

バイオテクノロジーの研究開発戦略

— 分析視角を求めて —

菰田 文 男

キーワード：研究開発，技術戦略，バイオテクノロジー，MEDLINE，データベース

はじめに

21世紀の経済システムは「bio-based economy」の方向に向けて進化することになるであろう⁽¹⁾。生物学，バイオテクノロジーが技術パラダイムの中核を占めるようになる。

19世紀以後の物理学や化学の進歩は，鉄鋼，自動車，電気，石油化学そしてエレクトロニクスなどの豊かなモノの溢れる大衆消費社会を作りだし，市民生活の大きな変化を導いた。さらに，20世紀の後半には，コンピューターサイエンスの進歩が情報社会を生み出し，従来の企業組織や社会の編成原理を水平的，分権的なものへと変えつつあるし，消費者のライフスタイルや価値観を変えつつある。そして今，生物学やゲノム研究の成果が，将来の経済発展やライフスタイルや価値観をさらに変えようとしている。

生物の進化や発生の生化学的な仕組みや遺伝子の発現のメカニズムが解明されてくることによって，われわれは30数億年の生物の進化の歴史が築きあげてきた優れた「知恵」を理解し始めている。生物や人間が生態系をいかに大切に，外部環境と調和して生きることの大切さを教えられ，また外部環境の変化に調和・適応するとはどういうことなのか，それがいかに大切であるのかを教えられている。地球環境問題の深刻さに直面している今日，生物学の視点から環境問題を考えることは大変意義が大きい。生物の多様性を大切にす

ることがいかに重要かは，進化について考えることなしには理解できない。

また，生物のさまざまなレベルでの情報処理機構，すなわち細胞内部の情報伝達機構，化学物質や電気信号を用いた細胞間の情報伝達機構，さらには最も高次の脳の情報処理機構などが解明されるにつれ，その情報処理の仕組みの巧みさ，各要素が自律分散的に情報処理することが全体としての一見脆弱そうであり，実は巧妙で極めて柔軟かつ堅固で高度な情報処理につながる仕組みなどが分かってきている。このような仕組みは，コンピューターサイエンスや通信ネットワークシステムのアーキテクチャに応用され，その進歩に貢献し始めているし，今後さらに利用されることになるであろう。たとえば，フォンノイマン型のコンピューターの限界は，生物の神経回路システムから学ぶ新しいコンピューターアルゴリズムを模索させている。また，これまで主として工場という製造現場に導入されてきたロボットが，家庭などの一般社会にまで浸透してくるのに役立てられるようになる。また，生物の持つ冗長で柔らかい仕組みは企業組織などの社会システムのあり方が自律分散型のものを目指す際の指針ともなる。また，脳の情報処理機構について考えることは，心の価値や満足という，曖昧で人によって大きく異なり，捉えがたいものを理解するのに役立ち，新しい大衆消費社会の解明に役立てられることになる。

このように生物学の進歩はさまざまな領域で大きなインパクトを有しているのであるが（あるい

は、将来有することになるであろうと予想されるのであるが)、その中でも最も重要な意味を持つのはバイオテクノロジー、とりわけその中心に位置するゲノムテクノロジーである。ゲノム研究の成果は医薬品開発、再生医療や遺伝子治療などの新しい医療技術などにも利用されようとしている。また、農業や化学産業で利用され始めている。ゲノムレベルで生命現象や生物の情報処理機構を解明することができるようになったことが、「bio-based economy」を導いているのである。

もちろん、ゲノム研究は科学としてみても技術としてみても未だ黎明期にあり、その将来の発展の可能性は十分には見えてこない。ゲノム創薬といっても、その実現への道のりは遠い。ましてや遺伝子治療、再生医療、人工臓器などの新しい医療はその輪郭がぼんやりと見え始めている段階でしかない。しかし、その実現に向けて研究を推進すること、またそのための戦略を明確にすることが、生物学、バイオテクノロジーに基礎を置く将来の経済の行方を大きく左右することになることは間違いない。バイオテクノロジー、ゲノム研究の戦略の構築は焦眉の課題である。ところが、日本のバイオ研究はエレクトロニクス、情報技術など、20世紀を特徴づける技術分野に比して、相対的に劣っていることは広く受け入れられている事実認識である。ナノテクノロジーのフロンティアで日本の研究が大きく貢献しているのに対して、バイオ分野のそれは見劣りがする。

本稿の目的は bio-based economy に向けて必要となるバイオテクノロジーの育成のための政策や戦略を提起するための基礎作業をおこなうことである。基礎作業とは、他の分野と比較した生物学、ゲノム、バイオテクノロジー研究の特徴、特質を明確にすることである。この特質を知ることが、必要な政策や戦略を提起するための前提だからである。本稿では、その特徴を、(1)情報技術との融合、(2)生き物という複雑なシステムを対象としていること、(3)倫理観や価値観と深く関係する生き物を対象としていること、という3点に焦点を当てて論じる。すなわち、生物学が扱う「生命」「生物」は物理学や化学が扱う「自然」と比して

あまりにも複雑なシステムであるし、また人間の価値観や倫理観との関連を抜きには論じられないという性質を持っているという点において物理学や化学とは異なる。生物学研究は物理学、化学、情報技術などと融合することによって、同じ言語を用いて研究が進められるようになりつつあるとは言いながらも、物理学や化学のような自然現象を扱うわけではなく、また情報科学のようにアルゴリズムという人間の脳が作りだした人工物を扱うわけでもない。「生き物」という高度に複雑で再現性が乏しく、客観性が得難く、また倫理観や価値観と深く関係する対象を研究するので、研究システムであれ研究に必要な人材であれ、他の領域とは異なるシステムや性質を必要とする。

そして、このような認識の上になって、ゲノムサイエンス、バイオテクノロジーを捉えるための全体像を描くことが、研究システムの問題点を知ったり、あるべき研究システムを提起することを可能にするであろう。

そのために、第1、2、3節において生物学、バイオテクノロジーの特質を論じ、第4節でその全体像を捉えるための方法を提起する。

第1節 生物学研究の特質(1) — 物理、化学、情報技術との融合 —

ゲノム研究の起源

今日の生物学研究を最も特徴づけ、進歩を牽引しているのはゲノム研究である genome (ゲノム) とは gene (遺伝子) と chromosome (染色体) との合成語であるが、ゲノムというナノメートルのスケールのマイクロ世界で生命を探求することが生物学研究のフロンティアである。

遺伝情報を担う物質を追い求める研究は、生命をマイクロの世界で見てゆく研究に起源する。近代科学において、物質の究極をマイクロの領域で追い求めていったのが物理学や化学であったとすれば、生命の究極をマイクロの領域で追い求めていったのが生物学である。その最大の目的は医学・医療である。生物学の歴史は医学・医療とのかかわり抜きには論じられない。ペスト、コレラのような感

染症との闘いは大きなテーマであったが、その原因となる微生物の発見のための研究の最大の成果の一つが、たまたまパスツールが腐肉の研究から「生命は生命からしか生まれない」ことを発見したことであった。その後、光学顕微鏡技術の進歩に支えられて、コッホ、北里柴三郎などの多くの研究者が結核菌、ペスト菌、破傷風菌などの微生物が伝染病の原因であることを発見するなどして、生物学の研究は進歩した。

また、ダーウィンによる生物進化の法則の発見は、遺伝物質の追求という新しい研究課題を生み出した。ダーウィン自身は「ゲンミュール」という遺伝情報を担う仮想の物質を想定したが、その後メンデルがデジタルな振る舞いをする遺伝物質の存在が確実であることを証明した。そして、この遺伝物質が細胞の中のどこにあるのかを究明するための研究が続けられた。染色体の中にあるのか、あるいは別の場所にあるのか等の研究は、細胞を構成する化学物質の次元で生物の遺伝の仕組みを考えることができるという確信を生むことになる。そして、慧眼のある物理学者のシュレジンガーによって生命も物理学、化学の言語で語ることができるであろうと予言が可能になる段階にまで研究が進化する⁽²⁾。そして、1953年にDNAの二重らせん構造が発見されることによって、物理学・化学と生物学とのつながりの基本が解明された。こうして生物学は物理学や化学との接点を発

