

## はじめに

本書『生命の起源はどこまでわかったか——深海と宇宙から迫る』を発行するに至り、いま、私は編者として大いなる喜びに打ち震えている。

2011年に私は、当時の自分自身の主観的な考えを勢いにまかせて書き上げ、『生命はなぜ生まれたのか——地球生物の起源の謎に迫る』を幻冬舎新書から世に送り出した。しかし送り出して数年もすると、日本や世界の多くの研究者や私たちの研究グループによって生命の起源やアストロバイオロジーに関する新しい成果や知見がどんどん更新され、私自身の考え方や研究の方向性も大きく変化するようになった。特に、一見無関係に見えるような深海と宇宙という、人類にとっての二大知的ロマンかつ未踏探査フロンティア領域での科学的挑戦やその研究成果が結び付き合っていることを強く確信するようになり、その関連性を明らかにすることこそ、生命の起源研究にとって今後の最重要課題であると考えようになった。

いったんそう確信すると今度は、私たちの研究グループを含めた世界の生命の起源やアストロバイオロジー研究での新しい考え方やこれからの方向性を、多くの人に伝えたい、知ってほしい、という研究者としての抑え難い本能＝表現欲求に駆り立てられるようになった。一方でその表現欲求の高まりに反して、その広範な研究成果をじっくり咀嚼・整理して一般向けの書籍にまとめる余裕がない自分自身の状況に大いなるジレンマを感じていたのだ。

しかしきっかけが訪れた。2017年に海洋研究開発機構<sup>ジャムステック</sup>(JAMSTEC)の広報誌である『海と地球の情報誌 Blue Earth』が150号を迎えるので、その特集号で生命の起源やアストロバイオロジーに関する私たちの研究グループの最新研究を紹介したいという依頼が、Blue Earth

編集委員会から来た。『Blue Earth』は研究者が取材を受けてライターが記事をつくる形式なので、自分で執筆するよりはるかに時間的・物理的制約が少ない。しかもライターは、長年取材を通じて研究背景や知己を共有してきた、その力量が信頼できるフォトンクリエイターの鈴木志乃さんである。

私は勢いにまかせて「150号記念特集だけではつまらん。生命の起源やアストロバイオロジーに関するJAMSTECや日本国内の新進気鋭の研究者たちの最新成果を紹介する3号連続ぶち抜き特集や！」とけしかけた。

さらに、「『Blue Earth』の特集だけではもったいないから、それを再編集・加筆してガツンと書籍もつくったりしましょうや！」と、まるで東大阪の町工場の社長のようなノリで強引に話をまとめてしまった。

本書はそういうきっかけで生まれた。

きっかけはともかく、本書のコンセプトは「生命の起源やアストロバイオロジー研究のショッピングモール」である。私は、モールのコンセプトを打ち出して、出店してもらうブランド(研究者。204～206ページ参照)と店舗構成(第1章から第3章まで)を決めた総合プロデューサーにすぎない。そしてモールのコンセプトは、幅広い年齢層や嗜好を持ったいろいろなお客さんに「新しい」「楽しい」「ワクワクする」「自分も将来こういうブランドを持ちたい」と思ってもらえるような場にあることだ。

そしてモールの一角に、お客さんが集まって楽しめるステージをつくり、ささやかなエンターテインメント(第4章)を企画した。さらに、モールの味わい尽くせるようにインフォメーションセンターのキレイなお姉さん役を自ら買って出た(解説編)。

モールの空間デザイン(きれいなイラストや写真をふんだんに使った分かりやすい紙面)は『Blue Earth』の制作スタッフによる。そして、これだけの空間を実現しながら気軽にお客さんに来てもらえるようなつくりにできたのは、純粹に「生命の起源やアストロバイオロジーの最先端を知りたい」と願う篤志家の厚意(研究に対する寄付)の賜であることを記しておきたい。

ぜひ皆さん、この「生命の起源やアストロバイオロジー研究のキラキラモール」を楽しんでほしい。

2018年2月 高井 研

# 目次

## 3 はじめに

# 第 1 章

## 10 深海に私たちの はじまりを探して

- 12 深海熱水活動域が  
生命の故郷  
といわれる理由
- 18 インド洋かいいいフィールドで  
初期生命生態系の生き残り  
「ハイパースライム」に出会った
- 21 ハイパースライムが存在する条件  
「ウルトラH<sup>3</sup>リンケージ仮説」の  
最後のピースを埋める
- 26 初期生命を維持できるだけの  
水素はあったのか？  
深海熱水環境を再現して検証
- 31 ハイパースライムは  
かいいいフィールドにしか  
いないのか
- 35 岩石—水—生命の化学相互作用  
を解き暗黒の生態系の  
組成や量を予測可能に
- 40 JAMSTEC モデル——  
生命誕生の場と初期の生命生態系  
の姿にたどり着いた



