



Sasaki T

Origin and Early Evolution of the Earth

地球の形成と初期進化：生命誕生の場ができるまで

京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室
佐々木 貴教

Department of Astronomy, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, JAPAN.

Corresponding author: Takanori Sasaki, takanori@kustastro.kyoto-u.ac.jp

Phone: +81-75-753-3892

Received: Dec. 1, 2014 / Accepted: Dec. 22, 2014

Abstract The study of the origin and evolution of life cannot be separated from the study of the origin and evolution of the Earth. In this paper, I focused on the latter studies to understand how our planet was formed and how its early environment was evolved. First, I reviewed the over-all formation and evolution of the solar system based on “Kyoto model.” Then, I proposed a new scenario of the early evolution of terrestrial planets especially for the Earth’s early environment. Through these scenarios, I discussed how to make a habitable planet and what mechanisms are essential to make a planet habitable. The universality and diversity of the evolution of life in the Universe is one of the key questions to understand the origin and evolution of life on our Earth. However, these questions are highly complicated and cannot be solved through astronomy alone. I believe that multidisciplinary integration of planetary science, geology, and biology is imperative to promote the new science-field, Astrobiology.

Key words: 太陽系形成論、巨大天体衝突、初期地球、ハビタブルプラネット、系外地球型惑星 (planet formation theory, giant impacts, early Earth, habitable planets, extrasolar terrestrial planets)

1. はじめに

本論文では、生命誕生の場としての地球ができるまでの過程を、太陽系形成・初期地球環境形成に関するいくつかのシナリオをもとに概説する。惑星科学を専門とする筆者の立場から、生命を宿す惑星の

誕生と進化についての定説、および最新の知見を可能な限りシンプルに定性的に論じるつもりである。各物理過程に関する詳細な説明、および定量的な議論については、巻末に上げた参考文献を参照されたい。

2. 太陽系形成論：標準シナリオ「京都モデル」⁷⁾

現在の太陽系形成の標準シナリオは、1980年代に京都大学の林忠四郎らのグループによって提案されたものを基盤とし、「京都モデル」あるいは「林モデル」と呼ばれている⁷⁾。モデルの提唱から約30年が経ち、今日では修正を受けた点もあるが、理論の枠組みは概ね正しいとされ、現在でも惑星形成論の標準シナリオと捉えられている。本節では、図1に示した原始惑星系円盤からの太陽系形成の概念図をもとに、本シナリオの概要を述べる。

原始惑星系円盤

宇宙空間において、水素の密度が高い領域を分子雲と呼び、分子雲の中でもより高密度の部分分子雲コアと呼ぶ。この分子雲コアが自己重力により収縮することで恒星が誕生する。分子雲コアは初期状態で少なからず角運動量を持っているため、重力による自己収縮が進む際に角運動量保存則に従い回転角速度が増加する。回転軸方向のガスが中心まで落下していく一方、回転軸に垂直な方向のガスは遠心力により中心まで落下できなくなり、その結果、中心星の周りに円盤が形成されることになる。この円盤のことを「原始惑星系円盤」、あるいは太陽系に限定した場合には「原始太陽系円盤」と呼ぶ。この円盤中で、現在の惑星系が形成されたと考えられてい

る。

原始太陽系円盤はガスと固体粒子（ダスト）から成る。現在の太陽系の状態を再現するような密度分布等が仮定されており、「太陽系復元円盤」と呼ばれる⁶⁾。円盤の元素組成は太陽系の元素存在度とほぼ等しく、約99%のHおよびHeと約1%の重元素（O, C, Si, Fe, N, Mg等）から構成され、円盤の総質量はおよそ0.01太陽質量であると推定されている。一方、円盤の温度は、ダストについてのエネルギー収支を解くことで推定される。低圧の円盤中でのH₂Oの凝固点は約170Kであり、その温度となる軌道位置を「雪線（スノーライン）」と呼ぶ。現在の太陽系では雪線はおよそ2.7AU程度と見積もられており、雪線の外側ではダストの質量面密度が氷の分だけ大きくなるため、よりおおきな惑星を形成することが可能となる。

微惑星

原始惑星系円盤中での乱流が収まると、円盤中のダスト成分は太陽重力の鉛直方向成分により、円盤の赤道面に沈降し始める。初期に1 μ mオーダーであったダストは、沈降時に互いに衝突合体を繰り返し成長していく。ダストの赤道面への沈降が進むと、赤道面のダスト密度が上昇し、ダスト層が形成される¹⁷⁾。ダスト層が臨界密度を超えると、自己重力によって収縮し、一気にkmオーダーのダスト塊へと成長すると考えられる¹⁹⁾。このようなダスト塊のことを「微惑星」と呼ぶ。雪線の内側では岩石微惑星が、外側では岩石微惑星に加えて氷微惑星が形成される。

