

対称性の破れ キラリティー

総合研究大学院大学
湯川 哲之

1.

物質としてみた生命体が持つ数多くの特徴の中で、その性質を獲得した時期が生命の起原にまでさかのぼるものの一つに、たんぱく質やDNA・RNAの右手系-左手系（キラリティー）対称性の破れがある。すなわち、地球上の生物は、たんぱく質は左手系（L-）アミノ酸だけを原料とし（ただしグリシンだけは左右の区別が無い）、DNAやRNAは右手系（D-）リボース（5単糖）だけを使うという著しい非対称性を持っている。これは、統計物理学上まったく不可解なことである。右手系の分子は、それと鏡像関係にある左手系の分子とほとんど等しいエネルギーを持ち、したがって平衡状態や準平衡状態ではどちらも同じ確率で存在すべきと考えられる。もちろん、左手系と右手系が混合したラセミ体は、生命活動のために機能する立体構造をうまく組めないため排除されるとしても、右手系だけで作る生命体の集団が左手系で作っているものと同じように存在して良い。

この大問題を解決するために、数え切れないほど多くの考えが提案されてきた。それらは、大きく分けて次の二つの姿勢にまず分類できる。その第一は、「生物はわれわれが考えもつかない複雑で精巧な仕組みを持っている。このように神秘的な生命が出来る確率は、地球の年齢の46億年を考えてもほとんどゼロに近い。生命は自然がたまたま作り上げたものであり、理論的に解明できるものではない」とする考えで、これを確率論と呼ぶ。第二は、「生命も、始めはごくあたり前の化学反応の進化過程として出発したものであり、非対称性の原因はそのとき働いていた力の性質に求めるべきだ」という考え方である。これを決定論と呼ぼう。確率論の中には環境の非対称性、たとえば地球磁場、非対称結晶、などに原因を求める議論も多い。また、対称性の破れの一様性は、グローバルな非対称環境が必要だとして、その起原を宇宙空間や地球外惑星とする説もある。もちろん、それが地球外の出来事だとしても、起原を問うことは出来る。しかし、われわれがそれを直接検証できないという点で、生命の起原研究が科学からSFへと移ってしまうことは、科学者としては物足りない。

2.

そこで、物理学者が考える単純な決定論的アイデアとして、非対称の起原を相互作用の性質に求める考えをここで展開しよう。考えの基本は、よく知られた弱い力のパリティ非保存におく。理論計算によるとL-アミノ酸とD-アミノ酸ではエネルギーに少しの違いがあり、これが非対称の原因となっていると考える。しかし、このエネルギー差たるや、なんと分子の典型的な反応エネルギーに比べ約18桁も小さく、この差から出発して左手系がほぼ100%の存在となる現実のたんぱく質にまで非対称性を増幅するには、一体どのような機構が可能なのか誰も想像がつかない。

たとえば、増幅の機構としてよく例に出されるものに自己触媒反応がある。化学反応において生

成物を合成する触媒としてその生成物自体が使われるような場合、生成量は時間的に指数的増加が期待される。これが自己触媒反応である。この機構は、確かに有力な増幅機構であるが、求める非対称性には程遠い。たとえば、指数的な増加により、始めはごく小さかった差異も指数的に大きくなる。しかし、どちらか一方が減少してなくなるわけではない。どちらも指数的に増大するのだから、100%の非対称性は期待できない。それだけではない。一方が作られすぎると、その差を小さくしようとする反応が必ず起き、いつかは指数的成長が停止する。たんぱく質のラセミ化はその例である。こうして平衡状態にたどりついてしまうと分布の差はほとんど無くなる。

パリティ非保存を非対称の原因とする理論でよく言われるのはL-アミノ酸とD-アミノ酸のエネルギー差であるが、これが正しい説明につながらないことは以上の議論でも明らかであろう。エネルギーが分布に反映するのは平衡状態の時だけである。それに対し、非対称性の成長は平衡状態とはまったく逆の、エントロピーを減少させる方向である。したがって、生命の非対称性に大切なことは、エネルギー差ではなく反応方向（遷移）の非対称性と非平衡状態なのである。

3.

