

火星衛星探査計画 MMXが持ち帰る試料の惑星検疫検討



黒澤耕介
千葉工業大学 惑星探査研究センター 上席研究員



火星生命探査における火星衛星探査計画「MMX」の役割に関する説明会 2021 8/19

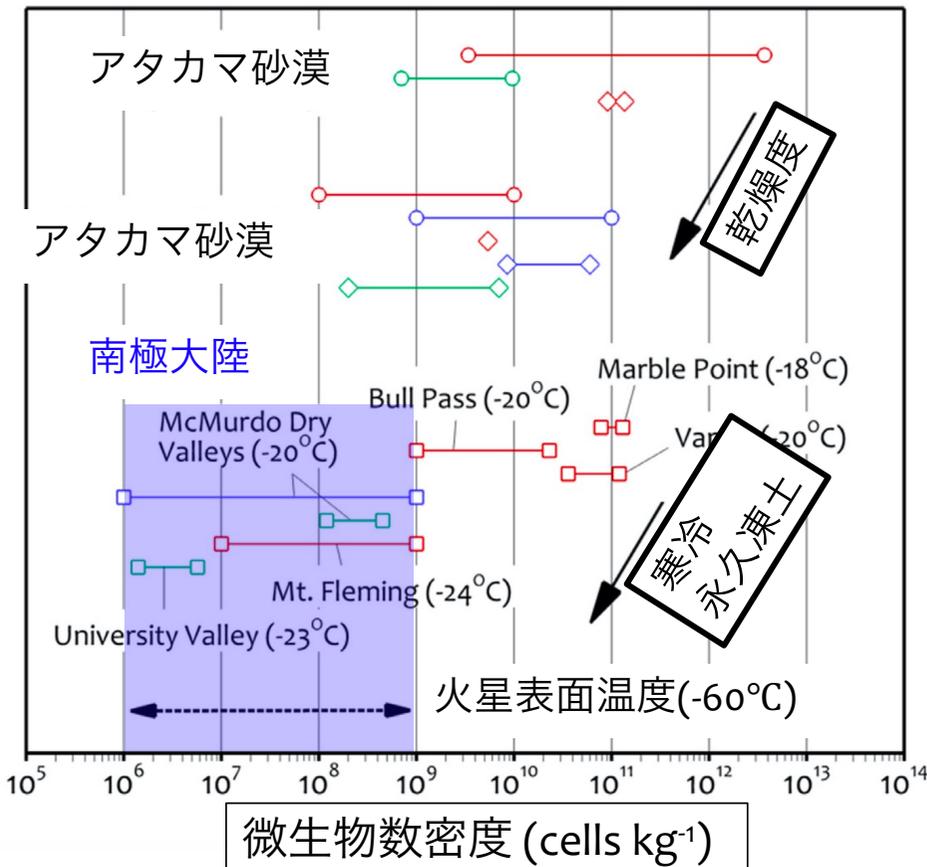
Image credit: JAXA

火星土壤に生命が現存している可能性は否定できない

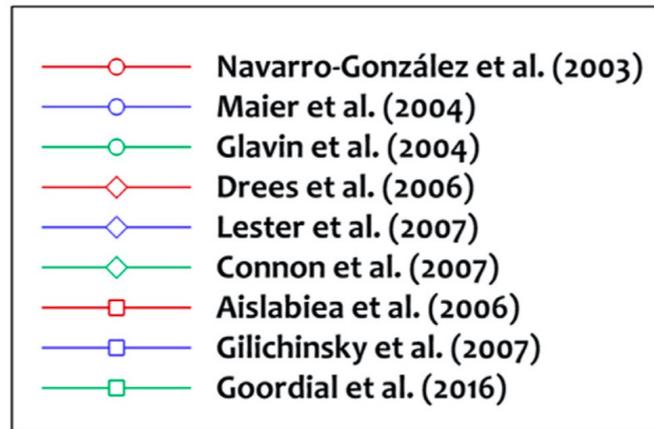
火星土壤の培養可能な微生物数密度 $\leq 10^{11} \text{ cells kg}^{-1} \neq 0!$

Viking探査機搭載機器の検出限界以下

参考例: 地球上の火星類似地域の微生物数密度 [論文1, Fujita et al., 2019]



南極大陸の永久凍土地域にも微生物あり。



* $1 \text{ CFU/kg} \sim 10^3 \text{ cells/kg}$ is assumed

火星着陸 & サンプルリターン探査では微生物がいることを前提とした準備が求められる。

天体衝突による火星から火星衛星への物質輸送

生きている微生物がフォボスに到達している可能性も否定できない。

Image credit: JAXA

MMXへの国際的要請: 試料に培養可能微生物が含まれる確率は100万分の1以下でなければならない。

MMXの科学目的達成のための試料採集目標

深さ ~10 cm

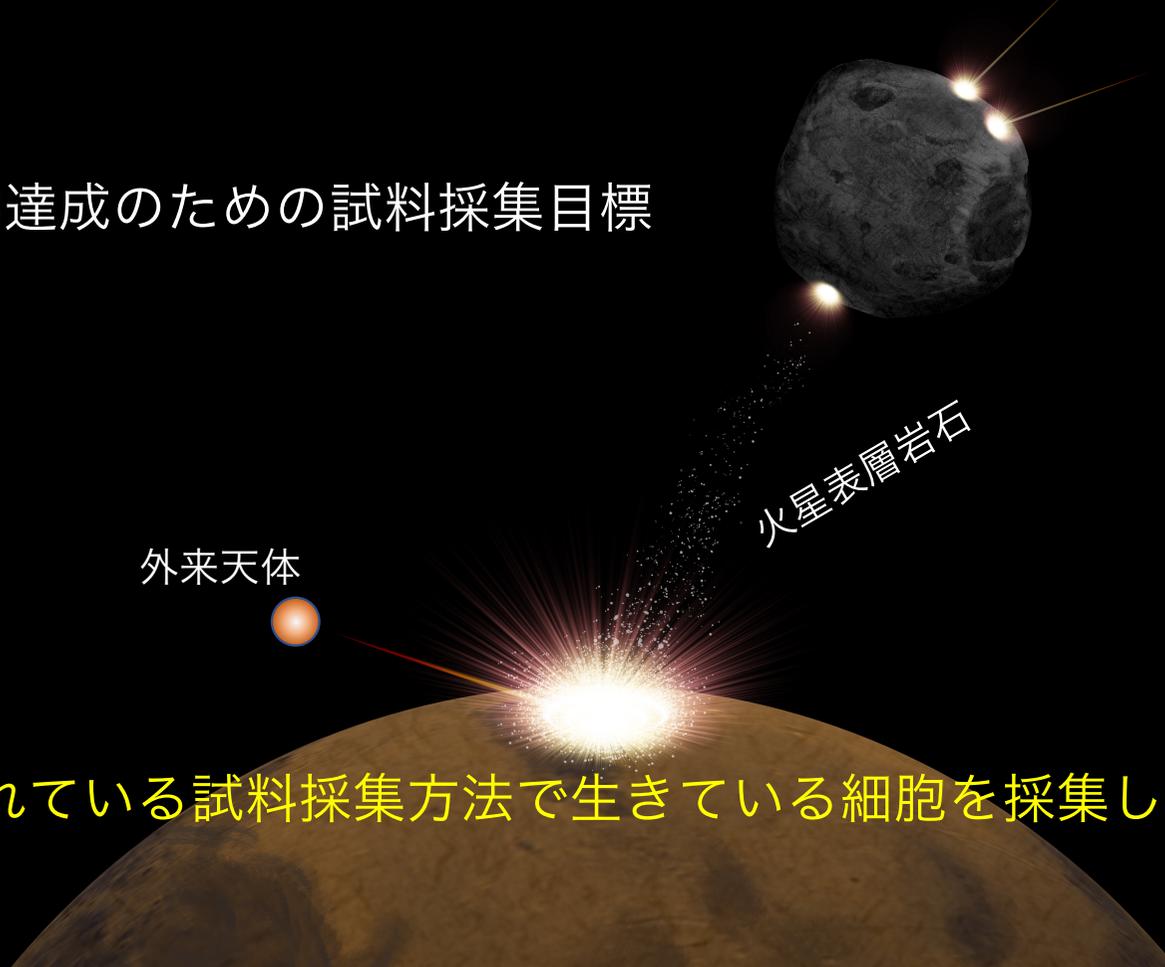
質量 ~10 g

外来天体



火星表層岩石

MMXで計画されている試料採集方法で生きている細胞を採集してしまう確率は?



