ムーンショット目標 10 研究開発プロジェクト「核融合研究のパラダイムを刷新する数理モデルの定式化と解決法のイノベーション」について

早稲田大学 先進理工学部 応用物理学科
小澤　徹

本稿はムーンショット型研究開発制度の研究開発プログラム目標 10（吉田善章プログラムディレクター）「2050 年までに，フュージョンエネルギーの多面的な活用により，地球環境と調和し，資源制約から解き放たれた活力ある社会を実現」のもとで行われている表題の研究開発プロジェクトについて説明するものである．

1. ムーンショット型研究開発制度

内閣府のページ[1]によると，ムーンショット型研究開発制度は，「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）を推進する国の大型研究プログラム」と規定されており，制度の特徴として次の 5 点が挙げられている[2]．

- 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（ムーンショット目標）及び構想を国が策定する．
- 各ムーンショット目標において，複数のプロジェクトを統括する PD（プログラムディレクター）を任命し，その下に国内外トップの研究者を PM（プロジェクトマネージャー）として採択する．
- 研究全体を俯瞰したポートフォリオを構築し，我が国の基礎研究力を最大限に引き出す挑戦的研究開発を積極的に推進し，失敗も許容しながら挑戦的な研究開発を推進する．
- ステージゲートを設けてポートフォリオを柔軟に見直し，将来における社会実装を見据え派生的な研究成果のスピンアウトを奨励する．
- データ基盤を用いた最先端の研究支援システムを構築する．

この制度案が内閣府の総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）で初めて提案されたのは 2018 年（平成 30 年）6 月 14 日の第 39 回会議であり，12 月 20 日の第 41 回会議で制度の実施が決定され，2020 年（令和 2 年）1 月 23 日の第 48 回会議で

目標 1-6 が決定された[3]．現在の目標は次の項目である[4]：

目標 1：2050 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
（PD 萩田紀博 大阪芸術大学 教授）
目標 2：2050 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
（PD 祖父江元 愛知医科大学 特命学長）
目標 3：2050 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（PD 國吉康夫 東京大学 教授）
目標 4：2050 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
（PD 山地憲治 地球環境産業技術研究機構 理事長）
目標 5：2050 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
（PD 吉澤史昭 宇都宮大学 総括理事・副学長）
目標 6：2050 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
（PD 北川勝浩 大阪大学 量子情報・量子生命研究センター センター長）
目標 7：2040 年までに，主要な疾患を予防・克服し 100 歳まで健康不安なく人生を楽しむためのサステイナブルな医療・介護システムを実現
（PD 平野俊夫 大阪大学名誉教授・公益財団法人大阪国際がん治療財団理事長）
目標 8：2050 年までに，激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現
（PD 三好建正 理化学研究所 計算科学研究センター チームプリンシパル）
目標 9：2050 年までに，こころの安らぎや活力を増大することで，精神的に豊かで躍動的な社会を実現（PD 熊谷誠慈 京都大学 教授）
目標 10：2050 年までに，フュージョンエネルギーの多面的な活用により，地球環境と調和し，資源制約から解き放たれた活力ある社会を実現
（PD 吉田善章 東京大学大学院 特任教授）

このうち，科学技術振興機構（JST）が担当するのは目標 1，2，3，6，8，9，10 であり，ガバニング委員会の運営統括のもと，横断的支援として ELSI 分科会と数理科学分科会が設置され事業運営体制が組まれている[5].

尚, 数理科学分科会の活動およびムーンショット型研究開発制度と数理科学との関連については若山正人主査の記事[6]が詳しい.

2. ムーンショット目標 10

ムーンショット目標 10 は核融合エネルギー発電の実用化とその多面的な活用を目指して 2023 年（令和 5 年）12 月 26 日の CSTI 第 70 回会議で決定され，2024 年に採択された 3 つのプロジェクトを以って研究開発を開始した．核融合エネルギーとは，具体的には重水素と三重水素の軽い原子核の融合によりヘリウムの原子核が生成される際に放出される莫大なエネルギーを指し，豊富な資源（海水中に豊富に存在する燃料）と高い安全性（核分裂反応の様な暴走や二酸化炭素排出の無さ）が特徴である．更に，フュージョンエネルギーは 2026 年に閣議決定された「日本成長戦略」における「成長 17 分野」の一つにも選定され，国家規模の最重点テーマとして位置づけられている対象である[7].

