

生命起源の2 遺伝子仮説の展望

——化学・生命・文明：階層構造出現の相同機構の提唱に向けて——

川 村 邦 男

(受付 2018 年 10 月 24 日)

1. はじめに

地球を含む宇宙においてどのようにして生命が出現したのか、その機構あるいは一般則を明らかにすることが生命起源の研究の目標である。ラマルクやダーウィンによる進化論¹⁾の提唱、パスツールによる自然発生説の否定、オパーリンによる生命起源の提唱²⁾などを経て、ミラーの実験³⁾が1953年に発表された。この実験が出発点となり生命起源の研究は20世紀後半には、自然科学のまともな研究テーマとして認識されるようになってきた。ミラーの実験が発表された1953年にはDNAの2重らせん構造が発表され、20世紀の後半には分子生物学が飛躍的に発展した。また20世紀後半には宇宙での生命探査も進展したため、これらの影響によって最近では生命起源の研究は以前よりも活発になった。

生物の遺伝情報は言わば生物の設計図である。その設計図は遺伝子であり、その本体はデオキシリボ核酸 (DNA) である。DNAの塩基配列をリボ核酸 (RNA) に転写し、さらにリボソームの翻訳装置によって、設計図にかかれた塩基配列が、タンパク質中のペプチド鎖のアミノ酸配列へと正確に変換される。つまり、設計図に従ってタンパク質がつくられる。この仕組みは極めて精巧かつ複雑であり、しかも基本的な分子装置と仕組みは地球上の生物では共通である。一方、タンパク質はDNAの塩基配列、言い換えると設計図によって作られる。この際に、DNAを複製、転写、翻訳してタンパク質を合成する一連の装置と分子は、タンパク質がなければ作動しない (図1)。つまり、DNAとタンパク質との関係はタマゴとニワトリの関係にある。概念的に言うならば情報と機能との関係にある。原始地球上で単純な分子の集団から、この複雑な仕組みがどのようにできたのかは、すなわち、遺伝情報と生物学的機能をどのように結びつける仕組みができあがったのかは、生命起源の中心の問題である。このような経緯を経て、1980年代前半にリボザイムが発見された⁴⁾。リボザイムは酵素機能をもつRNAである。リボザイムが発見されるまでは、RNAはDNAの塩基配列を写し取る役割や、リボソーム上でペプチド鎖を合成するための補助的な役割を果たすだけの物質であると、多くの科学者は考えていた。

しかしこの発見をきっかけにして、RNAの生化学的な役割に対する考え方は一変した。生

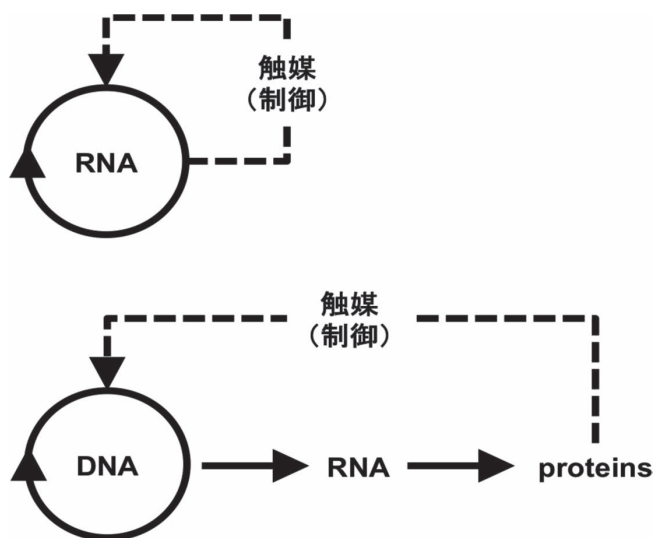


図1. RNA分子が中心的役割をはたす生命体と現在の生物における遺伝子と表現型との関係

RNAワールド、あるいはRNAが中心的な役割をはたしたと考えられる初期生命体では、RNAが自己複製し、生成したRNA自身になんらかのリボザイム機能を持つ（上段）。このため、遺伝子型分子と表現型分子はともにRNAによって担われる。一方、現在のシステム（下段）では遺伝子型分子はDNAであり、その塩基配列が遺伝子を含む。これが、RNAの塩基配列に転写され、タンパク質中のペプチドのアミノ酸配列へとリボソーム上で翻訳される。すなわち細胞型生物では、遺伝子型分子と表現型分子の対応付けのための装置一式が細胞内におさめられている。

命起源の研究においても、原始生命体あるいは最初の生命体の出現過程では、RNAは中心的な役割を果たしていただろうとする仮説、すなわちRNAワールド仮説がGilbertによって命名・提唱された⁵⁾。RNAワールド仮説と実質的に同様の考え方は、リボザイムの発見よりもだいぶ前に遡ることができる。1960年代にCrickとOrgelは既にそのようなことを考えていたことを後の論文で明らかにしている⁶⁾。実際にOrgelは1960年代からRNAがいかにして地球上の非生物的な化学反応によって生成したか（このように、生物が出現するまでの化学反応が複雑化する過程を化学進化とよぶ）を世界に先駆けて研究し、その後のRNAワールド研究に大きな影響を与えた⁷⁾。また、Eigenはハイパーサイクル仮説を1971年に提唱し、RNAが促進し合う化学反応ネットワークの発展によって生命情報が保持・拡大する、すなわち生命とよべるシステムへと発展する機構を提案した⁸⁾。

