

# LIBS-TOFMS instrument suite for in-situ geochronology experiments on Mars

(LIBS-TOFMS 装置による火星表面年代のその場計測)

Yuichiro Cho<sup>1</sup>, Shingo Kameda<sup>1</sup>, Yayoi N. Miura<sup>2</sup>, Yoshifumi Saito<sup>3</sup>,  
Shoichiro Yokota<sup>3</sup>, Satoshi Kasahara<sup>3</sup>, Ryuji Okazaki<sup>4</sup>, and Seiji Sugita<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Rikkyo University

3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo, 171-8501 Japan

<sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo, 113-0032 Japan

<sup>3</sup>Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)

3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara-shi, chuo-ku, Kanagawa, 252-5210 Japan

<sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

Hakozaki, Fukuoka, 812-8581 Japan

<sup>5</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-0033 Japan

## ABSTRACT

The age of geologic record is a key observable for understanding the evolution of a planet. The geologic history of planets including Mars, however, is largely based on the radiometric age data derived from very limited locations on the Moon. Furthermore, no radiometric age data have been obtained for Mars. Although a sample return mission would provide highly accurate radiometric age measurements, it would be extremely expensive. Thus, an in-situ radiometric age measurements mission would be very important. In order to achieve such missions, we are developing on-site geochronology instruments that can be carried by lander. Here we discuss (1) the uncertainties in the Martian chronology models, (2) the first in-situ K-Ar age measurement results conducted by the NASA Curiosity rover, and (3) the development status of our in-situ K-Ar isochron dating

method based on a combination of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and time-of flight mass spectrometry (TOF-MS). We also describe the perspectives for designing an in-situ geochronology mission to Mars potentially carried out by Japan.

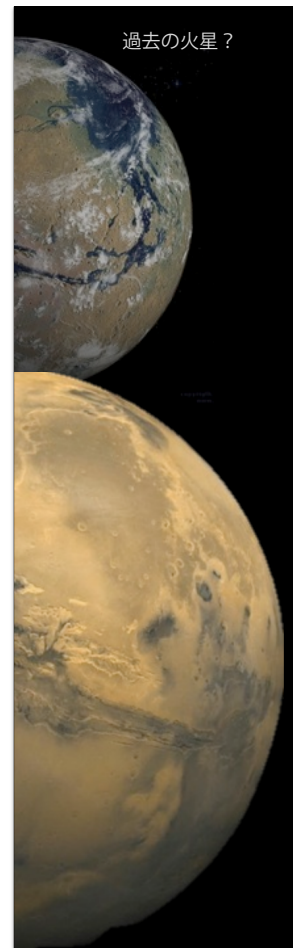
# LIBS-TOFMS装置による 火星表面年代のその場計測

長 勇一郎<sup>a</sup>, 亀田真吾<sup>a</sup>, 三浦弥生<sup>b</sup>, 齋藤義文<sup>c</sup>,  
横田勝一郎<sup>c</sup>, 笠原慧<sup>c</sup>, 岡崎隆司<sup>d</sup>, 杉田精司<sup>e</sup>

<sup>a</sup>立教大学, <sup>b</sup>東大地震研, <sup>c</sup>ISAS/JAXA, <sup>d</sup>九州大・理, <sup>e</sup>東大新領域

第47回 月・惑星シンポジウム

2014年8月4日  
改訂 2014年8月18日

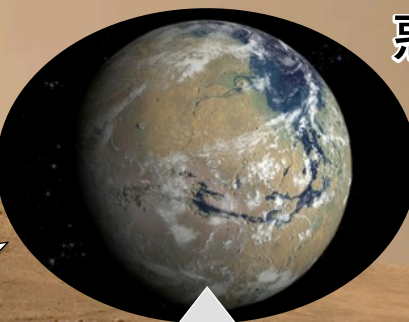


## 火星探査の意義

火星にはいつまで水が  
流れていたのか?

着陸地点はどういう  
場所なのか?

