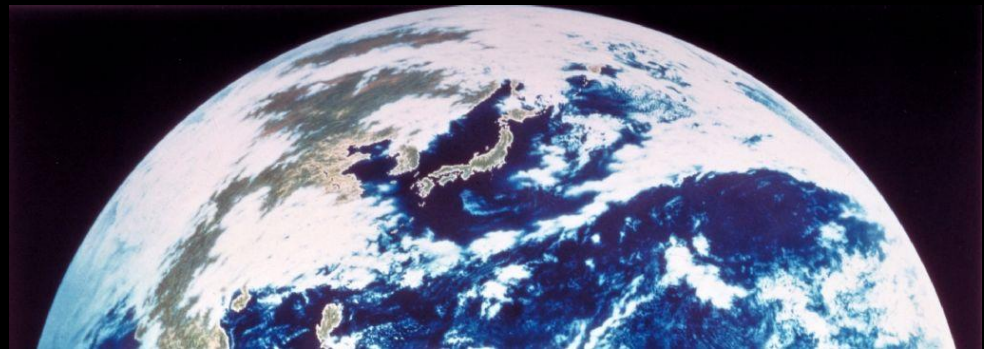
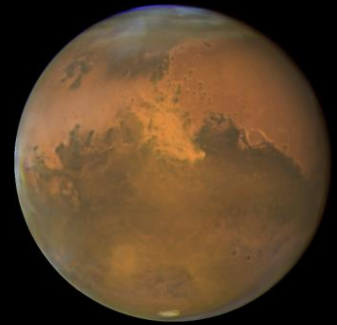


宇宙に生命を探す

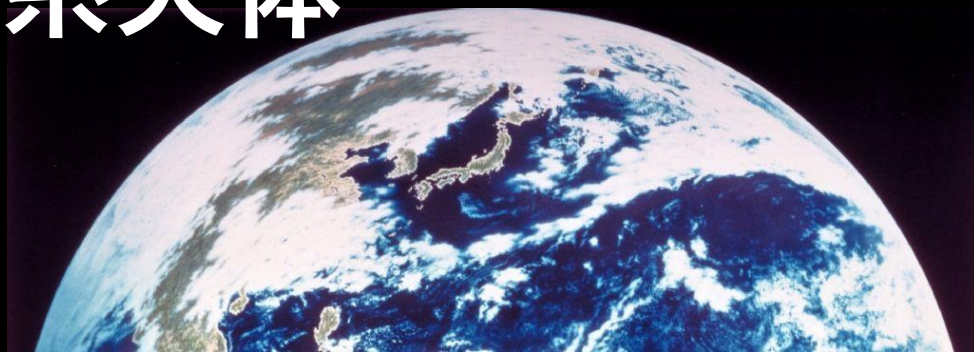
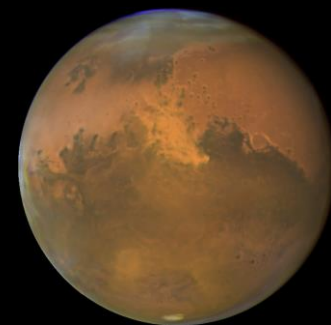
山岸明彦
東京薬科大学
生命科学部

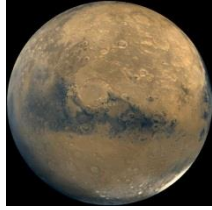


太陽系における生命と有機物探査

目次

1. 地球大気圏微生物
2. 地球低軌道の微生物
3. 火星での生命探査
4. その他の太陽系天体





蛍光顕微鏡を用いた、 火星における生命探査提案

山岸明彦(東京薬科大学)、吉村義隆(玉川大学)
長沼 毅(広島大学)、宮川厚夫(静岡大学)、出
村裕英(会津大)、豊田岐聡(阪大)、本多 元(長
岡技術科学大学)、小林憲正(横浜国大)、三田肇
(福岡工大)、大野宗祐、石丸 亮(千葉工大)、石
上玄也(ISAS/JAXA)、佐々木晶(国立天文台)、
宮本英昭(東京大学)

