

特集「太陽系におけるアストロバイオロジー」

地球とエウロパの海底熱水噴出孔

長沼 毅¹

2011年4月8日受領, 2011年5月6日受理.

(要旨) 海底熱水噴出孔は、天体内部からの放熱場であるとともに水-岩石相互作用の場である。地球における熱水噴出孔は母岩相によって異なる還元的物質を供給することで酸化の海水との境界で多様な酸化還元勾配をつくり、多彩で豊かな生物群集を形成する。一方、木星の氷衛星であり内部海を持つことが強く示唆されているエウロパにおいては、熱水噴出孔は潮汐加熱等の放熱場として氷殻の底を融かす物理的な作用が一義的に重要であり、その水-岩石相互作用からの物質供給が内部海の形成に寄与すると考えられる。ただし、エウロパでは酸化力源の供給は必ずしも潤沢ではなく、むしろ、想定し得る生命活動や生物量に対して制限的であるに違いない。

1. はじめに

熱水噴出孔は、地熱で温められた水が噴出するところである。陸上なら温泉、間欠泉、噴気孔などと称されるところであるが、ここでは海底の熱水噴出孔に焦点を絞ることとする。しばしば“海底温泉”と称される海底熱水噴出孔は海底面から温水～高温熱水が湧出あるいは噴出する場所である。もともとは海底の割れ目から熱水が出るのだが、周囲海水で急冷されて溶存物——しばしば多金属硫化物——が析出・沈殿し、それが積み重なって「チムニー」と呼ばれる煙突状の構造、つまり一種のトラバーチンができることが多い。また、これを巨視的に見ると、現在進行形の金属鉱床形成現場であると捉えることもできる。実際、秋田県北部その他に分布する「黒鉱鉱床」は過去の海底熱水噴出孔であると考えられている。

海底熱水噴出孔は鉱床をつくるほどの「天然の水熱合成」の場であり、高温の「水-岩石相互作用」の場である。水はふんだんにあって絶えず循環している、あるいは、停滞しているところもある。温度、圧力、岩相、溶存物質、ガス成分などに勾配、すなわち不均

一性があるという、いかにも実験的な再現が難しそうな天然のリアクターである。ここでつくられる成分には水素ガスやメタンガス、硫化水素など、ある種の微生物がエネルギー源に用いる還元的成分もある。そして、これらの微生物が生産者となり、地球の他のどの場所よりも高密度な生物群集がつくられている。また、“ある種の微生物”には、全生物の「共通祖先」に近いと推定される微生物も含まれており、海底熱水噴出孔と原始地球環境の類似性と合わせて、熱水噴出孔が「生命の起源」の場であると考えられる根拠にもなっている。

海底熱水噴出孔は、地球以外の天体でも、大量の水と火山活動があれば存在すると考えて無理はない。具体的には、木星の第二衛星エウロパがその第一候補である。もし、エウロパに海底熱水噴出孔があったら、そこにも「エウロパの生命の起源」があって、いまでも豊かな生物群集が維持されているだろうか。本稿では、地球の海底熱水噴出孔に関するここ十年の研究成果のうち生物学的な知見、特に地球生物の強靱さと多芸多才さに関する知見を拡大したものを紹介するとともに、エウロパの海底熱水系モデルに関する研究成果を概観しつつ、エウロパにおける生命存在の可能性を検討する。

1. 広島大学大学院 生物圏科学研究科
takn@hiroshima-u.ac.jp

2. 地球の海底熱水噴出孔

2.1 地質学的・地球化学的な概略

海底熱水噴出孔はマンツルのプレートテクトニクスに起因するホットスポットおよびプレートテクトニクスにおける発散境界(海底拡大系)にみられる。前者はハワイ島の南東海底にあるロイヒ海山の海底熱水噴出孔が好例であり、後者は地球を約5万kmもの長きにわたって取り巻く中央海嶺系および背弧海盆系である。海底拡大系は、東太平洋海膨のように年20 cm以上も移動するような“高速拡大系”から、大西洋中央海嶺やインド洋中央海嶺のように年2 cm以下しか移動しないような“超低速拡大系”まで、移動速度と火山活動の度合いがさまざまである。

研究史的には当然であるが、高速拡大系のほうが火山活動とそれにとまう熱水活動が活発であると考えられ、最初の高温熱水噴出孔は東太平洋海膨で発見された。これまで、地球全体の海底拡大系のまだ一割も調査されていないが、その大半はMORBと略称される中央海嶺玄武岩が主な母岩である高速拡大系で行われてきた。海底温泉という俗称に合わせて表現すれば、湯量が多く湯質はどこも一様な硫化水素泉といえようか。

