

熱水環境と生命の起源

三菱化学生命科学研究所

柳川 弘志

Hydrothermal Environments and Origins of Life

Hiroshi YANAGAWA

Laboratory of Biomolecule Engineering, Mitsubishi Kasei Institute of Life Sciences

1. はじめに

生命はおよそ30数億年前に、原始の海で生まれたと考えられている。生命が誕生したころは、大気中に酸素は存在しなかった。現在の大气中の酸素は植物の光合成によってつくられた。地球上の生物は、酸素からつくられた成層圏のオゾン層によって、太陽からの紫外線や宇宙線の損傷作用から守られている。最初の生命が誕生したころは、オゾン層もなかったのだから、強力な紫外線や宇宙線が地球上にふりそそいでいた。それゆえ陸上では生命は存在しなかった。なぜ生命は海で生まれたと考えられるかという点、それは現在の生物の組成と海の組成が、非常に似ているからである。

現在の生命は、天然に存在する92種の元素のうち、およそ30種の元素を用いてつくられている。人体、海水、地球表層(気圏、水圏、地殻)における元素の存在についてみると、人体に最も多く存在する4元素は、水素、酸素、窒素、炭素である(表1)。含量の多いほうから10位までの範囲内で、海水にふくまれているが人体にふくまれていない元素は、マグネシウムだけである。しかし、11位に入っている。反対に10位までで人体にふくまれているが、海水にふくまれていない元素はリンである。人体の6位のリンの代わりに、11位のマグネシウムを入れ換えれば、人体と海水の元素の種類はおなじになる。このように人体の多量元素と海水の多量元素との間には、明確な相関関係がみられる。しかし、人体の多量元素と地球表層のそれと比較しても、相関関係はみられない。すなわち、地球表層中に多いケイ素やアルミニウムは、人体の多量元素の範囲内には全くはいっていない。

このような事実と、約4億年以前の生物は、ほとんど海棲生物であったとする古生物学的事実から、生命は海で誕生したといわれている。現在の海水の組成は世界中どこでもほとんどおなじ

表1 人体、海水、地球表層に存在する主要元素

含量順位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(11)
人 体	H	O	C	N	Ca	P	S	Na	K	Cl	(Mg)
海 水	H	O	Cl	Na	Mg	S	Ca	K	C	N	
地球表層	O	Si	H	Al	Na	Ca	Fe	Mg	K	Ti	

である。これは岩石からとけだしてくる化学成分が難溶性の塩を形成し、全部そのまま沈澱してしまい、海水から除かれてしまうことによる。

では最初の生命は、原始の海のどのようなところで生まれたのであろうか。海水が入ってきては、干上がるような干潟のようなところ、100℃位までの温かい海のなか、最近注目されている350℃の熱水を噴き上げている海底の熱水噴出孔の付近、などのいろいろな海の環境が想像される。

ここでは生命の起源の場としての熱水噴出孔について考えてみたい。

2. 熱水噴出孔環境

1970年代末、ガラパゴス拡大軸(海洋底が拡大しつつある場所)や、東太平洋中央海嶺などの深海底で高温の熱水が噴き出している場所が発見され、地球物理学、海洋化学、資源科学、生態学などの観点から関心を集めている。その後、この海底熱水噴出孔は世界各地で見つっている。熱水は冷海水が地殻の裂け目から入り込んで、マグマ(マンツルの部分融解によって生じた溶融岩石)と接触して暖められ噴き出してきたものであり、350℃もの超高温である。もとの冷海水は塩分を多くふくむが、金属成分は少なく、弱アルカリ性(pH 7.5-8.0)である。海底の地殻の裂け目からしみ込んだ冷海水がマグマで加熱されると、比重が小さくなり上昇する。この暖められた海水が上昇してくるとき、周囲の玄武岩と反応する。熱水中のマグネシウムイオンは玄武岩中のケイ酸と結合して、水に不溶性の塩を形成する。水の水酸イオンだけが反応し、水素イオンは溶液中に残るので熱水は強い酸性になる。熱水中の硫酸イオンは玄武岩中の二価の鉄イオンによって還元され、硫化水素になる。このようにして生成した酸性度の強い熱水は、海洋地殻の岩石中の金属塩を水素イオンの作用によってどんどんとかし出していく。熱水中の金属イオンは硫化水素と反応し、その上昇する通路の壁や噴出孔付近に硫化物の形で沈澱し、鉱床を形成する。