火星圏物質輸送過程と推定された生存微生物数変化

[論文2, Kurosawa et al., 2019]

6. 放射線による
滅菌



7. 火星衛星への天体衝突による
堆積層形成 (放射線防御層)

5. 火星衛星への衝突 (クレーター形成)

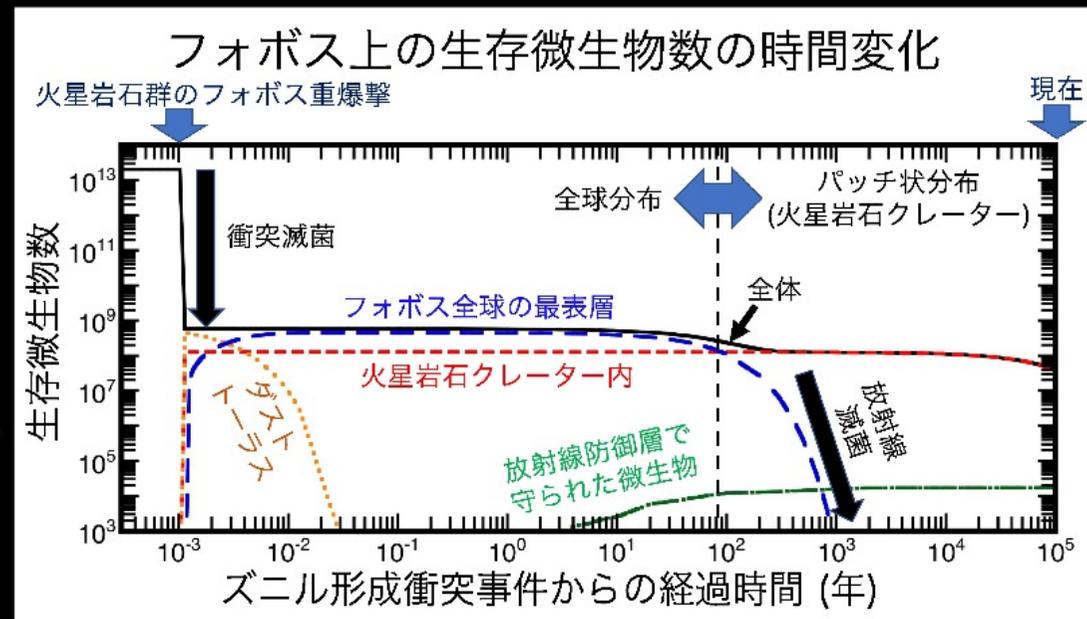
- 高速衝突による滅菌 (衝突滅菌)
- 火星岩石の粉碎 & 砂層への混合
- 衛星軌道への飛散・衛星への再降着

4. 空力加熱による
滅菌

3. 衝突滅菌

2. 天体衝突による物質放出

1. 火星上の潜在的な微生物密度

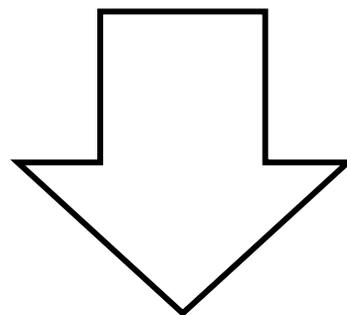


火星衛星の環境は微生物には過酷すぎる

火星からフォボスへ輸送された微生物の中で現在まで生き延びる割合は50万分の1

10 cmの深さから10 gの土壌試料を採集する場合、
生きている微生物を採集する確率は3,800万分の1

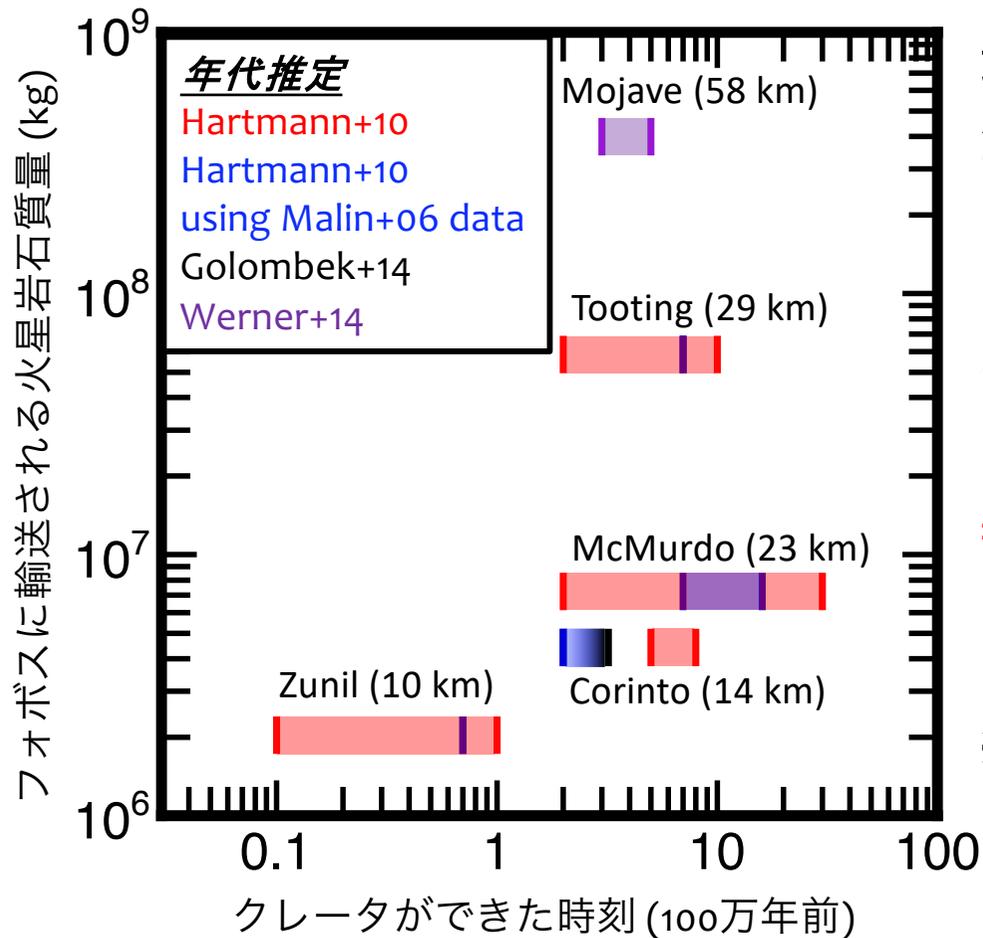
[論文2, Kurosawa et al., 2019]



2019年3月のCOSPAR総会でMMXは「安全」とであると認定

フォボス上の火星微生物の行方

火星上の新しいクレータからの輸送質量平均値 [論文3, Hyodo et al., 2019]



最近500万年以内に輸送された
生きている微生物の数の概算
およそ 10^{16} 個

そのほとんどは死滅している。

⇒死んだ微生物を1個以上※1
採集する可能性あり。

※1 惑星検疫の検討では、より安全側の評価とするために
火星上微生物数密度として高めの値を採用した。
死んだ微生物を確実にとれることを保証するわけではない。

英文査読付き論文

論文1

Fujita, K., K. Kurosawa, H. Genda, R. Hyodo, S. Matsuyama, A. Yamagishi, T. Mikouchi, and T. Niihara (2019), Assessment of the probability of microbial contamination for sample return from Martian moons I: Departure of microbes from Martian surface, *Life Sciences in Space Research*, **23**, 73-84, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.07.009>

論文2

Kurosawa, K., H. Genda, R. Hyodo, A. Yamagishi, T. Mikouchi, T. Niihara, S. Matsuyama and K. Fujita (2019), Assessment of the probability of microbial contamination for sample return from Martian moons II: The fate of microbes on Martian moons, *Life Sciences in Space Research*, **23**, 85-100, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.07.006>

論文3

Hyodo, R., K. Kurosawa, H. Genda, K. Fujita, and T. Usui (2019), Transport of impact ejecta from Mars to its moons as a means to reveal Martian history, *Scientific Reports*, **9**, 19833, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56139-x>

プレスリリース

2019年9月6日 「火星衛星探査に向けた国際的な惑星保護方針への貢献について」(JAXA・千葉工大・東工大・東大・東京薬科大)
https://www.jaxa.jp/press/2019/09/20190906b_j.html

2020年1月14日 「小天体衝突による火星から衛星への物質輸送、従来見積り以上の10倍以上」(東工大・千葉工大)
<https://www.titech.ac.jp/news/2020/046066>

