宇宙での生命の起原と進化

山岸明彦
東京薬科大学
生命科学部

Are we alone in the universe?

生命は、宇宙で我々だけか？

アストロバイオロジー

- 天文学
- 惑星科学、地球物理学
- 地球化学、化学進化
- 地学的証拠
- 生化学的研究
- 熱水地帯の微生物生態
- 遺伝子の証拠、分子進化学
- 宇宙での微生物探査
- 知的生命体探査

火星表面における
メタン酸化菌探査
MELOS　生命探査計画

MELOS Life Search Plan: Japan Astrobiology Mars Project (JAMP): Search for Microbes on the Mars Surface with Special Intereist in Methane-oxidizing Bacteria

MELOS: Mars Exploration with Lander Orbiter Synergy

Preparing mission definition, targeting to launch on 2020

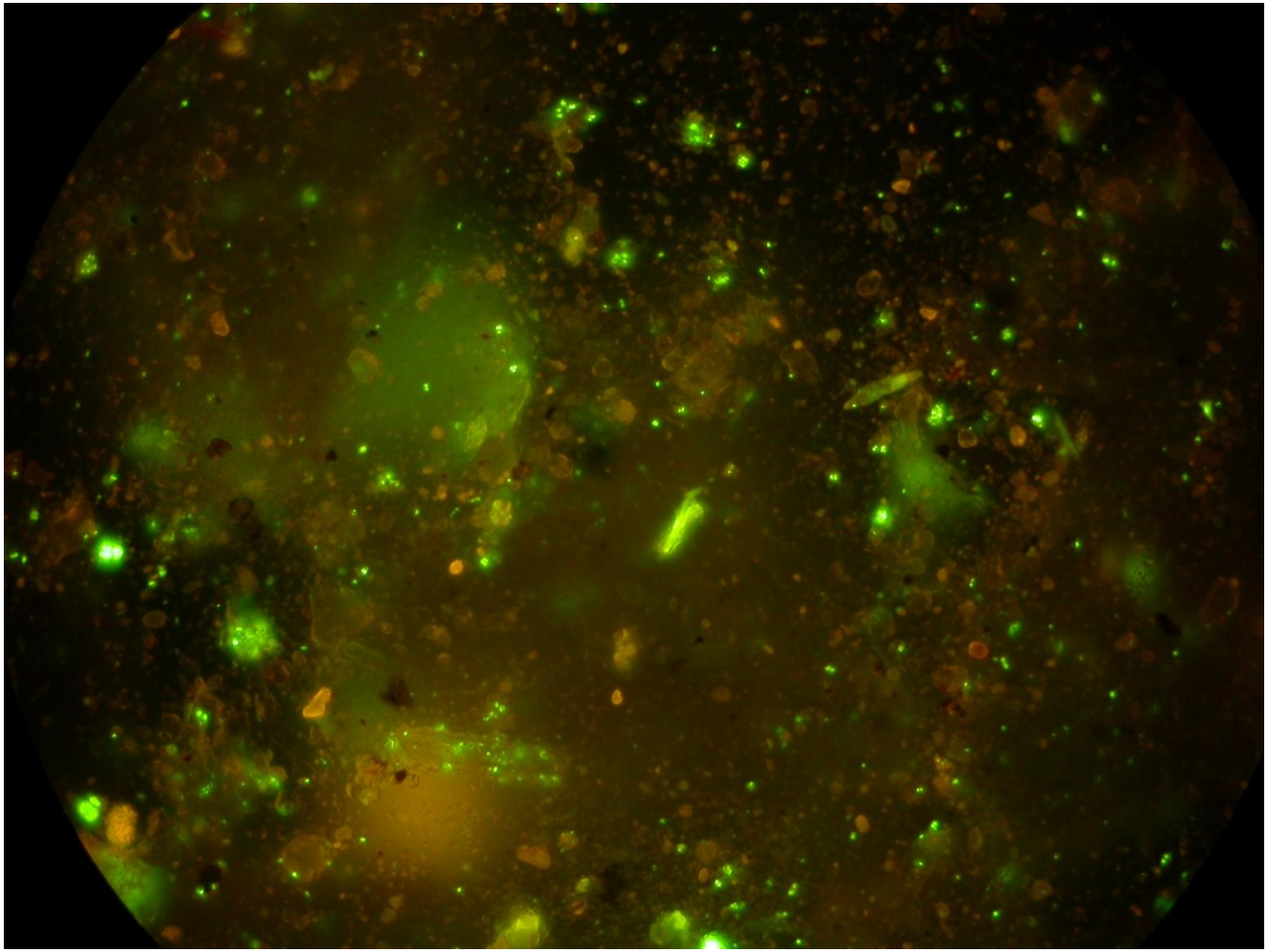
- A. Yamagishi [1], Y. Yoshimura [2], A. Miyakawa [12], S. Araki [6], T. Satoh [3], M. Yamashita [3], T. Kubota [3], G. Ishigami[3], T. Fujita H[3]. Yano [3], J. Haruyama [3], M. Tabata [3], K. Kobayashi[4], H. Honda [5], Y. Utsumi [6], T. Itoh [7], K. Hamase [8], T. Naganuma [9], S. Sasaki [10], H. Miyamoto [11]
- And MELOS Life Search Subgroup

