

## 第6章

# ヒトゲノムと社会

永山 國昭

nagayama@nips.ac.jp

岡崎国立共同研究機構・統合バイオサイエンス

### プロフィール

東京大学理学部物理学科卒業、同理学系大学院博士課程満期退学。東京大学理学部物理学科助手、日本電子(株)生体計測学研究所室長、科学技術振興事業団永山たん白集積プロジェクト総括責任者、東京大学教養学部教授を経て、1997年より岡崎国立共同研究機構 教授

### はじめに／講義の問題意識とポイント

ゲノムとは本質的に何かについて、私の捉え方を紹介する。ヒトゲノムという表現は、本当はあまりよくない。ゲノムはすべて個人のものである。ヒトゲノムというゲノムは存在しない。ヒトゲノムという人類の財産のようなイメージがあるが、個人ゲノムは個人の資産というイメージがあり、個人ゲノムは誰のものかという問題が生じる。その点についても考えてみたい。

## 1. 生命の非還元的構造

### 1.1. ポラニーの「二重制御理論」

最初に指摘したいのは、生命は物理科学法則に還元されない、ということだ。それがゲノムであり、そういう意味でも、ゲノムは生物にとってエッセンシャルな存在であると言える。

マイケル・ポラニーは、1968年に、生命は非還元的構造であることを前提にした「二重制御理論」を発表している。当時は非常に衝撃的な論文であり、現在でも大きな影響を与えている。これは、「生物の機構は、まったく異なる

二重の制御のもとで働くという意味で機械と同じである」という考え方である。そして制御の1つは物理科学法則による制御であり、もう1つは構造、システムデザインなど、ある意図のもとに行なわれる制御であり、彼はこれらをまとめて境界条件と呼んだ。しかも非常に重要なのは、両者がお互いに独立しており、物理科学法則により、境界条件を変えることはできないということだ。つまり、還元主義は、すべて物理科学法則に還元されると考えるが、物理法則に還元されない制御要因があるというわけだ。今の言葉では、さしずめ情報(インフォメーション)と呼んでいいだろう。

したがって簡単な構造から複雑な構造ができる契機は2つあると考えられる。1つは物質法則であり、もう1つは境界条件としての情報である。一番わかりやすい例は蛋白質である。われわれの一番重要な要素である蛋白質は、アミノ酸のつながりからできている。アミノ酸のつながりは遺伝情報として与えられている。それによってアミノ鎖ポリマーがある構造を作る。そのときの駆動力は熱力学である。蛋白質と似て非なるものは、ランダムにアミノ酸をつなげたポリマーだ。これは実験室でも簡単に作ることができるが、まったく構造を持たず、従って機能をもたない。ランダムな並び方では意味をなさないのだ。蛋白質にとって一番大事なのは、配列情報が獲得され、しかもきちんとした構造をとることである。

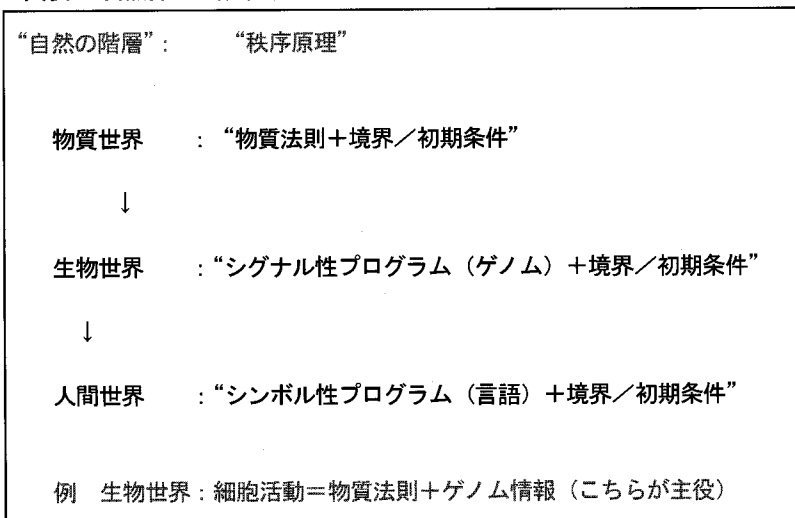
社会学者の吉田民人氏は、生命の情報が社会科学の情報と同じかどうかというテーマを問い詰め、最終的に、次のような結論に達した。すなわちポラニー同様、社会科学であれ生命であれ、情報は、完全に科学的な法則性から独立している、というものだ。私がポラニーや吉田氏の結論を解釈すると、【図表1】のようになる。

自然界は、物質世界、生物世界、人間世界という大きな階層構造を持つ。それぞれは完全に断絶しており、連続性を持たない。生物世界においては、物質世界にはない新しい制御原理としてのシグナル性プログラム(ゲノム)が付加されている。もちろんだからといって、物質法則に違反しているわけではない。しかしそれはどちらかと言えば二義的であり、重要なのは情報である。たとえば現在の分子生物学は、生物の記述にあたり、二義的な物質のこ

とはほとんど考えず、情報ばかり取り上げる。それに対して物理学は物質法則を重視する。

一方、人間世界において、他の2つの世界と決定的に異なるのは、言語の獲得だ。生物学的な条件を抱え込みながら、人間以外の生物にはない言語を獲得した。サルなど他の生物にも言語があるという意見もあるが、最近の学説によれば、われわれの言う言語と異なり意味伝達はあるが文法がないとされている。

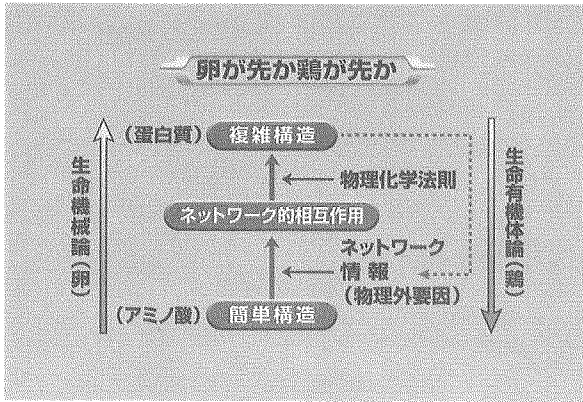
図表1 自然界の三階層と秩序原理



## 1.2. 生命=自己複製系=情報生成系

こうして単純な構造から複雑な構造に至り、人間世界になったわけだが、断絶があるために、ボトムアップから形成していくことはできない。言い換えれば、単純な要素に還元して、それを積み上げれば複雑なものができるというわけではないのだ。

