

小惑星と火星圏の物質輸送(MMX)

藤谷 渉 (茨城大学)

スターダスト計画によって 81P/Wild 2 彗星から回収された試料の分析から、彗星にも難揮発性包有物 (Ca-, Al-rich Inclusion: CAI) や結晶質のケイ酸塩鉱物の存在が確認された。これは原始太陽の近傍で形成した物質が外惑星領域まで移動していることを示し、原始惑星系円盤内において物質が動径方向に輸送されていたことを示唆している。

しかし、太陽系物質の組成は均質ではない。酸素に代表される様々な元素で隕石間の同位体比のバリエーションが見られ、異なる隕石グループは固有の同位体比を示す。太陽系内の物質輸送は巨大ガス惑星の形成によっても影響を受けたはずであり、コンドライトの CAI 保持問題やクロム・チタンなどの同位体比の二分性にも関連する重要な研究課題である。さらに、巨大ガス惑星の軌道進化によって小天体の軌道も乱され、太陽から遠い領域で形成された小天体が内惑星領域に輸送された可能性もある。

このような大規模な物質輸送は太陽系史を通じて起こっており、惑星の組成や進化に影響を与えたであろう。前述の同位体比バリエーションは多くの元素で 0.1%以下の微小なものであるが、それを利用して、地球の同位体組成がどのような隕石物質の組み合わせによって再現できるかが考察されている。地球に含まれる多くの元素の同位体比はエンスタタイトコンドライトと呼ばれる還元的なコンドライトと類似しており、地球の材料物質の大部分はエンスタタイトコンドライトのような物質からなると推測される。しかし、地球マントル中の親鉄元素の濃度や揮発性元素の同位体比から推測されるように、コア形成の後に炭素質コンドライトのような揮発性元素に富む物質、いわゆるレイトベニア、がもたらされた可能性もある。地球マントル中のルテニウムやモリブデンなどの親鉄元素の同位体比は、既知の隕石グループのどれとも一致せず、どのようなレイトベニア物質がもたらされたのかにはまだ議論の余地がある。

火星衛星探査計画 (MMX) では、Coring (C-)と Pneumatic (P-) sampler という二種類のサンプリングシステムを用いて、火星衛星フォボスの表層から 10 g 以上の試料を回収することを目指している。MMX の科学目標の一つは火星衛星の起源の解明である。火星衛星の起源にはジャイアントインパクト説と捕獲小惑星説があり、いずれの場合でも、回収試料の分析から太陽系内の物質輸送を紐解く重要なデータが得られる可能性がある。現在、試料分析ワーキングチーム (Sample Analysis Working Team: SAWT) は回収試料の分析計画と目指すサイエンスについて議論を進めている。捕獲小惑星説の場合、フォボスの表面スペクトルから推定されるように、回収試料は始原的な炭素質コンドライトに類似した物質である可能性が高い。その場合、試料分析から捕獲小惑星の性質や形成・進化過程を解明し、さらに、フォボス表面のクレーター密度から、始原天体が火星重力に捕獲された時期に関して制約を与えられる可能性がある。ジャイアントインパクト説の場合、回収試料は高温のガスあるいはメルトから形成した物質であると考えられる。その場合、試料分析からインパクトの性質や衝突の条件、さらに衝突の年代学的情報が得られ、衛星形成の過程を制約したり、火星圏の進化に対する天体衝突の影響を評価したりすることが可能となる。

小惑星と火星圏の 物質輸送(MMX)

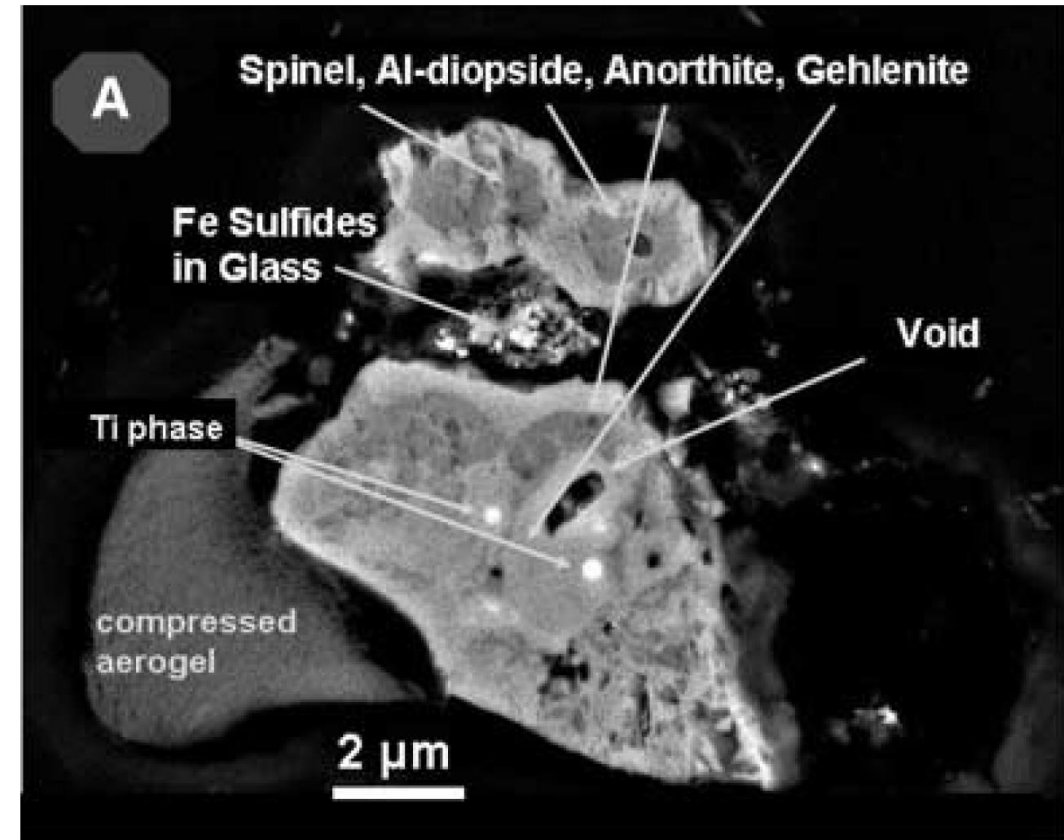
藤谷渉（茨城大学）

Feb 21, 2021

惑星圏研究会

太陽系内の物質輸送

- 原始惑星系円盤内での大規模な物質循環 (Ciesla, 2007)
 - 彗星中の結晶質ケイ酸塩鉱物 (Brownlee et al., 2006; Munnma & Charnley, 2011)
 - Comet 81P/Wild 2試料中の難揮発性包有物 (CAI)

