

宇宙物質の元素組成データベースを用いた多変量解析に基づくフォボスの起源の制約

平田佳織^{1,2}, 臼井寛裕², 兵頭龍樹², 玄田英典³, 深井稜汰²,
David J. Lawrence⁴, Nancy L. Chabot⁴, Patrick N. Peplowski⁴, 草野広樹⁵

¹東京大学,²JAXA 宇宙科学研究所,³東工大 ELSI,

⁴Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory,⁵量子科学技術研究開発機構

火星衛星、フォボスとダイモスの形成過程には2つの仮説、小惑星捕獲説と巨大衝突説が提案されており、現在も議論が続いている。宇宙航空研究開発機構（JAXA）により計画されている火星衛星探査計画（MMX）では天体の元素組成を測定するためのガンマ線中性子線分光計（MEGANE）が探査機に搭載される。本研究の目的は、宇宙物質の元素組成データベースの多変量解析により火星衛星の形成仮説を決定するための MEGANE データの解析手法を提供することである。

本研究ではフォボスのバルク組成を火星と小惑星を端成分とした線形混合により表現する混合モデルを定義した。端成分の組成として、バルクシリケート火星と12種類の隕石サブグループを仮定し、MEGANEで測定できる元素の中から6種類の親石元素（鉄、ケイ素、酸素、カルシウム、マグネシウム、トリウム）を用いて計算を行った。任意のフォボス組成とコンドライト組成に対して、MEGANEの観測精度 E_p と組成バリエーションに対応した相対誤差を仮定して、混合率の範囲を計算した。この混合率の値に基づいて任意のフォボス組成に対応する形成仮説を判断した。形成仮説がどの程度判別可能であるかを評価する指標として判別効率を定義し、モデルで仮定したパラメータへの依存性を定量化した。

計算により、フォボスの組成と対応する形成仮説6元素組成空間において可視化された。衝突説においてフォボスが火星物質（50%）と衝突天体物質（50%）から構成されると仮定すると、観測精度 $E_p = 30\%$ の場合、全体の65%の組成で形成仮説がただ一つに決定されると推定された。観測精度が20%から10%に減少すると、判別効率は74%から87%へと増加した。衝突説における物質の混合率を30-70%と保守的に設定した場合でも、導かれる判別効率には大きく影響しなかった。判別効率は、MEGANEの観測期間と観測軌道から決まる観測精度 E_p に依存する。MEGANEの機器性能とMMXの運用計画からは20-30%程度の観測精度が示唆されており、この場合判別効率は70%程度になることが示唆される。

本手法を用いると、捕獲天体あるいは衝突天体の小惑星タイプも特定される可能性がある。MEGANEで期待される20%の観測精度を仮定した場合、約40%の組成領域において小惑星タイプが一意に決定された。また、計算に用いる元素としてカリウム加えることにより、6元素を用いた場合と比べて5-10%程度判別効率が向上することが示された。

2022/2/9 惑星圏シンポジウム2022



MEGANE 眼鏡

MARS-MOON EXPLORATION WITH GAMMA RAYS AND NEUTRONS

宇宙物質の元素組成データベースを用いた 多変量解析に基づくフォボスの起源の制約

平田佳織 (東京大学/宇宙研), 臼井寛裕 (宇宙研), 兵頭龍樹 (宇宙研), 玄田英典 (東工大 ELSI), 深井稜汰 (宇宙研),
David J. Lawrence (JHUAPL), Nancy L. Chabot (JHUAPL), Patrick N. Peplowski (JHUAPL), 草野広樹 (量子科学技術研究開発機構)

火星衛星フォボスとダイモス、探査計画MMX

MMXミッションでは火星衛星の起源の解明が目指されている

■ 2つの火星衛星：フォボス、ダイモス

■ 小惑星捕獲説 Pollack+ (1979), Burns+ (1992), Pajola+ (2013)

- D型小惑星と類似したスペクトル
Burns (1978), Murchie+ (1991), Rosenblatt+ (2016), Hyodo+ (2017a)

■ 巨大衝突説 Hesselbrock & Minton (2017), Hyodo & Genda (2018)

- 黄道面に沿った近円軌道 Burns (1992), Rosenblatt (2011)

2つの火星衛星、フォボスとダイモス



■ MMX : Martian Moons eXploration Kuramoto+ (2019, 2021)など

- 2024年打ち上げ、2025-2028年火星圏で観測予定
Nakamura+ (2021)

科学観測

Kameda+ (2021), Senshu+ (2021), Matsumoto+ (2021), Chabot+ (2021), Barucci+ (2021), Yokota+ (2021), Michel+ (2022), Cho+ (2021)

