
《研究ノート》

地球生命起源へのアプローチの方法論：地球外からのアプローチ

小 出 良 幸

要 旨

生命誕生へのアプローチとして、地球外の対象や素材を研究している天文学、惑星科学、隕石学、シミュレーション学の分野についてまとめた。天文学は、系外惑星は非常に多様で、我々の太陽系はひとつ多様性に過ぎないことが明らかにしたことで、惑星系形成に新たなモデル構築を迫った。惑星科学では、小惑星帯の化学的束縛条件があり、ハビタブルトリニティとして陸の存在も生命誕生には重要であることがわかってきた。隕石学では、生命誕生における化学的束縛条件と時間的束縛条件がつけられ、還元的で無水のEコンドライトが地球の材料になることがわかってきた。シミュレーション学において、タンデムモデルによって太陽系形成や系外惑星の多様性も説明できるようになってきた。地球は二段階モデルで、最初は還元的で無水の状態で形成され、その後炭素質コンドライトによる揮発成分が供給されるABEL爆撃が起こった。地球外の学問によって生命誕生のための束縛条件が明らかにされてきた。

キーワード：生命の定義、天文学、惑星科学、隕石学、Eコンドライト、シミュレーション学、タンデムモデル、還元的で無水の地球、地球形成の二段階モデル

1 はじめに

地球創成時期に当たる5億年間について一連の研究を進めている。地球創成とは、地球だけでなく太陽系全体の創成も意味し、この時期に太陽系全体で大きな変化が起こったことになる。だが、証拠が少ない時期でもある。数理モデルによるコンピュータ・シミュレーションによる研究（シミュレーション学と呼ぶ）が中心になり、そこに天文学や惑星科学、隕石学、地質学、古生物学、生物学、生化学など多様な分野からの証拠で、束縛条件が示され、検証され、修正されていくことになる。

これまで、一連の研究として、地球誕生の条件を探るために太陽系全体の素材（小出、2022a）について検討し、次いで地球や太陽系惑星の直接の材料となった始原的隕石を概観し（小出、2022b）、分化した隕石の特徴から太陽系初期や天体形成を考えた（小出、2023）。本論文も

その取り組みの一環となる。

地球創成は、非常に多様な学問体系の学際的な総合科学として取り組んでいかなければならないという困難さがある。加えて、時間経過によるシナリオが示されていくことになるはずだが、時期によって関わってくる学問分野も変化していくことになり、それにより困難さを増している。例えば、形成場については天文学、材料・素材について隕石学、形成プロセスについては惑星科学やシミュレーション学が、地球形成後は地質学などが中心になってくる。この太陽系形成、地球形成のシナリオの上に、本論文のテーマである生命誕生のシナリオが構築されていくことになる。本論文では、生命起源についてどのようなアプローチがあるのかの方法論のうち、地球外の学問を中心に考えていく。

25年前ころから、このテーマについては検討してきた(小出, 1998, 1999a, 1999b, 1999c, 2001; 小出・山下, 1995, 1996a, 1996b; 小出ほか, 1997)。当時も、生命起源について、いくつもの仮説があり、決着をみないものも多かった。近年、大量の系外惑星の発見で、太陽系形成や地球形成のシナリオも再構築が迫られてきた。生命起源は、太陽系形成や地球形成のシナリオが大きな束縛条件となるため、シナリオのゆらぎは、大きな影響を受けることになった。

そんな矢先、生命起源に、大きな進展があった。科学研究費助成事業の新学術領域研究「冥王代生命学の創成」(2014年～2019年)という学際的研究が5年間実施され、成果が次々と報告されてきた。Geoscience Frontiers 誌での Special Issue “Frontiers in Early Earth History and Primordial Life-Part I” (Maruyama and Santosh, 2017) と Special Issue “Frontiers in early Earth history and primordial life-Part II” (Maruyama and Santosh, 2018), さらに地学雑誌の特集号「冥王代の世界 (Part I) —ハビタブルトリニティ惑星の誕生—」(丸山ほか, 2018), 「冥王代の世界 (Part II) —生命誕生場の準備—」(丸山ほか, 2019), 「冥王代の世界 (Part III) —生命誕生と初期進化—」(丸山ほか, 2020) の5誌が発刊され、それらをまとめた普及書として「冥王代生命学」(丸山ほか, 2022) や「最新地球と生命の誕生と進化 [全地球史アトラス] ガイドブック」(丸山, 2020) が上梓された。

報告されて間もない成果なので、今後の議論や検証が必要ではある。だが、非常に多岐にわたる分野において、多くの成果が盛り込まれている。これまでの仮説を否定したり、新しい仮説が提唱されたりする重要で興味深い成果群となっている。

それらを参照しながら地球生命起源について総括をしていく必要があると考えた。だが、多くの探求で多岐に渡る成果となるため、本論文では、生命起源の探求の方針と方法論を考え、地球外を研究対象としている天文学、惑星科学、隕石学、シミュレーション学からのアプローチを整理していくことにする。地球内について稿を改めて報告する予定である。

本研究は、2023年度研究促進奨励金B「四国と北海道における地質学的特徴の把握と地質学的固有概念に関する哲学的考察」(SGU-BS2023-04)を利用したものである。また、本研究はサバティカル期間に実施したもので、多数の論文を読み込み、整理する機会ともなった。

II 生命起源の探求に向けて

生命起源を扱う時、まずは「生命とはなにか」を考えておく必要がある。生命が定義されていないと、原始的な化石が発見された時、生命と呼んでいいのか、それとも類似した非なるものかが判別できない。生命の定義は、いろいろあるが(小出, 1998), まずはそこから確認していこう。

1 生命の定義

イギリスの化学者でRNA ワールド仮説を提唱したオーゲル (Orgel, 1973) によると、生命の本質は、「複雑な情報伝達と再生産可能な自然選択によって進化した対象体」で「生命は高度に複雑で組織化された化学系」とした。その中で、自己複製、遺伝情報の伝達、エネルギーの取り込みと利用、化学反応の制御が重要な要素とされた。その中には、自然選択による「進化」や、「自己複製」、「遺伝情報の伝達」、エネルギーの取り込みと利用、化学反応の制御など、後述の「代謝」に相当する機能が示された。

岩波生物学辞典（第4版、八杉ほか編、1998）によると、生命とは「生物の本質的属性として抽象されるもの」として、個体および種の保存、進化を生命の本質的属性とみなした。その根底には「情報の伝達とエネルギーの方向づけられた変換」があるとしながらも、明確な定義がなされないが、生物学者が用いている現実的課題も指摘している。

このような課題は、同書の「生物」の項において「生命現象を営むもの」と記しながらも、「両者の関係はトートロジーとなり」と指摘している。基本的属性としては、核酸の司る「遺伝」と、蛋白質の司る「代謝」の関与する「増殖」を有力であるとした。

世界大百科事典（第2版、日高、2005）も生物学事典と類似の定義になっており、循環論法の問題も指摘している。生物の定義として、歴史的に成長と代謝を重視されてきたとして、代謝の結果、繁殖（増殖）し、種の存続（自己保存）していくこととしている。また、生物の機能に着目して、遺伝・代謝・適応の3つ（清水、1985）を示したものもある。

日本大百科全書（鈴木、1998）では、生物はいろいろ定義がされてきたが、「すべてを満足させる定義を与えることはできない」とした。生物のある属性を示しても、無生物でも似た属性を持っていたり、生物でその属性をもっていないものもあって、生命の「必要十分条件を規定するのはむずかしい」。

ドーム・丸山 (2018) は、生命には、

- ・生物の体の内と外を隔てるための「膜」
- ・糖と栄養塩を消費する化学反応によってエネルギーをつくり出す「代謝」
- ・生命を後世に残すための「自己複製」

の3つの要素が必要だが、これら要素がそろっていても、生命を維持するには、「物質やエネルギー」の供給が「継続」している必要があるとした。

上述のように、さまざま視点で定義が試みられてきた。必要十分条件は示せないため、厳密な定義はできない。だが、いくつかの不可欠の属性が抽象できるだろう。

生物として「**個体(individual)**」となっていることが十分条件である。次に、「**代謝(metabolism)**」と「**複製(reproduction)**」が必要条件になっていると考えられる。「複製」から副次的に生じる「**進化(evolution)**」という条件(複製の十分条件)も加えていくべきであろう(図1)。また、生命を維持するためには、外界と物質やエネルギーの供給が「**継続**」して、「代謝」が「**継続**」していくことが必要条件になる。個体、代謝、複製、進化について、単細胞生物をモデルにして考えていく。

a 個体 (内と外の境界, 生物の基本単位)

生物を認識するためには、外界(環境)と内側(自分自身)を区別するための境界をもたなければならない。内外を区分されたものが「**個体**」(細胞)となるため、内外の境界は重要となる。個体の識別のためだけでなく、後述の代謝のための物質の出入りを判別するためにも必要な概念となる。

生物の外界と内側の境界は、細胞膜というリン脂質で構成されている。細胞膜を通じて物質やエネルギーの出入りが起こる。このような個体の内外の営みを「**代謝**」と呼ぶ。

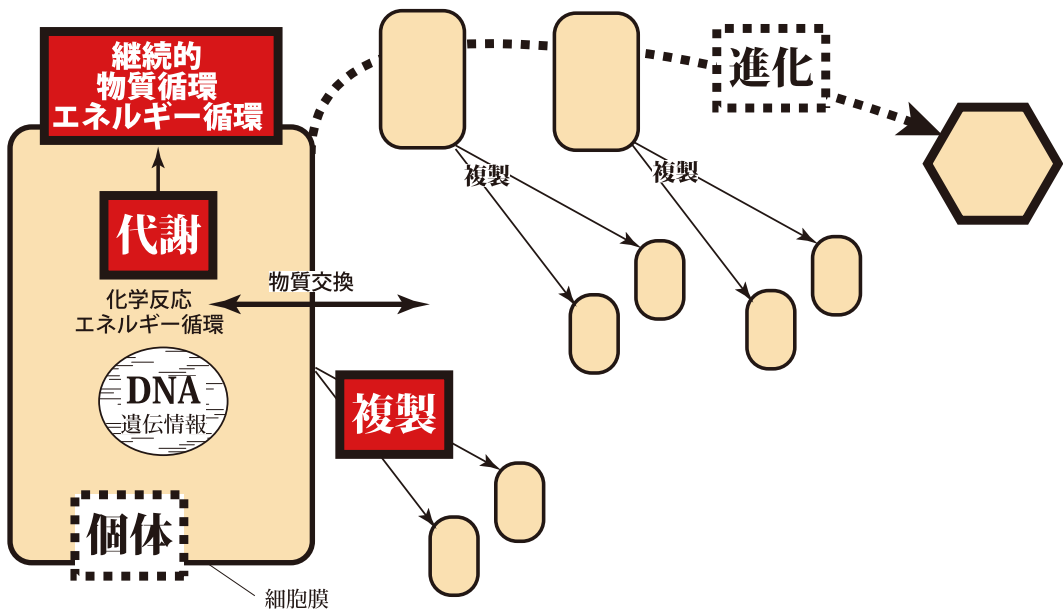


図1 生命の定義

生命の定義の概念を単細胞生物で示した。生命の定義する要素を条件としてとらえると、「**個体**」が十分条件、「**代謝**」と「**複製**」が必要条件、「**進化**」は複製の十分条件となる。他にも「**継続的**」な物質交換、化学反応、エネルギー循環が必要条件となる。実線：必要条件、破線：十分条件を意味する。

外界の条件（環境）の変化が起これば、個体は対応（適応）しなければならない。変化に対応できれば生存が継続し、繁殖していく。適応できなければ、生存できなくなり個体が死を迎える。複数の個体からなる種のレベルでの適応は「繁栄」となり、不適応は「絶滅」となる。適応を広義でみると、自然選択への対処ともとらえられ、後続の個体に固定された変化を伴えば「進化」となる。

個体は、生物として機能や活動、後述の生物の各種の属性を考えるための基本単位となるものである。分類の階層で考える時、生物学的「種」を構成する生物集団、生物集団を構成する個体群、個体群の基本となるのが個体である。

b 代謝（物質交換，エネルギー循環の継続）

個体では、細胞膜を通して物質を内部に取り込めこみ、利用して不要になった物質を外界に排出されていく。出入りする物質の形状や状態は変化している。外から物質を取り込み、個体内で化学反応（分解，合成）をおこない、反応後に不要になった物質を排出することを「代謝」と呼ぶ。代謝が継続することで、個体の機能（生命）を維持していく。

化学反応ではエネルギーが出入りする。個体内で、物質を分解すること（異化）でエネルギーを取り出していく。そのエネルギーを利用して単純な物質から必要な複雑な物質に合成（同化）していく。化合物には、個体内に化学エネルギーを保存できる化合物もある。保存された化合物は、異化することで単純な物質に変わる時、エネルギーが放出される。

個体内では、リン酸から合成されたアデノシン三リン酸（ATP）が、異化する時に生じるエネルギーを代謝に用いられる。ATPは、アデノシンに高エネルギーのリン酸が3つ結合したもので、酸素によってリン酸の結合が分解されることでエネルギーが取り出せる。ATP合成は、真核生物ではミトコンドリアが担っている。このようなエネルギーの合成も代謝の一種になり、エネルギー代謝と呼ばれる。

代謝は、タンパク質が担っている。タンパク質は、アミノ酸がペプチド結合で連結したポリマーである。生物が利用しているアミノ酸は20種あり、それぞれが特定の側鎖（R基）を持つ。タンパク質は、アミノ酸の配列によって多様な三次元構造を持つことで、酵素として多様な化学反応の触媒ともなる。

個体を存続するためには、代謝が継続されなければならない。

c 複製（増加，分裂）

個体がおこなう代謝や個体の特徴は、すべて情報（遺伝情報）として個体内に記録されている。個体の情報は、DNA（デオキシリボ核酸）の中に塩基配列として記録されている。

DNAは、有機塩基、糖、リン酸から構成されている。DNA内の遺伝情報は、RNA（転移RNA，tRNA）によって運ばれ、RNAに転写され（メッセンジャーRNA，mRNA）、リボソ-

ム(リボソーム RNA, rRNA)によってタンパク質へ伝えられていく。このような過程を「翻訳」と呼ぶことがある。

遺伝情報の発現時期が調節され、順調に進むことで個体の成長へとつながっている。成長した細胞は、やがて分裂(細胞分裂)が起こる。細胞分裂では、細胞内で DNA が2セット形成(複製)され、細胞膜が収縮しくびれていき、二つの細胞に分裂(二分裂 binary fission)していく。その結果、ひとつの個体から、同じ DNA を持った二つの個体ができていく。これを増殖、自己複製などと呼ぶ。単細胞生物では、同じ DNA をもった個体が増えていく。

単細胞生物では、遺伝子の多様性の形成は起こりにくく、突然変異によることになる。一方、多細胞生物では、雌雄をもつことで多様性を生み出す仕組みが組み込まれている。細胞分裂する時、DNA が二つに別れて半数になる減数分裂(meiosis)が起こる。雌雄ごとに半数の DNA をもった生殖細胞(卵子と精子)が形成され、両者が受精によってもとの染色体数に戻っていく。このような増殖の過程で多様性が生まれていく。減数分裂と受精によって、DNA の組み合わせが4通りに増えていくことで、遺伝的多様性が形成される。多細胞生物では、自己複製に進化を起ししやすい機能が組み込まれている。

d 進化(複製の継続)

進化とは、可変性のある体勢をもつ多様な生物群を前提としている。自己複製の過程におこる変化で DNA に遺伝情報として固定されて、種のレベル、あるいは上位の分類群にまでおよんだものが、「進化」となる。進化を担っている物質は、自己複製と同じ DNA である。自己複製の過程で DNA の改変、組み換えが起こる。そのうち生存可能で、なおかつ他の個体と比べて優位性をもっており、種内で一定の割合を占めていくと、新たな種として固定される。

もし進化という属性を持たず、多様性も生じない1種の生物のみの世界があれば、変化は個体数の増減だけになる。また、個体内にア・プリオリに多様性があっても、種の変化にはならず、多様性ごとの個体数の増減するにすぎない。

生物種に多様性があり、生物種間で棲家や食料などで競合が起こったら、強いものが個体数を増やし、弱いものが減るといった種間の生存競争が起こることになる。また、環境条件の変化による自然淘汰もおこる。内包された多様性と可変性による変化と、外的な自然淘汰による選別が、進化につながっていく。

生物種の「進化」という現象は、家畜や作物の品種改良などの実験や観察で確認されている。進化のメカニズムに関する仮説は、ダーウィンが提唱して以来、盛んに研究や議論がおこなわれてきた。分子レベルで、DNA の遺伝情報の保存と分裂時の変異の発生と伝播などが基本メカニズムとなっている。

しかし、進化論には多くの未解決問題が残されている。例えば、変異が発生した個体が新しい種となるはずだが、種の定着のメカニズム、DNA 上の遺伝子上の変異と形質変化との関係など、

不明なこともある。DNA へのウイルスの侵入などが発見され、多様な進化メカニズムがある可能性もわかってきた。形質変化には複数の遺伝子が関与する場合や環境の影響などもあり、そのメカニズムは複雑である。代謝でタンパク質が遺伝子発現を制御することが示されたが、そのメカニズムと進化への影響はよくわかっていない。さらに、進化が、地球生物に固有のものなのか、普遍的な生命のメカニズムかは、比較対象がないため不明である。

生命あるいは生物の定義や、必要かつ十分な属性は確定されていないが、上記のような個体、代謝、複製、進化、代謝の継続性という属性をもっているものを生物とするのが、現在の合意となっている。

2 生命起源を考えるための前提

生命起源は未解決問題があり、解決には科学のさらなる進歩が必要であろう。研究分野によっては、手がかり少ない分野もある。手がかりない状態の時、なんらかの方法や発想の転換をしていく必要がある。そんな時、使えるアイデアをいくつかまとめておく。

a フェルミのパラドックスから

人類の文明や科学技術の発展から外挿してくと、知的生命は、生まれた天体の至るところを利用し、やがて天体外へも拡散していくだろう。発展を続ける文明であれば、要する時間は不明だが、自身の恒星系だけでなく、他の恒星系へ、さらには銀河のいくつもの天体へと進出していくだろう。このような発展過程が想定できるなら、人類よりはるか以前に先行した知的生命が存在していれば、地球に到達し人類と接触していてもいいはずである。ところが、「人類は未だに地球外知的生命との接触がない」という事実とは、論理的に矛盾が生じている。この状態を、アメリカの物理学者フェルミ（Enrico Fermi）は、かくれんぼ遊びにたとえて、“Where is everybody?”という問いを發し、「フェルミのパラドックス（Fermi's Paradox）」と呼ばれるようになった。

このパラドックスは、宇宙には知的生命がいるはずなのに、知的生命が地球にはやって来ないし、人類とコンタクトもとっていない。このパラドックスには、科学技術を持たない地球外生物の存在は考慮していないが、生命進化を前提としていることに注意しなければならない。

このパラドックスの解決として、地球人類が唯一の存在や、技術的進歩における障壁など、いくつかのアイデアがある（小出、1999c）。

地球人類が唯一の存在だろうか。どんなに稀な現象であっても、地球人類が存在するということは、重要な事例となる。多数の恒星系、多数の銀河系が存在しているため、確率的にも、地球人類が唯一の存在とは考えられない。ただし、地球人類が、宇宙の中でも特殊な条件の中で低い確率で誕生した存在という可能性はある。だが、そのような条件が確定されるまでは、この考えは採用できない。なぜなら、それ以上前に進めないからである。また、太陽系は、銀河文明の

自然公園で、多数存在する知的生命から、わざと放置されているという「動物園仮説」(Ball, 1973) もがあるが、これも検証不能なので、採用できない。

地球人類が唯一の知的生命でないとすると、フェルミのパラドクスをどう回避すればいいのかわ。一つの考えとして、生物誕生から、知性を持ち、文明を持ち、科学技術を進歩させていくまでには、いくつもの障壁があったとする。地球では、生命誕生から知性をもつに至るまで30億年以上の時間が必要であった。地球生物の一例しかないが、生物の進化において技術文明を獲得するまでに長い時間が必要であることが類推できる。その長い時間内には、さまざまな障害があり、いずれも乗り越えるのが困難であったとしたら、地球人類が稀有な存在となるだろう。

例えば、生物が海で誕生し、その後陸上へ進出する時の困難さとして、海と陸の比率、陸地の紫外線の減少、生物の体制の完成などの条件をクリアしていなければならない。知的生物が生まれたとしても、海中であれば、科学技術の多く、火力、製鉄、電気技術などは使えない。陸上の知性が科学技術をもったとしても、文明・民族・国家間での衝突による知的生命間の自滅の危険性もある。さらに、宇宙空間で補給なしで長期の生物維持が困難で、宇宙進出への困難さがある。長距離の移動にかかる時間の間に、宇宙空間での生殖と子孫の継続を克服しなければならないだろう。それらの障害を、適切な時期に、順次、すべて克服していくためには、長い試行錯誤が必要で、通常の生物の進化速度では、恒星の寿命内で終われそうにない。など、さまざま障害があったと考えられる。

もしかすると、観測圏外には人類と同様にすべてクリアしている、同時代に地球外知的生命が存在する可能性があるかもしれないが、不可知論となる。

地球外知的生命が少数だとしても、多くの太陽系外惑星が存在するので、生物を宿す天体は多数存在すると想定される。

b 生命は地球型だけか

地球以外にも生物が存在すると仮定すると、それらは地球型生命と類似したものであろうか、それとも全く異なったものだろうか。確率的にも、論理的にも、異なると考えられる。例えば、代謝に利用するアミノ酸の選択や組み合わせは多数で、地球生物のように20種だけでなく、いろいろな選択や組み合わせがありうる。また、2種の立体異性体(光学異性体 optical isomers)としてD体(Dextro, 右型)とL体(Levo, 左型)がある。そのうち、地球生物は、なぜかD体アミノ酸のみが用いられている。L体もしくは混在型の生物がいてもいいはずだが、地球では発見されていない。そこにはどのような必然性があったのかは不明だ。

また、核酸塩基も、地球生物のアデニン(adenine)、チミン(thymine)、グアニン(guanine)、シトシン(cytosine)の4種しか用いていない。他の組み合わせもありえるだろう。RNAではチミンの代わりにウラシル(uracil)が用いられているのはなぜか。核酸の構造においても、D体の二重らせんでなくても、L体の二重らせん(Wang et al., 1979)でも、三重(Felsenfeld et

al., 1957), 四重 (Wang and Patel, 1992; Kanoh et al., 2015) でもいいであろう。

地球生物のタンパク質や核酸の種類や組み合わせや構造に、多様性が存在することから、他の条件や環境では、化学反応から誕生まで、その後の進化過程を考えると、多様な生物がいて多様な進化をしている可能性がある。

有機物を中心とする生物（炭素系生物）は、水中で発生すると考えられている。水は、極性をもっているためいろいろな物質を溶かせること、物質をイオン化できること、比熱が大きいなどという特性があるため、代謝などの反応が起こりやすくなる。水の存在とその維持が、生物発生もしくは進化のために重要な条件になってくると考えられる。

もし、水に変わるような媒質があれば、別の形態の生物が発生していいはずである。木星のようなガス惑星では、メタンやアンモニアを利用した炭素系生物の材料が、合成できることは実験で確認されている。Sagan et al. (1967) は、このような環境で、浮遊性の生物が可能だと考えた。気球のように水素を入れたり暖めたりして大気中に浮いている生物を考えた。浮遊性生物は、天体大気内で十分なエネルギーが発生していれば活動できる。木星では大気の運動や磁気などから、太陽からえられるエネルギーの2倍ほどのエネルギーを発生している。このようなエネルギーを活用すれば、太陽から遠く離れた惑星でも生命誕生と進化は可能かもしれない。

アンモニアは、宇宙にたくさんある物質で、 H_2O の水に比較的似た性質をもっている。アンモニアの海では、有機物を中心とした炭素型生物が誕生する可能性がある(Haldane, 1954)。だが、そこで合成されるタンパク質や核酸は全く違ったものになるはずである。アンモニア型タンパク質やアンモニア型核酸と呼ぶべきもので構成されているはずである。アンモニアの液化は低温(-78℃)なので、化学反応はゆっくりとしたものになり、代謝や進化も緩慢なものとなるであろう(Schulze-Makuch and Irwin, 2008)。このような生物の代謝や機能を考える時、有機化学の知識が役立つはずである。アンモニア型生物体は、窒素を吸収して最終産物としてシアンを出すと考えられる。酸素もかつては嫌気性生物の世界では有毒な物質であったが、生物は適応してきた。同様に、シアンは地球生物にとって有毒だが、好気性でアンモニアを分解し亜硝酸(NO_2)にするニトロソモナス菌や、亜硝酸を分解し硝酸塩(NO_3)にするニトロバクテリア菌がいたり、嫌気性のアンモニア水の中でも生きていけるバクテリアもいたりする(久保ほか, 2011; 石田, 2001)。

地球生物は炭素を中心としているが、他の元素を中心にする生物がいてもいいはずだ。例えば、炭素と似た機能を持つケイ素(Si)やゲルマニウム(Ge)など4価の元素を基にする生物が想像できる。

ケイ素型の生物は好超高温性になるだろう。ケイ酸の反応は高温高压条件か、水が加わればその条件は少し下がるが、誕生の場はマグマだまりのような条件で前駆的物質が形成され、その後水和反応でケイ酸系生物が誕生するのかもしれない。地球初期のマグマオーシャンのような状態があれば、多様な環境が生まれ、誕生の可能性があったかもしれない。炭素系生物の活動は酸素を利用して最終産物は二酸化炭素になるが、ケイ素型生物は(マグマ中の)酸素を利用して最終

的に二酸化ケイ素を出すことになるのだろうか。

他の生物タイプの可能性はいくつも考えられているが、まだ科学といえる段階に達していない。大きくタイプの異なった生物は、合成実験学的アプローチが可能で、また有機化学や無機化学、あるいは岩石・鉱物学などの分野の知識が利用して、各種の生物の可能性を探ることができるだろう。

c コペルニクスの原理

生物の定義は、地球生物に共通する属性を抽象していくものであった。定義の適用範囲は、地球生物で検証できるが、まだ完全ではない。これは、生物の属性や生命活動の多様性が大きいためである。

