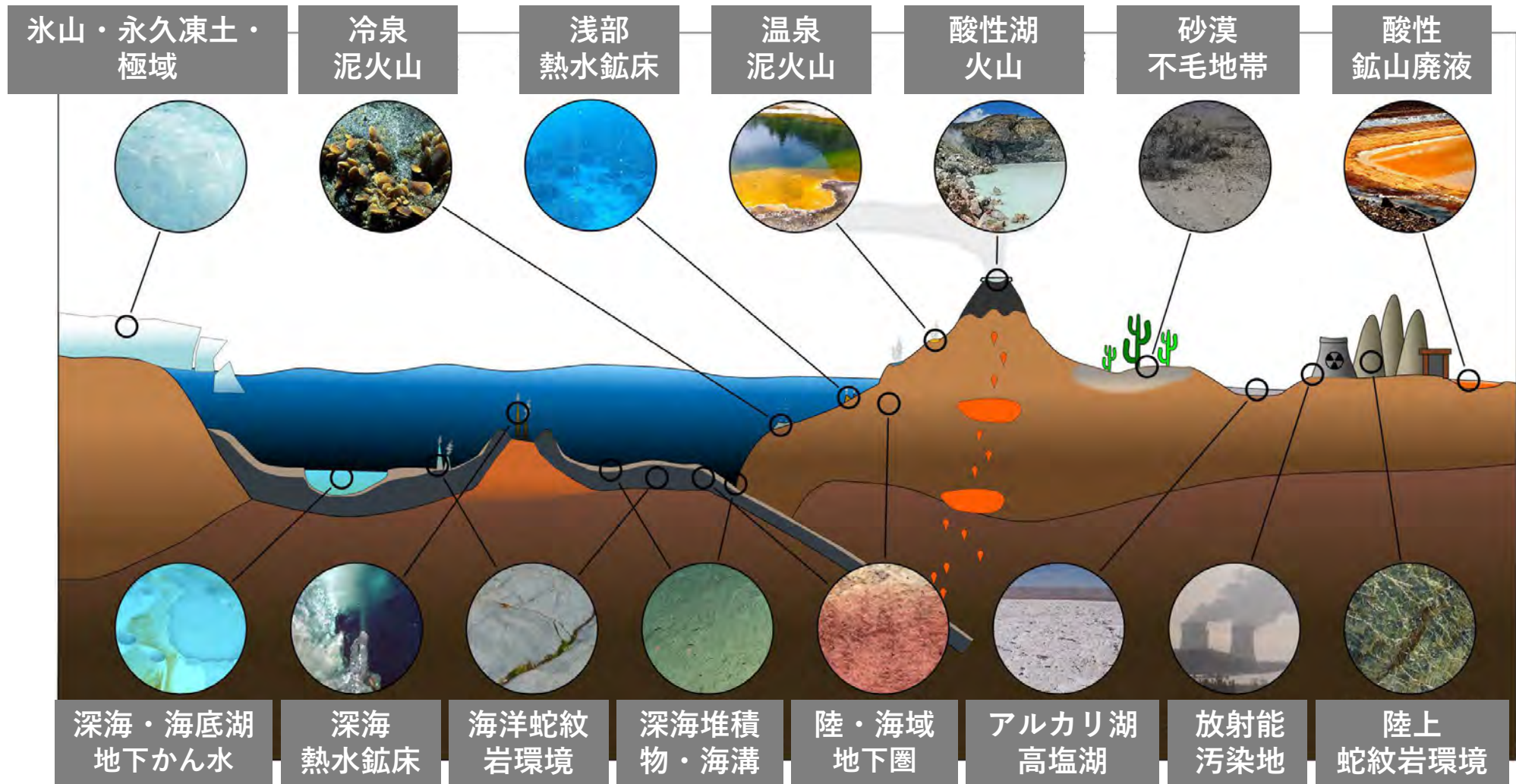


# 地球惑星科学分野の研究開発動向について ～極限環境生命圏研究～

鈴木志野 (JAXA)

