

# IT FROM BIOBIT : ORIGINS OF LIFE IN THE CONTEXT OF INFORMATIONAL EVOLUTION

Yuzuru Husimi

Japan Science and Technology Agency, SENTAN group  
7, Gobancho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0076 Japan  
husimi@fms.saitama-u.ac.jp

(Received: August, 2, 2018, Accepted: September, 21, 2018)

## Abstract

“It from Biobit” is an adaptation of “It from Qubit” which is the title of a running international research project on quantum fields (including condensed-matter physics), quantum gravity and quantum information, supported by Simons Foundation. The latter is also an adaptation of J.A.Wheeler’s “It from bit” (1990). “It” refers to everything physical (and everything biological and cultural in our case).

Evolutionary molecular engineering has provided various tools to explore the functionality of the possible world in biopolymer sequence spaces. It also has provided the evolvability view point of life, regarding the origins of life as the emergence of “encoded digital information” in our Universe. Because this encoded digital nature was based on the specific interaction between biomolecules, it did not reach the level of the ideal symbol (bit) manipulation. We would like to call this biomolecular information processing the “Biobit” manipulation. The Biobit molecular information network, however, invented *homo sapience* and the bit manipulation (including language, logic, math...) and then invented the concept of Qubit, through the biological and cultural evolution.

“It from Qubit” project inspired us the evolution of matter (quantum many-particle system, e.g. molecule) may be called as Qubit evolution, that is, complexity of an evolved molecule may be measured by the entanglement entropy in the molecule. Adenine has a greater Qubit (more entangled) than hydrogen molecule. Specific interaction of complementary bases thus evolved was a basis of Biobit manipulation in the RNA world. A Biobit code is largely physicochemically related to its meaning (structure and function), in contrast to an arbitrary correspondence in the conventional bit code. In this article we discuss informational evolution of our Universe in three stages, Qubit/Biobit/bit evolution, laying emphasis on the emergence of Biobit.

It from Biobit : 情報進化からみた生命の起源  
伏見 譲

科学技術振興機構, 先端計測グループ  
東京都千代田区五番町7, K's 五番町  
husimi@fms.saitama-u.ac.jp

## 1. 序論

この奇妙なタイトルは、米国 Simons 財団が支援する大規模国際共同研究プロジェクトのタイトル “It from Qubit” の本歌取りである<sup>[1]</sup>。後者は、重力理論、量子場の理論 (物性物理を含む)、量子情報の異分野融合の理論物理学共同研究で、It は物理学的なモノ・コトの全てを指す。後者はまた、

1990年に重力理論の物理学者 J.A.Wheeler が提唱した “It from bit” の本歌取りである。われわれの場合、It は、物理学的、生物学的、文化的なモノ・コトの全てを指す。Qubit は、量子コンピュータや量子情報科学の基本用語であるが、第3節で解説する。Biobit は、筆者による造語で、第4節でその意味を詳述する。筆者が総合研究大学院大学・学長イニシアティブ先導的共同研究 (仮称「情報進化」) 研究企画ワーキンググループ (2015.11-2017.3) の主査をしていたとき、発案したものである<sup>[2]</sup>。

本稿の結論を先に述べておこう。図1. に、自然史・人類史における情報形態の変遷をまとめた。生命の起源が、我々の宇宙における最初の情報革命であったことを主張している。系における情報形態の進化は、系の進化能の進化に繋がる。このため、情報進化は加速度的に進行する。

