

# 内閣府ムーンショット：数理科学研究をいかに進めるか

ムーンショット研究開発制度・数理科学分科会主査<sup>1</sup>  
(東京理科大学/JST・研究開発戦略センター)

若山 正人

## I はじめに

令和2年度より政府肝煎りの科学・技術への国家投資である「ムーンショット型研究開発制度（以下、MSプログラム）」が始まりました。

本稿は、日本数学会会員の皆様に、この MS プログラムに対して、数理科学的観点からの関心を抱く契機としていただくことを目指して誌面を頂戴したものです。さらに、興味や関心をもっていただける皆様に対して、MS プログラムの研究参画へのお誘い第一弾とすることが目的です。実は、参画していただく方法が未だ固まっていない状況なのですが、目下検討中の企画案の考え方を前もってお知らせしたいと思います。そのためまず初めに、「MS プログラム」とはいったい何を指すプログラムなのかについての紹介をします。研究開発目標の中身と制度の意図を幾らかでも明らかにできればと思います。とくに、この制度のもとにすでに始まっている多様で意欲的な研究開発において、陰に陽に求められている数学・数理科学の視点からの研究の可能性についてご説明できればと考えています。なお、ここで「陰」と表現した理由は、数理科学的研究アプローチが必要そうだが、今のところ明確ではなく、解くべき課題を数学の問題として明示的に設定するところから始めなくてはならない（しかし面白い）課題が多くあるからです。他方、目標と掲げられている研究開発において、解決すべき課題が、すでに明確に数学を必要としているものもあります。そうしたものを「陽」として記しました。さらにこれが、いまは誰も気づいていないかもしれないが、MS プログラムの目標群が潜在的にもつ新しい数学の芽を見出していただけるひとつの機会になることを願っています。

さて、昨今、およそ見聞きしない日がないくらい AI（＝ここではニューラルネットワークでの深層学習）やビッグデータが社会を席卷しています。しかしわが国で

---

<sup>1</sup> 本文の文責はすべて筆者にあります。数理科学分科会メンバー・各目標の数理系アドバイザーの皆さんからは貴重なコメントをいくつもいただいたことを記しておきたいと思います。

は、数学と AI との区別が明確でないように感じられるときもあります。もちろん根っこの部分での共有点も少なくなく、あながちそれを否定するのはよくないかもしれません。とはいえ、AI は解くべき課題・目標がなければおよそ無力です。一方、そのパターン認識・処理能力はすでに人間のそれを凌駕しています。事実、問題解決能力が人に勝ると認められる場面も多くみられます。ただし数学では、問題解決とともに、問題の発掘・発見、あるいは問題をうまく設定して解ける方向に定めるところが重要な点です。これは、目前の数的事実や不明点を前にして、それをどう理解したいか、すべきかという主観に根ざしているものです。隠れた数学的真実、いわば謎を暴きたいという気持ちが数学者にそうさせるのでしょうか。必要な数学的概念をそろえ、可能なかぎり明確で本質を捉えるような良い問題（面白そうで豊かな内容が期待される）の探索が重要であるわけです。

上記は筆者の観察に過ぎぬかもしれません。しかし数学の歴史を振り返ると、そういう具合に多くの進歩を得たように思われてなりません。本稿では、このような認識のもとに、目的である MS プログラムとそれに関わる数理科学の研究についての紹介・説明を試みたいと思います。おおよそ以下の順に進めます。お付き合いくださいれば幸いです。

- MS プログラムの紹介 [II 節]
- 各目標において必要とされる、あるいは期待される数理科学的な研究について：現在そして未来に続く可能性を秘めた、しかし定かではない課題の紹介 [III 節]
- 数理科学分科会を中心として行う予定のムーンショット目標に関わる数理科学研究への参画について [IV 節]

## II ムーンショット型研究開発制度について

ここでは昨年度から内閣府の主導で始まった政府の「MS プログラム」について概観しておきたいと思います。最長 10 年間の支援として当初予算配賦額が 1 千億円を超えるという、国としても思い切った研究開発投資です。ムーンショットという名称は、読者の皆様もご存知のとおりです。実際この制度は、かつて米国の John F. Kennedy 大統領の宣言

*“We choose to go to the moon. We choose to go to the moon in this decade and do the other things, not because they are easy, but because they are hard, because that goal will serve to organize and measure the best of our energies and skills,*

*because that challenge is one that we are willing to accept, one we are unwilling to postpone, and one which we intend to win...”*

