

日本の展望—学術からの提言 2010

報告

基礎医学分野の展望



平成22年（2010年）4月5日

日本学術会議

基礎医学委員会

この報告は、日本学術会議基礎医学委員会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議基礎医学委員会

委員長	谷口 直之	(第二部会員)	大阪大学産業科学研究所、寄附研究部門教授
副委員長	鍋島 陽一	(第二部会員)	京都大学大学院医学研究科教授
	大隅 典子	(第二部会員)	東北大学医学系研究科教授
	菅村 和夫	(第二部会員)	宮城県立がんセンター総長
	竹縄 忠臣	(第二部会員)	神戸大学大学院医学系研究科特命教授
	谷口 維紹	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
	長田 重一	(第二部会員)	京都大学大学院医学研究科教授
	中村 祐輔	(第二部会員)	東京大学医科学研究所ヒトゲノム解析センター長
	野本 明男	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
	廣川 信隆	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
	廣橋 説雄	(第二部会員)	国立がんセンター総長
	本庶 佑	(第二部会員)	京都大学大学院医学研究科特任教授
	御子柴克彦	(第二部会員)	理化学研究所脳科学総合研究センターチームリーダー
	三品 昌美	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
	宮下 保司	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
	山本 雅	(第二部会員)	東京大学大学院医学系研究科教授

※ 名簿の役職等は平成 22 年 3 月現在

要 旨

1 作成の背景

これまでの生命科学研究は「生命現象の包括的・統合的な理解とその人類の福祉への貢献」を大きな目標として推進されてきた。しかし、生命科学の研究成果が生命現象の解明のみにとどまらず、人類の福祉に貢献するという認識が社会において切実に共有され始めた現在、これまでの研究推進の方策に再考が迫られている。本委員会では、生命科学研究の質的変遷に対応し、さらに国民からの要望の強いヒトへの応用科学としての健康科学領域を創設するため、今後の資源配分のあり方および人材育成を含め、総合科学技術会議、文部科学省、文部科学省科学技術・学術審議会に対して適切な施策として実行に移されることを要望し、本報告を取りまとめた。

2 現状及び問題点

科学の本質である「科学的原理の発見」と、科学に対する社会的要請である「科学的原理の社会的展開」との緊張関係を、研究教育体制と学術政策という手段を媒介としてどのように日々の研究の中に融合させ、科学をいかに社会の一部として位置づけていくべきか、今考える時期に来ている。この意味では、「生命現象の包括的・統合的な理解」のための生命科学と「人類の福祉に貢献するための人間の科学」としての健康科学とを両立させ、今後問題とするべき事柄を提言した。また生命科学の中でも特に基礎医学の人材育成は大きな問題を抱えている。それについても提言する。

3 報告等の内容

(1) 10～20年程度の中期的な学術の展望と課題

現在の生命科学を俯瞰すると、細分化と専門化が進行する一方、学問の壁を乗り越えて多くの方法や体系を融合する新しい方向が芽生えており、物質科学、生命科学、システム情報科学、人間科学などを統合した全体的理解へのアプローチが必要となる。特に、ポストゲノム科学の中で、遺伝子発現制御機構からゲノム産物を計測可能な包括的生物情報 (Ome) として系統的に解析する手法 (Omics) により産出されるデータやクローン資源を大規模な基盤として個別の学術研究が推進される方向へと展望を広げつつある。実験的大量データ収集システムとその処理を担うバイオインフォマティクスや人間・生命のシステム的な理解が求められると同時に、鍵となる分子群や現象の学際的アプローチを駆使した深い理解も必須である。したがって、今後医科学研究領域においては、脳神経系、発生、がん、免疫系の生命システムの統合的な理解のための学際的アプローチによる深く掘り下げるタイプの研究とシステムバイオロジーを含む統合的研究、双方に対する経済的支援が必要である。このためには、医科学研究領域では、生命科学の応用研究としての健康科学研究領域の設置が必要となる。すなわち、生命科学の研究成果を国民に還元する仕組み、すなわち医療への技術移転や創薬への橋渡し研究は、これまでは、個々の研究者の努力に依存するものがほとんどであった。5年前より橋渡し (TR) 研究拠点の設置と橋渡し研究の推進が行われてきたが、十分に行われているとは言えな

い。技術移転を系統的かつ組織的に行っていくためには、人材育成、研究推進、技法の開発などのプラットフォームを構築する必要があるだけでなく、その構造が社会に組み込まれるための倫理的および法的な基盤の整備が必要である。また、このようなプロセスを効率的に実行するためには、新しい研究技術や研究資源をより多くの研究者が共有するためのシステムやプラットフォームを積極的に構築していく必要があり、長期的かつ集中的な健康科学に対する予算投資が重要である。また、今後開発すべきポストゲノム生命科学技術には、①データ生産要素技術（巨大容量DNAシーケンス技術）など各要素の大容量データ生産技術、②システムデータ生産技術、③システムデータ生産技術で開発されたオミックス基盤となるゲノム資源を保存・頒布する技術とバイオリソース整備、④大容量データ解析処理基盤技術、などがある。

また、開発すべき生命科学／健康科学テクノロジーは、①DNA・タンパクシーケンスなどの生化学的技術、②細胞や個体を「制御」、「操作」、「作る」技術、③生体構成物質情報計測技術、④生物システム模倣技術、⑤非侵襲生体計測技術、⑥医薬品開発プラットフォーム、⑦人体構成物質・遺伝情報測定技などの情報を計測技術と組み合わせた新技術、⑧病理検査技術、⑨医療システム支援技術、などがある。

(2) グローバル化への対応

これまで日本の先端技術が我が国の生命科学の躍進を支えてきたにもかかわらず、アカデミアでは技術開発が必ずしも高く評価されない傾向にある。一方で欧米に比べるとオリジナリティーのある新規技術は低調であると言わざるを得ない。我が国の研究用の生命科学機器の70%は外国製品であり、我が国ではユーザーとしての国際的位置づけである。独創性のある技術開発には、継続的な求心力のある経済的サポートが必須である。動物研究支援体制、データベース構築、コホート研究のような基盤的な研究は競争的資金の性格から外れるため、適切な施策がなされない傾向にある。短期的な成果を望むのではなく、長期的な視点に立った継続性のある支援が必須である。競争的資金の充実がなされることにより、研究を支えるハード・ソフトのインフラ整備が脆弱化している。グローバル化への対応には、国際的に通用する人材育成も必要であり、アジア、アフリカなどからの人材や、欧米諸国からの人材を受け入れるには、外国人教員の大幅な採用、英語による講義体制、学位の授与、国家試験に至るまでの一貫したシステム改革が必要となろう。

(3) 社会のニーズへの対応

社会のニーズに対応するためには、継続的な研究への援助が必要である。特に、長期的な視点から社会に大きな利益をもたらす基礎研究（ボトムアップ研究）は大学を中心に文部科学省の科学研究補助金により行われており、研究費総額は、およそ年間2,000億円に達しているがその採択率は23%程度である。基礎から応用に至る研究を疎かにしては将来を見通した国家戦略となり得ない。両者の研究費のバランスが重要であるにもかかわらず、現在のトップダウン型研究は短期的効果を狙った応用研究が主で、 balan

スが崩れているのが現状である。応用研究に用いられるブレイクスルーは基礎研究から生まれる訳であるから、トップダウン型研究とボトムアップ型研究は連携して推進される必要がある。

現在、大学においては若手基礎研究者が激減し、危機的状況にある。学生に研究者になりたいと思わせるためには大学が世界トップクラスの研究業績を出し、かつ一流の研究者を教員としておく必要がある。大学には個人の興味から発した多様な研究によって、多様な学部・大学院学生を育てる使命がある。一方、研究所は国家レベルの横断的研究（タンパクプロジェクト、ゲノムプロジェクト、感染症、ワクチン開発、基盤技術開発研究、脳、発生、免疫系など生命システムの系統的戦略的研究）、国民の健康に重大な疾病の研究など社会から強く推進が要請される国家プロジェクトなどを担うべきであり、しかも、大学と研究所の関係は補完的であるべきである。

(4) これからの人材育成

我が国で優れた人材が博士課程に進み、またポストドクとして研究し、科学技術立国の将来を担っていくためには、多くの優れた人材が研究者になることを希望し、かつ優れた研究を遂行できる環境を整備する必要がある。このためには、学納金を国が徴収する現在の仕組みを改め、逆に国あるいは大学が厳選した学生を生活費まで支援する制度の導入が必要である。こうした仕組みなしに大学院の国際化、レベルの向上は不可能である。さらに、大学院生を全国規模で募集し、各大学で5-10名程度の学生には奨学金としてポストドク並みの援助を与える制度の導入も必要である。国際基準に照らした大学院の整備・機構改革、さらには国際的に通用する人材育成が必須である。