Photo by Spirit



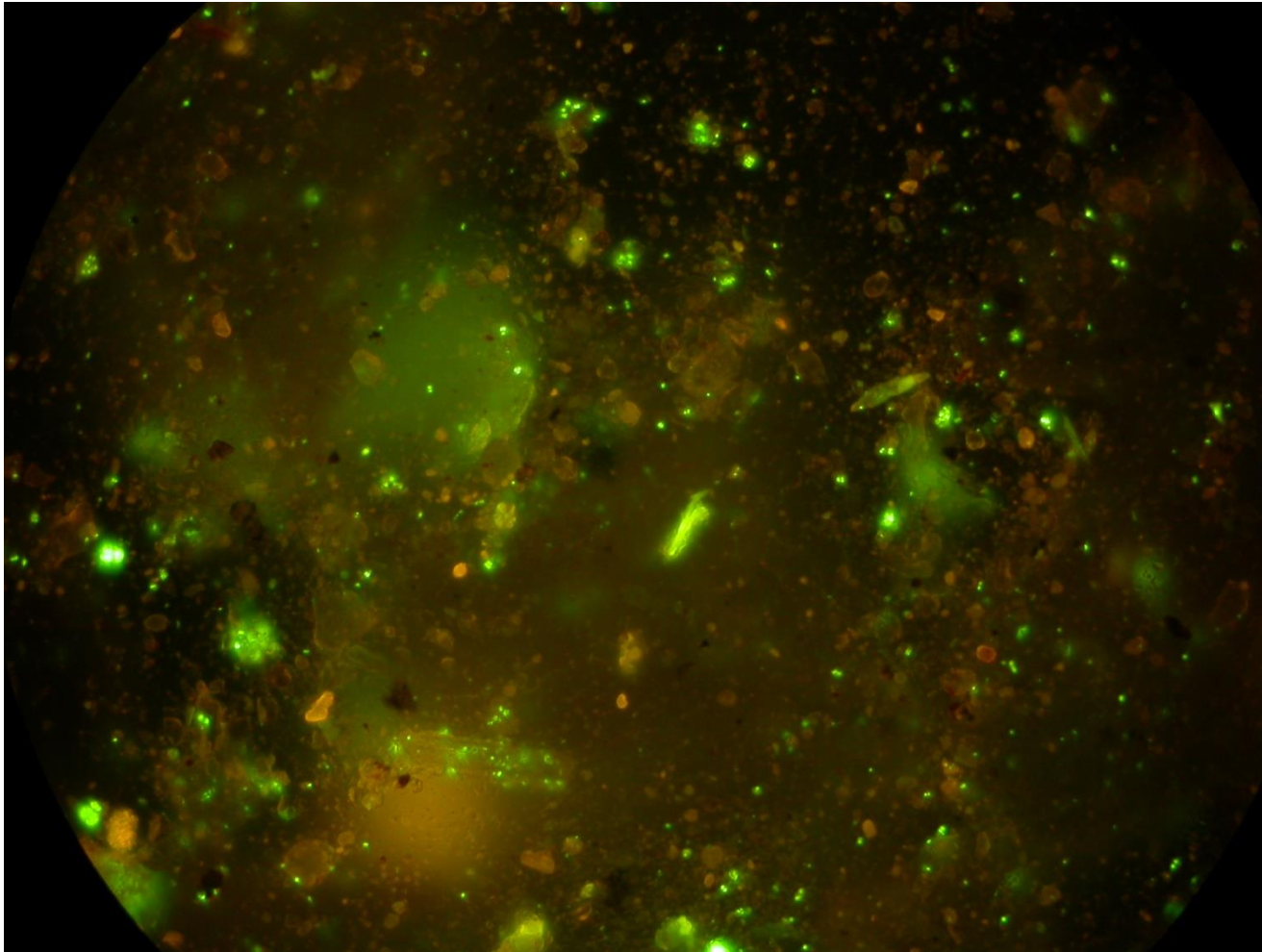
NASA

チリ、アタカマ砂漠



玉川大 吉村

アタカマ砂漠の微生物



微生物密度
 10^4 細胞/g

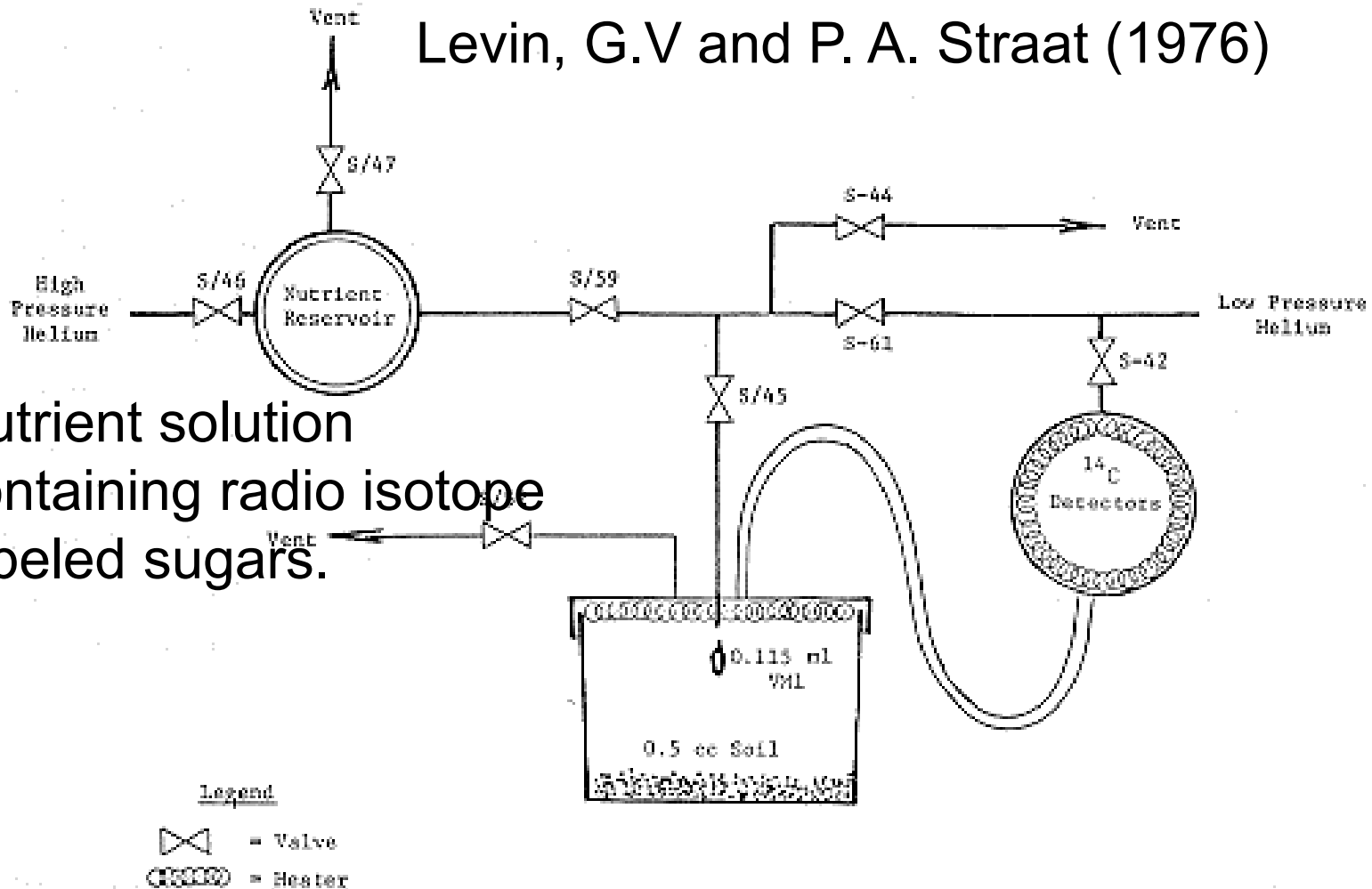
SYBR Green

玉川大 吉村

Labeled Release Experiment on Mars done in Viking Mission

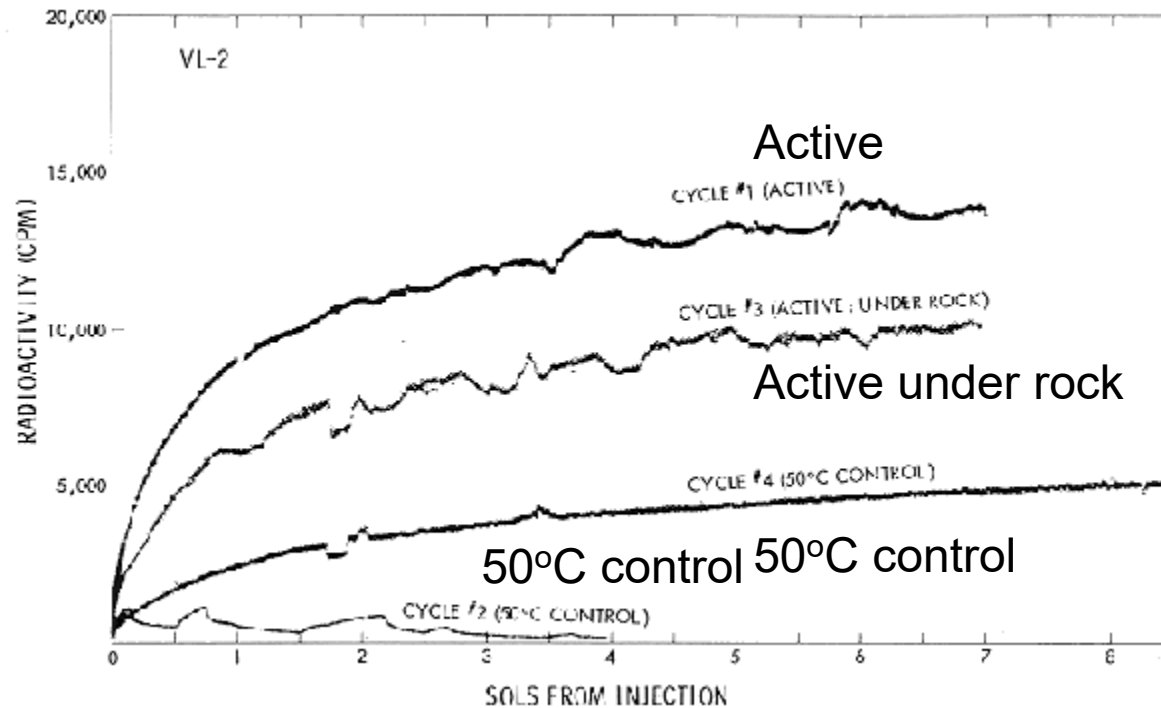
Levin, G.V and P. A. Straat (1976)

Nutrient solution
containing radio isotope
labeled sugars.



Labeled Release Experiment on Mars done in Viking Mission

These results are consistent with a biological response and also greatly narrow the number of possible chemical reactants.



Levin, G.V and P. A. Straat (1977) J. Geophys. Res. 82, 4663-4667

Margulis, L. et al. (1979) J. Mol. Evol. 14, 223-232

The results of the Viking Biology experiments are best explained by non-biological phenomena. Conditions of water activity, temperature, availability of carbon sources and others in most regions of the planet are too extreme for survival and growth of any known microorganisms.

- 1) Relied on the negative result of GCMS.
- 2) Before the development of extremophile research.
- 3) Before the high-resolution observation of Mars.

Re-evaluation of Viking GC-MS.

The detection limit of Viking GC-MS was not very good. Viking GC-MS is not able to detect bacteria 10^6 cells/gram soil.

(Glavin, et al, *Earth Planet. Scie. Lett.*, 2001, Navarro-González, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* , 2006)

Whereas microbes in least populated soils contain only 10^4 cells/gram, on Earth (Atacama Desert) .

(Drees et al. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2006)

Highly sensitive instruments should be used for the life exploration.

1. なぜ火星での生命探査か：最近の発見

NASAバイキング計画の見直し
GC-MS 感度がとっても悪かった。

The detection limit of Viking GC-MS was not very good. Viking GC-MS is not able to detect bacteria 10^6 cells/gram soil.

(Glavin, et al, *Earth Planet. Scie. Lett.*, **185**, 1-5 (2001)
Navarro-González, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **103**,
16089-16094 (2006)。

地球でも微生物見つけられない。

Whereas microbes in least populated soils contain **only** 10^4 cells/gram, on the Earth.

(Dress et al. 2006, *Appl. Environ. Microbiol.* **72**, 7902-7908;
Karner et al. *Nature* 409: 507-510; Kato et al. *Environm. Microbiol.* **11**: 3210-3222.)

1. なぜ火星での生命探査か：最近の発見

- 誕生初期の火星：地球と同じ（海、大気、地磁気、陸）
- 地球よりも生命誕生に適していた。
 - 過去の火星には水があった。
 - Large outflow channels (the Mars Global Surveyor mission)
 - H₂O ice (the Mars Odyssey and the Phoenix mission)
 - Hydrated sulfate and phyllosilicates (the Mars Express mission)
 - Sedimentary rocks and hematite (the Mars Exploration Rover Opportunity)



地球の生命は
火星が起源



火星には氷が見つかった
左の氷の固まりが数日後にはなくなった。

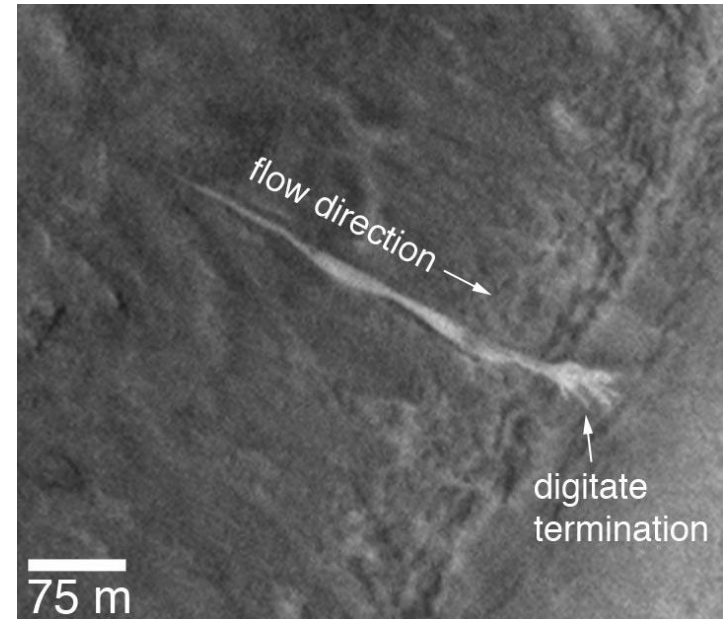
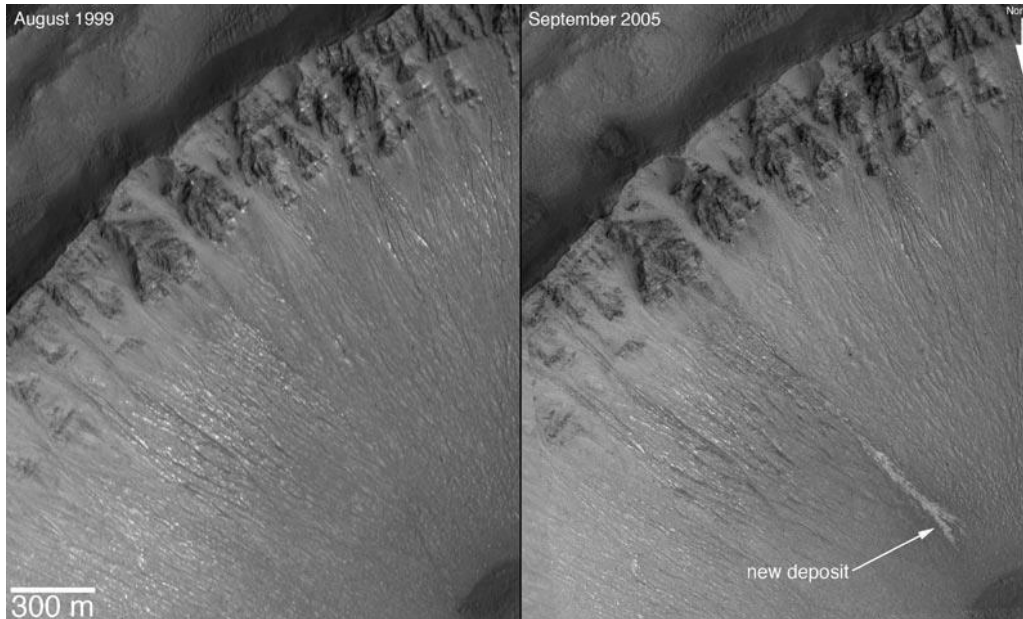
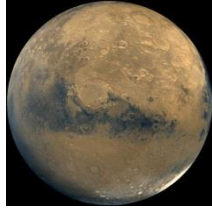


40億年前の火星には海があった

水の流れているらしい場所がいくつも見つかった。



火星表面の流体？の痕跡



NASA HP

Miyamoto, H., et al., 2004, J. Geophys. Res. Planets 109(E6).

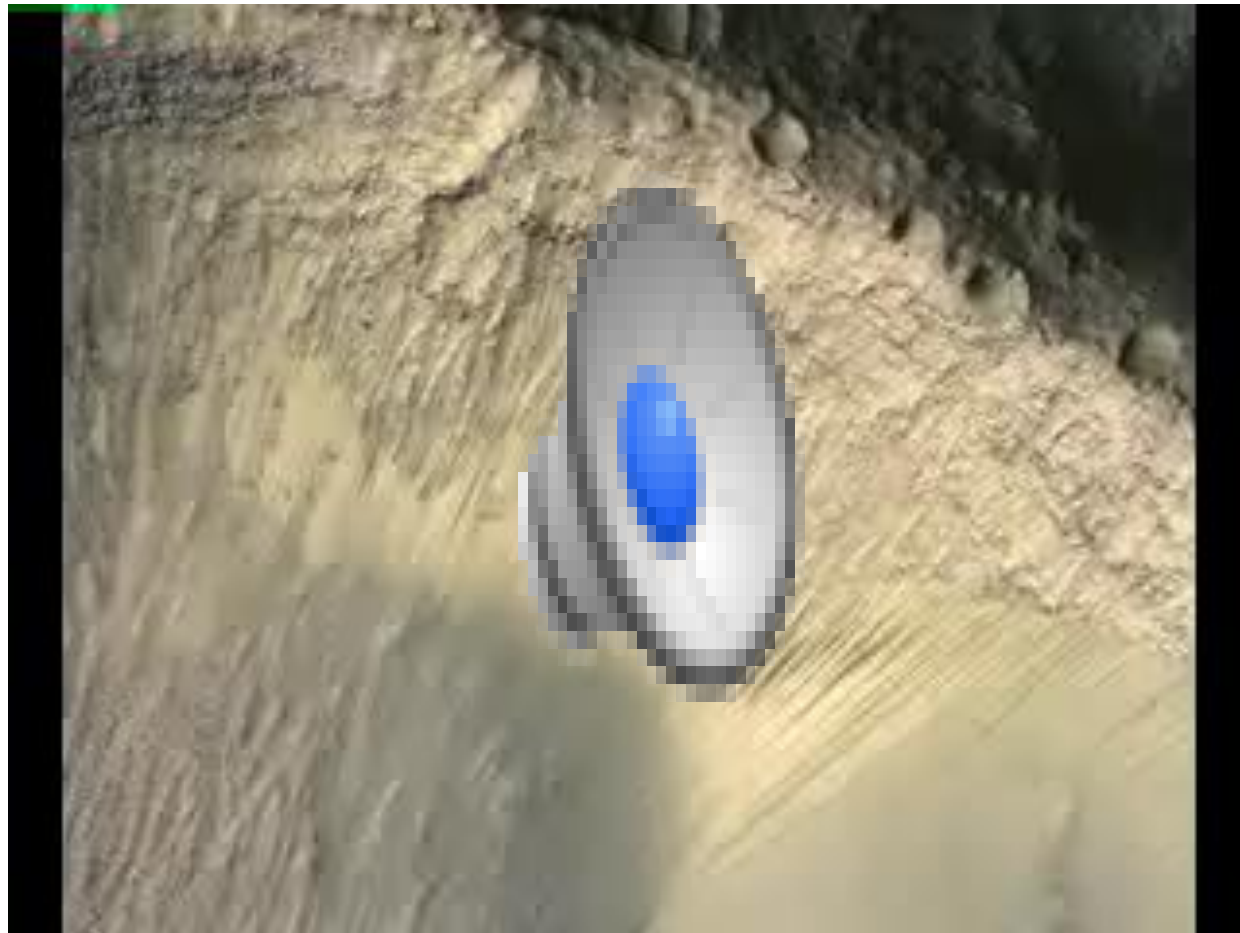
Miyamoto, H., et al., 2004, Geophys. Res. Lett. 31(13).