**生命**  
ハビタビリティの変遷

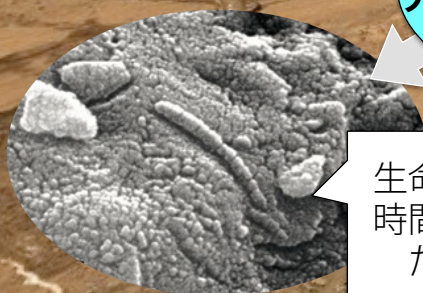


**惑星科学**  
地質  
物質科学  
火星表層環境進化  
火成活動史  
内惑星の天体衝突史

年代計測  
元素・鉱物計測  
ガス分析

**有人活動**

資源、水、  
希少金属…

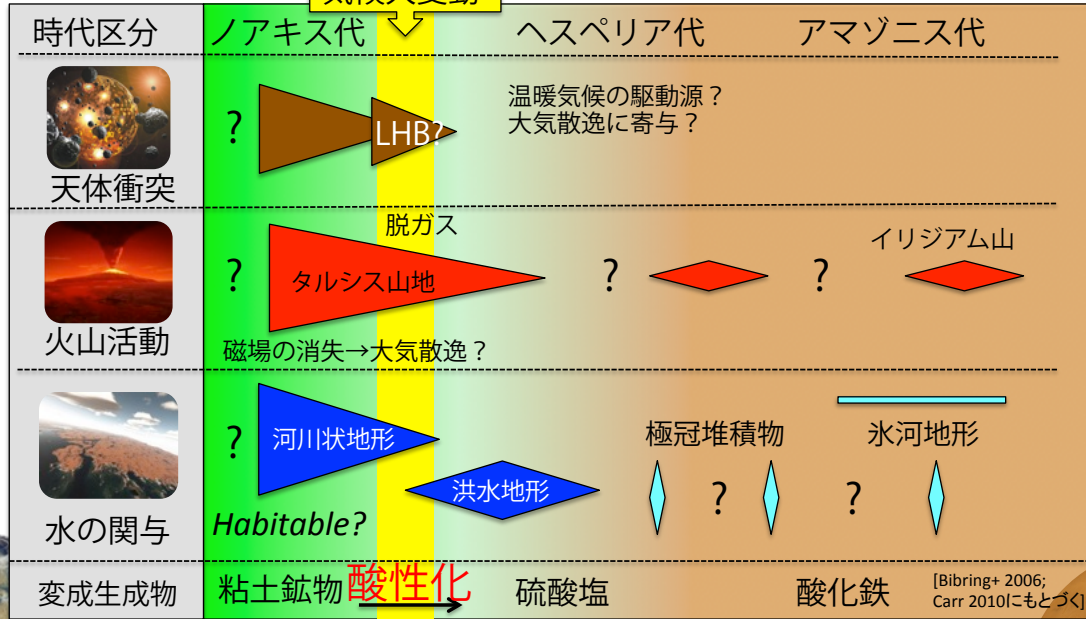


生命の進化する  
時間はあったの  
だろうか?



# 火星表層進化史

気候大変動



温暖湿潤だった火星は、乾燥寒冷の星に変貌してしまった

水はいつまであったのか?なぜ消えてしまったのか?

## 水が継続的にあった環境は、なぜ終焉を迎えたのか?



月クレーター年代学 → 変換 → 火星クレーター年代学

- 地質イベントと絶対年代の対応づけ無し
- 様々な仮定に立脚
  - 衝突フラックスの違い
  - 衝突速度の違い
  - 地表面物性の違い
  - クレーター風化モデル

a: Neukum & Wise 1976  
 b: Neukum 2001  
 c: Hartmann 2001  
 d: 月クレーター年代学の改訂必要性; 35億年の地表→30億年だった? [Robbins+ 2014]  
 e: 41億年前の隕石に水の関与した鉱物

