

# 生命の起原

NEC 基礎研究所  
飯田 一浩

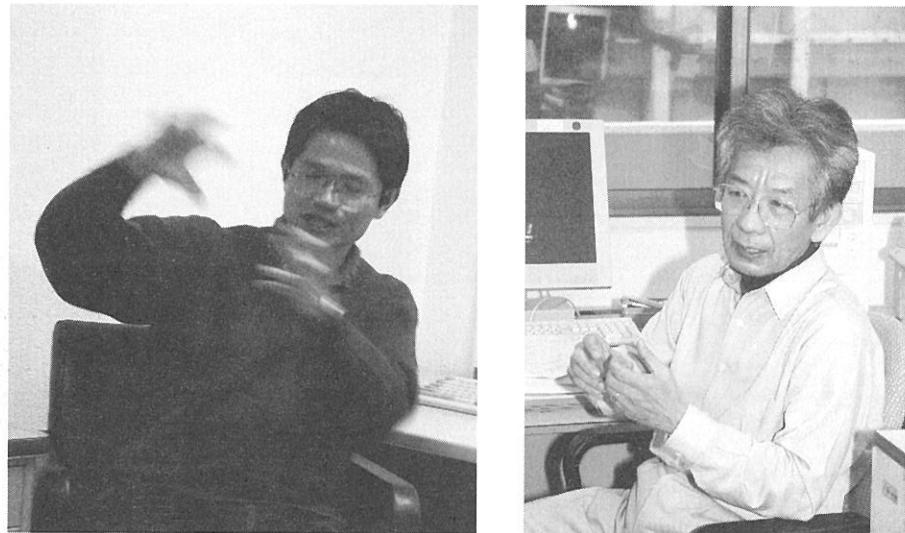


—— 「生命の起原」は飯田さんがリーダーですが、私もメンバーです。これは対談というよりも、むしろ放談という状態になるかもしれません、まず、その端緒から進めたいと考えます。私の知識は初学者的知識であって、生命の起原に興味を持って取り組み出したのは、導入書、あるいはポピュラーな書籍あさりからです。それに比べると飯田さんは、以前から学問として研究をやっていました経験があると思います。おおよそ、どのようにして生命の起原を提案したかという動機や、提案した頃の状況をお話し願います。

飯田 では、きっかけということで自伝的にはじめさせていただきますと、私の背景は生物です。生物の研究をしていると、カエルも犬も目はあるけれども、カエルの目は動くものしか見えないといった具合で、あまり普遍的とは思えないことばかり山ほど出てきます。もう少し簡単に理解できないかなあ、といつもそう思っていました。生物屋になる前は工業高専にて、物理や化学が好きだったのですが、そのうち生物の方が不思議なことが多く魅力的に感じるようになったのです。大学の博士課程を終える頃になって振り返ると、専門（私の専門は、動物の内分泌学でした）については多少「知識」はついたものの、生物を「理解」したとはとても言えないなあと思いました。その頃から、人生短いことだし理解したような気になって死にたい。それなら物理や化学のモデルで、できるだけシンプルに理解しようかと思うようになりました。そこで生物からちょっと離れて、もう一度物理化学モデルの立て方を勉強し直そうとポスドクぐらいの気持ちで某企業の研究所に入りました。当時そこには、実験屋から理論屋まで優れた人材が集まっていた、とても刺激的な場所でした。ようやく力が付いた頃、物理化学の方法で生物を理解した気になるには、何をやろうか考え直してみました。行き着いた先は、「生き物の仕組みは、始め存在しなかった」という事実です。存在しないところから、なんだかよく分からぬですが、今の生物ができ上がってきたということです。以来、生物が「無い」ところからでき上がってくる仕組みが分かれば、自己満足ではあります、生物とは何かが分かったような気になると信じています。

生物が無いところから生じてくる仕組みを研究する分野は、生命の起原研究と呼ばれています。ところがこの分野の研究者はとても少なく、一人で研究せざるを得ませんでした。その頃はバブルの頃で、企業の研究所には、ある意味大学よりも自由な研究環境がありました。そんな自由な環境の中ですら、研究を続けるのが難しいという状況でした。そこで会社の外へ出かけてさまざまな分野の研究者と情報交換をしていた中、筑波大学の有光敏彦さんにお会いました。有光さんは非平衡熱力学理論が専門で、その分野の考え方や方法論について指導していただくことができました。非平衡熱力学の記述方法は、プリゴジンらが仄めかしていましたが、生命への系変化を記述する助けになるように思われます。その有光さんから大学の研究者で生命起原の研究をしている人がいると紹

介され、湯川さんに初めてお会いしたのは5年前です。湯川さんに「総合研究大学院大学がグループ研究を始めます。その中に生命の起原を入れていますから、ぜひ参加してください」と言われました。私は当時、「生命起原の研究なんて、大学だってできないよなあ」と諦めムードだったので、即、飛び



つきました。私は湯川さんの背景については何も知らなかったのですが、話をしてみると物理で生命起原を攻める方法についていろいろなアイデアを持っていて、有意義なディスカッションができました。さらに湯川さんのグループ研究に参加したこと、異分野の研究者の方と知り合うことができ、自分と違う考え方につれアイデアが広がってゆきました。

残念なことにその直後、バブルがはじけ企業の研究所もリストラが進みグループ研究に携われなくなりました。最近は、バイオチップの開発をしていて、そっちが忙しくなってしまい、湯川さんとの共同研究活動も下火で苦労していますが、時間を工夫して研究を続けています。

—— 最近のことについて言及するに先立ち、私たちが「生命の起原」を始めた理由は「グループ研究」というプロジェクトがあり、新しい分野を開拓しようということで「これからは生命の時代だ」と世間では考えられていたことと、「複雑系」と言われているものもおもしろそうだ」と言っていたことがあります。「生命の起原」を提案したのは私ではなく、初めに提案したのは高工ネ機構長の菅原さんです。菅原さんには動機があり、ゲルマンの著書「クォークとジャガー」にも触発されたかもしれないですが、彼は素粒子や原子核の研究の行き着く先は、宇宙の始まりについての研究だとし、物性や化学、生物学の行き着く先は生命の起原だということで「生命の起原」をやろうと言い始めました。その頃すでに、彼はスーパーストリングの研究をやってきていましたから、宇宙の起原はすでに見えたと思ったのでしょうか。だから、生命の起原を研究しようとしたのです。私の動機に言及すると、以前は私は基研の「カオスとその周辺」グループに入っていました。メンバーであった金子さんたちは、その後複雑系を提唱し始めたのです。私は、要素還元派であるから複雑系などというものはあり得ないという立場でした。複雑系とはいったい何ぞやということで、だれでも考えることは生命です。複雑系とは、部分部分で理解できず総体として理解することがエッセンシャルであるような系ということであり、生命は部分部分で生きているわけではないのだから、全体として成り立っているとの理解でした。しかし、どのように複雑なものを全体として捉えることなどはとても不可能だと私は考え、最もシンプルな状態からどのように複雑になってきたかを捉えることが、還元派から言えば最も簡単であり、要するにばらばらにするのではなく、初めに戻つていけば、初めから生物ではなくても、生物らしいものから生物になっていくだろう、と。そのような状況で複雑なものを理解できるということもあり得るのではないかと考え、複雑な生命を研究するのであれば、その起原を研究することが重要だろうと考えました。生命の起原の研究には「生命とは何か」が必ず話題となりました。生命の起原は、あまりはっきりとした土台がないのでさまざまな人がさまざまな説を言うわけです。「生命の起原の研究をしている」と言うと、やや科学者としては奇異に

見えるところがあると考えられます。たしかに生命の起原の研究の歴史を見ていると、今でも私は少し怪しげなところがあったと思いますがどうですか。

**飯 田** 経験上、「生命の起原」という言葉を出すと、真っ当なサイエンティストではないと見られがちですね。生命が何かも分からぬのに、生命の起原だなんて、そんなふうに思われるようです。そもそも現段階で、生命と生命でないものの定義で確定したものはありません。「生命とは何か」ということだけについて議論する国際会議まで持たれたくらいです。その会議は2001年にヨーロッパで開催され、日本からも何人か参加しましたが、結論にいたりませんでした。物質と生命の境界はきわめて曖昧です。一つには、実物に基づいて定義したいけれども、その実体の切り分け自体、まず難しい。例えば、細胞イコール生命として良いのか、ウイルスまで含めるのか、という議論です。もう一つには、哲学的、あるいは倫理的な含みがあること。宇宙は生命体である、あるいは地球は一つの生命であると主張する人々もいます。その辺まで含めて、さまざまに議論されているので、事実上、「生命とは何か」に対する答えが出るような状況ではありません。

—— 生命の研究が危ういと言ったのは、そのように定義されていないことをやるときには、さまざまな人が自分の立場でさまざまに定義しようとし、また、さらに危ういことは、進化論などについて言及すると宗教などと抵触してくるなどの問題があります。しかし、生命の研究をするには、ある程度は「生命とは何か」を定義する方法を述べ、それから「この段階のこの箇所をわれわれは研究している」としなければ、堂々めぐりの議論となり「われわれはこう言った」あるいは「だれそれはこう述べた」と同じことを別の言葉にして繰り返すこともあります。現在、生命を研究している私が、飯田さんと議論していてたいへん触発されたことは、生命とは一言では言えないが、生命に必要な要素は存在し、その要素についての考え方というべきものがあるということが分かりました。定義ではないが、「生命とはこういう考え方である」ということに言及してください。