一方、地球の海底拡大系の約半分を占める低速および超低速拡大系にも、高速拡大系に劣らぬほど高温で活発な熱水噴出孔のあることがわかってきた。しかも、母岩は玄武岩だけでなく、表出したあるいは深部にある塩基性～超塩基性岩という場合もあり、熱水の化学組成に大きな多様性がみられる。特に大西洋中央海嶺の海嶺軸からやや外れたところにある「レインボウ」や「ロストシティ」と称される熱水噴出域では、水-マンツル(超塩基性岩)相互作用、すなわち蛇紋岩化作用による水素発生とそれが惹起する生物学的あるいは非生物学的なメタン生成が活発であり、生物地球化学かつ「生命の起源」論の興味の的となっている[1]。

噴出する熱水はその“端成分”によって主に3タイプに分類される。それは (a)最も多いタイプで、玄武岩のような塩基性岩を母岩としメタン濃度が低い高温熱水タイプ、(b)「レインボウ」のように超塩基性岩の蛇紋岩化作用により水素 H_2 、メタン、溶存鉄などの

濃度が高い高温熱水タイプ、そして、(c)「ロストシティ」のように蛇紋岩化作用の影響を受けつつも低温(90℃以下)であるようなタイプの3つである。「ロストシティ」には世界最高記録55 mのチムニーがあるが、それは一般的な硫化物チムニーではなく、炭酸塩チムニーである。このことは「ロストシティ」の熱水活動が比較的長期にわたって維持されてきたことを示唆している。

2.2 地熱光による光合成

東太平洋海膨の「9°N」(北緯9度)の熱水噴出孔は、研究史の初期、すなわち、もう30年以上も前から重点的に調査されてきたが、まだ驚くべき新発見がなされる“学問のホットスポット”である。ここは太陽光が届かない暗黒の深海底であるにもかかわらず、光合成によってしか生きられない微生物が生息しているのだ[2]。緑色イオウ細菌に分類される光合成細菌(バクテリア)である。緑色イオウ細菌は現代の分類学では「クロロビ門」、中国語で「緑菌門」に分類され、酸素のない嫌気的環境に生息し(有酸素環境に耐えるものもいる)、それ自身も酸素を発生しない非酸素発生型の光合成を行う。ここで酸素発生型の光合成について説明しておく、二酸化炭素 CO_2 を還元してブドウ糖 $C_6H_{12}O_6$ をつくるのに水 H_2O 由来の水素(と電子)を用いるため、その廃棄物として酸素 O_2 が発生する。これに対し、非酸素発生型である緑色イオウ細菌は、硫化水素 H_2S 由来の水素で二酸化炭素を還元するので、廃棄物として単体イオウ(S_0)が細胞外に沈着するか硫酸が生じることになる。

この光合成細菌は水深2391 mの熱水噴出孔の噴き出し口の直近で採取された。これを培養したところ、波長750 nmの赤色光に最大吸収があり、(波長450 nmの青色光で励起すると)波長775 nmの赤色蛍光を発することがわかった。このスペクトル特性や、対応色素の質量分析結果から、この色素はバクテリオクロフィルc(BChl c)であると推定された。仮に370℃の熱水噴出孔があるとして、そこからの750 nmの光フラックスは約 $1 \mu mol$ フォトン $cm^{-2} s^{-1}$ である。噴き出し口付近の332℃の湯だまりから1~2 cmのところでも、もう少し波長幅を広げた600~1000 nmの光フラックスは約 $1 mmol$ フォトン $cm^{-2} s^{-1}$ である。これは緑色イオウ細菌が光合成をしている黒海の水深80

mの光フラックスに相当する[2]. つまり, 熱水噴出孔において, 太陽光の代わりに「地熱光」geothermal lightによる光合成が行われていることの, 初めての証拠が挙げられたのである.

2.3 テルルを使う呼吸

東太平洋には他にも熱水名所があり, そのひとつのファン・デ・フーカ海嶺からも新発見があった. それは呼吸についてである. 生物のエネルギー生成過程は光合成・発酵・呼吸に大別される. 光合成は太陽光や地熱光の利用性に制限される一方, 発酵と呼吸は時と場所を選ばない. しかし, 本質的に「酸化還元をとまなわな分解反応」である発酵に比べて, 「酸化還元反応」である呼吸のほうが大きなエネルギーを得られる. しかも, われわれがブドウ糖などの有機物を酸素で酸化する有酸素呼吸(好気呼吸)だけでなく, 多種多様な無機・有機の還元的物質と(酸素以外の)酸化剤の組み合わせによる無酸素呼吸(嫌気呼吸)が知られている.