# 火星の表層環境進化への示唆

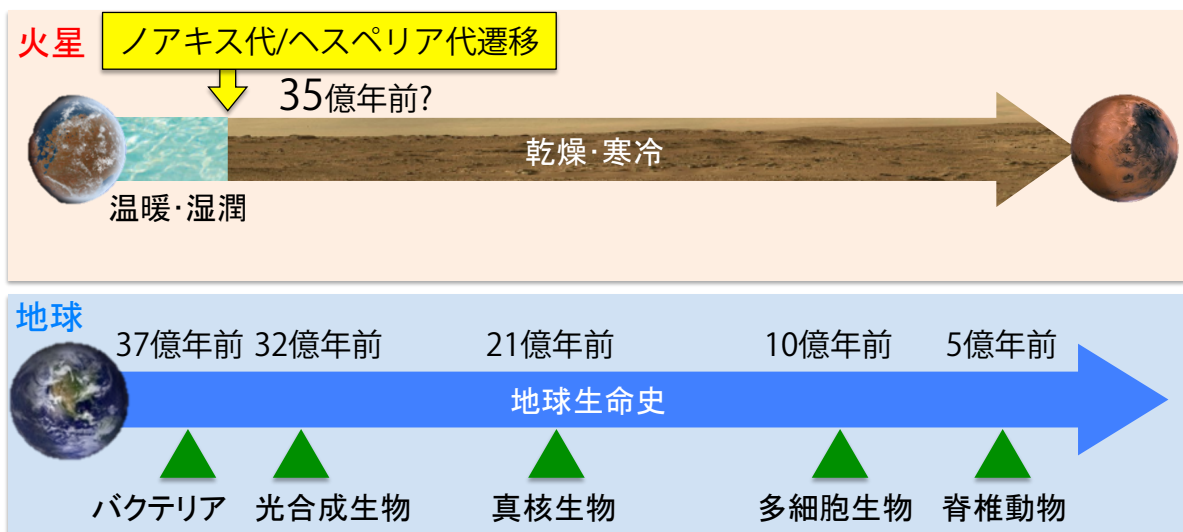


▲ 後期重爆撃期との前後関係? … 気候大変動は内因的? 外因的?

火星温暖湿潤気候の維持メカニズムを制約  
「何が火星のhabitabilityを失わせたのか」

5

# 過去のハビタビリティへの示唆



ノアキス代ーヘスペリア代境界の年代測定: 温暖湿潤気候終焉時期の決定

生命が生存・進化し得る環境の持続期間にも示唆

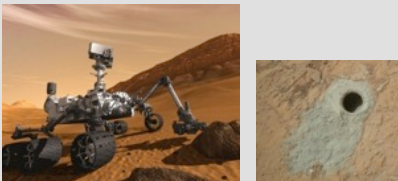
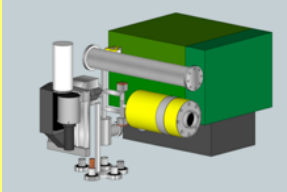
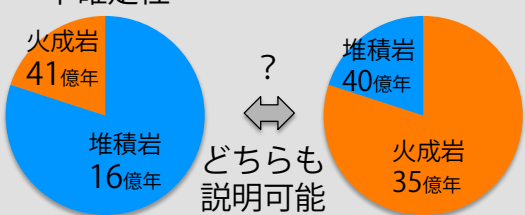
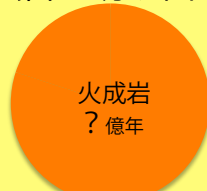
6

# サイエンススコープ

- ノアキス代-ヘスペリア代遷移時期に対応するクレーター密度をもつ火成岩地帯に着陸し、
- 岩石のK-Ar年代を10%の精度で計測する。
  - ・ 複数試料の計測で5%の相対精度を目指す。
- 「火星上に水が定常的に存在したような環境は、いつ終焉を迎えたのか？」という問いに答える。
- 物質計測によって同時に地質情報を得ることで、得られる年代値の信頼性を確保する。