# 現在研究が行われている地球における極限生命圏



多様な環境において、陸上・海洋掘削を伴うサンプル採取・解析が行われている。

# 極限環境生命圏の研究で 何を明らかにするのか？

## 地球科学

微生物を地球の成因の1つとみなす

全球規模の物質循環

気候変動における微生物の役割

地球史における微生物の役割

エネルギー資源の成因

## 生命科学

地球生命の1つのモデルとして捉える

生命のハビタビリティー

生命の生存戦略・進化戦略

生命の起源

地球外生命の可能性

地球-生命共進化

地球史・生命史

地球環境変動をもたらす  
物質循環の主要因子としての生命活動の役割

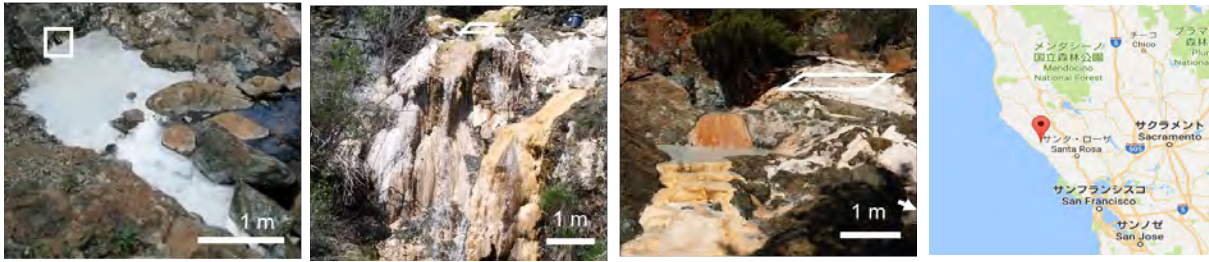
将来環境変動などの予測  
海底下エネルギー資源への貢献

特殊環境に生きる生命から、  
生命の普遍性・法則など学理学説の構築

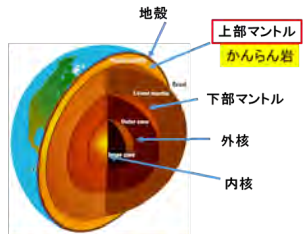
特殊機能利用による人類社会への貢献  
地球外生命探査へ

# 蛇紋岩化反応に支えられる生命圏

Suzuki et al. (2013) PNAS

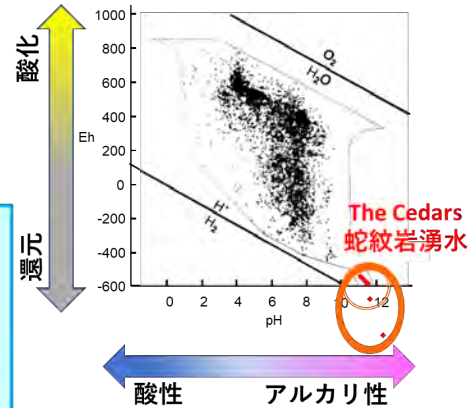


蛇紋岩化反応 = かんらん岩と水が反応し、蛇紋岩ができる反応

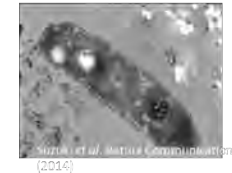
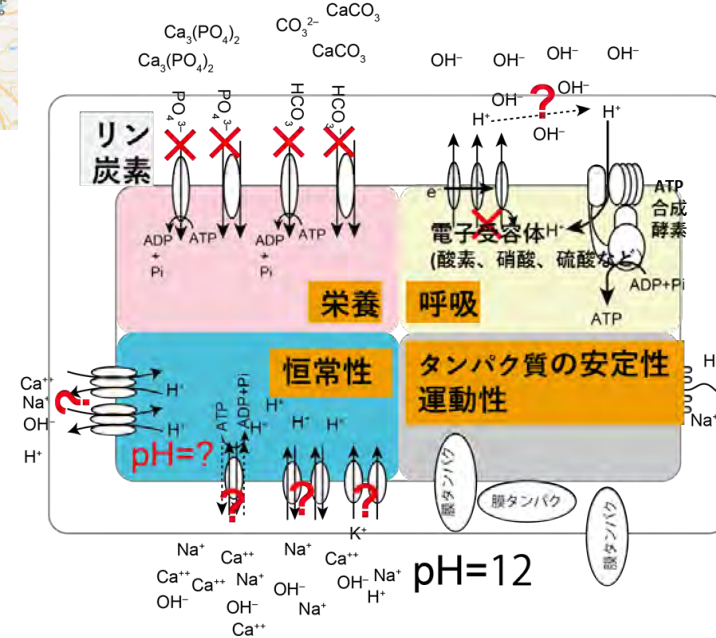


## The Cedars湧水の化学的特性

- 超アルカリ・超還元水 (pH=11-12,  $E_h = -900 \text{ mV} \sim -500 \text{ mV}$ )
- 水素、メタン、カルシウムを多く含む
- 炭素、窒素、リンといった栄養はほとんどない。
- 呼吸に必要な酸化物質（酸素、硝酸、硫酸）も検出できない。



複合的要因により、微生物にとって、生育が非常に難しい環境



人類の生物学の知見では、どのような戦略で生命が生育可能なのか、予測困難

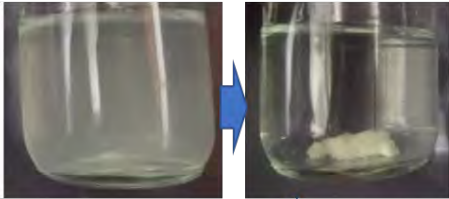
生命のエネルギーである水素が大量に発生  
非生物的反応で有機物が作られる（化学進化が起きうる）環境

新たな生命の生存戦略の理解  
初期生命進化・生命の起源と関連性

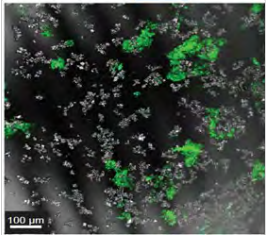
# 学術的ハイライト

pH11で水素をエネルギー源とし  
炭酸カルシウムを炭素源とする  
微生物を発見

*Serpentinomonas* 培養2週間後



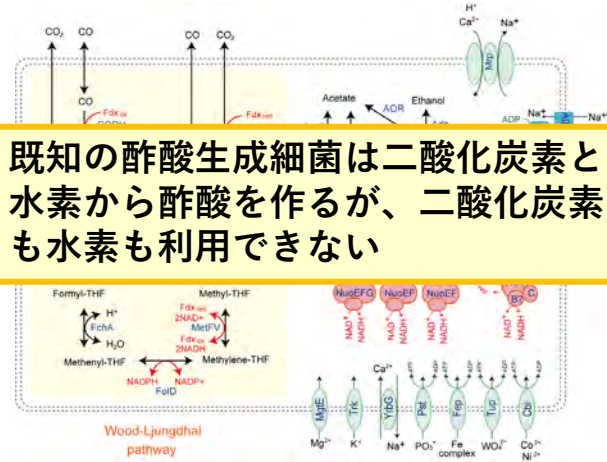
炭酸カルシウムを唯一の  
炭素源として培養



新規炭素固定代謝経路を持つ微生物の発見

Suzuki et al. (2018) *Frontiers in Microbiology*

推定一酸化炭素  
駆動型酢酸生成細菌



既知の酢酸生成細菌は二酸化炭素と  
水素から酢酸を作るが、二酸化炭素も  
水素も利用できない

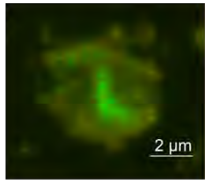
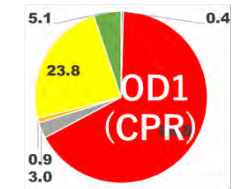
Ca. *Horikoshibacteria*

多くの生命機能を欠損した  
ナノ微生物が最優先種であることを発見

Suzuki et al (2017) *ISMEJ*

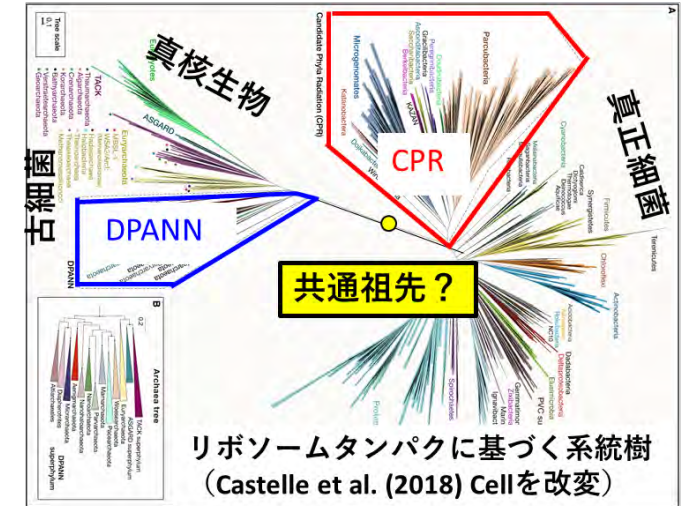
The Cedarsの泉  
の微生物群集構造

蛇紋岩に付着  
するOD1



OD1は多くの生命が  
保有する機能を欠失  
セントラルドグマ  
遺伝機能

- 代謝機能
- 合成機能
- 細胞膜
- 細胞壁合成



リボソームタンパクに基づく系統樹  
(Castelle et al. (2018) *Cell*を改変)