実に様々な酸化剤が生物に利用されているが, ここではいったん元素周期表の第16族(酸素族)だけ見ることにすると, 第2周期の酸素はもちろんのこと, 第3周期のイオウと第4周期のセレンまでは, それらの酸化物である硫酸とセレン酸を酸化剤に用いる呼吸(伝統的には硫酸還元, セレン酸還元と呼ばれる)を行う生物が知られている. しかし, 第5周期のテルルについては, 地殻における平均濃度が $1 \mu\text{g kg}^{-1}$ と元素中でも最低レベルなので, 生物的な利用性も低く, この酸化物であるテルル酸を酸化剤に用いる呼吸(テルル酸還元)のことは誰も考えていなかった.

しかし, テルルはイオウ, セレンとともに金属鉱石をつくりやすい「カルコゲン」なので, 熱水鉱床とも呼ばれる海底熱水噴出孔に多いことが予想される. また, テルル酸は硫酸より酸化力が強いので, もしテルル酸が安定供給されれば, テルル酸を用いた呼吸は生物的に可能である. そこで, テルル酸呼吸を行う微生物を探索したところ, ファン・デ・フーカ海嶺の熱水噴出孔から複数の微生物が見つかったのである[3].

これらの微生物はシェワネラ属(シェワネラ属とも)に分類されている. この属の微生物種は地底や深海底によくみられ, また, 多種多様な酸化剤を利用する無酸素呼吸を行うことが知られている. したがって,

シェワネラ属は無酸素呼吸の“百貨店”だと思えば, テルル酸呼吸もその酸化剤のレパートリーがひとつ増えたということで“然もありなん”と思えてくる. ただし, ファン・デ・フーカ海嶺で採れたシェワネラ属菌は, ひとつの種類でテルル酸, セレン酸, バナジウム酸を酸化剤にするほど多芸多才であった. これは, 今後の熱水微生物の探査だけでなく, 地球外生命の探査においても, 生命存在の可能性とその探査対象を拡大する根拠となる.

ちなみに, 日本は世界第3位のテルル生産国である. また, 地球の地殻はテルルに欠乏している. これはテルルの水素化物(テルル化水素 TeH_2)が気化しやすいので大気から宇宙空間に散逸してしまったためと考えられている. 逆に言うと, テルルの元素存在度は地殻(クラーク数)より宇宙のほうが大きいので, アストロバイオロジーのひとつの観点になる.

2.4 超臨界水の噴出

噴出する高温熱水はしばしば 300°C を超える. では, もっと高温の熱水は出てこないのかという疑問は以前からあった. もちろん, 水深 3000 m より深ければ, 純水の臨界点($218 \text{ 気圧}, 374^\circ\text{C}$)どころか, 海水の臨界点($302 \text{ 気圧}, 407^\circ\text{C}$)を超えた圧力-温度条件があり得るので, ただの超臨界水だけでなく, 超臨界海水あるいは超臨界熱水が出てきてもおかしくないのだが, その海底下での存在を示唆するデータはあっても, それを実際に確認した例はなかった. しかし, 2008年, ついにそれを明示するデータが発表された[4].

それは高速拡大系の熱水噴出孔で発見されると信じられていた. 実際, “海底下での存在を示唆するデータ”も東太平洋海嶺やファン・デ・フーカ海嶺で取られていたが, その海底面は水深 3000 m より浅いので, その圧力では重臨界になってしまい, 超臨界の熱水は見られない. 高速拡大系は活発であるがゆえに拡大軸が高く盛り上がり, 水深が浅くなってしまっている. 一方, 活発でないがゆえに水深が深い低速拡大系は熱水活動も活発でない, というのは誤謬であった. 超臨界熱水の決定的なデータが得られたのは大西洋中央海嶺の「 5°S 」(南緯 5°), 水深 3000 m をやや超える複数の熱水噴出孔だった. ここで最高 464°C という水温が記録されたのだ. 最初は研究者たち自身も信じられず, 翌年に再計測しての記録なので信憑性はある.