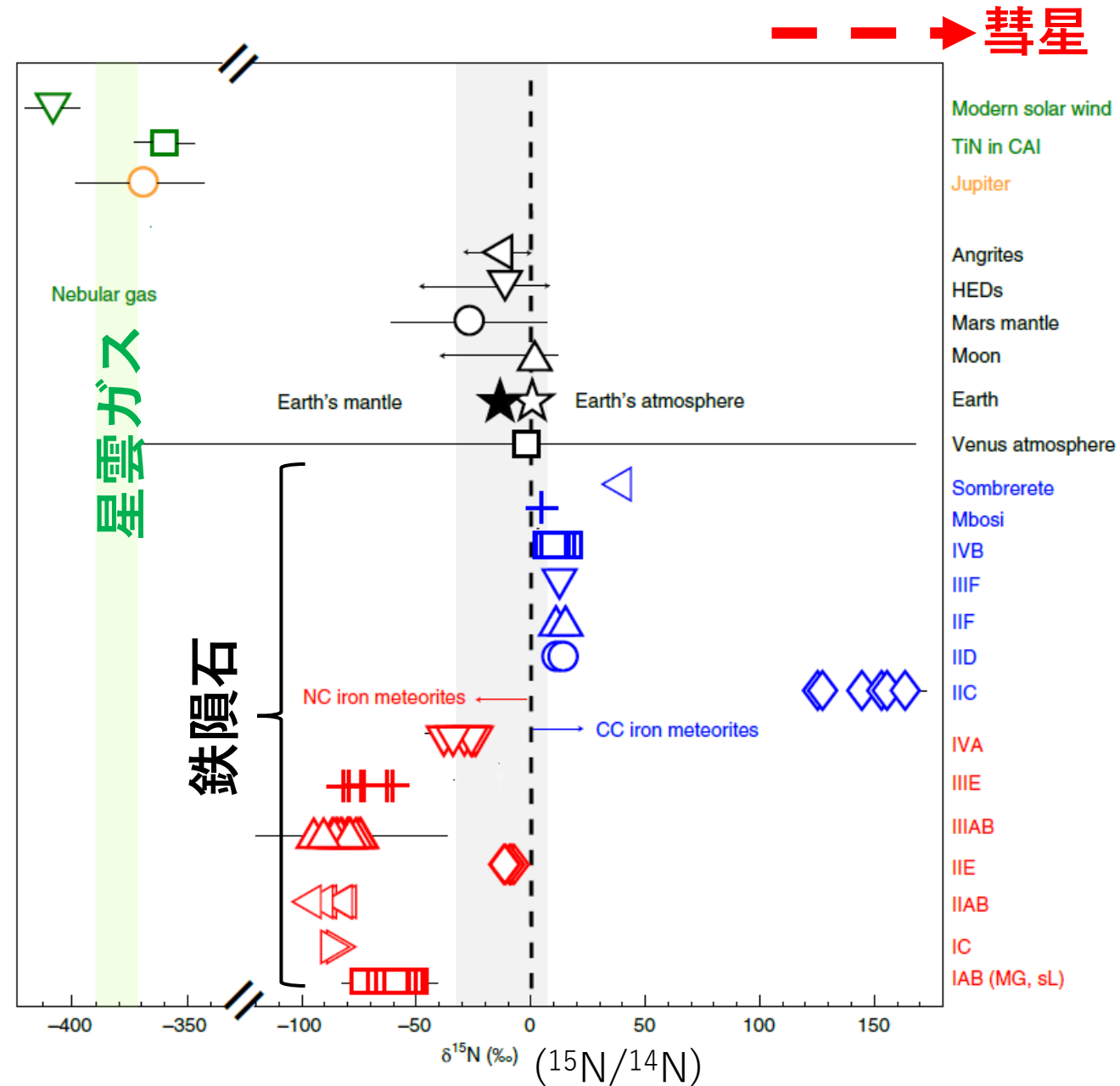


Zolensky et al., 2006

太陽系物質の同位体比のバリエーション

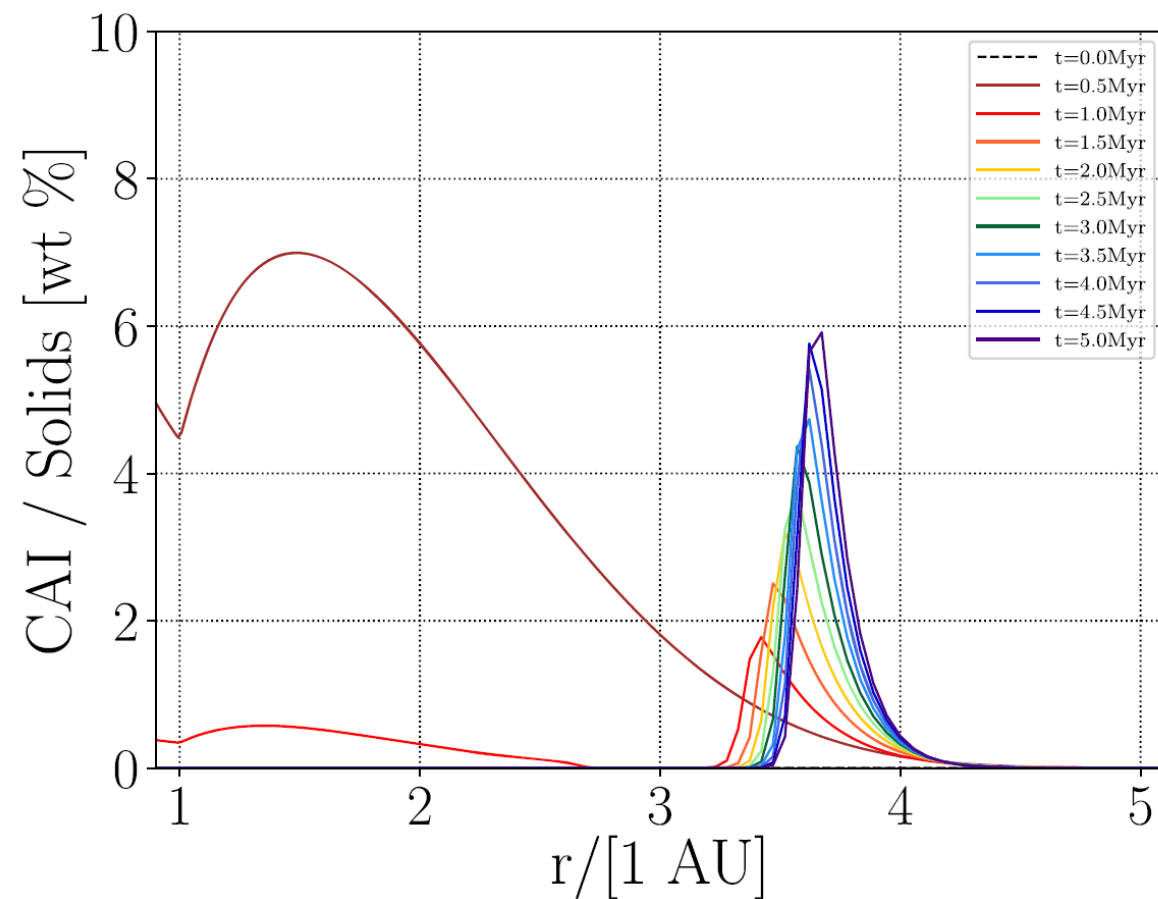
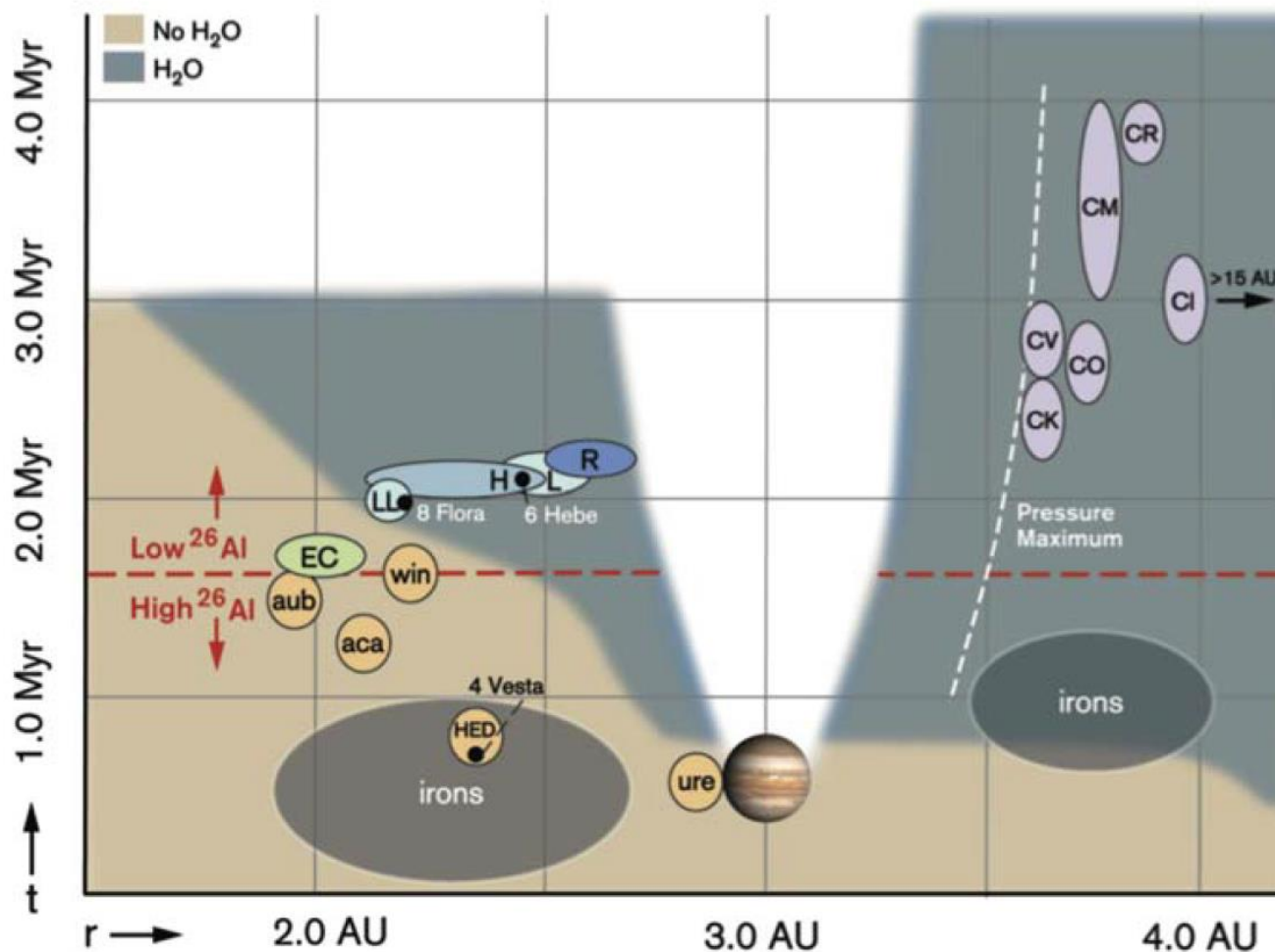
- 太陽系物質には同位体比のバリエーションが見られる (e.g., Dauphas & Schauble, 2016)

→ 物質の不均一な混合



Grewal et al., 2021

物質輸送と巨大ガス惑星の形成



Desch et al., 2018

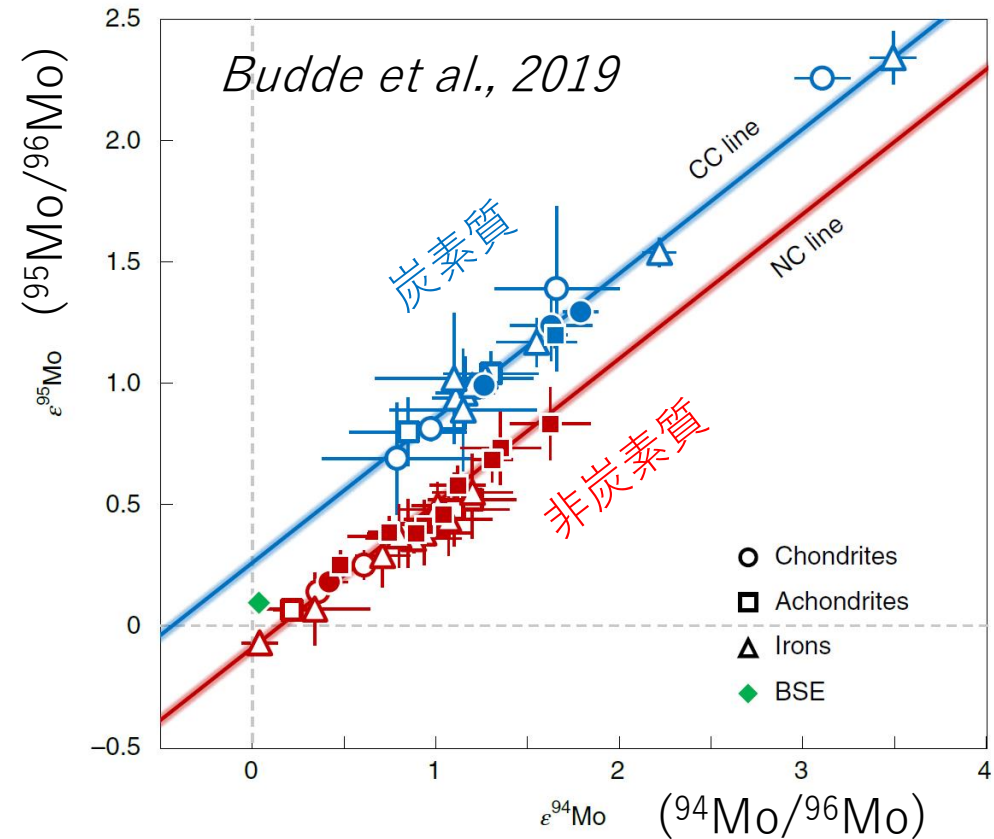
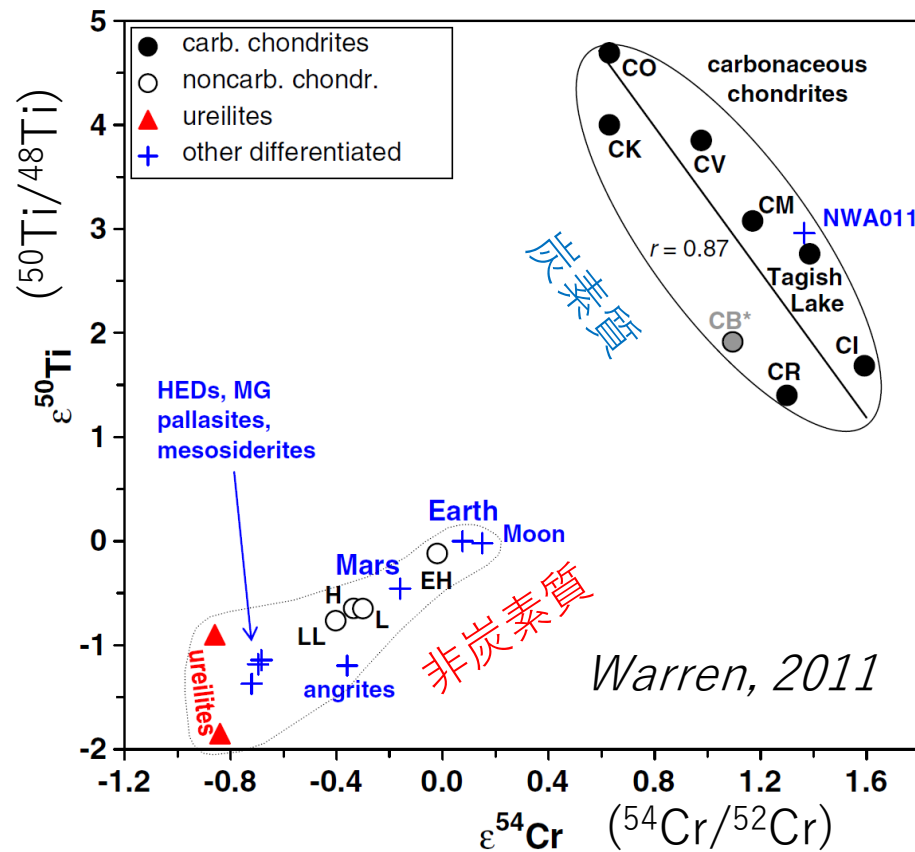
物質の不均質混合

- CAI保持問題

非炭素質コンドライトにはCAIが少ない (Desch et al., 2018)

