

素粒子物理からみた生命世界の左右非対称性

林 昌樹*, 森河良太**

地球上のあらゆる生物は、例外なく L-アミノ酸と D-リボースから成り立っており、ミクロ的には左右非対称である。生命の世界では、いつ頃から、なぜ現在のキラリティに決まったのか？この問題に対する 1 つの可能な説明が、素粒子物理学から示唆されている。すなわち、化学や生物学は、従来は「電磁気力」によって説明されてきたが、素粒子物理学に基づくより厳密な立場からは「弱中性カレント」の寄与も考慮する必要があるが生じる。「弱中性カレント」は空間パリティを破るので、この相互作用による力が働くと通常の物質からできている D 型、L 型分子は完全な左右対称にならず、ごくわずかであるが安定性が異なってくる。そのため、最初の生命体には D-、L- 両アミノ酸が共存していたが、L 体の方が少しだけ余計にあった。このわずかな差を増幅する機構が働き、生命の進化の過程で、L 体だけからできた生命が形成されていった、と考えられる。本稿では、まず最初に、「電弱力」や「パリティの破れ」などに関する最近の素粒子物理の知見をごく簡単に紹介し、このような立場から生命世界の非対称性の起源の問題を解説する。

1. はじめに

生物界はマクロ的には左右対称なものが多いのに、ミクロ的には左右対称性が全く破れている。生体を構成する分子は L-型（左手型）、D-型（右手型）のどちらかから成るという特徴がある [D および L は、偏光面の回転方向の dextro（右）、levo（左）の意味からでている]。L-型、D-型といった鏡像構造の存在は、光学的性質から知られたものであり、それぞれ偏光を逆の方向に旋光させる。L-型、D-型といった構造異性をもつ物質は、光学活性物質とよぶが、両型の間には、旋光性以外の物理的、化学的性質は酷似している。ふつう人工的に化学合成すると、L-型、D-型の等量混合物（ラセミ化合物）が得られるが、生体内では L-型、D-型のどちらか一方のみが選択的に合成され、利用される。このような L-型、D-型の選択は、生命活動にとってきわめて重要な意味をもつ。生体分子中、最も基本的なアミノ酸と（デオキシ）リボースは一方のエナンチオマー（enantiomer；鏡像（異性）体、対掌体；L-アミノ酸、D-リボース）のみから成り立っている。このことは地球上のあらゆる生物に共通している。分子のレベルでみると、この生物界のホモ（同一）キラリティ（homo-chirality）の性質以外にもタンパク合成、遺伝の仕組み、生体分子や分子間の連携プレーの仕方など、地球上の生物は驚くほど似ているところがある。この事実は、生命が共通の起源をもって進化してきたことを示唆している。このような観点からも、生命の世界では、いつ頃から、なぜ現在のキラリティ（L-アミノ酸と D-リボース）に決まったのか、あるいはホモキラリティの確立は原始生命の誕生の前か後か、それは偶然であったか必然であったか、といった問いは生命の起源の問題と密接なかわりがある。

「生命の世界では、なぜ現在のキラリティに決まったのか」という問いは生体分子の光学活性の起源を問うものである。この光学活性の起源を説明しようとする 1 つの仮説が、素粒子物理学に基づいて示唆されている^{1),2)} [素粒子物理以外の諸仮説については、文献 1), 3) を参照せよ]。現代の素粒子物理学の知見によると、素粒子間に働く力 [重力、電磁気力、強い力（核力）、弱い力（原子核の崩壊の原因になる力）] も「進化」した。「電磁気力」と

