ドライな還元地球の誕生と大気海洋成分の 二次的付加で説明される ABEL モデルと、 生命惑星誕生における ABEL 爆撃の重要性

丸 山 茂 徳^{*,**} 戎 崎 俊 一^{***} 丹 下 慶 範^{****}

ABEL Model of the Two-step Formation of the Earth and the Significance of ABEL Bombardment to Produce a Habitable Planet

Shigenori MARUYAMA^{*,**}, Toshikazu EBISUZAKI^{***} and Yoshinori TANGE^{****}

[Received 8 August, 2017; Accepted 27 July, 2018]

Abstract

In the recently proposed ABEL model, the Earth was born as a dry planet without atmosphere and ocean components at 4.56 Ga. From 4.37 to 4.20 Ga, bio-elements, such as carbon (C), hydrogen (H), oxygen (O), and nitrogen (N), were secondarily accreted on the Earth. This two-step formation model of the Earth is referred to as the advent of the bio-elements model (ABEL Model) and the event of the advent of bio-elements (water component) is referred to as ABEL Bombardment. It is evident that the solid Earth originated from enstatite chondrite-like dry material because of its oxygen isotopic composition and similar isotopes. On the other hand, the Earth's water originated primarily from carbonaceous chondrite material based on the hydrogen isotopic ratio. The ABEL model successfully explains this enigma between solid Earth and water. In addition, the importance of the secondary accretion of oxidizing bio-elements should be emphasized because this event became a precursor to initiating the metabolism for life to emerge on a highly reductive planet. If ABEL Bombardment had not occurred, life would never have emerged on the Earth. Therefore, ABEL Bombardment was one of the most important events for this planet to evolve into a habitable planet. Moreover, ABEL Bombardment is thought to be the trigger to switch from stagnant lid tectonics to plate tectonics on this planet because of the injection of volatiles into the initial dry Earth.

Key words : origin of the Earth, formation of the Earth, origin of terrestrial water, planetary formation theory, origin of life

キーワード : 地球の起源, 地球の誕生, 地球の水の起源, 地球形成モデル, 生命の起源

* 東京工業大学地球生命研究所

** ノボシビルスク大学

*** 理研

**** 高輝度光科学研究センター

* Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8551, Japan

** Novosibirsk State University, Pirogova 1, 630090, Russia

*** RIKEN, Wako, 351-0198, Japan

**** Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo, 679-5198, Japan

I. はじめに

地球の水、あるいは海洋の起源はいったい何か？ 古代より、地球の水の起源は地球内部にあるという考えを人々はおもっていた。これは観察事実に基づく発想で、地球内部から噴き出すマグマに水分が含まれていることに起因している。もちろん、地球の内部に存在する含水鉱物から水が供給されることに疑いの余地はない。そこで、地球の水の起源は地球内部にあり、それらがマグマとともに地球表層に湧出し、時間とともに次第に水が増加して海洋が形成されたのではないかと人々は考えた。

マグマの成因論と変成岩の研究によって、地球の水はマグマとともに一方的に地表に集積したのではなく、逆に、プレートによって地球内部にも運ばれ、それらのバランスによって表層海洋の増減が引き起こされていることがわかった。Maruyama and Liou (2005) は、地球表層の水（海洋）は、約 6 億年前以降になってはじめて、プレート沈み込み帯から地球深部のマントル遷移層（410–660 km 深度）に含水鉱物として運びこまれるようになり、海洋質量は厚さに換算して約 600 m が現在までに減少したことを地質学的な証拠から示した。しかし、先カンブリア時代の海洋質量、とくに地球形成時の水の起源が何なのかは、いくつかの学問領域で活発に議論されてきたが、結果的に不明のままもた越された問題である。

この問題に大きな転機を与えたのが Maruyama and Ebisuzaki (2017) による ABEL モデルの提案である。ABEL モデルとは、地球はもともと大気・海洋のないドライな岩石惑星として誕生したあと、二次的に揮発性成分を多く含む隕石が降り注ぐことによってドライな地球に水をもたらした、結果的に大気・海洋が生まれたことを提案した地球形成の二段階モデルである。ABEL モデルは、過去に提案されてきた地球形成モデルでは説明のできない事象を具体的に説明し、かつ生命惑星へと進化する惑星のシナリオを提示している。本稿では、Maruyama and Ebisuzaki (2017) の解説を中心とし、地球が生命を育む惑星になり

えた原因を探るとともに、今後の研究の方向性を導く。

II. 地球形成モデルの研究史

地球形成モデル、あるいは地球の初期進化モデルは、複数の学問分野で研究が進められてきた。ここでは、代表的なものを要約しておく。

1) 惑星形成理論分野

惑星形成理論の研究者たちは、地球は、固体地球、大気、海洋がともに同時に誕生したと漠然と考えてきた。古典的地球形成モデルは、Safronov (1969, 1972) や Hayashi *et al.* (1985) によって提案され、固体地球の形成時に内部にあった揮発性成分が惑星形成の進行とともに脱ガスして大気と海洋が生まれたと考えた。現在も、惑星形成理論分野のほとんどの研究者はこの考え方に沿っている（図 1）（Fanale, 1971; Matsui and Abe, 1986; Zahnle *et al.*, 1988, 2007; Ikoma and Genda, 2006）。

専用計算機の開発が進むと、N 体計算に焦点をあてた数値計算研究も進んだ（Kokubo and Ida, 1995; Ida *et al.*, 2001）。そして、近年では、Nice モデル（例えば、Desch, 2007）や Grand Tack モデル（Walsh *et al.*, 2011）が提案されている。最新のモデルである Grand Tack モデルとは、巨大ガス惑星である木星が 3.5 AU の位置で誕生したあと、周辺の氷小惑星を伴って太陽系内側に移動し、その際に地球などの太陽系内側の岩石惑星に水を供給したと説明するモデルである。しかし、彼らのモデルにおける問題点は、化学的な条件がまったく考慮されていないことである。そのために、氷や有機物（< 0°C）を大量に含むアステロイドが、スノーラインのはるか内側である水星軌道のさらに内側まで移動し、かつ、そこで安定して存在し、大気・海洋成分を岩石惑星に供給するという化学的に「ありえない」モデルとなっている。太陽に近づくと彗星が消滅してしまう例から明らかなように、スノーラインの内側で氷小惑星が安定して存在することは困難である。そうした化学的条件を考慮せず、物理的側面しか議論していない点が、このモデルの惑星形成理論にお

図 1 惑星形成論研究者らによる地球の誕生プロセス。母天体から、成層構造をもつ地球になるまでの誕生プロセスの概略図である。45.3 億年前までには、大気・海洋をもつ地球が誕生した。現在の地球半径を 1 MRE (mean radius of the Earth) とすると、0.3 MRE の頃にはすでに大気があり、段階的な分化が進んでいた。0.5 MRE はほぼ火星サイズで、表層にはマグマオーシャンが生まれただろう。0.7 MRE になると、コアが分離し、45.3 億年前にジャイアントインパクトが起き、その後、海洋が再出現した (図は Abe (1995) に一部加筆修正した)。

Fig. 1 Formation process of the Earth according to planetary scientists. Schematic of the process forming a layered Earth from an asteroid. Step-wise differentiation occurred at 0.3 MRE (mean radius of the Earth) (keeping atmosphere), 0.5 MRE (Mars) (initiation of magma ocean on the surface), and 0.7 MRE (segregation of core), giant impact at 4.53 Ga, and the re-emergence of the ocean shortly thereafter. Figure modified after Abe (1995).

ける不足点である。また、彼らのモデルでは、そもそも地球に落ちてきた隕石がミリメートルからセンチメートルのスケールで超高温物質のコンドリュールを含み、さらに低温 (< 0℃) で合成された有機物をも含む集合体であることをまったく説明できない。つまり、小惑星帯に現存する化学分帯 (小惑星帯内側から外側に向かって化学組成が還元的なものから酸化的なものへと変化する (図 2) の存在やその形成理由を具体的に説明す

ることができない (Maruyama and Ebisuzaki, 2017; Ebisuzaki and Imaeda, 2017)。自然界の現象を説明するモデルは物理的、化学的、あるいはそのほかのさまざまな視点からの反証に耐えう必要がある。この点で、Grand Tack モデルはすでに反証によって否定されているといえる。

2) 隕石学分野

隕石学は、Urey (1952) や Anders (1964), Ringwood (1959, 1966) によって牽引されてき

図 2 隕石学者らが考えた惑星誕生のシナリオ。原始惑星系円盤から鉱物が凝縮し、太陽に近い側でより還元的な岩石惑星が成長し、惑星形成後期になって酸化物質が付加したと考えた (Smith, 1982)。

Fig. 2 Formation process of planets according to astrolithologists. Top figure shows the relation between meteorites and a solar nebula with monotonic variations of temperature and oxidation state. Smith (1982) explained that a reductive material was accreted at the inner side of the solar system, and an oxidized material gradually increased at a later stage of planetary formation. Meteorite symbols: Au aubrite, RI reduced iron (i.e., Si alloyed with Fe).

た長い研究の歴史をもつ研究領域のひとつで、コンドリュール（隕石に含まれる球状のミリメートルサイズの粒子）を含むコンドライトの分類からはじまった学問である (Urey and Craig, 1953)。始原的コンドライトは、非平衡状態における原始星雲物質の集合体であり、基本的に、さまざまな小石（礫）が周辺の砂や泥と一緒に固まってできた礫岩である。これらのコンドライトは、カルシウムとアルミニウムを非常に多く含んでいる CAI と呼ばれる高温（2000℃）起源の物質を含むこともあれば、温度 1000℃ 以上で形成されたコンドリュールや、100℃ 以下で形成された粘土鉱物、さらには、アミノ酸や簡単なたんぱく質のような 0℃ 以下の低温で合成された有機物質をマトリックスに含んでいる。したがって、始原的コンドライトが形成されたのは、0℃ 以下の惑星間空間である。コンドライトには、酸化的なもの

と還元のものがあり、もっとも還元なものをエンスタタイトコンドライトと呼び、逆にもっとも酸化的なものを炭素質コンドライトと呼ぶ。木星の内側から火星の外側に位置する小惑星帯（2-5 AU）は、こうしたコンドライトと小惑星（直径最大約 1000 km）、さらに、それらが衝突し破壊されてできた隕鉄やグラニュライト相の変成岩などを含む隕石母天体から形成されている。そして、太陽に近い領域にはエンスタタイトコンドライトが多く、太陽から遠ざかるほど揮発性成分を多く含む炭素質コンドライトが多く存在している（図 2）。コンドライトのマトリックス部分は、形成時の温度を基本的に示し、太陽からの距離の関数となっている。このような観察事実に基づき、隕石の研究者たちは、地球の形成は還元的な物質の付加や集積にはじまり、次第に揮発性成分を含む酸化的物質が、成長する惑星のより外側に

付加し、最終的に大気・海洋をもつ地球が誕生したと考えた (Ringwood, 1977, 1979; Ringwood and Kesson, 1977; Wänke, 1981; Wänke and Dreibus, 1988)。

一方では、地球マントルに含まれる親鉄元素の高い含有量を説明するために、炭素質隕石による重爆撃があったとするレイトベニア説が提案され (Anders, 1968)、これを論じてきた。最近になって Albarède (2009) がこの形成モデルに年代学的データを導入し、レイトベニアが約 42 億年前に起きたと説明した。しかし、レイトベニアという事象が生命惑星地球の進化のうえでどのような意味をもつのかという本質的意味にまで深く掘り下げることはできなかった。

3) 同位体分析分野

科学技術の進歩によって同位体比分析装置が開発されると、シカゴ大学の Clayton とその同僚たちは、さまざまな隕石の酸素同位体組成比を分析し、固体地球の酸素同位体組成比と比較することによって、地球の起源物質がエンスタタイトコンドライトのものとはほぼ同じで、炭素質コンドライトとは異なることを明らかにした (Clayton *et al.*, 1984; Clayton and Mayeda, 1996)。その後、分析装置の開発・発展とともに、地球の起源物質がさまざまな元素の同位体によって議論されるようになり、同位体に関するデータが徐々に蓄積されていった。例えば、Pb 同位体に関しては Albarède (2009)、Ti 同位体は Zhang *et al.* (2012)、Sr 同位体は Moynier *et al.* (2012)、S 同位体は Labidi *et al.* (2013)、Pd-Ag の系統分類は, Schönbachler *et al.* (2010)、Hf-W の系統分類は, Willbold *et al.* (2011)、Touboul *et al.* (2007, 2012, 2015)、Kruijer *et al.* (2015)、Ru-Mo 同位体については Dauphas *et al.* (2004) や Fischer-Gödde *et al.* (2015) などである。こうして、酸素同位体比だけでなく、多くの元素の同位体比に基づいて、1 AU 付近にあった地球始原物質の化学組成を推定する試みがはじまった。

4) サンプルリターン計画や観測による分析

さらなる技術発展は、太陽系惑星空間におけるサンプリングや地上からの観測を可能にした。例

えば、はじめてのサンプルリターン計画としては、探査機スターダストが宇宙塵を宇宙空間からもち帰り、探査機ジェネシスはディスカバリー計画の一環で太陽風に含まれる粒子を地球にもち帰った。また、同じくディスカバリー計画の一環で打ち上げられた探査機ディーピンパクトは、対象となる彗星に衝突体を打ち込み、その衝突によって飛散する塵などから彗星の調査に貢献し、これらは NASA によって主導された。これらのミッションで獲得された具体的なデータ例をあげると、ハレー彗星 (Balsiger *et al.*, 1995; Eberhardt *et al.*, 1995) や、ヘールボップ彗星 (Meier *et al.*, 1998)、ガラッド彗星 (Bockelee-Morvan *et al.*, 2012) などがあげられる。このような観測技術の充実に伴って、太陽大気や彗星の D/H が測定され、地球の水の D/H 値は太陽大気や彗星とは異なり、小惑星帯の炭素質隕石のものとはほぼ同じであることが確定した。こうして、地球の水の起源は小惑星帯の外側に起源をもつ炭素質コンドライトであることが明らかになった (Eberhardt *et al.*, 1995; Geiss and Gloeckler, 1998; Lécuyer *et al.*, 1998; Robert, 2001)。しかし、この結果は、固体地球がエンスタタイトコンドライト起源であることを示した酸素同位体組成比とは矛盾するものとなり、地球の形成プロセスについては議論の余地を大いに残す結果となった。

III. 過去の研究から導かれている成果

1) D/H 値から導かれた地球の水の起源：炭素質コンドライト

地球の海洋水、湖沼の水、あるいは鉱物中やマントル鉱物に含まれる水などの D/H 値は $(149 \pm 2) \times 10^{-6}$ である (Lécuyer *et al.*, 1998)。他方、45 億年前の太陽大気から得られる D/H 値は $(21 \pm 5) \times 10^{-6}$ であり (Geiss and Gloeckler, 1998)、彗星の D/H 値は 300×10^{-6} であると推定されている (Eberhardt *et al.*, 1995)。炭素質コンドライトの D/H 値の分析によると、その値は 130×10^{-6} から 150×10^{-6} の範囲であり (図 3)、地球の水に含まれる水素の D/H と非常に近い値を示すことがわかっている。ただし、炭素質隕石の

図 3 水素同位体比から推定した地球の水の起源。地球の水がもつ D/H 値は、炭素質コンドライトのものとはほぼ同じであり、45 億年前の太陽大気や彗星の D/H 値とは大きく異なっている (Robert (2001) を一部修正)。つまり、地球の水の起源は炭素質コンドライトであるといえる。

Fig. 3 Origin of water on the Earth. The D/H of the Earth's ocean approximates the value of carbonaceous chondrite, while being distinct from analyzed D/H of either the solar atmosphere at 4.5 Ga or of a comet (Robert, 2001).