見し、分子生物学という新しい研究領域が生まれるのである。

その後、生命の基本的素材や情報伝達物質としてのタンパク質という高分子の構造や機能や、DNAの仕組みは、原子や分子レベルでの電荷、質量、素粒子の量子的なふるまい等の知識に支えられることなしには理解できない。生物学と物理、化学とは融合を強めるいっぽうである。生物学が物理学・化学などの助けを借りて進歩してゆくの

生物学と物理学、化学、情報技術との融合

生物学と物理や化学との融合の実態を知るためには学術論文の研究分野を見ればよい。そのためには、日本の論文を中心として、全ての科学・技術分野を網羅して収録している学術論文データベースであるJOISを用いるのが最適である。

ある一つの論文が同データベースの複数の科学・技術分類で収録されているとすればそれらの科学・技術分野は相互に関連し融合しているということになる。たとえば、ある論文が生物学と物理学の両分野に収録されていれば、それは生物学と物理学とが融合していることを意味すると解釈できる。これを1987～8年と2003～4年についてみたのが表1である。ただ、JOISは日本の論文が中心に収録されていて、海外の研究動向を十分に反映していないという問題があるので、日米別に分けて

表1 生物学と物理・化学・情報技術融合（論文数）

		合 計	生 物 学	
合 計	1987～88年		150,000	
	2003～04年		199,122	
物 理 学	1987～88年	193,719	1,778	0.9%
	2003～04年	207,337	4,753	2.3%
化 学	1987～88年	124,793	8,518	6.8%
	2003～04年	194,964	19,841	10.2%
情 報 技 術	1987～88年	59,418	1,166	2.0%
	2003～04年	71,152	3,228	4.5%

(注) 科学技術振興事業団のデータベース「JOIS」の論文数の検索により作成。
同データベースの科学技術分類にもとづき検索した。

分析する必要もあろう。

これによると、「生物学」と他の分野との融合が強いのが、「化学」であることが分かる。2003～4年までみて、「化学」の論文の10%は生物学の論文としても位置づけられている。次いで「情報技術」が4.5%、「物理学」が2.2%となっている。ただ、同期間に融合の進んだ度合いを見ると「情報技術」との融合が最も進んでいる。

生物の遺伝の仕組みや、生体の制御の仕組みを理解するためのDNA、タンパク質などの研究は、ヌクレオチドやアミノ酸、ペプチドなどの高分子の性質の知識なしにはありえないので、生物学は化学に依存する。生物学が化学の言語を用いて研究されるようになり、DNAの分子のレベルで解明する研究が遺伝子研究の中心テーマとなったのであり、生物学と化学とが融合してくるのは当然である。

このような融合はさらに進んでいる。その背景にあるのは、化学の成果を生物学で生かすいわゆる「生化学」の段階のものから、より化学に近づいた場所での生物研究である「ケミカルバイオロジー (chemical biology)」に進んでいる。

表1では、化学との融合ほど強くはないが、物理学と生物学の融合も強まっている。事実、生物学は物理学の支えなしにはありえない。結晶回折分析、電気泳動、質量分析など今日のゲノム研究の基本的手法は物理学の研究成果に依拠している。また mRNA と相補的な DNA 断片が何千個も固定され、mRNA が結合して発光することによって遺伝子の発現の解明を可能にする DNA チップ技術も、IC チップ製造技術の延長上に可能になったものである。

さらに、物理学の領域で生まれた、非線形系の科学は生物という非線形的なシステムの理解に大きく貢献している。

さらに、ナノテクノロジーはゲノム研究と融合し、新しい技術開発に役立てられようとしている。この技術は医療などに利用されると考えられていて、「ナノメディスン」という言葉も現れている。

生物学と情報技術との融合

以上のような生物学と物理・化学との融合は、情報技術の進歩なしにはありえない。実際、1987～8年と2003～4年の間に「生物学」と最も融合が強まったのは「情報技術」である。すなわち、1987～8年の2.0%から2003～4年の4.5%へと増大している。おそらく実際の生物研究者の感覚としては、この数値が表現する以上に両者の融合が進んだというのが現実であろう。

生物学研究におけるさまざまな分析機器の開発・導入・利用は、それを制御するためにも、また実験データを解析するためにも、コンピューターに対する依存を大きく強めることになる。シーケンサー、DNA チップ、質量分析、X線回折装置等である。

また、従来の創薬は、見込みのある膨大な種類の化合物をすべてスクリーニングして、たまたま薬効のある化合物を発見するという方式であった。しかしゲノム情報がえられることによって、予め有効な性質を持つ化合物を予想できる。コンピューター技術を利用して創薬を飛躍的に効率化できるだけでなく、従来の方式では得られない医薬品の開発も可能になる。

これらの手法はコンピューターのハードウェアとソフトウェアのめざましい進化が可能にした情報処理能力の発展に依拠している。すなわち、生物学研究の特徴の一つは実験により得られるデータ量が膨大になること、およびそのデータがさまざまな階層にまたがっていて互いに関連しあっていることである。このようなデータの中から、因子あるいはパラメーターを発見し、その重みづけや意味づけをし、因果関係を発見してゆかねばならない。たとえば、ある遺伝子性疾患を持つ患者と遺伝子との相関を見る必要がある。このような *in silico* の研究は、疾患情報の解明、それと遺伝子やタンパク質などとの関連づけなど、さまざまな点で大きな貢献をしている。

このように生物という複雑で異なる階層の要因が複雑に絡み合うシステムの中から、類似した要因を括りだしたり、統計学的に有意な関係を発し

たり、クラスターや概念を作り出すこと等を必要とする。生物学に固有のこのような研究は情報技術なしには不可能である。

さらに、進化のような長い時間をかけて進むので実験に制約がある複雑なロジックは、コンピューターでシミュレーションすることによって解明される。

そもそも、生物学と物理・化学の融合そのものも、コンピューターシミュレーション技術の進歩によって生まれた新しい科学・技術のパラダイムによって、さらに促されたのである。たとえば、コンピューターの演算処理能力の進歩は、それまででは解を得ることが難しかった非線形系の方程式

を解くことを可能とした。そして、決定論的な因果関係にありながら、初期条件のわずかな相違が最終的には極めて大きな相違として結果する系の存在が知られるようになったのである。物理学の領域で気象などの例で解明されたこのような現象は、生物学にも受け入れられ、自然現象と生命現象とをつなぐロジックの解明に向けた研究が少しずつ進んでいる。

また、コンピューター技術の進歩はプログラムを巨大化し、巨大なプログラムの連携やデータベースの統合において、階層型あるいはツリー型や集中管理型のシステムの限界を知らしめることとなり、この傾向はさらにコンピューターがネットワー