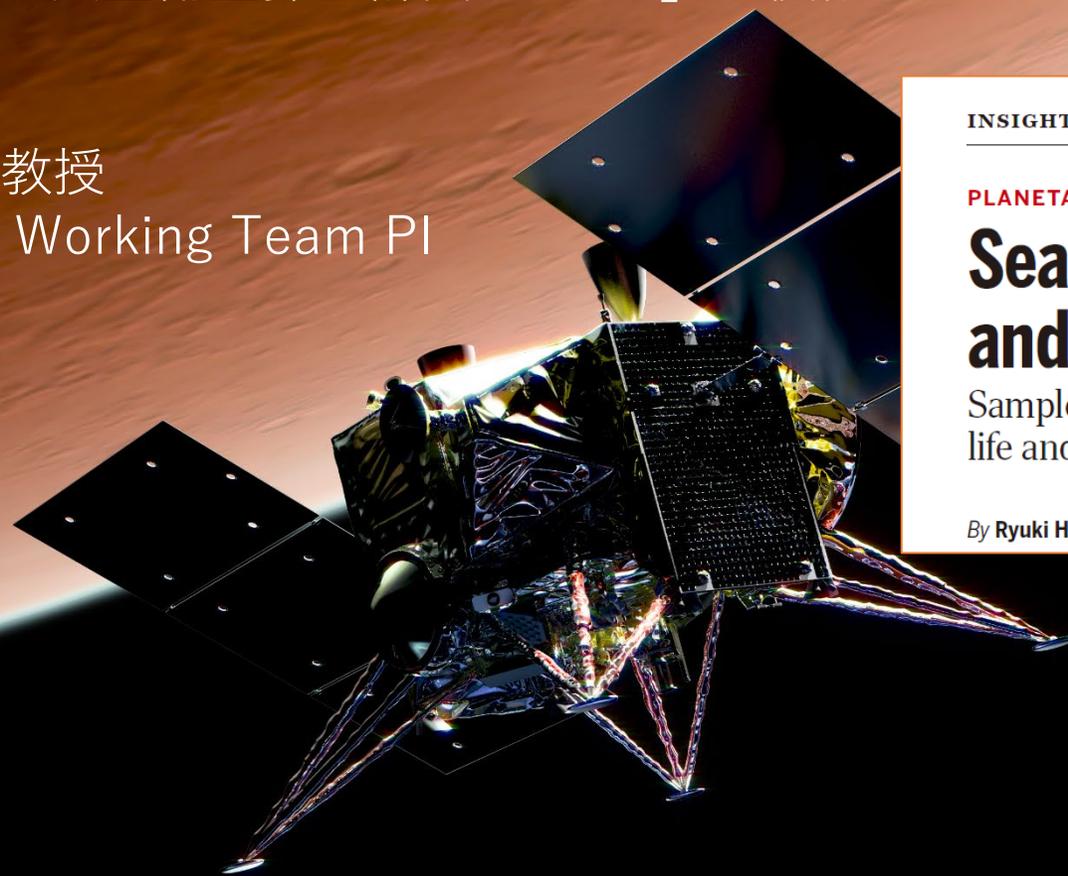
MMXでフォボスから回収される火星試料の重要性

— 火星生命探査における火星衛星探査計画「MMX」の役割 —

臼井寛裕

JAXA宇宙科学研究所 教授

MMX Sample Analysis Working Team PI



INSIGHTS | PERSPECTIVES

PLANETARY SCIENCE

Searching for life on Mars and its moons

Sample-return missions will look for extraterrestrial life and biomarkers on Mars and Phobos

By Ryuki Hyodo and Tomohiro Usui

than ejection of Martian ejecta than Deimos. Numerical simula-

Hyodo & Usui (2021) *Science*
Doi: [10.1126/science.abj1512](https://doi.org/10.1126/science.abj1512)

共同研究者

兵頭龍樹・菅原春菜・藤本正樹 (JAXA)

黒澤耕介 (千葉工大)

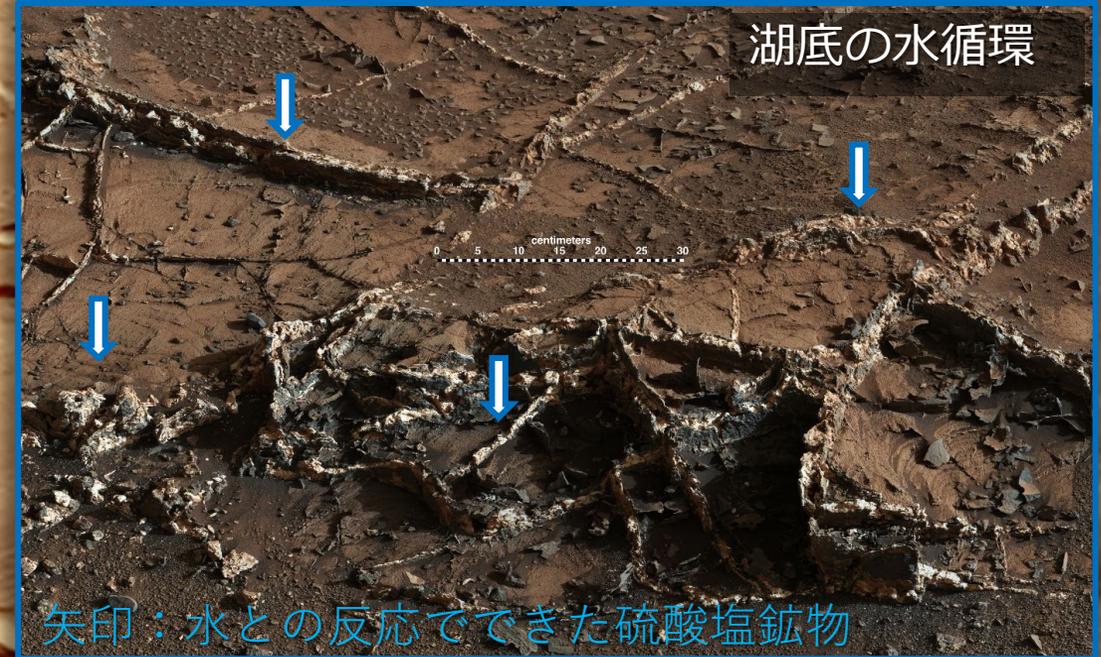
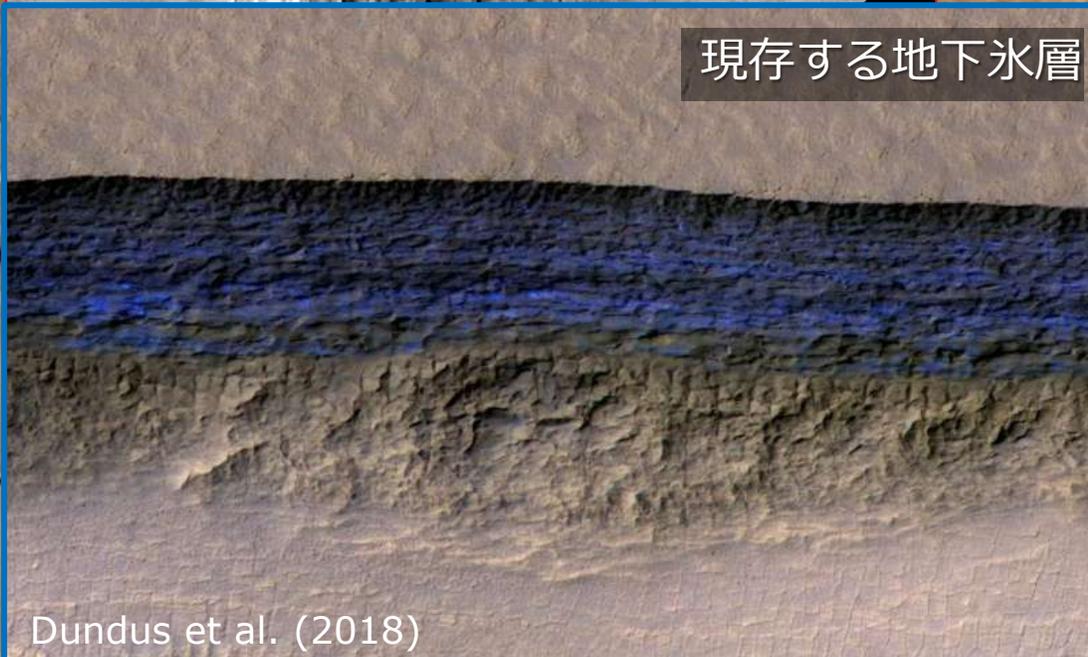
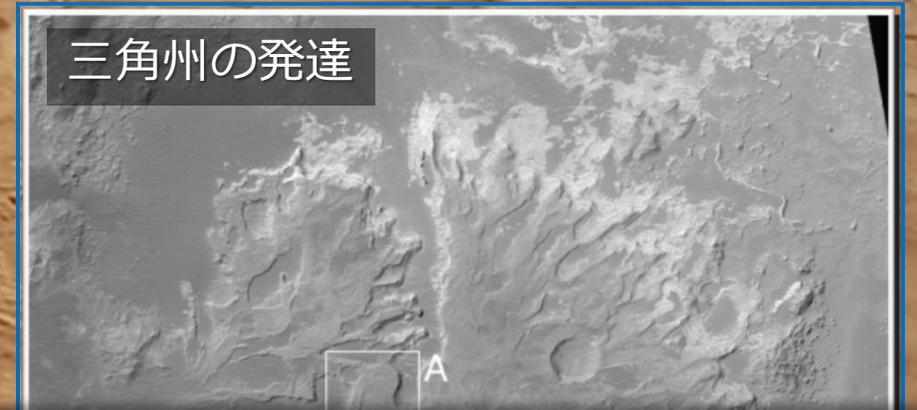
玄田英典 (東工大)

