

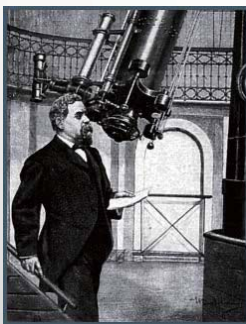


富士宮から火星の洞窟を探る～UZUME計画・序章～
2023年8月26日@富士宮・芝川文化ホール

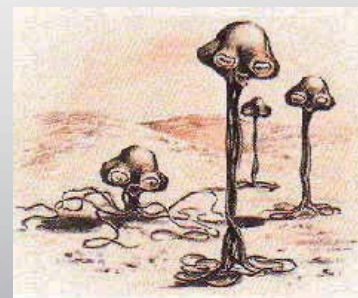
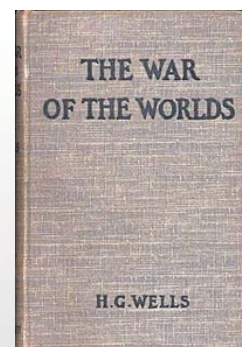
火星の洞窟での生命探査

○小林憲正¹, 横堀伸一², 春山純一³
¹横浜国大, ²東京薬大, ³JAXA/宇宙研

火星の生命？



スキヤパレリの火星「運河」(1877-1886)



ウェルズの宇宙戦争(1898)

ローウェル (1855-1916) PERCIVAL LOWELL



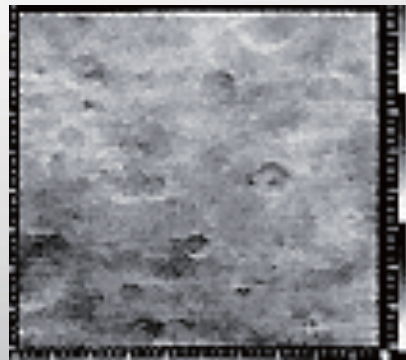
- 火星観測のためローウェル天文台を設立
- クラーク反射望遠鏡→



3

火星探査 1960-1976

	ソ連	米国
1960	× ×	
1961		
1962	×	
1963	×	
1964	×	× ○マリナー4号
1965		
1966		
1967		
1968		
1969	× ×	○マリナー6号 ○マリナー7号
1970		
1971	× × ○マルス2号	× ○マリナー9号
1972		
1973	× × × ○マルス5号	
1974		
1975		○バイキング1号 ○バイキング2号
1976		
	2勝13敗	6勝2敗



マリナー4号と火星画像 (1965)

4

NASAヴァイキング計画(1976)

2機の無人探査機がクリュセ平原・ユートピア平原に着陸・生命探査



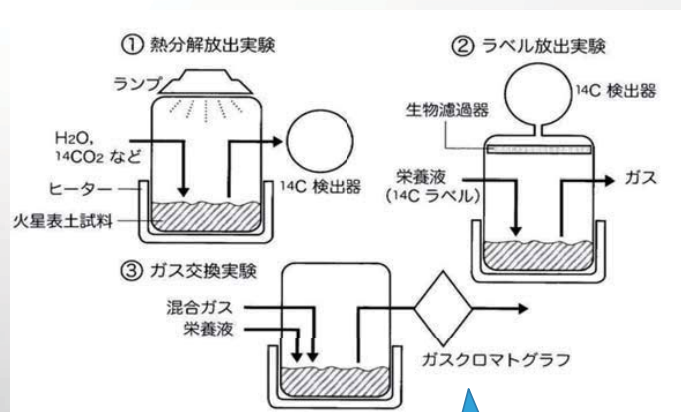
5

ヴァイキング計画での火星生命探査(表土のみ)

1. カメラによる撮影
2. 有機物分析(熱分解GC/MS)
3. 生物学実験
 - A) 炭酸同化実験
 - B) ラベル放出実験
 - C) ガス交換実験



- ✓生命・有機物の存在は確認できず
- ✓かつて表面に水が存在した証拠は得られた



地球表層の生物を想定

6

ヴァイキング計画の問題点

1. 着陸地点：中緯度の平坦な場所（水の存在は未確認）
2. 分析試料：表土のみ（紫外線・超酸化物の影響大）
3. 生物学実験：地球表層の通常環境微生物をターゲット
4. 分析感度：不足
（地球の砂漠土壌試料でも微生物を検出できなかった）
5. 有機物分析法：熱分解法
（クロロメタン類は検出されたが、その炭素源は未同定）

7

火星探査 1975～1995

	ソ連・ロシア	米国
1975		〇〇バイキング1号・2号
1976		
1977		
1978		
1979		
1980		
1981		
1982		
1983		
1984		
1985		
1986		
1987		
1988	× × フォボス1号・2号	
1989		
1990		
1991		
1992		× マースオブザーバー
1993		
1994		
1995		



フォボス1号



マースオブザーバー

8

1994年4月@BABAKIN CENTER, MOSCOW
 ロシアの火星探査機を用いた日本・ロシア共同
 の生命探査の可能性(齊藤威)

1994年8-9月@Trieste, Italy
 3rd Trieste Conference on Chemical
 Evolution
 国際協力による火星生命探査の可能性:
 Return-To-Mars-Together
 (C. Ponnampereumaが命名)

1994年12月
 C. PONNAMPERUMA 逝去

1995年9月
 4th Trieste Conference on
 Chemical Evolution
 (C. Ponnampereuma Memorial)

研究者レベルでReturn-To-Mars-
 Together合意

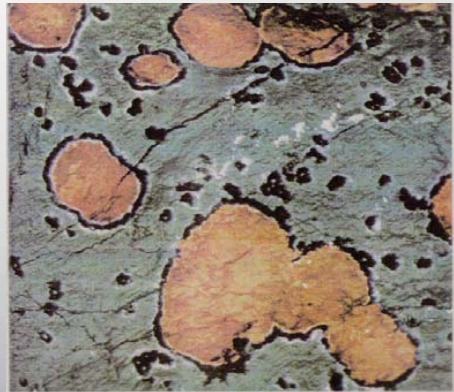
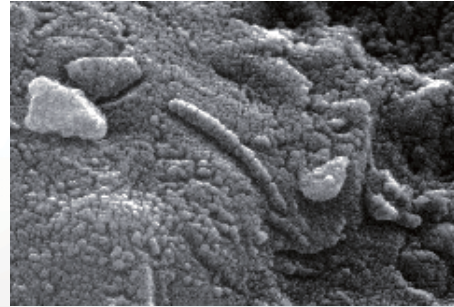
RTMTメンバー →

