

化学進化と生命の起源の考え方

—— その変遷と理科教材としての可能性 ——

胸 組 虎 胤

(キーワード：化学進化, 生命の起源, 理科教材)

1. はじめに

1-1. 生命の起源に関する国際会議が日本でされること

2014年に生命の起源に関する国際会議が奈良で開催される。日本での開催は二度目であり、1978年に京都で最初の日本開催が実現した際には、当時のソビエト連邦からオパーリン (A. I. Oparin)、アメリカからはミラー (S.L. Miller)、フォックス (S. Fox)、ヨーロッパからもこの分野の研究者が集まった。

1978年当時、大学生であった著者は国際学会が日本で開催されている新聞報道を知り、心躍らせていた。それは次のことによる。高校時代にたまたま聞いていた通信高校講座で、生命の起源についての講義が流れてきたのである。詳しい内容は覚えていないが、講師は生命がこの地球で誕生した過程について、A. I. Oparin の『生命の起源』という著作に触れ、雷のような放電反応が起こって、生命の元の物質が生成した。その実証実験として若い学生のミラーが放電実験をしてアミノ酸を合成したことを話していた。それがなぜか非常に感動的で、強く印象に残っていた。また、著者が大学1年生の時、有機化学を担当された先生が、最初の授業で、自分が化学進化説に感動したと述べたことも影響している。著者はそのとき卒業研究はこの先生の元でやろうと深く心に決意した。希望通りその先生の研究室で研究をすることができたが、実際にはその先生は化学進化を研究していなかった。しかし、生物有機化学の基礎を学ぶことができた。大学院では、筑波大学の宇宙化学研究室を主宰する原田馨教授にお世話になった。原田教授は化学進化の大家であり、アポロ11号が月から持ち帰った石を日本で初めて分析して、アミノ酸が存在しないことを証明した。著者は原田教授のテーマに強く惹かれていたが、大学院での実際のテーマは立体化学の研究となった。大学学部、大学院で化学進化の研究はできなかったが、博士研究員終了後、筑波大学の物質の進化特別プロジェクト専従の助手として、化学進化の研究に携わることになった。

生命の起源学会が1978年に日本で開催されたことを知り、興味を持ち続け、研究をしている者にとっては、2014年の国際生命の起源学会が日本で開催されることにはただならず思い入れがある。しかも、現在著者が勤務する鳴門教育大学第二代学長を務めていた方が、生命の起源に関する日本の学会の創設者であることは実に感慨深い。

1-2. 鳴門教育大の第二代学長、今堀宏三先生

鳴門教育大学の第二代学長であった今堀宏三先生は、日本の生命の起源と進化学会の創設者の一人であった。大阪大学奉職中から、専門の生物学の研究の傍ら、大学での教育方法の研究もされていた。生命の起源と鳴門教育大学を結ぶ今堀先生は大阪出身で、広島文理科大学で学んだ後、金沢大学、大阪大学教養部で勤務され、福井県立大学看護短期大学(現在の福井県立大学)学長の後、鳴門教育大学の学長に就任された。

1-3. 生命の起源が高等学校学習指導要領で取り上げられること

高等学校学習指導要領において、明確に生命の起源に関する項目が取り上げられた¹⁾。生命の起源の問題は、生命の変遷と進化と関連して重要な点であり、学習指導要領で取り上げられたことを喜んでいるとともに、それが生物と生物基礎という二科目だけで取り上げられていることにやや不十分さを感じている。

本論文では、化学進化と生命の起源に関する考え方の変遷をまとめることから始め、それらが生物のみならず、化学、地学、物理学のすべての領域に関連する分野であることを具体的に論じたい。次に、化学進化という考え方を基礎に、生物、化学、地学、物理学の境界領域の研究の中で明らかにされてきた結果を紹介し、化学進化と生命の起源について考える意義と、実際の教材化の方向性について論じたい。

2. 化学進化と生命の起源についての考え方の変遷

2-1. ジュラシックパーク

1993年の夏、日本でも話題になったアメリカ映画に『ジュラシックパーク』（監督：スティーヴン・スピルバーグ、原作：マイケル・クライトン）がある。この映画には、遺伝子操作で現代に蘇った恐竜が登場する。恐竜の遺伝子（DNA）は、太古の昔にこの恐竜の血を吸った蚊の化石から抽出したものであった。この映画はバイオテクノロジーという言葉が頻繁に使われる現代に、あり得ると思わせる内容であった。しかし、蚊が吸った恐竜の血液から、なぜまた恐竜を作り出せるのかの詳しい説明はなかったような気がする。ただ、生命の元の物質DNAから恐竜という生命が生まれるということをごく最近で知っている人たちはなんとなく納得してしまったのであろう。あまり理詰めで考えてしまうと娯楽映画としての面白味がなくなってしまうが、恐竜に限らず生命がどの様に誕生するのか、そして、大昔生きていた生命が今は存在しないのに、その元の物質から現在に蘇るといふ不思議さを多くの人が感じたことであろう。生命と物質との境目が何であるのか、また、昔生きていた生命が減びて、今の生命が生まれたのはなぜなのか、さらに、最初の生命の誕生についての考え方を紹介したい。

2-2. シューメイカー・レビー第9彗星

1994年7月、シューメイカー・レビー第9彗星が木星に衝突したことがテレビや新聞で報じられた。このような出来事は千年に一度のたいへんめずらしい事であるとのことであった。このとき天体望遠鏡を買い込んで、わか天文ファンになった多くの人がいたようである。衝突前までは、小さい望遠鏡では観察は無理との専門家の意見が強かったが、いざ衝突してみると、小さい望遠鏡でも観察が可能であった。専門家はあまり宣伝して、実際に見えなかった場合に批判が集中するのを恐れたのであろう。

ところで、このような衝突は太陽系ができたばかりで、地球がやっと誕生したばかりの時代（今から46億年から40億年前のころ）には頻繁に起こったことだと考えられている。実はこのような彗星や小さい惑星のかけら（微惑星）が衝突した時に、それらをつくっている様々な物質が原始地球上にばらまかれ、また、衝突のときの莫大なエネルギーによってこれらの物質が反応して、生命を作る物質の元になったとも考えられている。

2-3. 蠅が湧く

最近あまり使わなくなったかもしれないが、「虫が湧く」とか「蠅が湧く」とかいう言い方がある。これは虫がどこにもなく、自然に発生して来るようにも聞こえる。しかし、実際そういうことがあるのであろうか。紀元前の昔に生きていた人々の中にはそのことを本当に信じていた人が数多くいたようである。当時の人々でさえ人間の子供、犬や猫の子供はその親から生まれて来ることは当然知っていたはずであるが、生きているものが発生する過程についての知識はあいまいであった。

また、紀元前後から近代にかけては、西洋ではキリスト教の影響によって、多くの人々は唯一絶対の神が生命を創造したと考えていた。つまり、神が個々別々の種類のものとして生命を作り出したと考えていたのであり、それぞれの生命は関係性がなく、それぞれ独立していた。この考えは中世からルネッサンスの時代まで続いた。

ルネッサンスの時代には、人々はキリスト教から離れて自由な発想でものごとを考えるようになった。そのなかから、自然をありのままに観察していこうとする自然科学が発展してきた。生命の発生についても、様々な研究がなされるようになった。昔から信じられてきた『自然発生説』を科学的に証明しようとする人々も現れた。

2-4. 生命の自然発生説

実は親以外から生命が生まれるということ（『自然発生説』）は、すでに古代ギリシャの著名な哲学者アリストテレスによって詳しく研究されており、17世紀頃まで信じられていた。一方、すでにこのころまでに生命についての知識が蓄積されてきており、自然発生説に疑問をもつ人々も現れてきた。17世紀の後半に、フランシス・レーディは、肉片を入れた二つの入れ物を用意し、一方には覆いをせずに放置し、もう一方には覆いをして、うじ（ハエの幼虫）の発生を観察した。その結果、肉片にうじが湧くのはハエが卵を産みつけたためであって、肉片から自然発生するためでないことを証明した。

しかし、目に見える生命についてではなく、微生物の自然発生を唱える人々がいた。フランスの化学者プーシェは、肉汁が腐る実験で微生物が自然に生まれることを証明しようとした。1858年に『人工空気および酸素ガス中において自然に発生する植物性および動物性原生動物について』という論文を出している。しかし、フランスの化学者パスツールによってその誤りが指摘されて、生物が自然発生しないということが証明された。

