

《フロンティアセミナー・テキスト》

地球惑星環境進化論 第2回

門屋 辰太郎¹, 渡邊 吉康¹, 関根 康人², 田近 英一²

2012年7月25日受領, 2013年10月18日受理.

(要旨) 太陽系外惑星系におけるハビタブルプラネットを考える上で, 私たちが知り得るハビタブルプラネットの唯一の実例である地球の環境の理解は必要不可欠である. 本稿では, 地球環境の進化および変動の原因, そしてそれらの生命進化との関わりについて比較惑星環境学的視点から議論する. 第1回(第1章~4章)では, 地球史最初期から原生代後期までの大気表層環境史について議論した. これを踏まえ, 今回は顕生代における生物の大量絶滅イベント(第5章)や天体衝突が引き起こす環境変動(第6章)について議論する. さらに第7章では, 生命が生存可能なハビタブルプラネットの条件について再考し, 問題点を議論する.

5. 物質循環と生物進化

・ 顕生代の地球環境変動 ・

5.1 顕生代における生物進化と気候変動

顕生代(約5億4100万年前~現在)は, 生物による生体鉱化作用(バイオミネラリゼーション)が始まり, 地層中に化石記録がたくさん残るようになった. そのため, 大量絶滅などの地球史的イベントに対する理解がそれ以前の時代と比べて格段に進んでいる.

図1に, 顕生代における古土壤などの環境指標や物質循環モデリングによって推定されている大気CO₂濃度の変動と, 氷河時代が訪れたタイミングを示す[e.g., 1, 2]. CO₂濃度は, 顕生代全体を通じて, 基本的には時間とともに低下してきたことがわかる. これは太陽光度の長期的な増加による温暖化の傾向が, 炭素循環による負のフィードバックによって補償されるためである. こうしたCO₂濃度の長期的減少傾向の下, より短期的なタイムスケールでは, プレート運動にもなう火成活動の変動などに起因してCO₂濃度の変動が起きていたことが知られている. そして, CO₂濃度の低い時代には氷河時代が訪れているなど, CO₂変動と地

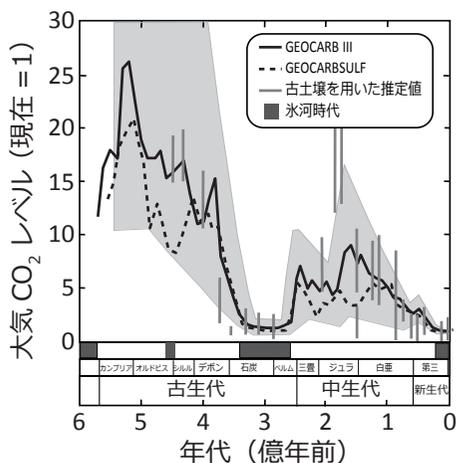


図1: 顕生代における大気中CO₂濃度(現在との比)の時間変化 ([1, 2]に基づく). 大気中のCO₂濃度はより短周期のゆらぎを伴いながら, 大局的には時間と共に低下してきたと考えられている. 網掛け部分は, モデルの誤差を表す.

表面温度の変動は高い相関をもっている.

特に, 古生代後期の石炭紀(約3億年前)には, 顕生代を通じて最も氷床が拡大した Gondwana 氷河時代が訪れたことが知られている. この時期には, 大気中のCO₂濃度は現在とほぼ同レベルにまで低下していた(図1). さらに, 当時は現在よりも太陽光度が3%程度低かったためにより寒冷となり, 最大で南緯35°まで氷床が拡大していたと考えられている.

1. 東京大学大学院理学系研究科

2. 東京大学大学院新領域創成科学研究科

kadoya@astrobio, k. u-tokyo, ac. jp

それでは、なぜこの時期のCO₂濃度は前後の時期に比べて著しく低下していたのだろうか。この原因として有力な説は、生物の影響、とくに陸上植物の大繁栄によるとするものである[3]。石炭紀には維管束植物が大森林を形成していたことが知られている。すると、植物の根やバクテリアの活動などによって土壌が厚く安定に維持されるようになり、陸上の化学風化効率が格段に増加する。これによって、CO₂濃度が低下して地表面温度が下がっても、大気海洋システムへの火山ガスによる供給速度と釣り合う速度でCO₂を固定することができる。