* 生命物理科学研究室・教授 ** 生命物理科学研究室・助手

「弱い力」は初期宇宙においてはもともと1つの「電弱力 (electroweak force)」と呼ばれるより根源的な1つの力に統合されていた。ビッグバン宇宙の誕生後まもなく（ビッグバン後、 10^{-11} 秒後）、「弱い力」は極端に弱くなったため、「電磁気力」とは実質的に分岐してしまったように見える。しかし、厳密には依然として「電弱力」は存在して現在の宇宙においても至る所で作用しているのである。化学や生物学は「電磁気力」によって説明されているが、より厳密にはこの「電弱力」によるべきである（通常の条件下では、「電弱力」のうち、「弱い力」の寄与はほとんど無視できる）。「電弱力」はパリティ（左右対称性）を破るので、この理論にしたがえば、エナンチオマーで厳密には等しくないことになる。ただ、その差がきわめて小さいので、エナンチオマーによる通常の物理的、化学的性質の違いはまだ観察されていない。こうして通常の物質からできているD型、L型分子は完全な左右対称になっておらず、ごくわずかであるが安定性が異なっているはずである。そのため、35億年前の原始生命の誕生前、地球上にはD-、L-両アミノ酸がほぼ等量共存していたが、L-アミノ酸の方がわずかに多かったと考えられる。つまり、最初の生命体にはD-、L-両アミノ酸が共存していたが、L体の方が少しだけ余計にあった。このわずかな差を増幅する機構が働き、生命の進化の過程で、L-アミノ酸だけからできた生命が形成されていった、とすれば説明がつくのである。このことは、タンパク質の触媒としての能力は一方のエナンチオマーからつくられたものの方が、D、Lが混在するものよりはるかにすぐれているはずであることから理解ができよう。

以下第2章では、まず最初に、素粒子物理の「電弱力」や「パリティの破れ」などに関する最近の素粒子物理の知見をごく簡単に紹介する。次に第3章でこのような素粒子物理から生命世界の非対称性の起源の問題を解説する。

2. 電弱力とパリティの破れ

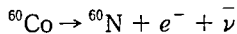
素粒子（レプトンとクォーク）の相互作用は4種類ある。つまり、重力、電磁気力、強い力（核力）、弱い力である。このうち、核の崩壊の原因になる弱い力には、相互作用の結合定数が小さく、到達距離が短い相互作用であり、また空間パリティの破れ、CPの破れ、ストレンジネスの破れなどを伴うという特徴がある。現代素粒子物理学によると、ビッグバン直後により根源的な力が進化して現在知られているこれら4種の力に分岐（相転移）した。そして素粒子に働く力とともにそれら自身も進化をしてきた。膨張宇宙論によると、現在から約150億年以前の宇宙の始まり近くまでさかのぼると、宇宙空間はきわめて小さくなっていた。このような状況では、世の中すべての物質がその構成粒子に分解し、超高温超高密度のスープ状態になっていた。この時代の痕跡がいくつか現在の宇宙に見つかり、ビッグバン理論の正しさ、さらには膨張宇宙論の正しさが検証された。ビッグバン後の宇宙では、次のような素粒子から原子、分子への「進化」があったと考えられている。

ビッグバンからの時間	できごと
• 10^{-44} 秒	重力が「原初の力」から分岐（「大統一力」+「重力」）
• 10^{-36} 秒	大統一力から強い力が分岐（「強い力」+「電弱力」）
• 10^{-12} 秒	電弱力から弱い力と電磁力が分岐
• 10^{-6} 秒	クォークが結合して陽子と中性子ができた
• 3分	軽い原子の原子核ができた
• 30万年	原子ができた

これら4種の力は、実質的に分岐した形で作用しているが、厳密には「原初の力」、「大統一力」、「電弱力」は形を変えてその後も「化石的な力」として作用しうる、はずである。たとえば、「大統一力」は現在でも陽子の