2-5. パスツールの実験

パスツールが行った実験は、白鳥の首のようなかっこうをしたフラスコの実験として有名である。パスツールは二つのフラスコを用意し、スープを入れて、次にそれらの首をS字形（白鳥の首）に引き伸ばした。これらのフラスコ内のスープを加熱沸騰させた。そのうち一方の首を切り取り、両者をしばらく放置したところ、首をきった方は腐敗したが、首を切断しなかった方は腐敗しなかった。これにより、パスツールは、空气中に微生命が塵に付着して多数存在していることを明らかにした。首を切断したフラスコにはこの塵に付着した微生物が入り込んで、スープが腐敗し、S字形の首がついたフラスコには微生物が入らず腐敗しなかった。この実験によって微生物が自然に発生することはないことが証明された。

2-6. 地球上の生命はなぜ様々なものがあるのか

腐敗が空气中に存在する微生物によって起こるということは証明されたが、ある生命は微生物のように単純なものや、人間などのように物事を考えたり、いろいろな道具をつくりだしたりできる生命が同時に存在するのはなぜであろう。キリスト教では神が各々の生命を別個につくったと考えている。そして、最後に神と同じ姿の人間をつくったといわれている。ところが、現在では一部の人たちを除いて現在の生命は原始的な一種類の生命から進化してできたことを、多くの人が信じている。生物進化といわれている。

2-7. 生物進化説とは

「生物が進化する」という考え方はフランスのラマルクやイギリスのエラスムス・ダーウィンによってすでに示されていた。このうち、ラマルクの考え方は、「いつも使っている生物の体の器官は代を重ねる毎に発達し、使わないでいる器官はしだいに衰えていく。」という説（用不用説とか獲得形質の遺伝）で知られている。彼はこの例として、キリンの首が長くなったのは木の高いところにある葉をキリンが食べるという習性が代々子孫に伝わっていったためであると説明している。また、ラマルクは「始原生命は無機物から発生し、それらは進化という必然的な傾向をもっている。」²⁾という説を唱えていたため、キリスト教が信じられていた当時の社会から無神論者とみなされ、彼の進化説は無視され、埋もれてしまった。

一方、エラスムス・ダーウィンの孫のチャールズ・ダーウィンは、生命が自然発生しないことがパスツールによって証明されたのとはほぼ同じ時代（1859年）に、『種の起源』という本を出版し、生物が「自然選択」により「淘汰」されて、環境の変化に適応した生物だけが生き残ることを主張した。チャールズ・ダーウィンは1831～1836年までイギリス海軍の軍艦ビーグル号に乗って世界一周をした。ダーウィンはこの航海の途中に南太平洋のガラパゴス諸島に立ち寄り、動植物や地質の調査を行い、生物が進化することを確信したと言われている。

ダーウィンはガラパゴス諸島に住んでいるフィンチという鳥のくちばしが島ごとに異なっていることに注目し、島それぞれの環境によってフィンチの餌の取り方が異なるためだと考えた。つまり、島それぞれの環境に適応したフィンチだけがその島に生き残ったためだと考えた。これは生命が何代も経る毎に、徐々に複雑な機能を備えて「進化」してきたことを意味している。

ダーウィンは以上のように進化ということを言い出したが、それは多種多様な生物が生まれることを説明するために現在の生物が共通の祖先からなるという考え方を思い付いたことに始まる。これは共通起源説といわれるもので、彼が書いた『種の起源』はその解説書だった。彼は現在の生命が共通の祖先から生まれたことを樹木の枝が伸びて広がる図（系統樹）³⁾で示した。進化が起こる原因については「自然選択」による「淘汰」、すなわち、「自然淘汰」を考えていた。

2-8. 自然淘汰

自然淘汰とは一定の自然環境の中あるいは自然環境の変化の中で、生物がその環境に適応したものが生き残るということである。自然淘汰は具体的には種と種の間での個体の生存率と繁殖率の違いに現れてくる。一代で比較すると、個体の生存率が高い方が時間とともに個体数が増加すると考えられる。また、繁殖率が高い方が、多くの子供を残すので、代を経る毎に個体数が多くなる。これらのことが結果的に自然に適応することになる。ダーウィンは餌をうまく取ることができるくちばし（一つの形質）をもったフィンチ⁴⁾は生き残る能力が高く、生存率が高いと考えた。したがって、生存率が高く、繁殖力も高い種が結果的に自然淘汰されずに生き残る。

2-9. メンデルの法則

ダーウィンが『種の起源』を発表したころ、現在のチェコにあるブルノーという町（昔、モラビアという国の首都であった）の聖職者メンデル（1822-1884）がえんどうまめの栽培実験をくりかえしていた。メンデルは様々な形質（異なった形や色）のエンドウ豆をいろいろとかけあわせ、次の世代のエンドウ豆の形質を調べた。

その結果、法則性があることに気付いた。支配の法則（あるいは優性の法則）、分離の法則、独立の法則、純

粹の法則次の4つの法則からなっている。支配の法則はえんどう豆をかけあわせるとき、子供（雑種第一代という）には両親の形質のうち優性な形質のみがあらわれる。分離の法則は雑種第一代目を自家受粉（同じ花の雌しべに同じ花の花粉をつける）すると、その子供の代（雑種代二代）では、たとえば種子の形について丸型としわ型という異なる形質が現れる子供の数（雑種代二代目）の比率は、3対1になり、多い方を優性、少ない方を劣性という。また、雑種代二代目について2組以上の相反する形質について見た場合の形質の現れ方を示したのが独立の法則である。たとえば、丸くて黄色いえんどう豆としわの入った緑色えんどう豆からは、丸黄色、丸緑、しわ黄色、しわ緑の形質をもったえんどう豆が9：3：3：1の比率で現れる。また、純粹の法則は雑種を作ることによって遺伝子は互いに汚染されることなく、純粹性をたもつというものである。

彼はこの遺伝する形質の現れ方が一定の数字の比率になるという法則性の原因が、ある粒子が結合したり離れたりすることの法則性であると考えた。そして、その粒子をエレメント（遺伝子）と名付けた。遺伝の原因が遺伝子という粒子が結合したり離れたりするとする考え方は、彼が若いときにオーストリアのウィーンに留学し、化学を学んでいたせいだと指摘する人もいる。

2-10. ダーウィンも遺伝子のような粒子を考えていた

ダーウィンは形質毎にジェミュールという粒子があり、この粒子に変化が起こればこれが子孫に伝えられると考えていた。しかし、彼はメンデルが見つけた遺伝の法則については知らなかったか、あるいはよく理解していなかったようである。後に、ダーウィンの進化論とメンデルの遺伝の法則を両方使って、生物の進化を説明しようとする総合進化説という考え方がでてきた。生物の進化についての説明はこの考え方でできるかもしれないが、最初の生命はどのようなものだったのだろう。この生物進化が起これる理由は遺伝子の本体であるDNAが変化することが原因であった。

2-11. 最初の生命はどこから？

生物の形質は親に似ること、形質が遺伝していくことはすでに述べた。この形質がそのまま代々伝わっていけば、生命の種は変化せず進化は起これない。しかし、生命は進化し形質を段々と変化させてきた。では、最初の生命はどのようなものだったのであろう。もし、最初の生命が生命以外のものから生まれたとすると、これはパスツールが証明した「生命は自然発生しない」という結論を否定する説のようにもとれる。ところで、ダーウィンは、フーカーという友人への手紙の中で、「... 生物がはじめて発生したときの条件は、かつてあったように、いまも存在しているといわれています。もしも（それはなんと大きなもしもでしょうか）、何か小さな暖かい水たまりがあり、そこにアンモニア、リン酸塩、光、熱、電気などあらゆるものがあれば、タンパク質がつくられ、更に複雑な変化を遂げたでしょうが、(略)⁹⁾と述べているように、最初の生命の自然発生を信じていた。

2-12. 自然発生否定と生命進化の矛盾

パスツールによる自然発生の否定とダーウィンによる生物進化説は突き詰めて考えると矛盾しているように見える。生命は実際どの様に生まれたのかという疑問が生じる。この問題に対する答えは二つ考えられる。一つは、生命が地球以外の場所で誕生し、それが地球上に降り注いで来て、地球上で進化したとする考え方である。もう一つは、地球上で生命が誕生した（最初で最後の自然発生）という考え方である。

