

提案タイトル: 月・惑星着陸探査用元素分析装置: レーザ誘起絶縁破壊分光装置 (LIBS)

石橋高、竝木則行、荒井朋子、小林正規、千秋博紀、和田浩二、大野宗祐、松井孝典(千葉工大)
亀田真吾(立教大)、長勇一郎、杉田精司(東大)

- 今後20年で行うべきは、太陽系内の「惑星地質学」
 - ・ 太陽系は数多くのリモートセンシング探査を中心に調べられてきた
→ 固体系天体の表層は多様性に富むことが判明
 - ・ しかしリモートセンシング探査では空間分解能などに限界がある
 - ・ 天体の起源と進化の真の理解には地球における地質学と同等の調査に基づく「惑星地質学」が必要
→ 「月惑星の構造と進化の比較学」へ
- 固体系惑星探査のステップ
リモートセンシング → 着陸惑星探査 → サンプルリターン → 有人探査
 - ・ 今後は着陸探査によるその場観測とサンプルリターンがメインに
 - ・ 地球における地質学と同等の探査を目指す
- LIBS — 汎用的かつ効率的な元素分析装置
 - ・ 地質学者の目となり手となる
 - ・ サンプルリターンの前段階としての着陸地質探査
 - ・ サンプルリターン時の適切な試料選定
 - ▶ 現在、SELENE-2 用の LIBSを フランス・スペインと共同開発中で小型軽量化も達成されつつある
 - ▶ LIBS は火星でも使用されている (MSL への搭載)
 - ▶ ドイツやインドでも開発中 → 惑星探査用元素分析装置のスタンダードへ?



ソーラー電力セイル探査機による トロヤ群小惑星探査および宇宙赤外線背景放射観測

A 太陽系の起源と進化を明らかにする: 標準理論の実証の時代へ ~「月惑星の構造と進化の比較学」
B 比較惑星学とアストロバイオロジー: ハビタブル天体の探索と研究 ~「生命に至る宇宙物質の進化学」

本提案の特徴:

1. Bを主目標とするが、母天体分化過程の解明により Aにも貢献可能
2. JAXA/ISAS 工学委員会のソーラーセイルWGと緊密な連携
3. 今後20年の日本の惑星探査の中核となる中・大型衛星ミッション

- A/B ともに、探査に加えて他の惑星系の観測研究がなくては成立しない
- 対象天体に到着するまでの長期にわたるクルージングフェーズを活用する必要

→ 惑星科学と不可分の関係にある天文分野との連携

- 有人ミッションと連携する月探査は、中国・インドなど新興国の国威発揚の場
- 人類全体にとってのフロンティアである火星は欧米主導の国際協力
- 日本が 独自の技術をもって主導できる上記2テーマ以外の分野を持つことが重要

→はやぶさ・IKAROS での経験を生かし深宇宙探査工学の技術的優位を確立

超高感度広帯域地震計による惑星内部モニター

地震探査・・・内部構造を詳しく知るために必須の手法

●月・惑星・小惑星等の内部探査技術の高度化→構造・成因・進化に迫る

観測帯域が探査深度（表層～コア）を決める

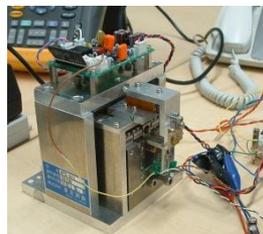
地震計の構成規模（広帯域型～短周期型）により観測帯域が異なる

探査深度	深（コア）	（マントル）	浅（表層）
観測帯域	低周波（1mHz）	（10～100mHz）	（0.1～1Hz）
地震計	広帯域型（～10kg）	（～5kg）	短周期型（～1kg）

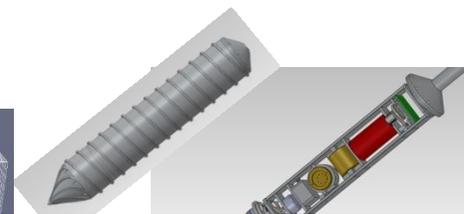
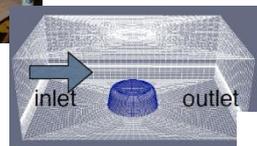
本提案（レーザ式地震計）・・・コアを狙える唯一の地震計