そもそも微生物がいるか？

チリ、アタカマ砂漠

玉川大学　吉村

アタカマ砂漠の微生物



微生物密度
10^4細胞/g

SYBR Green

玉川大学
吉村

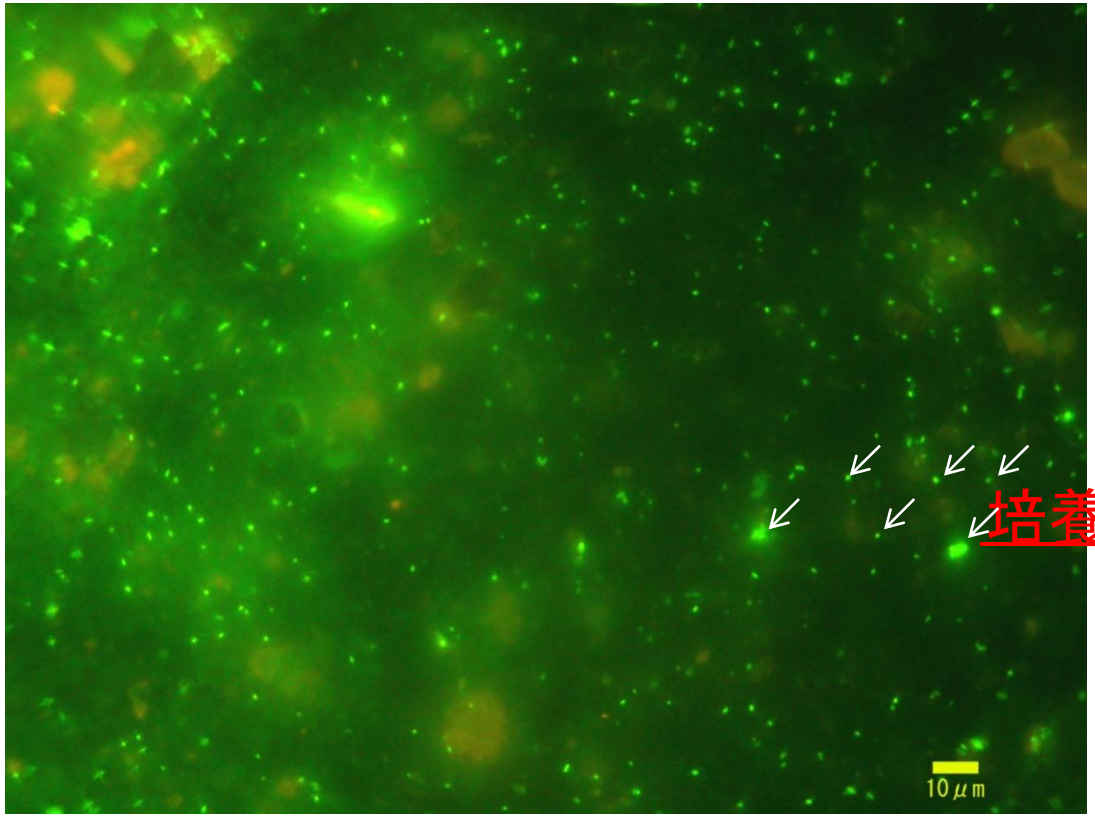
南極

写真提供：小川麻里先生（安田女子大学）

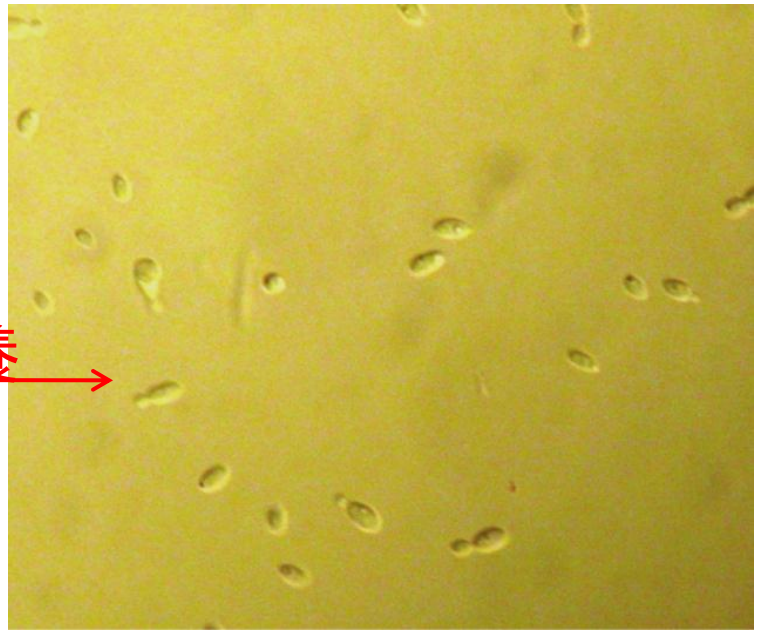
南極の氷

写真提供：小川麻里先生（安田女子大学）

南極の氷の微生物



培養



蛍光顕微鏡写真　　培養された酵母の顕微鏡写真

Microorganisms stained by SYBR GOLD

地球で

アタカマ高地砂漠
南極砂漠
南極雪原

細胞密度　10^4細胞/g土壌（氷）
Vikingの検出感度は 10^7細胞/g土壌
（Pyrolysis ppb Glavin et al. 2001）

今後の生命関連探査計画

- MSL のSAM (Sample Analysis at Mars) は有機化合物をGC-MSで分析予定
- The European Space Agency's の*ExoMars* はっ生体関連分子を抗原抗体反応で分析予定
- 我々は火星表面で、蛍光顕微鏡を用いて、微生物、特にメタン酸化細菌を分析する計画を提案する。

地球微生物の生存限界と火星表面環境

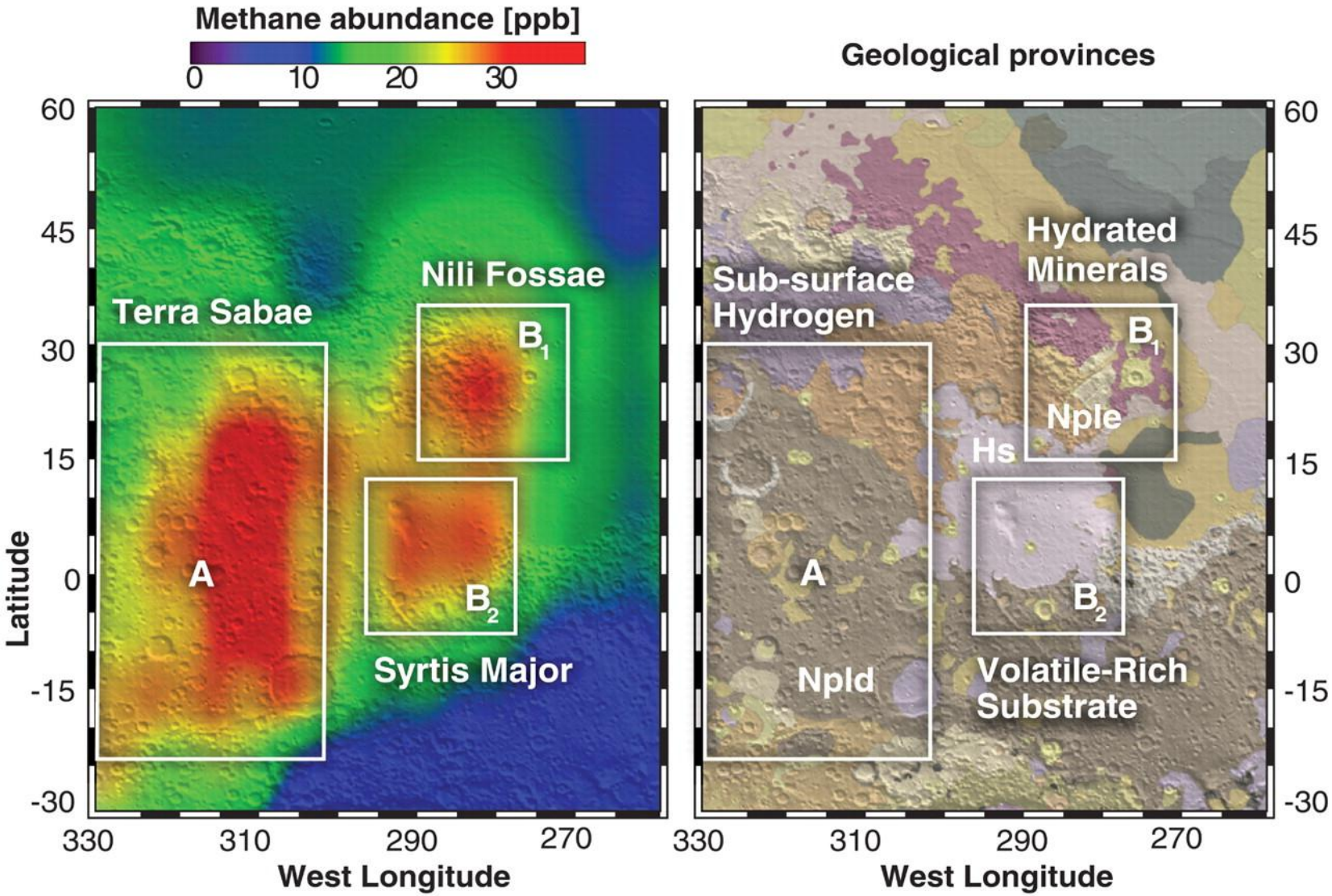
Factor	Limit for terrestrial life	Mars
Gravity	~ 0 to unknown higher *g*	0.376 *g*
Temperature	Active from -20°C to 122°C	-87°C to -5°C or 20 °C?
Pressure	Survivable lowest: unknown Survivable highest: 1.6 Gpa	Atmosphere 0.6 kPa (*ca.* 6/1000 of Earth)
Vacuum	Survivable	0.4 kPa
Salinity (NaCl%)	0 to >30% (saturation)	Evaporites
Water activity (Desiccation)	~ 0.6 (bio-activity) ~ 0 (survival)	~ 0
Ionizing radiation	1440 Gy	0.4 mGy day^{-1}
pH	-0.06 to 12.5	7.7±0.5
Redox potential	Limits undefined	Highly oxidizing
UV radiation	~ 5000 J m^{-2}	~ 20 W m^{-2}