表2 バイオテクノロジーの分類

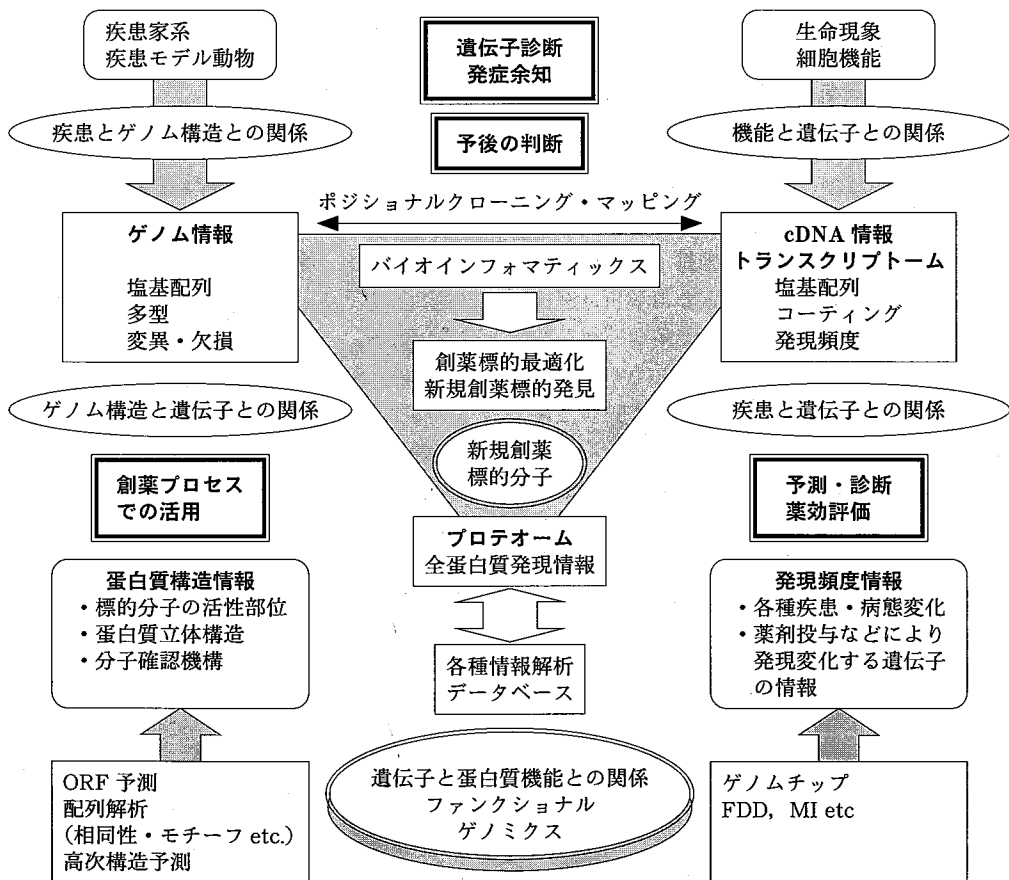
I. バイオテクノロジーの領域		
(1) 遺伝子解析		
DNA塩基配列解読	.....	「分析対象」(a)ゲノム・DNA
遺伝子発現解析	.....	「分析対象」(b)遺伝子
(2) タンパク質解析		
アミノ酸配列分析	.....	「分析対象」(c)タンパク質・化合物
タンパク質相互作用解析	.....	「分析対象」(c)タンパク質・化合物
タンパク質立体構造解析	.....	「分析対象」(c)タンパク質・化合物
(3) 糖鎖解析		
糖鎖構造解析	.....	「分析対象」(c)タンパク質・化合物
(4) 細胞解析		
細胞分析	.....	「分析対象」(d)生物の高次システム
細胞イメージング	.....	「分析対象」(d)生物の高次システム
II. 主要なバイオ関連機器と関連技術		
(1) 機器技術		
DNAシーケンサー	.....	「要素技術」(b)分析手法・機器
DNAチップ	.....	「要素技術」(b)分析手法・機器
質量分析装置	.....	「要素技術」(b)分析手法・機器
セルソーター	.....	「要素技術」(b)分析手法・機器
(2) 試薬・手法		
核酸用試薬・手法	.....	「要素技術」(a)材料・試料技術
タンパク質用試薬・手法	.....	「要素技術」(a)材料・試料技術
糖鎖用試薬・手法	.....	「要素技術」(a)材料・試料技術
細胞用試薬・手法	.....	「要素技術」(a)材料・試料技術
(3) 検出系		
光電子増倍管	.....	「要素技術」(b)分析手法・機器
センサー	.....	「要素技術」(b)分析手法・機器

(出所) 経済産業省産業技術環境局技術調査室『バイオ関連機器に関する産業の現状と課題』(『技術調査レポート(技術動向編)第5号』)2003年から作成。右欄は第4節での筆者の提起する分類との照応関係を示す。

表3 ゲノム関連機器の発展

	遺伝子関連機器	タンパク質関連機器
過去	手作業自作簡易装置 (原理通りに一つ一つ手作業で行う)	手作業自作簡易装置 (原理通りに一つ一つ手作業で行う)
現在	コンピューターによる自動化 (作業の軽減によって効率を上げる。データを高速で解析し共有する)	コンピューターによる自動化 (作業の軽減によって効率を上げる。データを高速で解析)
近未来	微細加工・複合化 (試料や試薬を少量にして安価、高速化をねらう)	複合化・ナノ技術の利用 (詳細な構造の観察やシミュレーションにより働きを解明)
未来	新手法・ナノ技術・コンピューターによる全自動化 (新たな観点からの研究を行う。可用性・精度を高めて医療現場で応用)	新手法の開発 (新たな観点からの研究を行う。医療や創薬で容易に利用する。)

(出所) 経済産業省産業技術環境局技術調査室『バイオ関連機器に関する産業の現状と課題』
 (『技術調査レポート(技術動向編)第5号』)2003年,6ページ,12ページから作成。



(出所) 辻本豪三・田中利男編『21世紀の創薬科学』共立出版,1988年,3ページ。

図1 ゲノム情報から創薬研究へのフローチャート

ク化されることによってさらに強まった。この限界は巨大なシステムの各部分システムの自律性を重視し、分散処理される冗長なシステムへとコンピュータシステムを進化させることになるが、この自律分散処理、冗長なシステムのモデルは生物にある。したがって、情報技術が生物に学び、その成果がフィードバックされて生物の仕組みを解明するのに利用されるという関係も生まれる。このことが生物学と情報技術との融合を進めることにもなった。

生物学と情報技術との融合の進展

将来のバイオテクノロジーが生物学と情報技術との融合をさらに促し、その進歩の上に可能になることは間違いない。それが具体的にどのような形で進むかを経済産業省産業技術環境局技術調査室『バイオ関連機器に関する産業の現状と課題』⁽⁹⁾にもとづいてみてみよう。

同報告書は(I)「バイオテクノロジーの領域」を(1)遺伝子解析、(2)タンパク質解析、(3)糖鎖解析、(4)細胞解析に分類し、(II)それに必要な関連機器・技術である「主要なバイオ関連機器と関連技術」を(1)機器技術、(2)試薬・手法、(3)検出系に分類する(表2)。

そして、同書は「バイオ関連機器と関連技術」の中から「遺伝子関連機器」「タンパク質関連機器」の2つの技術の過去から将来への発展の方向性を表3のように論じ、予測する。基本的には情報技術の導入とナノ技術の導入が技術を進化させると考えられている。この表から、いかにバイオテクノロジー研究が情報技術やそのハードウェアとしてのエレクトロニクス工学との融合をさらに強めることになるかが分かる。

それ以外にも、最近は一つの細胞の内部の仕組みをコンピュータ上で再現するような研究(「システムバイオロジー」と言われる)という研究分野も成立し、急速に進歩し成果をあげている。

このような生物学と情報技術との融合は、伝統的な研究のスタイルや文化や必要な研究者の資質も次第に変えつつある。創業についても研究の内容は変化し、バイオインフォマティクスが極めて

重要な位置を占めるようになってきている。図1はバイオインフォマティクスを中核とした創業のための新しい研究開発の性質がどのようなものとなっているかを示している。

第2節 生物学研究の特質(2)——複雑性

前節では、化学や物理学に支えられて、さらには情報技術を用いて、いかに生物のふるまいや生の仕組みがゲノムレベルで解明されつつあるか、その研究がいかに有効であるかを論じた。また、創業などの形での産業化において、どれだけ重要な意味を果たしているかを論じた。