図表2 生命機械論 vs 生命有機体論



2002年放送大学大学院「複雑システム科学」より

簡単な構造から複雑な構造ができるという還元論は、生命機械論である。それに対して生命有機体論では、複雑な構造は簡単な構造に還元できないという立場をとる。これまでの生物物理学は、徹底した還元論をとってきた。しかしそれでは、一番重要な部分が説明できないということも分かってきた。

物理科学法則は人類の誕生以前から存在するが、人間世界のような複雑な系は、単純な要素を積み上げるときに、必ず上位から情報を獲得している。つまり、アミノ酸だけでは蛋白質は構成されず、その情報は外から来る、しかも大きな体系がなければ構成できない、ということが分かってきたのである。したがって、生物がなければ生命も存在しえないわけで、まさに、卵が先か鶏が先かの問題になってしまう。では、なぜ生物は存在するのか、その最初の情報はどこから与えられたのか、という問題が出てくる。

この情報起源の問題を解明したのが、マンフレッド・アイゲンである。彼は1971年に「生体高分子進化理論」を発表し、生命は自己複製系であり情報を生成すると主張した。自己を複製するのは、単に結晶が結晶を複製するような単純な工程ではなく、まったく同じものを複製するためには大変な情報を必要とする。コピーには必ずエラーがあるが、それを乗り越えて同一複製

物を作るのが生物であるとする。そして自己複製系のネットワークができると、情報の根源である遺伝コードが生まれると考えた。その意味で、遺伝コードの起源は、自己複製の起源と同等であると主張している。つまり、情報やゲノムの起源は、彼の定義によると「自己複製する生命」ということになる。それは物質科学法則としての必然性を持って、この宇宙が完了する時間内に生命が誕生し得るのか、という問題につながる。これは、別の言い方をすれば、物質の進化論になるが、これについてはまだまったく結論がえられていない。

### 1.3. 宇宙に生物が発生する確率は

このようにして生命系においては、遺伝情報が主役となることが明らかになった。それは物質原理では語れない自己複製系という生命の原理として最初に仮定するべきものでもある。

問題は、自己複製系のように還元主義ではカバーできない根源的な情報原理がどのようにして生まれたかということである。部分か全体かという問題についても同様で、常に全体が部分に影響を与えるという情報還流があるとすれば、その情報はどこから生まれたかという問いが残ることである。では、自己複製、別の言葉で言えば、情報の起源は偶発的に生まれるものか、必然的に生まれるものか、すなわち、この宇宙に他の生物がいるか——この確率を計算することができるかどうか、試みてみよう。結論から言えば、その可能性はまったくない。その確率の低さは300億年の寿命を持つ現宇宙が1兆回誕生しても、1回発生するかどうかだろう。すなわち、現宇宙では地球にしか生物は存在しない、というのが私の結論だ。次にその根拠を述べる。

自分と同じ個体を複製する複雑な生物系の複雑度はどの程度だろうか。ノイマンの自己組織化の原理によれば、最低500bitsの情報が必要だという。500bitsの複雑さは、私の感覚では、一番簡単な鉱石ラジオよりは複雑だが、トランジスタラジオよりは簡単という程度だろう。その程度の複雑さと機能を持った生命体が、宇宙の中で、他の科学物質同様に偶発的に発生する確率を計算してみる。

すべては、物質の衝突過程における相互作用から生じる。素粒子同士が相互作用する頻度は、1秒間に $10^{30}$ 回という超高速であり、その中で水素や水を発生させるなどさまざまなイベントを試している。全宇宙に存在する素粒子の数は $10^{80}$ 個で、宇宙の年齢は300億年であるから、これらを積算してみる。宇宙である確率で物質が発生するためには、衝突過程でものを作るといふさまざまなイベントが試されなければならない。それは $10^{128}$ イベントという膨大な数になる。一方500bitsの物質が偶然生まれるのは、 $2^{-500}$ の確率、すなわち $10^{150}$ イベントに1回程度と推測される。つまり、自己複製系が誕生する確率は、 $10^{22}$ 回宇宙が誕生し、星、銀河系など誕生を含むその間のあらゆる事象の中で1回あるかないかの計算になり、完全に偶然の結果と考えられる。これに対する反論もある。250bitsの複雑さであれば、もっと確率は高まるというわけだ。もちろんそういう考え方もあるだろう。

いずれにしても、ゲノムは自己複製を可能にする情報という意味で根源的なものだ。物質と生命を区分するもっとも明確なメルクマールと言えよう。宇宙探索の場合、何をメルクマールにして、生物の存在を確認するかと言えば、酸素の存在だという説もあるが、それは非常に物質的であり、それが決定的な証拠になるとは思えない。

これまでのまとめをすれば、ポラニーの二重制御理論で一番重要な点は、以下のように指摘できる。生物は物理科学法則による制御と境界条件(構造、システムデザインなど)による制御という二重の制御を受けている点で機械と同じである。そして2つの制御は相互に独立しているが、生物の場合は、ゲノム情報と呼ばれる境界条件による制御が重要である。ゲノム情報は自己複製系から生まれ、非常に洗練された情報生成系として実現されている。秩序原理としては、すでに見てきたように、物質世界、生物世界、人間世界の3つしかない。生物世界では物質世界の法則に加えてゲノム情報が付加され、人間世界ではさらに言語が獲得される。重要なことは、生物世界では、ゲノム情報がむしろ主役である点だ。

## 2. 個人ゲノムの解読

### 2.1. ヒトゲノム解読完了宣言

2003年4月、ゲノム解読完了宣言が出された。

ヒトゲノム解読完了 予定より2年早く—日本など6カ国参加  
6カ国の研究機関でつくる「国際ヒトゲノム計画」は14日、人間の全遺伝情報（ヒトゲノム）の解読完了を宣言した。解読技術の進展、米ベンチャー企業が競争を激化させた影響で、当初予定より2年早かった。精度の高い「人間の設計図」の完成は、病気の診断や治療、新薬の開発に大きく貢献すると期待される。