この発見は、単に最高水温記録を出したというだけでなく、2年にわたる再計測を経た、つまり、このような超高温の熱水活動が低速拡大系において少なくとも2年間は維持されることを明らかにした点でも意義がある。この「低速拡大系≠低活動系」という認識は、この分野の専門家は驚きもしないだろうが、そうでない研究者には「低速拡大系≠低活動系」という認識をアストロバイオロジーの観点に加えてもよいだろう。

2.5 水-コマチアイト反応

海洋研究開発機構(JAMSTEC)の高井らは、インド洋中央海嶺の「かいいいフィールド」の熱水噴出孔(水深2450m, 温度360℃)から超好熱性のメタン生成菌(アーキア)であるメタノピュルス・カンドレリ(*Methanopyrus kandleri*)を採取し、同種の既存株と区別するために“116”と名付けた。常圧下で116℃まで生育するから“116”である。驚いたことにこの“116”株は、200～400気圧で生育温度が122℃まで上がった[5]。これは生物界における生育温度の最高記録であり、2011年3月末の時点でもまだ破られていない。

大西洋中央海嶺の「レインボウ」と同様、インド洋中央海嶺の「かいいいフィールド」もまたマントル物質たる超塩基性岩を母岩とする高温熱水系、すなわち蛇紋岩化作用によって駆動する高温熱水系である[1]。現世の海底では、超塩基性岩が海底面に露出することは少ない。しかし、「生命の起源」の頃は、コマチアイトという「原始地球の超塩基性岩」が地殻を構成していたと考えられている[6]。いや、地殻なしのマントル露出系というほうが近いかもしれない。「かいいいフィールド」はその頃の条件、まさに“雰囲気”をいまに伝える場所であり、そこから「生命の起源」に近いと想像される超好熱性のメタン生成菌を採取したことは意義深い。

さらにJAMSTECの吉崎もと子らは擬似コマチアイトを合成し、蛇紋岩化作用を模した反応で水素ができることを確認した[7]。これまで「生命の起源」のうち、化学進化に関する研究では実験は当たり前であった。ところが、化学進化から生命誕生への(まだ不可知の大飛躍後の「初期生命」の研究となると、ゲノム解析による情報論的な研究と、観測・採集・擬似現場培養などにもとづく現場型の研究が主流であった。そこに、ようやく理論にもとづく実験的手法が導入さ

れたことの意義は大きい。そして、コマチアイトは地球外の天体にこそ、いまでも存在すると考えられている[6]。今後のアストロバイオロジーの焦点のひとつになるであろう。

2.6 世界最深の小さな熱水系

総延長5万kmの海底拡大系の中でもカリブ海にあるミッド・ケイマン・ライズは他と隔離されている(ミッド・ケイマン・ライズは「ケイマン中央海膨」と訳してよいかもしれないが、ここではそのまま表記する)。ミッド・ケイマン・ライズは110 km程度の小さな、しかし、最大水深6500 mと深い、そして、年2 cm以下という超低速拡大系である。ここには水深約5000 m、世界最深の熱水噴出孔“ピカール”もある。

こんな深いところに潜れる有人潜水船はそうそうない。しかし、噴出した熱水が(その高温ゆえにもつ浮力のため)広がりながら数百mも上昇する、あたかも噴煙のようなもの——ブルームという——を検出し、その化学成分を精査することはできる。よく練られた採水調査なら、熱水ブルームの噴出地点を絞ることもできる。このような熱水ブルームの調査により、小さなミッド・ケイマン・ライズに2.1で述べた3つの熱水タイプのすべての兆候——熱水由来の化学成分——が確認された[8]。このうち特に、大西洋中央海嶺の「ロストシティ」に似た「蛇紋岩化作用で駆動する低温熱水系」の兆候が、この小さな拡大系に見つかったのは想定範囲内とはいえ幸運なことであった。

こんな小さな拡大軸にこれほど多彩な熱水系があるとは！もし、兆候だけでなく、実際に熱水活動が目視等で確認されたら、地球の熱水系に関するわれわれの認識を改めなくてはならなくなる。それは、かつて「低速拡大≠低活動」との認識を植え付け直したように、いま新たに、「小さい拡大軸≠単純な熱水系」との認識を迫ることになる。しかも、“ピカール”のような大深度の熱水活動域には、いままで知られていなかったような高温高压下での熱水化学があるかもしれない。ただし、「ロストシティ」的な兆候のみられた熱水活動域は水深2500 m以浅の“ふつう”の深さである。ここからは、伊豆-小笠原弧の水曜海山という海底火山の熱水噴出孔で検出されたイオウ酸化性のスルフリモナス属(*Sulfurimonas*属)の微生物遺伝子(16S rRNA 遺伝子の配列でFaswB53と名付けられたもの)とまっ