医学研究者の激減とそれに対する方策については、喫緊の課題である。6年前から始まった「卒後臨床研修必修化」によって、医師の臨床指向や、専門医指向がますます強くなってきた。結果として、基礎医学研究やトランスレーショナルリサーチを担う人材が激減し、医学研究は危機的な状況に直面している。このことは、臨床能力の高い医師が増加するという面があるとは言えるが、長期的には我が国の医学のレベルを大きく低下させることになる。現在の医学知識および医療技術が過去の基礎医学研究の成果の上に成立しているのと同様に、今後の医療の進歩は現在の医学研究に依存していることは明白である。しかし、医学研究を担う人材が育たなければ、将来の人材を養成する大学での教育スタッフの不足を招く。さらに、この状態が続けば将来の医学の発展が損なわれ、国民の健康増進や経済的利益の観点から取り返しの付かない事態に陥ることが危惧される。この危機を回避するために、早急に優秀な人材を医学研究に投入するような具体的な施策が求められている。そこで医学部卒業生の最低5%を医学研究に従事させるような具体的な方策を提案する。

目 次

1	はじめに	1
2	10～20年程度の中期的な学術の展望と課題	2
(1)	基礎医学の中期的な課題	2
(2)	生命科学：生命現象の統合的理解	2
(3)	研究体制	6
3	グローバル化への対応	9
(1)	日本の生命科学技術開発の傾向と国内外の状況	9
4	社会のニーズへの対応	10
(1)	健康科学：ヒトを対象とした応用科学	10
(2)	日本における基礎・臨床医学研究推進のための仕組み：大学と研究所のあり方	13
5	人材育成について	15
(1)	大学院制度	15
(2)	ポストドクのキャリアパスについて	15
(3)	医学研究の必要性	15
6	おわりに	19
	<用語の説明>	20
	<参考文献>	28
	<参考資料>	28

1 はじめに

本邦における生命科学研究は「生命現象の包括的・統合的な理解とその人類の福祉への貢献」を大きな目標として推進されてきた。しかし、生命科学の成果が生命現象の解明のみにとどまらず、人類の福祉に貢献するという認識が社会において切実に共有され始めた現在、これまでの研究推進の方策に再考が迫られている。科学の本質である「科学的原理の発見」と、科学に対する社会的要請である「科学的原理の社会的展開」とを生命科学においてどのように融合させ、いかに社会の一部として位置づけていくべきか、今考える時期に来ている。この意味では、「人類の福祉に貢献するための人間の科学」としての健康科学と「生命現象の包括的・統合的な理解」のための生命科学が今後問題とするべき事柄を報告する。

2 10～20 年程度の中期的な学術の展望と課題

(1) 基礎医学の中期的な課題

本邦における生命科学的研究は「生命現象の包括的・統合的な理解とその人類の福祉への貢献」を大きな目標として推進されてきた。しかし、生命科学の成果が生命現象の解明のみにとどまらず、人類の福祉に貢献するという認識が社会において切実に共有され始めた現在、これまでの研究推進の方策に再考が迫られている。科学の本質である「科学的原理の発見」と、科学に対する社会的要請である「科学的原理の社会的展開」とを生命科学においてどのように融合させ、いかに社会の一部として位置づけていくべきか、今考える時期に来ている。この意味では、「人類の福祉に貢献するための人間の科学」としての健康科学と「生命現象の包括的・統合的な理解」のための生命科学が今後問題とするべき事柄を報告する。

今後医科学研究領域においては、脳神経系、発生、免疫系、がん、などの生命システムの統合的な理解のための学際的アプローチによる深く掘り下げるタイプの研究とシステムバイオロジー等の研究、双方に対する研究推進が必要である。

(2) 生命科学：生命現象の統合的理解

現在の生命科学を俯瞰すると、細分化と専門化が進行する一方、学問の壁を乗り越えて多くの方法や体系を融合する新しい方向が芽生えており、物質科学、生命科学、システム情報科学、人間科学などを統合した全体的理解へのアプローチが必要となる。特に、ポストゲノム科学の中で、遺伝子発現制御機構からゲノム産物を計測可能な包括的生物情報 (Ome) として系統的に解析する手法 (Omics) により産出されるデータやクローン資源を大規模な基盤として個別の学術研究が推進される方向へと展望を広げつつある。実験的大量データ収集システムとその処理を担うバイオインフォマティクスや生命のシステム的な理解が求められると同時に個別の key molecules や現象の学際的アプローチを駆使した深い理解も必須である。

① 多様性解明のための分子生物学、細胞生物学、分子遺伝学の推進 (ゲノミクス、プロテオミクス、メタボロミクス、グライコミクス、フェノミクス)

生命を物理と化学の法則で説明する根源的な試みが科学の原動力となり、分子生物学が誕生した。研究材料としての生物も、大腸菌やフェージなどが主力であった黎明期から、真核微生物である酵母が脚光を浴びる時代、さらに多細胞系のモデル動物としてショウジョウバエや線虫の時代を経て、現在のマウス研究の隆盛がある。複雑なシステムについての理解が可能になった今、ほ乳動物の研究からヒトの理解への期待が大きい。分子生物学の方法論は、ゲノミクス、プロテオミクス、ゲノミクス、グライコミクス、メタボロミクス、フェノミクスといった網羅的研究の発展によって膨大な生命システムの情報を提供しており、生命理解の基盤整備に向けて更なる高次の階層に向かいつつある。また、一方では数学を取り入れて複雑な生命活動を理解しようとするシステムバイオロジーによる体系的理解に向けた研究が進められている。これに対して細胞生物学の方法論はいまだ発展途上にある。それを打開する方策として、

生物学と物理、化学、工学との連携によって生まれる融合領域に大きな期待が寄せられている。例えば、生きたままの細胞や組織を、光を用いて精密に観察・操作するライブイメージングが、これまでの方法ではアプローチできなかった謎を解きつつある。生命の最小単位である細胞に軸足を置く基礎研究は、生命科学の重要な基盤として、異分野間の連携を生かして推進していくべきである。さらにモデル動物を用いた分子遺伝学的アプローチは、細胞生物学による解析とあわせ、個体レベルで標的分子の働きを通して生命現象を理解する上で非常に大きな力を発揮し、方法論としても益々発展していくと思われる。

② 生命原理と情報原理を結ぶ新たな学問体系の創出

生命は、36億年の進化の過程で生まれた物質の一存在形態である。それは変動する環境の中で、世代を超えて自己を再生産する特別な能力を獲得した。このために、自己の構造を記述し、次代に伝える遺伝情報、自己を再形成する巧妙な仕組み、さらに環境の情報を汲み取りこれを利用して生き抜く技を備えている。このように、生命は自己の情報構造を保持し展開するという、物質の特殊な存在形態であり、その仕組みを「情報原理」として理解することができる。生命は、巧妙な分子機構を創り出し、これを細胞、さらに高次のシステムへと高める仕組みを実現した。この情報原理は、分子機械とも言うべき生命のすばらしい物質的な仕組み、生命の物質的基礎を明らかにする普遍的な原理である。情報は、遺伝、細胞機能の仕組み、免疫、発生、脳など生命高次機能系の発現過程のすべてに共通している。生命機能は、多細胞からなるシステムが環境から情報を手に入れ、それを処理し、利用する情報装置であるといえる。情報系では、分子という物質的な基盤の上に、情報が展開していくため、その理解には物質と情報の双方の原理を交錯させた研究が必要である。物質の発展は、生命という特殊な機構を生み出すに止まらず、ヒトを生み出した。ヒトは意識と心を持ち、言語を用い、文明を築く生物である。これは発展した脳がもたらしたものであり、ヒトの理解には脳の解明が必要である。生命の理解はヒトの理解、さらにその社会の理解に向かう。これには心の問題が大きな役割を果たす。また、がんをはじめとするヒト疾患の理解とその克服にも大きく貢献することになる。心とその社会文明は、生命の範疇を超えてさらに高次の社会と文明という仕組みを生み出している。したがって、これからの生命科学研究は自然科学、社会科学、人文科学、倫理学などを包括した研究体制を確立しなければならない。

③ 個体行動・社会システムに至る統合的人間科学の構築とその脳科学的基盤

400年以上に及ぶ近代自然科学を支えてきたデカルト的な知の枠組みの中では、自然科学の領域は、哲学、心理学、教育学、社会学、倫理学、経済学等の人文・社会科学と峻別されてきた。しかし現代そして近未来の生命科学の発展は、これらの枠組みに共通の新しい人間観を打ちたて、さらには、芸術・文化の諸領域を含むあらゆる人間の精神活動の所産を視野に入れた総合的人間科学を構想することを可能にしつつあ