海底熱水噴出孔海水中には鉄やマンガンをはじめとして、多くの金属イオンがひじょうにたくさんふくまれている。この点が金属資源開発の面から海底熱水鉱床が注目されている理由である。最近、青森県むつ市の霊場・恐山の温泉沈澱物から世界最高の含有率をもつ金鉱石が見つかり話題となった。この金鉱石は1トンあたり436グラムの金をふくむという。恐山の金鉱床は岩石層の金などが温泉の硫化水素にとけ、熱水とともに地表にでた後堆積する熱水鉱床の一つである。

北緯21度の東太平洋海膨には、チムニーと呼ばれる煙突状の噴出孔が多く分布している。噴出物は鉄や銅やマンガンなどの硫化物の黒い沈澱をふくんでいるので黒煙のようにみえる。それゆえ1979年に噴出孔を最初に発見した研究者たちは、このチムニーをブラックスモーカーと名づけた。地殻の裂け目からしみ込んだ海水は、マグマの熱により急激に600℃に熱せられるが、ただちにそのマグマとの接触面を離れ、冷却される。

3. 熱水噴出孔での化学進化

われわれの住んでいる地球はおよそ46億年前に形成された。そして、その地球という巨大なフラスコのなかで生命は誕生した^{1,2)}。

地球上で生命が生まれるとき、突然生まれたわけではない。簡単な物質から複雑な物質をしいだいに合成しながら、秩序あるシステムを形成し、その機能を高めて、より生物に近いものへと進化していった。地球が形成されて、最初の生命が誕生するまでのおよそ10数億年が化学進化の時代、それ以後は生物進化の時代と呼ばれている。すなわち、化学進化の過程を研究することは、物質の進化の過程を化学的に研究することにはほかならない。

最近、海底の高温の熱水環境下で生命は誕生したのではないかと可能性が注目されるようになってきた³⁾。ガラパゴス諸島付近、東太平洋海膨(深海底の隆起部)、ファン・デ・フカ、カリフォルニア湾内のワイマスベズン、マリアナ、沖縄などの海底の地殻の裂け目から高温の熱水が噴き出していることが見出されている。なかでも、北緯21度の東太平洋海膨の水深2600メートルのところにあるブラックスモーカーと呼ばれる噴出孔は、350℃の超高温の熱水を噴き出している。海底熱水噴出孔は、メタン、硫化水素、水素、アンモニアなどの濃度がまわりの海水に比べて異常に高く、いわゆる還元的な環境である。

海底熱水噴出孔は温度が高く、規模が大きいため化学反応を進めるためのエネルギー源が豊富である。また、鉄やマンガンや亜鉛などの金属イオンの濃度が極めて高いなどの特徴をもっている。このような海底の熱水噴出孔は40億年前の先カンブリア時代の地球上にも存在したと考えられる。その証拠としては、38億年前にできたグリーンランドのイスアの地層で、海底起源の玄武岩のなかに硫化物が堆積しているのが見つかっていることなどがあげられる。地球がドロドロにとけていた状態から固まって地殻ができ、海ができつつある先カンブリア時代には、地殻が柔らかく全地球規模で熱水が噴き出していたと想像できる。

化学進化の過程において、化学反応を進めるためにはエネルギーが必要である。海底熱水噴出孔ではそのエネルギーは高温の熱である。地殻の裂け目からしみ込んだ海水がマグマの熱で急激に熱せられ、ただちにそのマグマとの接触面を離れ冷却される。煙突状の噴出孔をもつスモーカー型では、350℃以上の熱水が4℃の冷海水中に急激に噴き出される。一般に有機分子は高温で合成されやすいが、分解もされやすい。海底熱水噴出孔のシステムでは、噴出孔中の高温状態で合成された有機分子を安全な低温の状態に移すことが可能である。つまり、海底熱水噴出孔は高温から低温へ熱の勾配のついた流動反応炉である(図1)。

現在の生体系における種々の微量元素イオンの重要性は近年とみに注目されてきている。生命の起源における微量元素イオンの役割についても数多くの報告がある。海底熱水噴出孔海水は鉄、マンガン、亜鉛、銅などの濃度が普通の海水の値よりも1000倍以上も高い。それゆえ、これらの金属イオンの熱水中での有機反応への参加は十分に期待できる。