President John F. Kennedy, address at Rice University, September 12, 1962

に因んで命名されたものです。アポロ計画により、米国では多くの科学が協働し、目的を超えて科学と技術が大きく進歩したといわれます。

日本における“ムーンショット”型研究開発制度（MS プログラム）を具体的に述べれば、超高齢化社会や地球温暖化問題など重要な社会課題に対し、人々を魅了する野心的な目標（ムーンショット目標）を国が設定し、挑戦的な研究開発を推進するものとされているということになります。制度の趣旨や運営組織については、公開されているウェブページ

<https://www.jst.go.jp/moonshot/jigyuu.html>

をご覧くださいければと思います。詳細は上記のページに譲りますが、以下、本稿を self-contained なものとするために内容の一部を紹介します。

----- 引用 -----

少子高齢化の進展や大規模自然災害への備え、地球温暖化問題への対処等、今日、我が国は多くの困難な課題を抱える中、それら課題解決に科学技術が果敢に挑戦し、未来社会の展望を切り拓いていくことが求められている。

----- 中略 -----

こうした背景の下、新たに創設するムーンショット型研究開発制度（以下「本制度」という。）は、我が国発の破壊的イノベーションの創出を目指し、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発（ムーンショット）を推進することとし、

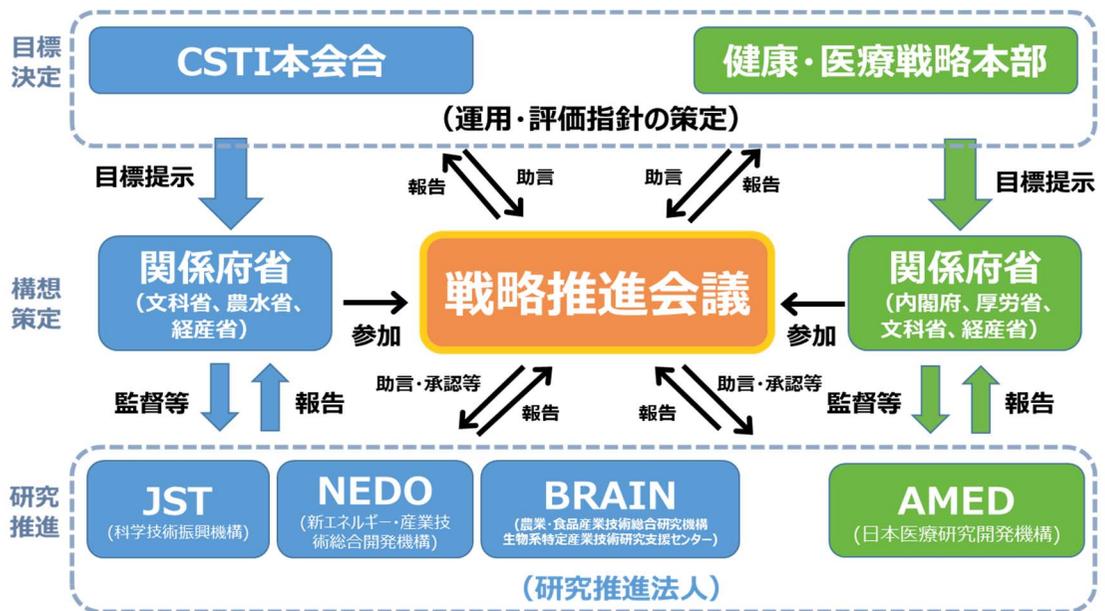
① 未来社会を展望し、困難だが実現すれば大きなインパクトが期待される社会課題等を対象として、人々を魅了する野心的な目標（以下「ムーンショット目標」という。）及び構想を掲げ、最先端研究をリードするトップ研究者等の指揮の下、世界中から研究者の英知を結集し、目標の実現を目指すこと

② また、基礎研究段階にある様々な知見やアイデアが驚異的なスピードで産業・社会に応用され、今日、様々な分野において破壊的なイノベーションが生み出されつつある状況に鑑み、我が国の基礎研究力を最大限に引き出す挑戦的な研究開発を積極的に推進し、失敗も許容しながら革新的な研究成果を発掘・育成に導くこと