UV は土壌で遮蔽される

生命の生育のため

- 水：液体の水は細胞の中には必要だが、細胞の外に大量の水はいらない。
- 自由エネルギー
  - 還元型物質（有機物、水素、硫黄、メタン）
  - 酸化型物質（酸素、硫酸、酸化鉄）
- 活動は局所で良い
- 生育した微生物菌体は火星を飛び回る可能性がある。

火星ではメタンが出ている



メタン酸化鉄–細菌が発見された。

Manganese- and Iron-Dependent Marine Methane Oxidation

Emily J. Beal,1* Christopher H. House,1* Victoria J. Orphan2

Anaerobic methanotrophs help regulate Earth's climate and may have been an important part of the microbial ecosystem on the early Earth. The anaerobic oxidation of methane (AOM) is often thought of as a sulfate-dependent process, despite the fact that other electron acceptors are more energetically favorable. Here, we show that microorganisms from marine methane-seep sediment in the Eel River Basin in California are capable of using manganese (birnessite) and iron (ferrihydrite) to oxidize methane, revealing that marine AOM is coupled, either directly or indirectly, to a larger variety of oxidants than previously thought. Large amounts of manganese and iron are provided to oceans from rivers, indicating that manganese- and iron-dependent AOM have the potential to be globally important.

10 JULY 2009 VOL 325 SCIENCE, 184-187

火星では何を食べる

メタン

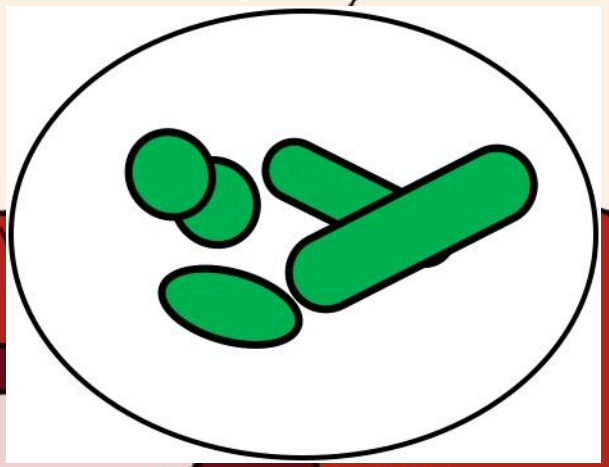
メタン

メタン

メタン

酸素はどうする？

酸化鉄



土壌をすくい取って

メタン酸化菌

メタン酸化菌はメタン菌（メタン生成菌）とは別。
メタン酸化菌の生育は、火星表面。
メタンの起源を問わない。
現在メタンがでていれば良い。

メタン酸化菌以外の可能性
何らかの地熱活動があれば化学合成細菌
液体の水があれば低栄養細菌等

生育した菌があれば、空中を頒布する可能性あり。

目的

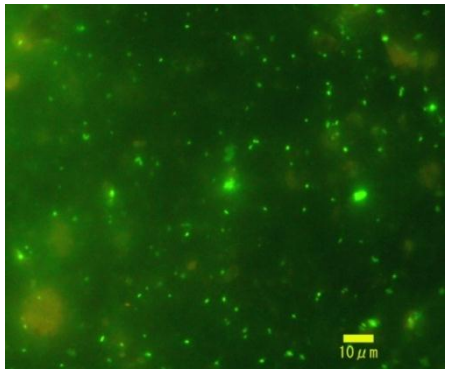
火星表面に生命はいるか。
　　地球型生命との関係は。
火星表面に有機物はあるか。
ダストの顕微鏡画像をとる。
火星表面で土壌をシャベルですくって、シャーレにのせ蛍光顕微鏡で自動観察して画像を地球に転送

何を検出して生物と言うか

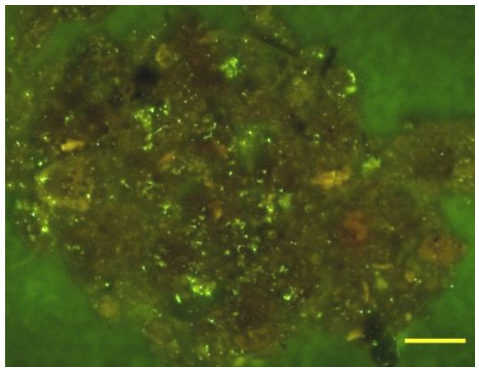
- 生物の定義
  - 複製する
  - 境界を持つ
  - 代謝する

検出可能な特徴

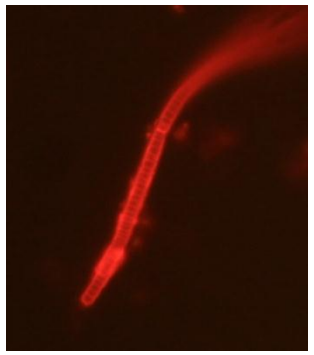
特徴	分子種	蛍光色素
遺伝情報	核酸	SYBR Green I and II, SYBR Gold, Acridine orange, DAPI, etc.
代謝	酵素反応	CFDA, CFDA-AM, SFDA, etc.
細胞膜	脂質膜	ANS, FM1-43, FM4-64, etc.
非生物的合成等	アミノ酸	Fluorescamine, etc.