たく同じものが検出された。この微生物は約300万年前にパナマ地峡が陸化する前に移動していたのだろうか、その生物地理に興味を湧く。ちなみに、この熱水活動域は“エウロパ”と名付けられている。

3. エウロパの海底熱水噴出孔

3.1 ガリレオ衛星の潮汐加熱

核反応という内部熱源を持たない天体にとって、天体形成時の集積熱、放射性元素の崩壊熱、そして、潮汐加熱が主な内部熱源である。このうち、潮汐加熱は木星の四大衛星、いわゆるガリレオ衛星で顕著である。四大衛星とは当を得た表現で、大きさを言えば太陽系の衛星で1位(ガニメデ)、3位(カリスト)、4位(イオ)、6位(エウロパ)を占めている。ちなみに、2位は土星の衛星タイタン、5位は地球の月である。また、太陽系最小の惑星である水星の大きさはタイタンとカリストの間である。

ガリレオ衛星は、いちばん外側のカリストを除く3つの衛星——内側からイオ、エウロパ、ガニメデ——の公転周期が1:2:4の関係になる「ラプラス共鳴」という軌道状態になっている。外を回るガニメデが1周する間に、エウロパは2周、イオは4周するという関係である。これによって、これらの衛星は互いに引き合い、その軌道が円からずれていく。この“ずれ”が潮汐加熱の原因となる。

氷衛星の起源と進化に詳しい木村淳氏は軌道の“ずれ”による潮汐加熱を「母惑星が衛星に及ぼす潮汐力が時々刻々と変化することで、衛星が周期的に揉まれて加熱される作用」と表現する[9]。この潮汐加熱の内部熱源としての重要性がガリレオ衛星系で際立っている。

3.2 エウロパの内部海

潮汐加熱に起因する地質学的な活動、具体的には火成活動は内側の衛星ほど強い。そのためか、ガリレオ衛星は本来的に質量の半分程度が水成分(氷あるいは液体の水)であるところ、いちばん内側のイオは激しい火山活動のため、水のほとんどが衛星外に散逸し、エウロパも同様の影響により水成分は質量の1割足らずにとどまると推定される。それでも、その推定量(3

$\times 10^{21}$ kg)は地球の海水量(1.3×10^{21} kg)の2倍以上である(表1)。

エウロパの水成分は厚さ約100 kmで天体の表面を覆い、その下にケイ酸塩岩石のマントル、さらに内側の中心部に金属鉄のコアがあると考えられている[10]。エウロパの平均表面温度は -170°C なので、水成分は氷である。しかし、潮汐加熱によりケイ酸塩岩石のマントルに火成活動が生じ、その熱で氷底が融けてできた液体の水の部分、すなわち、表面を覆う氷と岩石マントルに挟まれた「内部海」があると考えられている。さらに、潮汐加熱がなければ氷地殻は冷却して成長する(つまり内部海が薄化する)はずのところ、潮汐加熱が氷地殻にも作用してその成長を抑えるので、内部海が維持されている。

木星とその衛星系の起源と進化を探るための国際共同ミッション「ラプラス」LAPLACEの計画論文では衛星の内部構造について、(a)全層が氷、(b)表層と底層が氷で中層が海、(c)表層のみ氷でその下は海、という3つの可能性が検討されており、エウロパにおいては(c)の可能性がもっとも高いと評価されている[11]。なお、LAPLACEは現在では欧州宇宙機関(ESA)とNASAが協同体制を組んだ「Europa Jupiter System Mission」(EJSM)へと発展している。

一方、より大きな衛星であるガニメデやカリストでは底層で高圧氷(たとえば3.5で述べる氷II)ができるので(b)の可能性が高いと予想されている。この場合、岩石マントルと内部海の間には熱の移動があるだけで、物質の移動はほとんどないことになり、生命存在の可能性については悲観的なセッティングとなる。

もちろんエウロパにおいても、潮汐加熱というか「ダンプ効果」は岩石と氷の間の摩擦熱として散逸してしまい、必ずしも内部海ができないことも想定されている。では、上記(c)のような「岩石マントルと内部海が接するケース」はどのような観測結果から支持されるのだろうか。まず、重要な前提条件として、木星磁場が自転とともに回転し、かつ磁場軸が自転軸から傾いていることがある。この条件の下で、エウロパに液体の電解質流体、たとえば塩を含む海水があると、木星の強力な磁場内を移動するにつれ誘導電流が生じ、それが副次的にエウロパの磁場をつくる。ただし、それは木星磁場に対して直交し、磁極はエウロパの赤道付近にくることになる。しかも、木星磁場の変動にと

もなっており、エウロパ磁極の向きも反転する[12].