③ その際のマネジメントの方法についても，進化する世界の研究開発動向を常に意識しながら，関係する研究開発全体を俯瞰して体制や内容を柔軟に見直すことができる形に刷新するとともに，最先端の研究支援システムを構築すること．また，研究成果を円滑に社会実装する観点から，多様な人々との対話の場を設けるとともに，倫理的・法制度的・社会的課題について人文社会科学を含む様々な分野の研究者が参画できるような体制を構築すること．さらに，将来の事業化を見据え，オープン・クローズ戦略の徹底を図ること

等を旨とし，総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）及び健康・医療戦略推進本部の下，関係府省が一体となって推進する．

----- 引用ここまで -----



MSプログラムの運営体制図

こうしたなか，令和 2 年に 6 つのムーンショット目標（MS 目標）が定められ，その後さらに令和 3 年には一つの追加がありました．それら 7 つの目標とは，以下に示すとおりです．目標ごとの括弧内は，それぞれの挑戦的研究開発に係る業務を行う国立研究開発法人の名称を記載しています．

目標 1 (JST) :

2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/index.html>

目標 2 (JST) :

2050 年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal2/index.html>

目標 3 (JST) :

2050 年までに、AI とロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/index.html>

目標 4 (NEDO) :

2050 年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現

[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100161.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100161.html)

目標 5 (NARO-BRAIN) :

2050 年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出

[https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon\\_shot/index.html](https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon_shot/index.html)

目標 6 (JST) :

2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>

目標 7 (AMED) :

100 歳まで人生を楽しめる医療・介護システムの実現

<https://www.amed.go.jp/program/list/18/03/001.html>

それぞれの目標毎に、構想から深く関与した PD (Program Director) やサブ PD が任命されました。そして PD が任命する外部有識者からなるアドバイザーたちが、PD の運営統括の仕事の支援を行なっています。実際の研究開発は、公募でプロジ

エクトが採択された PM (Project Manager) により推進される構造となっています。目標達成をになう PD・PM の方々と内容の紹介は上記のそれぞれの web page に譲ります。PM のもと、研究を指揮・推進する PI (Principal Investigator) が配置され、そこには有力な、あるいは将来が大きく期待される若手研究者が集い、研究開発が展開されています。

上記に加えて、各挑戦的研究開発に係る業務を行うために、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST : 目標 1,2,3,6), 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO : 目標 5), 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター (NARO-BRAIN : 目標 4) 及び国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED : 目標 7) に基金が設立されています。

### III 数理学からの研究アプローチの可能性

MS プログラムでは、上記の各目標と研究開発体制に加え、

「倫理的・法制度的・社会的課題 (ELSI : Ethical, Legal and Social Issues) / 数理学等の分野横断的な支援も研究開発の加速や社会実装にとって重要であることから、PD と分野横断的な研究者との意見交換会の場を設置し、PD が PM に対する分野横断的な研究者の支援が必要であると判断し、かつ PM も当該支援を必要とする場合には、当該 PM が分野横断的な研究者の支援を受けられることができるような仕組みを構築する」

のように明確な形で数理学の役割と制度構築の理念が謳われています。これが、JST が所管する各目標に 2 名ずつの数学者がアドバイザーとして配置されていること及び数理学分科会<sup>2</sup>の設置根拠となっています。さらに「JST 以外の研究推進法人は、JST が各支援機能に応じて整備した数理学分科会等の分科会を活用することができる。」とも定められています。そのため、経済産業省下の法人である NEDO 等に設置されている目標についても同列に考えていくことが可能であり求められることとなっています。

#### III-1

よく知られているように、“万物は数”とはピタゴラスによるものです。彼は、現在の AI やビッグデータの到来くらいは知っていたかのようです。当時に示された素

---

<sup>2</sup> II 節の冒頭に記載のウェブサイトにある数理学分科会メンバーに加え、各目標に二人ずつ任命されている数理系アドバイザーにより (拡大) MS 数理学分科会は運営されています。

数が無限に存在することと素因数分解の一意性が、およそ 2500 年後の現代の公開鍵暗号を生みました。もっともそこには、17 世紀のフェルマーの小定理も使われています。しかし古代ギリシャ人が、どういう意図から素数たちに思いを馳せたのかは想像するしかありません。いずれにしても現実社会への応用までに随分と時間がかかっているとみなされています。しかしながらこのことは、数学の重要な発見が時間を超えて社会とともにあることを示しているようにも思われます。