これらの研究を経て、1990年にはRNAを実験室で人工的かつ進化的に創成するin vitro selection法がつけられた。この手法は全く独立した2つのグループによってつくられ、同じ月のNatureとScience誌上で発表された^{9,10)}。これらの論文は生命起源だけでなく医学・薬

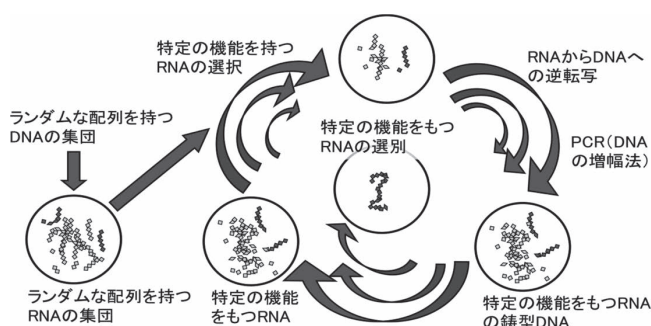


図 2. In vitro selection 法による種々の機能性 RNA の創成過程

数10鎖長程度のランダム配列をもつ DNA のプールを DNA 人工合成装置でつくる。これを鋳型として RNA のプールとする。この数は、実験室レベルでは、例えば 10^{13} 種の分子の集団である。これらの中には特定の機能を持つものが存在しているが、例えばアプタマー（特定のタンパク質などに結合する分子など）を選択する際には、アフィニティークロマトグラフィーを用いる。アフィニティークロマトグラフィーに特定のタンパク質を固定化し、ここに結合しやすい分子を結合しにくい分子と分離することができる。リボザイムの創成には少し工夫が必要である。得られた RNA 集団には、最初よりもその特定のタンパク質と結合しやすい RNA が多く含まれている。これを逆転写 PCR 法によって、DNA への変換と増幅を行う。このようにして得た DNA プールを再び出発材料として、このサイクルを数回繰り返す。これによって、急速にほぼ1つの RNA 分子が選別される。文献 9, 10) をもとに作成した。

学への応用面で注目され、その引用回数はどちらの論文も7000から8000回以上（Google Scholar）に達している。この手法を用いると、アプタマーやリボザイムなどの様々な機能をもつ RNA 分子を進化工学的に創成できる（図 2）。またこの過程は、「変異」「複製・増幅」「選択」の3つの過程を含むので、ダーウィン進化のアナロジーとみることができる。この成果によって、1990年代からは RNA の化学進化研究の主要なアプローチ法として多くの研究者が利用し、どのような機能をもつ RNA が存在し得たのかが次第に明らかになってきた。

しかし、一連の RNA ワールド仮説に関する研究を経ても、生命とは何か、RNA ワールドとは具体的に何であるのか、RNA を中心とした化学反応のネットワークから最初の細胞型生物へとどのように化学進化したか、などの本質的な問題に対する答えは得られていない¹¹⁾。筆者は2016年にこれらの問題への答えとして、2つの遺伝子が化学進化の過程で出現すれば単純な化学反応ネットワークから生命へと発展する過程が開始するという仮説を提案した¹²⁾。そこで本論文では、この仮説に至った経緯とこの仮説の内容を概説する。さらに、この仮説を検証するための手法と他分野への展開の可能性について、展望を述べる。

2. 主体性の進化論から生命起源の2遺伝子仮説へ

2.1 主体性に基づく生命システムの発展機構

1999年秋頃に国際生命の起源学会 (the International Society for the Study of the Origin of Life (ISSOL), 現在は ISSOL-The International Astrobiology Society) の会員に向けて、生命の定義 (Definition of life) に関するアンケートが Gyula Pályi 教授 (University of Modena and Reggio Emilia, Italy) から電子メールで届いた。私は1992年に工業化学の研究をやめて、Rensselaer Polytechnic Institute の James P. Ferris 教授のポスドクになり生命起源の研究に入った。このアンケートが来たのは、ポスドクを終えて日本に帰国して4年後のことであり、化学進化研究のための熱水フローリアクターを開発しつつ生命についてアクティブに考え始めた頃であった。この当時、学生が研究に向き合う姿はとても受動的であると私は感じていた。この光景は、生きていくと言ふことは何なのかを考える自分の研究テーマにつながっていった。生物あるいは生命の最も身近な例はヒト (人間) である。いま改めて考えると、人間を考えることは生きていくことを考える入口であると思われる。研究に向き合う当時の学生達の消極的な姿勢に対する批判的な思いは、生命とは何かという問に対する考えを形成していったようである。一方で、RNA ワールド仮説の研究によって、情報と機能との対応付けということが、生命の本質的な性質あるいは仕組みとして含まれていることに注目していた。このような背景を基にして、「Life is a system which has subjectivity」という定義と、情報と機能との対応付けという観点から地球上のシステムを3つに分類し簡単な説明を加えて、私はこのアンケートに対するメールを直ちに送った (表1)¹³⁾。

表1. 生命システムにおける主体性、および情報と機能との対応付けによる3分類

分類	対応付け	主体性
クラスⅠ 細胞型	装置一式が細胞内に格納されている	自己完結型の生きているシステム
クラスⅡ ウィルス型	遺伝型と表現型分子が化学結合によって結ばれている	細胞型生物が必要
クラスⅢ 非生物	ない	ない