**飯 田** 私は、生命を定義するのは、まだまだ早いというスタンスです。ただし「生命とは何か」に答えることができなくとも、その答えに漸近していくのが科学の強みだと思います。サイエンティフィックな目で生物を見るとき、明らかなのは、生物が物質でできているシステムだということです。ただし物質でできたシステムは、いたるところに存在します。この机も物質でできたシステムだし、このテープレコーダーも、飛行機や自動車もそうです。では何故、ある物質系を生物と呼んでいるのかというと、その物質系に他と違う特徴があるからでしょう。例えば、特徴の一つとしてだれもが注目するのは自己増殖です。似たものが自然に増えるという性質。もう一つは代謝。代謝は、何かが始まったら、終わらないで持続している状態といった漠然としたアイデアです。もう一つは遺伝。生物は、きわめて多様な形質に進化していますが、形質を遺伝情報として受け継いでいく特徴があるから可能だったとも言えます。

多くの人に受け入れられている特徴といえば、今述べた三つ程度なのですが、良く考えてみると、そのどれもが曖昧で、ある物質系がその特徴を持っているのかどうかすら判定しにくい。例えば、ろうそくの炎は代謝している状態なのか、塩の結晶が成長するのは結晶面が自己増殖しているのか、などなど。私は、意味がもう少し明確な多くの特徴を挙げる必要があると考えています。それらを物理的属性と呼びますが、漠とした定義をブレークダウンして、意味が明確で、物質系がその属性を持っているかどうかを簡単に評価できるような特徴を使って、生物という物質系を区別しようと思っています。一つ一つは他の物質系と共通な特徴、例えば、「まとまって存在する」「有機物を含む」「散逸系である」といった特徴でも、それらの特徴を全部持っている物質系は、生物以外、あまりないかもしれません。生物の特徴の数が増えるほど、それを持っている物質系は、さらに生物に近い系になるでしょう。意味が明確な特徴を組み合わせることで、生物という物質系の輪郭を、まず、はっきりさせる必要があると考えます。そこで、それらの属性をすべて満たすものを探すと、生物しかあり得ないというような、クリティカルな属性を集めることを続けています。属性が集まると、今度はそれら一

一つの属性を満たすことができる物質系の構造というものを考えることができます。それを繰り返して、生物という物質系の特徴を明らかにしたいと思っています。

—— 60項目余りのさまざまな条件があると言いましたが、とにかく次々と条件を与えていくと、次々に抜け落ちることになり、最後に残るのが生命という方法ということですね。私が考えたことは、歴史性ということです。歴史の最初は、 $H_2O$ とか $CO_2$ とか $N_2$ とか生命でないものから、生命の構造体である分子へと進んでいったわけです。歴史的にはそれがアミノ酸になっていくと、アミノ酸が持っている性質は必ず生命の定義の中に入ってくることになります。それがつながって、タンパクが持っている性質も必ず生命の中には入ってくることになり、それで次にRNA、DNAとなる。そのように考えていくと、獲得する性質とは、60項目の性質のようなものと歴史性として結び付いていると言うことができます。

飯田 私も、そう考えます。

—— そのことこそがまさに生命が複雑系であるということであり、一言でいうような単純なことではなくて、次々と多くの性質を獲得していくということです。そういうものが積み重なった結果だから複雑なのであって、やはりそんなに簡単には定義できない。むしろ60項目くらいと言えるということは、あるいは幸運だったかもしれません。

飯田 歴史という切り口は、きわめて重要です。私は物質系が生物の属性を獲得してきた歴史を系統樹で表現したいと思っています。湯川さんは、たぶん、その歴史が始まる前にあった仕組みを解明したいと考えておられる理解しています。私は少し違います。まず、現在の生物をよく見て、その性質が出現してきた歴史を明らかにすることで、生物の基本的仕組みに迫るという立場です。現在、われわれは「生物」あるいは「生命」という言葉を使っていて、会話も成り立っていますよね。私はこの「生物」という言葉が、多数の物理化学的性質の集まり、ここでは属性と呼んでいるものの集まりに対応していると考えます。何かの物質系があって、その物質系に「生物」に対応する多数の属性が見出されるなら、その物質系は「生物」であると考えるわけです。そこで「生物」という概念を、より細かく見てみたところ、約60個の物理化学的性質の集まりに分解できることが分かってきました。今いる生物は、初めからこれら全部の属性群を持っていたわけではない。とすると、それらを獲得してきた歴史があるわけで、その獲得順序が分かれば、物質から生物への歴史が見えてくるはずです。

しかし「生物」を代表する属性群が得られたとしても、それらが獲得された順序、あるいは出現した順序に並べるなんて、普通はできないと思いますよね。ところがよくよく考えてみると、案外単純な理屈で、その出現順序が決定できることに気づきました。一番簡単な例で説明します。例えば細胞膜に関連して、「膜がある」と「閉じた膜がある」という2属性を並べるとします。「閉じた膜」以外にも「開いた膜」がありますが、「膜がある」ことに変わりはないので、「閉じた膜がある」は「膜がある」という属性に包含されます。実は、この包含関係から、各属性が出現した順序を決めることができます。ある属性を包含している属性は、必ず、包含されている属性が出現する以前に出現します。さっきの例で、もし、「閉じた膜がある」という状態が「膜がある」という状態が現れるよりも前に出現したとしますと、明らかに矛盾ですよね。2つの属性間の関係は、包含を含めて5種類の関係に分類できます。その関係ごとに、他の順序では出現し得ない特異的な出現順序があるんです。さまざまな属性同士を物理化学レベルで厳密に比較して、それらの属性同士が包含関係にあるのか、それとも他の関係にあるのかを調べてやると、先の特異的な出現順序に当てはめることで、属性が出現してきた順序が決定できます。まだ少ししか書いていないのですが、これを続けていくと最終的にはツリー状の順序の樹、「物質の進化系統樹」ができると思っています。属性の出現順序で書かれた物質の進化系統樹は、生命ができたあの生物の進化系統樹、単細胞生物ができて、それ

が多細胞生物化し、植物になり動物になったという、あのツリーに相当する樹です。生物の進化系統樹では、次々とバラエティーができ分岐していきますが、物質の進化系統樹では、多くの属性が一つのところ（つまり生命）に集約するような根っこ型のツリーができるでしょう。木の根のような逆さのツリーを描くことで、さまざまな物理的な背景を持った物質系が集まってきて、「生物」と呼んでいるものに集約していく、その過程を記述したいと思います。この樹は、湯川さんの意味での歴史もまた反映するに違いありません。

ところで、生命の起原を具体的に研究するには何から始めるかという問題があったのですが、それについて私が考えていたことは、生命は難しいからあまり複雑なことから始めても理解は困難であるということです。しかし歴史性という見方では、地球の始まりなどさまざまな始まりがあるから、「これが生命の始まりである」と言うためには、どこで、生命の特徴となるものをどのように獲得していったかというプロセスが重要になります。最初に考えたのは、生命としてその複雑さを獲得するために必要だった条件とは何かについて、自分で複雑になっていくことができる能力のあるようなもの、例えばそれはDNAや、タンパクと言われているような、生命において本質的なのは小さい分子の集合ではなく、長くなる必要がある。長いものを、われわれの手で小さいものから作り始めると、そのためには長い時間が必要になります。生命の起原を短時間で研究するためのよい方法はないだろうか。私たちが実験を始めたはるか以前には、生命の起原の研究で最も有名な「ミラーの実験」がありました。ミラーの実験とは、水素と水とアンモニアとメタンガスからなる原料を閉じ込め、そこで火花放電を行うとアミノ酸ができたというものです。それは地球環境で単純なものができることは分かったということで、それが複雑になるためにはどのようなことが必要か考えることが、われわれの研究目的でした。

飯田 背景を説明しますと、ミラーの実験はノーベル賞にはならなかったものの、たいへん有名な実験です。フラスコの中に当時予想されていた原始大気の成分と水を封入し、気体の方で雷を模した放電を繰り返すと、フラスコの底にたまつた水の中に、数種のアミノ酸が生成しているのが検出されました。この実験結果は、私たちの体を作っている基本的な成分、アミノ酸が、原始の地球上で無機物から作られたことを強く印象づけました。この結果に触発された人は多く、現在も、世界で研究されている実験の約半分はミラーの実験の発展型と言えるほどです。例えば、「放電よりも放射線を当てたほうが、アミノ酸の収率がよい」といった研究が精力的に行われています。湯川さんの指摘は「しかし、アミノ酸という材料があったとして、そこから次の一步はどう踏み出されたのか、分からんではないか」ということです。材料から先の世界は、人工生命の分野の研究者がシミュレーションで探っている程度です。実際、だれにも分からぬのです。あと半分の研究者は、今の生物を比較して、より原始的な生物の姿を推定しています。例えば、多くの種類の生物のDNAの塩基配列やタンパク質のアミノ酸配列を比較することで、現在の生物が持っているタンパク質やRNAが、大昔はどんな形だったかを推定する、それを合成してみるとといったことが行われています。湯川さんが指摘された研究対象は、それらの研究のちょうど境界線上で、空白になっている場所にあります。