崩壊の原因に成りうるし、「電弱力」は本稿で論じるように約 35 億年前に生物学的な左右非対称性の原因になったと考えられる。

以下では、本稿の主題と関連のある「電弱力」と「パリティ保存則の破れ」を中心に説明する。いま、人を鏡に写して見る（空間反転）と右利きは左利きが変わる（これを鏡像変換という）。鏡の向きをどのように変えても右利きを左利きにはできないから、鏡の中の世界と元の世界とは別物である。空間反転に伴う保存則は（空間）パリティの保存則といわれている。このパリティの保存、つまり左右の平等は空間の対称性の一部として当然のこと考えられていたが、1956 年 T. D. Lee と C. N. Yang は、「弱い相互作用におけるパリティ保存の問題」という論文の中ではじめて素粒子に働く「弱い力」はパリティの保存則を破るという仮説を提唱した⁴⁾。まもなく C. S. Wu のグループは、放射性アイソトープ ^{60}Co の β 崩壊

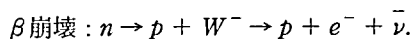


の実験結果を分析して、確かにパリティが保存しないことを立証した⁵⁾。この実験で明らかになった著しいことは、右巻きの電子（スピン=1/2）に比べて、左巻き電子（スピン=-1/2）の方が圧倒的に多く放出されている（パリティが保存されていると、この 2 種の電子の数は等しいはず）ことである。つまり、電子が放出される方向に非対称性が生じ、パリティの保存則は破れていることがわかった。その結果、 β 崩壊の際、陽電子 e^+ とともに放出されるニュートリノ ν は左巻き、電子 e^- とともに放出される反ニュートリノ $\bar{\nu}$ は右巻きの状態しかない。ここで左巻きとは光の円偏光のように、その伝搬方向に向かってスピンの向きが左巻き（-1/2）か右巻き（1/2）かということである。

その後、S. Weinberg と A. Salam は、1967 年独立に電磁気力と弱い力を統一的に扱う論理的に完備した電弱理論の定式化に成功した。S. L. Glashow にも同様な先駆的な試みがあったことから、この理論は現在 Weinberg-Salam-Glashow の理論と呼ばれている⁶⁾（標準理論ともいう）。電弱力（electroweak force）は電磁気力と弱い力を統一したものであるためこれらの力を同時に含む。そのうち弱い力には、弱荷電カレント（weak charge current）と弱中性カレント（weak neutral current）の 2 種類がある。弱荷電カレント（弱中性カレント）による素粒子間の相互作用を W 相互作用（ Z 相互作用）という。すなわち

電弱力 = { [W 相互作用], [電磁気力 + Z 相互作用]}.

W 相互作用は荷電した W ボソンの交換によっており、電荷を変化させる。これが β 崩壊の原因となるのである。すなわち



電弱理論によれば W 電荷といわれる量が左巻き電子の場合ゼロとは異なるが、右巻き電子ではゼロである。このため、 β 崩壊では、左巻き電子が過剰に放出されパリティの保存則が破られるのである。一方、 Z 相互作用は電荷を変化させない素粒子反応を引き起こす。この力も弱い力でありパリティを破る。 Z 相互作用の存在は実験的に検証された⁷⁾。

電磁力は到達力の長い力であり、荷電粒子の間で質量がゼロの量子（光子）をやりとりすることによって生じる。それに対して W 相互作用は W^\pm ボソンが、また Z 相互作用は Z^0 ボソン（中性ボソン）といわれるいずれも大質量の粒子が素粒子（レプトンとクォーク）の間でやりとりされることによって生じるので、弱い力の到達力は極端に短い。これら W^\pm ボソンと Z^0 ボソンの存在は、実際に 1983 年 CERN（Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire；ヨーロッパ合同素粒子研究機構）の加速器で C. Rubbia 等の実験グループによりみごとに確認され、Weinberg-Salam-Glashow の電弱理論の予想どおりの質量（ $m_W = 81[\text{GeV}/c^2]$, $m_Z = 91[\text{GeV}/c^2]$ ）をもつこと

が示された⁸⁾.