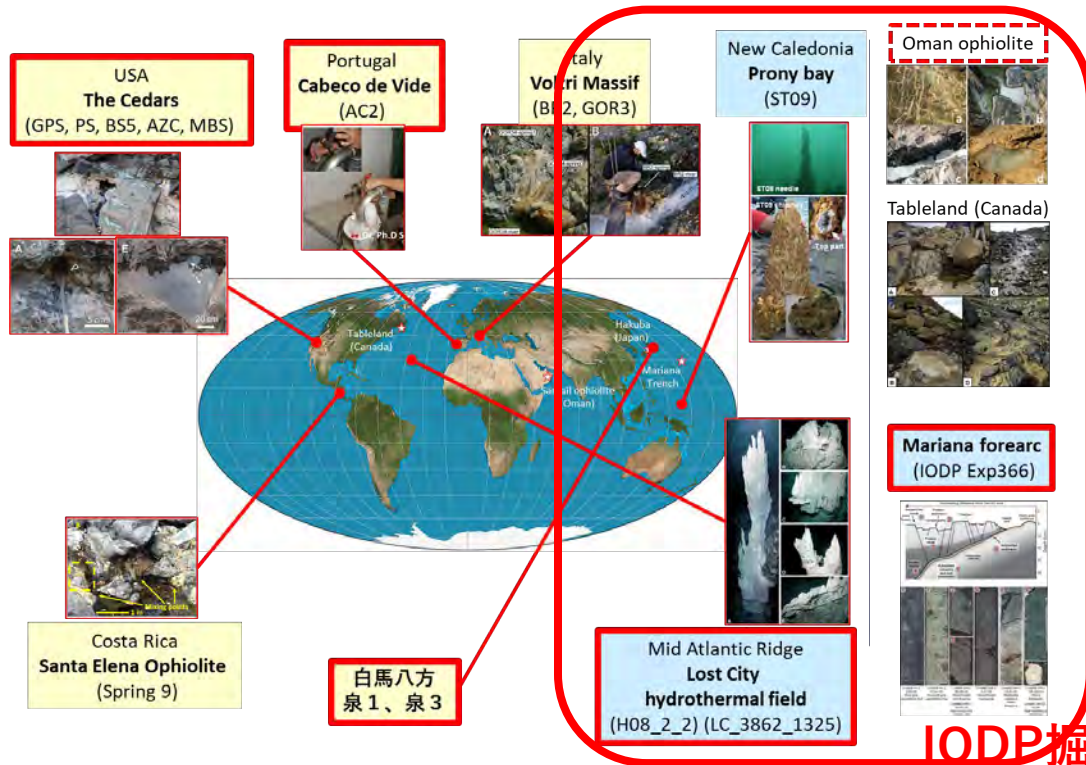
出願番号：特願2021-125723

発明名称：「電子授受タンパク質」

超還元的環境で生きるために必要な  
高活性な電子授受タンパクの発見

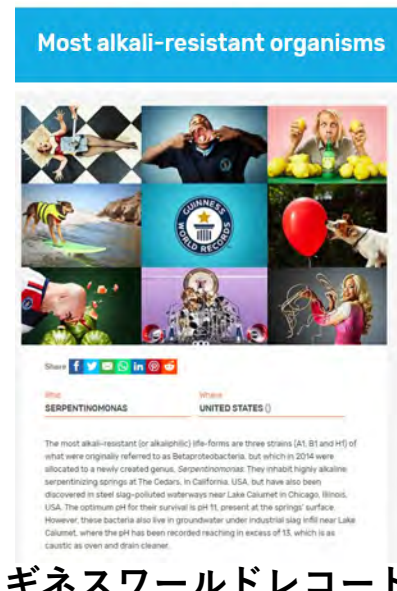
極限環境の特殊なサンプルを解析することで、新たな知見・遺伝資源が明らかに！ 120

# 陸域・海域の蛇紋岩化反応サイト

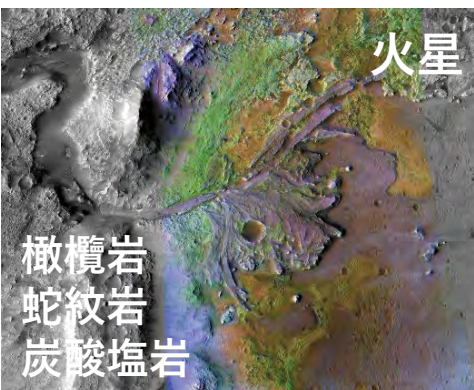


# 本研究の発展・波及効果

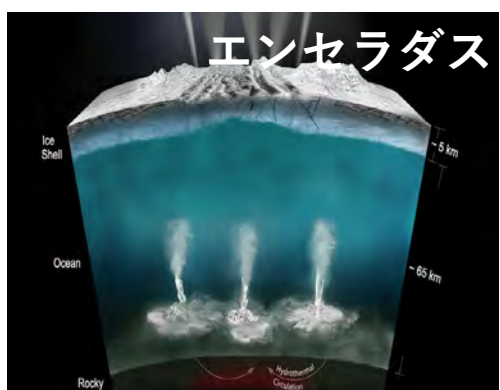
60以上のメディアで紹介



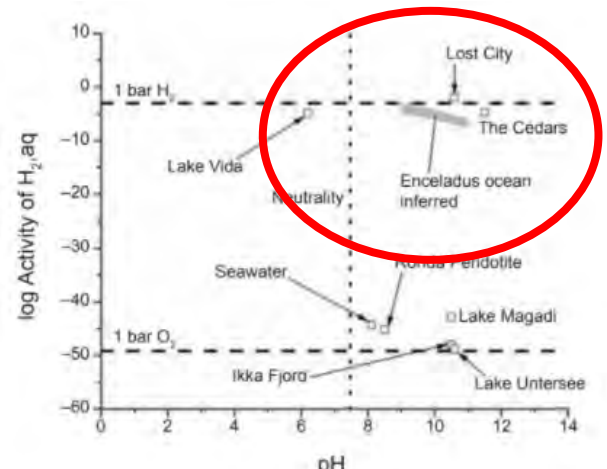
## 海洋天体の類似環境としてアストロバイロジー研究と関連



Mars (Jezero Crater) (Ehlmann, Science 2008)



NASA/JPL-Caltech/Southwest Research Institute



微生物 岩からエネルギー?

呼吸などの遺伝子なし

2 μm

海洋微生物チームの新発見

生命活動に必要な硫酸や鉄を必要とする微生物を思いついた。鉄と硫酸、海洋研究微生物学チームは、呼吸し、エネルギーを作り出した。呼吸し、エネルギーを化学反応を利用して生きていく。微生物は、新しい生命の起源を探る。

新種が見つかったのは、環境よりも、以前よりも、より高温、より酸性、より高圧の環境で発見された。この微生物は、鉄と硫酸を必要とする。この微生物は、呼吸し、エネルギーを作り出した。呼吸し、エネルギーを化学反応を利用して生きていく。微生物は、新しい生命の起源を探る。

読売新聞

# 掘削科学で明らかとなった海底下生命圏

## ① 海底堆積物

### 海底下生命圏の発見

1994年 海底下生命圏の発見

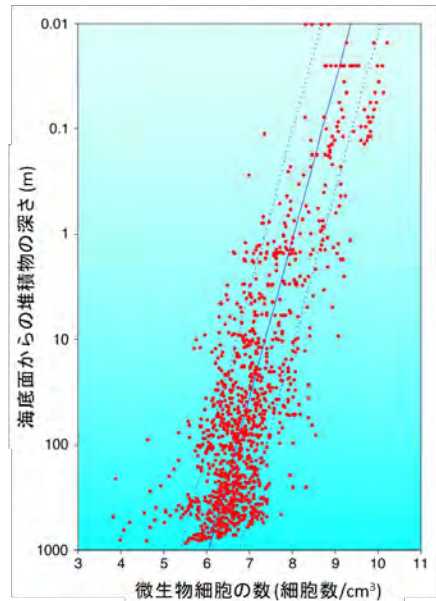
1994年にイギリス・ブリストル大学のジョン・パークス博士らにより発表された研究成果

