

米国における数学と生命科学の研究協力促進のための科学技術政策

伊藤裕子（文部科学省科学技術政策研究所）

数学は、歴史的に生命科学の発展に重要な役割を果たして来た。特にメンデル以降の遺伝学や分子生物学においては、複雑な生命現象や遺伝現象を分析および解明するために多くの法則やモデルが提唱され、これらに数学や数学者が貢献した。

近年では、ヒトゲノムプロジェクトにおいて、数学を教育および研究バックグラウンドに持つ分子生物学者エリック・ランダー所長（MIT, Broad Institute）が「遺伝子解析の数学モデル」でプロジェクト推進に多大な貢献をしたことは記憶に新しい¹。

欧米では、複数の研究分野の境界領域や融合領域の研究を推進することが伝統的におこなわれており、研究者自身も新しい研究分野に参入することに積極的である。例を挙げると「分子生物学」を発展させるのに中心的な役割を果たしたのは、当時の遺伝学研究者ではなく、生命科学分野に新規参入してきた物理学のバックグラウンドを持った研究者であった²。

1990年代以降、生命科学の進展が、国家に経済の維持・向上をもたらすと考えられるようになってから、生命科学の重要性が増すようになった。その結果、各国とも生命科学に多額の政府予算を投入するようになり、国家は更なる生命科学の発展のための政策に力を注ぐようになった。

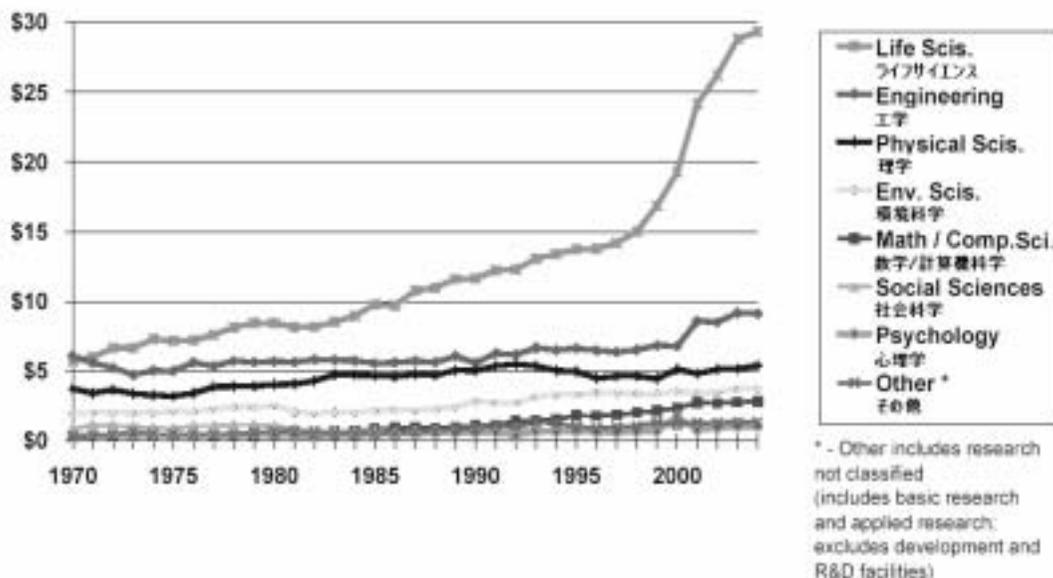
生命科学の初の大型プロジェクトであったヒトゲノムプロジェクトは、「従来の個人主体の研究から、グループ主体の研究へ」というように、生命科学のスタイルの転換点になったと言われている。しかしそれだけではなく、ヒトゲノムプロジェクトは、他分野と生命科学とが連携して融合領域や境界領域を形成することにより、生命科学自体が大きく発展することを証明した例であると考えられる。ヒトゲノムプロジェクトの推進に大きく貢献したのは、コンピュータ科学、数学、情報科学といった学問であることから、今後の生命科学の発展においても、これらの学問と生命科学の連携が重要ではないかと欧米では考えられており、近年、様々な科学技術政策が検討され始めた。

