



2013年1月8日
宇宙科学シンポジウム



© Akihiko Ikeshita

A. Ikeshita

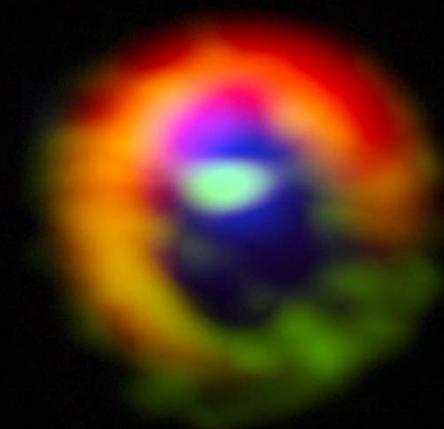
小惑星探査と惑星科学

渡邊 誠一郎

名古屋大学

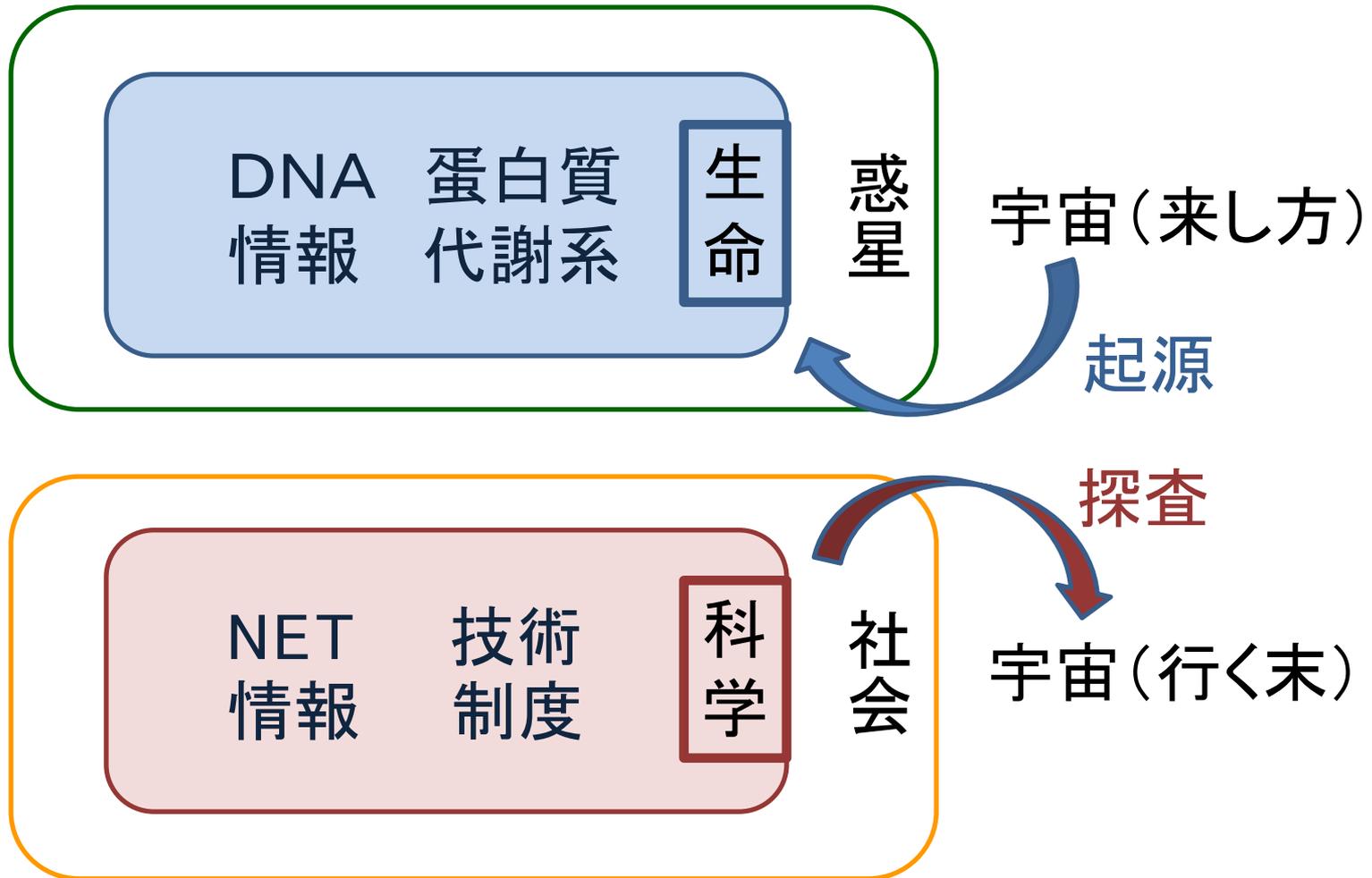
JAXA宇宙科学研究所(客員)

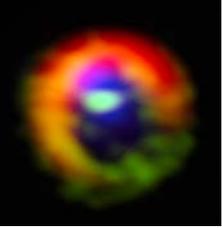
はやぶさ2プロジェクト



© ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), S. Casassus et al.

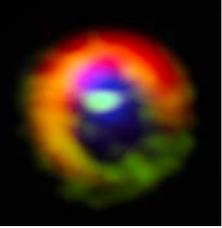
宇宙と生命と科学





宇宙科学をつなぐ惑星科学

- 惑星科学：宇宙進化 ← 接続 → 生命進化
 1. 惑星形成領域の観測：比較惑星系形成論
 - 電波からX線まで, HST, ALMA, TMT, JWST, SPICA
 2. 系外惑星の観測：惑星の多様な姿：astrobiology
 - トランジット観測: COROT, Kepler; *Plato*:, TESS
 - 干渉計: TPF ×, Darwin ×; EChO, JTPF
 - 重力マイクロレンズ監視: WFIRST
 3. 太陽系探査：微惑星 → 惑星系 → 惑星進化
 - 工学との強い連携が必須：多様な手段・機器



惑星探査の“3大”テーマ

- 地球という惑星の生い立ちと特質を知ること
 - 可能態としての地球：生命の惑星
- 1. 太陽系考古学
 - 惑星形成／地球への物質供給／年代記
- 2. 前生命進化論
 - 非生命と生命の間の断絶を復原する
- 3. 比較内部構造論
 - Surface から Insight へ
- そのための戦略的な**技術開発・機器開発**



はやぶさ2のテーマ

- 「小惑星からの惑星科学」を追求
 - 多くの分野への橋渡し
- 1. **太陽系考古学** **雪線の記憶**
 - 岩と氷の混合の場 / 地球への物質供給の物証
- 2. **前生命進化論** **地球近傍小惑星 (NEA)**
 - 天体上の鉱物-水-有機物相互作用 → 複雑化
- 3. **比較内部構造論** **C型始原小惑星**
 - 微惑星アナログの構造 / 衝突特性 **微小重力瓦礫天体**
- 観測結果に応じた**運用のダイナミックな切り替え**