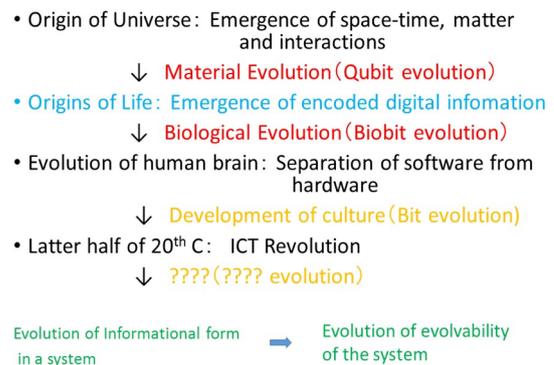


Fig 1. Evolution of informational form in our Universe

## 2. 分子コーディングと Biobit 情報処理の起源

本誌に載せた先行論文で述べたことだが<sup>[3]</sup>、生命の起源とは物質進化の段階から生命進化の段階に遷移することに他ならない。RNA ワールド仮説を受け入れる限り、その遷移機構は、原始生命体としての核酸分子の持つ特異な物性に帰せられる。この特異な物性を実験的に明らかにしたのは進化分子工学である。進化分子工学は<sup>[4]</sup>、進化の対象を一つの分子の機能に限定することにより、分子実体レベルのダーウィン進化機構の詳細を明らかにしてきた。また同時に、可能世界としての RNA ワールドを支持する核酸の潜在能力を開花させてきた。なかでも、上記の核酸の特異な物性が分子コーディング能、すなわち、核酸分子機能をその核酸分子上の塩基配列に符号化できるという物性であることを示した。核酸の分子コーディング能は、最も簡単な進化分子工学実験である核酸アプ

タマー創出実験によって示すことができた。Ni<sup>2+</sup>固定化カラムへの結合性という淘汰圧によって、ランダム配列ライブラリーの中から人工進化してきた次の1本鎖DNA：

5'-ACTGAACGCGGAATTATGCTTCGTGCGTTCGGT-3' (1)

は、Ni<sup>2+</sup>イオンだけに特異的に強く結合する。共重合高分子ランダム配列ライブラリーから出発して、環境に適応して特異的結合能を人工進化させたオリゴマーをアダプターという。特異的結合能がある理由は、1次構造(1)を持つ分子において、相補的塩基対合を介して形成された2次構造がさらに折れ畳んで形成された3次構造の分子表面が、Ni<sup>2+</sup>イオンの構造との相補的構造をしているからと考えられる。すなわち、記号列(1)で表されるデジタル情報は、分子(1)のNi<sup>2+</sup>特異的結合性という機能と、それを導く特異的立体構造とを符号化した情報と見なせる。塩基配列(1)は自己複製可能であるので、塩基配列(1)を遺伝子型、その立体構造や分子機能を表現型と呼ぶことができる。遺伝子型は、対応する表現型の符号化デジタル情報である。すなわち、核酸には、同一分子上に遺伝子型と表現型を持ちうるという物性がある。これをRNA型分子コーディングと呼ぶことにする。ちなみに、遺伝子型と表現型とが異なる分子に載っている場合は、蛋白質型分子コーディングと呼ぶ。蛋白質型分子コーディングの実現には、「遺伝コード表」と「遺伝子型・表現型対応付け機構」の2つのシステムの創出が必要になる。

遺伝子型は複製容易な秩序プログラムであり、表現型は秩序そのものである。生物の示す秩序も、DNAアダプター(1)の示す秩序も、この遺伝子型/表現型の二重性を持っている。デジタルな秩序プログラムは秩序そのものより、複製・伝達・記憶がはるかに汎用的に容易に行える。このことが、この二重システムの進化能が、秩序そのものしか持たない系(ふつうの物質)の進化能よりはるかに高い理由である。進化分子工学が高速進化させてきた多種多様な高機能高分子の存在が、これを例証している。生物は、ユークリッド空間における散逸構造<sup>[5]</sup>であるが、上記二重システムであることから、配列空間における散逸構造でもある二重の散逸構造であることがわかる。