RETURN TO MARS TOGETHER, Membership (8 Nov., 1995)

JAPAN	
ISHIKAWA Yoji	Obayashi Corporation
KANEKO Takeo	Dept. of Phys. Chem., Yokohama Nation. Univ.
KOBAYASHI Kensei	
KAWASAKI Yukisige	Mitsubishi Kagaku Inst. of Life Science
YANAGAWA Hiroshi	
KOIKE Junpei	Dept. of Life Science, Tokyo Inst. of Tech.
KOSHISHI Hajime	NAL
MATSUSHIMA Koichi	*
OGUCHI Mituo	
OSHIMA Tairo	Tokyo Univ. of Pharm. and Life Science
SAITO Takeshi	Inst. for Cosmic Ray Res., Univ. of Tokyo
RUSSIA	
AKSYNOV Sergei	Dept. of Biological Physics, Moscow State Univ.
RUBIN A. B.	
CHERNAVSKII Dmitrii	Lebedev Physics Institute, Moscow
DOBROTTIN Nikolai A.	*
POLUKHINA Natalis	*
TSAREV Vladimir	
PICHHADZE Konstantin	Babakin Research Center
GLIANENKO Alexander	Moscow Engineering Phys. Inst., Moscow
KOTOV Yuri	
IVANOVA Mikhail	Institute of Microbiology
SPIRIN Alexander	Institute of Protein Research, Moscow
USA	
BOURKE Roger	NASA, JPL
FERRIS Jim	Renassaer Polytechnic Institute
DE VINCENZI Donald	NASA Ames
FOX Sidney	Univ. of South Alabama
FRIEDMAN Louis	The Planetary Society
JOOSTEN Kent	NASA Johnson
KHANNA RajiK.	Lab. of Chemical Evolution, Univ. of Maryland
MEYER Michael	NASA HQ
MCKAY Christopher	NASA Ames
PAPPELIS Aristotel	Dept. of Planet Biology, South Illinois Univ.
EU	
MACDERMOTT Alexandra	Physical Chemistry Lab., Univ. of Oxford, UK
CHELA-FLORES Julian	International Center For Theor. Phys., Italy
TRANSTER George	Dept. of Phys. Sci., Welome Res. Lab., UK
RAULIN Francois	LISA, Univ. Paris, France
THIEMANN Wolfram	Phys. Chem. Univ. Bremen, Germany
ROSENBAUER Helmut R	Max Planck Inst. fur Aeronomie, Germany
GREENBERG Mayo	Huygens Lab. Univ. of Leiden, Netherlands

火星隕石ALH84001中の 「生命の痕跡」(1996)

- 炭酸塩(右下)
- 微生物状の構造(右上)
- 多環芳香族炭化水素
- 磁鉄鉱



NASAの新火星探査： “FOLLOW THE WATER” TO “FOLLOW THE CARBON”



MARS ROVER MISSION

地形や鉱物分析より比較的最近まで大量の水があったことを発見

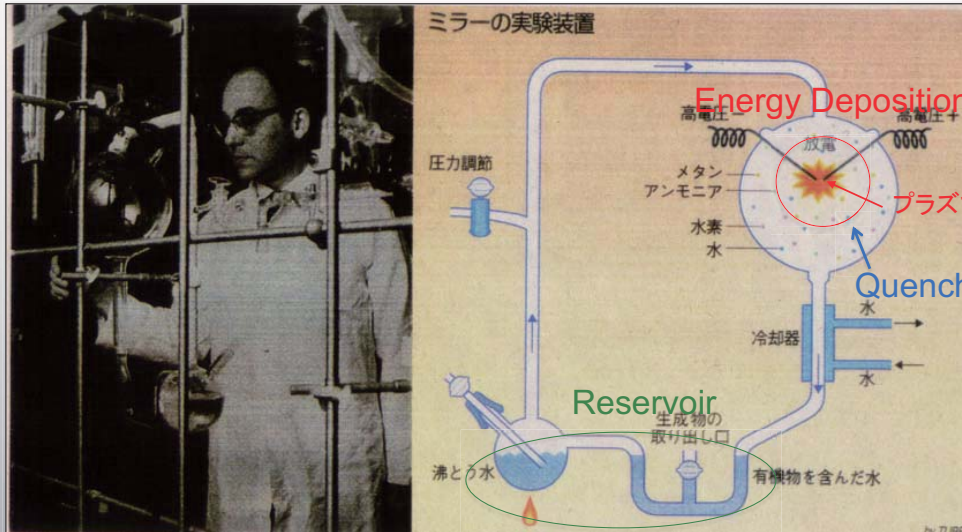


MARS 2020 PERSEVERANCE ROVER

ジェゼロクレーターに着陸、サンプルリターン用の試料を採取¹²

火星で生命は誕生できたのか？

ミラーの実験: 単純な分子からアミノ酸合成に成功 (1953)



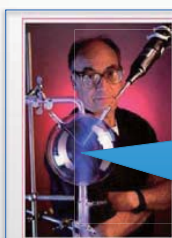
高エネルギーで出発材料分子を解離

急冷により、新たな分子を生成

生成物をエネルギーの当たらないところに避難させる。

13

初期火星・地球上の生体有機物の起源



Millerの実験(1953)

CH₄
NH₃
H₂
H₂O

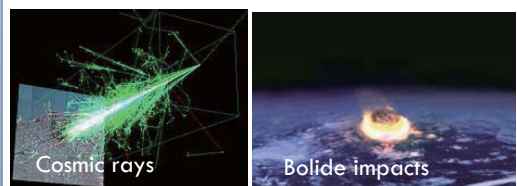
初期火星・地球大気は、強還元型でなく、CO₂, N₂を主とする弱還元型だった (1980年代～)

