

Origin and Evolution of Mars-moon system

—Prospective study of returned samples from Phobos—

(火星衛星の起源と火星圏進化史)

—回収試料から得られる科学成果の検討—

Tomohiro Usui¹, Shogo Tachibana², Koji Wada³, and the working group of
Phobos/Deimos sample returner mission

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo, 152-8551 Japan

²Department of Natural History Sciences, Hokkaido University
N10 W8, Kita, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

³Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology
2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

ABSTRACT

Study of the outermost rocky planet Mars and its moons (Phobos and Deimos) is critical to understand the origin and evolution of not only the Mars-moon system but also the Earth-moon system. JAXA's Martian moons mission will conduct close-up remote sensing and in situ observations of both moons, and return samples from Phobos. The origins of Phobos and Deimos are still at matter of significant debate: capture of asteroids or in situ formation by a giant impact on Mars. In either case, the sample return mission will definitely provide clues to their origins and offer opportunity to directly explore the building blocks or juvenile crust/mantle components of Mars. Our prospective study suggest that ~10 g of typical Phobos regolith samples should be required for comprehensive lab-based geochemical, petrological, and mineralogical analyses.

火星衛星サンプルリターン計画とその科学 2

火星衛星の起源と火星圏進化史

— 回収試料から得られる科学成果の検討 —

臼井寛裕（東工大）・橘省吾（北大）・和田浩二（千葉工大）
サンプルリターン計画科学検討チーム



発表内容

- **火星衛星SRの意義**
- **火星衛星SRの目的**
 - 火星衛星の起源同定が最優先課題
- **Phobos & Deimosの基本情報**
 - 小惑星捕獲説・巨大衝突説
- **火星衛星の起源を同定するための条件**
 - 衛星試料の回収・分析が最重要，だが十分条件ではない
- **火星衛星系進化史の解明に向けて**