- TENGOO/OROCHI (地形カメラ/可視分光計)
- LIDAR (レーザ高度計)
- MEGANE (ガンマ線中性子線分光計)
- MIRS (近赤外分光計)
- CMDM (ダストカウンタ)
- MSA (イオンエネルギー質量分析器)
- 着陸ローバ

サンプルリターンによる詳細な物質分析

Usui+ (2020), Fujiya+ (2021)

- 科学目的：火星衛星の起源、火星圏の進化の解明

火星衛星の形成過程とバルク元素組成

バルク元素組成データは火星衛星の起源に関する情報を保持している可能性がある

■ 形成過程・条件を反映する量：バルク元素組成

Hyodo+ (2017, 2019), Pignatale+ (2018)

- 火星衛星を構成するビルディングブロック
 - 捕獲説 … 捕獲された小惑星物質
 - 衝突説 … 火星由来物質 + 衝突した小惑星物質

火星衛星のバルク元素組成を決定する要因

■ 捕獲説

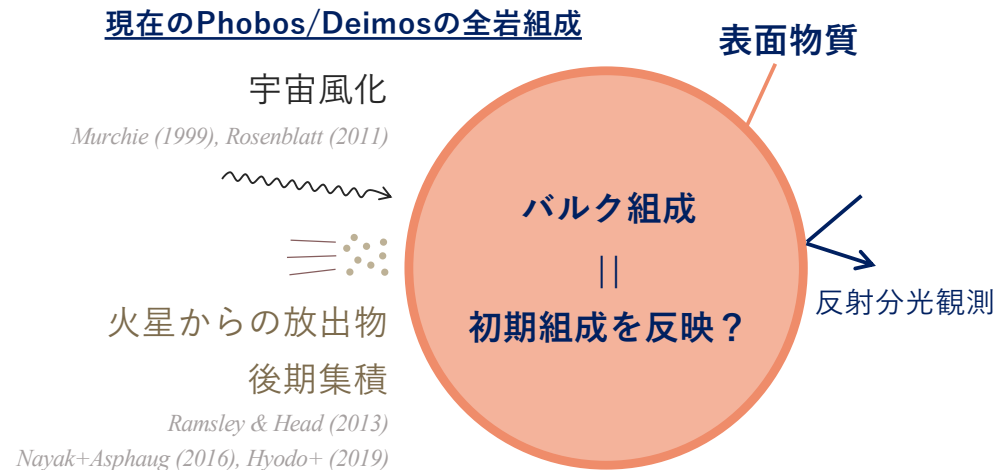
- 捕獲天体の種類 (組成)

■ 衝突説

- 衝突天体の種類 (組成)
- 衝突(天体)の規模
- 衝突速度、角度
- 円盤の温度上昇、脱ガス

■ 問題：反射分光データは初期のバルク組成を反映していない可能性がある。

- 反射分光データは表層プロセスの影響を受けた表面物質に関する情報 (鉱物組成、粒径など) を反映。



火星イジェクタ：<1250 ppm (地面最上部 <0.4 m) *Ramsley & Head (2013)*
後期集積：~1,000 ppm *Hyodo+ (2019)*

MEGANE/MMX (ガンマ線中性子線分光計)

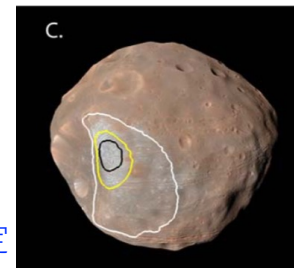
MEGANEによりPhobosのバルク元素組成が測定される

■ MEGANE (Mars-moon Exploration with GAMMA rays and NEutrons)

- ガンマ線と中性子線を検出
 - 宇宙線の照射により生成
 - **メリット** 深さ~1 mまでの物質を測定 *Prettyman (2014)*
 - 広い視野
 - **デメリット** 低い空間分解能, **メリット** バルク組成の測定
 - 主要元素(Fe, Siなど) や放射性元素 (K, U, Thなど)

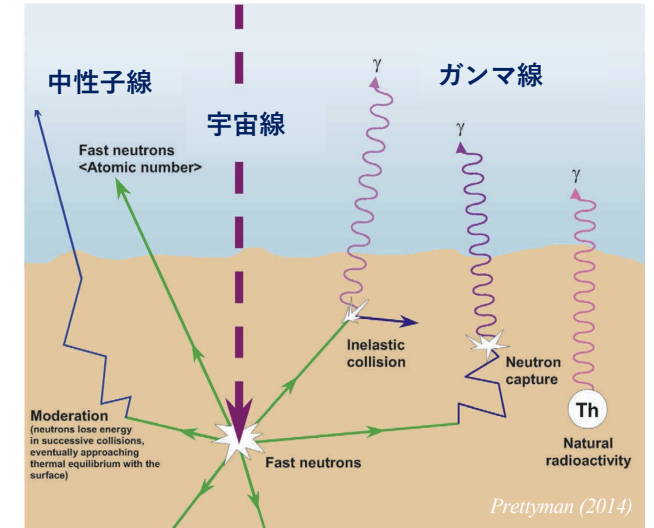
■ 親石元素 (Fe, O, Si, Ca, Mgなど) はフォボスの初期バルク組成を保持している可能性が高い。