時代はその後も進みます。たとえば、多方面で時代を超えていたとされるレオナルド・ダ・ヴィンチは、“工学は数学的科学的楽園である。何となればここでは数学の果実が実るから”と手記<sup>3</sup>に記しています。また、ガリレオ・ガリレイの次の言葉はあまりにも有名です。“宇宙（自然）は数学の言葉でかかっている”。しかしながら、核物理学者であったユージン・ウィグナーによる 1960 年に公開された講演録、“自然科学における数学の理不尽ともいえる有効性”ほど、多くの天才たちにも共有されて数学の特長が端的な表現は見当たりません<sup>4</sup>。もちろん、数学自体は発見するものであり発明するものではないと考えられています。また、数学にも様々な分野があるわけですが、じつは秀れた数学活動には根底に繋がる一体感があると思われまます。このことは数学を生き活きと発展させてきた理由の一つでもあるのでしょうか。

ところがわが国では、先進国にありながら上記の感覚があまり共有されていない状況が続いてきました。たとえば、世界では STEM, STEAM<sup>5</sup> 教育といわれて久しいところですが、乱暴に言えば受験数学を排すれば実質的に M がみあたりません。かつて計算機性能が貧弱な時代、実は日本には超一流の応用数学を実践した工学者が多く存在しました。それが大学での教育にも活かされました。おそらく日本の高度成長の原動力の一因になったと考えられます。したがって、ずっと M が欠けていた訳ではありません。数学は、諸科学・技術において、いわば横串的な役割を果たしてきました。ただしその特徴は、成果物からはほぼ見えないことにも表れています。しっかりと前提を踏まえれば、それが導く数学の結論は（少なくとも数学としては）正しいといえます。たとえばアルゴリズムという面からの数学の有用性もそれにあたります。またその抽象性は、思考の整理と柔軟性、ときにはそれまでの概念を破壊するほどに見える飛躍を導き、思いがけない発見を生みます。それとともに、実問題に対しても有効性を発揮することは過去の幾多の例が示すところです。

---

<sup>3</sup> 手記 下（岩波文庫）/レオナルド・ダ・ヴィンチ/ 杉浦 明平（文庫：岩波文庫）

<sup>4</sup> The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cpa.3160130102>

<sup>5</sup> STEM = Science, Technology, Engineering and Mathematics, STEAM = STEM+A(=Arts).

本稿で述べる MS プログラムは内閣府が主導した人類の未来に寄与すると期待される目標が明確な研究開発制度ですが、数理科学が真にこのような役割を発揮すべき機会でもあります。決して、研究の助っ人としてではなく（外からは前述のように見えにくいですが）、新しい数学を展開する機会でもあります。内閣府に設置されている CSTI の議員でもある東北大学の小谷元子氏は、このような考えからも制度の構築に熱心にあたられました。

しかしながら、MS プログラムは数理科学の発展やその基本となる人材育成を旗印にしているわけではありません。もっとも、多様な科学研究に関心をもつ数学を専門とするコミュニティの育成には賛同する向きが確かに存在しています。たいへん心強いものです。したがって、MS プログラムの研究開発に参画する場合には、数理科学の研究者も、アポロ月面着陸計画に参画するがごとく、いずれかの目標の達成に資する方向にあることが期待されます。

### III-2

以下、JST が所管している4つの目標における数理的な課題について概観してまいります。ただし、予めお断りしておきたいことがあります。というのも、本稿の冒頭で触れたように、数理科学の課題が明確なものもある一方で、課題はたしかに存在していそうだが明確でないものも多いことです。したがって、各々の目標における PM プロジェクト<sup>6</sup>では、数理科学的手法の推進が、自らの設定する目的に現実に役立つか、あるいはある程度の短期間に成果が見えてくるものなのか、見通せないままのケースが多々あります。また、目標により各 PD や PM の方々による数理科学の捉え方・イメージも多様です。そのため、私たちのような数学・数理科学を専門とする者とは、同じ用語を使っているにもかかわらず意識の乖離があるかもしれません。ただし、そのこと自体が新しい研究を開拓していく意義を高めるきっかけを与える可能性もあります。

目標 1：目標のタイトルからは、vague ではあるものの、ここに数理的な要素・問題がありそうだということは、容易に想像がつくと思われます。本目標でのとくに重要なキーワードはアバターです。実際、サイバネティック・アバターにより、時空を含めた様々な制約を乗り越えて、人間の活動を広げようというのが目標です。人とアバターの対応が 1:1 から多：多になったときの、個々のアバターの自立性と被制御性の問題やネットワーク上の情報のやりとり、ヒトの側の脳の状態の理解な