David W. Beaty・Brandi L. Carrier (NASA)

Monica M. Grady (Open University)

火星を探查する理由

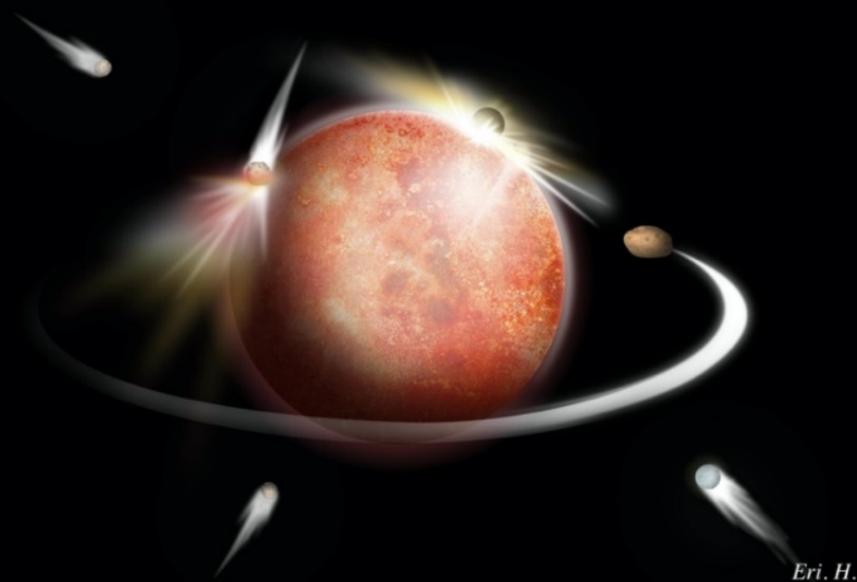
地球と同様、水や大気が存在し、熱水活動を含む多様な水環境が発達



火星物質のフォボスへの輸送： MMXでも火星からのサンプルリターンが可能

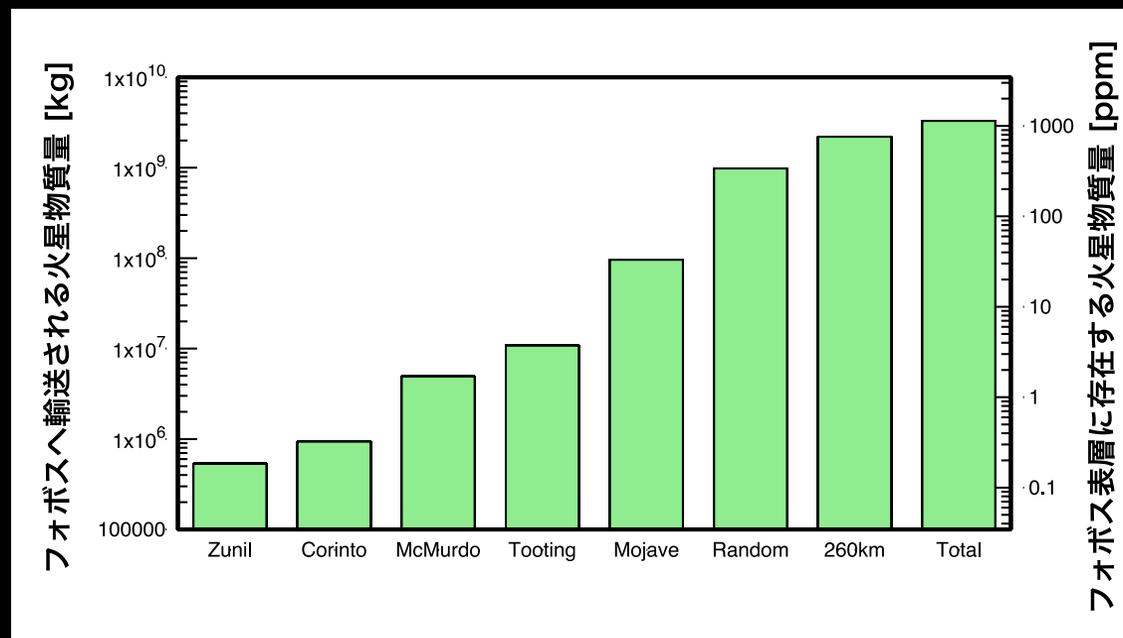
フォボスの表土の約0.1%は火星の複数の場所から飛来した物質

火星における無数の小天体衝突と、破片のフォボスへの輸送過程のイメージ図



Hyodo et al. (2019, Sci. Rep)

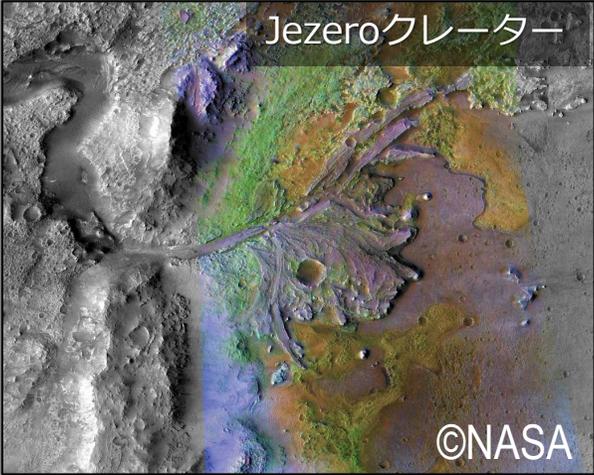
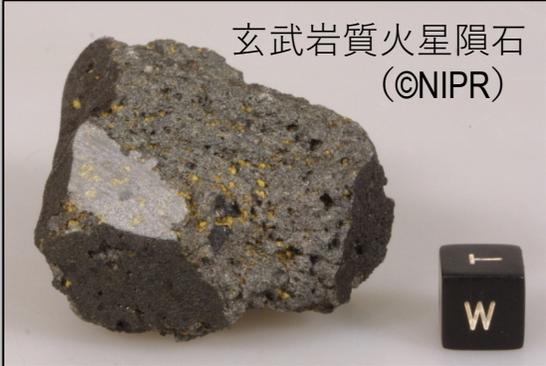
小天体衝突によってフォボスへ輸送される火星表層物質の量を計算し総量1,000 ppm (0.1%) を得た



ZunilやCorintoなど、比較的最近形成したクレーターを作った衝突による輸送量を計算

MMXが持ち帰るフォボス表土に含まれる火星物質 MSR・MMX・隕石試料との比較

有機物を含む様々な時代の堆積岩がフォボス表土に混入

	MSR	MMX	火星隕石
特徴	<p><u>三角州の発達した昔の湖の跡</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 岩石：堆積物に含まれる、多様な粘土鉱物や炭酸塩鉱物 • 時代：ノアキス紀（~40億年） • 変質：火星表層から直接回収 	<p><u>様々な環境で形成した複数の地質体</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 岩石：火山岩・堆積岩など火星に分布する岩石の種類を広くカバー • 時代：複数の形成年代 • 変質：フォボスへの輸送で弱い衝撃圧を経験 	<p><u>火山岩</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 岩石：火山岩（堆積岩は未発見） • 時代：多くが若い年代 • 変質：地球への輸送で強い衝撃圧や、高温での部分溶解を経験 