人間のDNAの塩基の並びは約31億あるが、国際研究チームは約28億3000万を読み取った。未読部分は生命活動に無関係か、現在の技術では解読不可能という。

研究チームは2000年に解読結果の概略を公表したが、病気の診断などに役立つ99.99%の精度（誤差が1万個に1個に相当）で解読されたものは、全体の3割に過ぎなかった。今回はすべての部分で99.99%以上の精度を達成した。また、生命活動を支えるたんぱく質の設計図に相当する遺伝子の数は、約3万2000個と推定されている。

計画には日、米、英、仏、独、中国の24機関が参加、約3500億円を投じた。日本は、理化学研究所や慶応大が参画し全体の6%の解読を担当。米国（59%）、英国（31%）に続く貢献をした。

（2003年4月15日毎日新聞朝刊から）

2003年7月現在、【図表3】に示すような種々の生物のゲノム解読が進んでいる。

なぜ国際連合軍が、アメリカのベンチャー企業たった1社に負けたかと言え

ば、理由は簡単だ。ゲノム解読のコストは1人分 3000 億円と予測されたが、それをベンチャー企業は 10 分の 1 のコストで実現したからだ。

地球上の個人ゲノム数の総体は  $10^{19}$  (60 億人  $\times$  30 億塩基 =  $10^{19}$  塩基)だが、技術的にはそのすべてを解読できる時期が到来するだろう。しかし現在のコストであれば不可能だ。現在のやり方なら、地球の全資産を投入しても、人類のゲノムを解読することはできないだろう。私はそれを解読するシステムを作ろうとしている。

**【図表3】解読完了ゲノム(2003年7月現在)**

真核生物 (7)
ヒト、マウス、フグ、ホヤ、 ショウジョウバエ、線虫、シロイヌナズナ
原核生物 (114)
酵母、プロトゾア、大腸菌、サルモネラ菌、 枯草菌、コレラ菌、ピロリ菌、赤痢菌、 各種ウイルス 他
古細菌 (16)
好塩菌、好熱菌 他

ゲノム解読のスピードを高速化する計画はさまざまあり、マイクロアレイもその技術の1つだ。現在、ヒトゲノムの情報はある程度解明されているので、それをもとにすれば、さらにコストダウンができる。マイクロアレイ方式では、アカデミック・ディスカウントで1人分約2億5000万円、企業ベースで25億円と言われ、それが現在のゲノム解読のコストとされている。しかし、ゲノム解読のスピードは急速に向上している。そのスピードはあまりにも速い。半導体産業は20年で1000倍程度の伸びで、われわれは自分の手の平に大型コンピュータ並みの能力を持つCPUを携帯電話の中に持つことができるようになった。同様の現象がゲノム解読でも生じている。この伸びはすさまじいが、今後もこのまま進むのだろうか。



## 2.2. 電子顕微鏡によるコストダウン

2000年当時のゲノム解読コストの計算は以下の根拠による。

読み取りコスト  $\approx 10$  円/塩基

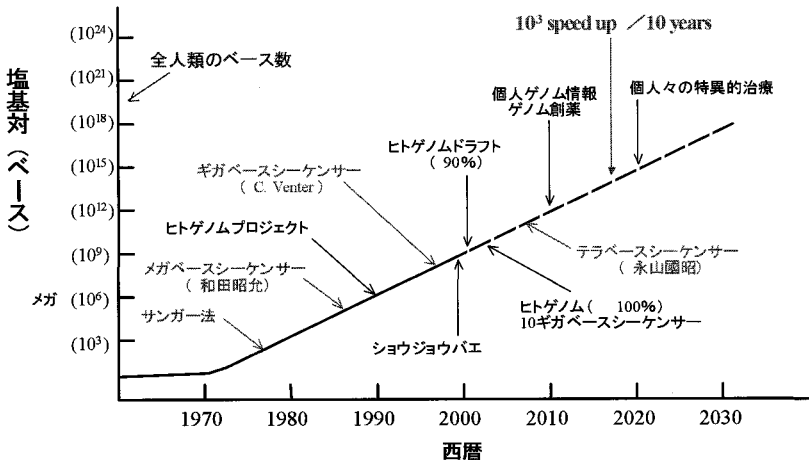
ヒトゲノムコスト  $\approx 3 \times 10^9 \times 10$  円 = 300 億円

ゲノム解読スピードの急速な伸びを支える従来技術は、ロボティクスと超並列化であった。こうした技術をふまえれば、個人ゲノムが解読される時代も決して夢ではない。個人ゲノムを応用した創薬は2010年頃がめどとされているが、世界でもさまざまな手法を用いて、同様のプロジェクトが10くらい走り始めている。アメリカが一番早く、イギリス、日本が追随している。しかし技術はすべて既存技術であり、1970年代に提案されたサンガー法がベースになっている。