Malin, M. C. et al., 2006, Science 314, 1573.

McEwen, A. S., et al., 2011, Science 333, 740.

1. なぜ火星での生命探査か：水の流出？

クレーター斜面に春と夏に現れる水の流出？



NASA

Radar evidence of subglacial liquid water on Mars.

Orosei, R. et al. *Science* 361, 490-493 (2018)

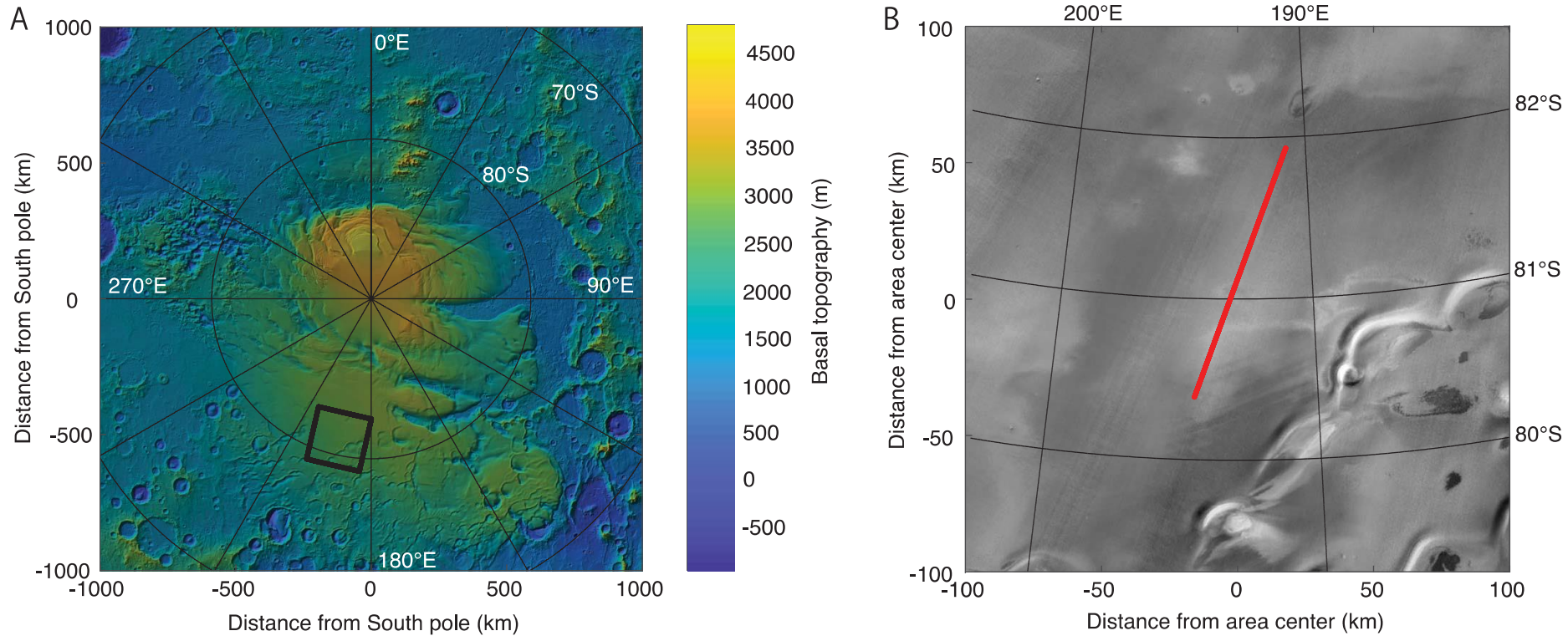


Fig. 1. Maps of the investigated area. (A) Shaded relief map of Planum Australe, Mars, south of 75° S latitude. The map was produced using the MOLA topographic dataset (11). The black square outlines the study area. (B) Mosaic produced using infrared observations by the THEMIS (Thermal Emission Imaging System) camera (13), corresponding

to the black square in (A). South is up in the image. The red line marks the ground track of orbit 10737, corresponding to the radargram shown in Fig. 2A. The area consists mostly of featureless plains, except for a few large asymmetric polar scarps near the bottom right of (B), which suggest an outward sliding of the polar deposits (34).

Radar evidence of subglacial liquid water on Mars.
Orosi R. et al. *Science* 361, 490-493 (2018)

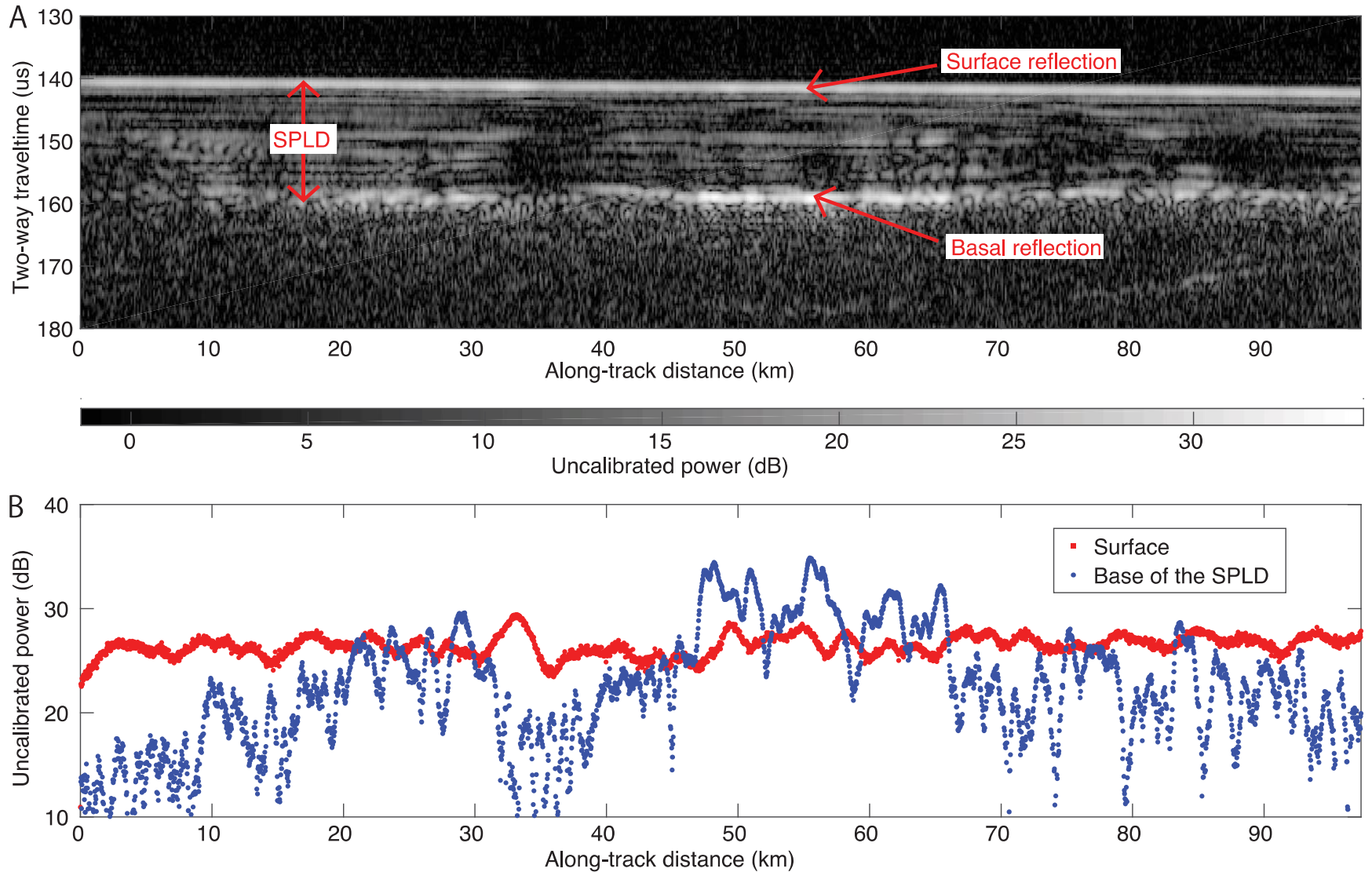


Fig. 2. Radar data collected by MARSIS. (A) Radargram for MARSIS reflector at about 160 ns corresponds to the SPLD/basal material interface

Radar evidence of subglacial liquid water on Mars.

Orosei, R. et al. *Science* 361, 490-493 (2018)

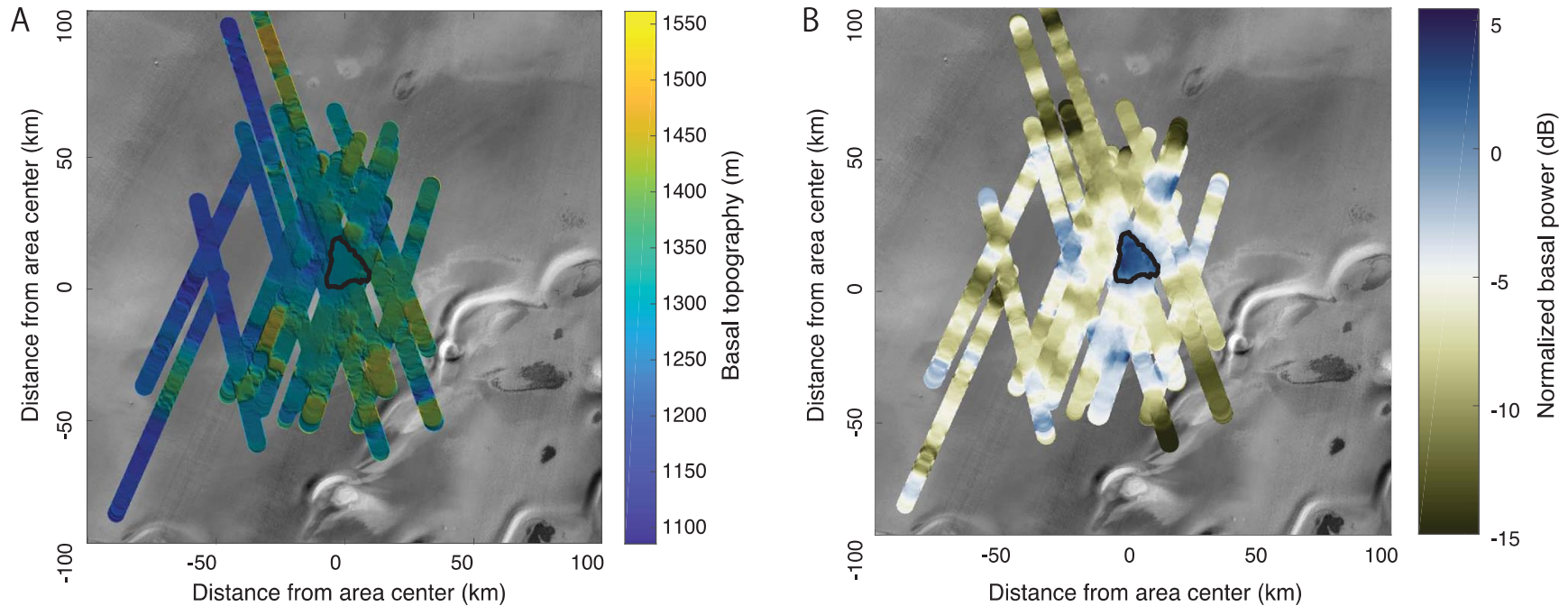


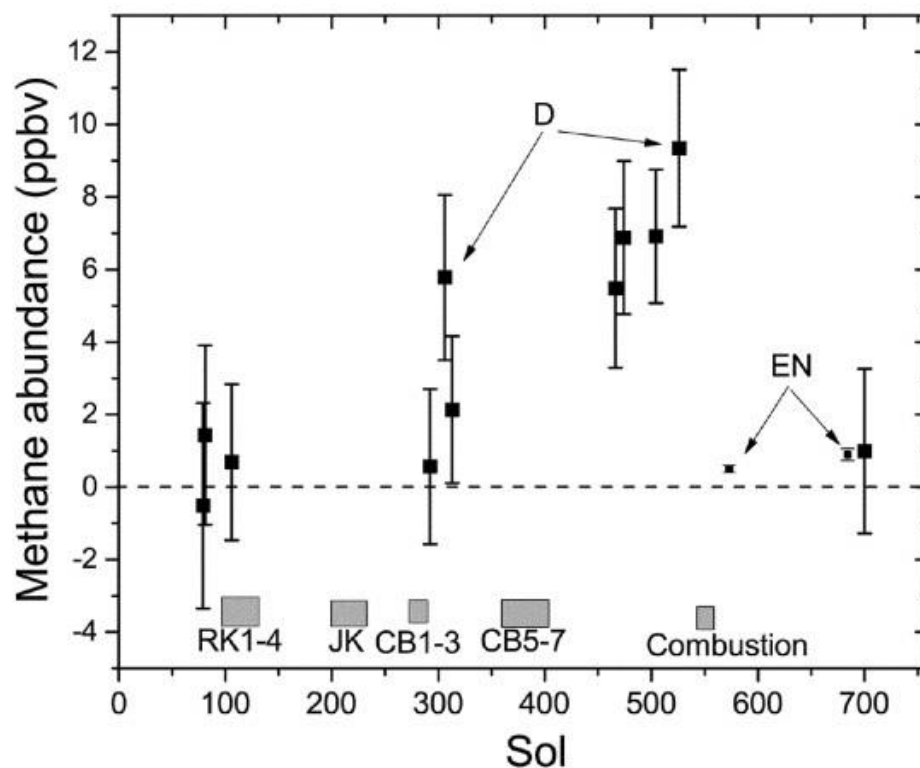
Fig. 3. Maps of basal topography and reflected echo power. (A) Color-coded map of the topography at the base of the SPLD, computed with respect to the reference datum. The black contour outlines the area in which bright basal reflections are concentrated. (B) Color-coded map of normalized basal echo power at 4 MHz. The large blue area (positive