MSR (NASA/ESA) の目指すサイエンス

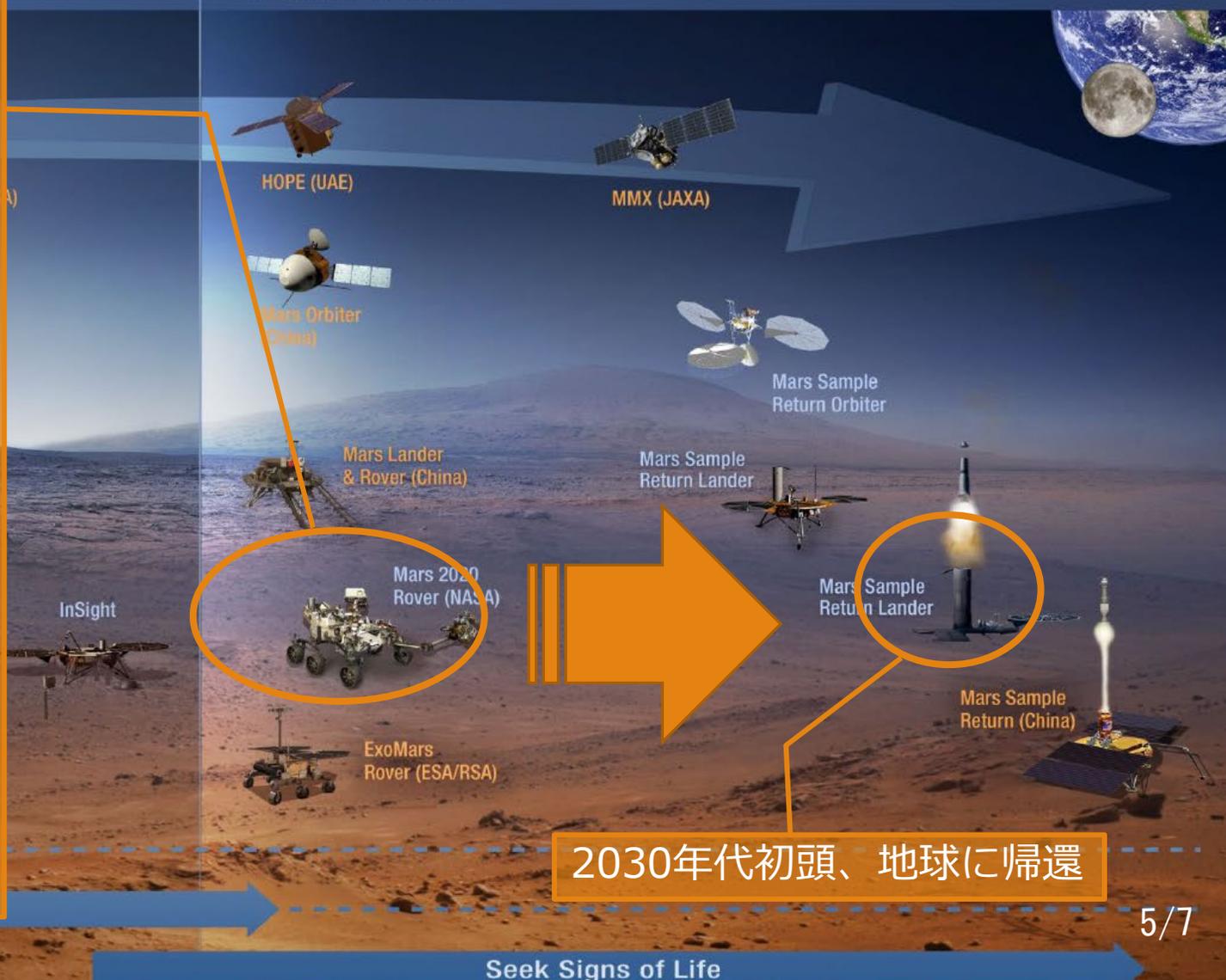
MARS MISSIONS

パーシビアランスローバー
湖底に堆積した地層から、火星の水環境や生命痕跡の情報を保持するサンプルを回収

Follow the Water

Explore Habitability

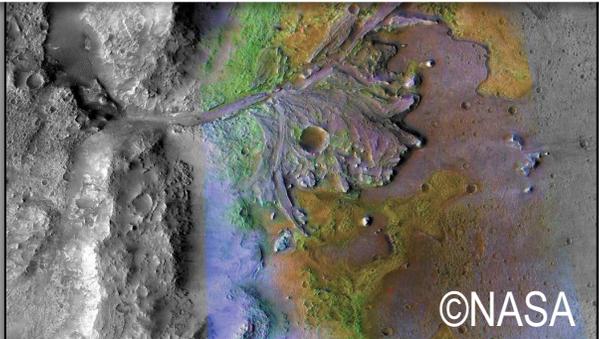
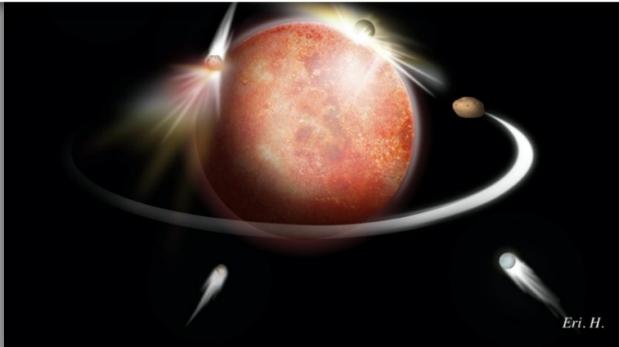
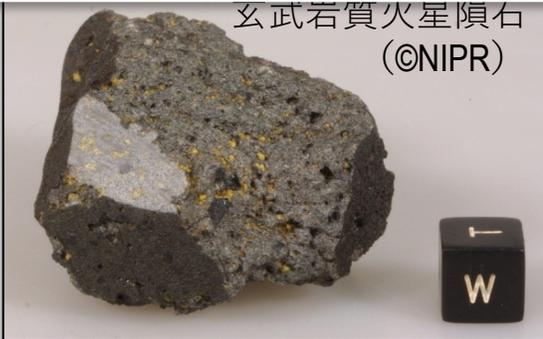
2020 AND BEYOND