2-13. 生命の種は隕石に乗ってきたのか？

19世紀のはじめから考えられていたが、リヒターは1865年に生命の種が天体のかけらに載って、隕石として地球上に降り注いできたという考えを発表した。この考えが生まれた背景には、前年の1864年にフランスのオルゲイユ村に大きな隕石が落ちたことが影響していると言われている⁹⁾。また、20世紀はじめには、スウェーデンの化学者アレニウスは生命の胞子（胚種）が宇宙線に乗って地球に降り注いできたと考えていた。そして、これが地球上での生命の起源につながったというものである。この考え方はパンスペルミア説（胚種広布説）と呼ばれている。

2-14. 新しい地球外起源説

また、1970年代にはオーゲルとクリックという科学者は、生命が地球上で自然発生する確率は非常に低く可能性が少ない一方、地球以外の星に住んでいる宇宙人が微生命を積んだ飛行物体を地球上に送り込んだ可能性があるという考えを述べている。そして、その考え方を指令胚種広布説と呼ぶ。最近、ホイットとその弟子のウィックラマニングは生命が彗星によって運ばれてきたという説を出している。彼らは、彗星によって宇宙からウイルスのような下等な生命が運ばれてきて、それが現在地球に生息する生命の祖先となったと考えている。また、ウイルスは現在も彗星とともに地球に運ばれていると言っている。その証拠には、彗星が地球に接近した年には、インフルエンザが大流行すると言う。しかし、これに対して、シャピロというアメリカの学者は、根拠のないこと

だと反論している。現在では、生命が地球外で発生したという根拠は見つかっていないが、生命の元の物質が彗星や小さな惑星で生み出された可能性が真剣に議論されるようになっていく。

2-15. 生命は地球上で誕生したのか？

生命が地球の外で生まれて地球上に落ちてきたという考え方がある一方、生命が地球で発生したという考え方がある。ソ連（現在のロシア）の科学者オパーリンが1924年に『生命の起源』という本で唱えた「化学進化説」によれば、無機物から進化して有機物となりそれがやがて生命になった。この考え方は後に広く受け入れられるようになった。

2-16. オパーリンの仮説―「化学進化説」

ダーウィンの生命進化説に従えば、最初の生命は最も単純な生命であったことになる。しかし、その生命はどのようにして誕生したのだろうか。まず、生命誕生前、宇宙で最初に生成した元素は水素（H）と考えられている。この水素は最も簡単な構造をした元素で、通常は水素原子が2個結合して水素分子（H₂）を作っている。さらに、ヘリウム（He）、炭素（C）、酸素（O）、窒素（N）、リン（P）、硫黄（S）、そして、ナトリウム（Na）、カリウム（K）、カルシウム（Ca）などの金属元素、やがては、鉄（Fe）などの重い元素が生成したと考えられている。そのうち、生命を構成している元素はおもにC、H、N、Oである。オパーリンの化学進化説によれば、生体物質の原料は地球上の物質、特に大気であった。第1段階ではメタン（CH₄）、アルデヒド（H₂CO）、アンモニア（NH₃）などという単純な有機化合物が生成した。第2段階では、アミノ酸、単糖、核酸塩基などが生成した。これらは、生命を構成している物質の構成単位となっている物質である。第3段階ではこれらのアミノ酸、核酸塩基、単糖が結合した、高分子化合物であるタンパク質、核酸、多糖類が生成した。第4段階では、外界から仕切りができて、代謝をする複合物質系が生成した。これが原始細胞である。ここまでの化学進化であり、その後の生物進化とは区別されている。

2-17. 高分子物質が反応し集合した

タンパク質、核酸、多糖類は分子の大きさ、質量が大きい（分子量が10,000Da以上）ということで高分子物質といわれている。高分子物質に対して、小さい、分子あたりの質量が小さい物質は低分子物質と呼ばれている。高分子物質は低分子物質にはない複雑な働きや構造の変化をする。周りの状況、環境によって形や働きが大きく変わる。原始の海に蓄積してきたタンパク質同士や核酸同士あるいはタンパク質と核酸は脂質や無機物の介在によって互いにより集まって集合体を形成したと考えられる。

2-18. 細胞の誕生

最後に、大きなこれらの高分子は集合して、役割を分担して、外界との仕切りをつくり、物質を取り入れたり、排出したりし、また、この段階でエネルギーを取り入れるようになったと考えられている。これが、オパーリンのいう原始細胞の誕生である。しかし、どこで生命が生まれたかを調べるには、生命の定義がしっかりしていなければならない。

2-19. 生命の定義

生命の定義はいろいろなレベルでなされている。そのうち、最初の生命、すなわち、原始細胞ということに関連して、細胞のレベルでの定義について考えてみよう。中村運博士は、細胞レベルの生命を次のように定義している。(1)「自身を保存するためのしくみをもっていること。」、(2)「自己と同じ子を生む。すなわち、自身で複製できること。」、(3)「時代とともに進化すること。」。また、生命とは、上の3つの属性（性質）を合わせもつと定義している。そして、このような属性をもつ物質系を生命（生命体）と呼んでいる。無生命という物質系はそのような属性を決してもっていない⁷⁾。ここに述べた3つの条件を満たすものだけが、生命（生命体）というものにふさわしい。したがって、これらの条件を満たす物質系ができたときに初めて、生命ができたと言える。オパーリンの説のように進化していった物質系が以上のような生命という属性を備えたときに、生命（生命体）が始まったといえる。しかし、オパーリンの考え方が発表された当時では、これはまだまったくの仮説の段階にあり、証明されたわけではなかった。次に、このオパーリンの考え方を証明していく研究について述べる。

2-20. 化学進化説の広まり

今まで、オパーリンが考えた『化学進化』という仮説について述べてきた。1924年に初めて出された彼のこの学説は1936年に『地球上における生命の起源』という本に書き改められ、さらにこれは1938年に英訳された。そして、最初の日本語訳も昭和16年（1941年）に出版された。この出版によって、『化学進化』という考え方は1940年代には世界中の科学者たちにも知られるようになったと考えられる。しかし、当時はこの仮説を実証するためにどの様な観察をし、実験を行ったりしたらよいか多くの研究者はわからなかったであろう。遠い過去の世界で

ある原始地球の状況を実際に見る方法がわからなかった。一方、現代の科学は、原始の地球の姿、化学進化の可能性について調べることができるようになってきている。つまり、地球外の物質を調べたり、地球外の様子を見たりすることで、原始の地球当時のことを推測できるようになってきている。また、化学反応についての理解は当時に比べたら比較にならないぐらい進んでいる。さらには、生命体そのものの仕組みや細胞の働きなどについての知識はすさまじい速さで増大している。

3. 化学進化という生命の起源の説明とその実証

ここでは生命の起源を説明する仮説として提示された化学進化説に関連して、これまで研究され、実証されてきた結果を含めて論じたい。

3-1. 地球の誕生は46億年前

地球が誕生したのはいまから約46億年前といわれている。隕石や地球その他の惑星は原始太陽を中心とする円盤状の原始太陽系星雲から、ガスや塵（微粒子）を元に同じ年代に生まれたと考えられている。また、その原料はそれらの天体に共通の物質から出発していると考えられている。隕石がその原料物質と同じ古さの天体であることはすでに述べた。つまり、隕石の古さがそのまま、地球の古さと考えていいということになる。この隕石中に含まれているアルゴン40 (^{40}Ar) という元素の比率を求めることで年代を測定できる。原始太陽系で生成した放射性元素であるカリウム40 (^{40}K) の89%は β 崩壊してカルシウム40に、残り11%は電子捕獲によりアルゴン40に変化するが、カリウム40が崩壊する半減期は 12.77×10^9 年⁸⁾である。地球が生成した当時にはアルゴン40はほとんど存在しなかった（太陽のアルゴン40は0.026%）に対し、年とともに地殻中のカリウム40の崩壊によってアルゴン40が生成して、現在ではアルゴン40の同位体比は99.6035%⁹⁾である。そこで、地球外の天体に封入されているアルゴン40とカリウム40の比率を求めれば、現在が太陽系生成から何年達っているかわかる。この方法をカリウム-アルゴン法といい、隕石を試料にして、カリウム-アルゴン法で地球の年齢を求めることができる。

