

原始大気と原始海洋

灼熱の世界から青い地球に至るまで、および、金星と地球の運命の分かれ道

原始地球ができあがったばかりの頃、(水でできた)海洋は存在していなかった。その代わり、隕石の衝突によって地面は高熱となり、マグマの海で覆われていた。また二酸化炭素を多く含む原始大気は、激しい温室効果を引き起こし、地表面の温度は400度の高温で、生命どころか、液体の水すら存在できない世界だった。このような状況から、どうやって青い海と青い空に包まれ、穏やかに生命に満ちた地球へと変わって行ったのだろうか？また、このことを理解できれば、地球と金星の運命がどのように分かれていったか知ることができる。まずは、原始大気から議論を始めよう。

4-0：3つの大気

現在のところ、地球の大気組成は3回入れ替わったと思われる。

1. 第一大気：水素とヘリウムからなる。その組成比は4：1であり、星間ガスや、原始太陽と同じである。
2. 第二大気：主成分は水蒸気と二酸化炭素。二酸化炭素は現在の金星と火星の主成分である。
3. 第三大気：現在の大気のこと、その8割が窒素で、2割弱が酸素である。(水蒸気は1%ほどで、二酸化炭素は0.1%未満しかない。)

4-1：第一大気

最初の気は、水素8割、ヘリウム2割の組成を持っていた。これは、星間ガスと同じ成分で、原始太陽の成分とほぼ同じである。つまり、原始地球が形成されたとき、周辺の星間ガスを巻き込む形で取り込み、最初の気としたのである。しかしながら、地球の質量は木星型惑星と比較するとかなり小さく、質量の軽い水素とヘリウムの気体を長期間に渡って保持することができなかった。しだいに、水素もヘリウムも宇宙空間に逃げ出していき、無くなってしまった。このプロセスは案外早くおきるの、第一大気が続いた期間はかなり短いと思われる。

4-2：第二大気と原始海洋

地球を形作った隕石や彗星が含んでいた揮発成分が、やがて火山やマグマから噴き出して、第二大気を形成した。隕石の主成分である二酸化硅素 (SiO_2) や金属 (鉄やニッケル) は、地殻やコアを形成した。(特に比重の大きな金属は、ドロドロに溶けた状態で、地球中心部に沈みこみコアとなった。比較的比重の軽い岩石溶岩、すなわち二酸化硅素はコアの上に浮き上がり、冷えて地殻となった。) 隕石には揮発ガスも含まれていて、それは水蒸気、二酸化炭素を主成分とする。これらは、マグマから蒸発する形で、大気中に放出されていき、第二大気となった。したがって、第二大気の主成分は水蒸気と二酸化炭素である。そこに、硫化水素などの火山性ガスが混じっていたと思われる。

蒸発した高温の水蒸気は、上空に昇り、高高度で冷えて雨 (液体の水) となる。雨は重力に引かれて低空に落ちていくが、地面に近づくにつれ、高温のマグマオーシャン (マグマの海) にあぶられ、再び蒸発して上昇してしまう。このように、最初の雨は高度の高いところのみで降っていて、地表に届く事はできなかった。宇宙空間との境界領域で、水蒸気は赤外線を放出して冷却され、マグマの熱を宇宙空間へ少しずつ逃がして行った。このような水 (雨/水蒸気) の循環を通じ、地球の表面温度は、長い年月をかけて、少しずつ下がって行った。温度が下がるにつれ、雨が落下できる高度も低くなっていった。そして、ついに雨が地表のマグマに直接降り掛かることができるほど気温が下がった時、灼熱のマグマオーシャンに最初の雨が降った。マグマは急冷され、陸地が誕生し、そこに雨が貯まって、最初の海が形成された。今からおよそ40億年前のことである。ただし、できたばかりの原始海洋の海水温は150度もあって、生命の誕生にはまだまだ不適であった。さらに、硫酸や塩素ガスなどの火山性ガスが溶け込み、初期の海水は強酸性であった。

大気から水蒸気が抜けたため、第二大気の主成分は二酸化炭素となった。このため温室効果は引き続き起きていた。しかし、海水に少しずつ二酸化炭素が溶けて、温室効果は弱まり地球の気温は低下した。大気中の二酸化炭素の濃度がある値を切った時、温室効果は劇的に弱まり、地球の表面温度は一気に低下し、海水温も現在のレベルに低下した。

一方、マグマが固まってできた陸地に雨が降ったり、波がかかったりすると、岩石に含まれる鉱物成分が溶かしだされ、海洋に広がって行った。ナトリウム、カリウム、カルシウムなどである。これらは、アルカリ性の化学物質、たとえば水酸化カルシウムや水酸化ナトリウム、を形成し、強酸の海を中和した。ナトリウムなどは、水にとけて塩素と結びつき、食塩となった。こうして、現在の海のような、青くて、温度が低く、しょっぱい海水ができあがったのである。

4-3：第三大気

第二大気の主成分であった水蒸気は海となり、二酸化炭素も海に溶けてしまった。この結果窒素が残った。これが、第三大気の主成分となる。もう一つの主成分である酸素は、生命活動によって生産された。

今からおよそ36億年前、強酸の海の中で最初の生命が誕生した。（化石など直接的な証拠はまだ発見されていないが。）この原始生物は、酸素を必要としない嫌気性生命体であった。例えば、現在も生き延びているメタン菌という古細菌は、水素と二酸化炭素を使ってエネルギーを獲得し、老廃物としてメタン（ CH_4 ）と水（ H_2O ）を出す。二酸化炭素は第二大気の主成分であり、海に溶けたり火山ガスに含まれたりしていても、その量は相当なもので、メタン菌のような生物がそれを利用して生きていたのは自然な成り行きだろう。光合成をする生物はこの時まで存在していなかった。