これらのことがガリレオ探査機によって実測されたことは、エウロパに海水があることを強く支持する。しかも、表面が氷であることは明らかなので、内部海である。

次に、エウロパ表面の暗く見える部分の反射スペクトルを精査したところ、マグネシウムやナトリウムの硫酸塩など、水の氷以外の不純物が混ざっていることがわかった[13]。それらの分布状況はリッジという亀裂地形に沿っていて、いかにも氷の割れ目から液体の水が噴き出した“スプラッシュ”を反映しているかのようである。この水に塩類が含まれているということは、岩石から海水への塩類成分が溶け出したことを強く示唆するので、やはり上記(c)のケースが支持される。

3.3 エウロパの表面地形と熱水プルーム

エウロパ表面の暗部はリッジという亀裂地形だけでなく、いったん破碎されたようにみえるカオスという地形にも存在する。おそらく、この部分の氷がいったん融けたか、下のやや温かくて対流した水の上昇域に相当する地形と考えられている。いずれにせよ氷を融かすか温める原因が必要であり、そのひとつとして海底熱水噴出孔からのプルームの影響が想像されてきた。

たとえば、代表的なカオス地形である約100 km大のコナマラ・カオスをつくるには 10^{21} Jの熱量が必要で、局所的な 10^{11} Wのプルーム熱流量が1000年(3×10^{10} 秒)持続すればその熱量を供給できるという試算がある[14].

これに対し、約100 km大の面積(10^{10} m²)に 10^{11} Wの熱流量だと面積当たりにして10 W m²にしかならず、この程度のプルーム熱流量では氷層を融かせない。うえ、実際の熱水プルームはもっと小規模で動きも遅いという反論がある[15]。さらに、エウロパの表面重力は地球の約13%と小さいので十分な熱水プルームをつくるだけの浮力が生じない、そのため、エウロパの表面地形に熱水活動が影響を及ぼすとしたら、きわめて局所的に密集した熱水活動と熱水プルームを想定しなければならないという意見もある[16].

なお、地球の熱水活動と熱水活動が想定されるエウロパに関するパラメータを必ずしも網羅的ではないが、イオならびに土星の氷衛星であるエンケラドゥスと比較して、表1に示しておく。

3.4 エウロパの蛇紋岩化作用

火山活動が確認されている衛星イオには超塩基性岩コマチアイトの存在が示唆されている[6]。ならば、

表1：地球とエウロパとイオの天体諸元および熱水活動の比較(文献[14][16][17]に加筆)

パラメータ	地球	エウロパ	イオ	エンケラドゥス
質量(kg)	6×10^{24}	4.8×10^{22}	8.9×10^{22}	1.1×10^{20}
全球平均密度(g cm ⁻³)	5.5	3.0	3.5	1.6
表面重力(G)	1	0.13	0.18	0.01
半径(km)	6.4×10^3	1.6×10^3	1.8×10^3	2.5×10^2
表面積(km ²)	5.1×10^8	3.1×10^7	4.2×10^7	8.0×10^5
海／氷の厚さ(km)	4	100	—	80
海／氷の体積(km ³)	1.3×10^9	2.8×10^9	—	6.4×10^7
地殻熱流量(W m ⁻²)	0.06	0.1	3	0.006
全球的な熱流量(W)	3×10^{13}	3×10^{12}	1×10^{14}	5×10^9
うち放射性崩壊熱(W)	3×10^{13}	2×10^{11}	3×10^{11}	3×10^8
うち潮汐加熱(W)	ほとんどない	3×10^{12}	10^{14}	5×10^9
うち蛇紋岩化作用(W)	3×10^9	1×10^8	—	2×10^7
蛇紋岩化の深さ(km)	6	25	—	172
全球的な熱水熱流量(W)	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{12}$	—	—
350℃前後の高温熱水の熱流量(W)	$\sim 10^{11}$	$\sim 10^{11} - 10^{12}$	—	—
個々の熱水系の熱流量(W)	$\sim 10^8 - 10^9$	$\sim 10^7 - 10^8$	—	—
高温熱水系の数	$\sim 300 - 3000$ (海底拡大系)	$\sim 5000 - 250,000$ (全球分布を仮定)	—	—
熱水性マス・フラックス(kg s ⁻¹)	$\sim 2.5 \times 10^8$	$\sim 10^7$	—	—
海水／氷の回転時間(年)	$\sim 2.5 \times 10^5$	$\sim 10^7$	—	—