地球外生物の存在を考えたフェルミのパラドクスや地球型以外の生物などは、可能性だけに基づいた仮定や推測であり、実際の地球外生物での検証はできない不可知論となる。検証不能な条件での検討を進めていくに当たり、なんらかの指針があれば有効だろう。地球外での生物存在の可能性や特性を考えるのに、地球生物は重要な比較対象になるだろう。

「コペルニクスの原理」(Copernican Principle)を導入することで、指針ができる。コペルニクスの原理は、「メディオクリティの原理 (mediocrity principle)」(Rood and Trefil, 1981)や「凡庸の原理」(principle of indifference)とも呼ばれることもあるが、本論文ではコペルニクスの原理と呼ぶことにする。

確率が最大のものが最も多く出現するという統計学上の最尤原理がある。多くの要素があるとき、その多くは平均的な分布(正規分布)をすると考え、未知のものに対して、平均的なものを当てはめて考えていくことである。手がかりがまったくない状態でも、なんらかの見通しや結果が欲しい時、「凡庸さ」を根拠にコペルニクスの原理を適用することで、議論をとりあえず進めていくことができる。

太陽系、あるいは地球、地球生物、人類(地球知的生命)は、宇宙で何ら特別な存在ではないとすることで、この仮定を導入して未知のものを外挿していく方法である。これまで人類は、地球型生物や地球、太陽系惑星を対象にして科学を発展させてきた。地球生物に関する生物学や有機化学、生態学が構築してきた成果を、また地球に関する地質学、古生物学、気象学、海洋学を、太陽系惑星に関する惑星科学の成果を、コペルニクスの原理を前提に未知のものに適用していくことである。

以下の検討では、これまでの知的体系をコペルニクスの原理で導入して適用していく。もし普遍的生命として起源や属性を抽象できれば、地球型生命や地球、太陽系惑星に適用し検証を進めることも可能である。

Ⅲ 探求のための方法論

16世紀、キリスト教的な呪縛から開放されて以降、教条的な生命起源論から科学的な仮説が提唱されてきた。だが、生命起源に関する仮説は、科学的根拠を示したり、検証したりできるものではない。なぜなら、過去に起こった一度だけの事象なので、再現できないし、検証も不能である。そのため、「現在」の対象や事象を扱う学問体系の知識を、コペルニクススの原理とし、斉一的に適用していくことになる。そのような方法論が、再現できない現象への対象へのアプローチとなる。

1 さまざま仮説

生命起源に関してはいろいろな仮説が提唱されてきた。暖かく小さな水溜り説（warm little pond, Darwin, 1859）、潮間帯説（Deamer, 1997）、パンスペルミア説（Arrhenius, 1908）、火星起源説（McKay et al., 1996a）、中央海嶺熱水説（Martin et al., 2008）、陸上火山の地熱地帯（Mulkey et al., 2012）など（丸山ほか, 2019）があり、それぞれに違ったバリエーションがある。加えて、新しく自然原子炉間欠泉説も提唱されている（Ebisuzaki and Maruyama, 2017）。

暖かく小さな水溜り説は、生物誕生に必要な温度や光などの合成反応のためのエネルギーや化学的反応の過程から考えられた（Darwin, 1859）。潮間帯説は、陸と海の両方からの成分や条件が供給され、干潮による乾湿や温度、塩分濃度の変化などをエネルギーにして、化学反応が進むと考えるものである。地球形成当時、月の公転軌道は今より小さかったため干潮も大きく、現在より変動の激しい環境が想定される。そこで生命の素材合成が進んだとする説である（Deamer, 1997）。

パンスペルミア説は、地球外で誕生した生物が飛来したと考えられたものである。現在では、生物ではなく、生物の材料が地球外で形成され運ばれたと考える「ネオパンスペルミア仮説」（丸山ほか, 2019）になっている。隕石などで地球外から由来の材料が、地球の水と二酸化炭素と反応して生物となったと考える説である。生物形成の難易度は低くはなるが、さらに地球内での合成の困難さは残る。

火星起源説とは、火星で誕生した生物が地球に飛来したというものである。パンスペルミア説の太陽系内の起源といえる。きっかけとなったのが、火星起源の隕石 ALH 84001 から化石様物質の発見の報告からである（McKay et al., 1996a）。詳細については後述するが、火星から地球への飛来は可能だが、火星で生命がどのように誕生したのかを解明しなければならず、地球生命の起源になることを証明しなければならない。

深海底の中央海嶺は活発な火山活動があり、熱水噴出孔も多数あり、独自の生態系も発見された（Corliss et al., 1981）。マグマ活動と高温の熱水、高水圧、多様な pH という極限環境で細菌

(Jannasch and Mottl, 1985) から大型の節足動物や軟体動物、魚類に至るまでの異なった生態系 (Smith, 1985; Nuckley et al., 1996) が発見された。原始的な生物の生態系なので、中央海嶺熱水説は、現在も有力と考えられている (Kelley et al., 2001; Martin and Russell, 2003; Martin et al., 2008; 大島, 1995; Russell et al., 1988)。

生物の細胞の化学組成は、海、湖、川のものとは比べて、カリウム、リン酸塩、遷移金属が多い。原始細胞の組成は環境と平衡だったはず (Deamer, 1997; 2008) なので、陸上火山の地熱地帯は、カリウム (K^+)、亜鉛 (Zn^{2+})、マンガン (Mn^{2+}) イオンやリン酸が豊富だったと考えられた。そのような場合は海洋には存在せず、陸上の熱水-火山で水蒸気の多い無酸素の地熱地帯だったことから、陸上火山の地熱地帯説が提唱された (Mulkidjanian et al., 2012)。

近年、Ebisuzaki and Maruyama (2017) によって、自然原子炉間欠泉説が提唱された。自然原子炉をエネルギー源として、地下の炉心近くの還元的な地下空間で熱水による生物材料合成が起こり、間欠泉で地表の酸化的な環境に運ばれることで、生物が合成されると考えた。

上述の生命起源の仮説で、現在採用され研究されているものの詳細を、以下の各項目で述べることにする。

2 さまざまなアプローチ

生命起源に関する素材や対象、条件は、非常に多岐に渡る。素材や条件が異なると、学問分野が異なり、観測・実験・記載手法も異なり、えられたデータの処理や結果の扱いも異なってくる。以下では、生命起源に取り組んでいる研究分野で代表的なものを取り上げ、それぞれのアプローチの特徴をまとめて、分野ごとの視座を整理していく。

a 時間軸上で

学問分野によって、対象とする素材が異なり、対象となる時間軸も異なってくる (図2)。

太陽系外の天体を扱う「天文学」は、光速で情報伝達されるので、遠くなればなるほど過去の現象を見ることになる。天文学でえられた情報からは、惑星形成の一般論を探ることが可能となる。過去の太陽系や地球、地球生命がたどったかもしれない過程との比較ができる。

太陽系の天体を研究する「惑星科学」は、地球とは似て非なる対象の「現在」(同時代)の状態を直接観測し探査できる。惑星によっては、形成後変化が少ないもの、地球とは異なった変化を遂げたもの、地球に似た条件に置かれたものなど、数は限られているがいろいろ天体があるため比較対象となる。

隕石は、太陽系の惑星の材料の残渣である。隕石は地球に落下した実物があるため、惑星の材料を直接調べることができるという利点がある。しかし、実際の地球をつくった材料はもはや存在しない。

シミュレーション学でおこなっている惑星形成や地球形成、地球変遷に関するシミュレーショ

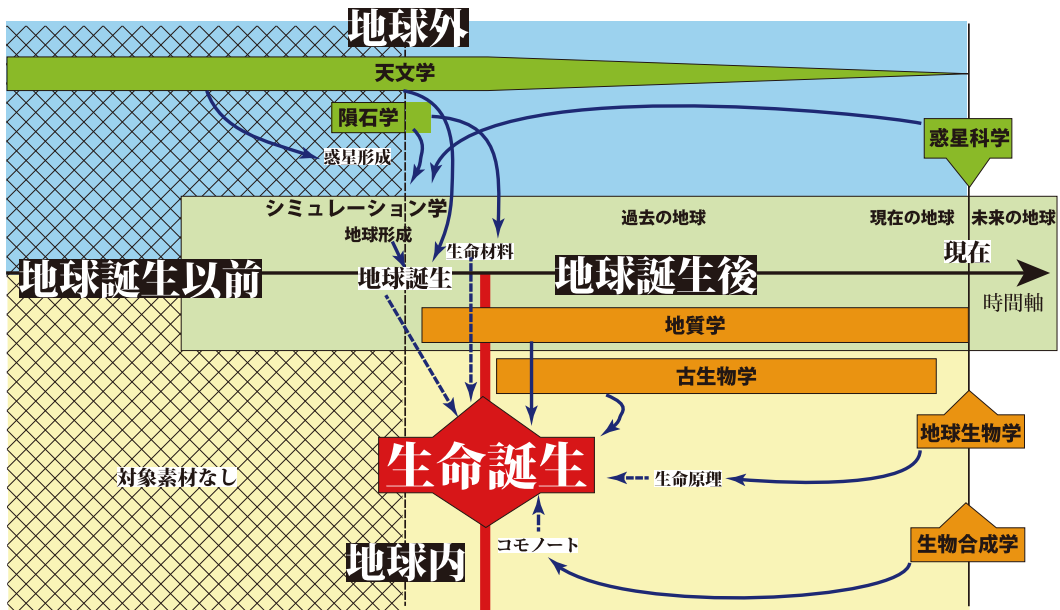


図2 生命起源に関する学問の時間軸と地球内外における位置付け

生命起源を対象としている学問が扱う領域とキーワードを示した。横軸：時間軸。地球誕生以前と地球誕生後に区分。縦軸：地球内と地球外に区別。生命誕生の時期は厳密には不明。

ンは、他の研究分野への重要な束縛条件となる。また、現在の地球や惑星などの状態を検証するのにも利用されている。定式化さえできれば、素材を使うこともなく、時間にも場所にも束縛されることなく、地球の内外であっても、地球誕生以前、誕生後、現在、あるいは未来であっても、計算できる。ただし、検証が困難なシミュレーションも多い。

地球の岩石は、地球誕生後に形成されている。地球誕生を直接調べることはできないが、最古の岩石以降の証拠は、地質学的調査で入手できるので、直接調べることができる。生命誕生以前に形成された岩石もあるので、生命誕生の条件や痕跡が残されているかもしれない。多くの学問の中では地質学だけが、生命誕生の直接の証拠を入手できる可能性がある。

古生物学は化石を対象とする。最古の化石の発見はできるが、生命誕生よりは後のものになるだろう。なぜなら、化石となるためには、多数の生物が存在し、そのうち化石として残る硬質部や化学成分などを持ち、それらが保存される条件をもった地層があることが前提となる。さらにその地層が現在まで残され、地質学者に発見されなければならない。そのような稀な条件なので、生命誕生の化石や場が残ることはないであろう。しかし、古い時代の化石は、地球生物がその時代に存在したという重要な束縛条件となる。生命起源のモデルは、その生物に至る可能性をもっていなければならない。

地球生物は実在し入手できるため、分析、計測、実験から、検証できる対象となる。現世生物

の多様性を把握することもできる。そこから生命原理を導き、生命誕生の束縛条件とできるであろう。

生命誕生の束縛条件として、生命を合成していくアプローチもある。生命の材料や前駆物質の形成、材料の構築の過程を、実験的に再現できる。生物合成学から、もっと最初の生命（コモノト）を推定していくことができるだろう。実際の地球生物が辿った過程だとは検証できないが、重要な可能性を提示することになる。

これらの学問分野は、扱っている時間軸が異なっているため、学際的に連続させることができない。しかし、それぞれの学問の特徴を活かしながら、もっとも生命誕生にふさわしいシナリオを作成することは可能であろう。シナリオをそれぞれの学問分野で検証していくことで、より緻密なシナリオにしていけるであろう。

b 学問分野の特徴

前項では、時間軸上での学問の特徴を示した。少し視点を変えると、時間の区切りとして、注目の時間軸の時点である生命誕生の前か後という区別が大きい。だが生命誕生の時代は未定なので、地球誕生で代用することにした。もうひとつの視点として、研究対象が地球外と地球内かの区別がある。2つの視点を軸にすると、4つの領域ができるが、生命誕生前には地球は存在していなかったため、地球内の素材は存在しないが、シミュレーション学だけは仮想で考えることが可能かもしれない。残った3つの領域では、実在する物質や対象を扱う学問分野がある。

地球外の地球誕生前を対象とする学問としては天文学と隕石学がある。これらは、時間軸の過去から誕生に向けての前提、あるいは環境、素材などの条件を限定していく。加えて、未解決な課題に対して、いろいろな条件の比較検討、取捨選択もできるであろう。地球生命を明らかにしていく過程では、地球外からの外挿が必要であろう。また地球生命の誕生で明らかになったいくつかの観点を地球外へと演繹もしくは適用ができるかもしれない。

生命の誕生が確認されているのは地球だけである。生命誕生を直接明らかにできる可能性があるのは、地球生命を用いた研究である。地球内の学問は、地球誕生後の学問となる。それらの学問は、生命が誕生しているという前提があるため、その前提を推定していくことになり、時間軸を遡ることになる。また生命誕生前を扱う学問は、生命誕生の束縛条件として利用できるだろう。地質学は、地球誕生が生命誕生より先行し、生命誕生以前の素材が存在しているため、重要な学問分野となる。古生物学は生命誕生後の学問であるが、多数の化石の証拠は、誕生の条件を外挿するために重要となる。地球誕生以降の学問は、現在の素材を対象としていることになる。ただし、天文学は現在の観測だが、遠くの天体の観測は、距離に応じた過去を見ることになる。惑星科学は地球外の素材で、地球生物学は地球内の素材となる。生物合成学は、シミュレーション学の一つともいえるが、実物を用いた実験なので実証性があるが、仮想的前提に基づいている。

以下では、それぞれの学問分野のアプローチで、地球外のアstronomy、惑星科学、隕石学、シミュ

レーション学の最新の情報を加味しながら、概観していく。

IV 天文学的アプローチ

天文学的アプローチでは、研究対象の距離が大きくなるにつれて、情報量が減っていく。しかし、宇宙の天体や星雲、ガスなどの化学組成や分子などの検出や観測はできるため、生命の材料を検討することは可能である。近年、系外惑星が大量に発見され、その多様性が把握されてきた。そこから、生物誕生の条件とその可能性の程度が問題になってきた。多数の系外惑星が発見されているので、小さな可能性であっても、複数存在するかもしれない。直接の生物の発見、まして生命の起源を知ることはできないので、生物が存在しうる環境（材料物質の有無や惑星の有無）を探索することになる。また、遠隔であっても、科学技術まで発展した文明を持った知的生命があれば、それを検出することは可能である。このような観点でまとめていく。

1 宇宙空間の条件

宇宙空間で観測される主成分は H_2 と He である。しかし、その他の成分も、量は少ないが含まれている。生物の材料物質となる O 、 C 、 N など有機物合成に不可欠な成分も、特別な元素や特別な物理化学的条件を必要とするものではなく、ごくありふれた存在であることが判明している。

宇宙線によって分子合成がおこなわれていることは古くから知られている（西, 1984）。その多くは低分子量の成分であるが、生物の材料として必要な成分も発見されてきた（表1）。10 K 程度の分子雲ではあるが、珪酸塩粒子表面に存在する H_2O 、 CO 、 NH_3 などを含むアモルファス氷がイオン-分子反応、紫外線や宇宙線などによる反応で有機物が形成される（Herbst and van Dishoeck, 2009）。170 ~ 200 K になると、氷は昇華してイエロー・スタッフという複雑な有機分子の混合物が形成されることが実験でわかってきた（香内, 2005）。このような分子の存在は、真空に近い低密度、極低温、低エネルギー状態であっても有機物の合成が可能であることを示している。

このような成分から、直接、生物が合成されることはないであろう。なぜなら、生物になるためには、分子の濃集した環境と、多様な化学反応を進めるためのエネルギーも必要となるが、宇宙空間では困難である。また、材料が合成できたとしても、生物の多数の前駆物質の合成と組み立てには、連続的に化学反応を進めながら、分子の選択と組み立てが必要になるが、そのためには多様な条件や環境がなければならない。そのような条件や環境は宇宙空間にはないであろう。

2 生命誕生の条件

生命誕生における天文学的な必要条件として、惑星表層に液体の水が存在することが考えられている。生物の前駆物質や材料となる有機物の合成をする場には水が必要になるからである。

表1 星間分子

<p>簡単な水素化物、酸化物、硫黄化物、ハロゲン化物など H₂(IR), HF, HCl, N₂(UV), N₂O, H₂O₂; CO, SiO, SO₂, O₂, CO₂, TiO, TiO₂; H₂O, NH₃, CH₄[*](IR), CH₃Cl, SiH₄[*](IR), CH₃SiH₃, SiH₃CN; CS, SiS, H₂S, OCS, PH₃, PN, HCP; NaCl[*], AlCl[*], KCl[*], AlF[*], AlO[*], AlOH</p> <p>ニトリル、アセチレン誘導体など C₂[*](IR), C₃[*](IR), C₅[*](IR), C₃O, C₃S, C₄Si[*], C₅O, C₂H₄[*](IR); HCN, HC₃N, HC₅N, HC₇N, HC₉N, HC₁₁N[?], KCN[*], HCOCN, HCSCN, CNCN, HOCN, HSCN; CH₃CN, CH₂CHCN, CH₃CH₂CN, CH₃C₃N, CH₃C₅N, CH₃C₇N[?], CH₂CCHCN, C₂HCHCHCN, CH₂CHC₃N, CH₂CCHC₃N, n-C₃H₇CN, i-C₃H₇CN, HOCH₂CN, HCCCH₂CN; HNC, HNCO, HNCS, HNCCC, HCCNC, HC₄NC, CH₃CN, HCNO, HONO, CH₃NCO, C₂H₅NCO; HC₂H[*](IR), HC₄H[*](IR), HC₆H[*](IR), CH₃C₂H, CH₃C₄H, CH₃C₆H, CH₂CHC₂H, CH₂CCHC₂H</p> <p>アルデヒド、ルコール、エーテル、ケトン、アミドなど H₂CO, H₂CS, CH₃CHO, NH₂CHO, HC₂CHO, CH₂OHCHO, CH₂CHCHO, CH₃NHCHO, C₂H₅CHO, C₂H₅OCHO, (CHOH)₂, HC₂CHS; CH₃OH, C₂H₅OH, CH₂CHOH, CH₃OCH₂OH, CH₃COCH₂OH, NH₂OH, CH₃SH, CH₃CH₂SH[?], (CH₃)₂O, (CH₃)₂CO, (CH₂OH)₂, HOCHCHCHO[?]; HCOOH, HCOSH, HCOOCH₃, CH₃COOH, H₂CCO, H₂CCS, H₂C₃S, CH₂CHCH₃, CH₂CHC₂H, C₂H₅OCH₃[?], CH₃CHCH₂O, CH₃COOCH₃; CH₂NH, CH₂CNH[?], HNCNH, CH₃CHNH, e-HNCHCN, HCCCHNH, NH₂CN, CH₃NH₂, C₂H₃NH₂, C₂H₅NH₂[?], CH₃CONH₂, NH₂CH₂CN, NH₂CONH₂, HOCH₂CH₂NH₂; H₂C₃, H₂C₄, H₂C₅, H₂C₆</p> <p>環状分子 c-C₃H, c-C₃H₂, c-C₅H₆, c-C₆H₄, c-C₆H₆[*](IR), c-C₉H; c-C₃HCCCH, 1-c-C₅H₅CCH, 2-c-C₅H₅CCH; c-C₂H₄O, c-H₂C₃O, c-SiC₂, c-Si₂C[*], c-SiC₃[*]; 1-c-C₅H₅CN, 2-c-C₅H₅CN, c-C₆H₅CN, 1-C₁₀H₇CN, 2-C₁₀H₇CN; C₆₀[*](IR), C₆₀^o(IR), C₇₀[*](IR)</p> <p>分子イオン H₃⁺, HeH⁺, CH⁺(OPT), OH⁺, ClH⁺, ArH⁺, SH⁺, PO⁺; HCO⁺, HOC⁺, HCS⁺, HN₂⁺, HOCO⁺, HCCS⁺, HC₃O⁺, HC₃S⁺, CH₃CO⁺; HCNH⁺, H₂O⁺, H₂Cl⁺, H₃O⁺, H₂COH⁺, HC₃NH⁺, HC₅NH⁺, HC₇NH⁺, 1-C₅H⁺, 1-C₅H⁺; CO⁺, CF⁺, SO⁺, NO[?], NS⁺, NH₄⁺, NH₂CO⁺, NCCNH⁺, HCCNCH⁺; C₄H⁺, C₆H⁺, C₈H⁺; CN⁺, C₃N⁺, C₅N⁺</p> <p>ラジカル OH, CH, CH₂, CH₃, NH(UV), NH₂, SH(IR), SiH[?], HO₂, HS₂, NCO, NCS; C₂H, C₃H, C₄H, C₅H, C₆H, C₇H, C₈H, CH₂C₂H, HCO, HCCO, HCCCO, HC₅O, HC₇O; CN, C₂N, C₃N, C₅N, HCCN, HNCN, H₂CN, H₂NC, CH₂CN, CH₂C₃N, HC₄N[*], HCS, HSC, HCCS; NO, HNO, NS, SO, PO, FeO[?], MgNC, MgCN[*], HMgNC[*], MgC₂H[*], MgC₄H[*], MgC₅N[*], MgC₆H[*]; C₂O, CH₃O, C₂S, C₄S, CP[*], C₂P[*], SiC[*], SiN[*], SiCN[*], SiNC[*], AlNC[*], NaCN[*], FeCN[*], CaNC[*]</p>
--

2022年6月現在まで発見されている270種の星間分子のリスト。270種のうち258種が確定。カッコ内は電波以外の波長域で観測されたもの。IR: 赤外線, OPT: 可視光, UV: 紫外線。*: 赤色巨星でのみ検出。?: 報告はあるが確認されていないもの。データは国立天文台(2022)による。

a ハビタブルゾーン

恒星系で、生命が生存できる範囲をハビタブルゾーン (Habitable zone, 生物居住可能領域や生存可能圏, 生存可能領域) と呼んでいるが、実際には液体の水が存在できる領域を意味している。ハビタブルゾーンは、恒星の条件、惑星の軌道、惑星のタイプから限定されていく。

ハビタブルゾーンとして、恒星の十分条件は、H₂Oが液体として存在できることである (Kasting et al., 1993)。恒星の放射がわかれば、H₂Oが液体として存在できる範囲を決めることが可能である。だが、推定値はいろいろある。

原理は、恒星の放射は距離の2乗に逆比例して減るので、距離 (a: 天文単位, AU) の関数で温度 (T: K) が決定できる (小尾・森, 1985)。我々の太陽系では、

$$T = 395 \cdot \frac{1}{\sqrt{a}}$$

という式で示される。

地球では、395K (122℃) となる。この温度は太陽からのエネルギーをすべて利用できた時の値である。軌道上で取りうる最高の温度といえる。実際には、惑星は太陽のエネルギーを反射している。惑星の反射能 (アルベド) を A とすると、惑星表面に吸収され惑星を暖めるのに使われるエネルギーは (1 - A) 倍となり、温度は下がる。また、惑星の自転が速いと太陽放射を吸

収するのは太陽側だが惑星全体から熱の放射がおこなわれるので、温度はさらに下がる。以上のような冷却効果を考慮すると、平衡温度の下限は、

$$T = 277 \cdot \frac{1}{\sqrt{a}}$$

となる（小尾・森，1985）。この値から、液体の水が存在しうるのは、太陽から 0.55 AU から 2.09 AU の範囲が最大と推定できる。

他にもいろいろな推定があるが、現在の太陽系の一般的な推定（Ramses and Kaltenecker, 2017）では、太陽から 0.95 ～ 2.4 AU（天文単位）の範囲となり、地球の軌道から火星、そして小惑星帯の内側の軌道までになる。

だが、他の要因として、大気の状態変化（気候モデル）、大気の色と成分（温室効果の程度）、軌道の変動（太陽放射の変動）、自転周期、大気維持には惑星の大きさ（質量、半径）もかかわってくる。例えば、気候変動モデルの違いで、0.9 ～ 1.3 AU（水谷，1984）という見積りもある。要因の条件が変わることで、内側では 0.38 AU（Zsom et al., 2013）まで、外側では 10 AU（Pierrehumbert and Gaidos, 2011）までの推定値がある。

ハビタブルゾーンの中でも、生物が存在でき、なおかつ進化ができるためには、生物が進化できる期間（少なくとも数億、できれば数十億年）維持されなければならない。そのような条件をもつ領域を、ゴルディロックズゾーン（Goldilocks zone）と呼ばれることがある。ゴルディロックズゾーンは、ハビタブルゾーンより天文学的にさらに限定された条件となる。

ハビタブルゾーン、もしくはゴルディロックズゾーンに、条件を満たした惑星が見つければ、間接的だが生命の誕生の十分条件を満たすことになる。

b 恒星の条件

ハビタブルゾーンやゴルディロックズゾーンは、惑星における水の存在のための条件であった。次に、生命誕生のために、恒星が持つべき条件を考えていく。

恒星の放射は、公転半径の 2 乗（公転面として考える）、もしくは 3 乗（恒星から 3 次元的な位置）に反比例するので、放射の強い星ほど遠くにハビタブルゾーンが形成され、軌道面積（体積）が広がっていく。恒星の放射は、ハビタブルゾーンの位置や範囲に、大きな影響を与えることになる。

放射の激しい星は寿命が短く、太陽質量の 10 倍の恒星では、核融合反応が速く進行するので、数千万年から 1 億年程度の寿命となるので、生物が誕生して進化するには時間が足りないだろう。放射の弱い星は、核融合反応がよりゆっくりと進行するので、進化を遂げるために十分な時間がえられる。しかし、ハビタブルゾーンの範囲は、太陽系の 10 分の 1 しかなくなる。そこに適当な惑星がある確率は小さくなる。