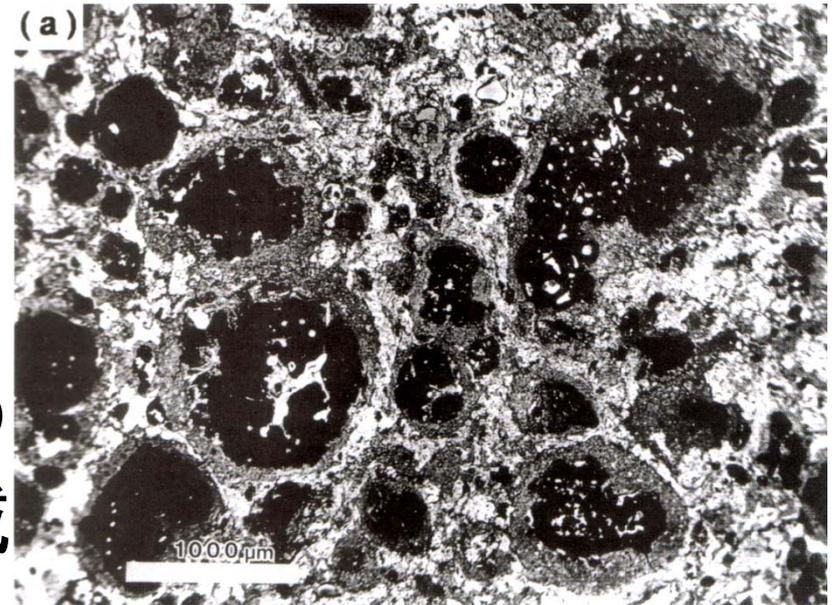




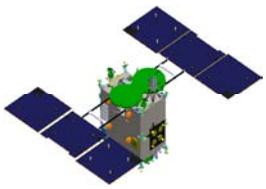
始原天体：非平衡状態の保持

- はやぶさ粒子は**熱平衡**コンドライト(LL6)
- はやぶさ2は**非平衡粒子**を持ち帰ると期待
- 個々の粒子が異なる
元素組成を持ち、
異なる歴史を記憶
している...
- リモートセンシングでの
着地点選定，産状記載
が重要