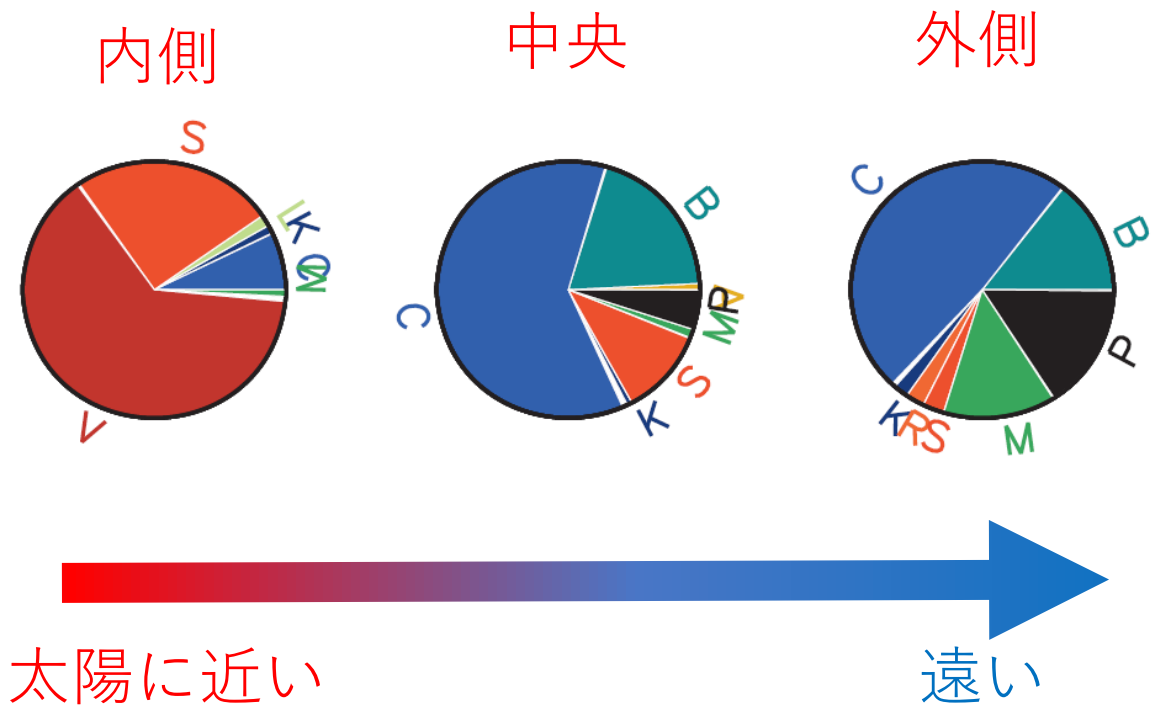
- 隕石における同位体比の二分性

(炭素質 vs 非炭素質; e.g., Kruijer et al., 2017)