---

<sup>6</sup> 以下では、PM が率いる研究開発プロジェクトを PM プロジェクトと記します。

どに、何らかの数理からの知見が必要になるだろうと考えられているところです。しかしながら、具体的な研究アプローチが数学的な問題として定式化されているわけではありません。ただし PD によれば、目標となっている研究開発においてすぐにも課題となりうる具体的な問題も存在しているようです。たとえば、脳波等のデータの解析の問題もそのような数学的な課題のひとつです。ここで立ち入ったご説明をすることは、筆者の力が未だ及ばないことに加え時期尚早かもしれません。しかし、脳の活動をきちんと捉えるには、闇雲なデータ収集をおこなっていても難しいはずで、たとえばデータを前にして理解を試みる際の「次元の呪い」を回避するためにも期待されるはずの、精神と身体の状態を推定するようなアルゴリズムは確立できないと考えられています。このような点からも、数理的突破口が必要となるだろうとの期待が存在します。

本目標の数理科学の観点からのアドバイザーである、以前の本会理事長でもある坪井俊氏（武蔵野大学）と九州大学の落合啓之氏は、現在 JST の戦略創造プログラムの CREST やさきがけ研究プロジェクトから派生した「未解決問題ワークショップ」などでの活動を通じての有効な接点も考慮にいれながら、本目標の PD とも相談されながら、そこでの今後の数理科学の展開について深く検討されているところです。筆者の個人的な意見を述べさせていただければ、本目標の課題は、数理科学研究の題材の宝の山だと思う次第です。

目標 2：もちろん本目標でのテーマは医学・生物学・生命科学分野に入ります。しかし、未病というキーワードから容易に想像がつくように、病気が陽に現れる前の状況での、病気の予測、予兆の検出とそれに対する対応方策の構築がポイントになります。したがって、ここに確率論や人を含む生物系などの時間的な変異・発展を記述する力学系といった数学が必須になります。ベースとなるものがデータですので、統計学がなくては話になりません。もちろん、工夫をしながら現在の AI を駆使することにもなります。創薬における AI の利用が当然のように語られ、AI のさまざまな利用が進んでいることは皆が知る時代です。しかし、そうした状況であるからこそ、数学・数理科学からの本格的なアプローチが欠かせないと考えています。

また、本目標においては実験や臨床記録などからなるデータの収集が研究の根本になることは容易に理解できることと思われま。ところで同時に、得られるデータは、対象が細胞・ウイルス、またマウスなどの実験動物、そしてヒト由来のものであるなど、そのままでは同時に扱い比較することができないものがほとんどです。たとえ時系列データであっても、取得間隔やデータ数などの違いも大きくあります。

これらを、統合あるいは関係性をあきらかにしていくのも数学・数理科学に期待されている大切な点です。

実は、この目標2はほかの目標に比べて、すこし特別なところがあります。先にも述べましたが、この目標のみは、かつてなら数学とはあまり縁がないと考えられていたウェットな実験をベースとする生物学・生命科学の研究です。しかしながら、ヒューマン・セル・アトラス計画などに見られるような国際的なトレンドにも沿いながら、角度を異にする意欲的な課題設定として「人の臓器間ネットワークを包括的に解明する」ことが挙げられました。そして公募要領では

～複雑な生命現象の理解ためには、時空間的な計測情報等を統合的に解析・分析することが必要である。そのため、AI 技術をはじめ、現代数学を含めた数理科学的手法を効率的かつ効果的に導入することは必須であると考えられる。～

と書かれました。そうした経緯もあり、目標2を構成する PM プロジェクトは、キーワードを記せば、難治性がん、糖尿病、認知症、ウイルスのほかに、東京大学の合原一幸氏が PM を務める“複雑臓器制御系の数理的包括理解を目指す”，いわば数理科学を軸にしたプロジェクトがあります。数学のテーマを挙げればひろくは力学系の研究に深く関係していますので、専門が近いアドバイザーである京都大学の國府寛司氏がこの目標に協力しています。さらに、各々の PM プロジェクトにおいても、実績があり独自性を備えた数理科学からの研究アプローチが積極的になされているという特長があります。