る。同時にこの総合的人間科学は、現代社会の喫緊の課題となっている「こころの荒廃」をもたらした様々な精神・神経疾患の治療と予防に結びつくだけでなく、人間理解をサポートし、社会・教育システムにおける様々な問題の解決に貢献できると期待される。こうした総合的人間科学を可能とする生命科学的基盤の1つが脳科学である。脳の活動は、個体としての認識・思考・行動を司るに留まらず、異なる個体間や生物種・生態系との間に相互作用を生み出し、社会集団を形成する上でも決定的な役割を果たしている。このようなコミュニケーションや社会行動など、個体を越えたレベルで、脳がどう作動するかについての研究は、いまだ端緒にすぎたばかりである。特に、現代社会で頻発する社会行動の異常は、古典的な精神疾患の概念だけでは捉えられない側面が急速に拡大しており、社会全体の病理メカニズムとして捉える必要性から、より広い視点からの研究が急務となっている。また、ある個体が他の個体や生物と共存して生きていくためには、それぞれの個体が各々の遺伝子情報の上に、後天的な経験情報を蓄積することで、社会的生存のために必要な機能を脳の中に形成する必要がある。豊かな社会性を備えた人間を育てていく上で、後天的な情報獲得として、教育のあり方が大きな影響を及ぼすことはいままでの間でもないが、これに対して何らかの指針を与える客観的指標や生物学的根拠を与える総合人間科学を求める声は切実である。従来、こうした人間と社会や教育にかかわる問題に対するアプローチは、人文・社会科学的なものに限定されがちであったが、今後、自然科学の一学問領域としての脳科学の壁を打破し、人文・社会科学と融合した新しい人間観に基づくアプローチが求められている。このような観点に基づき、脳科学は豊かな人と社会の形成に資するために、コミュニケーションを含む社会行動を形成・制御する分子・細胞レベル、回路レベル、そして個体・システムレベルでの機序解明を行っていくことが必要である。また、地球生物の進化の産物として脳がどのように誕生したかという発生原理を明らかにし、脳にとって適切な環境を明らかにするとともに、脳神経系の発生・発達と可塑性の原理の解明、さらには脳情報処理と機能発達との関連に関する検討などを重点的に推進することが必要である。またこうした研究を推進するに当たっては、複数個体から得られる脳機能に関する膨大なデータの相関構造を含めて解析する大規模データの解析・処理技術やデータベースの開発、さらには、遺伝子解析と社会的認知機能との関連を結びつけるコグニティブ(認知)・ゲノミクス手法といった基盤技術の開発を重点的に推進することが必要である。

④ 物質科学、生命科学、システム情報学、人間科学の統合としてのシステムバイオロジー

生命科学は、分子生物学を基盤技術としてあらゆる分野で大きく進展してきた。この発展をもたらした情報の量は、きわめて膨大であり、これを基に生命の仕組みを理解し、人間の福祉につなげていくためには、「今」に立脚した着実な研究が必要である。臨床への橋渡し研究や、ゲノムプロジェクトで蓄積されてきた膨大な情報を遺伝子の機能解析につなげるための機能ゲノミクスの重要性を考えてみれば、未来が現在か

ら独立して存在し得ないことは明らかである。これらの分野は、日本でも緒についたばかりであり、長期にわたる計画的な支援が必要な分野といえる。達成するための戦略として、システムバイオロジーを、(ア) 実験的大規模データ収集システムの構築と多量のデータ解析、(イ) 生命のシミュレーション、(ウ) 人工生命、に大別して考える。

ア 実験的大規模データ収集システムとバイオインフォマティクスデータドリブンサイエンス (Data-driven Science) の基盤

ゲノム研究は、生命体を作り出す構成要素が有限であることを示した。それと同時にその情報があまりに膨大であるため、迅速かつ正確に大量の情報を解析し、そこから必要な情報を抽出し解釈するためには新しい方法が必要であることも示した。ゲノム構造や遺伝子構造・遺伝子発現データだけでなく、ゲノム配列以外の遺伝情報ともいえる DNA のメチル化、RNA による遺伝情報伝達やタンパクの糖鎖付加に見られるような化学的修飾についての情報蓄積も指数関数的に増加し、生命機能の複雑さも増大し続けている。この状況に鑑み、遺伝情報にコードされる物質を包括的に収集し、その構造と機能の解析を系統的に効率よく行う「実験的大規模データ収集システム」を担う基本技術を開発する必要がある。つまり、生体を構成する要素を系統的に解析し、これをもとに、「生体システム」を推定、実験的証明を行う必要がある。したがって、「実験的大規模データ収集システム」の技術開発は、最初に取り組まなければならない最大の課題である。次のステップとして、「実験的大規模データ収集システム」によって、膨大な数の未知の生体構成要素が解明されるに伴い、「大量のデータを取り扱うバイオインフォマティクス」研究が重要となる。それは、生体内構成分子のネットワークや遺伝子多型と疾患の多因子連鎖解析や比較ゲノムに基づく進化研究などにより生命現象や人間の理解が現実的なものとなりつつあるからである。

イ 階層を越えて予測を可能にする生命活動のシミュレーション：理数生命情報科学の構築

多量の情報処理そのものを目指す方向の代表である「バイオインフォマティクス」は、遺伝子の発現とその制御、化学的修飾など、分子の世界で生ずる膨大な情報の制御原理を解明することを目指しているが、遺伝子、分子などの物質の実態と、その表す記号系列の情報が絡みあい、膨大な組み合わせ数の世界が現れる。これは、数理、情報、物質を結ぶ新しい世界であり、いまだにこれを解明する確立した方法論がないため、多くはシミュレーションに頼っている。階層が上がると、生命構成要素とその情報は、細胞内での信号伝達を主体にした細胞機能発現の情報処理に変換される。いわゆるシステムバイオロジーは、シミュレーションによりここで起こる多次元非線形のダイナミックな現象を解明するのに必要である。この場合、シミュレーションを媒介に、それを越えて原理に迫る研究方法が

ここでも求められている。階層をさらに進めると、免疫系、発生、発がん、さらに脳・神経系等の高次生命機能系の情報処理に至る。ここでは、外環境情報が細胞レベルからシステムに変換される論理的な演算をはじめとする計算が必要となる。さらに高次のシステムになれば、記憶とそのデータ構造を自己組織化し、認識と判断を行い、運動計画を立てその制御を行うなど、情報が主導した活動が続く。この解明には、物質の特性を利用して、情報処理を如何に実現していくか、情報の表現とその計算アルゴリズムが問題になる。すなわち、情報が主体となり物質を手段として計算を実現するという骨格がはっきりしてくる。階層の頂点は、意識と心の問題である。人間においては、情報系は自己を認識し、計画し、情報を操作することができる。人間は社会を作り、その中でヒトの特性である心と言語を発展させた。生命科学の究極の目標はヒトの理解にある。このためには、分子からシステムのレベルに至る物質の法則の理解とその上に乗る情報の原理の解明が必要である。システムを人工的に構成し、うまく働くことを確認することで、生命などの複雑な仕組みを抽象的なレベルで理解する方法である。すなわち、コンピューター上で概想した理論を、要素還元的な解析とそれに基づく再構築とをいかに融合させるのかが、大きな課題として問われている。

ウ 人工生命の構築: Synthetic Biology (合成生物学), ロボティクス、人工組織、人工細胞

生命を理解するために、工学的手法により「無生物から生物を生み出さうか」という課題を設定することも重要である。いわゆる「人工生命」である。この研究分野はシミュレーションとは異なるシステムバイオロジー (Systems Biology) である。いかにして、生命として認知できる存在を創出できるかを、合成生物学、ナノサイエンス、計算機科学を含むあらゆる再構成的手段を駆使して挑戦することが重要である。

(3) 研究体制

基礎医学の研究体制は現在大学などの運営交付金や補助基盤研究費の削減などにより、常勤職員が激減し、教育の負担が増え、研究時間が減少している。一方応用面が強調され、知的好奇心や自由な発想にもとづく基礎研究がやりにくい状況になっている。研究機器の整備や、リソースの整備が断続的であり、長期的な観点に立った支援が必要である。人類の科学史を省みると、「科学」と「技術」は常に車の両輪として機能してきた。科学は、常に技術開発の目標と動機を与え、技術は科学に意義ある目標を達成する手段を与えた。それまで人類が見ることができなかった情報を計測できるようになり、手にすることができなかったツールが日常生活レベルで使用可能になったのは、すべて技術の発展によるものである。「科学なくして技術なし、技術なくして科学なし」といわれる原理原則は、歴史を見ても明らかである。