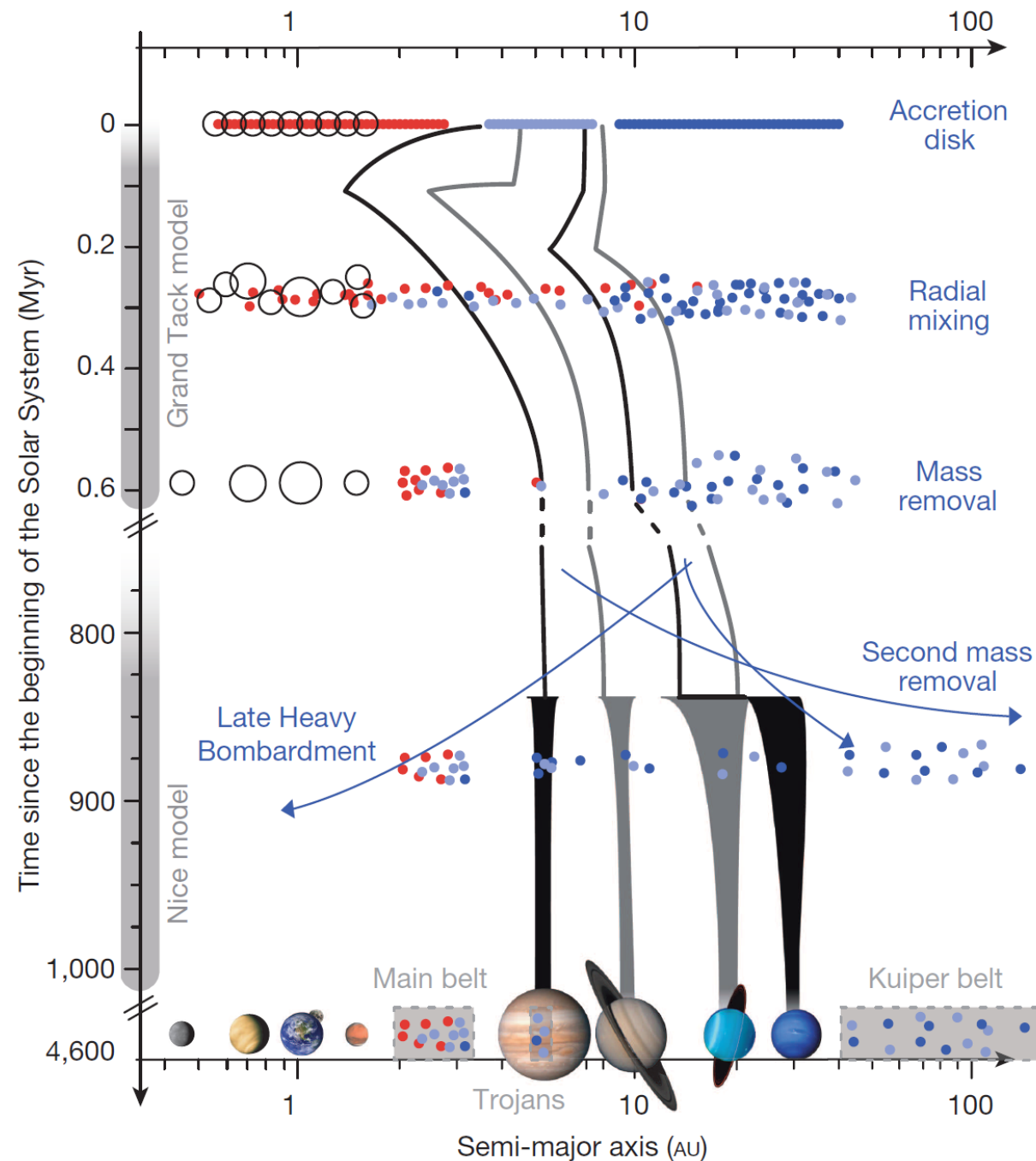


惑星の軌道進化と物質輸送

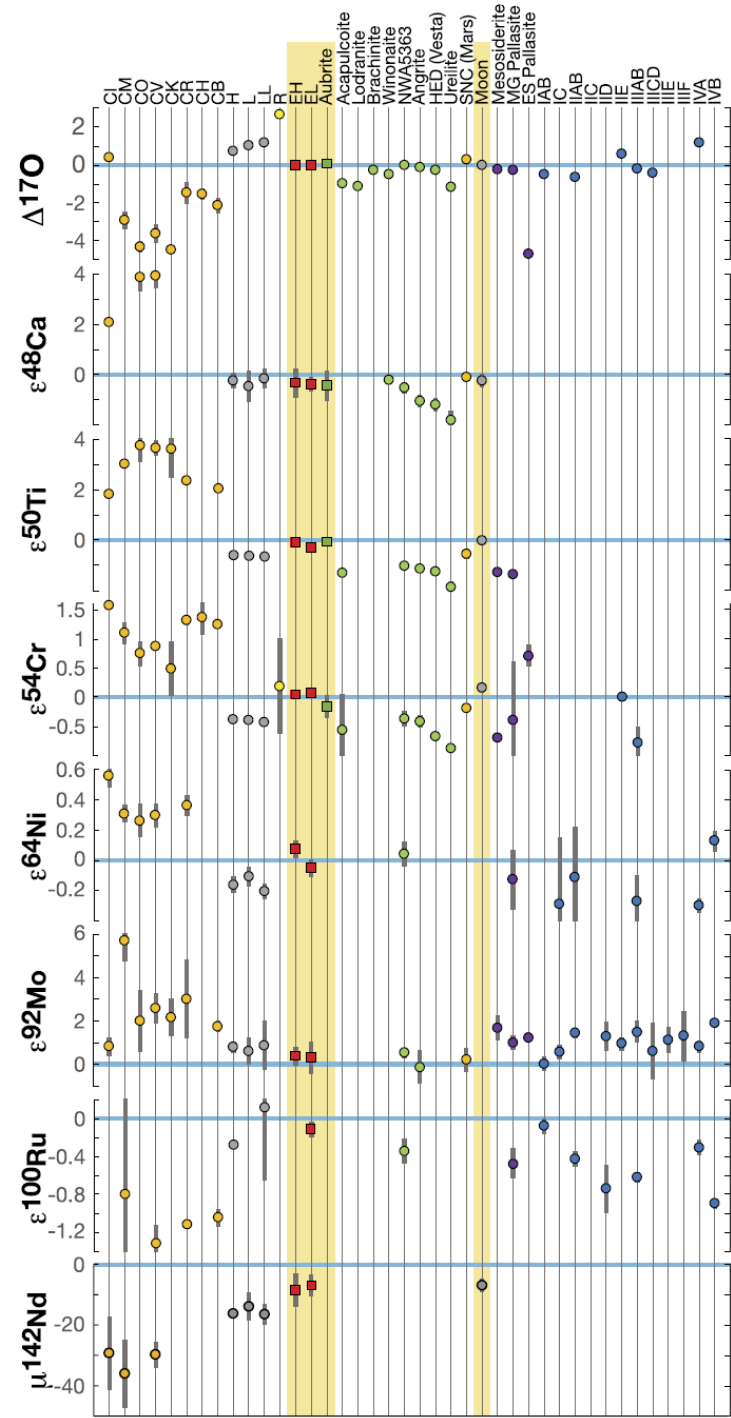
小惑星メインベルト



DeMeo & Carry, 2014



同位体比から推測する地球の材料物質

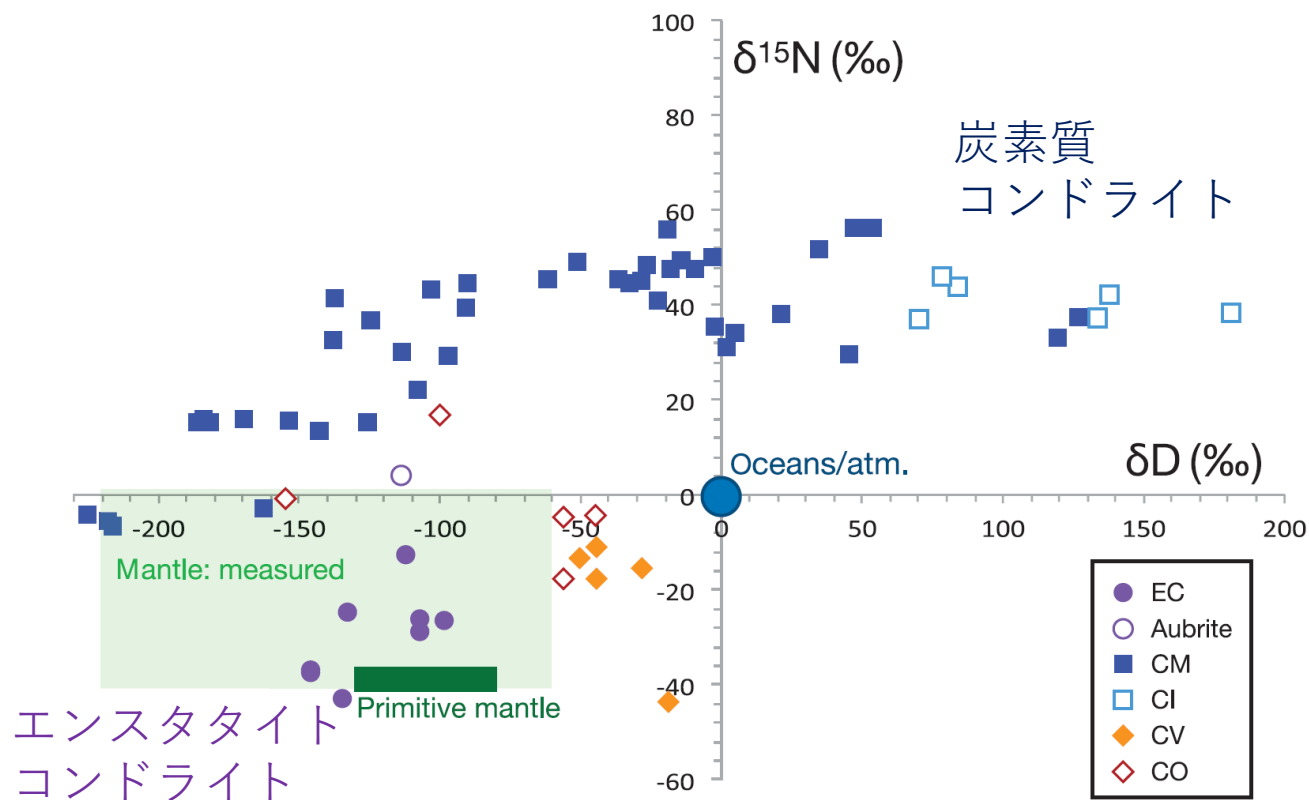
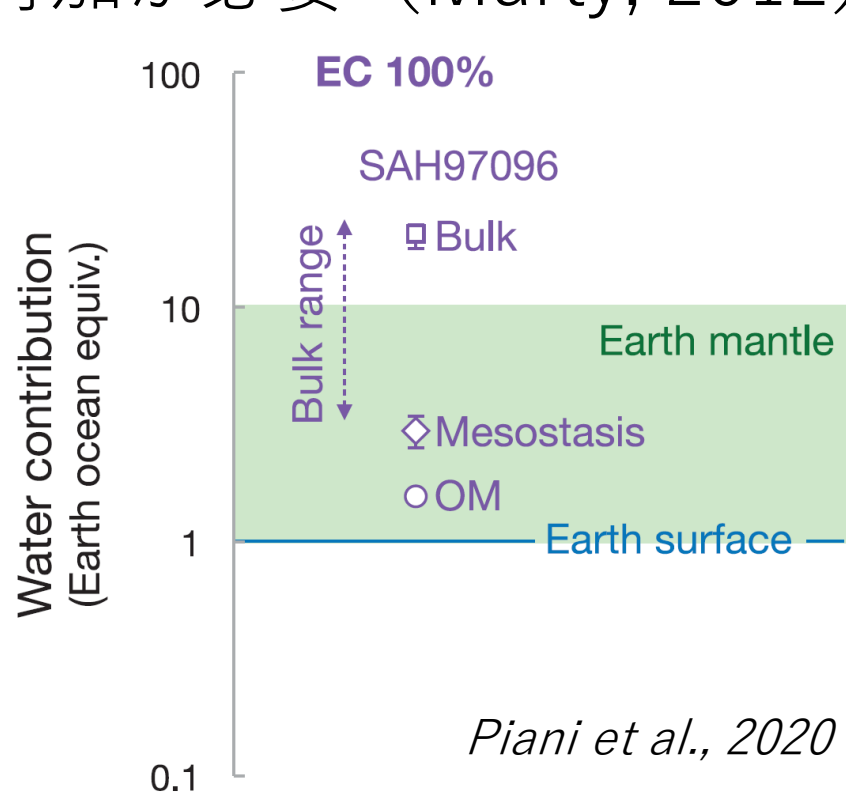


- 地球の材料物質は70%以上
エンスタタイトコンドライト
- 炭素質コンドライトは数%

Dauphas, 2017

エンスタタイトコンドライト中のH₂O

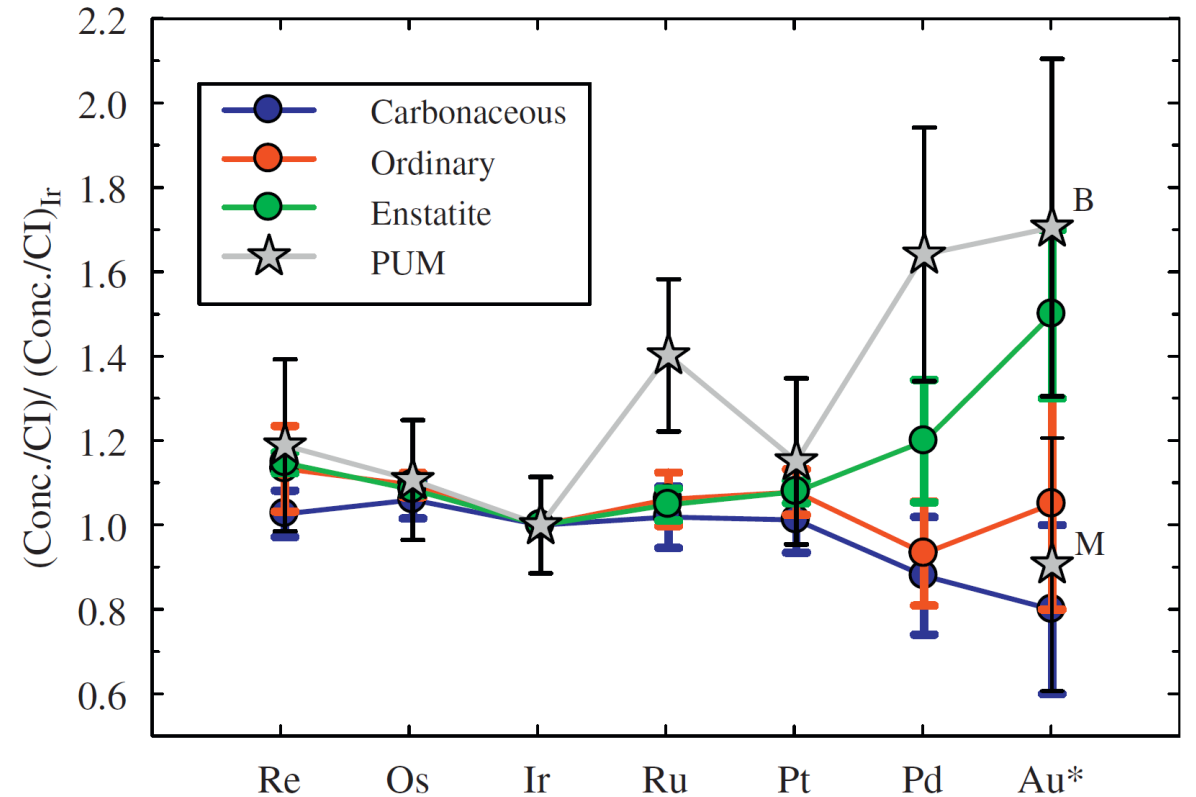
- ECは少なくとも地球表層の3倍程度H₂Oを含む
- 同位体比はD-poor（始原的マントルに近い；Hallis et al., 2015）
- 地球表層のD/Hを説明するためには炭素質コンドライト的な物質の付加が必要（Marty, 2012）



レイトベニア

- 地球マントルのHSE存在度はコンドライトの1/200
- 相対存在度パターンはほぼコンドライト的

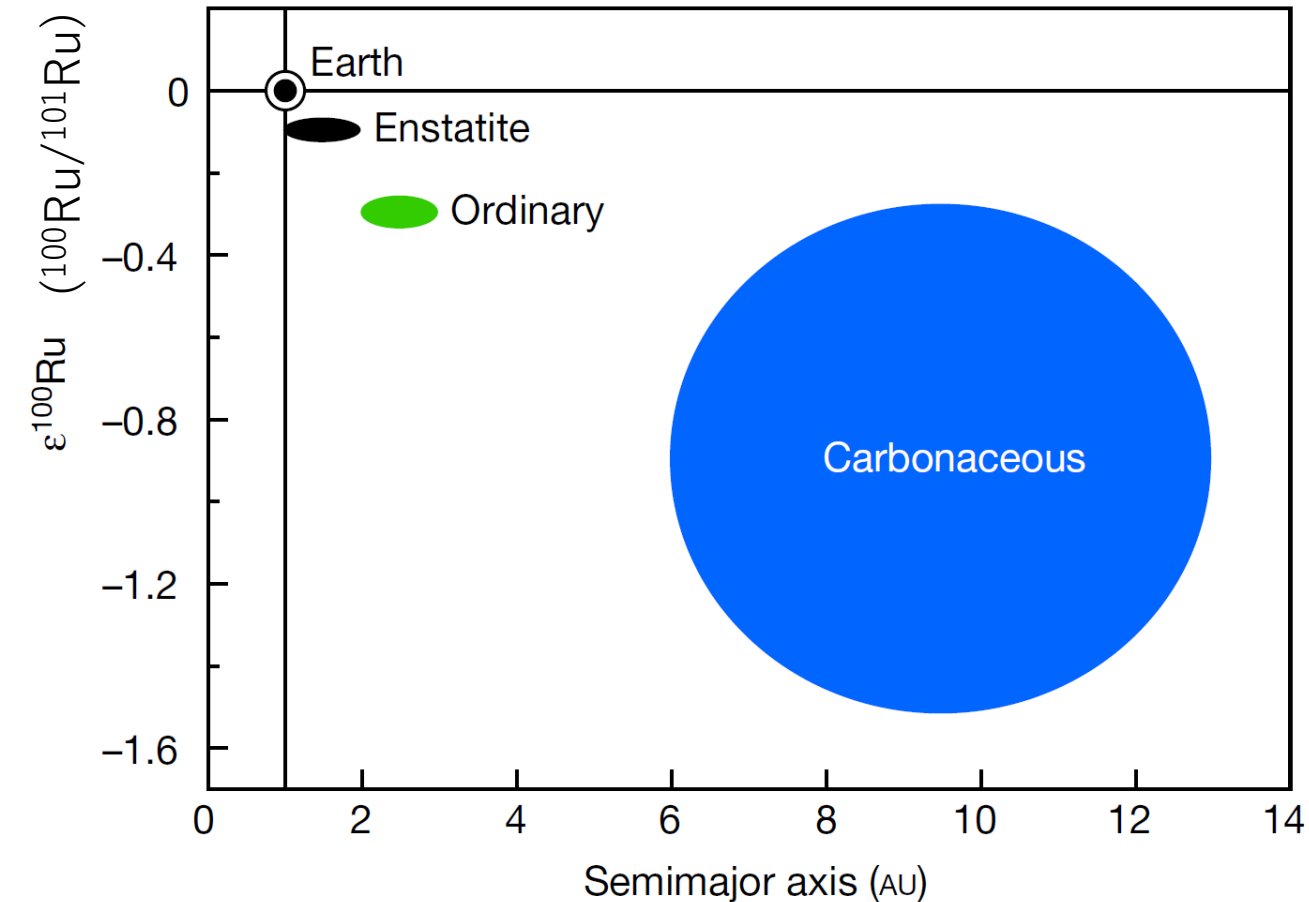
→ マントルの~0.5%のコンドライト物質がコア形成後に集積
(太陽系形成から30 Myr以降；
Kleine et al., 2002)