MEGANEの空間分解能



Lawrence+ (2019)

宇宙線照射によるガンマ線と中性子線の生成



Prettyman (2014)

観測誤差や捕獲/衝突天体の組成バリエーションなどの実際の条件を考慮して、MEGANEにより得られるデータから形成仮説を判別することが可能か？

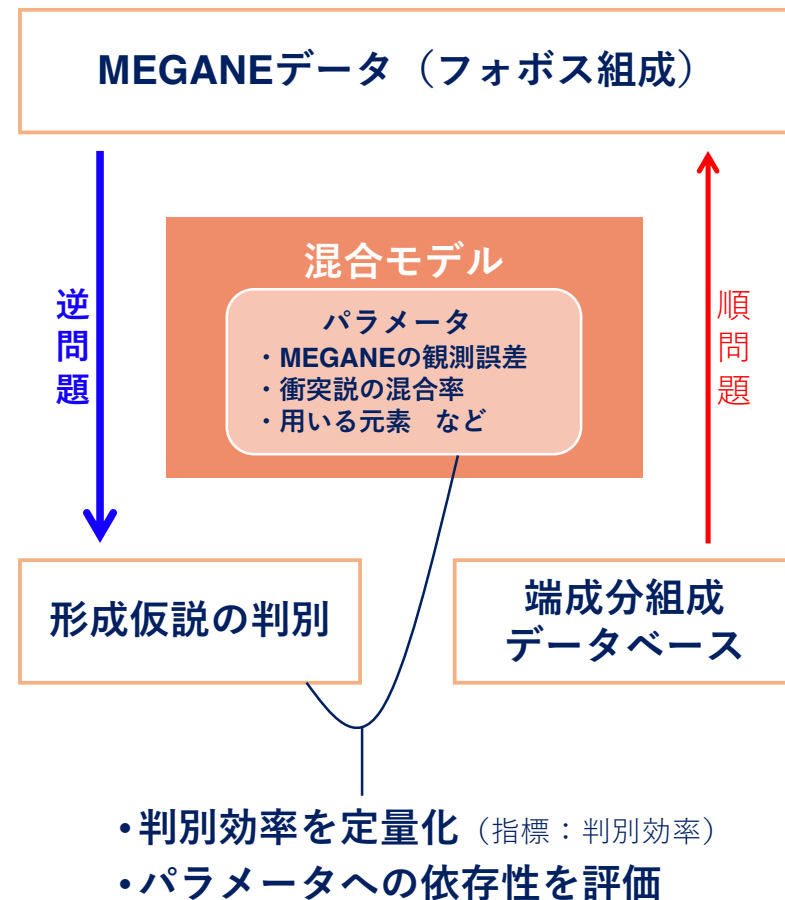
本研究の目的、アプローチ

- 目的：MEGANEデータからフォボスの形成過程*を決定する解析手法の確立

*形成仮説、捕獲/衝突天体の種類、混合率 など

■ アプローチ

- フォボスの組成を表現する混合モデルを構築
- MEGANEデータから形成仮説を判別する手法を確立
- 形成仮説の判別可能性を定量化
- モデルで仮定したパラメータへの依存性を評価
 - パラメータ：MEGANEの観測誤差、衝突円盤中の脱ガス率など