1. Full spec →月・火星のコアまでの探査・・・根源に迫る

2. Down grade →リソースに応じて、表層・小惑星・氷衛星等へも適用可能な技術



小型BBM・
自動化・
各種試験



設置法検討

現状

Full spec
月・火星コア

中帯域
マントル～
表層、小惑星

短周期
小惑星、氷衛星

107P/Wilson-Harrington サンプルリターン計画

かつて理論が先行した宇宙論。現在は観測的宇宙論の果たす役割は大きい。惑星科学においても、原始星誕生から惑星形成までの理論的フレームワークは他の原始惑星系円盤の観測や初期太陽系物質の分析からサポートされるだけでなく、観測や分析事実が先行し、理論がサポートする形も今後益々重要となる。観測においては、すばる・ALMAによる原始惑星系円盤観測が精力的に進められ、将来的にはTMT・SPICAなどの望遠鏡計画も存在する。

観測で今後さらに見えてくる円盤低温部の構造・化学に対し、対応する物質は揮発性物質（氷・有機物）である。太陽系における揮発性物質進化の理解は、観測・理論と合わせ、銀河系における比較原始惑星系円盤進化学の構築につながるものであり、また、分子雲から惑星までの生命材料物質の進化の理解につながるものでもある。すなわち、銀河の進化—太陽系の誕生・進化—惑星・生命の誕生までをひとつの進化軸で理解することが可能となる。天文学と地球科学の中間的存在ともいえる惑星科学において、銀河の進化に太陽系を位置づけ、さらに生命につながる初期条件まで明らかにすることは今後20年でめざすべきことだと考える。始源物質サンプルリターンはその一助になるものである。

イトカワ再探査による宇宙衝突実験

- I. 太陽系の起源と進化を明らかにする: 標準理論の実証の時代へ ~「月惑星の構造と進化の比較学」
 II. 比較惑星学とアストロバイオロジー: ハビタブル天体の探索と研究 ~「生命に至る宇宙物質の進化学」

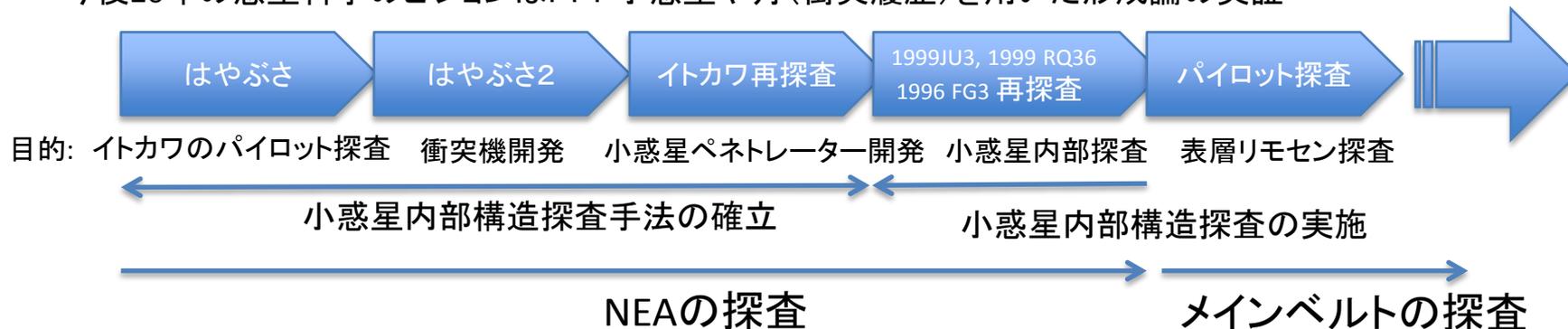
現在: IとIIの研究には2つの方向性. 以下のiとiiは常に相補的

- i. 系外惑星系の観測: ダスト・デブリディスクや巨大ガス惑星~スーパーアース等の惑星
1. 太陽系の多様性や惑星の多様性を解明(して行く)
 2. ハビタブル天体の発見やその大気観測から生命活動の証拠探し
- それでも難しい観測がある → 惑星形成過程で重要な cm アグリゲイト~ 1000km天体の直接観測
 → 生命の直接観測(SETI?)
- ii. 惑星探査
1. 惑星形成過程の実証的観測: cmアグリゲイトから準惑星(1000km)までの成長過程を調査する
 2. 火星, エウロパ, エンセラドスなどの調査から, 地球外生命の直接研究が可能

探査は万能ではない → 太陽系の惑星はしょせん8個しかない. また, 地球を含む太陽系は1つ.
 > 一般性に欠ける?
 → ハビタブル天体はさらに少ない

イトカワ再探査は, Iをii-1の範疇で行う探査である.