D/H のなかには 300 といった極端に高い値を示すものもあり、これらはオールトの雲のどこから何等かの理由でもたらされたものではないかと考えられている (Eberhardt *et al.*, 1995)。このような例外があるにせよ、全般的な分析結果からみて、地球の水は、小惑星帯外側の炭素質隕石に起源があることは、ほぼ疑いの余地がない (Robert, 2001) (図 3)。

もし、地球の水が地球形成の最初期からあったものだとすると、それは原始太陽系星雲内部に存在していた水素ガスに起源をもつことになる。その場合、地球形成初期に表層を覆ったマグマオーシャンが固化した際に、地球内部から抜け出し海洋をつくったと考えることも可能かもしれない。しかし、地球の水の D/H の値をみると、太陽原始星雲由来の水素ではないことは確実である。なぜなら、太陽風の D/H は、地球の D/H と大きく違うからである。つまり、地球誕生時にすでに大気・海洋があったとは考えられないことになる。

2) 酸素同位体比から導かれた固体地球の起源： エンスタタイトコンドライト

長い間、地球の起源物質は炭素質コンドライト

であると考えられてきた (Latimer, 1950; Urey, 1952)。その理由は、大気・海洋成分の起源を説明するためには、炭素質隕石である方が合理的だからということにある。しかし、もし地球が炭素質隕石だけから形成されたとすると、地球は大容量の海洋をもつことになってしまう。炭素質隕石の含水量は 2% から 20% と非常に多様であるが、仮に、含水量 2% の炭素質隕石が地球を形成したとして単純に計算しても、約 400 km 近い深さの海洋が地球を覆うことになる。ということは、含水量 20% の炭素質隕石で地球をつくった場合、地球は 4000 km 深度の海をもつことになり、炭素質隕石から現在のような地球ができたと考えer ことには無理がある。

決定的な証拠は、酸素同位体比から得られた。 $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の比である。地球の酸素同位体比は TF ラインと呼ばれる線上に乗る (図 4)。そして、炭素質隕石や普通コンドライト、R コンドライト (Rumuruti chondrite) などの酸素同位体比は TF ラインからは外れたところにプロットされるが、エンスタタイトコンドライトは TF ライン上に乗る。つまり、固体地球の起源は、エ

図 4 酸素の安定同位体比から推定した地球の起源物質。(左図) エンスタタイトコンドライトの酸素同位体比は、TF ラインに乗るが、それ以外の炭素質コンドライトや普通コンドライトは TF ラインから外れてプロットされる。(右図) 左図の一部を拡大したもので、月の酸素同位体比は TF ライン上にはほぼプロットされる。しかし、火星やベスタを起源を推定される HED 隕石とは異なる (Clayton (2003) と Krot *et al.* (2005) に加筆修正)。

Fig. 4 Oxygen isotopic composition. (Left) Plots of isotopic compositions of oxygen, in which case enstatite chondrite is plotted on the terrestrial fractionation (TF) line, while ordinary and carbonaceous chondrites are not. (Right) Plots of isotopic compositions of oxygen for Mars, the Moon, and Vesta. The Moon is plotted on the TF line corresponding to the Earth. Figure is modified after Clayton (2003) and Krot *et al.* (2005).

ンスタタイトコンドライトと考えるのが自然だ (Clayton *et al.*, 1984; Javoy, 1995; Claytn and Mayeda, 1999; Javoy *et al.*, 2010)。もう少し詳しくみていくと、地球の起源となったコンドライトの種類は EH コンドライトに近いということが示されている (Clayton and Mayeda, 1996; Javoy, 1998)。エンスタタイトコンドライトは、分光観測によれば、小惑星帯のもっとも内側である 2 AU 付近に位置しており (Kallemeyn and Wasson, 1986)、地球形成当時のスノーラインの位置が 2.7 AU であったことから判断しても、地球を形成した起源物質は完全に無水だったと思われる。

最近の研究において、Herwartz *et al.* (2014) は、月と地球の $\delta^{17}\text{O}$ におけるわずかな差異 ($\delta^{17}\text{O}_{\text{Moon}} - \delta^{17}\text{O}_{\text{Earth}}$) が 0.012‰ であり、かつ、エンスタタイトコンドライトの場合、 $\delta^{17}\text{O}_{\text{EC}} - \delta^{17}\text{O}_{\text{Earth}}$ が 0.050‰ であることも示した。そして、これらの差は、地球と月の形成過程の違いに原因があることを示唆した。しかし、月と地球がともに同様の形成プロセスをたどったとしても、起源

物質 (母天体) がすべてまったく同じであるということは考えにくい。つまり、さまざまな母天体の衝突の結果、その組成に微細な差異が現れたとしてもおかしいことではない。また、このような差異があるからといって、起源物質が主としてエンスタタイトコンドライトであることを否定することはできない。ただし、問題がないわけではない。EH 型のエンスタタイトコンドライトから地球が形成されたとすると、地球マントルと大陸地殻の主成分の化学組成に不都合が生じるからである (例えば、Kumazawa and Maruyama, 1994)。エンスタタイトコンドライトの金属鉄が地球のコアを形成すると、残りの成分である MgSiO_3 がマントルを形成する。以下の関係式 (1) からわかるように、マントルの化学組成をカンラン石と近似すると、マントルの 3 分の 1 (分子比) が大陸地殻 (SiO_2) となる。

しかし、実際の大陸地殻の質量は厚さに換算し

て 35/2900 km にすぎない。つまり、理論的な計算が実際の観測とあわないのである。これには論争があり、マントルは MgSiO_3 と主張する研究者 (Murakami *et al.*, 2007), さらにマントル遷移層 (410–660 km 深度) と D'' 層 (2600–2900 km) のなかに大量の原初大陸物質 (SiO_2) があると説明する研究者もいる。

一方では、酸素以外の元素の同位体組成比についても研究が進み、窒素 (Javoy and Pineau, 1983, 1991; Javoy *et al.*, 1984, 1986; Cartigny *et al.*, 1997), モリブデンとルテニウム (Dauphas *et al.*, 2004), オスミウム (Meisei *et al.*, 1996), 放射線誘発性の ^{53}Cr と放射線非誘発性の ^{54}Cr (Birck *et al.*, 1999; Trinquier *et al.*, 2007) などの詳細がわかりつつある。これらの研究の詳細については Javoy *et al.* (2010) によくまとめられているので参照していただきたい。このように、酸素を含むさまざまな元素の同位体組成比の研究成果からも、固体地球はエンスタタイトコンドライトに近い物質から形成されたことが支持される。

さらに、これらの分析結果に基づく考察において非常に重要なことは、同位体分析によって得られる数値は地球の形成モデルの検証材料として使えるが、それ以上のことを語ることはできないということである。いい換えると、分析結果は、地球形成過程における単なるスナップショットの情報を与えるのみであって、時間軸を入れた形成履歴や形成過程における条件を提案できる性質のものではない。

例えば、Dauphas *et al.* (2014) は、物質収支の計算から地球の同位体組成比は、エンスタタイト成分を 91%, 普通コンドライトを 7%, 炭素質隕石を 2% の割合として混合させることによって再現可能であることを導いた。つまり、地球の起源物質を複数の小天体の混合比として考えたのである。これは、一見して合理的にみえるが、実際には、見かけの混合比から惑星起源物質の付加過程を議論することはできない。なぜなら、1 AU (地球が誕生した位置) の場の始原物質の化学組成を推定するために、2–5 AU に残された始原的な小天体物質の同位体比の混合を根拠に説明する

ことは不自然であるからだ。

地球を形成した起源物質を解明するためには、理論的な予測がもっとも効果的なアプローチであろう。例えば、2 AU 付近ではすでに揮発性成分がないので、それよりさらに内側の岩石惑星も揮発性成分をもたないことは明らかである。しかし、ケイ酸塩鉱物や酸化物、硫化鉱物などの量比に違いがあるはずである。その差異は太陽からの距離 (エネルギー強度) と凝結鉱物種の安定性で決まるはずで、これらを明らかにすることによって、地球起源物質の理論的予測が可能である。

IV. 地球形成シナリオとしての ABEL モデルの提案

II 章でまとめたように、過去の研究で提案され、議論された地球形成モデルはいくつかある。しかし、第 III 章で述べたように、固体地球の起源物質はエンスタタイトコンドライトを主体としていること、また、地球の水の起源は炭素質コンドライトであるのは明らかである。2 つの端成分であるエンスタタイトコンドライトと炭素質コンドライトがどのような過程で地球を形成するのかは、地球の起源を議論する際にもっとも難関で不可解な点だった。以下では、そのような矛盾を解決するモデルとして提案された ABEL モデルを詳しく解説する。

1) 第一ステップ：ドライな地球の形成

地球が形成された時期のスノーラインの位置はおよそ 2.7 AU の場所で、地球軌道はスノーラインのもっと内側にあった。スノーラインの内側では水成分は存在しえないので、地球形成の材料物質はエンスタタイトコンドライトに類似した物質だったはずである (図 5)。したがって、45.6 億年前に誕生した地球は、大気・海洋をもっていなかったと考えられる。つまり、地球は非常に還元的な「裸の」惑星として誕生した (Maruyama *et al.*, 2013)。

地球のマグマオーシャンの固化が進むと、マントルを構成する岩石成分としてとり込まれにくいリンやウランなどの元素は、マグマオーシャンの最終残液に濃集した。それらの元素は、地球表層

図 5 太陽系の惑星形成前の原始惑星系円盤内部の化学累帯構造を決めた鉱物アイソグラッドの分布。原始惑星系円盤内部では、太陽からの距離の関数として化学累帯構造があったと考えられる。そこでは、さまざまな物質境界が存在し、2.7 AU のスノーライン (Hayashi, 1981) と同様に、粘土鉱物線 1.8-1.9 AU、有機物線 2.1 AU (Kouchi *et al.*, 2002)、CO₂ ライン 10 AU、CO ライン 40 AU (Öberg *et al.*, 2011; Schwarz and Bergin, 2014) が存在すると考えられる。注意したいのは、含水鉱物の安定境界は 1.8-1.9 AU であり、地球軌道の 1 AU からはるかに外側にあるということである。したがって、地球の起源物質は還元的なエンスタタイトコンドライトを主体とする物質だったと考えられる。

Fig. 5 Progressive chemical zonation of the Solar System at ca. 4.56 Ga. Progressive chemical zonation of proto-planetary mineral dusts in the nebula disc is seen as a function of distance from the Sun (AU). Organic matters at 2.1 AU (Kouchi *et al.*, 2002), snowline at 2.7 AU (170 K) (Hayashi, 1981), CO₂ at 10 AU, and CO at 40 AU are shown (Öberg *et al.*, 2011; Schwarz and Bergin, 2014), with a clay mineral line assumed to occur at 1.9 AU. Note that the inner stability limit of the hydrous phase is at 1.8-1.9 AU. The major rock type of proto-Earth was enstatite chondrite-like, as inferred from the oxygen isotope ratio, but in reality plus Ca and Al- and Mg-components are also necessary (Javoy *et al.*, 2010).

でシュライバーサイト (Fe₃P) やウラン鉱物などの超還元鉱物として大陸地殻に普遍的に存在していたと考えられる。そのような初期冥王代の大陸地殻は、現在の月の表層に残存する 45.5-40 億年前の大陸地殻のそれと酷似していたはずである。こうした過程を経て、地球のマグマオーシャンは 45.3 億年前までには固化し、核、マントル、地殻といった層状構造が形成されたと考えられる (Borg *et al.*, 2015)

ここでひとつ注意しておきたいのは、地球を形

成したと考えられる物質は、厳密には、1 AU に存在していたエンスタタイトコンドライト的な物質であり、その化学組成は 2 AU 付近にあるエンスタタイトコンドライトとは異なっていたはずだということである。1 AU にあった地球の起源物質を厳密に引用するために、本論ではこれ以降、地球を形成したエンスタタイトコンドライト的物質を EN (1 AU) と表記することにする。

2) 第二ステップ：生命構成元素（大気・海洋成分）の降臨（ABEL）とハビタブルトリニティ惑星の誕生

43.7 億年前になると、大量の炭素質隕石が還元的地球に降り注ぎはじめた。この現象は、木星や土星といった巨大ガス惑星の重力散乱が原因で起きたと考えられる（Nesvorný, 2011; Cloutier *et al.*, 2015）。炭素質隕石の組成をもつ氷小惑星の飛来は、ドライな還元地球にはじめて酸化物質をもたらした（Albarède, 2009; Maruyama *et al.*, 2013; Maruyama and Ebisuzaki, 2017）、強い化学非平衡が生じて、還元物質と酸化物質の間の化学反応が自発的にはじまった。これこそが、生命誕生へとつながる前駆的化学進化の原点だった。というのも、もし地球が誕生当初から水で覆われていたとすると、表層環境はすでに酸化状態になってしまう。例えば、化学的に酸化的な状態ではリン化合物の非平衡連続反応は起きない。リンが連続反応するためには、還元的リン鉱物が必要である（Pasek *et al.*, 2007, 2008）。この点で、還元的な固体地球に二次的に大気・海洋成分が降り注

ぐことが非常に重要である。ちなみに、Pasek *et al.* (2013) は、シュライバーサイト (Fe_3P) はエンスタタイトコンドライトのような還元隕石に起源があると考えている。

こうして大気・海洋成分がもたらされると、生命誕生に必要な生命主要構成元素 C, H, O, N が原始地球上ではじめて準備され、それに加えて固体地球（原初大陸）から栄養塩が供給される。これがハビタブルトリニティ環境（大気・海洋・大陸の共存）の基本であり、この環境なくして生命誕生はありえない（Dohm and Maruyama, 2015）。

3) ABEL モデルと ABEL 爆撃

III 章 1) 節と 2) 節で述べたように、地球は二段階で形成されたとするこのモデルは、生命の主要構成元素である C, H, O, N がドライな地球に二次的に付加することの重要性を考慮して「Advent of bio-elements（生命構成元素の降臨）」、略して ABEL モデルと名づけられた（図 6）（Maruyama and Ebisuzaki, 2017）。そして、大気・海洋成分を付加する炭素質コンドライトの飛

図 6 地球形成の二段階モデルである ABEL モデル。地球は、無大気・無海洋の還元的岩石惑星として誕生し、その後二次的な大気・海洋成分の付加によって現在の姿になった。

Fig. 6 ABEL model as a two-step formation of the Earth. At 4.53 Ga, the Earth formed as a dry planet dominated by enstatite chondrite-like source materials; then, secondary accretion of carbonaceous chondrite-like material occurred mainly between 4.37 Ga and 4.20 Ga, which was named ABEL Bombardment. The ABEL Bombardment event delivered bio-elements to the Earth to make a habitable planet.