解読高速化の経緯を見ると、10年ごとに、メガ、ギガ、テラとペースが上

【図表4】 DNA配列決定法における“和田の法則”とテラベースプロジェクト

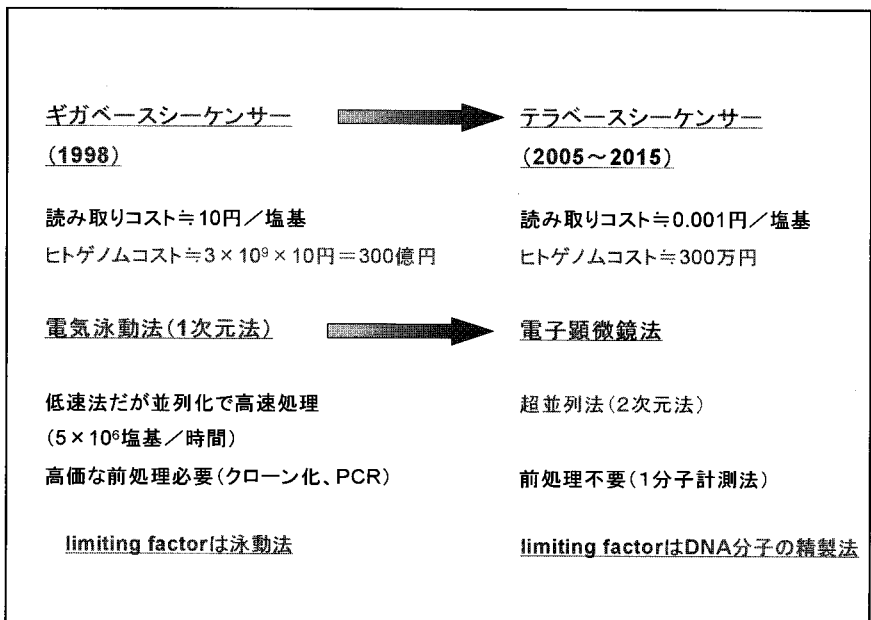
テラベースプロジェクト: 1年間に  $10^{12}$  塩基配列決定を行うシステムの構築 (2001 ~ 2005)



(馬場嘉信、ファルマシア 37(2001)46 を改変)

がっている。しかし次世代であるテラベースシーケンサーを作ろうとすると、現状の方法では1兆円以上の初期投資が必要になる。そのために世界中でさまざまなコストダウンの試みがなされている。たとえば細胞表面で働くチャネルのようなナノメートルの穴にDNAを通し、そのときの電流ドロップを利用するという方法(ナノポア法)で、アメリカではこの方法が急速に普及している。ただこの方法は本質的に確率的方法であり、極めて大きなエラーを伴うという欠陥がある。そこで私は、高速データ取り込み可能な電子顕微鏡をとりあげ、技術開発を続けている(【図表5】参照)。しかしこれは背後の要素技術開発が大変なので、研究コストは膨大にかかり、国からの援助を必要とする。

【図表5】 ギガベースシーケンサーからテラベースシーケンサーへ



【図表6】 テラベースシーケンサーの5つの要素技術

I. ゲノムスコープ	:ラベルした重元素を塩基特異的に弁別する高コントラストの電子位相顕微鏡技術
II. ゲノムアレイ	:1mm×1mm四方に3×10 <sup>9</sup> 塩基相当の1本鎖DNAを並列に配列する技術
III. ゲノムラベル	:1原子金属錯体、金属クラスター錯体、多核ヨード化合物などを結合したラベル化塩基の合成技術
IV. ゲノム塩基対	:水素結合を強めた修飾塩基の合成技術。A-T、G-Cの選択的結合を強化した1本鎖DNAへの重元素ラベル塩基結合の制御。
V. ゲノム画像解析	:電子顕微鏡像をもとにDNA塩基配列を高速に決定する技術

テラベースシーケンサーの要素技術は、【図表6】に示す5つであるが、現在、元素を弁別する電子顕微鏡はほぼめどがたった。後は、1ミリ四方の中に、1人分(30億塩基)の1本鎖の伸張したDNAをきれいに並べるゲノムアレイの技術などが課題として残されている。ちなみに、5つの要素技術の完成度は以下のとおりである。それぞれの技術にポストドクを2名ずつ配置する必要があり、人件費、装置代などでどうしても、1年間で2億円はかかる。後5年間かけて、10億円の予算で研究を遂行しようと計画している。

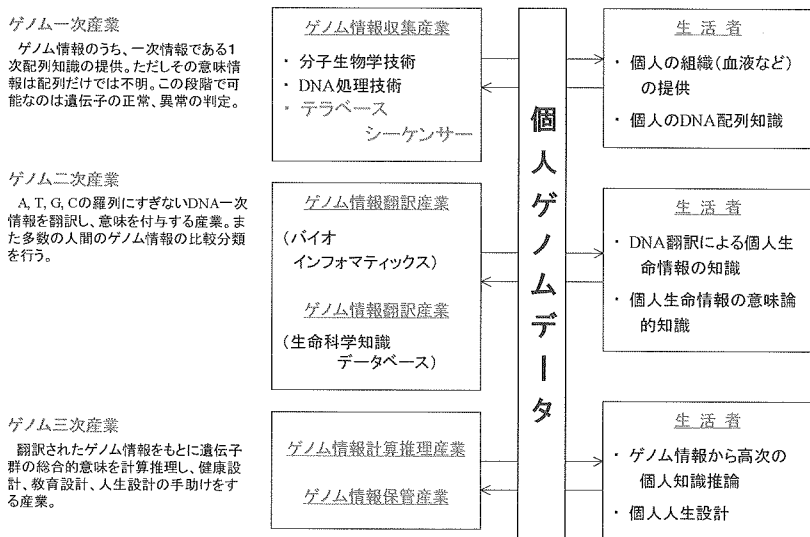
- ゲノムスコープ(要素 I) : ほぼ完成
- ゲノムアレイ(要素 II) : 道半ば
- ゲノムラベル(要素 III) : 道半ば
- ゲノム塩基対(要素 IV) : 理論完成
- ゲノム画像解析(要素 V) : 市販品利用

## 2.3. ゲノム産業成立へ向けて

今後、ゲノムを核とする医学、計算科学が、急速な勢いで進歩するだろう。なぜ、わざわざ従来と異なる方法を用いたかと言えば、先ほどから指摘しているコストの問題につきる。要するに、ゲノムの解読をベースに産業化するバイオベンチャーを立ち上げたいのだ(【図表7】参照)。個人ゲノムを読める時代の到来は、1人1人がゲノムを読むことが可能な状況につながり、それは必ず産業の対象になる。私は2000年に出願した特許をもとに、2003年7月に、ニューヨークでベンチャーを立ち上げた。

「日経バイオビジネス」(2003年6月号)で、10年後のバイオ技術が取り上げられ、私の手がけている方法論も「テラベースシーケンサー——30億塩基対のヒトゲノム1人分を300万円の費用で1台の装置で1日で解析」として紹介された。私の装置は、1年に500人分を解読する装置であり、1人分のコストは300万円の計算だ。こういうテラベースシーケンサーをベースにした新しいゲノム産業が成立する。こうして個人ゲノム解読は、経済の問題に