しかし、そうでありながらも、化学の言語を借りて、また情報技術を導入することによって、生物が解明されるわけではないことも事実である。生物学研究、バイオテクノロジー研究はそれに固有の性質を持っているからである。そして、このことがバイオテクノロジー研究を困難にしているのである。以下ではこの問題についてみてゆこう。

複雑性

生物学には物理学や化学と異なる性質がある。その最も大きい相違は、生物が自然に比して要素が多様で複雑であるという点に由来する。

力学の研究は、自然に作用する力を最も根源で見ると「重力」「強い力」「弱い力」「電磁気力」から成っていることを解明している。また、周期律表の元素は100あまりである。自然は比較的シンプルな法則で理解できる。

これに対して生物というシステムは変数あるいは要素の数や種類があまりにも多い。自然、生物、社会を階層として捉えれば、素粒子、原子、分子、高分子、DNA、細胞、多細胞、ホルモン系、免疫系、神経系、中枢神経系、脳、心、文化というような階層として捉えることができる(図2)。

そして上位の階層になればなるほど、変数あるいは要素の数は増加し、それらが互いに相互作用する複雑なネットワークになる。DNAの塩基配列という形で含まれている遺伝情報は、4種類の塩基によってコードされている。これに比べてタ

人工物	人工知能 技術, 文化 社会 (社会組織)
生物	生態系 種 個体 中枢神経系, 脳 神経系, 免疫系, 内分泌系 器官 細胞 細胞内器官 DNA
化学	タンパク質 高分子 分子 原子
物理	原子核, 電子 クォーク

(出所) 菰田文男『科学・技術と価値』多賀出版,
2000年, 33ページ

図2 自然と社会の階層構造

ンパク質の構造ははるかに多様であり、遺伝子と比べてその理解は格段に難しくなる。さらに、タンパク質が特有の機能を持つためには、糖や脂質がそれに正しく結合しなければならない。

生物の複雑さの事例としてしばしばあげられるのは、ウィルスのような最も単純な生命でさえ、ひとたびそれをバラバラに切り離すと人間の力でそれを元に戻すことはできないという事実である。生物はさまざまな要素が空間的に、しかも時間的要因を含めて相互作用しているので、その理解ははるかに難しい。ましてやその操作はさらに困難である。

当然であるが、この相互作用は多細胞生物にまで進化すれば、細胞間の情報交換の必要性が生まれることによって、さらに複雑なネットワークを作り上げておこなわれるようになり、そのため格段に複雑さを増す。免疫システム、ホルモンシステム、神経システムを通じて細胞間や外部環境と相互作用する。このようにして発信したり受信したりする情報にもとづいて、遺伝子のスイッチを

入れたり切ったりしながら生命活動をするからである。

この理由から、一つのタンパク質の構造を見ただけではその機能や役割は分からないのである。

「生き物」の均質性の欠如・再現性の欠如

生、あるいは生きている状態とは、単にそれに必要な物質の寄せ集めによって可能になるわけではない。試験管の中で最も単純な生命を作り出すことさえ、およそ不可能である。プリゴジンは下位の階層の要素が上位の階層のシステムを作り、それが全く新たな機能を持つようになることを「創発」と名づけたが、生命とはまさに「創発」の産物である。

当然、生物が進化し、免疫システムや中枢神経系を持つようになれば、ますますこの原理の解明は難しくなる。生物の内部では膨大な情報伝達物質が相互作用し、しかも空間的な位置や時間的なタイミングを理解した上で作用している。

タンパク質間の相互作用やタンパク質と遺伝子の相互作用にしても、全体から切り離してそれを解明するだけでは理解したことにはならない。生きた生体の内部でのタンパク質の立体構造、分子軌道、電子の状態をコンピューターで計算しなければならないのである。また、タンパク質の構造も静的に理解するだけでは不十分であり、機能のプロセスで時間とともに形を変えたり、他の物質と結びついたりしてゆくものとして理解しなければならない。タンパク質という生体分子を分離できても、それだけではそれが生体内でどのような活性を持つか、あるいは持たないかは理解できない。医薬品開発の難しさの原因の一つはここにある。ヒトの身体それぞれの場所毎に異なる細胞に含まれるタンパク質の種類を知り、生体の条件の変化とタンパク質の構成の変化の関係を知ることが必要である。そのためコンピューターだけで (*in silico*) 実験するだけでは創薬には至らない。実際に動物等を使って実験しなければ、創薬につながる物質を絞り込むことは難しい⁽⁴⁾。

この理由から、生物の研究はその実験の結果の再現性が乏しくなりがちである。条件が一定では

ないために同じ実験が違う結果を生んでしまう。このことが生物研究を難しくする。

また、生物の個体は、個性を持っている。とりわけ、遺伝子に比べてタンパク質は個性が大きい。その理由はたとえば、外部から侵入する抗原に対する防御機能はその個体に独自の免疫システムを作り上げるからである。したがってプロテオミクス研究はゲノム研究と比べてもその理解が格段に困難になる。

さらにまた、生物は複雑で生きていて個性を持つために均質性がない、いわばヘテロな系である。たとえば、物質ではどの部分をとっても材料としての相違はないのに対して、細胞にしても身体の中の部分の細胞を対象とするか、細胞内のどのタンパク質を対象とするか、外の世界とどのような相互作用しているタンパク質を対象とするかで、研究の結果は異なってくるのである。

たとえば、CG（コンピューター・グラフィックス）で人間の身体筋肉のような柔体の動きを表現する（シミュレーションする）ことは、剛体のシミュレーションに比べて、はるかに難しいのである。身体がヘテロな系だからである⁽⁵⁾。

このように実際の生物のふるまいをコンピューター上で表現することの難しさゆえに、実際の生物を対象としている（すなわちコンピューター上で生物学を研究しているのではない）生物学研究者の多くは、実験室の中の単細胞生物には「生物」を感じるが、コンピューター上で生物のふるまいのシミュレーションを見ても、それには「生物を感じない」そうである。

ゲノム試料・材料生産の困難

以上のような生物研究、ゲノム研究に固有の性質ゆえに、研究の試料や材料の製造は物質の材料を製造に比べて難しくなるのが一般であり、この製造や保管がきわめて重要な課題となる。

ゲノムの機能やタンパク質の構造・機能の研究は、細胞からDNAを抽出し、断片化し、大量に複製し、電気泳動で断片を大きさや重さ別に分離し、読みとるなどのプロセスを辿る。このように、この研究の大前提は、純度が高く均質のDNAの

クローンやタンパク質の結晶などを大量に製造できることである。しかし、これは簡単ではない。そもそもゲノム研究が単なる科学の段階から、実際にそれを操作する技術の段階に進むことを可能にしたのは、塩基配列を読みとるシークエンサー技術の開発、ベクターの発見など多くの技術に依存しているが、その中でもPCR法というDNAの断片を大量に複製するための技術の発明の果たした役割はきわめて大きかった。

タンパク質の構造や機能を解明するためのプロテオミクスでは、大量のタンパク質の結晶や水溶液の大量生産が必要であるが、これはDNAのそれよりも遙かに困難である。タンパク質を自動合成、自動結晶化し、安定して製造し管理することは容易ではない。そのために、多くの研究機関がcDNAからのタンパク質の生産を試みているが、それぞれに個性のあるタンパク質を同時に取り扱う合成精製過程が困難に直面している。この解決の一つの方法は「無細胞タンパク質合成システム」である。

このような材料・試料の製造技術はコンピューター技術の進歩に支えられて機械化・自動化が急速に進んでいるが、最終的には人間の経験や勘などが重要な役割を果たす場合が多い、極めて高度な技術である。

このようにタンパク質の技術の確立の意義は大きい、これを効率的なタンパク質の合成のためにはcDNAのライブラリが必要である⁽⁶⁾。

第3節 生物学研究の特質(3)