来がなければ、地球は現在のような大気と海に包まれた惑星にはなりえず、ゆえに生命誕生も不可能だった。そこで、この隕石爆撃を生命惑星地球を誕生させるうえでもっとも重要なイベントと位置づけ、これを ABEL 爆撃 (ABEL Bombardment) と名づけた。ABEL 爆撃は、無水の岩石惑星がハビタブルプラネットとなるためにはもっとも重要なできごとである。生命惑星をつくるための隕石爆撃の位置づけを、このようにはっきりと定義づけしたのは、ABEL モデルがはじめてであり、それ以前から議論されてきた後期重爆撃 (LHB) やレイトベニア仮説とは本質的に異なることに注意したい。

さらに、ABEL モデルが示したもうひとつの重要な点は、ドライな岩石惑星が一度できたあと、原始惑星形成プロセスとは完全に無関係な時期 (約 2 億年後) に、二次的に大気・海洋成分が付加されたと説明したことである。そして、この二段階のプロセスこそが生命惑星へ進化するための原始代謝 (リンの化学反応) を招き、それゆえに重要であることを強調した。過去の研究にあるように、Ringwood や Wänke らが説明してきたモデル (例えば、Wänke and Dreibus, 1988) は、エンスタタイトコンドライトと炭素質コンドライトという端成分をもつ隕石の比率が時間とともに徐々に変化していくことによって、大気・海洋をもつ惑星になったとしたが、彼らには不連続的な二段階形成という概念はまったくなかった。Albarède (2009) は、レイトベニア説に年代分析データを組み合わせ、炭素質隕石の飛来は約 44 億年前にはじまったと説明したが、彼のモデルの根幹にあるのは Ringwood や Wänke の提案した地球形成プロセスであり、地球誕生から連続して起きた揮発性成分の付加をもって地球の誕生 (地球形成の完了 (45.6-44.0 億年前)) だとみなしている点で、ABEL モデルとは本質的に異なる。

V. ABEL モデルを支持する証拠

1) レイトベニアあるいは LHB の年代学： ABEL 爆撃としての再定義

冥王代、あるいは太古代の初期の頃に、宇宙

から隕石が飛来したという考え方は、基本的に 2 つの違った視点からのアプローチで研究されてきた。それが、レイトベニア説と後期隕石重爆撃説 (LHB) である。

レイトベニア説は、地球のマントルに含まれる白金族元素の含有量についての研究から出てきた考えである (Anders, 1968)。白金族元素は親鉄元素なので、鉄の存在ときわめて強い相関関係を示し、地球形成時に存在していた白金族元素はほぼすべて鉄と一緒にコアに分配されると考えられている (Ringwood, 1966; Ringwood and Kesson, 1977)。しかし、白亜紀などの若い時代に lamproite magma (揮発性成分の膨張によってマントルから高速で上昇してくるマグマ) が運ぶマントルかんらん岩の白金族元素含有量は非常に高い (Becker *et al.*, 2006)。このことは、地球のコアが分離したあとに、親鉄元素が二次的にマントルに付加したことを示唆している。そこで提案されたのがレイトベニア説であり、地球のマントルペリドタイトの白金族元素の高い含有量を説明しようとした。近年になって Albarède (2009) は、U-Pb と I-Xe 年代法を利用して、レイトベニアイベントが 44 億年前に起きたと結論づけた。

後期隕石重爆撃 (LHB) という考え方は、アポロ計画による月のリターンサンプルをもとに進んだ研究から出てきた考え方である。Schaffer and Schaeffer (1977) は、アポロ 14, 16, 17 が着陸地点からもち帰ったサンプルの K-Ar 法による年代分析を行い、cataclysm と呼ばれる月の隕石重爆撃のピークの時期は 39-40 億年前であるとした。しかし、最近の年代学研究によれば、月の重爆撃の年代モデルについて次の 6 つが提案されている。(a) Neukum and Ivanov (1994) や Neukum *et al.* (2001) は指数関数的な隕石爆撃減衰モデルを提唱、(b) Tera *et al.* (1974) は、継続的爆撃だがいくつかの目立った重爆撃時期があるとするモデルを考え、(c) Morbidelli *et al.* (2012) は、41 億年前にピークをもつのごぎり型爆撃減衰モデル、(d) Ryder (1990, 2002) や Zahnle *et al.* (2007) は、LHB と呼ばれる後期隕石重爆撃モデル、(e) Nemchin *et al.* (2009,

2010) や Taylor *et al.* (2009) は、月のリターンサンプルのレゴリス中の大量のジルコンを用いた年代分析の結果によるモデル、そして、(f) Hopkins and Mojzsis (2015) による、レゴリス中のジルコンの $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代頻度分布の集積データと前述(5)を比較したモデル、である(図7)(詳細は Hopkins and Mojzsis (2015) ならびに各論文を参照していただきたい)。

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代は非常に精度よく年代が決まることから、Hopkins and Mojzsis (2015) の示した爆撃頻度分布とそのピーク年代は LHB の正しい年代を示しているといっていよう。重爆撃

によって、月面にあった岩石は、激しい衝撃とともに、一部は一瞬にして溶融、あるいはガス化し、温度が 1600°C 以下になるとメルトから再結晶しただろう。あるいは、溶融を経験しなくても、超高温にさらされることによって、ジルコンの U-Pb 年代のリセットが容易に起きたと考えられる。月の表層が無数の隕石重爆撃にさらされ、レゴリス層が激しく攪拌されたことを考えると、重爆撃の年代はジルコンの年代頻度分布に対応するだろう。

Borg *et al.* (2015) と Hopkins and Mojzsis (2015) のデータによれば、LHB の正確な年代

図7 ABEL 爆撃の時期。ABEL 爆撃の時期は、およそ 43.7–42.0 億年前だと考えられる。Hopkins and Mojzsis (2015) によれば、LHB の時期は、これまでにいわれてきた 3.8–4.0 億年前ではなく、43.7–42 億年前である。図中の a から f はこれまでに提案された後期重爆撃の時期をまとめたものである。(a) Neukum and Ivanov (1994) や Neukum *et al.* (2001) は指数関数的な隕石爆撃減衰モデルを提唱、(b) Tera *et al.* (1974) は、継続的爆撃だがいくつかの目立った重爆撃時期があるとするモデルを考え、(c) Morbidelli *et al.* (2012) は、41 億年前にピークをもつこぎり型爆撃減衰モデル、(d) Ryder (1990, 2002) や Zahnle *et al.* (2007) は、LHB と呼ばれる後期隕石重爆撃モデル、(e) Nemchin *et al.* (2009, 2010) や Taylor *et al.* (2009) は、月のリターンサンプルのレゴリス中の大量ジルコンを用いた分析の結果によるモデル、そして、(f) Hopkins and Mojzsis (2015) による、レゴリス中のジルコンの $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代頻度分布の集積データと前述(e)を比較したモデル、である。

Fig. 7 Period of ABEL Bombardment. The newly proposed ABEL Bombardment occurred roughly between 4.37–4.20 Ga. According to a recent analysis by Hopkins and Mojzsis (2015), the actual age of the LHB is 4.37–4.20 Ga, rather than the commonly cited age of 3.8–4.0 Ga. (a) exponential decay model (Neukum and Ivanov, 1994; Neukum *et al.*, 2001), (b) multiple cataclysms as several distinct bombardment episodes (Tera *et al.*, 1974), (c) sawtooth cataclysm having peak bombardment at 4100 Ma (Morbidelli *et al.*, 2012), and (d) unimodal cataclysm known as LHB (Ryder, 1990, 2002) (refer to Zahnle *et al.*, 2007). Recently, Hopkins and Mojzsis (2015) analyzed a large number of zircons from lunar samples and showed (f) cumulative age-frequency plots of Apollo 14's zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, compared to (e) previously determined zircon ages by Nemchin *et al.* (2009, 2010) and Taylor *et al.* (2009).

は、冥王代の中期にあたる 4.37–4.20 Ga の時期に 90% が集中し、その後、3.9 Ga までに複数の小ピーク（10%）があると結論づけることができる。これまで提案されてきた LHB の年代が 3.8–4.0 Ga であることと最近のジルコン年代とを比較すると、正しい LHB 年代はもっと古いということになる。こうした新たなデータに基づくモデルは、K–Ar 年代法がほかの方法に比べて、一般的に数億年若い年代を示す傾向があることを考慮すると、これまでいわれてきた LHB の年代については再考する必要がある。

ここで、もう一度、レイトベニアと LHB というモデルを確認しておく。レイトベニアは地球マントルに含まれる白金族元素を説明するために提案されたモデルであり、一方、LHB は月の年代学の研究から提案されたモデルである。もともと別の着眼点から提案されたモデルではあるが、これら 2 つのモデルが意味している事象は同一イベントであるといえるだろう。そして、その正確な年代については、精度が高い Pb/Pb 法で解析をした Borg *et al.* (2015) と Hopkins and Mojzsis (2015) のデータを採用すべきである。

この隕石爆撃イベントと ABEL モデルを組み合わせると、ドライな岩石惑星に炭素質隕石が飛来する隕石爆撃イベントは、生命惑星としての進化がはじまる最初の重要なイベントであることを認識することができる。このような重要性を強調し、かつそれ以外の提案と区別するために、「ABEL 爆撃」として再定義した点は、生命と地球の歴史を論じるうえで大きな意味をもつ。

ここまで整理された地球の起源シナリオを復習しておこう。およそ 45.6 億年前に太陽系が誕生し、塵が集積することで直径 1–10 km 程度の微惑星が形成した。微惑星は衝突・合体することで原始惑星へと成長し、さらに原始惑星同士が合体することで、地球型惑星が形成された。太陽系誕生の数千万年後には、地球の集積とコア形成が完了したと考えられている。45.3 億年前までに地球のマグマオーシャンは固化し、大気・海洋のない還元的な地球が誕生した。43.7 億年前になると、巨大ガス惑星の重力散乱効果によって小惑星帯外

側から炭素質隕石が太陽系内側へもたらされ、これが ABEL 爆撃として地球や月などの太陽系内側の岩石惑星に降り注ぐことになった（例えば、Weidenschilling and Marzari, 1996）。ABEL 爆撃はおもに 42 億年前まで継続し、1.7 億年をかけて大気と海洋が徐々につくられていった。

2) ジルコンの酸化還元状態からわかる ABEL 爆撃によるマントルの酸化

ABEL モデルを支持する観察事実としてほかにもあげられるのは、Yang *et al.* (2014) が示した地球のジルコンの酸化還元状態の経年変化である（図 8）。彼らの分析値は、冥王代ジルコンが 44 億年前から現在までの間にホストマグマから晶出したジルコンの Ce^{3+} と Ce^{4+} の比を利用して酸化還元状態の変化を示している。それによると、過去 35 億年間はセリウムの酸化還元比は 20 から 500 の間の値を示すが、冥王代の間は平均して 2 から 20 の値を示している。つまり、酸化還元状態が 44 億年前と 35 億年前の時期では約 1 桁変わっている。これは、冥王代から太古代前期にかけてジルコンのホストマグマが急激に酸化になったことを示している。そして、酸化物質としての揮発性物質、とくに水の成分が 44 億年前以降にマントル内部に次第に蓄積されていったことも示唆している。Robert *et al.* (1992) は、酸素同位体組成の点からみると、地球誕生後の時間の経過とともに、表層とマントルの間での物質循環がよく進み、成分が徐々に均一化していったことを説明した。これらのことは、本論で述べた ABEL モデルと調和的な観察事実の一つである。

図 8 下図は、43.7–42.0 億年前までの間に起きた ABEL 爆撃時の地球内部断面図のイメージを描いたものである。揮発性物質を含む小惑星や巨大隕石が地球に衝突すると、飛来した小惑星も、衝突が起きた地球側の部分も、ともに衝撃によって瞬間的にガスになり、原始大気の一部となる。この過程で、無水だった岩石惑星地球の形成物質は徐々に酸化されていくのである。隕石の衝突によって、地球側にはクレーターが形成され、その大きさは数 km から数 1000 km に匹敵するものでさまざまな大きさだと考えられる。冷却が進むと、

図 8 地球における酸化物質の蓄積。(上図左) ジルコンのカソードルミネセンス像 (Wilde *et al.*, 2001). ジルコンの一部は 44 億年 ± 400 万年の年代を示しているが、42 億年前という若い年代を示している部分もある。(上図右) ジルコンの Ce³⁺ と Ce⁴⁺ の比を利用して酸化還元状態の変化を示した図 (Yang *et al.*, 2014). 冥王代から太古代前期にかけてジルコンのホストマグマが急激に酸化的になったことを示している。(下図) 上部マントルの加水と白金族元素の増加の様子。巨大隕石の衝突によってマントル内部に水が供給され、マントル対流を通じて徐々にマントル全体が加水される。

Fig. 8 Accumulation of oxidized material. (Top left) Cathodoluminescence image of zircon by Wilde *et al.* (2001). The image shows part of a zircon dated at 4.40 ± 4 million years old, while other parts show younger ages with some approaching 4.20 Ga. (Top right) Chondrite-normalized Ce-anomalies of zircons by Yang *et al.* (2014), which indicate the redox state of the mantle of the Earth, which had gradually oxidized over time (indicated by red circle). (Bottom) Hydration of the upper mantle and accretion of platinum group elements (PGEs). The underlying mantle is hydrated due to large asteroid impacts. Following bombardment, hydration occurs at local to regional scales, so the hydrous upper mantle is distributed heterogeneously (stippled part of figure). Through mantle convection, the whole mantle is oxidized, as shown by zircon analysis.

衝突によってできたガス成分は次第に結晶化し、サブミクロンからミリメートルサイズの細かいガラス粒子や微結晶となり、地球表層に降り積もった。一方で、隕石衝突時に与えられた熱エネルギー

ギーは固体地球に吸収された。より激しい衝突が起これば、それによって与えられた熱によって上部マントルは対流を起こし、クレーター直下ではマントルリバウンドが起こる。そして、マントル

リバウンドの上昇対流は減圧融解によってマグマポンドをつくることさえ起きる。マントルリバウンドの発生は、小規模なクレーター中央部に丘があるということからも容易に理解できる。つまり、マグマの活動の有無にかかわらず、地球深部からの盛り上がり（衝突に伴うリバウンド）があることを裏づけている（Jahn and Riller, 2009; Spray *et al.*, 2010）。

クレーターの分布は当然不均一であるため、地下のマントルの加熱も不均質となる。このことが、マントル対流をさらに促進させる原因となり、その結果、マントル内部の酸化をより促進するのである。図 8 下図では、地球の右側が隕石衝突によって選択的に加熱されている様子を示している。この段階では、原始地球の表層はすでにアノソサイト、KREEP 玄武岩、コマチアイトからなる厚い原初大陸に覆われていただろう。そして、下部マントルはこの時期はまだ無水で、下部マントル底には基底マグマオーシャンがまだ存在していたかもしれない。

3) ルテニウム同位体組成で検証可能な固体地球の起源

Fischer-Gödde and Kleine (2017) は、水を含む揮発性元素と白金族元素を地球に供給したのは炭素質コンドライトの飛来によるとする（レイトベニア）仮説を検証するために、さまざまなコンドライトのルテニウム同位体組成異常のデータを比較し、それをもとに地球の水あるいは白金族元素の起源を論じた。隕石の同位体異常とは、隕石が地球試料（標準物質）と異なる安定同位体組成をもっていることを指す。コンドライト中のルテニウムの同位体組成異常の違いの原因は、太陽系形成時に分布していた太陽起源のダストが不均質であったことを示していると考えられている。そこで、彼らは、すべてのコンドライト種のルテニウム同位体組成異常を分析し、その値がエンスタタイトコンドライト、普通コンドライト、炭素質コンドライトの順に高くなることを示した。一方、地球マントルを代表する岩石として、彼らはクロミタイトに含まれるルテニウムを分析し、その値が、炭素質コンドライトの値からは大きくずれて

いることを示した。彼らは、この結果から、レイトベニアは炭素質コンドライトによるものではないと結論づけた。これは、ABEL モデルを否定している材料であると考え研究者がいるが、実は、ABEL モデルを支持する材料であることを以下に解説する。

Fischer-Gödde and Kleine (2017) が展開した論理において、指摘すべき点は 2 つある。1 つ目は、上部マントルに対するアプローチである。彼らは、現在の上部マントル由来のクロミタイトを分析し、その値が冥王代の上部マントルの代表として適用できると考えている。これは、冥王代から現代まで上部マントル物質がなんら変わっていないという仮定に基づく論理である。しかし、実際には、上部マントルを構成している物質は、現在と冥王代では大きく異なっている（図 9）。地球形成後、45.3 億年前頃にマグマオーシャンが固化すると、地球の層状構造が形成された。上部マントルと下部マントルは独立した対流構造をもつ二層対流だった。43.7 ~ 42.0 億年前に炭素質コンドライトが飛来すると、上部マントルに白金族元素や揮発性物質が付加されたが、下部マントルと上部マントルは独立していたため、下部マントルへの付加はなかった。地球の冷却に伴って、太古代末期にあたる 27 ~ 25 億年前に、マントルオーバーターンが起きた（Solheim and Peltier, 1994; Tsuchiya *et al.*, 2013）。マントルオーバーターンとは、下部マントルと上部マントルが入れ替わる事変である。このことによって、冥王代に形成されたエンスタタイトコンドライト起源の下部マントルは上部マントルへと入れ替わった。その後の間欠の一層対流によって、地球マントルは、もともとの上部、下部マントルがある程度「混じりあった」状態になっていると考えてよい。このような地球マントルの対流の歴史を考えると、現在の上部マントル起源の捕獲岩のサンプルを分析し何かの値を得たとしても、それがいつの時代の何を代表する値なのかを決めることは非常に難しいことがわかる。Fischer-Gödde and Kleine (2017) が分析したクロミタイトのルテニウム同位体はエンスタタイトコンドライトに近

図 9 固体地球の内部進化とマントルオーバーターン。地球形成後マグマオーシャンが固化し、地球の層状構造が形成されると、マントルは二層対流を生じた。すなわち、上部マントルと下部マントルは独立した対流構造をもっていた。しかし地球の冷却に伴い、25 億年前（古生代末期）にマントルオーバーターンと呼ばれる、下部マントルと上部マントルが入れ替わる事変が起きた。これによって、冥王代に形成された下部マントルは原生代の上部マントルへと入れ替わった。そして、その後の間欠的一層対流によって、地球マントルはある程度「混じりあった」状態になっていると考えることができる。

Fig. 9 Evolution of solid Earth and mantle overturn. After the magma ocean solidified, a layered structure formed within the solid Earth, resulting in double-layered convection, which means a separate convective structure between upper mantle and lower mantle. Through the cooling of the Earth's interior, mantle overturn occurred at 2.5 Ga, with the upper mantle and lower mantle replacing each other. As a result, the lower mantle, formed through magma solidification, ascended to become the upper mantle. After mantle overturn, episodic whole mantle convection started to mix the interior.