## 第2章

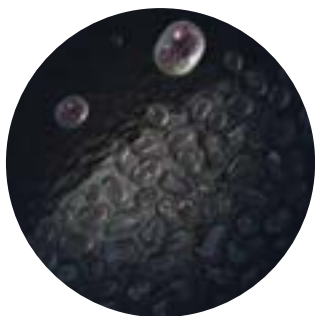
### 44 地球生命は こうして生まれた

- 46 地球生命は、いつ、どこで、  
つくられていったのか
- 54 原始の海で  
生命の材料をつくったのは  
深海熱水噴出孔の発電現象か
- 59 電気化学進化で  
生命の材料はどこまで  
つくれるか
- 63 窒素分子を生命が使える  
かたちにしたのは小天体衝突か？  
その可能性を検証
- 68 高分子からシステム  
そして生命への道筋を  
合成生物学で解く
- 74 地球における生命誕生は  
“必然”である

## 第3章

### 80 宇宙の海に 生命を探す

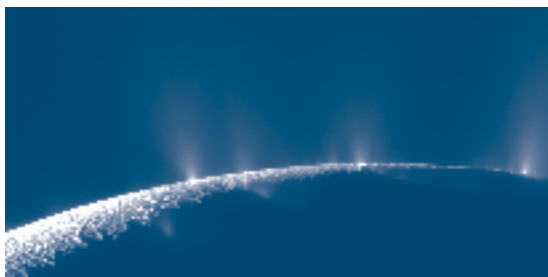
- 82 氷に覆われた土星の衛星  
エンケラドスが  
いま最も注目される理由
- 86 エンケラドスの  
氷の下に広がる海では  
熱水活動が起きている
- 91 日本の技術を結集し  
エンケラドスの海水を地球に  
持ち帰る
- 96 エンケラドスから持ち帰った  
試料を分析する準備が  
JAMSTECで進行中
- 102 広がる生命探査のターゲット  
——エウロパ、ガニメデ、  
タイタン、火星、ケレス……
- 107 地球の海、太陽系の海、  
さらには銀河系の海を  
ターゲットに





## 第4章

- 112 特別座談会  
私たちは宇宙に  
生命を探します  
高井 研 × 矢野 創 × 田村元秀
- 114 天文学、  
太陽系探査科学、微生物学  
——三者三様の研究者の出会い
- 119 日本における  
アストロバイオロジーの系譜
- 122 地球生命誕生のシナリオを  
いかに検証するか
- 124 「ハビタブル」とは
- 129 トラピスト1の  
系外惑星発見に興味津々
- 132 アストロバイオロジーの  
存在意義



136 チャレンジャーコースの  
学術解説編  
生命の起源研究  
7つの論点  
高井 研

- 138 このハードな解説編を  
始める前に
- 148 論点1  
生命の定義
- 152 論点2  
生命の材料となる有機物の起源
- 157 論点3  
地球生命は多系統的起源か  
単系統的起源か
- 165 論点4  
最初に誕生した生命は  
従属栄養か独立栄養か
- 171 論点5  
生命誕生のセントラルドグマ
- 184 論点6  
生命誕生の場
- 192 論点7  
生命存続の可能性
- 198 おわりに
- 199 参考文献