— 価値と倫理問題 —

前節で述べた要因以外にも、生物学研究に対して、他の分野の研究とは異なる性質を与えるさらに別の要因がある。それは、人間の身体を扱い、したがって倫理的問題や価値規範の問題と関係してくることなどである。この問題についてみておこう。

身体が「市場」になる

市場ニーズあるいは利用分野という観点からみ

たゲノム研究に最も期待されるのは、医薬品開発や遺伝子治療など、医療分野である。しかし、それは人間の身体を扱うために簡単には実験をおこなうことが許されない。非動物実験、動物実験を繰り返すことによって薬効が十分に期待できる物質、そしてまた毒性が強くないことが十分に期待できる物質のみが人体に実験的に投与され、薬効や毒性を最終的に確かめることができる。

しかし、医薬品の候補物質は単にコンピュータ上で計算したときや、動物を用いて実験した時には効能が見られても、実際に人体で試してみると効能が見られないことはしばしばある。マウスを使った実験では毒性が弱くても、実際に人間に投与してみると細胞内から有毒な物質が排出されないなどの理由から毒性が強くなる場合もしばしばある。非動物実験や動物実験で有望であることが確認された候補物質の多くは、最終的に効能が見られなかったり、あるいは副作用があったりして実用化されることなく消えてゆく比率が圧倒的に多いのである。したがって、動物や人体を使った実験は不可欠であるが、これには大きな時間とコストを必要とする。医薬品開発における最も大きい障害の一つは、候補となる物質の毒性を予測できない場合が多いという点にある。臨床段階で重篤な毒性が見つかり、それまでの巨額の投資が全く無駄になることもしばしばある。

一般に、アメリカでは大胆に新薬が認可されるので、医薬品開発がおこないやすいと言われてるように、それぞれの国の文化や習慣により相違があるとはいえ、バイオテクノロジーの医療分野への応用を目指す研究は、人体をビジネスの場としているという点において、物理、科学や情報技術の研究とは大きく異なっている。このことがバイオテクノロジー研究を難しくする一つの理由である。

倫理感との抵触

ゲノム研究の成果を、医療など人間の身体に利用する時に問題となるのは、それが人間の伝統的な価値観や倫理観や社会的規範と抵触することになりがちである。その最も典型的な事例は生殖医

療への応用である。

不妊治療などの生殖医療は既に大きな市場を形成している。クローン羊ドリーの誕生が契機となってアメリカ・クリントン大統領の諮問を受けてクローン研究の倫理的な意味について検討したL. B. アンドルースはアメリカにおける不妊治療市場の成長という事実、また医師の中でも不妊治療の専門医の収入が極めて多いという事実を指摘している⁽⁷⁾。ゲノム技術がさらに進歩することによって、新しい技術が動員され、新しい治療の可能性が生まれる。

しかし、それが身体に与える影響は簡単には分らない。複雑なシステムとしての身体に現れる特質とゲノム医療との因果関係ははっきりとつかめないからである。また、それが現れるのに時間がかかり、世代を超えて現れる場合には数10年～100年以上の時間を要するからである。二酸化炭素の排出量と地球の温暖化との因果関係の分析も時間がかかり因果関係も曖昧になるが、バイオテクノロジーの人間の肉体への適用にかんしてもそれと同じ困難がある。したがって、ゲノム研究の成果の医療への応用は安全性が優先されることになる。

しかし、安全性が優先されるとはいえ、当然個人によってそれに対してどういう態度をとるかは違ってくる。たとえば、脳死者からの臓器移植についても、肯定的な倫理観を持つ人々と否定的な人々とに分かれるように、その社会的なコンセンサスや規範を得ることの難しい。臓器の再生医療が現実化すると、臓器を再生してまで生きたいのか、人間の杯を再生医療に利用するということは生きた生命を殺すということにならないかといった意見も当然生まれる。ましてや不妊治療のようなものにまでなると、価値観の相違が大きく現れる。

また、タンパク質の構造解析はヒトでなくマウスのタンパク質を対象としている部分が多い。その理由の一つも、ヒトでは倫理的な問題と抵触する可能性が大きいからである。さらに、遺伝子の破壊実験にしてもヒトでは難しので、マウスのそれを使っておこなう場合が多い。たとえば、最近

の遺伝子やタンパク質の機能解析の手段の一つとなっているのがRNAiという遺伝子の一部を破壊してその機能を知るという手法である。このような制約も生物研究、ゲノム研究の重要な特徴の一つである。

以上のようにバイオテクノロジーの医療への適用は伝統的な価値規範や倫理観と対立するケースを多く引き起こす。ガンの遺伝子治療やアルツハイマー病の薬品による治療については大きな問題はないだろう。しかし不妊治療の場合にこれが必要と見なすかどうかは重要な問題である。

この問題に、さらにバイオテクノロジーの適用の因果関係を知ることの困難性や予測の困難性が増加する。一般にバイオテクノロジー研究は未知のウィルスを作り出すことになるかもしれないという危険と隣り合わせである。

以上のように生物学研究、バイオテクノロジー研究は単に科学や技術の領域だけでは答えられない問題を含んでいるのである。このことが、生物学研究に対して他の領域の研究と異なる独自の性質を与えることになる。したがって、第2節で論じたのとは別の意味で、研究者は学際的な知識やセンスを求められることになる。すなわち、人文・社会科学的な知識やセンスである。

バイオテクノロジー研究における普遍性と独自性

第1～3節までの叙述から、バイオテクノロジーが他の分野と融合し、伝統的な生物学研究の性質が変化してくるという傾向と、そうでありながら生物に固有な性質のあることを論じた。

したがって、医薬品開発の方法や必要な資質も変わってくる。

既に解明された遺伝子の機能、タンパク質の構造や機能、疾患情報などはデータベース化されている。このデータベースの中には医薬品の開発に役立つ情報や知識から全く無関係な情報や知識に至るまで、膨大な量の情報がのることになる。そして、ターゲット物質の探索はこのデータベースの網羅的な検索によっておこなわれる。すなわち、機能は分からないが、病気の原因となりそうな

(あるいは、原因となる可能性のありそうな)タンパク質の全てをデータベースから抽出し、疾患情報と結びつけ、可能性のより大きい物質を抽出する。この推論はコンピューターがおこなう。以前のように、勘や偶然に依存するのではなく、データベースから網羅的に探索し、その中から有望な物質を発見するという形で進めるようになる。膨大な可能性の中から発見するので、当然本来であれば標的として認識されなかったものまで検索の対象となる。その中からスクリーニングして得られた標的可能性物質の中のごく一部がリード化合物の候補として研究が進められ、最適化に入る。

しかし、生物は異なる階層の膨大な変数が相互作用しているあまりに複雑なシステムである。実験データも厳密性を欠く場合が多く、その客観性、再現性も得にくい。そのため生物学やゲノムの知識が豊富で生物のふるまいを熟知している研究者の経験や勘に基づく推論に依存する部分が多く残されることになる。たとえば、膨大な可能性のある候補の中から現実性のあるものを目星をつけ探し出さなければならないが、その際、「進化に適したデザインは何か」を基本に据えて見ることが効率的な分子設計を可能にする⁶⁾。進化のメカニズムや分子生物学の知識なしには、優れたソフトウェアの開発も不可能なのである。

また、この理由からコンピューター上でのシミュレーションだけでなく、実際の実験に依存する部分も多く残る。しかし、そのための実験材料の製造なども生物独特の難しさがある。生物研究者にも情報技術にも通じることが必要となる。

一般に過去の研究から得られた知識や情報のストックは、「人体化情報」「モノ体化情報」という言葉が表現しているように、人の頭や体の中や、コンピューターを含む機械設備の中など、さまざまな形で蓄積されている。