CM(マーチソン)隕石



個々のコンドリュール，CAI，マトリックス粒子の形成年代が異なる



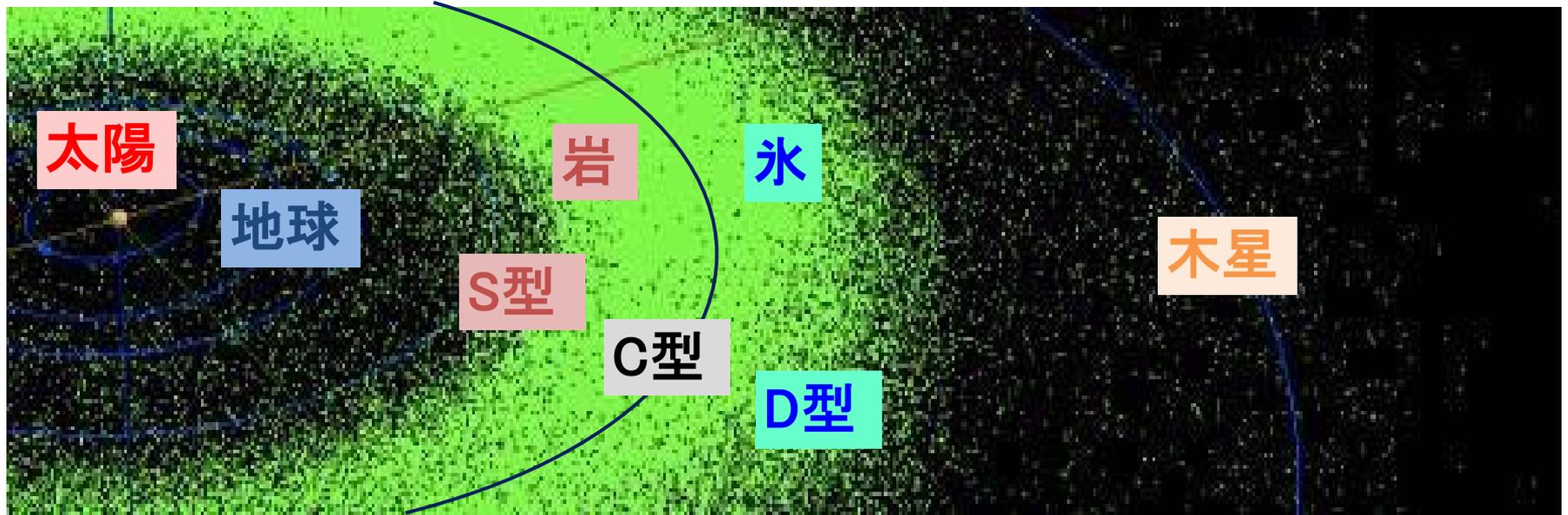
太陽系考古学

岩と氷の狭間で

雪線付近：急激な物質勾配 \longleftrightarrow 移動に敏感

1つの始原天体の不均質性の度合いから
太陽系初期の物質移動の復原

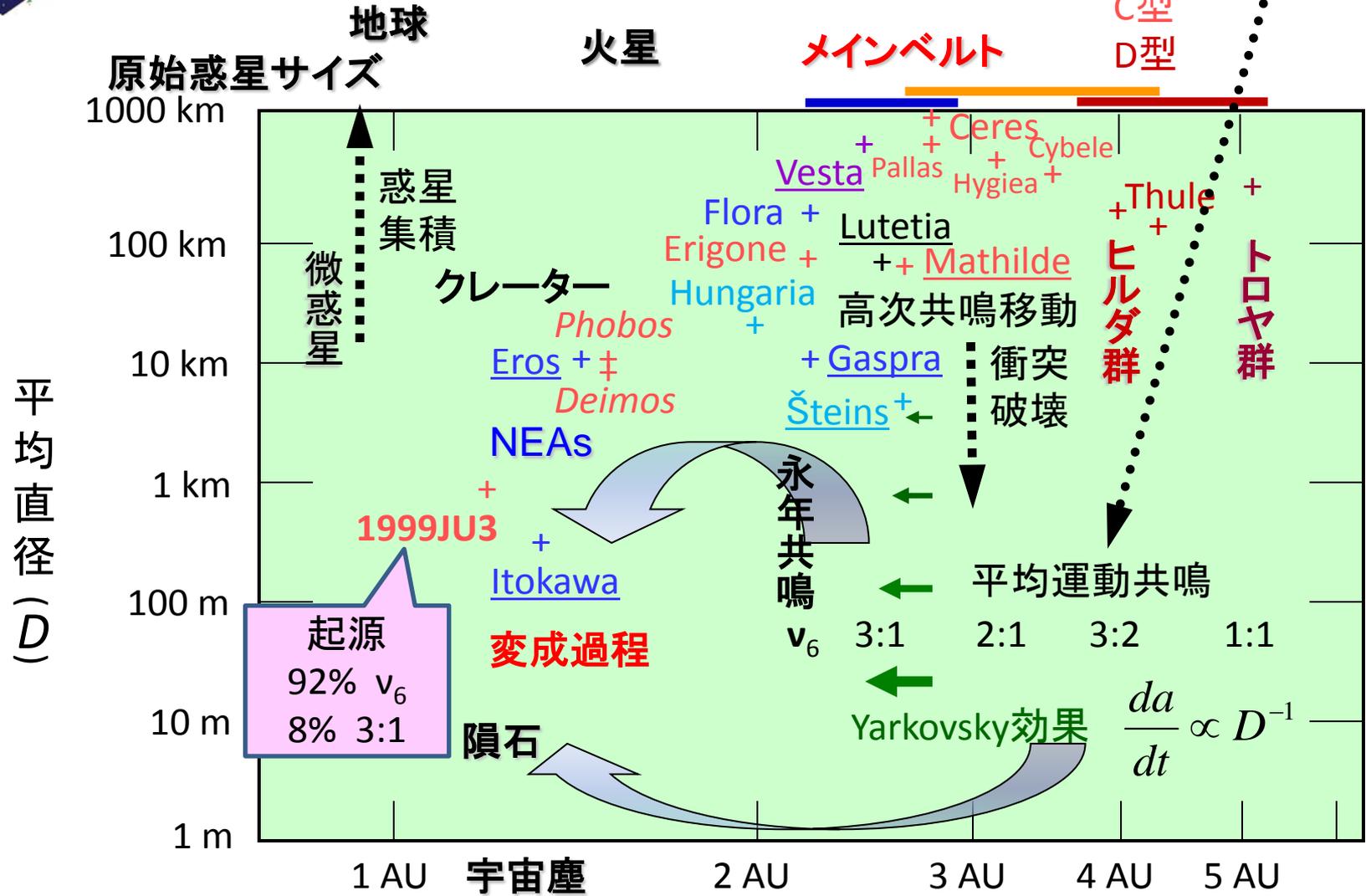
雪線



小惑星メインベルト

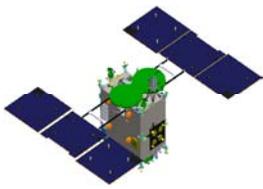


地球への物質供給システム



地球への物質供給を読み解くため、この供給システムの理解が不可欠

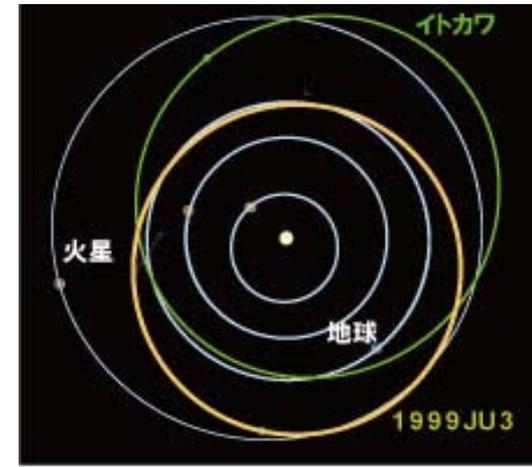
軌道長半径 (a) ~60万個 軌道確定 下線は 既探査



探査対象天体の故郷

(162173) 1999 JU₃

- **C型**地球近傍小惑星 (**希有**) $H_V = 18.8$
- 直径0.9 km (ほぼ球形) $P_V = 0.07$
- 水和鉱物や有機物を含むと期待される
- 小惑星帯内側: ν_6 共鳴により地球領域へ
- **Erigone族のメンバーの可能性**

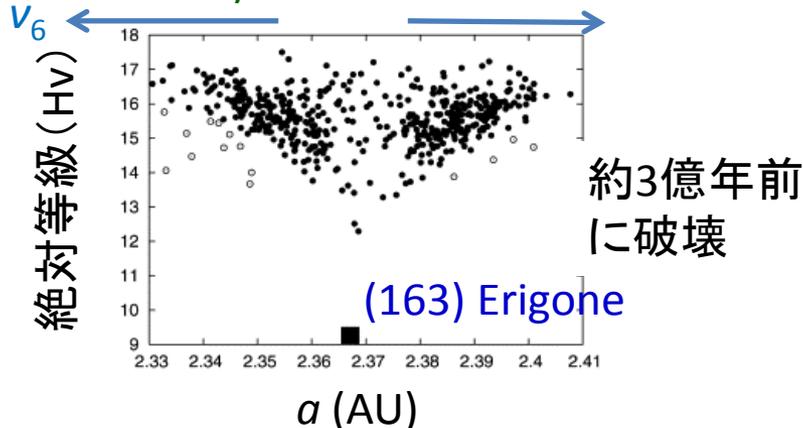


$a = 1.19$ AU, $T = 1.30$ yr
 $e = 0.19$, $i = 5.88^\circ$

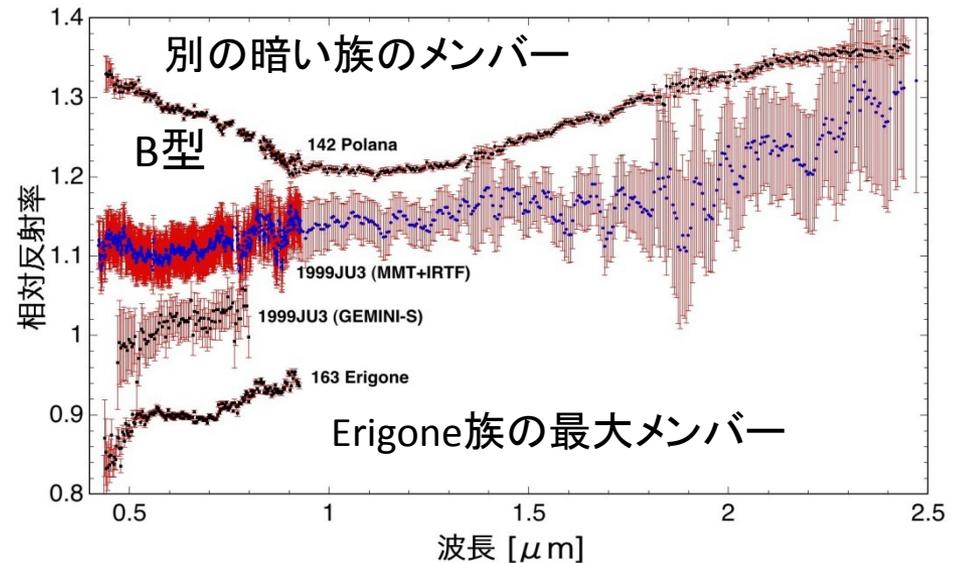
自転周期: 7.63時間 (TDに好適)

Erigone族の位置と明るさ

Yarkovsky 効果による拡散



Vokrouhlický+ (2006)



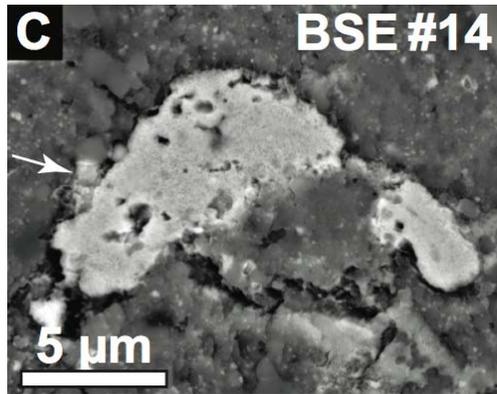
Data : Viras (2008), Sugita+ (2012), Abe+ (2008)

前生命進化論：**鉱物**-**水**-**有機物**相互作用

- ・太陽系形成以前の低温環境を記憶
- ・小惑星上での**鉱物**-**水**-**有機物**相互作用

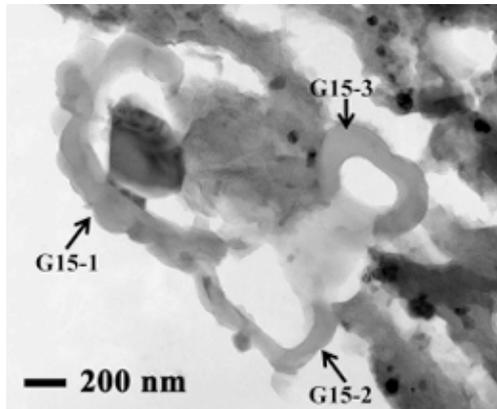
(**鉱物**: 場を提供, **水**: 反応を促進,
有機物: 多様化→生命材料物質)

太陽系最古の水質変成



Sakamoto+ (2007)

ナノスケール膜状有機物



Nakamura-Messenger+. (2006)