① 新しい生命科学の研究スタイルと生命科学テクノロジー

生命科学は、まだまだ未成熟かつ未開拓である。新しい生命科学へのアプローチは、先に計測できる生物情報をすべて得たのち、それをプラットフォームとして用いるものである。このような、オミックス科学により解析されたデータやクローンの資源、それにより生じた膨大なデータを処理するシステムそのものは、その後続くすべての生命科学のプラットフォームとして使われる使命を帯びている。このオミックス基盤を整備する活動は、ゲノム科学に始まり、データドリブンサイエンス(Data-driven science)の出現と位置づけられる。研究に必要な生体内分子構造に関するゲノム、トランスクリプトーム、プロテオームなどのデータ情報は、データベースの中から必要な情報を探し出し、利用するということが求められるようになった。事実、これらのゲノム科学に始まる生命科学の新しい流れは、非常に短期間に想像をはるかに超える大きな成果をあげ、生命科学全体に革命をもたらしている。このデータドリブン生命科学を支える原動力になったのが、塩基配列解読技術などに代表される「生命科学技術」であった。今後も、この躍進的な生命科学技術は急発展を遂げると考えられ、将来のオミックス基盤の発展を支えるのが、ポストゲノム生命科学テクノロジー（ポストゲノム生命科学技術）である。21世紀の生命科学の中核となるシステムバイオロジーは、データドリブン生命科学が創出するデータを解析するバイオインフォマティクスと、生命活動そのものをシミュレーションする活動、合成生物学など生命を分子の総合体として理解するシステムバイオロジーに他ならない。このように、ポストゲノム生命科学テクノロジー（ポストゲノム生命科学技術）には、① データ生産要素技術：巨大容量 DNA シークエンス技術、X線自由電子レーザーによる一分子タンパク高次構造決定技術など各要素の大容量データを生産する技術、② システムデータ生産技術：大容量要素データを生物学的意味のあるシステムデータに結びつける総合データ生産システムとその情報処理技術。さらに、システムデータ生産技術で開発されたオミックス基盤となるゲノム資源を保存・頒布する技術とバイオリソースの整備も必要、③ 大容量データ解析処理基盤技術：膨大なデータを処理するコンピュータシステムやそれを用いた解析ソフトの開発、等が主力となる。

② 開発すべき生命科学テクノロジー

今後開発すべきポストゲノム生命科学技術には、① データ生産要素技術（巨大容量 DNA シークエンス技術）など各要素の大容量データ生産技術、② システムデータ生産技術（大容量要素データを生物学的意味のあるシステムデータに結びつける総合データ生産システムとその情報処理技術）、③ システムデータ生産技術で開発されたオミックス基盤となるゲノム資源を保存・頒布する技術とバイオリソース整備、④ 大容量データ解析処理基盤技術（膨大なデータを処理するコンピュータシステムやそれを用いた解析ソフト）。また、開発すべき生命科学／健康科学テクノロジーは、① 生化学技術（DNA・タンパクシークエンス技術など、② 細胞や個体を「制御」、「操作」、「作る」技術（ES細胞、iPS細胞、クローン個体、ノックアウト個体、遺伝子導入、細胞

内分子操作技術、Synthetic Biology など)、③ 生体構成物質情報計測技術 (塩基配列解読、SNP 検出、完全長 cDNA、遺伝子発現計測、タンパク発現、タンパク高次構造計測 (NMR, X-ray crystallography)、細胞内分子イメージング、細胞内 1 分子計測技術など)、④ 生物システム模倣技術 (RNAi 試薬・RNAi 医薬など)、⑤ 非侵襲生体計測技術 (超高磁場 MRI、超多チャンネル MEG、新規 PET タグなどの個体レベルのイメージング技術)、⑥ 医薬品開発プラットフォーム (ヒトゲノム、完全長 cDNA、タンパク高次構造解析データを利用した低分子医薬、分子標的薬、RNAi などの核酸医薬を開発するプラットフォーム構築)、⑦ 人体構成物質・遺伝情報測定技術 (実用的 SNP 測定法、癌マーカー探索、メタボローム解析などの情報を計測技術と組み合わせた新技術)、⑧ 病理検査技術 (手術標本からの迅速予後判定技術、分子病因論にもとづいた細胞診断技術と計算機によるパターン認識技術を融合させた高速診断のオートメーション化)、⑨ 医療システム支援技術 (病院内情報管理システム、SNP やオーダーメイド医療に則した個人情報管理システムや暗号化システム、遠隔医療技術、医療ロボット技術など)、などがある。

3 グローバル化への対応

(1) 日本の生命科学技術開発の傾向と国内外の状況

これまで我が国では、技術が生命科学の躍進を支えてきたにもかかわらず、生命科学における技術開発研究は、特に、アカデミアにおいては高く評価されない傾向にある。長期的視点に立って、研究資源をはじめとするリソースの整備を図るべきである。また、オリジナリティーのある新規技術は欧米に比べると低調であるといわざるを得ない。

これらは、生命科学技術産業にもその実態が良く出ており、日本における研究用生命科学用研究機器の70%は、外国からの輸入である。日本は生命科学の領域では、技術の開発者というより、ユーザーとしての国際的位置づけである。これは、長年にわたる日本の生命科学における技術開発軽視の傾向に起因するところが大きい。さらに、開発に関して政府予算が求心力になるだけの額が出ていない事も問題である。本当に独創性のある技術を開発するためには、求心力のある額が必要であるとともに、それらが一定期間減額なしにサポートされる継続性が重要である。動物研究支援体制、データベースの構築、あるいは地味で問題発掘型のコホート型研究などに象徴されるように、科学技術を支える基盤の発展的構築・維持は、競争的資金という性格から外れていることから、適切な施策がなされにくい状況にあるのではないか。このような支援体制は短期的成果を望むのではなく、長期的視点に立った継続的支援が必須である。現実には、競争的資金の充実が強調されることによって、生命科学研究を支えるハード・ソフトのインフラ整備についての適切な支援システムが急激に脆弱化していると思われる。その結果、長期的視点に立った研究基盤の充実が出来ないという厳しい状況が生み出されているのではないか。インフラの整備を行うため、適切な支援システムが急務であり、長期的視点に立った支援体制を充実させるべきである。

4 社会のニーズへの対応

(1) 健康科学：ヒトを対象とした応用科学

生命科学の社会への還元を考える時、科学者の立場からのひとつの懸念は、その成果の治療や福祉への転換が十分に行われてきたとは言いがたいことである。

これは、日本の生命科学研究が、ヒトを理解する事を最終目標にしており、その成果を「人間」に還元することを明確な目標としてはいなかったためでもある。生命科学の研究成果を社会に還元し、その知見を社会の常識へと変換していくための方策として考えられるのは、「人間」を理解し、その健康と福祉に貢献することを目的とした「健康科学」という研究領域を設定し、推進することであろう。

① 健康科学の現状と問題点

臨床研究は、① 本来臨床医学講座の使命である高度な患者研究・症例研究による疾患メカニズム解析、② いわゆる治験に代表されるような開発研究、③ 治療効果の評価に代表される臨床疫学研究に分類することができるが、これらが基礎医学研究と連携することによって初めて画期的な治療法や医薬品の開発が推進されるものと考えられる。しかし、現在大学の臨床講座や臨床施設を有する研究所では臨床実績や診療技術などに偏った専門医養成が要求され、本来臨床講座がなすべき患者・疾患研究を通じて基礎医学と関連し創薬や治療開発につなげるという本来の臨床研究の部分が空洞化している現状がある。臨床研究のうちトランスレーショナルリサーチを実践する拠点施設は整備されつつある。しかし、臨床研究の現状は質の高い臨床医学研究のための人材育成システムの強化、キャリアパスの構築を図るとともに環境整備を推進することが緊急の課題であると思われる。

② 健康科学領域の創設

生命科学研究において、ヒトが永くその標準的な対象となりえなかった理由は、ヒトを材料とする研究に対する倫理的障壁とそれに由来する実験的困難があったからである。しかし、分子生物学によってヒトを構成する要素の構造が数多く明らかにされ、ヒトが他のモデル生物と科学の対象として異なるものではないことが実証された現在、ヒトは生命科学研究の重要かつ標準的な対象のひとつとなった。したがって、ここに規定する健康科学は、今まで明確にされていなかった生命科学の応用研究として位置付けるべきものである。「健康科学」は、主にモデル生物を用いて行われる生命科学研究の成果を、ヒトの疾患を理解するための基礎研究等に応用し、さらに、「人間」を対象とする産業および医療システムへ効率的かつ安全に移転するための研究として位置付けるべきである。この研究スキームは少なくとも3つの階層から構成される。第一には、モデル生物での研究成果をヒトへと翻訳する手段の開発であり、第二には、ヒトへと翻訳された情報を実際の治療や福祉へと効率的に転換する技術の開発と研究システムの構築、第三には、先進医療技術を社会が積極的に受容する社会構造・体質の実現である。

ア モデル生物からヒトへ翻訳するための基盤構築

モデル生物を用いた研究は、現在までの生命科学の本流であり、生命現象に関する重大な発見のほとんどはこの範疇の中でなされてきた。ヒトのゲノムが解読され、数多くのタンパク、糖鎖などの構造が明らかにされ、それらの機能や種を越えた相同性も明らかになりつつある現在、モデル生物には、各種要素の機能を読み取るための最も有効な方法という付加価値が与えられた。モデル生物において得られた情報をヒトに読み換えていくために重要な具体的方策を展望する。

(ア) ヒトの遺伝学

今日までに蓄積された膨大なゲノム情報とヒトの疫学情報を連結する方法は、遺伝子あるいはタンパクなどの要素機能をヒトにおいて読み取ってきた。今後飛躍的に増える遺伝子多型情報を活用したこの方法論は今後も積極的に推進されなくてはならない。