ところで、原始惑星系円盤内でダストは太陽の周りをケプラー運動するが、ガスは自身の圧力傾度力により、ケプラー速度よりもやや遅い速度で公転する。ダストサイズが十分に小さいときは、ダストはガスに引きずられ同じ速度で公転するが、ダストサイズがmオーダーになると、ガス抵抗によりダストの角運動量が減少し、ダストは速やかに中心星へと落ち込んでしまう¹⁾。これを「ダスト落下問題」と呼ぶ。ダストサイズがkmオーダーにまで成長すると、ダストはガスとは独立に運動できるようになるため、中心星への落下は回避される。そのため、微惑星形成過程においては、ガス抵抗を受けやすいmサイズを飛び越し、一気にkmサイズの微惑星を形成させる必要がある。

原始惑星

微惑星は互いの重力相互作用により散乱され、軌道離心率・軌道傾斜角が変化し、軌道交差が生じることで互いに衝突合体を起こし成長していく。この際、全ての微惑星が均等に成長するのではなく、微惑星の中で大きいものがさらに周りの微惑星を集め

ることで暴走的に成長することがわかっている。これを微惑星の「暴走成長」と呼び、その結果形成される天体のことを「原始惑星」と呼ぶ¹⁰⁾。自らの重力圏内に含まれる微惑星を全て集積した時点で暴走成長はストップするため、原始惑星の質量は軌道長半径によって決まり、地球型惑星領域ではおよそ火星サイズ程度に達する。互いの重力圏程度の間隔で、独立に微惑星の暴走成長が起きるため、最終的にその間隔で似たサイズの原始惑星が多数並びながら成長していくことになる。これを原始惑星の「寡占成長」と呼ぶ¹¹⁾。地球惑星形成領域では、およそ20個の原始惑星が形成されたと考えられている。

地球型惑星（岩石惑星）

寡占成長により適当な間隔で並んで成長してきた原始惑星は、円盤ガスの減少に伴い、次第に重力相互作用によって互いの軌道を乱し、衝突を起こし始める。地球型惑星形成の最終段階は、「巨大天体衝突」ステージと呼ばれ、原始惑星が互いに衝突合体を繰り返すことで現在の岩石惑星が形成される¹²⁾。したがって、特に地球と金星は現在の姿になる直前に複数回の巨大天体衝突を経験したことが予想されている。

巨大天体衝突は非常に大規模な衝突イベントであるため、形成直後の地球型惑星は表面の岩石が溶融した「マグマオーシャン」状態を経験することになる。またそれまでに獲得していた海の一部も宇宙空間に散逸する。ただし、巨大天体衝突ステージを通して表面の海や大気を全て失うことはないと考えられており、巨大天体衝突以前に獲得していた大気は、後に地球型惑星の原始大気の一部となることが予想される⁴⁾。ちなみにこの巨大天体衝突によって地球の周りにばらまかれたマントル物質が集積することで、地球の月が形成されたと考えられている⁵⁾。

木星型惑星（巨大ガス惑星）と天王星型惑星（巨大氷惑星）

雪線より外側の領域では、氷が凝縮することにより微惑星の材料物質が増えること、および中心星から遠ざかるため相対的に重力圏が広がることから、より大きな原始惑星が形成される。これらの原始惑星は、ガス惑星および氷惑星のコアとなる。原始惑星はその重力によって原始惑星系円盤ガスを引きつけ原始大気を形成するが、コアの質量がある臨界質量を超えると、原始大気が静水圧平衡を保てなくなり、円盤ガスが暴走的に流入することになる。その結果、大量にガスをまとった巨大ガス惑星が形成される¹⁵⁾。