MMXが検出する可能性のある生命痕跡

MSR・MMX・隕石試料との比較

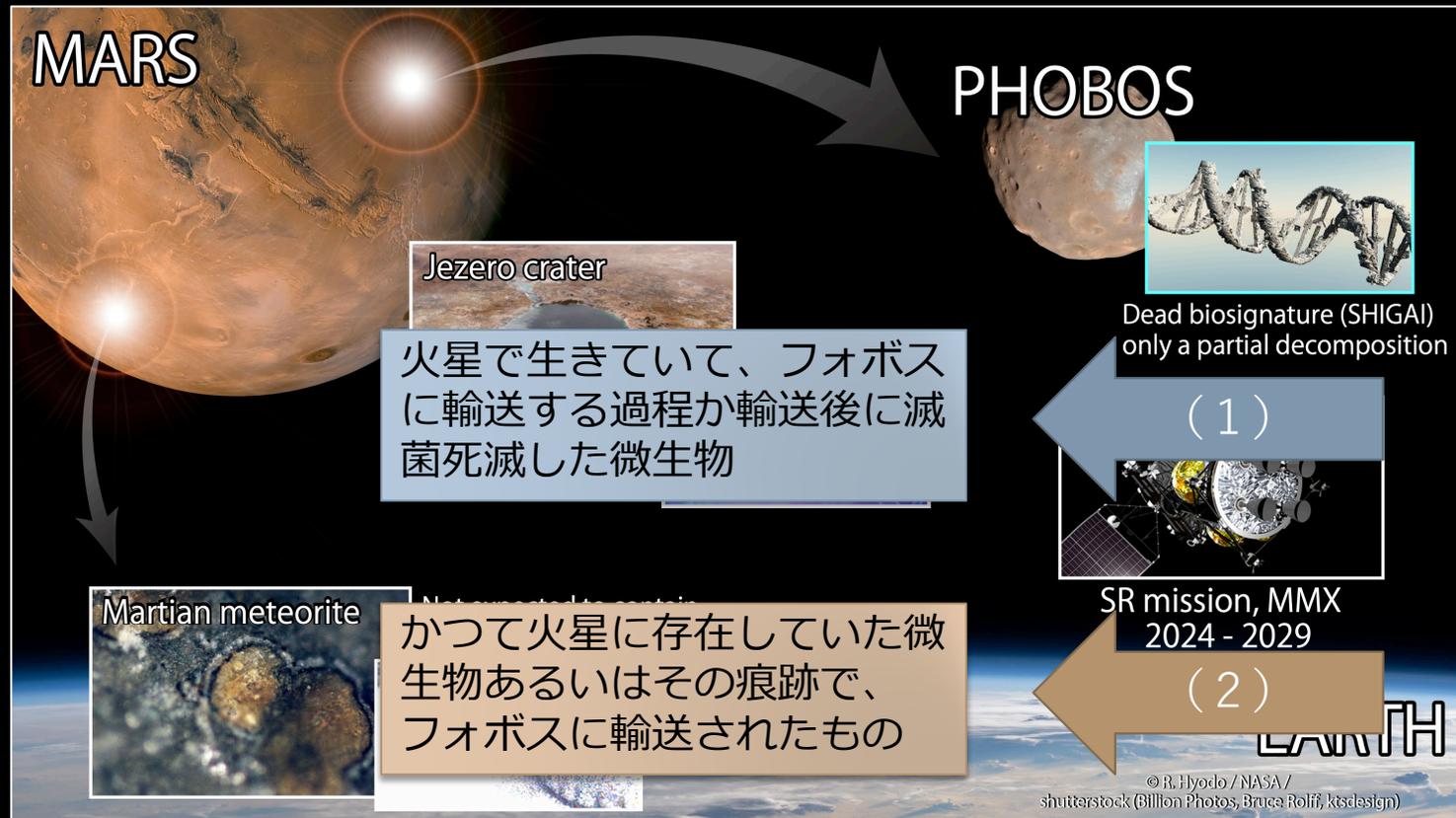
火星生命検出にはMSRとMMXによる相補的な探査がカギ

	MSR	MMX	火星隕石
保存性	<u>高い</u> 火星表層から、直接回収	<u>低い</u> フォボスへの輸送やフォボス上で熱・衝撃圧・放射線照射を経験	<u>極めて低い（未検出）</u> 地球への輸送による高い衝撃圧・溶融を経験
検出	<u>着陸地に依存</u> Jezeroクレータに生命環境があれば、高い確率で検出する可能性あり	<u>存在度に依存</u> 火星の“どこか”に高い生命存在度を示す環境があれば、フォボス試料から検出する可能性あり	<u>極めて困難</u> 火山岩に由来すること、また地球上での汚染を考慮すると、検出は困難
			

MMXが検出する可能性のある生命痕跡

SHIGAI (**S**terilized and **H**arshly **I**rradiated **G**enes, and **A**ncient Imprints)

MMXでは死滅した火星生命（もし存在すれば）の検出が期待される



本論文が提案するSHIGAIの定義
 “**SHIGAI**” (*Sterilized and Harshly Irradiated Genes, and Ancient Imprints*), the acronym in Japanese means a “*dead remains*”.

SHIGAI includes

- 1) *any potential microorganisms that could have been alive on Mars and were recently sterilized during or after the delivery to Phobos, and*
- 2) *the microorganisms and biomarkers that had been processed on ancient Mars before the delivery to Phobos, including potential DNA fragments*

210819 火星生命探査における火星衛星探査計画「MMX」の役割

MMXリターンサンプルに含まれる 火星粒子からの生命痕跡の検出に向けて



国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 特任助教
菅原 春菜

MMXが世界に先駆けて持ち帰る火星物質の分析に向けて

サンプル分析



©JAXA

リュウグウサンプル
サンプル量 >5 g
(想定: > 100 mg)



©JAXA

小惑星リュウグウ

無機化学分析

有機化学分析

ガス分析

火星物質分析



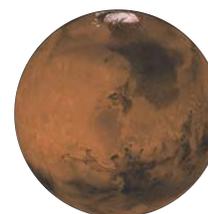
- 火星衛星の起源
- 水や有機物の輸送過程

火星衛星フォボス

©NASA/JPL-caltech/University of Arizona



MMX
Martian Moons exploration



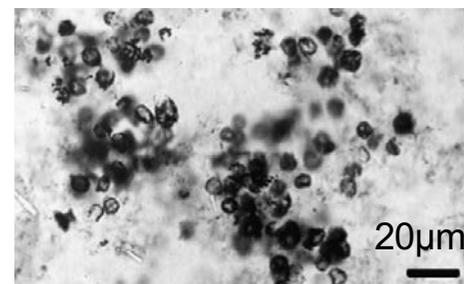
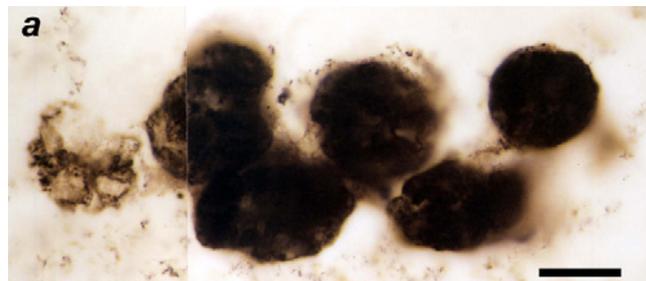
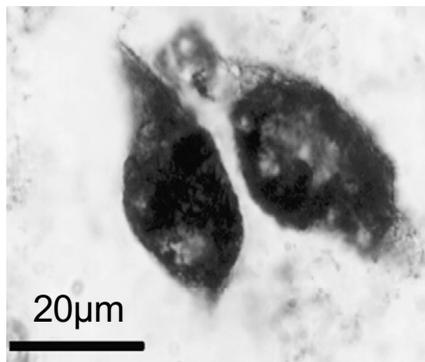
フォボスサンプル量想定: >10 g

火星生命の痕跡を含む可能性あり

微小な火星粒子から火星生命の痕跡や化学進化の痕跡を得るための分析技術開発を進めている。

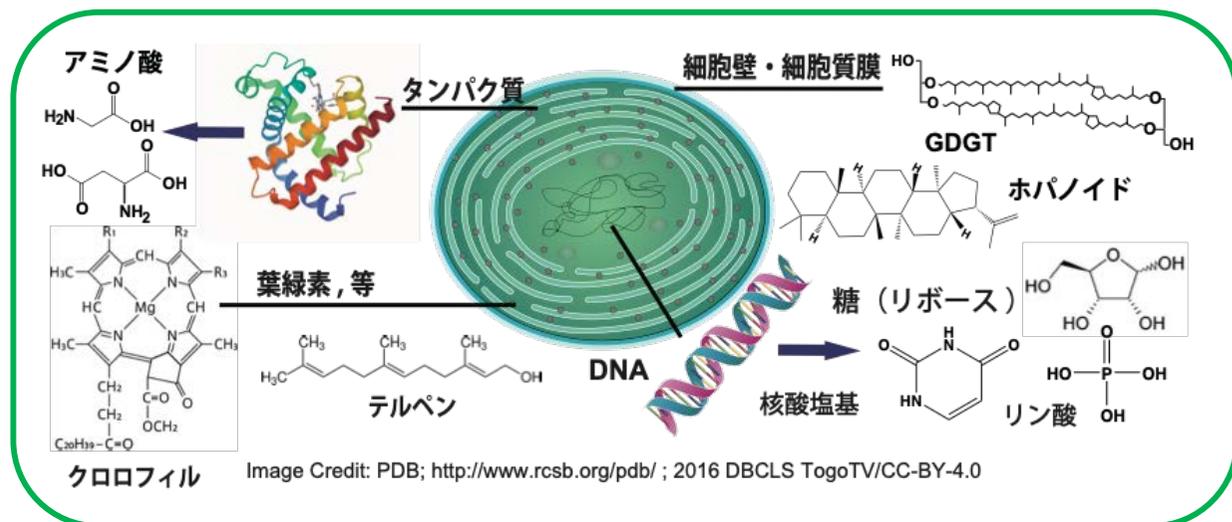
生命の痕跡=バイオシグネチャーとは？

地球上の太古代 (>30億年前) の微生物の化石 (オーストラリア)



Sugahara et al. (2010) *Pracam. Res.*; Sugitani et al. (2007) *Pracam. Res*

生体を構成する様々な有機分子



バイオシグネチャーとなるもの

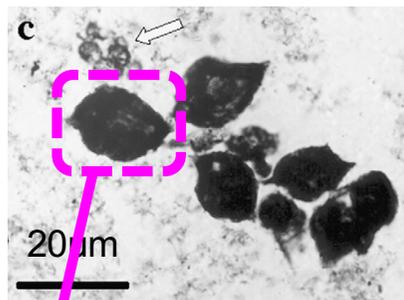
- ① 形態学的特徴
- ② 生命に特徴的な有機分子
= バイオマーカー
- ③ 安定同位体比 (e.g., $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)

←

- ・ 非生物的に生成された有機物
- ・ 隕石や彗星にもたらされた有機物

→ 火星における化学進化の可能性
を理解する上で重要

生命の痕跡・化学進化の歴史を保存しうるのは水質変成鉱物 火星粒子からいかにして火星生命につながる情報を取り出すのか？



Sugiyani et al. (2007) *Pracam. Res*

1st Step 有機物の濃集はあるか？

- 光学顕微鏡観察
- 分光学的分析
(e.g., 赤外分光, ラマン分光)
- X線 3D-CT (放射光)

火星粒子に含まれる有機物の多角的な情報は、火星生命の有無だけでなく、火星のハビタビリティを理解する上での重要な鍵となる。

3rd Step 重要な有機分子はあるか？

2nd Step 有機物の濃集の特徴は？

<局所分析>

- 電子顕微鏡 (SEM-EDS)
- NanoSIMS
- XAFS (放射光) etc.