原子や分子の性質は、従来（仮想的な光子の交換による）電磁気力によって記述されるとされてきたが、これは電荷を変えない過程である。統一電弱理論によれば、厳密には電磁気力はそれを拡張した電弱力に置き換えられるべきである。すなわち

$$[\text{電磁気力}] \rightarrow [\text{電磁気力} + Z \text{ 相互作用}].$$

このとき、パリティを破るZ相互作用も混入するので、通常物質からできているD型、L型分子は完全な左右対称になっておらず、ごくわずかであるが安定性が異なっているはずである。事実、Z相互作用による左右のエネルギー差は、次章で説明するように理論計算で実際に得られている。このエネルギー差はきわめて小さく、右型分子と左型分子の物理的、化学的性質の変化を生じさせる現象は観測されていない。原子については、現在、左右非対称性を支持する実験結果が得られている⁹⁾。このようなわずかな力が生命世界の非対称性の起源の鍵を握っている可能性がある。そのことを次章で解説する。

3. 生命世界の非対称性

W相互作用

W相互作用は生命の分子のホモキラリティの原因になりうるかどうか、実験と理論的考察を以下に紹介する。

- 実験：³²P, ⁹⁰Srなどをβ線源として、加速器によってつくられた右または左に偏光した電子線を用いて、ラセミ化合物（D, Lの等量混合物）の不斉分解反応、つまり、DとLのどちらが選択的に分解されるかを調べる実験が行われた。D-, L-イソロシンの不斉分解の実験では、D, Lによる選択的分解は検出されなかった。その他の実験でも同様の結果が得られている。左右の差はあったとしても実験誤差の範囲を出ない、と思われる〔文献1)の解説参照〕。
- 理論計算：R. A. HegstromはL体とD体とを縦偏極したβ粒子によって分解するとき、その分解速度には10¹¹分の1程度の違いが生じることを示した¹⁰⁾。

Z相互作用

Z相互作用が、生体系のホモキラリティの起源にどんな影響を与えているか、に関する理論的な考察を以下で解説する。原子や分子などの物理的な特性の計算は電磁気力がその基礎にある。より厳密に電弱理論に基づき、Z相互作用の寄与を考慮すると、該当する全振幅は

$$A = A(\gamma) + A(Z) \tag{1}$$

と電磁気による寄与 $A(\gamma)$ とZ相互作用の寄与 $A(Z)$ の和で表される。観測量は、振幅の絶対値の2乗で与えられるから

$$|A|^2 = |A(\gamma) + A(Z)|^2 \approx |A(\gamma)|^2 + 2\text{Re}[A(\gamma)A(Z)^*] \tag{2}$$

となる（ $|A(Z)|^2$ は無視できる）。 $|A(Z)|^2$ は通常の化学や生物学の諸過程を記述する。 $2\text{Re}[A(\gamma)A(Z)^*]$ がパリティを破る寄与である。

以上のことを考慮して、一重項基底状態にあるカイラル分子の光学的な鏡像異性体間の、パリティを破るZ相互作用によるエネルギー差 ΔE_{pv} (pv:parity violating) を求めると

$$\Delta E_{pv} = 2 \sum_T \text{Re}[\langle 0 | V_{pv} | T \rangle \langle T | V_{so} | 0 \rangle (E_0 - E_T)^{-1}] \tag{3}$$

で与えられる¹¹⁾。ここで $|T\rangle$ は、エネルギーが E_T の電子の励起三重項の状態、 $|0\rangle$ はエネルギーが E_0 の電子の一重項基底状態を表す。これらの状態は、スピン-軌道相互作用 V_{so} とZ相互作用の電子-核子成分 V_{pv}

$$V_{pv} = (\Gamma/2) \sum_a \sum_i Q_W^a [\sigma_i \cdot p_i, \delta^3(r_i - r_a)]_+ \quad (4)$$

によって結合している。ここで、 $[\dots]_+$ は反交換子を表し、2つの Σ の内、最初のもの (a) は分子の原子核に関する総和を、また2番目 (i) のものは電子に関する総和を表す。 p_i は電子 i の運動量演算子であり、 σ_i はそのスピン演算子である。原子核 a における電子の荷電密度は Dirac のデルタ関数： $\delta^3(r_i - r_a)$ によって決められる。定数 Γ は Fermi 結合定数 G_F と電子の質量 m_e および光速 c を用いて

$$\Gamma = G_F / (2\sqrt{2} m_e c) = 5.731 \times 10^{-17} \text{a.u.} \quad (5)$$

