

## 30年後の地球化学

# 宇宙と生命の起源解明と未来の理解に向けて

丸山茂徳\*

(2013年4月18日受付, 2013年6月6日受理)

## Origin of the universe and life, and the future of Science

Shigenori MARUYAMA\*

\* Earth-Life Science Institute Tokyo Institute of Technology  
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan

To understand the origin and evolution of life and to predict the future of life is the ultimate goal of geochemistry that we need to reach. Here, I will show the history of geochemistry and future outlook on the Earth, the universe and Astrobiology.

**Key words:** Origin and evolution of life, Earth history, Habitable trinity, Extraterrestrial life, Astrobiology

### 1. はじめに

19~20世紀前半まで地球科学の中心は地質学と鉱物学だった。戦後、鉱物学は廃れ、地球物理学が中心になってプレートテクトニクスが確立された。その頃から、地球化学が本格的に台頭し、惑星科学が目覚め、同位体地球化学の手法と理論の開発が隕石の理解を大きく発展させて、地球宇宙化学が惑星科学の中心的な位置を占めるようになった。そして、観測天文学の飛躍的発展とともに、宇宙の理解が『起源から未来』までを観測事実に基づいて具体的に議論できる時代になった。

地球化学は、地球物理学の台頭と歩調を合わせて生まれたが、近年の地球物理学の衰退とは逆に、系外惑星の生命探査指標の確立を目指して太陽系惑星探査の主演へと進もうとしている。なぜなら、生命棲息環境や過去の生命の痕跡を探す重要な手段であるからだ。

そのような地球化学の30年後の世界を展望してみよう。

### 2. 地球史と地球生命史の理解手段としての地球化学

自然科学の究極のゴールは我々生命の起源と進化、及び未来の理解であろう。地球史は、神秘的な研究レベルだと批判された1970年代以前から大きく飛躍したのは、近代的分析化学技術の確立によるもので、とりわけ、SHRIMPの貢献は大きかった。ジルコンの高精度年代分析が可能になると共に、ほぼ全球規模で造山帯の地質年代が明らかになり、地球には最初期の46~40億年前(冥王代)の記録が残っていないことが明らかになった。しかし、碎屑性ジルコンは44億年前に遡り、惑星形成論と地球史との接点生まれようとしている。

#### 2.1 分析手法：スポット分析と超微量超高精度分析

分析技術の向上は短時間で高精度の分析を可能にし、分析もまた数ミクロンサイズのスポットで行えるようになった。スポット分析はSIMS, LA-ICP-MS, バルクの超高精度分析はTIMSが双璧であるが、これら相互の長所と短所をうまく組み合わせた分析法(マイクロドリルや液中レーザー法など)の開発が進みつつある。SHRIMPは独自の改良を進め、全世界に広がり、中国を中心に膨大なデータが蓄積されつつ

\* 東京工業大学地球生命研究所  
〒152-8551 東京都目黒区大岡山2-12-1

ある。

## 2.2 分析技術の発展と成果中心主義がもたらす論文の粗製濫造時代

分析技術の発展とともに単純に地球史や生命史の詳細な理解が飛躍的に進むかという点、単純には進まないだろう。それは、分析技術の発展が、短時間で大量のデータの生産を可能にしたことによって、また、成果中心主義がもたらした弊害によって、質の悪い論文が大量に生産される時代になったからで、それは今後にも更に加速するだろう。

論文化までに最も時間がかかり、最も効率の悪い研究分野が野外地質学である。野外地質学は、20世紀の後半に飛躍的な進歩があった。それが付加体地質学と呼ばれるもので、それまでの地層累重の法則とは真逆の原理で説明される。新しい付加体は、ほぼ水平な断層を介して、下位ほど若くなる。更に、付加された海洋プレート起源物質を本来の層序（海洋プレート層序）に復元すると、付加体物質が、深海堆積物の特定の他に、中央海嶺玄武岩、ホットスポット火山岩、更に島弧火成岩を区別できる。それらの同定によって、固体地球の組成と温度の歴史40億年、生命史や宇宙史の解読が可能になる。

圧倒的に時間と経費がかかる付加体地質学の研究に比べて、既存の地質図に基づく安易な地球化学研究から推測された地球史・生命史・環境史は、21世紀になって、あらゆる雑誌に氾濫しつつある。そしてこれは、カオスの時代の根本的な原因になっている。

## 3. 展望と成果

### 3.1 地球・生命史研究

生命と地球の歴史46億年研究は、上記の付加体地質学に基づく試料の選別ができて、厳選された試料の地球化学研究が進めば大きな成果が期待される。深海堆積物の系統的収集と宇宙化学研究は宇宙史研究に全く新しい局面を切り開くだろう。横軸46億年研究（1億年間隔で、40個の試料の解析によってマンツルの温度、海洋の組成など約100項目を縦軸にとる）と特異点研究（地球史・生命史が急激に変化した時代の研究）によって大きな成果が生まれるだろう。

### 3.2 冥王代研究：生命の起源

「生命の起源」については近年、冥王代に遡ると考えられるようになり、冥王代の地球表層環境の復元を地球に残されたジルコン（44億年前）の中の鉱物や流体包有物、更に、月の地質、隕石の宇宙地球化学か