3-2. 惑星はどのように生まれたか

太陽系の中で、惑星がどのように生まれたかについて、大きく分けて2つの考え方があり、一つは惑星が高い温度で生成したという「高温凝集説」ともう一つは低い温度で凝集して生まれたとする「低温凝集説」がある。高い温度で惑星が生成すると、鉄や珪素などが高温で凝集することで惑星の核ができたと考えられている。この場合、高温での化学平衡を考えると、惑星の大気は窒素と水と炭酸ガスになることが計算される。しかし、低温凝集説によると、鉄やその他の金属イオンが低温ガスとともに凝縮することになるので、アンモニアと水とメタンが惑星誕生初期の大気となることが計算される。このことは、地球でどのような生命が生まれるかを決定する重要な初期条件になる。一番太陽に近いところから、水星、金星、地球、火星、小惑星帯、木星、土星、天王星、海王星、冥王星（惑星から除外された）の順であるが、水星から、小惑星までの惑星は皆、重い核できていることがわかっている。これらは地球型惑星と呼ばれており、高温で凝集することによって生成したと考えられている。しかし、外側の惑星の大気はアンモニア、メタンなどからなり、低温で凝縮したと考えられている。

3-3. 地球の大気と水は地球内部から吹き出した

惑星のうち現在の地球では鉄のコア（中心）の回りにマグマが囲み、その外側を地殻が取り囲み、海が囲んでいるが、最初からこのようであったわけではない。先に述べたように、地球などの惑星の元の原料はガスや塵（ $0.1 - 0.5 \times 10^{-5}\text{m}$ の微粒子）であった。このうち地球はこれらの粒子が高温で凝集することによって生成したと考えられている。数十年前まではすべての惑星は低温で凝集して生成したために、メタン、アンモニア、水からできて原始大気を覆っていたという考えが支配的であったが、実はそうでなく、窒素、炭酸ガス、水が地球を覆っていたという考え方が支配的になってきた。前者の大気は還元的大気、後者の大気は非還元的大気と言われている。この原始大気が発生した機構は、まず、太陽系発生初期に、太陽の成分の主要物質である水素とヘリウムがまだはっきりした形ができていない地球を覆っていた。この一千万年後に、太陽の活動が盛んになり、強い太陽からの放射線が未完成の地球に襲いかかった。これによって、初期の地球の回りを覆っていた最初の大気（1次大気）が吹き払われてしまった。次に、微粒子が集合してできた微惑星が衝突して地球が高い温度になり、このとき、微粒子や微惑星に含まれていた窒素、炭酸ガス、水が地球内部から吹き出した。これが2次大気と呼ばれている。このときも、微惑星の衝突は続き、原始地球の温度は上がっていった。だいたい、 $1500 - 2000^\circ\text{C}$ に達したと考えられている。

3-4. 高温の地球が冷めて陸と海ができた

時間が経つにつれて、衝突する微惑星が段々少なくなって来た。地球の温度が段々と低下して、原始地球大気の温度が水三重点（367℃）に達したとき、突然雨が降り始めて、海が瞬く間にできた。水が蒸発することが起こり、地球の温度はさらに低下し、陸地ができた。実は、このときの証拠が残っている。この陸地ができたときに、初めて岩石が生まれたと考えられ、約43億年前といわれている。だいたい、これと同じくらい古い岩石がカナダで見つかっている。この岩石は、カナダ東部ケベック州にあるヌブアギック緑色岩¹⁰⁾と呼ばれている。この岩石の年代は42.8億年前ということが確かめられている。これは現在見つかっている岩石のうちでは、最も古いもののひとつである。したがって、43億年よりも昔に岩石が固まっており、陸地があったことが推定できる。

3-5. 地球上の大気は今と違って炭酸ガス、窒素、水だった

先ほど、地球が高温で凝集してできたために、中心に比重が大きい元素が集まり、その回りに比重の小さい元素があつまり、気体成分は炭酸ガス、窒素、水が主成分となったということを述べた。しかし、1950年代には低温凝縮説が有力だったために、原始地球の大気がメタン、アンモニア、水であると考えられていた。その仮定をもとにして、ミラーやユーリーは原始地球の模擬実験を行なった。彼らの実験は仮定の段階で間違っていた。しかし、彼らが原始地球ということ意識した模擬実験を行ったことは、大きな業績である。この後、原始地球の条件を再現して、実験を行う研究が数多く行われるようになり、生命の物質の生成過程を明らかにしようとする試みが人々の興味をかき立てた。

3-6. 地球上には様々なエネルギー源があった

ところで、生命の物質が生成するためには、その元の物質とともに、反応を促進するエネルギーが必要だった。原始地球上には、様々なエネルギー源が存在していたと考えられている。次に主なものを示す。(1) 放電エネルギー、(2) 熱エネルギー、(3) 光エネルギー、(4) 衝撃波のエネルギー、(5) 放射線などが重要だったと考えられている。まず、(1) 放電エネルギーであるが、原始地球上では温度が高いために、水が上昇気流によって上空にあがり、雲をつくる。火山の噴火によって速い速度で火山灰や水蒸気を含んだ上昇気流が巻起り、雷が発生したことも考えられる。(2) 熱エネルギーは陸上の火山、海底火山、そして海底に顔を出したマグマの割れ目である熱水噴出孔から供給されたと考えられている。(3) 光エネルギーであるが、原始地球では地球の回りに現在存在するオゾン層がなかったために、太陽の光が今より相当強く注いでいたと考えられている。(4) 衝撃波であるが、原始地球では巨大な隕石、微惑星、彗星が衝突して、その衝突のエネルギーは莫大なものであったと考えられている。ある計算によると、直径10kmの隕石が地球に衝突したとすると、最大2万度の高温が発生すると言う。初めに述べたシュウメイカー・レビー第9彗星の木星への衝突がすさまじいものであったということはわかるであろう。(5) 放射線だが、太古の太陽系に限らず宇宙空間のあらゆるところが宇宙線という放射線で覆われている。原始地球では太陽からの放射線、その他の天体からの放射線が現在の地球よりも一層強く注いでいたといわれている。当時の地球にはオゾン層が存在せず、地球上に宇宙からの放射線が現在よりも強く降り注いでいたと考えられている。放射線は一定のエネルギーあたり最も効率よく、化学反応を引き起こすと考えられている。

3-7. 隕石

地球上には現在も様々な天体が降ってきている。例えば、彗星から降り注がれる流星雨、また、隕石などがある。これらの天体は太陽系や地球が生成したときにも存在し、太陽、太陽系の惑星、小惑星などの天体ができるための原料物質を供給していたと考えられている。地球もこれらの小さい天体が衝突し、寄り集まって互いに熔け合い、できあがったと考えられている。したがって、現在観察される彗星や地球に落下してきた隕石の中には太陽系が始まった初期から地球外をさまよい続けていたものがあり、重要な情報を提供してくれる。

隕石は鉄、ニッケルなどの金属、ケイ酸塩などからできていることわかっており、金属とケイ酸塩の比率から鉄隕石、石鉄隕石、石質隕石に分類される。石質隕石はさらにコンドライトとエイコンドライトに分けられる。コンドライトは直径数ミリメートルの小さい球状粒子（コンドリュール）から成っているためこの名前がつけられた。球状粒子は地球上の鉱物には見られないもので、隕石特有のものである。落下を目撃されている隕石をいろいろ調べてみると、コンドライトが圧倒的に多い。また、コンドライトを構成する不揮発性成分（ケイ素、マグネシウム、鉄、アルミニウム）の組成は太陽大気と一致している。

コンドライトは主に普通コンドライトと炭素質コンドライトに分類され、炭素質コンドライトは熱変性を受けておらず、地球創世当時の姿をとどめている隕石であると考えられる。この炭素質コンドライトを調べることで、原始の地球の姿を調べるための現実の証拠が得られる。南極ではこの原始地球の原料がしばしば発見される。南

極には山脈があり、南極の中央部に落ちた隕石は一時雪の中に埋もれまるが、氷河に流されて長い時間が経つと山脈の麓に出てくる。日本の南極越冬隊、1989年の第31次、1998年の第41次には隕石調査隊が組織されて、多くの隕石が採集された。

また、隕石の中にはアランヒルズ84001 (ALH84001) のように、火星に小惑星が衝突した際に宇宙空間に飛び出し、地球上に隕石として降ってきた、いわゆる火星隕石も知られている。この隕石中には生命体の痕跡と思われる痕跡があると発表された¹¹⁾。

3-8. 生命体の化石

最初の生命体を探るのは非常に困難であるが、昔の生命体の痕跡を何とか探し出す方向からの研究もなされている。一般に、古い時代の生命体の痕跡は古い地層にあると考えられている。生命体の痕跡は、化石として現れてきます。地球上には地球の地殻変動によって、古い時代の地層が露出しているところがあり、そのような場所は化石の発掘場所として有用である。発掘された生命体の痕跡とそこの地層にある物質の年代、形態的比較を行うことによって、生命体の系統樹ができてきました。このような学問を古生物学という。