アミノ酸などの窒素含有生体有機物の雷や紫外線による生成は困難

地球外有機物の供給

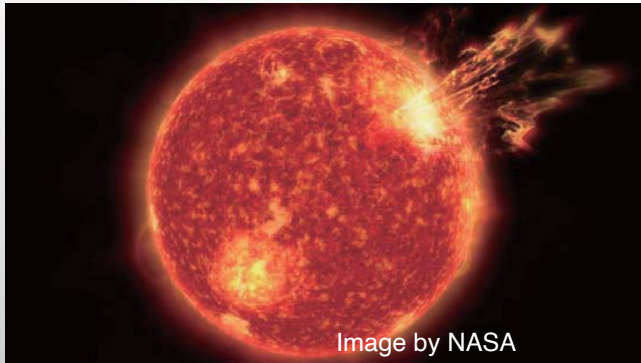


宇宙線などの他のエネルギー評価

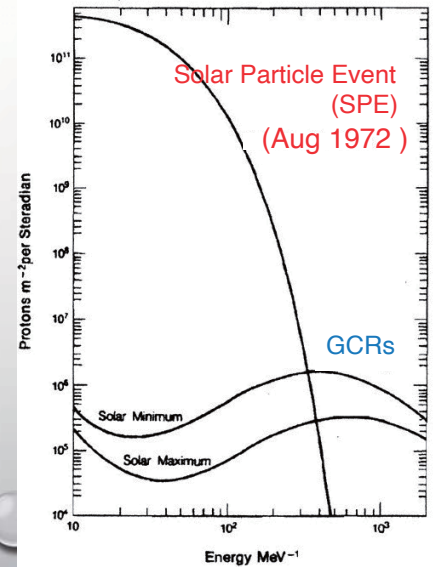


太陽フレア/コロナ質量放出からの 太陽エネルギー粒子(SEPS)の寄与

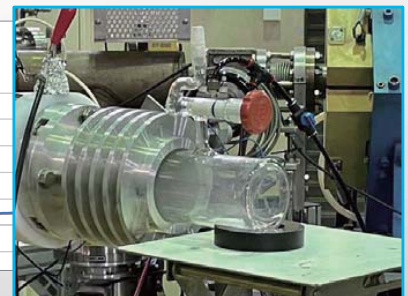
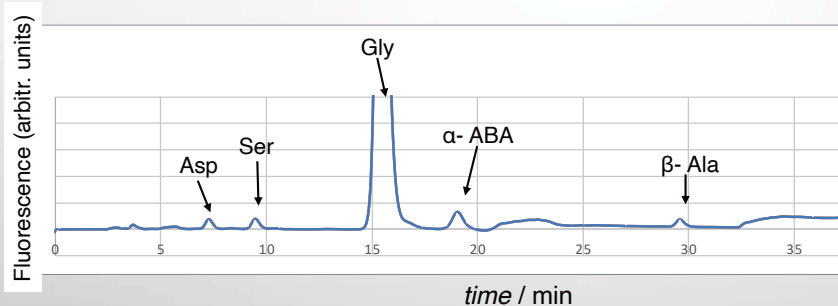
Airapetian+, 2016



- ✓ 太陽型星がスーパーフレアを起こす！(Maehara+, 2012)
- ✓ 若い太陽は今よりも多くのフレアを起こす。
- ↓
- ✓ 若い太陽は銀河宇宙線よりも5桁以上高いフラックスの高エネルギーイオンを射出(Airapetian+, 2019)

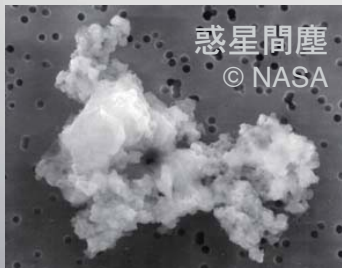


CO₂, CO, N₂, H₂O混合気体への陽子線照射



- COを数%含む大気からは、
- ✓ 原始地球で1000万トン以上
 - ✓ 原始火星でも100万トン以上
- のアミノ酸が太陽エネルギー粒子で生成。

地球外有機物



- ✓ アミノ酸(前駆体)
- ✓ 核酸塩基
- ✓ 糖
- ✓ 不溶性有機物(IOM)
- ✓ 低温環境下で生成



17


はやぶさ2計画

C型小惑星リュウグウがターゲット(炭素質コンドライトと似た物質からなる?)

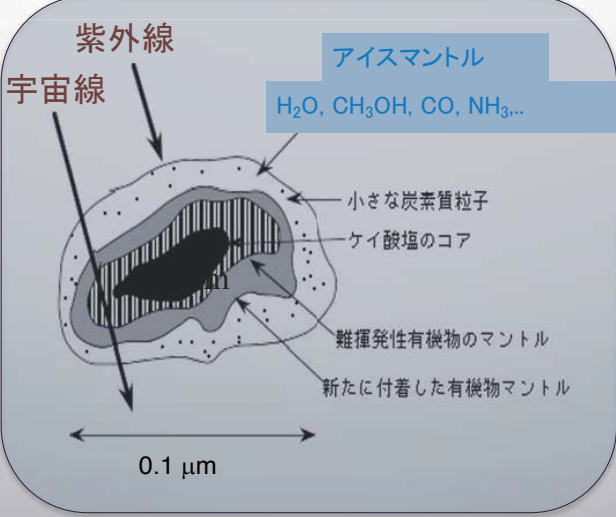
- 2014年12月3日に種子島スペースセンターから打上
- 2018年リュウグウに到着
- 2019年にリュウグウを発ち2020年末地球に帰還
- 2022年 水・アミノ酸の検出
- 2023年 ウラシルの検出



星間・小天体での**有機物の生成**



隕石母天体




紫外線
宇宙線

アイスマントル
H₂O, CH₃OH, CO, NH₃...

小さな炭素質粒子
ケイ酸塩のコア
難揮発性有機物のマントル
新たに付着した有機物マントル


0.1 μm




分子雲

γ線 → 熱
↓ ↓
HCHO, NH₃, H₂O

模擬星間物質への**重粒子線照射**



2003 11 11



↑メタノール・アンモニア・水混合水への重粒子線照射(直後)

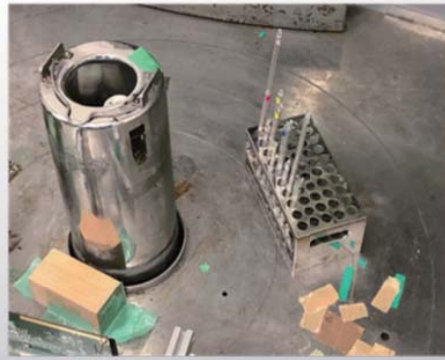
←HIMAC (重粒子線照射装置)

高分子態のアミノ酸前駆体が生成

小天体(隕石母天体)模擬実験

ホルムアルデヒド, アンモニア, 水の混合物

加熱
~150°C



γ線照射
@東工大
⁶⁰Co線源

アミノ酸前駆体*・糖・不溶性有機物(IOM)*が生成

*Kebukawa+, *Sci. Adv.* 2017
Kebukawa+, *ACS Cent. Sci.* 2022

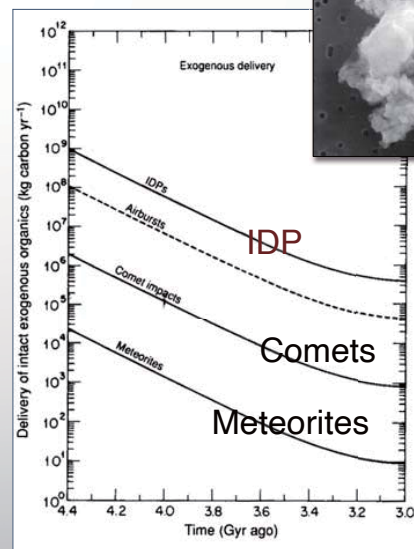
地球への有機物搬入は宇宙塵で?