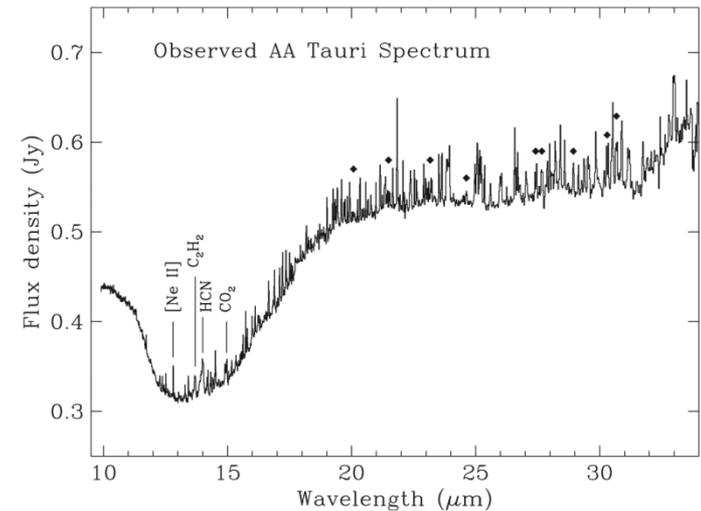
イソバリン(アミノ酸)左手過剰

隕石		Lee (%)
Orgueil	C1	15.2
Murchison	CM2	18.5
		15.2
LEW90500	CM2	3.3
LON94102	C2	2.4
QUE99177	CR2	0.3
EET92042	CR2	-1.0

↑ 水質変成プロセスの程度

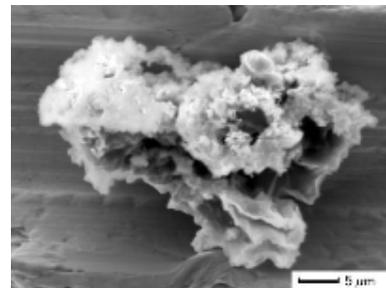
Glavin & Dworkin (2009); Glavin+ (2011)

原始惑星系円盤中の有機分子



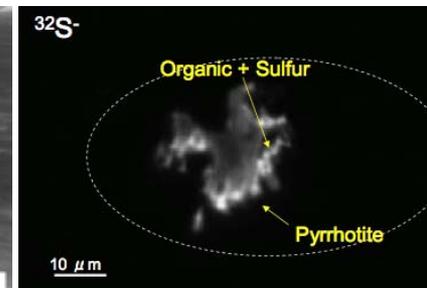
Carr & Najita (2008)

超炭素質微隕石

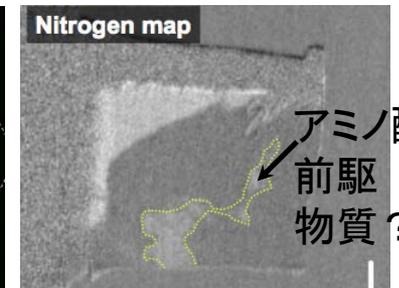


Yabuta+ (2012)

硫化物と有機物中のS



窒素含有有機物



地球外有機物の非破壊元素分析法

 μ -EDS (ミュオン-エネルギー分散X線分光法)

従来の特性X線を用いた元素分析

軽元素 (C, O, N) は特性X線エネルギーが小さく (<1 keV), 高精度分析に不向き

他元素についても、試料の表面付近のみ組成分析に限られる (試料内部からの特性X線が試料自身に再吸収される)

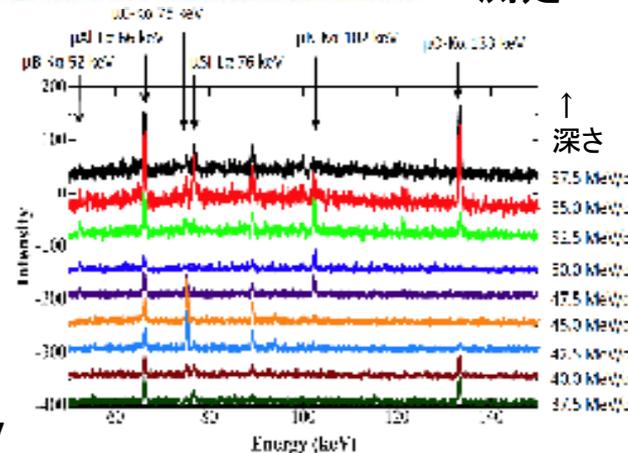
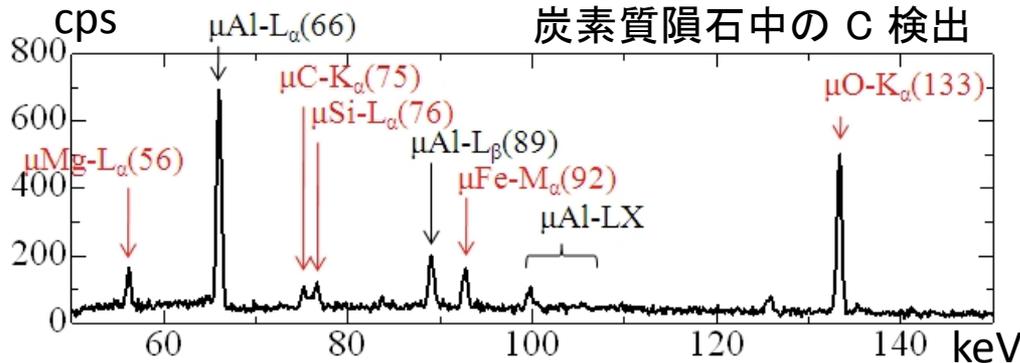
ミュオン捕獲特性X線を用いた非破壊元素分析

- 電子遷移の特性X線に比べて, 約200倍のエネルギー
- mm サイズの試料中の軽元素 (特に炭素, 窒素) の非破壊分析が可能 → 地球外有機物の非破壊探索
- J-PARC物質・生命科学実験施設 (世界最高のパルスミュオン強度) での開発

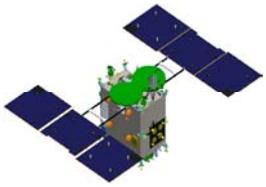


チャンバー内試料に写真右側からミュオンビームを照射. ミュオン捕獲特性X線はゲルマニウム検出器で測定

Terada *et al.* (2012)



深さ方向分析. 5mm深からの特性X線の検出にも成功



比較内部構造論：微惑星アナログ

サイエンス目標

- 人工クレーターでのサンプル採取とリモセン観測により、ダイナミックに変動する小惑星の表層構造を知る

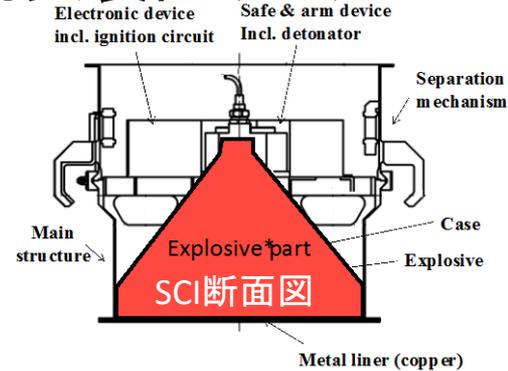
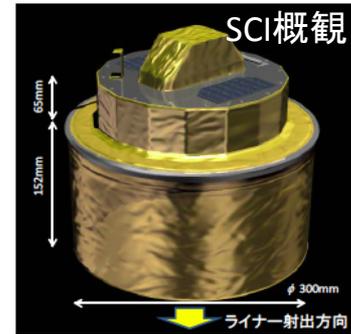