そのほか、維管束植物がつくるリグニンやフミンといった新しい有機物を分解する微生物が当時まだ出現していなかったために、有機物の埋没効率が高かったことも示唆されている[3]。実際、顕生代における海水の炭素同位体比変動を調べてみると、約3億年前に大きな正異常が生じたことが知られている。これは、軽い炭素を含む有機物の埋没率が増加したことを示唆し、その結果、大気海洋システムから大量のCO₂が除去された証拠と考えられる。つまり、陸上植物の埋没率の増加は石炭紀後期におけるCO₂濃度の低下のもうひとつの要因であったことが示唆される[3]。

顕生代最大規模の氷河時代である Gondwana 氷河時代は、生物活動が直接の原因となったことが地質記録から強く示唆されるという点で、地球史的にみて非常に興味深い。

5.2 顕生代の酸素濃度変動

大気中のO₂濃度の変動は、正味の生成過程である有機炭素や黄鉄鉱の埋没と、除去過程である有機炭素や黄鉄鉱の酸化の収支の差によって生じる。ここでO₂の生成過程は炭素と硫黄の特徴的な同位体分別作用を伴うことが知られているため、物質循環モデルに海洋における炭素と硫黄の同位体比変動記録を境界条件として用いることによって、顕生代を通じた大気中のO₂濃度変化が推定されている[2, 4](図2)。他方、室内実験によれば大気中のO₂濃度が35%を超えると植物の自然発火確率が非常に高くなり、森林火災によって陸上植物は全焼するものと推定されているが、地質記録にはそのような形跡が見られないため、O₂濃度は35%以上にはならなかったと考えられている[5]。逆に、O₂濃度が約15~13%を下回ると植物が燃焼し

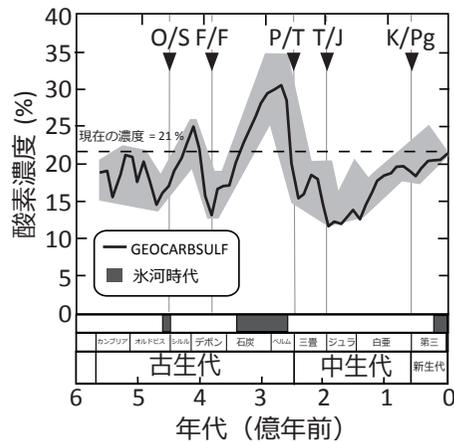


図2： 顕生代を通じた大気中O₂濃度の変動及び5大絶滅イベント ([2, 4]に基づく)。網掛け部分はモデルの誤差を表す。図中のO/Sはオルドビス紀とシルル紀の境界、F/Fはフラスニアン期とファミニアン期の境界、P/Tはペルム紀と三畳紀の境界、T/Jは三畳紀とジュラ紀の境界、K/Pgは白亜紀と古第三紀の境界を示し、大量絶滅が起きたと考えられている。

なくなるが、デボン紀以降は森林火災の証拠である木炭化石(チャコール)が継続的に産出するので、そのようなレベルにまで低下したことはなかったと考えられている。これらのことから、O₂濃度は13~35%の範囲で変動してきたものと考えられている[2, 4](図2)。

前述のように、Gondwana氷河時代が訪れた石炭紀には有機物の埋没が増加した。有機物の埋没とO₂の放出は地球化学的に等価であり、当時の大気中のO₂濃度は約35%に達していたことが示唆されている[4]。このように高いO₂濃度は、当時の陸上に進出していた昆虫類にとって大変有利であった。というのは、昆虫類は大気中のO₂を拡散によって体内に取り込んでいるからである。たとえば石炭紀には、体長75 cmにも及ぶ巨大トンボ(*Megamaura*)や2~3 mにも及ぶ巨大ムカデ(*Arthropleura*)などの化石に見られるように、昆虫類が巨大化したことが知られている。興味深いことに、最近行われたキロシヨウジョウバエの飼育実験から、高O₂濃度条件下では、世代を経るごとに体サイズが大きくなることが分かってきた[e.g., 4]。

古生物の進化を理解する上で、O₂濃度が低い時期も注目される。たとえば、いわゆる5大絶滅イベントのうち、小惑星衝突に起因する白亜紀/古第三紀境界以外のものについては、すべてO₂濃度が低いレベルに低下した時期と一致しているようにみえ[4, 6]、両

者の関連性が示唆される(図2)。また、三疊紀/ジュラ紀境界以降の数千万年間は、顕生代の中でもとくに O_2 濃度が低かった可能性が示唆されている(図2)。恐竜(獣脚類)はこのような低い O_2 濃度(〜13%)に適応するために、気嚢システムと呼ばれる呼吸器官を獲得したのではないかと考えられている[7]。気嚢システムでは、吸気(O_2)と排気(CO_2)が混ざることなく一方向に行われるため、哺乳類の横隔膜を用いた肺呼吸と比べて呼吸効率が非常に良い。このような気嚢システムは鳥類に引き継がれ、空気の薄い大気上空における飛行運動を可能にしたと考えられる。