◇宇宙塵は隕石や彗星よりも多くの有機炭素を供給(左図)

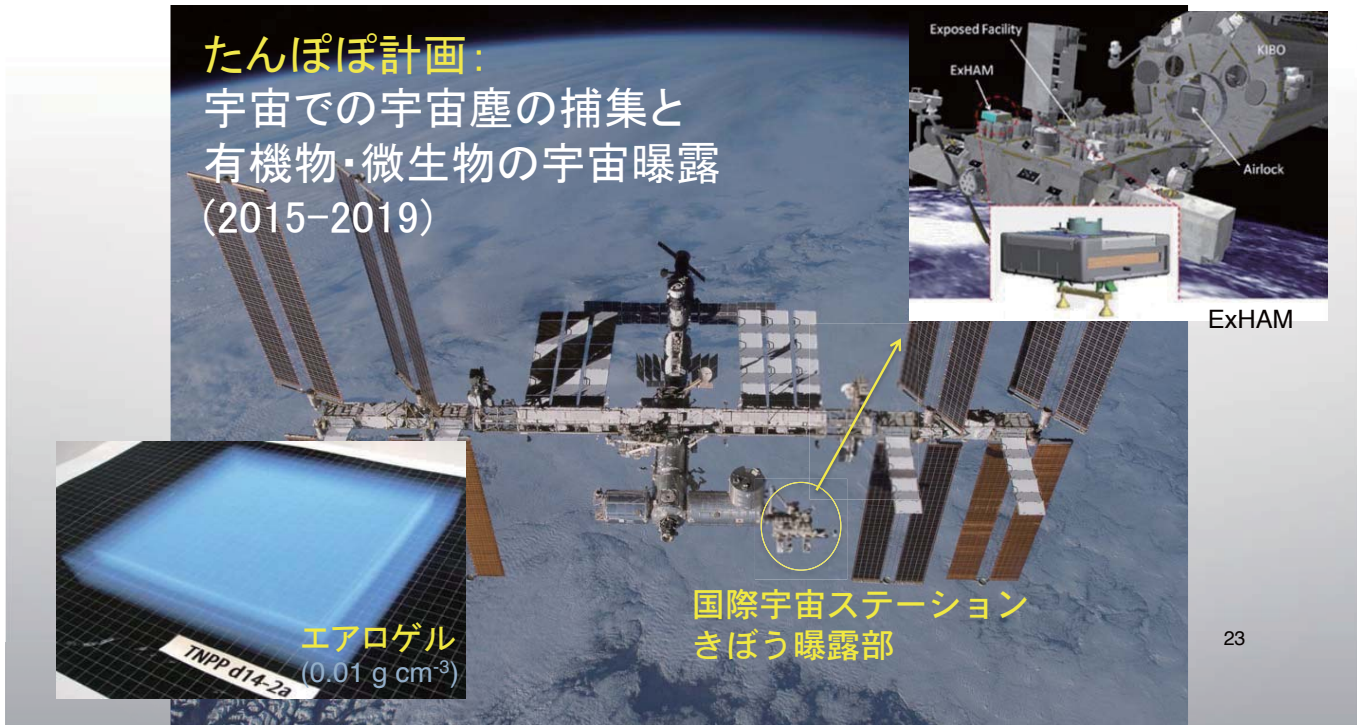
◇宇宙塵は隕石や彗星よりも安全に有機物を搬入

◇宇宙塵は太陽紫外線や宇宙線に直接曝露される

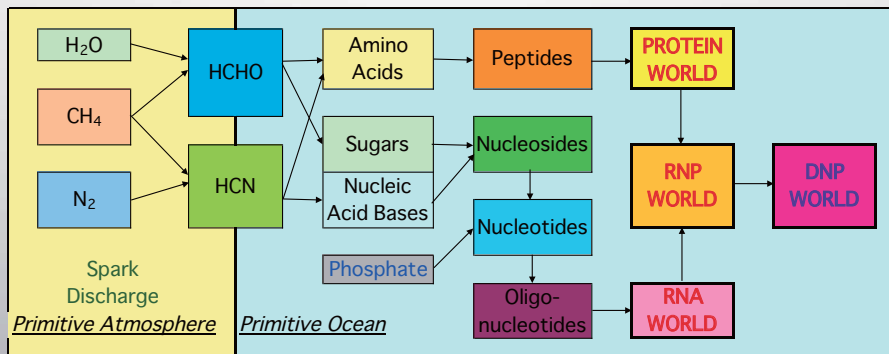
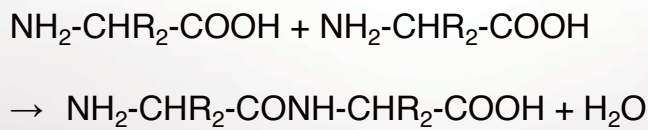
◇宇宙塵は地球環境中で汚染されやすい



(Chyba & Sagan, 1992)