values of the normalized basal echo power) outlined in black corresponds to the main bright area; the map also shows other, smaller bright spots that have a limited number of overlapping profiles. Both panels are superimposed on the infrared image shown in Fig. 1B, and the value at each point is the median of all radar footprints crossing that point.

1. なぜ火星での生命探査か：メタンの発見

•NASA探査車MSL：メタンの放出が検出された

Webster, C.R. et al. Science Express (2014)



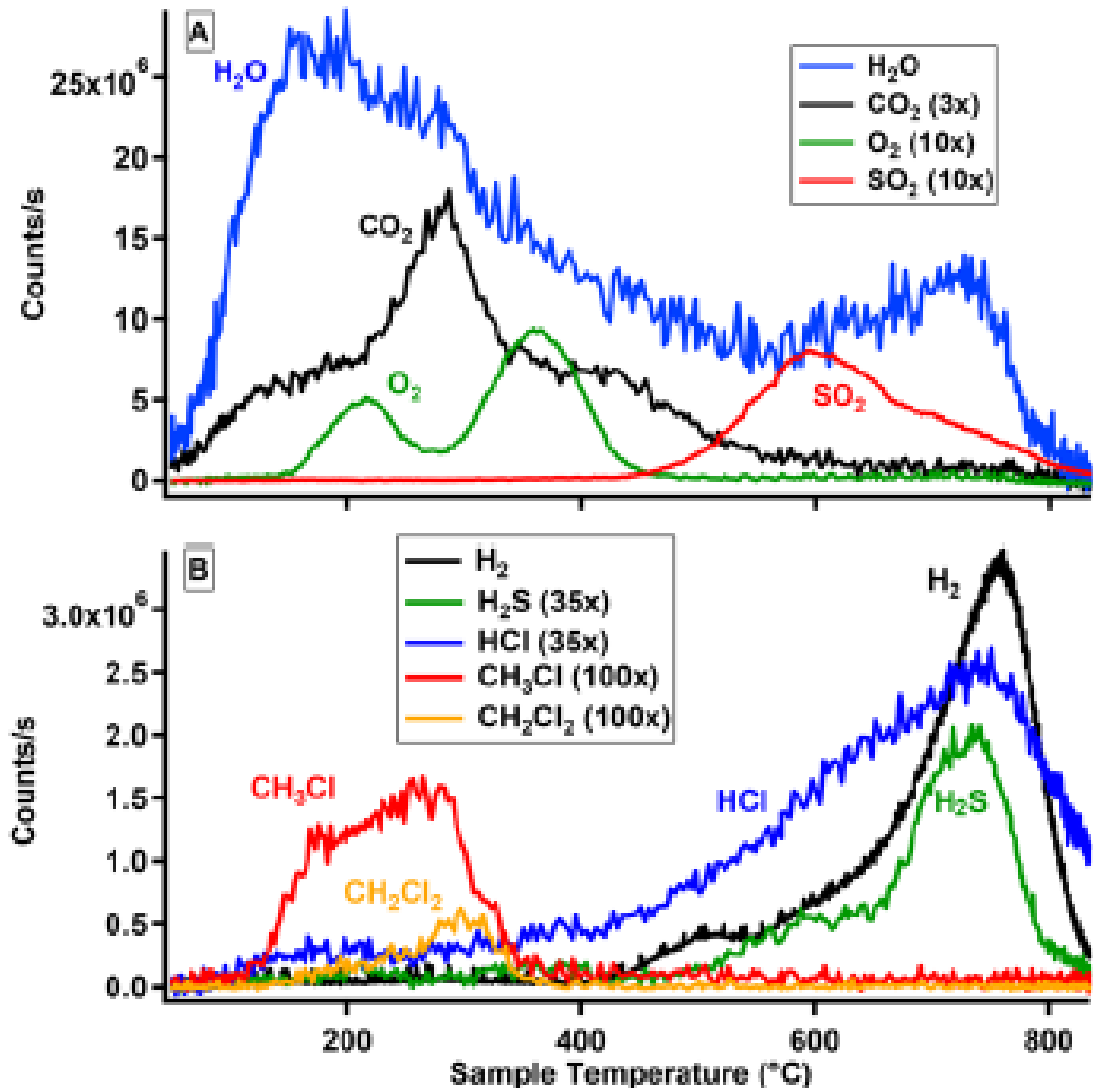
Methane can be energy source for methane-oxidizing bacteria, which is different from well known metanongen.

Methane was measured from nighttime ingest, except D that was ingested during the day and analyzed at night. EN were retrieved form the “enrichment measurement”.

1. エネルギー源の発見

火星探査車
MSLキュリオシティ
が還元型鉱物を検
出した。
生物のエネルギー
源となる

D. W. Ming et al. 2013
science.1245267
Scienceexpress Dec.19



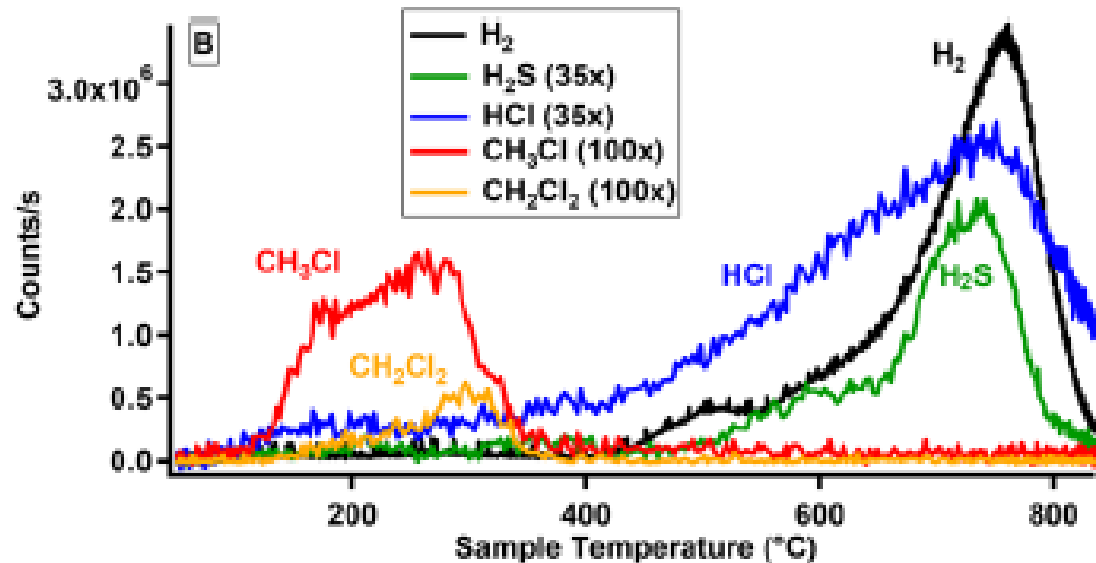
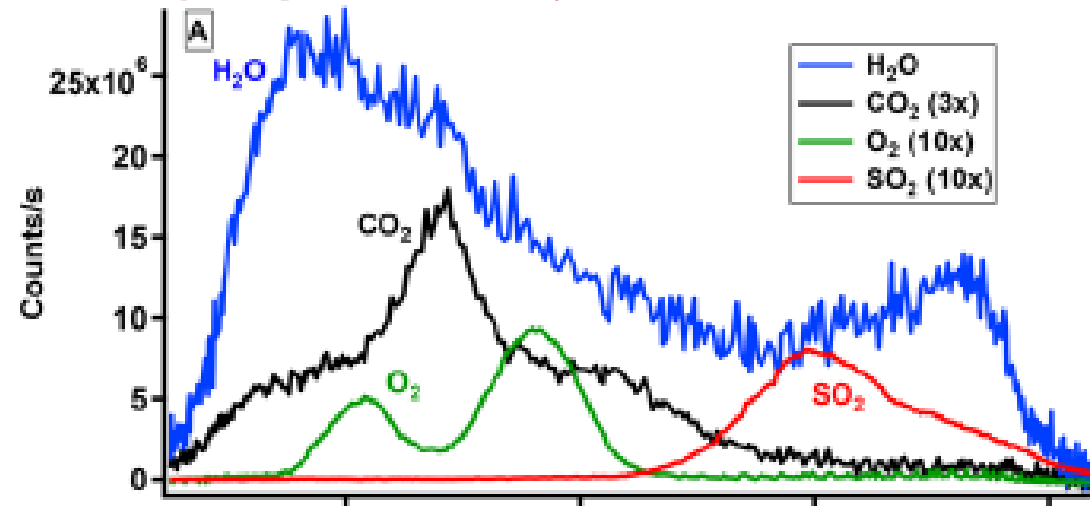
1. 有機物の発見

