—有機物反応系の解明

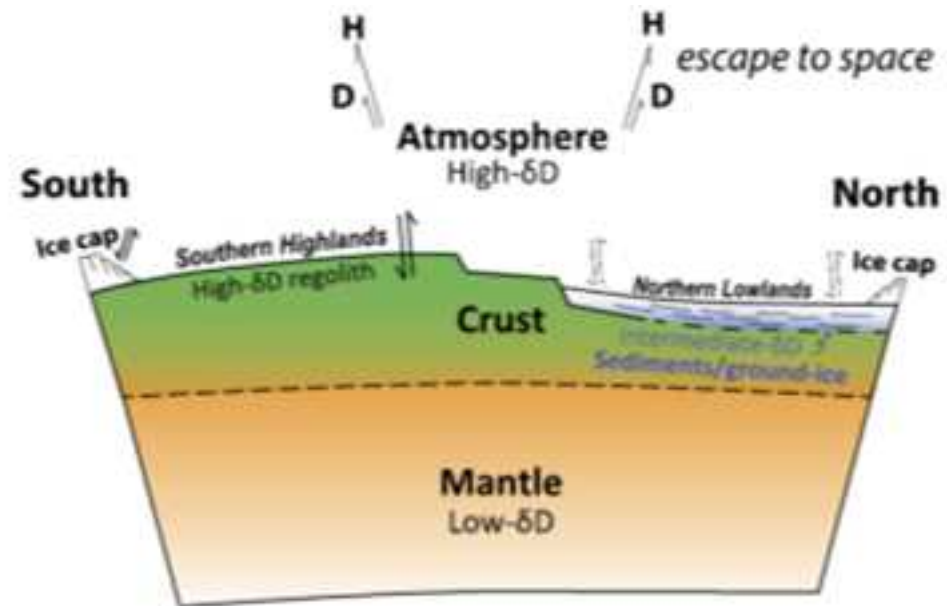
- 浅部地下の水循環が火星環境進化の支配要因である可能性
- 地下探査は本質的であるにも関わらず、技術的に行われてこなかった
- 大型化の進む米国の探査においても最重要視されていない

クレーター壁面(急傾斜地)に断続的な塩水の流出を確認



Ojha et al. (2015)

古海洋(平均水深~200 m)に匹敵する地下凍土層が存在する可能性



凍土層を示した火星模式断面図 (Usui et al. 2015)



## 2. 宇宙探査における科学的意義 (9/10) — 小天体探査の目標 —

- 宇宙科学のサイエンスは天文学・宇宙物理分野、太陽・惑星系科学分野と大別され、国際宇宙探査は、太陽・惑星系科学分野を中心に議論がなされている。
- 惑星科学の大目標として、『太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解』のため、以下5つの中目標に分類。

(1) 生命前駆物質の形成・進化:

彗星, 始原的小惑星, 惑星間塵

(2) 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動, 天体への供給:

月, 小惑星, 水星

(3) 地下熱水環境: 鉱物—水—有機物反応系:

火星, 氷衛星, 始原的小惑星

(4) 大気(海洋)散逸・光化学反応:

火星, 金星, タイタン, 系外惑星

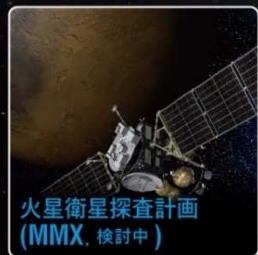
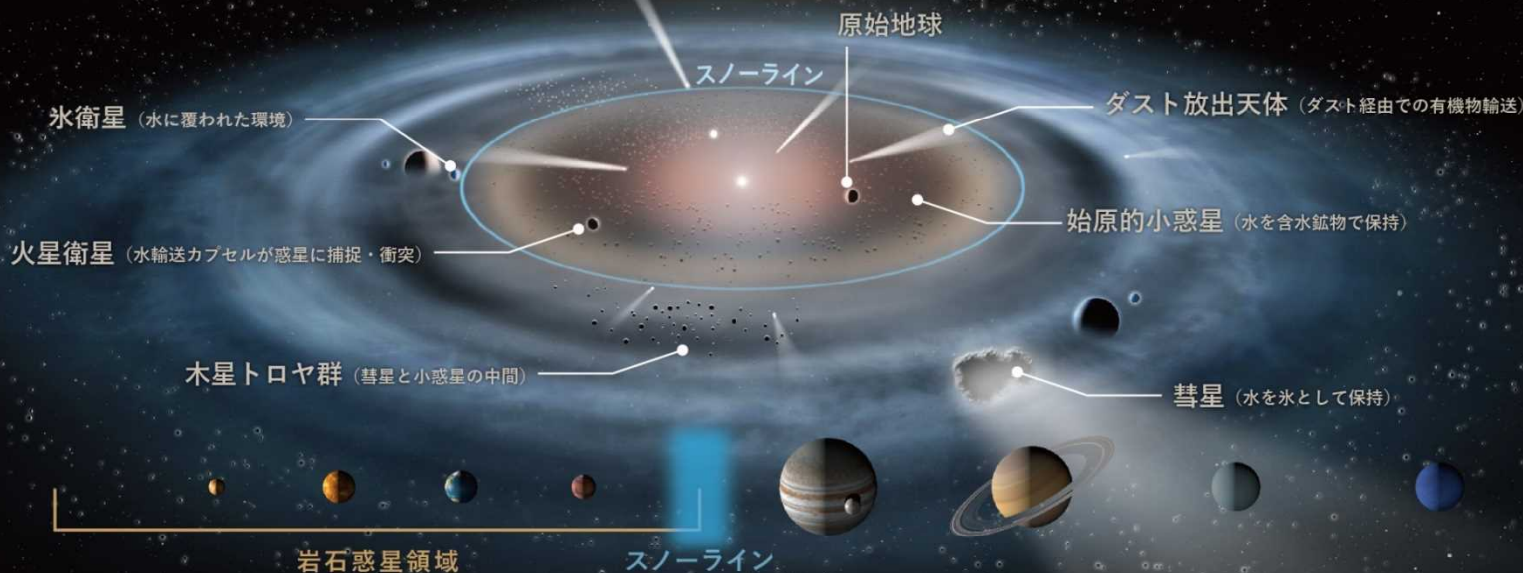
(5) 惑星・衛星の形成・初期分化:

月, 水星, 火星, 分化小惑星

## 2. 宇宙探査における科学的意義 (10/10) — 小天体探査の目標 —

### ISASの小天体探査戦略

スノーラインの外で生まれた小天体。最初は凍った泥団子であり、その後、多様な姿に進化する。これらの天体が運ぶ水、有機物等の揮発性物質が、地球型惑星を生命居住可能にするために必須であった。しかし、いつ、どの天体が、どのように水を原始地球に持ち込んだのか？



一連のミッションで、これらの問題を探求する



### 3. 科学探査の成果の国際宇宙探査への活用 —SLIMで実証する技術の適用・発展—

- SLIMは、月探査に向けた着陸技術の確立のための先駆的技術実証として位置づけ。
  - 月探査シナリオ(水資源探査～有人月面探査)の実現に向けて必要な技術を獲得する。  
(ピンポイント着陸技術など)
  - SELENEで得られた観測成果や科学的知見を活用して着陸地点を選定。
- SLIMで実証をする技術とその後の発展

誘導制御 アルゴリズム	■ SLIMで実証される基本的なアルゴリズムは、 <u>後継の月着陸ミッション(極地方や大型、有人)でそのまま適用可能。</u>
航法(位置)	■ SLIMで実証されるクレータマッチング手法は、 <u>後継の月着陸ミッションに適用可能。</u> ⇒クレータマッチングに加え、崖や岩石などの特徴点のマッチングを追加することで、 <u>照明条件の悪い極地域着陸ミッションや火星フォボス/ダイモスへの探査ミッション(MMX)へも適用が可能となる。</u>
航法(速度)	■ SLIMで実証されるレーダは、 <u>そのまま後継の月着陸ミッションや火星フォボス/ダイモスへの探査ミッション(MMX)で適用可能。</u> ⇒SLIMで計測される実環境での反射波形により、 <u>地上シミュレータのコリレーションを行い、後継ミッションでのレーダの高精度化が図れる。</u>
障害物回避	■ SLIMで実証される可視画像による障害物回避技術は、 <u>後継の月着陸ミッションでも日照域では、そのまま適用可能。</u> ⇒現在研究中である、日陰時でも対応可能な3D-Flash LIDARと合わせて搭載することで適応性が向上する。
エンジン (推力可変)	■ SLIMで実証される500N級スラストのオフモジュレーションによる推力可変技術は、 <u>同クラスのスラストを採用する月着陸ミッションおよび火星フォボス/ダイモスへの探査ミッション(MMX)などで適用可能。</u> ⇒クラスタ化技術を付加することで、 <u>より大型のミッションに発展可能。</u>



## 4. 国際宇宙探査の成果の科学探査への活用 —国際宇宙探査技術の宇宙科学へのフィードバック—

- 国際宇宙探査で磨かれた技術は、宇宙科学ミッションにフィードバックが可能。
- さらに、国際宇宙探査で新たに開発される技術についても宇宙科学に適用することができる。

SLIM技術	■ SLIMで実証された技術は、国際宇宙探査に適用することで信頼度を高められ、その技術を宇宙科学ミッションに適用することで、より確実なミッション実行が可能となる。 例:ピンポイント着陸技術、航法、障害物回避、エンジン他、
その他技術	■ 国際宇宙探査において確立される技術についても、宇宙科学ミッションに適用が可能である。
観測器・分析技術	■ 国際宇宙探査で実証または実用される観測器、また質量分析などの分析の技術は、他天体を探査する宇宙科学ミッションに活用する計画である。 例:分光カメラ、質量分析器