- 小惑星上での宇宙衝突実験により、微小天体の衝突過程を明らかにし、クレーター形成の物理モデルを構築。

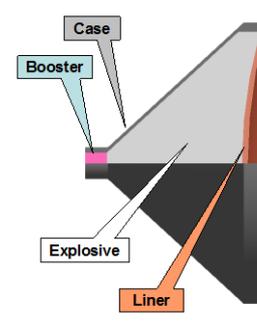


分離カメラ
DCAM3

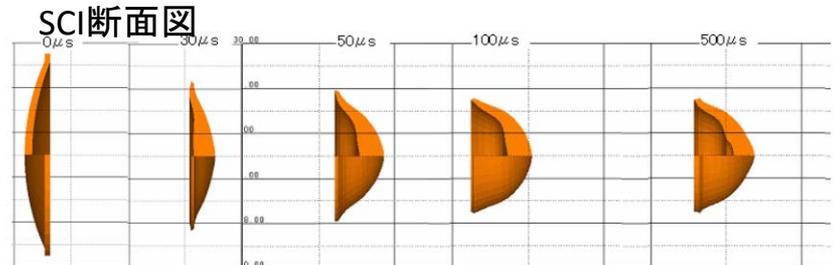
小型搭載型衝突装置 (SCI)



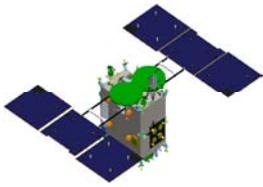
爆薬により円盤 (Liner) を半球殻に成形して加速



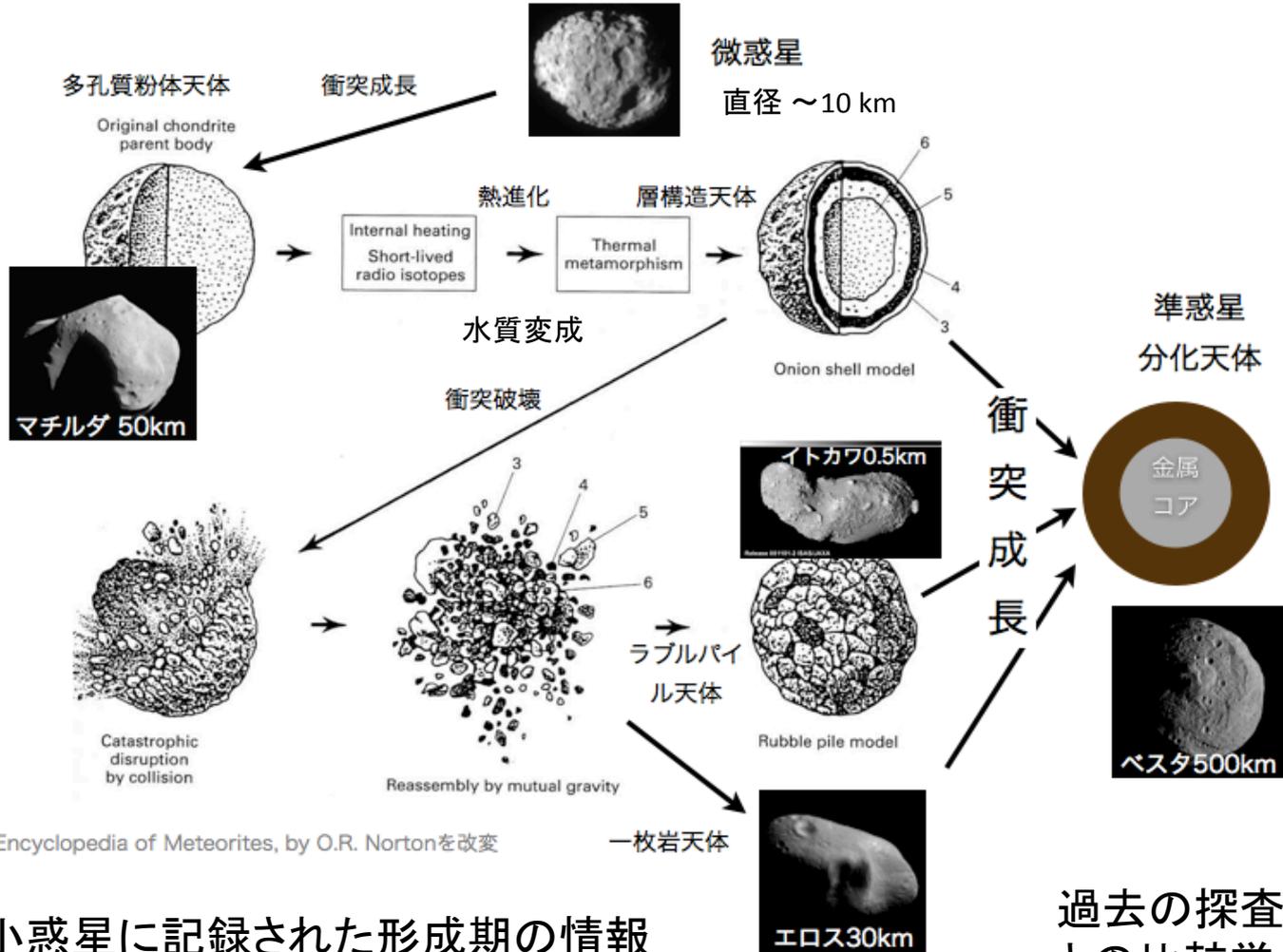
質量：2kg
円盤サイズ：Φ300mm
成形後：Φ150mm
材質：銅
速度：2km/s程度



SCI成形の様子：数値計算



惑星の衝突破壊・合体と物質変成の解明

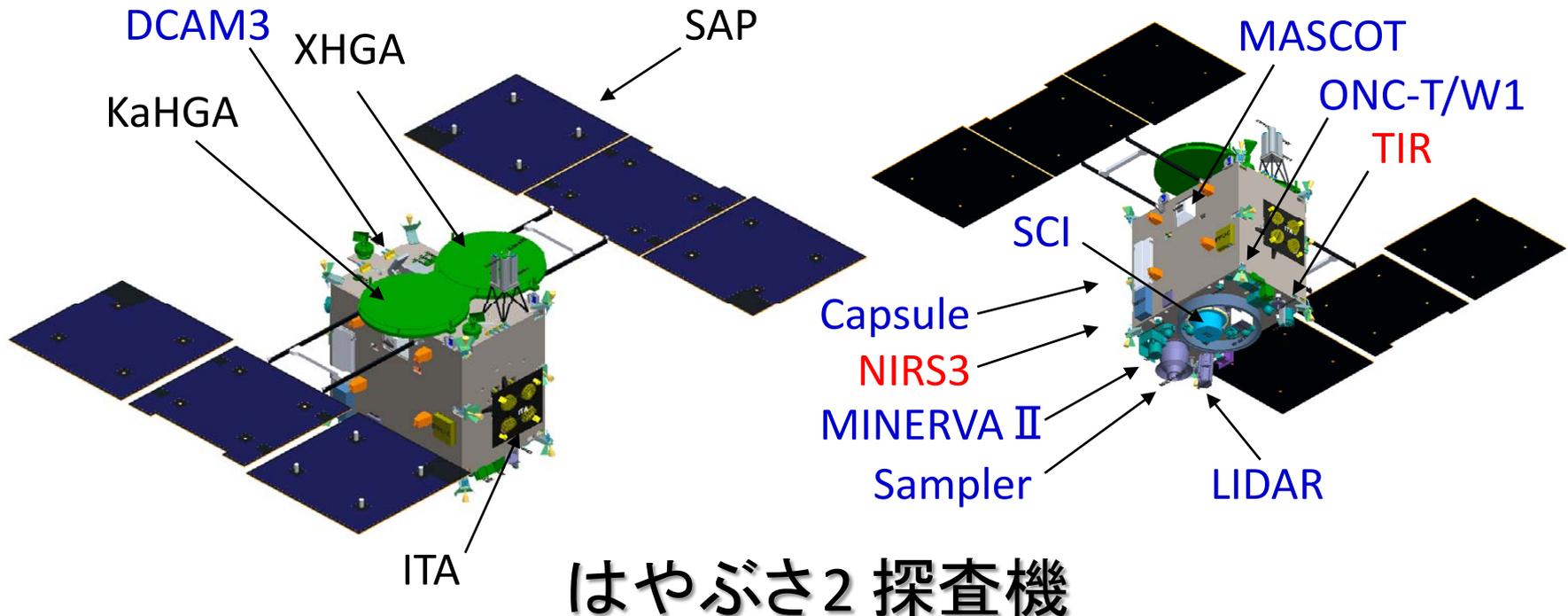


小惑星に記録された形成期の情報

過去の探査天体との比較学

はやぶさ2搭載科学機器

- 可視マルチバンドカメラ(ONC)
- レーザ高度計(LIDAR)
- 近赤外分光計(NIRS3)
- 中間赤外線カメラ(TIR)
- サンプラ+再突入カプセル
- 小型搭載型衝突装置(SCI)
- 分離カメラ(DCAM3)
- 小型ランダ(MASCOT)
- 小型ローバ(MINERVA II)