エウロパにもコマチアイトあるいはそれに類した超塩基性岩を想定してもよいし、さらに、超塩基性岩と水との相互作用、いわゆる蛇紋岩化作用を想定することができる[17]。蛇紋岩化作用では熱の発生とともに、遷移金属その他の物質が水に供給されることが重要である。特に蛇紋岩化作用で発生する水素 H_2 は生命活動のエネルギー源として生物に利用し得るので、アストロバイオロジーの観点から重要な化学過程である。

エウロパにおいて蛇紋岩化作用により発生する熱流量は、潮汐加熱や放射性崩壊熱に比べて微々たるものである。しかし、蛇紋岩化作用の起こる深さは、地球で想定される6 kmより深く、エウロパでは25 kmと推定されている[17]。つまり、エウロパにおける熱水循環は地球のそれよりも鉛直方向に広がっており、海底面や海水中だけでなく、いわゆる深部地下生物圏が存在する可能性を示唆している。

なお、表1には、土星の水衛星エンケラドゥスにおいて蛇紋岩化作用による発熱が比較的重要であること、そして、蛇紋岩化作用の起こる深さ、すなわち地下生物圏の広がり地球やエウロパより大きい可能性が示されている。

3.5 エウロパの海水化学と氷物性

もし、エウロパの海水がマントル岩石と直に接触し熱水循環があるとしたら、海水中に様々な塩類がイオンとして(溶質として)溶けだすだろう。これらの溶質、たとえば Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} などは海水の密度を重くして沈みやすくするとともに、氷の融点を下げる、つまり、融けやすく凍りにくくする作用がある[18]。このことは、元に戻って、海水とマントル岩石が直に接触する可能性を高めるという意味において、正のフィードバック効果をもたらすといえる。逆に言うと、もし、海水の密度が軽くなり、かつ、底層で凍った場合、海底に氷がたまって海水と岩石との接触が妨げられることになり、海水化学の“進化”が停滞するとともに、生命活動の維持も困難になると考えられる。

氷について、エウロパの氷と内部海の厚さは100 kmと考えられており、その深度で想定される約130 MPaの圧力では“氷Ih”という密度 0.93 g cm^{-3} の“ふつうの氷”で水に浮く(ただし、本来なら“水に浮く氷”はふつうでなく異常である)。したがって、エウロパについてはこれ以上、述べることはない。ところが、エ

ウロパより大きな氷衛星、たとえばガニメデだと氷/海の厚さが500 km、そこでの圧力は300 MPaに達し、密度 1.18 g cm^{-3} の“氷II”や密度 1.16 g cm^{-3} の“氷III”ができる可能性がある。これらの氷はふつうの固体らしく液体の水に沈む。したがって、ガニメデでは海水と岩石が直に接触する機会は限られ、海水化学や生命系の“進化”も限定的だろうと予想される。

3.6 エウロパの酸化力源

地球における熱水噴出孔は「還元力の供給源」という点に生命論的、具体的にはエネルギー代謝論的な意義がある。地球の表層が過去20億年以上にわたって酸化しており続け、有酸素呼吸をするわれわれ自身もそれを当たり前のように思っているから、水素や硫化水素やメタンなどの還元的物質を吐き出す熱水噴出孔に“オアシス”、すなわち酸化還元勾配を生み出すエネルギー代謝の泉のような魅力を感じるのである。しかし、エウロパではむしろ酸化力の供給に乏しいので、熱水噴出孔は必ずしも“オアシス”のような生命の泉ではないかもしれない。

この宇宙における主な酸化力源は水 H_2O に紫外線や放射線が照射して生じた酸素 O_2 や過酸化水素 H_2O_2 などである。エウロパにおいては表面を覆う氷に宇宙線(主に電子線)があたるケースが想定される。実際、エウロパの希薄な 10^{12} 気圧の大気は O_2 からなり、エウロパの氷には水に対するモル比で0.13%ほど過酸化水素が存在する。対流する氷の表面滞留時間を1000万年とすると、その間の宇宙線照射(エウロパ表面で $8 \times 10^{13} \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)により表面から1.3 mまでの氷成分のほとんどが H_2O_2 と O_2 になり、それが対流によってエウロパの内部海に送られるという試算がある[19]。これがエウロパの主な酸化力源になると考えられるし、逆にいえば、これがエウロパの生命活動や生物量の上限を決めるともいえる。