で与えられる。原子核 a のパラメータ Q_W^a は、Weinberg-Salam-Glashow 理論により、Weinberg 角 θ_W を用いて

$$Q_W^a = -[(4 \sin^2 \theta_W - 1)Z_a + N_a] \quad (6)$$

と表される。ただし、 N_a は核内の中性子の個数、 Z_a は核内の陽子の個数を表す。 $\sin^2 \theta_W$ の実験値は、 $\sin^2 \theta_W = 0.232$ である¹³⁾。スピン-軌道結合を表す V_{so} は、分子中の原子核 a 上に位置する1電子演算子の総和によって

$$V_{so} = (1/2) \sum_a \sum_i \xi_i(a) \sigma_i \cdot \ell_i(a) \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 $\ell_i(a)$ は原子核 a のまわりの電子の軌道角運動量、 $\xi_i(a)$ は原子核 a のまわりの球面状の場における電子 i のスピン-軌道結合パラメータを表す。

状態関数 $|0\rangle$ と $|T\rangle$ を分子のスピン-軌道 (spin-orbital) で展開し、励起三重項配位の磁気スピン成分： $M_s = 0, \pm 1$ に関して総和をとると、パリティを破る Z 相互作用によるエネルギー差 ΔE_{pv} について次のような表現

$$\Delta E_{pv} = 2\Gamma \sum_j \sum_k \sum_a \sum_b Q_W^a \text{Re}[\langle \psi_j | [p, \delta^3(r_a)]_+ | \psi_k \rangle \langle \phi_k | \xi(r_b) | \phi_j \rangle (\epsilon_j - \epsilon_k)^{-1}] \quad (8)$$

が得られる。ここで ψ_j と ψ_k はそれぞれエネルギーが ϵ_j と ϵ_k の被占分子軌道と空軌道に、また a と b は各原子中心に対応する。引き続き、分子軌道 ψ_j と ψ_k を、それらを構成する原子軌道で展開すると、LCAO (Linear Combination of Atomic Orbitals) 係数の積 $C_{ja} C_{ka} C_{jb} C_{kb}$ で重みをつけた2中心項の仮想的な電子遷移： $j \rightarrow k$ の総和で表わせる。このような理論的な方法を適用して、ab initio 分子軌道法で (誤差の取り扱いに注意して) 次のような結果が得られている。

- S. F. Mason と G. E. Tranter は文献13)で Gauss 型の基底関数を用いて過酸化水素の (S)-異性体について、また基底関数 STO-6-31G を用いて L-アラニンについてエネルギー差 ΔE_{pv} を計算した。 ΔE_{pv} は、符号、絶対値ともに鏡像異性体の立体配座に依存し同位体の鏡像異性体では、このエネルギー差はない。
- 同じ著者らは文献14)で、過酸化水素の (S)-異性体について、 α -アミノ酸、基底関数 STO-N-31G を用いて、基底状態の電子エネルギーに対する Z 相互作用の寄与を計算し、 α -アミノ酸、ペプチドおよびモデルヘリックス系のエネルギー差 ΔE_{pv} を得た。 α -ヘリックスおよび β -シート立体配座を取る L-アラニンと L-ペプチドは対応する D 体よりも基底状態が低いエネルギーを持つ。
- G. E. Tranter は文献15)でグリシン、アラニン、バリン、セリンおよびアスパラギン酸について、基底状態の電子エネルギーに対する Z 相互作用の寄与を計算。その結果得られたエネルギー差より、これらの α -アミノ酸は D 体よりも L 体で存在する方がわずかに安定となる。L, D 体のパリティ非保存によるエネルギー差は 10^{-14} [J/mol] と小さく、分子立体配座に敏感である。
- S. F. Mason と G. E. Tranter は文献16)で水溶液中での L-アラニン、L-ペプチドの α -ヘリックスや β -シートでの基底状態の電子エネルギーに対する Z 相互作用の寄与を計算すると、対応する D-体よりエネルギーが低くなる。この差は 10^{-14} [J/mol] 程度であり、常温で1モルの溶液中、L 体が 10^6 個ほど分子数が多いことになる。