私たちもその空白になっている領域について研究したいと考えましたが、それに先立ち、ミラーの実験と同じようなこともやっています。それは、ミラーの実験を始めとする多くの人たちの実験は、地球上に海ができ、陸も形成されて雷や干渉など現在ある地球的な環境においてそこで考えられる分子を使って作るということです。しかし、化学進化がいつ始まったかによって、地球的な環境は次々に変化します。地球環境の中で、化学進化が最も活発だったのは、まだ地球がどろどろの溶岩で覆われていた時代であると私は思います。どろどろの溶岩に覆われていたから、今は海水として存在する水も、その頃は大気中にあったわけです。だから、水も、炭酸ガスも窒素ガスも大気中にありました。しかも外からは紫外線にさらされ、いわば化学反応のるつぼになっていたわ

けです。そのような全地球規模で、化学合成が起こるだろうと考えられます。全地球規模の合成は生成物が数量的に圧倒的であろうと考えられます。そして現在、KEKで実験しているいくつかの実験の中には、水と炭酸ガスと窒素を高温・高圧の中で、紫外線を照射して反応させるというものもあります。私が生命の起原についての議論の中で疑問に思うのは、局所的に特別な状況のもとで化学進化が始まったとする考え方の人々が多いということです。例えば、隕石やすい星のかけらの中には、シアン化水素やシアン化炭素、青酸ガスなどとさまざまな物質が観測されていることから、宇宙において生成されたという人がいます。しかし、そのような低密度の環境で、偶然に生成されてもそれが大きくなり、生物、生命になると考へるのは、あまりにも楽観的です。とはいえ、このような考えは実験でチェックできるということも重要であって、その意味において、私はミラーの実験などについても、まだじゅうぶん組織的には行われていないと考えています。さてそこで、中間領域をどうすべきかということです。これこそは、われわれのグループの中心テーマだったはずです。私は今も覚えていますが、まだ工業技術院電子技術総合研究所と言っていた頃、その研究所の山口さんたちと、どのような特徴を打ち出していくかという戦略会議を持ちました。その際に、飯田さんが化学進化の系統樹的な考え方が出されたので、そこで、私はそうであれば系統樹の端から、逆にたどる実験をしてみようではないかと提案しました。要するに、作るのは時間がかかるでしょうが、分解するのは早く、簡単だろうというのが一つのアイディアだったわけです。タンパクを高温・高圧で分解して、そして最終的には窒素や水素、炭素になる以前にアミノ酸になり、アミノ酸になればそれはもう終了です。その途中、アミノ酸よりは大きいポリペプチドという、アミノ酸が数個、10個程度までを予想していましたが、そのような中間体が存在し、それが何らかの特別な働きをしているのではないかという考えを示しました。

飯 田 きわめて斬新なアイデアでした。

—— 幸運だったことには、メンバーは飯田さん以外は生命の分野の素人と言える人々で、当初は何かマユツバと心の中では見られていたかもしれません、話がどんどん進行し山口さんがリアクターの設計をし、グループ研究のお金をいただき製作しました。飯田さんもそのようなことを否定できないということを指摘してくれたので力づけられました。あの頃、東大工学部を出て名古屋大学の地球物理教室にいた光澤さんは、タンパク進化の理論的な数値シミュレーションをやっていましたが、私を訪ねて来て一緒に実験するということになり、地球物理と素粒子の理論家が、プロの飯田さんや山口さんの応援のもとに実験を始めました。それについて少し詳しく言いますと、まず問題だったのは、私たちが素人なので実験の方法すらあまり知らなかつたことです。例えば「HPLC」という、高速液体クロマトの使い方は、光澤さんがまず講習会で懸命に勉強してきました。私はほとんど時計係か試験管洗いなどの単純労働を担当し、光澤さんがさまざま機械を担当しました。実験の中で最も困ったことは、タンパクを、リアクターの中に放り込み、高温・高圧にしようとすると、ほとんどすべてのタンパクは110度から130度あたりで、ゆで卵状態、つまり白濁して塊になったことです。私たちのリアクターは、細いチューブや小型のポンプなどを使っているので必ずフィルターがあります。そのフィルターを詰まらせてしまい、うまく流れない。「これは困った」とさまざまな方法でやってみました。例えば、タンパクはSとSを結合させて、構造を保つようにしています。そのSS結合を切るようなことをしたのですが、だめでした。その次は、ジアスターーゼやさまざま消化酵素を放り込み、適当な大きさに切らなければならぬと考えて、切ってもまだうまくいきません。ほとんど考えられることすべてをやりましたが、ただ一つ、リボニューカレーゼだけがうまくいきました。なぜうまくいったのかよく分からないのですが、偶然にリボニューカレーゼを購入してあったのです。

飯 田 リボニューカレーゼはタンパク質と核酸の相互作用に興味があったので買っておいたのです。現在、生命起源の研究には二つの流れがあります。遺伝子が先にできたという説と、タンパ

クが先にできたという説です。リボニューカレーゼは、両者の橋渡しをするところに位置しています。タンパク質の酵素でありながら、核酸を切ったりつないだりする機能があり、私たちはその点に注目していました。とりわけ光澤さんは「リボニューカレーゼを買おう」と始めから言っていました。

—— 実験ではリボニューカレーゼだけが110度、120度、130度と温度が上昇しても白濁せず、そして何とそれが250度、280度まで白濁しませんでした。高温・高圧になると、すべてがばらばらに分解します。温度の上昇とともにばらばらになる様子は、紫外線吸収の様子からも目に見えるようになりますが、どのような質量のものができているかということを、調べる必要があります。そこで、総研大のMALDIというTOFマススペクトルメータを使ったのですが、これは、いわゆる田中耕一さんがノーベル賞を受賞した質量分析器です。実はその器械は、田中さんの作った島津製ではなく、イギリス製で7千万円の上等なものです。MALDIという方法は実は田中さんによるものではなく、ドイツの研究者がその方法について論文を書き、その中で田中さんが日本の研究会でこういう話をしたのを聞いたと引用したのです。正直な研究者の社会にいた田中さんはたいへん幸運だったと言えます。それともう一つは、島津製作所のいわゆる人事管理がきっちりしすぎていなかつたということです。すぐにお金につながらない研究をやる人でも雇っておくことができたということで、人事管理が良くなるとそのような人を置いておくことが難しくなります。バブルのときだから、あんなことができたと考えています。

**飯 田** 学問の本質を突いた考え方だと思います。

—— ところで、「タンパクワールド」と「RNAワールド」は、大きな問題です。それと生命の「パンスペルミア」という、宇宙起源説あるいは地球外起源説という仮説があり、これらはアメリカやヨーロッパで流行しています。パンスペルミアはあとで、右手・左手非対称の話として取り上げたいと思います。そこで、RNAワールドについて、なぜRNAワールドが海外で優勢なのですか。

**飯 田** チェックの発見の影響が大きいと思います。RNAはどの細胞にもあるのですが、ゾウリムシの研究をしていたチェックが調べたRNAは、自然に2つに切れて小さくなるという、変わった性質がありました。よくよく調べてみると、そのRNA自体が自分を切る酵素の役割を持つことを見つけました。酵素機能は、通常、タンパク質が担っていてDNAやRNAはそのタンパク質のアミノ酸配列を決める情報の担い手であるという考え方方が一般的でした。いわゆるセントラルドグマです。DNAの持っている塩基配列としての遺伝情報がRNAの塩基配列に転写され、その配列がタンパク質のアミノ酸配列に翻訳されて酵素などの機能を持つタンパク質ができると考えられていましたから、たんなる情報の担い手であるRNAが酵素として機能するということが分かって、世界中が驚いたわけです。情報の担い手でありながら、自分を合成できるようなRNA分子があってもおかしくない、そういうRNAが増殖している世界がRNAワールドなわけです。

では、どうしてRNAがタンパクに先んじてRNAワールドを作ったと考えられたかというと、タンパク質が熱に弱いからです。湯川さんは先程、250度まで分解しないタンパク質もあると指摘されました。タンパクは普通100度になる前に凝固したり変性してしまいます。原始の地球は、現在よりもずっと熱かったと考えられていますから、タンパク質は変性してしまい機能を持ち得ないだろうと考えられたわけです。これに対して核酸は、歴史的に熱に強いと考えられています。なにしろ細胞から遺伝子を取ってくるとき、熱をかけてタンパク質を働かなくして核酸をとってくるぐらいですから、高温な地球環境でも核酸は生き残る可能性があると思われていました。さらに、核酸は細胞分裂の際に必ず複製されます。それで核酸のほうが先に核酸ワールドを作ったという説が出てきたわけです。さらにチェックの発見を考え合わせると、生命以前の段階では、酵素反応や代謝をしながら自己複製するような核酸分子がたくさんできていた、その後、その核酸分子がタンパク質を

利用し始めたのではないかと考えられるようになりました。地球がだんだん冷えてきて、タンパク質が変性しないような温度になった頃、自己複製するようなRNAがタンパク質をうまく利用して、「もう私たちは少しきついから、おまえらが働け」とバトンタッチしてできたのが生物の代謝系じゃないかというわけです。