海底下518mまでの堆積物に、1cm<sup>3</sup>あたり、100万細胞を超える微生物が存在していることを示した



ジョン・パークス

バリー・クラッグ

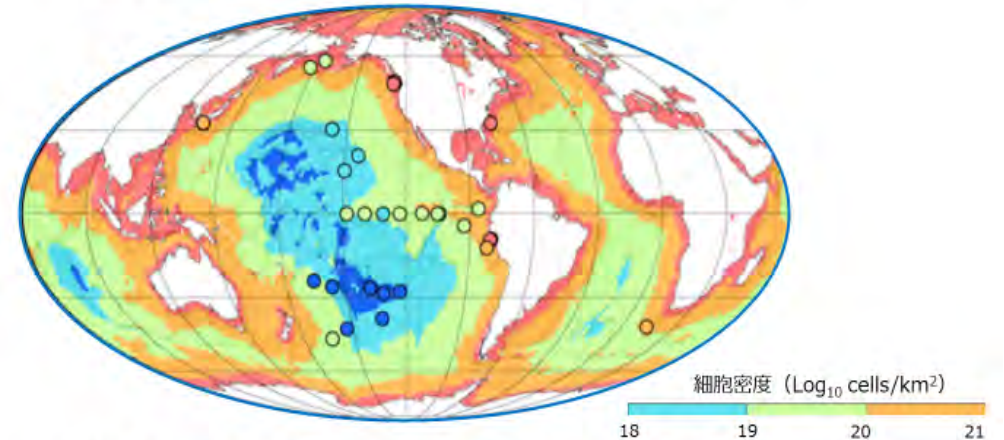


“この発見は、海洋生命圏の深さを大幅に拡大し、海洋から沈降する有機物の生物学的な分解が、その埋没後も（地質学的な時間スケールで）続くことを示している”

Parkes et al., Nature, 1994; Hydrogeol. J., 2000. 2

### 海底堆積物における生命数

海底堆積物に存在する微生物量の全球分布モデル

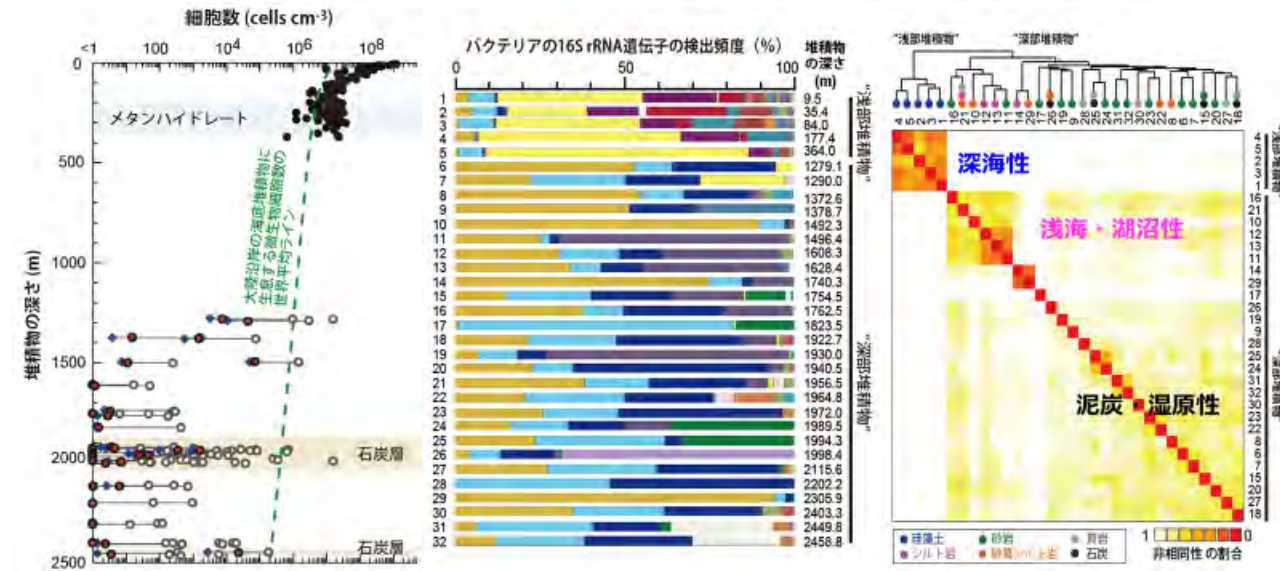


地球全体の海底堆積物に  $2.9 \times 10^{29}$  細胞の微生物が存在  
その分布は地球の表層における光合成一次生産（有機物）と相関がある

Kallmeyer et al., PNAS, 2012.