このころ、地球の磁場はまだ安定しておらず、太陽風や太陽光に含まれる紫外線やX線は、地表に容赦なく降り注いでいた。これらの放射線は高エネルギーを持ち、複雑な分子をバラバラの原子に破壊することができる。つまり、太陽は初期の生物にとってはむしろ害であった。そのかわり、海底の熱湧水（温泉）のような火山エネルギーを活用して、生命活動を維持する生命体が多かったであろう。最初の生物は「深海の温泉」で発生した可能性が高いと考えられている。

地磁気が安定したのは、今から約25億年前と思われる。地磁気が安定すると、太陽風など、高エネルギーをもった粒子の多くが南極や北極に迂回してくれるので、低緯度地域の放射線レベルは低下し、生物は浅海へと上がってくる事ができるようになる。この段階で、太陽光を利用する生物、すなわち光合成生物が誕生する。光合成生物は、二酸化炭素と水と光から、栄養（炭水化物）を合成することができる。そして蓄えた栄養からエネルギーを取り出して、自らの生体活動を維持する。

光合成生物が吐き出した酸素は、次第に海水にとけ込んで行き、海中の酸素濃度は上昇した。海水中に溶けていた鉄は酸化され、さび（酸化鉄）となって海底に沈殿していく。また、嫌気性の初期生物は、体が酸化されると機能が低下するため、酸素濃度の高くなった海域では死滅してしまった。これがOxygen Catastropheである。（相当深い深海や地底深くなど、特殊な環境でのみ、細々と生きながらえたとと思われる。）嫌気性生物のいなくなった海中は、敵が少なく新種の生物にとっては楽園であった。こうして好気性生物が繁栄する。好気性生物とは、酸素を吸って二酸化炭素を吐き出す（呼吸する）生物である。海水に溶けきれなくなった酸素は、空気中へと広がって行って、第三大気（窒素8割、酸素2割）が完成した。

4-4：金星と地球の運命の分かれ道（磁場の有無）

地球と金星はよく似ている。例えば、太陽からの距離は、地球は1天文単位、金星は0.7天文単位である。金星の直径は、地球のその95%である。大きさも、太陽からの距離も非常に良く似たこの2つの惑星は、大きく異なる点がある。最大の違いは、地球には生命がいるが、金星にはいない。この違いの大きな要因は、金星には海が形成されなかったことである。

金星に最初から水がなければ、金星に海ができなかったことは容易に理解できる。しかし、金星も地球も、同じ地球型惑星であり、その原型は衝突して合体した隕石や彗星である。隕石と彗星の成分は、アステロイドベルトの内側では、均一かつ同一で、二酸化硅素、鉄やニッケルなどの金属、氷（水や二酸化炭素など）などである。したがって、原始金星には揮発した水蒸気の大気があったはずである。つまり、地球の

第二大気と同じ成分を、金星の大気も最初は持っていたはずである。地球で起きた海の形成が、なぜ金星では起きなかったのか？この問題はまだ完全に解かれた訳ではないが、いくつか有力な理論が提案されている。その一つが磁場の影響である。

地球には磁場、すなわち地磁気があるが、金星にはない。つまり、金星では方位磁石はまったく役に立たない。どうして地球には磁場あって、金星にはないのか、いまだに確固とした答えは得られていないが、一つの説として、Big Splatの有無が提案されている。つまり、地球には月があるが、金星には衛星が一つもないのである。

Big Splatについて復習する。地球のラグランジュポイントには、かつて大きめの微惑星ティアが地球—太陽の重力によって捉えられていた。なんらかの影響で不安定になったティアは、地球めがけて落下し、地球と大衝突を起こす。このとき、衝突のエネルギーで地球もティアもドロドロの溶岩に溶け、地球の内部は強にかき混ぜられる。高温のマグマは約4000度の温度をもち、そのような環境では電子は原子、分子から電離してしまう。流れるマグマは流れる電子、つまり電流である。この電流によって地磁気を作られていると考えられている。（もちろん、諸説あっていまだに統一は成し遂げられてはいない。）

このことから、金星のラグランジュポイントには、運悪くティアのような微惑星が捕まらなかったであろう。Big Splatのない金星のマントルは流動せず、静的で、磁場は生じない。太陽にちょっと近いこともあり、金星に浴びせかけられた太陽風は、金星の水蒸気（水分子）をすべて分解してしまったのであろう。現に、最近の惑星探査の研究で、金星の大気には酸素原子と水素原子が1：2の割合で含まれている、という発見があった。金星にも最初、水はあったが、太陽風で壊されてしまい、雨が降らず、海ができなかったのである。当然、二酸化炭素は海にとけ込むことはなく、第二大気の成分を保持したまま、温室効果がずっと続いてしまった。

火星の大気も主成分は二酸化炭素である。当初含まれていたと思われる水は、現在氷となって両極に残っているだけである。火星の地形を詳しく観察すると、河が流れた跡のような地形や、湖、海洋に似た地形が見つかる。かつて、火星にも海が存在した可能性は高いと思われる。ただ、火星の質量は小さいため、水蒸気は宇宙空間に飛び去ってしまったと考える人が多い。探査機による研究によって、火星に関する形成のシナリオはいくらでも変わる可能性がある。

参考文献

- 1：丸山茂徳、磯崎行雄著、「生命と地球の歴史」（岩波新書、1998年）
- 2：園池公毅著、「光合成とは何か」（講談社ブルーバックス、2008年）
- 3：A. H. Knoll 著(齊藤隆央訳)、「生命：最初の30億年」（紀伊国屋書店、2005年）
- 4：池谷仙之、北里洋著、「地球生物学」（東京大学出版、2004年）