では、RNAは本当に熱い場所でできたのかというと、最近疑問がでてきています。RNAの材料はリン酸、塩基、それとリボースという糖ですが、リボースや塩基などの大きな分子は自然には生じにくいことが挙げられます。それらが安定に存在していて、しかも特定の形で結合しないとRNAの材料であるヌクレオチドはできません。さらに、そのヌクレオチド自体、熱に弱いことが分かってきました。大阪府立大の川村さんが熱心に調べていますが、200度ぐらいで、気圧・水圧も少し上げて地球環境を模したようなところにヌクレオチドやジヌクレオチドを入れると、想像よりはるかに早く壊れていくことを示しています。川村さんは、そのことがRNAワールド仮説を否定するものではないとしています。

RNAワールドとは別に「タンパク質ワールド」ということを称えている人たちもいます。タンパク質は熱に弱いが、ペプチドといわれる程度の短いものなら、かなり高温な環境でも分断されないで維持できるケースがあることが分かってきました。タンパクの材料であるアミノ酸は、小さな分子で、きわめて簡単にできることができミラーの実験でも知られているし、原始地球上で想定される環境でなら、大量に合成されたと推察されています。そのようにできやすく、圧倒的に多いと推定される材料が生命の最初の材料として使われたと考えるのが自然だというのが、「タンパク質ワールド」が提唱された理由の一つです。

—— 核酸の原料も、弱いだけではなく、リボースとリン酸などきわめて量が少ないですね。

飯田 できにくく、地球上に存在した量も少なかったと考えられています。ミラーの実験ですとアミノ酸と比べると圧倒的にできにくく、3桁も4桁も少ない収量です。

—— そういう事実からも、少なくともわれわれのシナリオでは、タンパクのほうが先にくるべきものだと考えています。

飯田 原始地球環境にも高層大気から海底火山までさまざまなバラエティーがあり得るし、地球そのものも段々冷えてきますから、タンパク質が機能を維持できる状況が出現した可能性はあります。RNAワールド仮説、タンパク質ワールド仮説に加えてもう一つ、RNPワールド仮説ということがあります。タンパク質と核酸が協調しながら成長してきたというアイディアです。RNPのPはプロテイン、RNはリボヌクレイックのRNです。実験でなく、理論面から生命の起原を研究する人たちの中には、タンパク仮説を支持する人が多いように思います。

—— 私はニュートラルです。自然環境の中で進化するときには最も多く、あるいは最も当たり前のものがたくさんあって、その当たり前のことが中心的に起こることは当然なのだと考えます。だから地球の変化において、それぞれの時点でどういうことが最も可能だったかをまず調べてみるのが自然で、最も当たり前のことまず除外しておいて、あり得ない可能性から始めることは合理的ではないと私は考えています。

飯田 RNAが工学に利用されたことも挙げられます。RNAは遺伝子工学で使われています。進化分子工学とも呼ばれていますが、特定の物質に結合したり酵素作用を持つなどの有用な性質をもつたRNA分子を得る方法があります。RNAは塩基の配列が変わると、その構造も変化します。酵素を使ってRNAを増殖させることができるのですが、そのときRNAの塩基配列に突然変異が起こるような条件下で増殖させてやります（正確には、RNAをDNAに逆転写したDNAを得て、そのDNAを

DNAポリメラーゼで増殖させ、増えたDNAの塩基配列を、RNAポリメラーゼでRNAに転写するという多段階の操作でRNAを増殖させます)。その過程でいろいろな変異を持つRNA分子ができてきますが、それらの中から特定の物質に結合するようなRNAだけを、その物質を釣り針として釣あげて、それに結合したRNAを再度、突然変異が起こるような条件で増殖させ、残りは捨てるということを繰り返していきます。つまり自然選択の代わりに、特定の物質に結合するという性質で、人為的に選択していくわけです。すると最後には特定の物質に強く結合するRNA分子、アプタマーが残ります。バラエティーを生じた中から環境に適したものが生き残ることで進化するというネオダーウィニズムの考え方を、RNA分子で試すわけです。そして、これが実際うまくいくわけです。このように選択淘汰による進化が可能なことが、バイオテクノロジーで実証されていることもあって、どちらが主流かというと、今のところ軍配はRNAのほうに傾いていると言えます。

—— 研究者の多さからするならば、RNA派が多く、それはやはり応用にもきわめて近いことがありますね。

**飯田** 応用が見えるということも重要で、最近は、応用が見える研究に予算が付くようです。話を戻しますと、RNAワールド派の人たちは、先の進化分子工学の手法を使ってRNAの塩基配列を複製するためのポリメラーゼ活性を持つRNA、いわば自己複製RNAというべきものを探しています。今では自分の塩基配列を鋳型として、数残基を連続して合成できるRNAが見つかっています。ただし、このようなRNA分子が人工的に作り出せたとしても、RNAワールドが存在したかどうかを判断する根拠にはならないと思います。

—— 何々ワールドということについては、生命の定義にもよると考えられます。太古の昔に、現在のタンパクと同じぐらい長いものが存在して、まずそれがRNAを作り始めたなどとは、とても考えられない。そこで、私はこう考えました。RNAワールドとは、RNAが主であるがアミノ酸は多量にあり、ペプチドもすでに存在するというような状況であった、と。しかし、「生命の定義に情報というべきものが入ってくることは、生命にとってはきわめて重要であった」と主張する人たちがいて、それに従うと情報を持てない集合ではまだ生命でないから、RNAとは生命にとってはきわめて本質的な情報が獲得でき、中心的な役割をした化学物質だったと考えられます。ところで飯田さんが指摘した、あのような温度においてタンパクが機能を持つことができないということについては、私たちが実験していると、はたして機能を持っているかどうか分からぬものの、実験で生成されたのはアミノ酸6残基から7残基のポリペプチドでした。きわめて興味深いことは、ずいぶんと大胆な推測かもしれません、6個の疎水性のアミノ酸が連なっているのを、これは何だろうと私は考え、当たり前のことであります。疎水性だから表面を小さくして、なるべく水と触れ合う部分を少なくしようとしているわけです。そうすると熱い水の中で、最後まで残るのはその疎水性の塊であるはずです。したがって熱い温度では、長い時間、長寿命でその形を保存できるのは疎水性のチェーンの長いものです。そこで懸命にタンパクのデータベースから、どの程度の長い疎水性の鎖の部分があるかということを探してみたところ、容易には見つけ出すことはできませんでした。

**飯田** 膜貫通タンパクには、疎水性の部分が多量にあります。

—— そこで興味深いのは、今述べたようにアイディアの一つとして、熱い場所で構造を保持したいと考えるならば、まず疎水性を持つものを集めるということです。疎水性は、タンパクの働きの中でもきわめて重要なものです。というのは、酵素反応するということはある空隙があり、そこに何かきたときにつなげたりはずしたりする機能ですが、こういう疎水性のものがあると、水をはじき出すだろうと考えます。要するに、タンパクに対し水霧囲気の中で脱水反応をさせたいわけです。それにより、次々と長いタンパクを作りたいわけです。その際に、疎水性の構造体があることは脱水反応には好適であると考えています。

飯 田 タンパクワールドの話では、湯川さんはその新しい仮説を実証しようとされていますが、タンパク質ワールド仮説とRNAワールド仮説との比較で、もう一つ忘れてならないことは、RNAが遺伝情報を担うということです。ここで言う遺伝情報とは、塩基配列として量子化された情報です。RNAの塩基配列は、現在はDNAを介して複製されていると考えられるわけですが、片方の鎖を鋳型として相補的な鎖が合成されることで、合成された娘鎖にもとの鎖の塩基配列情報が受け渡されます。タンパク質の場合、RNAやDNAのような直接的なコピー現象は発見されていません。そのためタンパク質ワールド仮説には、RNAやDNAの塩基配列のように量子化されていない遺伝情報もあり得るという説もあります。その中に、光澤さんもシミュレーションしていたカウフマンの自己触媒集合という説があります。自己触媒集合とは、ある分子集団を構成する要素分子同士が連携して、その分子集団の要素分子自体の合成を促進することによって、その分子集団のボリュームと構成要素のバラエティーが増すような分子集団を指します。カウフマンは、短いペプチドでも多数集まると、その中に長い鎖が生成されるような自己触媒集合を形成し得ると考えています。彼は、分子集団を構成するペプチドの一つが、他のペプチド分子同士がつながったり切れたりするのを、ほんの少しでも促進したり抑制したりする触媒作用を持つだけで、そのペプチドが触媒してつなげたペプチドが次のペプチドの合成を促進し、まわりまわって、最初のペプチドの合成が促進されるといった互助的なネットワークが、高い確率で生じることを示しました。ここで注意したいのは、そのような互助的なネットワークを構成し得るペプチド集団は、特定の構成比、例えば、ペプチドAは10に対してペプチドBは5の濃度比といった構成比を保って増殖していくということです。これは要するにRNAやDNAで塩基配列という量子的な情報が伝達されるのに対して、構成比という連続的な情報が遺伝していると考えて良いのではないかということです。自己触媒集合は、ペプチドだけでなくRNAにも適用できる仮説ですが、鋳型合成が無くても情報の伝達が可能という点でタンパク質ワールドを考えるに向いています。理論家の中にはこの説を好む人が多いようです。