3-9. 化学化石

化石は古代の生命体または生命体が生息していた形跡が地層に埋もれたものである。一方、化学化石は生命体を形づくっていた有機化合物やその生命活動によって生じた有機化合物が現在まで残っていたものである。石油や石炭に含まれている物質もこの化学化石に当たる。1954年にアーベルソン (Abelson) が魚の化石からアミノ酸を検出し¹²⁾、その後化石中の有機物についての研究がさかんに行われるようになった。化石に含まれる様々な化合物も時間が経つにつれて反応し、分解したり、少しずつ変化したりする。また、その化石が埋まっていた環境によってその変化の速さが変わる。そこで、地層と地層の間の有機物の組成を調べることで、時代毎の環境変化を推測することができると考えられる。このように各地層に埋まっている化学化石中の有機物を分析し、色々な考察をする学問が有機地球化学である。

3-10. ミラーの放電実験 (Miller Discharge)

ところで、最近の地球や宇宙の化学的研究によって、原始地球に関する様々なことが分かってきた。原始地球の大気の組成、海の様子など様々なことが明かとなり、特に、原始大気の主成分は炭酸ガス (CO_2)、窒素 (N_2)、水 (H_2O) であったことが有力視されている。これは酸素が含まれていないということで非還元的大気と言われている。今から60年ほど前には現在信じられているのとは異なった原始大気が正しいと考えられていた。その成分はメタン (CH_4)、アンモニア (NH_3)、水 (H_2O) であり、還元的大気の大気を実験室のフラスコの中に再現して、原始地球で得られると考えられる放電のエネルギーによって化学反応を行わせた。このような実験は模擬実験とかシミュレーション実験と呼ばれている。この種類の実験の初期のものとしては、1953年、当時まだ23才でシカゴ大学の大学院生だったミラーによって行われた放電実験 (ミラー放電、ミラーの実験) が有名である¹³⁾。オパーリンと彼の指導教官であったユーリー (H. Urey) が指導しており、当時正しいと考えられていた原始地球の大気 (還元的大気: メタン、アンモニア、水) と同じ組成の混合気体をガラス容器中に封入し、火花放電を行った。

ガラスの反応容器の下に溜まった水溶液は原始の海洋を示し、気体は原始大気、火花は原始地球で頻繁に起こっていたと考えられる落雷などの放電現象を意味していた。約1週間の反応の後、下に溜まった溶液を分析してみると、アミノ酸や有機酸など生命の構成成分と同じ構造の物質が見つかった。

これは、まさにオパーリンの唱えた化学進化説を証明する実験であると考えられた。このように化学進化のことを考えて行われた実験はこれが初めてではなかったが、アミノ酸が検出された実験としては最初のものであった。

3-11. ガリソンとカルビンの実験

1951年にガリソンとカルビンが高エネルギーの α -粒子 (ヘリウム原子核) を炭酸ガスの水溶液に照射して、ホルムアルデヒドやギ酸などを得たが、この実験ではアミノ酸が得られなかったのであまり省みられなかった¹⁴⁾。

3-12. 原田の放電実験 (Harada Discharge)

ミラーの放電は原始地球の大気中における放電であったため、放電による電子を含む荷電粒子が移動し、実際に反応が進行するのは気相であり、当然そこに存在する原子の密度の低い上に、分解反応が進行しやすいことから反応効率が悪い。投入したエネルギー100eV当たりの生成物のモル数 (G-value) は、グリシンというアミノ酸では、 $G(\text{Gly}) = 0.000001$ ¹⁵⁾である。しかも、この反応は2段階の反応であり、気相での反応物が水圏に蓄積

して初めて成り立つ反応である。これに対して、原田らは水溶液中への放電¹⁶⁾を、原子水圏への落雷のモデルとして提示した。これをミラーの放電実験 (Miller Discharge) に対して、原田の放電実験 (Harada Discharge) と呼ぶことにする。水中への放電では、水が水素ラジカルと水酸ラジカルに解離することが引き金となって様々な反応が進行する。カルボン酸とアンモニアからのアミノ酸生成、カルボン酸同士の炭素-炭素結合生成、カルボン酸水溶液中に分子上窒素を吹き込みながら放電を行うとアミノ酸が生成する。また、水溶液中におけるペプチド生成に重要と思われるアスパラギンというアミノ酸を生成することが明らかとなっている。これに関連して、水溶液に水素や窒素のプラズマジェットを吹き込むことでアミノ酸を含む様々な化合物が得られ、KrF エキシマレーザーを水溶液に照射することでもアミノ酸が得られている。以上の点から、原田の放電実験は忘れてはならない重要な実験であるとともに、化学進化に関連してさらに研究すべき内容を多く含んでいる。

3-13. アンモニア, アルデヒド, シアン化水素, その他の単純な有機化合物

原始地球上では様々なエネルギー源が存在していたと考えられており、これらのエネルギー源によって、原始大気を原料として様々な有機化合物が生成した。このうち最も簡単な化合物がまず生成した。それらのうち、アンモニア、ホルムアルデヒド、シアン化水素は重要であったと考えられている。これらの単純な化合物がなぜ最初にできたと考えられている理由は、これらの化合物がアミノ酸、単糖、核酸塩基という物質の原料だったからであること、そして、ミラーの実験における生成物であったことである。また、この3つの物質はそれぞれ、タンパク質、多糖類、核酸という生命にとって非常に重要な生体高分子といわれる物質の基本単位になっている。しかし、ミラーの実験の根拠になった還元的な大気は正しくなく、実は非還元的な大気と呼ばれる、炭酸ガス (CO₂)、窒素 (N₂)、水 (H₂O) であったことが主成分であったと考えられている。この条件でミラー放電を行ってもアミノ酸はあまり得られなかった。気体成分に還元性がなかったため、炭素を還元することができなかった。しかし、水溶液に直接放電する原田放電では、大気が非還元的であっても水から水素ラジカルという還元剤を生じさせることができ、有機化合物の還元反応を進行させることができる。これは化学進化の研究において考慮すべき点である。

3-14. アミノ酸, 核酸塩基, 糖ができた

アミノ酸はミラーの実験でも見出され、また、隕石中에서도見いだされている物質であり、原始地球でも比較的容易に形成されたと考えられているが、ミラーらが仮定した原始大気は還元的なものであったので、彼らの実験は成功した。そこで最初の原始大気の仮定を修正して、原始大気を窒素、二酸化炭素、水としてミラーと同様な実験が行われましたが、アミノ酸は還元的な大気を用いたときほど生成してこなかった。何等かの還元的条件がアミノ酸生成にはどうしても必要であった。そこで、一酸化炭素や水素をこの模擬大気に混ぜて、同様な実験を行うと、還元的な大気を用いたときと同程度の量のアミノ酸が得られることが、近年のミラーらの実験で確かめられた。一酸化炭素は還元性があり、アミノ酸の生成に役立ったであろう。ところで、実はこの反応にはもう一つの成分である水が重要な役割を果たしていたと考えられる。水の分子は (H-O-H) という構造をしているが、これは紫外線、放射線などの働きで水素ラジカル (H) と水酸ラジカル (OH) に解離して、それぞれ還元剤、酸化剤として作用することが知られている。つまり、水は紫外線や放射線の働きによって、還元剤と酸化剤を発生させることができる。気体の水ではなく、液体の水の中で発生した水素ラジカル (H) と水酸ラジカル (OH) も有機物の生成に活躍した可能性がある。非還元的な大気の下でも水が存在すれば、還元的な反応が起こったにちがいない。アミノ酸は炭素が還元された部分と酸化された部分を持ち、この物質の生成に水は適していたと考えられる。

そして、シアン化水素という物質は炭素と窒素が一つずつ結合してそれに水素が結合した構造をしている。これは炭酸ガスと窒素から酸素がとれれば、シアン化水素ができる。これがいくつか結合すると、核酸の部品である核酸塩基ができる。さらに、ホルムアルデヒドという物質があるが、これは、炭酸ガスと水素が結合した構造をしている。ホルムアルデヒドが4つ、5つ、6つと結合して水がとれた構造は単糖類といわれている。