Antarctic ice
stained by SYBR Gold



Alpine soil
stained by CFDA-AM

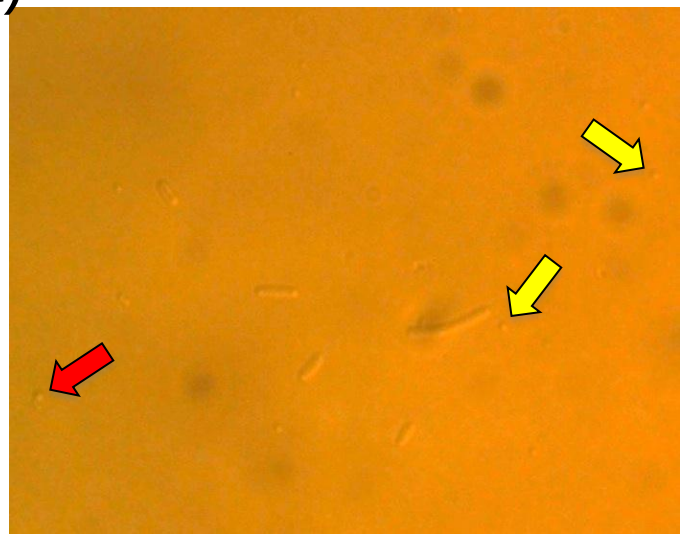


Antarctic soil
stained by FM4-64

DNAを持たない大腸菌を検出（黄色矢印）

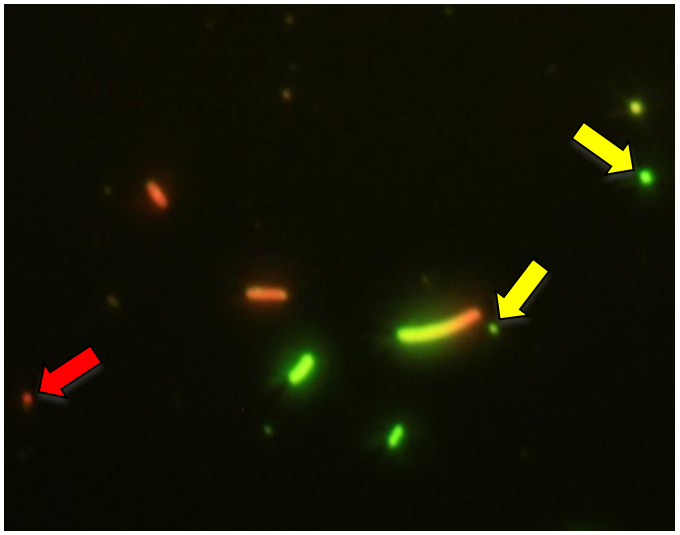
Staining of miniature *Escherichia coli* P678-54

(a)



Bright field

(b)

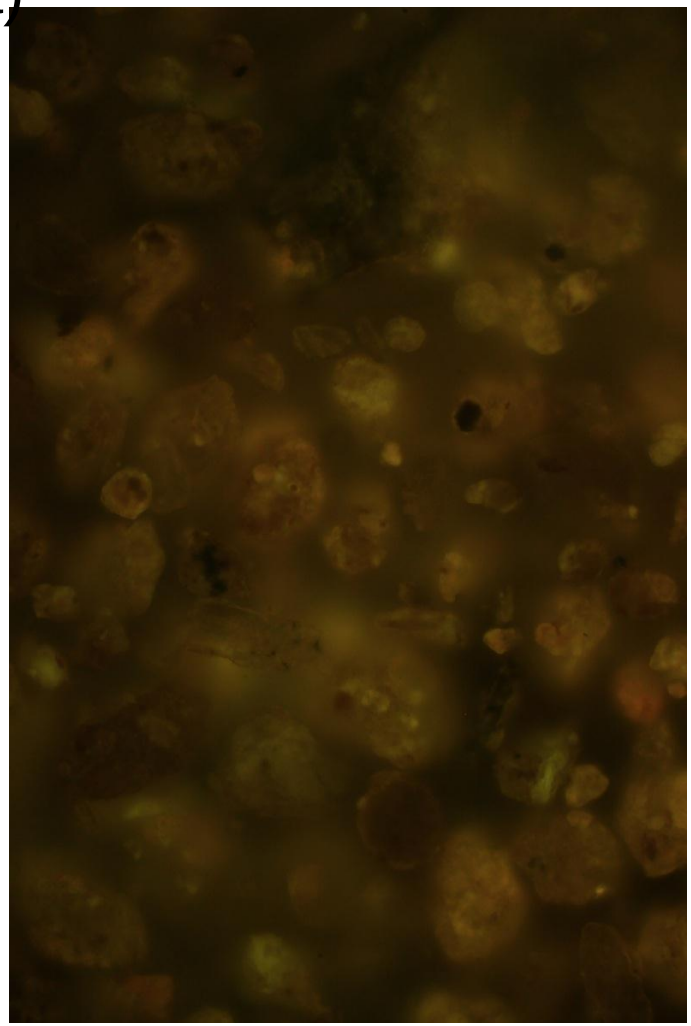


Fluorescent field

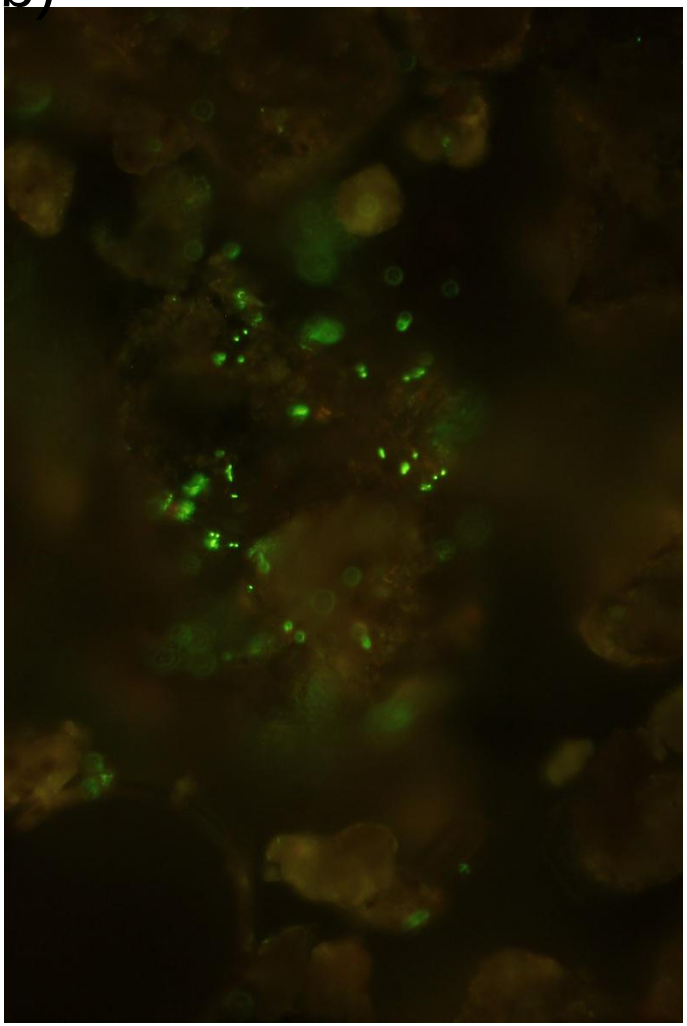
Microscopic images of P678-54. (a): brigt image, (b): fluorescence image stained with LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kit (SYTO9 & PI)