—— カウフマンの説を聞いて私が不満なことは、そういうことがあり得るとはいうのですが、具体的にそれがどのようなときにあったか。例えば、彼が化学反応式を書いてみて「さあ、これだからできる。例えばこれがそうだ」と一つでも例があれば説得力がありますが、現実にはきわめて楽観的であるだけです。そこで、物理学や化学などのマテリアルサイエンスは、やはりモノが出てこなければ、それはただの作り話でしかないのであって、作り話はいわゆる理論ではありますが、それがモノと対応してやっと科学になると考えられているところがあります。カウフマンの説は、それはそうかもしれないですが、自己複製というものがあるならば、「これがそうだ」と一つでも出してほしいものです。

飯 田 湯川さんが指摘されてきており、理論を作ったらこれを満たし得る物質のセット、要するに系の候補を挙げることができることが重要だと思います。私は、言い換えれば「理論上、この物質のセットでしか生命らしい振る舞いは観測できない」という候補を挙げができるまでつきつめていける理論でないと、価値がないと考えます。湯川さんの指摘はそういうことだと理解しています。

—— 高エネルギー物理学が実はそうです。理論がたくさんありますが、例えば「小林・益川理論」は、トップ・クォークの存在もあり、 $B\bar{B}$  (ビーバー) ミクシングという現象があり、ある実験をしなさいと具体的に示唆できるような理論です。そしてその理論は、まだノーベル賞を与えられていないですが、述べられていることは実験がその理論を正しいと検証できるわけです。だから、ただこんなことは確率としてあり得るとするだけではなく、「それを、どれとどれでかくのごとくやれば、このような結果となる」と断言できるものでなければなりません。ノーベル賞をもらうためには、それを実験で示さなければなりません。

飯 田 「このセットなら、そうなる」と予測できなければならぬ、そういうことです。ところで「量子的な」という言葉について補足させていただきますと、私は、生物学から見てあるいは生化学から見て「量子的な」とは、それ自体をさらに小さく壊すと意味がなくなるものだと思います。また違った種類の量子的な存在、例えばDNAの4種類の塩基を並べることで膨大な種類の組み合わせが、曖昧さ無しに想定できるようになります。「量子的な」とは、このような明快な組み合わせが実現できる性質があることも同時に指します。例えば、DNAはそれを分断してもDNAですが、それを構成する塩基を分解してしまうとDNAとしてのアイデンティティーが失われます。塩基のように安定で、それに似たものが存在して組み合わせを想定することができるようなものです。もっとマクロな見方、分子でなく生物を扱う立場では「量子」とは、例えばここにおられる湯川さん、マクロスコピックに見たところ明らかに量子です。どこかでツツンと切ってしまえばもう意味がなくなってしまうから。しかも湯川さんとその仲間を組合せることで大学という機能が生まれ、さらに大学同士の組み合わせがある。そのような性質を持っているものを量子、いわゆるマクロスコピックな量子と考えます。それを壊してしまったのでは、もう意味をなさないものです。

—— レゴブロックのような基礎部品みたいなものですね。ところで話題を戻して、タンパクワールド、RNAワールドについて考えましたが、われわれは中間的な問題もやっていました。

飯 田 モデルや理論について要求される厳しさというのは、先程湯川さんが指摘されたとおり、要するに予測能を持つことです。さらにもう一つ湯川さんが指摘された重要な点は、物質で示すということですね。

—— 実験で検証できるということです。

飯 田 物質でやりたいということには二つの意味があります。一つは、本当に理学的な意味で突き詰める。真実であるということを突き詰めるためにモノでやる。もう一つは、一般に受け入れられなければならないということです。

—— 理論だけではやはり一般受けはしません。ストリングなどやっていても「何だ、これは」という反応だけになり、向こう側の世界で仕事しているという感じで「勝手にやっていなさい」ということになってしまいます。私たちは今、タンパク質やアミノ酸の研究をやっていて、素粒子の研究者からも何かおもしろそうと、耳をそば立てられています。なにしろアミノ酸は高校で習いますからね。ストリングは高校で習いません。

飯 田 物質で示されると、理屈は分からなくてもネイチャーに掲載されたりします。ですから、物質で示すというのは是非やるべきことではありますが、私は故あってその目標を追いかけるのは止めています。自己満足のために一人で研究していくのなら、実験に十分な予算も時間もないという現実があります。つまるところ理論で攻めるしかないが、少なくとも、だれも考えつかなかつた切り口で攻めたいと考えています。

—— 現在、私たちが進化の研究が正しいと判断する一つの要素として、重要だと考えているのはキラリティーの問題です。なぜ地上の生物のタンパクはキラリティーが左手のアミノ酸だけなのか。あるいはDNA、RNAについてはリボースが右手だけしか使われていないのはなぜか。右左が対照なのが普通なのだから、これは生命のきわめて生命的であるがゆえにそうなったということで、私はこれを物質的に証明することによってようやく、私たちは生命を扱っているということが実感できると考えています。RNAの情報伝達能は私たちの次の研究対象となるものの、今はそこまでいかず、なぜ左だけかの問題を先に考え、実験しようとしています。まず、それについて何らか的一般的なコメントがありますか。

飯 田 生体分子の場合、L型、D型という光学異性体の偏りがあります。それがなぜ生じたのかは、長く議論されてきました。野依良治さんは、一方の異性体だけを増やすキラル触媒を作られましたが、キラル触媒が原始の地球上にあったとは考えにくいですよね。最近注目されているのは、宇宙線の偏光です。光にはP波とS波の位相差で、左巻きと右巻きの光があり、それを円偏光と呼びます。宇宙には中性子星のそばなど円偏光した宇宙線が多い場所があるらしいのですが、そこに有機物を含んだ彗星や宇宙塵が飛んでいくと、彗星の表面にきわめて高エネルギーの宇宙線がバシッと当たるときに円偏光の方向を反映したL型、D型どちらかの成分がわずかに多くなる。その偏ったものが大量に地球に降り注いで生命の材料として使われたとすると、スタート地点ですでに異性体の比が偏っているわけで、それが現在も維持されているという説です。地球が誕生して最初の2億年の間に宇宙から地球に降り注いだ炭素の量は、今地球上にあるすべての炭素の数十倍の量だったという試算もあるくらいで、宇宙からきた既に偏った有機物が使われたとしてもおかしくないと考えられています。

—— そのとき不思議なことは、宇宙線が当たらない陰のほうではLもDも半々ずつ存在し、Lのほうが多いのは当たった場所であり、さらに当たった側も100パーセントがLになるわけではなく、少しLが多いということです。明らかに差が出ると断言していますが、これはたいへん不思議に聞こえます。そしてさらに、地球上にくるときにはきわめて高温になります。普通は高温になるとラセミ化はきわめて速く起こり、そこで差があったとしても、すぐに高温である間にラセミ化してしまい同じ程度になるのではありませんか。

飯 田 右巻き、左巻きのどちらの円偏光を受けるかは、宇宙全体で見るとフィフティー・フィフティーじゃないかという反論はあります。それと違う、もう一つの説は、D型、L型が半々のラセミ状態だったとしても問題ないという説です。この説は、自己触媒反応系、要するにセルフフィードバックと、偶然の選択、そしてクリスタライゼーションとに基づいています。どういうことかといふと、まずD型とL型が両方あっても良いが、きわめてわずか、どちらかが多かったとします。そのようなごくわずかな偏りは、局所の熱ゆらぎでも生じています。問題はこのごくわずかなずれが、大きく拡大されるかどうかです。最初の偏りが拡大されるような現象は、構成要素が自分と同じ要素の合成を促進するような自己触媒反応で見られます。前述のクリスタライゼーションとは、さらにその自己触媒反応の結果生じた異性体が、他方の異性体へ戻ることがないということです。最初に熱ゆらぎや偏光紫外線などの影響で、L型がほんのちょっとだけ多い状態ができ、同時にL型が集まつた結晶ができたとします。そのL型の結晶が自己触媒だったとすると、近くにあるL型を吸いよせて次々に増えていくわけです。同じようにD型の結晶もできますが、材料の取り合いになると、最初ほんの少しだけ多かったL型の結晶が勝ち残るわけです。まだ結晶に取り込まれていない分子は、自然にラセミ化してL型とD型を行ったり来たりしてますからD型の分子ですら、L型の結晶にどんどん吸い取られてしまうわけです。

—— 私たちはその仮説を数値シミュレーションしラセミ化も想定したところ、Lが多くなると、LD反応とDL反応の確率が同じだとすると、反応のスピードはLからDに行くときにはLの密度がかかるため、いつか平衡状態になります。