【図表7】ゲノム情報産業



なる。しかし、倫理の問題を避けて通ることもできない。

私は、この問題は「科学と社会」にとって、きわめて重要と考えている。情報産業は数十年前からは想像もできないほどの規模に肥大しているが、ゲノムが起爆剤になり、どんな産業構造が生まれるかも予測は難しい。個人個人が自分のゲノムが分かり、他人のゲノムも分かるようになれば、かなりの混乱を社会にもたらすだろう。

### 3. 個人ゲノムは誰のものか

#### 3.1. ゲノム解読は“終わりの始まり”

個人ゲノムは誰のものかという問題をもう一度整理しておきたい。

1953年にワトソンとクリックの二重らせん構造の論文が発表されて、今年でちょうど半世紀。Nature誌をはじめ、多くの雑誌で50周年記念特集が組まれ、また海外、日本で多くのイベントも開催された。この影響は学問領域にとどまらず、経済にも多大な影響を及ぼした。そして膨大な技術集積の結果、ついに2003年に、ヒトゲノムが完全に解読された。ここに至るまでには、1869年のミーシャによる核酸発見以来、1900年、ド・フリースらによるメンデルの法則の再発見などを経て、1世紀以上にわたる長い歴史がある。

しかしゲノムの解読は“上がり”ではなく、実は、これからがスタートだ。今後の社会は、想像を絶する世界になりうる可能性もある。コンピュータ1つとっても、これほど急激な技術革新を達成するとは、私自身正直言って想像していなかった。半導体産業を支えた原動力は、20年で1000倍という成長曲線であった。ゲノム産業の伸び方は、半導体産業の上を行っている。そしていったん成長曲線が認知されると、社会はその波に乗ってしまう。良いとか悪いかという価値判断を超える原則があるようだ。全人類のゲノム総体が解読されるのは、このペースでいけば、おそらく2025年くらいと予測されている（【図表4】）。だからこそ、今の段階で、ゲノム情報は誰のものか——人類共有の財産なのか、それとも個人の資産なのか——について、十分議論する必要がある。

### 3.2. ゲノム特許の歴史と展望

特許の条件は、以下のように、有用性、新規性、進歩性などがある。3番目の条件については、国によって、非自明性(米)、発明のジャンプ(英)など、さまざまな表現がある。

- 1、有用性
- 2、新規性（公知、公用は不可）
- 3、進歩性（日）
  - 非自明性（米）
  - 発明のジャンプ（英）
  - 発明活動（独、仏）

アメリカの特許法では、特許対象は「いかなるものであれ新規で有用な方法、様式、製造物、組成物またはその改良」と規定され、自然現象や自然法則は特許の対象にされていない。ただし、それらについても人為的に抽出したものは可とされている。

問題は、ゲノムが自然現象や自然法則にあてはまるかどうか、だ。自然現象も、社会的経済活動の要素が強まるにつれて、特許として認められてきたという歴史がある。微生物特許の第1号は、パストゥールによるビール酵母菌である。微生物が認められれば、組み換え食物はどうか、という問題につながってくる。アメリカの植物特許法では、新規な植物は認められるが、じゃがいもは不可など、理由不明な条件もしばしばある。いずれにしても、経済活動の対象になるにつれて、保護対象となる植物は増えてくる。日本では、種苗法で保護されている。動物特許の場合、人工的な生物すべてが特許対象になる。ジャンボカキの特許は、自然界において突然変異で発生する可能性があるため認められなかった。だいたい最後は「人は除く」という条項があるが、将来のことはよくわからない。

【図表8】 生物特許の歴史

微生物特許	植物特許	動物特許
1873：ビール酵母菌（仏） （パストゥール）	1930：植物特許法（米） （顕著で新規な植物の種 類。ただしじゃがいも類 や野性植物除外）	1980：チャクラバーティ判決 （米） （人工的な生物全てが特許対 象）
1972：人工微生物（米） （チャクラバーティ） （組み換え法で原油成分を 分解する4種のプラスミド を組み込んだ株を特許化）	1961：植物新品種保護法 （米） （あらゆる植物が保護対 象）	1987：ジャンボカキ特許拒絶 （米） （しかし人を除く生物は特許 対象となる）
1973：ヨーロッパ特許条約 （特許対象として微生物 可。ただし植物、動物の 品種およびその生産のため 生物学的手法は除く）	1978：種苗法（日） 1980：組換トウモロコシ （米） （組み換え食品のはし り）	1992：ハーバードマウス特許 可（米） （特許条約の改訂。品種→「生 物材料」として可にする。）
1977：寄託法（米） （藻類、原生動物、細胞系 プラスミド、ウィルス、ベ クターが特許対象となる）		1998：バイオ発明指令（米） （「生物材料」に与えられた特 許はそこから増殖した同じ生 物材料にも及ぶ。「遺伝情報を含 む産品」の祖先も可。）

（参考資料：名和小太郎「ゲノム情報はだれのものか」岩波）

現在は、「生物材料」という定義の再検討をしている。「材料」なら特許の対象になるというわけだ。しかも生物材料の場合は、その適用範囲は、そこから増殖した同じ材料にも及ぶ。すなわち、子孫も特許の対象になる。これはリーチ・スルーという概念で、非常に警戒されている。生物は子孫を増やすという特性を持っているから、子孫にまで特許の効力が及ぶことになれば、その費用は莫大になるからだ。

経済的・商業的活動に組み込まれているという意味では、アメリカが一番進んでいる。フロンティアがどんどん生物側に押し寄せ、かろうじて「ヒト」

の部分で食い止めているという状況だ。

ゲノムについて、非常に重要な問題は、EST(発現配列タグ)問題、すなわちDNAの単なるシーケンサーの断片が特許の対象になるか、どうかだ。ゲノム解読の旗手ベンターがcDNAの断片を特許局に提出して拒絶されている。有効性なし、新規性なし、非自明性なしという理由だが、一番の理由は有効性が記述されていなかったからだ。その後、ベンターはいろいろなかたちで特許をとろうとしているが、メルクという大きな会社が進んで来て、ベンターが特許を取得する以前に、重要なゲノム情報のすべてを公開しようとして、両者が対抗している。最終的には、HUGO 声明が出されて、小康状態を保っている。現在は、単なる配列では特許はとれない。しかし有効性が具体的に立証してあれば可としている。これは、アメリカの非常に甘い見解だ。