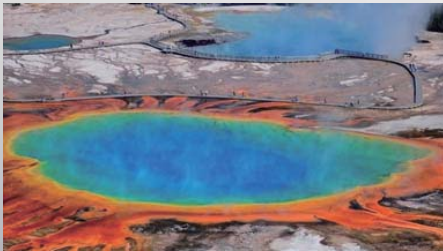
化学進化の古典的シナリオ



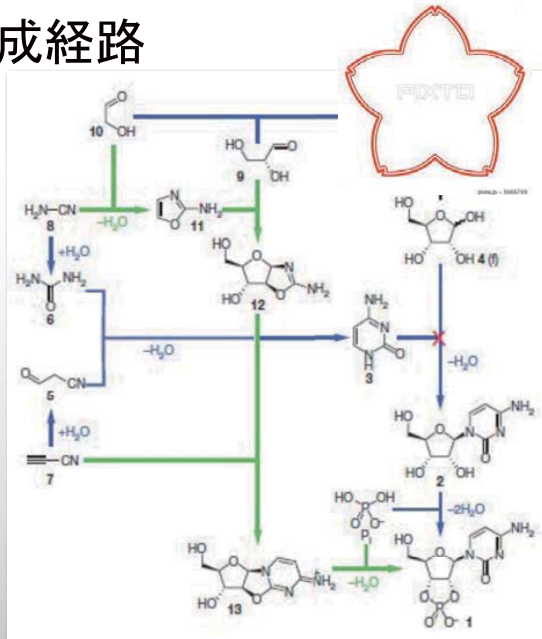
ヌクレオシドの新しい生成経路

Blue: Conventional pathway
Green: New pathway proposed by Powner et al.:

M. W. Powner, B. Gerland, J. D. Sutherland, *Nature*, **459**, 239-242 (2009)

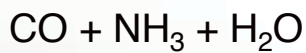


生命の陸上温泉起源説



Still high concentration of starting materials and purification of intermediates are necessary!

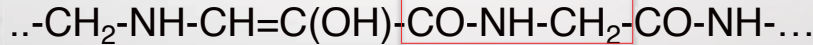
放射線による有機物(がらくた分子)生成機構



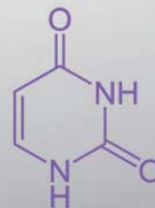
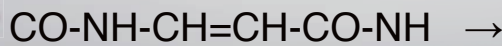
↓ 高エネルギー放射線



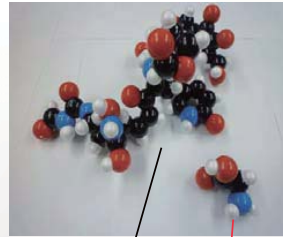
急冷 (イオン・ラジカル)



↓ H₂O

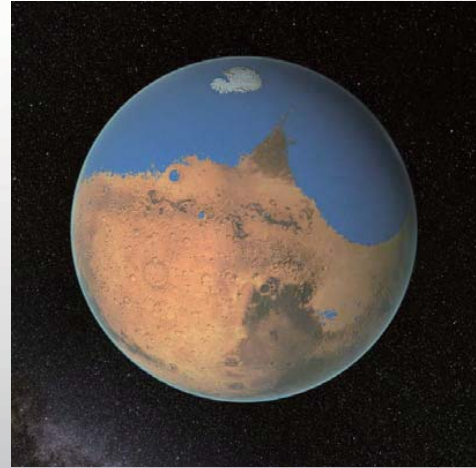


(ウラシル)



過去の火星における生命誕生

- 弱還元型の大気から、太陽エネルギー粒子によりアミノ酸などが生成
 - 隕石・宇宙塵などにより地球外起源の有機物が搬入
 - 40億年前頃に生命誕生？
 - その後、表面の水・大気の喪失
- ↓
- 絶滅 / 地下で生存？



過去の火星の想像図(©NASA/GSFC)

火星生命・有機物探査のターゲット

生命探査

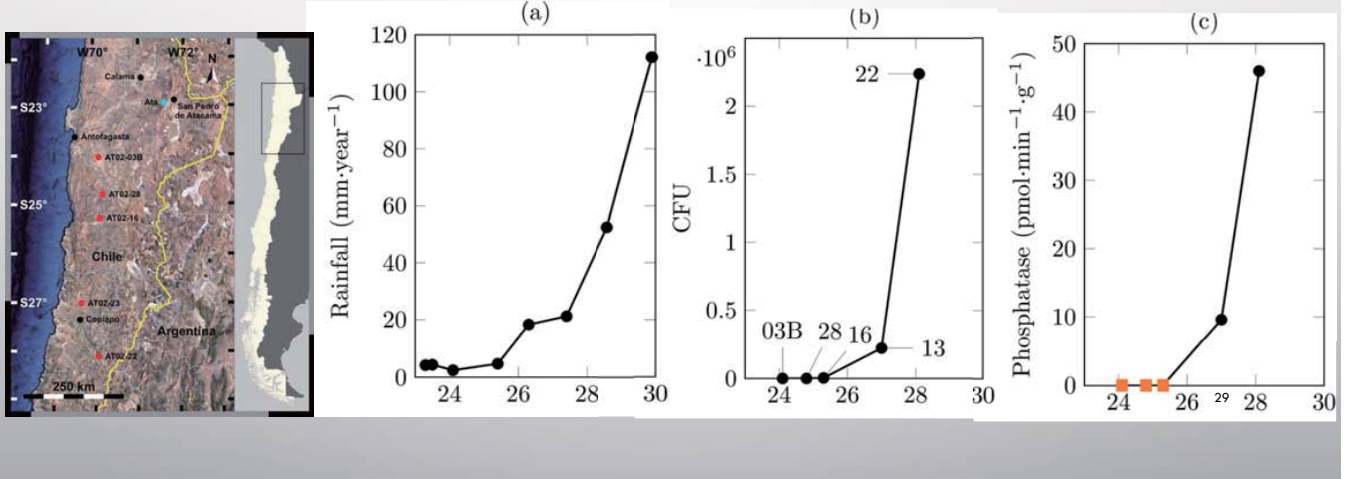
- ✓過去に火星に生存していた生命 (EXTINCT)
- ✓現在も火星に生存している生命 (EXTANT)
- ✓地球から火星に移動した生命
 - ・隕石・微隕石
 - ・人間活動(ロケットに付着)

有機物探査

- ✓過去の生命由来の有機物
- ✓現存の生命由来の有機物
- ✓過去に無生物的に生成した有機物
- ✓現在無生物的に生成している有機物
- ✓火星外から供給された有機物
 - ・隕石・微隕石
 - ・地球隕石
 - ・人間活動

火星アナログとしてのアタカマ砂漠

(a) 降水量, (b) 培養可能な細菌密度, (c) アミノ酸濃度
(Kobayashi et al., *Internat. J. Astrobiol.*, 2022)



たんぽぽ計画における微生物・有機物の宇宙曝露

紫外線が宇宙における微生物の生存性・有機物の安定性に対して鍵をにぎる(生存のためには紫外線を遮蔽する必要がある)。
Kobayashi+, *Astrobiology*, 2021
Yamagishi+, *Astrobiology*, 2018

Exposure panel

Aerogel (0.01 g cm⁻³)

OBJECTIVES:

1. MICROBE CAPTURE
2. MICROBE EXPOSURE
3. CAPTURE AND ANALYSIS OF IDPS
4. EXPOSURE OF ORGANICS
5. DEVELOPMENT OF NEW AEROGEL
6. MONITORING OF SPACE DEBRIS

月・火星の縦孔の発見

- かぐやによる月の縦孔発見
- 地下空洞の存在の可能性
- 火星にも縦孔



生命探査の場としての火星地下空洞

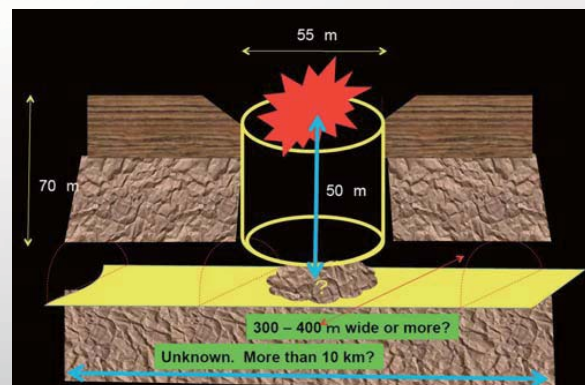
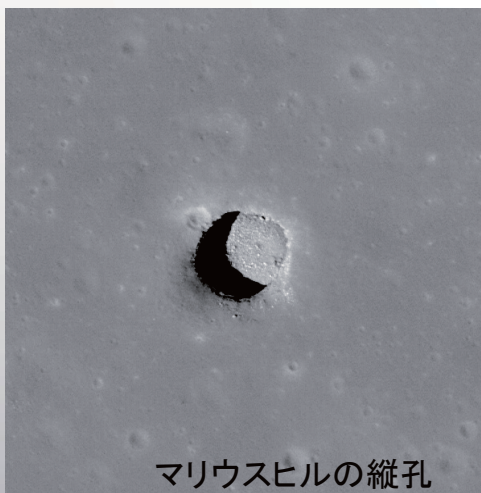
- ✓ 紫外線の遮蔽
- ✓ 高湿度



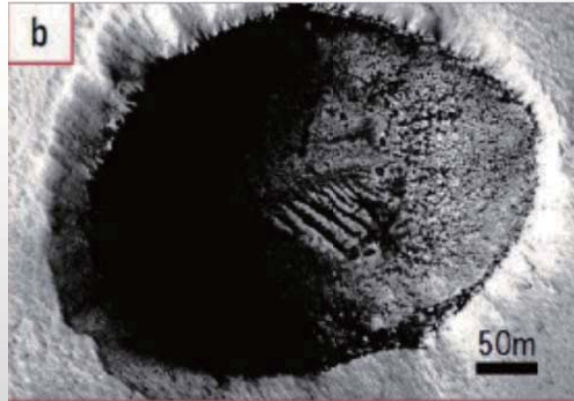
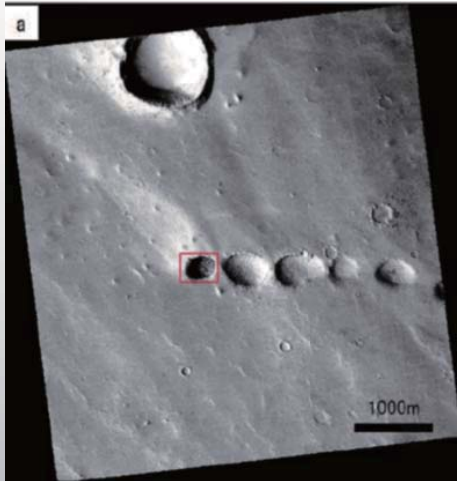
火星の縦孔 © NASA JPL, U. Arizona

31

かぐやによる月の縦孔発見： 地下空洞が存在？



火星にも縦孔・地下空洞？



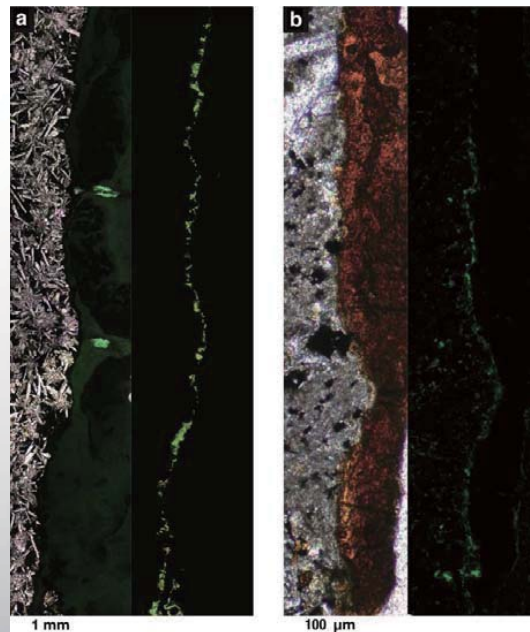
エリシウム山近傍の縦孔列(a)と その拡大(b)
Goto+, JAXA-RM-16-008, 2017

33

溶岩ドームの壁は火山岩： 微生物は棲息可能？

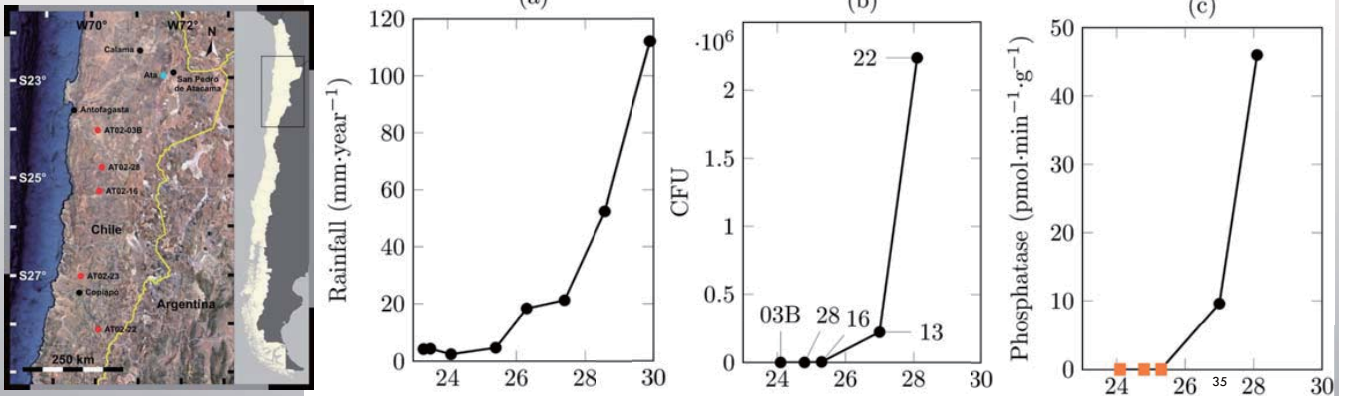
地球の海底の玄武岩界面に微生物が存在
Suzuki+, *Commun. Biol.* 2020