飯 田 違います。結晶になってしまっている分子は、ラセミ化しません。

—— 結晶化を入れると、一度なってしまったら元に戻らないということですね。

飯 田 すべて液層なら、湯川さんの指摘のとおりになると思いますが、結晶のような固層だと話が違ってきます。

—— しかし、普通のタンパクは常温でもラセミ化を少しずつしています。だから、もっと高温

にある物質ですと、より速くラセミ化するはずです。だから、われわれの細胞は結晶がそうであるほど、ラセミ化を受けつけないわけではないはずです。

飯 田 いいえ、それはラセマーゼという酵素を使わないと検出しづらいくらい、ゆっくりとしたものです。

—— 酵素がそれをできるというくらいだから、やはり私は温度によると考えます。

飯 田 確かに温度によります。

—— 現在、ラセミ化ができているということは、地球の初めの頃から、ポリマー化して長くしなければならない。そのためには温度が高くなればならない。しかし、温度が高いとラセミ化は早く起こる。それがつらいところです。

飯 田 そのあたりは確かによく考える必要があります。先程からクリスタライゼーションとか、結晶と言ってきましたが、ここで言うクリスタルとは高分子のことです。高分子に取り込まれてしまった分子は、2次構造、例えばらせん構造などをとて安定化する結果、遊離しているものよりもラセミ化しづらくなります。つまり安定構造をとった高分子は、ある意味固層であり、溶液中とは違う状態になるので、一度クリスタルになるとラセミ化しにくいという説があります。タンパク質はさまざま格好をしていますが、その一部だけを見ると2次構造を作っています。2次構造の主たるもののは「らせん（ $\alpha$ ヘリックス）」です。DNAも二重鎖の「らせん」を作ります。らせん構造では、水素結合を介して鎖内の相互作用が強く働いてコンパクトになり、熱に強く壊れにくくなります。そして、らせんは、巻き方が自分と同じ構成要素がつながることによってのみ、成長し、維持されます。L方向に卷いたらせんはL型のモノマーを使って伸びてゆき、D方向に卷いたらせんはD型のモノマーを使って伸びてゆきます。L、Dの方向とは右まわりのネジか、左まわりのネジかという関係です。らせんができると、光学異性体を水系から隔離して、先程湯川さんが指摘されたラセミ化を起こりにくくします。

—— 基本的に理解が欠けているのは、なぜLだったかということです。Lである必要はなくて、Dでもよかったわけです。それも程度の問題で、地球全体がすべてLにならなければならないのか、80パーセントがLで、隠れて住んでいる生物の中にDがいたりして、そんな程度の話でないのはなぜかです。同じような問題が素粒子論でもありました。なぜこの宇宙の中に反物質の宇宙がないか。その論理を立てようとしているのです。なぜLしか存在しないのか。弱い相互作用で左のほうが10のマイナス20乗エレクトロボルトぐらいエネルギーが低い計算が具体的にあり、そうすると、ボルツマン分布では左のほうが右よりもほんの少し、だいたい10のマイナス20乗です。ところが1リットルの中にある分子の数は10の23乗です。そうすると1リットルの中で左のほうが千個ぐらいは多いことになります。

物質・反物質の非対称性も、これと同じ程度の差です。しかし、現在は物質だけになっています。これはどういうことが起こったのか。ビッグバンが起きたとき、物質と反物質が同時にできたのです。きわめてエネルギーが高い温度のときには、プロトンがアンチプロトンになったり、アンチプロトンがプロトンになったりするバリオン数非保存の反応が起きて次々に移り変わります。移り変わるのが、プロトンがアンチプロトンになるよりも、アンチプロトンがプロトンになるほうが少しだけ多い。生物の右利き・左利きの問題は、トンネル効果の問題ですが、このポテンシャルを作っているのは「電磁ポテンシャル」であり、そこに弱い相互作用のわずかな差があって左のほうが右よりもやや低くなっていて、ラセミ化すると左利きのほうがわずかではありますが、いつも増やされていると考えられます。この世の中は少しだけ左が強いのではないかと考えられています。

飯 田 左利きの独り勝ちが必要ということですね。

—— 宇宙のプロトンとアンチプロトン数について述べると、プロトンはプロトンで世の中を構成し、アンチプロトンはアンチプロトンで反物質の世の中を構成します。プロトンとアンチプロトンが出会うと、ぶつかって光になり、光になってもエネルギーが大きいとき、または、プロトンとアンチプロトンになる。宇宙が膨張しているから光も冷やされていてエネルギーが低くなり、ものはやプロトンとアンチプロトンにならない光になったとしたら、アンチプロトンはプロトンにどんどん食われていくことになる。お互いに食い合いをして残った10のマイナス20乗分でもじゅうぶんな数になります。現在はこのように、プロトンとアンチプロトンが食い合って残ったプロトンが構成する世界と、プロトンもアンチプロトンも作れないエネルギーの低い光で満ちています。

飯 田 なるほど。

—— そこで、タンパク質の話に戻ります。私たちの仮定として、左は左で安定して伸ばし、右は右で安定したものを伸ばします。しかし左と右が結合し、規則的なを作ろうと考えても、左巻きのらせんがラセミ化して、急に右巻きになる。そうすると、自分で自分をつなげるようなことが起こります。そうすると伸びなくなる仮定なので実験する必要があります。私たちはこれをグリシンで実験しましたが、グリシンは右も左もないでらせん状に伸びていくのも、リングになったジケトピペラジンと同じように起こります。ただ、どちらが安定かを温度の敏感さで見ると、ジケトピペラジンは温度が高いときにはグリシンと同じ程度の活性はありますが、温度が低くなるとまったく活性がなくなり、きわめて安定になります。そこで考えられるのは、温度が高いときには、左も右もほとんど同じで少しだけ左が多いだけですが、温度が低くなると右と左が混ざったラセミ状態は不活性化するということです。したがってタンパクは、左と右が結合してきわめて安定化した部分と、残りの左だけで伸びた部分とで構成されていると私は考えます。さらに、左と右で一度安定化したものはもう一度、温度が低くなると左・左とか右・右に戻るのではなく、分解して炭酸ガスなど左右とは関係ない物質になってしまっていると考えられます。要するに私は独り勝ちしないと、一方的にはならないと考えています。飯田さんの指摘の問題は指数的に伸びていくことは確かです。LもDも指数的に伸びていくのですが、ただ始まりが少し違うだけです。

飯 田 要するにラセミ化を介して、材料が片方に吸い取られることがあるか、もしくは湯川さんが指摘されたように材料が不活性化して失われていくということですね。

—— そうです。私たちの考えは、実験で検証することが可能なのでそれを実行しようと考えています。宇宙論的生命学あるいは素粒子論的生命論ともいうべきものです。これこそ、私たちが今までのグループ研究で最も懸命になって予算を調達し、光澤さんや、最近では隕石の中のタンパク質や、アミノ酸の存在を分析している筑波大学の薮田さんと研究しています。ところで今までに、隕石の中からアミノ酸は1例だけ見つかったということですね。

飯 田 正確には、隕石そのものからアミノ酸が出てくるのではなく、隕石が加水分解されたものの中からアミノ酸が検出されます。隕石の中にあるのはアミノ酸のもとになるような分子で、亀の子が連なった変わった形の分子らしいのです。この話に関連して、横浜国立大学の小林憲正さんが「ガベージワールド仮説（ゴミ・ワールド仮説）」を提唱しています。これはとてもおもしろい説なので紹介します。

隕石の中には、さまざまなかたちの有機高分子がたくさん入っているらしいのですが、隕石が地球に降り注ぐときに、水圏に落ちると加水分解して、その有機高分子の一つの部品がブツンと切れてアミノ酸の「ようなもの」が大量にできる。それらの物質群の中で、先程湯川さんが述べられたような系や、あるいはカウフマンが説明しているような一人勝ち的、自己触媒的系ができてきたのではな

いかと小林さんは考えています。言い換えれば、最初はアミノ酸が存在したに違いないと、アミノ酸にだけ注目して考えることは少し不自然で、隕石が運んできた、素性が不明な分子を最初の有機分子としてとらえ、その加水分解ができる、さらに素性不明な物質の中からアミノ酸のような物質が選択されていったのではないかということです。

—— われわれの考察から完全に欠如していることは、いつRNAやDNAができたのか。生命の重要な部品であるRNAやDNAは私たちのシナリオの中では、どうなっているのかという問題があります。私が予想していることは、まず左手のアミノ酸で左手系のタンパク質が主役となっているということ、核酸の中のDリボースが主役となっているということは、関連しているのではないかと考えられますが、そうではありませんか。

飯田 私はそれを深く考えたことはありませんが、当然のことだろうと考えます。なぜなら、高分子同士が相互作用する際には、らせんが巻く方向といった立体構造上の特徴に応じて作用の中身が変わらうることは容易に想像がつくからです。

—— この問題はきわめて重要で、アミノ酸かリボースどちらかがどちらかを誘発したということになっているのであれば、私がアミノ酸が初めに始まったというのは、L-アミノ酸で作った複合体のエネルギーのほうが、D-アミノ酸で作った複合体よりもエネルギーがわずかに低いと出ています。RNAでDリボースとLリボースのエネルギーの計算や、RNA説の人で私たちと同じようなシナリオを主張している人がいるのか知りません。

飯田 私はDとL、タンパクやRNAについてそれほど深く考えたことはありません。それらは、いずれにしても、一度クリスタライゼーションが起こってしまえば、それに都合のいいものしか選択されなくなるからです。私は細かい場所に踏み込む前に、鳥瞰的に見ることにしていて、例えば湯川さんが実験で作られたものを評価する立場に立ちたいと思っています。そういうわけで、「湯川さん、これはこういう条件で生物に近いとは言えますが、これは少し生物の系統樹からはずれています」と指摘できるような基準作りの方に興味があります。