い値を示していることから、それはおそらく冥王代初期の地球形成時にとり込まれたルテニウムをみているにすぎない。おそらく、別のクロミタイトのルテニウムを分析すると炭素質コンドライトの分析値に近いものも存在するだろう。いずれにしても、彼らの分析値は、冥王代に地球を形成した岩石はエンスタタイトコンドライトであるということを肯定しており、ABEL モデルを支持していることになる。

2 つ目に指摘すべき点は、クロミタイトの分析

値の解釈である。彼らは、分析したクロミタイトのルテニウム同位体の値は、これまでに得られているコンドライトのルテニウム同位体のどの分析値ともあわないことを指摘した。さらに、クロミタイトのルテニウム同位体比によれば、起源物質は小惑星帯外側の炭素質コンドライトではなく、エンスタタイトコンドライトに近い物質であるとしている。彼らが分析した地球マントル捕獲岩のルテニウムが 46 億年前の固体地球形成時にとり込まれたものであるとすれば、その値は当然小惑

星帯外側の炭素質コンドライトの値とは異なる。その場合、ルテニウム同位体の値は、地球形成時に1 AU付近にあったコンドライト (EN (1 AU)) に含まれていたルテニウム同位体のものだと考えるのが合理的である。固体地球の起源となった EN (1 AU) は、2 AU に現存するエンスタタイトコンドライトとはいくらかは異なるはずであるから、彼らが示したルテニウムの分析値は、地球形成時に1 AU 付近に存在していたルテニウムの成分を示している可能性が高い。

固体地球の起源物質 (EN (1 AU)) を解明するためには、2-5 AU に残存する小惑星帯を構成する小天体 (直径1 m 以上のもの) や微小天体 (直径1 m 以下のもの) の化学組成を利用することがもっとも有効な方法のひとつであるといえる。小惑星帯では、後の時代の重力的な擾乱作用によって本来の化学累帯構造が部分的に破壊されているが、小惑星のうち、公転軌道が円軌道に近いものだけを選ぶことで、本来の組成累帯を推定することが可能である。その結果、小惑星帯の主体は、内側ほど揮発性成分に乏しく、外側ほど揮発性物質に富み、最大で20 wt% に達することがわかっている。そして、最内側でエンスタタイトコンドライト (無水だが、FeS, FeCl₂ 鉱物が安定) が安定であることも判明している (DeMeo and Carry, 2014)。小惑星帯の組成累帯がなぜ形成されるかは、原始惑星系円盤内部の温度構造のなかで起こる物質循環を考慮し、原始太陽から100 AU の範囲を循環する宇宙塵サイズの鉱物の累進変成再結晶作用と脱水分解に伴う揮発性物質の移動 (太陽系の外側に輸送される) による交代作用モデルを考える必要がある。しかし定性的には、岩石惑星形成領域 (> 1000°C) に大気・海洋成分がないのは当然であるので、現在の地球が保持している大気・海洋成分は、後の時代に地球に運ばれたと考えるのが自然であり、その事象が、ABEL モデルで提案された ABEL 爆撃 (43.7-42.0 億年前) である。なお、固体地球の起源物質を探るための手法として、現在の小惑星帯を構成する天体種を組み合わせた推定法に正当性はない。なぜなら、固体地球の起源物質は1 AU に

あった物質であり、小惑星帯を構成していた物質ではないからである。この議論における今後の研究の方向は、2-5 AU 領域のなかでみられる同位体的特徴に基づいて、化学組成累帯構造を反映する成分の変化曲線を太陽からの距離に基づいて求め、1 AU の位置の主成分化学組成を外挿することである。

VI. 議 論

1) ABEL モデルの優位点とこれまでであった問題点の説明

地球の海洋と大気の形成は、微惑星が次々と衝突を繰り返し原始地球ができあがったときにはほぼ同時に形成され (Safronov, 1972; Hayashi *et al.*, 1985), それに続くジャイアントインパクトが揮発性成分の量を変えたと考えられてきた。この古典的太陽系形成モデルはその後、Abe and Matsui (1986, 1988) や Kokubo and Ida (1995), Ida *et al.* (2001), Ikoma and Genda (2006) などによる N 体計算でさらに改良が加えられた。しかし、彼らのモデルは、一貫して、大気・海洋は地球誕生時にもともとできていたとするものである。

2.7 AU にスノーラインがあることを理解すれば、それより内側の1 AUにある地球では水が存在しえないことは明らかである。Oka *et al.* (2011) は、スノーラインが地球誕生時に1 AU 付近に移動して、地球に水を供給し、その後2.7 AU に後退したといくつかの仮定を並べて説明したが、もしそうならば、火星はどうなるべきか考えてみよう。もし、スノーラインが2.7 AU から1 AU に移動し、その後さらに2.7 AU に戻ったのであれば、火星は地球よりはるかに長い間スノーラインの内側の領域に存在することになり、より多くの水を獲得しえたはずだ。しかし、ノアキアン (火星の地質年代: 火星誕生から37 億年前までの時代) から現在までの火星表層の状況のみを限りでは、このようなスノーラインの移動を支持できる証拠はない。むしろ、火星にあったと考えられる水の量に関していえば、わずか400 m の厚さの海洋 (ボレアリス海) しかなかったと考えら

れている (Baker *et al.*, 1991; Carr and Wänke, 1992)。彼らの計算は、火星の地下 10 km 深度まで堆積物が分布していると考え、その堆積物粒子の間隙水、あるいは水の量から過去の海洋量を逆算したもののだが、地球に存在する水の量と比べると圧倒的に少量であることがわかる。また、Oka *et al.* (2011) が説明するようなスノーラインの移動が、惑星形成時期の最終段階で起きるとするのは非現実的である。そもそも、スノーラインの移動がなぜ起きるかというメカニズムについての説明が不十分である。この物理モデルへの批判は戎崎 (2008, 本特集号) を参照していただきたい。

一方で、Walsh *et al.* (2011) は Grand Tack モデルを提案した。地球の揮発性成分をもたせした小惑星帯外側に存在している氷小惑星は、5-10 AU にあった木星が火星軌道のさらに内側まで移動したときに、一緒に地球付近まで移動し、それによって地球を含む岩石惑星に水成分がもたらされ、やや遅れて土星が地球軌道に接近し、次に木星と土星が外側の現在の位置に後退したと説明した。しかし、このモデルも Oka *et al.* (2011) と同様に、重大な矛盾を抱えている。小惑星帯の氷惑星が一群となって太陽系内側の水星軌道付近まで移動したとしたら、その過程で小惑星の揮発性物質はすべて蒸発してしまうだろう。さらに、月のクレーター形成年代 (43.7-42.0 億年前) と無水の月形成を説明できない。そもそも、1.9-5.0 AU に残っている小惑星帯に化学組成の帯状構造があることをどう説明するのか？ もし、木星と土星の影響で太陽系内部へ小惑星帯が移動したとするなら、現存する累帯構造はどのように形成されたと説明するのだろうか？

上述したようなレビューから導かれることは、太陽系惑星形成理論は、磁気回転不安定と造岩鉱物の熱力学という新たな視点を導入することによって、今後、大きな発展を迎える研究分野であるということである。今後は、隕石、月、地球の物質科学的な証拠を組み込むことが重要なカギになる。現段階で議論されている惑星形成理論は、古典的力学モデルを踏襲しているだけでモデルとしてはまったく進歩していない。計算機の進歩に

よって、確かに N 体計算の N 数は増えたが、それは計算機の向上を利用した成果であって、モデルの進化ではなかった。1970 年ごろまでは、隕石の造岩鉱物が細粒すぎたために、構成鉱物の詳細が不明であったり、隕石母天体における物質分化の過程も不明で、小惑星内部における熱源についても不明であった。しかし、その後の研究でさまざまなことが判明した。例えば、隕石母天体内部で生じる累進的な化学反応と物質分化の結果、金属核、ケイ酸塩マントル、玄武岩質地殻の物質分化が半径 100 km 程度にすぎない小惑星内部で起きることや、ケイ酸塩マグマの形成過程では、グラニュライト相から角閃岩相を経て緑色片岩相に至る物質移動を伴う物質分化が岩石小惑星内部で生じること、また、その熱源が ^{26}Al などの短寿命核種であることの理解が進み、隕石母天体の岩石鉱物学は 1990 年代にはほぼ完成していた。21 世紀になると、超高压実験が飛躍的に発展して、地球中心の温度 (6000 K) と圧力 (364 GPa) 条件が達成され、岩石惑星形成に至るプロセスで起きると予測される揮発性物質を含む造岩鉱物の熱力学的な性質が利用できる時代となった。これらの進歩を惑星形成理論に組み入れた研究は原理的には 15 年以上前から可能であったが、現在でもまだ行われていない。また、小惑星形成に伴う揮発性物質の定量的理解も進んでいない。そのために、現存する惑星形成モデルでは、地球は火星サイズになってはじめてマントルと金属核が分離し、月と火星の中間サイズまで惑星が成長すると自重力で大気・海洋が表層を覆い、最後に巨大衝突で月が生まれ、地球は全熔融するというのが基本的なシナリオであるが、最新の研究成果に基づき修正していく必要があるだろう。

今後の惑星形成理論では、古典的な力学モデルで導入した、N 体計算に加えて、磁気回転不安定や、鉱物化学を組み込んだモデルを展開することが重要になるだろう。本特集号で解説されている TANDEM モデルは一次元モデルだが、こうした新たなパラメーター (磁気回転不安定と鉱物化学モデル) を加えてはじめて議論を進めた惑星形成理論モデルである。次は、この一次元モデル

を三次元モデルに発展させ、小惑星帯のみならず太陽系の諸惑星に残された組成累帯とそれを創った変成再結晶交代作用のフォーワードモデルを構築することが惑星形成論における大きな発展へのステップであろう。

2) ABEL 爆撃で付加された水の量

マントルにおける白金族元素の含有量の議論を通して、レイトベニアイベント (= ABEL 爆撃) によって地球に付加した隕石の総量が推定されている (表 1)。Morgan *et al.* (2001) は、隕石の付加量は 0.5×10^{22} kg であることを (1) 地球と月の重力の割合 (およそ地球 : 月 = 50 : 1)、(2) 月面の隕石孔の数とサイズから推定した隕石量、(3) 月面のクレーターから推定した隕石の衝突速度 (6 km/s) から導いた。それとは独立して、Becker *et al.* (2006) は、クレーターの直径と隕石質量、隕石の衝突速度から、隕石の総量を $(0.3-0.5) \times 10^{22}$ kg であると推定した。一方、Walker (2009) は、Ir や Os といった特定の白金族元素の濃度から、親鉄元素の付加量を 3×10^{22} kg であると推定した。これら 3 グループの推定値には $0.3-3 \times 10^{22}$ kg の範囲でばらつきがある。

Morgan *et al.* (2001) の推定した隕石量をもとに、もし付加した隕石が 20 wt% の水分を含む炭素質コンドライトの組成を平均的にもっていたとすると、地球に飛来した水の総量はおよそ 0.1×10^{22} kg である (Maruyama and Ebisuzaki, 2017)。この水量は、まったく別の手法で Maruyama and Liou (2005) と Maruyama *et al.* (2013) が推定した冥王代の海洋量 0.16×10^{22} kg と非常に近い値である。Maruyama *et al.* (2013) の推定は、39 億年前のイスアならびに 35 億年前のピルバラに残された地質記録とマントルのポテンシャル温度を MORB-かんらん石-水の状態図と比較した計算に基づき得られたものである。もし、この量の海洋が、Morgan らの推定した隕石量によって運ばれたとすると、炭素質コンドライトの含水量は 32 wt% だったと逆算できる。すると、氷小惑星の起源は、木星に近い小惑星帯外縁部由来であっただろう。

もし ABEL 爆撃が 43.7 億年前から 42.0 億年前までの 1.7 億年の間継続し、Morgan らが推定した隕石量が付加され、それらのコンドライトの密度が 3.44 g/cm^3 (Macke *et al.*, 2011) だった

表 1 ABEL 爆撃によって地球に付加した岩石 (水) の総量. Morgan *et al.* (2001), Becker *et al.* (2006), and Walker (2009) らが推定した隕石の付加総量の比較.

Table 1 Accreted material and total mass of carbonaceous chondrites with the comparison between Morgan *et al.* (2001), Becker *et al.* (2006), and Walker (2009).