1. 米国政府の数学研究予算

米国政府の分野別の研究開発予算 米国政府の分野別の研究開発予算では、図表1のようにライフサイエンス分野の伸びが著しい。特に1998年からライフサイエンス分野の予算が急激に拡大している。これは、1999年度から5ヵ年計画で実施されたNIH予算の倍増計画による。2003年度は計画の最終年であり、翌2004年度では予算の伸び率は頭打ちになっているが、全体の割合からすると依然として、ライフサイエンス分野の重点化は変わっていない（2003年度では286億ドル、約3兆円、1ドル=105円）。ちなみに日本では、米国のようなライフサイエンス分野に対する重点的な予算配分はしていないが、それでも他の分野よりも多く予算を投入している。しかし、2003年度の日本のライフサイエンス分野の予算は4,362億円であり、米国の約七分の一程度である。

米国の数学 & 計算機科学分野の予算は、図表 1 に示すようにライフサイエンス分野の予算の十分の一であり、金額は非常に少ない。しかし、最近 10 年間は緩やかな増額傾向にあり、環境科学分野の予算に迫ってきている³。

図表 1 米国政府資金による分野別研究予算の推移 (\$ billion)



(全米科学振興協会 AAAS の HP 参照³)

米国政府の数学研究予算 数学 & 計算機科学分野ではなく、数学分野のみの研究予算はどの程度であろうか？

2006 年度の米国政府の数学分野の研究開発予算は、全研究開発予算の 0.3% である約 3 億 9,800 万ドル (約 400 億円) である⁴。その半分は全米科学財団 (NSF) に配分され、残りは国防総省 (DOD)、国立衛生研究所 (NIH)、エネルギー省 (DOE) に配分される。また、米国航空宇宙局 (NASA)、米国環境保護局 (EPA)、商務省の国立標準技術研究所 (NIST) も少額ではあるが、数学研究予算が配分されている。

興味深いのは、米国最大の生物医学研究所である NIH に 7,600 万ドル (約 80 億円) の研究予算が配分されていることである。これは、NIH の研究所に属する国立一般医科学研究所 (NIGMS) および国立生体医学画像・生体工学研究所 (NIBIB) にそれぞれ予算配分され、これらの機関を通して、研究資金 (ファンド) として大学等の研究者に配分されている。対象として、生物資源学 (population biology)、システムバイオロジー、バイオインフォマティクス、コンピュータ科学、モデル開発 (model development) などの研究領域を含む。

参考までに示すと、日本の科学研究費補助金 (科研費) における 2004 年度の数学分野の予算額は約 19 億円 (基盤研究 A,B,C、若手研究 A,B、萌芽研究、奨励研究の新規と継続の合算) で

あり, COE 研究費やそれ以外の研究費の内, 数学に関連すると推定される研究予算を加えても, 米国に比べて極めて少額な研究予算しか投入されていないと考えられる.

数学への期待の理由 ここ数年, 米国では, 数学と生命科学の研究協力の重要性が取り上げられるようになったが, その背景としていくつかの事が考えられる. ひとつは, 生命科学分野への研究予算の重点化にも関わらず, 国民の目に見えるような社会的効果が上がっていないこと. 例えば, がんなどの生活習慣病に罹患する人の割合は減少していないし, AIDS の完治のための薬はまだ開発されていない. 世界規模で見れば, 新興および再興感染症の大規模発生がみられる. また, 生命科学分野の研究は進展しているのに, 市場に出てくる新薬の数が十年前より少なくなっている.

これらの状況を打開するためには, 生命科学に新しい血が必要と考えることは当然であり, そのため他分野と生命科学分野の融合を図ることが効果的と考えられたのではないかと推測する.

数学と生命科学の研究協力については, ロックフェラー大学およびコロンビア大学の Cohen 教授が, 「数学は生命科学にとってかつての“顕微鏡”であり, 生命科学は数学にとってかつての“物理学”である」と期待を述べている.

2. 米国における数学と生命科学の研究協力の状況

米国政府機関主催のワークショップ 2003年2月12日~13日にNIHにおいて, 「数学と生物学の研究協力の促進(Accelerating Mathematical-Biological Linkages)」というテーマで, NSFとNIHの合同シンポジウムが開催された. 会議では, 数学-生物学の研究協力推進の方策や対象とする研究領域について討論がされた⁵.