# 深度方向の微生物の分布と活性

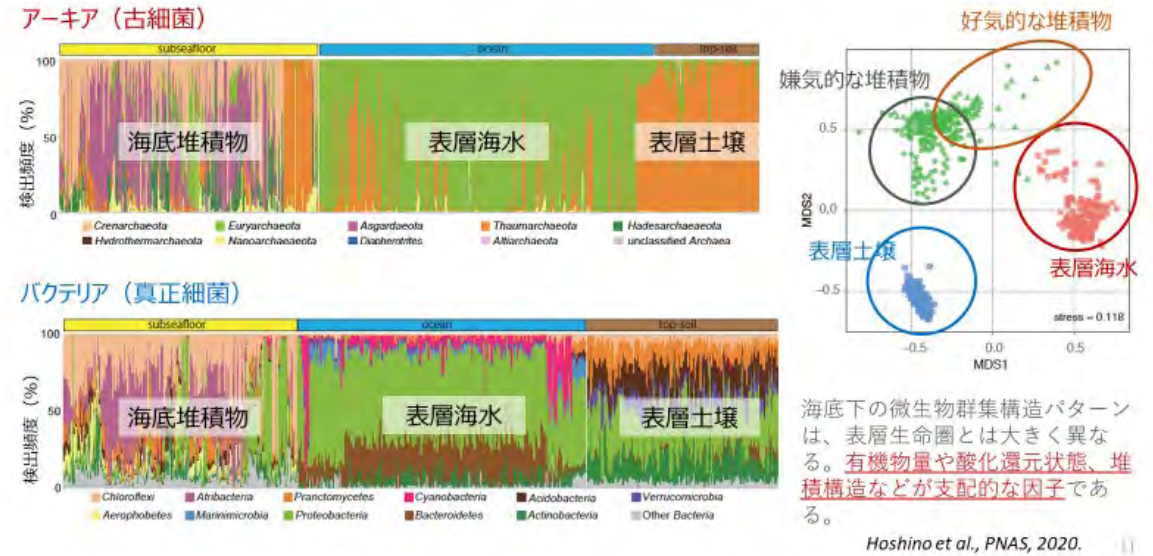
バイオマスの急激な減少と堆積プロセスを反映する微生物群集の存在を認めた



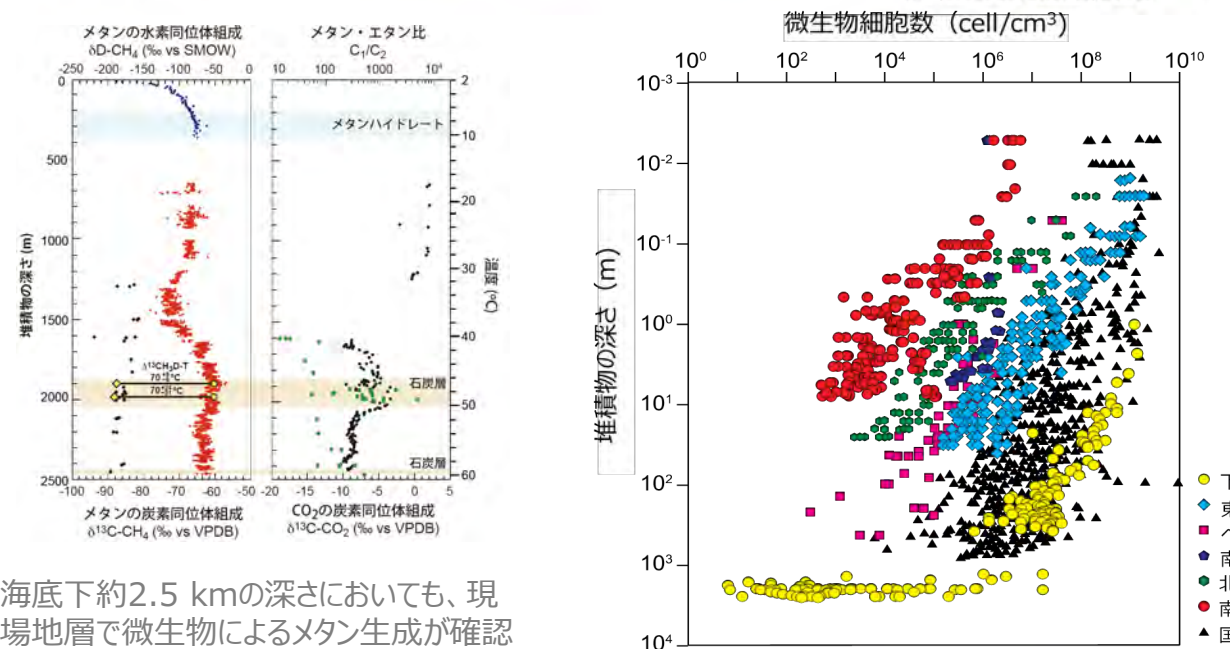
Inagaki et al., Science, 2015.

# 海底堆積物における微生物の多様性

海底下の微生物の多様性は、陸域土壌や海水中の微生物多様性に匹敵する



Hoshino et al., PNAS, 2020.

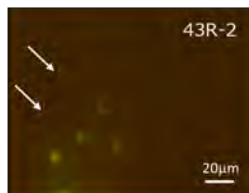


海底下約2.5 kmの深さにおいても、現場地層で微生物によるメタン生成が確認

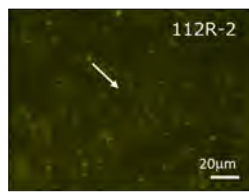
各種IODPのデータを統合的に解析することで  
 全球規模での海底堆積物の基盤特性を記載する  
 ことに成功



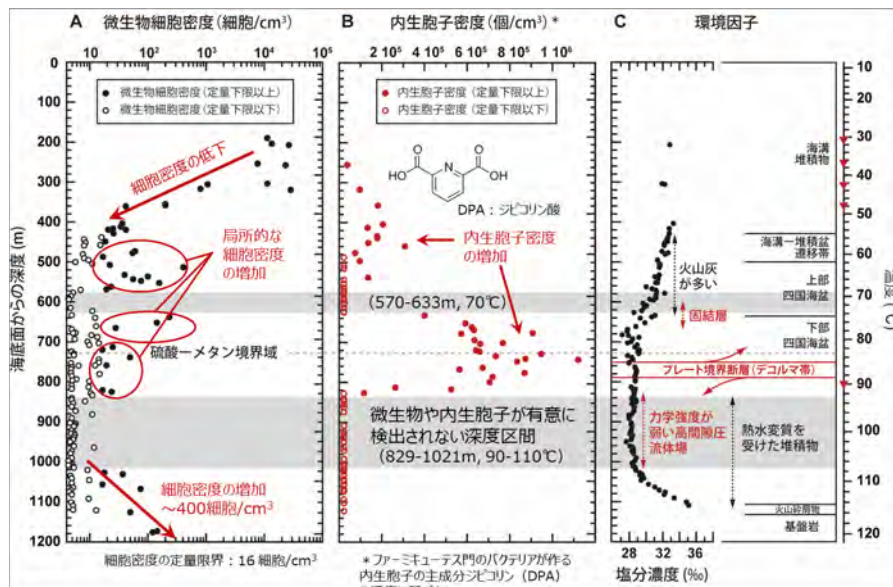
海底下深部においても、微生物の過酷な生存競争が繰り返されている



43R-2  
深度652.0m、76℃



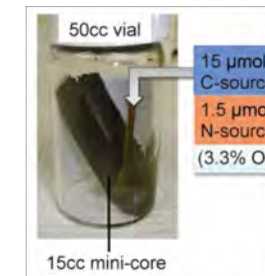
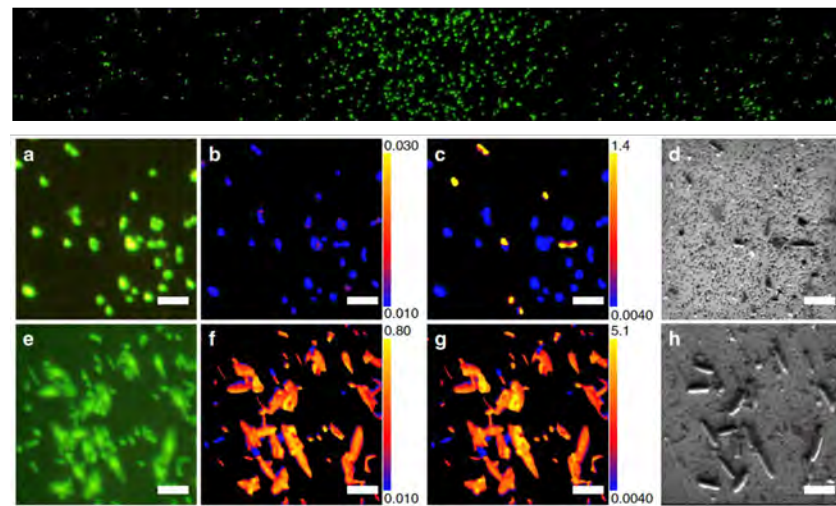
112R-2  
深度1176.8m、120℃



Heuer, Inagaki, Morono, et al., Science, 2020.

南太平洋環流域の1億年前までの地層から生細胞を検出

(2010年、IODP Exp. 329)

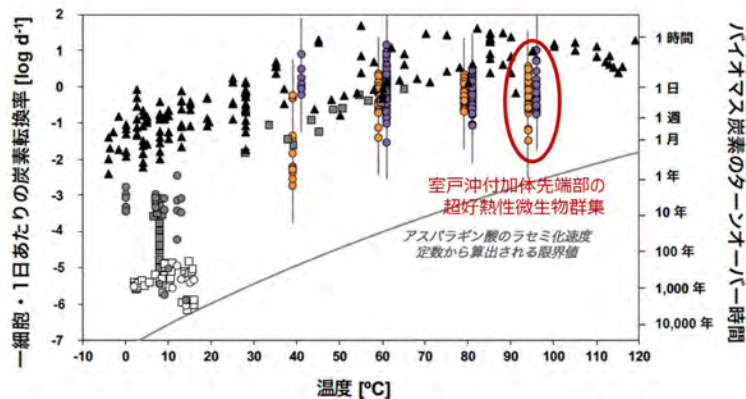


外洋の栄養源に乏しい堆積物に1億年ものあいだ閉じ込められた微生物細胞が、生きていたことを証明した

<sup>13</sup>C や <sup>15</sup>N などの安定同位体で標識された栄養源を取り込んだ1億年前の地層に生息する好気性微生物

Morono et al., Nature Communications, 2020. 30

海底下深部には、極めて高い代謝活性を持つ超好熱性微生物生態系が存在する



海底下深部の堆積物に生息する微小な(超)好熱性微生物群集は、熱による生体高分子の損傷の修復に必要なエネルギーを獲得するため、理論上の限界値を超える高い代謝活性を維持している