今後20年の惑星科学のビジョンは... 小惑星や月(衝突履歴)を用いた形成論の実証



「月惑星の構造と進化の比較学」中期ビジョン

「月面年代学探査」提案 諸田 智克（名大）

＜惑星科学の目指すもの＞

惑星系の成り立ち（起源と進化）の理解 ⇒ 「月惑星の構造と進化の比較学」セクション

(1) 惑星系の構造と構造変化に関する物理過程の理解

(2) 惑星系進化の時間軸の確立 <= 本提案

生命の起源と存在可能性の解明 ⇒ 「生命に至る宇宙物質の進化学」セクション

惑星探査の特色・・・多様なターゲット（月、小惑星、火星、水星、巨大惑星系…）・観測対象・手法…

⇒ 今後の一連の探査において共通の柱となる理学目標の設定が必須

太陽系構造進化の時間履歴は小天体の軌道分布・サイズ分布、惑星表面のクレータに記録されている
今後20年に目指すべきテーマとして「**小天体を介した太陽系形成・進化の描像の検証・実証**」を提案

＜本提案の位置づけと周辺分野との相補性＞

本提案・・・惑星表面のクレータ年代から小天体の軌道進化・衝突進化の紐解き

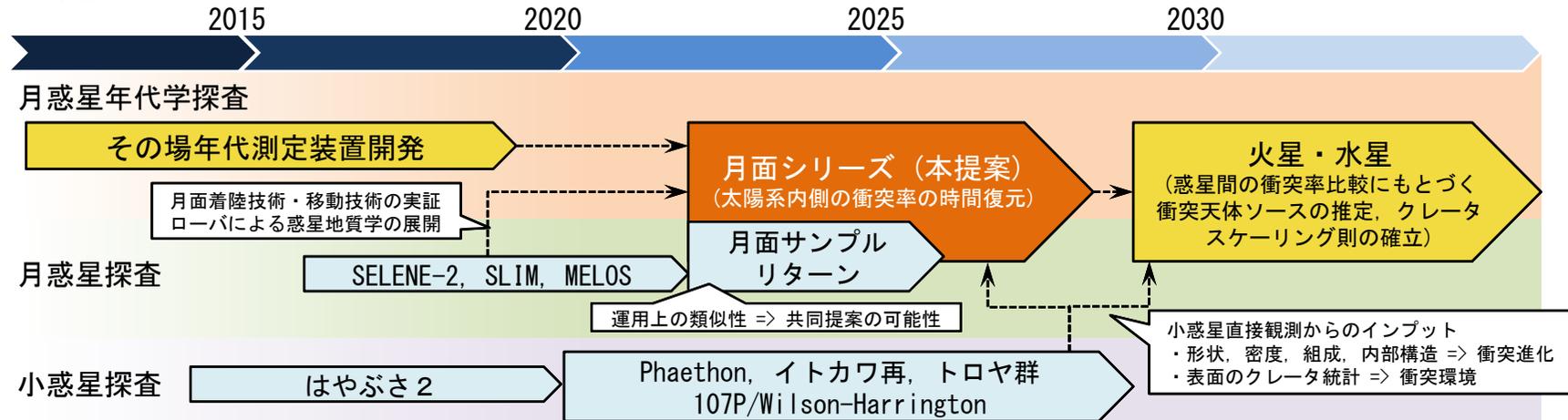
小惑星探査・・・小惑星形成・成長過程，衝突破壊進化，メインベルト衝突率の直接観測