これに加えて、一酸化炭素 CO や二酸化炭素 CO_2 も酸化力源となる。前述した蛇紋岩化作用にともなうメタン生成とは、実のところ、蛇紋岩化作用で発生した水素の CO あるいは CO_2 による酸化であると考えことができ、それを行うメタン生成菌は(O_2 を用いる有酸素呼吸の代わりに) CO_2 呼吸を行っているといってもよい。エウロパの氷には水に対するモル比で0.08%ほど CO_2 が存在する[19]。これが宇宙線照射により水

や過酸化水素と反応してアルデヒド CH_2O を生じる可能性もあるが、エウロパの氷における有機物の存在はまだ確証されていない。むしろ、氷の対流によりエウロパの内部海に送られた CO_2 、あるいは海水中にもともと存在する CO_2 と、蛇紋岩化作用で発生した水素が反応するメタン生成を、生命活動のエネルギー供給源として想定するほうが現実的かもしれない。

4. エンケラドゥスから眺めたエウロパ

土星の氷衛星エンケラドゥスでは、南極付近の“虎の縞”tiger stripesと呼ばれる筋状凹地列から氷火山が噴出する様子が確認され、その噴出物の成分はモル比で H_2O が91%、 N_2 が4%、 CO_2 が3.2%、 CH_4 が1.6%、および微量のアンモニア、アセチレン、シアン、プロパンなどからなることがわかった。初源的に集積したはずのアンモニアが少ない理由として、エンケラドゥス内部の(表1の潮汐加熱による)200～500℃くらいの高温過程でアンモニアが分解して N_2 になったと想定されている[20]。

同様に CO_2 が CH_4 より多いことの原因として、かつて200℃くらいの熱水系において CO_2 と CH_4 が平衡したことが提唱されている[21]。この平衡では、かつて短期間の放射線照射により H_2O が分解してできた H_2 の一部が宇宙空間に散逸し、相対的に過剰になった O_2 が酸化力源になったと考えられている。ただし、 O_2 が直接の酸化剤になるのではなく、たとえば、完全に酸化された赤鉄鉱(Fe_2O_3)には至らないものの、部分的に酸化された磁鉄鉱(Fe_3O_4)として酸化作用に寄与したと想定されている。

いずれにせよ、エンケラドゥスでは、かつて起きた水の放射線分解に由来する酸化力の供給があり、その酸化力が鉄酸化物として鉱物に固定されたことが示唆されている[21]。先に述べた「酸化力の供給源が生命のオアシス」という観点からすれば、このことは生命存在の可能性を検討する上で重要であり、エウロパについても同様に「酸化力の供給と固定」という観点から再検討をしなくてはならないだろう。

謝辞

この原稿に対して木村淳博士から大変に重要かつ有

意義なコメントを頂いたことに深く感謝する。

参考文献

- [1] Kumagai, H. et al., 2008, *Geofluids* 8, 239.
- [2] Beatty, J. T. et al., 2005, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102, 9306.
- [3] Csotonyi, J. T. et al., 2006, *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 4950.
- [4] Koschinsky, A. et al., 2008, *Geology* 36, 615.
- [5] Takai, K. et al., 2009, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 10949.
- [6] Nna-Mvondo, D. and Martinez-Frias, J., 2007, *Earth Moon Planet.* 100, 157.
- [7] Yoshizaki, M. et al., 2009, *Geochem. J.* 43, e17.
- [8] German, C. R. et al., 2010, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107, 14020.
- [9] 木村 淳, 2008, *惑星地質学*, 193.
- [10] Anderson, J. D. et al., 1998, *Science* 281, 2019.
- [11] Blanc, M. et al., 2009, *Exp. Astron.* 23, 849.
- [12] Zimmer, C. and Khurana, K. K., 2000, *Icarus* 147, 329.
- [13] Orlando, T. M., et al., 2005, *Icarus* 177, 528.
- [14] Thomson, R. E. and Delaney, J. R., 2001, *J. Geophys. Res.* 106, 12335.
- [15] Goodman, J. C. et al., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, E03008.
- [16] Lowell, R. P. and DuBose, M., 2005, *Geophys. Res. Lett.* 32, L05202.
- [17] Vance, S. et al., 2007, *Astrobiology* 7, 987.
- [18] Sohl, F. et al., 2010, *Space Sci. Rev.* 153, 485.
- [19] Chyba, C. F. and Phillips, C. B., 2001, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98, 801.
- [20] Matson, D. L. et al., 2007, *Icarus* 187, 569.
- [21] Glein, C. R. et al., 2008, *Icarus* 197, 157.