204 編者・取材協力者紹介



Blue Earth 編集委員会

取材・執筆・編集  
有限会社フォトンクリエイト 鈴木志乃

装丁・デザイン・ダイアグラム制作  
株式会社デザインコンビビア

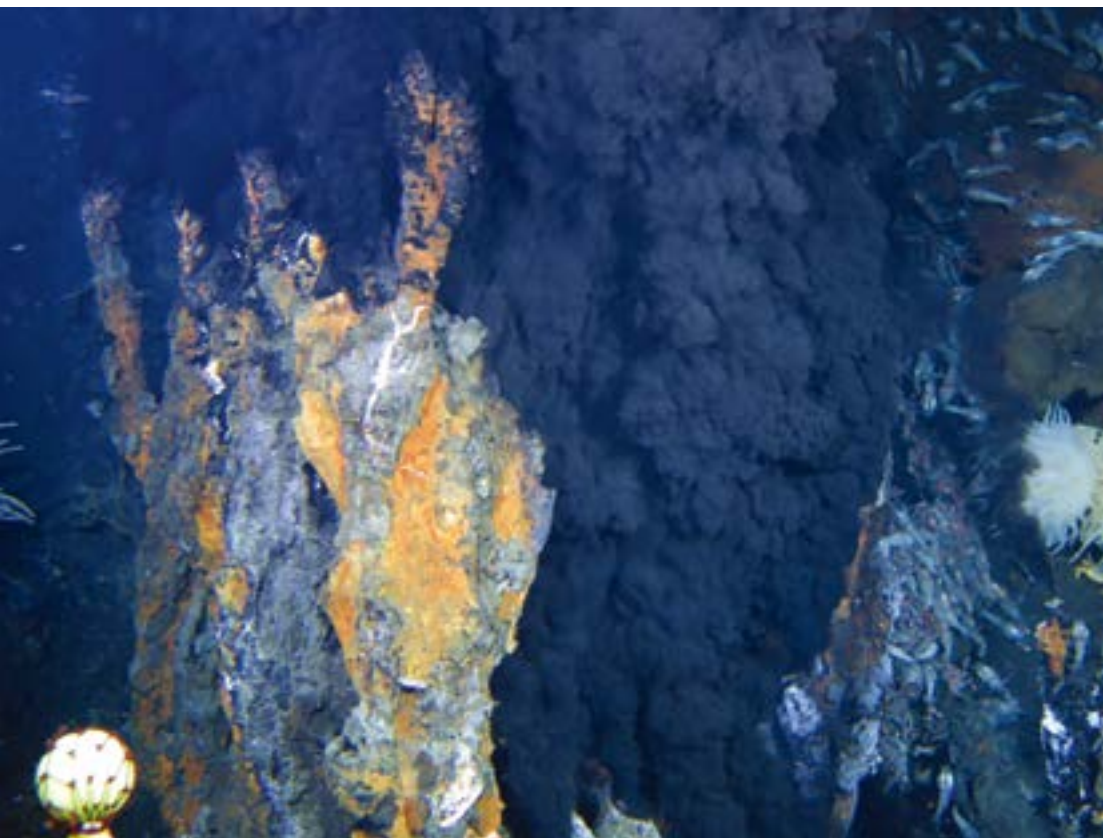
# 第1章

深海に私たちの  
はじまりを探して





# 深海熱水活動域が 生命の故郷 といわれる理由



インド洋かいいいフィールド熱水活動域。水深2,450 m。熱水に鉛や亜鉛、銅、鉄などの硫化物が多く含まれているため、黒く見える。海水で冷やされると金属成分が沈殿し、チムニーと呼ばれる煙突状の堆積物が形成される。周辺にはツノナシオハラエビやイソギンチャクなどが生息している。

©JAMSTEC

2002年、インド洋かきれいフィールドの調査が、海洋研究開発機構(JAMSTEC)の有人潜水調査船「しんかい6500」とその支援母船「よこすか」によって行われた。JAMSTEC分野長の高井研さんは、「このとき私たちは、地球生命のはじまりを探す旅の途中にいました。まるで濃霧のなかをさまようような先の見えない状態でしたが、根拠のない自信と情熱だけがありました」と振り返る。