火星衛星SRの意義： 火星衛星系の魅力

「原始惑星の生き残り」と「多様な表層環境を経験した水惑星」の二面性

意義

太陽系・惑星形成論
の実証

多様な太陽系天体
進化の理解

目的

火星衛星の起源

火星初期進化

衛星
表層進化

火星
表層進化

火星衛星SRの意義－1： 太陽系・惑星形成論の実証

太陽系・惑星形成論は物理的理解から物質科学的検証の時代へ

• 天体力学的考察

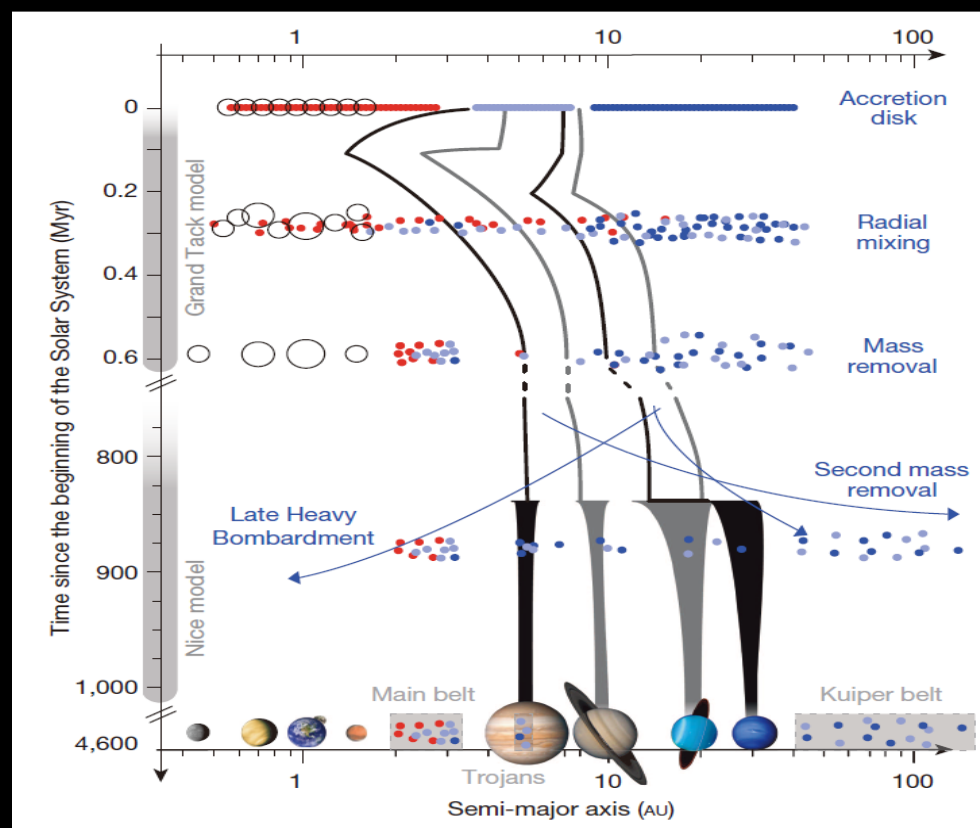
- 標準モデル
- Niceモデル
- Grand Tackモデル



物質科学的検証にはサンプルリターンが必要不可欠

- いつ（形成年代）
- どこで（形成場）
- どのように（形成過程）

太陽系天体の移動・集積過程を表した模式図

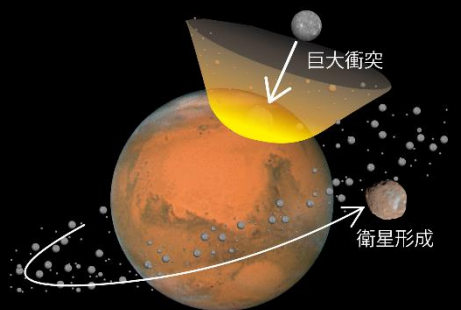


火星衛星SRの意義－1： 太陽系・惑星形成論の実証

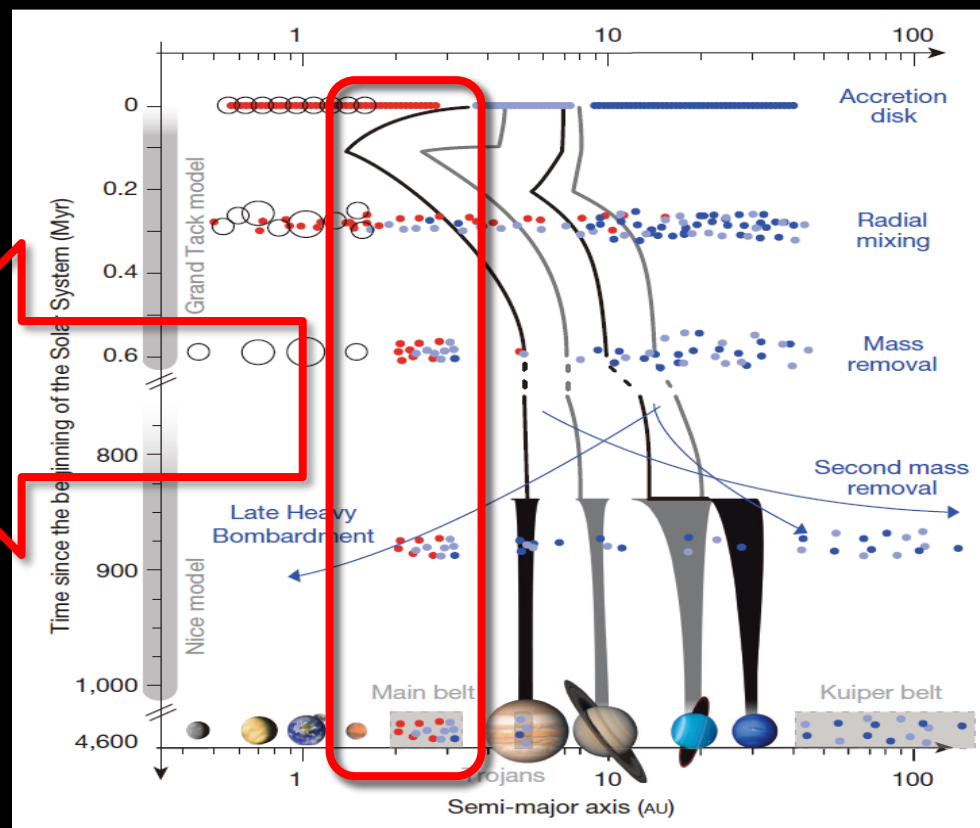
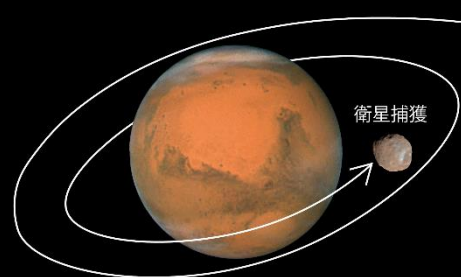
火星衛星系の理解が太陽系・惑星形成進化の鍵を握る

太陽系天体の移動・集積過程を表した模式図

巨大衝突説



小惑星捕獲説

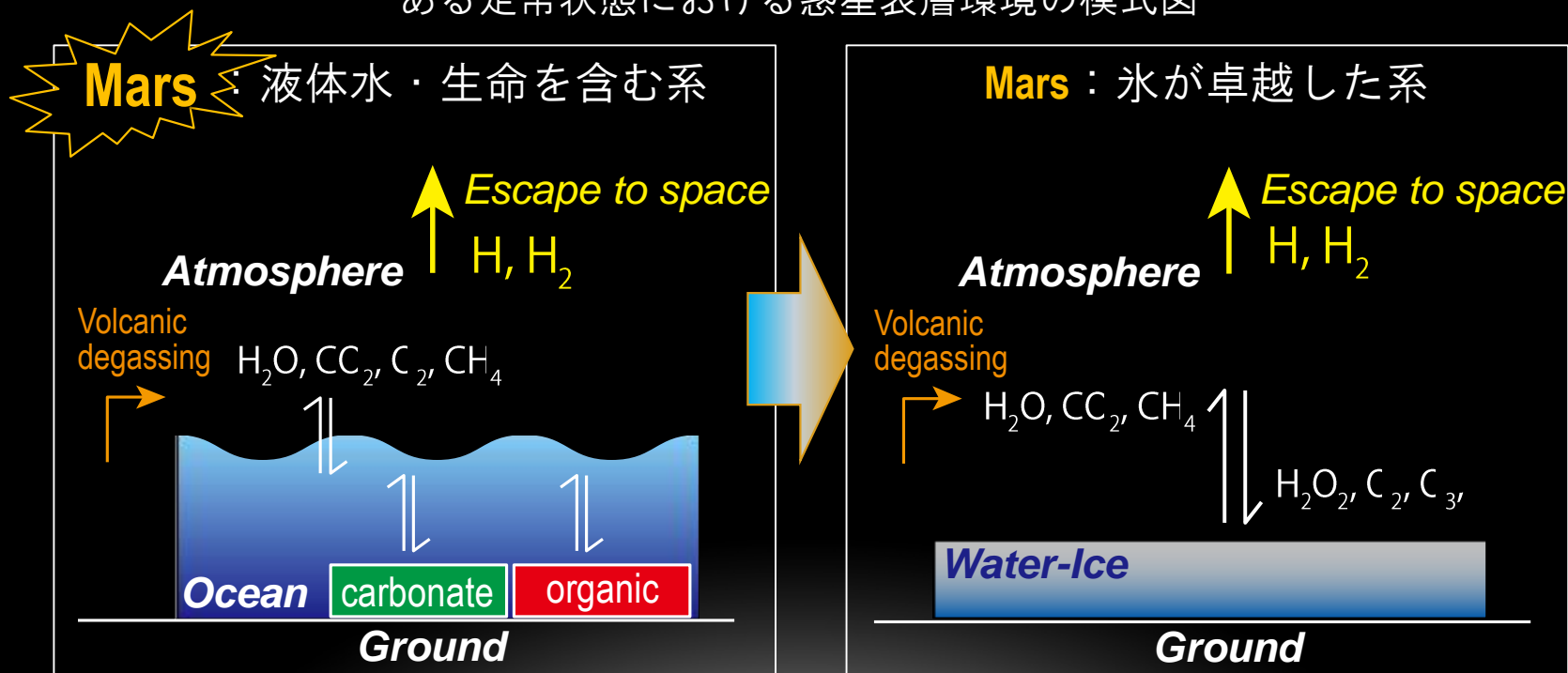


DeMeo & Carry (2014)