(イ) ヒト臓器あるいは細胞を用いた研究

遺伝学のようなレトロスペクティブな方法論だけではおのずと限界があり、その部分はより実証的な方法で補う必要がある。直接的なアプローチのひとつは、モデル生物を部分的なヒト化あるいは試験管内で構築したヒト臓器や細胞を用いた研究であろう。すでに行われているマウスにおけるヒト造血免疫システムの再構築（造血免疫系ヒト化マウス）、ヒト ES 細胞や iPS 細胞を用いた臓器構築、人工リンパ節などの人工臓器の研究などである。ヒトの細胞や臓器における遺伝子タンパク、糖鎖などの機能を明らかにしていくためにも、直接的で有効な方法である。

(ウ) システムバオロジーを用いた研究

コンピュータを用いてヒト機能をシミュレートする方法は、コンピュータパワーの飛躍に伴ってバイオインフォマティクスが、実験生物学に対しても大きなインパクトを与えた。この方法が効果を発揮しうるためには、モデルを成立させるための初期条件となる実験に基づく情報の入力と、出力されたモデルに対する実験的な検証が必要となる。この分野を成立させていくためには、人材および実験のプラットフォームの開発といったインフラから整備していく必要がある。モデル生物からヒトへの方向付けを意味あるものとしていくために最も重要な点は、今までに蓄積してきたモデル生物とヒトにおけるゲノム、遺伝子発現、多型、遺伝子産物の構造についての情報、および、その実体としてのバイオリソースがこの分野の基盤を構成していくことである。すでに、全国規模の拠点で行われているように、プラットフォームを介してこれらの情報やリソースを、より多くの研究者によって共有し、効率的に活用していくのはひとつの方法である。しかしな

がら、より強力に推進していくためには、国際基準での高次オミックス基盤の構築とともに、システムバイオロジーを含めてこれらを集約させることを目的とした研究システムの構築が必須であろう。

イ ヒトへ効率的に転換する技術開発を研究システムの構築

生命科学の研究成果を国民に還元する仕組み、すなわち医療への技術移転や創薬への橋渡し研究は、これまで個々の研究者の努力に依存するものがほとんどであった。5年前より橋渡し (TR) 研究拠点の設置と橋渡し研究の推進が行われてきたが、十分に行われているとは言えない。技術移転を系統的かつ組織的に行っていくためには、人材育成、研究推進、技法の開発などのプラットフォームを構築する必要があるだけでなく、その構造が社会に組み込まれるための倫理的および法的な基盤の整備が必要である。また、このようなプロセスを効率的に実行するためには、新しい研究技術や研究資源をより多くの研究者が共有することであり、そのためのシステムやプラットフォームを積極的に構築していくことが重要である。

(ア) トランスレーショナルリサーチ (TR) における基盤整備、人材育成、国民の理解

我が国において、TR と TR を評価するためのクリティカルパスリサーチ双方の研究基盤は欧米より相当な遅れをとっており、その研究支援基盤の整備と強化と人材育成は、我が国において緊急の課題である。トランスレーショナルリサーチ (TR) は、国民にとって直接その成果を享受できる課題であるがゆえに、重要かつ緊急性がある課題であるが、国民の直接的な参加を必要とするため、慎重かつ公正に行っていくだけでなく透明性を保証する必要がある。TR を制度として組み込み、国として実行していくために避けることのできない前提は、TR に対する国民の理解とそれに基づいた倫理的合意の形成である。その過程で必要なことは、TR のゴールとプロセス、および透明性を保証するその構造を国民に示すことである。そのような合意に基づいて規程や法律を整備した上で、体制づくりと人材育成に努めることが急務である。

(イ) 創薬の橋渡し研究

生命科学からのもうひとつの明確な社会還元は、創薬である。系統的なゲノム情報とそれに基づいた研究の進展が、核酸やタンパク、糖鎖などの生体高分子、またそれらと相互作用する代謝産物や低分子化合物についての構造機能相関に関する知識を拡充蓄積してきており、研究分野の垣根を越えて知識や目標を共有していくことが創薬開発に重要になってきている。言うまでもなく、バイオインフォマティクス、機能ゲノミクス、ヒトの遺伝子多型情報に基づく疾患研究、薬理ゲノミクス、化学遺伝学、化学生物学などは、診断、予防の分子標的戦略にも融合しやすい分野であり、その融合領域の将来像は見え始め

ている。また分子イメージング、有機合成化学、システムバイオロジー、新たな工学デバイス、加速器科学、あるいは、ナノサイエンスや材料科学などは、健康科学において絶えず新たな突破口をもたらす可能性が高い。このような学際的な研究が効率的に実行できる研究システムを構築する事は重要であり、「共有」を触媒する融合領域あるいは技術融合・移転プラットフォームを構築する必要がある。そのためには、責任と権限に裏付けられた学際かつ省際領域を統括する研究システムと融合性を高めるファンディングシステムの存在が今後一層重要にならざるを得ない。一方、健康科学を実効性のある研究領域として成立させ、包括的に推進するためには、現在まで各研究者レベルで進められてきた創薬への橋渡し研究、国家レベルで推し進められてきた生物資源開発、民間レベルや医療従事者による治療資源の開発などを、有機的に相関させる構造が必要である。そのためには、例えば疾患・創薬基盤の研究ネットワークなどが、いわゆる省庁の垣根を越えた横断的プラットフォームとして機能することが望ましい。

ウ 先進医療技術を社会が積極的に受容する社会構造・体質の実現

健康科学を社会の一部として明確に位置付けることは、生命科学が安定した研究基盤を享受する上で必要不可欠であり、またそれが継続性の高い臨床研究などの健康科学を保証することになる。臨床研究は被験者として国民の参加を要求し、製薬会社などバイオ産業の参画も必須であることを考えると、国民に対する透明性を保証しまた実施者の責任を明示し、国民からの要望を反映した制度のプロトタイプとならざるを得ない。

(2) 日本における基礎・臨床医学研究推進のための仕組み：大学と研究所のあり方

現在、大学においては若手基礎研究者が激減し、危機的状況にある。大学は好奇心に基いた学術研究の発展が求められ、その研究活動の営みを通じて次の世代を育てるのも大学の重要なミッションである。一方、研究所は国家レベルの横断的研究（タンパクプロジェクト、ゲノムプロジェクト、感染症、ワクチン開発、基盤技術開発研究、脳、発生、免疫系など生命システムの系統的戦略的研究）、国家プロジェクトなどを担うべきであり、しかも、大学と研究所の関係は補完的であるべきであり、ともに十分な予算的措置によって支援される必要がある。

大学等が担うボトムアップと研究所等が担うトップダウン研究はどちらも重要である。とくに、社会に大きな利益をもたらす基礎研究（ボトムアップ研究）を疎かにしては長期的な国家戦略となり得ない。両者の研究費のバランスが重要であるにもかかわらず、現在のトップダウン研究は応用研究が主で、バランスが崩れているのが現状である。応用研究に用いられるブレイクスルーは基礎研究から生まれる訳であるから、トップダウン研究とボトムアップ研究はともに連携されることが重要である。

① 機器基盤整備

これまでに整備された機器は、年月が経たため、老朽化したり更新が必要だがその予算が限られており、とくに地方大学では更新ができないため深刻な問題である。共通施設による機器利用を積極的に進め、またその維持のための人材の育成と雇用が必須である。大型機器はいくつかの拠点で整備し、共同利用できる体制が必要である。すなわち、その使用にあたっては全国の研究者が誰でも使えるようにすべきである。ただし、現実にできたものは共用しにくい傾向があり、運用体制が重要となる。

② 大型研究費の拡大の必要性

CREST, NEDO などによる大型研究費が期限付きであり、すぐれた研究成果が出ても継続性がない。ただ問題なのは大型予算が往々にして高額機器の購入や、経費のかかる動物飼育の外注などのような費用に多くが費やされている可能性があり、研究手法の画一化により研究の独創性が薄らいではいけないか危惧される。また我が国ではほとんどの試薬と機器を米国から購入しており、その価格はものによっては米国で購入する場合の3倍にも達するものがあるため研究費を圧迫している。大型研究費の拡大にあたっては、より一層省庁間の壁を取り払う必要がある。

5 人材育成について

(1) 大学院制度

我が国で優れた人材が博士課程に進みまたポストドクとして研究し、科学技術立国の将来を担っていくためには多くの優れた人材が研究者になることを希望しかつ優れた研究を遂行できる環境を整備する必要がある。

このためには、学生授業料を国が徴収する現在の仕組みを変えて、逆に国あるいは大学が厳選した学生を生活費まで支援する制度の導入が必要である。学術振興会が開始する Global30 のような英語だけで講義を行い、学位も取得できる制度を導入するなど、国際的に通用する大学院制度の導入が必要である。また博士取得の基準の厳格化、修士課程の教育システムの構築など、これまで我が国では、研究室に任されていた教育制度を改め、系統的な大学院教育を制度として確立すべきである。この問題が解決されれば、海外から、特にアジアに限らず、欧米諸国からも大学院生を受け入れられる環境整備も整う。このようにして、諸外国との制度を一致させない限り、大学院の国際化、レベルの向上は不可能である。さらに、大学院生を全国規模で募集し、各大学で5-10名程度の学生が入学できるようにする。これらの学生には奨学金としてポストドク並みの援助を与える必要がある。またポストドク 20,000人構想など多くのポストドクが増加はしたものの、その後のキャリアパスの検討がきちんとなされていなかったこもともあり、社会問題となっている。