恒星の寿命と適当な温度範囲の両方を満たさなければ、生物は存在しえないだろう。水の存在

範囲の適当な温度を考えると、質量は太陽の0.7倍から1.4倍程度という推定もある(小尾・森, 1985)。質量が太陽の0.7倍の恒星は表面温度約4,400度、寿命数百億年となり、質量が1.4倍の恒星は表面温度約6,500度、寿命30億年となる。

c 特異な条件での水の存在

ハビタブルゾーンとは、軌道上の天体表層に水が存在する条件で、ゴルディロックゾーンは水が長期間存在できる条件であった。だが、他にも生命誕生の環境が考えられるようになってきた。

氷惑星や氷衛星の表層は、寒冷で液体の水は存在できないが、天体内部に氷の層があり、その下に内部海(液体の水)が存在する可能性があると考えられている。太陽系では、木星の衛星エウロパ(Europa)や土星の衛星エンケラドス(Enceladus)、海王星の衛星トリトン(Triton)などに可能性がある。そこが、ハビタブルゾーンになるということである。

エウロパでは、以前から水の存在は推定されてきた(Geissler et al., 1998)が、ハッブル宇宙望遠鏡によって水蒸気の噴出が観測され(ESA/Hubble Press Release, 2013)、ガリレオ探査機の観測で水の存在の証拠が示された(Jia et al., 2018)。液体の水が存在できる熱源は、木星との潮汐力だと考えられている(Roth et al., 2013)。

エンケラドスでも、水の存在が推定されていたが、カッシーニ探査機によって南極からの水蒸気を含んだ噴出物が観測された(Porco et al., 2006)。土星を周回するときに生じる秤動を熱源としており(NASA, 2015)、内部海の深さは26~31kmと推定されている(Thomas et al., 2016)。

トリトンは、探査機ボイジャー2号によって、1989年に表面から8kmの高さにまで達する窒素やチリを噴出する間欠泉が発見された(MacGrath, 1998)。凍った半透明の窒素(N_2)と水(H_2O)とドライアイス(CO_2)の表層(天体表層の赤い有機物のソリン Tholin を含む)からなる。間欠泉は、南緯50度から57度の間に存在していることから、「固体の温室効果」が考えられた(Smith et al., 1989)。太陽からの放射で窒素の「固体の温室効果」が働いており、窒素ガスができ噴出できると考えられている。太陽系内の天体で、このような惑星や衛星の内部の水の存在の確認はされてきたが、系外惑星において観測は困難であろう。

もうひとつの可能性として、赤色矮星(M型)のターミネーター・ゾーン(Terminator zone 明暗境界線)での恒常的水の存在がある。M型恒星は小型だが、全恒星の数の70%を占めると考えられる(Bochanski et al., 2010)。多数の恒星なので、地球サイズの岩石惑星の数も多くなると推定されている(Mulders et al., 2015)。恒星から0.2AU付近にハビタブルゾーンが存在できる領域が形成される(Kopparapu et al., 2013)。恒星に近い惑星は潮汐ロックが起こり、惑星の公転と自転が同期し、恒星に常に同じ面を向けることになると考えられる(Barnes, 2017)。

恒星の近くで潮汐ロックされた惑星は、大気安定状態が維持できず、大気状態が崩壊し(Joshi et al., 1997)、昼側は暴走温暖化、夜側は凍結する(Yang et al. 2019)とシミュレーションされた。

そのため、安定したハビタブルゾーンは維持できないと考えられた。だが、夜と昼の境界部のターミネーター・ゾーンでは、惑星の水の量などの条件が整えば、液体の水が存在する可能性もシミュレーションされている（Lobo et al., 2023）。まだ決着を見ていないが、多数の M 型恒星で複数の惑星があるはずなので、少ない可能性であっても、ハビタブルゾーンとして有効だと考えられる。近傍であれば、M 型恒星で系外惑星の大气も観測可能かもしれない。系外惑星で水が発見できるかもしれない。

3 系外惑星の多様性

最初に系外惑星が発見されてから、現在では多数発見されてきた。多様性が大きいことも把握されてきた。系外惑星の多様性から、太陽系形成へのフォードバックも生まれつつある。

a 発見と探査

系外惑星（exoplanet, extrasolar planet）の最初の発見は 1992 年、パルサー（PSR B1257 + 12）を公転する 2 つの地球サイズの惑星であった（Wolszczan and Frail, 1992）。特異な星での発見であった。1995 年には、Mayor and Queloz（1995）は、地球から 50 光年離れたペガサス座の太陽と似た質量（1.1 倍）の主系列星（G 2.5 IVa）の 51 番星で、木星程度の質量の星を発見した（井田, 1997）。その後、多くの系外惑星が発見されていくことになった。

系外惑星の探査衛星として、ケプラー（Kepler satellite）からはじまり、ケプラーでの追加の K2 のミッション、後継機の TESS（Transiting Exoplanet Survey Satellite）によるミッションが、現在継続中である。現在（2023 年 6 月 14 日）、系外惑星で確定されたものは 5445 個になる（NASA Exoplanet Archive, 2023）。他にも、確認作業中の系外惑星が 4416 個ある。

b 多様性の把握

系外惑星が多様であることがわかってきた（図 3）。軌道半径や質量、その特徴から、系外惑星は、地球型惑星、海王星型惑星、木星型惑星に大別されている（葛原, 2016）。

地球型惑星は、地球の 10 倍以下の質量で、主成分が岩石だと考えられている。質量が大きいスーパー・アース（super earth）と呼ばれるものも多い。海王星型惑星は、地球の 10 ～ 数 10 倍の質量で、 H_2O の氷と岩石であると推定されている。ホット・ネプチューン（hot neptune）は、恒星に近い軌道をもっている。木星型惑星は、地球の数 10 倍以上の質量をもつ。恒星に近い軌道を回るものを、ホット・ジュピター（hot Jupiter）と呼ぶ。中心星から 10 AU 以上離れた公転軌道を持つものを、大軌道巨大惑星と呼び、数百 ～ 数千 AU も離れた軌道をもつものも見つかっている。

他にも、離心率の大きなエキセントリック・プラネット（eccentric planet）（原川, 2016）や、逆行惑星（retrograde planet）、連星（2 つ以上の恒星）を回る周連星惑星（circumbinary planet）（真

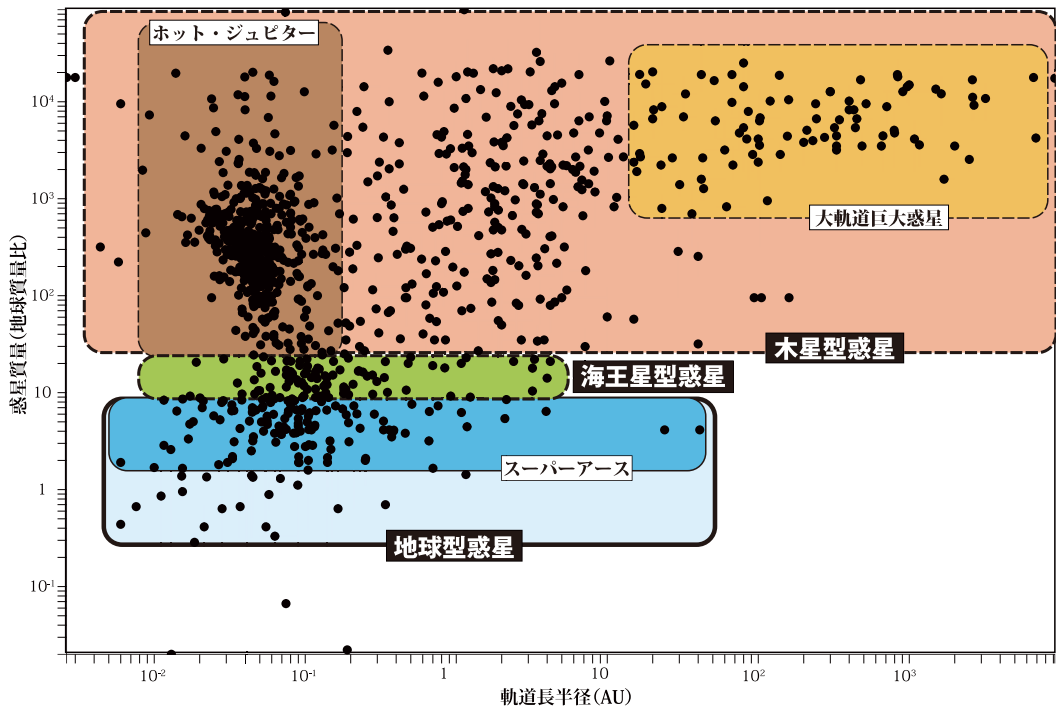


図3 系外惑星の多様性

発見された系外惑星の軌道長半径 (AU: 天文単位) と惑星質量 (地球質量との比) の軸で示したものの。図の領域によって地球型惑星、木星型惑星、海王星型惑星に区分される。地球型惑星はスーパーアース、木星型惑星はホットジュピターと大軌道巨大惑星に細分される。小出 (2021a) による。

山, 2016), パルサーを回るパルサー惑星 (pulsar planet) (平林, 2016) など, 特異な系外惑星も見つかっている。

c ハビタブルゾーンの惑星

系外惑星の内, ハビタブルゾーンの惑星として, 広義では地球の10倍の質量, 2.5倍までの半径の惑星を含むものと, 狭義では地球半径1.6倍から3倍までの岩石惑星に限定されたものがある。現在 (2023年1月5日) 確定された系外惑星の中で, 火星サイズ ($0.1 \sim 0.5 M_E$, M_E : 地球質量のこと, あるいは $0.4 \sim 0.8 R_E$, R_E : 地球半径のこと) のものでは1個, 地球サイズ ($0.5 \sim 3 M_E$ あるいは $0.8 \sim 1.6 R_E$) のものが23個, スーパーアース・ミニ海王星 ($3 \sim 10 M_E$ あるいは $1.6 \sim 2.5 R_E$) のものが39個, 合計で63個が候補となっている (The Habitable Exoplanets Catalog, 2023)。

ただし, このデータにはいくつか注意すべき点がある。

まず, 示された観測によるデータは, 巨大ガス惑星に対して, 岩石惑星の質量も半径も小さいため, 発見しづらいという点である。そのため, 観測されている岩石惑星は, 実際に存在する惑

星より少なくなっているはずである。

次に、発見数が少なく見積もられているとしても、ハビタブルゾーンの惑星は稀な存在である点である。系外惑星には多様なタイプ（軌道や惑星構成など）があることがわかってきた。系外惑星のうち、ハビタブルゾーンにある惑星は、1.2% にしかない。そのため、統計的には稀な惑星となり、これらの惑星の特徴が、どの程度普遍化できるのか評価が難しくなる。

恒星の多様性は、以前からよく知られていたが、多数の系外惑星の発見で、惑星系にも惑星のタイプにも、多様なものがあることがわかってきた。多様な惑星の発見から、上述したように、恒星と惑星軌道だけの単純なハビタブルゾーンの探求ではなく、もっと多様なハビタブルゾーンの存在の探求が考えられるようになってきた。

系外惑星の多様性は大きく、太陽の惑星系は大きな多様性の一つに過ぎない。これまで惑星系形成のシナリオとして、太陽系から構築された「標準モデル」は普遍化できるものではなく、「太陽系モデル」となってきた。多様な系外惑星の発見によって、「太陽系モデル」の拡張、修正、もしくは新しいモデルへの転換が必要になってきた。

4 地球外知的生命の探査

系外惑星の最初の発見以降、30年以上経過したが、地球外生物は発見されていない。遠い天体上での生命活動の有無は、地球上の生物を何光年も離れたところから検出できるかという問題に変換できる。酸素の多い大気が生命活動に由来しているのであれば、地球を太陽系内から生物の星として検出することは可能である。しかし、他の恒星の惑星系の大気状態は、まだ十分解明できていない。地球では酸素が大気に増加してきたのは20億年前ころである。生命誕生から20億年近くの時間が必要だった。このようなゴルディロックゾーンとしての条件を系外惑星で探せるかどうかは不明である。

a SETI

地球外で文明を持つ知的生命の探査は可能である。地球外文明の探査は、もっと少ない数の探査になる。だが、探査は効率よくできる。知的生命が発した（人工的？）信号を探知すればよいからだ。

探査の試みは、かなり前からなされている。1959年9月19日のイギリスのNature誌にCoconi and Morrisonによる「星間通信への模索」という論文が掲載された。この論文以降、地球外知的生命について科学的議論がなされるようになってきた。そして1960年春、Ozma計画で地球外知的生命の探査が実施された。1960年11月には、Greenbank天文台で「地球外知的生命体に関するGreenbank会議」が開催され、研究者が地球外生命に関して真剣な取り組みをはじめた。

地球外知的生命をETまたはETI (Extra-Terrestrial Intelligence)、あるいは技術痕跡 (technosignature) の担い手である技術的知性 (Technological Intelligence, TI) と呼んでい

る (Lingam et al., 2023)。ET を探査する分野を CETI (Communication to Extra-Terrestrial Intelligence), あるいは SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) という。UFO (Unidentified Flying Object) や CETI, SETI はかつて空想やエセ科学とされていたが, 科学の一分野として確立されてきた (大島, 1984; 平林・寿岳, 1984)。今までおこなわれた地球外生命の探査をまとめた (表 2)。

CETI の対象となる星は, 地球から 50 光年あるいは 100 光年の距離が目安になる。テレビ電波は電離層を突き抜けるため, 地球外へ電波が漏れる状態になる。1928 年にアメリカ合衆国の放送局 (WGY, 現在の WRGB) がテレビ実験放送をはじめた。1939 年には, アメリカ合衆国と旧ソビエト連邦の国営放送が定時放送を開始した。この頃が意図されていないが, 地球からの電波の発信とみなせる。

最初にテレビが利用されてほぼ 100 年たつ。100 光年にある星は, 地球の最初のテレビ電波が検知できる距離である。50 光年の距離の星は, 初のテレビ放送を観測して, 地球に文明があること知り, 返信をしたら届く距離となる。地球からの電波の発信によるコミュニケーションを考えると, 100 光年と 50 光年は重要な区切りとなるだろう。CETI では地球人類の情報を伝えることになり, 知らない知的生命への情報開示には危険が伴うので, いまでは CETI は実施されていない。ただし, 大量の電波が地球から漏れている。

SETI では, 地球からの信号を発することなく, 技術的知性の発する信号を感知しようとするものである。本格的なプロジェクトとしては, SETI@home がある。SETI@home は 1999 年 5 月 17 日から, アレシボ天文台の電波望遠鏡のデータが用いられた (University of California,

表 2 地球外文明の探査

研究者	場所	アンテナ (m)	周波数 (MHz)	分解能 (Hz)	対象	限界感度 (Wm ⁻³)	観測時間 (H)
Drake (Ozma)	NRAO, U.S.A.	26	1,420 - 1,420.4 (H)	100	2 S	4*10 ⁻³³	400
Troitsky et al.	Chimenki, USSR	15	926 - 928 1,421 - 1,423	13	12 S	2*10 ⁻³¹	11
Troitsky et al.	USSR	Dipole	1,863 927 600		AS, Pulse	10 ⁻³³ Hz ⁻¹	700
Felshell (Ozma)	NRAO, U.S.A.	91	1,419.8 - 1,421	490	9 S	5*10 ⁻³⁴	13
Palmer et al. (Ozma II)	NRAO, U.S.A.	43	1,410 - 1,430	6,900		2*10 ⁻²³	
		91	1,415 - 1,425 1,420.1 - 1,420.7	64,000 4,000	600 S	1*10 ⁻³³ 3*10 ⁻²⁴	500
Kardashev	Eurasia, USSR	Dipole	1,337 - 1,863		AS, Pulse	10 ⁻³² Hz ⁻¹	
Dixon & Cole	Ohio Univ., U.S.A.	Dipole	1,420.40	20,000-100,000	AS, Beacon	1.5*10 ⁻³¹	Allways
Bridle & Feldman	Argonquin, Canada	46	22,200 (H ₂ O)	30,000	500 S		
Drake & Sagan	Arecibo, U.S.A.	305	1,420 1,653 2,380	1,000	4 G	3*10 ⁻³⁵	100
Serendip	Barkeley, U.S.A.	26	1,410 - 1,430 1,853 - 1,873 917 - 937	2,500	AS	5*10 ⁻³⁴	
Clark et al.	NRAO, U.S.A.	43	8,522-8,523	5	4 S	2*10 ⁻³⁴	7
Black et al.	NRAO, U.S.A.	91	1,665 - 1,667 (OH)	5	200 S	4*10 ⁻²⁵	100
Drake & Stale	Arecibo, U.S.A.	305	1,664 - 1,668	2.5	6 S	8*10 ⁻³⁴	10
University of California*	Arecibo, U.S.A.	305	-	-	-	-	Allways
鳴沢真也**	西はりま天文台	2	-	-	-	-	34 nights

AS: all sky (全天), S: stars (星), G: Galaxies (銀河)。データは横尾 (1991) に最近のものを加えた。
*: SETI@home と呼ばれるプロジェクト, 2020 年 3 月 31 日に終了。**: Narusawa and Morimoto (2007)。

2023)。目的は、地球外知的生命体の痕跡を見つけることである。ボランティアを募って個人所有のパソコンに解析プログラムをインストールし、パソコンが使われていないとき（スクリーンセーバーとしてバックグラウンドで動作）にデータを解析していくという方法である。当時のスーパーコンピュータに匹敵する性能を示したとされている。この手法は、後に BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) となり、SETI@home と同時に、他の分散コンピューティング・プロジェクトとしても貢献するようになった。BOINC では計算量が必要な科学計算に利用されている。

SETI@home は 2020 年 3 月 31 日で終了した。その後も、断続的に SETI は進められている (Narusawa and Morimoto, 2007) が、地球外地球外知的生命を示す確定的なデータはえられていない。

b Drake の式

地球外文明の存在する確率を推定する式が、Drake (1961) によって提案され、Drake の式、あるいは Drake-Sagan の式、Greenbank 方程式とも呼ばれている。ここで文明とは、電波を用いて通信能力を持っている技術文明のことで、SETI できる可能性があるものとなる。

$$N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

ここで N (個) は求めるべき銀河系内の技術的知性のいる星の数である。銀河系内としたのは、我々にとって存在を知ることが有意である文明 (検出できる, コンタクトできる) は銀河系内に限られる。銀河の数は 2 兆個ともいわれている (Conselice, 2016) が、現実的に検出できるコンタクトできる星の母集団を銀河とするのは、推定する上でも重要な前提である。 N は、7 つの推定された値をかけることで求められる。

銀河系内の恒星で、年間に形成される恒星の数 (星の形成速度) を R (個/年), 恒星で惑星を持つ確率を f_p (個/個), その惑星系で生物の生存に適した惑星の数を n_e (個), その惑星上で生物が発生し進化する確率を f_l (個/個), その生物から知的生命へと進化する確率を f_i (個/個), その知的生命が技術文明をつくる確率を f_c (個/個) として、いずれも比率 (0 ~ 1) で示す。その技術文明が継続する期間 L (年) をかけると、 N の推定値が求められる。

なお、Drake では n_e を個数にしたが、ここでは単位を揃えるために、惑星系で生命存在可能な惑星の比率 (個/個) にして、 N (個) に対応させた。数値を推定していく時、コペルニクスの原理を利用する。ただし、それでも決定できない場合は、それぞれの人の判断に委ねられる。以下で、それぞれの値を見ていこう。

我々の銀河は棒渦巻銀河 (SBc 型) で、そこには 2000 ~ 4000 億の恒星が含まれるとされている。恒星の寿命は質量に依存する (小出, 1997) ため、質量が大きいかほど寿命は短くなる。多くの主系列星の質量は太陽質量程度であると考え、星の寿命は 100 億年 (10^{10} 年) である。従っ

て星の生成率は年間 20 ~ 40 個となる。

地球の母星の太陽は、主系列星の G2V 型星の主系列星に属するごくありふれた天体で (小出, 1994; 1995a; 1995b; 1997; 小出・山下, 1995; 1996b), 惑星を持つ確率は、系外惑星が発見されたため、大きくなる。そこで f_p は 1 とする。

n_e は、上述したように系外惑星で発見されているハビタブルゾーンの惑星の数は少ないが、小さい惑星は発見されづらいというバイアスがある。そのため、コペルニクスの原理で太陽系を例にして考えると、8 個惑星の内ハビタブルゾーンの惑星は、地球と火星の 2 個あることから、0.25 と計算できる。氷衛星の内部海は太陽系でもまだ未確定要素が多いので、ここでは天体表層に液体の水の存在できる惑星とする。

f_l の生命の誕生の可能性は、本論文の重要な課題にもなる。ハビタブルゾーンの 2 つの惑星のうち、ひとつに生命が誕生しているので、コペルニクスの原理の適用で 0.5 とする。

生命の進化の結果、知性をもつ可能性 (f_i) は、知性の定義にもよっても大きく変化する。Darwin (1881) のいうようにミミズにも知性があるとする考えもあるが、ここでは陸上知的生命とする。この陸上知性の発生確率も、次の技術文明の誕生 (f_c) も、判断が難しいがコペルニクスの原理の適用で、両者とも 1 とする。

最後の、技術文明の継続期間 (L) は、テレビが利用されてほぼ 100 年たつので、少なくとも 100 以上の値にはなり、今後人類が現在の技術文明を継続していく限り増加していく。

Drake の式を提唱した Drake は論文の中で見積もった技術的知性の数は、10 であった (表 3)。本論文の推定では、500 ~ 1000 個という値になった。その値の評価については、次の項で検討する。

ここで、注意しておくべきは、推定した数は、現時点で存在している技術的知性で、電波を出している可能性があるものである。しかも、同時代に存在していたとしても、電波が届くために

表 3 Drake の式

略号	意味	単位	Drake の値	本研究
R	星の形成速度	個 / 年	10	20 ~ 40
f_p	惑星を持つ確率	個 / 個	0.5	1
n_e	生物生存可能惑星の比率	個 / 個	0.5	0.25
f_l	生物が誕生する確率	個 / 個	1	1
f_i	知的生命へ進化の確率	個 / 個	0.01	1
f_c	技術文明を持つ確率	個 / 個	0.01	1
L	技術文明の継続期間	年	10,000	100
N	技術的知性	個	10	500 ~ 1000

地球外知的生命で技術的知性になっているの星の数を推定する方程式。Drake (1961) によって提唱されたもの。Drake の値 : Drake 論文で示された値。本研究 : 本文参照。

は、距離に応じた時間がかかることを把握しておく必要がある。

もうひとつは、それぞれの推定の値を決めるための必要な学問は、前半は自然科学で、後半は人文科学や社会科学が担うべき分野である。R と f_p , n_e は、天文学的知見が役に立ち、推定値の根拠や精度が示せた。 f_i は生物学もしくは古生物学がその答えを出すべき問題となる。だが、その値を決めることは、本論文のテーマとなる生命起源に直結したもので未解決である。 f_i は人類学が、 f_c は考古学が過去を扱う人文科学の問題で、L は国際問題や政治、経済を考える社会科学が検討すべき問題となるだろう。後の項ほど、日常的で身近なものではあるが、不確かさが増している。これが、人類の知性の現状である。

c テクノロジー文明

Kardashev (1964) は、文明を3つに区分した(表4)。それぞれ、I型文明、II型文明、そしてIII型文明と呼んだ。それぞれの文明についてみていくが、数値は60年近く前に考えられたものなので、現状にはそぐわないかもしれないが、示唆に富む値でもあるので、そのまま使用した。

I型文明

I型文明は、太陽定数 ($1.37 \times 10^3 \text{ W/m}^2$) から、技術的知性の生まれた惑星に母星から降り注ぐエネルギー(太陽定数) $1.7 \times 10^{24} \text{ erg/秒}$ ($1.7 \times 10^{17} \text{ W}$) を基準として、 $4 \times 10^{19} \text{ erg/秒}$ ($4 \times 10^{12} \text{ W}$) と見積もった。

現状(2021年)で、地球全体のエネルギー使用量は、 $2 \times 10^{20} \text{ erg/秒}$ ($2 \times 10^{13} \text{ W}$) となっている(Energy Institute, 2023)。現時点で、すでに地球のエネルギー使用量は、I型文明の想定の数倍となっている。エネルギーの内訳としては、再生可能エネルギー(太陽光、水力、風力など)が13.5%、原子力が4.3%、あとは化石燃料となっている。

化石燃料が、現在使用されているエネルギーの主たるものである。化石燃料とは、石炭、石油、天然ガスで、これらはいずれも過去の生物を起源とする。過去の生物も、太陽エネルギーを光合成として利用する植物を基盤とした食物ピラミッドを構成していた。これらの生物の遺骸が、炭素を中心とする固体、液体、気体となったのが、化石燃料である。過去の太陽エネルギーが生物

表4 テクノロジー文明

タイプ	文明	利用エネルギー	エネルギー空間領域		内容
		(erg/sec)	(W)		
I型	惑星文明	地球人類程度	4×10^{19}	4×10^{12}	1つの惑星表面で利用可能なエネルギー
II型	恒星文明	恒星の全出力	4×10^{33}	4×10^{26}	母恒星を全エネルギーを制御、ダイソン球を構築
III型	銀河文明	銀河の全出力	4×10^{44}	4×10^{37}	銀河系の全エネルギーを制御

Kardashev (1964) によるI型、II型、III型の区分と内容。I型文明のエネルギー量は、地球軌道上のエネルギーをすべて利用することが上限の値となる。II型文明は、恒星の放出するエネルギーをすべて利用するもの。II型文明は、銀河系全体のエネルギーを利用するもの。データは横尾(1984)による。

体を作り出し、それらが埋没して変化したものが化石燃料となる。

再生可能エネルギーとは、太陽エネルギーを直接利用する太陽光発電、太陽エネルギーで水が循環するのを利用するのが水力発電、空気の循環を利用するのが風力発電などである。現状では、 3×10^{19} erg/秒 (3×10^{12} W) 程度が再生可能エネルギーとなっており、想定された I 型文明のエネルギー量に相当する。現在の技術をもってすれば、もっと利用可能であるため、地球文明は今後しばらくは I 型文明の状態が続くであろう。

地球生物の特性として、ニッチがあればどこでも進出するという習性を持つ。地球の知的生命・人類も同じ特性をもち、好奇心が旺盛で、未開の地があればそこを目指していくという傾向がある。惑星空間が、次なる開拓（フロンティア）の対象となるだろう。