はやぶさ2 探査機



ミッション・シナリオ

探査の分岐的・複線的シナリオ

- 1999 JU₃ の自転軸, 表面地形/状態が不確定
 - タッチダウン可能な時期/領域, 燃料消費量
- さまざまな制約/トラブルのリスク
- ミッション・シナリオ = 運用シナリオ・オプションの総体
- 「その場」観測結果を踏まえて, リアルタイムにダイナミックに運用オプションを切り替える
 - サイエンス成果を最大にする自在な運用
- タッチダウン点の選定: 理学要求 vs 工学制約

日本が先鞭をつけた 小惑星サンプルリターン

FB: Fly-by () は彗星

RV: Rendezvous

SR: Sample return

2003年

2014年

2016年

2020年

JAXA:

FB: 0 (2)

RV: 1 (0)

SR: 1 (0)



はやぶさ
(イトカワ: S型)

彗星SR
の問題
点



はやぶさ2
(1999 JU₃: C型: 既探査はFly-byの1つのみ)

「はやぶさ」の成果は
Science誌で2回の特集号。
過去20年間で、複数回特集
された惑星探査は5つのみ。
他4つは米国が関わるもの。

NASA:

FB: 6 (6)

RV: 2 (0)

SR: 0 (1)

StarDust

04年ヴィルト2彗星
2006年帰還

OSIRIS-REx

(1999 RQ₃₆: B型)
2016年打上げ予定



ドリリングサンプ
リングを予定。

Credit: NASA/Goddard/University of Arizona

ESA:

FB: 3 (2)

RV: 0 (0)

SR: 0 (0)

「はやぶさ」までの小惑星
探査はフライバイが中心。
唯一の例外はNASAの
NEARシューメーカー探査
機によるS型小惑星エロス
へのランデブー・着陸

Marco Polo-R
構想段階

(2008 EV₅: C型)





惑星探査の“3大”テーマ

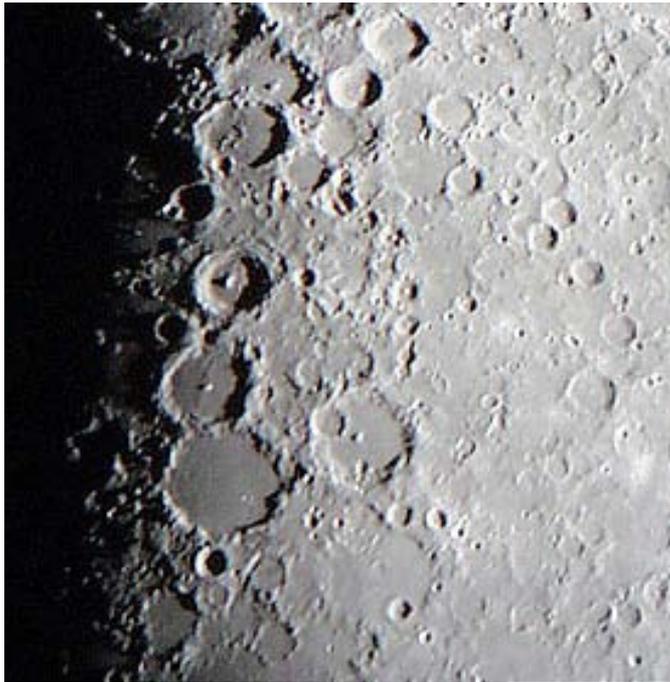
- 地球という惑星の生い立ちと特質を知ること
 - 可能態としての地球：生命の惑星
- 1. 太陽系考古学 次期小惑星探査
 - 惑星形成／地球への物質供給／年代記
- 2. 前生命進化論 JUICE, 火星, Enceladus
 - 非生命と生命の間の断絶を復原する
- 3. 比較内部構造論 月探査, ペネトレータ
 - Surface から Insight へ
- そのための戦略的な技術開発・機器開発