3-15. アミノ酸はタンパク質の部品

アミノ酸はアミノ基、カルボキシル基、側鎖と呼ばれる部品が一つの炭素に結合してできている。このアミノ酸一つのアミノ基ともう一つのアミノ酸のカルボキシル基との間から水が一つとれるとペプチド結合という結合ができている。アミノ酸が70個から100個以上このペプチド結合でつながったものがタンパク質である。この構造はペプチド結合が多数あることから、ポリペプチドの構造をもつという。ここで、現在の生命を構成するタンパク質中では、各アミノ酸の側鎖の部分は20種類がある。この20種類のアミノ酸の配列順序の違いがタンパク質の性質を決めている。

3-16. 核酸の部品は糖, リン酸, 塩基からなるヌクレオチド

核酸には, RNA (リボ核酸) と DNA デオキシリボ核酸) があり, とともにヌクレオチドという構成単位からできている。さらに, そのヌクレオチドは単糖, 核酸塩基, リン酸という3つの部品からなっている。これらはそれぞれの糖とリン酸の部分が結合して, 大きな分子をつくっている。

3-17. 多糖の部品は炭素, 水素, 酸素からなる単糖

ヌクレオチドの構成成分である単糖には2種類あるが, それ以外にも様々なものがある。そのなかでとくに重要なものにブドウ糖がある。これが環化したものがたくさんつながったものがデンプンやセルロースである。

3-18. 生命体の部品はタンパク質, 核酸, 糖, 脂質など

生命体を構成している物質は様々あるが, そのうち, 生体高分子と呼ばれるタンパク質, 核酸, 糖質, これに加え, 低分子ではあるが脂質も重要な働きをしている。タンパク質は体の骨格を作っている。また, 体の中での物質の分解や合成を行っている酵素もタンパク質でできている。高等生命では血液を経由した情報伝達がホルモンによっておこなわれ, このホルモンのいくつかはペプチドという小型のタンパク質でできている。

一方, 核酸は細胞の核と呼ばれる部分に多く存在し, タンパク質を作る設計図としての役割を果たしている。

核酸は DNA と RNA の2種類あり, とともにヌクレオチドが繰り返し結合した高分子物質である。ヌクレオチドの共通の部品は核酸塩基 (DNA では ATGC の4種類, RNA では AUGC の4種類), 単糖 (DNA ではデオキシリボース, RNA ではリボース), そして, リン酸である。これらのうちの3つのヌクレオチドの組合せがひとつのアミノ酸に対応している。この組合せの数は64通りあるが, 複数の組合せがひとつのアミノ酸に対応している。

脂質は細胞膜の主成分である。高級脂肪酸とグリセリンの結合した中性脂肪や, レシチン, セロブロシド, リン脂質などの脂質が知られている。

3-19. 生命体の仕組み

現在生息している生命体から進化的にもっと下等な生命体とその形態や仕組みの点で比較していき, その違いを明らかにしていくことも重要である。違いを比較することによって, 系統樹を作り, 最初の生命体がどんなものであったかを調べるようにすることができる。しかし, 最初の生命に近い生命体が現在も生存していれば, それを調べることができる。現在知られている最も古い生命体の痕跡は, 化石の中からも見つかっているが, 高温, 高圧, 高塩濃度, 酸素のない条件等の環境でも原始的な微生物が見つかっている。このような特殊な環境下の微生物, 化石中の生命体の痕跡も含め, DNA の塩基配列を調べることで, 系統樹の分かれ目にメタン菌のような古細菌が存在することが分かっている。

3-20. 真核生物と原核生物, 単細胞生物と多細胞生物

生物の系統樹を辿って行くと, 様々な形態の生物が出てくるが, 細胞の中に核がある生物は真核生物, ないものは原核生物といわれている。真核細胞には細胞小器官があり, 形体的に複雑になっている。細胞一つからなる生命は単細胞生物, 一つの生物が多くの細胞から形成されているものが多細胞生物である。一般に, 原核生命体の仕組み方が簡単で原始的であると考えられているが, 先ほど述べた古細菌 (原核生物の一つであるが) はこれらの共通の祖先であることが分かっている。多細胞生物は単細胞生物よりも高等であり, 多細胞生物は単細胞生物に比べてかなり複雑な構造をしており, 多細胞生物では細胞間の情報の伝達がおこなわれている。

3-21. コアセルベート

化学進化説を最初に唱えたオパーリンは原始細胞のモデルとして, コアセルベートというものを考えた。コアセルベートはオランダのグンドベルグ・ド・ジョンが命名者で, 1930年代に研究されている。このコアセルベートはアラビアゴム, ゼラチン (タンパク質) などを原料にして, 作り出すことができるのは, オパーリンの弟子によって証明されている。しかし, オパーリンが使ったコアセルベートの原料は現在も地球上に存在している物質であり, 原始地球上では存在しなかった。そこは大きな問題点ではあるが, オパーリンは最初に原始細胞のモデルを具体的な形で示したことで評価されている。

3-22. プロテイノイドミクロスフェア

アミノ酸という物質は水中ではなかなか結合せず, タンパク質と同じ性質の物質にならない。水中で水がとれなければ成らないからである。しかし, アミノ酸が水分を失って, さらに加熱されれば, 様子は変わる。通常のアミノ酸は100℃以上に長時間加熱されると, 分解する。しかし, アスパラギン酸, グルタミン酸などは特殊な性質を持つ。アスパラギン酸を160~200℃で長時間 (4-24時間) 加熱すると, アミノ酸同士が結合して, 水が取れてポリペプチドというタンパク質類似の物質ができる。また, グルタミン酸と他のアミノ酸を混合して加熱

すると、まず、グルタミン酸が熱で融解し、これに溶け込むようにして他のアミノ酸が反応して、ポリペプチドができる。さらに、生成したポリペプチドをみずくに溶解して少しずつ冷やすと、球状の物質ができることが知られている。これらの一連の研究は日本人の原田馨博士とシドニー・フォックス (S. Fox) 博士らによって研究された¹⁷⁾¹⁸⁾。この球状物質はプロテノイドミクロスフェアと呼ばれており、原始地球で最初に誕生したと考えられる原始細胞のモデルであるといわれている。1950年代半ばにアメリカに渡った原田博士はフォックス博士にアミノ酸をたくさん結合させてポリペプチドというものをつくる方法を考案するように言われ、グルタミン酸とアミノ酸と他のアミノ酸を混合して、個体のまま200℃近くまで加熱したところ、予想通り、ポリペプチドを合成することができた。その後、アスパラギン酸というアミノ酸がそのまま加熱するだけで水を失って、ポリペプチドになることもつきとめた。

3-23. マリグラヌール

1970年代の後半、柳川と江上らはアミノ酸を混合した金属塩を含む水溶液を105℃で加熱することで、球状体(マリグラニューールと呼んでいます)を合成することができたと報告している。くわしい報告を見ると、球状体の「内部の充填物は分子量2000程度の高分子で、アミノ酸残基の少なくとも1/3はペプチド結合をもっていることが明らかになった。」とある¹⁹⁾。また、「マリグラヌールの形成にはトリプトファンやチロシンのような芳香族アミノ酸と少量の酸素の存在が必須であった。」とある。以上のように、構造的には不明な点が多い。芳香族アミノ酸は、植物が生合成するアミノ酸であり、化学進化の時代には生成されなかったか利用されなかったであろう。むしろ生物進化の段階で獲得されたアミノ酸であると見る方が適切であろう。

4. 新しい発見と残された課題

4-1. リボザイムとRNAワールド

1970年代まで、生体物質の中で触媒作用をするのはタンパク質から構成された酵素だけであると考えられてきたが、1980年代に、チェックとアルトマンらが独立にRNAにも触媒作用があることを明らかにした。RNAとタンパク質の複合体でできている酵素の触媒作用を詳しく調べるために、RNAとタンパク質を切断して、それぞれについて酵素作用を観察すると、RNA部分に触媒作用があった。RNAの触媒作用は、RNAが輪投げ状に屈曲して切り刻まれる現象(スプライシング)、リボソーム上のRNAがタンパク質合成を促す作用等で見出されており、RNAの触媒はRibozyme(タンパク質の触媒Enzymeに対して)と呼ばれている。タンパク質合成の重要な個所に関わっていることから、生命の起源においてRNAが果たした役割が注目されており、化学進化の段階ではアミノ酸が縮合してできたポリペプチド(タンパク質はこの構造をもつ)よりも、先に登場したと考える研究者も多い。彼らはRNAが生成し、ポリペプチドを生み出していたかもしれない時代(化学進化における)を仮定し、RNAワールドと呼んでいる。RNAにはDNAにないリボース上の遊離の水酸基(2'位のOH)が存在していることが触媒作用に重要な働きをしているが、アミノ酸に含まれる多種多様な触媒基に比べると貧弱であり、むしろタンパク質が先であるとする研究者もいる。この点は議論が残されている。