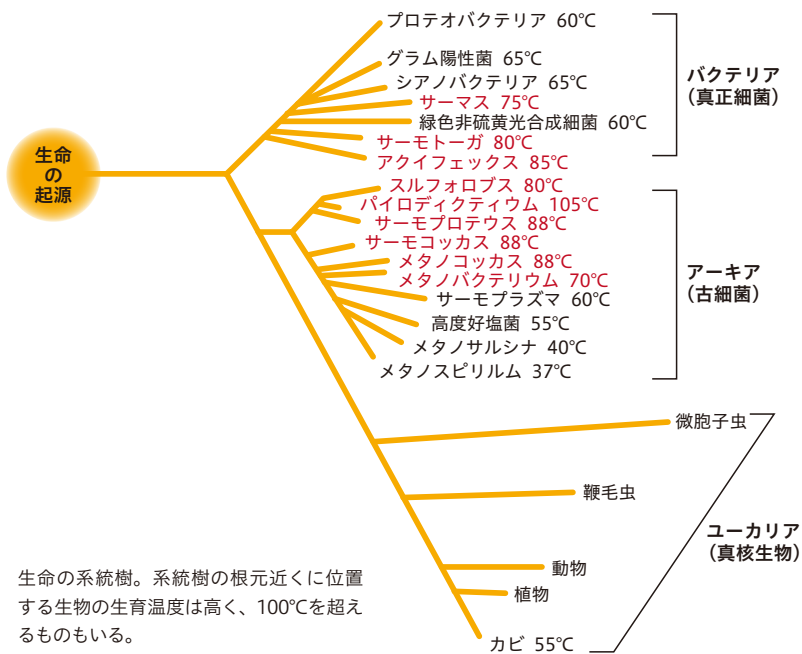
かきれいフィールドは、中央インド洋海嶺と南東インド洋海嶺、南西インド洋海嶺という3つの海嶺がぶつかり合う場所にある。水深は2,450m。2000年、深海調査研究船「かきれい」と無人探査機「かいこう」によって、インド洋で初めて深海熱水活動と熱水に依存した化学合成生物群集が発見されたことから、その名前が付いた。

深海熱水活動とは、深海底から周囲の海水より温度の高い熱水が噴き出している現象をいう。かきれいフィールドでは、360℃を超える熱水が噴出している場所もある。そんな深海の極限環境で、ツノナシオハラエビやイソギンチャク、アルピングイ、ウロコフネタマガイなどが熱水噴出孔の周辺を覆い尽くすほど、たくさん生息していた。それらの生物たちを支えているのは、太陽光エネルギーではなく、熱水に含まれる硫化水素やメタン、水素など還元的な無機物を酸化する際に生じる化学エネルギーを利用して、有機物をつくり出す化学合成微生物である。

かきれいフィールドと地球生命のはじまり。その2つが、どう関わるのだろうか。

## 生命とは何か

この地球で、生命は、いつ、どこで、どのように生まれたのか——。私たち人類は、その問いを抱き続けてきた。古くは、アリストテレスが自然発生説を唱えた。2,400年近くも前のことだ。生命の起源や誕生した場については、昔からさまざまな仮説や考えが議論されてきた。地球での自然発生説や宇宙からの飛來說、雷放電や隕石衝突や熱水活



生命の系統樹。系統樹の根元近くに位置する生物の生育温度は高く、100°Cを超えるものもある。

Woese et al.(1990), Yamagishi et al.(1998) を改変

動による有機物生成、宇宙有機物の供給、生命誕生の場として陸上の温泉や深海の熱水、生命誕生における大陸の必要性などなど。生命の起源というのは、それほど人類の興味をひきつけてやまないテーマだといえるだろう。

「生命のはじまりを考えるには、まず“生命とは何か”を知る必要があります」と高井さんは強調する。「生命の定義は、定義するのも難しいですが、受け入れるのもとても難しい問題です。科学者や一般の人々の間でコンセンサスを得るには至っていません。しかし“生命に必要な要素は何か”という問いには明確な答えが出つつあります。必要性の順番として、①エネルギー、②多様な無機元素とそれを溶かす溶媒としての水、そして③有機物です」。

## 私たちにつながる生命のはじまり

私たちが最も知りたいのは、自分たちにつながる生命のはじまりだ。つまり、生命が生まれるだけでなく、生まれた後に生命の連鎖が継続しなければならない。さらに、現実起きた現象、つまり地球に残された化石や生物のゲノム(遺伝子)に刻まれた記録とも整合している必要がある。

「地球生命の起源について現在提唱されているどの説が正しいのか、真実を見つけるのは非常に難しいことです。なぜなら、私たちにつながった生命の誕生と進化は一度きりの現象で、どれだけ可能性が低い奇跡的な現象であっても、その可能性を否定することができないからです。しかし、生命に必要な要素がそろっているか、生命が持続する可能性が高いか、地質や生物の記録と整合性があるか、という観点に基づいて可能性の大小を比較・評価することはできます。そのような観点から総合的に考えた場合、一番有力だと考えられているのが、深海熱水活動域での生命誕生・初期進化説です」と高井さんは語る。