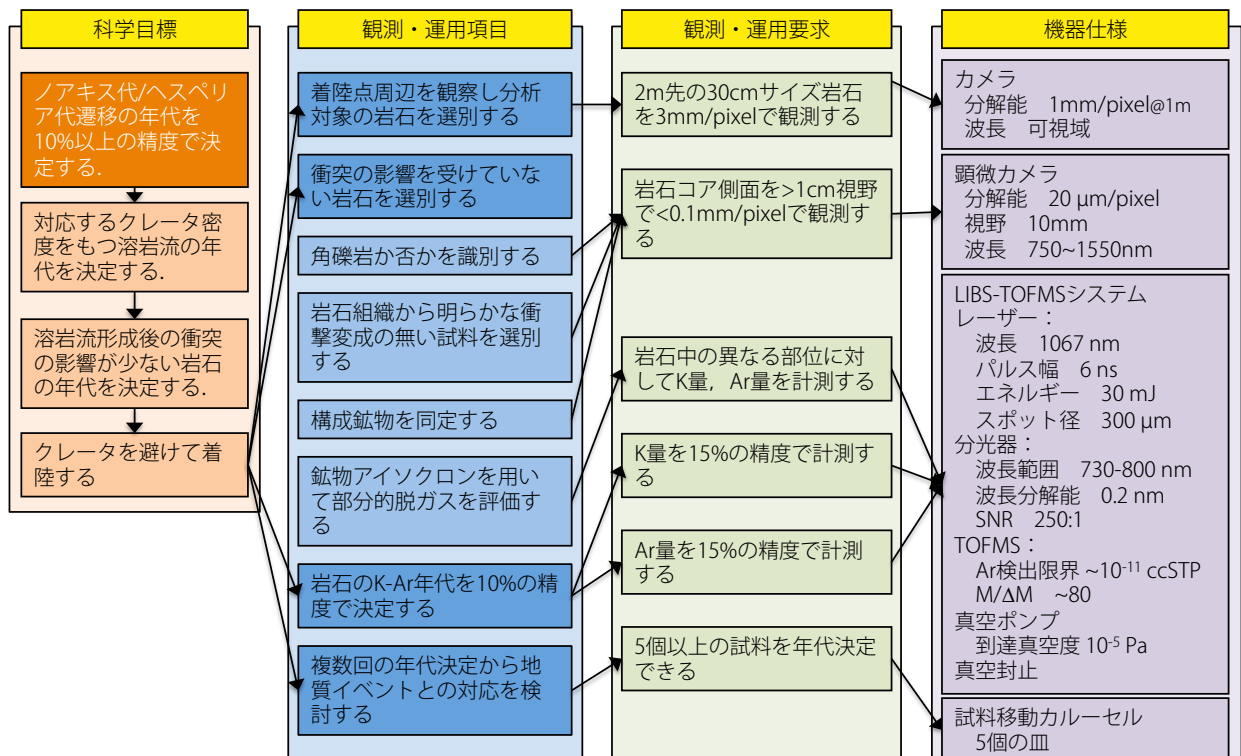
## Curiosityとの関係<sup>1</sup> ←評価項目番号

Curiosity (2013-)	本提案 (2021-)
 <ul style="list-style-type: none"> <li>■ クレータ年代制約できず</li> <li>■ 水が流れていた時期は不明</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ K-Ar年代計測可能性の実証 [Farley+ 2014, Science]</li> <li>✓ 古い岩石(42億年前)の計測可能性を実証</li> <li>◆ 堆積岩の年代値に大きな不確定性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 年代計測に適した溶岩流地帯へ着陸</li> <li>✓ 地質文脈の明確な試料</li> <li>✓ 計測鉱物の同定が可能な局所分析</li> <li>✓ 米欧の堆積岩探査と異なる日本独自の切り口</li> </ul>
 <p>火成岩 41億年 堆積岩 16億年</p> <p>？ ⇔ どちらも説明可能</p> <p>堆積岩 40億年 火成岩 35億年</p>	 <p>火成岩 ?億年</p>