火星衛星SRの意義－2： 多様な太陽系天体進化の理解

火星は惑星表層環境史を研究する上で理想的な天体

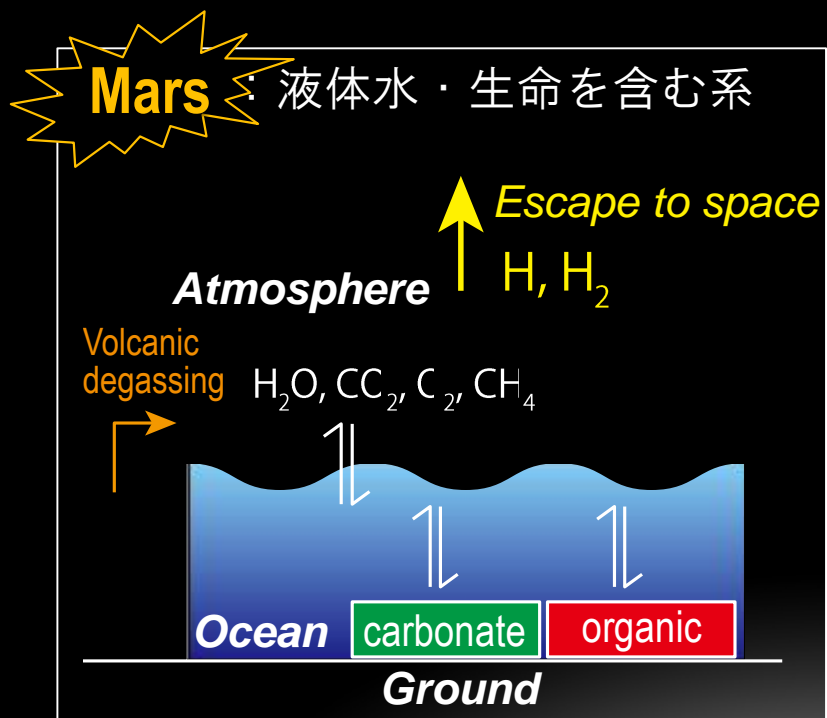
ある定常状態における惑星表層環境の模式図



Modified from Harada et al. (2015); Zanhle et al. (2008)

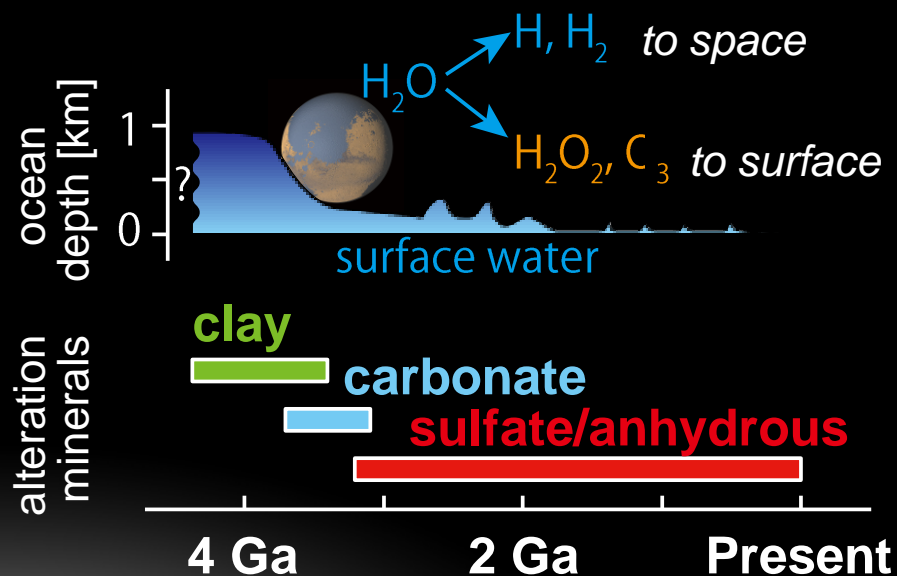
火星衛星SRの意義－2： 多様な太陽系天体進化の理解

火星は惑星表層環境史を研究する上で理想的な天体



Modified from Harada et al. (2015); Zanhle et al. (2008)

火星の水量および表層物質の時代変化



Modified from Ehlman & Edwards (2014); Ehlmann et al. (2011)

火星衛星SRの意義－2： 多様な太陽系天体進化の理解

多圏相互作用を研究する上で理想的な惑星系

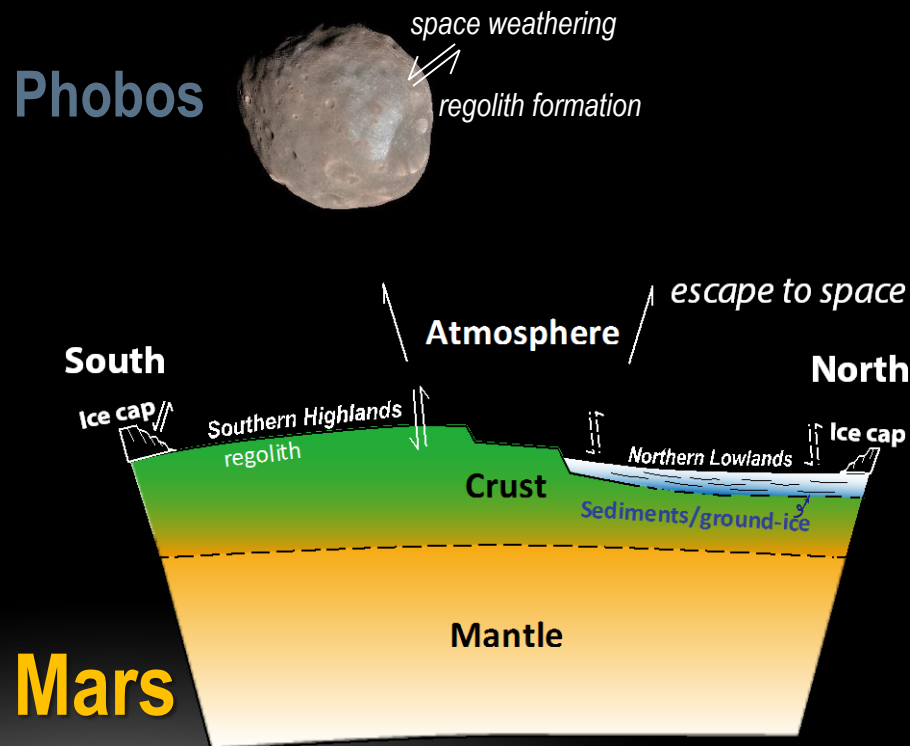
火星衛星

- 宇宙圏
 - 固体圏
- ⇕ 直接相互作用

物質供給？
~300 ppm？

火星

- 宇宙圏
 - 大気圏
 - 水圏
 - 固体圏
- ⇕⇕⇕ 多圏相互作用

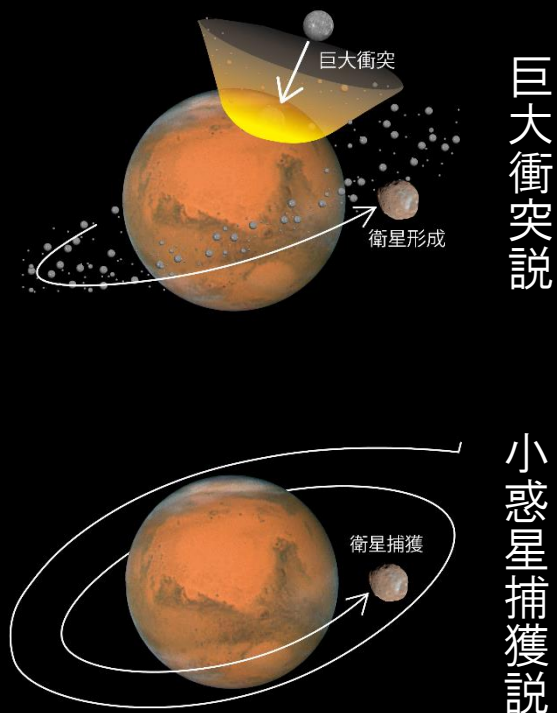


火星の模式断面図 (Usui et al., 2015)