地球軌道でえられる太陽エネルギーは、公転軌道の面積分が利用可能なので、最大 1.7×10^{24} erg (1.7×10^{17} W) と計算できる。この値は、現状の総使用量の 4 桁も大きいので、かなりの将来まで、太陽エネルギーで十分、供給可能であろう。だが、より遠距離、より長期間の宇宙空間への進出は、太陽光発電の効率化技術、蓄積技術、エネルギー補給技術の開発が不可欠である。そして他の惑星へ進出した状態になっていくと、II 型文明へと進んでいく。

II 型文明

II 型文明は、恒星の全てのエネルギーを利用するもので 4×10^{33} erg/秒 (4×10^{26} W) と見積もられている。恒星が放出されるすべて利用している状況を想定している。例えば、地球軌道で考えると、恒星のエネルギーを、軌道上が供給において最も効率的だが、さらに多くを利用するためには、地球軌道半径とする球で、すべての放射を利用する方法である。Dyson (1960) は、球状に人工生物圏 (artificial biosphere) を建造し、エネルギーも利用できると考えた。提唱者にちなんでダイソン球 (Dyson sphere) と呼ばれている (Dyson, 1960)。このような文明をダイソン文明と呼ぶ。

現在、地球軌道付近が有人での開拓のターゲットになっているが、月面にも人類の足跡が刻まれている。今後も地球外への進出は続くであろう。長く技術文明が継続すれば、人類はより遠くの惑星、衛星へと進出していくはずである。ただし、宇宙への進出は、非常にコストがかかる。そのため、商業的にメリットがあるか、コストに関わらず進出しなければならないような事態が起こった時などが、宇宙への進出の動機となるであろう。

恒星のエネルギー密度が小さく、恒星から離れると減っていくため、地球軌道から外へ生活圏を広げるためには、核エネルギーの制御が不可欠であろう。核エネルギーとは、核分裂や核融合などで、質量欠損をエネルギーとして利用するもので、膨大な出力がえられる。また、恒星から離れても利用可能なエネルギーとなる。核エネルギーの利用が、重要な技術的ステップとなるであろう。遠くの惑星空間へ進出するためにも、不可欠な技術であろう。

Ⅲ型文明

Ⅲ型文明は、銀河の全てのエネルギーを制御できるもので、 4×10^{44} erg/秒 (4×10^{37} W) と推定されている。ただし、この状態に達するには長い時間が必要であろう。まずは、居住恒星系から近隣の恒星系へと進んでいくことになる。その恒星のエネルギーを利用するⅡ型の方法で、資源は惑星や天体から利用されていくであろう。また、通信や移動など多くの技術でのブレークスルーが必要となる。

Ⅱ型文明が進むに連れて、利用される恒星系の数が増えていくことになる。そこには長い時間が必要であろう。少なくとも現状では、銀河系全体にいきわたっているⅢ型文明は存在しない。なぜなら地球には地球外技術的生命は来ていないというフェルミのパラドクスがあるからだ。この事実は、Drakeの式の値にも関係する重要なものである。

d 文明の発展パターン

この文明区分の概念は、現状に合わせて改定されてきた。例えば、Sagan (1973) では、Kardashevの3つの型をもっと細分するために、型(K)を数値化するために、方程式を提案した。

$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10}$$

ここで、P (W) は消費電力となる。

文明が時間とともに、どのように発展していくかを、コペルニクスに原理により、地球人類をもとにして考えていく (図4)。

破滅型

文明が発展していくためには、いくつもの危機を乗り越えなければならない。現在、地球において人類を襲いそうな危機として、エネルギー、食糧、資源の枯渇、人口増加などいろいろなものが考えられる。過去にも、何度も危機があったが、人類は知恵で克服してきた。だが、次回も克服できるという保証はない。もし、危機が乗り越えられなければ、破滅となる。このようなタイプの文明の発展は、「破滅型」となる。地球ではこれまで多くの文明が破滅したり、破壊されたりした。地球文明全体にも同様の危険性があるだろう。

鎖国型

文明の一つの選択として、進歩を望まず、現状のままに留めるということもありうる。惑星内での「鎖国」である。人類の歴史において鎖国を選択した民族や国もあった。「鎖国」の終了は、外部からの圧力と内部からの圧力の二つがある。外部からの圧力とは地球外知的生命からの「開国」要求であろう。しかし、今のところ、この可能性は不明である。Drakeの式のNやdの値が決定すれば推測も可能であろう。人類の歴史を見る限り、すべての「鎖国」には終わりがあ

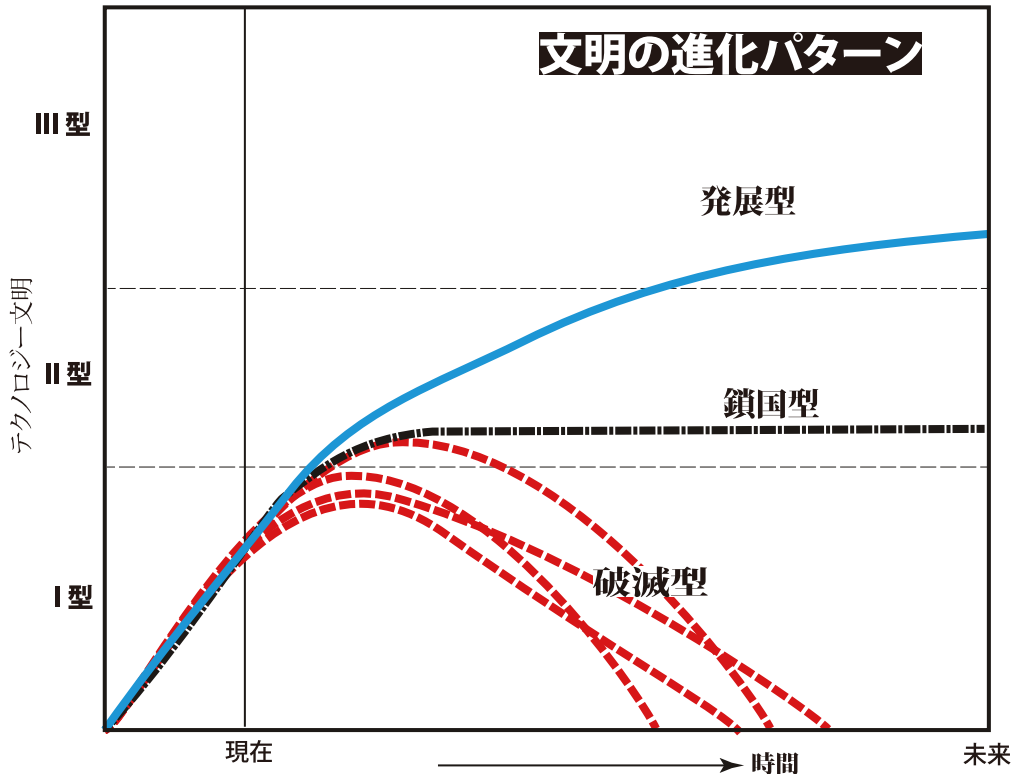


図4 文明の発展パターン

Kardashev (1964) による文明区分 (I 型, II 型, III 型) と発展のパターン。横軸: 時間。縦軸: テクノロジー文明でエネルギー使用量。文明の発展のパターンは, 破壊型, 鎖国型, 発展型に分けられる。

た。コペルニクスに原理により, 「鎖国」が続くのは, せいぜい数 100 年程度と考えられる。内包されている人類自身の外への要望が, 「鎖国」を終了させる原因なのかもしれない。

発展形

幾多の破滅の危機を乗り越えた時, 発展が継続される。人類 (技術的知性) は, 常に発展を目指している。やがては, 母惑星から外への進出となる。地球外へ進出した人類は, 太陽エネルギーを最大のエネルギー源として, 地球軌道から, 周りの惑星軌道へと進出するはずである。やがて II 型文明へと進むことになる。

銀河で最古の恒星の推定年齢が 132 億年とされている (Frebel et al., 2007) ので, それ以前に銀河は誕生していたことになる。地球の 45 億年を考えれば, 知的生命誕生のために, 十分な時間があったことになる。その中に地球人類に先行した文明があれば, 当然, I 型もしくは II 型文明になっているであろう。だが, 電波による探査 (SETI) で検出できない。これがフェルミのパラドクスでもある。

II型文明が発展してくると、近隣への恒星系へと進出がはじまるであろう。その発展の速度は、星間を技術的知性が移動するスピードが上限となる。光速(c)より遅い速度(v)での移動となる。II型文明の拡大によって、銀河全体に広がるのにかかる時間 (L_{\max}) は、最大に見積もって、

$$L_{\max} = \frac{\text{銀河直径}}{V}$$

となるが、平均的 (L_{ave}) に考えると、

$$L_{\text{ave}} = \frac{\text{銀河半径}}{V}$$

していいであろう。もし電波による検出を考えれば、Vは光速Cに置き換えられる。5万光年以内に技術的文明が存在し、電波を発信し続けていれば、SETIがかかることになる。SETIができていないということは、現在、5万光年以内に先行するSETIできる技術的知性が存在しないことになる。5万光年、あるいは数万光年という値には、どのような意味があるのだろうか。

Drakeの式の値から、文明を持つ天体同士の平均距離（文明間平均距離）dは、

$$d = \sqrt[3]{\frac{R}{N}}$$

で求められる。ここでNはDrakeの式で求めた値である。Rは銀河系の半径である。

本論文で検討した計算結果の500～1000個という値は、銀河内で平均すると、dは100光年から200光年となる。これが平均的な技術文明距離と考えられる。我々の技術文明と同程度の時間となり、近隣に文明があってもいいことになる。だがSETIで検出できない。これは、Nを大きく見積もりすぎていたことになる。その原因は、技術的知性にまで進化するために障害が多く困難であるか、もしくは進化に時間がかかり、Nが大きくなれないのかもしれない。

入れた値や計算結果が、どの程度信頼できるのかは、現状では評価できない。ただ、もしコペルニクスの原理を導入すれば、導ける結論は、我々は銀河系内で、現在している唯一の技術文明、もしくは少数がSETIできないところに散らばっている可能性が高いことになる。

天文学では、生命の直接の探査は不可能なので、ハビタブルゾーンという概念が導入され、検討されてきた。水の存在形態にもいろいろな可能性があることもわかってきた。一方、知的生命の検出を目指す研究（SETI）もあり、もし検出されれば、それは生命誕生、生命進化を前提にしているため、生命の存在の間接的証明となる。しかし、いずれにしても、生命起源の直接的な情報をえることはできない。

V 惑星科学的アプローチ

惑星科学的アプローチは、太陽系内で生物の有無を調べるものである。主な探査対象は、惑星

やその衛星が中心になる。現在のところ、地球外生命は確認されていない。

1 太陽系内での生物探査

太陽系の天体は、各種波長での地上望遠鏡、宇宙望遠鏡による観測、多数の人工衛星による探査で、年々、新知見が集まっている。地球の近くの天体には、探査機を着陸させ、表層移動の探査や検証実験によって生物の有無を確認することが可能となる。遠くの天体では、望遠鏡による観測や探査機によるリモートセンシングで生物の痕跡を探すことになる。地球から離れていた、小さかったりする天体では、情報量が少ない。多くの観測、探査が実施されたが、太陽系内で生命探査がなされたのは火星だけである。また、いくつかの天体からのサンプルリターンがおこなわれているが、水や生命の材料への興味が強くなっている。

a 火星探査

生物の存在に関する最初の探査は、アメリカ合衆国 NASA の Viking 計画で実施された。1976 年 Viking 1 の着陸船はクリセ平原に、Viking 2 の着陸船はユートピア平原に着陸した。「火星生物」を検出するための実験をおこなった。Viking の生物実験は、呼吸実験、新陳代謝実験、光合成実験、有機物検出を目指した (河島・小池, 1997)。4 種の実験が実施されたが、生物の存在は否定的であった。

楽観的、あるいは厳密な意味では、Viking による実験は、直径数十メートルの 2 地点の火星表面で、実験時点に生物活動が存在しなかったということになる。従って、Viking 計画が否定した生命現象は局所的なものだったという見解にも立ちうる。

火星では、その後も探査は継続された。主にアメリカ合衆国の NASA が主導しており、マーズ・エクスプロレーション・ローバー (Mars Exploration Rover)、スピリット (Spirit) とキュリオシティ (Curiosity)、マーズ・パスファインダー (Mars Pathfinder)、オポチュニティ (Opportunity)、インサイト (Insight) と続き、現在もパーサヴィアランス (Perseverance) が探査を継続している。

パーサヴィアランスには採取サンプルの保管するためのチューブが搭載されており、これまでに 18 本の保管容器が火星表層に残されている。今後、回収ミッションが考えられており、地球帰還用探査機が 2027 年に、サンプル打ち上げ用のロケットを搭載した着陸機が 2028 年に打ち上げられる予定である。このサンプルリターンが実現すれば、かなりの精度で表層における生命の有無が明らかになるであろう。

火星には、過去に海があった痕跡として流水跡と堆積岩の存在がわかってきた。泥岩からは有機物も発見がされている。後述の隕石にも有機物は見つかっている。だが、生物の痕跡は見つかっていない。

b 火星生物の可能性

火星起源説（Kirschvink and Weiss, 2003）は、火星で誕生した生物が地球に飛来したというものである。その根拠となったのが、火星起源の隕石 ALH84001 から、化石様物体が見つかったことからである（McKay et al., 1996a）。パンスペルミア説の太陽系内起源説というべきものである。

火星から岩石が飛来したかどうかは、隕石が火星起源と認定できるかどうかである。他の隕石では見られない角閃石や磁鉄鉱を含み、地球の火成岩に似た「特殊な隕石」があることは知られていた。1970年代末には、火星起源ではないかと考えられたが、1980年頃に論争が起こり、1984年頃には「火星起源隕石」であることが決着した。特異な酸素同位体組成、希ガスの同位体組成が火星大気と一致、火成岩の沈積岩の組織、含水鉱物が存在、強い衝撃の痕跡、形成年代の若さ、大きな天体にみられる REE パターンなどが根拠として挙げられ、火星起源として認知されてきた（小出, 1998）。

1996年、火星起源の隕石から化石が見つかったという報告（McKay et al., 1996a）がされ、大きな話題になった。その概要を以下にまとめる（Sleep and Zahnle, 1998; Weiss et al., 2000; Kirschvink and Weiss, 2003; Thomas-Keprta et al., 1998, 2000, 2001）。

ALH84001 は、今から 40 億年前に火星でマグマから形成された深成岩であり、約 36 億年前に亀裂ができ炭酸塩鉱物が形成された。1300 万年～1600 万年前に小惑星が衝突して惑星空間に飛びだした。1000 万年以上惑星空間を漂流した後、1 万 3000 年前に南極に落下したと推定されている（Borg et al., 1999）。亀裂の炭酸塩鉱物から生物化石の痕跡が発見されたと報告された（McKay et al., 1996a）。

ALH84001 の割れ目に炭酸塩鉱物の小球体（globule）があり、周りに化石が見つかった。その根拠は、小球体が生命に適した温度での形成、数種類の PAH が存在、炭酸塩鉱物の微粒子の周りに化学的に共存できない鉱物の共存、炭酸塩鉱物の表面の磁性微粒子などを根拠に、バクテリア由来の化石だとした。McKay et al. (1996a) では、これら個々の根拠は無機的にも形成可能だが、総合的に判断して生物が関与したものと考えるべきだと主張した。

火星隕石からの化石の発見の重要性は多くの研究者が認めている（土山, 1997; 田崎, 1996）。だが、反論や問題点も多かった。例えば、化石のサイズが数 10 nm で地球生物より一桁小さく（秋山, 1997; 池田, 1997）、PAHs や有機物、炭化水素の無機的起源、もしくは地球での汚染の可能性（下山, 1995; 1997）、36 億年前の短期間に走磁性バクテリアまで進化できない（Sheater and Papike, 1996; 赤井, 1996, 1997a, 1997b）などの課題が指摘されている。現在に至るまで、生物の痕跡であるという確証はない。

火星に生物が誕生し現存していたとしたら、これまでの探査でなぜ発見されていないのか。約 36 億年前に亀裂にできた化石だとしても、それ以前に生物が誕生し、地球最古の化石発見以前に飛来できたのか。落下時の高温高圧状態に耐えられたのか、地球の環境に適応できたのか、な

どの解決すべき課題は多い。

もし火星起源説であれば、今後、火星生物の起源を考えるという過程が必要になる。パンスパーミア説と同様に、誕生場を変更して、生命起源を考えなければならなくなり、より困難な作業となっていく。

c サンプルリターンがもたらしたもの

地球外の天体のサンプルリターンは限られてはいるが、おこなわれている。サンプルリターンの重要性は、後述の隕石が、由来地が定かでないのに対して、所在が明らかな状態で物質を入手できる点である。現在、月、イトカワ、リュウグウの試料が回収され分析されている。

月はアポロ計画で多くの岩石試料が持ち帰られ、多様な多くの分析がされてきた (Heiken et al., 1991)。探査も継続され、永久影に H₂O の氷があること (Pieters et al., 2009) などもわかってきた。だが、生命の痕跡は発見されていない。

イトカワからは、はやぶさの2度の着陸でサンプルが回収された。分析から LL5 から LL6 のコンドライトであった (Yurimoto et al., 2011)。はやぶさ2によるリュウグウのサンプルから、炭素質コンドライトであることがわり (Kitazato et al., 2019)、粘土鉱物中の水 (Viennet et al., 2023) やウラシル (Oba et al., 2023) や各種のアミノ酸の発見 (Potiszil et al., 2022)、水質変質で可溶性有機物が形成されたこと (Nakamura et al., 2022) などもわかってきた。

試料を分析することで、小天体の履歴が解明され、そこから小惑星帯の起源も理解されるようになってきた。両小惑星も、実際の天体からもたらされた試料から、隕石と化学的な比較ができ、スペクトル区分 (C 型) との対応が検証できた。リュウグウは、地球近傍惑小惑星 (アポロ群) にあり、炭素質コンドライトであることは、地球の揮発成分、生命の材料の有機物の起源と考える上で重要になるだろう。

2 小惑星帯の探査

小惑星は公転軌道によって分類され、天体の密集した領域 (ハンガリア族、フローラ族、フォサイエ族、コロニス族、エオス族、テミス族、キュベレー族、ヒルダ族) と少ない領域 (カークウッドの空隙、2.065, 2.502, 2.825, 2.958, 3.279 AU の位置) がある。地球軌道の近くにまで達する特異な軌道をもった地球近傍小惑星 (アテン群、アポロ群、アモール群) もある。地球近傍小惑星が、地球と交差したとき、隕石として落下することになる。

小惑星の反射スペクトルによる区分もなされている。アルベド (albedo, 反射能) によって、小さいものは、C (B, F, G), D, P, T, K のクラスに区分され、大きいものは、A, M, Q, T, S, V のクラスに、もっともアルベドの大きなものがクラス E となる。

軌道半径ごとに、クラスの異なった小惑星が卓越していることがわかってきた (図5)。主ベルトでは、内側からクラス S, V, T, M, A, C があり、外側にクラス B, G, F がある。主ベ

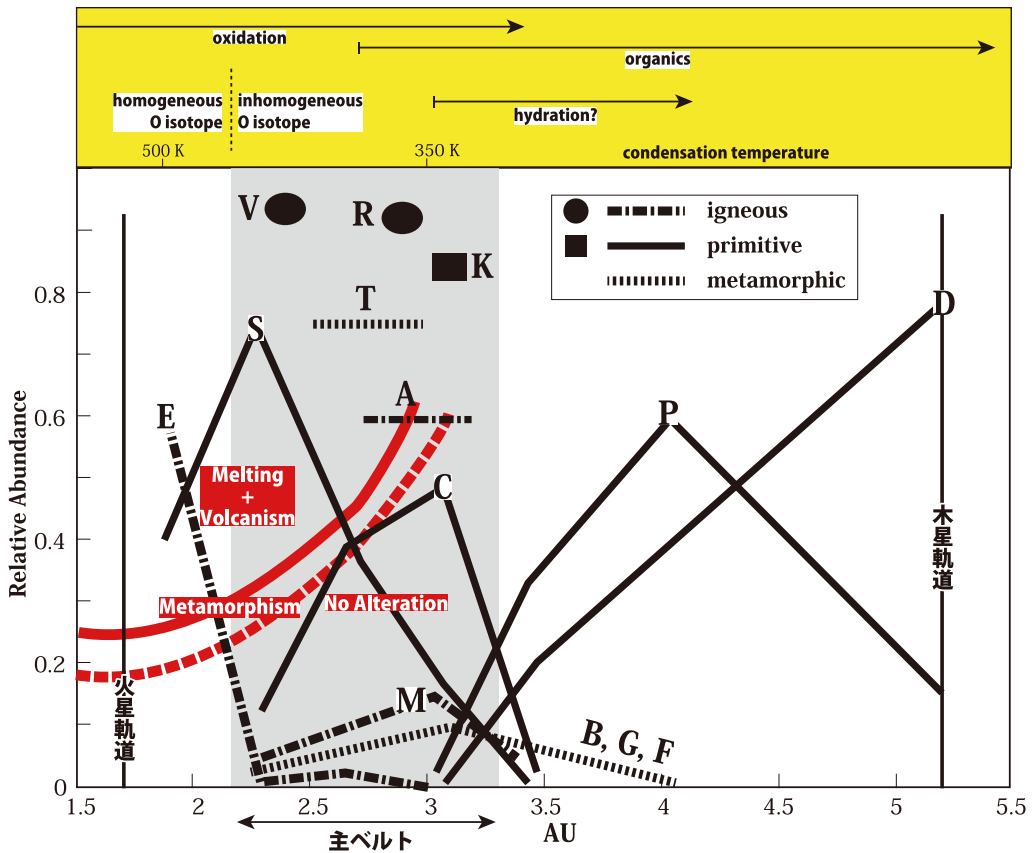


図5 小惑星の位置とクラス

軌道半径の内側からクラスE, S, M, C, P, Dがあり、主ベルトはクラスS, M, Cからなる。もっとも内側にはクラスEが分布している。隕石の熱履歴から物理条件は、内側から溶融+火山作用（Melting + Volcanism）、変成作用（Metamorphism）、非変質（No Alteration）の領域となる。上段は隕石の酸素同位体組成から推定された特徴。小出（2023）を改変。

ルトのさらに内側にクラスEが、さらに外側にクラスP, Dが分布している。

小惑星は、隕石との対比から、始原的なもの（primitive）、変成作用を受けたもの（metamorphic）、火成作用によるもの（igneous）に区分（Bell, 1986）されている（図5）。内側では酸素同位体が均質化されるが、外になると不均質になっていく。内側から酸化が進み、外側では水変質が進み、有機物が形成されるという特徴もある（Bell et al., 1989）。

小惑星帯の物理条件として、内側の軌道は岩石の溶融と火山活動が起こり、外側では変化がなく始原的状態が残され、その境界では変成作用が起こる領域であったと考えられている（Bell, 1986）。ただし、例外もあり、さらなる観測や検討が必要であろう。

3 海と陸の必要性

天文学的アプローチでハビタブルゾーンについて検討してきたが、水の存在を前提とする概念である。水が存在し、そこで必然的に生命で誕生し進化してくるのであれば、ハビタブルゾーンで水（海）の検出を目指せばいい。だが、もし生命誕生に水以外の要素が必要条件となれば、それも加味する必要があるだろう。

Dohm and Maruyama (2015) は、ハビタブルトリニティ (Habitable trinity) という概念を提案し、生命誕生にとって水（海）だけでなく、陸と大気存在が不可欠であるとした。生命の構成成分は、海洋の水は H と O の供給源であるが、他にも大気中の C と N や、大陸から生命に必要な多様な成分（例えば、Ca や P など）が供給されなければならない。3つが共存していなければならないと考えた。さらに、天体表層で、これら3つの間で継続的な物質循環が、太陽放射によって駆動される必要があるとした。

Dohm et al. (2018) では、ハビタブルトリニティの有無を他の天体で検討した。原始大陸は重要な要素となることから、系外惑星のスーパーアースでは生命が出現する可能性はないとした。ドーム・丸山 (2018) では、太陽系の火星では、ハビタブルトリニティがかつて存在した可能性があったが、現在生命が生存していたとしても、単純な生命体であろうとした。水衛星のエウロパやタイタンなどは、陸地からの栄養塩の供給ができず、大気が希薄なので、生命の材料となる化合物の合成が難しいと考えた。両者とも太陽からのエネルギーが地球の 1 % しかない (Borucki et al., 1984) ことも、悪条件となるとした。

生物が複雑化し進化して知的生命になるためには、海洋と大陸が同時に存在する必要があることを、数学的にも示された (Simpson, 2017; Lingam and Loeb, 2019)。Lingam et al. (2023) は、海洋だけの世界では技術的知性が発生しづらいことを統計的に示した。

生命誕生には、海だけでなく、陸の存在も重要や必要条件になりそうである。陸の存在は、海水の量に依存する。陸の寄与が不可欠であれば、水の量、あるいは海と陸の比率を考えていかなければならない。ハビタブルゾーンの系外惑星において、適切な水と陸の比率をもったものを探求する必要があるが、現状の観測技術では困難である。もし、SETI できるような技術的知性が居住しているのであれば、海と陸が存在している天体である可能性が高いと考えられる。

惑星科学においては、水の存在は地球と火星、水衛星で確かめられてきた。生命の可能性の最も高い火星での探査でも生命の痕跡はまだ発見されていない。火星由来の隕石中の「化石」も、研究者の合意をえられていない。サンプルリターンによる精密分析でも、有機物や水は発見されてきたが、生命の痕跡や多様な前駆物質は確認されていない。地球起源や生命起源において、小惑星帯は重要な存在である。小惑星帯の反射スペクトル分析と隕石との対比から、小惑星帯の化学的条件が理解されてきた。これは、地球の材料や形成のための重要な束縛条件になってくる。

VI 隕石学的アプローチ

隕石は地球で発見されたものだが、落下を目撃されていることから、地球外物質であることが明らかである。地球をつくった材料の残存物とも考えられるため、生命誕生のための初期的束縛条件にもなっていくであろう。以下では、隕石の持つ意義と概要をまとめ、生命起源に関連するネオパンスパーミア説、地球の材料としての知見をまとめていく。