光学顕微鏡画像＋蛍光顕微鏡画像
(SYBR Green 1で染色)：
緑色の部分が生菌

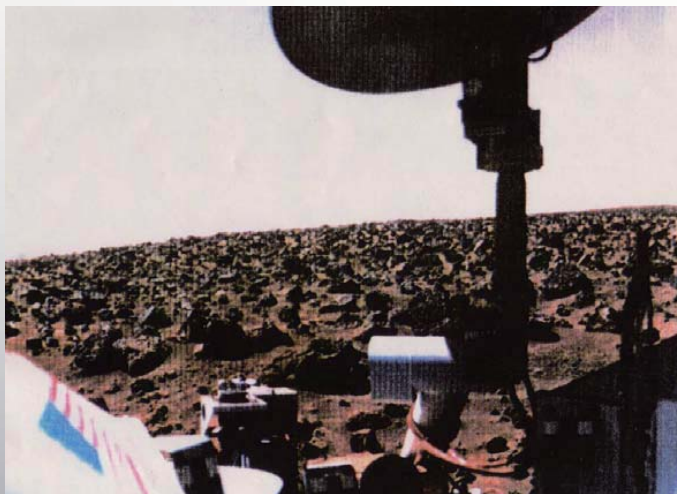


火星アナログとしてのアタカマ砂漠： 降水量が微生物密度に大きく影響

(a) 降水量, (b) 培養可能な細菌密度, (c) アミノ酸濃度
(Kobayashi et al., *Internat. J. Astrobiol.*, 2022)



NASAヴァイキング計画： 地表に微生物・有機物が検出されず



- ✓ オゾン層がない
- ↓
- ✓ 紫外線が地表まで届く
- ↓
- ✓ 過去に存在した水が分解され、過酸化物が生成
- ↓
- ✓ 有機物を分解

地下空洞での生命探査： メリット

- 火星表面と異なり，紫外線が当たらない
 - 過酸化物が少ない
 - 湿度が高い
- ↓
- 微生物の生存に有利



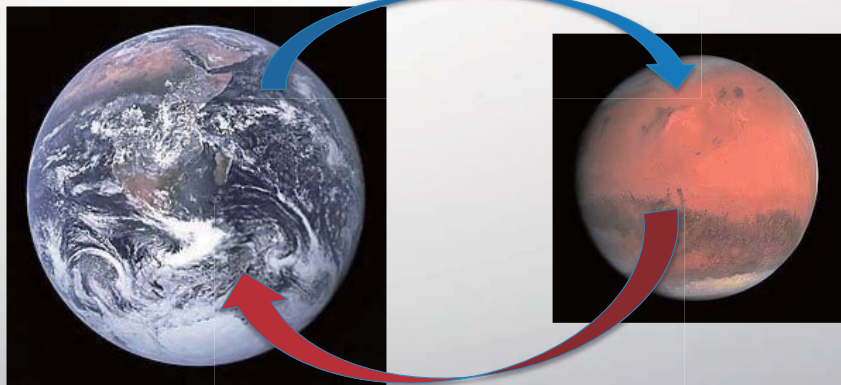
地球の地下空洞（長崎県五島市寧江）
眞部十， 2018

惑星保護 PLANETARY PROTECTION



ジョシュア・レーダーバーグ
惑星保護の必要性を提唱

探査機などで地球の微生物を持ち込まない



サンプルリターンで未知の微生物を地球に持ち込まない

38

国際的な惑星保護の取り決め COSPAR PLANETARY PROTECTION PANEL

- **カテゴリー1**

太陽・S型小惑星(イトカワ)など

- **カテゴリー2**

月・金星・C型小惑星(リュウグウ)など
(暫定的にタイタン・ガニメデなども)

- **カテゴリー3**

火星・エウロパ・エンケラドゥス
(周回ミッション)

- **カテゴリー4**

火星・エウロパ・エンケラドゥス
(着陸ミッション)