ワークショップにおいて, 1) 組織のとるべき行動(Institutional Action), 2) 教育においてとるべき行動(Education Action), 3) 研究においてとるべき行動(Researchers Action)について討論が行われ, 様々な提案がなされた.

提案の内容は, 以下に簡単に示した.

1) 組織のとるべき行動(Institutional Action)

1. NSFとNIHとの連携の拡大(研究ファンドなど), および数学と生命科学との境界領域の研究のための国立のセンターの設立
2. ゲノムやプロテオミクスなど生命科学研究上のあらゆるデータを統合したデータベースの確立
3. 研究者が論文発表したデータやモデル同士を比較可能にするための標準化の策定
4. 数学と生命科学の連携を目的としている学協会や教育機関同士の連合

2) 教育においてとるべき行動(Education Action)

1. 境界領域を研究するポスドクを対象にした新しいプログラムの作成
2. 数学関連の学部や生命科学関連の学部の学部長を対象にした学際的な学部教育カリキュラ

ムの作成のためのワークショップの開催

3. 生命科学と数学の境界領域の教員のポジションの創生
4. 高校生を対象とした数学と生命科学の連携の夏期教育プログラムの作成
5. 初等中等教育における数学と生命科学の連携に関する教材の作成

3) 研究においてとるべき行動(Researchers Action)

1. 数理生物学領域でチャレンジングなトップ 10 の研究課題のリストの作成
細胞から人や社会環境まで、様々なレベルのシステムにおけるモデルの構築
複雑な代謝経路, シグナル伝達, 生体物質の相互作用のネットワークのモデル化
不確実性やリスクの理解のための確率理論の統合
コンピュータ科学の更なる理解 - エージェントモデルやコンピュータ計算からの理論
データマイニングと同時推定の理解 (Bonferroni 法を超えるような理論が必要)
グラフ理論的なアプローチによる遺伝子や蛋白構造
脳機能のモデル化
様々な空間的なおよび時間的なサイズをもつ生命現象の過程をモデル化することを可能にする計算科学的な手法の開発
生態学における予測手法
生命科学の理解におけるエラーデータの効果 (どの程度の間違いデータが生命科学の正しい理解に影響をしているか, 例 シーケンスの解読間違いなど)
2. 数学と生命科学の境界分野に関する国内学会の開催
3. 数学者が生命科学を学び, 生命科学者が数学を学ぶことができるような研究者の教育を目的とした学会やワークショップの開催
4. 数学と生命科学の境界領域の論文出版を促進するために, これらに関するデータベースやオンラインジャーナルを統合すること

数学と生命科学の融合研究を推進する研究 Grant NSF と NIH は, 数学と生命科学の融合領域における更なる研究の必要性を認識しており, この領域の研究を推進するために 2002 年から共同で研究 Grant のプログラムを立ち上げている. 2002 年から 2004 年まで年一回, 計 3 回の研究申請書の募集を行い, 2005 年は 6 月 30 日が申請書の応募の締め切りであった.

2003 年までのプログラム名は Joint DMS/NIGMS Initiative to Support Research in the Area of Mathematical Biology であったが, 2004 年から Joint DMS/BIO/NIGMS Initiative to Support Research in the Area of Mathematical Biology となり, NSF の生物科学部門(BIO)が本プログラムに参加するようになった.

ファンドの年間予算は 650 万ドル (6.8 億円) であり, NSF が 250 万ドル (2.6 億円), NIH に属する研究所である国立一般医学研究所(NIGMS) が 400 万ドル (4.2 億円) と分割して出資している. 年間 20 人に研究費を支援しており, 一件当たりの研究費は年間 10 万ドル ~ 40 万ドル (1,050 万円 ~ 4,200 万円) で, 支援期間は 4 ~ 5 年である⁶.