進化分子工学によって作られたRNAアダプターは、原始生命体の象徴的モデルになり得ることを説明しよう。原始のスープの中では、Zn<sup>2+</sup>イオンなどに触媒されて、RNAは複製されると考えられる<sup>[6]</sup>。すると、原始の海底火山近傍のような非平衡開放系では、まず、金属イオンによって複製されやすい塩基配列が進化してくる(分子進化の構成的原理<sup>[3,4]</sup>)。それはその金属イオンに対するアダプターの性質を多少有しているはずである。金属イオンに対するアダプターは金属イオンの触媒能に影響を与えるから、そのようなアダプターでプラスの影響を与えるものが、次の段階で進化してくるだろう。ここで、そのアダプターは複製反応の触媒補因子なので、局所濃度効果から、他分子の複製より、自己の複製に寄与するチャンスが大きいことを注意したい。このアダプター触媒補因子が最初の自律的生体高分子単位であり、その塩基配列がこの宇宙における最初の符号化デジタル情報であり、そしてまた、この事件のプロセスはBiobit情報処理(定義は第4節)の起源といえるだろう。

ここで述べたタイムラインが、進化能の飛躍的増大を実現してみせたプロセスを示しており、物質進化の段階から生命進化の段階への遷移の時期、すなわち筆者の言う生命の起源であることになる<sup>[3]</sup>。

### 3. 物質進化：Qubit 情報処理による自律進化

(この節で解説することは、筆者の専門外であり、耳学問の成果を、筆者の誤解を含めて、伝えていない過ぎないことをお断りしておく。)従来のコンピュータは、on/off, 0/1の記号列の演算処理、すなわちbit情報処理によって働くのに対し、近未来の量子コンピュータが桁違いに高性能なのは、それがQubit情報処理によって働くからである。Qubit(量子ビット)は量子コンピュータ開発という応用面の要請から造語されたのであるが、量子力学の観測問題で登場する「量子もつれ」(Entanglement)という純粋科学の問題と深く関わっている。量子もつれは量子系の非局所相関の表れであり、J.S.Bell作の「手袋事件」がその解説のためによく引用される。冬の朝自宅を出て電車の駅まで来た男が、寒いのでポケットから手袋を取り出したところ、右手のものしかなかった。左手のは自宅玄関に忘れてきたのである。古典論では、忘れたのは左手の方であるという事件は、自宅玄関で起こった。量子論では、忘れたのは左手の方であるという事件は、駅での観測時に起こった。観測するまで、左手か右手かは量子的にもつれているからである。自宅玄関と駅まで、左右が不確定で、左右は非局所相関しているのである。

量子多体系は量子もつれによって状態に不確定性がある。どの程度不確定かを表す量に、エンタングルメント・エントロピーがある。ある領域の不確定が確定すれば情報を得たことになるから、エンタングルメント・エントロピーはその領域のもつ量子情報量と言ってよく、単位はQubitということになる。2006年に笠真生と高柳匡との共同作業によって、このエンタングルメント・エントロピーの計算公式が考案された<sup>[7]</sup>。量子もつれを重力理論の時空の計量と結びつけ、重力理論の数学を用いて、量子多体系のエンタングルメント・エントロピーを計算する。笠・高柳の公式の成功は、時空もまたQubitの集合体として理解されるとの予想を生み出した。すなわち、物質(量子多体系)と時間空間という物理学の主要研究対象の全てが、深いところでQubitに繋がっているだろうという予想に達したのである。これが冒頭で紹介した「It from Qubit」異分野融合研究プロジェクトの発端であった。

すると、宇宙の進化は情報進化の最初のステージとしてQubitで記載できると予想できる。量子多体系の一つである分子の進化はどうであろうか。宇宙(地球上を含む)における分子の複雑化過程の記載に、そのエンタングルメント・エントロピー(Qubit)が採用できないであろうか。アデニンは水素分子よりも量子もつれが大きい、すなわち大きなQubitを持つ。また、A+B→Cという化学反応をQubitの変化として表現できないであろうか。ICT革命下の次世代分子科学にとっての課題であろう。