火星探査車キュリオ
シティが有機物を
検出した。

D. W. Ming et al. 2013
science.1245267
Science express
Dec.19

Organic molecules in
the Sheepbed
Mudstone, Gale Crater,
Mars

Freissient, C. et al.
J. Geophys. Res.
Planets, 2015

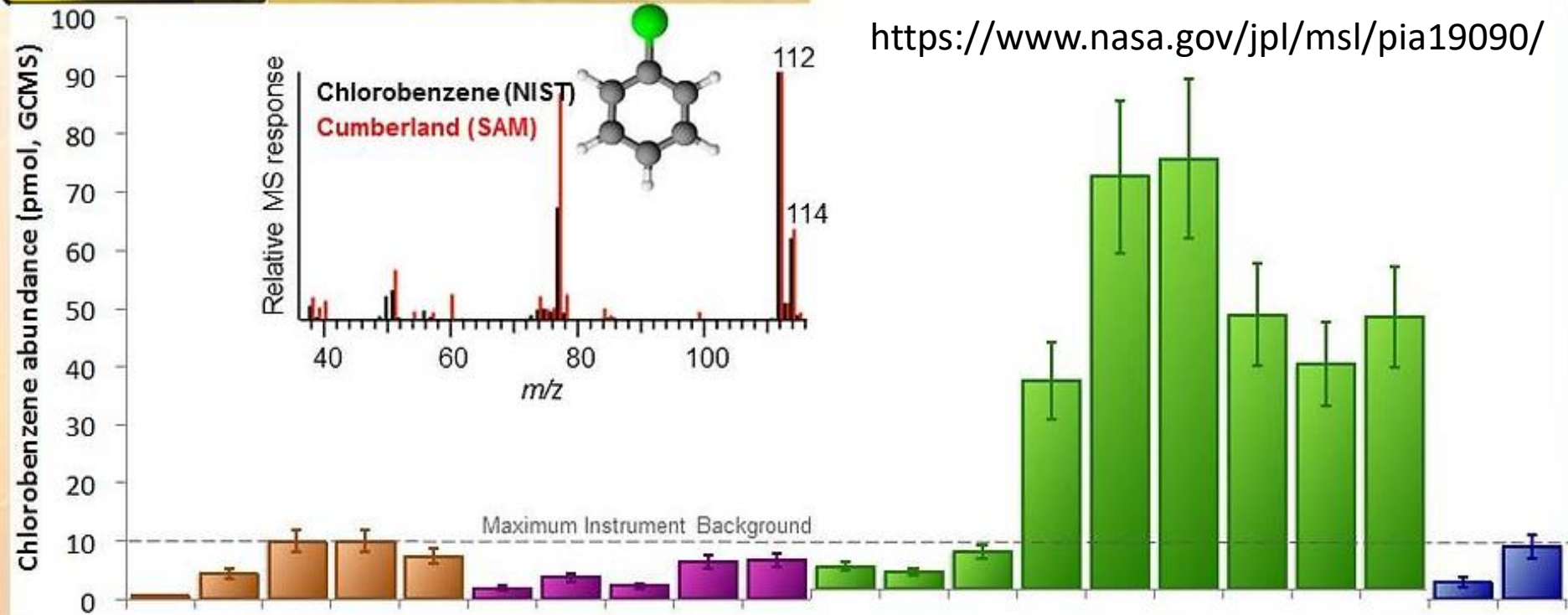




Sample comparisons reveal a compelling result



<https://www.nasa.gov/jpl/msl/pia19090/>



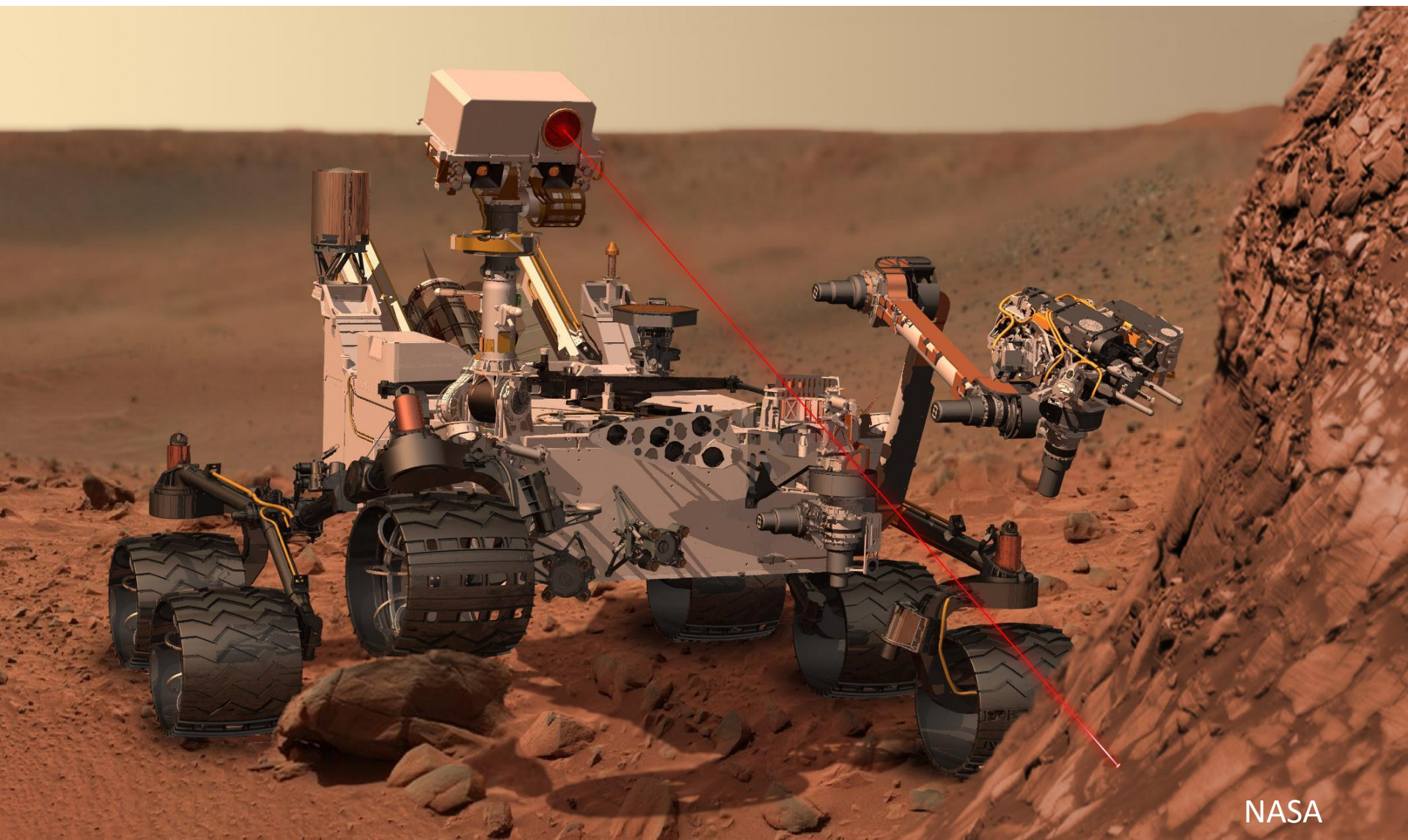
ROCKNEST

JOHN KLEIN

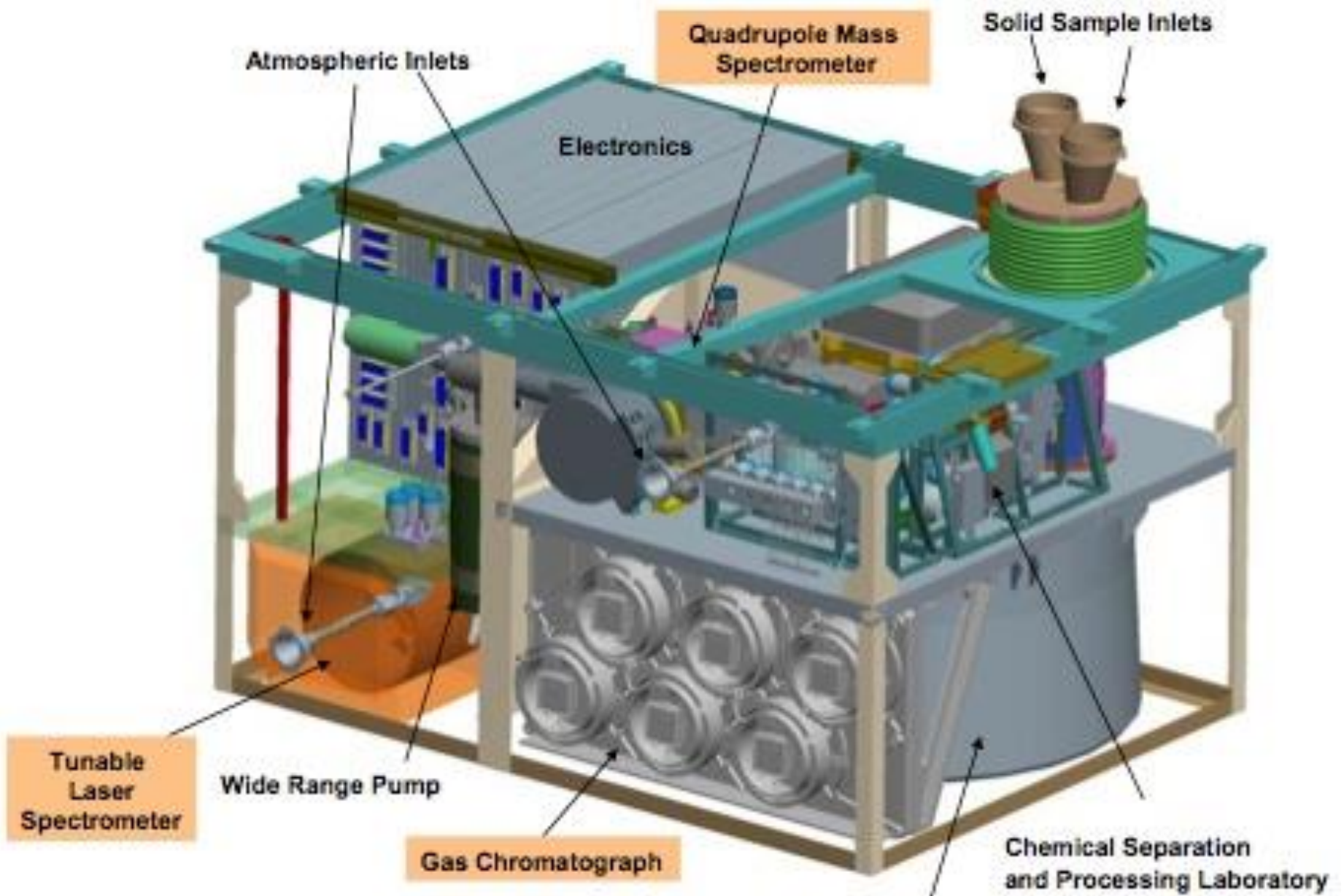
CUMBERLAND

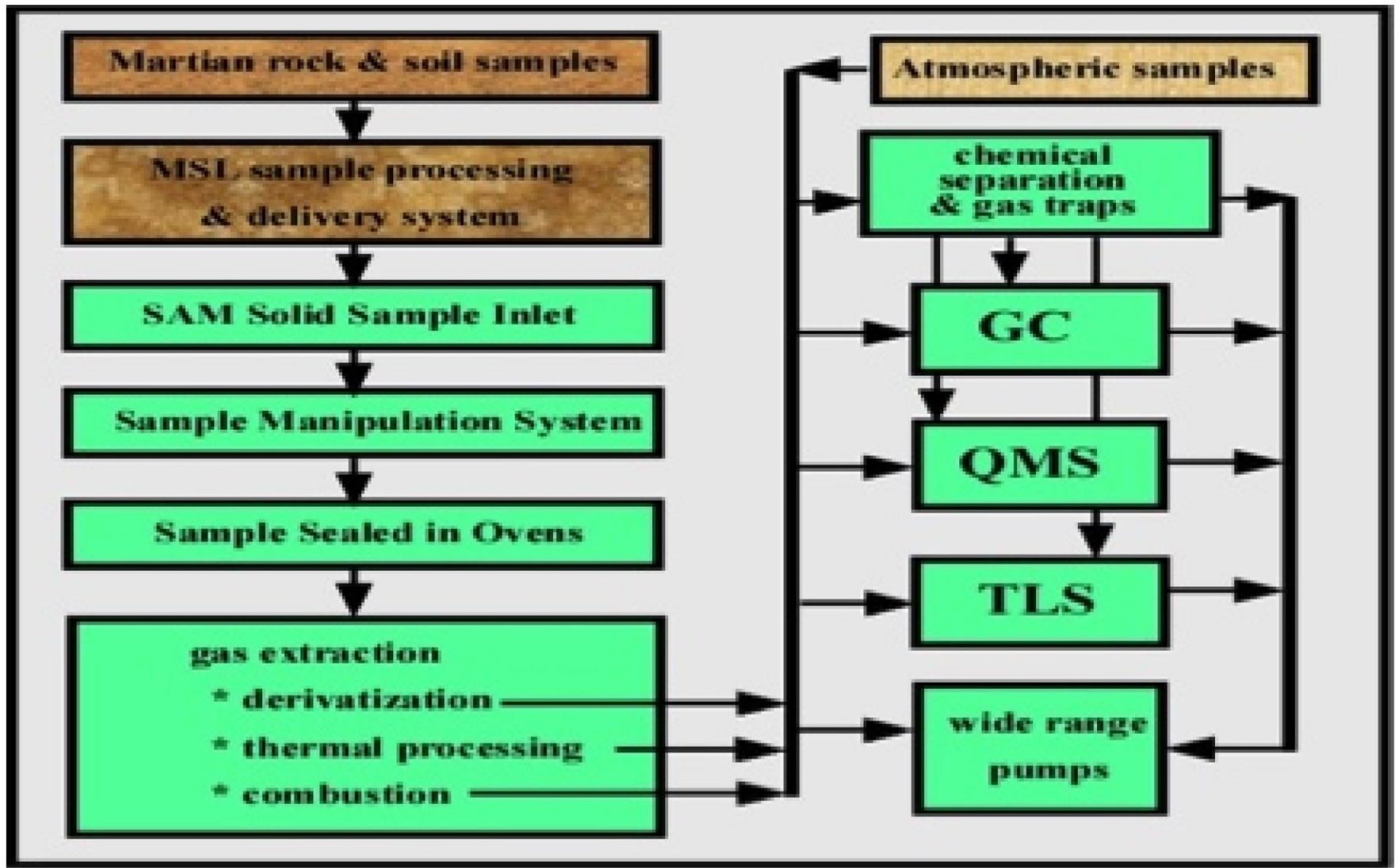
CONFIDENCE HILLS





NASA





2. 生命はいるか

火星表面で可能な化学合成細菌

電子供与体	電子受容体	化学合成細菌
(H ₂)	CO ₂	(メタン生成菌)
(H ₂)	ClO ₄ ⁻ , NO ₃ ⁻ , Fe(OH) ₃ , SO ₄ ²⁻ , etc.	(水素酸化細菌)
CH ₄	NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , Fe(OH) ₃ , SO ₄ ²⁻ , etc.	メタン酸化細菌
Fe (II)-sulfides	NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , etc.	鉄酸化細菌
S ⁰	ClO ₄ ⁻ , NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , etc.	硫黄酸化細菌

地球生命生存限界と火星環境

Factor	地球微生物の生存限界	火星表層環境
Temperature	-20~122°C (Metabolism) -18°C (Cell division) -196°C (Survival)	-130~20°C
Pressure	700 Pa (Cell division)	600~800 Pa (6/1000 of the Earth's)
Water	Water activity: $a_w=0.4$	Ice/Liquid?
pH	-0.06~12.5	7.7 ± 0.5
UV radiation	$\sim 5,000 \text{ J m}^{-2}$	20 W m^{-2}
Ionizing radiation	$1,440 \text{ Gy day}^{-1}$	0.4 mGy day^{-1}
Redox potential	Limits undefined	Highly oxidizing (perchlorate)

- UV light is shielded by thin layer of soil.
- Perchlorates is used for respiration by some microorganisms.