火星衛星SRの目的

火星衛星の起源同定が最優先目的

火星衛星起源の同定



火星初期進化

- 揮発性元素供給
- 初期分化

衛星表層進化

- レゴリス形成過程

火星進化史

- 表層環境進化
- 固体火星進化

PHOBOS & DEIMOSの基本情報

- 月と比較し，低密度・低質量
 - 密度 (cm^3/g) : Phobos = 1.87, Deimos = 1.47
 - 質量 (kg) : Phobos = 1.07×10^{16} , Deimos = 1.48×10^{15}
- クレータ一年代（形成年代？）
 - ~4.3 Ga (火星軌道 \leq 巨大衝突説)
 - ~3.5 Ga (Main Belt \leq 小惑星捕獲説) Schmedemann et al. (20014)

- 低離心率・低軌道傾斜角
- D or T型小惑星のスペクトラム

一見，矛盾した観察事実？

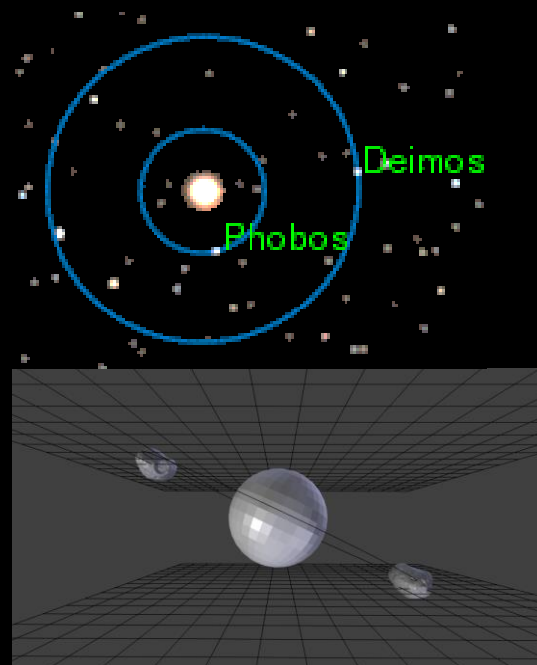
PHOBOS & DEIMOSの基本情報

低離心率・低軌道傾斜角 ⇒ 巨大衝突説を示唆

- 離心率 (Jacobson & Lainey, 2014)
 - Phobos: 0.001511, Deimos: 0.00027
- 軌道傾斜角 (Jacobson & Lainey, 2014)
 - Phobos: 1.076 deg, Deimos: 1.789 deg

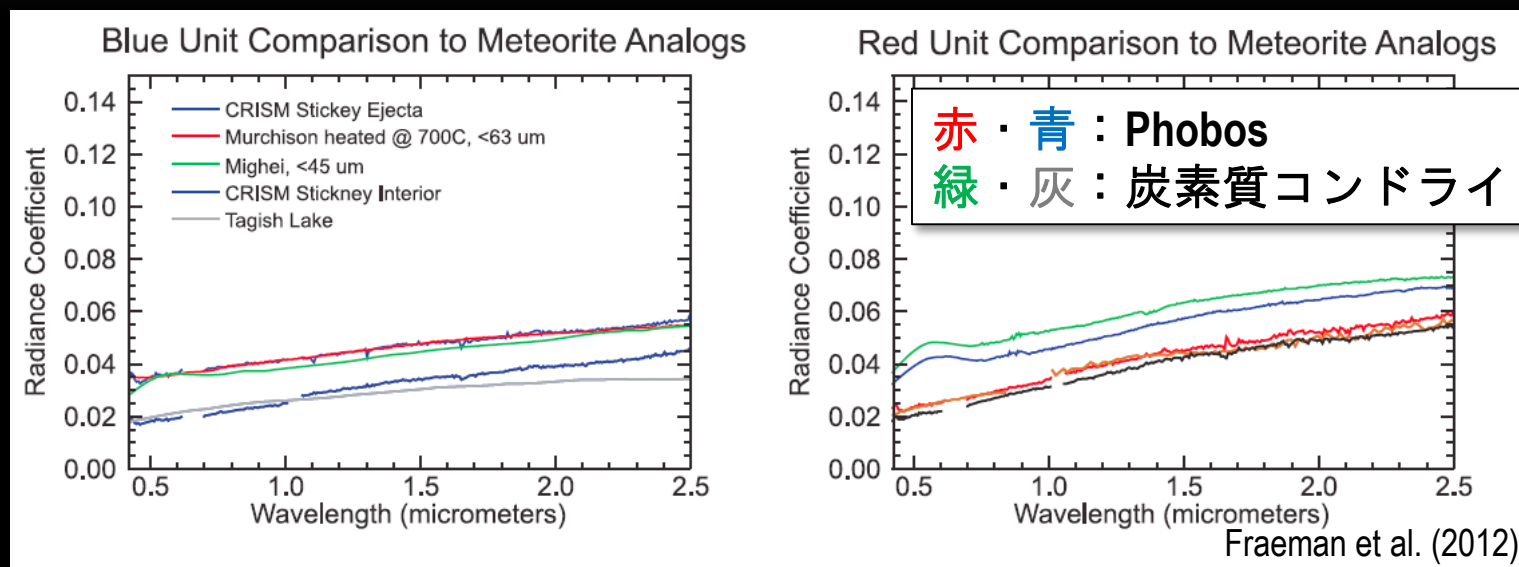
もし捕獲説が正しいならば...