—— それは、あまりにも理論的すぎます。飯田さんとはこのあたりで意見が合わなかったことを見ると、そういう意味では私のほうが立証主義者ということです。

飯田 理論家であり、立証主義者ですよね。

—— 生命について、私はこう考えています。タンパクワールド説では、タンパクはある設計図というものではなくて、アナログ的なマシンであると考えられています。車を作る場合は、初めに設計図があって車ができたのではなく、最初は丸木をころころ転がしていたのが、効率や運転性などのさまざまな機能が付いて、そしてあまりにも複雑になってきた側面があり、いいアイディアであればそれを書きとどめておいて、次にどの部分をどうにかしたいという考えがあって、ようやく設計図ができることになります。現代では設計図が車よりも先にできているのは当然です。このように、情報が機能の先に出るということはあり得ないと、私は考えます。だから、RNAワールド説で情報が先行してできてしまったら、そのRNAはすでに機能を持っているのに、なぜタンパクのようなつまらないお粗末な物質を使い始めるのかがよく理解できません。どのように不安定というべきか、脆弱というべきか、わずか100度で固まってしまうものなどを使うのか。だからRNAワールドのシナリオの中に、なぜタンパクがあるのかが不思議な点です。

飯田 それはRNAのモノマー、ヌクレオチドがアミノ酸より10倍大きいからではないでしょうか。モノマーが大きいと折れ曲がりにくい。一つのターンを作るのにも巨大な鎖を作らなければならない。タンパク質の場合は低温になってくると安定した構造を取れるようになります。そこまで

冷えると折れ曲がりやすいから、RNAと同じようなターンがもっと短い鎖できるわけです。

—— それは、二重らせんはそうのようなところがないですが、RNAには柔らかいつなぎがあります。

飯 田 RNAも2次構造を作りますが、やはりそれはタンパク質のそれと比較して巨大な構造です。モノマーが大きいと、分子の質量に対して活性部位の数が少なくなります。少ない材料で多くの種類の触媒を作るには、モノマーが小さい方がいい。例えば、細胞は直径1ミクロンとか10ミクロンとかのサイズに収まっています。なぜそのサイズが安定かについては理由がありますが、その話題はまた別の機会に譲るとして、その小さな空間の中にさまざまな機能を持った分子を詰め込もうとするときぎっしりになってしまいます。実際、細胞の中は液体というより、分子がぎっしりの固体状態に近く、水分子すら狭い場所をすり抜けながら動いているような状態です。この小さな細胞が持つさまざまな機能を、DNAやRNAだけで実現しようとすると、モノマーが巨大なできわめて不利です。核の中にはDNAがぎっしり詰まっています。しかし、あれで酵素機能までまかなおうとしたら、全体が核酸でできた巨大細胞になってしまふでしょう。

—— そのとき、RNAは何とか巧妙にアミノ酸を動員してタンパクを作らなければならぬですが、タンパクであれば、さまざまな機能があって、そこには核酸をうまくつなぐことができるような触媒機能などがあるともいい。きわめて不器用な人が不器用なものを作り出すのか、あるいは器用な人がきわめて器用だが安定なものを作り出すのが先か、何かRNAワールド説は論理的にどうも逆のように思います。

飯 田 確かにそれは疑問が残る点です。

—— 生命現象だからということですか。

飯 田 それが自己組織化現象という言葉で、今は十把一絡げに放置してあるところです。

—— 確かにその通りです。しかし、だからこそ結局は生命の起原も実証科学になるべきであつて、これくらいのレベルで終わってしまうというところが、やはり納得できないところです。

飯 田 それだから起原の話題を実証科学にするためには、厳密な基準づくりが必要だと考えます。その意味で、私は自己満足の世界ですが、一つの進化ステップを越えたかどうかを測定した値に基づいてオール・オア・ナッシング的に判定できるような基準を作り、それらの基準を集めて体系化しようとしています。そして、湯川さんが懸命に実験した結果を、私が審判になって「これは違う」、でも「これは良い」と、こう言ってみたいんです。

—— 飯田さんの条件を、一つ一つの山として、この一つ一つをクリアし、ようやく生命に近付いていくものなのだろうと考えているから、やはりある程度はさまざまな条件をクリアしたいと考えています。その中の三つぐらいのレベルについて、研究をやっています。ところで、生命の起原を話題にすると、どうもマユツバと思われたり「おもしろいが、学問としてはね・・・」などのコメントになり、例えば科学研究費の申請をやってもなかなか予算が付かなかったりします。ここを何とか改良しなければならないという気がします。

飯 田 理由の一つは、研究方法が未発達だからです。生命の起原という研究対象に、一般的な実験科学の方法をそのまま使うのには、無理があります。従来の実験科学のやり方をそのまま使ったのが、ミラーの実験だと思います。何がいけないのかというと、実験結果と比較するべき対象を間違えているからです。一般的な実験科学の方法は、「現在」存在する材料と条件を使って合成を試み、その合成結果と、「現在」存在する産物とを比較します。それらが一致すれば、先の材料と条件が、

その産物を生成させる条件であると主張します。このロジックを生命の起原にも使って、何かを生じさせた材料や条件を明らかにしたければ、「過去の」材料と条件とを使って合成を試み、その合成結果と、「過去」存在した産物とを比較するのが正しい使い方です。ミラーは、「現在の」生物が持っている物質、アミノ酸や核酸塩基が無機的にできたことと、「過去の」できごと、生命の起原とを関連づけていますが、起原と関連づけるのなら、「過去の」産物、要するに大昔地球で実際に作られたいた産物と比較すべきなのです。しかし、その「過去の」産物や「過去の条件」は、既に失われているか、発見するのがきわめて難しいというのが、起原研究の特徴です。

起原の実験でよく使う前提で、「昔の地球は熱かった」というのがあります。しかし「では何度だつたか」という問い合わせになると、実は曖昧なんです。「原始の地球には水がなかった」と言う人もあるが、「いや、あったかもしれない」という人もいる。要するに、過去のことは過去に遡るほど分からなくなるのに、40億年も前のでき事となるとねえ、というわけです。その曖昧な過去の環境を前提として、「おそらく自己複製する分子ができたのでしょうか」とか、現在の生物は皆RNAを持つしRNAは触媒機能もあるから「その分子はRNAだったに違いない」という仮説を出す。その仮説はおもしろいから、いろいろなRNAを合成してみて、ほんのわずかでも自分の配列を複製できるRNAを見つかると、生命の起原は自己増殖するRNAだという仮説が証明されたような気になってくる。ところが、頭を冷やして、その自分の配列の一部を合成するRNA分子は、生命の起原とどういう関係にあるのかと方法論から考え直してみると、何の証明にもなっていないわけです。もし本当に自己複製していた分子の「かけら」でも宇宙のどこかに残っていて、その「かけら」と比較して、まさにそれはRNAであり、同じ配列で、同じ形だったなら、これは今までの実験科学と同じ証拠能力を持ちますが、残念ながら、その過去のサンプルがないわけです。

では、どうにもならないのかというと、一般的な実験科学の方法が使いにくいというだけであって、手が無いわけではありません。別の研究方法だってあります。大きく分けて、一つは実際にあるものからスタートしようとする方法、もう一つは、実験は断念してすべて理論で攻めようという方法論です。実際にあるものからスタートする方法は、不明確な過去の環境や材料からスタートしても、何も分からぬから、いろいろ比較のできる現在の生物を調べることで、過去を推定しようという方法です。過去の生物ではなく現代の生物を調べて過去を推定するにはどうするかというと、ゲノムプロジェクトなどで揃った遺伝情報を用います。多くの生物の遺伝情報を比較すると、原始的な機能しか持たないと思われている細菌のような生物と、やや高等であると思われている酵母菌のような生物では、持っている機能の差に応じてアミノ酸や塩基の配列に差が見つかる。それらの生物がもとは同じ起原を持つとすれば、配列の違いは起原の後に段々とできたものだろうから配列の違う方をもとに、昔の生物の配列や機能が推定できるのではなかろうか、というアイディアです。どの配列からどの配列ができるかという順番が分かるとよいわけですが、情報理論を使った系統樹と「分子時計」という仮説を導入すると、順番が分かるようになります。分子時計仮説は、有名な木村資生博士の中立進化説とペアで出てくる仮説で「中立な遺伝子配列では、塩基の置換はほぼ一定のスピードで起こる」というものです。その仮定を導入すると、ある配列がどのくらい昔にできたかを推定できます。抜けている情報を補いながら系統樹の根に近い部分にあるべき配列を推定すれば、おそらく原始的な生物が持っていた配列にたどり着くだろうという方法です。もし遺伝子配列が機能に翻訳される機構が昔の生物も今の生物も同じだったとすると、その配列を翻訳しててくる機能と、現在存在する生物の機能とを比較して、触媒能の高低や物の増減が議論できる。それで分子時計仮説、翻訳系の同一性を前提として、例えば「昔の生物は、今より熱い環境でも生存できただろう」といった推定ができるわけです。もちろん、この方法は早くともDNAと、その翻訳系ができた後でしか適用できません。現在の生物の遺伝情報をから遡って推定できるでき事と、われわれが問題にしている生命以前のでき事との間には、依然として深い溝があります。今のところ、生命以前のでき事を探るには、人工生命に代表されるシミュレーションの方が向いていますが、実証