ところで、原始惑星の成長のタイムスケールは、原始惑星系円盤周りのケプラー回転のタイムスケールで律速されている。つまり、軌道長半径が大きい

ほど、成長のタイムスケールは長くなる。天王星形成領域以遠では、原始惑星の形成タイムスケールが、原始惑星系円盤ガスの散逸タイムスケールよりも大

きくなるため、形成された原始惑星は十分な量のガスを捕獲することができず、薄いガスをまとった巨大氷惑星が形成されたと考えられている。

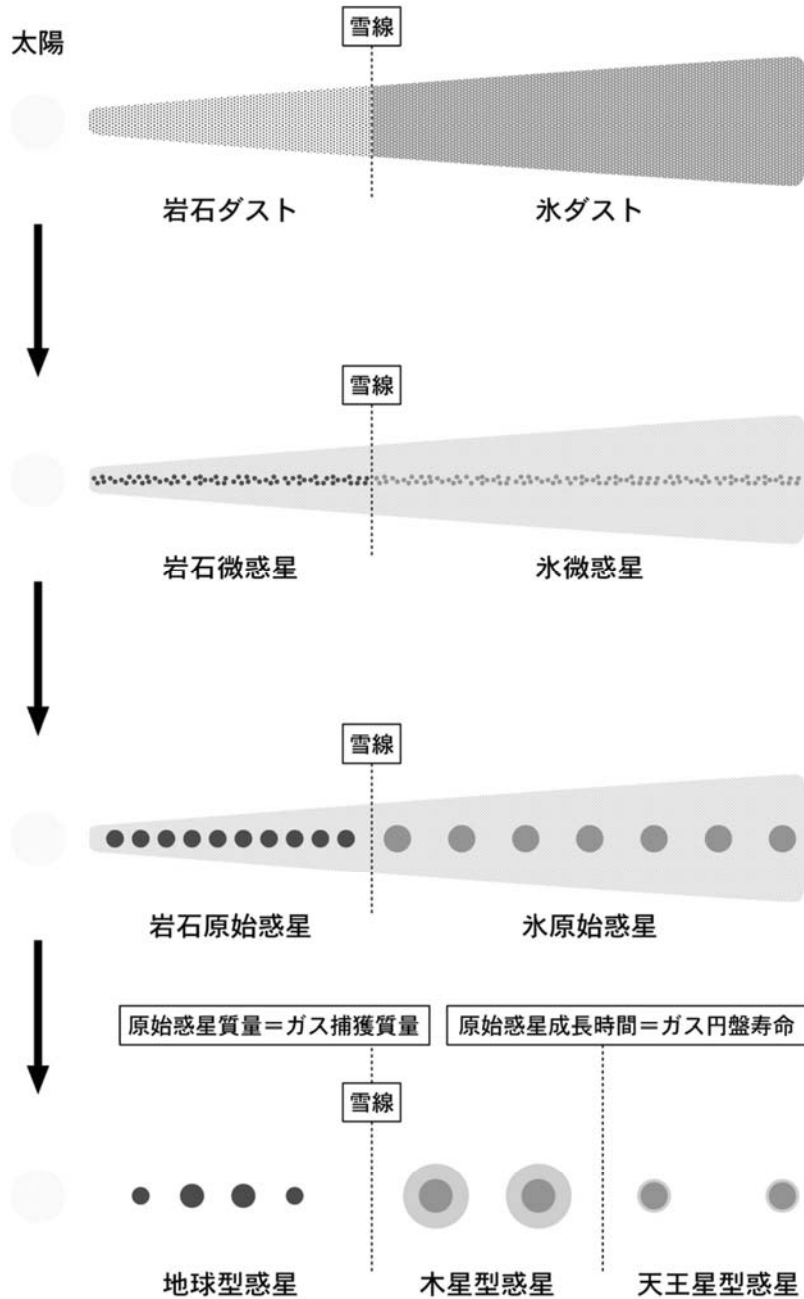


図 1 太陽系形成の標準シナリオの模式図 (理科年表より引用)

3. ハビタブルプラネット

地球の生き物は繁殖を含む生活環のどこかで液体の水を必要とする。そのため「惑星表層に液体の水が存在できる」ことを、惑星が「ハビタブル（生命居住可能）」であるための条件とすることが一般的であり、これまでも惑星形成過程における液体の水の獲得・保持についての研究が数多く行われてきた^{8,13,16}。

ところで、液体の水の存在をハビタブルであるための条件とすることに、なんらかの必然性・普遍性はあるのだろうか？水は宇宙に存在する元素の中で、反応性の無いヘリウムを除けば最も存在量の多い水素と酸素の組み合わせで作られる。そのため、宇宙全体で考えても非常に普遍性のある物質であることがわかる。また、分子量の比較的小さなシンプルな分子の中で、水は圧倒的に高い沸点・融点をもっており、化学反応の溶媒として最適である。よって、惑星表面に存在する可能性のある液体の中で、水は最も大量に存在でき、かつ最も生命活動の媒体として使いやすい物質であるといえる。液体の水に注目して「ハビタブルプラネット」を探すことに、ある種の必然性・普遍性はある、と考えてよいのである。