文献13) をもとにして作成した。

2000年の4月頃、私は Pályi 教授を代表とする研究グループからのメールを再び受けとった。私は彼らの名前をもう忘れており、最初のメールには気付かなかった。2度目のメールによって2000年の9月に開催する国際会議 (Workshop on Life, September 3-8, 2000, Modena, Italy) の案内であることを知った。上で述べたとおり、生命起源の研究は自然科学

の分野として現在では認識されるようになった。しかし同時に、この分野は黎明期にあつて、直感的、空想的、あるいは哲学的に生命をとらえることも重要である。実際には、生命起源に関する国際会議でも、哲学的な内容を含む議論はほとんど行われない。そのような中で、**Workshop on Life** は科学の題材としては議論しにくいところに踏み込むものであった。

私は、最初は旅費がないので学会には参加できないと返事をした。しばらくすると、旅費を援助するから基調講演をしないかという返事がきた。生命起源の研究を始めて、まだ数年しか経っていないのに、国際会議で基調講演をやらせてもらえるという提案は大変嬉しく光栄であった。是非やりたいという返事をして、この学会に参加することとなった。学会までのおよそ4ヶ月の間に、先に提案した生命の定義「**Life is a system which has subjectivity**」について自分の考えをまとめ、同時に、過去にそのような考えがあったのかどうか調査することに没頭した。

生物（あるいは生命）と主体性とは関わる研究を遡ると、今西錦司の進化論に行き着いた^{14,15)}。今西錦司は西欧を土台とする自然科学にはない、非常にユニークな視点を持って生物の世界をとらえたと考えられている。これについては1980年代後半に *Nature* 誌上で何回か議論が行われた^{13,16)}。今西錦司の学問成果に対しては批判する意見もみられるが、今西錦司は自然科学的直感に極めて優れた科学者であると私は考えている。科学者がなんらかの科学的成果を得る過程では、まず自然科学的直感によって仮説あるいはモデルが科学者の頭の中に芽生え、これが科学者を答えに導く原動力になる。論理的あるいは批判的思考は、観測データやモデルが出て試行錯誤を繰り返した後で、始めて有効になるものである。このようにして、生命とは何かということと、生物進化を含む生命の発展に関する考え方をまとめるという作業の最初の成果が、**Workshop on Life** の講演と議論をまとめた **Fundamentals of Life** の一節として出版された¹³⁾。この本に対して、後に私のポストドクでの指導教授である Ferris 教授がこの書評を書き、その中で私の述べた **subjectivity** についても言及した¹⁷⁾。

このモデルを図3および図4に示す。生命の世界は非常に複雑で多段階の階層構造をしている¹³⁾。生命の世界の歴史とは、このような階層が複雑化していった歴史である。この過程の一つとして、通常の生物学では含めない文明社会というシステムも加えることとした。これは、文明に興味があったことと関係があるが、後に文明を生命システムとしてとらえるという考え方へと発展した。そもそも生命システムとは、生物または生物を含むシステム、あるいはそれに準ずるシステムと一連の論文で規定した。図3では階層が複雑化・多段化する過程をモデル化するために、生命の世界は直線的に発展するように描いているが、実際の生物世界の多様性は我々の想像よりもはるかに大きい。ここでは例外に目をつぶり、第1近似として、「原核生物の登場」、「真核生物の登場」、「多細胞生物の登場」、「固体間のつながりや社会の形成」「文明」などの生命システムの階層の違い（図3）を、この単純なモデルによって

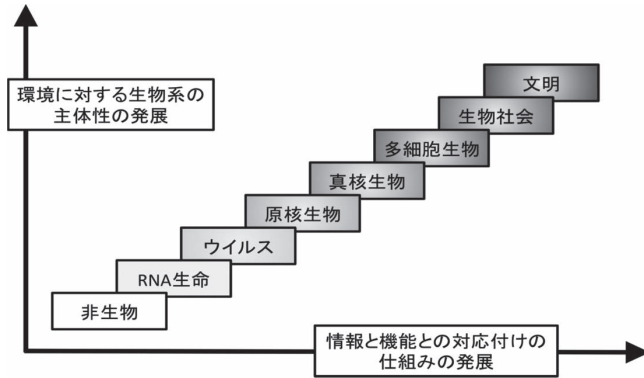


図 3. 生命システムの階層的発展における情報と機能との対応付けの仕組みの重層化と生命

システムの主体性（生物側から環境に働きかける性質）および、情報と機能の対応付けの仕組みの重層化の関係（（文献13）をもとに再構成した）は、相関関係がある。これらの段階的な変化の過程では、新しい対応付けの仕組みが生命システムに取り込まれ、これが新しい環境に対する生物側からの働きかけの仕組みとなる。この意味で環境に対する生命システム側からの働きかけは、段階的に高度化・重層化していると見なすことができる。