模擬火星土壌中の微生物 (JSC MARS-1A)

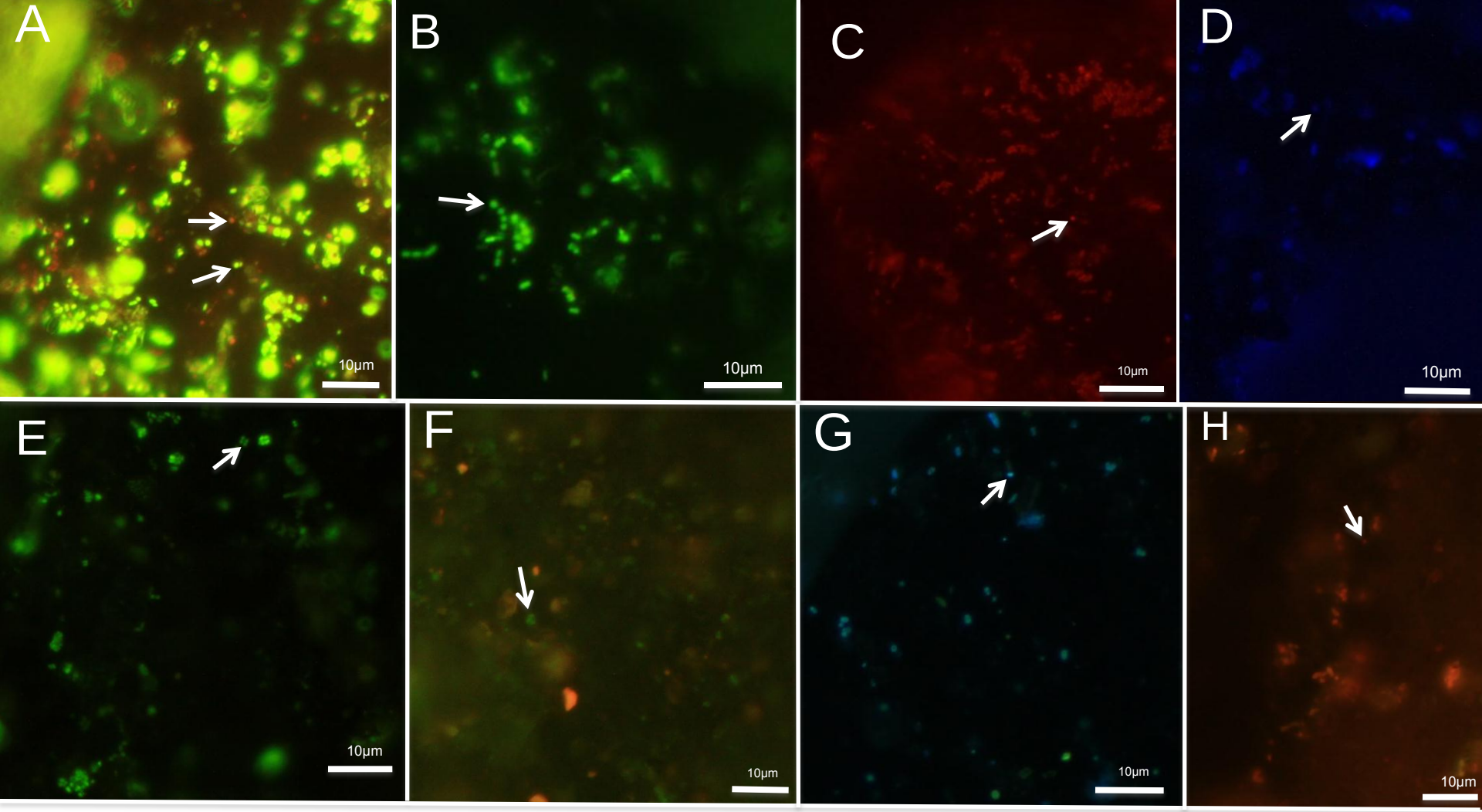
(a)



(b)



Fluorescence images of JSC Mars-1A. (a): autofluorescence , (b): stained with LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kit (SYTO9 & PI)



Fluorescence images of Antarctica soils stained with various probes.
(A): LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kit (SYTO9 & PI), nucleic acids probes (NP). **(B):** CFDA, esterase substrate probe. **(C):** DiHydroethidium, NP. **(D):** TMADPH, membrane probe (MP). **(E):** SYBR Green Ⅰ, NP.**(F):** Acridine orange, NP. **(G):** DAPI, NP. **(H):** FM1-43, MP.

顕微鏡観察

- できる限り多くの存在可能性のある粒子の識別
  - DNA生物、RNA生物、タンパク質生物
  - 複雑有機物（プロティノイド、ソーリン）
  - PAH（ケロジェン）
  - 鉱物？（紫外蛍光での撮像）
- 検出感度
  - 4cmφの時、12cm^2 に10細胞　焦点深度　0.01mm
  - 10^3 細胞/g土壌

微生物

- メタン一鉄酸化細菌をターゲットとする。
- 顕微鏡：小型、高感度、スペクトル測定
- 総合蛍光組み合わせ同時観測カクテルで生物らしいものを検出する
- 岩、氷、の場合には粉砕が必要だが、粉砕は考えなくても良い。固まりの中にはいない。

何を分析するか　1.