5.3 海洋無酸素イベント

生物の大量絶滅の原因として、海洋無酸素イベントが注目されている。海洋無酸素イベントとは、海洋内部に無酸素水塊が広がる現象のことであり、地質学的には有機物に富んだ黒色頁岩の堆積からその発生が示唆される[8]。これらの堆積した時期は、温暖とされる地質時代に対応するものが多い[8]。無酸素水塊中では、ほとんどの海棲生物が生存できなくなると考えられる。ここではまず、海洋無酸素イベントの発生条件を理解するために、海洋内部の物質循環の概略を述べる。

海洋における酸素や栄養塩の鉛直分布は、生物ポンプと海洋循環の競合で決まる。栄養塩(生物が利用可能なリン、窒素、炭素などの水溶性化合物)は、海洋表層における生物生産によって生物に取り込まれる。生物の遺骸は、重力によって沈降しながら酸化分解を受け、海水に栄養塩を放出する。この生物による栄養塩の鉛直輸送を生物ポンプと呼ぶ。分解して無機化された栄養塩は、海水の湧昇によって海洋表層に供給され、再び生物生産に用いられる。酸化分解を免れた一部の有機物は、海底に堆積する。

一方、 O_2 は海洋表層で大気から取り込まれた後、海洋の深層水循環によって海洋深部へと供給される。海洋内部の O_2 は有機物の酸化分解によって消費される。有機物の酸化分解の大部分は、水深1000 mまでの海洋中層水付近で生じるため、現在の海洋ではこの深さに O_2 濃度の極小帯が形成されている。

このことを踏まえて、海洋無酸素イベントが発生する条件を考えてみる。それには、主として1)海洋循環が停滞することで海洋深層水への O_2 の供給が低下

すること、もしくは2)光合成活動の活発化により有機物の沈降水量が増加して海洋内部の O_2 除去が増加すること、の2つの可能性が考えられる。海洋物質循環モデリングによってこの両者を検討すると、1)の場合は、海洋循環速度が現在の1/5〜1/10以下にならないと海洋無酸素イベントは発生しないが、2)の場合、海洋表層への栄養塩供給率が現在の1.5〜2倍程度にまで上昇すれば、海洋無酸素イベントが発生することが分かる[9]。海洋への栄養塩供給は大陸の化学風化に起因しているため、温暖な環境下では栄養塩の供給が活発になり、酸素の海水への溶解度の低下とも相まって、海洋は比較的容易に無酸素状態に陥るという結果が得られる。このことは、海洋無酸素イベントが温暖期に頻繁に発生しているという事実とも調和的である。

一方、富酸素条件から無酸素条件に推移する際、アノキシア-生物生産フィードバック(A-Pフィードバック)と呼ばれるリンに関する正のフィードバック機構がはたらく[e.g., 9]。富酸素条件下において、リンは最終的に有機物や燐灰石(アパタイト)、あるいは水酸化鉄への吸着によって海水から除去される。一方、無酸素条件下では水酸化鉄が存在しないためリンの除去効率は低下し、さらに有機物中のリンが選択的に海水中にリサイクルするようになることが知られている。この結果、何らかの理由で無酸素水塊が発生した場合、海水中のリン濃度が増加するため、海洋表層における生物生産の増加が引き起こされ、海洋中層水における O_2 消費を促進する。こうして、無酸素水塊は拡大し、海洋は急激に無酸素化することになる[9]。

海洋無酸素イベントは、生物に大きな影響も及ぼす。海洋無酸素イベントが生じれば、好気的な底生生物(海底に生息する動物)は絶滅する。また、大規模な海洋無酸素イベントが発生したことで知られる、約2億5000万年前のペルム期/三疊紀(P/T)境界において、緑色硫黄細菌に由来するイソレニエラテンというバイオマーカーが発見されている。緑色硫黄細菌は電子供与体として硫化水素(H_2S)を用いる絶対嫌気性の光合成細菌であるため、この活動が発見されたということは、海洋表層の有光層(〜100 m)にまで H_2S が充満するような極度の無酸素環境が発達していた可能性を示唆している。もし H_2S が大気中に漏れ出したとしたら、当然、陸上生物にも大きな影響が及ぶであろう。