(2) ポストドクのキャリアパスについて

ポストドク 2万人構想に基づき、我が国のポストドクの人数は大幅に増加した。しかし一方で、国立大学などのスタッフの削減、また不況による会社の雇用抑制などにより、多くのポストドクが就職ができずにポストドクのはしごをしている現状がある。彼らの就職先として、研究者のみならず多彩な職種を社会全体で考慮する必要がある。また民間企業には税制の優遇措置をつけるとともに、雇用に際し一定の割合で、博士号をもった研究者の雇用をたとえば 2.5%というように義務付け、それを越した場合には優遇措置を、それを下回った場合には罰則を課すというような、政策が必要である。

(3) 医学研究の必要性

近年の医学は研究成果に基づく理論的な学問に変貌しつつある。つまり基礎的な研究成果なしには、将来の医学の進歩はあり得ず、現在急速に高齢化しつつある我が国の医療問題を解決することは困難であると同時に、経済的にも多くのイノベーション機会を逸する結果ともなろう。医学研究とは将来の医療に対する「投資」に他ならず、その重要性は自明である。つまり我が国としては、現在の「医療」と共に将来への「医学研究」を同時にバランス良く進める必要がある。

① 我が国における医学研究者の現状

ア 研究を担う人材の激減

以前より我が国では医学研究に携わる人材の育成はあまり積極的に行われておらず、医学部卒業者のうち、基礎医学研究に従事するものは数パーセントにも達していなかった。しかしながら臨床部門から基礎部門への大学院生の派遣や、その結果として臨床部門から基礎部門へ指向を変える者が少数ながらいて、結果的にこれらの少ない人材が世界的にも認められる数多くの優れた研究を生み出し、後進の教育指導にも従事しながら日本の医学研究を支えてきた。また、基礎医学部門に出向していた医師が再び臨床部門に帰ることによって、臨床的な研究のレベルが向上し、科学的な思考体系を有する医師が指導的な立場に立つことによって、後進の教育も何とか維持されてきた。このように基礎部門と臨床部門は不十分ながらもある程度の人材交流があり、それによって何とか医学研究と医療の両立を図ってきた。最近では「トランスレーショナルリサーチ」という基礎研究で得られた知見を実際の医療現場へ応用するための学問領域も発展し始め、欧米では既に基礎医学研究と応用医学研究はトランスレーショナルリサーチによって結びつけようという体制が取られている。

ところが6年前から開始されたいわゆる「卒後臨床研修必修化」が一つの契機になって、地方から都市部へ、大学から市中病院へと人材が移動し始め、大学の臨床部門が人材不足になるに伴い、基礎部門への派遣は激減し、現在基礎医学研究を行っているほとんどの講座では医学部出身者は皆無に近い状態に陥っている。もちろん従来から基礎医学に進む学生は多くはなかったが、国公立大学の独立法人化による大学予算の削減、基礎講座の減少や、教官の定員削減、さらには地方大学の弱体化、質の高い臨床研究への若手医師の希求と流動化、医師不足などの複合的な要因も拍車をかける結果となった。基礎医学研究者の90%近くが教育・研究の危機を実感しているという調査結果がある。

臨床分野においても、実地に役立つ臨床が重視され、専門医指向が強くなって来た。その結果、先端的な医療や、トランスレーショナルリサーチの担い手が激減しつつある。このことは、臨床能力の高い医師が増加するという面があるとは言えるが、長期的には我が国の医学のレベルを大きく低下させることになる。現在の医学知識および医療技術が過去の基礎医学研究の成果の上に成立しているのと同様に、今後の医療の進歩は現在の医学研究に依存していることは明白である。基礎医学分野の人材の育成は喫緊の課題である。

イ 医学部出身者の研究者が必要な理由

これまで我が国の医学の研究には、多くの医学部以外の理系学部出身者により、基礎的な研究が支えられてきたことは事実であり、現在も基礎医学の講座の7割はこのような研究者によって研究の一部が支えられている。しかし、最近の医学の進歩に従って、研究対象がより疾患指向になりつつあり、医学知識のベースのない研究者では本質的な課題を解決する可能性が極めて少なくなっている。さらに実際の疾患を見ることにより具体的で深い課題設定ができることなど、医学の進歩に対して医学教育を受けた研究者は一定割合で今後も必要である。研究開発は基本的

に従来の知識体系にない価値観の創造活動であるから、最も高度な知的作業が必要である。ところが現在の我が国においては、理系志望のポテンシャルをもつ若い優秀な学生の多くは医学部へ進学するという現実が存在するが、この医学部卒業生のほとんどが専門職としての臨床医になっており、高度の知的作業が必要とされる医学研究に貴重な人材が投入されていないのが現状である。このように社会的必要性和個人的才能のミスマッチやアンバランスな状態が急速に問題化している。このように将来の医学を担うべき医学部出身の研究者が減少することは、下記のような問題を生むと予想される。

② 今後予想される問題点

ア 基礎医学研究の凋落

急速な人材不足によって、我が国における基礎医学研究が壊滅的な打撃を被り、将来の医学の進歩が停止する。また臨床医学の研究者が基礎医学などでの研究経験の機会を失うため、将来の大学における臨床医学の指導者には、基礎研究経験のない指導者が増える恐れがある。

イ トランスレーショナルリサーチの質の低下

臨床部門においても臨床研究やトランスレーショナルリサーチを担う医師の質が低下し、科学的な思考体系を有する医師が減少することによって、医療の質が低下する。

ウ 医学教育の崩壊

基礎医学教育が人体に対する包括的な理解や疾患に関する知識、経験に乏しい教官によってのみ行なわれると、疾患に対して科学的な見方のできない医師が増加し、これが再び医学研究の人材不足につながるという悪循環に陥る。

エ 医療サービスレベルの低下とイノベーション創出の機会現象

医学教育・研究のレベルの低下は、近い将来医療サービスの質の低下をもたらす。また、イノベーション創出の機会減少をもたらす、我が国が新しい診断・治療法を開発できなくなる。結果的に、先端医療技術を完全に欧米先進諸国に依存することになり、医療コストの増大を招く。

③ 医学研究を担う人材の確保のための方策

ア 目標

上記の危機を回避するために、医学部卒業生の最低5%（約400名）を医学研究に従事させることを数値目標とする。ここで言う医学研究とは、基礎的な研究だけでなく、研究に特化した臨床応用研究やトランスレーショナルリサーチを含む。それによって基礎医学研究はもちろん、科学的見地に基づく臨床研究も活性化を図る。

この目標を達成するために、下記の3つの方策を同時に取り入れる。

イ 具体的方策

(ア) 「アカデミックドクター (AD) 養成特区」構想

医学研究者になるための専門コースを「アカデミックドクター (AD) 養成特区」として設置する。主な特徴は下記の通りである。

従来の医学部教育(6年)に大学院教育(4年)を併せた10年教育コースである。

医学部2年次あるいは3年次終了時点で選抜試験を行う。

全国の医学部で年100名を募集し、選抜試験の成績で採用を決定する。

- ① 医学部卒業後すぐに大学院に進学するコース、
- ② 医学部4年次終了後、大学院に進学し、学位取得後に医学部へ復学し、医師免許を取得するコース、
- ③ 医学部卒業後2年以内に大学院進学するようなコース、を用意する。

医学部3年次あるいは4年次は基礎配属を6ヶ月から1年間行う。

共用試験は免除。

授業料は全額免除。

奨学金を付与(医学部在学時は月20万円、大学院在学時は月40万円程度)。

卒業後は(審査を経た上で)基礎医学部門の助教の地位を付与し、幹部候補生として遇する。

財源については、特区に属する大学法人の運営交付金や、ポストドク1万人構想のように関連省庁、関連独立法人などがこのための資金をもうけることにより、これを賄う方法が考えられる。

医学部以外の理系学部出身者(理学部、農学部、薬学部等)あるいは我が国には限られた大学しかないリベラルアーツ型の教育を受けたものの中には医学に興味を持ち、医学研究を行いたい優秀な学生が多数存在する。医学部への学士入学制度を改革し、このような学生を学部卒業後、もしくは医学修士課程修了後、3-4年次に編入させ医学教育を受けることを可能にする(PhD-MDプログラム)。医師免許取得ないし研修終了後、一定期間は基礎研究に従事(修士卒は博士課程に進学)することを条件にMD-PhDプログラムと同等の授業料免除、奨学金給付を行う。

(イ) 従来の大学院制度の改革

従来の医学大学院教育を、「医学研究コース」と「臨床専門コース」に大別する。「医学研究コース」は基礎医学研究のみとし、厳格な資格審査を行い、学位授与率を90%以下にする。「臨床専門コース」では臨床に直接関係する研究や、職業人としての臨床医としての研究など対象にし、臨床現場での実践につながる研究対象も取り入れる。このような抜本的な改革を国策として行うべきである。