地上観測・・・小天体の統計・軌道要素・サイズ分布（現在のスナップショット）

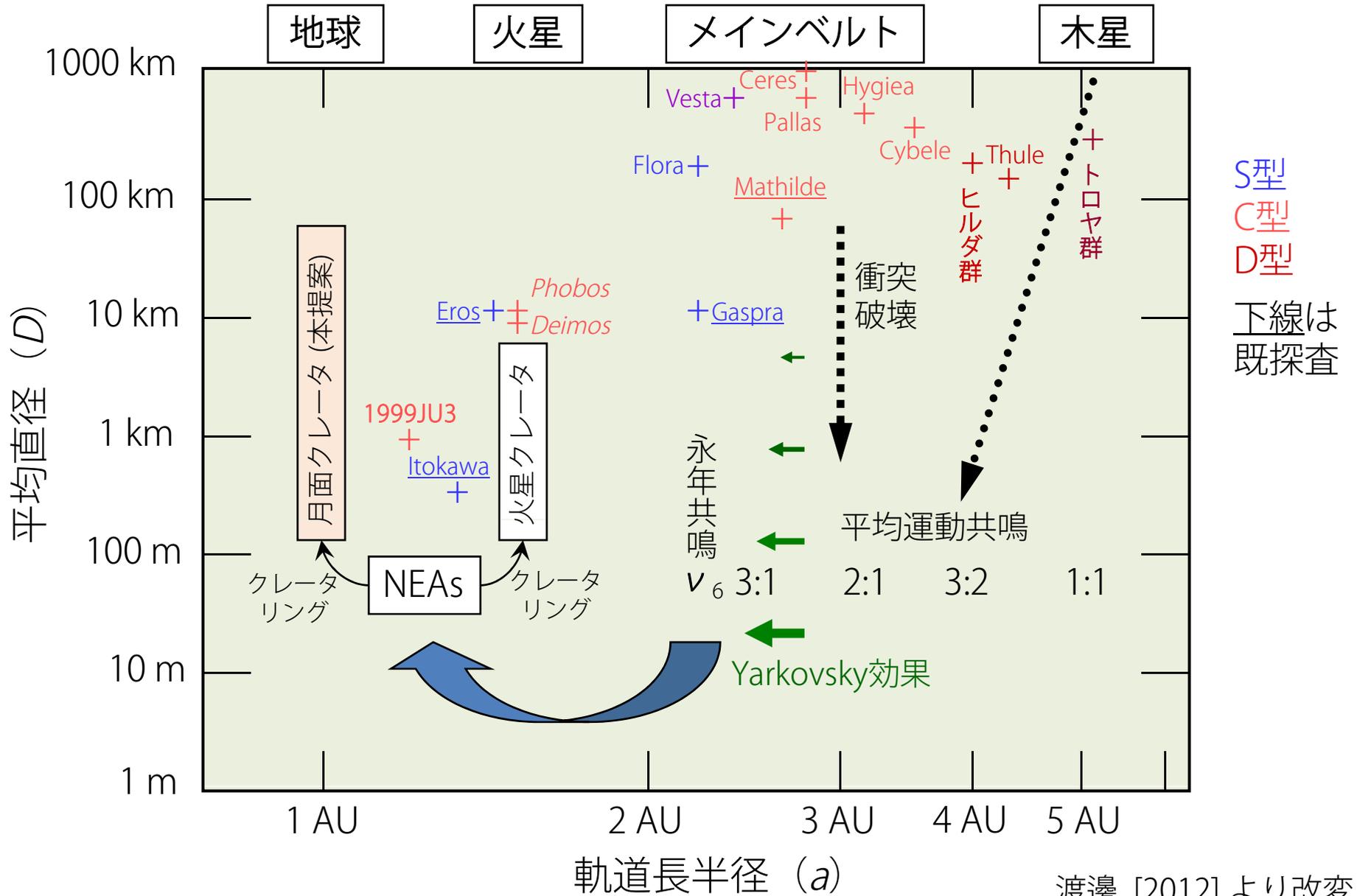
軌道力学計算・・・惑星衝突までの軌道進化 ソース，サイズごとの整理

衝突物理実験／理論・・・衝突破壊，クレータスケール則，天体スケールでの衝突物理

＜今後20年のロードマップ＞

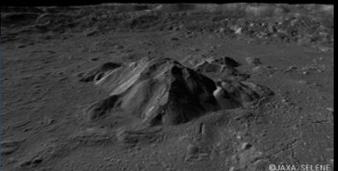
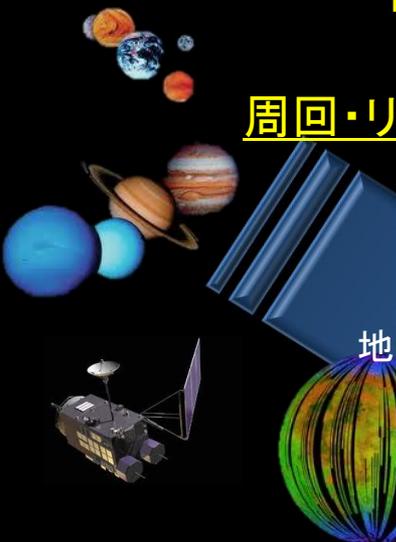


補足：「小天体を介した太陽系形成・進化の描像の検証・実証」 (メインベルトからの衝突天体供給の例)



冒険の時代から、精密探査の時代へ

周回・リモセン探査



地形(カメラ、レーザ高度計...)