低離心率・低軌道傾斜角 ⇒ 捕獲理論モデルの再検討



PHOBOS & DEIMOSの基本情報

D or T型小惑星のスペクトラム⇒ 捕獲説を示唆

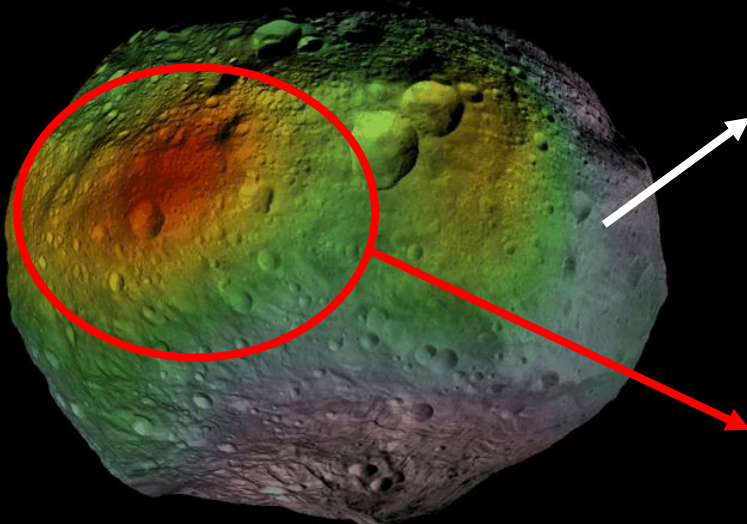


もし巨大衝突説が正しいならば...

反射分光データは表面のレゴリス層を反映？ ⇒ 内部構造探查
反射分光データは宇宙風化で形成された？ ⇒ サンプルリターン

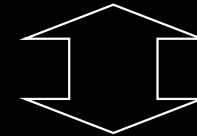
VESTAの例：DAWN探査の結果

GRaNDで得られた水素マップ
Max ~400 ppm



Prettyman et al. (2012)

Vesta :
玄武岩質地殻を持つ分化型小惑星



2.8 μm の吸収を検出
CMコンドライト的な物質の付加と解釈

De Sanctis et al. (2013)

衛星の起源同定のための条件

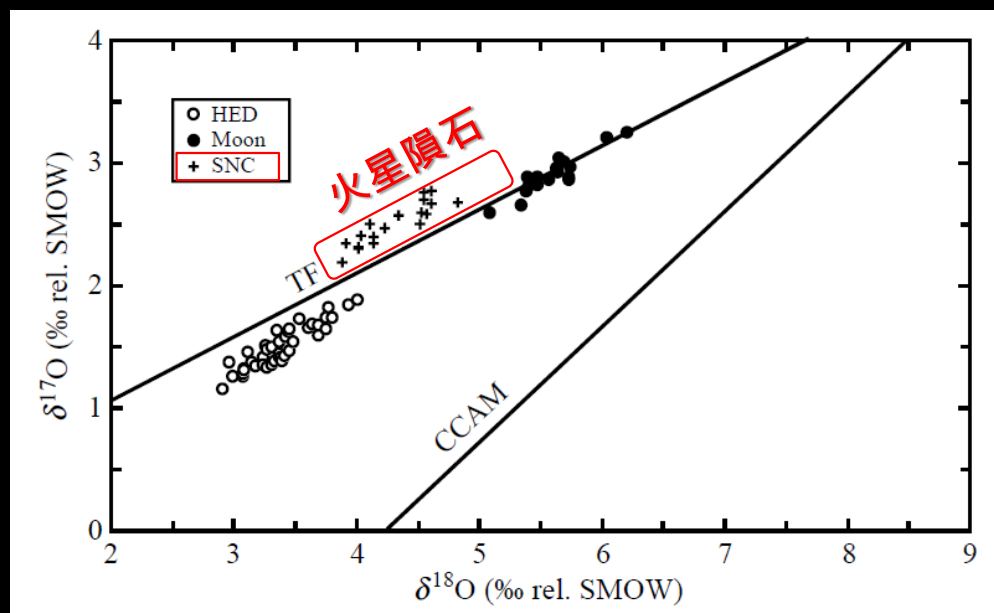
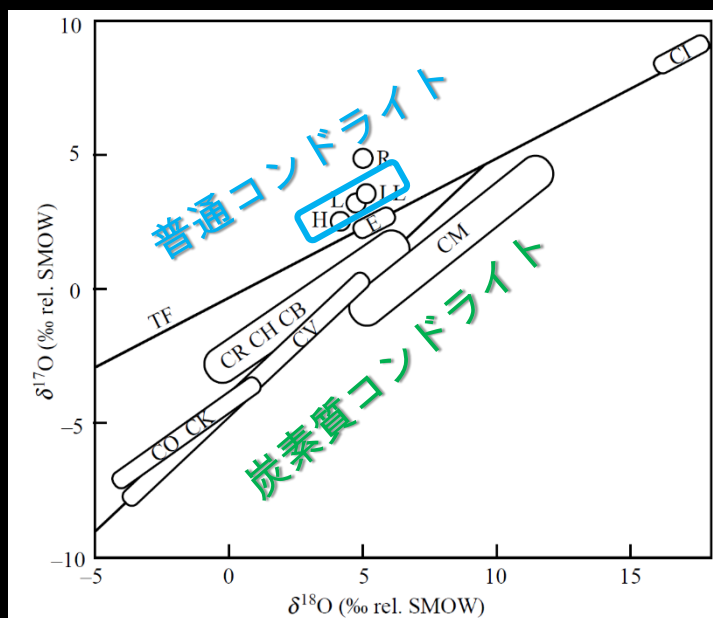
- 衛星起源物質の回収・分析 ⇒ サンプルリターン
 - 衛星起源物質の同定（化学組成・結晶構造など）
 - 衛星起源物質の年代決定
 - 回収物質の地質学的産状の解析 ⇒ リモセンによる表面・内部探査
 - 回収物質の代表性を担保
- ⇒ 回収試料の起源 ≠ 火星衛星の起源

回収試料の分析で分かること： 酸素同位体を使った起源同定

酸素同位体により起源天体（火星・小惑星）の同定が可能

- 太陽系天体はそれぞれ異なる酸素同位体比を持つ
e.g. SNC (Martian) meteorites: $\Delta^{17}\text{O} = +0.3 \text{ ‰}$

太陽系物質の酸素同位体プロット (^{18}O vs ^{17}O)