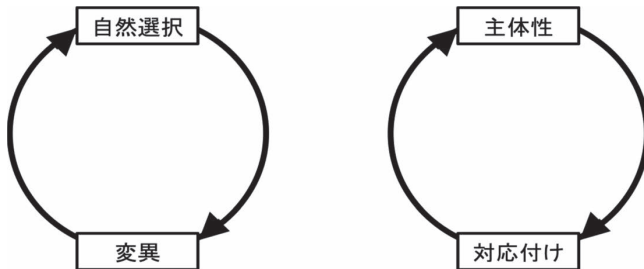


図 4. 生命システム発展のモデル

左：ダーウィンの進化機構を非常に単純化して表したモデル。生物に変異がおり、これがその環境下において有利であれば、次世代を多く残すことになり、その形質（遺伝子）はその集団の中に広がっていく。
 右：著者のモデル（文献13）。生命システムには環境に対する柔軟性と環境に対する生物システムからの働きかける能力をもつため、その環境下では環境に対応する過程で生じた新しい対応付けを生命システムの中に取り込む、あるいは、保存する。これによって、順次新しい情報と機能との対応付けが蓄積され、環境に対して多様な生命システムへと発展する。変異と自然選択のセットは、その一部である。

表した。

この階層モデルによって、進化の仕組みを説明することができるだろうか。第1に生命を定義あるいは定式化するためには、生命というシステムとそれととりまく環境との関係を考えねばならないと私は考えた。単純に言えば、生命は環境との関係において他のシステムと

区別できるものである。具体的に言えば、生命とは環境に対して生命側からの主体的な働きかけをもつシステムであるということである。

このような観点から、生物学的な「主体性」の意味を私は定義した。この考え方に基づく、進化とは生命の主体性の現れ方の一つである。これに基づいて、通常のダーウィン進化で理解されている進化機構に対して、生物側から環境への働きかけという「主体性」に基づく機構を提案した。ダーウィン進化¹⁾を単純に解釈すると、例えば、大地溝帯で起こったヒトの祖先からヒトへの進化の過程では、ヒトの祖先の集団に新しい遺伝子が出現して、それによって新しい環境に生き残ったと解釈できる。一方で、私の理論によると、生物はそもそも環境変化に対応するなにかの潜在的能力を持っている。これによって、環境が変化してもなんとか生きることができる。最適ではないがなんとか生き延びる過程で、新しい遺伝子が出現しそれが定着していくのだと、説明できる。これはダーウィン進化機構とも矛盾しないし、環境に対して生物側からの働きかけという考え方とも矛盾しない。

これらを総合すると進化の仕組み(図4)は次のように説明できる。ここで登場する対応付けという考え方は、生物の遺伝子型と表現型を対応づけるという考え方に端を発する。これに基づいて、地球上のシステムを生命という観点から3つに分類し、この内容を Pályi 教授に送ったのであった。細胞型生物を基準にすると、地球上のシステムは生物、ウイルス、それ以外(非生物)に分類できる。生物は細胞内に遺伝情報と機能との関係に対応づける装置一式が含まれている^{8, 11, 12, 18, 19)}。ウイルスは遺伝情報を持つ分子と機能を持つ分子が化学結合で結ばれているが、装置一式は持たない。それ以外のシステムには対応付けの仕組みがなく、そもそも遺伝情報も生物的機能もない。このような遺伝子型と表現型を対応づけるという考え方を私は拡張し、DNA からタンパク質への情報の対応付けにとどまらずに、生物世界の様々な分子機構に基づくものや、文明における言語や文字などを含めて考えた¹³⁾。すなわち生命システムは、環境に対して生命側からの働きかけによって、新しい情報と機能との対応付けをその生命システムに組み込む。これがそのシステムの性質を変化させ、やがて、上位の階層の生命システムへと発展する。新しい情報を生み出す機構はダーウィン進化の突然変異でも構わないのであるから、この考え方はダーウィンの進化論と矛盾するものではない。むしろ突然変異などを含む、より広い対応付けを含んだ生命システムの発展を想定するものである^{13, 20, 21)}。

2.2 比較生命システム論の展開

この生命システム発展の機構は、いずれはその最も初期の段階=生命の起源がどのように形成されたかを考えるアプローチとなることを目的として考案したものである。生命システムには様々な階層が入れ子構造になっており(図5)、なおかつ階層の間には相似が見られ

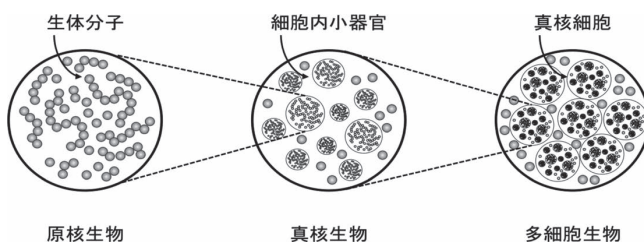


図5. 原核生物・真核生物・多細胞生物における要素とシステムとの関係に関する相似

原核生物は分子を構成要素としてシステムが形成されている。マーギュリスの真核生物の起源（共生説）に基づく、真核生物は原核生物の共生体である。この階層構造が図に反映されている。さらに、多細胞生物は真核細胞から構成されている。これらの関係を文献(22)に基づいて再構成した。

る。従って、ある階層から上位の階層が出現する過程を見れば、生命起源に関するヒントが得られるかも知れないという見通しを持っていた。では、どこを見たら最も良いヒントを見つけられるであろうか。私は直感的に文明であると考えた。生命科学は現在も急速に進んでいるが、生物そのものは複雑すぎる。これと比べると文明はもっと単純であると感じた。文明が単純であるとする考えが正しいかどうかは分からないが、生命システムとしての文明を他の生命システムと比較することに取り組むことにした^{20, 22)}。