目標3：テーマのなかにもある AI とロボットというのがキーワードです。AI なり深層学習なりをロボットに搭載すれば技術が発展するといった主張を耳にすることがあります。しかし話はそれほど簡単ではないことが、ここでの一つの大きなポイントです。AI を搭載しただけではできない部分の基礎理論の研究などには数理科学の力が必須であると思われます。身体性の発達によって機能を獲得してきた生物というものに対する深い理解も求められることのひとつでしょう。無限定な環境で動ける機械とはいったいどういうものであるのか。環境を限定することによって動く機械を作ることができるが、限定されていないところで動くことができるロボットとはいかにあるのだろうか。人が予期していなかったものは想定外の事象と言われているが、人間が想定外でも振る舞えるのはどういう事象であるかなど、根本的な疑問が多くあると思われます。

無限定性、物理でいえば開放系が想定されますが、それに対しては、生物が見せ

てくれる群（むれ）のようなソリューションの実現もあり得るかもしれません。実際、脳を大きくするという方向性もあるでしょう。また、群制御やセンサーや人も含むネットワークを考えるとという方向性もあります。いずれにしても数理科学的観点からのアプローチが欠かせないと思われまます。

本目標のなかにあるテーマとして、ロボットが群をなして、災害現場での支援・修復や月面での建設を可能とするような技術や、無限定性からくる環境評価にかかわる問題もあります。そこには当然のことながら、（群）ロボットの自律性の課題や遠隔技術の技術的向上も必要です。また、言語処理などを見据えた圏論などに注目されている PM プロジェクトもあります。つまり、種々の異なった構造の類似性を記述する言語としての圏論の応用もありそうです。さらには、ロボットの支援によって人々の自己効力感（運動主体感や身体保有感）を向上させることを目指している PM プロジェクトもあり、そこでは、認知心理学、たとえば心理学的観点からの人間の感情の推定という問題に対する数理モデルの研究などがありそうです。アドバイザーである東北大学の尾畑伸明氏と國府氏がいろいろな可能性の検討を進めており、多様で新しい数学の展開と、数学の諸科学との連携を必須とする領域の研究テーマも生み出されていくのではないかと期待されているところです。すこし個人的なコメントも追加させていただきます。たとえば群ロボットがどうやって無限定な環境で操作できるかを考えます。そこでは、限定された境界条件の中で最適な行動を見つけていくプロセスと、境界条件の外に探索にいく行動のバランスが重要になってきます。基本的には最適化の問題ですが、対称性などによる問題の *reduction* なども必要かもしれません。常識的に考えると起こるはずの（現在の AI・機械では到底想定しえない）イベント対応のためのメカニズムの開拓、あるいはオープンな環境での自己組織の形成の研究が必要となるはずで、これらはブラックボックスを抱える AI では対応しきれません。自己組織化には、それがどのように振る舞うかという力学系の観点などの数理モデルの構築が課題になるかもしれません。さらには最近話題になっている、微分方程式で深層学習を記述するニューラル ODE によって扱うことなど注目してもよいと思われるアプローチも生まれてきています。多くの場面で直面する非線形な接触や現象を踏まえて安定して目的を達成できるようなモデルを考える際には数学的考察が必須ではないかと思うところです。本目標に限らず、機械学習などのデータ駆動型研究と伝統的な数学研究の手法をインテグレートすることは重要であり、新しい数理の世界の開拓となると期待できます。

目標6：本目標は誤り訂正をそなえた大規模で万能な「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」の実現を目指すものです。そのため、その有力候補である超伝導量子ビット、シリコン量子ビット、イオントラップ量子ビット、光量子ビットといった4つの異なるアプローチからデバイス作りに専念するPMプロジェクトと2つの異なるアプローチで量子コンピュータをネットワーク化するための技術を開発するPMプロジェクト、さらに理論グループといわれる理論・ソフトウェア開発のPMプロジェクトからなります。この理論研究のところでは、明らかに数理的な課題が山積みです。量子計算機の素人からみても、巷にある解説等からは、量子誤り訂正符号の背後にあると思われる数理科学的構造のようなものを明確にすることは大きな意義があるに違いありません。さて本目標における数理科学課題はかなり明確です。実際、具体的課題として、たとえば以下のような研究テーマが重要だと考えられています。

1. 物質のトポロジカル相・マヨラナ量子ビットの数理
2. 作用素環・モジュラーテンソル圏・トポロジカル量子計算の数理
3. 量子重力・量子情報・量子誤り訂正の数理
4. 量子文脈性・量子超越性の数理
5. リソース理論・量子情報・量子計算量の数理
6. Post-Quantum Cryptography(耐量子暗号)の数理
7. 量子コンパイラの数理
8. 量子コンピュータ高速エミュレーションの数理