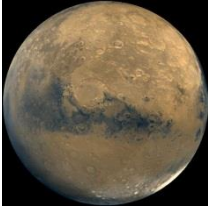
微生物は火星表層で生存可能。

2. 生命はいるか

現在の火星に生育環境があるか？

1. エネルギー源
2. 有機物
3. CHONSP 軽元素
4. 微生物生存環境：紫外線が遮蔽される場所
5. 水活量0.4以上の場所

火星の微生物をどう探すか？



どんな形をしているか？

球形あるいは桿菌

どれくらいの大きさか？

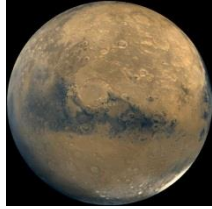
1から10 μ m

何でできている？

有機物

どう判定する？

膜で囲まれている



蛍光顕微鏡で検出可能な特徴

特徴	分子種	蛍光色素
遺伝情報	核酸	SYBR Green I and II, SYBR Gold, Acridine orange, DAPI, etc.
代謝	酵素反応	CFDA, CFDA-AM, SFDA, etc.
細胞膜	脂質膜	ANS, FM1-43, FM4-64, etc.
非生物的合成等	アミノ酸	Fluorescamine, etc.

Antarctic ice
stained by SYBR Gold

Alpine soil
stained by CFDA-AM

Antarctic soil stained by
FM4-64

3. 探査原理

微生物をどう見つけるか？

1. 有機物でできている

水、初期火星環境、隕石由来有機物

2. 膜に囲まれている：生命の定義

細胞膜：細胞内分子濃度を高いたもつ

3. 代謝をする：生命の定義

酵素活性：エステラーゼ反応

4. 探査手法: 蛍光顕微鏡で検出する

1. SYPRO Red: 有機化合物
2. SYTO24 and propidium iodide: 有機化合物は赤、膜に囲まれた有機化合物は緑
3. CFDA-AM: 酵素触媒活性

SYTO24 & Propidium Iodide

SYPRO Red

CFDA-AM

DNAをもたない細胞も検出できる

DNAを持たない大腸菌を検出(黄色矢印)

Staining of miniature *Escherichia coli* P678-54

(a)

(b)

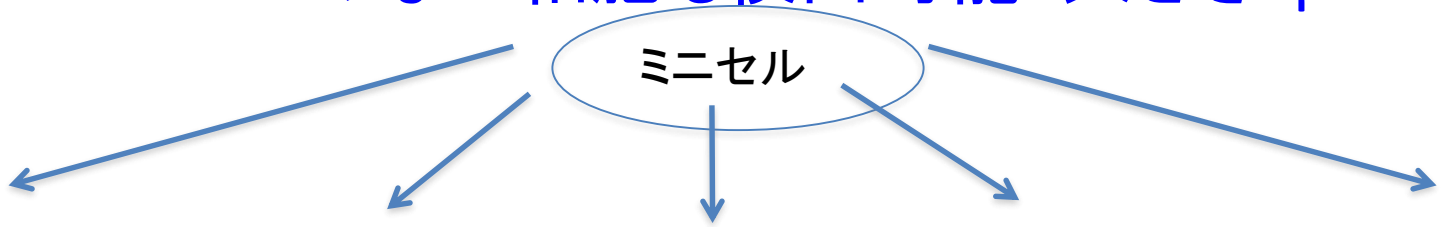
Bright field

Fluorescent field

Microscopic images of P678-54. (a): bright image, (b): fluorescence image stained with LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kit (SYTO9 & PI)

3. 探査原理

DNAのない細胞も検出可能: 大きさ1 μm



生菌

死菌

3. 探査原理

有機物に対する染色性

微生物細胞だけでなく、
タンパク質やプロテノイド、
PAHなどの有機物も
検出可能

DNAを持たない細胞や有機物、PAHも検出可能.

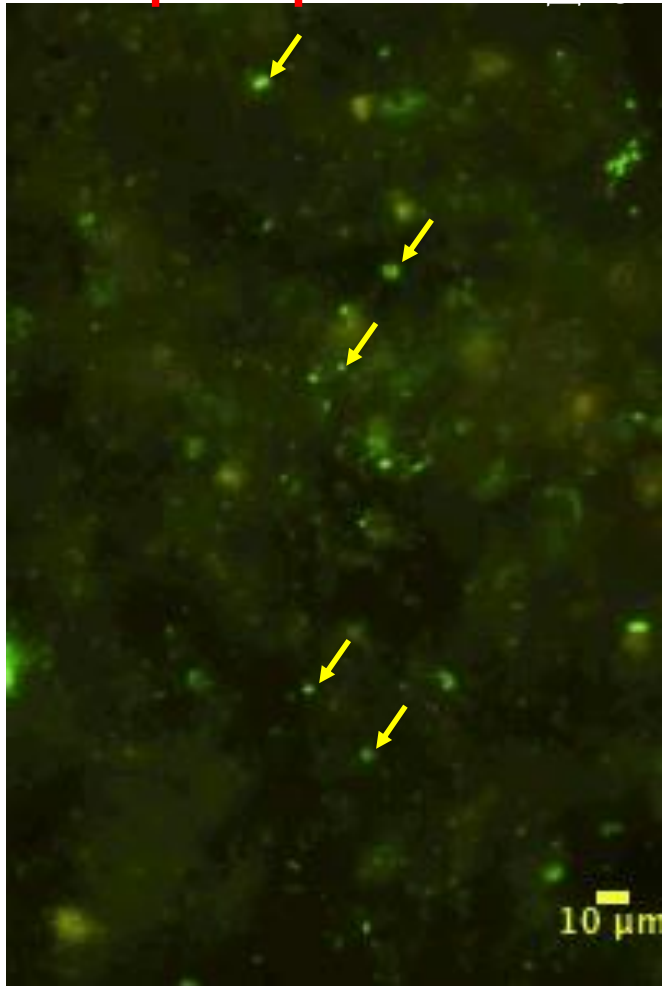
3. 探査原理

火星模擬土壌中でも微生物の検出が可能

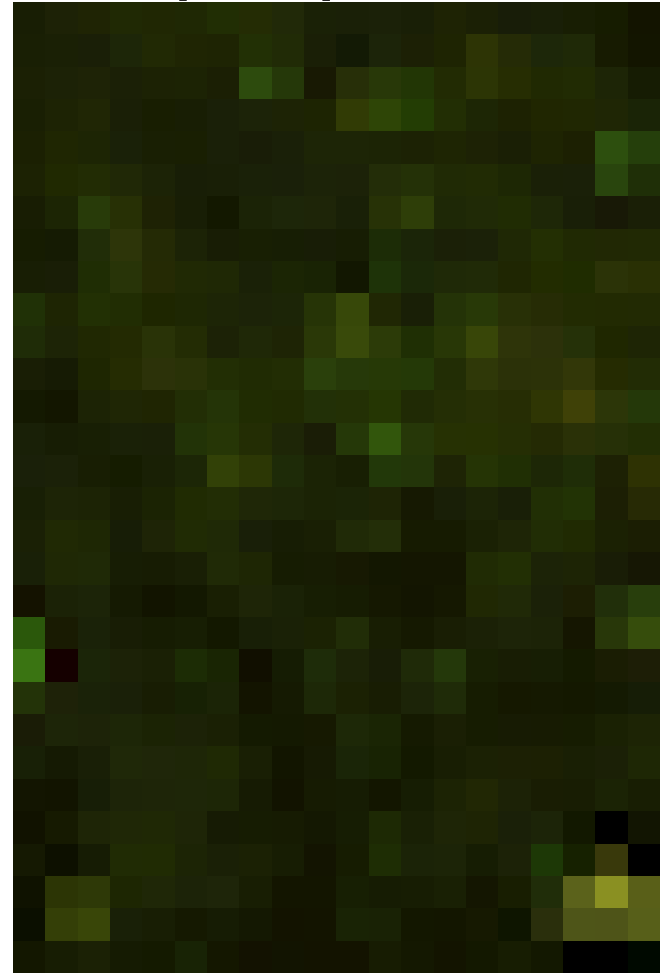
SYTO24 プロピヂウムイオダイド SYBR Green I SYPRO Red CFDA, AM

高い画像解像度が重要

1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$



10 $\mu\text{m}/\text{pixel}$



Desert soils stained by SYBR Green

擬陽性の蛍光

Deinococcus radiodurans (liveing and dead cells) in montmorillonite and simulated Martian soil stained with SYTO24 & Propidium Iodide

Dead and alive microbes were added to montmorillonite and simulated Martian soil, stained with SYTO24 and propidium iodide. Clay particles adsorb pigments and emits false positive signals.

擬陽性の蛍光を黒色インクで抑える

蛍光スペクトル測定

生菌 : SYTO 24

死菌 : Propidium Iodide

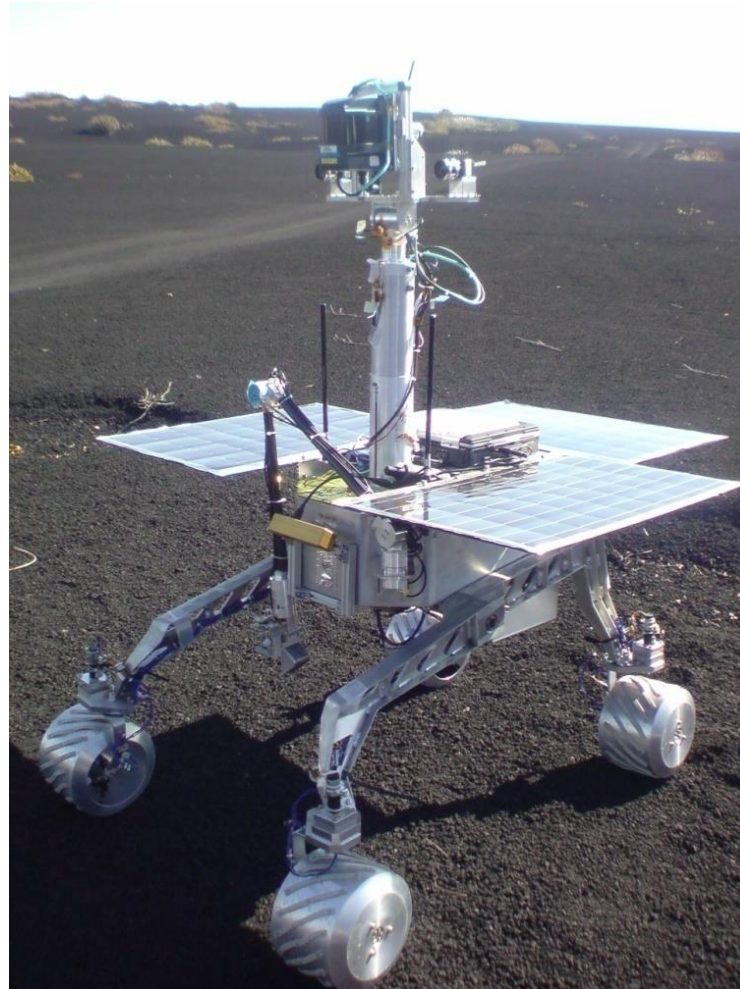
長石 : 非染色

4. 探査手法：色素の環境耐性.