以上の結果などから、D-, L-アミノ酸ではL-アミノ酸の方がわずかに安定で、分子の数にするとL-アミノ酸の方が 10^n 分の1の割合だけ多く存在していることがわかった。これこそが生命体が、L-アミノ酸、D-糖からなることの原因ではないか、というわけである。隕石中のアミノ酸はラセミ体であることから、原始地球では生命の分子はラセミ体であったと推測される。それゆえ現実に見られる生命の世界のホモキラリティを説明するには、明らかに化学進化の過程でキラリティの増幅過程が必要となる。キラリティが上述のように必然的（物理的）に生じたものであろうと、偶然説をとるにせよ、キラリティの増幅機構が必要となる。以下、このような増幅機構として検討されたモデルをいくつか紹介する。

F. C. Frank のモデル計算¹⁹⁾：全く等量存在している D-アミノ酸と L-アミノ酸の混合物からなる系について、次の仮定をおいた。

- 1) 自己複製される能力（DからはDが、LからはLが複製される）があり、複製は逆のエナンチオマーの存在によって妨害される。
- 2) DとLは対をつくって全く別の物質となって系の外に出る。
- 3) エネルギーや物質の出入りがあり、熱力学的平衡状態にない。

このような系では、D、L分子の数は常に時間とともに変化しており、統計的な偏りが原因で、対称性が自発的に破れている。いったん一方の分子の数がわずかでも多くなると、その分子の方がたちまち大過剰になり、ついにはその一種類の分子だけになってしまう。このモデルでは、D-アミノ酸にならなかったのは、全くの偶然であるとしている。自己複製する可能性の仮定があるので、分子ではなく生物のレベルにもこのモデルを適用することができ、2つの生命体の競合の結果、偶然に一方の鏡像体の生命は絶滅したということになる。

Y. Yamagata¹⁸⁾とV. S. Letokhov¹⁹⁾はパリティ非保存によって、もしも一方のエナンチオマーの方が微小のエネルギーだけ安定ならば、これが増幅されて一方のキラリティになる可能性があることを示した。以下でこのことを、K. Tennakoneによる1つのモデル²⁰⁾で見てみよう。

Z相互作用は、パリティ非保存によって分子の活性化エネルギー（activation energy） E を $\Delta E \approx \varepsilon E$ だけ変化させるとする。ここで

$$\varepsilon = \alpha^2 G_F (m_e/m_p)^2 \sim 10^{-16} \quad (9)$$

($G_F = \text{Fermi 結合定数} = 1.02/(10^5 m_p^2) = (294 \text{ [GeV]})^{-2}$, $\alpha = \text{微細構造定数} = e^2/(4\pi) = 1/137$: ただし、 $\hbar = c = 1$ とする)。そうするとL体とD体の生成率定数は

$$c_L = c_0 \exp[-(E - \Delta E)/kT] \quad (10)$$

$$c_D = c_0 \exp[-(E + \Delta E)/kT] \quad (11)$$

と表される。 c_0 は定数であり、パリティ非保存によって、 $c_L > c_D$ とした。「前生命体」媒質（prebiotic medium）中で自己複製し、相互に影響し合うL体とD体の成長は、次のVolterra型方程式で記述できる。