# サクセスレベル 2,3 ←評価項目番号

レベル	内容	意義
ミニマム	KとArの計測によってAr/K比を計測し、見かけ上のK-Ar年代値を得る。 LIBSとTOFMSで物質分析を行い、着陸点の地質を把握。揮発性元素の含有量を決定。	LIBS-TOFMS年代計測法の実証 惑星科学 資源探査
フル	火星の地質ユニットと対応づけられる初の年代値を得る。ノアキス代末の年代を10%の精度で決定する。 →火星上に広く水が存在した環境の終焉時期を制約 月LHBとの前後関係を制約	惑星科学 生命環境
エクストラ	複数試料の年代値を計測することでノアキス代末の年代を5%の精度で決定する。 →温暖湿潤気候の継続期間を更に高精度で決定 月LHBとの前後関係を決定 火星で提案されている複数のクレータ年代学モデルを識別し、火星軌道における天体衝突フラックスを制約。 →月軌道における衝突フラックスとの比較から、太陽系内惑星への小天体の輸送過程を解明	惑星科学 生命環境 惑星科学

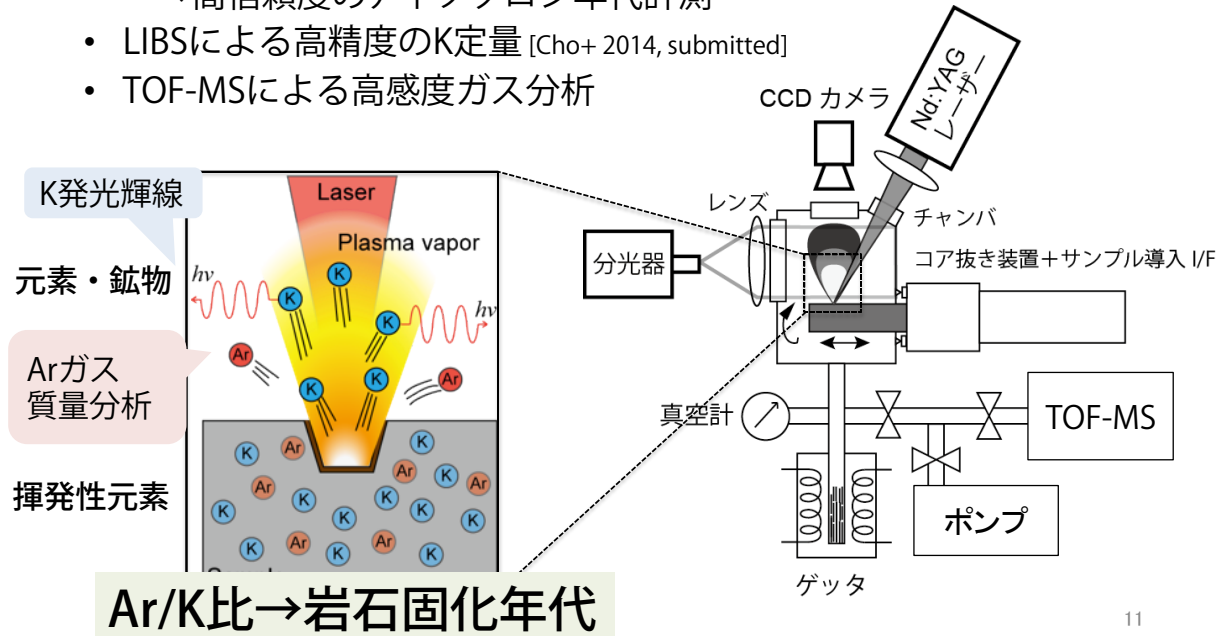
## 要求事項 4



# 提案する新手法: LIBS-TOFMS法<sup>5</sup>

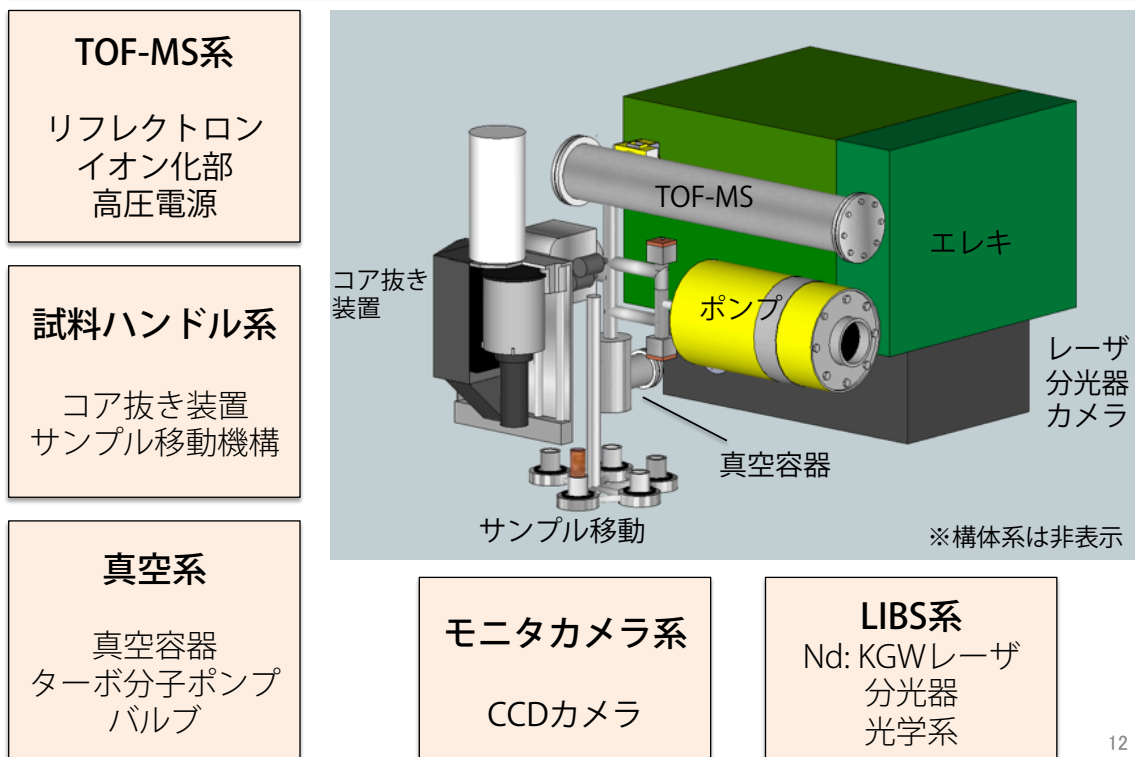
## レーザーアブレーションによる局所分析(<500 μm)

- 岩石の不均一を逆手にとって鉱物単位での測定  
→高信頼度のアイソクロン年代計測
- LIBSによる高精度のK定量 [Cho+ 2014, submitted]
- TOF-MSによる高感度ガス分析



11

## 機器構成<sup>5</sup>



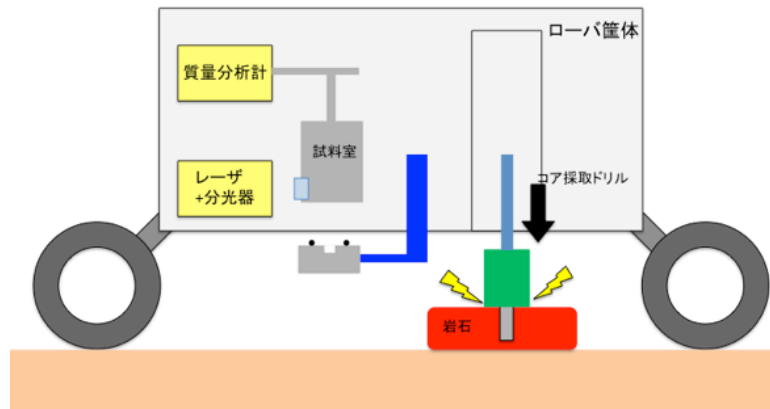
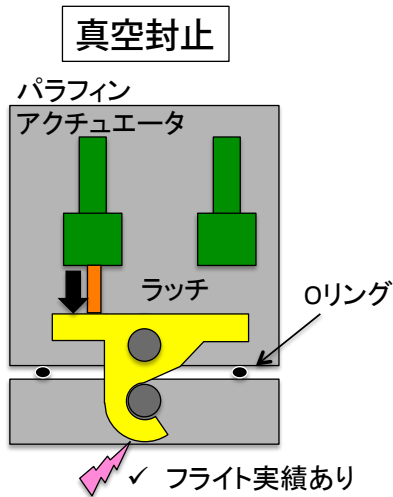
12