6 おわりに

本報告は、基礎医学委員会から、(1)10～20年程度の中期的な学術の展望と課題、(2)グローバル化への対応、(3)社会のニーズへの対応、(4)これからの人材育成、の課題項目にしたがって、基礎医学関係で今後推進すべき緊急・重要課題について収集し・検討した結果を、総合科学技術会議、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、環境省、その他の関係行政機関、産官学の研究機関、公立試験研究機関、一般国民に対する提言として、取りまとめたものである。

<用語の説明>

アカデミックドクター

研究経験があり、また研究心を持った医師の意味

遺伝子発現計測

遺伝子発現量は、主に DNA マイクロアレイによる網羅的計測や、特定の遺伝子をポリメラーゼ連鎖(PCR)反応で増幅して計測する方法により行われる。本技術は、分子遺伝学の研究のみならず医療や犯罪捜査に大きな役割を果たしている。

塩基配列解読

RNA や DNA 等の長鎖の核酸に含まれる遺伝情報は、糖とリン酸からなる規則的なバックボーンの上に結合した塩基の並び方(塩基配列)の形でコードされている。核酸上の塩基配列を解析する事を塩基配列解読(シーケンシング)という。次世代シーケンサーの登場により塩基配列解読の速度が飛躍的に高まった。

化学遺伝学

古典遺伝学における「変異」を化学物質、特に細胞機能を調節するような物質(バイオプローブ)に置き換え、それによって引き起こされるユニークな表現型を、分子のレベルで解明することを目指した新しい分子遺伝学。従来の遺伝学が変異体の取得とその形質を相補する遺伝子の解析によって進められるのに対し、化学遺伝学はある化合物を生体に投与することによって起こる表現型の変化から、化合物の標的遺伝子や標的タンパク質を同定する。

化学生物学

ケミカルバイオロジーとも呼ばれる。化合物や有機化学的な手法を切り口として、生体分子の機能や反応などの生命現象を、分子レベルで明らかにしようとする学問領域。低分子化合物から生体内分子まで、様々な化合物の生体モデル系における機能や反応を解析することによって、生体機能にかかわる分子の振る舞いを理解する。医薬品が生物に与える影響(効果や副作用)などについて多くの情報が蓄積されており、創薬にも応用されつつある。近年、一領域を築いた分野である。

完全長 cDNA

タンパク質合成の鋳型となるメッセンジャーRNA 分子の、タンパク質に翻訳されない領域(非翻訳領域)を含む全長を、配列上相補する DNA (complementary DNA, cDNA) に写し取ったもの。完全長 cDNA の網羅的解析により、ゲノム DNA のうちどの部分が機能的な部分であるかを明らかにすることができる。

癌マーカー探索

癌に伴って特異的に生じるタンパク質や代謝産物の変化(癌に特異的なタンパク質の修飾、癌に特異的な代謝産物の量的変化など)を探索する事により、癌の予防、診断、治療等に役立つ指標(マーカー)を発見する試み。

機能ゲノミクス

ゲノム配列情報を利用し、遺伝子機能の解明を目的とする学問。網羅的な遺伝的多型の解析や遺伝子発現解析から遺伝子機能に迫るアプローチが多用される。広義には網羅的な遺伝子欠損マウスの作製と表現型の解析を通じた遺伝子機能解析等を含む。

共通施設による機器利用

高価・特殊な解析装置とこれを操作する専門技術者を擁し、これらを利用した研究を支援するための共同利用施設。生命科学分野ではDNAマイクロアレイ解析や細胞分取、大型機器などがしばしば共通施設を利用して行われる。

グライコミクス

糖鎖解析の技術を用いて、糖鎖を網羅的に解析する解析手法並びに研究。質量分析、NMR、糖鎖を特異的に結合するレクチン分子などを利用したり、機能解析のために糖鎖合成遺伝子などを破壊したり、過剰発現させて研究を行う。

クローン細胞

単一の細胞から細胞培養によって作られた細胞集団のことであり、均一な性状を持つ。体細胞クローン技術やその途中経過である移植者自身の体細胞より発生した幹細胞を利用することで、臓器を複製し機能の損なわれた臓器と置き換えたり、あるいは幹細胞移植による再生医療への利用が期待されている。

ゲノミクス

遺伝子の総体(ゲノム)並びにゲノムからの転写産物を網羅的に解析する解析手法並びに研究。「生物の設計図」であるゲノムDNA配列の解読、ゲノムから転写されタンパク質をコードする転写産物(メッセンジャーRNA)の網羅的同定と定量、ゲノム配列の個人差と疾患との関連の解析などを含む。

健康科学 ヒトの身体的・精神的健康の増進を目的とする生命科学の一分野。疾病の予防、診断、治療法の開発、生活の質(quality of life, QOL)の向上など、医学、薬学、工学など多数の領域の融合により成り立つ。

細胞内1分子計測技術

細胞内分子イメージングの発展技術で、細胞内に存在する単一の分子の動態を検出・計測

する技術。個々の分子の振る舞いを観測し、平均値では分からないタンパク質の動的挙動を計測することにより、生命の動作原理に迫ることを目標とする。

細胞内分子イメージング

細胞内に存在する分子を可視化する技術。分子の局在・分布・動態を解明するために用いる。可視化したいタンパク質分子を蛍光物質で標識し、その局在を蛍光顕微鏡で観察するという手法が多用される。

システムバイオロジー

生物をシステムとして理解することを目指す生物学の一分野。生物システムの構成要素（遺伝子やタンパク質）に着目して研究を進める従来の分子生物学と異なり、システムバイオロジーではこれらの要素から構成されるシステムの構造、動作原理などに注目する。

実用的 SNP 測定法

遺伝情報の個人差（多型）のうち、単塩基多型（single nucleotide polymorphism, SNP）を高精度・低コストで解析・測定するための手法。

新規 PET タグなどの個体レベルのイメージング技術

PET（positron emission tomography；ポジトロン断層法）とは陽電子検出を利用したコンピュータ断層撮影技術を用いた個体内イメージング技術である。放射性同位元素で標識した化合物（タグ）をトレーサーとして個体内に導入し、個体内部での動態を観察することで、疾患の診断に利用されている。タグ分子を使い分けることにより様々な疾患へ応用ができることから新規タグの開発が盛んに行われている。

タンパクプロジェクト（Protein 3000）

公式名称はタンパク 3000 プロジェクト。文部科学省の主導により平成 14～18 年度にかけて実施され、タンパク質の全基本構造の 1/3（約 3,000 種）以上の構造及びその機能の解析、成果の特許化まで視野に入れた研究開発を推進した。

タンパク高次構造計測

タンパク質の機能は、高次構造すなわちアミノ酸配列の折りたたまれ方により決定される。高次構造の計測は X 線結晶解析、NMR などにより原子レベルの分解能で行われる。またタンパク質構造予測による理論的推定なども行われている。

タンパク発現

数千種類以上の細胞内タンパク質の発現量は、遺伝子発現などの要因により複雑に制御されており、疾患など環境変化に伴って変動する。近年 2 次元電気泳動と質量分析を用いて、細胞機能や疾患に関わるタンパク質の網羅的な発現解析が進められている。

超高磁場 MRI (Magnetic resonance imaging ; 核磁気共鳴画像法)

MRI は患者を強力な磁場の中に置いた際の組織の磁化によって、画像を撮影する技術であり、癌などの病変の検出に利用される。超高磁場 MRI は従来の高磁場 MRI と比べて高感度・高解像度が得られる点が利点である。

超多チャンネル MEG (Magnetoencephalography ; 脳電図)

脳神経の電氣的な活動によって生じる磁場を超伝導量子干渉計と呼ばれる高感度デバイスを多数用いて詳細に計測するイメージング技術である。脳外科手術の病変位置の同定や、脳科学研究における脳神経活動の記録など高次脳機能の解析にも応用されている。

低分子医薬

分子量がおおよそ数百から数千で、化学的に合成された医薬品。従来の医薬品開発は、低分子医薬を中心に発展を遂げてきた。しかし近年は、バイオテクノロジー研究の発展に伴い、抗体医薬などのタンパク質や核酸なども医薬品の開発対象となってきた。

トランスレーショナルリサーチ

基礎的な研究を臨床に応用する橋渡し研究。

バイオインフォマティクス

生命情報学。数学、情報学、計算機科学などの応用によって生物学の問題を解こうとする学問。高度なアルゴリズムおよびその実行計算を可能とするコンピュータを用いて、生命現象を支える莫大な情報（遺伝情報、タンパク質相互作用等）から生物学的な意味を抽出する。

ヒトの遺伝子多型情報に基づく疾患研究

個々人により微妙に異なる遺伝情報の差異（多型）と疾患の関係を探る研究。単塩基多型（single nucleotide polymorphism, SNP）やコピー数多型（copy number variation, CNV）などの遺伝的な多型と生活習慣病や癌などの疾患の相関・因果関係を探る。