ただし、国際連合軍は、それよりもっと厳しい見解を発表している。SNPs、すなわち1人1人の遺伝情報そのものについては特許は認めない。子孫に関わるリーチ・スルー権を認めない。特に個人の問題として重要なのは、ある特定の個人の遺伝情報と判明した場合、本人の同意が必要である。公序良俗に反する発明は否定している。

### 3.3. ヒトゲノム総体を人間文化のプラットフォームに

最後に、問題を整理してみよう。アメリカの考え方がグローバル・スタンダードになるのが、現在の社会の趨勢だから、ヒト以外の多細胞生物は動物を含め特許対象になりうる時代になった。遺伝子の場合、有効性が明示されていれば、特許の可能性が非常に高い。これに対して、アメリカ国内でも議会、宗教団体、グリーンピース、市民団体などから猛烈な反対が巻き起こっている。

自然現象としての生命に特許を認めるかどうかについて、たぶん答えはない。しかし、なんらかのかたちで人工物としての材料という観点から経済活動に入った場合、特許の対象になりうる。それでは、個人ゲノムの情報をどう考えるか。個人という観点を離れて、ヒトゲノムとして取り扱うことができるか。こういった問題がまだよく分かっていない。これから個人ゲノムが



解読される時代になると、色々なところで問題が生じることは明らかだ。

もう1つはプライバシーの問題だ。そもそもゲノムという情報は、どの程度の影響力を持ちうるのか。現時点では、せいぜいガンや遺伝病の診断などマイナーな影響だが、将来はその程度ではない。もしわれわれの持っているゲノムが、個性（身体的能力、知的能力、芸術的能力などすべて）を決定するとすれば、情報としてはすさまじいインパクトを持つ。現時点ではまだゲノムの意味は解明されていない。その全解読をめざし、あらゆるライフサイエンスが邁進している。ライフサイエンスの集約点は、ゲノム情報の意味ある解明に向かっている。だから、いつか必ず、“その日”は来る。

私自身としては、1人1人のゲノムがいつでも読める装置を5年以内で作り、産業化をめざしたいと考えている。これは非常に大きな社会問題を投げかけている。一般的には、ゲノムやバイオについて理解を深めるためにさまざまな啓蒙活動が行なわれているし、経済的な観点からではなく、生活者の立場からゲノムを捉えなおすという機運もある。しかし、それらは結局、経済活動を押しとどめる力にはならない。

私は、若い学生にゲノム産業を肯定するかどうか、また自分のゲノム情報を知りたいかどうかアンケートをとったことがあるが、いずれについてもほとんどは肯定的だった。ただし、その背後には、その流れは押しとどめられないという現状追認意識もあるようだった。

もちろん肯定的な見解ばかりではない。哲学者、たとえばフランシス・フクヤマは、人間の尊厳という観点から、現状について危機意識を表明する。また、ニーチェの「鉄人」「末人」という指摘が現実化するような、ゲノム格差の問題にも言及し、それゆえに社会がゲノムを規制する必要性を説いている。インターネット技術はデメリット以上に、メリットが大きいという社会的なコンセンサスがあるため完全に自由放任にしているが、核兵器は厳しい規制をしている。バイオは、自由放任と政治的規制の中間にあるが、しだいに規制の方向に向かいつつある。

私は、規制とは、われわれの理解を超えた急速な科学技術の進展に対して、経済活動だけに任せず、ゆっくりしたペースの中で人間がいつか受容できる体制を作るまでの時間稼ぎだと思っている。

個人ゲノムはやはり人間の最高度のプライバシーだろう。しかし自分のものかと言えばそうではない。自分が作ったわけではなく、親、そしてさらにその祖先から受け継いだものだ。そういう意味で、人間だけではなく、全生物に共通する公共性を持つ。だから、これは非常に新しい問題をわれわれに突きつけている。まだその答えはない。

しかし、次のような考え方もできるのではないか。たとえば日本人のゲノムがすべて解読され、その総体としての意味が判明したとしよう。そのことは、病気だけではなく、文化、技術、芸術なども含めて、総体としての人間活動の理解につながるのではないだろうか。非常に明快に記述化・計量化可能なゲノムの総体は、人間の文化や社会の情報圧縮という気がする。それは、これまでの歴史的、文化的解釈とは異なる、根源的な新しい視点を与えようと思う。ゲノムは現在は、医学診断などに限定されているが、それを超えるパワーを持ち、人間文化総体のプラットフォームになる可能性がある。

繰り返すが、個人ゲノムが完全に社会に解放される時代がやがて到来する。日本政府が30万人のゲノムを解読するという場合、現在はプライバシー保護のために、誰のものか特定できないような配慮をしている。個人ゲノムが、個人の個性や生き様と対応すれば、総体としてのゲノムは、人間社会全体のマッピングとの対応関係が持てる。この意味は、非常に大きいし、しかもそれが現在のIT産業をはるかに凌ぐ規模の経済活動の基盤になるだろうと予測している。ただし、そのためには、最初に誰でも解読できるという状況を作らなければならないが、それは科学技術で可能であり私も今実践している。

### <質疑応答>

—— 個人のゲノムが読めるようになる時代がもうすぐ到来する。そのときどのような問題がありうるかだが、むしろポジティブにとらえたい、ということか。

**永山** そう思えなければ、自分の仕事を続けられない。

—— もし個人のゲノムがすべて分かったとしたら、現状では、どの程度のことと言えるか。

**永山** 生活習慣病はかなり難しいが、たとえば遺伝子1つか2つがからむような単純な病気は10年以内に解明されるだろう。ただし、解明できても根本的な治療法が見つかるとは限らない。

—— 解析がもっと進むと、さらにいろいろなことがわかってくるだろうか。

**永山** 生物は二重制御であり、物質的な側面と情報的な側面がある。そのうち、情報的な側面を第一義にとらえると指摘したが、その観点に立てば、今のライフサイエンスはいらないかもしれない。入力と出力さえあればよい。この場合の入力とは遺伝子で、個人の遺伝子が1万人分分かったとして、それに対応するそれぞれの身体データ、学業データなどすべてが分かったとしたら、どういうアルゴリズムを使うかは分からないが、入力情報と出力情報の関係づけを行なうようになるだろう。そうすると、中間の物質過程は抜きになり、今の生命科学はいらなくなる可能性がある。