最近の研究によれば、シベリアントラップを形成し

た洪水玄武岩の噴出活動によって温暖化が生じた結果、大陸の化学風化率の増加に伴い海洋への栄養塩供給が増加して海洋無酸素イベントが発生し、またそれに伴って海洋表面の有光層にまでH₂Sを含む水塊が上昇したことが、ペルム期／三畳紀境界で起きた大量絶滅の原因だったのではないかと示唆されている[10]。一方で、海洋における無酸素水塊の拡大は、将来の地球温暖化に伴う海洋の応答と環境変動を評価する上でも重要な検討項目と考えられる[11]。

6. 天体衝突イベント

6.1 白亜紀/古第三紀境界における大量絶滅

顕生代においては、5回におよぶ生物の大量絶滅イベントが起きたことが知られている(図2)。その中で一番最近のものが、約6600万年前の白亜紀/古第三紀境界(K/Pg境界¹⁾)における大量絶滅イベントである。恐竜やアンモナイトを含む、科のレベルで20%、属のレベルで50%に相当する生物の分類群が絶滅したことが知られている[12]。

Alvarezら[13]は、ヨーロッパに分布するK/Pg境界の厚さ数mm～1cm程度の粘土層において、白金元素のイリジウムが異常濃集していることを発見した。イリジウムは親鉄性元素であり、地球形成時に大部分はコアへ分配されたために、地殻中にはほとんど存在していない。したがって、K/Pg境界層にみられるイリジウムの異常濃集は、小惑星の衝突によってもたらされたと考えられる[13]。この他にも、天体衝突時の衝撃波による高圧条件下で生成した衝撃変成石英や、衝突溶融物が急冷して生成したガラス質のスフェルールが発見され、K/Pg境界における小惑星衝突説を強く支持する証拠となった。そして、重力異常や磁気異常から、ユカタン半島北部の地下2kmに、直径約200kmにもおよぶ円形構造が存在することが明らかになり、ボーリングコア試料と近傍のK/Pg境界層から採取された試料から、誤差の範囲でK/Pg境界の年代に合致する衝突溶融ガラスが発見されたことで、K/Pg境界において巨大衝突クレーターを形成する天

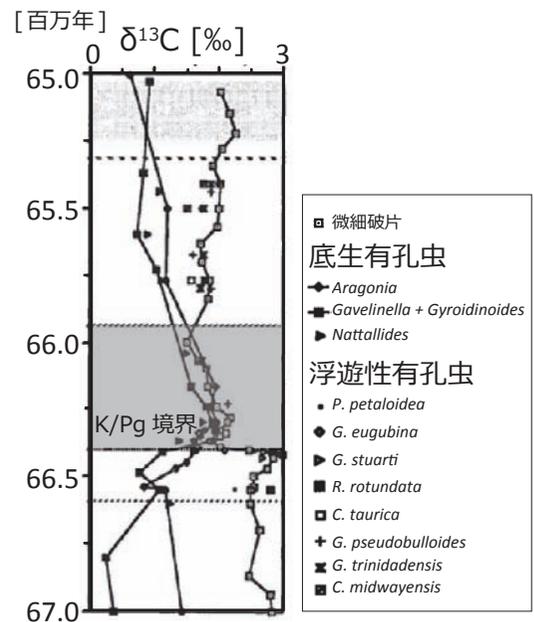


図3：K/Pg境界における海洋の炭素同位体比変動([16]に基づく)。浮遊性有孔虫と底生有孔虫の殻に含まれる炭素同位体比の比較から、K/Pg境界後50万年間に渡って、海洋における炭素同位体比が鉛直方向に均一化していることがわかる(灰色ハッチ部分)。

体衝突が生じたことが決定的になった [e.g., 14]。

天体衝突と大量絶滅の因果関係を結びつける仮説として有名なものが、“衝突の冬”と呼ばれるシナリオである。これは、衝突によって巻き上げられたサブミクロンサイズ以下の塵粒子が地球全体を覆うことによって日射が遮られ、それによって植物の光合成が停止し、食物連鎖が崩壊することによって大量絶滅がもたらされたというシナリオである[13]。

ただし、その後の研究によって、光合成を停止させるような大量の塵が大気中に存在できる期間は、数ヶ月程度であると見積もられた。このため、衝突の冬仮説は必ずしも妥当ではないかもしれないと考えられるようになった。しかしながら、衝突の冬と類似の環境変動が生じたであろうことは、生物の絶滅パターンからも類推されている。たとえば、K/Pg境界においては、底生有孔虫に比べて海洋表層水に生息する浮遊性有孔虫が選択的に絶滅している[15]。このことは、衝突の冬仮説で示唆されたように、まず光合成を行う1次生産者に大きなダメージが与えられ、それにより生態系全体が影響を受けて大量絶滅に至ったというシナリオ