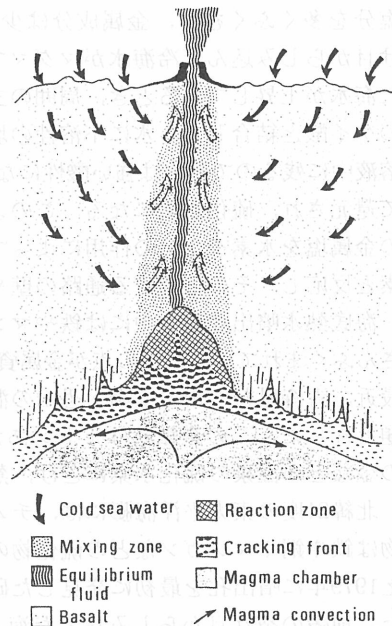


図1 海底熱水噴出孔の断面図

4. 熱水噴出孔でのアミノ酸の生成

アメリカの海洋学者のイングマンソンらは、化学進化過程における海底熱水噴出孔の重要性を早くから指摘していた。かれらは、紅海海底熱水噴出孔海水のアミノ酸を分析し、そのグリシン濃度がまわりの海水のものに比べて10倍ほど高いことを見出した。このように異常にグリシンの濃度が高いことは、海底熱水噴出孔で有機物が無生物的に合成されている可能性を示唆している。

このような高温の海底熱水噴出孔環境下で有機物が無生物的に本当に合成されるであろうか。海底熱水噴出孔環境下での有機物の合成はこれまでしられていなかった。私たちは海底熱水

噴出孔海水とおなじ組成の模擬熱水噴出孔海水をつくり、そのなかでメタンを加圧、加熱し、アミノ酸など生体構成分子が生成するかどうかしらべてみた⁴⁾。模擬熱水噴出孔海水をガラス管に入れ、これを加圧釜に入れて設置した後、メタンを40気圧、窒素を40気圧張り込み、325℃で6時間加熱した。圧力は最終的には200気圧に達する。その結果、グリシンやアラニンなどのタンパク質アミノ酸やβ-アラニンやγ-アミノ酪酸などの生体のタンパク質を構成していないアミノ酸も生成することがわかった(図2)。

5. 熱水環境下でも微小球ができる

次に私たちは、海底熱水噴出孔での化学進化の可能性をさらに検証するために、高温、高圧の熱水環境下で、アミノ酸からペプチドや細胞様構造が形成されるかどうかをしらべてみることにした。

グリシン、アラニン、バリン、アスパラギン酸をふくむ水溶液をガラス管中に入れ、250℃、134気圧で6時間加熱すると、直径1.5~2.5ミクロンの膜構造をもつ微小球が生成することを発見した(図3)⁵⁾。微小球は内部は空洞で、30ナノメートルの厚さの膜構造をもっている。この構造体は300℃あるいは350℃の反応でも形成されるが、形は少し変形してしまう。しかし、200℃ではほとんどできず、ガラス管のかわりにステンレス管中で反応させてもできない。また、グリシンのみ、グリシンとアラニン、グリシンとアラニンとバリンのアミノ酸混合物からは形成されない。アスパラギン酸の代わりにグルタミン酸、リジン、アルギニンのような水によくとける親水性のアミノ酸を加えても微小球体は形成される。塩基性アミノ酸を加えた場合、4~8ミクロンの直径の大きい微小球が生成する。これらの結果から、微小球の生成には、極性アミノ酸、ケイ酸塩、250℃以上の反応温度が、それぞれ必要であることがわかる。そして、種々の解析からこの微小球は、酸分解されにくい、ケイ素化合物をふくむ、分子量約2000のペプチド性の高分子からできていることがわかった。微小球は試験管からとけだしたケイ素で裏打ちされた形で安定している。

アミノ酸がつながってペプチドができる反応は温度に依存することがわかった。たとえば、グリシン、アラニン、バリン、アスパラギン酸の4種のアミノ酸混合物を、100℃や150℃や200℃で6時間反応させると、分子量1000ぐらいのペプチドができる。しかし、100℃ではごくわずか、150℃では少し、200℃ではかなり生成した。しかし、反応温度を250℃に上げると、分子量4000