さて、ハビタブルプラネットの存在条件について考えよう。惑星が中心星に近すぎると、表面の水は全て蒸発してしまう。一方で、中心星から遠すぎると、表面の水は全て凍りついてしまう。惑星表面に液体の水が存在できる、中心星からの距離の範囲を「ハビタブルゾーン」と呼ぶ⁹⁾。中心星の質量や年齢によって放射フラックスの量が異なるため、中心星の種類によってハビタブルゾーンの位置も大きく変わってくる。太陽系では1AU付近がハビタブルゾーンとなり、その領域には地球のみが含まれていることから、太陽系のハビタブルプラネットは地球だけであることがわかる。

ハビタブルゾーンに関する研究は数多くあり、これまで、生命を宿す惑星を探すことは、ハビタブルゾーン内に位置する惑星を探すこととほぼ同義であった。ところが近年、単に液体の水が惑星表層に存在するだけではハビタブルとはいえず、その「量」こそが重要である、という指摘がなされ始めている³⁾。すなわち、「水にあふれた惑星」ではなく「わずか0.023wt%の水を持つ惑星」であることが、地球をハビタブルな環境にしている、という指摘である。わずかな水の存在により、大陸・海洋・大気の三要素が惑星表層に同時に存在でき、それらが循環的に相互作用することで、生命誕生場となる極めて多様で動的な環境「Habitable Trinity」が作られる。このことがハビタブルプラネットを作る上での重要な条件だと考えるのである。

4. 地球の初期進化に関する新しいシナリオの提案

²⁰⁾

地球における生命の発生・進化を考えるうえで、初期地球の表層環境の形成・進化の過程を明らかにすることは極めて重要である。ここでは、地球形成の最終段階である巨大天体衝突ステージが、Habitable Trinityを含む地球の特異性の解明の鍵を握っている可能性があることを示し、地球の初期進化に関する新しいシナリオの提案を行いたい²⁰⁾。

巨大天体衝突ステージにおいて、衝突合体による地球型惑星の成長が進む一方、かなりの量（系の質量の1割以上）の衝突破片が惑星軌道上にばら撒かれることが、詳細な衝突シミュレーションによってわかってきた。これらの衝突破片中には、原始惑星のコアに由来する金属鉄も相当量含まれている。衝突破片は後に地球に時間をかけて再集積し、力学的・化学的両面で初期地球進化に大きな影響を与えることが予想される。

まず、衝突破片の再集積は、原始惑星同士の合体によって形成された地球型惑星の軌道に影響を与える可能性がある。特に、巨大天体衝突ステージを通して0.1程度まで上昇した惑星の離心率を、力学的にダンプすることで、現在の0.01程度にまで下げることが可能である。つまり、自律的に円軌道の地球型惑星を形成することが可能となる。一方、衝突破片の再集積は、化学的な面で地球の組成に影響を与える可能性がある。特に、衝突破片中の金属鉄が再集積することで、金属鉄中に含まれる強親鉄性元素が地球マントルに供給されたはずである。これは、現在の地球マントル中で観測されている強親鉄性元素の過剰を説明する「レイトベニア」仮説²⁾において、その供給源が自律的に与えられることを示唆している。

さらに衝突破片の再集積は、初期地球の表層環境にも大きな影響を与える。特に衝突破片に含まれる金属鉄は強力な還元剤として働き、原始海洋との反応により大量の水素を発生させ、地球表層の酸化還元状態を大幅に還元的にする可能性がある。これにより、一般的に生命の発生・進化に有利であると考えられている還元的な環境を、地球が初期に長期間（10~20億年程度）保持することが期待される。また原始海洋の大部分が金属鉄によって還元消費されることで、もともと地球が保持していた水が適度な量にまで減らされ、「わずか0.023wt%の水」が自律的な調整メカニズムにより実現する可能性も示唆されている。

本シナリオは、惑星形成過程の最終段階と、地球表層環境形成の初期段階を繋ぐ、分野横断的な重要な研究課題である。ただし、現在まだその大枠を提案し始めたばかりのところであり、これから詳細な数値計算、および地質学的調査等を通して、検証を