強親鉄元素：HSE

Walker, 2009

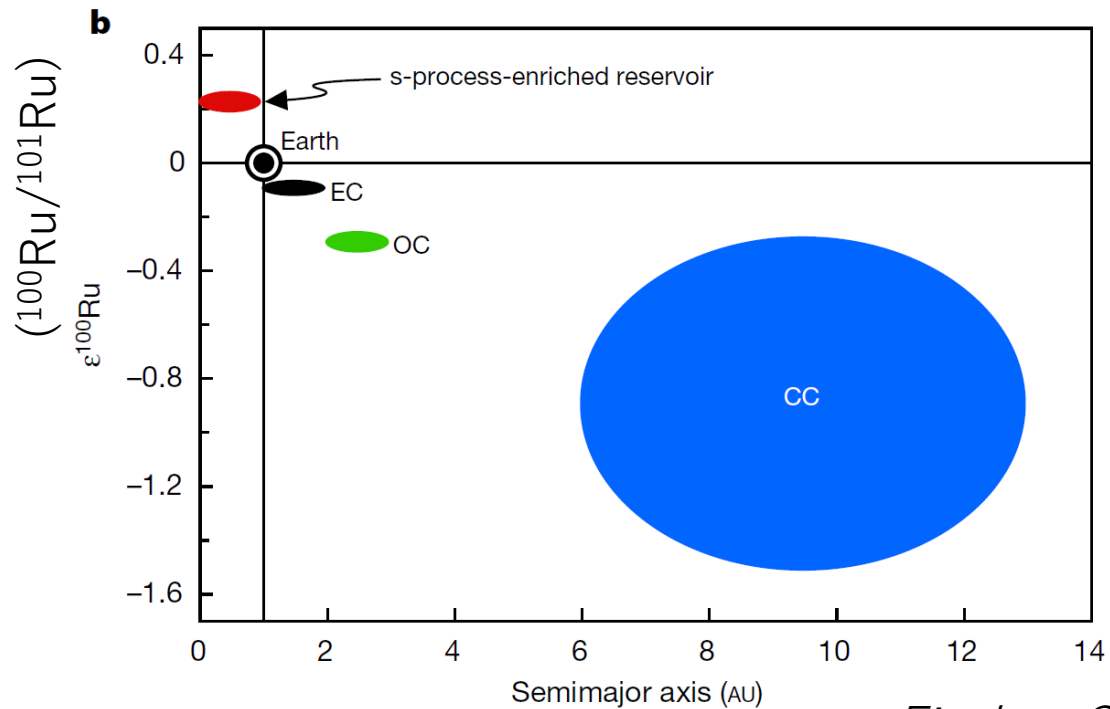
レイトベニア物質？



Fischer-Gödde & Kleine, 2017

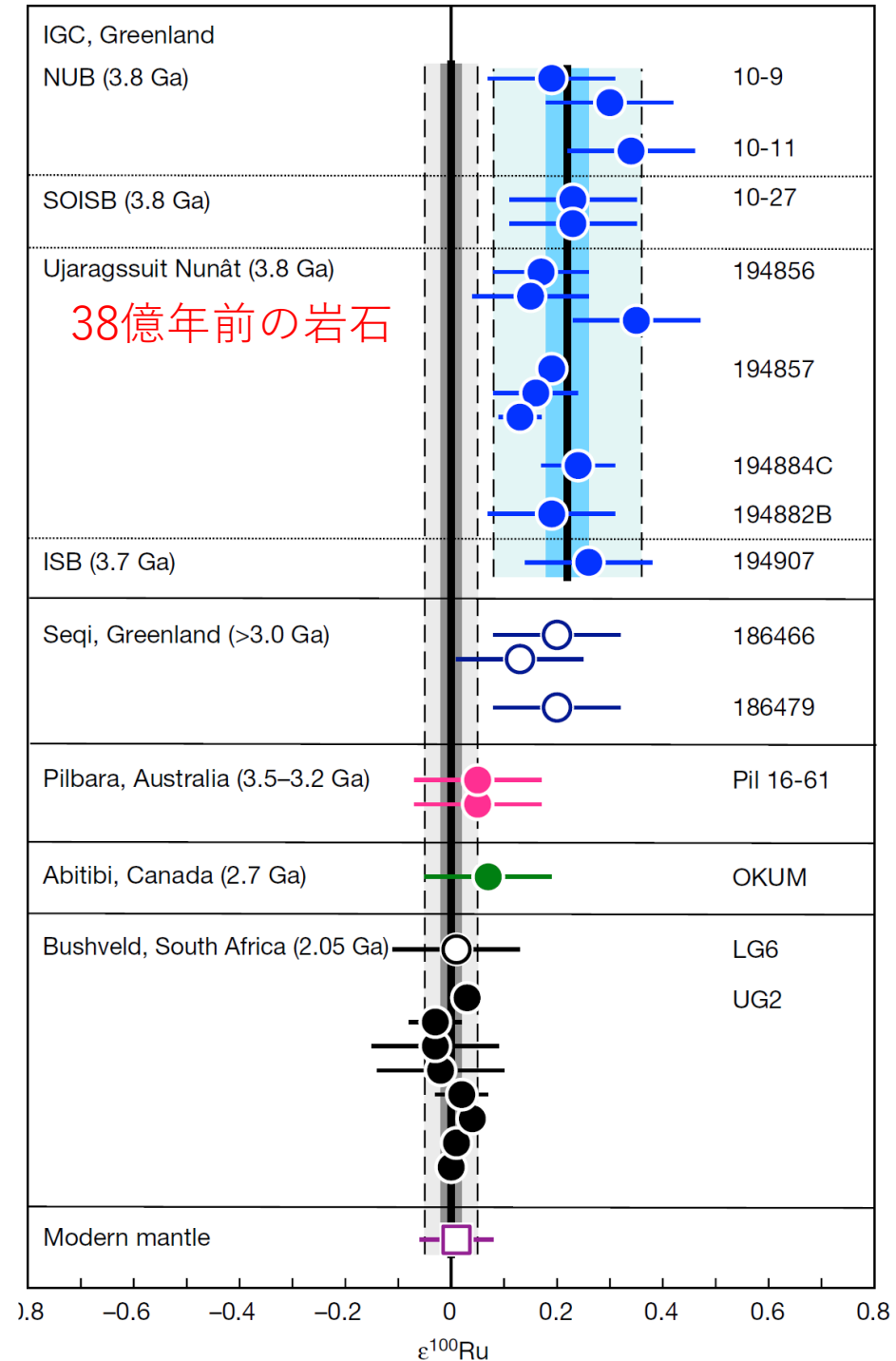
- Ru（強親鉄元素）からの制約
- マントル中のRuはほぼすべてレイトベニア起源
- 地球マントルと同じRu同位体比をもつ隕石は存在しない

レイトベニア物質



Fischer-Gödde et al., 2020

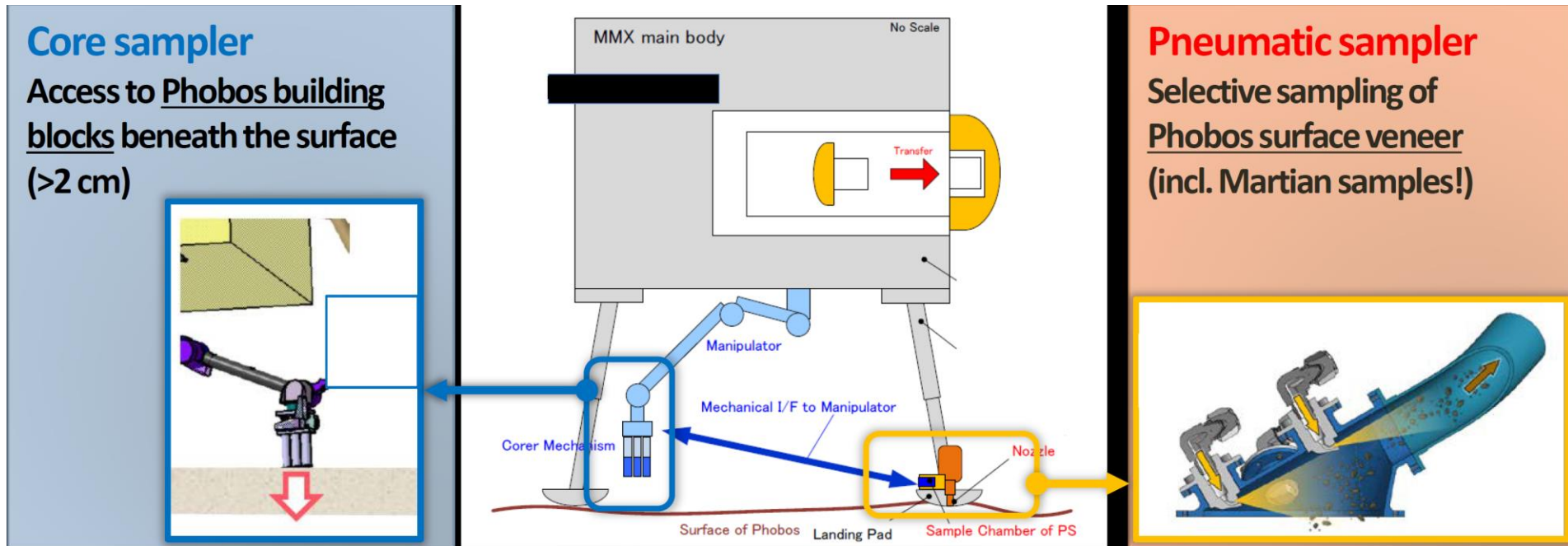
- 38億年前の超苦鉄質岩における ^{100}Ru の過剰
- “前レイトベニア”物質 (^{100}Ru -rich) と炭素質コンドライト的なレイトベニア物質 (^{100}Ru -poor) の混合



38億年前の岩石

火星衛星探査計画 (MMX)

- 2024年打上、2029年地球帰還 (Kuramoto et al., 2018)
- 火星衛星フォボス表面から試料 (>10 g) を回収 (Usui et al., 2020)
 - C (Core)-sampler
 - P (Pneumatic)-sampler
- **Sample Analysis Working Team (SAWT):** 試料分析計画を検討



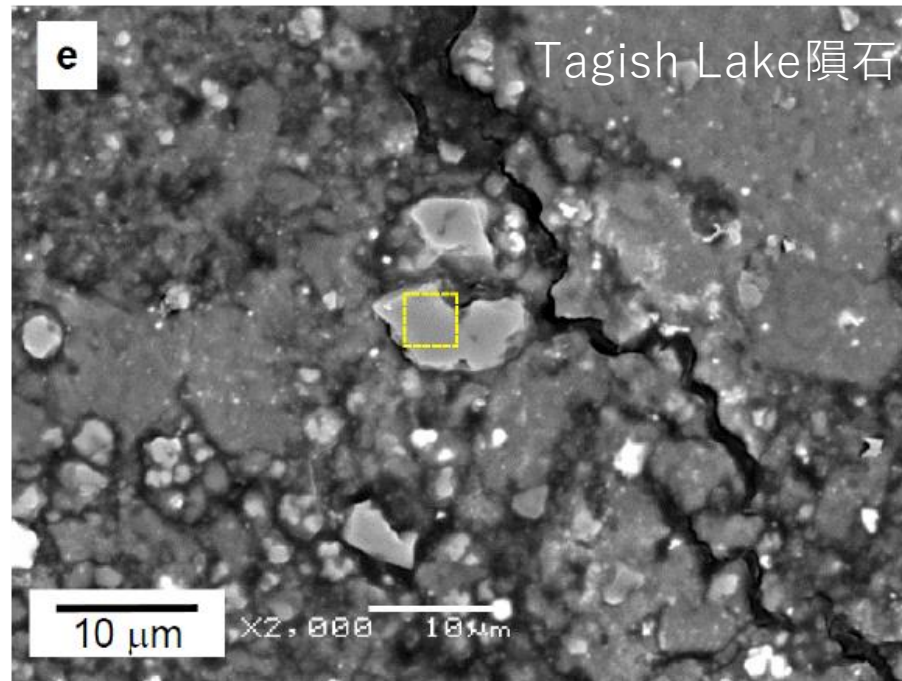
MMXの科学目標

- 火星衛星の起源を解明し、惑星形成過程と物質輸送を制約する。
 - 【小惑星捕獲起源】地球型惑星領域へ供給される始原物質の組成とその移動過程を解明する。
 - 【巨大衝突起源】地球型惑星領域における巨大衝突と衛星形成過程を理解する。
 - Deimosの起源に新たな制約を加える。
- 火星衛星からの視点で火星圏進化史に新たな知見を加える。
 - 火星圏における衛星の表層進化の素過程に関する基本的描像を得る。
 - 火星表層変遷史に新たな知見と制限を加える。
 - 火星気候の変遷に関わる火星大気物質循環のメカニズムに制約を与える。