1. かつては第三紀(Tertiary)の頭文字をとってK/T境界と呼ばれていたが、地質年代区分名の改訂の結果、現在では用いられなくなった。

を支持しているようにみえる。

大量絶滅のメカニズムを解明するためには、海水中の炭素同位体比の挙動のような地球化学的証拠が重要となる。前述のように、海洋内部においては、プランクトンの遺骸の重力沈降とその酸化分解によって生物ポンプがはたらいっている(第5章参照)。海洋表層では、光合成における炭素の同位体分別効果により、軽い炭素(^{12}C)が優先的に固定されるため、海洋表層水中の無機炭素の同位体比($\delta^{13}\text{C}$ 値)は大きな値になる。一方、海洋中深層水においては、有機物の酸化分解によって軽い炭素が放出されるために $\delta^{13}\text{C}$ は小さな値となる。つまり、生物ポンプの働きによって海洋における炭素同位体比は、特徴的な鉛直構造をもつ。

ところが、K/Pg境界前後において海洋表層にすむ浮遊性有孔虫と海洋深層にすむ底生有孔虫の殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値を調べると、絶滅イベント直後に鉛直方向の炭素同位体比の差が無くなるのが明らかになった[16](図3)。このような炭素同位体比の均一化は、その後50万年近くも続いている(図3)。HsuとMcKenzie[17]は、このような海洋鉛直方向の $\delta^{13}\text{C}$ 値の均一化は、生物生産(光合成活動)及び生物ポンプの停止を意味するのではないかと考え、“ストレンジラブ・オーシャン²⁾”と呼んだ。ストレンジラブ・オーシャンを示唆する炭素同位体比の挙動は、これまで知られている限り、K/Pg境界直後のみにみられる特徴的な現象である。

この炭素同位体比の挙動は、光合成活動の完全な停止を意味するようにみえるが、実のところ、話はそう単純ではない。それは、生物活動が完全に停止していたと考えれば、海洋の $\delta^{13}\text{C}$ 値の鉛直方向の均一化は説明できても、その絶対値(1.5%)は説明できないからである。すなわち、もし完全に生物活動が停止したならば、海水の $\delta^{13}\text{C}$ 値は数十万年スケールで火山ガスの組成(〜5%)に漸近するはずであるが、実際には高い値を保っている。Kump[18]は、K/Pg境界でみられる炭素同位体比の鉛直分布とその絶対値を説明するためには、外洋域においては生物生産がほぼ完全に停止していたが、浅海域では白亜紀末と同程度の

生物活動が継続していたと考える必要があると主張している。つまり、K/Pg境界における海水の $\delta^{13}\text{C}$ データは、小天体衝突の生命活動に対する影響が、全球一様にあったわけではなく、むしろ地域性を持っていたことを示唆する。

6.2 天体衝突が引き起こす環境擾乱

地球史における天体衝突の普遍性を考えれば、K/Pg境界の大量絶滅イベントに限らず、天体衝突がどのような環境擾乱を引き起こすのかを明らかにすることは重要である。とくに、地球の場合、地表面の7割が海洋で覆われているため、海洋への衝突による環境擾乱を評価することが重要となる。しかし、海洋衝突は地球独自の現象であり、惑星科学的にもその理解は乏しい。

K/Pg境界での衝突イベントでは、衝突地点が浅海底だったため、衝突クレーター近傍のメキシコ湾からカリブ海にかけて、衝突で発生した巨大津波による津波堆積物が広く分布している。この津波堆積物を詳細に調べると、通常の津波では影響の少ない深海底においても非常に厚い津波堆積物が堆積しており、通常の地震津波に比べて桁違いのエネルギーをもった巨大な“衝突津波”が発生していたことが示唆されている[19-22]。また、津波堆積物の構造から津波の流向を復元した結果や衝突津波のモデリングの結果などから、クレーターに向かう津波と逆向きの津波が繰り返されていたことも明らかになっている[19-22]。

一方、海洋衝突が地球表層環境に及ぼす擾乱には、衝突津波のような物理的影響だけでなく、化学的影響も重要である。AhrensとO'Keefe[23]は、衝突時の海水の蒸発により、成層圏へ水蒸気や塩分が供給され、それらの光解離反応によってオゾン層が激減する可能性を指摘している[24]。また、衝突地点直下の海底堆積物に含まれる炭酸塩や硫酸塩の蒸発で、 CO_2 や SO_2 が大気中に大量に放出されたとも考えられている[25-27]。その場合、これらのガスの温室効果や、エアロゾルの生成による日傘効果、あるいは酸性雨など、気候や生物に対するさまざまな影響が指摘されている[25-27]。