1 隕石の持つ意義

隕石が生命起源において、どのような役割の果たすのかを考えていく。

a 内と外の境界

隕石には太陽系外の物質（プレソーラ粒子と呼ばれる）が発見されている（小出, 2022a）。プレソーラ粒子の存在は、太陽系自体の素材がどこから由来したのかを示す痕跡ともなる。プレソーラ粒子は非常に小さく稀な存在である。太陽系の大半の成分は、初期に高温状態になっており、原子レベルでの均質化が起こっている。その時点で、太陽系独自の化学成分が、均質にブレンドされたことになる。太陽系の成分が、どの軌道位置まで、どの程度均質化されたかはまだ不明だが、隕石が由来する範囲（小惑星帯あたり）までは、均質化されたことになる。そのため、隕石から地球の起源や生命の起源を考える時、太陽系形成以前の状態や物質を考える必要はなく、太陽系ブレンドの成分からはじまったと考えられる。

隕石学的アプローチは、地球内と地球外の中間的、あるいは両方の利点を合わせ持ったものと位置づけられる。隕石は、地球外物質だが太陽系ブレンドが固化したものからできている。ただし、その詳細な由来は明らかでないものも多い。

地球を形成した素材は、現在の惑星空間には残っていない。地球が形成される時、ほぼすべての物質は地球に吸収合体されたからである。

隕石は地球の材料物質ではないが、太陽系の惑星の材料の残存物である。多様な隕石が存在し、中には地球の材料物質も同じ分類群のものが残存している可能性もある。それが確定できれば、地球の材料が推定されることになる。

隕石は、地球で入手できる地球外の物質である。なにより実物があるため、分析可能である点ほかの地球外の対象の学問と比べて有利な点である。放射性核種を用いた年代測定もできる。隕石ごと、構成物ごとに年代が決定でき、時間軸上に並べることで、太陽系初期の出来事への束縛条件が与えられる。

惑星の固体物質として、生物の素材や痕跡を探することも可能である。だが、隕石は地球に落下したもので、地球の物質の汚染を受けている可能性もあるので、生物の痕跡探査には特に注意が必要となる。

b 隕石の分類

隕石は、その岩質や鉱物組み合わせ、化学組成、組織などの違いにより区分される (図6)。隕石は、カンラン石 (olivine)、輝石 (pyroxene)、斜長石 (plagioclase) と Ni-Fe 合金からできている。珪酸塩鉱物を主とする石質隕石 (stony meteorite)、珪酸塩鉱物と金属からなる石鉄隕石 (stony-iron meteorite)、および金属からなる鉄隕石 (iron meteorite) に大別される。それぞれを概観する。

鉄隕石

鉄隕石は、Fe-Ni 合金と少量のトロイライト (troilite, FeS) を伴う。Fe-Ni 相の組織によって、ヘキサヘドライト (hexahedrite)、オクタヘドライト (octahedrite)、アタキサイト (ataxite) の3つに区分される。また、Ni, Ga, Ge および Ir の含有量によっても区分される。

石鉄隕石

石鉄隕石は、Fe-Ni 合金の基質部に珪酸塩鉱物を含むポリミクト角礫岩である。珪酸塩鉱物の組み合わせによって、メソシデライト (mesosiderite)、パラサイト (pallasite)、ロドラナイト (lodranite)、シデロファイア (siderophyre) の4つに区分される。これらは稀なタイプの隕石である (Graham et al, 1985; Grady, 2022)。

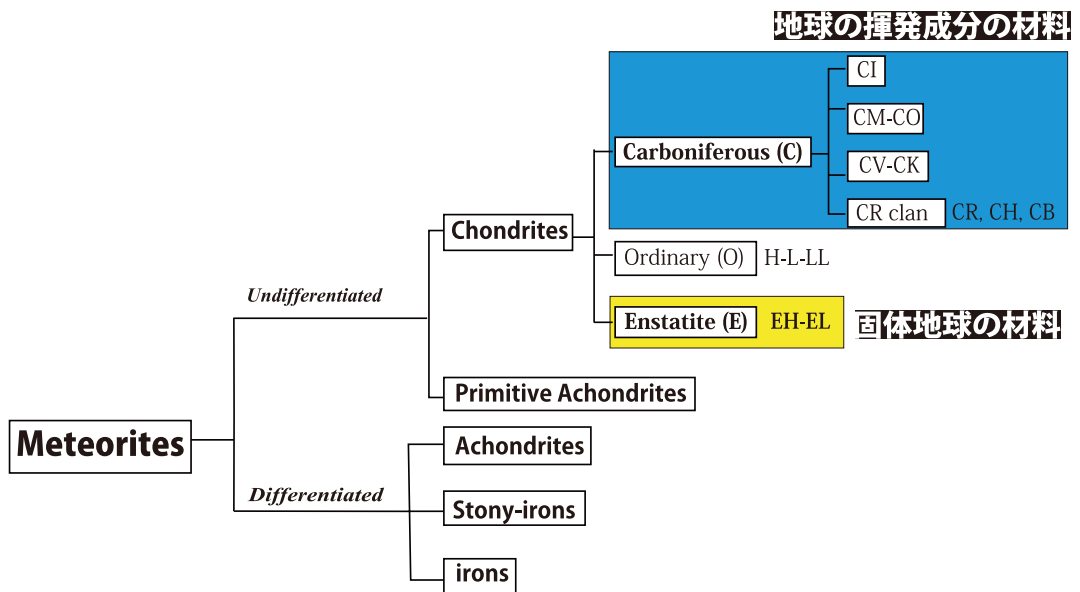


図6 隕石の分類

隕石の分類と地球の材料の候補。詳細は本文参照。小出 (2022b) を改変。

石質隕石

石質隕石は、コンドリュール（chondrule, 顆粒）を含むコンドライト（chondrite）と、含まないエイコンドライト（achondrite）の2種に分かれる。

コンドライト

コンドライトは、隕石の中でもっとも多く見られるものである。コンドライトの構成は、コンドリュールと岩片（fragment）、インクルージョン（inclusion）からなり、間をマトリックス（matrix, 基質）が充填している。炭素質コンドライト（carbonaceous chondrite, Cと略される）、アンフォテライト（amphotelite, LL）、カンラン石-ハイパーシン・コンドライト（olivine-hypersthene chondrite, L）、カンラン石-ブロンザイト・コンドライト（olivine-bronzite chondrite, H）、およびエンスタタイト・コンドライト（enstatite chondrite, E）の5つのグループに区分される。同じタイプのコンドライトでも、岩石学的な組織が連続的に変化していくことに着目して、1から6に区分した（Van Schmus and Wood, 1967）。

エイコンドライト

エイコンドライトは、Fe-Ni合金は含まない。オーブライト（aubrite）、ユレイライト（ureilite）、ダイオジェナイト（diogenite）、シャッシナイト（chassignite）、ホワルダイト（howardite）、ユークライト（eucrite）、ナクライト（nakhlite）、アングライト（angrite）、および月起源の隕石（anorthositic regolith breccia）がある。成因関係を重視して、ホワルダイトとユークライト、ユレイライトは3種の頭文字をとってHEDと呼ばれる。シャーゴッタイトとナクライト、シャッシナイトはSNCと呼ばれ火星起源隕石となる。

c 隕石の有機物

隕石からは、多様な有機物が見つかった。隕石は、宇宙空間と比べて高密度の条件に置かれ、なおかつ太陽系初期に高温条件が生じた後、固化凝縮している。高温から低温へ変化した。太陽からの位置によって温度条件は変化し、固相成分（ H_2O ）に差が生じた。主成分である水素とヘリウムの気相が吹き飛ばれる時期があったが、その時固相組成の位置にいたかいなかったかにより、後の集積過程に差が生じた。軌道ごとに条件が多様になり、化学反応も多様になる。

隕石の精密分析から、有機物が検出されている。発表当初は、地球の有機物の汚染が指摘された。汚染のない南極隕石の分析や1969年にオーストラリアに落下した汚染の少ないMurchison隕石の分析（Cronin and Chang, 1993）などの各種の検証によって、隕石に有機物が含まれていることが確実にされた。有機物は、炭素質コンドライトからたくさん発見された（Sephton, 2002; 西, 1984）。有機分子は400種を優に超え、アミノ酸も100種近くが報告されている（Glavin et al., 2018）。CM2コンドライトでは、有機炭素を約2 wt % 含むことが知られている（藪田, 2008）。

有機分子の存在量, 成分比, 分子同位体組成が明らかにされてきた (Gilmour, 2003)。

隕石から発見される有機物は, アミノ酸も糖も D-体と L-体が 1:1 に混合しているラセミ体で (下山, 1987), D-体と L-体の分別は起こっていない。D-体と L-体を分別するには, 何らかのエネルギーを注入しなければならない。アミノ酸の光学異性体比の偏りも発見されてきた (Cronin and Pizzarello, 1997; Pizzarello and Cronin, 2000) が, 生物では一方だけが利用されるに至るメカニズムは, 必ずしも明らかではない。

隕石には, 地球生物の材料物質, あるいは生体物質の前駆体となるものが多数発見されている (Pizzarello, 2004; Pizzarello et al., 2006)。そこから, 生命を構成する材料が, 隕石から地球に供給されたという考えもある (Chyba and Sagan, 1992; Sephton and Botta, 2005)。

2 パンスパーミア説からネオパンスパーミア説へ

星間物質や隕石からの有機物の発見は, 特別な条件がなくても, 有機物が簡単に形成されることを示唆している。コペルニクスの原理を適用すれば, 特別な条件を有する天体であれば, もっと多様な有機物が合成され, 生命誕生の可能性もあるだろう。

a パンスパーミア説

パンスパーミア説 (panspermia) とは, 胚種広布説とも呼ばれる。起こりは, Pasteur がおこなった長フラスコによる実験で, 生物の自然発生説が否定された。そこから, 地球外に生物の由来を求めるようになった。パンスパーミア説は, 古くは Arrhenius (1908) が提唱したもので, 地球生物は, 地球外で発生して, 何らかの手段で地球に飛来し, 地球生物の起源となったとするものである。

Crick and Orgel (1973) では, 他の知的生命が, 地球に生物を送り込んだと考えた。根拠は, 生体内のモリブデン (Mo) の濃集にあった。だが, 海水組成が再測定され, Mo には異常がないことが判明したため, この議論は終結した。

パンスパーミア説の変形で, 彗星で発生した生物が, 地球に降ってきたもので, 病原微生物にも地球外生物が含まれており, 今も降り続けているという説がある (Hoyle and Wickramasinghe, 1978)。

太陽系は, 宇宙ではごくありふれた化学成分から構成されており, 元素組成にも特異性は見られない (小出, 1997)。コペルニクスの原理から, 地球外生物も似たような元素組成でできている可能性が大きい。もし類似した組成ならば, 地球外で誕生した生物がいても, 区別できないだろう。

だが, パンスパーミア説には課題があった。例えば, 低温で強い宇宙放射線の中を, 長期間にわたって生きて移動してこられるのか, 繁殖するためには一定の量や多様性をもった生物が必要だが可能なのか, 到着しても地球が生育に適した環境とは限らない, などさまざまな困難な条件

をクリアしなければならない。パンスパーミア説による生命起源では、科学的な検証が不能であるし、根拠も示せない。現在では、生物が飛来したというパンスパーミア説は採用されていない。

b ネオパンスパーミア説

生物そのものが飛来するのではなく、地球外で形成された生物の材料が運ばれたと考えるネオパンスペルミア仮説 (Neo-Panspermia hypothesis) もある (丸山ほか, 2019)。ネオパンスペルミア説では、ありふれた素材からできた生物の材料 (生命構成単位と呼ぶ, Building blocks of life: BBL) となる有機物が、地球へ運ばれ、地球の環境と材料 (H_2O , CO_2 , N_2) と反応して生物誕生に至ると考えるものである (Sutherland, 2016; Adam et al., 2018)。

丸山ほか (2019) は、次のような根拠から「地球外から飛来する有機物は生命のもとにはならない」と結論づけた。太陽熱によって彗星 (氷惑星) から分離したマイクロサイズの BBL は、2 AU より内側だと太陽風の高エネルギーによって還元的なガスに分解され、太陽系外側へ吹き飛ばされる。隕石中の BBL は、地球大気圏に突入する時の摩擦熱や、衝突時の高温高圧衝撃波圧と温度上昇 (数千から数万 $^{\circ}C$) によって、無機物にまで分解される。また、地球に BBL が落ちてきたとしても、それらが集積するメカニズムが働かない。いろいろな課題があると指摘した。

ネオパンスパーミア説として、BBL が地球外の天体由来の可能性があったとしても、それが直接、地球生命の素材となったかどうかは、判別は困難であろう。なぜなら似た成分が宇宙空間や隕石中にもあり、多分地球でも合成されていたであろうから、区別できない。

3 地球の材料としての隕石

隕石のうち、どの種類が、地球の素材になったのかを、隕石の特徴と小惑星帯の比較から考えていく。

a コンドライトの形成

エイコンドライトは、微惑星 (数 100 km 以下) の状態の母天体で化学的分化を起こし、その後天体同士の衝突により破壊されたものと考えられる (小出, 2023)。また、鉄隕石は大きな微惑星で金属鉄が分離して核を形成していたもので、石鉄隕石は核とマンツルの境界や金属と岩石の分離途中のものとなる。

エイコンドライトや鉄隕石、石鉄隕石は、天体内で化学的に大きく分化変容しているため、微惑星形成初期の情報となるが、地球の材料物質、あるいは生物の材料物質とはならない。地球や生命の起源を考えるためには、コンドライトが重要になってくる。

コンドライトは、形成条件が大きく異なるコンドリュールやその破片、低温で形成されたマトリックスなどの非平衡な物質の集合体となっている。始原的コンドライトのコンドリュールは、高温で気相になった後、無重力空間で液化して液滴 (岩石の溶融物、マグマ状態) となって固化

したもので、高温(2000℃)で固化したCAI(Ca-Al inclusion, カルシウムとアルミニウムを多く含む包有物)から、1000℃以上で形成された珪酸塩鉱物がある。100℃以下で形成される粘土鉱物、さらに低温で形成される有機物を含むマトリックス(基質0℃以下)がある。

マトリックスの有機物が残っているため、低温状態のまま集積して固体になり、その後もマトリックスが残っていることから、太陽系初期に形成された固体物質が、ほとんど変化を受けることなく、未分化のまま残されている物質であることがわかる。

コンドライトの形成年代は、地球の岩石より古く、エイコンドライトなどの分化した隕石と比べても古い。太陽系でもっとも古い固体物質となる。太陽系初期に形成されたコンドライトが、集積して微惑星が形成されてきたことになる。つまり、コンドライトが惑星ならびに地球の材料と考えられる。

現在、大きな惑星が周回する軌道には、コンドライトはなく、小惑星帯にのみ残されている。地球に落下した隕石で軌道の求められたものは、Pebble (H5) (Spurny et al. 2003), Lostcity (H5) (Schaifers and Voigt, 1981), Innisfree (LL5) (Schaifers and Voigt, 1981), Peekskill (H6) (Brown et al., 1994), Neuschwanstein (EL6) (Spurny et al., 2003), Almahata Sitta (Ureilite) (Jenniskens et al., 2009), Chelyabinsk (LL5) (Popova et al., 2013) などがいくつかある。小惑星帯に由来することが確認されている(小出, 1995b)。したがって、現在落下している隕石は、地球軌道にはなく、地球の材料物質ではない。

b 隕石と小惑星の対比

小惑星の反射光のスペクトルから表層物質の特徴がえられ、隕石と対比が可能で、類似性が導かれる(Wetherill and Chapman, 1988)。

小惑星のスペクトルによるクラス区分と、隕石の特徴が対比されている(Bell et al., 1989)。アルベドの小さいクラスC(B, F, G)はCIとCMコンドライトに対比され、クラスTは変質した炭素質コンドライトに、クラスKはCVとCOコンドライトに対応させられている(図7)。クラスDとPは対応するものはない。アルベドの大きいクラスAはブランチナイトに、クラスMは鉄隕石に、クラスQは普通コンドライトに、クラスRはカンラン石に富むエイコンドライトに、クラスSはパラサイトと鉄隕石に、クラスVは玄武岩質エイコンドライトに対応する。中程度のアルベドのものは、化学的に分化したエイコンドライトや鉄隕石に対比される。もっともアルベドの大きなクラスEはEコンドライト(エンスタタイト・コントライト)に対比されている。

主ベルトの小惑星は、ほとんど(70%)が炭素質コンドライトと類似の表面を持つ。粘土鉱物や炭質物をもちより低温で形成されたCIからCMは、ベルトの外ほど多くなる傾向がある。石鉄隕石や鉄隕石も主ベルトにある。

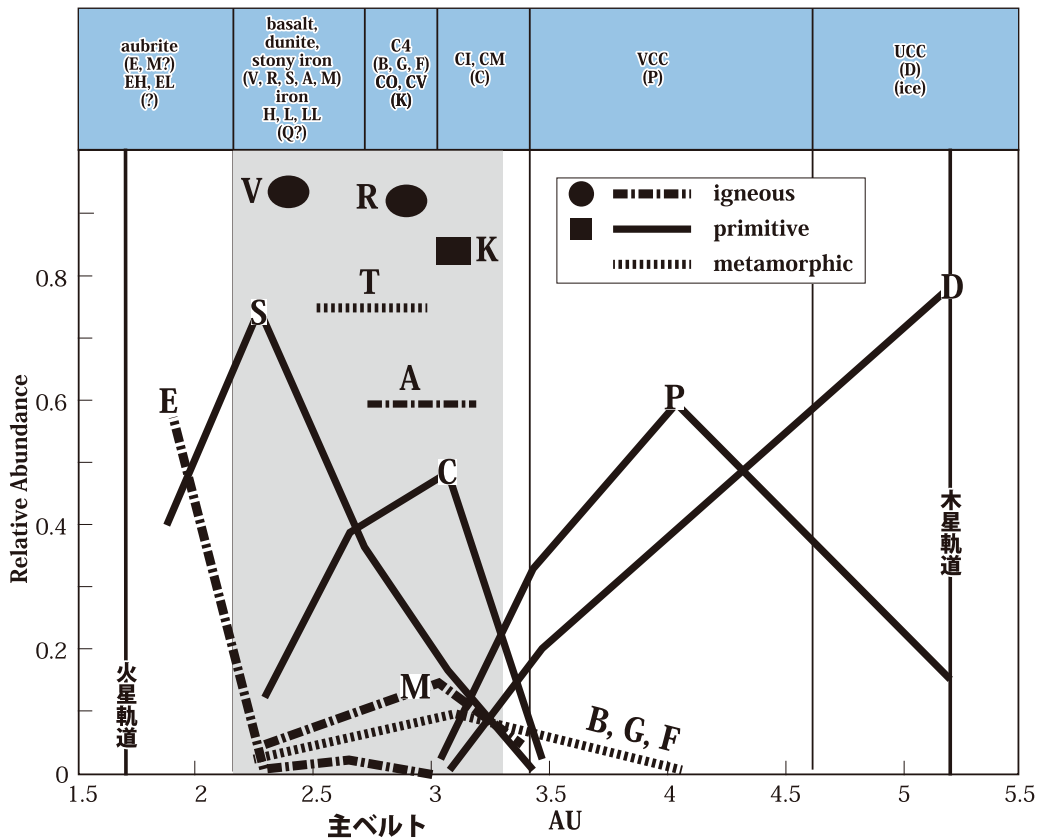


図7 隕石のタイプと小惑星のクラス

上段：軌道半径ごとの小惑星のクラス（図5を参照）に対応する隕石の種類。VCC: very carbonaceous chondrites, UCC: ultra-carbonaceous chondrites（赤い有機物相を含む）は実在しないが小惑星のスペクトルPとDのクラスを説明するために導入された仮想の隕石タイプ。データはBell et al. (1989) による。

普通コンドライトに類似した小惑星は、主ベルトにはほとんど見られず、地球を横切ったり近づいたりする軌道（アポロ・アモール群）にある。地球に近づく軌道を持つために、隕石の落下頻度の大部分を占める。

小惑星帯（2-5 AU）の天体は、隕石に対比されているが、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になり、酸化になる。マトリックスの形成時の温度も、太陽からの距離と相関も持つはずである。太陽に近いものは、揮発成分が少なくなる。還元的なエンスタタイト・トコンドライト（Eコンドライト）になる。

Eコンドライトは稀な隕石（2%）で、構成鉱物の輝石がエンスタタイトであることが特徴となっている。還元的な環境で形成され、鉄の酸化物はなくFe-Ni金属や硫化鉄として含まれている。Eコンドライトは、金属の多いEH型（Feが29%）と少ないEL型（22%）に分類される。

Eコンドライトには、地球ではほとんど見られないoldhamite (CaS), niningerite (MgS),

perryite ((Ni, Fe)₈(Si, P)₃), アルカリ硫化鉱物 (djerfisherite や caswellsilverite) などの鉱物を含む。これらの特異な鉱物も、還元的な形成場を示している。E コンドライトの多くは、熱変成を受けている (岡崎・中村, 2009)。

これらの多様な隕石のうち、どのような隕石が、地球の材料、もしくは生物の材料となったのかを考えていく。

c 地球の材料：E コンドライト

これまで地球の材料は、炭素質コンドライトと考えられてきた (例えば, Latimer, 1950; Urey, 1952 など)。炭素質コンドライトには揮発成分をかなり含んでいるため、大気や海洋をつくることができるためである。炭素質コンドライトであれば、地球の成分のすべてをまかなえる材料と考えられていた。

現在の太陽系の小惑星帯での天体の特徴をみると、炭素質コンドライトは主ベルトを構成しているが、太陽から離れたところに多くなっている。太陽に近い領域では、アルベドの大きなクラス E が多くなっている。クラス E は還元的な環境で形成された E コンドライトに対比されている。

そこから外挿していくと、地球軌道で形成されたコンドライトは、含水鉱物や水を含んだマトリックスはほとんどなく、酸素同位体組成などからも、E コンドライトを主とする物質であったと考えられる (Robert, 2001)。

このような隕石学的な研究の結果を考えると、炭素質コンドライトを地球の材料とする従来の仮説ではなく、E コンドライトを主材料とする惑星形成の過程 (Dauphas et al., 2014) を考えるべきだろう。

隕石は、地球内で入手できる試料だが、地球外から由来している。そのため隕石学からは、特徴的な情報が抽出できる。試料が存在するので、各種の分析や計測ができ、化学組成による化学的束縛条件、放射性同位体組成による時間的束縛条件がつけられる。また、小惑星帯との対比から、地球の材料の限定と固有の特徴となる、還元的で無水の材料からできたという推測ができてきた。

Ⅶ 地球のシミュレーション学的アプローチ

惑星形成の理論を数値計算モデルにして、コンピュータを用いて計算する「シミュレーション学」がある。そこでは、系外惑星の多様性や惑星科学、隕石からえられた初期条件や束縛条件などを加味して、惑星系や地球の形成を考えられている。シミュレーション学は、場や時間には束縛されないので応用領域は広い。以下では、束縛条件を整理し、シミュレーション学による惑星系形成モデルと、そこから導かれた地球形成モデルを概観していく。

1 小惑星と隕石からの束縛条件

地球形成の数値モデルによる研究では、炭素質コンドライトのような地球に必要な成分をすべてもっている材料から形成されたとして進められてきた。古典的モデル (Safronov, 1969, 1972; Hayashi et al., 1985) では、材料から、固体成分から、揮発性成分が脱ガスして大気と海洋が形成されたと考えられてきた。近年でも、この仮説がとられている (Zahnle et al., 2007; Ikoma and Genda, 2006)。

そこでは、小惑星のタイプや隕石の化学的特徴が、地球の材料として考慮されていない (Maruyama and Ebisuzaki, 2017)。前項で示したように、小惑星帯と隕石の対比、配列から、地球軌道では還元的な物質が、集積してできた可能性が高くなってきた。揮発性成分を含む酸化の物質は、地球形成後、付加され大気・海洋をもつようになったと考えらるようになってきた (Ringwood, 1977, 1979; Ringwood and Kesson, 1977; Wanke, 1981; Wanke and Dreibus, 1988)。

太陽からの距離 (放射線量の変化) によって、物質が固化する条件 (固化線) が変化していく。固化線より外側では、固体は小惑星帯や隕石として取り込まれていく。固化線より内側では、取り込まれない。小惑星や隕石の化学的配列は、このような固化線の位置を反映している。

例えば、 H_2O の固化線 (スノーライン) より外側では、氷が固体成分として構成物に加わる。氷が多い外側の軌道上では氷惑星が形成される。同様にスノーラインより内側では、固体物質は岩石だけとなり、岩石惑星が形成される。

小惑星帯と隕石の対比による化学的条件 (酸化還元状態, 揮発成分) を考える (図8) と、 H_2O が氷になる固化線 (スノーライン) は 2.7 AU とあったと考えられる (Hayashi, 1981), 有機物の固化する境界 (有機物固化線) は 2.1 AU (Kouchi et al., 2002; 山本・香内, 2003), CO_2 固化線は 10 AU, CO 線は 40 AU (Tsuchiyama et al., 2021; Oberg et al., 2011; Schwarz and Bergin, 2014) が存在すると考えられる。また、粘土鉱物固化線は 1.8 ~ 1.9 AU で、地球はそこからかなり内側に位置している。

原始太陽系の地球軌道では、還元的で無水の固体物質になり (丸山ほか, 2018), さらに内部になる珪酸塩も還元され、水星では還元的な物質からなる可能性が指摘され (Wasson, 1988), 反射スペクトルでは水星表面に有色鉱物が乏しいことを示していることから、還元的環境を支持している (広瀬・倉本, 2005)。

地球軌道では、無水珪酸塩を主とする還元的な固体物質 (E コンドライト類似物) が材料となり集積したと考えられる。

2 惑星系形成モデル

惑星科学では、惑星系形成の数値モデルを作成して計算機実験するシミュレーション学も重要な手法となっている。シミュレーションの結果の検証には、現在の惑星内の天体情報や、最近で