4-2. 熱水噴出孔

深海底に存在する熱水噴出孔²⁰⁾からは様々な金属イオン、炭化水素が噴出されており、触媒的に炭素化合物が生成した可能性が指摘されている。熱水噴出孔を模したアミノ酸からのペプチド生成反応の研究もなされている。原始大気中や大気と水圏の海面以外に深海底という化学進化の場が注目されている。

4-3. キラリティーの問題

生命体を構成するタンパク質はL型(D型と鏡像関係)という片手構造のアミノ酸から合成される。また、核酸の構成単位であるヌクレオチドはD型(L型と鏡像関係)の単糖を構成成分としている。これらの組み合わせがどのように生じたか、また、アミノ酸とヌクレオチドがどうして片手構造なのかは、はっきり解明できていない。現在の地球を含む一定領域には中性子星から届いた円偏光²¹⁾の影響によって一方が残されたか、他の要因で偶然できた過剰に生成した片手構造の分子が増殖していったとする偶然説、もともと片方が安定であったとする必然説があるが、それがどのように片手構造のタンパク質や核酸になっていったかは明らかとなっていない。この分野における研究の進展が望まれる。

4-4. 地球外物質の問題

地球外の天体から試料を採取して実際に分析してみることは、実証研究の上でも非常に重要である。つい先ごろ、小惑星イトカワに到達して、試料を採取した日本の探査機(はやブサ)が話題になった。現在のところ、有

機物は確認できていないとのことであるが、このような探査技術が進歩して、地球外の天体からの試料採集が進めば化学進化の研究は大いに進展するであろう。また、最近特に注目すべきなのは火星に到達したアメリカの探査機がどのような分析結果を送ってくるか楽しみである。

5. 理科教材としての可能性

5-1. 基礎的教材として

生命の起源と化学進化については生命の始まり（起源）と変遷（進化）という点で非常に重要な項目であると考え²⁹⁾。高等学校の生物の基礎、生物の中で取りあげられることはたいへん好ましい。しかし、生命の起源について説明するには化学の知識が必要である。化学反応と化学的説明を省いていくと、どうしても単なるお話的な説明になりやすい。つまり、具体的な物質の構造から離れて、言葉での記述中心になりやすいと考えられる。また、利用できる教材について考えると、生物だけで扱える内容は限られている。たとえば、原始細胞の生成を考察するなどの点に限られるのではないだろうか。すでに知られているコアセルベートを形成させる実験を行うとか、プロテインノイドミクロスフェアを作って顕微鏡で観察するなどがあるだろう。しかし、よく工夫すればほかにも教材を作り出すことは可能であると考えられる。少し化学式を用いれば、タンパク質を形成している主なアミノ酸が α , L体であることを生命体に結び付ける説明があろう。

5-2. 境界領域

先にも述べたが、生命の起源という学習項目は、生物学、化学、地学、物理学に関連している学際的な項目である。学習指導要領では生物基礎と生物の学習項目に含まれているが、化学、地学、物理学の項目としても成り立ってよい項目である。ただ、学習指導要領ではどうしても重複を避ける傾向がある。これを別な言葉で表現すれば、厳密な縦割りであると見ることもできる。生物の項目に限定しておけば、他の科目で扱う必要はない。しかし、学際的な学習項目が一つの科目だけで扱われると、学習者のその学習項目への視点が限定されてしまう危険性がある。「生命の起源の問題は生物の問題である。」と限定的に考えやすくするのはないだろうか。生命の起源のことに限らず、明確な縦割りは弊害をもたらすであろう。境界領域にある学習項目に限定的な印象を植え付けてします。同じようなことは、生物と化学の境界にある「酵素」という学習項目にも当てはまる。

5-3. 発展的課題

生物、化学、地学、物理それぞれについて発展的内容を学習する方向性は3つある。一つは各科目内での内容を深める学習をする方向、二つ目は境界領域に広げる方向、三つ目は現実社会に目を向ける方向性である。生命の起源の学習項目は、二番目の境界領域の学習教材としては格好のものとなるであろう。すでに述べたように、この学習項目は4科目すべての境界領域に存在するからである。生物と化学、生物と物理、生物と地学、また、その他の組み合わせでも可能である。

5-4. 境界領域の重要項目は複数の科目の学習項目に

科目による限定的な学習を避けるには、複数の科目の学習項目とすべきであろう。別々な科目でその学習項目を扱うことで、科目ごとの異なった見方を学ぶことができる。現在の学習指導要領にはそのような点が欠けているかもしれない。少なくとも、生命の起源の学習項目については明確である。複数の科目の学習項目とすることには、科目ごとの見方を比較できること以外に、学習する生徒の数が増えるというメリットがある。生徒が選択した科目が何であれ、その学習項目に触れることができるのである。

5-5. 化学でも化学進化的反応について触れるべきである

生命の起源については生物の学習項目となったが、その化学的基礎である化学進化の問題は化学では取り上げられていない。化学の教科書では、物理化学、無機化学、有機化学、分析化学、そして、生物化学（やや削られたが）、そして、その応用に関する内容が記述されているが、有機化学や生物化学では化学進化的な反応については記述されていない。決まった原料物質を混合して、エネルギーを加えて反応させ、収率のはっきりしたものだけが記述されている。それは当然であるが、地球外の環境でどのような反応が起こっているのか、それが生命の起源につながる化学進化の反応であることを入れてもよいのでないだろうか。

6. おわりに

著者自身の研究領域である「化学進化と生命の起源」の国際会議が2014年に奈良で開催されることと、著者が

日本における生命の起源学会の創設者の一人である今堀宏三先生が第二代学長を務めた鳴門教育大に所属していること、そして、高等学校の理科の学習指導要領で生命の起源が取り上げられていることを述べた。これらのことが本論文を執筆する動機となった。「化学進化と生命の起源」分野は境界領域であるとともに、新知識が次々に蓄積している分野でもある。化学進化の研究結果についてはやや著者の考え方が強く出されている点もあるが、今後の研究によって正否が判断されるであろう。最後に、理科の学習指導要領においては、生物、化学、地学、物理の境界領域にあたる学習項目は、明確な縦割りをするのではなく、それぞれの科目で異なった観点から重複して扱って欲しいと考える。その最たる例がこの論文で扱っている「化学進化と生命の起源」の項目である。

引用文献

- 1) 高等学校学習指導要領解説理科編理数編, 文部科学省, p. 74, p. 92, 2011年.
- 2) 中村運, 『生命進化40億年の風景』, 化学同人, 1994年.
- 3) P. J. Bowler, Darwin's Originality, *Science*, 323, 2009, p. 223.
- 4) チャールズ・ダーウィン著, リチャード・リーキー編, 吉岡晶子訳, 『新版・図説種の起源』, 東京図書, 1997年, p. 237.
- 5) 原田馨著, 『生命の起源』, 東京大学出版会, 1977年, p. 20.
- 6) 原田馨著, 『生命の起源』, 東京大学出版会, 1977年, p. 14.
- 7) 中村運, 『生命進化7つの謎』, 岩波書店, 1990年, p. 6.
- 8) 日本アイソトープ協会, 『アイソトープ手帳第9版』, 丸善株式会社, 1996年, p. 24.
- 9) 日本化学会 原子量専門委員会, 『元素の同位体組成表 (2012)』, 化学と工業, 2012年4月号付録.
- 10) 下山晃, 原始地球と化学進化, 月間地球, 17, 1995, 440.
- 11) D. S. McKay et al., Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH 84001, *Science*, 273, 1996, 924.
- 12) P. H. Abelson, Amino acids from fossils, *Carnegie Inst. Washington, Yearb*, 53, 1954, 97.
- 13) S. L. Miller, Production of amino acids under possible primitive earth conditions, *Science*, 117, 1953, 527.
- 14) W. M. Garrison, D. C. Morrison, J. G. Hamilton, A. A. Benson, M. Calvin, Reduction of carbon dioxide in aqueous solutions by ionizing radiation, *Science*, 114, 1951, 416.
- 15) T. Munegumi, K. Harada, Molecular nitrogen fixation induced by nitrogen arc plasma in aqueous solutions under different pH conditions, *Viva Origino*, 23, 1995, 189.
- 16) K. Harada, T. Iwasaki, Syntheses of amino acids from aliphatic carboxylic acid glow discharge electrolysis, *Nature*, 250, 1974, 426.
- 17) S. W. Fox, K. Harada, Thermal copolymerization of amino acids to a product resembling protein, *Science*, 128, 1958, 1214.
- 18) S. W. Fox, K. Harada, Production of spherules from synthetic proteinoid and hot water, *Science*, 129, 1959, 1221.
- 19) 柳川弘志, 小川洋子, 伊藤雅彦, 模擬原始地球環境下での原始細胞構造の構築, 日本化学会誌, 1987, p. 2186.
- 20) J. B. Corliss, J. Dymond, L. I. Gordon, J. M. Edmond, R. P. von Herzen, R. D. Ballard, K. Green, D. Williams, A. Bainbridge, K. Grance, T. H. van Andel, *Science*, 203, 1979, 1073.
- 21) W. Bonner, Origin and amplification of biomolecular chirality, *Origins of Life*, 21, 1991, 59.
- 22) 胸組虎胤, 生物化学や生化学の授業で化学進化と生命の起源について教える意義, 科学教育研究, 21, 1997, p. 244.