- 化学組成
- 空間分布
- 周囲の鉱物との関係
- 安定同位体比

<分子レベル分析>

ガスクロマトグラフ or 液体クロマトグラフ

+ 質量分析計

- アミノ酸 (組成, キラリティー)
- 膜脂質バイオマーカー
- 核酸塩基, 糖

etc.

4/6

火星粒子を見つけてこそその火星生命探査 最重要課題は火星粒子をいかにして見つけるか？



©JAXA

はやぶさ2：リュウグウサンプルに加筆

MMXを契機に
粒子判別・分析技術開発を
一気に加速させる。

10 gのフォボスリターンサンプル中に
火星粒子は30粒子（粒径300 μ m想定）程度。

フォボス上には火星の様々な場所から飛来した様々な粒子が存在
しうるが、ターゲットとなる火星粒子は水質変成鉱物
（e.g., 炭酸塩, 硫酸塩, 粘土鉱物）

→ フォボス粒子とは化学・鉱物組成が異なる。

多量のフォボス粒子の中から極微量の火星粒子を
見つけ出すための技術開発が鍵となる。

光学顕微鏡観察による粒子形状情報と分光学的手法による
化学・鉱物学的情報（ラマン分光や赤外分光など）を
組み合わせたスクリーニング分析。

疑わしい粒子が見つければ、1粒子ごとに詳細な化学分析を
行い、火星粒子か否かの判定へ。

Martian Moons eXploration (MMX)

火星圏からの初のサンプルリターンとなる
MMXは火星生命探査の最前線。

MMXにより得られる科学的成果は後に続く
MSRへの重要な橋渡しとなる。

MMXは火星生命探査において重要な位置づけにある。

質量：約4000kg
ミッション期間：約5年
打上げロケット：H3

2024年度打上げ

火星生命探査と

MMX

Martian Moons eXploration

世界初の火星衛星サンプルリターン

- 原始太陽系における「有機物・水の移動、天体への供給」過程の解明への貢献として、水や有機物の存在を明らかにするとともに、火星衛星の由来を解明する。
- 我が国が培ってきた探査技術を継承しつつ、将来の火星本星における有人探査の拠点候補として火星衛星の調査を進める。

MMXの位置づけ ～小天体探査と国際宇宙探査～

火星衛星探査計画（MMX）は、はやぶさ2に続く、JAXAの**小天体探査**戦略の中核を担うミッションとして、並びに、**国際宇宙探査**の文脈において、日本の火星探査への取り組みの一番手に位置づけられてきた。

小天体探査戦略における位置づけ

MMXは、火星の衛星フォボスからの世界初のサンプルリターンミッション。原始太陽系における「**有機物・水の移動**、**天体への供給**」過程の解明に貢献するため、火星衛星に含まれる含水鉱物・水・有機物などを解析することにより、水や有機物の存在を明らかにするとともに、**火星衛星の由来**を解明する。

Credit: JAXA



国際宇宙探査における位置づけ

MMXは、日本における**火星探査への取り組みの一番手**。MMXでは、人類共通の価値である国際宇宙探査、その主たる目標である火星圏に、日本独自・優位な小天体探査技術を武器として、**大型国際共同ミッション**を主導して取り組む。我が国が培ってきた**探査技術を継承**し、その発展に寄与する。

Credit: JAXA

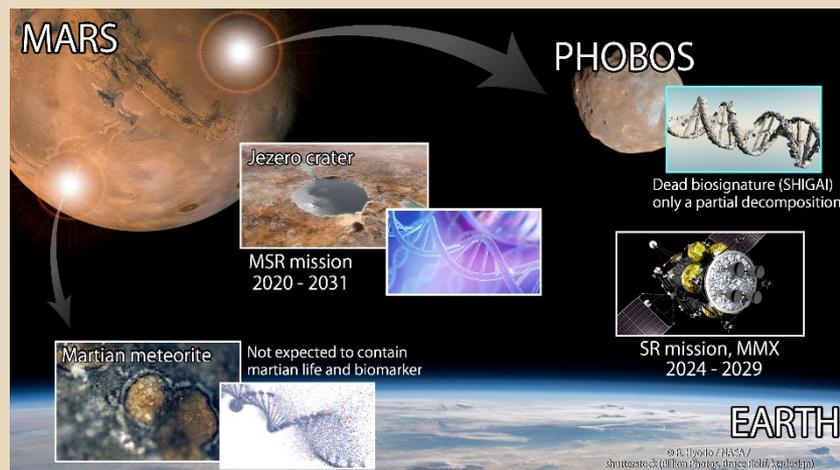


火星生命探査におけるMMXの役割

フォボス表面には、火星全表面からの全火星史に渡る火星表層物質が降り積もる。火星生命の痕跡を含みうる多様な火星物質を世界で初めて手に入れるMMXは、**火星生命探査**においても重要な役割を担う。

MMXが持ち帰る火星サンプル

- フォボスから採取する**サンプルの0.1%は火星から**飛来した物質。
- 火星表面の様々な地点・地質体から、様々な年代のサンプルが飛来。
(MSRが採取するサンプルとの違い)
- 火星生命探査で重要な役割を果たす堆積岩由来の物質も残存可能性。
(火星隕石との違い)



火星サンプル受け入れに向けた、サンプル分析技術

技術開発進行中!!

フォボスサンプルから火星サンプルを見つけ出す

光学顕微鏡観察による粒子形状情報と分光学的手法による化学・鉱物学的情報（ラマン分光や赤外分光など）を組み合わせるスクリーニング。候補粒子ごとに詳細な科学分析を実施して、火星粒子を識別。

火星サンプルから生命痕跡を見つけ出す

光学顕微鏡観察、分光学的分析等により有機物の濃集を識別。電子顕微鏡、放射光分析などの局所分析、クロマトグラフ、質量分析などの分子レベル分析を用い、濃集の形態学的特徴、多角的な化学情報を総合して生命痕跡の真偽を判断。

MMXは、火星生命探査における重要な科学的成果を挙げる可能性がある。

日本独自の火星圏探査MMX ~その意義・価値 3本の柱~

我が国が誇る小天体サンプルリターン技術を武器に、火星衛星の起源を明らかにすると共に、火星生命探査の一翼を担い、将来の有人火星探査にも寄与する。MMXは**日本独自の火星圏探査**である。

はやぶさ2からの発展 生命と火星衛星の起源に迫るMMX



©Akihiro Ikeshita

MMXは、はやぶさ2に続く、JAXAの小天体探査戦略の中核を担うミッション。火星の衛星フォボスのサンプルを採取し、火星衛星の起源を明らかにするとともに、太陽系の中で水・有機物が、どのようにして惑星に供給され、生命が誕生・居住可能な環境ができたのかを明らかにする。

NASAパーサヴィアランスより早く 火星サンプルを持ち帰るMMX



Credit:
NASA JPL

フォボス表面には、隕石衝突により火星表面から吹き飛ばされたサンプルが、かなりの量、降り積もっていると考えられている。MMXは、フォボス自身のサンプルに加えて、火星表層からのサンプルを、NASA・ESA、および中国の計画よりも早く、2029年度に地球に持ち帰る。