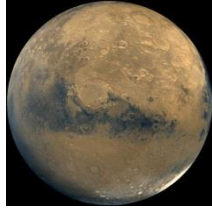
- 火星大気圧 $-30 \sim 30^{\circ}\text{C}$: 液体
- 熱処理後、放射線処理後、過塩素酸存在下での染色性
 - 50°C (700h)
 - γ -線 80Gy
 - 過塩素酸塩 (2.5%).

新型探査ロボットの試作機

Micro6シリーズ (JAXA宇宙研・中央大・明治大共同開発)



蛍光顕微鏡をローバーに搭載



- 日本のチームは蛍光顕微鏡で微生物を検出する事を提案中。
- バイキングの感度より1000倍感度が高い
- 地球と異なる微生物も検出できる。



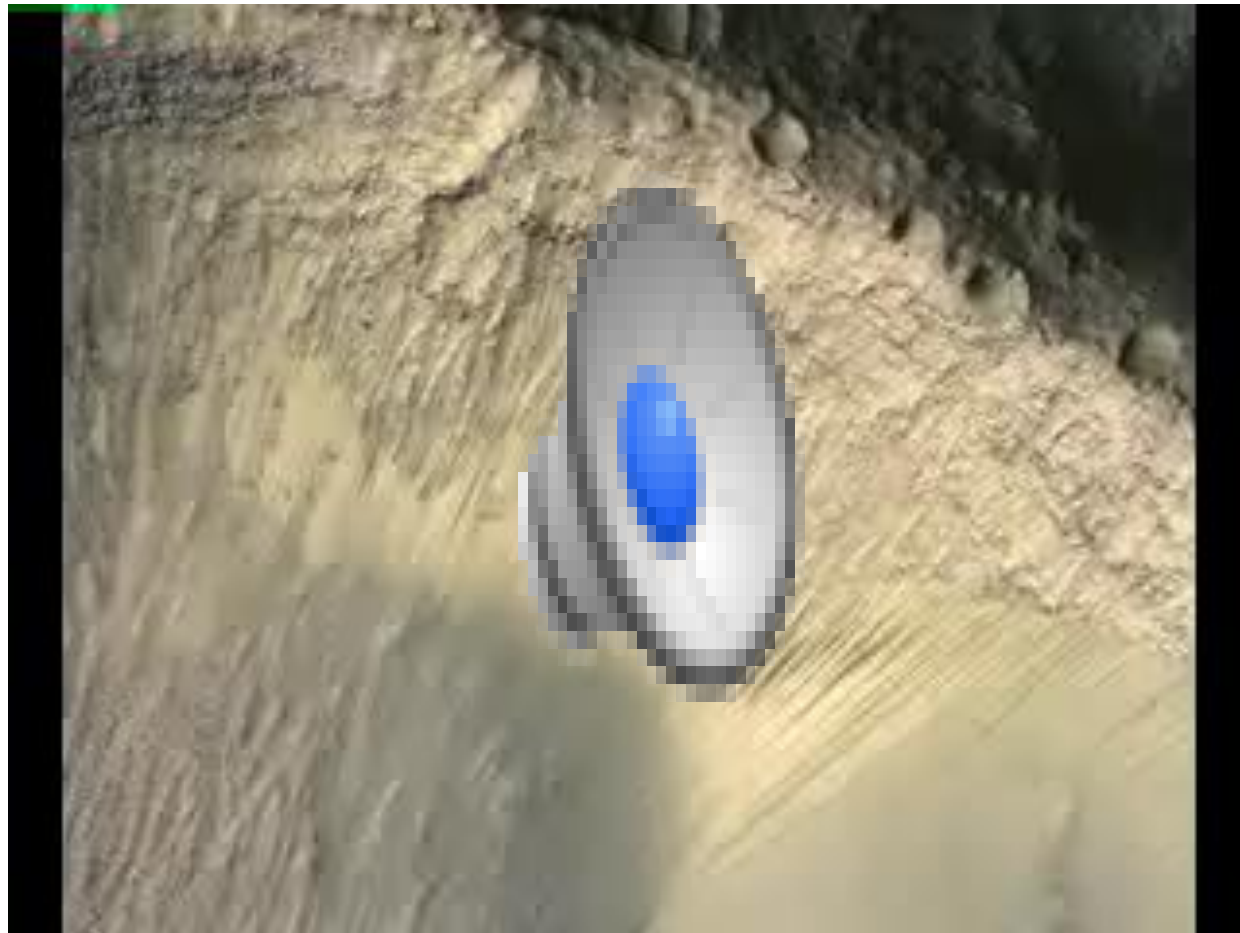
打上
約1年で火星到着
自動で顕微鏡観察
画像を地球に転送

どういふ場所に
メタン酸化菌がいるか：
噴気孔：地球では火山地帯
（地球では硫黄酸化細菌）



1. なぜ火星での生命探査か：水の流出？

クレーター斜面に春と夏に現れる水の流出？



NASA

5. 探査地候補

ダークパッチ

黒色の点 : 現在でも全球的に発生している

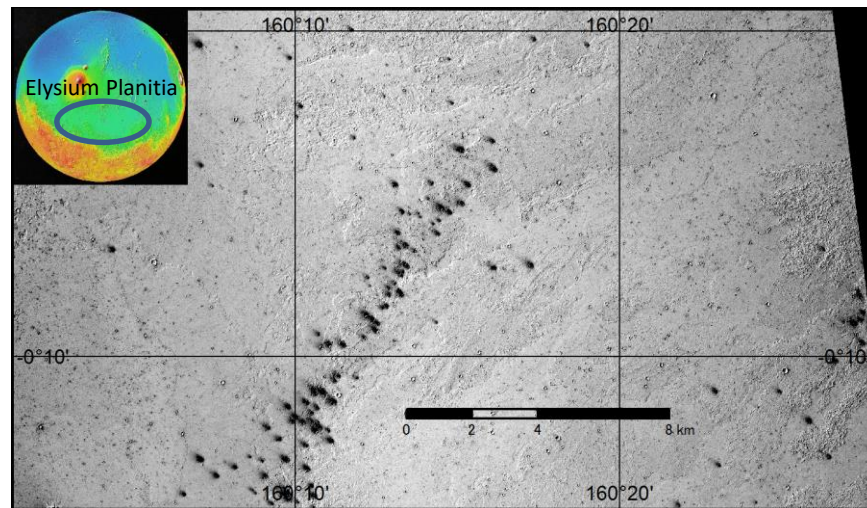
[Malin et al., 2006; Daubar et al., 2013]

新しい衝突クレーターと解釈される

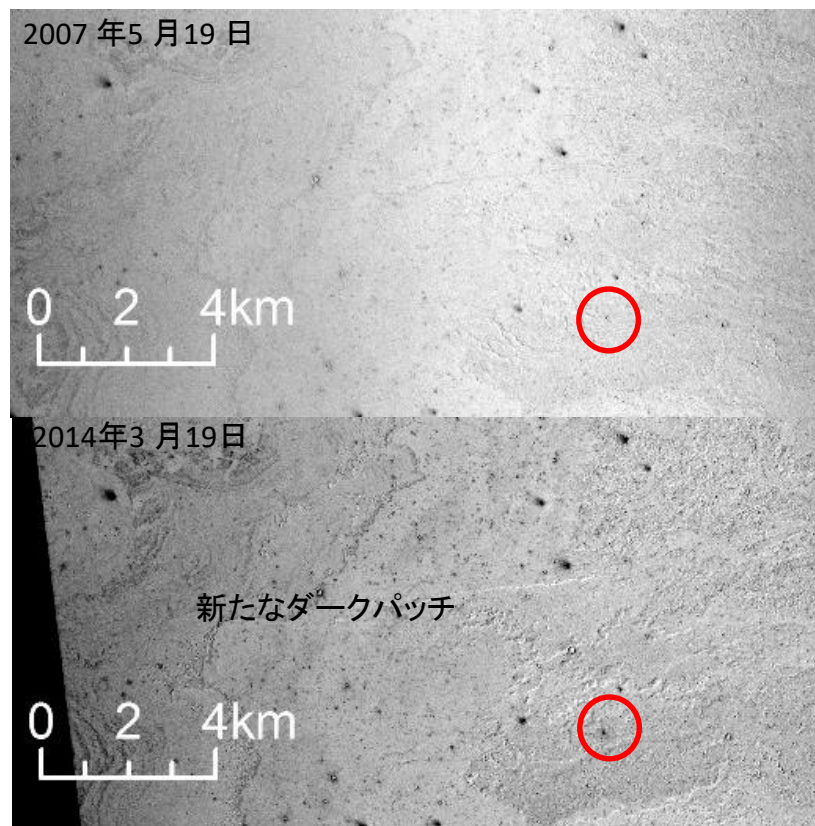
[e.g., Malin et al., 2006; Daubar et al., 2013; Watters et al., 2015]

しかし新しいダークパッチの底や周囲に水氷が検出されている [e.g., Byrne et al., 2009;]