フェノミクス

ある生物の全遺伝子の網羅的な変異（欠損）と、その結果として現れる表現型の総合的な解析を通じ、各遺伝子の機能や遺伝子産物間の相互作用などを明らかにする解析手法並びに研究。機能ゲノミクスの発展型。

プロテオミクス

タンパク質の総体（プロテオーム）を網羅的に解析する解析手法並びに研究。質量分析装置等を用いた生体試料（血液、細胞・組織抽出物など）中のタンパク質の網羅的な同定と

定量を基盤技術とし、疾患等に伴うタンパク質の質的・量的変化の検出を通じ、疾患の検出に役立つ指標（マーカー）、疾患のメカニズム等の解析に用いられる。

分子標的薬

疾患の特性を規定する分子機構を最近のバイオサイエンス研究の進展に基づいて明らかにし、それらの機構に関与する遺伝子やタンパク質を明確な分子標的として、特異性をもってその機能を制御することを目指して創生される薬剤。

メタボローム解析

メタボロミクスと同義。代謝産物の総体（メタボローム）を網羅的に解析する解析手法並びに研究。質量分析装置等を用いた生体試料（血液、細胞・組織抽出物など）中の代謝産物の網羅的な同定と定量を基盤技術とし、疾患等に伴う代謝産物の質的・量的変化の検出を通じ、疾患の検出に役立つ指標（マーカー）、疾患のメカニズム等の解析に用いられる。

メタボロミクス

代謝産物の総体（メタボローム）を網羅的に解析する解析手法並びに研究。質量分析装置等を用いた生体試料（血液、細胞・組織抽出物など）中の代謝産物の網羅的な同定と定量を基盤技術とし、疾患等に伴う代謝産物の質的・量的変化の検出を通じ、疾患の検出に役立つ指標（マーカー）、疾患のメカニズム等の解析に用いられる。

薬理ゲノミクス

ヒトゲノムプロジェクトによって整備されたゲノム情報やテクノロジーを、新薬の探索研究から開発、臨床研究にまで応用しようという方法論。医薬品の効果や副作用には個人差があることが知られているが、テーラーメイド医療を現実化するための新しいコンセプトとして注目されている。

ライブイメージング

細胞内分子イメージングの発展技術で、生細胞・生体中の分子の挙動（局在・分布・動態）を実時間で観察する技術。分子標識に用いる蛍光物質（蛍光タンパク質）、検出のための光学機器システムの両者の進歩により、生物学における重要な解析手法として近年著しい発展を見せている。

リベラルアーツ型教育

一般教養や社会科学、自然科学など幅広く4年間で学ぶことを目的とする大学。我が国には数えるほどしかない。

CREST

戦略的創造研究推進事業 Core Research for Evolutional Science and Technology の略

で、科学技術振興機構が行っているトップダウン型の競争的資金のひとつ。文部科学省によりテーマが決定され、そのテーマに基づき公募されて5年間の研究が行われる。我が国の社会的・経済的ニーズの実現に向けた戦略目標に対して設定され、インパクトの大きなイノベーションシーズを創出するためのチーム型研究資金。

ES細胞 (Embryonic stem cell ; 胚性幹細胞)

動物の発生初期段階である胚盤胞期の胚の内部細胞塊より作られる幹細胞のこと。理論上すべての組織に分化する分化多能性を保ちつつ、ほぼ無限に増殖させることができるため、再生医療への応用に注目されている。また、ES細胞内の特定遺伝子機能を操作することで、その機能異常(疾患)を持つ個体を作製することができ、生体機能の解明を目的とする基礎医学分野で幅広く利用されている。

Global 30

英語で講義を行い、また学位を取得できるという新しい今年から始まる日本学術振興会のプログラム。

iPS細胞 (induced pluripotent stem cells ; 人工多能性幹細胞)

体細胞へ数種類の遺伝子を導入することにより、ES細胞に似た分化万能性を持たせた細胞のこと。分化万能性は受精卵やES細胞のみが持つ特殊能力であったが、iPS細胞樹立法の開発により、体細胞から分化万能細胞を単離培養することが可能となった。これによりES細胞の作製時における倫理的問題や再生医療応用時の拒絶反応の問題を一挙に解決できるため、ES細胞に代わる細胞として大きな注目と期待を集めている。

KO動物 (Knock Out 動物)

ES細胞に様々な遺伝子操作を加えることにより、特定遺伝子の働きが欠失(ノックアウト)している動物。その動物個体では特定遺伝子機能の欠失による異常(疾患)が引き起こされるため、様々な疾患モデルとして病態研究など基礎医学研究では広く利用されている。

MD-PhDプログラム

医学部以外の学部を卒業後に医学部を卒業する制度。医学部の卒業生が臨床志向で医学研究をする人材が不足するため、基礎研究と臨床医学との両方を学ばせるためアメリカで行われている制度。国策として導入され、また多くの医科大学で制度化している。我が国では医学部の3年次編入制度(学士入学)がそれを真似て作られたが多くの学生がやはり臨床志向であるため、新しいプログラムを2-3の大学が試みているが歴史がない。アメリカで40年以上の歴史を持つ制度。

NEDO

New Energy and Industrial Technology Development Organization の略で、日本語名称は新エネルギー・産業技術総合開発機構。経済産業省所管の独立行政法人であり、新エネルギー開発やバイオ産業を含む各種産業技術の開発を促進する。

NMR（核磁気共鳴分光）

核原子核が磁場の中で、外部からラジオ波を加えることによって、原子が共鳴現象を起こす性質を利用した技術である。これによりタンパク質などの分子を構成する原子同士のつながりを知ることができる。

-Ome

ゲノム（遺伝子の総体）、プロテオーム（タンパク質の総体）など、「～の総体」を意味する接尾語。

-Omics

ゲノミックス（遺伝子の網羅的解析）、プロテオミクス（タンパク質の網羅的解析）など、「～の網羅的解析」を意味する接尾語。

RNAi

RNA interference（RNA 干渉）の略。タンパク質と短鎖 RNA からなる複合体が、短鎖 RNA と相補する長鎖 RNA を抑制（分解）する機構。またこの原理を利用し、標的遺伝子のメッセンジャーRNA と相補する二本鎖RNA を細胞に導入し、標的遺伝子の機能を抑制する手法。

SNP 検出

遺伝情報の個人差（多型）のうち、単塩基多型（single nucleotide polymorphism, SNP）を検出する事。遺伝的多型と表現型（疾患へのかかりやすさなど）の関係を探る研究のために必須である。

TR (translational research)

トランスレーショナルリサーチ。大学や研究機関、バイオベンチャーなどでの基礎研究で見出された新規発見やシーズ技術・新規物質を臨床や医薬品開発に役立つ応用・開発をするために、必要な一連の研究を立案・実行するプロセスのこと。この目的のために、多くの異分野の専門家がチームを作って行う橋渡し研究。近年、新薬開発には長い年月と費用がかかるため、これらを効率化するための方法として重要であると考えられている。

TR を評価するためのクリティカルパスリサーチ

FDA（米国食品医薬品局）が、迅速かつ安全な医薬品・医療機器の開発過程を改善するために提唱している評価方法。トランスレーショナルリサーチ（TR）が目指すゴールより先の製品化・実用化までを見据えて、製品の安全性、有効性、製品化・企業化について3次元

的に評価するツール。トランスレーショナルリサーチが基礎研究から臨床研究への橋渡しを行うのに対し、クリティカルパスリサーチでは、さらに製品化（医薬品の上市）までのプロセスを評価するのが特徴である。

X-ray crystallography

タンパク質などの結晶に X 線を当てると、その多くはそのまま突き抜けるが、一部は散乱する。X 線結晶解析は、この散乱された X 線を観測することにより、物質の中の電子分布すなわち高次構造を原子レベルで知る手法である。

<参考文献>

日本解剖学会・日本生理学会による「基礎医学教育・研究」アンケート結果について
前田正信、岡部繁男、柴田洋三郎、岡田泰伸
日生誌、Vol. 71, No3, 81-132, 2009

第6回東京大学医学部医学教育ワークショップ報告書 リサーチマインドを育てる
期日：2008年10月25日（土）、会場：東京大学医学部総合中央館333大会議室、演者：
清水孝雄教授、他
発行：2008年12月、編集：東京大学医学教育国際協力研究センター

基礎医学研究の衰退が医療全体の崩壊を招く
谷口直之, 鈴木敬一郎
創刊40周年記念特集号 第二部 (4.3), Medical Tribune, 130-131, 2008

「基礎医学教育・研究の危機」アンケート結果について
谷口直之, 鈴木敬一郎
日本生化学会 医科生化学・分子生物学教育協議会
生化学、79巻、第1号 98-114, 2007

医学部は崩壊する！？ - 研修必修化がもたらす研究と教育の荒廃.
DOCTOR'S MAGAZINE 6月号: p17, No. 79, June, 2006 掲載
株式会社 メディカル・プリンシプル社

日本医師会雑誌
第138巻・第10号 特集 臨床研修制度の影響・見直しと今後の展望

<参考資料>

基礎・臨床医学研究グランドデザイン検討分科会報告書（2008年）