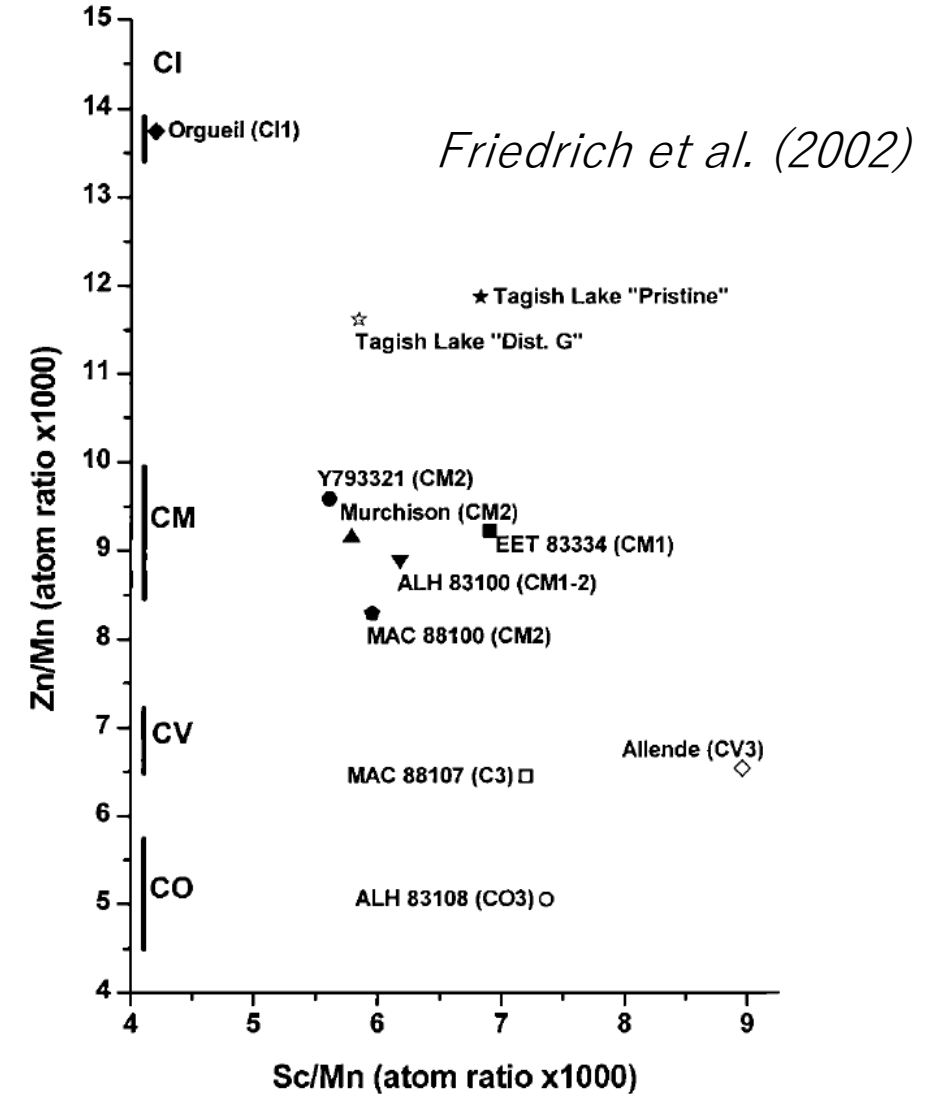
➡ どのような物質か？いつ形成したか/捕獲されたか？

予想される岩石学的組織と化学組成 (1)

- 火星衛星の表面スペクトルはD型小惑星に似ている (Fraeman et al., 2012)
- Tagish Lake隕石はD型小惑星に由来 (Hiroi et al., 2001)

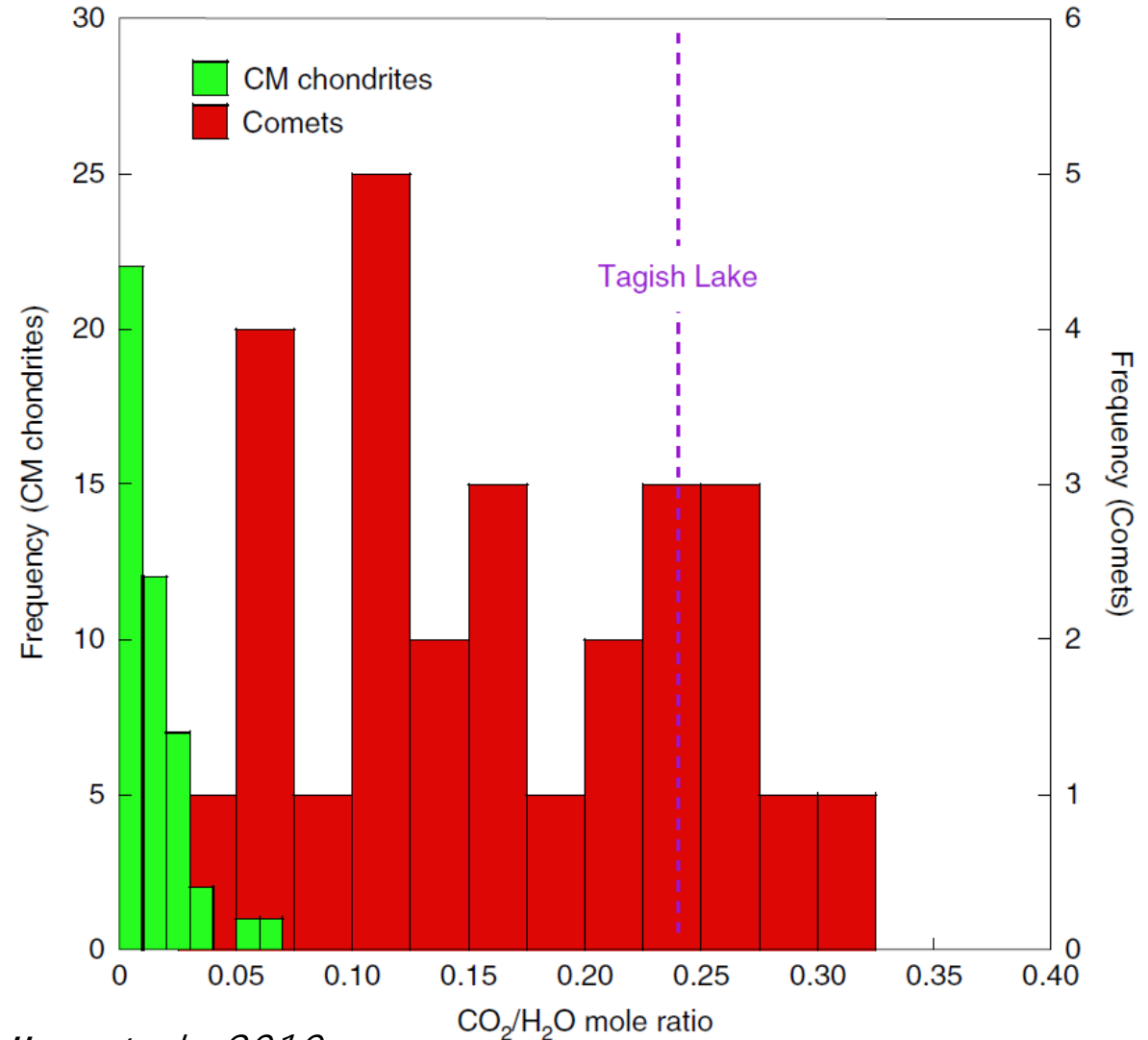


Fujiya et al. (2019)



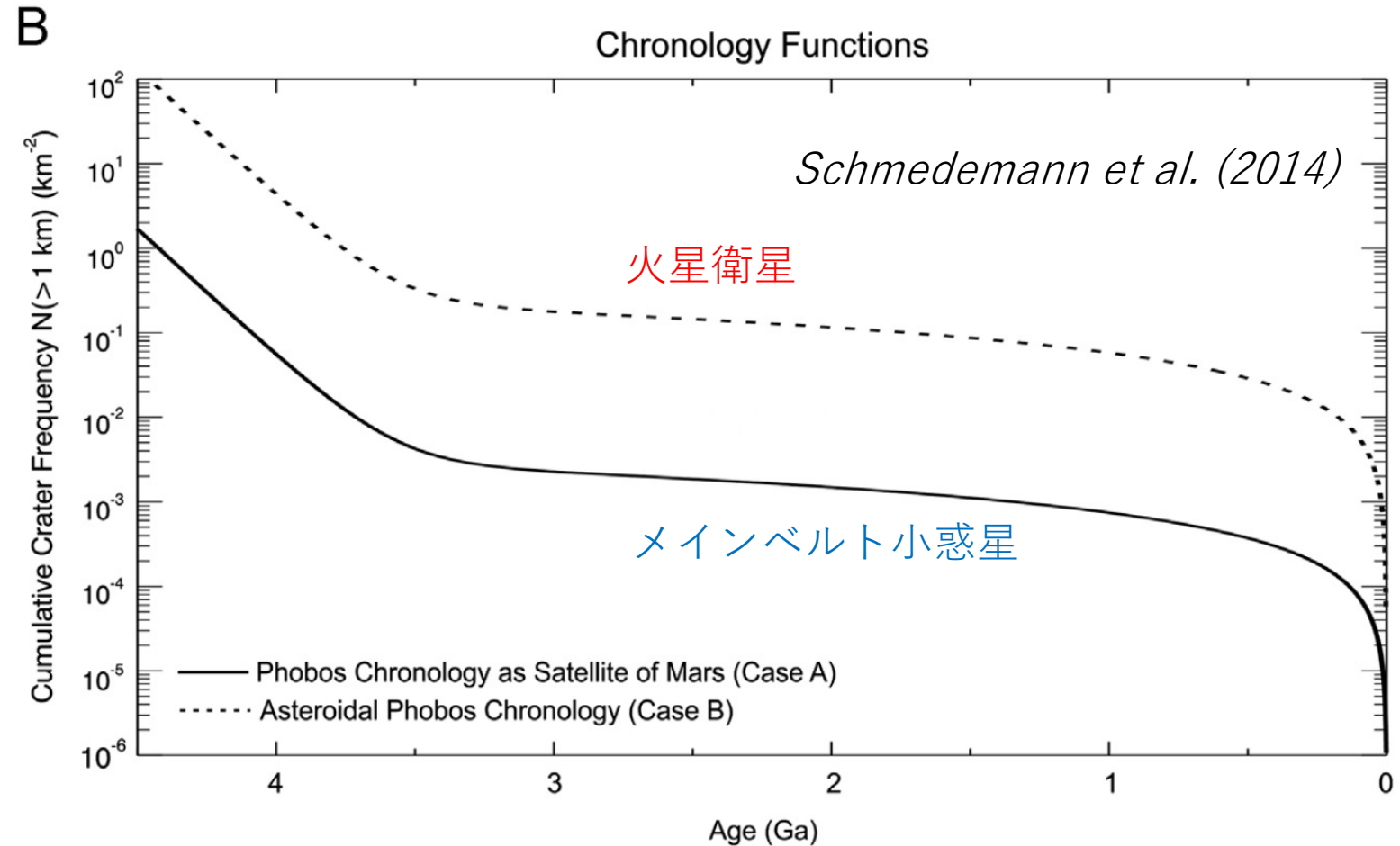
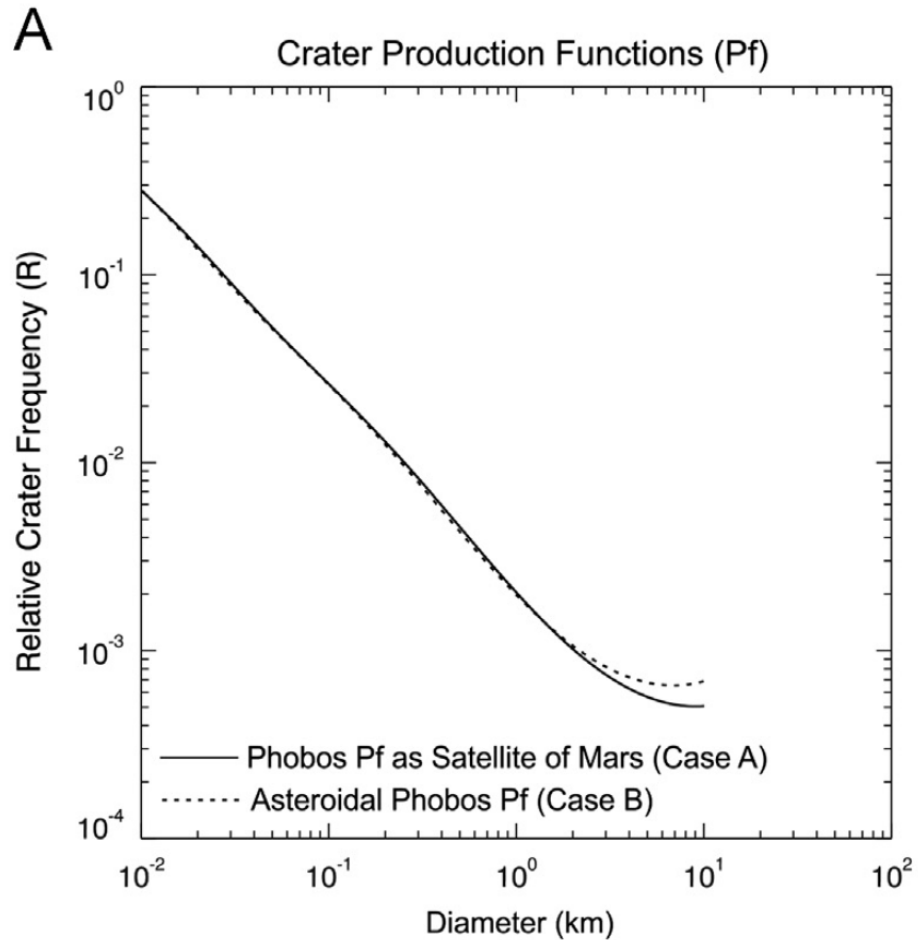
捕獲小惑星の形成場所