地中のガスハイドレートが地下の熱的異常の影響で溶け、放出したガスが蓄積、圧縮して表面のダストを吹き飛ばしたという解釈も成り立つ



CTX画像ペアの比較

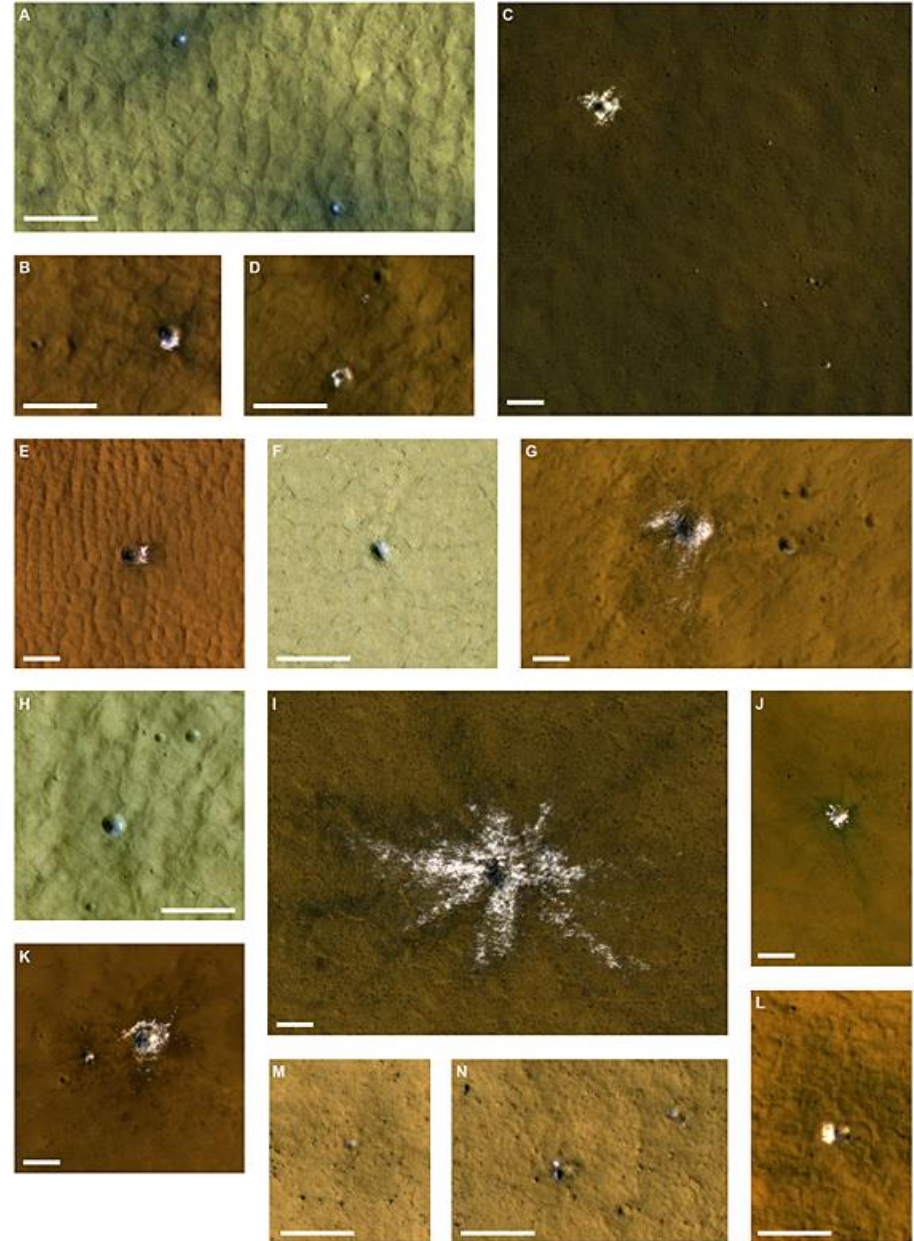


5. 探査地候補

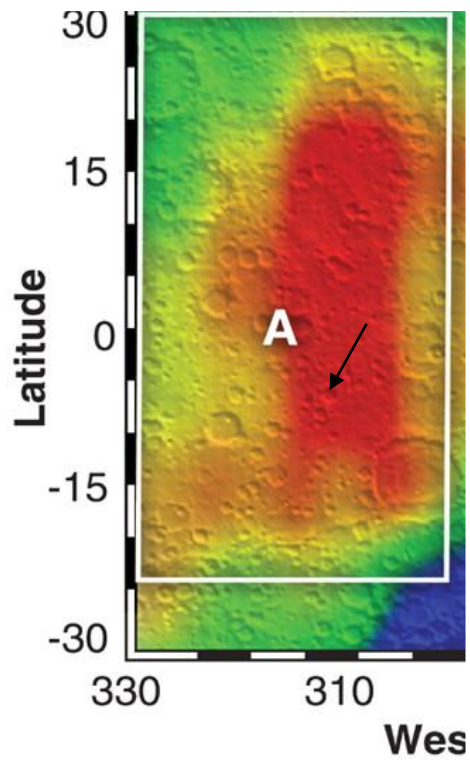
小さいクレーターで
氷が出てきた場所

Bar: 20m

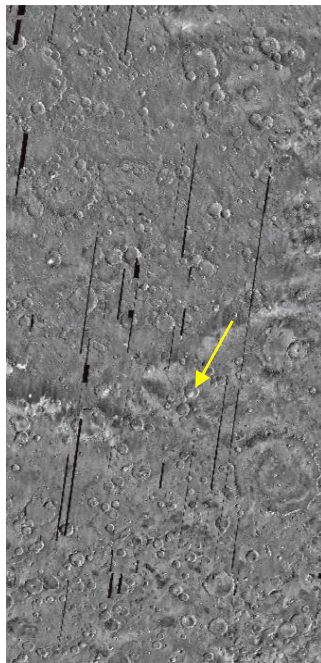
HiRISE observations of new
impact craters exposing
Martian ground ice
Dundas, C.M. et al. J. Geophys.
Res. 119, 109-127 (2014)
Scale bar: 20m



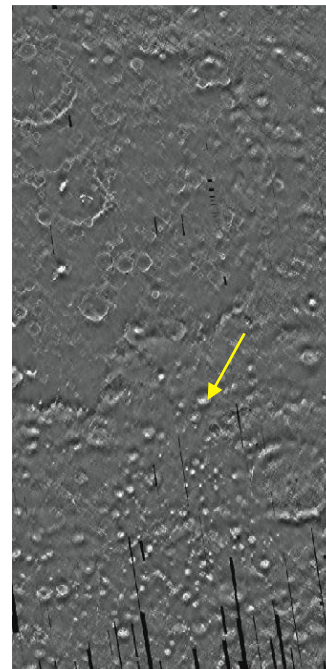
Methane



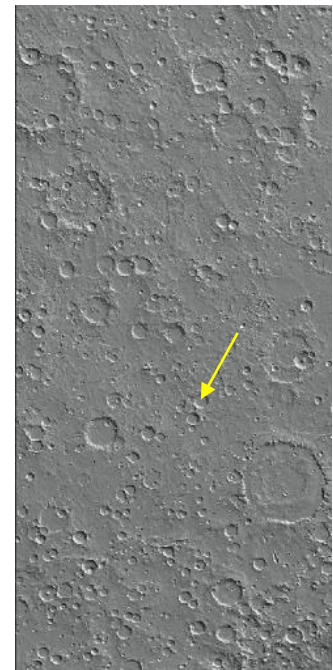
THEMIS Day IR



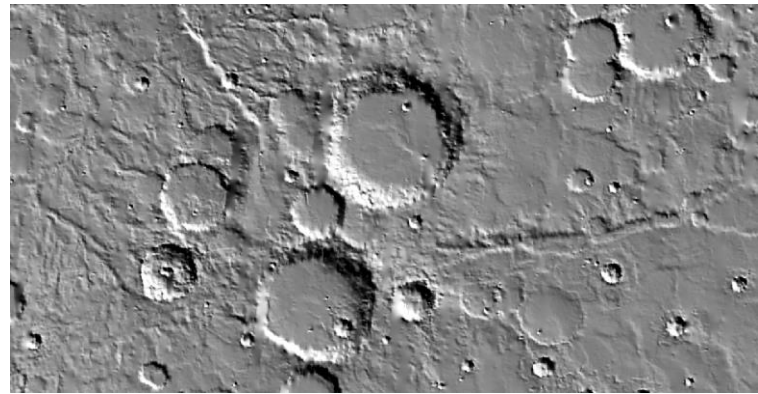
Night IR MOLA



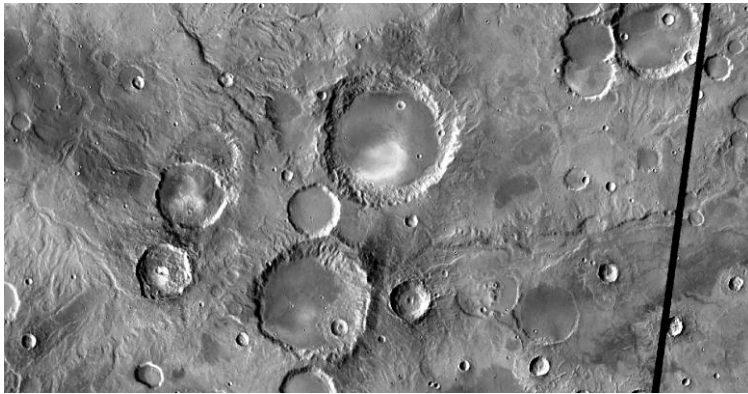
Shaded Relief



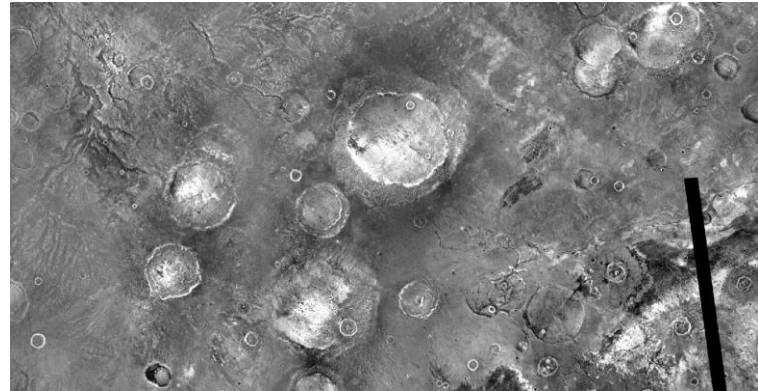
MOLA Shaded Relief



THEMIS Day IR



THEMIS Night IR



THEMIS Day IR + Night IR



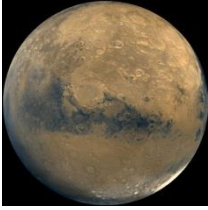
今後の火星メタン、水、有機物探査 これらを見据えて微生物探査

- 2016 Hawaii Tohoku-U Telescope et al. **メタン**
- 2016 ALMA **H₂O** 数百km resolution
- 2016 ESA Trace Gas Orbiter **メタン PPT**
- 2018 ESA/Russia ExoMars Lander 1.5 m drilling
Raman spectrometer: **有機物 画像解像度
10um**
- 2020 NASA Mars2020 **SHERLOC UV Flu. Raman,**
有機物 画像解像度10um

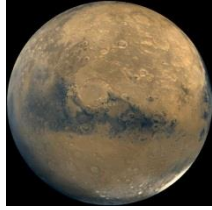
探す場所

- 水の活性が0.5以上でかつ温度が -20°C 以上になる場所。
- 地下から何か(水蒸気、メタン)噴出している場所。
- 永久凍土の下
- 永久凍土から水蒸気あるいは水が流出している場所: RSL?

火星での生命探査



- H3で探査機を打ち上げ
- 約1年で火星に到着
- 火星表面に到着
- 探査車で移動
- シャベルで土壌を採集
- 自動的に蛍光顕微鏡観察
- 画像処理の後に地球に顕微鏡画像を転送



第二段階 アミノ酸分析

地球の微生物を分析するとする

生物: 70%水、15%タンパク質、7%核酸、3%多糖類

タンパク質(アミノ酸多量体):

分子種: 1000から10000種類

分子量: 数千から数十万で、

加水分解すると: アミノ酸20種、核酸は5種、糖類は数種

加水分解後

アミノ酸が20種ならば地球由来(あるいは火星由来)

それ以外ならば地球以外由来

これまでの、隕石等の分析にに依れば、化学進化関連

DLがすべてLならば地球由来(あるいは火星由来)

DLならば化学進化関連、

Dならば火星生物

火星に生命が見つかったら

- DNAを持っているか？
 - 持っていない:火星
- 遺伝子増幅
 - 増幅しない:火星
- 配列決定 系統樹作成
 - 系統樹ができない:火星
 - 火星から共通祖先以前に地球に来た。
 - あるいは、火星に地球から行った。

アストロバイオロジー

われわれはひとりぼっちか

生命の起源、進化、伝播および未来

われわれはどこから来たか、何者か、どこへ行くのか

A. 宇宙の起源と未来
B. 惑星系形成と
生命生存可能領域

C. 前生物的
有機物合成

D. 生命の誕生
進化と本質の理解

E. 知的生
命と未来

太陽系外探査科学

地球型惑星の探査
(すばる, 地上専用
中口径望遠鏡、
TESS)
惑星誕生現場の詳細観測
(ALMA)
地球型惑星のキャラクタリゼーション
と系外生命探査
(TMT, WFIRST)

宇宙有
機物合
成
(ALMA)

太陽系内探査科学

前生命環境での
有機物合成過程
の理解

太陽系の地
球外ハビタ
ブル環境

太陽系で
の現生命
探査

地上実験

地球化学

生命の起源(合成生物学、生化学)

地球史(地質学, Deep
Drilling)
微生物生態(しんかい、
地球、航空機、大気球)
生命の進化(地質学、分子進化学)

文明史(人類学、考古学、文明論)
地球外生命探査(SKA)

隕石、
宇宙塵(た
んぽぽ)
小惑星(は
やぶさ2)

タイタン
国際探査・技術実証を含む様々な機会を活用
SSたんぽぽ2
(擬似大気+
宇宙環境)

氷衛星
JUICE
エンセラ
ダスサン
プルリタ
ーン

火星
現生命探査
に適した火
星地点の着
陸機会と最
適装置開発

深宇宙ゲ
ートウェイ

関連全分野が一体となった総合アプローチと
一点突破の集中

天文・宇宙物理学

宇宙における生命の可能性

惑星科学分野

太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件として
の前生命環境の進化の理解

太陽, 太陽圏

惑星表層環境・生命
圏の進化の理解
系外惑星の理解

アストロケミストリー

宇宙空間に普遍的に存在する宇宙ダストの組成やサイ
ズ・質量を明らかにし、宇宙における物質循環・化学進
化(有機物合成)の理解に寄与する

“アストロバイオロジー”

太陽系内外での地球外
ハビタブル環境

太陽系での
現生命探査

太陽系前生命環境での
有機物合成過程の理解

地球生命

地球生物と地球の歴史から地球生物の誕生進
化と生命の本質を探る

環境利用科学

宇宙生物科学

生命の基本原理やメカニズムの本質を明らかにする
宇宙における人類の居住を可能にするための生命科学
研究

終わり