その他の参考文献

- 秋山雅彦著, 『生命の誕生』, 共立出版, 1984年.
- 秋山雅彦著, 『大気のおいたち』, 青木書店, 1987年.
- 秋山雅彦著, 『よみがえる分子化石 ―有機地質学への招待』, 共立出版, 1995年.
- キャピタルABC インターナショナル, 『NASA 宇宙の記録 ビデオ解説書』, 1993年.
- クリスチャン・ド・デューブ著, 植田充美訳, 『生命の塵』, 翔泳選書, 1996年.
- フリーマン・ダイソン著, 大島泰郎, 木原拓訳, 『ダイソン生命の起源』, 共立出版, 1989年.
- リーン・J・デュボス著, 竹田美文, 竹田多恵訳, 『レイ・パストゥール』, 加納書店, 1967年.
- 石川統著, 『分子進化』, 裳華房, 1986年.
- C. E. フォルサム著, 吉田政幸訳, 『星からDNAへ 物質進化と生命の誕生』, サイエンス社, 1980年.
- S. フォックス著, 松野孝一郎訳, 『生命の出現と分子選択』, 東京出版, 1989年.
- 藤井陽一郎, 石神正浩著, 『変動する地球と生命の起源』, 新日本出版社, 1995年.
- 学会出版センター, 『物質の進化』, 日本化学会編, 化学総説 No. 30, 1980年.

- 学研,『最新起源論 始まりの科学』,1993年.
- マーティン・ガードナー著,坪井忠二,藤井昭彦,小島弘訳,『自然界における左と右』,紀伊国屋書店,1992年.
- 五條堀孝著,『人間は生命を創れるか 進化学の歩みと未来』,丸善,1995年.
- ドナルド・ゴールドスミス,トビアス・オーウエン著,桜井邦明,深田豊訳,『宇宙に生命を探る(上)(下)』,共立出版,1983年.
- 浜田隆著,『地球物語 46億年の謎を解き明かす』,新潮文庫,1987年.
- 原田馨著,『化学進化-生命の起源の化学的基礎』,共立出版,1971年.
- 原田馨著,『生命の起源 化学進化からのアプローチ』,東京大学出版会,1977年.
- 原田馨著,『宇宙における生命』,講談社,1984年.
- フレッド・ホイル,チャンドラ・ウィックラマシンゲ著,大島泰郎監訳,『生命はどこからきたか』,1995年.
- 池原森男,上田享,大塚栄子共著,『核酸有機化学』,化学同人,1979年.
- 今堀宏三,『つっぱり人生』,1981年.
- JICC 出版局,『進化論を楽しむ本』別冊宝島45,1985年.
- 金子隆一,中野美鹿著,『大進化する進化論』,NTT 出版,1995年.
- 河田雅圭著,『はじめての進化論』,講談社,1990年.
- A. G. ケアンズ・スミス著,石川統訳,『生命の起源を解く七つの鍵』,岩波書店,1987年.
- A. G. ケアンズ・スミス著,野田春彦,山口啓明訳,『遺伝子の乗っ取り——生命の鉱物起源説』,紀伊国屋,1988年.
- 木村資生著,『生命進化を考える』,岩波新書,1988年.
- 小林長生著,『現代の惑星学』,東海大学出版会,1992年.
- 古賀洋介著,『古細菌』,東京大学出版会,1988年.
- ウィリアム・F・ルーミス著,中村運訳,『遺伝子からみた40億年の生命進化』,紀伊国屋書店,1990年.
- L. マルギュリス著,永井進監訳,『細胞の共生進化(上)(下)』,学会出版センター,1985年.
- L. マルグリリス, D. セーガン著,田宮信雄訳,『マイクロコスモス-生命と進化-』,東京化学同人,1989年.
- 丸山圭蔵著,『生命とは何か』,共立出版,1985年.
- 松井孝典著,『地球・宇宙・そして人間』,徳間書店,1987年.
- 松井孝典著,『地球進化探訪記』,岩波書店,1994年.
- 松井孝典著,『地球=誕生と進化の謎』,講談社,1990年.
- E. マイヤー著,養老猛訳,『ダーウィン進化論の現在』,岩波書店,1994年.
- S. L. ミラー, L. E. オーゲル共著,野田春彦訳,『ミラー, オーゲル 生命の起源』,培風館,1975年.
- 水野義久著,『核酸 生命の鍵化合物』,産業図書,1983年.
- 長野敬著,『生命の起源論争』,講談社,1994年.
- 長野敬著,『進化論のらせん階段』,青土社,1994年.
- 中村運著,『細胞の起源と進化』,培風館,1982年.
- 中村運著,『生命進化40億年の風景』,化学同人,1994年.
- 中村運著,『生命にとって水とは何か』,講談社,1995年.
- 中沢信牛著,『メンデルの発見』,共立出版,1978年.
- ジャック・ニコル著,万年甫,万年徹訳,『科学者パストゥール』,みすず書房,1964年.
- 日本経済新聞社,『彗星と隕石』,別冊サイエンス,1981年.
- 日経サイエンス社,『宇宙と生命』,別冊日経サイエンス115,1996年.
- ジャック・ニニオ著,長野敬訳,『分子進化学入門』,紀伊国屋,1984年.
- 野田春彦著,『生命の起源』,培風館,1996年.
- 大島泰郎著,『生命は熱水から始まった』,東京化学同人,1995年.
- 小沼直樹著,『宇宙化学』,サイエンスハウス,1987年.
- L. E. オーゲル著,長野敬,石神正浩,川村越共訳,『生命の起源と発展』,1974年.
- ウィリアム・ルーベイ, L. V. パークナー, L. C. マーシャル著,竹内均訳,『海水と大気の起源』,講談社,1976年.
- カール・セーガン, アン・ドルーヤン著,小尾信彌訳,『ハレー彗星』,集英社,1985年.
- 佐藤七郎,福田哲也著,『新しい細胞-遺伝子像と生命』,新日本出版,1995年.
- ロバート・シャピロ著,長野敬,菊池韶彦訳,『生命の起源 科学と非科学のあいだ』,朝日新聞社,1988年.
- 柴谷篤弘,長野敬,養老猛司編,『講座進化第6巻 分子から見た進化』,東京大学出版会,1992年.
- 柴谷篤弘,長野敬,養老猛司編,『講座進化第5巻 生命の誕生』,東京大学出版会,1992年.
- 渡辺正雄編著,『ダーウィンと進化論』,共立出版,1984年.
- 藪下信著,『彗星と生命』,工作社,1980年.
- 柳川弘志著,『生命の起源を探る』,岩波書店,1989年.
- 柳川弘志著,『生命はいかに創られたか』,TBS プリタニカ,1991年.
- 柳川弘志著,『生命はRNA から始まった』,岩波書店,1994年.
- 湯浅精二著,『生命150億年の旅』,新日本新書,1992年.

Concept of Chemical Evolution and Origins of Life

— The History of Research and the Potential for Science Educational Tool —

MUNEGUMI Toratane

International Conference on the Origins of Life will be held in Nara in 2014. This is the second holding in Japan since 1978. The international conference which will be held in Japan encourages the author as a researcher of this field and as a practitioner of education, because “Origins of Life” was described as a learning item in the Education Guidelines by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science & Technology in Japan. The author now belongs to Department of Science Education, Naruto University of Education, in which one of the founders of the Japanese Society of Origins of Life, Kozo Imahori had been the second President. This research describes the history of research on chemical evolution and the origins of life and also proposes that educational tools related to chemical evolution and the origins of life are developed.