混合モデルのコンセプト

フォボスの組成 = 火星由来物質 + 小惑星由来物質の2成分混合により表現

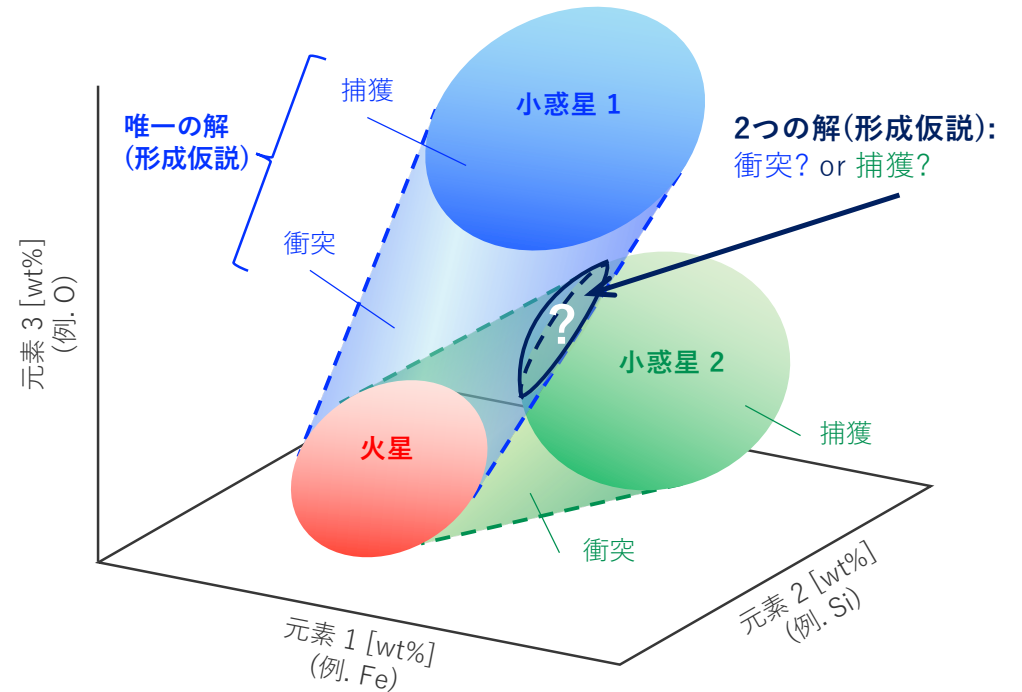
■ 順問題：形成シナリオ → フォボス組成

- 火星組成、小惑星組成のデータベース
- (小惑星組成の)混合率 r
 - 捕獲説 … $r = 100\%$
 - 衝突説 … $0\% < r < 100\%$ (衝突条件により変動)