- **カテゴリー5(制限なし)**

月などからのサンプルリターン

- **カテゴリー5(制限あり)**

火星・エウロパ・エンケラドゥスからの
サンプルリターン

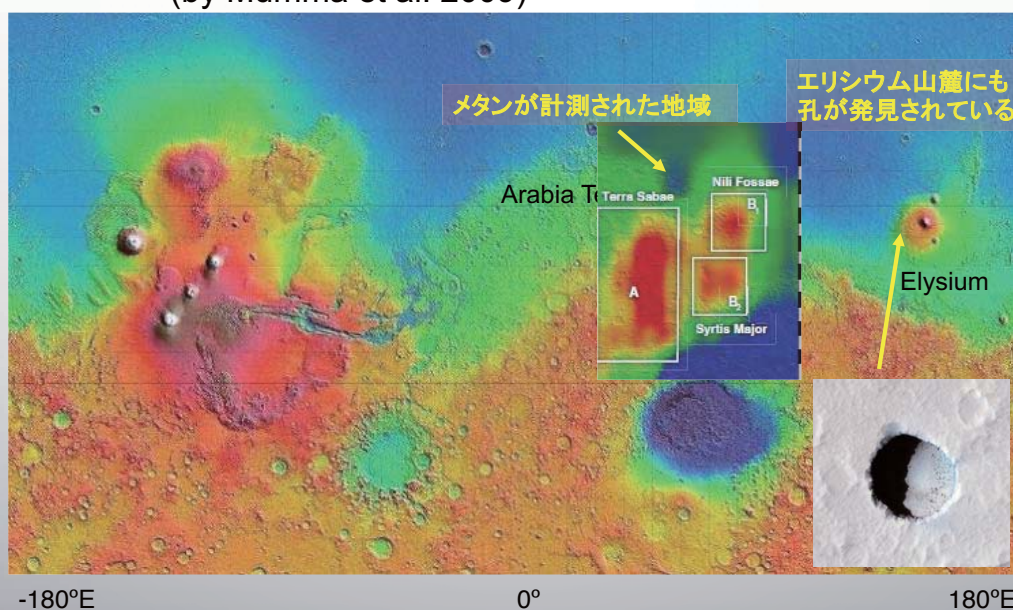
39

Destiny

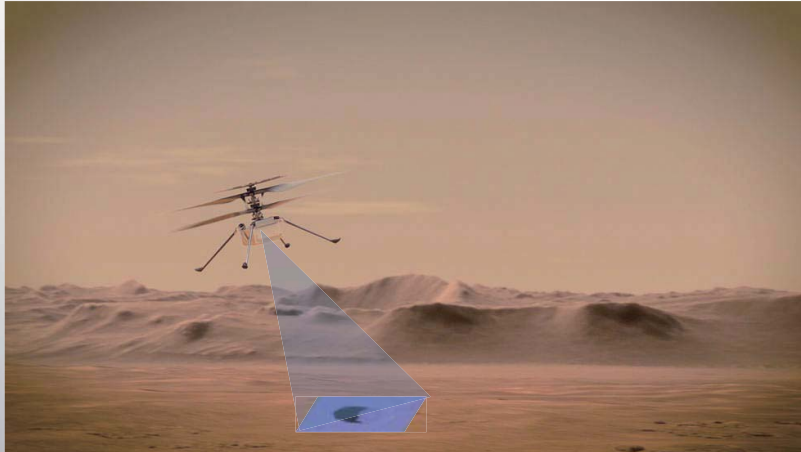
火星のメタン生成

(by Mumma et al. 2009)

メタンを利用(酸化)する細菌か
メタンを発生する細菌が存在?



ドローンなどでの上空からメタン探査



メタン： 1.66 μm 付近に赤外吸収

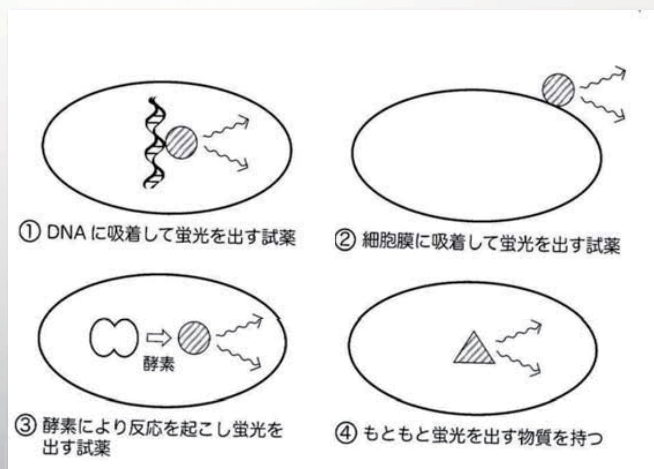
1.66 μm ダイオードレーザーを用いたメタン高感度検出

Nakaya+, *Anal. Sci.* 2000

©NASA

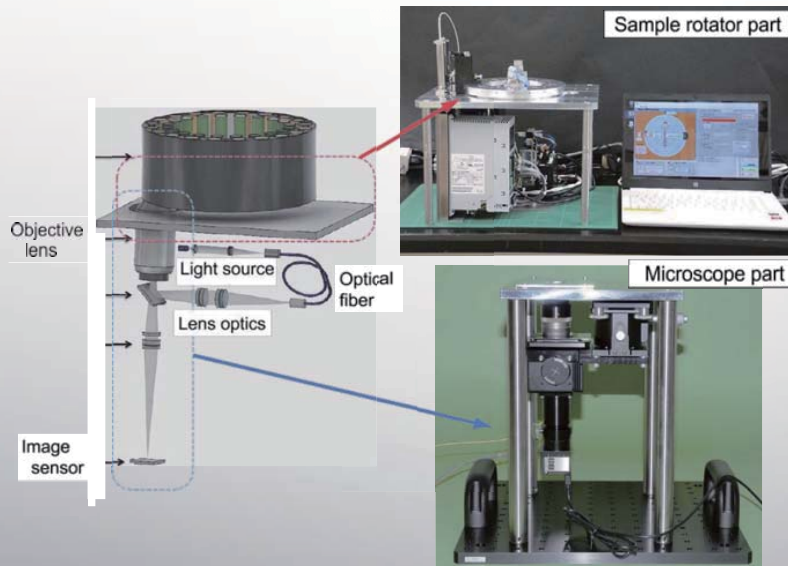
将来の着陸生命探査： 顕微蛍光法(FMS)による生命検出

- ① DNAを染色
- ② 細胞膜を染色
- ③ 酵素反応により蛍光を発する
- ④ 生物が発する蛍光を検出



42

生命兆候探査顕微鏡 (LDM) を用いる「現存する生命」探査



生命兆候探査顕微鏡
(LDM)

LDMのBBM
(Enya et al., *Space Sci. Rev.*, 2022)

43

アミノ酸分析による生命探査

アミノ酸の起源

1. 初期火星での無生物的生成
2. 現在の火星での無生物的生成
3. 火星外から隕石などによる供給
4. 過去の生命(EXTINCT)による合成
5. 現存の生命(EXTANT)による合成
6. 地球生物からのコンタミ

アミノ酸の特徴

- ✓地球と同じ20種類のL-アミノ酸を主とする
→ 6, 5(地球生物と同じ祖先をもつ)
- ✓地球と異なるセットのL-(またはD-)アミノ酸を主とする → 5(地球生物と異なる祖先をもつ)
- ✓L-(またはD-)過剰の限られた種類のDL-アミノ酸 → 4
- ✓ほぼラセミ体のアミノ酸(炭素数の少ないアミノ酸ほど多い) → 1, 2, 3

44

まとめ

- ◆ 初期火星は初期地球に似た大気・海洋をもつ環境
- ◆ 二酸化炭素・一酸化炭素・窒素・水を含む初期火星大気から太陽エネルギー粒子により大量のアミノ酸などの生成が可能
- ◆ 隕石・微隕石などにより火星外からの有機物の搬入も可能
- ◆ 以上の有機物から生命が誕生した可能性
- ◆ 火星表層の大気・海洋の消失後も生命が地下に生存の可能性
- ◆ 火星表土は乾燥・紫外線・超酸化物の影響で生物の生存には不適
- ◆ 火星地下空洞は紫外線の影響もなく、生命探査に適した環境
- ◆ 惑星保護を考え、まずは上空からのメタン検出
- ◆ 将来は蛍光顕微鏡とアミノ酸分析等を組み合わせて生命探査