性という点では、先程ミラーの例で紹介した実験科学の誤用と、このシミュレーションには、あまり差が無いように思います。

物質系の進化系統樹という私の方法は、これら二つの方法論と比較すると、実在する生物からスタートする前者の方法に近いのですが、生命以前のでき事を扱えるように構成した新しい方法です。物質系の進化系統樹では、物質でなく属性に注目します。ゲノム情報を利用する先の方法では核酸という物質の存在が不可欠です。生命以前という核酸の存在すらあやふやな状況では、核酸の存在よりも、核酸が持っている種々の属性、例えば、高分子である、熱的に安定である、配列として量子化された情報を持つ、などの物理的な性質の有無に注目する方が合理的です。今の生物が共有している属性も、遺伝子の配列と同様に段々と獲得されていったとしますと、それらの属性が獲得されてきた順序や、その途中で、ある属性が他の属性とどう関係していたのか知りたくなります。この順序や相関を知るのに、DNAやタンパク質といった特定の分子の有無が問題になることはありません。同定するのは、「現在の」生物が共有している属性の依存関係ですから、仮に実験で検証しようとする場合も、「現在の」生物が持つ属性と比較すれば良く、ロジカルな問題がありません。

—— 私たちの考えは、今あるタンパクはゲノムで作られていますが、機能としてそのさらに以前のまだゲノムが出現する前にゲノムを作った機能として、そのゲノムが覚えているのではないかと考えています。例えば、タンパクを分解するときにある残ったユニット、温度が高い時代にでも活動できたようなあるユニットなどです。

飯 田 それは、先程の「逆進化」の背景にある見方です。

—— ゲノムの先の、ゲノムのない時代の、ゲノム的な状況です。

飯 田 逆進化は、実験結果と比較できるものからスタートして、どうやって過去にさかのぼるかという方法論を議論していて、われわれのグループから出てきたアイデアです。現在の生物を造っているタンパク質の中には太古の記録がまだ残されている可能性があります。そのような記録を分子内化石と呼ぶことにしましょう。分子内化石は、たんにアミノ酸の配列や形状を見ていても、どこにあるのか分かりません。しかし、その材料を現在と違う昔に近い環境に置いてやると化石の部分が目立つようになるかもしれません。現在の材料を使って、温度のように制御可能な因子を昔の環境に戻してやり、分子内の化石を出現させる。言い換えれば、現在の材料を逆向きに進化させてやるのであります。これは新しい起原研究の実験方法です。

—— それを論文として提出したら「あなたたちの実験の解釈は間違っているかもしれないが、方法はおもしろいから結論のコメントを抜いて出し直せば通す」と言ってきて結局、論文は受理されました。ただ、私たちが言いたかったことである疎水性アミノ酸が並んでいることの意味などは削除されました。考え方方がおもしろいからということだったのですが、このようなこともよくあることだから、よしとしなければなりません。

飯 田 逆進化という考え方には、斬新です。起原研究に、新しい方法論を導入できたと思います。逆進化、それから物質の系統樹、この二つの新しい概念がわれわれの活動から出てきました。

—— 確かにそうです。これは「複雑系」に対する「還元学的研究方法論」と言うことができます。

飯 田 形容詞がたくさん付いてますね（笑）。

—— 複雑系の研究の方法論として、還元学的に複雑系をいかに攻めるかは、系統樹の構成、つまり複雑性の獲得の歴史を探すことだと私は考えています。

飯 田 われわれのグループは、新しい方法論を作り出したと思っています。さっきも言いましたが、たいへん残念なことに生命の起原というテーマで予算申請すると、なかなか通りにくいことがあります。企業の研究所では研究自体止めるように言われます。それで「分子の進化」や「物質の進化」などの新しいネーミングで再スタートできないかと考えています。こう言うと、ミラーがやったタイプの実験をまったく否定しているように聞こえるかもしれません、もちろん、ミラーのタイプの実験には大きな意義があります。ある条件では有機物ができて、ある条件ではできないといった「相図」を明らかにできるからです。ある条件ではできて、ある条件ではできないというその境界線について説明しますと、例えばミラーの実験では、実験に使うガスの中に二酸化炭素がきわめて微量しかないとアミノ酸ができるますが、二酸化炭素の濃度が少し高くなると、さっぱりできなくなることが知られています。アミノ酸ができる／できないを分ける二酸化炭素濃度があるわけです。また近年注目されている熱水噴出孔にもいろいろな種類がありますが、熱水に重金属イオンがあるとアミノ酸の重合が促進されます。しかし、その噴出口のお隣で重金属イオンを含まない熱水を噴いているところでは重合が進まなかったりと、ある意味、場当たり的な条件で反応が引っ繰り返したりします。

—— ただ、あのような実験では何がどれだけ入っているか、何が本当に不可欠かということを求めるには、パラメーターがあまりにもたくさんあります。地球上にはさまざまな元素がありますから。

飯 田 主に10種類くらいが生物の中でよく動いていますね。

—— しかも触媒は減るわけですから、存在したらそれは継続して働き続けるはずであり、そうするとどの触媒が必要かという問題などのイニシャルコンディションがすべて合致していないと分からぬといふほど微妙なものがあれば、そのような特殊な環境から生命が出てきたと言われても信用できるでしょうか。「そんなことはあったかもしれない」ということにしかすぎず、学問にならない気がします。したがって、あるきわめて一般的な条件でやることが必要であると考えられます。余分な条件を排除するというよりも、実験状況は安定であるということであり、外からのパートナーシップが少々あったとしても、ある条件すら満たされていれば、大体においてこういうことが起こるということが重要です。

飯 田 相図の考え方で言えば、パラメタ空間のある特定の領域には、その領域のどこからスタートしても、同じ状態へと吸い込まれるようなベイジン（吸い込み口）があって、そのベイジンが生きている状態に対応するといったイメージですよね。

—— そうです。それは、現在の生命の起原説として、神様説や、「たまたま説」です。DNAの4つの塩基ATGCの特定のつながりの確立は、4分の1のN乗であるが、Nが100にでもなれば、これはほとんど起こり得ません。要するに、そのようなことが偶然でなく、どこから出発してもほとんど吸い込み点に行くのだと確信しないと、やはりその説に勝つことはできません。だから、ミラーの実験などで可能な環境条件の探索をやっていますが、どれもきわめて特殊な環境であり、その条件が地球上で満たされたという確実な理由はありません。最近、毎日新聞の記事に、リン酸カリウムは酸素がある状況では存在できず、すぐ消滅してリン酸がヌクレオチドを結び付ける役割ができるほど存在したとは考えられない、ということが書かれています。もしきわめてあり得ないことであれば、これはもうマジックでないと、あるいは神様でないとできないことになり、科学にならないことになります。

飯 田 合成実験で調べたい条件は、とてもなく広いパラメタ空間の上にあります。その空間のある部分では、生体分子が合成でき、他の部分ではできないという境界線に意味があると思います。

しかし合成実験では、少なくとも1つは生体分子が生じる条件が見つからないと、何も言えないので、まだ確かめるべき多くの状態が残っているにもかかわらず、ミラーが成功した条件の周辺にだけ多くの実験が集中してしまうといったことが起こりやすい。ミラーの実験のように無機材料から生体分子へと合成していく、いわばボトムアップ的実験では、生体分子ができる条件を探すのが大変で、どうしてうまく行ったかを説明するのも難しい。しかしトップダウン的実験、つまり現存する生体分子を徐々にプリミティブにしていく方法なら、もう少し体系的な情報が得られるでしょう。

—— 飯田さんの60個の必要条件でも、一つ一つのステップは99パーセントは実現可能であるとしても、それを60乗すれば、きわめて偶然としかなりません。

飯 田 ある進化段階から次の進化段階へのステップは99パーセントの確率で成功するとしても、それがサイコロ振りと同じ偶然に支配されるなら、60回続けて成功しないといけません。これは、きわめて難しいことです。おそらく、一つ一つの段階を100パーセントで上れるような吸い込みのメカニズムが必要でしょう。

—— やはり生命の起原の研究をやろうと考えると、研究の方向を時間の反対に持っていかないと、ゴールには到達しないということです。

飯 田 うまいこと、まとめられてしまいました（笑）。

ところで、今日の話に欠けていたのが、NASAの話です。これは私たちにしてみれば、仕事を持っていくかってしまうような話ですが、NASAには予算があって火星に行こうとしています。何をして帰ってくるのかというと、生命探しです。探査機が備えている計測機器は、資源探査だけでなく生命現象に必要な水や、生命の痕跡を検出することも目的として設計されています。もし火星に比較対象といいますか、半ば生命のような物体が見つかったとすると、これは起原研究にとって大きな収穫です。その半生命を、生化学的に分析すればよいのですから。ただし、その物体が生命とどういう関係にあるかという問題にいたると、私が作るような何らかの基準が必要になるに違いありません。