堆積物の下に広がる海洋地殻内や、地球外天体における生命居住可能性(ハビタリティ)を理解する上で重要な科学成果



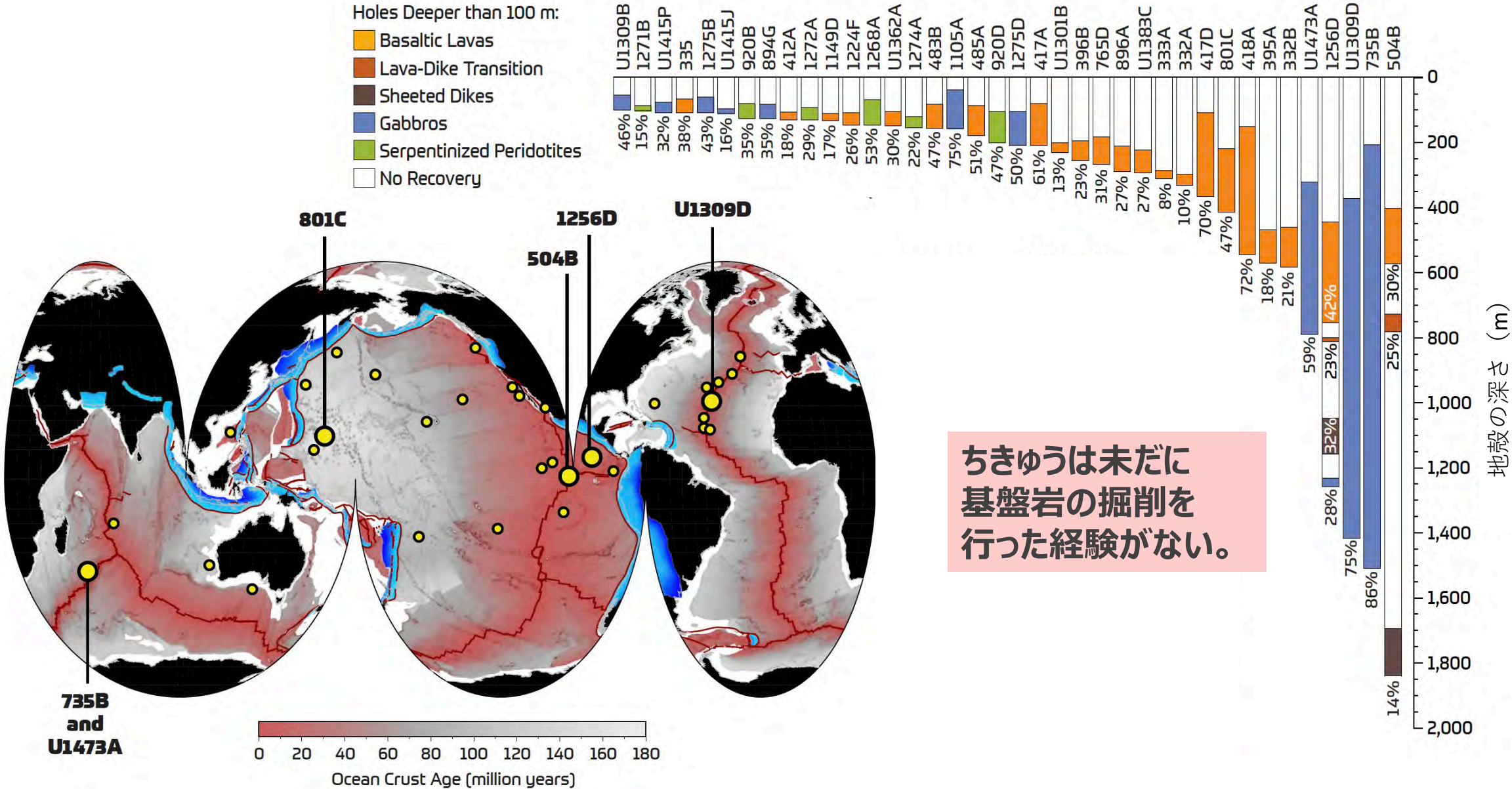
Beuwig et al., Nature Communications, 2022.

深度方向の微生物の分布やそれらの微生物が活着していることなどが明らかに。

海底堆積物の掘削調査により、海底下生命圏の存在・規模・分布・活性・多様性は明らかになった。

一方で、微生物のゲノム情報の取得や、培養株などの解析はほとんど進んでおらず、生存戦略などの知見は未熟である。

# 海洋地殻フロンティアの探索は海洋科学掘削のこれからの課題である

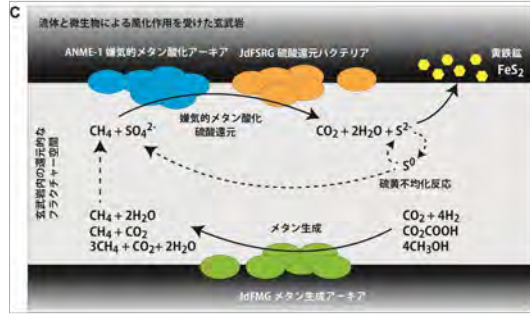
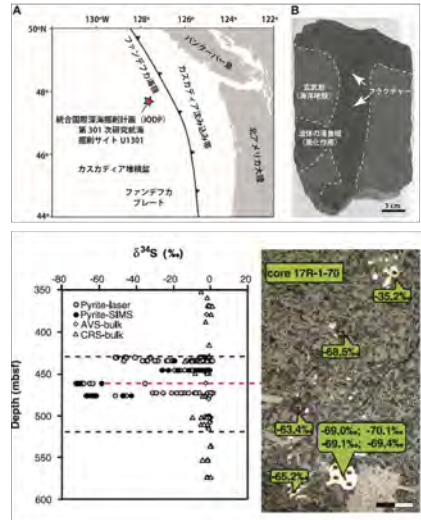


# 掘削科学で明らかとなった海底下生命圏

## ② 海洋地殻

バンクーバー島沖の海洋地殻に微生物が生息することを初めて直接的に証明

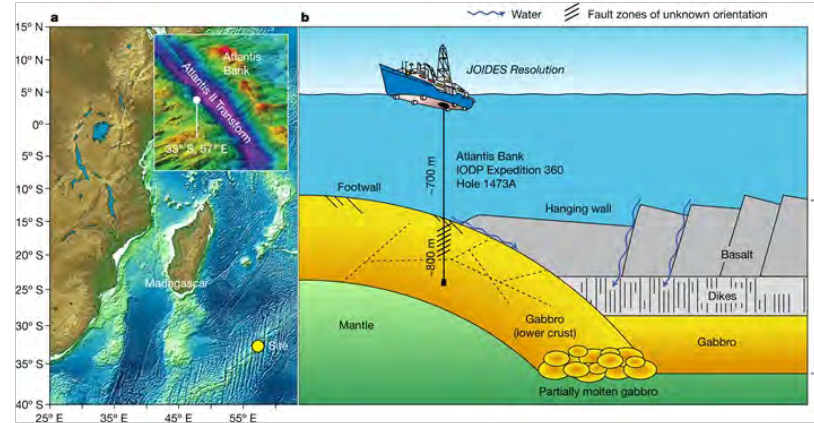
(2004年, IODP Exp. 301)



ファンデフカ海嶺翼部の若い玄武岩（形成年代は320万年程度）の亀裂に、炭素や硫黄循環に関する代謝活動をしめす同位体異常やその反応を担う微生物のDNAの証拠が得られた

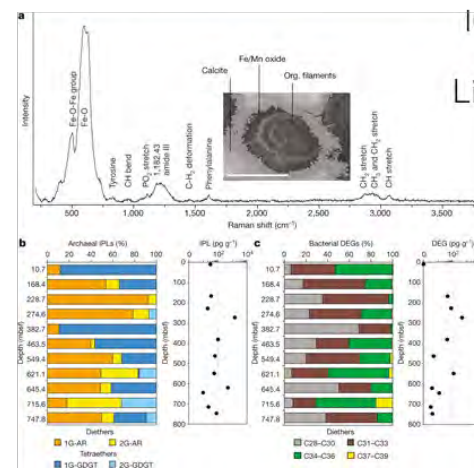
Lever et al., Science, 2013.