# 測定シナリオ<sup>5</sup>



## コア採取



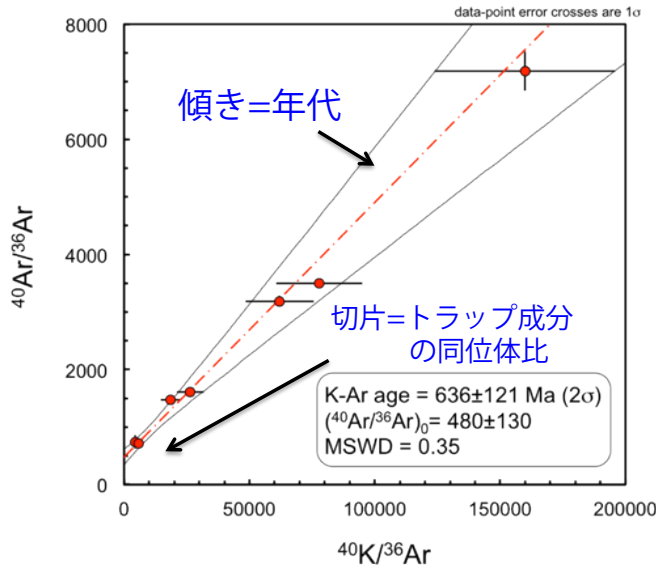
# 各要素の開発状況<sup>6</sup>

⇒ TRLの高い要素で構成可能。

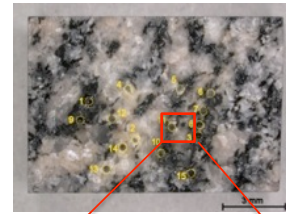
サブシステム	コンポーネント	担当	TRL	Mission
LIBS系	Nd: KGWレーザー	CNRS/France	9	ChemCam/Curiosity
	分光器	IRAP/Spain	8	RSL/ExoMars
	光学系	亀田研/立教大	4	新規開発
TOF-MS系	リフレクトロン・MCP	齋藤研/ISAS	3	MAP-PACE-IMA/Kaguya をベースに開発
	イオン源	齋藤研/ISAS	2	新規開発
	高圧電源	齋藤研/ISAS; 明星電気	2	新規開発
モニタカメラ系	カメラ	亀田研/立教大; 明星電気	2	新規開発
真空系	試料室(含真空シール)	アールバキュームラボ	5	EXCEED/SPRINT-A
	ゲッター	アールバキュームラボ	9	ISS
	バルブ	Mindrum Precision/USA	9	SAM/Curiosity
	ポンプ	Creare/USA	9	SAM/Curiosity
試料ハンドル系	コア採取機	Honeybee Robotics/USA	6	Mars 2020
	サンプル導入機構	亀田研/立教大	2	新規開発

# 年代計測装置としての技術実証<sup>6</sup>

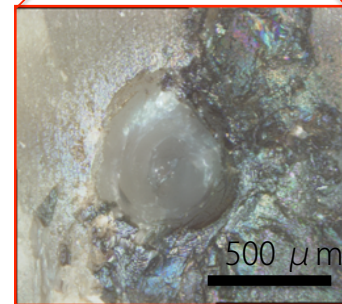
- LIBS-MSを使った年代測定は実験室レベルで実証済み(全体としてはTRL=2)
- 40億年,  $K_2O=1$  wt%の岩石→精度10%



天然岩石から得られたアイソクロン  
Cho+ (2013) Goldschmidt



南極産片麻岩  
Age=485 Ma



レーザーアブレーション痕

# 開発体制<sup>9</sup>

✓ 国際協調  
✓ フライト実績



# 開発・運用リスク<sup>10</sup>

## ■ 開発課題

項目	対処
各要素のTRLは高いが、コア抜き、真空槽開閉機構を含めた総合動作実験は未実施	2015年度中にBBMの総合動作試験によって実証する。
TOF-MSを使ったガスのstatic分析が未実証	MAP-PACE/Kaguyaで実績のある齋藤・横田・笠原で検討中。2014年度中のBBMを用いた実証を目指す。