参考文献	付加した物質の総量	付加した物質	付加した水の総量 ^{*1}	ABEL 爆撃の継続時間	コンドライトの付加速度 ^{*2}	水の付加速度
Morgan (2001)	0.5×10^{22} kg (3 km の厚さの地殻に相当)	炭素質コンドライト (20 wt% water)	0.1×10^{22} kg	1.7 億年	17 mm/1,000 年	12 mm/1,000 年
		炭素質コンドライト (5 wt% water)	0.025×10^{22} kg			3 mm/1,000 年
Becker <i>et al.</i> (2006)	$0.3-0.5 \times 10^{22}$ kg (1.8-3 km の厚さの地殻に相当)	炭素質コンドライト (20 wt% water)	$0.06-0.1 \times 10^{22}$ kg	1.7 億年	10.2-17 mm/1,000 年	7-12 mm/1,000 年
		炭素質コンドライト (5 wt% water)	0.015- 0.025×10^{22} kg			2-3 mm/1,000 年
Walker (2009)	3×10^{22} kg (17 km の厚さの地殻に相当)	炭素質コンドライト (20 wt% water)	0.6×10^{22} kg	1.7 億年	102 mm/1,000 年	72 mm/1,000 年
		炭素質コンドライト (5 wt% water)	0.15×10^{22} kg			20 mm/1,000 年

*1: 冥王代の地球の海洋の総量はおよそ 0.16×10^{22} kg であったと推定されている (Maruyama *et al.*, 2013)

*2: チャートなどの遠洋性堆積物の堆積速度はおよそ 1 mm/1,000 年だと見積もられている (Matsuda and Isozaki, 1991)

と仮定すると、飛来したコンドライトによる水の量の集積速度は、地球表層に均等に蓄積したと仮定して 1000 年で 12 mm の厚さに相当する増加量である。ちなみに、海洋底チャートの堆積速度は 1000 年で 1 mm である (Matsuda and Isozaki, 1991)。つまり、地球表層における一般的な堆積岩の堆積速度と比べると、隕石による水の付加は単純に 12 倍であることになる。同様に海洋の厚さが約 2 億年間継続した炭素質コンドライトの爆撃で 4 km の厚さに成長したとすると、平均増加率はおよそ 1000 年で 20 mm で、調和的であるようにみえる。いずれにしても、表 1 に示した 3 つの推定値をみる限り、地球に飛来した隕石の総量は、それぞれ 1 桁程度の違いはあるものの、それ以上の差異がない。さらに地球の地質記録から得られた推定値と比べても 1 桁程度の違いにとどまることになり、桁外れにずれた推定ではないといえるだろう。

3) 小惑星帯の化学組成分帯

太陽系の小惑星が化学組成的に均一でないことは、原始太陽系星雲にはじまる太陽系惑星形成理論に基づき多く議論されてきた (Smith, 1982 による概説を参照)。大局的には、太陽系内側部分には還元的物質が卓越し、外側に向かって酸化的物質 (揮発性成分) が増加し、太陽からの距離に基づく温度の関数であるといえる。このことは、1980 年代までの一般の学識で、(1) 観測天文学、(2) 凝縮温度と鉱物の関係、(3) T-タウリ期における中心星の誕生から双極流の存在と寿命、ヘリオスフェア (太陽磁場)、円盤進化と磁気回転不安定の導入、(4) 大規模物質循環と化学累帯構造形成、の成果であり、とくに、火星から木星の間に位置する小惑星は、太陽系惑星形成初期の手がかりとなるものとして理解されてきた。

こうした小惑星帯の小惑星や隕石の岩石種や化学組成がもつ意味を理解するためには、岩石学、とくに変成岩岩石学や、そのなかでも広域変交代作用といった概念を理解することが必要不可欠である。岩石学とは、岩石の産状や構成鉱物を記載・分類し、岩石の成因を研究する学問である。変成岩岩石学とは、ある岩石 (源岩) が、熱や圧

力などの影響を受け (変成作用)、鉱物種の構成や岩石がどのように変化するかを研究する学問である。原始惑星系円盤は、新しく生まれた恒星の周囲を回転する高温のガスの集積体だが、冷却するにつれて円盤内部のガスからサブミクロンサイズの結晶が晶出し、それらが集積すると小さな岩石をつくる。こうした物質は、中心星の周りを回転すると同時に、円盤外側から内側への大循環に従って円盤内部を移動する (図 10 上図)。太陽に近づくほど高温であるために、結晶や岩石は変成作用を受け、別の鉱物あるいは岩石へと変わるが、このプロセスは含水鉱物の相平衡理論でうまく説明できる (図 10 下図)。具体的には交代作用を伴う累進的脱水化学反応と呼ばれる変化である。太陽系の物質大循環に伴って、岩石の揮発性成分が抜けると、その結果岩石の化学組成は変化し、抜けた揮発性成分は太陽風によって太陽系外側へ吹き飛ばされる一方で、鉱物は太陽系中心へと移動を続ける。岩石惑星形成領域の外縁部では、珪酸塩鉱物が蒸発しはじめ、**Ma** や **K** がガス化する。0.3 AU 付近では、珪酸塩鉱物が大量に蒸発して残渣の金属鉄や白金族元素が増加する。このような交代変成作用をつねに受けながら、太陽を中心とする大物質循環のなかで、原始惑星系円盤の内部に化学組成の分帯がつくられていく。したがって、それぞれの軌道で形成される惑星の化学組成は、惑星形成当時の円盤内部の化学組成累帯を反映することになる。実際に惑星の化学組成をみれば、太陽系内側から外側へ向かって、岩石惑星、巨大ガス惑星、氷惑星という分帯があることから、太陽系全体の分帯を理解することができるだろう。このようなかつての化学分帯が実際の岩石として大局的に残されているのが小惑星帯なのである。

この分野における今後の研究目標は、こうした客観的事実や観測事実を合理的に説明するモデルを提案し、検証作業を進めることによって、太陽系ならびに惑星形成のメカニズムを解明することであろう。これを可能にするためには、太陽系における化学組成分帯の理解が最後に残された鍵となる。地球や火星といった、すでに惑星が形成さ

れた場の原始惑星系円盤時代に遡って化学組成を知る手がかりは少ないが、小惑星帯には大きな惑星が形成されなかったため、化学組成の記録が残されたままである。したがって、小惑星帯内の未分化微惑星の化学組成分布とその原因を詳細に説明することは、太陽系全体の原始惑星系円盤時代に遡って化学組成分帯を導くための最適な研究対象であるといえるだろう。さらに、原始惑星系円盤全体の物質大循環と化学組成累帯の原理の理解は、汎惑星形成論の構築に向けて重要な指標を与えるものである。例えば、170 K (H_2O の氷から H_2O のガスへ相転移する温度)におけるスノーラインの存在位置は 2.7 AU であることはすでに知られており、もともとは Hayashi (1981) により計算されたものだが、Kouchi *et al.* (2002) の実験と考察からも導かれている。同様に、有機物線は 2.1 AU に存在すると推定されており、粘土線は 1.9 AU 付近であろう (Kouchi *et al.*, 2002)。さらに、そのほかの物質についても境界となる位置が大雑把に示されており、 NH_3 は 5 AU (温度 57 K)、 CO_2 は 10 AU (42–52 K)、HCN は 17 AU (38 K)、CO は 40 AU (18–22 K) である (Öberg *et al.*, 2011; Schwarz and Bergin, 2014)。これらの境界線に沿って円盤内部の物質大循環がガスと固相間の反応によって円盤内部で組成変化を起こす (図 10)。その結果、太陽からの距離に依存して惑星の化学組成が系統的に変化する。ABEL モデルでも述べたように、スノーラインの内側で形成された地球の母天体に水成分がないことは、このような単純だが基本的な化学組成分帯の理解と調和的である。これはまた、汎惑星形成論を議論するうえでの重要な視点である。

4) ABEL 爆撃が起きたメカニズム

4.37–4.20 Ga に起きた ABEL 爆撃は、T タウリ期よりも約 2 億年もあとのイベントであるので、円盤から原始惑星が生まれる形成過程とはまったく関係ない後生的な事象だとみなすことができる。もしそうであれば、ABEL 爆撃を引き起こした要因とはいったい何なのか？

ひとつの可能なシナリオは、巨大ガス惑星による重力散乱である。現在、太陽系にある巨大ガス

惑星は木星と土星であるが、太陽系形成当初はもうひとつの巨大ガス惑星があったとする説がある (Nesvorný, 2011)。現在は存在していないその惑星を、ここでは仮に「お尋ね者惑星 (Black Sheep planet, Maruyama and Ebisuzaki, 2017)」と呼ぶことにする。3つの巨大ガス惑星の間に起きる重力散乱は、「お尋ね者惑星」をその場から追い出し、天王星と海王星のほかにもいくつか存在したはずの外側の氷惑星にも影響を与え、さらに小惑星帯の小惑星を太陽系の内側と外側へまき散らしたはずである (Weidenschilling and Marzari, 1996)。お尋ね者惑星によって連れ去られた氷惑星の一部は、カイパーベルト内に存在していると考えられる研究者もいる (Nesvorný, 2011)。とすると、カイパーベルトは太陽系の進化の歴史を解明するための重要な手がかりを隠しもっている重要な研究対象であるといえるだろう。

5) 月の地質から得られる ABEL 爆撃の間接的証拠

冥王代の年代を示す岩石は、現在の地球上ではみつかっていないが、月の表層には当時の岩石と重爆撃の証拠が残っている。これは、地球と月という2つの天体の大きさがもたらす対照的な違いである。月は地球の80分の1という小さな質量であるため、より早く冷却が進む。そのため、固体地球が熱いマントルに覆われている時期であっても、月の表層はすでに固化し原初大陸に覆われていた。さらに、月内部のケイ酸塩マグマの活動も30億年前には終わってしまったが、地球では今でも続いている。冥王代地球表層の岩石の証拠はないが、冥王代地球の表層にどのような岩石が露出していたかを議論するためには、月の表層地質に関する地質学的、岩石学的、惑星物理学的な知見での研究が重要である。

しかし、一方で、月面に残された地質情報も十分な状態で保存されているとはいえない。なぜなら、ABEL 爆撃によって表層は破壊され、場所によっては 100 km 深度までえぐられたからである (Mottmann, 1977)。しかも、衝突に伴う衝撃変成作用によって水和状態における超高温変成再結晶作用が進む (Hopkins and Mojzsis, 2015)。

图 10

Fig. 10

つまり、ABEL 爆撃は表層に残された地質の記録をある程度塗り替えてしまうのである。そのため、月の固化年代についてもまだ論争が続いており、 4.46 ± 0.04 Ga だと推定する研究者もいれば (Norman *et al.*, 2003), 45.3 億年前だとするものもある (Borg *et al.*, 2015)。

隕石衝突による衝撃変成作用は、原初大陸の粉碎とガス化、さらにはジルコンの再結晶化を招いたはずで、ジルコンの年代は隕石衝突時にほぼ完全にリセットされていると考えられる。一連の ABEL 爆撃が 1.7 億年間続くことによって、原初大陸が破壊されて、それらの角礫や砂粒などの小粒子からなる堆積岩のレゴリス層 (厚さ 10 m 程度) に表層の岩石は細粉となって十分に攪拌されたと考えられる。とくに直径 3200 km におよぶ Procellarum クレーターを形成したような巨大衝突の場合、攪拌効果は顕著だっただろう。このような攪拌効果によって、さまざまな年代のジルコン粒子が十分攪拌され、年代が均質化した状態で月の表層のレゴリス層として残されていると考えることができる。月面のレゴリス層から得られるジルコン年代は、最古のもので 43.7 億年前 (ABEL 爆撃開始時)、もっとも若いもので 39 億年前 (最後の隕石衝突) である。45.3 億年前から 43.7 億年前までのジルコン記録がないことは、この時期に月面においても隕石衝突がなかったことを暗示している。そして、このことは、地球でも同様に、この時期の隕石衝突がなかったことを意味する。

図 11B は、ジルコン結晶の年代頻度分布を示したもののだが、この分布は隕石爆撃時期を半定量的に示唆する。例えば、43.7-42.0 億年における隕石衝突は、42-29 億年前までに起きた隕石衝突に比べると 1 桁多いことがわかる。つまり、隕石爆撃は古い時代の方が 1 桁多かったということである。また、巨大隕石の衝突は古い時期に多かったことも観察からわかることである。月面のクレーターを丹念に観察すると、大きいクレーターほど、より若く小さい規模のクレーターで覆われている。最大の Procellarum クレーター (直径 3200 km) をみても明らかで、Procellarum クレーターのなかに、若いクレーターが多数存在する。直径 500 km 級が 5 個、直径 200 km 以下のものが複数個ある。そして、Procellarum クレーターのへりの部分はよりのちに起きた隕石爆撃によって地形が不鮮明になっていることから明らかである。

図 11C は、アポロ計画でもち帰った 8 種類の岩石の放射性同位体年代をまとめたものである。これらの 8 種類とは、(1) メアバサルトとよばれる、クレーター内部を埋めている玄武岩 (とくに Procellarum クレーターを埋めている岩石) (Wilhelms *et al.*, 1987), (2) メルトを伴う基盤岩の変成岩, (3) 高度変成岩 (グラニュライト相), (4) アルカリ岩, (5) 花崗岩/珪長岩, (6) KREEP II 玄武岩, (7) Mg に富む結晶に富む沈積岩 (KREEP I), (8) 苦鉄質鉱物を伴うアノールサイト, である。年代分析方法は、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$,

図 10 太陽系における化学組成分帯とスノーラインや粘土線との関係。(上図) 太陽系誕生直後、太陽の両極から双極流が流れだし、約 100 AU の距離までの間で物質大循環が起きていた。(下図) 物質大循環の仮定でどのように化学組成分帯が形成されるかを説明した図。スノーラインの外側から氷粒が移動した場合、スノーラインを超えると、水成分は気化する。そして太陽風によって太陽系外側へ吹き飛ばされるため、スノーラインより内側に水の成分は存在しない。粘土鉱物の存在境界である 1.9 AU より内側へ粘土鉱物が移動しようとする、例えば角閃石などの含水鉱物は変成作用を受けて無水のケイ酸塩である輝石へと変化する。このような各物質の変成作用によって、太陽系内部では次第に化学組成分帯が形成される。

Fig. 10 Chemical zonation within the solar system and relation to snowline or clay line. (Upper) Immediately after formation of the solar system, material circulation occurred within 100 AU. (Bottom) If an icy particle migrates from outer side of the snowline to the inner side of the snowline, ice vaporizes and is blown off. Therefore, there is no water component within the snowline. In the case of clay minerals, for example, amphibole (hydrous minerals) turns into pyroxene (dry silicate) through metamorphism. Through these chemical processes, chemical zonation can be formed within the solar system.

Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, Pb-Pb を用いている。この図をみると、月の年代と岩石に系統的な違いがあり、それは産状にも反映されていることがわかる。それが顕著にわかるのがメアバサルトである。そして、そのなかに水分を含むメルト包有

物がかんらん石に含まれている。月面のメアバサルト試料の年代は 3.15-3.85 Ga までの範囲を示し、この時代になると月の内部に揮発性物質（水）があったことを支持する。一方では、アノソサイトや magnesian suite pluton からなる基

図 11

Fig. 11

盤岩と呼ばれる月の最古の岩石があるが、とくにアノソサイトの年代は 4.30–4.55 Ga で、Mg に富む結晶質基盤岩の年代の半分は 43.0–45.5 億年前であるが、残りの半分は 43–41 億年前である。これは、測定された基盤岩類がすべて巨大衝突によって地殻深部から地表に放り出された破片であるために、衝突の影響を強く受けているのだろう。これらの基盤岩には含水鉱物が含まれていないことから、4.53 Ga にマグマオーシャンが固化したときには揮発性成分が存在せず、4.37 Ga までは無水の状態だったとするジルコン年代からの推測を支持している。

こうした 8 種類の岩石の種類、産状、および年代学から、時代を追って月の進化の歴史をみていこう。もっとも古い年代をもつ岩石は、上述したように基盤岩である。これらの岩石が含水鉱物を含まないことから、当時は無水の環境だったことがわかる。また、シュライバーサイト (Fe_3P) などの還元的鉱物の存在などから、月の起源物質が還元的隕石物質であったことがわかる。44 億年前ごろまでは、これら以外の岩石サンプルはない。その後 43.7 億年前ごろから ABEL 爆撃がはじまったことにより、KREEP II 玄武岩、花崗岩、アルカリ岩が形成された。4.35–3.80 Ga の年代を示す KREEP II 玄武岩とは、月のマグマオーシャン固化後に原初大陸の一部として月面を覆った KREEP I 玄武岩とは別に、少し後の時代にできた玄武岩を区別するために KREEP II 玄武岩

としている。KREEP II 玄武岩の成因は、ABEL 爆撃あるいは 4.20 Ga よりあとに起きた巨大衝突によって、地下のマントルが衝突の穴を埋めるためにリバウンドし減圧融解によって生じたマグマが噴出してできたものだと考えられる。マグマの月面への噴出は、巨大隕石の衝突直後から約 1–2 億年程あとまで継続する。減圧融解が可能になる深さまでマントルがリバウンド（上昇）して対流が長期的にわたって続くと、2 億年以上にわたってマグマの噴出が続くこともあるだろう。4.35–4.0 Ga の年代を示すアルカリ岩は、揮発性成分が付加されている間に起きた基盤岩の部分溶融によって形成されたと考えられる。このことは、無水だった月がこの時期に隕石爆撃によって揮発性成分を付加されたことを示している。これは、花崗岩や珪長岩の形成でも同様のことがいえる。そして、こうした一連の年代学的データは ABEL 爆撃によって無水の月に揮発性成分が二次的に付加したことを強く支持するものである。

メルトを含む変成岩、アルカリ岩やかんらん岩、およびグラニュライト相の岩石は 43.5–42.0 億年前に限られるのではなく、さらに若い時代に広がり、その年代は 4.25–3.70 Ga である。とくに、変成岩と KREEP II 玄武岩は 3.8–3.7 Ga にピークをもっている。グラニュライト相の変成岩は 800–900°C を超える温度で 4.25 Ga 頃にもつくられているが、メルトを含む変成岩の生成年代はグラニュライト相の変成岩よりも若い傾向を示す。

図 11 月の地質から得られる ABEL 爆撃の間接的証拠。(A) 月の表側のレゴリスの Th 濃度分布、およびクレーター分布とアポロ着陸地点 (Jolliff *et al.*, 2006)。Th 濃度の高い地域は、KREEP II 玄武岩（隕石の衝突によって二次的に生成された KREEP 玄武岩）の分布域であり、Whitaker (1981) によって提案された Procellarum のクレーターにはほぼ相当する。(B) レゴリス中のジルコン年代頻度分布 (Hopkins and Mojzsis, 2015)。(C) 月面表層部の 8 種類の岩石の放射性同位体年代の頻度分布 (Stöffler *et al.* (2006))。

Fig. 11 Indirect evidence of ABEL Bombardment derived from lunar geology. (A) Map of the Moon based on Clementine data (Jolliff *et al.*, 2006). Figure shows the distribution of impact craters, and KREEP II basalts (secondary generated KREEP basalts) largely highlighted by the elevated Th regions, with the prominent quasi-circular feature at the upper left roughly outlining the theorized Lunar Procellarum Basin first proposed by Whitaker (1981). Also shown are lunar landing sites, which include those of the NASA Apollo (A) and Soviet Luna (L) programs. (B) Zircon age population diagram by Hopkins and Mojzsis (2015). (C) Summary of radiometric ages of lunar rocks based on data compiled by Stöffler *et al.* (2006). Considering the occurrence of Ferroan anorthosite and magnesian suite plutons composed of anhydrous minerals, the Moon was initially dry following its formation until 4.37 Ga. After the injection of volatiles, the Moon formed metamorphic rocks, as well as granite and alkali rocks.

このメルトを含む変成岩は、地球上で普遍的にみられる広域変成岩とは異なり、隕石衝突に伴う衝撃変成作用（shock metamorphism）によって割れ目に沿って形成されたものである。グラニュライト相に達する変成岩の年代は ^{40}Ar - ^{39}Ar 法によるものだが、これが示す年代は、最後に隕石衝突があってから冷却するまでの年代を示しているとも考えられ、岩石が粉碎され、熱による変成作用を受けながら地表にもたらされたものかもしれない。

過去 100 年以上にわたる歴史をもつ地球の広域変成岩研究の観点からみると、揮発性成分の存在は変成再結晶作用の触媒の役割を担うものとしてきわめて重要である。揮発性成分がない状態では、火成岩は破碎されることはあっても、決してグラニュライト相（高温高压型）の変成鉱物組み合わせをもつことはない。つまりグラニュライト相の変成鉱物組み合わせがあるということは、揮発性成分の存在を示唆する。このことを示す具体例は、カザフスタンのコクチェタフや中国中央部のスルー・大別地域、あるいはアルプス地域のガプロに確認されている。これらは、古い時代の沈み込み帯で形成された超高压変成岩だが、揮発性成分がなかったガプロは、100-200 km 深度の700-1000℃という高温のもとにおかれても斑レイ岩質の水分をもたない火成岩のまま岩石組織と構成鉱物を残している。一方で、そういった岩石でも、もし揮発性成分が存在する場におかれると、急速にエクログジャイトに再結晶する。さらに、これらのエクログジャイトは、400-500℃で地殻中半の深さまで上昇すると加水による変成再結晶作用が進み、角閃岩相に変化する。重要なことは、変成再結晶作用は惑星内部に揮発性成分がある場合にだけ進む反応だということだ。

こうした岩石学的観察事実から判断すると、月の最古岩石は含水鉱物を含んでいない。ということは、月の揮発性成分は月のマグマオーシャンが固まったあとのどこかの時点、かつ変成岩が形成される前に、月に付加されたものであり、そうした揮発性成分の存在のもとではじめて、岩石の変成作用が進んだということになる。隕石衝突によ

って変成岩が形成されるようになったあと、それに続くマントル対流は洪水玄武岩の噴出を引き起こし、これが3.15 Gaまで続いた。とくにProcellarum盆地ではそれが顕著であり、Procellarumクレーターを形成した隕石衝突によって、月の表側では大規模なマントルリバウンドが発生した。それが月面表側にある地殻の引張を招き、逆に、裏側では水平方向に構造的圧縮が進んだ。そこでは、大陸地殻が折り重なるような構造が生まれ、月の大陸地殻が厚化した。これは、月の地質記録をみれば明らかで、表側のリソスフェアはより薄く、局所的に海洋地殻を形成している。全球的なbimodal リソスフェア（海洋プレートと大陸プレート）の形成までおよんでいないのは、おそらく、月は天体としては小さすぎたために、月面では海洋が生まれなかったことが原因だと考えられる。

6) 月の小惑星爆撃の記録から導かれる ABEL 爆撃の規模

Wilhelms *et al.* (1987) と Stöffler *et al.* (2006) による月のクレーター研究のレビューによれば、月面クレーターは大きさによって次の4つのグループにわけることができる。(1) 直径2500 km以上のクレーター（2個）、(2) 直径1200-1500 kmのクレーター（28個）、(3) 直径499-300 kmのクレーター（15個）、(4) 直径300 km未満のクレーター（無数）、である。例外的に大きなクレーターとしてProcellarum（直径3200 km）とSouth Pole Aitken（直径2500 km）がある。これらの巨大クレーターは、直径250-300 kmの隕石の衝突によって形成された（ちなみに、直径1,200-1,500 kmのクレーターの場合は、直径50-120 km程度の隕石によって形成され、直径499-300 kmのクレーターは、直径30-50 km程度の隕石によってそれぞれ形成された）。隕石衝突によって形成されるクレーターの詳細は、数値計算とクレーター直下の深部構造によって推定され、ユカタン半島にあるチクシュルブクレーターを含めた地球のクレーターにおける地震波観測で、非常によく実証されている。チクシュルブクレーターのサイズは直径およそ180 kmだが、このクレー

ターはわずか直径 10 km の隕石によって形成されたとされている。これと比較すると、Procellarum クレーターがどれほど大きな隕石の衝突によってできたものなのかがわかるだろう。

月の表側に直径 3200 km の Procellarum クレーターをつくった隕石の衝突を考えると、月よりさらに大きい地球にはさらに大きな隕石の衝突が起きた可能性を示唆している。例えば、氷小惑星であるケレス（直径約 950 km、密度 2.1 g/cm^3 、公転軌道およそ 2.8 AU）、同じく氷小惑星のパラス（直径約 500 km、密度 4.2 g/cm^3 、公転軌道およそ 2.9 AU）に近いサイズの氷小惑星が冥王代地球に衝突した可能性がある。このような大きさの隕石が ABEL 爆撃の間に地球に落ちたとすると、直径 10,000 km に達する太平洋規模の巨大なクレーターを形成しただろう (Marchi *et al.*, 2014)。もしそのような巨大隕石の衝突が起きたとすると、衝突の衝撃によって原初大陸物質が一瞬にして 20,000 K 以上に加熱される (Davies, 1972; Hiesinger and Head, 2006)。さらに、衝突による衝撃波は衝突地点以遠あるいは地球内部にもおよび、大規模な地形改変と固体地球の深部に達する広域的な変成作用を引き起こしたと考えられる。巨大衝突はマグマポンドを形成し、固化するまでに 10,000 年を要したと考えられる。隕石衝突による大規模な変形作用とそれに関連して起こる変成再結晶作用は、月にもみられるようにグラニュライト相 (800–900°C) におよぶ高度変成作用が原始地殻とその下部のマントルでも進行したことを意味する。つまり、地殻や最上部マントルの岩石のほとんどすべてが再結晶を起こし、もともとの火成岩の組織は残っていないということである。さらに、破壊的なまでに粉碎された岩石は溶融し、部分的な再結晶を起こしただろう (Stöffler *et al.*, 2006)。

7) ABEL 爆撃によって運命づけられた地球の歴史：スタグナントリッドからプレートテクトニクスの起動まで

地球のマグマオーシャンは 4.53 Ga までに固化し、マントルや地殻といった層状構造をもつに至ったが、その時にはまだ大気・海洋はなかつ

た。地球内部の層状構造は、(1) Dunite がほとんどを占める下部マントル、(2) レルズライトが主要構成物質である上部マントル、(3) 厚さ 100 km におよぶ KREEP 玄武岩からなる下部地殻をもつ原初大陸地殻（これを KREEP I と呼ぶ）、からなっていたと考えられる。注意しておくべきは、KREEP I 地殻はウラン、トリウムといった放射性元素をレルズライトマントルの 400 倍以上も豊富に含んでいることである。このような推定はマグマオーシャンの存在を仮定すると、メルツプログラムから単純に導かれる (Arai and Maruyama, 2017)。

マグマオーシャンの固化後、地球表層は 4.37 Ga までは非常に静穏な環境で、隕石衝突などもほぼなかった時期といえる。その結果、100–150 km の厚さにおよぶ堅固な大陸地殻が全球的に形成され、大陸地殻を除いたマントルは活発であっただろうが、地殻を含めて現在みられるような水平ならびに垂直方向に動きのあるプレートテクトニクスは機能しなかった。マントル温度は十分高く、プルームの上下運動に伴って、レルズライトに富む上部マントルでは玄武岩質のメルトが生成されただろうが、それらは地殻下方に底づけされたり、表層に噴出するだけで、地殻の厚化を招くだけだった。このような冥王代地球の状態は Solomatov らによって議論されたスタグナントリッドテクトニクスが機能した状態だっただろう (図 12) (Solomatov and Zharkov, 1990; Moresi and Solomatov, 1995; Solomatov, 1995; Solomatov and Moresi, 1996)。

氷小惑星が降り注ぐ ABEL 爆撃が始まると、地球には大気・海洋成分が供給されはじめた。その際、巨大アステロイドが衝突すると、非常に深い 100 km 以深まで、 H_2O や CO_2 などの揮発性成分が上部マントルに直接供給され、溶融温度と粘性の低下を招いただろう。ABEL 爆撃による衝突に伴い、巨大なクレーターの穴を埋めるために、約 100 万年かけてマントルはほぼ表層に近いところまでリバウンド上昇したと考えられる。こうしたプロセスは膨大な量の KREEP II をクレーター内部にもたらしたと考えられる (図 11)。前

図 12 冥王代の地球史. スタグナントリッドテクトニクスからプレートテクトニクスへ変わった原因は, ABEL 爆撃によって揮発性成分 (水) が固体地球に付加されたからである (Maruyama *et al.*, 2018).

Fig. 12 Hadean Earth history. Stagnant lid tectonics changed to plate tectonics due to the ABEL Bombardment event, which delivered volatiles (water) to the dry solid Earth (Maruyama *et al.*, 2018).

述したように, 地球に飛来した小惑星の直径は, 月のクレーターから推測すると, およそ 100–1000 km だと推定できる。1000 km 級の巨大アステロイドはおそらくあっても 5 個程度だったと考えられる。500 km 級の隕石の数は 10 数個程度, 100–300 km 級隕石は 100 以上あっただろう (Marchi *et al.*, 2014)。しかし, 重要なことは, 直径 1000 km 級の巨大隕石が落ちることによって, 地球表層には直径 10,000 km (地球の円周の 4 分の 1) におよぶ巨大クレーターが形成されることである。巨大隕石は, 固い原初大陸を大規模に破壊し, ガス化して太平洋サイズのクレーターをつくっただろう。大気・海洋成分が冷却されるとドライアイスや氷となって地表に次第に蓄積し, 巨大クレーターを満たした。厚い氷床の底に海洋が形成されると, 大陸地殻は次第に海洋地殻に置き換えられ, 海洋の厚さが 2.5 km を超えるとプレート運動がはじまる。CO₂ が熱水循環によって炭酸塩鉱物として固定されると, 炭酸塩鉱物に満ちた海洋地殻は沈み込み帯から選択的にマント

ル内部に運ばれただろう。こうしてスタグナントリッドは破壊, あるいは軟化し, プレート運動が機能しはじめたと考えられる (Azuma *et al.*, 2017, Maruyama *et al.*, 2018)。

クレーターの形成に伴って供給される流体によって, 地下 50 km 深度では苦鉄質の海洋地殻はエクログジャイトに相転移しただろう。太平洋サイズの巨大クレーターの内部に大陸地殻はなくなり, 代わって海洋地殻が覆い, 海溝深部でエクログジャイト化すると強烈なスラブの引張力が生まれたはずである。クレーターの内部では, 下部からのリバウンド対流によってブルームが生まれ, それらが連結したところで中央海嶺が形成され, そこではリッジプッシュ力が生まれただろう。これが, スタグナントリッドテクトニクスからプレートテクトニクスへの転換点となった (Azuma *et al.*, 2017; Maruyama *et al.*, 2018)。プレートテクトニクスが, いつ, どのように開始したかという長年の未解明だった問題も, 実は, ABEL 爆撃によって, ドライな地球が加水されたことによる

From stagnant lid tectonics to plate tectonics by the ABEL Bombardment

図 13 スタグナントリッドからプレートテクトニクスへ。4.55 Ga にドライな地球が誕生し、4.53 Ga までにマントルは固化、層状構造を形成した。この時はスタグナントリッドテクトニクスが機能していた。4.37-4.20 Ga に ABEL 爆撃が起き、ドライな地球に大気・海洋成分が二次的に付加された。巨大隕石の衝突によって、果タグナントリッドは破壊され、プレートテクトニクスへと移行した。そして、構造侵食によって原初大陸はマントル深部へと運ばれ、密度のもっとも高い KREEP I は 4.0 Ga 頃までにほぼすべてがコア・マントル境界へ崩落した。コア直上に蓄積した KREEP I は放射性元素を多量に含むために自己発熱し、ブルームを形成した (Maruyama *et al.*, 2018)。

Fig. 13 From stagnant lid tectonics to plate tectonics. At 4.55 Ga, the dry Earth was formed. By 4.53 Ga, the mantle solidified to form a layered structure and stagnant lid tectonics operated. Between 4.37 and 4.20 Ga, ABEL Bombardment progressed to deliver atmospheric and oceanic components onto the dry Earth. Due to the destruction of the stagnant lid by huge impactors, stagnant lid tectonics shifted to plate tectonics. By 4.30 Ga, bi-modal lithosphere (continental crust and oceanic crust) appeared following bombardment to operate plate tectonics. Due to tectonic erosion, primordial continents (anorthosite, komatiite, and KREEP I) were removed into the deep mantle. The densest KREEP I dripped down to the bottom of the mantle and accumulated (almost all KREEP I should have accumulated at CMB by 4.0 Ga). KREEP I heated the bottom of the lower mantle to generate plumes at CMB due to radioactive decay heat, where anti-crust formed at the same time. Restite enriched in Ca-perovskite split off from KREEP I as a high-temperature solid plume to accumulate at the top of the lower mantle. On the other hand, the solid core also melted down due to radioactive decay heat. By 4.20 Ga, TTG magma was generated to increase the granitic continental crust at the consuming plate boundary. Removed anorthositic crust moved downwards to a depth of 660-1000 km and accumulated. Within the lower mantle, ascending plumes from CMB accumulated at 660 km depth. At 4.0 Ga, the subducting oceanic lithosphere accumulated at 660 km depth as a stagnant slab. TTG crust was also removed from the surface to accumulate at the mantle transition zone (410-660 km), forming a second continent. At the bottom of the lower mantle, D' layer mostly formed the third continent (Maruyama *et al.*, 2018).