今後20年間で、惑星探査は着陸探査が主役になり、Field geologistの素質が問われるようになるだろう。

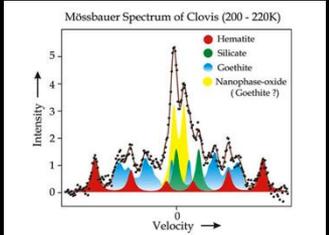
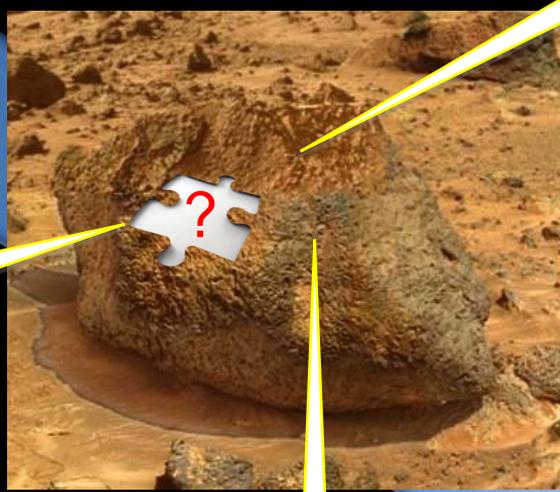
日本の独自開発で「やりたい」探査を「出来る」測器、技術力、人材

着陸・サンプル回収探査



鉱物組成(X線回折、ラマン...)

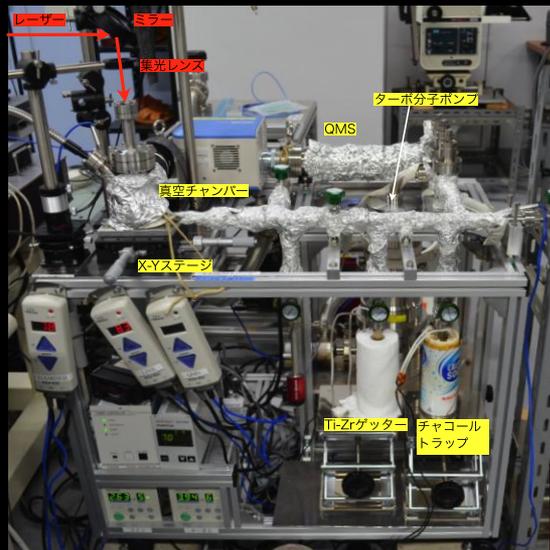
表面組成(可視・近赤・X線・γ線分光計...)



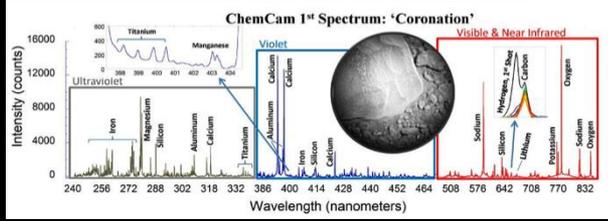
年代

着陸・サンプル回収探査の最重要パラメタでありながら未だ得られたことが無い。

元素組成(LIBS、X線蛍光法...)



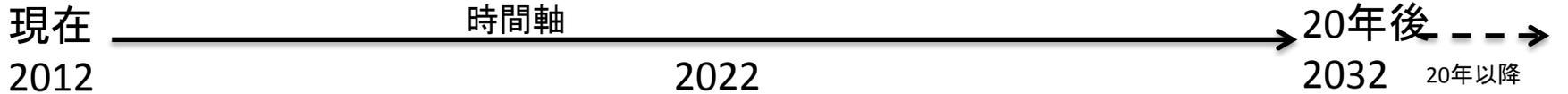
LIBS-QMS装置による年代計測 長 勇一郎, 三浦 弥生ほか (2012)