■ 逆問題：フォボス組成 → 形成シナリオ

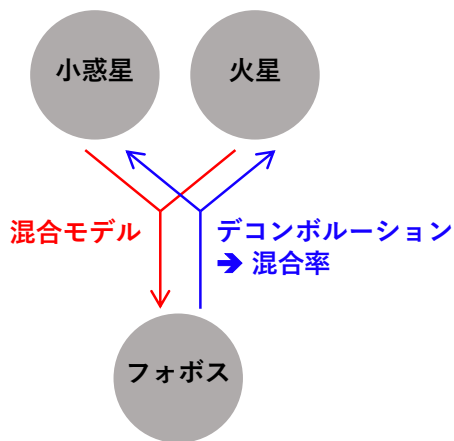
- 混合率 r の推定
- 形成仮説の判別

フォボス組成を表す混合モデルの概念図

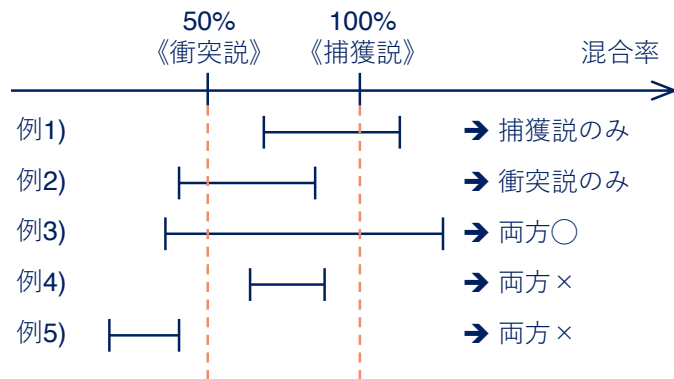


混合モデルを用いた解析の流れ

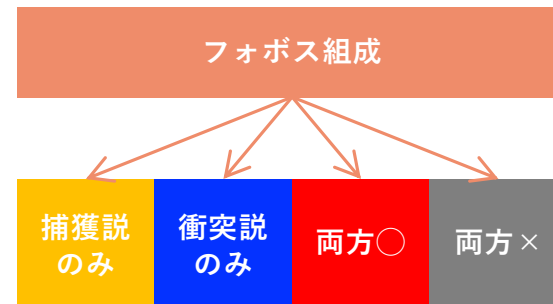
1. フォボス組成から、小惑星と火星の混合を仮定した場合の混合率を推定



2. 推定された混合率の値をもとに形成仮説を判別



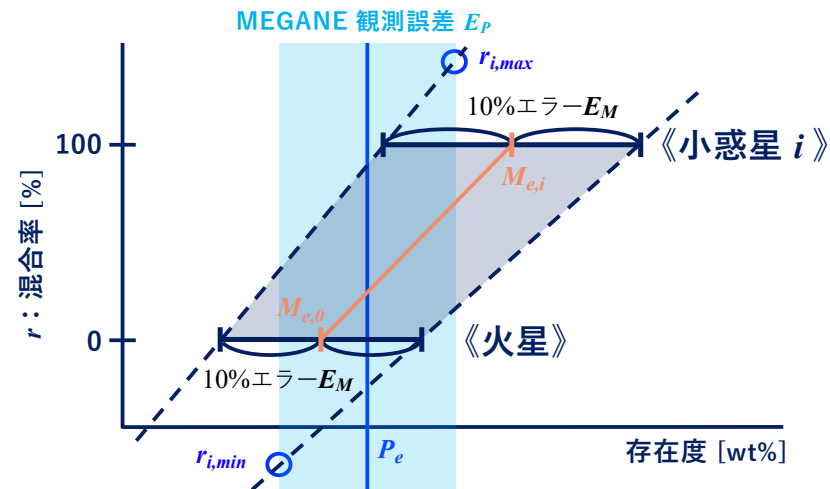
3. 捕獲/衝突説それぞれにより説明できる小惑星の種類数からフォボス組成を分類



1. 混合率の計算

混合方程式： $P = MR_i, R_i = M^{-1}P$

- 元素：Fe, O, Si, Ca, Mg, Th (親石元素, MEGANEにより測定可能)
- 仮定した12種類の小惑星組成 ($i = 1, 2, \dots, 12$):
CI, CM, CO, CV, CK, CR, Tagish Lake, H, L, LL, EH, EL



Phobos 組成	組成 Matrix				Mixing Ratio (小惑星 <i>i</i>)
$\begin{pmatrix} P_{Fe} \\ P_O \\ P_{Si} \\ P_{Ca} \\ P_{Mg} \\ P_{Th} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} M_{Fe,0} & M_{Fe,1} & & M_{Fe,12} \\ M_{O,0} & M_{O,1} & \dots & M_{O,12} \\ M_{Si,0} & M_{Si,1} & & M_{Si,12} \\ M_{Ca,0} & M_{Ca,1} & & M_{Ca,12} \\ M_{Mg,0} & M_{Mg,1} & \dots & M_{Mg,12} \\ M_{Th,0} & M_{Th,1} & & M_{Th,12} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 - r_i \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ r_i \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} < i$			
	<small>火星組成 Taylor (2013)</small>	<small>小惑星組成 Alexander (2019ab)</small>			

書き下すと...

$$P_e = M_{e,0}(1 - r_{e,i}) + M_{e,i}r_{e,i}$$

$$\Rightarrow r_{e,i} = \frac{M_{e,0} - P_e}{M_{e,0} - M_{e,i}} \quad \left[\begin{array}{l} e: \text{元素} \\ i: \text{小惑星の種類} \end{array} \right]$$

エラーを考慮した最小値・最大値

$$[r_{e,i,min}, r_{e,i,max}] \quad (e = 1, \dots, 6)$$

6元素の共通部分

$$[r_{i,min}, r_{i,max}] \text{ 小惑星 } i \text{ 物質の混合率}$$

- E_M (=組成バリエーション) ~ 10% (相対誤差)
- E_P (=MEGANEの観測誤差) ~ 0, 10, 20, 30% (相対誤差)

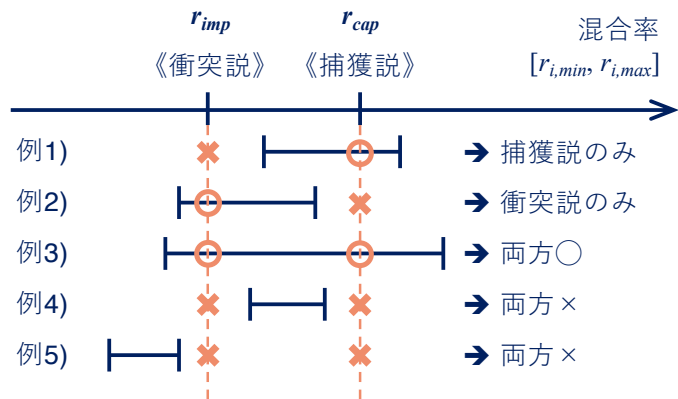
パラメータ 1 : E_P

2. 形成仮説の判別

■ 混合率が $\left(\begin{matrix} r_{cap} \\ r_{imp} \end{matrix} \right)$ を含む \rightarrow $\left(\begin{matrix} \text{捕獲説} \\ \text{衝突説} \end{matrix} \right)$ で説明可能