蛍光による検出;

　　生命の定義に基づく検出

DNAおよびstackingする塩基:

　　SyberGreen等

タンパク質、「がらくた」プロティノイド等:

　　acridineオレンジ

酵素反応:分解性蛍光色素

境界:膜透過性あるいは膜

どれ位、掘るか

- 微生物1μm、水は一滴でも十分
- 水は細胞の中だけでも良い（かもしれない）
- メタン酸化で水ができる。
- 紫外線は5μmで遮蔽される。
- γ線、太陽風は3mmのアルミで遮蔽される
- 微生物（D.radiodurans)はヒトの200倍放射線耐性
- どれ位、土壌が攪拌されるかが問題
- 多分　10cmで大丈夫
- いったん誕生した生命は適応する
- メタン噴出孔の周辺は還元的

有機物検出は

- 固体：土壌の粒度が問題だが、
- 顕微蛍光で先ず検出する。
- 分別して集めた後
- 再度、正確な蛍光分析
- 抽出、加水分解、アミノ酸分析

ありうる有機物

- 複雑有機物
  - Millar type非生物合成
  - 宇宙塵由来
- 過去の生物の遺物
  - ケロジェン
- 微生物

ローバーでの運用

- 土壌アームで採取、観察 25 mmφ
  - 微生物10^4 細胞/g土壌
  - 土壌中有機物10^4個宇宙塵（ソーリン）/g土壌
- 入口開放（一ヶ月）、入口120 mmφ
  - ダスト、ダスト中のソーリン
  - 3 x 10^2個の宇宙塵（ソーリン）感度は10個
  - 紫外線による変成速度測定
  - ダスト中の微生物
- 別の蛍光板とCCDでダストの常時モニタも可

第二段階アミノ酸探査

生命探査第二段階:アミノ酸分析

地球生物:70% 水, 15% タンパク質、

7% 核酸、3% 多糖類.

タンパク質 (アミノ酸重合体) :

分子種:1000-10000 種類

分子量:1000-1,000,000

加水分解により

20 種類のアミノ酸、分子量100－300.

生命探査第二段階:アミノ酸分析

加水分解後:

20種のアミノ酸: 地球 (あるいは地球外) 由来

20種より多い、少ない、違う: 地球外由来.

隕石に似た種類: 非生物起原.

光学活性解析

すべてL型:地球 (あるいは地球外) 由来.

DL混合:非生物起原.

すべてD型:地球外由来.

JAMP: 火星での生命探査計画

- 生存している微生物をターゲットとする
- これまで主に液体の水を探してきた。
- 自由エネルギーを探す:

  酸化鉄＋還元物質（メタン）
- メタン発生地帯
- 火星表面で自動で蛍光顕微鏡観察
- 火星表面で自動で加水分解アミノ酸分析

メタンがどこからでているか

第一段階
メタン発生地の探査絞り込み

メタンガス、火山ガス発生地帯のアナロジーからメタンガスは割れ目、孔から噴出、その周辺にメタン酸化鉄細菌がいる可能性が高い。酸化鉄の還元により二価鉄の沈着が起きているはず。
メタンガス噴出地域の同定が重要
熱が同時に放出される可能性大

絞り込みのための方法の選択肢

- 火星既存情報あるいは地球、周回での探査
- 地上からのメタン濃度観測
- 高温の場所を探査
- 2価鉄を分光学的に探査
- ExoMars Orbitor メタン濃度探査　2016年打ち上げ予定
- ローバーで探査
- メタン濃度測定
- 画像（解像度10cm、カラー）
- 赤外線画像

どういう場所に
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）

Maccalube mud volcano ir

G. Etiope
Oil and Gas Business.

Monte Busca (Emilia Romagna), Italy

Censo (Sicily), Italy

Lopatari, Romania

Andreiasu, Romania

Sarmasel, Romania

Cuarny, Switzerland

Giswil, Switzerland

MUD VOLCANOES AS EXPLORATION TARGETS ON MARS.

Astrobiology Science Conference 2010

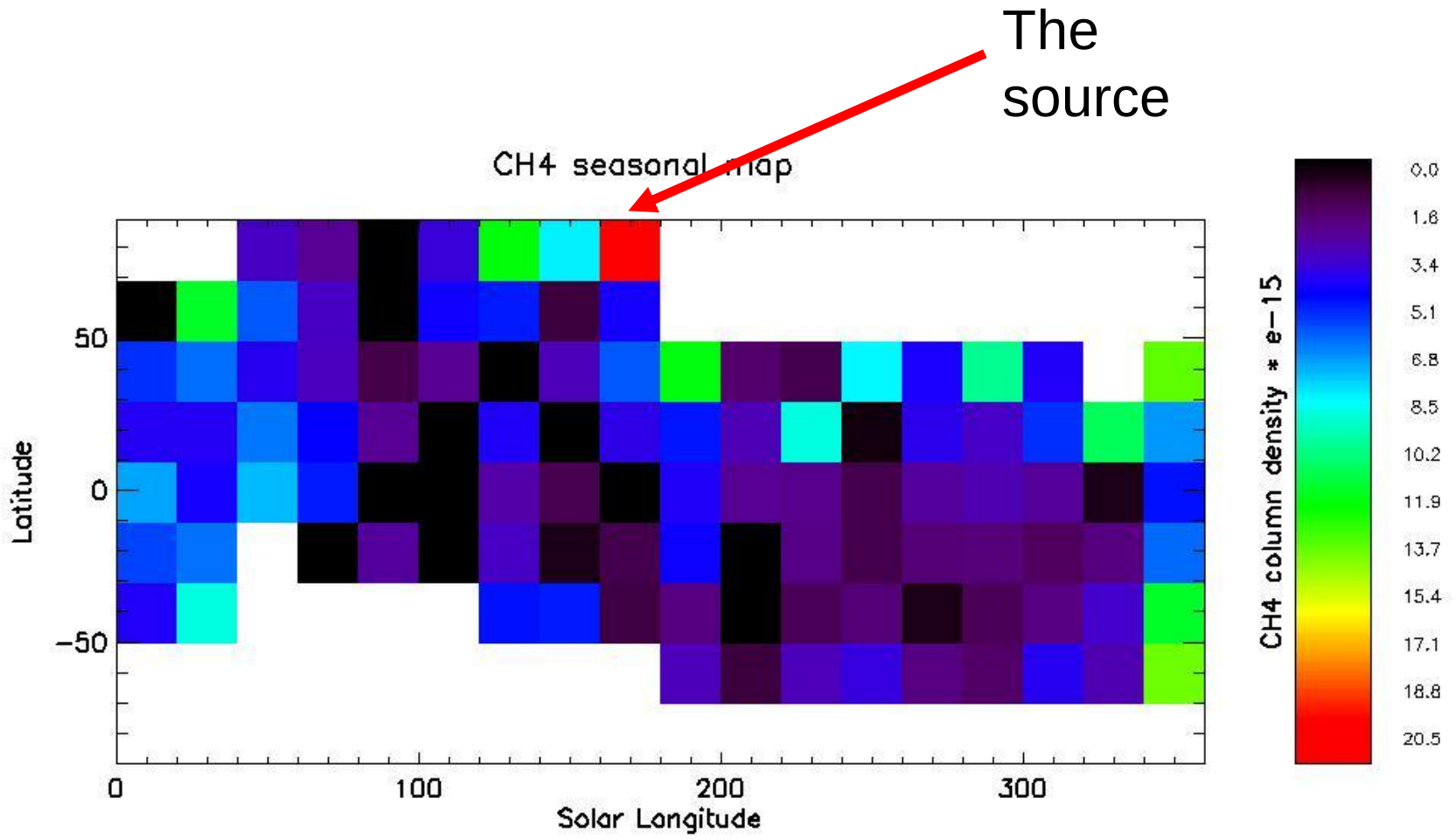
C. C. Allen and D. Z. Oehler (NASA Johnson Space Center)

Figure 1. Mud volcano in Acidalia Planitia; HiRISE PSP_002233-2225; 42.1° N, 319.3° E; scale bar 200 m.