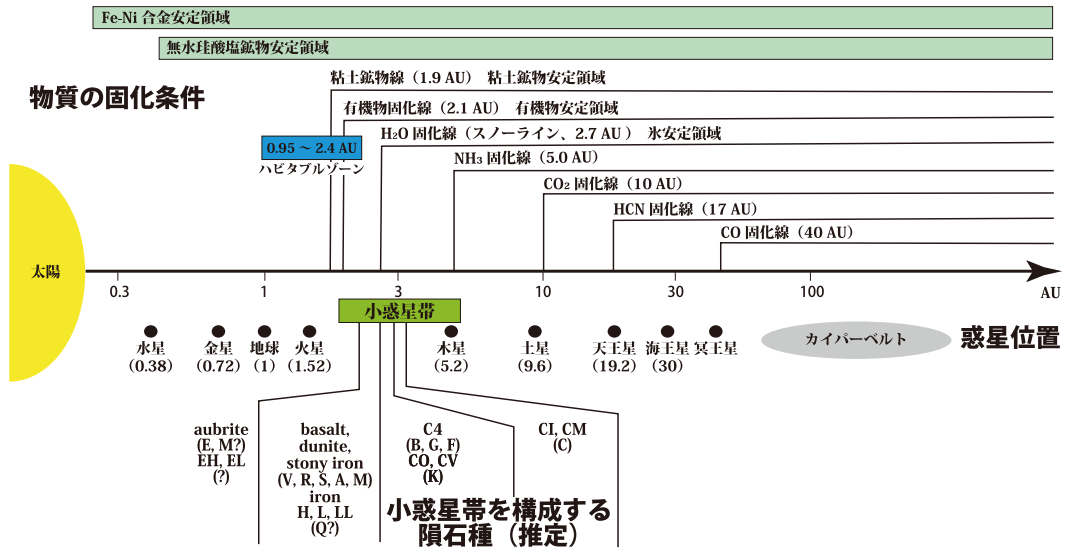


図8 太陽系初期の材料物質の推定された分布

上：太陽系初期の物質の固化条件。境界から太陽より遠い側では固体となる。中段：惑星の位置（AU 単位，指数軸）。下段：小惑星帯に対比される隕石種（図7参照）。丸山ほか（2018）を改変。

は系外惑星の多様性も説明できるかも重要になってきている。

a 標準モデル

近年まで「標準モデル」が利用されてきた(Safranov, 1969; Hayashi et al, 1985)。標準モデルは、次のようなシナリオになる（図9）。

H₂ と He のガスを主成分とし、ごく少量の固体成分（塵，ダストと呼ぶ）を含む、密度の濃い部分（分子雲コア）が、原始太陽系ガスとして恒星および惑星の材料となる。

原始太陽系ガスの中心部では、物質が集中し原始星（中心星）ができる。中心星で質量が増加し、重力による収縮で、重力エネルギーが放出され、中心部の温度が上がり、原始太陽となる。原始太陽が安定するまでは、不安定な時期があり、林フェイズ（Hayashi phase あるいは林トラック Hayashi track）と呼ばれる。内部温度が高くなり、やがて 1500 万度に達すると水素核融合が始まる。核融合の熱による膨張と重力による収縮が釣り合って安定した時、主系列星となる。

原始太陽系ガスの周辺部では、ゆっくり回転していたガスが重力で収縮して回転速度を増すと、遠心力が生まれる。回転軸方向は遠心力と釣り合ったところで収縮は止まる。回転しているガスでは、回転軸と平行の方向では赤道面に向かう力のみが働き、赤道面上に固体物質が集まってくる。原始太陽系内でダスト粒子が成長していくとともに、赤道面に沈降し（Weidenschilling, 1977; Nakagawa et al, 1981; Hayashi, 1981），原始惑星系円盤ができる（Bouvier et al, 2007）。

原始惑星系円盤は、岩石ダストと水ダストからなる。赤道面では、衝突合体が繰り返される。

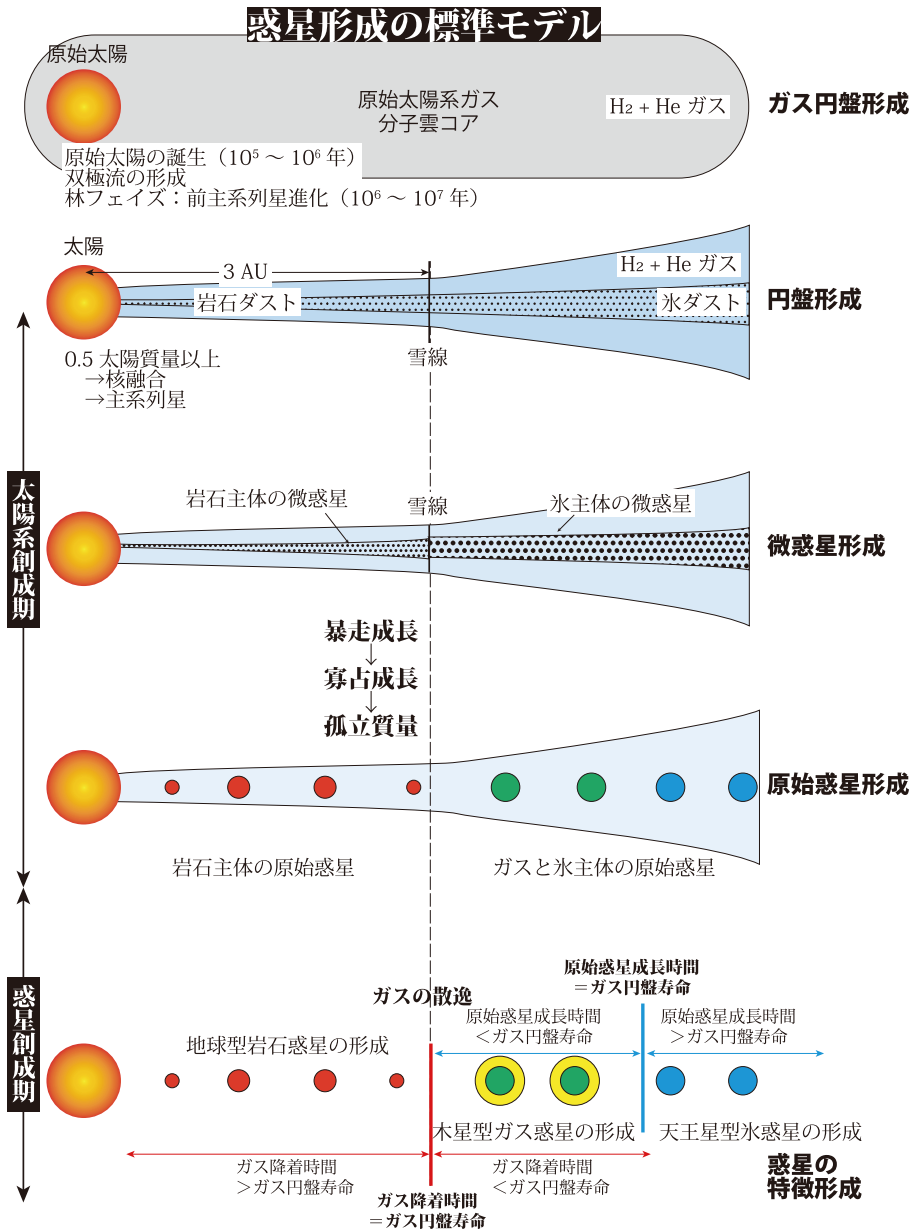


図9 惑星形成の標準モデル

惑星形成の標準モデル。各過程で課題も残っており、完成したモデルはできていない。系外惑星の多様性のすべてが、このモデルで説明できるわけではない。小出 (2021b) による。

直径 10 km 程度の微惑星 (planetesimal) に成長していく (Hayashi, 1972; Goldreich and Ward, 1973; Greenberg et al., 1978; Weidenschilling and Cuzzi, 1993; Wetherill and Stewart, 1989; 1993, Kokubo and Ida, 1996; Inaba et al., 2001)。

微惑星は、衝突合体で、原始惑星 (protoplanet) へと成長していく (Wetherill and Stewart, 1989; Kokubo and Ida, 2012)。微惑星の誕生から数十万年から数千万年の間に原始惑星へと一気に成長することから、暴走成長 (Makino et al., 1998; Kokubo and Ida, 1998) と呼ばれ、軌道上では一つの大型天体が選択的に寡占成長 (Weidenschilling et al., 1997; Kokubo and Ida, 1998; 2000; 2002) していく。このような過程を経て、質量 $10^{22} \sim 10^{23}$ kg, 直径 2000 ~ 3000 km の火星サイズの原始惑星が形成される (Chambers and Wetherill, 1998; Agnor et al., 1999; Iwasaki et al., 2002; Kominami and Ida, 2002)。

惑星の公転軌道の位置によって、地球型惑星 (岩石惑星)、ガスを捕獲した木星型惑星 (巨大ガス惑星) (Mizuno, 1980; Pollack et al., 1996), そして氷を主とする天王星型惑星 (氷惑星) が形成されていく。

天体の特徴は、ガス固着時間、ガス円盤の寿命、原始惑星成長時間のタイミング (時間) の兼ね合い、また素材の種類は中心星からの距離、表面密度 (1 AU で規格化 = 円盤質量) によって、それぞれ決まってくる (Kokubo and Ida, 2002)。素材における H_2O の役割は大きく、雪線の内と外では固体の惑星材料の量に大きな違いを生じる。その概要は太陽系では明らかになっているが、系外惑星では、この規則性が適用できない惑星も多数見つかっている。

標準シナリオには、以前から課題があることが知られていた。降着円盤中での磁気回転の不安定 (Balbus and Hawley, 1991; Hawley and Balbus, 1991) や、微惑星成長前に中央面への沈降運動の停止 (Champney et al., 1995) などで、固体粒子は大きく成長しにくい (Blum et al., 1998; Blum and Wurm, 2000)。また、原始惑星が地球質量よりも大きくなると太陽へ落下したり (Tanaka et al., 2002), ガス惑星と氷惑星の成長が遅かったり (Wetherill and Stewart, 1989; Ida and Makino, 1993) などの課題も指摘されていた。

b Grand Tack モデル

これらの課題を解決する形成モデルとして「Grand Tack モデル」が提唱された (Walsh et al., 2011; Walsh and Morbidelli, 2011)。

H_2O が固体となっている 3.5 AU 付近で木星が形成され、その後、惑星移動 (planetary migration) のうち、タイプ II 移動と呼ばれるものが起こり、内側 (1.5 - 2 AU) へ向かう (Morbidelli and Crida, 2007)。もし、軌道上に遮るものがなければ、太陽に極めて近い位置にまで移動し、ホットジュピターになる (Konstantin and Greg, 2015)。内側へ移動した木星により、微惑星は重力で散乱され、少数の惑星だけが残ることになる。そのため、火星軌道の物質が少なくなっていく。

土星も成長してくると、内側に移動していく。木星より小さいため移動は速くなる (タイプ I 移動)。土星が内側に移動していくが、木星と土星が 2 : 3 になる共鳴軌道で捕獲され、その軌道で停止する。2つの惑星が共鳴ロックされると、両惑星はともに外側へと移動しはじめ (Morbidelli A. and Crida A., 2007), 現在の位置 (5.2 AU, 9.7 AU) で止まる。木星は、重力で

微惑星を散乱させ、内側に飛ばされ1 AUあたりに微惑星ができる。

Grand Tack モデルでも課題があり、外側では惑星形成が遅いのに、なぜ木星が早期にできるのか、内側に固体のない領域がつかれない(Ebisuzaki and Imaeda, 2017)などが解決されていない。

c タンデムモデル

新たに「タンデム（惑星形成）モデル（Tandem planet formation）」が提唱されてきた（戎崎, 2018）。タンデムモデルとは、磁気回転不安定性（magneto-rotational instability: MRI, Balbus and Hawly, 2000）と固体粒子の多孔性凝集（Okuzumi et al, 2012; Kataoka et al, 2013）、中心星が放射する電離放射線の影響などを考慮した、原始星の降着円盤の定常状態の一次元モデルである。以下では、戎崎（2018）にもとづいてシナリオをまとめていく（図 10）。

0.3 ~ 20 AU の円盤中央面の周辺領域に、磁気回転不安定が抑制されることで静穏領域ができる。静穏領域の外側と内側の両方の境界で、固体粒子が中心分に向かって円盤中央面付近に集積していく部分ができる。そこでは、固体粒子が重力不安定を起こして、数 km の微惑星を効率的に形成されていく。

内側の境界では、温度が 1000 ~ 1300K と高温になるため揮発成分が失われ、岩石粒子だけが集積し岩石惑星が形成される。外側の境界では、ガスと H₂O の氷があり、ガス惑星の核となる氷惑星が形成される。両境界では、惑星もしくは惑星コアがひとつ形成される。このような同心円状の円盤の断面構造の2つの領域で、タイプの異なる惑星が形成されることから「タンデム」と名付けられた。

中心星からの電離放射線と恒星風が、円盤の内側のガスを消散させる。残った岩石微惑星は、

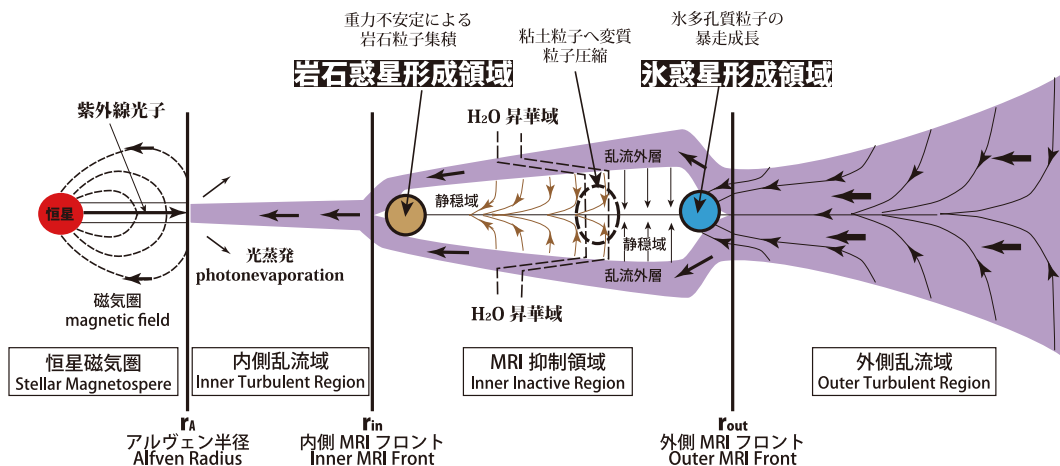


図10 タンデムモデル

磁気回転不安定性（MRI）の境界に物質が集まり、天体が形成される領域ができる。内側では岩石惑星、外側では氷惑星が、ひとつずつ形成される。詳細は本文を参照。戎崎（2018）による。

成長した岩石原始惑星に散乱され、小惑星帯に跳ね飛ばされる。外側の境界でも、ガスが消散し、巨大な氷惑星はガスを保持し、小さい氷惑星はガスが飛ばされる。残った氷微惑星は、巨大惑星に散乱され、一部は小惑星帯に飛ばされ、多くは外に跳ね飛ばれる（カーパーベルトやオールの雲になる）。

タンデムモデルによる惑星形成では、内側ではどのような条件であっても惑星は形成されるが、外側では縦磁場の強さと電離率によって、いくつかの状態が現れることがわかってきた。条件により、縦磁場が弱いと「分散惑星形成状態」が、電離放射線が強い場合は「シングル惑星形成状態」が生じ、その間の条件ならば太陽系に似た惑星系ができる「タンデム状態」なることがわかってきた。

タンデム状態（我々の太陽系の条件）は、内側の境界では岩石惑星のみが、外側の境界で氷惑星がつくられる。少数（10個以下）の円軌道に近い惑星がつくられる（Imaeda and Ebisuzaki, 2017a）。

分散惑星形成状態では、岩石惑星の形成は同様だが、外側の境界が遠く（100 AU）にシフトし、氷惑星の形成がどこでも進み、小さな惑星が多数できる。その結果、衝突が激しく起こり、高離心率の惑星ができる（Imaeda and Ebisuzaki, 2017b）。内側の岩石惑星の形成はタンデム状態と同じで過程で進む。

シングル惑星形成状態では、外側の惑星形成領域がH₂Oの固化線より内側に入り、氷惑星は形成されない。すべての固体粒子が内側の境界にとどまるので、巨大な岩石惑星できていく。内側の境界で、ガスの消散前に大きく成長してガスを捕獲できればホットジュピターになり、捕獲できなければスーパーアースができる。超新星残骸の周辺には、このような電離放射線が高い領域が存在すると考えられる（Imaeda and Ebisuzaki, 2017c）。

タンデムモデルでは、形成場の条件の違いによって、太陽系に似た惑星系から、高離心率惑星がある惑星系、ホットジュピター、スーパーアースなど、太陽系とは全く異なった惑星の形成をも説明ができるモデルになってきた。

このタンデムモデルでは、岩石惑星が形成される場では、水を持たない惑星として成長していく。後で述べる、水のない地球から誕生して、後に水が供給されるというABELモデルと調和的である。

3 地球誕生の二段階モデル

地球の材料は、無水珪酸塩を主とする還元的な固体物質（Eコンドライト類似物）であった。そのような物質からスタートとすると、揮発成分の供給を配慮したモデルが必要になる。丸山ほか（2018）は、それを二段階モデルとして提案した。以下では、二段階モデルに基づいて紹介していく（図11）。

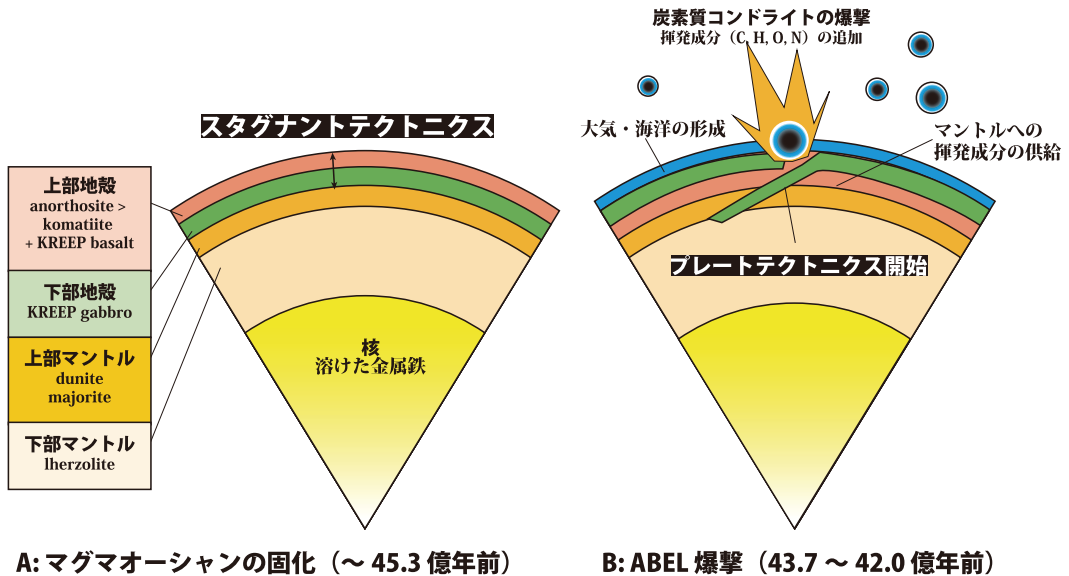


図11 地球形成の二段階モデル

A: マグマオーシャンの固化（～45.3 億年前）の地球。層構造の形成。月に似た無水の地殻、沈積岩からなる上部マントル、未分化のカンラン岩からなる下部マントル。溶けた金属鉄からなる核。B: ABEL 爆撃。炭素質コンドライトの爆撃で揮発成分（C, H, O, N）が加わり大気と海洋が形成。マントルにも揮発成分が供給され、融点降下、粘性の低下でプレートテクトニクスが開始。丸山ほか（2018）をもとに作成。

a 第一段階：裸でドライな地球形成

45.6 億年前に太陽系が誕生し、太陽系ガスの内部で固体粒子が赤道面へ沈降していく。密度が増えると、固体粒子層が重力的に不安定になっていき、多数の岩塊が形成されていく（Goldreich and Ward, 1973）。岩塊は、微惑星（planetesimal, 直径数 km ～ 10^2 km, 質量 $10^{18} \sim 10^{21}$ g）まで成長し、軌道上には約 10^{11} 個ほどが形成される。微惑星の形成後 10^5 年（10 万年）ほどで、微惑星が衝突合体して原始惑星（protoplanet, 火星サイズ, 質量 10^{25} g）へと成長していく。この時、大きな微惑星が選択的に急成長する爆走成長（runaway growth）が起こり、数個の原始惑星が形成されていく。

この時期に、円盤のガスは消失すると考えられている（佐々木, 2019）。円盤のガスの寿命は 10^6 から 10^7 年（100 万から 1000 万年）程度である（堀, 2019）。原始惑星同士の軌道が不安定となり、ガス消失後 10^7 から 10^8 年（1000 万から 1 億年）で、原始惑星同士の衝突（巨大衝突）が起こり、地球サイズの天体まで成長する（Wetherill and Stewart, 1989）。

暴走成長で原始惑星の数が少なくなると、成長がゆっくりとした寡占成長（oligarchic growth）に移行する（Kokubo and Ida, 1998）。その時、原始惑星同士の巨大衝突で地球の月が形成される。軌道上の物体がひとつの惑星にすべて取り込まれると、成長が止まり、惑星形成が終わる。

太陽系において、地球軌道はスノーライン (2.7 AU) の内側だったので材料物質には、揮発性成分の少ない還元的な E コンドライト類似の素材だったと考えられる。大気、海洋のない「裸」の (Maruyama et al., 2013) 乾燥した「ドライ」な惑星 (丸山ほか, 2018) として誕生すると考えられる。「裸」の「ドライ」な地球が、第一段階となる。

太陽系誕生から1億年以内で、地球が集積する。現在の地殻とコンドライトの同位体組成の差に基づいて、コア形成は太陽系形成後3000万年から1億年ほどで形成されたと考えられる (Touboul et al., 2007; Halliday, 2008; Klein et al., 2009)。月の衝突も6000万年ほどの間に起こった (Brandon, 2007)。

地球表層では、集積による衝突エネルギー (重力エネルギーの開放) により、岩石が溶融して、マグマオーシャンが形成される。45.3億年前までにマグマオーシャンは固化して地球が誕生する。核、マントル、地殻の層状構造が形成された (Borg et al., 2015)。

Maruyama et al. (2018) は、第一段階の地球は層状構造を持つとした。上部地殻は、マグマオーシャンの固化の最終残液によって原始大陸が形成される。月の表層に残存するものと類似し、液相に濃集しやすい (固相に分配されにくい) 元素である P, K, Ca, Fe, Mn, REE などが多い斜長岩 (anorthosite) の地殻 (厚さ 10 ~ 20 km) ができる。斜長岩を主とするが、コマチアイト溶岩 (komatiite lava)、鉄が豊富で高密度の玄武岩溶岩 (KREEP 玄武岩と呼ばれている) などを伴っていた。下部地殻は厚さ 100 km ほどの KREEP 斑レイ岩となると考えた。

マントルは、最上部はマグマオーシャンから沈積した、カンラン石からなるダナイト (dunite)、その下には Al に富む輝石やガーネットのカンラン岩 (majorite) からなる (丸山, 2022)。下部マントルはレルゾライト (lherzolite) が主要構成物質となる。

地殻は無水の硬い岩石からなるため、蓋のように働き、停滞して、プレートテクトニクスは起らなかった。そのような状態を、スタグナントテクトニクス (stagnant lid tectonics) と呼んだ。地球以外の水星 (O'Neill et al., 2007) や金星 (Stern, 2005)、衛星の月 (O'Neill et al., 2007) やイオ (Stern, 2005) も、このスタグナントテクトニクスが支配していると考えられている。

第一段階の地球は、斜長岩に含まれている P や K は生命誕生に重要な元素となるが、生命の材料が十分ではないので生命誕生は起こらない。

b 第二段階：ABEL 爆撃による揮発成分の供給

地球の水における水素 H と重水素 D との水素同位体比 (D/H) は、スノーラインより外側では、低温ほど大きくなる (Robert, 2001)。低温領域で誕生した彗星や小惑星の D/H 比は高い (Eberhardt et al., 1995)。ところが、太陽近傍でできたはずの地球の水の D/H は高く、小惑星の値と同じ程度である (Lecuyer et al., 1998)。地球の水は、水素同位体比から炭素質コンドライト物質に由来している (Clayton et al., 1984; Clayton and Mayeda, 1999; Javoy, 1995; Javoy et al., 2010) という考えはあった。ところが、地球軌道付近では炭素質コンドライトが材料とし

てなかったことから、 H_2O 、 CO_2 、 N_2 に富んだ揮発性物質は、地球形成後に加わったことになる。

その現象を説明するために、レイトベニア（Late Veneer）説や後期隕石重爆撃（LHB：Late heavy bombardment）説、ABEL（Advent of bio-elements 生命構成元素の降臨）爆撃（ABEL bombardment）説などが提唱された。

レイトベニア説とは、地球のマントルに含まれる白金族元素の含有量（Anders, 1968）が、推定より大きいことが根拠になる。地球形成時に白金族元素は鉄と一緒にコアに分配されているはずである（Ringwood, 1966; Ringwood and Kesson, 1977）。ところが、白亜紀の lamproite magma（マントルから急上昇してくる揮発性成分が多いマグマ）は、白金族元素が多いマントルに由来する（Becker et al., 2006）ことから、コアの分離後、マントルに親鉄元素が付加されたと考えられる。炭素質コンドライトによる重爆撃によって付加したというレイトベニア説が提案された。U-Pb と I-Xe による年代からその時期は、約 42 億年前と考えられる（Albarede, 2009）。

月の岩石の K-Ar 年代が 40 ～ 39 億年前にピークがある（Schaffer and Schaeffer, 1977）ことから、後期隕石重爆撃（late heavy bombardment）、あるいは月面激変（lunar cataclysm）と呼ばれている（Cohen et al., 2000）。月で起こった後期隕石重爆撃は、地球にも起こったはずで、それを地球の揮発成分の由来とした。タングステン（W）などの親鉄性（鉄に集まりやすい）元素も核に濃集するはずである。古代のグリーンランドの岩石は、高いタングステン同位体組成（ $^{182}W/^{184}W$ 比）を持っていたため、「後期重爆撃」によって供給された証拠と考えた（Willbold et al., 2011）。

LHB の正確な年代として、43.7 ～ 42.0 億年前の時期に 90 % が集中しており、その後 39 億年前までに複数の小ピーク（10 %）があることがわかってきた（Borg et al., 2015; Hopkins and Mojzsis, 2015）。