インド洋アトランティスバンクの海洋地殻に微生物確認



IODP Expedition 360

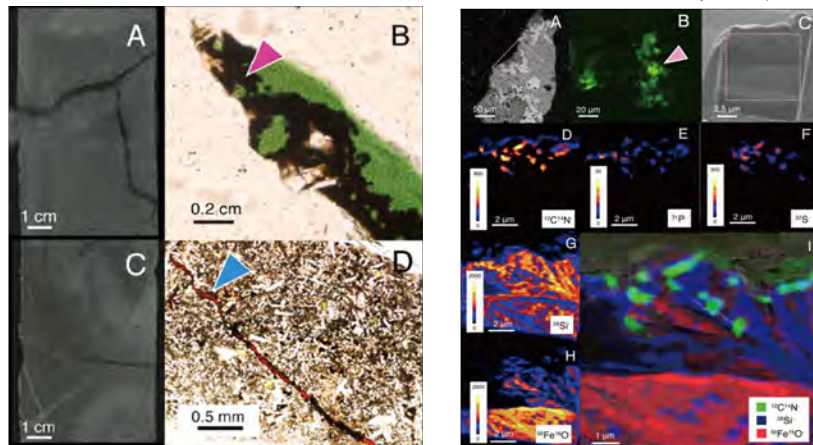
Li et al., Nature, 2020



海洋地殻内に微生物が存在することが確認  
海洋堆積物とは異なる微生物相であると推定

南太平洋環流域の1億年を超える玄武岩の亀裂に微生物を発見

(2010年, IODP Exp. 329)

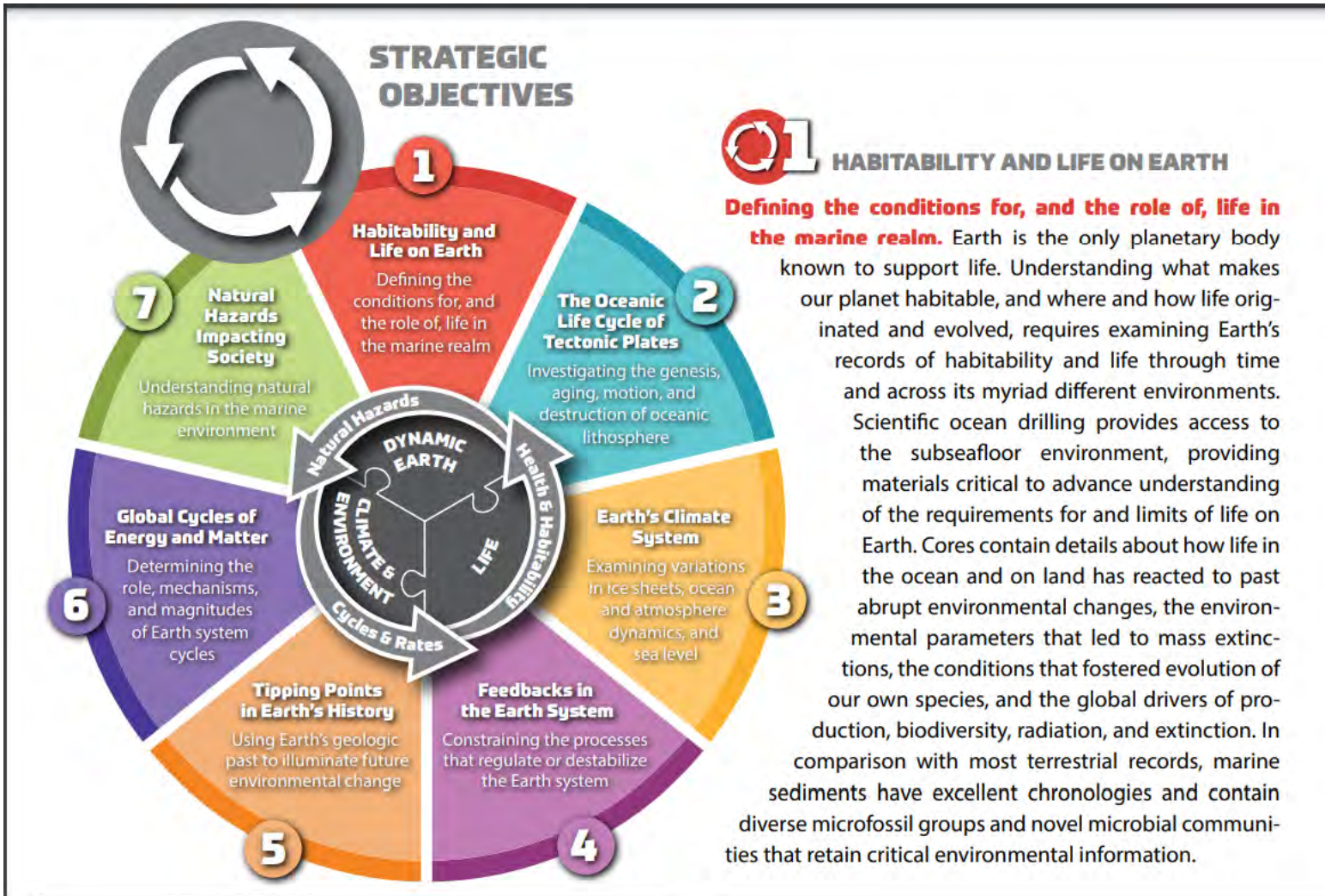


1億年を超える玄武岩の亀裂（変質粘土鉱物で充填されたもの）に微生物のバイオフィルムが発見された

Suzuki et al., Communications Biology, 2020.