「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」の実現には、量子誤り訂正が不可欠ですが、誤り訂正のために付加した回路がまた誤りを生み出すため、全ての誤りが訂正されるか、または、訂正されない誤りが蓄積して爆発するかは、要素的な計算素子の誤り確率に依存します。この誤り確率の閾値は誤り訂正方式によって決まるため、閾値を大きく改善する新たな誤り訂正方式を発見することが重要です。この問題には数理科学的なブレークスルーが期待されています。量子誤り訂正の問題は、物質のトポロジカル相とトポロジカル量子計算の関連を生み出しています。また、ブラックホールの情報消失問題に端を発して、量子重力、量子情報、量子誤り訂正の間に新しい関連が生まれています。これらの数学的背景としては、作用素環論をベースにしたモジュラーテンソル圏などの圏論的アプローチが生まれています。また、近年、量子計算量理論のブレークスルーである「MIP\*=RE」証明から、非局所量子相関に関するツィレルソンの予想及び作用素環論におけるコンヌの埋め込み問題の否定的解決が導かれるなどが話題になっています。とはいえ、専門家によれば、作用

素環・量子情報・量子計算量をつなぐ研究はこれからであるとの様子です。一方で、量子計算はなぜ古典計算より高速なのかという量子優越性の研究が、EPRのパラドックスや Bell の不等式に端を発する量子文脈性の研究に結びついて、代数的位相幾何学の方法で量子文脈性の分類が国外では盛んに行われているとのことなど、目標 6 のアドバイザーのお一人である小澤正直氏（中部大学）より伺っています。このほかにも、デバイス開発の理論的枠組みに関しての光と物質の相互作用の数理といった研究もありうるかもしれません。課題が具体的に列挙されていますが、これらの開拓には今までにない新しい数学を展開する、また問題をうまく定式化していくという興味深い作業があることも当然です。

上記に挙げた目標の研究開発において、数学者がそれぞれの研究ドメインの研究者とチームを組んで連携し、数学者が問題の数理科学的定式化からアイデアを存分に出し合って、新しい数学を開拓していくことが望まれています。学際的な連携研究については、かつて数理科学分野では初めての JST 戦略創造事業 CREST の研究統括を務められた西浦廉政氏（北海道大学）が、数理科学分科会においても、その豊富な経験からの多くのアイデアのもと課題の整理・検討に力を尽くしていただいているところです。

#### IV MS プログラムの MS<sup>7</sup>研究参画への誘い

これまでも見てきましたが、各々の目標における多くの研究開発において、データの収集・分析・処理はきわめて重要な位置にあります。しかしながら一方で、データ駆動型でなにかも決着がつくわけでないことも明白です。実際、疎な、あるいは不十分な量のデータしか得られない場合があります。そのような場合には数学のアイデアが必要となる理由があるわけです。Emmanuel Candès (Stanford) と Terence Tao (UCLA) らの創始である圧縮センシングのアイデアなどは、その典型的な成功例でしょう。圧縮センシングによる画像再構成など、MRI などを持ち出すまでもなく、意義は、その後の技術発展において明確にみられるものです。細分化されているようで、そうではなく脈々とつながる数学の一体感のようなものの力強さを感じます。

米国などにおいては、数学・数理科学への研究投資が目立ちます。NSF は、日本の JST と JSPS を合わせたような組織ですが、ほかにも DOE（エネルギー省）、NIH（国立衛生研究所）など各省庁からの投資予算が、数理科学への全研究予算の

---

<sup>7</sup> もちろん MS=Mathematical Science です。

3/4 程度を占めています。たとえば、AI と科学研究というタイトルの 2020 年に発足した DOE の研究開発イニシアティブにしても、予算の 5-10%は、数学と統計に使われることが想定された仕組みになっているようです。それはもちろん、現在の AI が抱える課題、たとえば、ブラックボックスだと問題視されている

- ・判定基準・理由について人の理解可能な形で説明できていない
- ・事故発生時に原因解明・責任判断ができない

などの課題があります。MS 目標にも関わる深い検討課題です。また、周辺を含めた状況の分析もあると思われますが、たとえば因果推論による仮説（数理モデリング）が立てられることなどがあればロボット研究などにも役立つかもしれません。