### 深海熱水活動域である根拠1：遺伝子に刻まれた記録

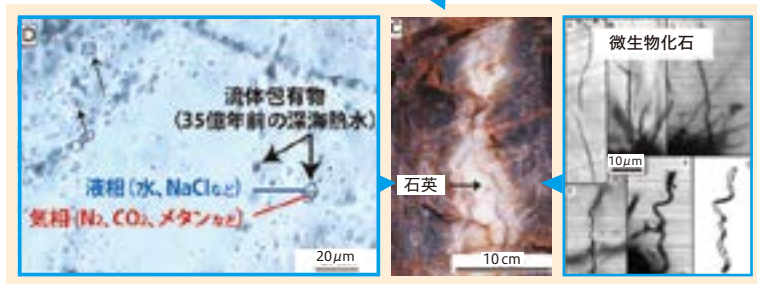
「深海熱水活動域が私たちにつながる生命誕生の場であると考えられる根拠として、2つの記録が挙げられています。1つ目は生物の遺伝子に刻まれた記録。2つ目は古い地質体に残された記録です」。そう語るのはJAMSTEC 研究員の西澤学さんだ。

さまざまな生物の遺伝子解析によって類縁関係や進化の道筋が明らかにされ、系統樹がつくられている。系統樹の根元に近いほど、古い時代に出現した生物で、根元が私たちにつながる最初の生命を表しているとされる。「系統樹の根元近くに位置する生物の生育温度は80～120℃と高温です。そのことから、最初の生命は高温環境で生まれたのではないかと考えられています。高温環境の有力な候補として挙げられているのが、深海熱水活動域なのです」。

現在の深海熱水活動域にも、高温を好む微生物が多く生息している。122℃という生物の生育温度の最高記録を持っている微生物は、インド洋かいいいフィールドの深海熱水活動域で発見された。

## 根拠2：古い地質体に残された記録

「オーストラリアの西オーストラリア州には、35億年前の地質体が



西オーストラリア州のノースポール地域には、35億年前の海洋地殻と海底に堆積したチャートから成る地質体が残されている。海洋地殻に見られる白い岩脈は35億年前の熱水の通り道であり、熱水から析出した石英が埋めている。そのなかには、当時の熱水を閉じ込めた流体包有物が含まれている。また、白い岩脈の周辺に見られる黒い線状のものはメタン菌の化石で、地球最古の生物化石である。

提供：東京工業大学 上野雄一郎

残されています。地球が誕生したのは46億年前なので、誕生から10億年しかたっていないころの地質体です。それが、深海熱水活動域が私たちにつながる生命誕生の場であると考える2つ目の根拠です」と西澤さん。地質体とは、地質学的にひとまとまりと見なせる地層や岩石の集合体のことだ。

35億年前の地質体は、西オーストラリアのノースポール地域にある。当時の海洋地殻の上に堆積層が重なっていて、海洋地殻の部分を見ると、白い岩脈が走っている。それは当時の熱水の通路で、熱水に溶けていたシリカが冷たい海水と混合する過程で石英として沈殿しながら通路を埋めていった跡だ。

「白い岩脈は、35億年前に熱水活動があったことを示す貴重な記録です。さらに、岩脈の周辺には、太さ10 $\mu\text{m}$ ほどの黒い線状のものがいくつも観測されます。それらは炭素でできた物質で、35億年前の微生物の化石であると認定されています。現在発見されているなかで、地球最古の生物化石です」。

西澤さんが東京工業大学の研究グループと共に詳しく調べた結果、化石の微生物は窒素固定を行うメタン菌であると推測された。好熱性のメタン菌は、系統樹では根元近くに位置し、現在の深海熱水活動域にも生息している。

「生物の遺伝子に刻まれた記録と古い地質体に残された記録から、私たちにつながる生命の故郷は深海熱水活動域であると考えられます。だから私たちは、インド洋かいいいフィールドなど世界中の深海熱水活動域の調査へと行くのです」。