## ■ 運用リスク

項目	対処
電力が不足し十分な計測が出来ない	主な消費源であるGetter、ベーキングのDuty比を削減。
岩石が変成を受けていて意味のあるK-Ar年代が求まらない	リセットの恐れがあるクレーター付近は避ける。リセットの有無はアイソクロン計測によって評価。
岩石のK濃度が想定より低い	真空引き前に予備計測して評価。実験室レベルでの感度向上を進めておく。
コア試料が軟らかく折れてしまう	蓋を複数枚用意して回避。

17

# 必然性・有効性<sup>11, 13</sup>

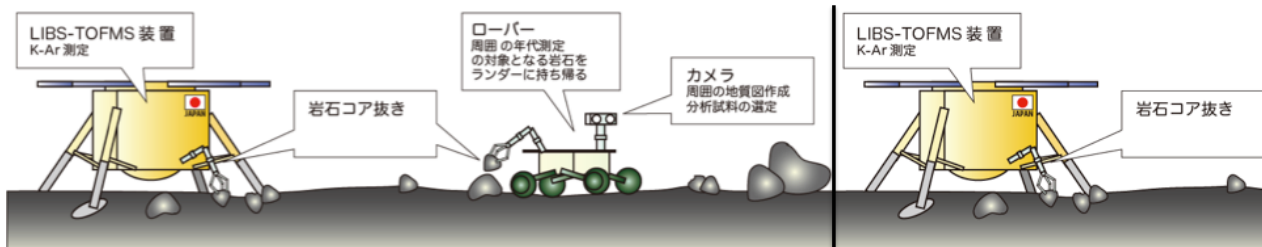
	A: 火星飛行機		B: 科学ローバ		C: 高走破ローバ		D: 多点ランダ	
	有効性	必然性	有効性	必然性	有効性	必然性	有効性	必然性
ローバ			5	5 / 1	5	5 / 1		
ランダ	2	4	4	5	4	5	2	3

### 有効性

- ❖ ローバ: 移動しながら年代計測に適した試料を選定, 計測→4~5点
- ❖ 試料採取ローバ+ランダ→4点
- ❖ ランダ: 対象が真下の岩石のみなので、有効な年代が計測できる可能性が下がる→2点

### 必然性

- ❖ 地磁気計測+年代=ダイナモの時期を制約→4点
- ❖ 内部構造探査+年代=地殻形成時期を制約→3点
- ❖ 生命探査+年代=生命存否情報を火星史に位置づけ→生命だけでも意義は高く1点



# 内外の状況との整合性 14

---

## ■ JAXA探査ロードマップ

- ・ 「太陽系と生命はどのようにして生まれてきたかの解明」
- ・ 「国際協調と相互補完」
- ・ 「太陽系形成過程を物証に基づいて明らかにする」

## ■ 学術会議提言(マスタープラン)

- ・ 太陽系生命前駆環境の実証的解明のための統合研究プログラム
  - ・ 「生命誕生に至るまでの惑星環境の様態と物質進化過程の多角的解明」
- ・ CQHとMULTUMで拓く宇宙・地球・生命科学
  - ・ 質量分析計によって「これまでは見えなかったものを観る」ことを可能とし、宇宙・地球・生命科学の最先端を切り拓く。
  - ・ 革新的な技術開発に基づく宇宙・地球・生命の歴史の解読。

## ■ 惑星科学会提言(来る10年)

- ・ 月面その場年代計測[提案者: 諸田智克]
- ・ 月面年代学との科学的、技術的相乗効果

19

# まとめ

---

- 「火星上に水が定常的に存在したような環境は、いつ終焉を迎えたのか？」という問いに答えることをめざす。
- LIBS-TOFMS装置によってノアキス代/ヘスペリア代境界の溶岩流のK-Ar年代を決定し、温暖湿潤気候が失われた年代を決定する。
- 年代計測技術は実験室レベルでは実証済み。
- 国際協力、フライト実績重視の開発体制を構築し、2015年度中のBBM総合試験実施をめざす。