同様に、

品質保証問題：

- ・仕様が定義されないためテストの成否が定まらない
- ・動作保証ができない。

などの課題もあります。そのほかにも以下のような課題に対処する必要性があるでしょう。

バイアス問題：

- ・学習データに偏見が含まれていると、判定結果にも偏見が反映される
- ・学習データの分布の偏りが差別を生むこともある

数学の帰結は前提が正しければ正しいわけですが、前提（あるいは価値）を定めての数理モデリングも怖いことを起こしえます。また、

脆弱性問題：

- ・学習範囲外のデータに対しての挙動が不明
- ・誤認識を誘発する攻撃が可能
- ・悪意をもった追加学習による不適切な振る舞いの誘導

フェイク問題：

- ・フェイクニュースによる思考誘導や世論操作の危険性拡大
- ・本物と見紛う紛い物の動画などの生成が可能、etc.

これらに対してできるだけ正しい評価を行うとともに信頼性を付与するためにも数学と統計学の寄与が重要です。また、NIH が行っている数学+CS 投資は、NSF のそれを上回っており、そのようなことにも数学に対する社会の期待が現れています。

研究のロードマップを描きにくい（描かない・描けない：数学に限らず、そもそも研究というものはそういうものでした）数学研究を積極的に取り入れることは、

本来のムーンショットそのものの意図にも似つかわしいものと考えられます。MSプログラムには、目標は明確でありながらもロードマップ・線表が描けない研究開発が入り込まないと爆発力が備わらないのではないかとというのが個人的な意見です。もちろんそこには、到達したいと願う大きな夢があり、信念や主観の発揮が必要でしょう。数学はその点でも相応しいものです。こうした状況を現実のものとし、継続していくことで学問の進歩もあるはずで。

先に述べましたが、本年 9 月はじめには、数学・数理科学の研究者の参画のための方法のご案内や研究提案公募を始める予定で準備しています。秋季総合分科会では、具体的な内容についての説明会をオンラインで開催することとしています。公募自体は、すこし余裕をもち、3ヶ月程度の期間を設定する予定です。したがって、学会終了後、プロジェクトの数理的内容の説明を含めたワークショップの開催を計画する予定です。おそらく目標ごとの開催となります。ワークショップでは、逆に各々の目標における PM プロジェクトの研究計画において数理的研究への期待なりが明らかになることも願っています。新しい提案を生み出すようなワークショップになることが期待されます。

現時点で検討している公募案の一つには、いわば数理科学側からの研究提案やアイデア提案の募集があります。若い研究者を念頭にはおいているものの、中堅やシニアの研究者あるいは中堅・シニアの研究者と若手が組になっての提案も歓迎できる枠組みを構築したいと考えています。また、狭い意味での公募ではなく、定式化されていない課題を数理的に明確にするという作り込み活動を、ワークショップ等を通じて育みながら、研究参加者を募るという方法もありうるかと検討しているところです。本稿の冒頭に数学の課題について「陰」と「陽」などと記しました。実際には、陰と陽が解析接続のようにつながっているというのも研究の醍醐味かもしれません。

## V 最後に：

数学にはその発展に裏打ちされつつ内的動機で進めることがきわめて大切な研究があります。もっともそれは数学に限ったことではありません。ところが同時に、現実社会への貢献が期待されている数学研究も実は大きいものです。さらに、数学が将来にわたりずっと豊かであるためには、意義深い新しい研究テーマや問題の発掘が必要です。これら三つはもちろん独立なものではありません。したがって、本稿で紹介させていただいた、諸科学・技術開発分野における数学研究は数学自体の進歩にも欠くことができないものです。

ムーンショット研究開発制度における数理科学研究についての紹介のために機会を与えてくださった寺杣友秀前理事長・清水扇丈理事長をはじめとする数学会理事会や関係者の方々に感謝申し上げます。また、この記事が出版され、上記の公募を開始したのちに開催される秋季総合分科会においては、先述のように本制度や公募の紹介を直接させていただく予定です。コロナ禍が続き、学会開催マネジメントに尽力されている前理事長の寺杣理事と小菌英雄理事には、このような機会の創出にご尽力いただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。また、ともすれば多くの自然科学研究や技術開発とは異なるスタイルで研究を進めようとする数学・数理科学の研究スタイルに対して理解を示され、その実現にご尽力をいただいている MS プログラム担当である JST 事務局の皆様、とくに小西隆氏には多くの時間をとって意見交換をさせていただいています。感謝の意を記しておきたく思います。

(2021 年 7 月 7 日提出)