### 4. 生命進化：Biobit 情報処理による自律進化とその先

情報理論では、符号化された古典情報は物理的実体から独立しているものとして扱う。その情報

量の単位は bit である。第 2 節で述べた生命の起源における符号化デジタル情報の出現は、第 3 節で述べた分子の Qubit 進化の結果生じた、相補的塩基間の特異的相互作用に基づいている。従って、その情報は、「記号列」を担う RNA 分子の物性と密接に結びついている。すなわち、物質から独立した理想的な記号処理 (bit 情報処理と呼ぼう) のレベルに達していない。この物理的実体に依存した分子情報処理のことを Biobit 情報処理と呼ぶことにする。生命の起源で始まった Biobit 情報処理は、現在の生細胞中でも行われている。ゲノム情報を始めとする現在の生命情報は、それが情報処理される生細胞中では、その情報を担っている生体高分子の特異的相互作用を介して情報処理されている。すなわち、生物進化は、Biobit 情報処理による分子情報ネットワークの自律進化として進行して現在に至った。ちなみに、生細胞中ではなく生物学者の研究ノート上では、核酸塩基の Biobit 性は情報縮約されて記号 A,T,G,C として扱われ、その結果 bit 情報処理されることがほとんどである。ワトソン・クリックの規則に従う相補的塩基対合が、この情報縮約を生物学的に有効なものにしているからである。

では、この相補的塩基対合の結合特異性を検討してみよう。非酵素的 RNA 複製の忠実度  $q$  を計算してみる。テンプレートの塩基 G に対して正しい塩基 C を取り込む確率は：

$$q_{GC} = \frac{m_C K_{GC}}{\sum_N^{A,U,G,C} m_N K_{GN}} \quad (2)$$

ここで、 $m$  はモノマー濃度、 $K$  は会合定数でその隣接塩基による差を無視した。例えば、ある程度本当らしい値<sup>[8]</sup>：

$$m_A : m_G : m_C : m_U = 100 : 10 : 10 : 1 \\ K_{RR} : K_{YY} : K_{AC} : K_{GU} : K_{AU} : K_{GC} = 0.1 : 0.1 : 1 : 5 : 10 : 100$$

を代入してみると、 $q_{GC} = 0.95$ ,  $q_{AU} = 0.69$  となる。つまり、Biobit 処理では、記号を担う物理的実体の物性に依存して、大きな内部雑音が発生する。さらに、環境中には、AUGC 以外の塩基誘導体が多数存在するだろう。上式で N が走るのは AUGC だけではなく、AUGCX<sub>1</sub>X<sub>2</sub>\*\*\*\*となるから、この外来雑音によって Biobit 処理の忠実度はさらに悪化する。この外来雑音も、記号を担う物理的実体の相互作用物性に依存している。「記号」がそれを担う物理的実体と不可分の状況では、この依存性は不可避である。情報理論 (bit 処理) の「記号」が、物理的実体から独立しているのと対照的である。

第 2 節の核酸アプタマー (1) の別の側面を議論しよう。このアプタマーの立体構造を、環境条件を変えて変性させたとする。条件を戻せば、同じ立体構造が再生する。符号化情報 (1) が、自由エネルギー最低状態の立体構造を記憶している。すなわち、記号列とその意味 (立体構造を介して導かれる分子機能) とが、物理化学的に結びつけられている。つまり、bit で扱われる古典情報の純粹記号性 (コードとその意味の対応の任意性) のレベルに達していない。別の言い方をすると、意味論レベルで符号化情報 (コード) が

自由エネルギーに転換する。このことは、蛋白質の立体構造と、記号列としてのアミノ酸配列との間でも成り立つ。ちなみに、Qubit (エンタングルメント・エントロピー) も物質のエネルギーに結びついているようである。

標準遺伝コード表における、アミノ酸と塩基 3 連子 (コドン) との対応関係が、純粹記号の任意的な対応関係ではなく、物理化学的な要素が複数入り込んでいることは前稿<sup>[3]</sup>でも指摘しておいた。