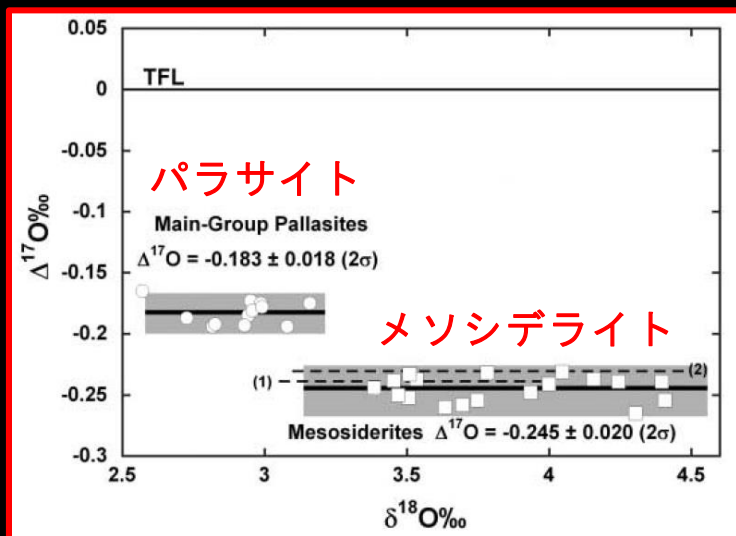


回収試料の分析で分かること： 酸素同位体を使った起源同定

Sub-mgの試料で高精度酸素同位体分析が可能

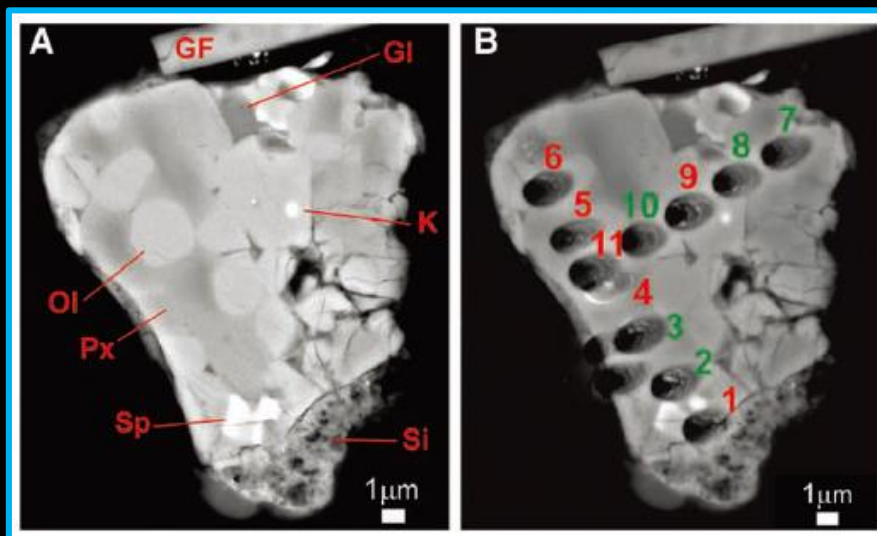
- IRMS : <1 mgの粒子のバルク・破壊分析 ($\Delta^{17}\text{O} = \pm \sim 0.02\text{‰}$)
- SIMS : <10 μm の粒子の局所・非破壊分析 ($\Delta^{17}\text{O} = \pm \sim 0.3\text{‰}$)
e.g. SNC (Martian) meteorites: $\Delta^{17}\text{O} = +0.3\text{‰}$

IRMSによる石鉄隕石の分析例



Greenwood et al. (2006)

SIMSによる彗星由来物質の局所同位体分析例



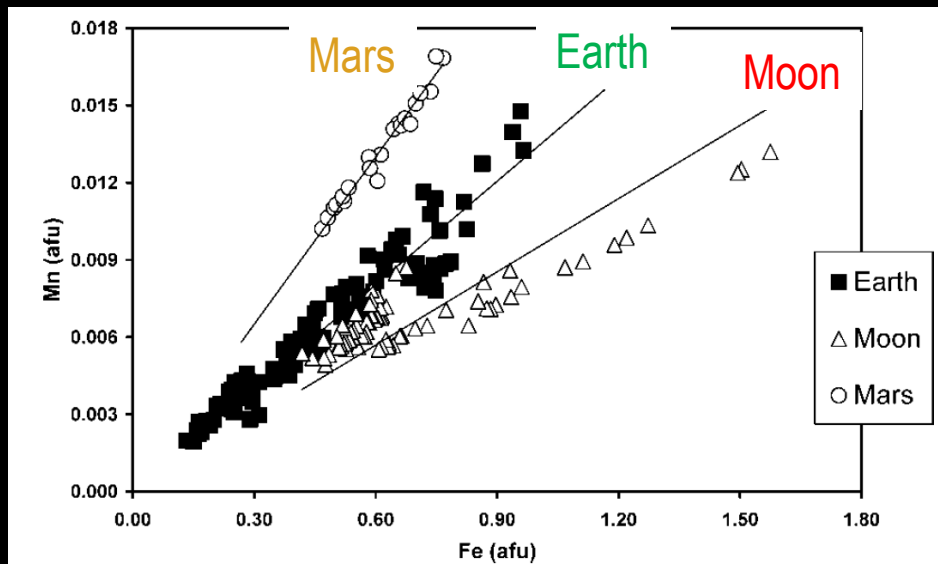
Nakamura et al. (2008)

回収試料の分析で分かること：
火星および小惑星由来物質が共存した場合

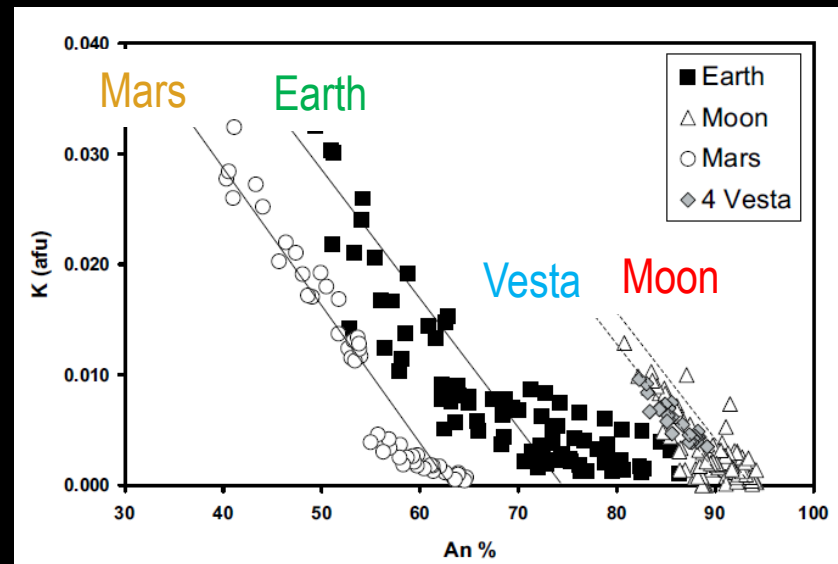
「GI起源物質」 or 「形成後の降着物質」 は判別可能

- マントル物質（ガーネットなど） or 表層物質（炭酸塩など）の存在
- 上記の物質がなくても、カンラン石や斜長石の化学組成で判別

カンラン石の [Fe vs Mn] プロット



斜長石の [An vs K] プロット



Karner et al. (2003, 2004)