生命システムとは、生物や生物を含むシステム、あるいはそれに準ずるシステムである。そこで、「文明」、「原核生物」、「真核生物」、「多細胞生物」、「社会性昆虫」、「種」、「生態系」、について、様々な属性を比較した。上述の環境とシステムとの関係は中でも最も重要な項目であり、これに関連する項目として、境界、要素、要素とシステムの環境に対する役割を検討した。また、システムの内部的属性として、「広い意味の代謝」、「複製」、「新しい機能をシステムに取り込む性質」、「情報と機能との対応付け」、を項目として比較分析した。この結果、対象とする生命システムの階層に、これらの属性を発現するための固有の仕組みが存在するかどうか、これらの生命システムの特徴を分類する要点であることを知った。

「原核生物」、「真核生物」、「多細胞生物」、は生物であり生命システムの代表である。これらの3つは生物の大きな分類として広く受け入れられている。一方で、実際に「広い意味の代謝」、「複製」、「新しい機能をシステムに取り込む性質」、「情報と機能との対応付け」について、それぞれの階層において固有の仕組みを持つ。すなわち、階層性からみてこれらを3つに分類することは、従来の生物学的な分類と矛盾しない。

一方、文明は細胞型生物に近いシステムである。すなわち、上述の全ての比較項目について固有の仕組みを持っている。また、社会性昆虫においても **queen** や **worker** からなる1つのシステムとして、社会としてのレベルで固有の仕組みを持っていると言ってよく、多細胞

生物と似ている。ただし文明や社会性昆虫では要素の性能や要素間の関係は細胞型生物の場合と異なるので、細胞型生物と似ているところもあるが異なるところもある。一方、文明と対照的に生態系は、生態系を複製する固有の仕組み、また生態系そのもののエネルギー・物質の出入りを制御する固有の仕組みが、生態系のレベルには存在しない。すなわち、細胞型生物とは質的に異なる。この種の比較分析を行い、文明は生態系よりも細胞型生物に似ていると結論した。

結論として、文明は生命システムであり、しかも文明というシステムのレベルにおいて、「広い意味の代謝」、「複製」、「新しい機能をシステムに取り込む性質」、「情報と機能との対応付け」について固有の仕組みをもつ。この特徴に基づけば、文明の諸性質を評価できるだろう。この推測に基づいて北アメリカ大陸の文明を評価しその挙動を分析し、一定の成果を得た²³⁾。さらに、文明においてヒトは文明の要素であるという特徴が際立っており、しかも文明の発展とともにその特徴は明確になる。この考え方に基づけば、要素としてのヒトの思惑とは異なる方向へと文明が発展するようなことが、なぜ起こるのかを説明できるのではないかと推測した。その事例として、ヒトは環境問題に対してどのように取り組むことができるかを考察した^{24, 25)}。

2.3 生命起源の2 遺伝子仮説

文明出現の過程を研究すれば生命の起源を明らかにできるかも知れないという着想に基づいて、生命出現過程のメカニズムについての考察をまとめた¹²⁾。

生命システムの比較からは、「広い意味の代謝」、「複製」、「新しい機能をシステムに取り込む性質」、「情報と機能との対応付け」という属性が重要であることが示唆された。これらを整理すると、「複製」、「新しい機能をシステムに取り込む性質」、「情報と機能との対応付け」の3つは情報に関連する要素である。実際、生物においてはDNA、RNA、タンパク質、その他の分子における情報の複製、変異、対応付けという一連の仕組みとして細胞内に装置一式が含まれる。これに対して代謝系は、別の要素として考えることができるだろう。従って、先の3つの属性をひとくくりにして、「情報中枢系」と呼ぶことにして、情報中枢系は「複製」、「新しい機能をシステムに取り込む性質」、「情報と機能との対応付け」の3つの性質を内包するものと考えた^{24, 25)}。

1章で述べたように、生命の起源において、RNA ワールド仮説が最も重要な仮説として長年精力的に研究されてきた。私は、RNA の化学進化を研究しつつ RNA ワールドに関する難点や矛盾点を指摘してきた。一方で、RNA が原始環境で変異を伴いつつ複製できる環境が存在すれば、それは、そのRNA 分子の集団は「情報中枢系」を構成できるであろう。実際には、RNA ワールド仮説の研究でも不明確なところはあるが、RNA は情報中枢系を担う潜

在能力を持つ分子である。第1にRNAはワトソン・クリック型の相補的な塩基対を形成する。これはDNAと同様であり、これに基づき条件が整えば複製が可能である。同時に、複製が不正確であれば変異も起こる。一方で、情報と機能との対応付けについては、RNAの場合には同一の分子が情報を伝達することが可能で、しかもリボザイム機能などの生体機能を持ち得る。従って、複製するRNA系を構築できれば生命起源に近づくものと考えられる。