と説明でき、解決されたといっている。いいだろう。

これらの一連の流れを図示したのが図 13 である。

8) ABEL 爆撃が生命惑星を生んだ：還元物質と酸化物質の混合

生命惑星誕生の条件を議論するうえで、ABEL モデルが与える非常に重要な示唆は、生物の主要構成元素である C, H, O, N が二次的に付加したことによって、生命の誕生場の原型が生まれた

ことである。ユーリ・ミラーにはじまる生命合成実験では、アミノ酸の合成には酸化物質 (H_2O) と還元物質 (CH_4 , NH_3 , H_2) が必要であることを示唆している。この実験が示したように、非平衡な物質同士 (酸化物質と還元物質) は熱平衡状態では共存しえないので、これらを強制的に供給する場があれば、激しい化学反応を起こし続ける。これが、無機物から生命構成単位であるビルディングブロックをつくりだすためのもっとも本質的

図 14 生命誕生場となった自然原子炉間欠泉モデル (Ebisuzaki and Maruyama, 2017). (左図) 表層の酸化大気 (CO_2 , H_2O , N_2) が地下に運ばれると、碧岩のコマチアイトに含まれるかんらん石と反応して H_2 ガスを発生させ、超還元物が生まれ、HCN おお d の還元大気が生まれる。それらがさらに、自然原子炉のある空洞に運ばれると、 U^{235} の崩壊によって生ずる電離放射線によって高エネルギー粒子がつけられ、さまざまな生命のビルディングブロックを生成する。それらは、間欠泉によって地表にもたらされる。表層の池では膜の乾漆サイクルによって膜の生成が進み、地下からもたらされた生命のビルディングブロックはより高次のリボザイムや RNA へと進化する。(右図) 自然原子炉間欠泉の原理を示した図。間欠泉内部が水で満たされていないとき、自然原子炉は活動を休止している。自然原子炉が水で覆われるようになると活動がはじまる。空洞内部が水で満たされ沸騰すると、間欠泉が噴き出し、洞窟内部の物質が表層環境へ強制的に移動させられる。間欠泉の熱源には 2 つのタイプがあり、火山性の熱源と自然原子炉が考えられるが、自然原子炉間欠泉モデルは後者を熱源とし、非熱的エネルギーを供給することが非常に重要なポイントである。

Fig. 14 Nuclear Geyser model as the birthplace of first life (Ebisuzaki and Maruyama, 2017). (Left) Fundamentals of nuclear geyser system. Surface river water drains into underground caves. Once the main cave fills with water and boils up, geyser splashes toss off material from the cave onto the surface environment. A necked narrow passage connecting caves controls periodic geyser splashes by continuously supplying surface water. The natural nuclear reactor operates periodically depending on its water content, between dormant and active phases. The exposed wall rocks of the geyser are not only uranium ore but also KREEP basalt, serpentinite, and schreibersite (Fe_3P), which supply important nutrients. The irregularly shaped ceiling of the cave acts as a container for reduced gasses to enable synthesis of amino acids. (Right) Mechanism of the geyser. When water does not fill the reactor room, it remains dormant. Once water covers the reactor, it enters an active phase. When the underground cave is filled with boiled water, it splashes. Although there are two types of potential heat source—volcanic magma and natural nuclear reactor—the latter is emphasized in this model.

な出発点である。そして、生命が誕生するためには地球表層でも同様のことが起きたはずである。それは、大気・海洋のない還元的でドライな地球が生まれ、そのあとに水（揮発性成分）をもつ炭素質コンドライトが飛来するというプロセスである。Pasek *et al.* (2007) は有機リン化合物が還元的シュライバーサイト (Fe_3P) の腐食作用によって合成されることを実証したが、そのプロセスはまさに ABEL モデルが説明するものである。地球が二段階で形成されなければ、生命の誕生はありえないのである。

このように、ABEL モデルはドライな地球の形成から前駆的化学進化を可能にした生命主要構成元素の付加、そして生命誕生までの進化の一連のシナリオを矛盾なく説明できるモデルである。生命誕生場の具体的モデルに関しては、ABEL 爆撃によって大気・海洋が誕生した冥王代地球の原初大陸上に生まれた自然原子炉間欠泉を駆動力とするエネルギー・物質循環場 (Nuclear Geyser model) がすでに Ebisuzaki and Maruyama (2017) によって提案されているので、参考にさせていただきたい (図 14)。

VII. 結 論

ABEL モデルは、地球が二段階で形成されたことを説明した新たな地球形成モデルである。第一段階では、1 AU の軌道に存在していたエンスタタイトコンドライトに非常に類似した物質が凝集することによって還元的でドライな地球が 4.56 Ga に誕生し、その時には、地球は大気も海洋も存在しなかった。第二段階になると、炭素質コンドライトを中心とする氷小惑星が地球に飛来した。これらの小惑星の飛来は、巨大ガス惑星の重力散乱が原因で起きたもので、4.37-4.20 Ga に地球に大量に降り注ぎ、小規模な衝突は 39 億年前まで続いた。水を含む揮発性成分を多く含む炭素質コンドライトがドライな地球に降り注いだことによって、徐々に揮発性成分が蓄積され、最終的に大気・海洋をもつ地球が誕生した。この二段階形成モデルは、地球の形成プロセスだけを説明するモデルではなく、生命の主要構成元素である C, H, O,

N が二次的に地球に飛来することによって始めて生命惑星が誕生するというまったく新しい概念を提案した。このことから、これまでに提案された類似するモデルとは区別するため、ABEL モデルと名づけられた。さらに、二次的な大気海洋成分の付加を招いた隕石爆撃を ABEL 爆撃と呼び、これまでに提案されてきたレイトベニアや後期隕石重爆撃説を新たな年代設定とともに置き換えるモデルとして再定義した。

ABEL 爆撃に伴って、固体地球の還元物質と炭素質コンドライトの酸化物質が混じりあうことによって、生命代謝の先駆けとなる化学反応がはじまった。この反応こそが、地球を生命惑星へと導いた最初の反応である。地球生命誕生の起源に迫るプロセスを説明した点で、ABEL モデルの示唆する冥王代地球環境は、今後展開される生命の起源に関する研究に重要である。

一方では、ABEL 爆撃によって、スタグナントリッドからプレートテクトニクスへの移行が起こり、ハビタブルトリニティ惑星への進化がはじまったことも説明しており、ABEL モデルの意味することは非常に大きいといえる。

謝 辞

本論文の編集、文献資料収集ならびに図版作成にあたっては服部玲子氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。なお、本研究は、科学研究費助成事業（新学術領域研究「冥王代生命学の創成（課題番号 26106002；26106006）」を使用した。

文 献

- Abe, Y. (1995): Earth evolution of the terrestrial planets. *Journal of Physics of the Earth*, **43**, 515-532.
- Abe, Y. and Matsui, T. (1986): Early evolution of the Earth: Accretion, atmosphere formation, and thermal history. *Journal of Geophysical Research*, **91**, E291-E302.
- Abe, Y. and Matsui, T. (1988): Evolution of an impact-generated H_2O - CO_2 atmosphere and formation of a hot proto-ocean on Earth. *Journal of Atmospheric Sciences*, **45**, 3081-3101.
- Albarède, F. (2009): Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature*, **461**, 1227-1233.
- Anders, E. (1964): Origin, age and composition of meteorites. *Space Science Reviews*, **3**, 583-714.

- Anders, E. (1968): Chemical processes in early solar system, as inferred from meteorites. *Accounts of Chemical Research*, **1**, 289.
- Arai, T. and Maruyama, S. (2017): Formation of anorthosite on the Moon through magma ocean fractional crystallization. *Geoscience Frontiers*, **8**, 299–308.
- Azuma, S., Yamamoto, S., Ichikawa, H. and Maruyama, S. (2017): Why primordial continents were recycled to the deep: Role of subduction erosion. *Geoscience Frontiers*, **8**, 337–346.
- Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., Kargel, J.S., Komatsu, G. and Kale, V.S. (1991): Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, **352**, 589–594.
- Balsiger, H., Altwegg, K. and Geiss, J. (1995): D/H and 18O/16O ratio in the hydronium ion and in neutral water from in situ ion measurements in comet Halley. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **100**, 5827–5834.
- Becker, H., Horan, M.F., Walker, R.J., Gao, S., Lorand, J.P. and Rudnick, R.L. (2006): Highly siderophile element composition of the Earth's primitive upper mantle: Constraints from new data on peridotite massifs and xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**, 4528–4550.
- Birck, J.L., Rotaru, M. and Allègre, C.J. (1999): 53Mn–53Cr evolution of the early solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**, 4111–4117.
- Bockelée-Morvan, D., Biver, N., Swinyard, B., de Val-Borro, M., Crovisier, J., Hartogh, P., Lis, D.C., Moreno, R., Szutowicz, S., Lellouch, E., Emprechtinger, M., Blake, G.A., Courtin, R., Jarchow, C., Kidger, M., Küppers, M., Rengel, M., Davis, G.R., Fulton, T., Naylor, D., Sidher, S. and Walker, H. (2012): Herschel measurements of the D/H and 16O/18O ratios in water in the Oort-cloud comet C/2009 P1 (Garradd). *Astronomy & Astrophysics*, **544**, L15.
- Borg, L.E., Gaffney, A.M. and Shearer, C.K. (2015): A review of lunar chronology revealing a preponderance of 4.34–4.37 Ga ages. *Meteoritics & Planetary Science*, **50**, 715–732.
- Carr, M.H. and Wänke, H. (1992): Earth and Mars: Water inventories as clues to accretional histories. *Icarus*, **98**, 61–71.
- Cartigny, P., Boyd, S., Harris, J. and Javoy, M. (1997): Nitrogen isotopes in peridotitic diamonds from Fuxian, China: the mantle signature. *Terra Nova*, **9**, 175–179.
- Clayton, R.N. (2003): Oxygen isotopes in meteorites. in *Treatise on Geochemistry* edited by Turekian, K.K. and Holland, H.D., Elsevier, 129–142.
- Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1996): Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, 1999–2017.
- Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1999): Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**, 2089–2104.
- Clayton, R.N., Mayeda, T.K. and Rubin, A.E. (1984): Oxygen isotopic compositions of enstatite chondrites and aubrites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **89**, C245–C249.
- Cloutier, R., Tamayo, D. and Valencia, D. (2015): Could Jupiter or Saturn have ejected a fifth giant planet?. *Astrophysical Journal*, **813**, 8.
- Dauphas, N., Davis, A.M., Marty, B. and Reisberg, L. (2004): The cosmic molybdenum–ruthenium isotope correlation. *Earth and Planetary Science Letters*, **226**, 465–475.
- Dauphas, N., Chen, J.H., Zhang, J., Papanastassiou, D.A., Davis, A.M. and Travaglio, C. (2014): Calcium-48 isotopic anomalies in bulk chondrites and achondrites: Evidence for a uniform isotopic reservoir in the inner protoplanetary disk. *Earth and Planetary Science Letters*, **407**, 96–108.
- Davies, G.F. (1972): Equations of state and phase equilibria of stishovite and a coesite-like phase from shock-wave and other data. *Journal of Geophysical Research*, **77**, 4920–4933.
- DeMeo, F.E. and Carry, B. (2014): Solar system evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, **505**, 629–634.
- Desch, S.J. (2007): Mass distribution and planet formation in the solar nebula. *Astrophysical Journal*, **671**, 878.
- Dohm, J.M. and Maruyama, S. (2015): Habitable trinity. *Geoscience Frontiers*, **6**, 95–101.
- Eberhardt, P., Reber, M., Krankowsky, D. and Hodges, R.R. (1995): The D/H and O-18/O-16 ratios in water from comet P/Halley. *Astronomy and Astrophysics*, **302**, 301–316.
- 戎崎俊一 (2018): タンデム惑星形成理論. 地学雑誌, **127**, 577–607. [Ebisuzaki, T. (2018): Tandem planetary formation theory. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **127**, 577–607. (in Japanese with English abstract)]
- Ebisuzaki, T. and Imaeda, Y. (2017): United theory of planet formation (i): Tandem regime. *New Astronomy*, **54**, 7–23.
- Ebisuzaki, T. and Maruyama, S. (2017): Nuclear geyser model of the origin of life: Driving force to promote the synthesis of building blocks of life. *Geoscience Frontiers*, **8**, 275–298.
- Fanale, F.P. (1971): A case for catastrophic early degassing of the earth. *Chemical Geology*, **8**, 79–105.
- Fischer-Gödde and Kleine, T. (2017): Ruthenium isotopic evidence for an inner Solar System origin of the late veneer. *Nature*, **541**, 525–527.
- Fischer-Gödde, M., Burkhardt, C., Kruijer, T.S. and Kleine, T. (2015): Ru isotope heterogeneity in the solar protoplanetary disk. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **168**, 151–171.
- Geiss, J. and Gloeckler, G. (1998): Abundances of deuterium and helium-3 in the protosolar cloud. *Space*