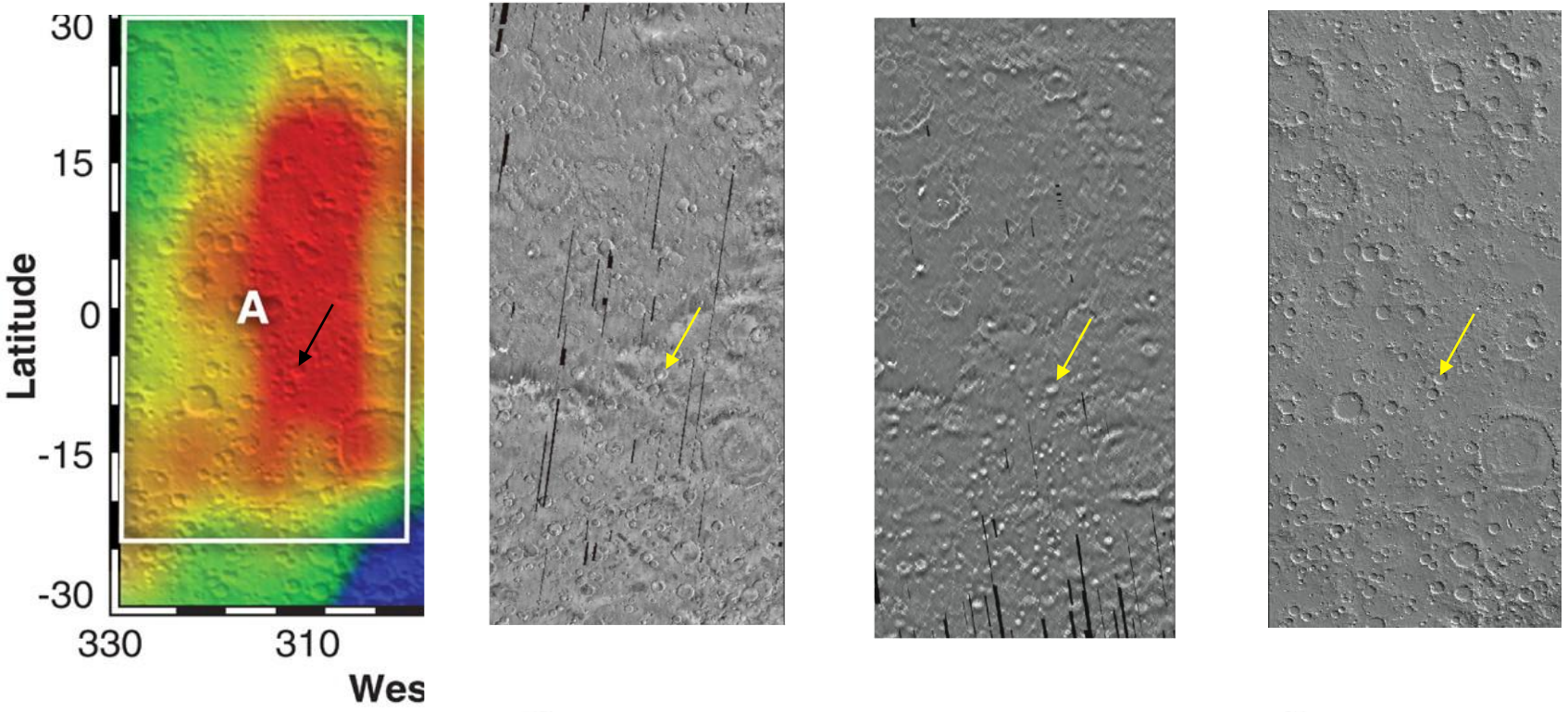
Figure 2. Mud volcano in Azerbaijan with nearly flat, pedestal-like surface and central high-albedo, sub-circular patch; 40.4° N, 49.0° E; scale bar 1 km.