具体的には、RNA自身の複製を促進するRNA鋳型依存型のRNAポリメラーゼリボザイム（以下RNAポリメラーゼリボザイムとよぶ）が必要である。これは、RNAを鋳型として、その塩基配列と相補的なRNAを合成するリボザイムである。これが存在すると、原始的な生物学的な機能を発現するRNAは複製・増幅される。従って、RNAワールド仮説で想定されるところの、RNAを土台とする生命体の中心的な役割をはたす仕組みであると推測される。このために、原始環境下でRNAポリメラーゼリボザイムが存在し得たかどうか大きな研究課題であった。昨今では*in vitro* selection法を用いると様々なRNAを創成できるのでこの技術を使って、RNAポリメラーゼリボザイムが可能かどうか研究されてきた^{26,27)}。この結果、生物学的機能を持つほど大きなRNAを十分正確に複製できるRNAポリメラーゼリボザイムは、現状ではまだ見つかっていない^{26,27)}。いつかは効率的なRNAポリメラーゼリボザイムが見いだされるはずであるという考えに基づいて、RNAワールド仮説の検証が今も精力的に行われている。

一方で、生命システムの比較に基づくと、情報中枢系（the central controlling system for information (CCSI)）と広義の代謝系（the central controlling machinery for inflow/outflow and formation/degradation of energy, material and information from environments (CMIO)）は、細胞型生物、社会性昆虫、文明に、それぞれのシステムのレベルにおいて備わっている。この事実からみると、生命システムの成立にはCCSIとCMIOが成立することが要件であると推察される。この考え方は、RNAワールド仮説を検証するためにRNAポリメラーゼリボザイムがターゲットとなっていることとも符合する。以上をまとめ、以下の仮説を提案した。CCSIとCMIOは生命システムを構成するために必要な要素であり、これらのリンクが開始することで生命システムの発展が開始される（図6）。すなわち、生命起源においては、化学反応のネットワークの中からCCSIとCMIOのリンクが開始することが生命出現の出発点である。

RNAポリメラーゼリボザイムが存在すると、CCSIは自動的に成立する。すなわち、RNAポリメラーゼリボザイムをコードする1つの遺伝子がCCSIの成立には必要である。一方で、CMIOの成立およびCCSIとのリンクには何個の遺伝子が必要であるか。答えは1である。RNAポリメラーゼリボザイムが成立すると、ランダムに様々なリボザイムが出現する。ランダムに生成したリボザイムが、どこかの反応を促進したとしても、システム全体の性能には

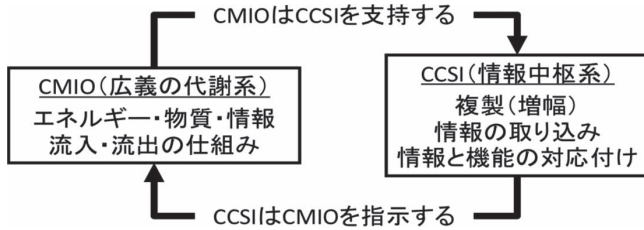


図 6. 生命システムにおける CCSI (情報中枢系) と CMIO (広義の代謝系) の相互促進関係

細胞型生物、社会性昆虫、文明などの生命システムにおいては、それぞれのシステムの階層において、固有の CMIO と CCSI が存在し、これらがリンクし相互に促進しあう関係にある。このリンクの開始点が、新しい階層の出現の開始点である。この関係を文献12) に基づいて再構成した。

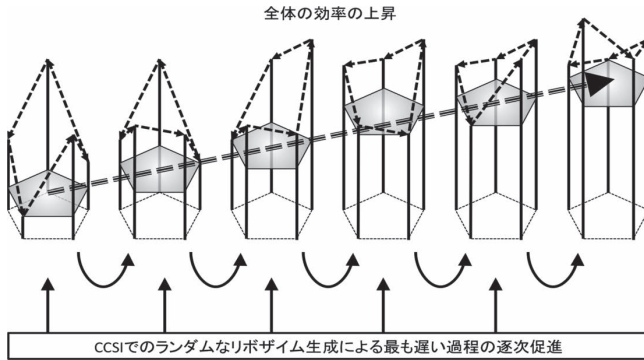


図 7. CCSI におけるランダムなリボザイム出現による CMIO の逐次促進過程の機構

CCSI とリンクしつつある CMIO においては、CMIO の発展にともなってそれが CCSI の効率アップにフィードバックされる。この際に、RNA を中心とした生命体 (初期生命体) において RNA ポリメラーゼリボザイムが存在すると、CCSI は成立する。この CCSI によってランダムに CMIO に関与し得るリボザイムが生成するが、最も遅い過程を 2 番目に遅い過程よりも促進する場合にだけ、その効果が CCSI へとフィードバックされる。これを繰り返すことによって、CMIO は全体として効率がアップし、CCSI とのリンクが強化される。これらの関係を文献12) に基づいて再構成した。

ほとんどの場合で影響しない。効果があるのは、CCSI につながる RNA の生成経路の最も遅い反応経路を促進するリボザイムが出現したときだけであり、その場合に CMIO の効率の上昇アップは CCSI にフィードバックされる (図 7)。同様にして、次のステップでは 2 番目に遅い反応経路が最も遅い経路となる。従って、この経路が促進され最も遅い経路でなくなるようにリボザイムがランダム生成したときに、同様に CCSI へとフィードバックされる。これが順次繰り返されることによって、CMIO が高性能化するとともに CCSI とのリンクが完