■ $r_{cap} = 100\%$ 、 $r_{imp} = 50\%*$ と仮定した。

*衝突条件により変動 パラメータ 2 : r_{imp}



		n_{cap}	
		+	0
n_{imp}	+	ケース3	ケース2
	0	ケース1	ケース4

3. MEGANEデータの分類

■ 12種類の小惑星組成全てで形成仮説を判定

■ n_{cap} = 捕獲説で説明できる小惑星の種類の数

n_{imp} = 衝突説で説明できる小惑星の種類の数

■ n_{cap} , n_{imp} に基づいてケース1-4に分類

- **ケース1** : 捕獲説のみにより説明できる
- **ケース2** : 衝突説のみにより説明できる
- **ケース3** : 捕獲説・衝突説の両方で説明できる
- **ケース4** : 捕獲説・衝突説の両方で説明できない

■ MEGANEデータ P (6次元) と形成仮説の対応を

定量化する指標：判別効率 $D_{hypothesis}$

$$\text{判別効率} = \frac{\text{ケース1} + \text{ケース2} \text{ (形成仮説が一意に決定できる組成)}}{\text{ケース1} + \text{ケース2} + \text{ケース3} \text{ (組成領域全体)}}$$

2 元素組成による形成仮説の判別

Fe-Si組成により40%以上の領域で形成仮説の判別が可能

■ 外側の領域で形成仮説の判別が可能になる傾向

- BSM(火星)組成側 … 衝突説、小惑星組成側 … 捕獲説に決定

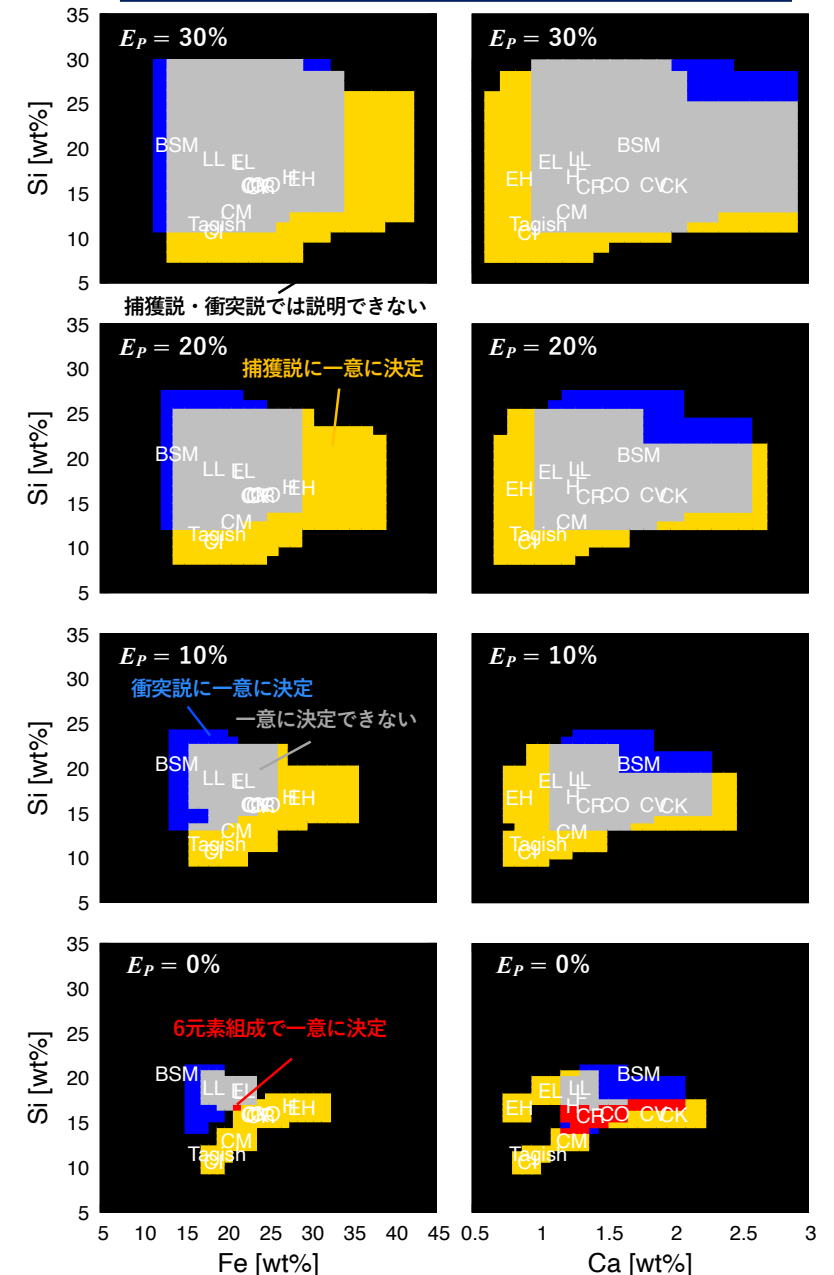
■ MEGANEの観測誤差 E_p が小さくなるにしたがって、

- 捕獲説あるいは衝突説により説明できる組成領域が小さくなる。
- 形成仮説が一意に決定される領域が比較的大きくなる。
 - $E_p = 30\%$ (最大)でも30-40%の領域で形成仮説が一意に決定される。