$$dN_L/dt = c_L N_L - a_L N_L^2 - b_L N_L N_D \quad (12)$$

$$dN_D/dt = c_D N_D - a_D N_D^2 - b_D N_D N_L \quad (13)$$

ただし、 N_L と N_D はそれぞれ時刻 t におけるL体とD体の濃度であり、 a_L , b_L , a_D , b_D は定数である。右辺第2項と第3項はそれぞれ、指数関数的な成長を制御する自己相互作用とL体とD体間の相互作用を表す。このVolterra型方程式は、 $c_L > c_D$ であれば、 $t \rightarrow \text{無限大}$ のとき、 $N_D \rightarrow 0$, $N_L \rightarrow \text{有限}$ の解をもつことが示せる。話を簡単にするために、 $a_L = a_D = b_L = b_D$ と仮定すると、

$$N_D/N_L = A \exp[-(\Delta c)t] \quad (14)$$

$$\Delta c = c_L - c_D \approx (2c_0 \Delta E/kT) \exp[-(E/kT)] \quad (15)$$

が得られる。ただし、 A は定数である。たとえば、 $E \approx kT (T = 300\text{K})$ とすると、 $\Delta c \approx 10^{-16} c_0$ となる。 $T=300\text{K}$ での分子の複製時間のオーダーに相当する $c_0^{-1} (c_L^{-1}$ または $c_D^{-1})$ として、 $c_0^{-1} \sim 1[\text{sec}]$ とすると、 $10^8 - 10^9$ 年後には、 D 体の濃度は無視できる程小さくなる。

D. K. Kondepudi と G. W. Nelson は文献 21) でカイラル対称性の破れに関連し、小さな対称性を破る影響が非平衡化学系に作用した場合の効果について議論した。実際的な速度論定数を持つモデル系を考え、反応エネルギー障壁の差が $\Delta E/kT = 10^{-17} \sim 10^{-15}$ の場合に、強いカイラル選択性を持つことを示した。この値は、 Z 相互作用による L 体、 D 体間でのエネルギー差の範囲にある。

同じ著者らは文献 22) で雑音の中に埋もれた信号を取り出す「雑音消去法」に類似したモデルを考察した。弱い力による対称性の破れ (= 信号) のため L 体の方向にわずかに破れている互いに競合しているエナンチオマーは不規則なゆらぎ (= 雑音) のためにあるときは L 体が多く、あるときは D 体が多い。このような系では、長い時間の後には不規則なゆらぎの影響は消滅し、弱い力による対称性の破れが重要になる。計算によると 10 万年といった長い時間の後にすべてのアミノ酸が L -アミノ酸になる確率は 98% になる。

こうして、 Z 相互作用の寄与を考慮すれば、原始生命の誕生に際して、 L -アミノ酸が D -アミノ酸よりわずかに安定であった事実と、上記のようなキラリティの増幅機構により生命の進化の過程で、現在の生物界のホモキラリティが実現されたというシナリオが展開できる。このシナリオによる素粒子物理からみた生命のマイクロ世界の非対称性の実現は必然であったということになる。

最近、細胞遺伝学者の A. Lima de Faria は、このようなシナリオをさらに急進的に押し進めた仮説を展開している。まず彼はネオダーウィニズムが拠って立つ「自然選択」は科学的概念たりえないばかりか、進化機構を発見するための障害でさえある、としてネオダーウィニズムのドグマを徹底的に批判した²³⁾。生物学的な左右非対称性の起源は素粒子の自律進化に求めることができる (物理的刻印) として、このことを一般化して次のように論じている。すなわち「進化」は、単に生物に特有の現象ではなく、物質本来に内在する性質であり宇宙創成の瞬間からそのスタートを切っていた。言い換えると、生物進化を引き起こしたのは「自然選択」ではなく、生物進化に先行し、これを方向づけた物理的、化学的な進化であった。

生物学的な左右非対称性の起源は、確かに前章でみたように素粒子の「電弱力」で説明が可能であるが、A. Lima de Faria はこの「電弱力」の寄与があった「事実」をビッグバンの直後に起こった素粒子の自律進化の結果であると解釈した。彼の「自然選択」に対する批判はそれなりに説得力があるように思われるが、生物進化そのものが物理的、化学的な刻印によってすでに方向づけられていた、という一般化した主張はもっと裏付けが必要であろう。