3. 数学能力をもつ生命科学者の育成のための米国の学部教育プログラム

数学能力をもつ生命科学者育成の意義 米国では、数学能力を身につけた次世代の生命科学研究者の人材育成のために、大学の学部教育を中心とした改革が実施されている。

プリンストン大学の分子生物学部の Botstein 教授らは、21 世紀に活躍する生物学研究者のために数学教育が必要であると提唱している⁷。生物学専攻（医学部進学者を含む）の学生は、一般的に必修科目として、1 セメスター（学期）から 2 セメスターで数学および物理学を履修し、2 セメスターから 4 セメスターで化学を履修している。大部分の学生はあまり熱心ではない。教師側も物理、化学、工学専攻の学生に対する「物理・化学・数学」教育とは、当然熱の入れ方が異なるし、カリキュラム上で履修する時間数も大きく異なる。

Botstein 教授らは、「自然という書物を記述している言語は数学である」というガリレオの言葉を引用して、数量的思考を身につけるための自然科学教育から、生物学専攻の学生が取り残されていることに危惧している。なぜなら、生命や生物という複雑なシステムの理解には、数量的思考が必要であるからである。

Botstein 教授は、生物系学部において、数量的思考を十分に身につけられる統合科学の入門レベル（学部 1 および 2 年次）のカリキュラムの必要性を提唱している。従来の「物理学」「化学」「数学」を独立して教えていたカリキュラムの代わりに、生物学上の未解決な課題に対して、「物理・化学・数学」がどのように関連しているかを体系的に示す内容が望ましいと提案している。

報告書“Bio2010” 2003 年に報告書「Bio2010：将来の生命科学研究者のための学部教育改革 (Transforming Undergraduate Education for future Research Biologists)」が全米研究評議会 (National Research Council) から発表され、今後の生命科学の発展のために、生命科学と他分野との研究協力の必要性が強調された。研究協力が重要であるとして挙げられた研究分野は、「数学 & 計算機科学」、「化学」、「物理学」、「工学」であった。これらの学問分野と生命科学の境界領域の学部教育を可能にするために、学部カリキュラムの改革が必要とされた⁸。

4. 数学と生命科学との研究協力における日本の状況

数学と生命科学との研究協力促進の動きはあるのか？ 日本の「数学と生命科学との研究協力」および「数学能力をもつ生命科学者の育成」の状況はどうであろうか。

平成 16 年度予算の科学技術関係経費において、生命科学と数学の連携・協力のプロジェクトに該当すると考えられるものは 4 課題あり、これらはバイオインフォマティクスかシミュレーションであった。しかし、生命科学と数学の研究協力の促進を目的としたプロジェクトは無かった。

JST の戦略的創造研究推進事業・創造科学技術推進事業 (ERATO) において実施されている研究プロジェクトでは、生物をシステムとして理解し、これを計算機科学で解析するシステムバイオロジーの「北野共生システム (1998-2003 年)」、応用研究として生命情報ネットワークの動的情報処理原理の確立を含む複雑系コンピューティングの「合原複雑数理モデル (2003-2008 年)」、学習メカニズムの脳科学の「下条潜在機能 (2004-2009 年)」が、数学と生命科学との連携・協力研究

に該当すると考えられる。さらに、理化学研究所の発生・再生科学総合センターの創造的研究推進プログラムにシステムバイオロジー研究チームがある。

しかし、これらは研究者個人の発想に基づくプロジェクトであり、米国のように公的組織の科学技術政策として数学と生命科学の融合を推進する動きは、日本にはまだ無い。

数学能力をもつ生命科学者の育成の動きはあるのか？ 日本の大学において、生命科学専攻の学生に数学能力を身につけさせるという学部教育の動きは無い。しかし、生命科学と情報科学の融合領域であるバイオインフォマティクスに特化した人材育成の取り組みはある。

文部科学省科学技術振興調整費により平成 13 年度(2001 年)から「東京大学理学部生物情報科学学部教育特別プログラム」が始まっている。このプログラムの目的は、バイオインフォマティクス分野の人材養成を学部教育として、情報科学と生命科学の専門教官の強力な支援のもとで行うことである。バイオインフォマティクス教育には、1)バイオインフォマティクスの専門教育、2)情報科学の基盤教育、3)生命科学の基盤教育、のバランスが必要であると考え、これらはカリキュラムに反映されている。さらに、同科学技術振興調整費により、京都大学化学研究所バイオインフォマティクスセンターでは、平成 14 年度からゲノム情報科学研究教育機構がバイオインフォマティクス人材養成プログラムを開始している。