回収試料の分析で分かること： その他の分析と必要量

回収試料（~10 g）から十分な総合的科学データが取得可能

分析手法，得られる科学データ，予想されるサンプル量の一例

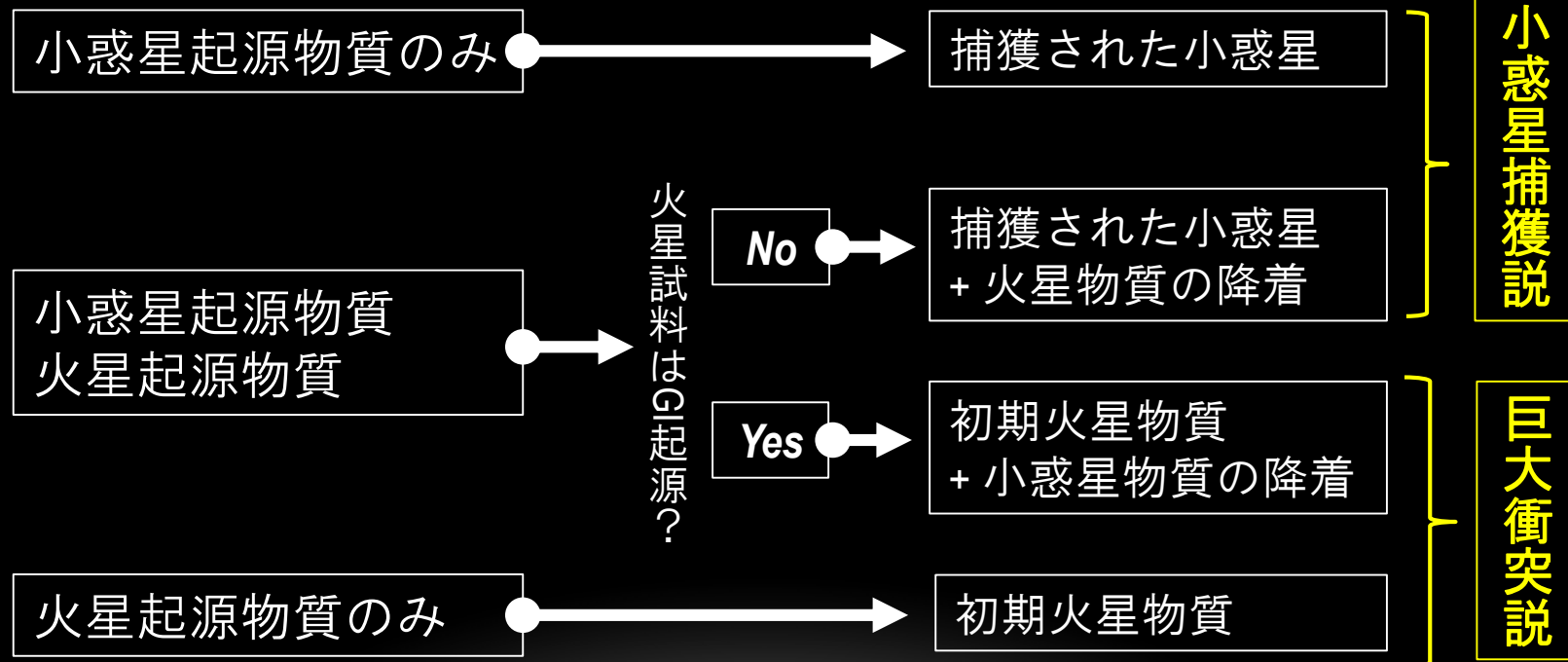
分析法	科学データ	最少必要量	備考
SIMS	酸素同位体	~10 μm dia.	局所・一部破壊
IRMS	酸素同位体	<1 mg	バルク・破壊
IRMS	Ar-Ar年代	<0.01 mg	バルク・破壊
TIMS	Rb-Sr年代	~10 mg	バルク・破壊
SIMS	Mn-Cr年代	~10 μm dia.	局所・一部破壊
即発 γ 線分析	全岩化学組成	~1 g	バルク・破壊
ICP-MS	全岩化学組成	~10 mg	バルク・破壊
EPMA	鉱物化学組成	<3 μm dia.	局所・非破壊
SQUID顕微鏡	磁場強度	~1 μm dia.	局所・非破壊

~10 g = ~5,000粒 ($1 \text{ mm}^3 = 2 \text{ mg}$)