クレーター一年代学

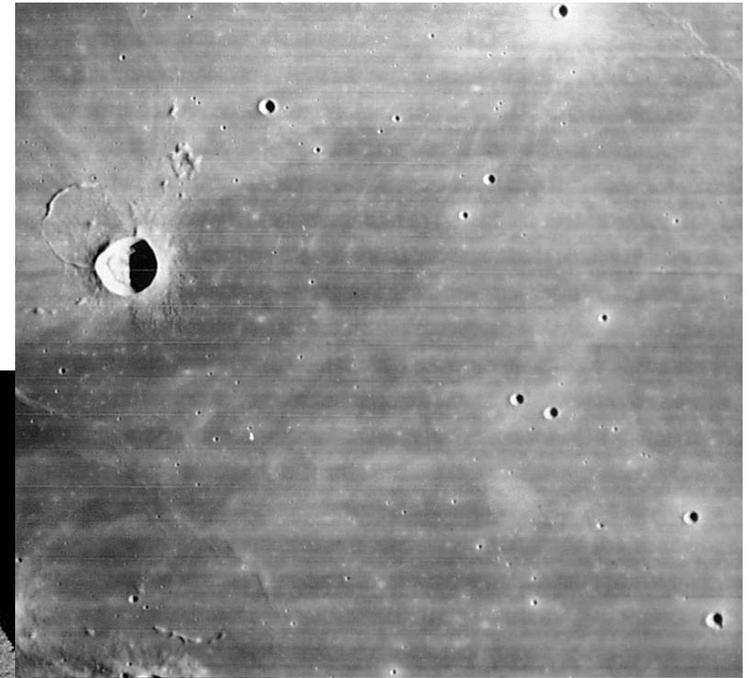
地球への物質輸送の記録

月の高地

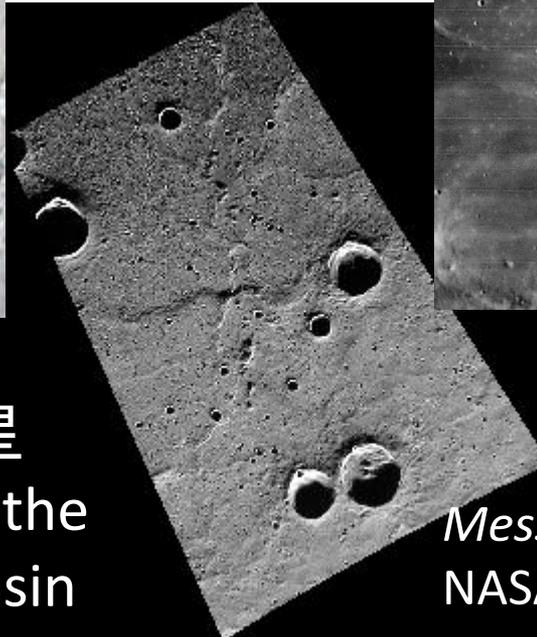


天体進化
+
太陽系進化

月の海



水星
Goethe
basin



Messenger
NASA

内部構造探査
との結合が
重要



惑星探査を総合する1つの視点

太陽系考古学

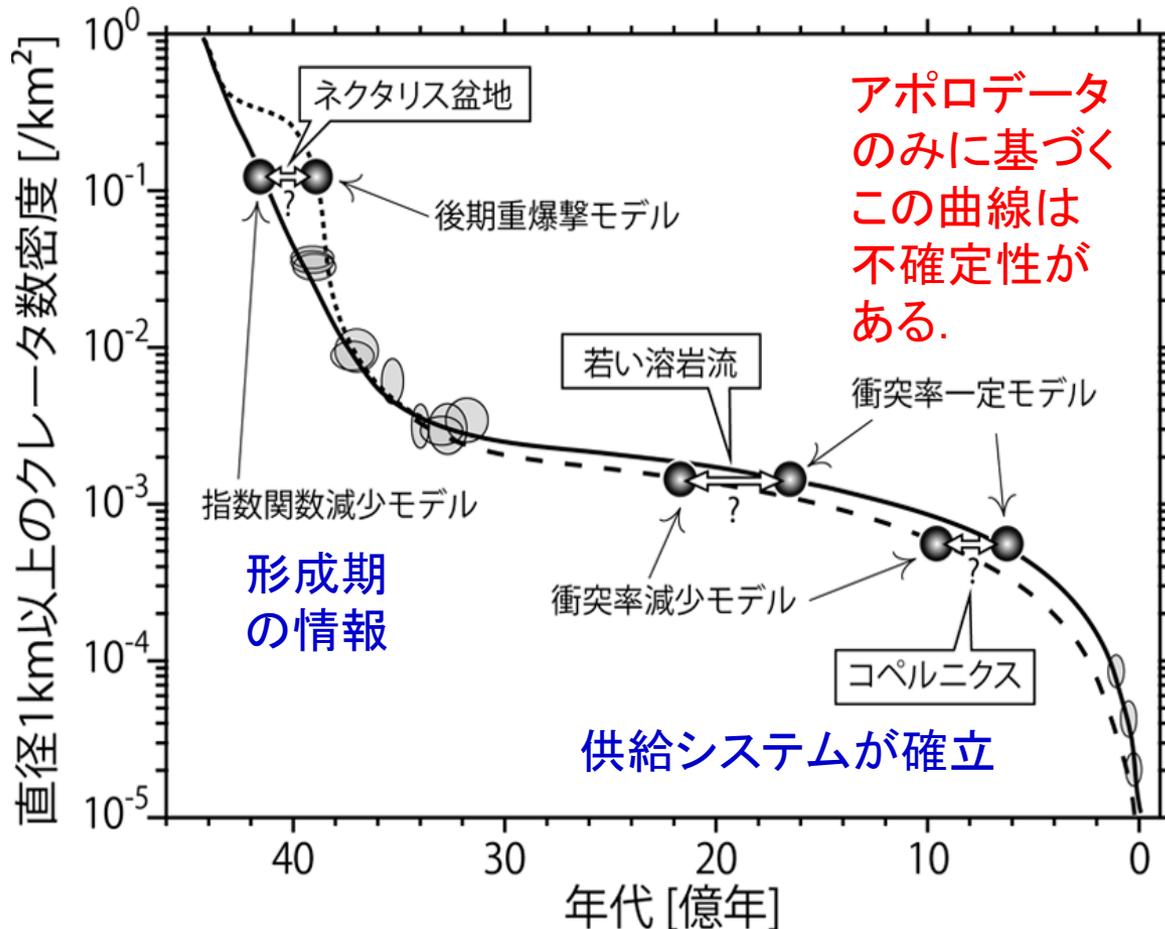
土器編年

→ ^{14}C 年代

- 絶対年代測定に裏打ちされたクレーター年代
 - メインベルト小惑星探査: ソース領域の情報
 - 地球接近小惑星探査: 年代学, 衝突過程, 分類
 - 月探査(着陸, S&R): クレーター年代
 - 地球型惑星探査: クレーター年代
 - 衝突の物理(室内実験スケーリング, 宇宙実験場)
 - 絶対年代測定法
 - サンプルリターン: サンプリングの指針
 - その場測定: LIBS: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
- 小惑星集積率の時間変化の実証
- 太陽系初期進化(ガス惑星形成/集積最終過程)の解明

月への天体衝突頻度の時間変化

小惑星帯からの破片天体供給によって、月面にクレーターが形成されるため、月探査により表面年代が分かれば、供給率が復原できる。またクレーターがイベントを記録しているはず。



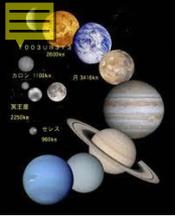
前生命進化を探查

生命に汚染され尽くした地球ではダメ！

- 生命前駆物質の進化：**彗星，始原小惑星**
 - 有機物の様態，水の関与した変成，キラリティ
- 前生命的天体表層環境・物質循環
 - 火星：温暖期の液体の水の痕跡，*生命衰亡過程*
メタンの不均質分布検出：メタン酸化鉄還元細菌
 - Titan：N₂-CH₄大気・C₂H₆-CH₄湖：化学進化の実験場
 - 氷衛星：内部海，熱水活動，

酸化力の担い手は？ $\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{UV, CR}} \text{H}_2\text{O}_2, \text{O}_2$

カンラン岩 $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
の水質変成



氷衛星の内部海

木星の衛星：エウロパとガニメデ *JUICE* に向けて

Conamara Chaos “Great Lake”

エウロパ



NASA/JPL/Ted Stryk



NASA/JPL/University of Arizona 70 × 30 (km)

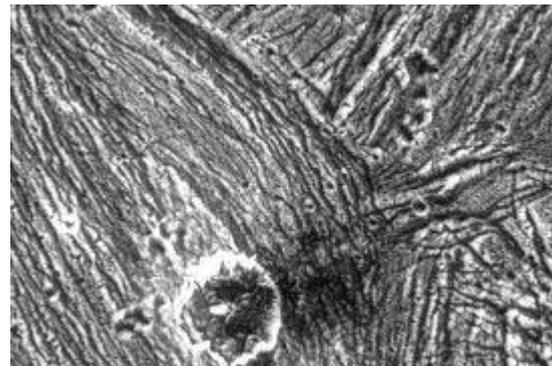
Galileo

ガニメデ



NASA

系外氷惑星
につながる



NASA



Enceladus: 水蒸気の間欠泉

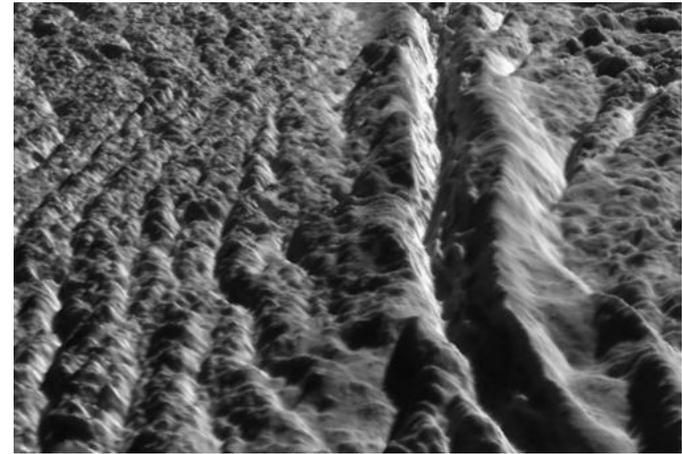
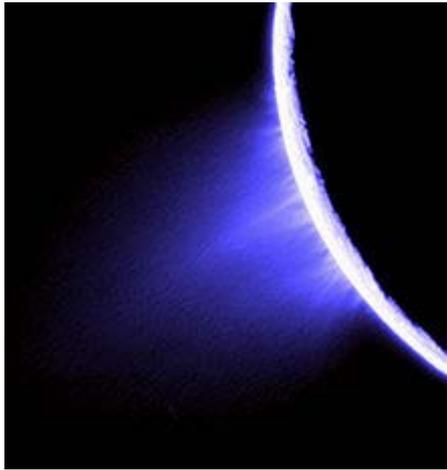
土星の内側から2番目の衛星