海洋地殻に微生物が存在すること以外はほぼ未解明

# 2050 Science Frameworkにおける生命探索関連研究の目的



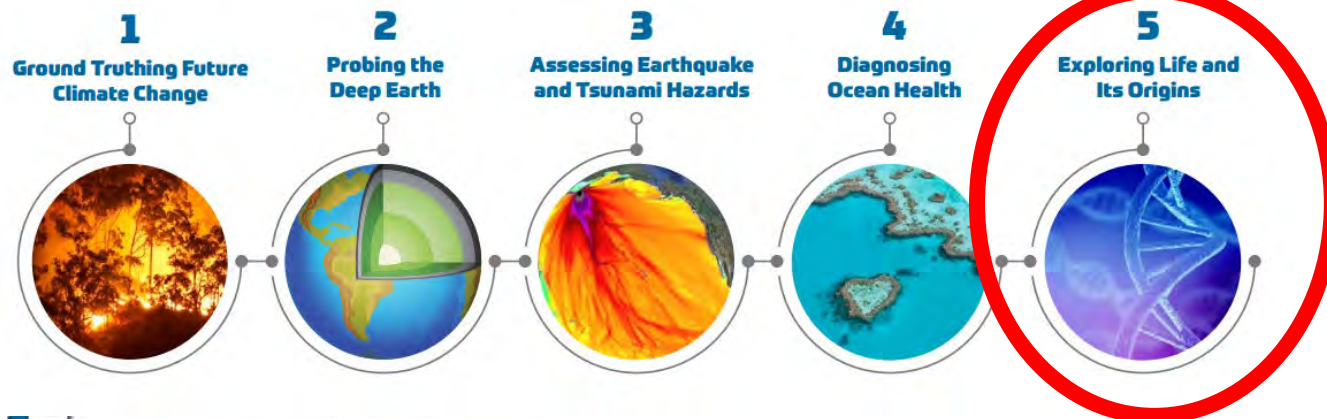
## 地球における ハビタビリティと生命

生命は多様な現象に関与

海域における生命の生存条件・  
生命の役割を定義する。

- 生命のハビタビリティ
- 生命の起源と進化
- 生命の限界の制約・規定
- 環境変動と生命変動
- バイオマスを規定する因子
- 微化石・新たな微生物群集

# 2050 Science Frameworkで目指す具体的方向性



## 4.5 EXPLORING LIFE AND ITS ORIGINS

Marine sediments and oceanic crust host a complex, active, globe-spanning ecosystem in which microorganisms live, interact, evolve, and die. The features and strategies that enable deep life to persist in these geologic habitats, what communities form under these extremely energy-limited conditions, and what geochemical and biochemical processes create their novel biosignatures remain largely unknown. To sample, monitor, and analyze a representative range of Earth's diverse subseafloor environments and the multitude of microbial communities that they inhabit in Earth's interior requires sustained scientific ocean drilling exploration.

**IMPACT.** Scientific ocean drilling will significantly advance understanding of the rules of life, the limits of life, and the origins and evolution of life on Earth. It also offers the opportunity to establish what life might look like in analogous environments on other worlds and what new organisms and novel biological functions useful in geobiotechnology reside in Earth's subseafloor.

## 生命と生命の起源を探查する

海洋堆積物・海洋地殻に生息する大規模地下生命圏を調査を通し、以下を解明

- ・エネルギーの乏しい環境での生命生存戦略
- ・生命活動と物質循環の関わり
- ・新たなバイオシグニチャーの構築



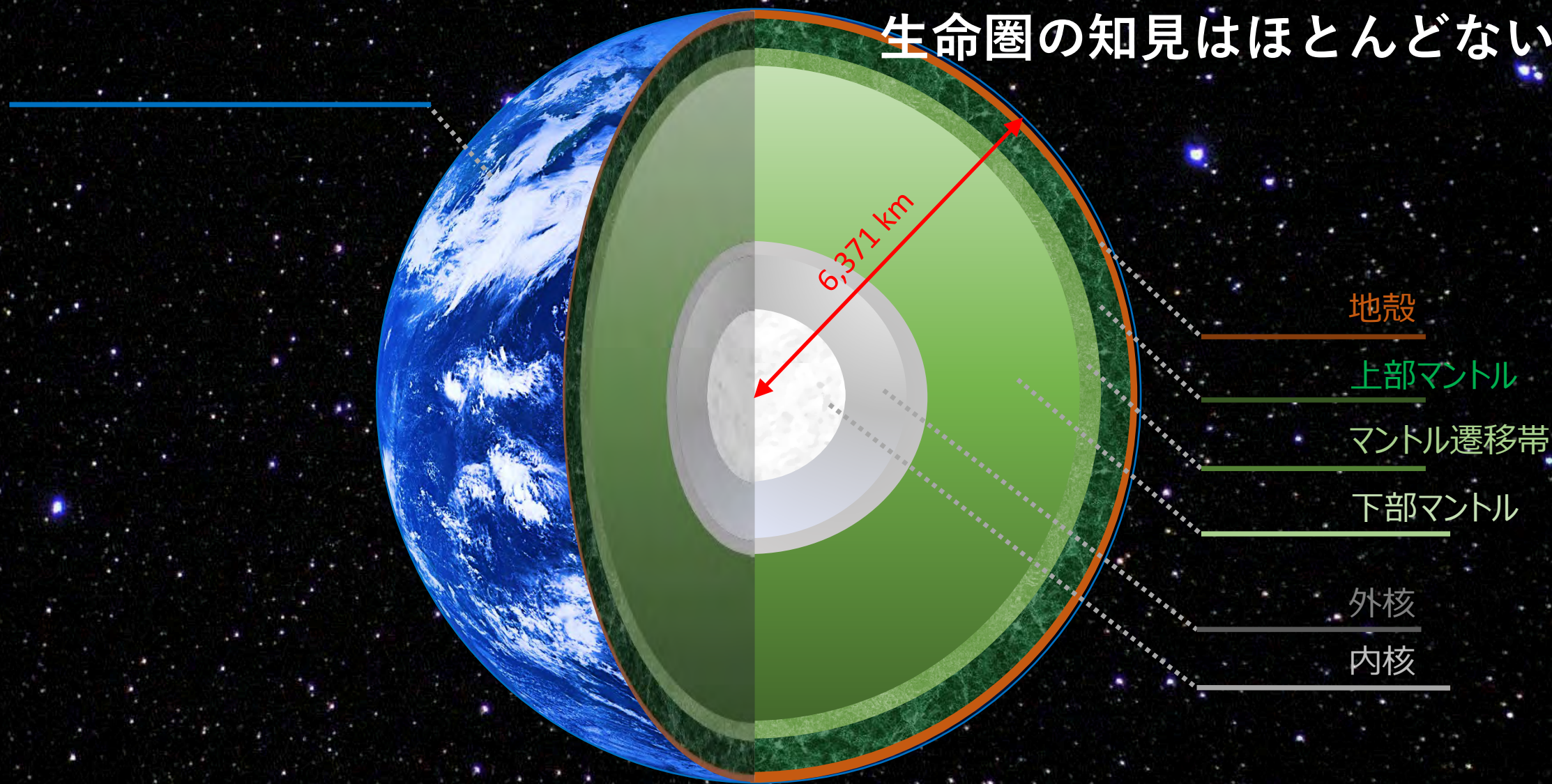
生命における法則  
生命の起源と進化



地球外生命探査への貢献  
地球微生物の利用へ（ジオバイオテクノロジー）

# 地球

海洋地殻—マントルにかけての  
生命圏の知見はほとんどない



# 極限生命圏として捉えた場合の今後の方向性の主眼

## ① 堆積層

浅部：物質循環における微生物の活性の役割  
環境変動に応答する生命変動

深部：堆積層における生命圏の限界  
物質移動の少ない中での生命維持戦略

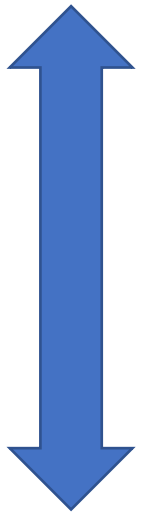
## ② 海洋地殻

微生物の存在量・活性・多様性・生存戦略・適応進化

## ③ マントル

マントルにおける生命圏の存在の有無  
非生命圏における海洋での化学進化の実態

地球科学分野に  
おける新たな  
知見創出の可能性



生命科学分野に  
おける新たな  
知見創出の可能性