惑星科学において、天体衝突や衝突クレーター形成に関する研究は、月や火星、氷衛星などを対象に行なわれてきたが、地球を対象とした研究例は多くない。

2. 映画“博士の異常な愛情” (スタンリー・キューブリック監督、1964年)に登場するストレンジラブ博士から採られたもの。核戦争により地球上の全生物が絶滅する絶望感が広がる中、選ばれた男女を地下坑道へ避難させることで人類滅亡を避けるのだという持論を熱弁する。

地球史におけるK/Pg境界以外の大量絶滅イベントの原因として、一時期は天体衝突の可能性が疑われたが、現在ではどれも否定されており、天体衝突と環境変動の因果関係を明らかにする研究は下火になっている。

しかしながら、衝突起源物質や衝突クレーターについて地質調査を通じて研究することは、地球でしかできないものである。特に、地球史における天体衝突現象とそれによる環境擾乱の評価は、後期隕石重爆撃期や初期地球環境の推定、将来の衝突リスク評価などのためにも、重要な課題である。

7. ハビタブルプラネット

7.1 温暖湿潤環境の成立条件

第1章で述べたように、ハビタブルゾーン内部に地球のような惑星が存在しても、必ずしも温暖湿潤な気候状態が実現されるわけではない。惑星環境を温暖湿潤に保つためには、十分な温室効果ガスとそれを維持するための気候の安定化メカニズムの存在が必要となる。地球の場合、基本的には炭素循環によるウォーカー・フィードバックがその役割を担ってきたと考えられる(第1, 2章参照)。

しかしながら、ウォーカー・フィードバックは、大気へのCO₂の供給と除去が釣り合う定常状態へ地表環境が向かうメカニズムであり、地表環境が温暖に保たれることを保証するものではない。つまり、CO₂供給率が変動するなど境界条件が変われば、それに応じて地表環境も変化する。たとえば、CO₂の脱ガス率が現在の数分の一以下になった場合、化学風化を介したCO₂の除去を脱ガスで補えなくなるため、数十万年程度で地球は全球凍結状態へ落ち込んでしまう[28]。また、火成活動がマントルブルームの活動のみによるなど、CO₂の脱ガスが炭素循環の特性時間である10万年スケールでみて間欠的である場合、たとえ一時的に温暖な環境が実現されたとしても、火成活動の弱い期間にCO₂は急速に除去されて、再び全球凍結に陥ってしまうと考えられる。つまり、温暖湿潤環境を維持するためには、プレートテクトニクスのように連続的かつ十分な量のCO₂供給メカニズムが必要不可欠となる[28]。

このような境界条件は、固体惑星の進化と変動を反

映したものであるため、ハビタブルプラネットの成立条件を理解するためには、固体惑星の内部進化及びそのダイナミクスに関する一般的な理解が重要となる[28]。

7.2 スノーボールプラネット

ここまでは、温暖湿潤な環境を持ち、表面に液体の水が存在している惑星をハビタブルプラネットであると考え、その存在条件について議論してきた。このような考えは従来の多くの研究についてもあてはまる。しかしながら、惑星表面の水が凍結している全球凍結惑星(“スノーボールプラネット”)[29]もハビタブルプラネットの一形態であるかもしれない。

たとえば、原生代において、地球は全球的に氷に覆われはしたが、地球内部からの熱の供給により、海洋は表層1000 mが凍ただけで完全には凍結しなかったと考えられている。つまり、全球的に氷で覆われた惑星の表面下には“内部海”が存在する可能性が考えられる[29]。

惑星内部の熱源として長寿命放射性核種(²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, ⁴⁰K)の壊変エネルギーを考え、惑星の熱進化と地殻熱流量変化を計算すると、水の存在度や惑星サイズが地球程度であれば、数十億年程度の期間、氷の下に液体の海が存在しうる。また、質量が地球の数倍程度のスーパーアースにおいては、さらに長期間にわたって高い地殻熱流量が維持され、内部海の寿命は延びるであろう[29]。スノーボールプラネットでは、中心星からの放射ではなく惑星内部からの地殻熱流量によって内部海が形成・維持されるため、浮遊惑星にも内部海が存在しているかもしれない。こうした氷地殻下に内部海が存在するスノーボールプラネットにおいては、地球の海底熱水系において生息しているような化学合成独立栄養生物が生存しているかもしれない。太陽系内にも、木星の衛星エウロパやガニメデ等に内部海が存在する可能性が示唆されている。それらはスノーボールプラネットのアナロジーとして重要な研究対象といえる。