個別観測機器提案「火星生命探査機器群提案」—細胞, アミノ酸, メタン検出を目的とした—

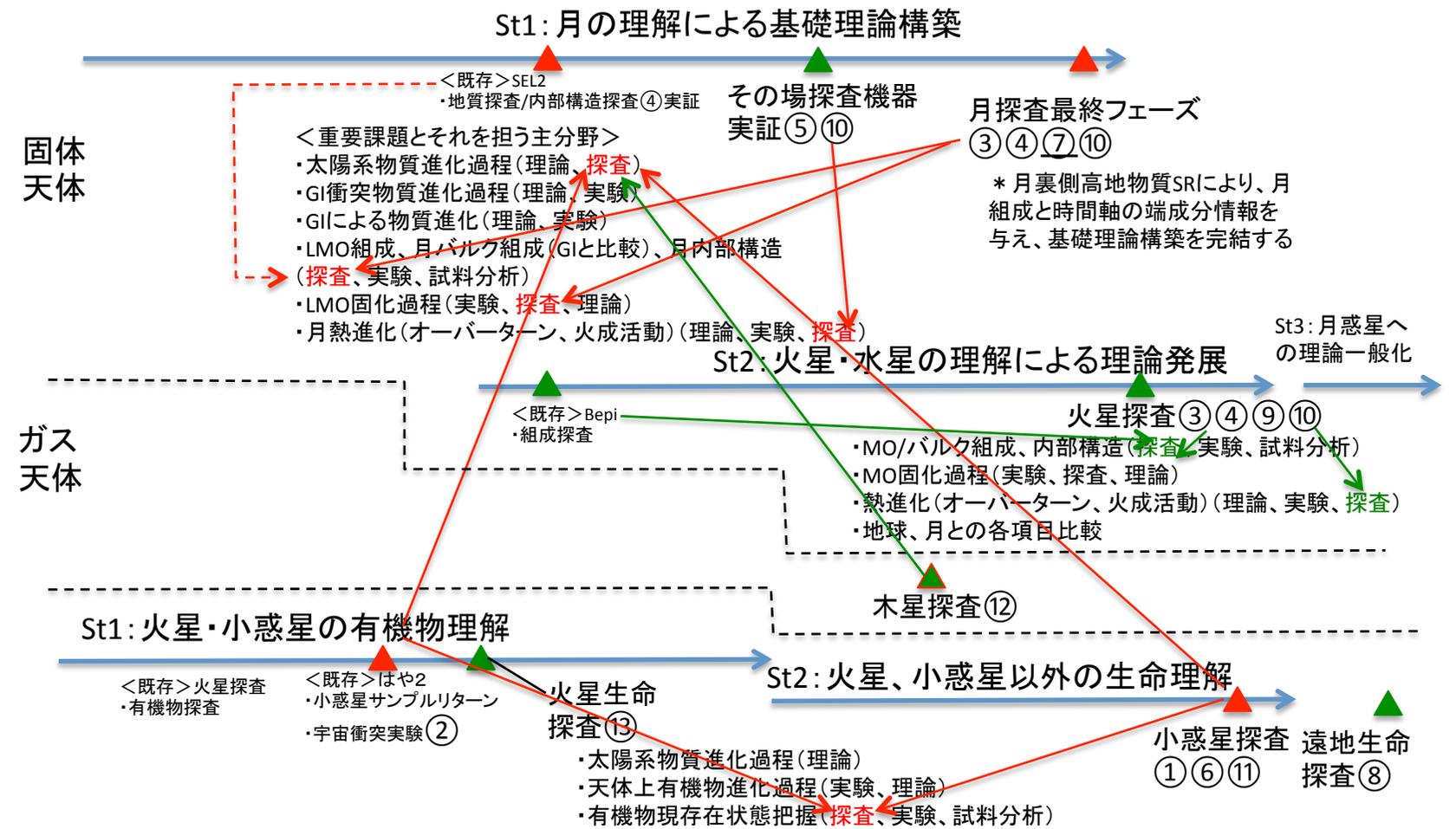
- A1)「生命に至る宇宙物質の進化学」を軸とした惑星科学の今後20年
- 生命に至る宇宙物質の進化学を研究する時、宇宙空間における惑星形成理論は先ず第一の課題である。現在進行中の系外惑星までも含めた一般的惑星形成論が誕生することが期待される。
- その理論は、惑星ごとの水その他の揮発性元素を説明できるものであることが期待される。
- 惑星形成論との関連で地球(およびその他の惑星)の初期環境が明らかになることが期待される。どのような有機物がどれだけ惑星に蓄積され得たかを知る為には惑星の初期環境が重要である。
- 生命の誕生課程およびその可能性を議論するためには、現在の生命の存在しえる惑星衛星の内部構造が重要である。現在液体の水の存在に興味集中しているが、それだけで無く何らかの地熱活動が現在もあろうのかという点が現在の生命の存在可能性を議論するために重要な情報となる。
- 惑星探査という意味では、周回機だけでなく、着陸機による探査の計画的実施が不可欠である。
- A2)「火星生命探査機器群提案」の位置付け
- 生命探査機器群は、有機物と誕生した生命を直接蛍光顕微鏡で探査し、生命を支えるメタンを探査し、有機物のなかでもアミノ酸に着目して生命誕生前のアミノ酸前駆体と生命アミノ酸を分析する。
- 火星における有機物、メタンの存在やその分布、年変動、液体の水の存在は、現在および今後進行する火星探査、地上からの観測で様々な情報が集まることが期待される。火星生命探査は生命の可能性を確定するための探査である。同時に、かりに生命が存在しないとしても探査地でのメタンと有機物の存在の情報を得ることができる。
- MSLやExoMarsでメタン同位体分析が予定されているので、本研究では「軽量高感度」メタン測定装置を開発する。
- 既存のプロジェクトWGとの関係性と他の提案との関連:
- 本提案の内、蛍光顕微鏡を用いた探査はMELOS1火星探査着陸機で実施する計画候補の一つである。
- 火星における内部構造探査や表層探査は現在および過去の火星を知る上で不可欠であり、同時実施が可能な計画である。
- 蛍光顕微鏡観察、メタン測定、アミノ酸分析は火星に限らず、生命や有機物の存在する可能性のあるすべての天体で有効な探査手段と言える。したがって、それらの天体探査との組み合わせが可能である。