Recent results by PFS
Methane mapping:with season

V.FORMISANO

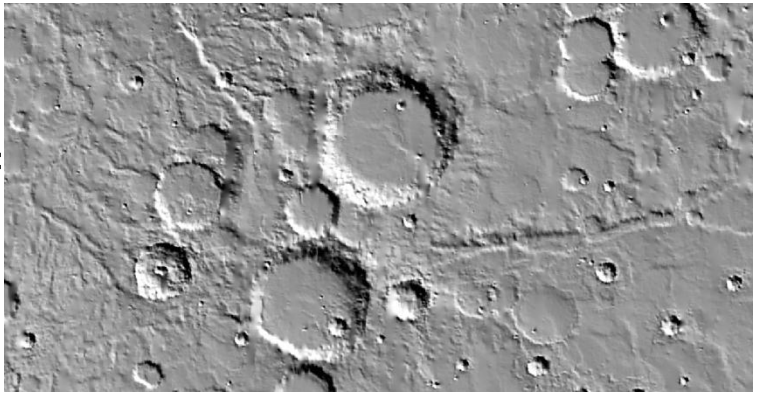


Methane THEMIS Day IR Night IR MOLA Shaded Relief

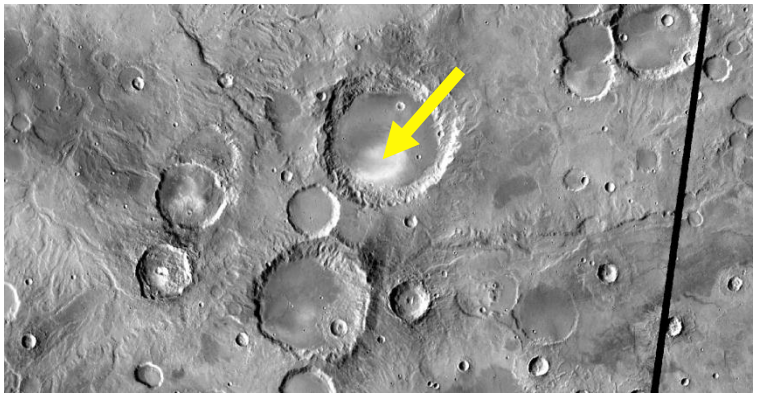


昼も夜も熱いのはなぜ？

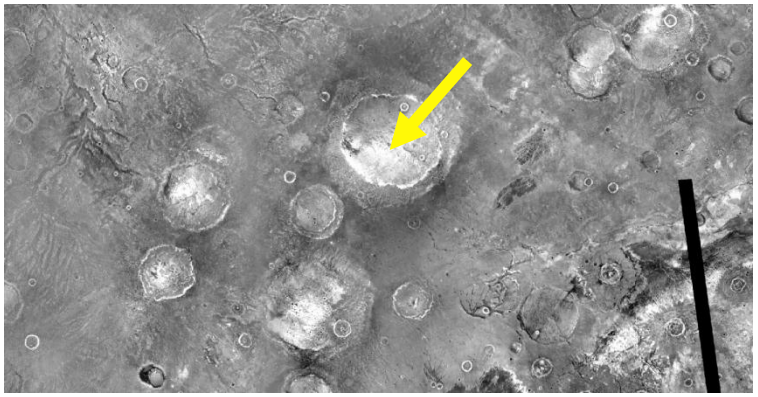
MOLA Shaded Relief



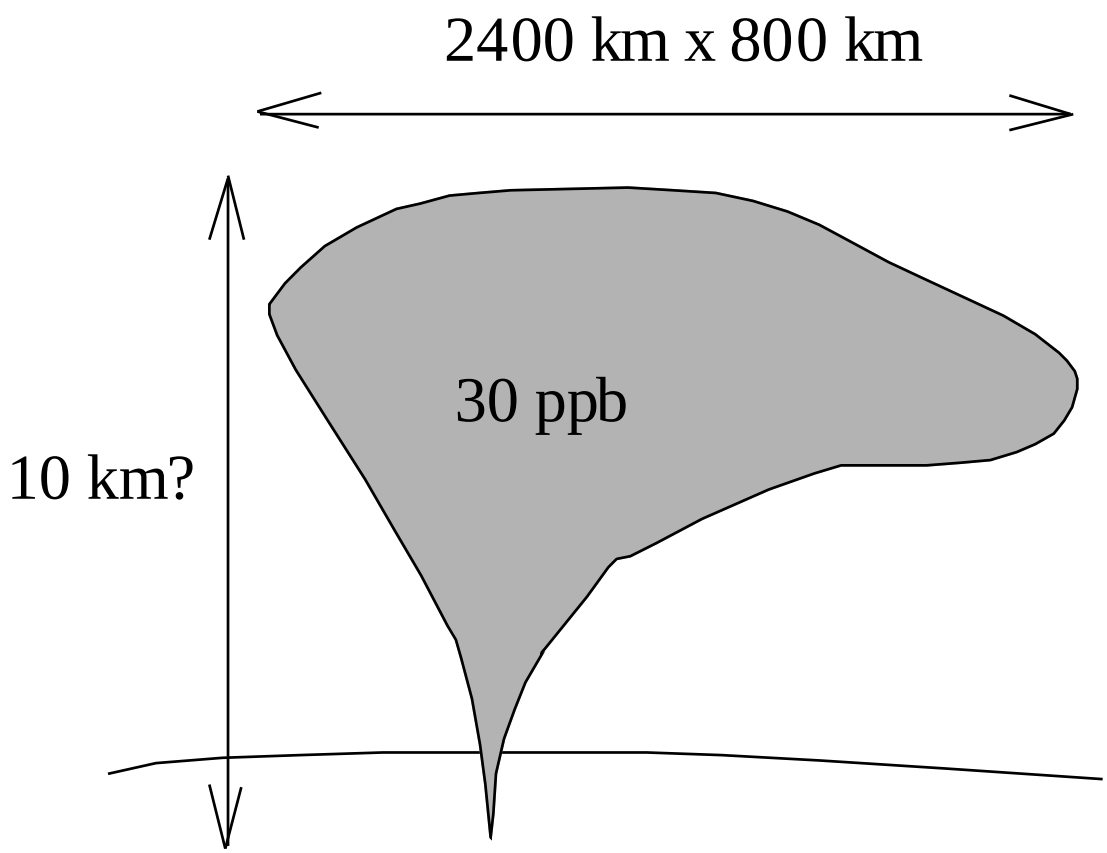
THEMIS Day IR



THEMIS Night IR



メタンプルーム探査



噴出孔の開口面積が240m x 240mならば、100%

酸化鉄(II)の光学的検出？

- 酸化鉄(II)は黒色粉末（FeO）。鉱石としてはウスタイト(Wüstite)が知られている。
- あるいはolivine (Mg,Fe)2SiO4.

Peridotite xenoliths in basalt--olivines are light green crystals. Location: San Carlos Indian Reservation, Gila Co., Arizona, USA.

生命探査の可能性を上昇させる手段
既存データでの解析

- 熱の放出地帯の可能性（THEMIS)
- 火山活動の可能性（地形）
- メタン発生地帯の可能性
  - 地形、色（黒、緑）、鉱物（マグネタイト等）
- 液体の水の可能性（地形）

生命探査の可能性を上昇させる手段
地上での火星メタン測定

Searches for volcanic or crustal gas in the recent Martian atmosphere by ground-based observation 2012

- H. Nakagawa, Tohoku University, Sendai, Japan
- Y. Kasaba, Tohoku University, Sendai, Japan
- S. Aoki, Tohoku University, Miyagi, Japan
- I.Murata, Tohoku University, Sendai, Japan
- S. Okano, Tohoku Univ., Sendai, Japan
- H. Maezawa, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Japan
- H.Sagawa, NiCT, Tokyo, Japan
- Y.Kasai, NIICT, Tokyo, Japan

生命探査の可能性を上昇させる手段
火星オービターでのメタン測定

- The ESA-NASA ExoMars Programme: ExoMars Trace Gas and Data Relay Orbiter 2016
  - The ESA-led Orbiter will perform detailed, remote observations of the Martian atmosphere, searching for evidence of trace gases of possible biological importance, such as methane and its degradation products.

まとめ

- 着陸地の検討；地熱活動、水、メタン
- 微生物の蛍光顕微鏡観察
- アミノ酸分析
- 探査対象
  - 微生物（現在）
  - 有機物（過去の生物、宇宙由来）

参考文献

- Glavin, D. P.; Schubert, M.; Botta, O.; Kminek, G.; Bada, J. L, 2001: Detecting pyrolysis products from bacteria on Mars, Earth and Planetary Science Letters, 185, 1-5
- Emily J. Beal1, Christopher H. House, and Victoria J. Orphan., 2009: Manganese- and Iron-Dependent Marine Methane Oxidation, science, 325, 184-187