このような理由から、コンピューター（情報技術）と生物を両方理解できる人材が必要なのである。ゲノム科学だけでなく、ゲノムを分子レベルで考える能力（分子生物学）、化学物質が生物に対して持つ毒性に関する知識（毒性学）、遺伝子の機能を進化という観点から捉える能力（遺伝学）、

薬品の投与の効果や副作用などの知識にかんする知識（薬理学）、薬効の実際の臨床の場で理解する能力（臨床医学）、生物現象という因果関係の曖昧で多数の変数が複雑に関与する現象を理解する統計学の知識（生物統計学、バイオインフォマティクス）など、幅広い分野に通じた研究者が必要であり、このような人材は日本ではほとんど得られないので、「数人のすぐれた研究者による協同作業が必要」なのである⁽⁹⁾。このように多方面の学際的な知識を必要とするのが、生物・ゲノム研究に独自の特徴なのである。

第4節 バイオテクノロジーの全体像

生物研究、ゲノムサイエンス研究、バイオテクノロジー研究の独自の性質が理解できたが、次の課題はバイオ研究のための戦略や必要な研究システムを模索・検討することである。しかも、そのためには前節までに明らかなされた生物研究の独自性を可能な限り表現できるようにゲノムサイエンス、バイオテクノロジーの全体像を前節までに論じた文脈で描き、その進歩の行方を具体的に示すことである。そのためにはゲノムサイエンス、バイオテクノロジーの的確な分類が必要であり、またその進歩の客観的な解明が必要である。

バイオ研究は膨大な要素技術から成り立っており、しかも不断に進化しているので、このような作業は容易でないが、そのために学術論文データベースが利用できる。したがって本節では生物科学の分野の最も権威あるデータベースの Medline を用いて行うこととする。

ゲノム技術の全体像

ゲノムサイエンス、バイオテクノロジーの全体像を知るための試みとしては、たとえば特許庁『平成15年度特許出願技術動向調査報告書——ポスト・ゲノム関連術——』2004年、特許庁『技術分野別技術マップ』の「遺伝子工学」1999年、「免疫工学・バイオ医薬品」2000年など、特許データを用いておこなう研究がすでに存在している。特許は産業の研究の全体動向を知る上で極めて重

要であり有効である。

しかし、ここでは学術論文を用いて全体像を描くことにする。なぜならば、ゲノムサイエンス、バイオテクノロジーの全体像を知るためにはその的確な分類が必要だからであり、その観点からは正確な分類項目を持つ学術論文データベースを用いて行うほうが的確であると考えられるからである。

この分類を行う上で重要な意義を持つ研究は、第1節でみた経済産業省産業技術環境局技術調査室の報告書ある。上述のように、同報告書はゲノム研究領域を(1)遺伝子解析、(2)タンパク質解析、(3)糖鎖解析、(4)細胞解析に分類し、それに必要な関連機器・技術を(1)機器技術、(2)試薬・手法、(3)検出系に分類する。

この分類の特徴と意義は、バイオテクノロジーを「分析対象」と「要素技術」という観点から分類しているという点にある。すなわち、表2の「I. バイオテクノロジーの領域」は分析の対象あるいは目的を示し、「II. 主要なバイオ関連機器と関連技術」はその分析に必要な要素技術の群を示している。

このような認識に立って、筆者はゲノムサイエンス、バイオテクノロジーを次のように分類する⁽¹⁰⁾。

- (1) 要素技術
 - (a) 材料・試料技術
 - (b) 分析手法・機器（計測技術）
 - (c) バイオインフォマティクス（ソフトウェア）
- (2) 分析対象
 - (a) ゲノム/DNA
 - (b) 遺伝子
 - (c) タンパク質・化合物
 - (d) 生物の高次システム
- (3) 利用用途、社会的ニーズ

「材料・試料技術」は遺伝子の機能やタンパク質の構造や機能を知るために必要な DNA やタンパク質のライブラリー作成技術などであり、「分析手法・機器」はそれを分析するための電気泳動、質量分析、DNA チップ/マイクロアレイなどの計測機器であり、「バイオインフォマティクス」

とはその解析のためのソフトウェア/アルゴリズムや統計処理技術である(言うまでもなく「分析手法・機器」も広い意味ではバイオインフォマティクスに含まれる)。

これらの材料と分析機器を用いて「ゲノム/DNA」「遺伝子」「タンパク質・化合物」「生物の高次システム」が解明され、このことが最終的に「利用用途, 社会的ニーズ」が充足される。「タンパク質・化合物」ではタンパク質の構造や機能が解明され、「生物の高次システム」では細胞内や細胞間のコミュニケーション, 免疫系, 神経系のメカニズムが解明される。また、「利用用途, 社会的ニーズ」には医薬品開発, 遺伝子診断・治療, 遺伝子組み替え作物発酵技術, 培養技術, 変異処理技術, 環境汚染処理技術などが含まれる⁽¹¹⁾。

学術論文数によるバイオテクノロジーの進歩の分析

技術の全体像と進歩のトレンドをさらに詳しく, かつ計量的に知るために, Medline にもとづいてみてみよう。表4は表2の各技術分野の中に同データベースの Mesh Term の技術用語をあてはめて, その論文数をみたものである⁽¹²⁾。論文数とは1997~98年と2001~02年の2時点について, 世界全体で発表された論文数である。そして, 列は2001~02年の論文数が1,000件以下, 1,000~5,000件, 5,000件以上に分け, 列は2時点間の論文の伸び率が5倍以上, 2~5倍, 1~2倍, 減少の4つに分類したものである。

言うまでもなく, 論文数が多い技術は, 成熟しつつあるともいえるが, しかし長い歴史を持ち,

表4 バイオテクノロジー論文数

	5000以上	1000~5000	1000以下
5倍 以上	REVERSE TRANSCRIPTASE PCR PROTEIN STRUCTURE, TERTIARY	DNA CHIP COMPUTATIONAL BIOLOGY GENOMICS GENE EXPRESSION PROFILING SEQUENCE ANALYSIS, PROTEIN PROTEOME	RNA INTERFERENCE PROTEIN ARRAY ANALYSIS PROTEOMICS DATABASE, PROTEIN DATABASE, GENETICS PROTEIN INTERACTION MAPPING PHARMACOGENETICS FOOD, GENETICALLY MODIFIED
2倍 ~ 5倍		SPECTROMETRY, MASS, MALDI STEM CELLS PLANTS, GENETICALLY MODIFIED	PEPTIDE LIBRARY
1倍 ~ 2倍	DNA, COMPLEMENTARY DNA PRIMERS MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY CRYSTALLOGRAPHY, X-RAY ELECTROPHORESIS, POLYACRYLAMIDE GEL ELECTROPHORESIS, GEL, TWO-DIMENSIONAL SPECTRUM ANALYSIS, MASS SEQUENCE ANALYSISs, DNA GENE EXPRESSION NEURONS CLINICAL TRIALS	CRYSTALLIZATION GENE LIBRARY DRUG DESIGN GENE THERAPY ANIMALS, GENETICALLY MODIFIED	SEQUENCE HOMOLOGY IMMUNITY DRUGS, GENERIC
減少	POLYMERASE CHAIN REACTION CHROMOSOME MAPPING		

(注) 行は1978~88年から2001~02年の論文数増減、列は2001~02年の論文数を示す。

(出所) Medline の検索に基づき作成。

この技術をベースとしてさらに新しい多数の技術が生み出されるベーシックな「中核技術」である。また、増加率が多いのは急速に成長しつつある「エマージング技術 (emerging technology)」である。したがって、この論文数の推移を見ることによってバイオ技術の進歩の動向、あるいは基本的な流れを知ることができる。