生命世界の非対称性の起源については、本稿で解説したシナリオ以外に化学進化あるいは生物学的な仮説に基づいた諸説が提唱されている^{1), 3)}。この問題の解明は、疑いもなく生命の本質とその起源についてより深い洞察を可能にするはずであり、今後の研究の進展がまつれる。

参考文献

- 1) 黒田玲子, 『生命世界の非対称性—自然はなぜアンバランスが好きか』, 中公新書 (1992).
- 2) G. Wächtershäuser, Prog. Biophys. Molec. Biol., 58(1992), 85.
- 3) 大島泰郎, 別冊数理科学『生命・情報・数理』, サイエンス社, p.62(1994).
- 4) T.D.Lee and C.N.Yang, Phys. Rev., 104(1956), 254.

- 5) C.S.Wu, E.Ambler, R.W.Hayward, D.D.Hoppes and R.P.Hudson, Phys. Rev., 105(1957), 1413.
- 6) S.Weinberg, Phys. Rev. Letters, 19(1967), 1264; A.Salam, in Proc. 8th Nobel Symposium; Elementary Particle Physics, ed. N.Svarthold (Almquist and Wicksell, Stockholm,1968); S.L.Glashow, Nucl. Phys., 22(1961),79.
- 7) F.J.Hasert et al. Phys. Letters, 46B(1973), 121; S.J.Barish et al. Phys. Rev. Letters, 33(1974), 448.
- 8) G.Arnison et al.(UA1 Coll.), Phys. Letters, 122B(1983)103; G.Banner et al.(UA2 Coll.), Phys. Letters, 122B(1983)476; G.Arnison et al.(UA1 Coll.), Phys. Letters, 126B(1983),398; G.Bagnaia et al.(UA2 Coll.), Phys. Letters, 129B(1983), 130.
- 9) E.N.Fortson and L.L.Lewis, Phys. Report, 113(1984), 289.
- 10) R.A.Hegstrom, Nature, Lond. 297(1982), 643; R.A.Hegstrom, Origins of Life, 14(1984), 405.
- 11) R.A.Hegstrom, D.W.Rein and P.G.H.Sandars, J. Chem. Phys., 73(1980), 2329; S.F.Mason and G.E.Tranter, Proc. R. Soc. Lond., A397(1985), 45; C.C.Bouchiat and M.A.Bouchiat, J. Phys., Paris, 35(1974),899; *ibid.*, 36(1975), 493.
- 12) Review of Particle Properties, Phys. Rev. D50(1995), 1233.
- 13) S.F.Mason and G.E.Tranter, Chem. Phys. Letters., 94(1983), 34.
- 14) S.F.Mason and G.E.Tranter, Molec. Phys., 53(1984), 1091.
- 15) G.E.Tranter, Molec. Phys., 56(1985), 825; G.E.Tranter, Chem. Phys. Letters., 120(1985), 93.
- 16) S.F.Mason and G.E.Tranter, Proc. R. Soc. Lond., A397(1985), 45.
- 17) F.C.Frank, Biochim. Biophys. Acta., 11(1953), 459.
- 18) Y.Yamagata, J. Theor. Biol., 11(1966), 495.
- 19) V.S.Letokhov, Phys. Letters, 53A(1975), 275.
- 20) K.Tennakone, Prog. Theor. Phys., 62(1979), 581.
- 21) D.K.Kondepudi and G.W.Nelson, Phys. Rev. Letters, 50(1983), 1023.
- 22) D.K.Kondepudi and G.W.Nelson, Phys. Letters, 106(1984), 203; D.K.Kondepudi and G.W.Nelson, Physica, A125(1984), 465.
- 23) A.Lima de Faria, *Evolution without Selection-Form and Function by Autoevolution*, (Elsevier Science B.V., 1988).