実は、生命のキラリティとよく似た状況が宇宙にも存在することが知られている。宇宙の始まりは非常に高温の状態だったと考えられているが、そこでは高エネルギー光子が物質（たとえば陽子）と反物質（反陽子）を対で作ったり、逆に物質と反物質がぶつかると消滅して光子に戻る過程が競合していた。しかし、現在観測される宇宙には反物質で出来た天体はまったく観測されていない。事実、もしそれが物質で出来た星と反物質で出来た星との衝突という形で観測されるとすれば、その時はとてつもないエネルギーを伴うに違いないが、そのような観測も形跡も無い。宇宙が膨張し温度が下がると光子は物質・反物質対を作るだけの十分なエネルギーを持たなくなり、その競合関係が途切れてしまう。そのとき、競合関係にあった時期の記憶が凍結され、それが現在まで残っていると考えられている。

1967年、ソヴィエトの科学者で水爆の父としても名高いサハロフは、現在観測されている物質・反物質の非対称性を説明するための必要条件として次の3つを提案した：

- 1) 物質数（バリオン数）の保存が破れていること。
- 2) 物質－反物質の対称性が破れていること。
- 3) 非平衡状態にあること。

条件1)は、物質だけの宇宙が出来るために当然必要である。条件3)は、すでに議論したように、物質と反物質のエネルギーがほとんど変わらないなら平衡状態の分布も変わらないことから要求される。条件2)は、物質が反物質になる過程と、それとは逆の過程が同じ頻度で起これば一方に偏った宇宙が出来ないことから、要求される。高エネルギー物理学によればこの条件を満足させることが出来る対称性の破れ（CP非保存と呼ばれている）が実験的にも見つかっている。

4.

宇宙における物質対称性の破れを手本にして、生命のキラリティの破れを説明するためには、サハロフの3条件をどのように書き換えれば良いだろうか。また、その条件を満たすためには基本相互作用にどのような性質を持たせる必要があるだろうか？まず、3条件の書き換えはほとんど並行的に進められる：

- 1) 左手系の分子と右手系の分子がたがいに移ることを許す。
- 2) 左手系分子－右手系分子の転移が非対称である必要がある。
- 3) 非平衡状態にあることも必要となる。

条件1)が満たされるにはパリティの破れは必要条件ではない。実際、L-アミノ酸とD-アミノ酸は量子力学のトンネル効果によって移り変わることが知られている。すなわち、ラセミ化がそれで

ある。パリティの破れが要求されるのは、条件2) を満たすためである。しかし、パリティの破れだけでは非対称性は起こらない。すなわち $L \rightarrow D$ と $D \rightarrow L$ の遷移はパリティが破れても対称的に起こる。『非対称性を導く最も簡単な機構は、D-アミノ酸の波動関数とL-アミノ酸の波動関数の重なり (ϵ) が0でないことである。』簡単な量子力学計算によって、2つの遷移確率の差は、パリティ非保存に由来するL-アミノ酸とD-アミノ酸のエネルギー差 (Δ) と、ラセミ化の遷移確立と、 ϵ との積に比例することが示せる。条件3) は、地球が生まれたときの高温状態から現在のほぼ 20°C にまでゆっくりと降下している非平衡環境で説明できる機構を考えなければならないということである。

非対称の程度が100%という極端な場合、自己触媒のようにどちらの状態も許す機構では解決できないことは明らかである。宇宙の物質・反物質の非対称性は、物質と反物質が互いに“潰しあいをし”、ほんの少し優位にあった物質の生き残りが宇宙を作ったが、それを可能にしたのは光子というエネルギーの担い手があったことである。たんぱく質の場合の光子にあたる物質は何なのかが問題を解く鍵となる。その有力候補としてL-アミノ酸とD-アミノ酸が結合したラセミ体が考えられる。さらに、宇宙が膨張し温度が下がることにより物質と光子との競合が途切れその時期の非平衡状態がそのまま凍結されたように、地球の温度が低下することにより、トンネル効果が温度に敏感なことから、ラセミ化が急に起こりにくくなり、たんぱく質とラセミ体の結合が切れ、非平衡状態が凍結したことがキラリティの非対称性の原因となっていると言うシナリオが成り立つと考えられる。

5.

われわれは現在、このシナリオを数値シミュレーションと高温でのアミノ酸実験により検証しようと思っている。またここで述べた詳細は、Progress in Biological Chirality; eds. G. Palyi, C. Zucchi, and L. Caglioti (Elsevier, Oxford, 2004) Chapt. 32, pp. 397–407、に見出される。