- 揮発性物質存在量による制約
 - Tagish Lake隕石は彗星と同程度 CO_2 iceを含んでいた
- ➔ 巨大惑星による太陽系外縁天体の散乱？ (Levison et al., 2009; Vokrouhlický et al., 2012)



Fujiya et al., 2019

いつ衛星は捕獲されたか？

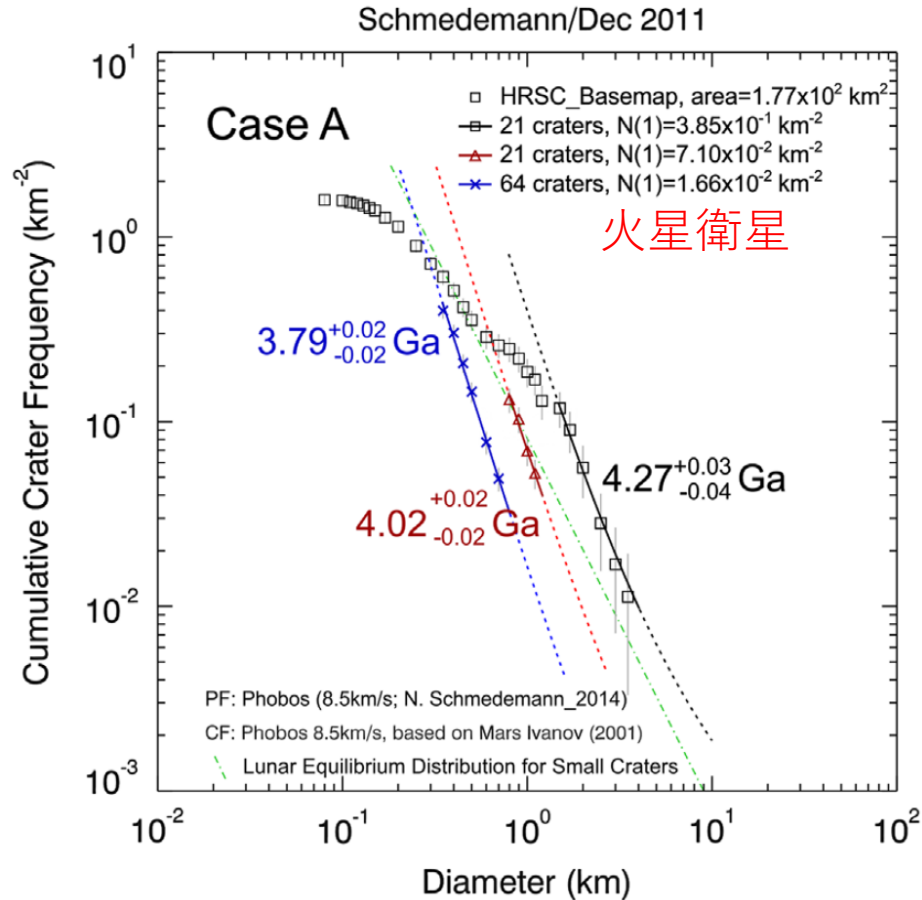


- クレーター密度とリターンサンプルの年代から制約

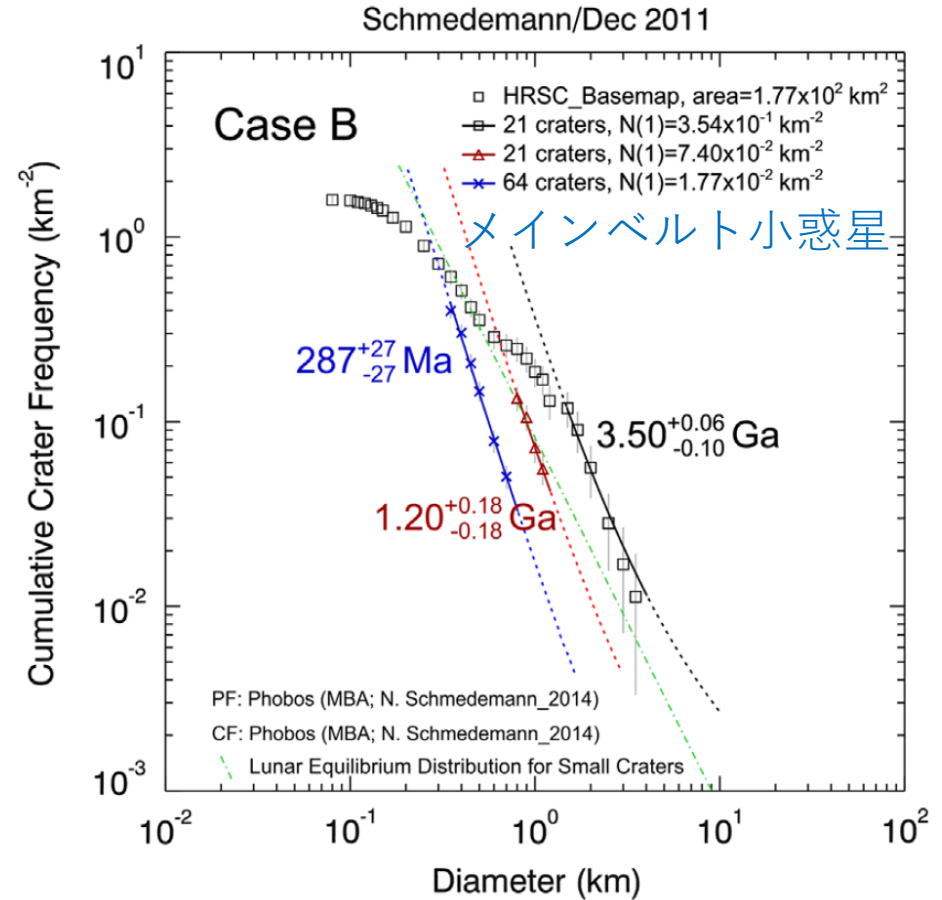
いつ衛星は捕獲されたか？

B

Average Area - Satellite of Mars Chronology



Average Area - Asteroidal Chronology

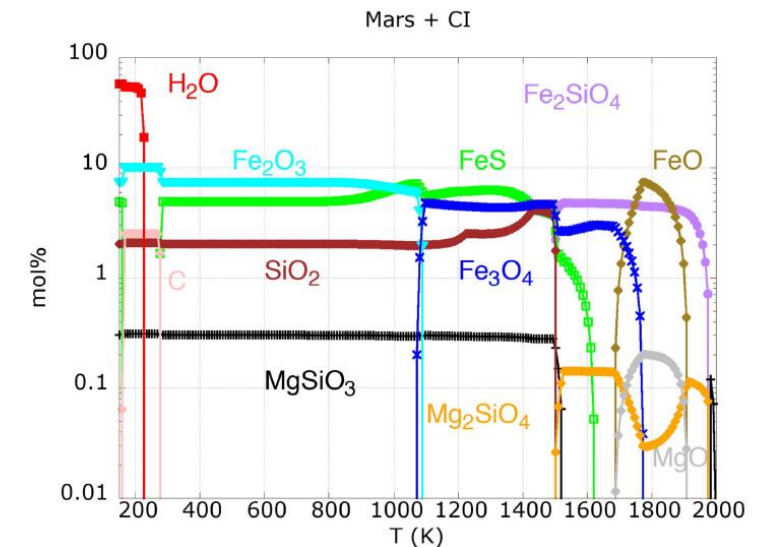
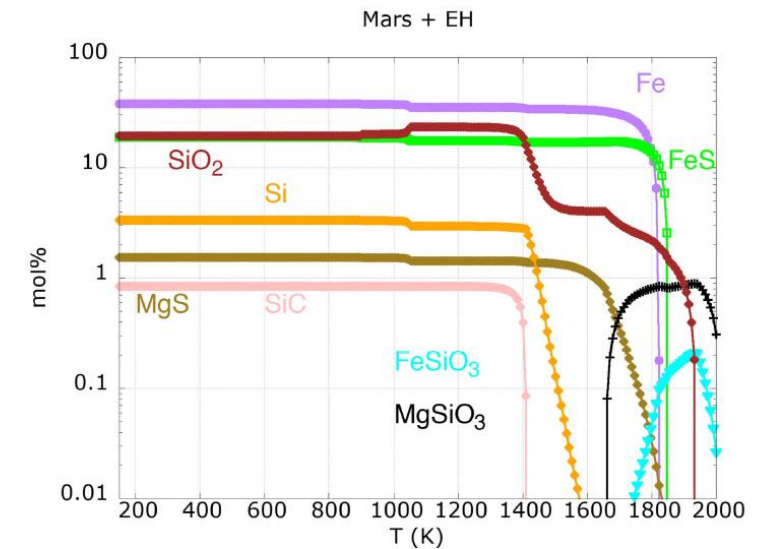
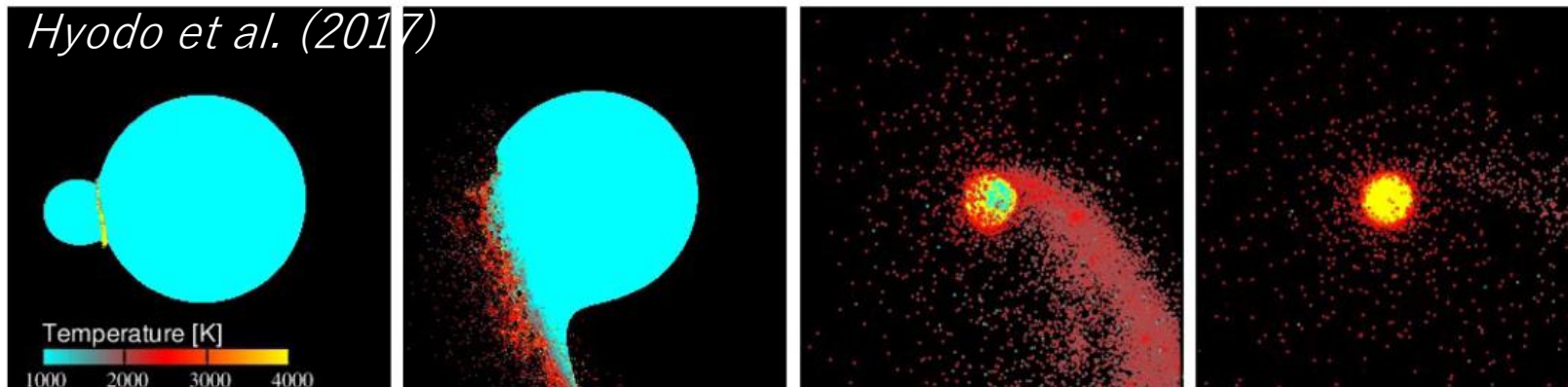