また、慶応大学湘南藤沢キャンパスのバイオインフォマティクス専攻プログラム(修士課程)では、ゲノム科学等の生物系とプログラミング等の情報系の科目を併せて履修する試みが実施されている。

5. 日本と米国の科学技術政策における違い

日米の政策の違い 米国と日本の数学と生命科学との研究協力の推進の方向性には大きな違いがある。米国では、学部教育のカリキュラムの変更により、数学の知識をもった生命科学者を育成することを考えており、既に生命科学者や数学者になっている者やポスドクに対しては、数学や生命科学の知識を付与するようなプログラムを策定することにより、研究者が研究領域を広げることを助けている。また、数学と生命科学の融合領域の研究にファンディングを行うことにより、新しい分野に研究者を呼び込むことを試みている。これらの方策は、対象としている研究者が限定されないため、結果的にこの新領域に参入してくる研究者数は今後増加するだろうと予想される。

一方、日本の場合は、「生命科学」と「情報科学または計算機科学」との融合分野である「バイオインフォマティクス」や「システムバイオロジー」に特化した少数精鋭の研究人材の育成に力を入れている。近年、国際的にシステムバイオロジー研究の重要性が提唱されている⁹。日本は当該分野の先鞭をつけたと国際的に評価されているが、安穩としていられる状況ではない。米国は世界に先駆けてハーバード大学のメディカルスクール(医学部)にシステムバイオロジー学部を創設し、数学と生命科学の連携推進をしている NIH の NIGMS もシステムバイオロジーを支援している。現在、米国における中心的なシステムバイオロジー関連の研究プログラムや拠点は、官民を含めて十数機関存在するなど、米国の勢いはすさまじい。このように素早く対応でき

る理由の一つは、米国には、数学と他分野の連携に関する科学技術政策の歴史があるからかもしれない。

今後の日本の政策 このような状況を踏まえて、今後は、少数精鋭の人材育成から、「生命科学」と「数学」との融合分野である「新領域」で研究を実施することができる多くの優れた人材の育成に変えていく必要があると考えられる。これらの人材は、「バイオインフォマティクス」および「システムバイオロジー」加えてそれ以外の数学を知識基盤にもつ新しい研究領域の創生および進展においても重要な役割を果たすと考えられる。

新しい分野の研究を進展させるためには、一定数以上の研究者が必要である。その人材を確保するためには、大勢の研究者や学生を対象とした「数学能力をもつ生命学者」育成のための施策が必要である。

日本の大学や学協会から、生命科学と他分野との研究協力の提言があまり挙がって来ないのは、生命科学分野の研究者が他分野との融合に対してあまり関心が高くないことに原因があるのかもしれない。それと同様に日本の数学者も、他分野との研究協りに消極的であるとか、応用数学分野の研究を避ける傾向にあるとかなども理由として考えられる。従って、研究者自身の意識改革が重要であると考えられる。意識改革には、産業界のニーズに対応する小規模の研究プロジェクトを数学者と生命学者で試験的に協力実行して成功させ、その経験を積み重ねることが必要かもしれない。

6. 提言

我が国において、数学と生命科学との連携を促進するための方策を提言する。この方策は、生命科学分野だけではなく、生命科学以外の分野（工学、材料科学、ナノテクノロジー等）と数学との連携においても有効であると考えられる。

1) 省庁内に数学分野の推進・支援を担当する部署を設置

米国には、DOEの数学・情報科学・計算機科学部門(Division of Mathematical, Information, and Computational Sciences)、NSFの数理科学部門(Division of Mathematical Sciences)、NISTの情報技術研究室(Information Technology Laboratory)の数学・計算機科学部門(Mathematical and Computational Sciences Division)、AFOSR(空軍科学研究局)、ARO(陸軍研究局)、DARPA(国防総省高等研究計画局)など数学分野の研究支援を担当する部署が多い。生命科学と数学の連携研究の支援のために、従来の縦割り型の研究費支援ではなく、NIHとNSFの連携のように研究支援機関横断的な研究費支援が実施されている。