まとめると、Biobit とは、分子物性と絡んだ生命情報の形態を指す。それは、意味論段階で自由エネルギーに転換しうる符号化デジタル情報の情報量の単位である。それは、生命情報の物質的起源を象徴するスローガンとも言える。数学的定義はまだできていないが、式 (2) のような分子間特異的相互作用の物理化学表式を含むことは当然であろう。

生命進化は Biobit 情報処理によって進行し、ヒトを創出するに至った。ヒト脳の進化は、言語、論理、数学を始めとする bit 情報処理を生み出し、それによって、文化の発展が加速的に進行し、ついに 20 世紀後半の ICT 革命をもたらした。その中でも、bit 情報処理に支援された人工的 Qubit 情報処理の発明は、この宇宙における情報進化が一巡し、新たな情報進化の段階に進みつつあることを暗示する。また、bit 情報処理に支援された人工的 Biobit 情報処理の発明は、Biobit 情報処理を高度化する方向 (遺伝子工学や進化分子工学を始めとする) と、それを純粹記号化処理に近づける方向 (DNA コンピュータを始めとする) とに発展し、これも新たな情報進化の段階を示している。

“It from Biobit” を次世代研究プログラムのタイトルと考えた場合、どのようなサブテーマが考えられるだろうか。

1. Qubit 進化から、いかにして Biobit 情報処理が生じたか。Biobit の定式化。
2. Biobit 進化から、いかにして bit 情報処理が生じたか。それはいつか。
3. 生命進化 (Biobit 進化) と科学技術発展 (bit 進化) の共通点と相違点。

## 5. 結語

It from Biobit とは、生命の起源を、符号化デジタル情報の物質的起源と捉え、情報進化の観点から、その研究の重要性をスローガン化したものである。生物、我々自身、および我々が扱う古典情報は、物理法則を含めて、全て It である。Qubit について考察している物理学者も、彼の考察結果も It である。

本稿の結論は図 1. に示したと冒頭で述べたが、別の表現をしてみよう。宇宙の進化は、現在のヒトの知見に限れば、一般相対性理論と量子力学の方程式を解く過程である。すなわち、宇宙という巨大コンピュータの計算過程である。この計算は、Qubit 情報処理で行われる。一方、生物進化は、広い意味でのダーウィン進化機構で進行する。ダーウィン進化機構は最適化問題の一般的近似解法であるから、生物進化とは、地球生態圏という巨大コンピュータによるその計算過程である<sup>[9]</sup>。この計算は、Biobit 情報処理で行われる。数理生物学者がそれを数理モデル化して、通常コンピュータの中の bit 情報処理でシミュレーション計算したとしても。

謝辞

総合研究大学院大学・学長イニシアティブ先導的共同研究・研究企画 WG (2015.11-2017.3) のメンバー各位のご討論と、生命の起源及び進化学会 & 日本アストロバイオロジーネットワークの学術講演会 2018 参加者のコメントに感謝する。

参考文献

1. <http://www.simonsfoundation.org/>
2. 「進化学」などを中心とする先導的共同研究・研究企画 WG 報告書 (総研大、2017.4)
3. Y.Husimi, *Viva Origino* **42**, 38-41 (2014)
4. 伏見譲監修「進化分子工学」(NTS, 2013)
5. G.Nicolis, I.Progogine, “Self-organization in Non-equilibrium System” (John Wiley & Sons, 1977)
6. L.E.Orgel, S.L.Miller, “Evolution of Catalytic Function” (Cold Spring Harbor, 1987)
7. S.Ryu, T.Takayanagi, *Phys.Rev.Lett.* **96**, 181602 (2006)
8. M.Eigen, P.Schuster, “The Hypercycle : A principle of natural self-organization” (Springer, 1979)
9. L.F.Landweber, E.Winfrey eds., “Evolution as Computation” (Springer, 2003)