Schmedemann et al. (2014)

- クレーター密度とリターンサンプルの年代から制約

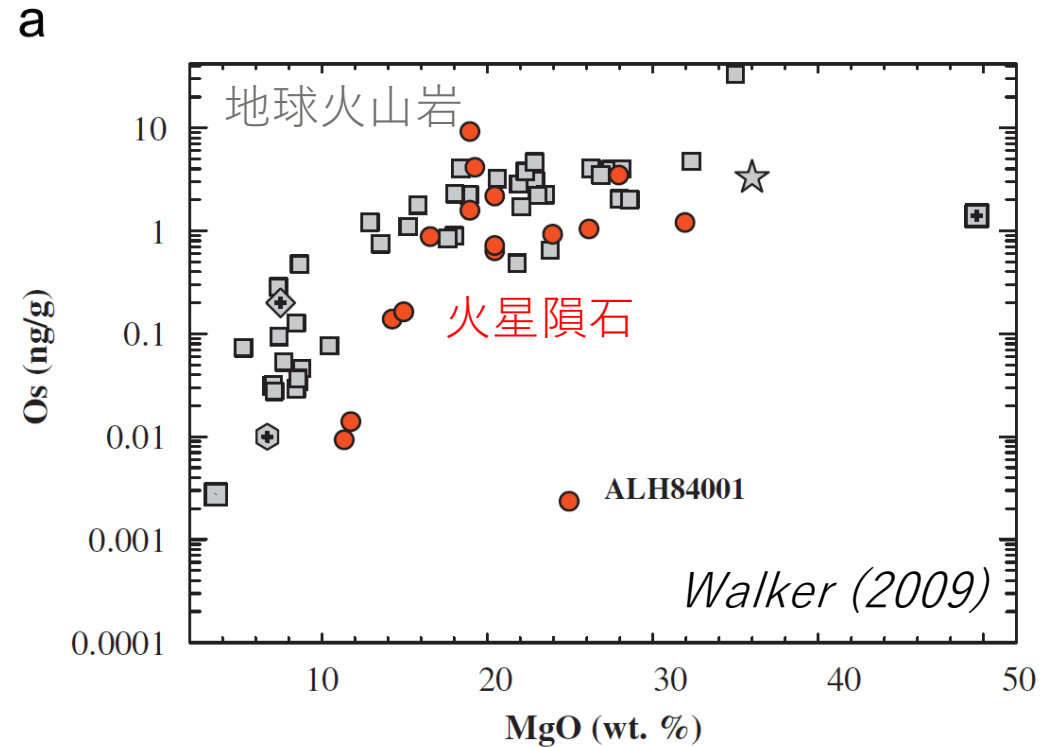
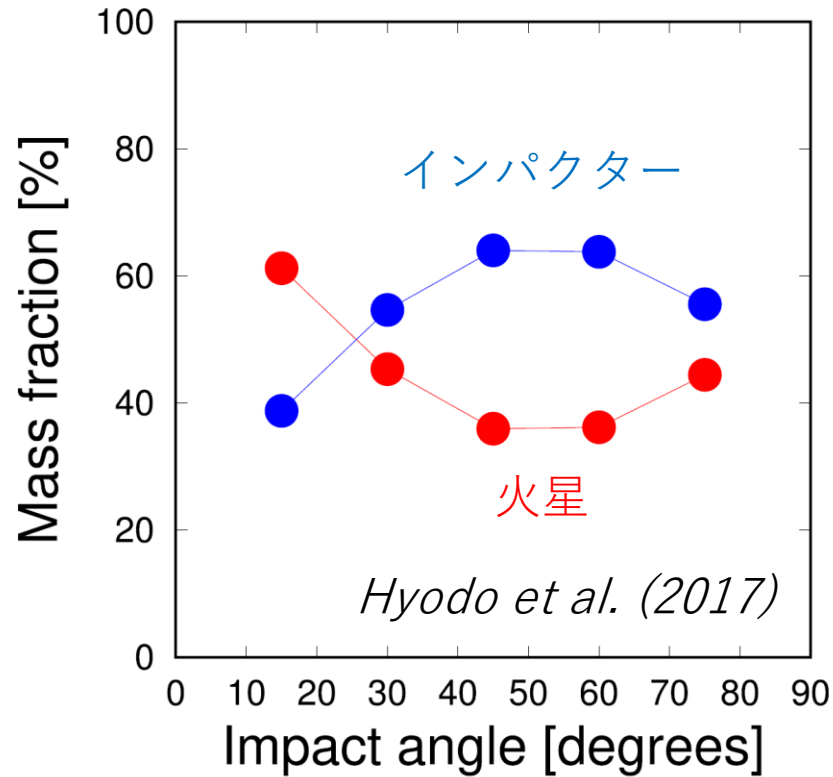
予想される岩石学的組織と化学組成 (2)

- フォボス材料物質は2000 K程度まで加熱される (Hyodo et al., 2017)
- フォボスの構成物質を平衡計算によって予測 (Pignatale et al., 2018)



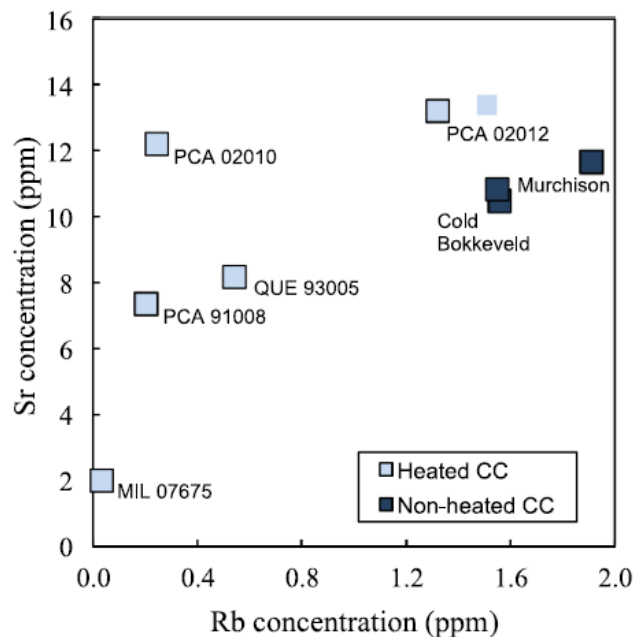
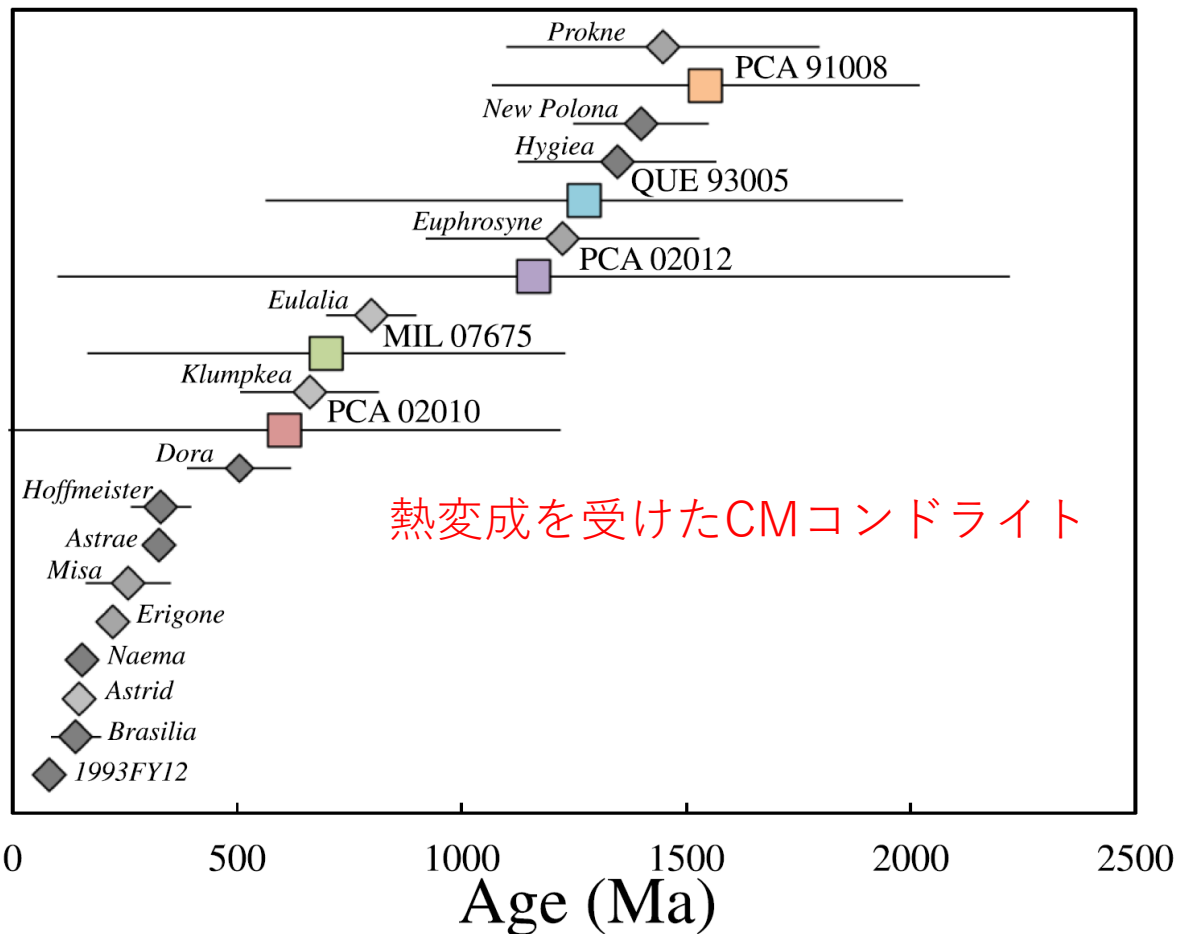
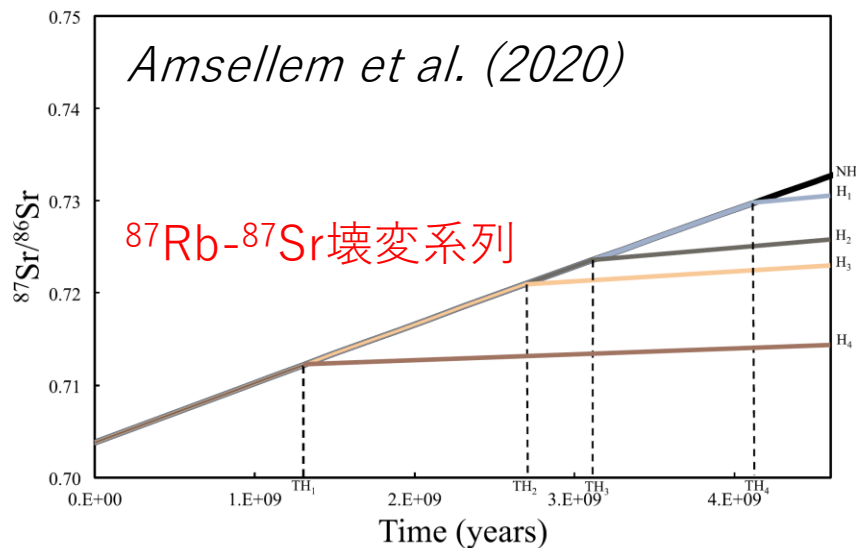
Pignatale et al. (2018)

インパクトター物質



- フォボスはほぼ等量のインパクトター物質と火星物質からなる (Hyodo et al., 2017)
- インパクトターがコンドライト的ならば強親鉄元素を測定できる

ジャイアントインパクトの年代



- 揮発性物質を失った年代を推定する

まとめ

- 太陽系内の物質輸送：
天体の組成、進化、揮発性物質の供給
(いつ、どのような物質?)
- MMX：
火星衛星フォボスからのサンプルリターンミッション
(衛星の起源 = いつ、どのような物質?)
- SAWTによる試料分析計画の検討