一方、日本の政府機関には、米国のような数学研究支援を担当する部署はなく、数学分野に関する科学技術政策を立案するシステム自体が存在しない。数学と生命科学の境界領域や融合領域を育てるためには、まず、数学分野の支援を担当する部署を省庁内に設ける必要がある。また、数学と生命科学の境界領域や融合領域を支援する競争的研究資金を拡大し、研究者をこの新分野に呼び込むような策が必要である。

2) 生命科学専攻の学生に対する数学教育の充実

生命科学分野と数学分野との連携を促進させるためには、生命科学分野の専攻の学生に対する数学教育が重要であると考えられる。従来の基礎課目としての数学以外に、生命科学の諸問題を数学により解析するなどの分野融合的な教育プログラムの策定が必要であると考えられる。

また、数学分野の専攻の学生が生命科学分野の知識を得られる機会をつくることも重要である。

これらの教育プログラムの策定や実行のための教員などの人材が日本に不足しているのであれば、海外から呼ぶことも検討するべきである。

3) 生命科学研究者と数学者が共同研究できる場（研究拠点）の創生

新しい研究分野の創生には、異分野の研究者同士の密なアイデア交換が必要である。そのために、生命科学研究者と数学者が共同研究できる場をつくる必要がある。

既存の生命科学分野の研究所で数学者を、または数学者で生命科学研究者を受け入れて共同研究を実施することを目的とした研究費支援制度の設立在効果的であると考えられる。

米国には多くの国際レベルの数学研究所があり、生命科学だけでなく様々な分野との共同研究を実施する応用数学が盛んである。

一方、日本では、京都大学の数理解析研究所が唯一の国際レベルの数学研究所であるが、ここでは純粋数学の研究が主に実施されている。つまり、応用数学や数学の境界領域の研究を目的とした国際レベルの研究機関は、日本には「ない」ということになる。従って、応用数学を中心に研究する数学研究所の創設は重要であり、生命科学を含めた様々な分野との境界領域の研究を実施することは、日本の科学技術全体の将来の発展を促進すると考えられる。

4) 企業と大学の研究協力の強化

企業と大学の研究協力を深め、産業上で生じた問題を数学者と企業の他分野の研究者との連携で解決することを可能とするシステムをつくる。これは、数学の産業応用の推進および新分野の創生を促すと考えられるので重要である。

5) 数学に対する国民の理解の向上

数学を学ぶ重要性や意義をあらゆる分野の学生や国民が認識するような国家レベルの取り組みが必要である。これは、様々な分野への数学の適用・応用や他分野との研究の連携・融合のための知識基盤や産業基盤をつくるために重要である。

参考文献等

- 1) Eric Lander, Unraveling the Threads of Life, p80-81, TIME Magazine April, 2004
- 2) Jonathan Weiner, "Time, Love, Memory: A Great Biologist and his quest for the origins of behavior", Knopf, 1999.
- 3) Kei Koizumi, AAAS Report XXX: Research and Development FY2006, Historical Trend in

Federal R&D.

<http://www.aaas.org/spp/rd/06pch2.htm> (2005 年 11 月 22 日現在)

- 4) AAAS Report XXX: Research and Development FY2006, Mathematical Sciences in the FY2006 Budget
<http://www.aaas.org/spp/rd/06pch2.htm> (2005 年 11 月 22 日現在)
- 5) Accelerating mathematical-biological linkages: Report of a joint NSF-NIH workshop
<http://www.maa.org/mtc/NIH-feb03-report.pdf> (2005 年 11 月 22 日現在)
- 6) Joint DMS/BIO/NIGMS Initiative to Support Research in the Area of Mathematical Biology
<http://www.nsf.gov/pubs/2004/nsf04572/nsf04572.htm> (2005 年 11 月 22 日現在)
- 7) Bialek, W. and Botstein, D., Introductory Science and Mathematics Education for 21st-Century Biologists. Science, Vol. 303, 788-790, 2004
- 8) BIO2010: Transforming undergraduate education for future research biologists, The National Academies
<http://books.nap.edu/catalog/10497.html> (2005 年 11 月 22 日現在)
- 9) Hood, L., Heath, J.R., Phelps, M.E., and Lin, B., Systems biology and new technologies enable predictive and preventative medicine. Science, Vol. 306, 640-643, 2004