回収試料の分析で分かること： まとめ

回収試料の起源

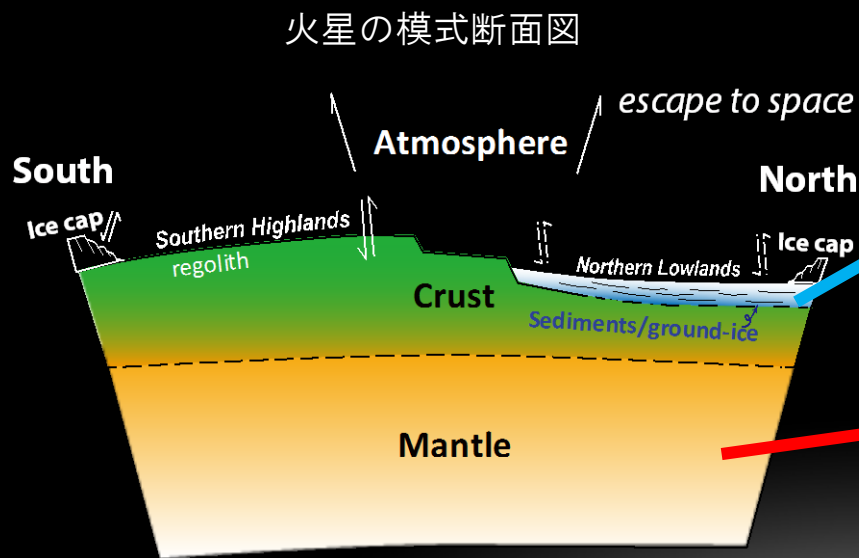
火星衛生の起源



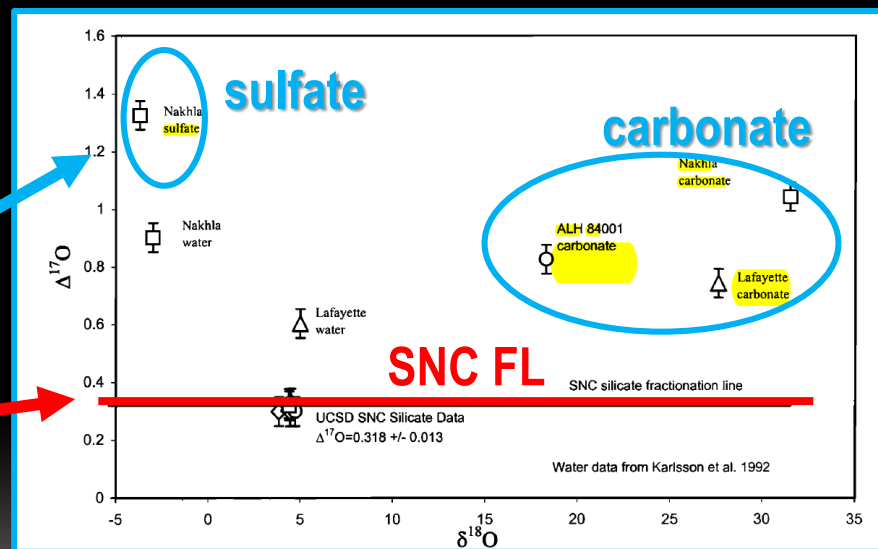
火星進化史の解明に向けて： 酸素同位体を使った火星表層物質の解析

酸素同位体を用いると、火星表層起源物質の同定も可能

- 火星表層物質（硫酸塩・炭酸塩）： $\Delta^{17}\text{O} = > +0.5 \text{ ‰}$
e.g. SNC (Martian) meteorites: $\Delta^{17}\text{O} = +0.3 \text{ ‰}$



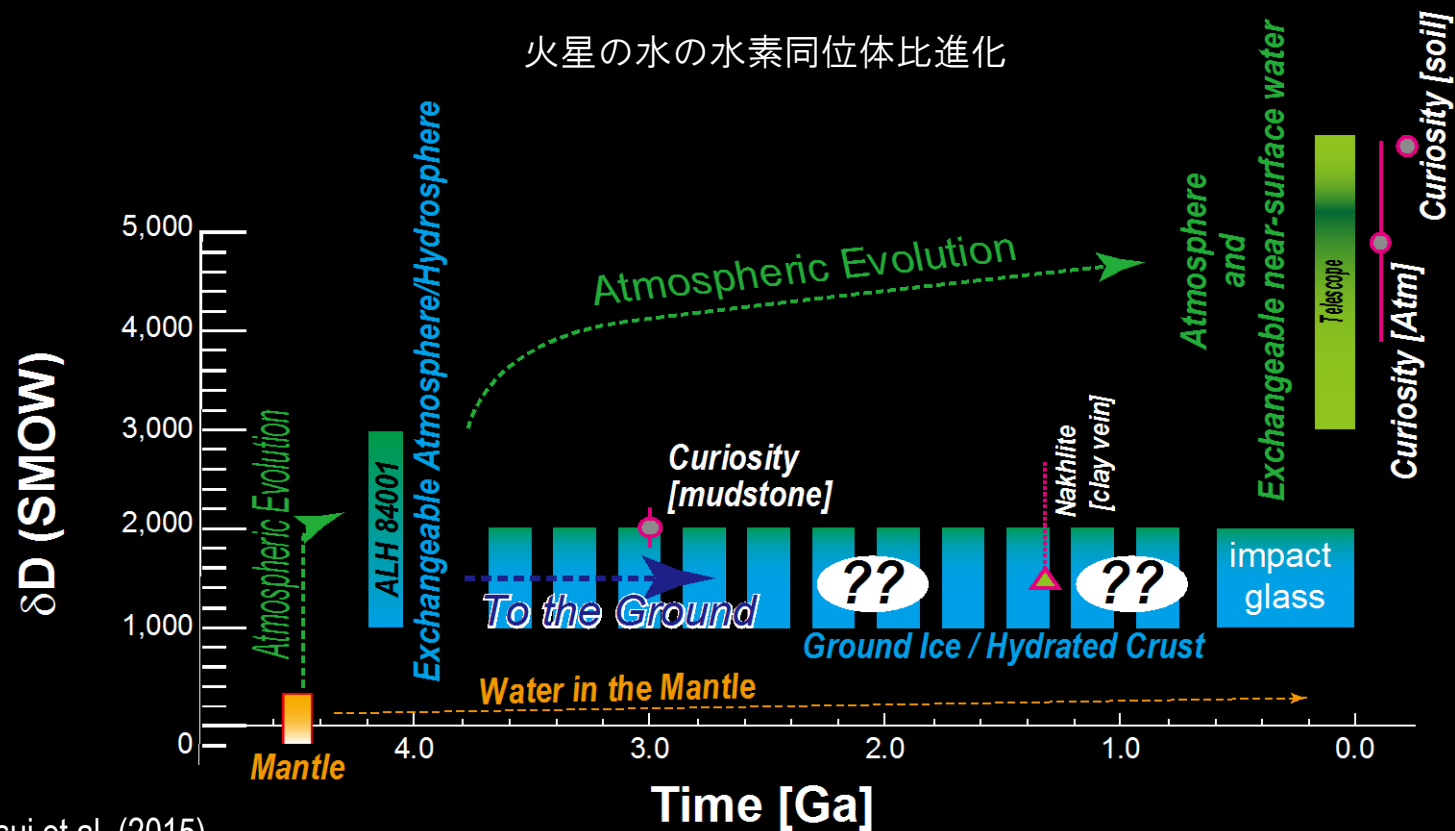
火星隕石試料の酸素同位体プロット (^{18}O vs ^{17}O)



Farquhar and Thiemens (2000), Usui et al. (2015)

火星進化史の解明に向けて： 水素同位体を使った火星表層物質の解析

水素同位体を用いると表層進化（水の散逸）が追跡可能



Usui et al. (2015)

結論

- 火星衛星SRの意義は「太陽系・惑星形成論」および「多様な太陽系天体進化」の物質科学的検証にある
- 火星衛星SRの最大の目的は衛星の起源（GI起源 vs 捕獲起源）を明らかにすることである
- 衛星の起源を明らかにするためには、サンプルリターンが必須である
- 回収試料の地質学的代表性を明らかにし、試料から得られる科学的成果を最大化するためには、衛星内部を含めたリモートセンシングが必要不可欠である
- 10 gの衛星由来物質を回収できれば衛星の起源は同定可能である