成する。この考え方はリービッヒの最小律とも似ている²⁸⁾。ただし、CCSIとリンクしているという点では全く異なる概念である。

3. 2 遺伝子仮説の展望

3.1 生命起源の実験的検証基盤としての2遺伝子仮説

どのようにしてCCSIとCMIOが出現しそのリンクが開始されたかを実験的に検証することが次のステップである。CCSIについては、現在までに*in vitro selection*法で様々なリボザイムなどの機能をもつRNAが創成されてきた。しかしこの方法では、DNAプール・逆転写PCR法などの人工的な手法や材料を使わなければならない。これらは原始地球には存在しないので、どのようにして類似の仕組みができあがったかを検証しなければならない。我々はこれまでにRNAだけで複製するシステムを発見すべく様々な実験を行ったが、現時点ではまだ成功していない。今後は、従来の水中での反応にとどまらずに様々な実験系でRNAが複製可能な条件を探索すべきである。

CMIOについてみると、原始的環境下でのRNAの生成経路を促進するリボザイムを、コードする遺伝子がターゲットとなる。無機物からRNAが生成するまでの過程は、核酸塩基・リボースの生成、ヌクレオシド・ヌクレオチドの生成、ヌクレオチドの重合という、大きく3つに分類できる過程があり、1960年代から研究が行われてきた。しかし、原始地球環境がどのようなものであったのが不明確な上に、時代とともにその知識も変わってきた。このため、各過程について様々な条件が設定され、その中で可能な経路が見いだされた。しかし、それらの環境が原始地球上に本当に存在し得たのか、また、各過程が広大な原始地球上でどのようにつながったのかは不明である。我々はこの問題に対する答えとして、約41億年頃に起こった後期重爆撃期の隕石衝突が地球上の異なる環境で起こった化学進化生成物を混合する役割を担ったという仮説を提唱した²⁹⁾。いずれにしても、最終的には原始地球のどこかでRNAの生成経路が連続的に起こり、その最も遅い経路を促進するという2遺伝子機構が作用しなければならない。実験室レベルでは、これまでに行われた化学進化反応をリボザイムが促進し得るかどうかを検証することが妥当だろう。

3.2 生命科学分野と環境分野への2遺伝子仮説の展開

そもそも2遺伝子仮説は、種々の階層にある生命システムを比較することによって導き出された。従って、他の生命システムの出現過程についても、この考え方は適用できる。例えば、真核生物の出現、多細胞生物の出現、社会性昆虫の出現、文明の出現などである。これらの階層の出現に適用することで、生命システムの一般則としての2遺伝子仮説を展開する

ことができる。生物進化における、真核生物の出現、多細胞生物の出現、社会性昆虫の出現などの出来事は、非常に古い時代に起こったことであり、恐らく遺伝子レベルでの研究が必要であろう。しかも関与する経路の数も多いと予想される。従って、これらの起源を解明するのはかなり難しく、多くの研究者の協力を必要とするだろう。一方で、文明は生物と似ているところもあるが、ずっと単純であると推察される。生命と文明との比較から導き出された2 遺伝子仮説の考え方を展開するならば、次のターゲットは文明の起源であるかも知れない。文明にはCCSIが存在する。文明のCCSIの起源は人間の持つ記憶でありそれを助ける言語などであろう。従って、人間社会が形成される過程で、既に文明のレベルに固有のCCSIのプロトタイプが存在したことになる。従って、文明の要素としてのCMIOがどのようにして形成されたのかを明らかにすることが文明の起源に迫ることにつながる。

一方で、比較生命システム論の視点から環境問題を議論する試みを行い、環境問題に取り組む際のいくつかの指針を得た。この観点からみると、2 遺伝子仮説の考え方を環境問題に適用する可能性も期待される。2 遺伝子仮説の考え方には、「技術体系の水準は最も遅れた技術（キーテクノロジー）で決まる」という考え方と通じるところがある^{30,31)}。すなわち環境問題の解決に向けて、最も性能が悪い技術や社会プロセスを効率化することと言い換えることができる。技術や社会プロセスは文明社会においてはそれらに関する情報が文明内に保持されているので、CMIOを構成する要素である。従って、最終的な環境問題が解決された文明の姿を想定し、そこに向けて技術および社会プロセスを要素化し、その最も非効率の部分の改良に取り組むことが解決策である。実際には、技術や社会プロセスの数は極めて多いので、しらみつぶしに検討することは難しい。また、どのプロセスが最も非効率であるかを定量的に評価することも難しい。定性的ではあっても環境問題につながる様々な人間社会のプロセスを要素化し、その中で最も効率の悪い社会プロセスを見いだし改善していけば、環境問題を解決する有力な手法となるだろう。例えば、比較生命システム論に基づけば、教育と組織的な研究は文明システムの行く末を大きく左右する要素であるから、2 遺伝子仮説の考え方に基づいても、教育と研究がターゲットであるかも知れない。

4. 結 論

本論文では、生命起源の2 遺伝子仮説にいたったこれまでの私の研究を概観し、2 遺伝子仮説を解説した。2 遺伝子仮説の考え方は、生命の出現だけでなく生命の歴史の大きな出来事に適用できる。すなわち、真核生物の出現、多細胞生物の出現、社会性昆虫の出現や、ひいては文明の出現にまで適用できるかも知れない。その中で特に文明の起源は比較的取り組みやすい課題であると推察される。一方で、2 遺伝子仮説から派生する考え方に基づけば、