フォボスは火星への橋頭保 有人火星探査の先陣を切るMMX



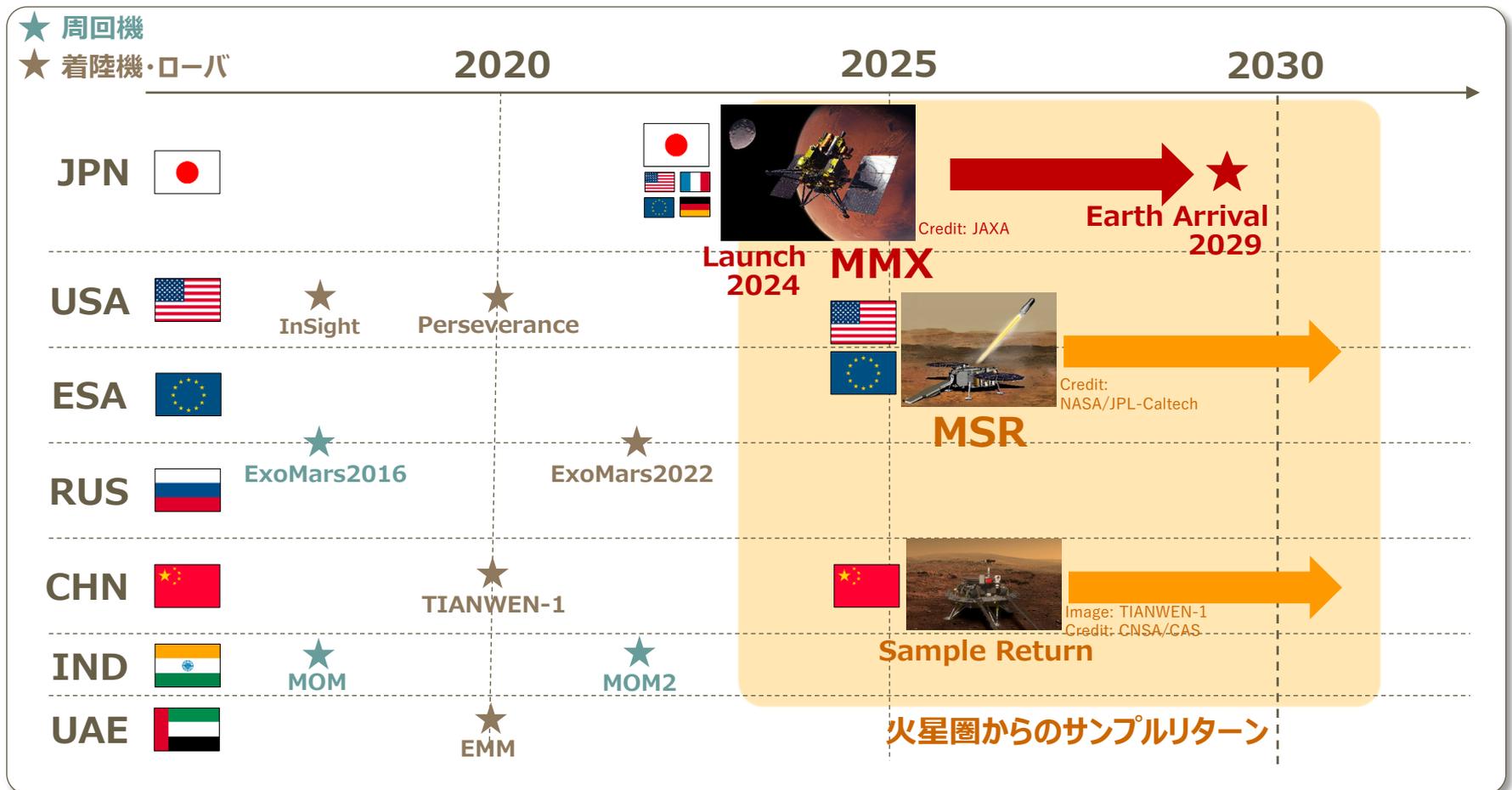
Credit:
NASA/JPL-Caltech
University of Arizona

MMXは、有人火星探査では必須となる火星圏への往復を果たす。また、有人火星探査の重要拠点と目されるフォボスの表面地形、地盤情報、表面・周辺環境を世界で初めて詳細に観測して、天然の宇宙ステーションとしての利用可能性を探る。

25 世界の火星圏探査とMMX

2020年度の米国、中国等による火星探査ラッシュも記憶に新しい、各国がしのぎを削る火星圏探査。日本はMMXを2024年度に打ち上げ、2029年度、**人類初の火星圏からのサンプルリターン**を実現する。

2020年代 世界の火星圏探査



2024年度の打ち上げに向け着実に進むMMX開発

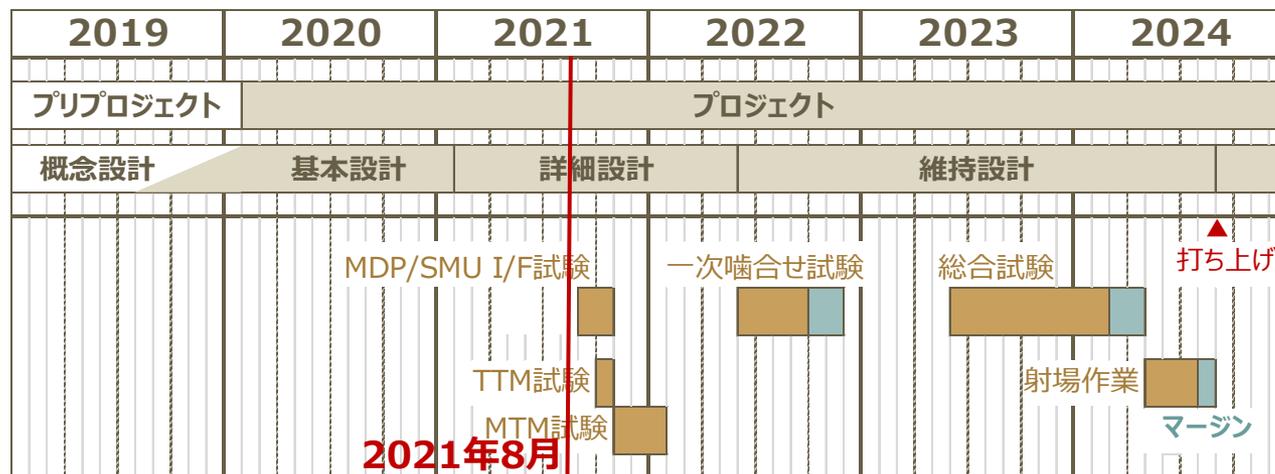
MMXは2021年2月に基本設計を完了、開発モデル（EM）の製作・試験、詳細設計を進めている。技術課題を一つ々々解決しながら、2024年度の確実な打ち上げに向け、着実に開発が進んでいる。

基本設計での挑戦

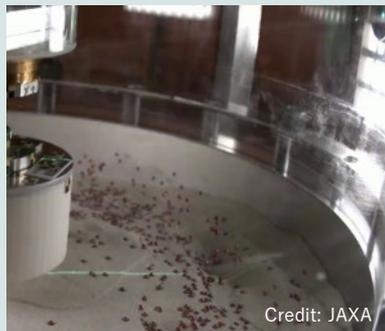
(2021年2月完了)

- 複雑なシステム、運用
- 13のミッション機器
- リソース（質量）制約
- タイトなスケジュール
- 新型コロナウイルス感染拡大によるコミュニケーション上の課題

MMX開発スケジュール



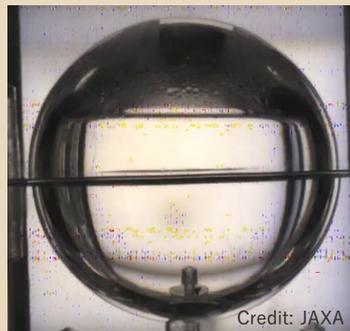
フォボス着陸時の反力・レゴリス飛散



Credit: JAXA

落下塔を用いた微小重力試験

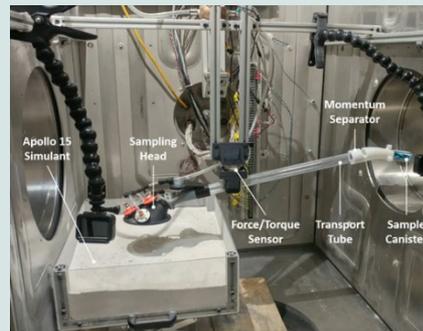
着陸時のスロッシング



Credit: JAXA

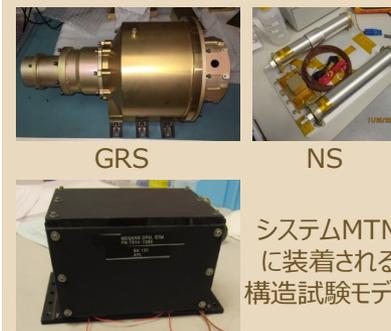
落下塔を用いた微小重力試験

ニューマティック採取機構



サンプル採取試験 (Honeybee Robotics 提供)

MEGANE STM



GRS

NS

DPU

システムMTM
に装着される
構造試験モデル

(JHU/APL提供)

まとめ

- 火星衛星探査計画（**MMX**）は、はやぶさ2に続く、JAXAの**小天体探査**戦略の中核を担うミッションとして、並びに、**国際宇宙探査**の文脈において、日本の火星探査への取り組みの一番手に位置づけられてきた。
- フォボス表面には、火星全表面からの全火星史に渡る火星表層物質が降り積もる。火星生命の痕跡を含みうる多様な火星物質を世界で初めて手に入れるMMXは、**火星生命探査**においても重要な役割を担う。
- 我が国が誇る小天体サンプルリターン技術を武器に、火星衛星の起源を明らかにすると共に、火星生命探査の一翼を担い、将来の有人火星探査にも寄与する。MMXは**日本独自の火星圏探査**である。
- 2020年度の米国、中国、UAEによる火星探査ラッシュも記憶に新しい、各国がしのぎを削る火星圏探査。日本はMMXを2024年度に打ち上げ、2029年度、**人類初の火星圏からのサンプルリターン**を実現する。
- MMXは2021年2月に基本設計を完了、開発モデル（EM）の製作・試験、詳細設計を進めている。**2024年度の確実な打ち上げ**に向け、技術課題ひとつひとつ解決しながら、着実に開発が進んでいる。