- Science Reviews*, **84**, 239–250.
- Hayashi, C. (1981): Structure of the solar nebula, growth and decay of magnetic-fields and effects of magnetic and turbulent viscosities on the nebula. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, **70**, 35–53.
- Hayashi, C., Nakazawa, K. and Nakagawa, Y. (1985): Formation of the solar system. in *Protostars and Planets II* edited by Black, D.C. and Matthews, M.S., University of Arizona Press, Tucson, 1100–1153.
- Herwartz, D., Pack, A., Friedrichs, B. and Bischoff, A. (2014): Identification of the giant impactor Theia in lunar rocks. *Science*, **344**, 1146–1150.
- Hiesinger, H. and Head, J.W. (2006): New views of lunar geoscience: An introduction and overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **60**, 1–81.
- Hopkins, M.D. and Mojzsis, S.J. (2015): A protracted timeline for lunar bombardment from mineral chemistry, Ti thermometry and U–Pb geochronology of Apollo 14 melt breccia zircons. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **169**, 1–18.
- Ida, S., Kokubo, E. and Takeda, T. (2001): N-body simulations of moon accretion. in *Collisional Processes in the Solar System* edited by Marov, M.Y. and Rickman, H., Springer, 203–222.
- Ikoma, M. and Genda, H. (2006): Constraints on the mass of a habitable planet with water of nebular origin. *Astrophysical Journal*, **648**, 696–706.
- Jahn, A. and Riller, U. (2009): A 3D model of first-order structural elements of the Vredefort Dome, South Africa—Importance for understanding central uplift formation of large impact structures. *Tectonophysics*, **478**, 221–229.
- Javoy, M. (1995): The integral enstatite chondrite model of the Earth. *Geophysical Research Letters*, **22**, 2219–2222.
- Javoy, M. (1998): The birth of the Earth's atmosphere: The behaviour and fate of its major elements. *Chemical Geology*, **147**, 11–25.
- Javoy, M. and Pineau, F. (1983): Stable isotope constraints on a model Earth, from the study of mantle nitrogen. *Meteoritics*, **18**, 320–321.
- Javoy, M. and Pineau, F. (1991): The volatiles record of a “popping” rock from the Mid-Atlantic Ridge at 14°N: Chemical and isotopic composition of gas trapped in the vesicles. *Earth and Planetary Science Letters*, **107**, 598–611.
- Javoy, M., Pineau, F. and Demaiffe, G. (1984): Nitrogen and carbon isotopic composition in the diamonds of Mbuji Mayi (Zaire). *Earth and Planetary Science Letter*, **68**, 399–412.
- Javoy, M., Pineau, F. and Delorme, H. (1986): Carbon and nitrogen isotopes in the mantle. *Chemical Geology*, **57**, 41–62.
- Javoy, M., Kaminski, E., Guyot, F., Andrault, D., Sanloup, C., Moreira, M., Labrosse, S., Jambon, A., Agrinier, P., Davaille, A. and Jaupart, C. (2010): The chemical composition of the Earth: Enstatite chondrite models. *Earth and Planetary Science Letters*, **293**, 259–268.
- Jolliff, B.L., Wiczorek, M.A., Shearer, C.K. and Neal, C.R. eds. (2006): *Reviews in Mineralogy and Geochemistry: New Views of the Moon*. **60**.
- Kallemeyn, G.W. and Wasson, J.T. (1986): Compositions of enstatite (EH3, EH4,5 and EL6) chondrites: Implications regarding their formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **50**, 2153–2164.
- Kokubo, E. and Ida, S. (1995): Orbital evolution of protoplanets embedded in a swarm of planetesimals. *Icarus*, **114**, 247–257.
- Kouchi, A., Kudo, T., Nakano, H., Arakawa, M., Watanabe, N., Sirono, S.I., Higa, M. and Maeno, N. (2002): Rapid growth of asteroids owing to very sticky interstellar organic grains. *Astrophysical Journal*, **566**, L121–L124.
- Krot, A.N., Keil, K., Goodrich, C.A., Scott, E.R.D. and Weisberg, M.K. (2005): Classification of meteorites. in *Meteorites, Comets and Planets: Treatise on Geochemistry* edited by Davis, A.M., Elsevier, 83–128.
- Kruijer, T.S., Kleine, T., Fischer-Gödde, M. and Sprung, P. (2015): Lunar tungsten isotopic evidence for the late veneer. *Nature*, **520**, 534–537.
- Kumazawa, M. and Maruyama, S. (1994): Whole earth tectonics. *Journal of Geological Society of Japan*, **100**, 81–102.
- Labidi, J., Cartigny, P. and Moreira, M. (2013): Non-chondritic sulphur isotope composition of the terrestrial mantle. *Nature*, **501**, 208–211.
- Latimer, W.M. (1950): Astrochemical Problems in the Formation of the Earth. *Science*, **112**, 101–104.
- Lécuyer, C., Gillet, P. and Robert, F. (1998): The hydrogen isotope composition of seawater and the global water cycle. *Chemical Geology*, **145**, 249–261.
- Macke, R.J., Consolmagno, G.J. and Britt, D.T. (2011): Density, porosity, and magnetic susceptibility of carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, **46**, 1842–1862.
- Marchi, S., Bottke, W.F., Elkins-Tanton, L.T., Bierhaus, M., Wuennemann, K., Morbidelli, A. and Kring, D.A. (2014): Widespread mixing and burial of Earth's Hadean crust by asteroid impacts. *Nature*, **511**, 578–582.
- Maruyama, S. and Ebisuzaki, T. (2017): Origin of the Earth: A proposal of new model called ABEL. *Geoscience Frontiers*, **8**, 253–274.
- Maruyama, S. and Liou, J.G. (2005): From snowball to Phanerozoic Earth. *International Geology Review*, **47**, 775–791.
- Maruyama, S., Ikoma, M., Genda, H., Hirose, K., Yokoyama, T. and Santosh, M. (2013): The naked planet Earth: Most essential pre-requisite for the origin and evolution of life. *Geoscience Frontiers*, **4**, 141–165.
- Maruyama, S., Santosh, M. and Azuma, S. (2018):

- Initiation of plate tectonics in the Hadean: Eclogitization triggered by the ABEL Bombardment. *Geoscience Frontiers*, **9**, 1033–1048.
- Matsuda, T. and Isozaki, Y. (1991): Well-documented travel history of Mesozoic pelagic chert in Japan—From remote ocean to subduction zone. *Tectonics*, **10**, 475–499.
- Matsui, T. and Abe, Y. (1986): Evolution of an impact-induced atmosphere and magma ocean on the accreting Earth. *Nature*, **319**, 303–305.
- Meier, R., Owen, T.C., Matthews, H.E., Jewitt, D.C., Bockelée-Morvan, D., Biver, N., Crovisier, J. and Gautier, D. (1998): A determination of the HDO/H₂O ratio in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). *Science*, **279**, 842–844.
- Meisel, T., Walker, R.J. and Morgan, J.W. (1996): The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle. *Nature*, **383**, 517–520.
- Morbidelli, A., Marchi, S., Bottke, W.F. and Kring, D.A. (2012): A sawtoothlike timeline for the first billion years of lunar bombardment. *Earth and Planetary Science Letter*, **355**, 144–151.
- Moresi, L.N. and Solomatov, V.S. (1995): Numerical investigation of 2D convection with extremely large viscosity variations. *Physics of Fluids*, **7**, 2154–2162.
- Morgan, J.W., Walker, R.J., Brandon, A.D. and Horan, M.F. (2001): Siderophile elements in Earth's upper mantle and lunar breccias: Data synthesis suggests manifestations of the same late influx. *Meteoritics & Planetary Science*, **36**, 1257–1275.
- Mottmann, J. (1977): Origin of the late heavy bombardment. *Icarus*, **31**, 412–413.
- Moynier, F., Day, J.M.D., Okui, W., Yokoyama, T., Bouvier, A., Walker, R.J. and Podosek, F.A. (2012): Planetary-scale strontium isotopic heterogeneity and the age of volatile depletion of early solar system materials. *Astrophysical Journal*, **758**, 45.
- Murakami, M., Sinogeikin, S.V., Hellwig, H., Bass, J.D. and Li, J. (2007): Sound velocity of MgSiO₃ perovskite to Mbar pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, **256**, 47–54.
- Nemchin, A.A., Pidgeon, R.T., Whitehouse, M.J., Vaughan, J.P. and Meyer, C. (2009): SIMS U–Pb study of zircon from Apollo 14 and 17 breccias: Implications for the evolution of lunar KREEP. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 668–689.
- Nemchin, A.A., Grange, M.L. and Pidgeon, R.T. (2010): Distribution of rare earth elements in lunar zircon. *American Mineralogist*, **95**, 273–283.
- Nesvorný, D. (2011): Young solar system's fifth giant planet?. *Astrophysical Journal Letters*, **742**, L22.
- Neukum, G. and Ivanov, B.A. (1994): Crate size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroidal cratering data. in *Hazards due to Comets and Asteroids* edited by Gehrels, T., Matthews, M.S. and Schumann, A., University of Arizona Press, 359–416.
- Neukum, G., Ivanov, B. and Hartmann, W.K. (2001): Cratering records in the inner solar system. in *Chronology and Evolution of Mars* edited by Kallenbach, R., Giess, J. and Hartmann, W.K., Kluwer, 55–86.
- Norman, M.D., Borg, L.E., Nyquist, L.E. and Bogard, D.D. (2003): Chronology, geochemistry, and petrology of a ferroan noritic anorthosite clast from Descartes breccia 67215: Clues to the age, origin, structure, and impact history of the lunar crust. *Meteoritics & Planetary Science*, **38**, 645–661.
- Öberg, K.I., Murray-Clay, R. and Bergin, E. (2011): The effects of snowlines on C/O in planetary atmospheres. *Astrophysical Journal Letters*, **743**, L16.
- Oka, A., Nakamoto, T. and Ida, S. (2011): Evolution of snow line in optically thick protoplanetary disks: Effects of water ice opacity and dust grain size. *Astrophysical Journal*, **738**, 141.
- Pasek, M.A., Dworkin, J.P. and Lauretta, D.S. (2007): A radical pathway for organic phosphorylation during schreibersite corrosion with implications for the origin of life. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**, 1721–1736.
- Pasek, M.A., Kee, T.P., Bryant, D.E., Pavlov, A.A. and Lunine, J.I. (2008): Production of potentially prebiotic condensed phosphates by phosphorus redox chemistry. *Angewandte Chemie-International Edition*, **47**, 7918–7920.
- Pasek, M.A., Harnmeijer, J.P., Buick, R., Gull, M. and Atlas, Z. (2013): Evidence for reactive reduced phosphorus species in the early Archean ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 10089–10094.
- Ringwood, A.E. (1959): On the chemical evolution and densities of the planets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **15**, 257–283.
- Ringwood, A.E. (1966): Chemical evolution of the terrestrial planets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **30**, 41–104.
- Ringwood, A.E. (1977): Composition of the core and implications for origin of the earth. *Geochemical Journal*, **11**, 111–135.
- Ringwood, A.E. (1979): *Origin of the Earth and Moon*. Springer-Verlag.
- Ringwood, A.E. and Kesson, S.E. (1977): Basaltic magmatism and the bulk composition of the moon. *Moon*, **16**, 425–464.
- Robert, F. (2001): The origin of water on Earth. *Science*, **293**, 1056–1058.
- Robert, F., Rejou-Micheal, A. and Javoy, M. (1992): Oxygen isotopic homogeneity of the Earth: new evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, **108**, 1–9.
- Ryder, G. (1990): Lunar samples, lunar accretion and the early bombardment of the Moon. *Eos*, **71**, 313–323.
- Ryder, G. (2002): Mass flux in the ancient Earth-

- Moon system and benign implications for the origin of life on Earth. *Journal of Geophysical Research*, **107**, 6-1-6-13.
- Safronov, V.S. (1969): *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets*. The National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation, Washington, D.C. by Israel program for Science Translations.
- Safronov, V.S. (1972): Evolution of the Protoplanetary Cloud and the Formation of the Earth and the Planets. *Soviet Astronomy*, **16**, 183.
- Schaffer, G.A. and Schaeffer, O.A. (1977): ^{39}Ar - ^{40}Ar ages of lunar rocks. *Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference 8th*, 2253-2300.
- Schönbächler, M., Carlson, R.W., Horan, M.F., Mock, T.D. and Hauri, E.H. (2010): Heterogeneous accretion and the moderately volatile element budget of Earth. *Science*, **328**, 884-887.
- Schwarz, K.R. and Bergin, E.A. (2014): The effects of initial abundances on nitrogen in protoplanetary disks. *Astrophysical Journal*, **797**, 113.
- Smith, J.V. (1982): Heterogeneous growth of meteorites and planets, especially the earth and moon. *Journal of Geology*, **90**, 1-48.
- Solheim, L.P. and Peltier, W.R. (1994): Avalanche effects in phase transition modulated thermal convection: A model of Earth's mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **99**, 6997-7018.
- Solomatov, V.S. (1995): Scaling of temperature- and stress-dependent viscosity convection. *Physics of Fluids*, **7**, 266-274.
- Solomatov, V.S. and Moresi, L.N. (1996): Stagnant lid convection on Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **101**, 4737-4753.
- Solomatov, V.S. and Zharkov, V.N. (1990): The thermal regime of Venus. *Icarus*, **84**, 280-295.
- Spray, J.G., Thompson, L.M., Biren, M.B. and O'Connell-Cooper, C. (2010): The Manicouagan impact structure as a terrestrial analogue site for lunar and martian planetary science. *Planetary and Space Science*, **58**, 538-551.
- Stöffler, D., Ryder, G., Ivanov, A.V., Artemieva, N.A., Cintala, M.J. and Grieve, R.A. (2006): Creating history and lunar chronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **60**, 519-596.
- Taylor, D.J., McKeegan, K.D. and Harrison, T.M. (2009): Lu-Hf zircon evidence for rapid lunar differentiation. *Earth and Planetary Science Letter*, **279**, 157-164.
- Tera, F., Papanastassiou, D.A. and Wasserburg, G.J. (1974): Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm. *Earth and Planetary Science Letter*, **22**, 1-21.
- Touboul, M., Kleine, T., Bourdon, B., Palme, H. and Wieler, R. (2007): Late formation and prolonged differentiation of the Moon inferred from W isotopes in lunar metals. *Nature*, **450**, 1206-1209.
- Touboul, M., Puchtel, I.S. and Walker, R.J. (2012): ^{182}W evidence for long-term preservation of early mantle differentiation products. *Science*, **335**, 1065-1069.
- Touboul, M., Puchtel, I.S. and Walker, R.J. (2015): Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon. *Nature*, **520**, 530-533.
- Trinquier, A., Birck, J.L. and Allègre, C.J. (2007): Widespread ^{54}Cr heterogeneity in the inner solar system. *Astrophysical Journal*, **655**, 1179.
- Tsuchiya, T., Kawai, K. and Maruyama, S. (2013): Expanding-contracting Earth. *Geoscience Frontiers*, **4**, 341-347.
- Urey, H. (1952): On the early chemical history of the earth and the origin of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **38**, 351-363.
- Urey, H.C. and Craig, H. (1953): The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **4**, 36-82.
- Walker, R.J. (2009): Highly siderophile elements in the Earth, Moon and Mars: Update and implications for planetary accretion and differentiation. *Chemie der Erde - Geochemistry*, **69**, 101-125.
- Walsh, K.J., Morbidelli, A., Raymond, S.N., O'Brien, D.P. and Mandell, A.M. (2011): A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature*, **475**, 206-209.
- Wänke, H. (1981): Constitution of terrestrial planets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, **303**, 287-302.
- Wänke, H. and Dreibus, G. (1988): Chemical composition and accretion history of terrestrial planets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **325**, 545-557.
- Weidenschilling, S.J. and Marzari, F. (1996): Gravitational scattering as a possible origin for giant planets at small stellar distances. *Nature*, **384**, 619-621.
- Whitaker, E.A. (1981): The lunar Procellarum basin. in *Multi-ring Basins: Formation and Evolution; Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference*, 105-111.
- Wilde, S.A., Valley, J.W., Peck, W.H. and Graham, C.M. (2001): Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, **409**, 175-178.
- Wilhelms, D.E., McCauley, J.F. and Trask, N.J. (1987): *The Geologic History of the Moon*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1348.
- Willbold, M., Elliott, T. and Moorbath, S. (2011): The tungsten isotopic composition of the Earth's mantle before the terminal bombardment. *Nature*, **477**, 195-198.

- Yang, X., Gaillard, F. and Scaillet, B. (2014): A relatively reduced Hadean continental crust and implications for the early atmosphere and crustal rheology. *Earth and Planetary Science Letters*, **393**, 210–219.
- Zahnle, K., Arndt, N., Cockell, C.S., Halliday, A., Nisbet, E., Selsis, F. and Sleep, N.H. (2007): Emergence of a habitable planet. *Space Science Reviews*, **129**, 35–78.
- Zahnle, K.J., Kasting, J.F. and Pollack, J.B. (1988): Evolution of a steam atmosphere during earth’s accretion. *Icarus*, **74**, 62–97.
- Zhang, J., Dauphas, N., Davis, A.M., Leya, I. and Fedkin, A. (2012): The proto-Earth as a significant source of lunar material. *Nature Geoscience*, **5**, 251–255.