スノーボールプラネットは、中心星から離れた軌道でも存在しうるため、ハビタブルゾーン内部に限定される温暖湿潤気候を持つ惑星よりも普遍的に存在する可能性がある。そのような惑星にも生命が生存可能かどうかは不明だが、もし可能だとすればハビタブルゾ

ーンの概念は、これまでの惑星表面に液体の水が存在するということから惑星表層付近に液体の水が存在するものへと拡張が必要になるかもしれない。

7.3 水惑星の多様性

ここまで地球を例として、炭素循環や生命の存在、海洋やプレートテクトニクス、大陸など、特徴的な要素について考えてきた(図4)。しかし、これらの要素が水惑星に共通なものであるかどうかは、まだほとんどわかっていない。地球とは異なった仕組みで、液体の水を地表に保持した惑星が存在する可能性も考えられる。そこで最後に、水の量という観点から、水惑星の多様性について議論する。

これまで水惑星を地球と同程度の水を持つ惑星と定義していたが、ここではより一般的に、表面に水が存在する惑星を水惑星と再定義し、水量の違いに由来する多様性を考える。すると、水惑星は、惑星表層に存在する水の量から以下の3種類に大別することができると考えられる。一つ目は、惑星表層に大量の水(≧0.023 wt%)が存在する“海惑星”(オーシャン・プラネット)である。このような惑星には、大陸地殻が存在しないか、あっても海面下に水没している。二つ目は、惑星表層に地球程度の水(~0.023 wt%)と大陸が存在する“海陸惑星”(オーシャン=ランド・プラネット)である。現在の地球は、この海陸惑星に相当する。そして三つ目は、惑星表層に水がほとんど存在しない“陸惑星”(ランド・プラネット)である。もう少し定量的に考えると、水の地理的な分布が地表面での水輸送によって決まる惑星を海陸惑星と定義し、大気循環によって水が極域に局在してしまうような惑星を陸惑星と定義することができる[30, 31]。

炭素循環の観点に立つと、上記の3種類の惑星ではCO₂の除去プロセスに違いがある。すなわち、海陸惑星では地球と同様に陸上での風化によってCO₂が除去されるのに対し、海惑星では海底風化や海底熱水作用がそのプロセスを担うものと考えられる。また、陸惑星では、熱水系や地下水系における風化過程が重要なプロセスとして機能する可能性が考えられる。これらの違いは、表面温度や大気中のCO₂濃度、そして気候の安定性に大きな違いをもたらす可能性がある。

地球型惑星の検出が比較的容易とされ、今後の観測に期待が寄せられているM型星(質量が太陽の半分以

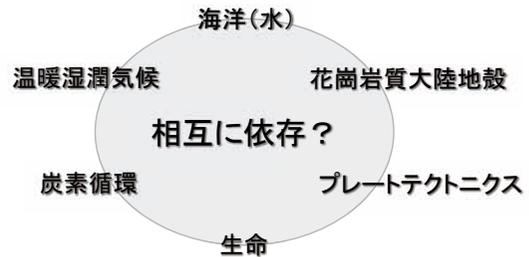


図4: 地球のような海陸惑星システムの重要な構成要素。本論で議論した内容をまとめたもの。これらは全て地球だけに見られる特徴であるが、互いに相互依存の関係にあるようにもみえる。もしかすると、地球のような惑星は必然的にこれらの要素をすべて持つことになる(すなわち普遍性がある)のかもしれない。

下の主系列星)のハビタブルゾーンでは、材料物質に水成分を多く含む惑星が形成される可能性が高い[32]。そのような惑星表面が温暖であると、深さ数百km以上の海が形成され、海底には高压水からなる氷マンテルが形成される可能性がある[33]。このような惑星においては、地球でみられるような、海底における岩石の風化作用や熱水作用が生じないことも考えられる。したがって、ウォーカー・フィードバックのような珪酸塩の風化に由来するCO₂等の温室効果気体の調節作用ははたらかず、その結果、海が存在できるかどうかは、与えられた惑星の軌道長半径と大気中に含まれる温室効果気体の量で左右されてしまう可能性が考えられる。

このように、水の量だけ考えても、水惑星の存在形態は多様であり、地球を唯一無二のモデルケースと考えることはできない。太陽系の既成観念にとらわれず、“多様性”を念頭に置いて検討することが重要である。その一方で、現時点で我々にできることは、我々が知る唯一のハビタブルプラネットである地球と、他の惑星や衛星の進化を比較惑星学的に理解することであろう。こうした理解なくして、ハビタブルプラネットの本質を捉えることはできないように思われる。