まず、技術の変化、あるいは研究の中心のシフトを示すのは変化率であるが、5倍以上増加したのは「GENOMICS」「GENE EXPRESSION PROFILING」などのゲノミクス、「PROTEIN STRUCTURE, TERTIARY」「PROTEIN ARRAY ANALYSIS」「PROTEOMICS」などのプロテオミクス、「DATABASE, PROTEIN」「DATABASE, GENETICS」などのバイオインフォマティクスにおいてみられる。研究の中心がDNAの塩基配列の決定のような段階から遺伝子の機能やタンパク質の構造・機能の探索にシフトしており、それと比例してバイオインフォマティクスの重要性が高まっているということを知ることができる。

論文絶対数が多いのは、「DNA, COMPLEMENTARY」「DNA PRIMERS」「CRYSTALLOGRAPHY, X-RAY」など第2節でその重要性を論じた「材料技術」や、「ELECTROPHORESIS, POLYACRYLAMIDE GEL」「SPECTRUM ANALYSIS, MASS」などの分析機器などの要素技術に多く見られる。これらの要素技術の開発がバイオテクノロジーの進歩を支えてきた中核技術であることが分かる。

また、ゲノム創薬というニーズの実現に向けて「CLINICAL TRIALS」「PHARMACOGENETICS」等の技術も増加している。

日本のバイオテクノロジーの実態を知り、戦略を考えるためにために国別の論文数をみる必要がある。したがって、日米英の3国について、(米国論文数) $>$ (日本論文数) $\times 2.5$ あるいは(米国論文数) $<$ (日本論文数) $\times 2.5$ 、及び(日本論文数) $>$ (英国論文数)あるいは(日本論文数) $<$ (英国論文数)を基準とし、

- (I) (米国論文数) $>$ (日本論文数) $\times 2.5$,
かつ(日本論文数) $<$ (英国論文数)
- (II) (米国論文数) $>$ (日本論文数) $\times 2.5$,
かつ(日本論文数) $>$ (英国論文数)
- (III) (米国論文数) $<$ (日本論文数) $\times 2.5$,
かつ(日本論文数) $<$ (英国論文数)
- (IV) (米国論文数) $<$ (日本論文数) $\times 2.5$,
かつ(日本論文数) $>$ (英国論文数)

と分類する。

その結果、日本はほとんどの技術がアメリカに対して2.5倍以上の差をつけられている。しかし、イギリスに対しては、日本が勝っている分野も多い。とはいえ、「GENOMICS」「PROTEOMICS」「PROTEIN FOLDING」など、研究の最も根幹となるゲノミクスやプロテオミクスの分野で、イギリスに劣っている。(IV)に属するのは、「材料・試料」としての「POLYMERASE CHAIN REACTION」「DNA, COMPLEMENTARY」など、「分析機器・手法」としての「ELECTROPHORESIS, POLYACRYLAMIDE GEL」「PROTEIN ARRAY ANALYSIS」などである。代表的なエマージング技術である「RNA Interference」などである。これに対して、(I)に属するのは「DRUG DESIGN」などである。これの意味するところは、日本は個々の要素技術に関しては優れたものがあるにしても、それがシステムとしてのゲノム創薬などの市場ニーズを目指した研究として結実していないということであろう。

バイオ研究戦略構築に向けて

バイオテクノロジー研究を振興するための政策・戦略を構想するためには、バイオテクノロジーの全体像を描くことである。そして、その全体像を、技術の進歩の基本的トレンドを表現できるように描くことである。たとえば、第1~3節で論じたような情報技術との融合を表現できたり、また *in silico* では解明できず *in vitro*, *in vivo* の研究に必要な実験材料や研究機器の重要性を表現できるように、全体像を描くことである。

本稿では、そのための本格的な研究をおこなう

ことはできない。本稿で学術論文のデータベースである Medline の検索対象とした技術は限られていて、十分に網羅的なものとはなっていない。今後の研究をまたねばならない⁽¹³⁾。しかし、本稿からもいくらかの知見を得ることができる。

すなわち、分析の対象が DNA の塩基配列の解明から遺伝子の機能やタンパク質の機能の解明にシフトしつつあること、ゲノム創薬に向けた研究がそれをそれをリードしているということ、日本のバイオ研究は市場指向的（あるいはニーズオリエンティッド）でなく、このことが個々の要素技術では優れたものがあったとしても研究全体の中に位置づけられてシステムとして機能しにくい環境が見られること、等々である。これらの問題や特質を全体像を描くことが今後の課題である。

このように全体像を描いた上で、これと日本のバイオ研究にかんするさまざまな特徴や性質を結びつけて論じることが、その問題点を析出することを可能とする。それはたとえば以下のような現実である。

アメリカの NIH (National Institutes of Health) の手厚い研究支援に比べて、日本にはそのような仕組みが存在しないという点にあらう⁽¹⁴⁾。バイオテクノロジー分野への政府研究資金でみても、アメリカのそれは群を抜いて多い。たとえば、政府の省庁機関別の研究開発予算は、2004年には国防省が51%であり、NIHは22%と第2位であった。さらに基礎研究だけに限定すると、NIHが55%で圧倒的に多くなる。この背景には、1994年に「バイオ技術研究イニシアチブ」が宣言されるなど、バイオテクノロジー研究の連邦政府の科学・技術投資の最優先分野として位置づける取り組みの強化などがある⁽¹⁵⁾。

また、アメリカでは NIH の支援を受けた大学や公的研究機関の基礎研究の成果が、ビジネスに結びつけられるような仕組み（ベンチャービジネスやベンチャーキャピタルが育成される風土）が確立されている。

さらに、日本の医薬品分野の技術開発の遅れは、製造業の研究開発の業種別研究開発費のシェアの相違からも読みとれる。1997年の場合、日本で

は医薬品産業が占める割合は6.0%、ドイツが6.5%であるのに対して、国防向けの研究開発の比率が大きいアメリカでも7.6%に達しており、日本を上回っている。さらにイギリスが22.2%、フランスが12.6%に達している⁽¹⁶⁾。

さらにまた、第1、2節で見たように、生物学の研究は物理学、化学、情報技術との親和性を強めているし、反面で生物研究に固有の性質がある。実験、試料・材料の製造、多様な因子の多変量解析などの統計処理能力と人間の勘の結合させる能力など、独自の資質を持つ研究者を必要としている。しかし、一般に日本は生物の研究者が少ない。『科学技術白書』によると、日本の民間企業の研究者に占める分野別の比率をみると、2001年には、市場指向的な「工学」が65.6%であるのに対して、基礎研究的性格の強い「理学」は21.7%であり、「理学」の中の「化学」が全体の15.4%、「数学・物理」が5.1%であり、「生物」はわずか1.2%でしかない。「保健（医学／歯学）」「薬学」の合計が3.3%であるので、それと合わせても、4.5%でしかない。しかも、1979年において「生物」が1.1%、「保健」が3.2%であるから、過去20年間にほとんど変化を示していないということになる⁽¹⁷⁾。また、日米の生物学・薬学の学位取得者数を比較すると、1998年の場合、アメリカが修士6,368人、博士5,854人であるのに対して、日本はそれぞれ2,607人、476人でしかない。

バイオテクノロジーの全体像を的確に描き、その全体的な枠組みの中でこの様な個々の問題点や特質を位置づけて理解することが、トータルな観点に立ったバイオ政策や戦略の提起を可能にするであろう。

むすびにかえて

総合的に見て、日本のバイオテクノロジー研究の水準、あるいはその産業分野における市場競争力は、他の技術分野、たとえば物理分野におけるナノテクノロジーや情報技術分野におけるエレクトロニクス工学などのそれに比して、明らかに劣っている。言うまでもなく、その対極にあり、世界