Cassini

cold geyser

Tiger Strips

Damascus Sulcus



NASA/JPL/SSI

Cassini Imaging Team, SSI/JPL/ESA/NASA

NASA/JPL/SSI/USRS/LPI 幅 5 km

直径: 約500 km 表面 T : 最高 180 K, 平均 75 K Bondアルベド 0.99

水蒸気 91%, N_2 4%, CO_2 3.2%, CH_4 1.6%, NH_3 , C_3H_8 , C_2H_2 ,
ダスト放出 → Eリング

Matson *et al.* 2007 *Icarus* **187**: 569

間欠泉から内部情報放出
S&Rに好適



内部構造探査

日本独自の内部構造探査技術

- 宇宙科学コミュニティへの認定試験
 - 課題: 独自技術を持って! → 20年超の継続開発
- ペネトレータ: 高い将来性
 - 無着陸内部構造探査
 - ネットワーク観測網設置
 - 錯誤的: 0.1 nm感度の変位計を10000Gで設置
 - 迎え角衝撃, 貫入体からの通信問題などを克服
 - 2010.8: 最終認定試験で完成

MEMS地震センサの性能

MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

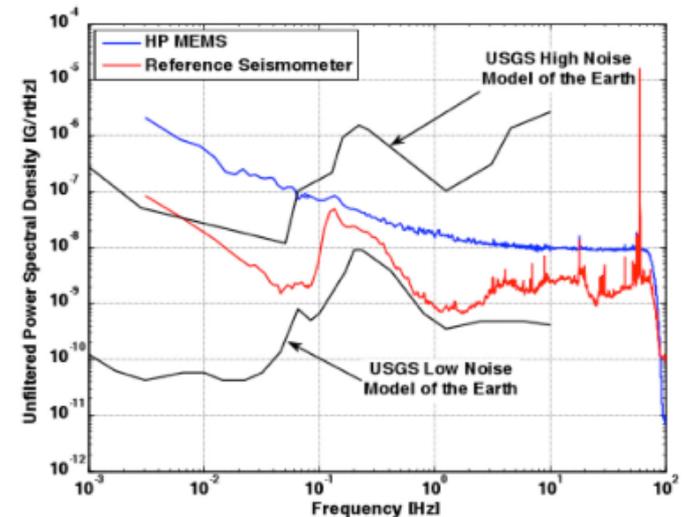
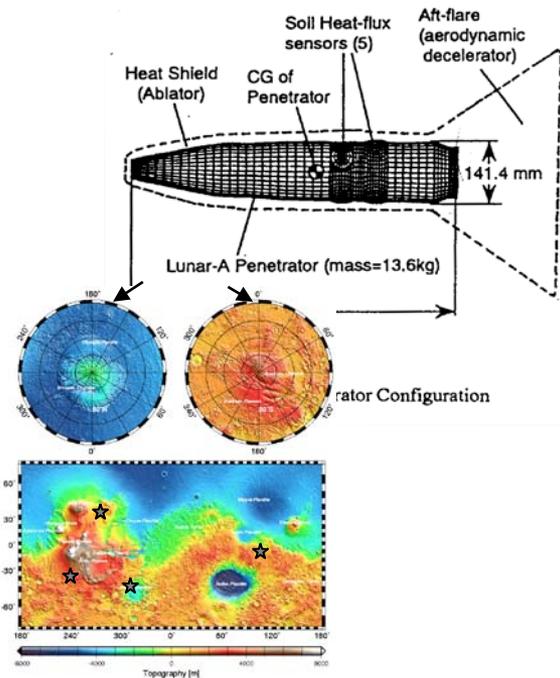


Figure 8. Noise PSD spectrum of HP MEMS sensor and GS-13 reference sensor from USGS noise test

from HP MEMS Seismic Sensor for Oil and Gas Exploration

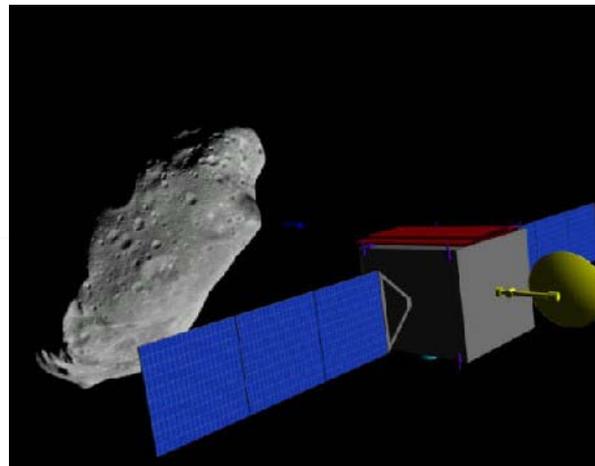
比較内部構造論：ペネトレータ探査

- 火星、小天体、外惑星などへの利活用可能性
→ 具体案：MELOS / 小惑星探査機への搭載提案検討
- 地震計、熱流量計以外にも搭載機器開発 μ TAS: Micro Total Analysis Systems
→ 具体案：X線蛍光分析, γ 線分光計, 可視近赤分光計, 磁力計, 加速度計; 電波源など

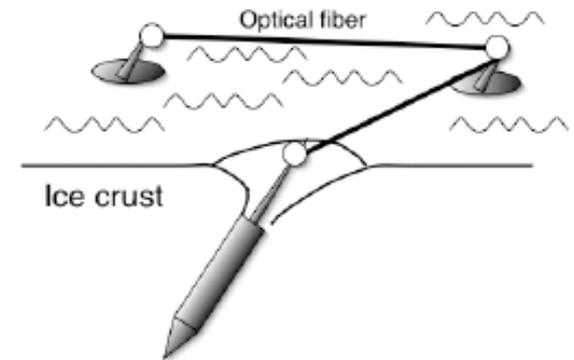


火星ペネトレータ

ペネトレータは月惑星探査の
汎用 / 多目的ツール



小惑星ペネトレータ



エウロパペネトレータ



日本の惑星探査将来計画

- Project 段階 小型・中型・大型
 - *Bepi Colombo (MMO)*【水星周回】, *はやぶさ2*【NEAS&R】
 - *JUICE*【木星氷衛星】
- Phase A *SELENE-2*【月着陸】(再構築も視野に)
- Pre-Phase A ソーラー電力セイル
 - *MELOS*【火星大気・EDL】, 次期小惑星【トロヤ群/CAT-O】
 - *SLIM*【月ε】, *月ペネトレータ*【国際】, *SELENE-3*【月S&R】
 - *のぞみ2*【火星大気散逸】
- ↕
 - *Phaeton* 【NEA】, 小惑星衝突【イトカワ】
 - *MELOS-2*【火星総合】, *Enceladus S&R* 【土星衛星】



惑星探査の戦略

- 高コスト: 「宇宙科学」としての決意が必要
 - リモートセンシングだけで良いのか？
- 技術実証: 軌道投入, 着陸, ローバ, S&R
 - 技術実証の段階をいかに踏んでいくか...
- 理工連携の再構築 自転軸不定
- 深宇宙アンテナ: 臼田後継, Ka帯に対応
2018.6のはやぶさ2の1999 JU₃到着までに...
- 人材育成: JAXAとコミュニティの連携の強化
- 国際共同ミッションへの意義ある参加権