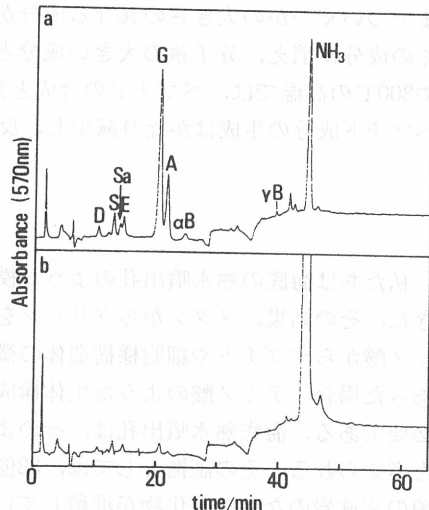


図2 熱水噴出孔環境下でのアミノ酸の生成。aはメタンと窒素を模擬熱水噴出孔海水中、325℃で15時間反応させた生成物のアミノ酸分析結果、bはそのブランク実験のアミノ酸分析結果、Dはアスパラギン酸、Sはセリン、Saはサルコシン、Eはグルタミン酸、Gはグリシン、Aはアラニン、αBは2-アミノ酪酸、γBは4-アミノ酪酸

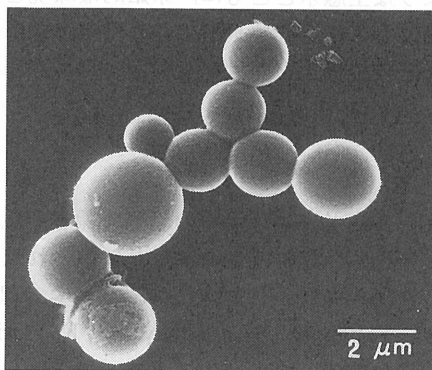


図3 グリシン、アラニン、バリン、アスパラギン酸をふくむ混合液を134気圧、250℃で加圧、加熱すると生成する微小球(ミクロスフィア)

までのいくつかの大きさの異なる成分が形成された。さらに300℃まで反応温度を上げると、多くの成分が消え、分子量の大きい成分と小さい成分の両極端の大きさの成分に分かれた。250℃や300℃の高温では、ペプチドの合成と分解や会合が同時におきているらしい。350℃の反応ではペプチド成分の生成はかなり減少し、反応は分解の方向に傾いていることがわかった。

6. おわりに

私たちは海底の熱水噴出孔のような模擬海洋環境を設定し、そのなかでの化学進化をしらべてきた。その結果、メタンからグリシンをはじめとしていろいろなアミノ酸が生成することや、アミノ酸からペプチドや細胞様構造体の微小球が生成することを知った。原始地球大気が酸化的であった場合、アミノ酸のような生体構成分子を原始大気から効率よくつくるには、還元的な場が必要である。海底熱水噴出孔は、そのような還元的な環境を40億年前ごろから保存してきたものと考えられる。その証拠としては、38億年前にできたグリーンランドのイスアの地層で、海底起源の玄武岩のなかに硫化物が堆積しているのがみつまっている。原始の海洋において熱水活動はいまよりは盛んであったであろうこと、実際の熱水噴出孔は私たちの実験系のように閉鎖系ではなく、解放系であることなどから、実際のアミノ酸などの合成の効率は私たちの実験結果よりもかなり高かったものと思われる。

海底の高温環境では、現在でも熱水噴出孔からメタンや硫化水素や水素などの還元ガスや、マンガンや亜鉛や銅や鉄などの金属イオンが多量に噴出しており、そのまわりにはそれを生体エネルギーとして用いる細菌がたくさん生育している。そしてその細菌を体内に共生させ、共存、共栄しているチューブ状の虫(ハオリムシ)、シロウリガイ、ムラサキガイ、カニ、エビなどが棲息していて、海底熱水噴出孔の一大生態系を形成している。海底熱水噴出孔はこのような生態系とともに、原始的な環境として生命の起源との関連でも大変興味深い場である。今後、さらに海底熱水噴出孔の化学進化における役割の解明が、模擬実験や実際の熱水噴出孔試料などの分析などの様々な角度からなされることが期待されている。

参考文献

- 1) 柳川弘志：『生命の起源を探る』，岩波新書，岩波書店(1989)
- 2) 柳川弘志：『生命はいかに創られたか』，TBSブリタニカ(1991)
- 3) 柳川弘志，小林憲正：地球化学，**22**，96-105 (1988)
- 4) Yanagawa, H., Kobayashi, K.: *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, **22**, 147-159 (1992)
- 5) Yanagawa, H., Kojima, K.: *J. Biochem.*, **97**, 1521-1524 (1985)