隕石爆撃イベントと ABEL モデルを組み合わせ「ABEL 爆撃（ABEL bombardment）」が提唱された（Maruyama and Ebisuzaki, 2017）。ABEL 爆撃とは、無水の岩石惑星の地球に、炭素質コンドライトが飛来する出来事である。炭素質コンドライトは、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太陽系内側にもたらされると考えられた（例えば、Weidenschilling and Marzari, 1996 など）。ABEL 爆撃では、43.7 億年前から 42 億年前まで 2 億年ほどかけて起こり、隕石の揮発成分から大気と海洋が形成された。小規模な衝突は 39 億年前まで続く。

炭素質コンドライトの爆撃により、 H_2O 、 CO_2 などの揮発成分がマントルにも供給され、上部マントルの岩石の融点降下、粘性の低下が起こる。その結果、プレートテクトニクスがスタートする（Azuma et al., 2017）。

無水の固体地球で形成された還元物質と炭素質コンドライトの酸化物質の混合によって生命代謝の先駆的化学反应がはじまった。これが生命惑星としての進化がはじまりとなる。これについては、稿を改めてまとめていく。

以上が地球誕生シナリオである。

シミュレーション学は、再現できない不可逆の過去の現象を、理論と数値計算によって仮想的に再現して、可能性を限定していくことができる。惑星系は従来の標準モデルが課題としていたものを解決するために、Grand Tack モデルや、レイトヴベニア説、タンデムモデルなどが提唱されてきた。タンデムモデルは、無水で還元的という地球形成場の特異性を加味できるものであった。太陽系の惑星系だけでなく、系外惑星の代表的な多様性も説明できるモデルにもなっていくそうだ。地球形成の二段階モデルが、タンデムモデルを反映した地球の固有性を説明できるものと考えられる。最初、還元的で無水のEコンドライト類似物質から地球が形成され、その後のABEL爆撃による炭素質コンドライトによる揮発成分の供給という、第二段階が提案されている。まだ、課題があるが、このようなシミュレーション学による地球形成モデルが、生命誕生における初期条件となってくるであろう。

VIII さいごに

生命誕生へのアプローチとして、地球以外の対象や素材を研究している分野として、天文学、惑星科学、隕石学、シミュレーション学についてまとめた。

天文学における系外惑星の発見は、重要な情報となった。惑星系は非常に多様で、我々の太陽系はひとつ多様に過ぎないことが明らかになり、惑星系形成においては新たなモデルの必要を迫った。

惑星科学では、小惑星帯の反射スペクトル分析と隕石との対比から、小惑星帯の化学的条件がわかってきた。また、ハビタブルゾーンが示す水の存在だけでなく、ハビタブルトリニティとして陸の存在も生命誕生には重要であることがわかってきた。

隕石が生命をもたらしたり、生命の材料を直接持ち込まれたりするのは困難であることが明らかになってきた。隕石の重要性は、化学的束縛条件だけでなく時間的束縛条件がつくことであった。小惑星帯との対比から、地球の軌道付近は、還元的で無水のEコンドライト様物質が地球の材料になることがわかってきた。

シミュレーション学においては、タンデムモデルで従来の標準モデルの課題が説明でき、太陽系の惑星系だけでなく、系外惑星の代表的な多様性も説明できた。地球は無水の還元的固体物質から形成、その後のABEL爆撃による炭素質コンドライトによる揮発成分の供給というモデルが提案されている。

本論文では、地球外を対象にした研究分野で、生命起源への取り組みを考えてきた。まだ不十分なものも多いが、研究は進展しており、生命誕生のための束縛条件がかなり整理されてきた。地球内の研究分野でもかなり進展があったので、今後、その整理もしていく予定である。

地球外の研究分野で、今後の展開でいくつか注目していくべきこともでてきた。観測精度が上がったり、手段が追加されたりすることで、系外惑星の多様性はもっと見つかるのだろうか。見つかった多様性は、タンデムモデルで説明できるのだろうか。大規模な SETI 計画は成果を出せず中止となり、その後、観測はほぼそとしたものになった。SETI は無駄なのだろうか。SETI ができたならば、技術的知性だけでなく、系外での生命の誕生と進化も内包している。そのような観測を継続しなくていいのだろうか。

Drake の式は、技術的知性の惑星の数を見積もるものであった。しかし、もっと重要な意味があるのではないだろうか。Drake の式には自然科学だけでなく、人文科学や社会科学など、学際的な知見が数値化されて、代入されていく必要がある。それぞれの数値は、我々の科学の到達度、進歩の尺度を反映している。現状では、式の項に入れられる数値には、不正確なものが多い。それは、我々の科学的探求がまだまだであることの証左であろう。今後の精度いい値を入れられる日はいつのことだろうか。それまで我々の科学時術文明は継続しているのであるだろうか。

文献

- Adam Z. R., Hongo Y., Cleaves H. J., Yi R., Fahren-bach A. C., Yoda I. and Aono M., 2018. Estimating the capacity for production of formamide by radio active minerals on the prebiotic Earth. *Scientific Reports*, 8, 265.
- Agnor C. B., Canup R. M. and Levison H. F., 1999. On the Character and Consequences of Large Impacts in the Late Stage of Terrestrial Planet Formation. *Icarus*, 142, 219-237.
- 赤井純治, 1996. 火星隕石 (ALH84001) とバクテリア起源の磁鉄鉱・磁硫鉄鉱, 惑星地質ニュース, 9, 2-6.
- 赤井純治, 1997a. 火星隕石 (ALH84001) 産磁鉄鉱・磁硫鉄鉱はバクテリア起源か—地球でのバイオミネラリーゼーションの知識からの比較検討—, 月刊地球, 19, 451-459.
- 赤井純治, 1997b. 火星隕石 (ALH84001) と生体鉱物, 日本惑星科学会誌, 6, 46-51.
- 秋山雅彦, 1997. 火星隕石にナンノバクテリアは検出されたか, 月刊地球, 19, 447-450.
- Albarede 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.
- Arrhenius S. A., 1908. *Worlds in the making*. Harper & Row, London. 100 p.
- 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.
- Balbus S. A. and Hawley J. F., 1991. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I-Linear analysis. II-Nonlinear evolution. *Astrophysical Journal*, 376, 214-233.
- Balbus S. and Hawley J., 2000. Solar nebula magnetohydrodynamics. *Space Science Reviews*, 92, 1-2, 39-54.
- Ball J. A., 1973. The zoo hypothesis. *Icarus*, 19, 3, 347-349.
- Barnes V. E. and Pitakpaivan K., 1962. Origin of indochinite tektites. *Proc. Nat. Acad. Sci. United States of Amer.*, 48, 6, 947.
- 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.
- Bell J. F., 1986. Mineralogical evolution of meteorite parent bodies. In *Lunar and Planetary Science Conference*, 17, 985-986.
- Bell J. F., Davis D. R., Hartmann W. K. and Gaffey M. J., 1989. Asteroids: The big picture. In *Binzel R. P.*,

- Gehrels T. and Matthews M. S., eds., *Asteroids II*. Univ. of Arizona, Tucson, 912-945.
- Blum J. and Wurm G., 2000. Experiments on sticking, restructuring, and fragmentation of preplanetary dust aggregates. *Icarus*, 143, 138-146.
- Blum J., Wurm G., Poppe T. and Heim L. -O., 1998. Aspects of laboratory dust aggregation with relevance to the formation of planetesimals. *Earth Moon and Planets*, 80, 285-309.
- Bochanski J. J., Hawley S. L., Covey K. R., West A. A., Reid I. N., Golimowski D. A. and Ivezić, Z., 2010. The luminosity and mass functions of low-mass stars in the galactic disk. II. The field. *The Astronomical Journal*, 139, 6, 2679.
- Borg L. E., Connelly J. N., Nyquist L. E., Shih C. Y., Wiesmann H. and Reese Y., 1999. The age of the carbonates in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 286, 5437, 90-94.
- 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.
- Borucki W. J., McKay C. P. and Whitten R. C., 1984. Possible production by lightning of aerosols and trace gases in Titan's atmosphere. *Icarus*, 60, 260-273.
- Bouvier J., Alencar S. H. P., Boutelier T., Dougados C., Balog Z., Grankin K., Hodgkin S. T., Ibrahimov M. A., Kun M., Magakian Yu. T. and Pinte C., 2007. Magnetospheric accretion-ejection processes in the classical tauri star aa tauri. *Astronomy & Astrophysics*, 463, 1017-1028.
- Brandon A., 2007. A younger Moon. *Nature*, 450, 7173, 1169-1171.
- Brown P., Cepelcha Z., Hawkes R. L., Wetherill G., Beech M. and Mossman K., 1994. The orbit and atmospheric trajectory of the Peekskill meteorite from video records. *Nature*, 367, 6464, 624-626.
- Chambers J. and Wetherill G., 1998. Making the terrestrial planets: N-body integrations of planetary embryos in three dimensions. *Icarus*, 136, 304-327.
- Champney J. M., Dobrovolskis A. R. and Cuzzi J. N., 1995. A numerical turbulence model for multiphase flows in the protoplanetary nebula. *Physics of Fluids*, 7, 1703-1711.
- Chyba C. F. and Sagan C., 1992. Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: An inventory for the origin of life. *Nature* 355, 125-132.
- 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.
- Cocconi, C. and Morrison P., 1959. Searching for interstellar communications. *Nature*, 184, 844.
- Cohen B. A., Swindle D. T. and Kring D. A., 2000. Support for the Lunar cataclysm hypothesis from Lunar meteorite impact melt ages. *Science*, 290, 5497, 1754-1756.
- Conselice C. J., Wilkinson A., Duncan K. and Mortlock A., 2016. The evolution of galaxy number density at $z < 8$ and its implications. *The Astrophysical Journal*, 830, 2, 83.
- Corliss J. B., Baross J. A. and Hoffman S. E., 1981. A hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth. *Oceanologica Acta*, 4, 59-69.
- Crick F. H. C. and Orgel L. E., 1973. Directed panspermia. *Icarus*, 19, 341-346.
- Cronin J. R. and Chang S., 1993. Organic matter in meteorites: Molecular and isotopic analyses of the Murchison meteorite. In Greenberg J. M., Mendoza-Gomez C. X. and Pirronello V., eds., *The Chemistry of Life's Origins*. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 209-258.
- Cronin J. R. and Pizzarello S., 1997. Enantiomeric excesses in meteoritic amino acids. *Science*, 275, 5302, 951-955.
- Darwin C., 1859. *On the Origin of Species*. John Murray, Albemarle Street, London, 24, 1.
- Darwin C., 1881. *The Formation of Vegetable Mould Through the Action of Worms, with Observations on their Habits*. John Murray, 渡辺政隆訳, 2020. ミミズによる腐植土の形成. 光文社, 326.
- 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.
- Deamer D. W., 1997. The first living systems: A bioenergetic perspective. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61, 239–261.
- Deamer D. W., 2008. Origins of life: How leaky were primitive cells? *Nature* 454, 37–38.
- Dohm J. M. and Maruyama S., 2015. Habitable trinity. *Geoscience Frontiers*, 6, 1, 95–101.
- ジェームズ・ドーム・丸山茂徳, 2018. ハビタブルトリニティモデルと太陽系におけるハビタブルプラネットの存否. *地学雑誌*, 127, 5, 609–618.
- Dohm J. M., Maruyama S., Kido M. and Baker V. R., 2018. A possible anorthositic continent of early Mars and the role of planetary size for the inception of Earth-like life. *Geoscience Frontiers*, 9, 4, 1085–1098.
- Drake F. D., 1961. Project Ozma. *Phys. Today*, 14, 40.
- Dyson F. J., 1960. Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation. *Science*, 131, 3414, 1667–1668.
- 戒崎俊一, 2018. タンデム惑星形成理論. *地学雑誌*, 127, 5, 577–607.
- 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.
- 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, 2, 275–298
- Energy Institute, 2023. Statistical Review of World Energy. <https://www.energyinst.org/statistical-review> (2023.7.22 閲覧).
- ESA/Hubble Press Release, 2013. Hubble discovers water vapor venting from Jupiter's moon Europa. <https://esahubble.org/news/heic1322/> (2023.7.20 閲覧).
- Exoplanet Team, 2020. The Extrasolar Planet Encyclopaedia Catalog. <http://exoplanet.eu/catalog/> (2020.7.1 閲覧).
- Felsenfeld G., Davies D. R. and Rich A., 1957. Formation of a three-stranded polynucleotide molecule. *Journal of the American Chemical Society*, 79, 8, 2023–2024.
- Frebel A., Christlieb N., Norris J. E., Thom C., Beers T. C. and Rhee J., 2007. Discovery of HE 1523–0901, a strongly r-process-enhanced metal-poor star with detected uranium. *The Astrophysical Journal*, 660, 2, L117.
- Geissler P. E., Greenberg R., Hoppa G., Helfenstein P., McEwen A., Pappalardo R., Tufts R., Ockert-Bell M., Sullivan R., Greeley R., Belton M. J. S., Denk T., Clark B., Burns J., Veverka J. and the Galileo Imaging Team, 1998. Evidence for non-synchronous rotation of Europa. *Nature*, 391, 368–370.
- Gilmour I., 2003. Structural and isotopic analysis of organic matter in carbonaceous chondrites. In Davis A. M., Holland H. D. and Turekian K. K., eds., *Meteorites, Comets, and Planets, Treatise on Geochemistry*, 1, Elsevier, 269–290.
- Glavin D. P., Alexander C. M. D., Aponte J. C., Dworkin J. P., Elsila J. E. and Yabuta H., 2018. The origin and evolution of organic matter in carbonaceous chondrites and links to their parent bodies. In *Primitive meteorites and asteroids*. Elsevier, 205–271.
- Goldreich P. and Ward W. R., 1973. The formation of planetesimals. *Astrophysical Journal*, 183, 1051–1062.
- Graham A. L., Bevan A. W. R. and Hutchison R., 1985. *Catalogue of Meteorites* (4th edition). Univ. Arizona Press, Tucson, 460 p.
- Grady M., 2022. *Catalogue of Meteorites [Data set]*. Natural History Museum. <https://doi.org/10.5519/tqfuwle7> (2023.7.4 閲覧).
- Greenberg R., Wacker J., Chapman C. R. and Hartman W. K., 1978. Planetesimals to planets: Numerical simulation of collisional evolution. *Icarus*, 35, 1–28.
- The Habitable Exoplanets Catalog, 2023. <https://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog> (2023.6.26 閲覧).
- Haldane J. B. S., 1954. The Origins of Life. *New Biology*, 16, 12–27.
- Halliday A. N., 2008. A young Moon-forming giant impact at 70–110 million years accompanied by late-stage

- mixing, core formation and degassing of the Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366, 1883, 4163-4181.
- 原川紘季, 2016. エキセントリック・プラネット. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典, 朝倉書店, 24-25.
- Hayley J. F. and Balbus S. A., 1991. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. II. Nonlinear evolution. *Astrophysical Journal*, 376, 223-233.
- Hayashi C., 1972. Origin of the solar system. Report of 5th Symposium on Moon and Planets at the Institute of Space and Aeronautics, 13. (in Japanese)
- 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 Black D. C. and Matthews M. S., eds., *Protostars and Planets II*, 1100-1153.
- Heiken G., Vaniman D. and French B. M., 1991. *Lunar Sourcebook, A users guide to the Moon*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 736 p.
- Herbst E. and van Dishoeck E. F., 2009. Complex Organic Interstellar Molecules. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 47, 1, 427-480.
- 日高敏隆, 2005. 生物. 世界大百科事典 CD-ROM 版. 日立システムアンドサービス.
- 平林久, 2016. パルサー惑星. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 32-33.
- 平林久・寿岳潤, 1984. 宇宙に文明をさがす—文明探査の基礎と現状—. *科学*, 54, 437-444.
- 広瀬佑介・倉本圭, 2005. エンスタタイト・コンドライト的な組成を仮定した水星の熱史. 日本惑星科学会秋季講演会予稿集, 2005, 0, 69-69.
- 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.
- 堀安範, 2019. 惑星の形成およびガス惑星の構造と形成. 太陽・惑星系と地球. 共立出版, 90-105.
- Hoyle F. and Wickramasinghe N. C., 1999. Comets-A vehicle for panspermia. *Astrophysics and Space Science*, 268, 333-341.
- 井田茂, 1997. 惑星系の多様性と普遍性—太陽系外の惑星の発見—. *日本惑星科学会誌*, 6, 4-18.
- Ida S. and Makino J., 1993. Scattering of planetesimals by a protoplanet: Slowing down of runaway growth. *Icarus*, 106, 210-227.
- 池田幸雄, 1997. 火星隕石と火星生命. *月刊地球*, 19: 403-412.
- Ikoma M. and Genda H., 2006. Constraints on the mass of a habitable planet with water of nebular origin. *Astrophysical Journal*, 648, 696-706.
- Imaeda Y. and Ebisuzaki T., 2017a. The origin of high eccentricity planets: The dispersed planet formation regime for weakly magnetized disks. *Geoscience Frontiers*, 8, 233-245.
- Imaeda Y. and Ebisuzaki T., 2017b. Single planet formation regime in the high-ionization environment: Possible origin of hot jupiters and super-earths. *Geoscience Frontiers*, 9, 1023-1031.
- Imaeda Y. and Ebisuzaki T., 2017c. Tandem planet formation for solar system-like planetary systems. *Geoscience Frontiers*, 8, 223-231.
- Inaba S., Tanaka H., Nakazawa K., Wetherill G. W. and Kokubo E., 2001. High-Accuracy Statistical Simulation of Planetary Accretion: II. Comparison with N-Body Simulation. *Icarus*, 149, 235-250.
- 石田祐三郎, 2001. 海洋微生物の分子生態学入門—生態学の基礎から分子まで. 培風館, 180 p.
- Iwasaki K., Emori H., Nakazawa K. and Tanaka H., 2002. Orbital Stability of a Protoplanet System under a Drag Force Proportional to the Random Velocity. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 54, 3, 471-479.
- Jannasch H. W. and Mottl M. J., 1985. Geomicrobiology of deep-sea hydrothermal vents. *Science*, 229, 717-725.
- Javoy M., 1995. The integral enstatite chondrite model of the Earth. *Geophysical Research Letters*, 22, 16, 2219-2222.

- Javoy M., Kaminski E., Guyot F., Andrault D., Sanloup C., Moreira M., Labrosse S., Jambon A., Agrinier P., Davaillé A. and Jaupart C., 2010. The chemical composition of the Earth: Enstatite chondrite models. *Earth and Planetary Science Letters*, 293, 259-268.
- Jenniskens P. A., Shaddad M. H., Numan D., Elsir S., Kudoda A. M., Zolensky M. E., Le G. A., Robinson J. M., Friedrich, D., Rumble A., Steele S. R., Chesley A., Fitzsimmons S. Duddy H. H., Hsieh G., Ramsay P. G., Brown W. N., Edwards E., Tagliaferri M. B., Boslough R. E., Spalding R., Dantowitz M., Kozubal P., Pravec J., Borovicka Z., Charvat J., Vaubaillon J., Kuiper J., Albers J. L., Bishop R. L., Mancinelli S. A., Sandford S. N., Milam, Nuevo M. and Worden S. P., 2009. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3. *Nature*, 458, 7237, 485-488.
- Jia X., Kivelson M. G., Khurana K. K. and Kurth W. S., 2018. Evidence of a plume on Europa from Galileo magnetic and plasma wave signatures. *Nature Astronomy*, 2, 459-464.
- Joshi M. M., Haberle R. M. and Reynolds R. T., 1997. Simulations of the atmospheres of synchronously rotating terrestrial planets orbiting M dwarfs: conditions for atmospheric collapse and the implications for habitability. *Icarus*, 129, 2, 450-465.
- Kanoh T., Matsumoto S., Fukatsu R., Kakusho N., Kono N., Renard-Guillet C., Masuda K., Iida K., Nagasawa K., Katsuhiko Shirahige K. and Masai H., 2015. Rif1 binds to G quadruplexes and suppresses replication over long distances. *Nat. Struct. Mol. Biol.*, 22, 11, 889-97.
- Kardashev N. S., 1964. Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations. *Astronomicheskii Zhurnal*, 41, 2, 282287.
- Kasting J. F., Whitmire D. P. and Reynolds R. T., 1993. Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus* 101, 1, 108-118.
- Kataoka A., Tanaka H., Okuzumi S. and Wada K., 2013. Fluffy dust forms icy planetesimals by static compression. *Astronomy & Astrophysics*, 557, L4.
- 河島信樹・小池惇平, 1997. 火星探検—火星人から生命探査まで—. PHP 研究所, 東京, 205 p.
- Kelley D. S., Karson J. A., Blackman D. K., Fruh-Green G. L., Butterfield D. A., Lilley M. D., Olson E. J., Schrenk M. O., Roe K. K., Lebon G. T., Rivizzigno P. and the A. T. S. P., 2001. An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30° N. *Nature*, 412, 145-149.
- Kirschvink J. L. and Weiss B. P., 2003. Mars, panspermia, and origin of life: Where did it all begin? *Journal of Geography*, 112, 187-196.
- Kitazato K., Milliken R. E., Iwata T., Abe M., Ohtake M., Matsuura S., Arai T., Nakauchi Y., Nakamura T., Matsuoka M., Senshu H., Hirata N., Hiroi T., Pilorget C., Brunetto R., Poulet F., Riu L., Bibring J. -P., Takir D., Domingue D. L., Vilas F., Barucci M. A., Perna D., Palomba E., Galiano A., Tsumura, K. Osawa T., Komatsu M., Nakato A., Arai T., Takato N., Matsunaga T., Takagi Y., Matsumoto K., Kouyama T., Yokota Y., Tatsumi E., Sakatani N., Yamamoto Y., Okada T., Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S., Sawada H., Honda C., Yamada M., Suzuki H. Yoshioka K., Hayakawa M., Ogawa K., Cho Y., Shirai K., Shimaki Y., Hirata N., Yamaguchi A., Ogawa N., Teru F., Yamaguchi T., Takei Y., Saiki T., Nakazawa S., Tanaka S., Yoshikawa M. and Watanabe S., 2019. The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy. *Science*, 364, 6437, 272-275.
- Kleine T., Touboul M., Bourdon B., Nimmo F., Mezger K., Palme H., Jacobsen S. B., Yin Q. Z. and Halliday A. N., 2009. Hf-W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73, 5150-5188.
- 小出良幸, 1994. 総説：地球形成の場まつわるモデルとその束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 23, 51-86.
- 小出良幸, 1995a. 地球前史—地球形成場の素描—. 月刊地球, 17, 203-209.
- 小出良幸, 1995b. 総説：隕石—地球の材料物質としての隕石—. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 24, 9-38.
- 小出良幸, 1997. 宇宙階層概論—宇宙の階層内における私たちの普遍性と特異性—. 神奈川県立生命の星・地球博物館編, 神奈川県立博物館調査研究報告(自然科学), 8, 131-170.