環境問題の解決の糸口につながる可能性もある。これらの課題を整理して個々の課題に取り組み成果を蓄積すれば、新しい学問分野の創成につながるものと期待している。

引 用 文 献

- 1) C. Darwin (1859) *On the origin of species by means of natural selection*, 2nd Edition. (日本語翻訳版, 岩波文庫, 1963)
- 2) A. I. Oparin (1924) *Proiskhozhdenie zhizni*, Moscow Izd. Moskovskii Rabochii, Russia.
- 3) S. L. Miller (1953) A production of amino acids under possible primitive earth conditions, *Science*, 117, 528–529.
- 4) T. R. Cech, A. J. Zaung, P. J. Grabowski (1981), In vitro splicing of the ribosomal RNA precursor of *Tetrahymena*: involvement of a guanosine nucleotide in the excision of the intervening sequence, *Cell* 27, 487–496.
- 5) W. Gilbert (1986), The RNA world, *Nature*, 319, 618.
- 6) L. E. Orgel, F. H. Crick (1993) Anticipating an RNA world. Some past speculations on the origin of life: Where are they today? *FEBS J.*, 7, 238–239.
- 7) L. E. Orgel (2004) Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world, *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.*, 39, 99–123.
- 8) M. Eigen (1971) Self-organization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften*, 58, 465–523.
- 9) A. D. Ellington, J. W. Szostak (1990) In vitro selection of RNA molecules that bind specific ligands, *Nature*, 346, 818–822.
- 10) C. Tuerk, L. Gold (1990) Systematic evolution of ligands by exponential enrichment: RNA ligands to bacteriophage T4 DNA polymerase, *Science*, 249, 505–510.
- 11) K. Kawamura (2012) Drawbacks of the ancient RNA-based life-like system under primitive earth conditions, *Biochimie*, 94, 1441–1450.
- 12) K. Kawamura (2016) A hypothesis: life initiated from two genes, as deduced from the RNA world hypothesis and the characteristics of life-like systems, *Life*, 6(3), 29.
- 13) K. Kawamura (2002), The Origin of Life from the Life of Subjectivity, in “Fundamentals of Life”, Eds. by G. Palyi, C. Zucchi, L. Caglioti, 563–574, Elsevier, Paris.
- 14) 今西錦司 (1941), 生物の世界, 弘文堂.
- 15) 今西錦司 (1980), 主体性の進化論, 中央公論.
- 16) L. B. Halstead (1985) Kinji Imanishi, *Nature* 317, 587–589.
- 17) J. P. Ferris (2003) Review of *Fundamentals of Life*, edited by Gyula Palyi, Claudia Zucchi and Luciana Caglioti, Elsevier, Paris, 2002, paperback, 95 euro, *Origins Life Evol. Biospheres*, 33, 109–110.
- 18) F. Crick (1970) Central dogma of molecular biology, *Nature*, 227, 561–563.
- 19) N. Nemoto, Y. Husimi (1995) A model of the virus-type strategy in the early stage of encoded molecular evolution, *J. Theor. Biol.*, 176, 67–77.
- 20) K. Kawamura (2003), The relative importance of genes, subjectivity, and self-organization for the origin and evolution of life, in “In the shadow of Darwinism: Alternative evolutionary theories in the 20th century”, Eds. by G. S. Levit, I. Y. Popov, U. Hossfeld, O. Breidbach pp. 218–239, Fineday-press, St-Petersburg.
- 21) 川村邦男 (2005), 生命の主体性に基づく生命系の時間発展の理論——化学進化, 生物進化, 文化・文明の発展を生命現象としてみる——, *Viva Origino*, 33(1), 17–35.
- 22) K. Kawamura (2007), Civilization as a biosystem examined by the comparative analysis of biosystems, *BioSystems*, 90(1), 139–150.
- 23) K. Kawamura (2015) A biosystematic view of civilizations: Western Europe and Japan: before and after the industrial revolution, *Comparative Civilizations Review*, 73, 77–100.

生命起源の2 遺伝子仮説の展望

- 24) 川村邦男 (2014) 文明の生命システム論から見る地球環境保全——教育と研究活動の役割——, 人間環境学研究, 12, 65–83.
- 25) 川村邦男 (2015) 文明の生命システム論からみる地球環境保全——エネルギー・資源・情報の流入・流出に関する考察——, 人間環境学研究, 13, 53–69.
- 26) J. T. Sczepanski, G. F. Joyce (2014) A cross-chiral RNA polymerase ribozyme, *Nature*, 515, 440–442.
- 27) D. P. Horning, G. F. Joyce (2016) Amplification of RNA by an RNA polymerase ribozyme, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 113, 9786–9791.
- 28) R. R. van der Ploeg, W. Böhm, M. B. Kirkham (1999) On the origin or the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1055–1062.
- 29) K. Kwamura, M.-C. Maurel (2017) Walking over 4 Gya: Chemical evolution from photochemistry to mineral and organic chemistries leading to an RNA world, *Origins Life Evol. Biopsheres*, 47, 281–296.
- 30) 四ツ柳隆夫 (1999) 21世紀のキーテクノロジーとしての化学分析と化学計測, *分析化学*, 48(12), 1037–1041.
- 31) 四ツ柳隆夫, 石山純一 (2011) 着想の才能を引き出す化学系実験への期待, *工学教育*, 59, 24–30.