のバイオ研究をリードしているのがアメリカである⁽¹⁸⁾。

これに対して、日本でも1999年に「バイオテクノロジー産業の創造に向けた基本戦略」が決議され、『バイオテクノロジー大綱』や『b-JAPAN』計画が取り組まれた。2001～5年の『科学技術基本計画』において、「情報通信」「ナノテクノロジー」「環境」とともに「ライフサイエンス」は重点4分野の一つとして、政府の研究開発予算を重点的に配分されることになった。縦割り制度の弊害を脱していないという批判等もあるが、バイオテクノロジーに対する支援政策は次第に強化されつつある。大学から民間企業への技術移転や大学発ベンチャーの育成の取り組みも進んでいる。しかし、その取り組みがどれだけ成果をあげることができるかどうかは、現時点では不明である。したがって、これまでの日本のバイオ研究の問題点や限界を解明し、さらに振興のための政策・戦略を強化することは不可欠である。

日本のバイオテクノロジー研究の遅れの歴史的背景を論じた岸宣仁氏の興味深い研究を始めとして⁽¹⁹⁾、多くの研究や報告書がその理由について論じている。

本稿では、生物学、バイオテクノロジー研究の振興のためには、この研究の特質について明確にしておくことの必要性を論じた。すわち、一方ではバイオテクノロジー研究が情報技術や物理学・化学などの他の分野との融合を進めつつあること、そのための研究システムや人材の必要となっており、他方では生物学に固有の独自性を持っているということであった。したがって、関連する多くの領域にまたがる知識が求められるということ、あるいは異なる領域の研究成果を融合させるようなシステムが必要であるということになる。そしてこのような基本的な認識をベースとして、ゲノムサイエンス、バイオテクノロジーの全体像を描くことが新しい政策・戦略の提起にとって役立つ。bio-based economy に向かいつつある今日、このような研究の重要性が高まっていることは間違いない。

《注》

- (1) Japan Association of Bioindustries, *Aiming to Realize a Biosociety and Bio-based Economy simultaneously Achieve Health, Safety and Harmony with Nature*, Japan Association of Bioindustries, 2001. OECD Internal Coordination Group for Biotechnology, *Biotechnology Update*, No 14, February 2005. R. W. F. Hardy, "The Bio-Based Economy", in J. Janick and A. Whipkey (ed.), *Trends in New Crops and New Uses*, ASHS Press, 2002.
- (2) E. シュレーディンガー (岡小天・鎮目恭夫訳) 『生命とは何か』岩波書店, 1951年。
- (3) 経済産業省産業技術環境局技術調査室「バイオ関連機器に関する作業の現状と課題」(『技術調査レポート(技術動向編)』第5号), 2003年。
- (4) ゲノム創業のこのような性質については、辻本豪三・田中利夫編『21世紀の創業科学』共立出版, 1998年, 長尾拓・成宮周・加藤隆一・宮本英七編『最先端創業』共立出版, 2000年をはじめとして、多くの研究がある。
- (5) 倉地紀子「映像に隠された先端科学」『日経サイエンス』2002年9月。
- (6) 先端的な研究試料などへのアクセスができないことがゲノム研究の障害の一つであることについては、OECD, *Genetic Inventions, Intellectual Property Rights and Licensing Practice*, 2002, Chapter 1.
- (7) L. B. アンドルース (望月弘子訳) 『ヒト・クローン無法地帯』紀伊國屋書店, 第2章。
- (8) 古川功治・中村春木「生体に学ぶ高親和性抗体の設計」日本生化学会編集, 後藤祐児・谷澤克行編『タンパク質の分子設計』共立出版, 2001年, 所収。
- (9) 加藤隆一「創業の現状と将来の展望」長尾拓・成宮周・加藤隆一・宮本英七編『最先端創業』共立出版, 2000年, 所収, 764ページ。
- (10) ゲノムサイエンス, バイオテクノロジーの全体像や, 中核技術などの理解には, 上述の経済産業省産業技術環境局技術調査室『ハガイオ関連機器に関する産業の無現状と課題』(『技術調査レポート(技術動向編)』第5号) 2003年に加えて, Brown, K., (2000). "The Human Genome Business Today", *Scientific American*, July 2000. Clark, N. and K. Stokes and J. Mugabe (2002). "Biotechnology and Development: Threats and Promises for the 21st Century", *Futures*, (34). Howard, K. (2000). "The Bioinformatics

- Gold Rush”, *Scientific American*, July 2000.
- Lau, N. C. and D. P. Bartel (2003), “Censors of the Genome”, *Scientific American*, August 2003.
- Misky, S. and J. Rennie (1997). “What Cloning Means for Gene Therapy”, *Scientific American*, June 1997.
- Mullis, K. B. (1990). “The Unusual Origin of the Polymerase Chain Reaction”, *Scientific American*, April 1990.
- Wickware, P. and Smaglik, P., (2001), Proreomics Technology: Character References”, *NATURE*, (413) などが役に立つ。
- (11) バイオテクノロジーの利用分野・用途については、バイオインダストリー協会編訳『バイオテクノロジーと21世紀の産業』オーム社、1999年、文部科学省研究振興局ライフサイエンス課等『平成15年度バイオ産業創造基礎調査報告書』2004年、等が有益である。
- (12) National Institute of Health (2000), *Medical Subject Headings: Annotated Alphabetic List*, NIH, 2002 から抽出した。
- (13) より網羅的な検索に基づく研究として、F. Komoda, “Bio Based Economy and the Opportunity for Developing Countries”, *Eastern Economic Review*, Vol. 1, 2006, (forthcoming) を参照されたい。
- (14) 掛札堅『アメリカ NIH の生命科学戦略』講談社、2004年。
- (15) バイオ、ゲノムテクノロジーにおけるアメリカの高い研究水準と市場競争力については、たとえば Commission of the European Communities, Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, *Life Science and Biotechnology—A Strategy for Europe*, 2002.
- (16) また日本の Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology の推計によれば、2000年場合、日本7.6%、ドイツ6.8%、イギリス30.8%、フランス15.4%となっている。
- (17) 文部科学省『科学技術白書』平成13年版、第2部第2章第1節、2-2-8図。
- (18) アメリカのバイオテクノロジー政策・戦略を理解する上で、古いがしかし本質をついた分析として、Kornberg, A. (1995). *The golden helix: inside biotech ventures*, University Science Book, California がある。
- (19) 岸宣仁『ゲノム敗北』ダイヤモンド社、2004年。中村祐輔・中村雅美『ゲノムが世界を支配する』講談社、2001年。新井賢一『東京ゲノムベイ計画』講談社、2002年。新井賢一・黒川清・野口照久・吉田文紀『黄金のDNAらせん』日本経済新聞社、1998年。榎佳之『ヒトゲノム』岩波書店、2001年。清水信義『ヒトゲノム計画の虚と実』ビジネス社、2001年。

《Summary》

Research and Development Strategy of Biotechnology:
Calling for an Analytical Perspective

KOMODA Fumio

The economic system in the 21st century will evolve to a bio-based economy. The products of genome research will be used for example for new medical treatments, drug discovery, regenerative medicine, and gene therapy. Moreover, these products will also play a very important role in the improvement of productivity in agriculture. Therefore, establishing biotechnology promotion policies is indispensable for developed countries and developing countries. In order to establish these policies, it is necessary to describe a synopsis of biotechnology and clarify the mainstream of biotechnology. In addition, the characteristics of bio-research and its difficulties must be clarified.

Therefore, the first three sections of this paper describe some features of biotechnology based on genome science. Above all, the fusion of biology with physics and chemistry is discussed, followed by a description of some features peculiar to biology research such as difficulties in materials production, or the necessity to consider ethical issues. Section 4 describes a synopsis of biotechnology with the help of the following classification: (1) requisite technologies, (2) subjects of analysis, (3) application of biotechnology and its human, social, and market needs. The synopsis takes shape through research into the number of theses in each category.

Keywords: R & D, technological strategy, biotechnology, MEDLINE, database