■ 形成仮説が決定される領域の割合：Fe-Si > Ca-Si

- 端成分組成のバリエーションが大きい
- Fe-Si組成が形成仮説判別のために比較的重要な情報となる

Fe-Si、Ca-Si組成とそこから判別された形成仮説



6 元素組成による形成仮説の判別、 パラメータ①：MEGANEの観測誤差

形成仮説の判別可能性は観測誤差に依存、20%の観測誤差でも70%以上の領域で判別可能

E_P [%]	$D_{hypothesis}$ [%]	捕獲説 [%]	衝突説 [%]
30	64.6	34.3	30.2
20	73.8	39.0	34.8
10	86.6	45.2	41.3
0	95.8	45.1	50.7

■ MEGANEによる誤差 E_P が小さくなるにしたがって $D_{hypothesis}$ が大きくなる。

- 捕獲説・衝突説それぞれに決定される組成領域の大きさは同程度。

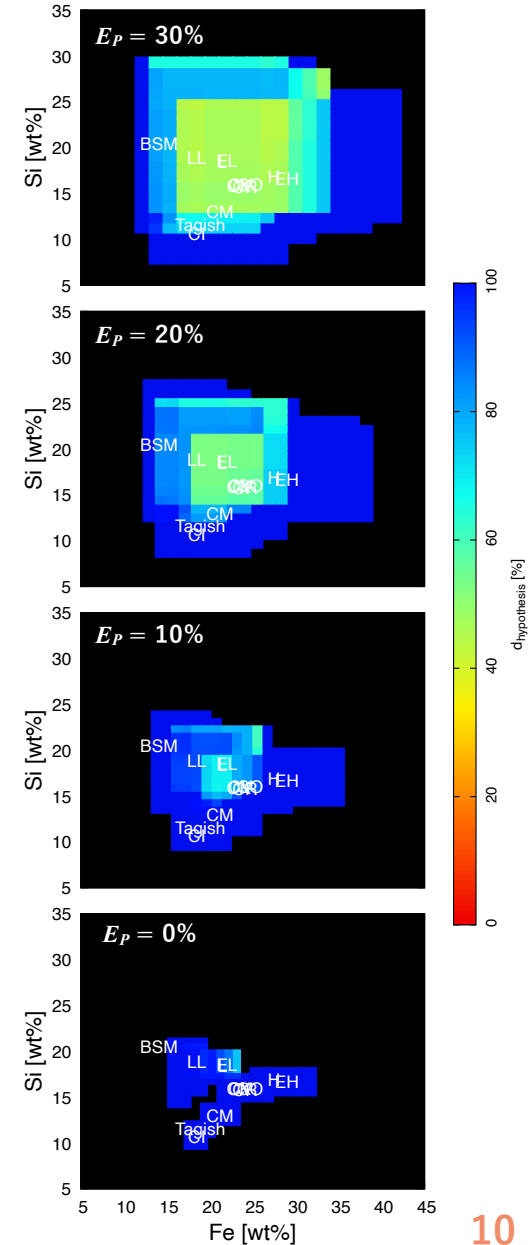
■ MEGANEの観測誤差…観測条件（主に軌道高度、観測期間）により決定

- MMX初期計画（1フォボス半径、10日間）による観測誤差の推定…20-33%程度
- ➔ 判別効率は60-70%程度になることを示唆
- 比較的誤差の小さいFe, Si組成にもとづいて、40%以上の確率で判別可能。

	Peak (keV)	Detection threshold	Relative precision
O ^a	6128.6	20 wt.%	33%
Mg ^a	1368.6	2 wt.%	33%
Si ^a	1779.0	2 wt.%	20%
Ca ^a	1942.7	5 wt.%	33%
Fe ^a	846.9	1.5 wt.%	20%
	7631.1		
	7645.5		
Th ^a	2614.5	150 ppb	20%

^aRequired to meet MEGANE's Level 1 requirements.