# インド洋かいいいフィールドで 初期生命生態系の生き残り 「ハイパースライム」に出会った

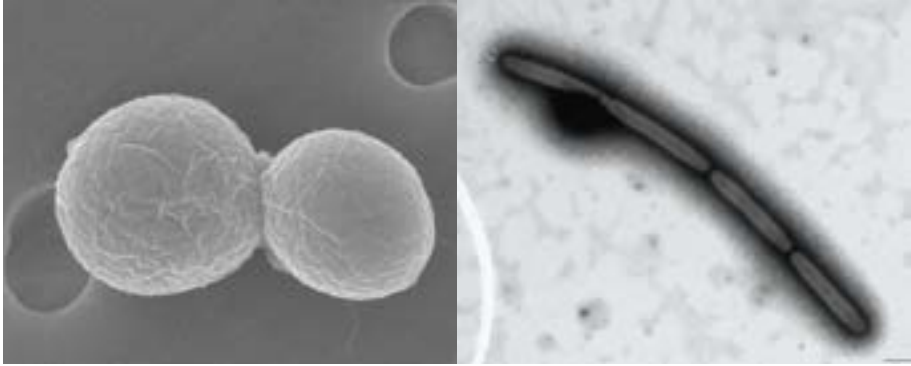
遺伝子に刻まれた記録から、私たちの共通祖先は高温環境で誕生したと考えられる。また、35億年前の深海には熱水環境があり、当時の原始的な微生物が生息していたことが地質体に残された記録から明らかになった。では、深海熱水活動域で誕生した最初の生命とは、どのようなものだったのだろうか。

## ハイパースライムとは

生命が深海熱水活動域で誕生したのならば、初期の生命は高温の熱水に含まれる水素や二酸化炭素などの無機質をエネルギー・栄養源とする超好熱性化学合成独立栄養生命である可能性が高く、しかも持続性を高めるためには単一の生命ではなく超好熱性化学合成独立栄養生命を一次生産者としたさまざまな機能を持った生命群から成る生態系が最初から存在していた方が圧倒的に有利だった、とJAMSTECの高井さんは予想。

そして、現在の深海熱水活動域、特にその海底下環境にもその始原的な生態系の特徴を色濃く残した“生き残り”生態系が存在するに違いないと考えた。そのような生態系を「ハイパースライム」と名付け、最古の持続的生態系がいまなお深海熱水活動域の海底下に生き永らえているとする「ハイパースライム仮説」を提唱した。ハイパースライムは、英語で書くとHyperSLiME。超好熱地殻内化学合成独立栄養微生物生態系を意味する、Hyperthermophilic Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystemの略語である。





©JAMSTEC

ハイパースライムの一次生産者の一種である超好熱メタン菌 *Methanotorris formicicum*(左)と *Methanopyrus kandleri*(右)の電子顕微鏡写真。 *M. kandleri*は、それまでの微生物の最高生育温度を更新し、122°Cで増殖することが確認されている。

ハイパースライムの存在を実証したい。そう思った高井さんたちは、2000年ごろから日本周辺の沖縄トラフや伊豆小笠原弧、パプアニューギニアのマヌス海盆などの深海熱水活動域で、ハイパースライムが存在する証拠を探してきた。しかし、まったく見つからなかった。それが、高井さんがかきれいフィールドの調査を前に感じていた「濃霧のなかをさまようような感覚」の背景だ。

### ハイパースライムは、かきれいフィールドに存在した

そして「しんかい6500」で、かきれいフィールドへ。現場微生物濃縮装置を用いて熱水活動域に生息している微生物を採取し、船上で培養実験を行った。現場微生物濃縮装置とは、ステンレスの筒に軽石を詰めたもので、ハイパースライム採取を目指し、高井さんらが開発した。それを熱水の噴出孔に数日間設置しておく、チムニーの内壁や海底下に生息している微生物が熱水と共に流れ込み、微生物は軽石に付着して濃縮され、効率よく回収できるのだ。現場微生物濃縮装置を回収し、船上で培養実験を始めてわずか数時間後、これまでの結果



インド洋かきれいフィールド熱水活動域。水深2,450m。2013年、「しんかい6500」による潜航調査にて撮影。

©JAMSTEC

を覆すハイパースライムの存在を強く示す証拠が得られた。「思わず踊っちゃいました」と高井さん。

航海終了後の詳細な研究によって、濃縮された微生物は2種類存在しており、超好熱メタン菌が75%、超好熱発酵菌が25%であることが分かった。また、超好熱メタン菌は、熱水中の水素と二酸化炭素を利用してメタンを生成していることも分かった。超好熱発酵菌は、メタン菌がつくり出した有機物を栄養源として利用している。

つまり、かきれいフィールドでは、一次生産者である超好熱メタン菌が75%、消費者である超好熱発酵菌が25%の割合で構成されるハイパースライムが存在し、海底下環境において熱水中の水素と二酸化炭素を利用してエネルギーを得て、広範囲に高密度で生息していることなどが明らかになったのだ。「私たちは、現在の地球に生きる初期生命の生き残りの姿にたどり着いたのです。もちろん世界初です」。この成果は2004年に発表され、大きな注目を集めた。

一方で、かきれいフィールドでのハイパースライム発見は新しい謎をもたらした。