- 小出良幸, 1998. 生命の起源—宇宙生物学へのアプローチ—. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 27, 1-30.
- 小出良幸, 1999a. 冥王代の地質学的素描. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 28, 1-28.
- 小出良幸, 1999b. 生命起源に関する研究動向の把握. 地学雑誌, 108, 314-320.
- 小出良幸, 1999c. 生命起源に関する研究動向. 地学雑誌, 108, 509-536.
- 小出良幸, 2001. 冥王代の研究動向. 地学雑誌, 110, 3, 393-396.
- 小出良幸, 2021a. 全地球テクトニクスから普遍的テクトニクスを目指して. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 109, 49-76.
- 小出良幸, 2021b. 地球最初の岩石への概念的弁証法的探求. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 110, 49-77.
- 小出良幸, 2022a. 太陽系の素材からのアプローチ—地球創成5億年の解明への方法論—. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 111, 65-108.
- 小出良幸, 2022b. 未分化隕石から地球最初の5億年へのアプローチ. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 112, 29-73.
- 小出良幸, 2023. 分化した隕石から探る地球最初の5億年. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 113, 29-78.
- 小出良幸・山下浩之, 1995. 地球前史—地球形成場と原料への束縛条件—. 地学雑誌, 104, 167-188.
- 小出良幸・山下浩之, 1996a. 地球初期への惑星物理的束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 25, 1-26.
- 小出良幸・山下浩之, 1996b. 地球初期への惑星化学的束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 25, 27-55.
- 小出良幸・山下浩之・佐藤武宏, 1997. 惑星進化論へのアプローチ: 要因と概要. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 26, 1-24.
- Kokubo E. and Ida S., 1996. On Runaway Growth of Planetesimals. *Icarus*, 123, 180-191.
- Kokubo E. and Ida S., 1998. Oligarchic growth of protoplanets. *Icarus*, 131, 1, 171-178.
- Kokubo E. and Ida S., 2000. Formation of Protoplanets from Planetesimals in the Solar Nebula. *Icarus*, 143, 15-27.
- Kokubo E. and Ida S., 2002. Formation of protoplanet systems and diversity of planetary systems. *The Astrophysical Journal*, 581,1, 666-680.
- Kokubo E. and Ida S., 2012. Dynamics and accretion of planetesimals. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2012 (1), 01A308.
- 国立天文台編, 2022. 理科年表 2023. 丸善, 東京, 1162 p.
- Kominami J. and Ida S., 2002. The Effect of Tidal Interaction with a Gas Disk on Formation of Terrestrial Planets. *Icarus*, 157, 1, 43-56.
- Konstantin B. and Greg L., 2015. Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 112, 14, 4214-4217.
- Kopparapu R. K., Ramirez R., Kasting J. F., Eymet V., Robinson T. D., Mahadevan S., Terrien R.C., Domagal-Goldman S., Meadows V. and Deshpande, R., 2013. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *The Astrophysical Journal*, 765, 2, 131.
- 香内晃, 2005. 小惑星および隕石の起源と進化における有機質星間塵の役割. *岩石鉱物科学*, 34, 3, 114-126.
- 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.
- 久保幹・久保田謙三・今中忠行・森崎久雄, 2011. 環境微生物学—地球環境を守る微生物の役割と応用. 化学同人, 188 p.
- 葛原昌幸, 2016. プリュームテクトニクス. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 8-9.
- Latimer W. M., 1950. Astrochemical Problems in the Formation of the Earth. *Science*, 112, 101-104.
- Lecuyer C., Gillet P. and Robert F., 1998. The hydrogen isotope composition of seawater and the global water cycle. *Chemical Geology*, 145, 249-261

- Lingam M., Balbi A. and Mahajan S. M., 2023. A Bayesian Analysis of Technological Intelligence in Land and Oceans. *The Astrophysical Journal*, 945, 1, 23.
- Lingam M. and Loeb A., 2019. Dependence of biological activity on the surface water fraction of planets. *The Astronomical Journal*, 157, 1, 25.
- Lobo A. H., Shields A. L., Palubski I. Z. and Wolf E., 2023. Terminator Habitability: The Case for Limited Water Availability on M-dwarf Planets. *The Astrophysical Journal*, 945, 2, 161.
- MacGrath M., 1998. Solar System: Satellites and Summary. *Hubble's Science Legacy: Future Optical/Ultraviolet Astronomy from Space* 291, 93
- Makino J., Fukushige T., Funato Y. and Kokubo E., 1998. On the mass distribution of planetesimals in the early runaway stage. *New Astronomy*, 3, 411-417.
- Martin W. and Russell M. J., 2003. On the origins of cells: A hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. *Philos. Trans R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, 358, 59-83.
- Martin W., Baross J., Kelley D. and Russell M. J., 2008. Hydrothermal vents and the origin of life. *Nat. Rev. Microbiol.*, 6, 805-814.
- 丸山茂徳, 2020. 最新 地球と生命の誕生と進化 [全地球史アトラス] ガイドブック. 清水書院, 176 p.
- 丸山茂徳, 2022. 冥王代地球表層環境—バイオスフェア誕生が地球う金星化を防いだ—. 丸山茂徳・戎崎俊一・金井昭夫・黒川顕著, 冥王代生命学. 朝倉書店, 125-192.
- Maruyama S. and Ebisuzaki T., 2017. Origin of the Earth: A proposal of new model called ABEL. *Geoscience Frontiers*, 8, 2, 253-274
- 丸山茂徳・戎崎俊一・磯崎行雄・黒川顕, 2020. 特集号「冥王代の世界 (Part III)—生命誕生と初期進化—」巻頭言. 129, 6, 751-755.
- 丸山茂徳・戎崎俊一・黒川顕, 2019. 地球生命誕生場に必要な9条件と生命誕生場としての自然原子炉間欠泉モデルの再考—生命誕生場は冥王代の地球表層の1か所—. *地学雑誌*, 128, 4, 513-548.
- 丸山茂徳・戎崎俊一・金井昭夫・黒川顕, 2022. 冥王代生命学. 朝倉書店, 483 p.
- 丸山茂徳・戎崎俊一・丹下慶範, 2018. 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. *地学雑誌*, 127, 5, 647-682.
- 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.
- 丸山茂徳・磯崎行雄・黒川顕・戎崎俊一, 2019. 特集号「冥王代の世界 (Part II)—生命誕生場の準備—」巻頭言. 128, 4, 485-489.
- 丸山茂徳・黒川顕・磯崎行雄, 2018. 特集号「冥王代の世界 (Part I)—ハビタブルトリニティ惑星の誕生—」巻頭言. 127, 5, 573-576.
- Maruyama M. and Santosh M., 2017. *Frontiers in Early Earth History and Primordial Life- Part I*. *Geoscience Frontiers*, 8, 211-213.
- Maruyama S. and Santosh M., 2018. *Frontiers in early Earth history and primordial life -Part II*. *Frontiers in early Earth history and primordial life e Part II*. *Geoscience Frontiers* 9 (2018) 1021-1022.
- Maruyama S., Santosh M. and Azuma S., 2018. Initiation of plate tectonics in the Hadean: Eclogitization triggered by the ABEL Bombardment. *Geoscience Frontiers*, 9, 4, 1033-1048
- 眞山聡, 2016. 連星惑星と連星円盤. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 56-57.
- Mayor M. and Queloz D., 1995. A Jupiter-mass companion to a solar type star. *Nature*, 378, 353-359.
- McKay D.S., Gibson E. K. Jr., Thomas-Keperta K. L., Vali H., Romanek C. S., Clemen S. J., Chillier X. D. F., Maechling C. R. and Zare R. N., 1996a. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273, 924-930.
- McKay D.S., Thomas-Keperta K. L., Romanek C. S., Gibson E. K. Jr. and Vali H., 1996b. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274, 2123-2125.

- Mizuno H., 1980. Formation of the giant planets. *Progress of Theoretical Physics*, 64, 544-557.
- 水谷仁, 1984. 生命が生まれる惑星の条件. *科学*, 54, 401-409.
- Morbidelli A. and Crida A., 2007. The dynamics of Jupiter and Saturn in the gaseous protoplanetary disk. *Icarus* 191, 1, 158-171.
- Mulders G. D., Pascucci I., Apai D., Frasca A. and Molenda-Zakowicz, J., 2016. A super-solar metallicity for stars with hot rocky exoplanets. *The Astronomical Journal*, 152, 6, 187.
- 村江達士, 1997. 隕石の有機化合物分析. *日本惑星科学会誌*, 6, 37-45.
- Mulkidjanian A. Y., Bychkov A. Y., Dibrova D. V., Galperin M. Y. and Koonin E. V., 2012. Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, E821-E830.
- Nakagawa Y., Nakazawa K. and Hayashi C., 1981. Growth and sedimentation of dust grains in the primordial solar nebula. *Icarus*, 45, 517-528.
- Nakamura E., Kobayashi K., Tanaka R., Kunihiro T., Kitagawa H., Potiszil C., Ota T., Sakaguchi C., Yamanaka M., Ratnayake D. M., Tripathi H., Kumar R., Avramescu M. -L., Tsuchida H., Yachi Y., Miura H., Abe M., Fukai R., Furuya S., Hatakeda K., Hayashi T., Hitomi Y., Kumagai K., Miyazaki A., Nakato A., Nishimura M., Okada T., Soejima H., Sugita S., Suzuki A., Usui T., Yada T., Yamamoto D., Yogata K., Yoshitake M., Arakawa M., Fujii A., Hayakawa M., Hirata N., Hirata N., Honda R., Honda C., Hosoda S., Iijima Y., Ikeda H., Ishiguro M., Ishihara Y., Iwata T., Kawahara K., Kikuchi S., Kitazato K., Matsumoto K., Matsuoka M., Michikami T., Mimasu Y., Miura A., Morota T., Nakazawa S., Namiki N., Noda H., Noguchi R., Ogawa N., Ogawa K., Okamoto C., Ono G., Ozaki M., Saiki T., Sakatani N., Sawada H., Senshu H., Shimaki Y., Shirai K., Takei Y., Takeuchi H., Tanaka S., Tatsumi E., Terui F., Tsukizaki R., Wada K., Yamada M., Yamada T., Yamamoto Y., Yano H., Yokota Y., Yoshihara K., Yoshikawa M., Yoshikawa K., Fujimoto M., Watanabe S. and Tsuda Y., 2022. On the origin and evolution of the asteroid Ryugu: a comprehensive geochemical perspective. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 98, 6, 227-282.
- Narusawa S. and Morimoto M., 2007. Optical SETI observations with the NAYUTA telescope. *Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs.*, 17, 1-3.
- NASA, 2015. Cassini Finds Global Ocean in Saturn's Moon Enceladus. <https://www.nasa.gov/press-release/cassini-finds-global-ocean-in-saturns-moon-enceladus> (2023.7.20 閲覧).
- NASA Exoplanet Archive, 2023. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html> (2023.6.26 閲覧).
- 西信之, 1984. 宇宙における生命起源分子の生成—星間分子—彗星—地球の点と線—. *科学*, 54, 419-428.
- Nuckley D. J., Jinks R. N., Battelle B. A., Herzog E. D., Kass L., Renninger G. H. and Chamberlain S. C., 1996. Retinal anatomy of a new species of bresiliid shrimp: From a hydrothermal vent field on the Mid-Atlantic ridge. *Biological Bulletin*, 190, 98-110.
- Oba Y., Koga T., Takano Y., Ogawa N. O., Ohkouchi N., Sasaki K., Sato H., Glavin D. P., Dworkin J. P., Naraoka H., Tachibana S., Yurimoto, H., Nakamura T., Noguchi T., Okazaki R., Yabuta H., Sakamoto K., Yada T., Nishimura M., Nakato A., Miyazaki A., Yogata K., Abe M., Okada T., Usui T., Yoshikawa M., Saiki T., Tanaka S., Terui F., Nakazawa S., Watanabe S., Tsuda Y. and Hayabusa2-initial-analysis SOM team, 2023. Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu. *Nature Communications*, 14, 1, 1292.
- Oberg K. I., Murray-Clay R. and Bergin E., 2011. The effects of snowlines on C/O in planetary atmospheres. *Astrophysical Journal Letters*, 743, L16.
- 小尾信彌・森暁雄, 1985. 地球外生命の謎. 大和書房, 東京, 235 p.
- Okuzumi S., Tanaka H., Kobayashi H. and Wada K., 2012. Rapid coagulation of porous dust aggregates outside the snow line: A pathway to successful planetesimal formation. *Astrophysical Journal*, 752, 106.
- 岡崎隆司・中村智樹, 2009. エンスタタイト・コンドライトの始原物質. *日本地球化学会年会要旨集 2009 年度日本地球化学会第 56 回年会講演要旨集*, 75-75.
- O'Neill C., Jellinek A. M. and Lenardic A., 2007. Conditions for the onset of plate tectonics on terrestrial planets and moons. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 261, 20-32.

- Orgel L. E., 1973. *The Origins of Life : Molecules and Natural Selection*, Chapman and Hall, 232 p.
- 大島泰郎, 1984. ET 探しは市民権を得たか. *科学*, 54, 386-387.
- 大島泰郎, 1995. *生命は熱水から始まった*. 東京化学同人, 東京, 141 p.
- Pierrehumbert R. and Gaidos E., 2011. Hydrogen Greenhouse Planets Beyond the Habitable Zone. *The Astrophysical Journal Letters*, 734, 1, L13.
- Pieters C. M, Goswami J. N., Clark R. N., Annadurai M., Boardman J., Buratti B., Combe J.-P., Dyar M. D., Green R., Head J. W., Hibbitts C., Hicks M., Isaacson P., Klima R., Kramer G., Kumar S., Livo E., Lundeen S., Malaret E., McCord T., Mustard, J. Nettles J., Petro N., Runyon, C. Staid M., Sunshine J., Taylor L. A., Tompkins S. and Varanasi P., 2009. Character and Spatial Distribution of OH/H₂O on the Surface of the Moon Seen by M3 on Chandrayaan-1. *Science*, 326, 568-572.
- Pizzarello S., 2004. Chemical evolution and meteorites : An update. *Orig. Life Evol. Bios.*, 34, 25-34.
- Pizzarello S. and Cronin J., 2000. Non-Racemic Amino Acids in the Murray and Murchison Meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 329-338.
- Pizzarello S., Cooper G. W. and Flynn G. J., 2006. The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles. In Lauretta D. S. and McSween, H. Y., Jr., eds., *Meteorites and the Early Solar System II*. Univ. of Arizona, USA, 628-651.
- Pollack J. B., Hubickyj O., Bodenheimer P., Lissauer J. J., Podolak M. and Greenzweig Y., 1996. Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas. *Icarus*, 124, 62-85.
- Popova O. P., Jenniskens, P. Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E. Khaibrakhmanov, S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovoyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J. Sanborn M. E.
- Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Ik Lee J., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein, I. A. Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T., (the Chelyabinsk Airburst Consortium), 2013. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, 342, 6162, 1069-1073.
- Porco C. C., Helfenstein P., Thomas P. C., Ingersoll A. P., Wisdom J., West R., Neukum G., Denk T., Wagner R., Roatsch T., Kieffer S., Turtle E., McEwen A., Johnson T. V., Rathbun J., Veverka J., Wilson D., Perry J., Spitale J., Brahic A., Burns J. A., DelGenio A. D., Dones L., Murray C. D. and Squyres S., 2006. Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus. *Science*, 311, 5766, 1393-1401.
- Potyszil C, Yamanaka M, Sakaguchi C, Ota T, Kitagawa H, Kunihiro T, Tanaka R, Kobayashi K, Nakamura E., 2023. Organic Matter in the Asteroid Ryugu: What We Know So Far. *Life*, 13, 7, 1448.
- Ramirez R. M. and Kaltenegger L., 2017. A volcanic hydrogen habitable zone. *The Astrophysical Journal Letters*, 837, 1, L4.
- Ramirez R. M. and Kaltenegger L., 2017. A volcanic hydrogen habitable zone. *The Astrophysical Journal Letters*, 837, 1, L4.
- 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, 295 p.
- 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.
- Rood, R. T. and Trefil J. S., 1981. *Are we alone? The possibility of extraterrestrial civilizations*. Charles Scribner's Sons, New York. 出口威夫訳, 1983. *さびしい宇宙人*. 地人書館, 東京, 283 p.

- Roth L., Saur J., Retherford K. D., Strobel D. F., Feldman P. D., McGrath M. A. and Nimmo F., 2013. Transient Water Vapor at Europa's South Pole. *Science*, 343, 6167, 171–174.
- Russell M. J., Hall A. J., Cairns-Smith A. G. and Braterman P. S., 1988. Submarine hot springs and the origin of life. *Nature*, 336, 117.
- Safranov V. S., 1969. Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets. Nauka, Moscow (translated by Israel Program for Scientific Translations, Keter Press, Jerusalem).
- Safranov V. S., 1972. Evolution of the Protoplanetary Cloud and the Formation of the Earth and the Planets. *Soviet Astronomy*, 16, 183.
- Sagan C., 1973. *Cosmic Connection: An Extraterrestrial Perspective*. Cambridge Press, 336 p.
- 佐々木晶, 2019. ガス雲の収縮と星・原始惑星京円盤の形成. 太陽・惑星系と地球. 共立出版, 82–89.
- Schaffer G. A. and Schaeffer O. A., 1977. ³⁹Ar–⁴⁰Ar ages of lunar rocks. *Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference 8th*, 2253–2300.
- Schaifers K. and Voigt H. H., eds., 1981. *Landolt–Bornstein Numerical Data in Science and Technology*. New Series, Group VI: Astrophysics and Space Research: Subvolume a: Methods, constants, solar system. Springer-Verlag, Berlin, XVIII + 305 p.
- Schulze-Makuch D. and Irwin L. N., 2008. *Life in the Universe: Expectations and Constraints (2ed.)*. Springer, 268 p.
- Schwarz K. R. and Bergin E. A., 2014. The effects of initial abundances on nitrogen in protoplanetary disks. *Astrophysical Journal*, 797, 113.
- Sephton M. A., 2002. Organic compounds in carbonaceous meteorites. *Nat. prod. rep.*, 19, 292–311.
- Sephton M. A. and Botta O., 2005. Recognizing life in the solar system: guidance from meteoritic organic matter. *Int. J. Astrobiol.*, 4, 269–276.
- Sheater C. K. and Papike J. J., 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274, 2121.
- 清水幹夫, 1985. 宇宙の生命. 共立出版, 東京, 152 p.
- 下山晃, 1987. 南極隕石の有機化合物. 国立極地研究所編, 南極の化学 6, 南極隕石. 古今書院, 東京, 243–275.
- 下山晃, 1995. 原始地球と化学進化. 月刊地球, 17, 440–447.
- 下山晃, 1997. 火星隕石の有機物と化学進化. 月刊地球, 19, 439–447.
- Simpson F., 2017. Bayesian evidence for the prevalence of waterworlds. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468, 3, 2803–2815.
- Sleep N. H. and Zahnle K., 1998. Refugia from asteroid impacts on early Mars and the early Earth. *Journal of Geophysical Research*, 103, 28529–28544.
- Smith B. A., Soderblom L. A., Banfield D., Barnet C., Basilevsky A. T., Beebe R. F., Bollinger K., Boyce J. M., Brahic A., Briggs G. A., Brown R. H., Chyba C., Collins S. A., Colvin T., Cook A. F., Crisp D., Croft S. K., Cruikshank D., Cuzzi J. N., Danielson G. E., Davies M. E., de Jong E., Dones L., Godfrey D., Goguen J., Grenier I., Haemmerle V. R., Hammel H., Hansen C. J., Helfenstein C. P., Howell C., Hunt G. E., Ingersoll A. P., Johnson T. V., Kargel J., Kirk R., Kuehn D. I., Limaye S., Masursky H., McEwen A., Morrison D., Owen T., Owen W., Pollack J. B., Porco C. C., Rages K., Rogers P., Rudy D., Sagan C., Schwartz J., Shoemaker E. M., Showalter M., Sicardy B., Simonelli D., Spencer J., Sromovsky L. A., Stoker C., Strom R. G., Suomi V. E., Synott S. P., Terrile R. J., Thomas P., Thompson W. R., Verbiscer A. and Veverka J., 1989. *Voyager 2 at Neptune: Imaging Science Results*. *Science*, 246, 4936, 1422–1449.
- Smith K. L., 1985. Deep-Sea hydrothermal vent mussels: Nutritional state and distribution at the Galapagos Rift. *Ecology*, 66, 1067–1080.
- Spurny P., Oberst J. and Heinlein D., 2003. Photographic observations of Neuschwanstein, a second meteorite from the orbit of the Pibram chondrite. *Nature*, 423, 6936, 151–153.
- Stern R. J., 2005. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time. *Geology*, 33, 7, 557–560.
- Sutherland J. D., 2016. The origin of life—Out of the blue. *Angewandte Chemie International Edition*, 55, 104–121.

- 鈴木俊彦, 1998. スーパーニッポニカ—日本大百科全書+国語大辞典 Windows 版. 小学館, CD-ROM 版.
- Tanaka H., Takeuchi T. and Ward W. R., 2002. Three-dimensional interaction between a planet and an isothermal gaseous disk. i. corotation and Lindblad torques and planet migration. *Astrophysical Journal*, 565, 1257.
- 田崎和江, 1996. 火星の生物痕跡?—バクテリアによる生体鉱物作用の立場から—. *惑星地質ニュース*, 8, 37-44.
- Thomas P. C., Tajeddine R., Tiscareno M. S., Burns J. A., Joseph J., Loredó T. J., Helfenstein P. and Porco C., 2016. Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean. *Icarus*, 264, 37-47.
- Thomas-Keprta K. L., McKay D. S., Wentworth S. J., Stevens T. O., Taunton A. E., Allen C. C., Coleman A., Gibson E. K. and Romanek C. S., 1998. Bacterial mineralization patterns in basaltic aquifers: Implications for possible life in martian meteorite ALH84001. *Geology*, 26, 1031-1034.
- Thomas-Keprta K. L., Bazylinksi D. A., Wentworth S. J., Vali H., Gibson E. K. and Romanek C. S., 2000. Elongated prismatic magnetite crystals in ALH84001 carbonate globules: Potential Martian magnetofossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 4049-4081.
- Thomas-Keprta K. L., Clemett S. J., Bazylinksi D. A., Kirschvink J. L., McKay D. S., Wentworth S. J., Vali H., Gibson E. K., McKay M. F. and Romanek C. S., 2001. Truncated hexa-octahedral magnetite crystals in ALH84001: Presumptive biosignatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98, 21642169.
- 土山明, 1997. Dr. D. McKay の講演要旨の和訳と総合解説. *日本惑星科学会誌*, 6, 21-28.
- Tsuchiyama A., Miyake A., Okuzumi S., Kitayama A., Kawano J., Uesugi K., Takeuchi A., Nakano T. and Zolensky M., 2021. Discovery of primitive CO₂-bearing fluid in an aqueously altered carbonaceous chondrite. *Science Advances*, 7, 17, eabg9707.
- 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, 7173, 1206-1209.
- University of California, 2023. SETI@home. <https://setiathome.ssl.berkeley.edu/> (2023.7.20 閲覧).
- 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.
- Van Schmus, W. R. and Wood J. A., 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, 747-765.
- Viennet J. C., Roskosz M., Nakamura T., Beck P., Baptiste B., Lavina B., Alp E. E., Hu M. Y., Zhao J., Gounelle M., Brunetto R., Yurimoto H., Noguchi T., Okazaki R., Yabuta H., Naraoka H., Sakamoto K., Tachibana, S. Yada, T., Nishimura M., Nakato A., Miyazaki A., Yogata K., Abe M., Okada T., Usui T., Yoshikawa M., Saiki T., Tanaka S., Terui F., Nakazawa S., Watanabe S. I. and Tsuda Y., 2023. Interaction between clay minerals and organics in asteroid Ryugu. *Geochemical Perspectives Letters*, 25, 8-12.
- Walsh K. J. and Morbidelli A., 2011. The effect of an early planetesimal-driven migration of the giant planets on terrestrial planet formation. *Astronomy Journal*, 714, 1155.
- 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.
- Wang Y. and Patel D. J., 1992. Guanine residues in d (T2AG3) and d (T2G4) form parallel-stranded potassium cation stabilized G-quadruplexes with anti glycosidic torsion angles in solution. *Biochemistry*, 31, 35, 8112-8119.
- Wang A. H. -J., Quigley G. J., Kolpak F. J., Crawford J. L., van Boon J. H., van der Marel G. and Rich, A., 1979. Molecular structure of a left-handed double helical DNA fragment at atomic resolution. *Nature*, 282, 5740, 680-686.
- Wanke H., 1981. Constitution of terrestrial planets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 303, 287-302.
- Wanke H. and Dreibus G., 1988. Chemical composition and accretion history of terrestrial planets. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A235, 545-557.
- Wasson J. T., 1988. The building stones of the planets. Mercury, University of Arizona Press, 622-650.

- Weidenschilling S. J., 1977. Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 180, 57-70.
- Weidenschilling S. J. and Cuzzi J. N., 1993. Formation of planetesimals in the solar nebula. In Levy E. H. and Lunine J. I., eds., *Protostars and Planets III*. University of Arizona Press, 1031-1060.
- Weidenschilling S. J. and Marzari F., 1996. Gravitational scattering as a possible origin for giant planets at small stellar distances. *Nature*, 384, 619-621.
- Weidenschilling S. J., Spaute D., Davis D. R., Marzari F. and Ohtsuki K., 1997. Accretional Evolution of a Planetesimal Swarm. *Icarus*, 128, 429-455.
- Weiss B. P., Kirschvink J. L., Baudenbacher F. J., Vali H., Peters N. T., Macdonald F. A. and Wikswo J. P., 2000. A low temperature transfer of ALH84001 from Mars to Earth. *Science*, 290, 791-795.
- Wetherill G. and Stewart G. R., 1989. Accumulation of a swarm of small planetesimals. *Icarus*, 77, 330-357.
- Wetherill G. W. and Stewart G. R., 1993. Formation of planetary embryos: effects of fragmentation, low relative velocity, and independent variation of eccentricity and inclination. *Icarus*, 106, 190-209.
- Wetherill G. W. and Champan C. R., 1988. Asteroids and meteorites. In Kerridge J. F. and Matthews M. S., eds., *Meteorites and the early solar system*. Univ. Arizona Press, Tucson, 35-67.
- Willbold M., Elliott T. and Moorbath S., 2011. The tungsten isotopic composition of the Earth's mantle before the terminal bombardment. *Nature*, 477, 191-195.
- Wolszczan A and Frail D. A., 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355, 6356, 145-147.
- 数田ひかる, 2008. 隕石有機物の構造・同位体分析による母天体変成過程の化学的解明. *Researches in organic geochemistry*, 23, 73-97.
- 山本哲生・香内晃, 2003. ダストの物質進化からみた惑星系形成. *天文月報*, 96, 4, 210-214.
- Yang J., Abbot D. S., Koll D. D. B., Hu Y. and Showman A. P., 2019. Ocean Dynamics and the Inner Edge of the Habitable Zone for Tidally Locked Terrestrial Planets. *Astrophysical Journal*, 871, 1, 29, 17.
- 八杉龍一・小関治男・古谷雅樹・日高敏隆編, 1998. 岩波生物学辞典 第4版 CD-ROM 版.
- 横尾広光, 1984. 文明の研究—地球外生命探査の論理構成—. *科学*, 54, 445-448.
- 横尾広光, 1991. 地球外文明の思想史. 恒星社厚生閣, 東京, 174 p.
- Yurimoto H., Abe K-I., Abe M., Ebihara M., Fujimura A., Hashiguchi M., Hashizume K., Ireland T. R., Itoh S., Katayama J., Kato C., Kawaguchi J., Kawasaki N., Kitajima F., Kobayashi S., Meike T., Mukai T., Nagao K., Nakamura T., Naraoka H., Noguchi T., Okazaki R., Park C., Sakamoto N., Seto Y., Takei M., Tsuchiyama A., Uesugi M., Wakaki S., Yada T., Yamamoto K., Yoshikawa M. and Zolensky, M. E., 2011. Oxygen isotopic compositions of asteroidal materials returned from Itokawa by the Hayabusa mission. *Science*, 333, 6046, 1116-1119.
- 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.
- Zsom A., Seager S. and De Wit J., 2013. Towards the Minimum Inner Edge Distance of the Habitable Zone. *The Astrophysical Journal*, 778, 2, 109.

Methodology of Approaches to the Origin of Life on Earth:
An Extraterrestrial Approach

KOIDE Yoshiyuki

Abstract

In this paper, as an approach to the birth of life, astronomy, planetary science, meteoritic studies, and simulation studies are summarized as studies on extra-terrestrial objects and materials. In astronomy, extrasolar planets are very diverse and our solar system is only one diversity. New models are now needed in the formation of planetary systems. In planetary science, the chemical conditions of the asteroid belt were revealed and the existence of land as a habitable trinity have is important for life's origin. In meteoritic studies, meteorites were given chemical and time constraints for the life's origin. It has been found that reductive, anhydrous E chondrite-like solid matter is the raw material of the Earth. In simulation studies, the tandem model could explain origin of the solar system and diversity of extrasolar planets. The Earth formed reductive, anhydrous materials and an ABEL bombardment providing volatiles from carbonaceous chondrites followed. The constraint conditions for the origin of Earth's life have been limited.

Keywords: definition of life, astronomy, planetary science, meteoritic studies, simulation studies, E chondrite, tandem model, reductive and anhydrous Earth, two-step model of the Earth's formation.

(こいで よしゆき 札幌学院大学人文学部教授 こども発達学科)