—— 自分のゲノムを知りたいという若い世代が多いということだが、どういうアンケートだったのか。

**永山** たいした調査ではないが、たまたま某大学の工学部の2年生で、生物学の知識のない学生に講義の後、自分のゲノムを知りたいかどうかアンケートをとった(2年間)。予想外に否定的でないことに驚いた。ただし、回答はいろいろある。「すぐ読みたい」「読んでも分からない」「知りたくない」などの意見に集約された。さらに驚いたのは、高齢者の多い場でこういう話をしたときでも、やはり知りたいという人がほとんどだったことだ。年齢に関係なく、未来の可能性について知りたい意識は誰しも持っているようだ。もし残された人生を自分にあつたことをして過ごしたいという欲求がゲノムで分かればすばらしいと思う。

—— 予測されるリスクについては、科学技術はどうサポートできるか。

**永山** すべての技術が、同じような問題を抱えている。放射能の研究で、原爆にいきつくと思った研究者はほとんどいない。私は、産業の立ち上げを意識しているので、ゲノムがもたらす影響についても真剣にならざるをえない。しかし現場はエンジニアリングの世界で、そこには、倫理はない。科学技術としてできるか、できないかだけだ。その過程で、成長曲線が描かれ、経済戦争のフロンティアになると、必ず誰かが産業化を実現する。私はその中で、電子顕微鏡がもっともコストが安く、方法論もよいと思っているので、その領域の特許はおさえようと思っている。私が大学院時代、今から30年前の1960年代は、まだサンガー法も確立しておらず、DNA配列は誰にも読めなくて、世界中で競争をしていた。その中で生き残ったのは、サンガー法であり、30年を経て、技術としては完全に飽和している。タイプライターがワープロに置き換えられたように、何かブレークスルーがなければ、次の発展はない。それを世界中で競争している。発想はみんな同じで、私とまったく変わらない。つまり、産業の基盤としてのテクノロジー開発であり、研究ではない。放射能研究が、原子力産業に発展した契機もどこかにあったはずだ。それは放射能研究が、今のエネルギー産業としての原子力発電所にシフトした経緯である。ある物理学者が核分裂連鎖反応の特許を提出し、産業化（多分軍事化も）の意志を明確にしてからだ。そこから産業化がスタートしている。

私にとっての契機は、ヒトゲノムの解読可能性が証明されたことだ。それまでは私も、先輩の失敗を教訓に、あまり重視していなかったが、解読の意味を考えているうちに、到達点ではなく、出発点として認識し、再度30年に失敗した電子顕微鏡に行き着き、コストが安いことが判明した。そこで、東京から岡崎に移って、開発を始めたわけだ。そのうち、科学と社会の問題に直面し、開発だけではなく、いろいろな機会での発言もきちんとしていこうと思うようになった。

—— 物質世界、ゲノム世界、言語世界の三層があるという構造から言えば、いくらゲノムを集めても、文化に行き着かないのではないかと。物質を研

究すれば、生命が分かると言っているに等しい。

**永山** それは、たしかにそうだ。膨大なゲノム情報をどう読み解くかに関して、配列を公開し、病気などあらゆる情報も公開する。インターネット上でプラットフォームを作り、みんなに参加してもらい解釈していく。そういう活動ができれば、医学だけの問題ではない領域ができそうな気がする。それができると文化になると考えた。

—— それは、血液型性格判断の複雑なものに過ぎないのでは。エンターテイメントとしてはおもしろいけれど、サイエンスとは違う。

**永山** サイエンスの概念を越えていると思っている。

—— 遺伝子の解析という場合、構造解析と機能解析にきちんと分ける必要があると思う。永山先生は、構造解析の大きなプロジェクトを手がけられているが、構造が解析されても、個々の情報がどのような意味を持つかは機能解析をしなければ分からない。現状では、一般に思われているほど、その意味が分かっていない。1つ1つの遺伝子の意味が仮に分かったとしても、それらの相互作用の意味となると、非常にまだ遠い。しかし機能解析が進み、いつかゲノムの総体の意味が明らかになるときがきたとすれば、そのときは、おっしゃるように、文化、技術、サイエンスのレベルにまで連鎖が向かっていく可能性があると思う。

**永山** 今は、ベンチャーという起業家が、知識とコンピュータを駆使すれば一企業として世界連合軍を打ち倒す時代だ。学術的に明らかにする以前に、DNA シーケンスを有料で解明し提供するビジネスも生じうる。そちらの方が早いかもしれない。それも含めて、私は、ゲノム情報産業と読んでいる。それらすべてを HUGO 方式で、インターネット上に公開し、公共のプラットフォームにすることも可能だが、どちらの方向に向かうのか。それはよくわからない。起業が目的なら、そのチャンスはある。学術情報は公開されているから、優秀な人間がコンピュータを利用して意味を解釈するソフトウェアを開発すれば、ゲノムの意味を解釈する会

社はすぐできる。今はその目的でやっていないが、ベンターがしたのは、それだった。つまり、先端的な大規模研究では、コスト意識が競争に勝つ要因であることを、明快に示した。しかもそのことを非常に効率よく行なった。

それに対して、科学者の集団である国際連合軍は非常に効率が悪い。1人1人は効率がよくても、全体としてみれば足並みが揃わず、効率は必ず悪くなる。効率は悪いかもしれないが、みんながハッピーになるのが公共性だと思うが、企業はそういうふうにはできていない。ベンターは決定的にそのことを実証した。しかもアメリカでは、すでにそういう方向に向かっている。それも含めて、私は自分の仕事に絡むことでもあり、どういう社会が来るかについて問題提起をしている。そして次のステップとして、そういう情報産業を立ち上げたいという計画を持っている。