行っていく必要がある。

5. 地球から「地球たち」へ

これまで見てきたとおり、地球型惑星の形成過程、および初期地球環境の進化過程については、主に理論的な研究を通してその理解が進んできた。しかし、太陽系や地球の形成・進化を論じることは一回性の歴史を研究することに他ならず、その固有性と普遍性、偶然性と必然性を峻別することはなかなか困難であった。ところが、1995年に初めて太陽系外の惑星が発見され¹⁴⁾、その後も次々と多様な惑星系が見つかってきたことにより、状況は大きく変化し始めている。

1995年以来1800個を超える太陽系外の惑星が発見されてきたが、その中には地球サイズの惑星も数多く含まれている。さらに2014年4月には、ついにハビタブルゾーンに位置する地球型惑星の存在も報告されるに至った¹⁸⁾。最新の見積りによると、銀河系内の恒星の半数近くに地球型惑星が存在していることが示唆されている。これらは地球のように海をたたえて生命を育む惑星が宇宙に充満する可能性、さらには、そのことにより生命の存在も相対化される可能性を示している。自然科学の次の大きな課題の一つは、宇宙における生命進化の一般性・多様性の探求である。今後、天文学、生物学、地球科学など、多様な視点から宇宙に広がる「地球たち」に関する研究が、相互協力的・分野横断的に推進されていくことを心より期待する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 若手研究 B (24740120)、および新学術領域研究 (領域番号 2605) の助成を受けたものです。

引用文献

- 1) Adachi, I., Nakazawa, K., and Hayashi, C. 1976. The gas drag effect of the elliptical motion of a solid body in the primordial solar nebula. *Progress of Theoretical Physics*. 56: 1756~1771.
- 2) Chou, C. L. 1978. Fractionation of siderophile elements in the Earth's upper mantle. *Proceedings of 19th Lunar and Planetary Science Conference*: 219~230.
- 3) Dohm, J. M., and Maruyama, S. 2014. Habitable Trinity. *Geoscience Frontiers*. in press.
- 4) Genda, H., and Abe, Y. 2005. Enhanced atmospheric loss on protoplanets at the giant impact phase in the presence of oceans. *Nature*. 433: 842~844.
- 5) Hartman, W. K., and Davis, D. R. 1975. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*. 24: 504~515.
- 6) 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.
- 7) Hayashi, C. et al. 1985. Formation of the Solar System. in *Protostars and Planets II*. (Tucson: University of Arizona Press), 1100~1153.
- 8) Ikoma, M., and Genda, H. 2006. Constraints on the mass of a habitable planet with water of nebular origin. *Astrophysical Journal*. 648: 696~706.
- 9) Kasting, J. F., Whitmire, D. P., and Reynolds, R. T. 1993. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*. 101: 108~128.
- 10) Kokubo, E., and Ida, S. 1996. On Runaway Growth of Planetesimals. *Icarus*. 123: 180~191.
- 11) Kokubo, E., and Ida, S. 1998. Oligarchic Growth of Protoplanets. *Icarus*. 131: 171~178.
- 12) Lissauer, J. J., and G. R. Stewart. 1993. Growth of Planets from Planetesimals. in *Protostars and Planets III*. (Tucson: University of Arizona Press), 1061~1088.
- 13) Matsui, T., and Abe, Y. 1986. Evolution of an impact-induced atmosphere and magma ocean on the accreting Earth. *Nature*. 319: 303~305.
- 14) Mayor, M., and Queloz, D. 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*. 378: 355~359.
- 15) Mizuno, H. 1980. Formation of the Giant Planets. *Progress of Theoretical Physics*. 64: 544~557.
- 16) Morbidelli, A., Chambers, J., Lunine, J. I., Petit, J. M., Robert, F., Valsecchi, G. B., and Cyr, K. E. 2000. Source regions and time scales for the delivery of water to Earth. *Meteoritics & Planetary Science*. 35: 1309~1320.
- 17) Nakagawa, K., Hayashi, C., and Nakazawa, K. 1981. Growth and Sedimentation of Dust Grains in the Primordial Solar Nebula. *Icarus*. 45: 517~528.
- 18) Quintana, E. V. et al. 2014. An Earth-Sized Planet in the Habitable Zone of a Cool Star. *Science*. 344: 277~280.
- 19) Safronov, V. 1969. *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets*. (Moscow: Nauka).
- 20) Sasaki, T., Genda, H., Ueno, Y., Iizuka, T., and Ikoma, M. Re-entry of giant-impact fragments and the dynamical and geochemical consequences. submitted.