今後20年間の惑星科学の中期ビジョン by 大竹真紀子



月惑星の構造と進化の比較学

生命に至る宇宙物質の進化学



番号と提案の対応

- ①小惑星Phaethon探査提案 荒井朋子
- ②イトカワ再探査による宇宙衝突実験 荒川政彦
- ③超高感度広帯域地震計による惑星内部モニター 新谷昌人
- ④月・惑星着陸探査用元素分析装置:レーザー誘起絶対線破壊分光装置(LIBS) 石橋高
- ⑤月面年代学シリーズ探査 諸田智克
- ⑥Solar Sail 探査機による惑星間塵の光学およびその場観測とトロヤ群小惑星ランデブー 中村良介
- ⑦月裏側高地物質サンプルリターン 大竹真紀子
- ⑧土星衛星エンセラダスのプルーム物質の化学・生命探査 関根康人
- ⑨火星ベネトラータによる表層環境と内部構造探査 白石浩章
- ⑩K-Ar 法を用いた月・火星着陸探査用その場年代計測装置 杉田精司
- ⑪"107P/Wilson-Harrington"サンプルリターン計画 橋省吾
- ⑫木星及び土星における雷放電発光観測機器OLD (Optical Lightning Detector)の提案 高橋幸弘
- ⑬火星生命探査機器群提案 山岸明彦

注釈: ▲は探査実施(赤三角は日本の探査、緑は海外とのコラボで実施)

○で囲まれた番号は各提案の実施タイミングを示す

各→は各探査により重要課題のどの部分を明らかとするのかを示す

GI:ジャイアントインパクト

LMO:月マグマオーシャン

(a1) 今後20年間の惑星科学の中期ビジョンを描く

(a2) その中で、自分たちの提案の位置づけを明らかにする

(b1) 惑星「探査」だけの中期ビジョンではなく、惑星「科学」を見渡したビジョンとする

(b2) 「月惑星の構造と進化の比較学」、「生命に至る宇宙物質の進化学」という大テーマを軸として整理

(b3) 自分たちの提案だけでなく、他の提案も含めて考える

(b4) 既存のプロジェクト~WGIによる探査計画が前提となっている提案は、その関係性も明示

この国の惑星科学・探査の中期 (今後20年) ビジョン “地球を知る、太陽系を知る” (関根)

なぜ地球は地球なのか？

なぜ太陽系は太陽系なのか？

という問いに実証的に答える

地球科学と系外惑星学をつなぐ太陽系固体惑星、次世代地球システム学の宇宙への拡張による

生命を育む惑星システムの理解

地球内部表層生命共進化の理解を他の惑星へ拡張

地球システム学の新時代

超高压実験, 大型計算, 素粒子トモグラフィーによる地球内部の理解

内部-表層連結 次世代地球シミュレータ

高輝度ビームライン, 精密分析による地球表層変動解析

惑星形成論、円盤観測の飛躍

次世代望遠鏡観測 (ALMA, TMT, SPICA) 理論モデルとの融合

多様な惑星系円盤の物理・化学情報

探査計画 LRO, MRO InSight

探査計画 MSL, JUICE, ExoMars, Mars sample return

多様な惑星系円盤と系外惑星を結ぶ、(地球型)惑星形成理論の発展

系外惑星スペクトル観測の始動

系外惑星キャラクタリゼーション 地球型惑星、スーパー地球の大気観測 (TMT, TRF)