Lawrence+ (2019)より改変



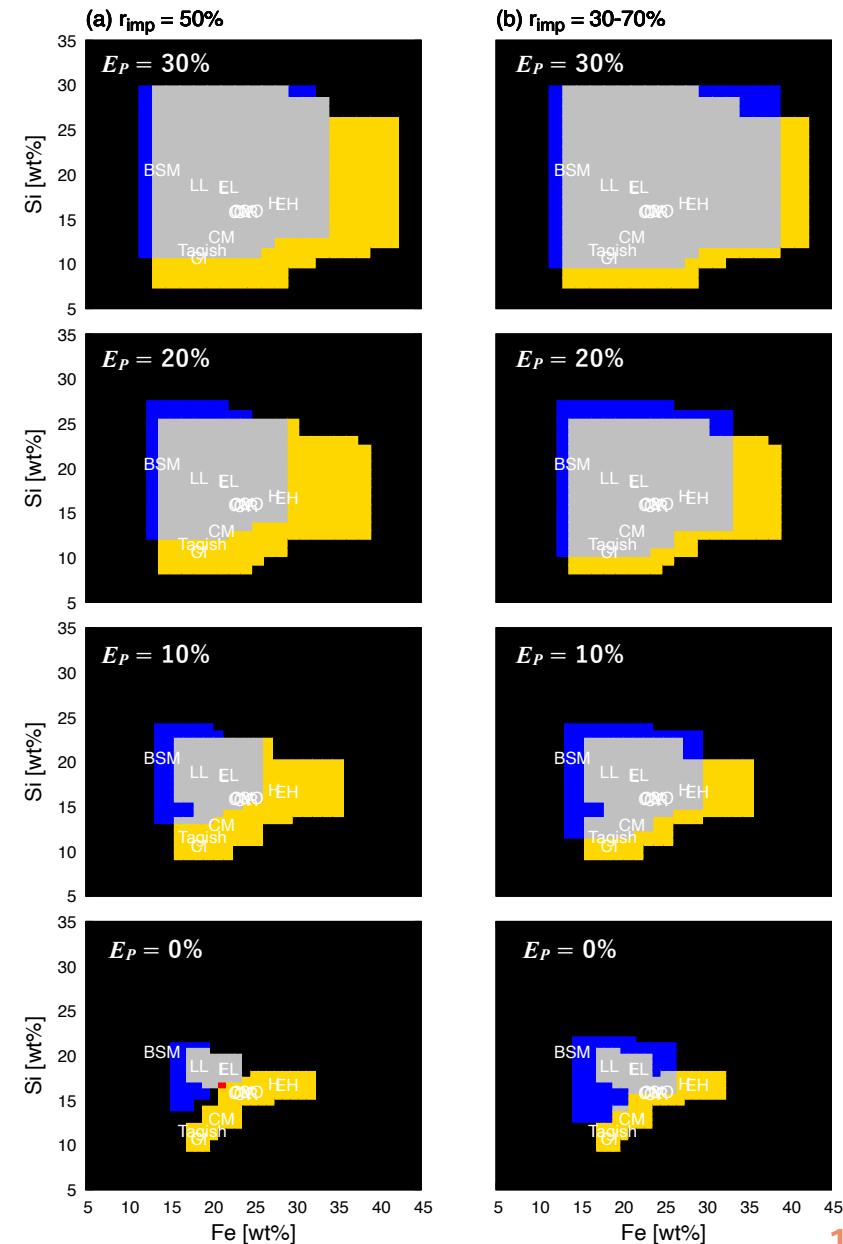
パラメータ②：衝突説における混合率 r_{imp}

衝突説における混合率を30-70%としても判別効率に大きく影響しない

- 巨大衝突で形成される火星衛星中の小惑星由来物質の混合率
 - 衝突条件（衝突天体のサイズ、速度など）に依存 Hyodo+ (2017a), Canup & Salmon (2018), Chau+ (2018)
- $r_{imp} = 30 - 70\%$ として形成仮説を判別するモデル
- 個々のMEGANEデータに対応する形成仮説が変化する
 - 衝突説により説明できる組成領域が増加
- 判別効率は大きく変化しない

E_P [%]	$D_{hypothesis}$ [%]	$r_{imp}=30-70\%$		$r_{imp}=50\%$		
		捕獲説 [%]	衝突説 [%]	$D_{hypothesis}$ [%]	捕獲説 [%]	衝突説 [%]
30	63.5	9.42	54.1	64.6	34.3	30.2
20	75.5	10.0	65.5	73.8	39.0	34.8
10	87.5	9.4	78.2	86.6	45.2	41.3
0	97.9	4.1	93.9	95.8	45.1	50.7

衝突説の判断基準を変えたときの判別効率



まとめ

- 捕獲説と衝突説の2つの形成仮説を仮定した**火星衛星のバルク組成を表す混合モデル**を構築した。
- 混合モデルを用いてMEGANEデータと火星、小惑星の組成から**混合率**を計算して形成仮説を判定する手法を確立し、**判別効率**による定量化とパラメータ依存性の推定をした。

- ✓ 形成仮説の判別効率は MEGANEの観測誤差に依存して変化する。
- ✓ 衝突説の場合の混合率の不確定性は判別効率に大きく影響しない。

- 本研究から、MEGANE観測により**火星衛星の形成仮説の判別が可能**であることが定量的に示された。

本研究の位置付け