8. まとめ

本稿では、地球における表層環境と生命の共進化を俯瞰的に眺めることによって、生命が生存可能なハビタブルプラネットで起こるであろう種々のプロセスや相互作用について考えてきた。地球においては、気候

を安定化するメカニズムとして大気-海洋-地殻-マントル間の炭素循環が重要な役割を担っており、大陸の形成やプレートテクトニクスなど惑星内部の活動と連続的かつ十分な量のCO₂の脱ガスが、地球環境を温暖に維持するために必須である。このような、基本的に安定化された環境において、まれに生じる短期的な大規模変動によって安定状態が壊されることで、大気組成が大きく変化したり、生命の大量絶滅が起きたり、生物進化が促進されるなどの不可逆的な変化が生じてきた。そのひとつの具体例として、全球凍結イベントのような破局的な地球環境変動が、大気中のO₂濃度の上昇を介して真核生物や多細胞動物の出現をもたらした可能性に言及した。

一方で、太陽系外の水惑星の多様性を考えるためには、地球について得られた知見をいかに一般化できるかが今後の大きな課題であると言える。そのためには、地球について得られた知見を太陽系外惑星にまで外挿するためのマイルストーンとして、火星や金星、水衛星などの天体の表層環境進化や内部進化を実証的に解明することが重要である。地球上ではたらいてきたようなフィードバックシステムや生命と環境の共進化の理解、そして太陽系内惑星の進化の理解を総合することにより、従来のハビタブルプラネットの想定を超える、新たな生命存在可能惑星の概念を構築できるものと期待される。

謝 辞

本稿の作成にあたって、査読者の倉本圭先生には有益なコメントを多くいただきました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Berner, R. A. and Kothavala, Z., 2001, *Am. J. Sci.* 301, 182.
- [2] Berner, R. A., 2006, *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 5653.
- [3] Berner, R. A., 1997, *Science* 276, 545.
- [4] Berner, R. A. et al., 2007, *Science* 316, 557.
- [5] Watson, A. et al., 1978, *Biosystems* 10, 293.
- [6] Ward, P. et al., 2006, *PNAS* 103, 16818.
- [7] O'Connor, P. M. and Claessens, L. P. A. M., 2005, *Nature* 436, 253.
- [8] Jenkyns, H. C., 2010, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11, Q03004.
- [9] Ozaki, K. et al., 2011, *Earth Planet. Sci. Lett.* 304, 270.
- [10] Xie et al., 2009, *Geology* 35, 1083.
- [11] Stramma, L. et al., 2008, *Science* 320, 655.
- [12] Russel, D. A., 1976, in *Cretaceous-tertiary extinctions and possible terrestrial and extraterrestrial causes*, 11.
- [13] Alvarez, L. W. et al., 1980, *Science* 208, 4448.
- [14] Hildebrand, A. R. et al., 1991, *Geology* 19, 867.
- [15] Kaiho, K., 1994, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 111, 45.
- [16] Zachos, J. C. et al., 1989, *Nature* 337, 61.
- [17] Hsu, K. J. and McKenzie, J. A., 1985, in *The Carbon Cycle and atmospheric CO₂: natural variations, Archean to present*, 487.
- [18] Kump, L. R., 1991, *Geology* 19, 299.
- [19] Takayama, H. et al., 2000, *Sediment. Geol.* 135, 295.
- [20] Tada, R. et al., 2002, *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 256, 109.
- [21] Goto, K. et al., 2008, *Cretaceous Res.* 29, 217.
- [22] Matsui, T. et al., 2002, in *Catastrophic Events and Mass Extinction: Impacts and Beyond (Colorado: Geological Society of America)*.
- [23] Ahrens, T. J. and O'Keefe, J. D., 1983, *J. Geophys. Res.* 88, A799.
- [24] Klumov, B. A., 1999, *JETP Lett.* 70, 363.
- [25] O'keefe, J. D. and Ahrens, J. T., 1989, *Nature* 338, 247.
- [26] Pope, K. O. et al., 1994, *Earth Planet. Sci. Lett.* 128, 719.
- [27] Pope, K. O. et al., 1997, *J. Geophys. Res.* 102, 645.
- [28] Tajika, E., 2007, *Earth Planet. Space* 59, 293.
- [29] Tajika, E., 2008, *ApJ*, 680, L53.
- [30] Abe, Y. et al., 2005, *Icarus* 178, 27.
- [31] Abuku, K. and Abe, Y., 2008, *Proc. ISAS LPS*.
- [32] Ida, S. and Lin, D. N. C., 2005, *Apj.* 626, 1045.
- [33] Leger, A. et al., 2004, *Icarus* 169, 499.