ら推測されようとしている。これらを、ミラー（Miller, 1953）以来繰り返してなされてきた生命実験と組み合わせ、鍵となる触媒の組み合わせの工夫によって、30年後までに大きな進歩があるだろう。しかし、生命の起源の研究における最後の難関は、RNA世界からDNA世界への壁で、階段に例えれば、RNAまでは10段で、そこから生命誕生まで1000段あるだろう。

## 4. 新時代：惑星探査のための地球宇宙化学

### 4.1 惑星形成論は戦国時代

我々日本人研究者にとって身近な京都モデルは、殆ど微塵もなく砕け散ってしまった感がある。例えば、京都モデルでは、原始惑星星雲のダストは太陽から遠ざかるように外側へ向かって消失し、惑星は誕生後から現在まで太陽からの距離は不変だと考えた。しかし最近の惑星形成論では、惑星は誕生後その位置を中心星（太陽）側へ移し、いくつかの惑星は中心星に落下したと考えるのが普通である。ところが、場合によっては木星は太陽から遠ざかった時期があったとするモデルまで提案されている。また、太陽とほぼ同じサイズ、ほぼ同じ年齢を持つ恒星の大気組成が、これまでの教科書とは異なり、実に多様であることが判明しつつある。系外惑星の観測から生まれたこれらの観察事実や考えは惑星形成論に革命的な変化を導くに違いない。

### 4.2 太陽系惑星探査は何を目指すか？

日本はアメリカと並んで南極隕石の収集数の大国である。その中には火星起源、月起源隕石が含まれ、小惑星帯の隕石母天体だけでなく、太陽系の起源や進化を議論するうえで膨大な情報の宝庫であり、これらの分析・解析による貢献は非常に大きい。また、観測天文学による雪線の観測や、窒素化合物のアイソグラッドなど揮発性元素の広域分布観測（地球型惑星からカイパーベルト、彗星まで）、惑星探査計画によるミニ太陽系（木星や土星の諸衛星）の揮発性元素の広域分布、太陽系諸惑星の46億年史とサンプルリターンによる物質科学研究は、太陽系の起源と歴史解明の個性の研究だけでなく、その中から導きだされる普遍性ととも、生命を持つ系外惑星探査の指標作りに大きな貢献をするだろう。

## 5. 系外惑星探索の為の地球史・生命史の役割

### 5.1 生命とは何か

生命の本質は『有機ラジカル反応』である。例えば、受精卵が37°Cで長時間おかれるとひよこになるが、高温すぎると半熟卵になってしまい化学反応は停止する。低温すぎても反応は進まず、適温である限りにおいて生命は有機ラジカル反応として永遠に継続する。しかし、ケイ酸塩鉱物の世界には、このような奇妙な反応は存在しない。周期律表で炭素と同族に属するケイ素を中心とする生命が存在する訳がない。生命がC, H, O, Nを主成分とした有機体というのは宇宙生命共通の普遍性だが、副成分である、P, K, Ca, Fe, Mg, S, Mg, Mn, Znなどの濃度や、それらを利用した代謝の反応などには、自由度が生まれる。更に進化を支配した表層環境変動もまた大きな自由度を持つ。

### 5.2 宇宙生命とは何か

「宇宙生命とは何か」を理解するには、情報のほとんどは地球生命の理解にある。そして地球生命の歴史は地球という個性の研究である。

生命の定義は古来、常に議論され続けたテーマである。通常、『膜』、『代謝』、『自己複製』の3者で定義されるが、これでは不十分である。4番目に『有機ラジカル反応』が必要で、更に生命が現象として継続するには、外的条件として栄養塩の連続供給(5番目)がなければならない。生命構成元素は、大気(C, N)、海洋(水)、陸地(岩石成分:P, K, Ca, Fe etc)の三者(Habitable Trinity)から供給されるので、これら全ての元素が混合する物質循環系が必要で、太

陽がこの循環を駆動するエネルギー(電磁波)を供給する。従って、habitable zone(惑星の表層に液体の水が存在する領域)にある系外惑星上に自動的に生物が存在する訳ではない。

### 5.3 生命を持つ系外惑星の探査指標(地球史からの指標提案)

無数の系外惑星候補のなかから、生命を持つ惑星の有効候補の選別を行うには、上記に述べたように、Habitable Trinity(大気、海洋、岩石)と駆動力となる太陽(中心星)が必要だが、そのための制約条件は(1)期海洋質量が深度3~5 kmの範囲であること(栄養塩供給岩石の地表露出の条件)、(2)サイズが地球質量に近い(火星サイズやスーパー地球では不可能)ことである。従って、これらを観測指標とする必要がある。21世紀に入って系外惑星の発見のラッシュが続くが、その中から生命を持つ惑星探査で、30年後までに候補は見つかっているだろうか?

ここでは議論しなかったが、地球史の重要な特異点は銀河宇宙のstarburstと関係している。Starburstの原因は銀河同士の衝突と考えられるが、銀河衝突の数値計算には暗黒物質の存在はこれまで考慮されてこなかった。観測天文学の充実に基づく新たな宇宙論は、地球生命の進化の加速の解明で重大な役割を持つ。今や、生命の起源と進化は、天文学からゲノムまでをカバーする自然科学全体の学際的な課題なのである。

## 文 献

- Miller, S. L. (1953) A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, **117**, 528-529, doi: 10.1126/science.117.3046.528.