宇宙物質科学と惑星形成理論、観測天文学の融合による

数多の惑星系の中での太陽系の普遍性の実証的レベルでの理解

原始太陽系円盤の物理・化学情報

多くの惑星系円盤中での原始太陽系の特徴を探る

始原小天体・氷衛星探査

⇒ 原始太陽系の温度構造 (氷線) 円盤物質混合、変成過程の制約

(ガス・氷惑星プローブ探査)

探査計画: Rosetta, Dawn, JUICE, OSIRIS, MarcoPolo, Hayabusa-2

生命には至らない宇宙物質テーマ軸 (青色系)

月惑星の内部進化と表層進化の連結を可能にする基礎データ取得

月 火星 氷衛星の内部表面物質探査

⇒ 月・火星トモグラフィー、内部ダイナミクス マグマオーシャン熱史、地質活動と表面年代

火星 氷衛星の環境進化・生命探査

⇒ 表層環境進化、ハビタビリティの理解 内部進化との因果関係

大気散逸・惑星気象探査

地球型惑星進化の一般化⇔系外惑星表層環境の推定

生命に至る固体惑星テーマ軸 (赤色系)

今後20年の動向と戦略 (インフラ: 次世代連結シミュレータ, 高輝度ビームライン, ExoMars, Mars sample return, ALMA, TMT, SPICA, TPF...)

固体惑星軸 地球科学: 地球内部と表層環境生命史をリンクできる環境が整備される ⇔ 探査計画: 火星表層探査から生命探査へ手薄でやるべき ⇒ 中期 (2020's): 火星内部探査、火星トモグラフィー(月で練習可) → 地球科学の潤沢なリソースと欧米の生命探査を利用し、火星内部と表層生命進化を結び付け全容を理解、さらには地球型惑星進化の一般化と系外地球型惑星への展開

宇宙物質軸 惑星形成: 多様な円盤の高解像観測, 高精度モデル化 ⇔ 探査計画: 原始太陽系小惑星帯、木星領域の物理化学条件制約競争激しいがやるべき ⇒ 原始太陽系遠方の条件制約 (中期(2020's): active asteroid/D型、長期 (2030's): トロヤ群/エンセラ) → 探査点を線にする原始太陽系モデルと観測との比較による太陽系の普遍性理解、物質科学を含む形成論とハビタブル惑星予測

我が国の惑星科学・探査の中期ビジョン (荒井朋子)

大目標：隕石・月試料研究と地上天文観測に基づく従来の惑星科学パラダイムからの脱却。

- (1) 月の内部探査により、月全球（バルク）を正しく理解する。
- (2) シリーズ化小惑星探査により、太陽系の小天体物質を正しく理解し（始原度・分化度・不均質など）、太陽系固体天体の材料物質を解明する。

大型探査 (>¥100億)

- 10年に1回を目標
- 複合型探査計画（周回機・着陸機・走行車・サンプルリターン・有人探査(?)）

月探査

- かぐや成果からの更なる発展
- 全球内部構造探査
- 特定地点の物理・地質探査
- 着陸・滞在・往還技術獲得

火星探査

- 月探査で獲得した科学技術の継承・発展
- 特定地点の物理・地質探査

中型探査 (<¥100億)

- 5年に一回を目標
- 往還探査（周回機・着陸機・衝突+サンプルリターン）

シリーズ化小惑星探査I

- はやぶさ成果の継承と発展
- 相対速度小の未探査型天体（D, M, A等）からサンプルリターン
- NEA, メインベルト

小惑星探査I

小惑星探査I

小型探査 (<¥10億)

- 2-3年に一回を目標
- 片道探査（フライバイ・ランデブー）

シリーズ化小惑星探査II

- サンプルリターン難の相対速度大のNEA重要天体探査
- 活動小惑星（**Phaethon**等）
- 流星母天体、彗星

小惑星探査II

小惑星探査II

小惑星探査II

超小型探査 (<¥1億)

- 1-2年に一回を目標
- 地球周回での観測・サンプルリターン

地球圏からの探査

- 地球周回衛星・航空機・ISSを利用した宇宙塵の観測・サンプルリターン

地球圏探査

地球圏探査

地球圏探査

地球圏探査