—— 構造解析なら効率向上は期待できるが、機能解析はどうか。実験を伴うので、構造解析ほどには進展しないのでは。

**永山** ゲノムをベースにした場合、血液診断やオカルト的占いより格段に精度の高いものができる。もちろん実験は伴うが、種々学術データも公開されている。丸山ワクチンは3%程度しか効かないという結論が出ているにもかかわらず、いまだに多くの人に信じられている。それがたとえば50%になったらどうか。100%信じるのと同じだろう。

—— ゲノムは諸刃の刃で、効果と副作用がある。たとえば遺伝子上の差別がありうる。では、問題点を指摘するだけではなく、具体的にどうすればいいのかを研究する学者はいるか。

**永山** ゲノム・デバイドの問題は、最高のプライバシーの問題なので、どこまで保護するかというレベルまでしか進んでいない。ケース・バイ・ケースの具体例を通じて、法制化なども含めて対策していくしかない。しかしゲノムの総体の意味がしだいに分かってくることは、病気だけの問題に限定されない。最近少しずつ分かってくることは、これまでネガティブにとらえられてきた病気にも、別の側面がある、ということだ。

病気がプラスの面を持つ場合があるかもしれない。たとえば鎌型赤血球は、貧血の原因になるが、マラリアには抵抗力があるため生き残ってきた。これは遺伝子のプラス、マイナスの側面だ。それを是とするか非とするかという問題にもなる。また、風邪なども熱を出さなければダメだし、つわりをおさえたら母子に悪影響があるなど、いろいろなことがわかってきている。そういう問題は、いろいろなつながりが見えてこないと分からない。そのとき、1つ1つが良い悪いというより、全体のネットワークの中で意味を理解するという方向があり、後者の方向に向かうことを期待しているのだが。

—— 何か問題が生じる前に対処すべきでは。

**永山** それは物事が起きる前に規制するという発想で、ヒトクローンなどその方向で進んでいる。日本もヨーロッパもその問題にはきわめて保守的だが、アメリカは規制が甘くて研究が進んでいる。その中でいろいろな発見もなされているから、10年もすると、相当水をあげられる。マイナスと見えるものは、今の状況だけでマイナスと決められない面もあり、評価するのは難しい。現に、アメリカに比べて、臓器移植は日本ではどうしようもないほど遅れてしまった。日本はそのままで行くのかどうか。今は、臓器移植の遅れを取り戻すために人工臓器に向かっているが、いずれにしても移植の需要は常に社会的に存在する。

だから、ゲノムについてもどういう発展の仕方をするかよく分からない。私は、非常に単純に割り切って考えれば、新しい技術については社会成員の受容力がポイントになると思う。あまり急激に変化すると、受容能力を超えてオーバーフローし、混乱するので、ある範囲内でコントロールする必要がある。問題はそのスピードで、技術自体は必ず受容されていくというのが、私の立場だ。スピードは規制によりコントロールできるが、方向はとめられない。抑止しようとすれば、今の社会生活のかなりの部分を否定せざるをえなくなる。私自身はある程度、自分のライフヒストリーの中でおりあいをつけている。社会に出ている間は戦うが、引退後は静かに生きようとするのを許す社会であってほしい。しかし

社会でファイトしている間は、あらゆる武器を使わざるを得ない。個人としてはいろいろな生き方があるが、総体としてはグローバル・スタンダードとしてアメリカのシステムが世界を覆いつつあり、それに対抗することは難しい。

——生物学を専攻しているが、ゲノムの解読は人間の差別につながると思う。差別の意味がなくなる時代は来るだろうか。

**永山** ゲノムが膨大に解析されれば、非常に膨大な情報だから、その可能性はある。差別はわずかのパーセンテージで、それ以外にすごい能力があることが発見されるかもしれない。そういう面はポジティブにとらえたいと思っている。

——自分のゲノムの構造一覧に対応した機能一覧があれば意味が出てくるのか？

**永山** ゲノム配列の情報をもらっても、個人にはあまり意味がない。しかし、その機能が分かったら、個人の能力や行動の予測ができるところまで発展させられる。現時点では、高次の文法の解読までは進んでいないが、そのうち実現するだろう。そうなると、生き方の指針となるかもしれない。

——自分がある行動をする傾向の人間と解明されたら、社会はどうなるのか。

**永山** それは、社会的に倫理、法整備などで対応していくしかない。根源的にはそれしかない。今は、本人の同意やプライバシーの点から、二重三重にランダムシャッフリングして情報源を分からなくしている。そのような情報守秘のソフトウェアを作る技術などが進んでいるが、その程度だ。

——個人情報もれのないよう法整備するにしても、いったんもれたら手のうちようがない。

**永山** ゲノム情報が漏れたら取り返しはつかないだろう。少なくとも政府はその問題をかなり深刻に考えて委員会を作り、法整備も考えていると思う。



—— たとえば、水泳でも平泳ぎとクロールでは泳法の覚え方が違うが、その違いが遺伝子に還元されるようになると、ポジティブな側面としては苦手な科目の克服なども考えられる。能力の高い子供を作ることも不可能ではなくなるかもしれない。それに対してどの程度のコストをかけるのかどうか。西洋的な方向ではなく、日本人的方法でゲノムを基盤に社会を運営できるように産業化の方向性を考えられるか。

**永山** デザイナーズ・ベビーなど、たしかにいろいろな心配はある。かつてジョージ・オーウェルは『1984年』の中で、個人の情報がすべて解明され、巨大政府にコントロールされるという未来予測を行なった。しかしもし仮に個人の情報を集めようとしたら、膨大な情報が集まり、ネットワーク化していくので、結局コントロールはできない。もちろん、ゲノムという個人的な情報のみをピンポイントで集められたら、どうしようもないが。

—— ゲノムの集積が文化ではない。ゲノムが解明されると人間全部が分かるわけではない。ゲノムが分かればすべてが分かるというのは幻想だ。

**永山** その通りだ。そういう意味では、限界もある。医学的な利用がせいぜいというのであれば、それほどの危険性はない。