目標 10 では「多面的な活用」も重視しており，核融合研究で得られた様々な技術を多くの領域に応用することを視野に入れている．例えば，融合炉の小型化・軽量化による宇宙開発や深海探査，分散型電源としての小型モジュール炉の開発，核融合で発生する超高温の熱や中性子の熱源利用や物質開発，医療診断・治療，放射性廃棄物処理への応用など，多くの領域への応用例が想定されている．

3. 核融合とプラズマ

核融合は太陽で常に起こっている物理現象であり，太陽の放出する莫大なエネルギーは核融合によるものとして理解される．地球上では，核融合は超高温のプラズマ状態を作り出し，その状態を継続的に閉じ込めて維持する事で実現可能となる．プラズマとは，原子を構成する原子核と電子が分離し陽イオンと電子として独立に激しく運動する事が可能となった状態を指し，しばしば，個体・液体・気体に続く「物質の第 4 の状態」と称されるが，そのためには超高温の環境が必要となる．核融合発電のために必要な環境は 1 億度以上のプラズマ状態である．また，その状態を炉の中で実現出来たとしても，超高温のプラズマが炉の壁に当たると壁が溶けたりプラズマが一瞬で冷えて消滅してしまうため，炉の壁に触れない様にしながら一定時間閉じ込めておく必要がある（太陽では強力な重力によって閉じ込めた状態が維持可能となっている）．通常，プラズマを炉内で浮かせて閉じ込めるために強力な磁場が用いられる．

プラズマ現象は雷（雲と地表間の電圧により空気がプラズマ化して光，熱，音を放出する状態），静電気による発火（乾燥した空気のプラズマ化現象），オーロラ（プラズマ粒子としての太陽風と大気分子との衝突による発光現象）のように自然界に見られるものから蛍光灯・水銀灯，空気清浄機，ガスコンロの点火時の火花等，実生活に応用されているものまで身近に観察される．

4. プラズマ現象を記述する偏微分方程式

プラズマはイオンと電子の荷電粒子から構成される為, その現象は粒子の運動を記述する方程式と荷電粒子の生成する電磁場の方程式からなる連立方程式系によって記述される. 方程式化に当たっては, 着目した対象の着目する挙動とその描像（粒子像対波動像, 接束対余接束, 決定論対確率論等), 対象とする現象の時空スケール, 想定近似精度等によって, 方程式による表現が異なって来るので注意が必要である. また, 考察すべき空間の範囲（全空間, 半空間, 有界領域, 外部領域等), 境界の形状（凸性, 非拘束境界, 星型境界, 滑らかさ, 向き付け等）幾何学的条件（種数, 曲率, 連結性, 単連結性等）や境界条件（ディリクレ条件, ノイマン条件, 自由境界条件, 非線型境界条件, 周期条件, 動的境界条件等）によっても解の存在や挙動に大きな影響が反映されるので, 明確に規定しない限り数学的取扱いは意味を失う. 勿論, 簡単なモデル設定から始めて現実的な諸条件を少しずつ加える事によって理解を深めて行くのは数学に限らず科学の方法論として正当な考え方である.

プラズマ現象を記述する偏微分方程式は多岐に亙る. ここでは代表的なもののみを取り上げる.

先ず, 電子レベルのミクロの立場の方程式として, ブラゾフ・マクスウェル方程式が挙げられる. 高温で希薄なプラズマ中で粒子同士の衝突が無視可能な設定において, 粒子の速度分布函数が従う方程式で, 時間・空間・速度に関し一階の非線型双曲型方程式系の形を取る. プラズマ波動と粒子の相互作用として現れるランダウ減衰を説明するモデルとして良く用いられる.

次に, イオンと電子から成るプラズマ全体を流体と見做すマクロの立場の方程式として, 磁気流体方程式（MHD 方程式）が挙げられる. 空間スケールが大きくプラズマの遅い時間変化のマクロな挙動に着目した設定において, プラズマ流体の速度ベクトル場と電磁場が従う方程式で, 時間に関し一階, 空間に関し一階または二階の非線型放物型・双曲型方程式系の形を取る. 核融合プラズマのモデル方程式として最も用いられる方程式で, プラズマによる宇宙論の基礎方程式である.

また, ミクロな電子の振動が生成する高周波電場と低周波イオン密度変動との相互作用のもたらすラングミュア波の電波を記述する方程式として, ザハロフ方程式系が挙げられる. 高周波電場の複素包絡場と低周波イオン密度変動が従う方程式で, 時間に関し一階または二階, 空間に関し二階の非線型分散型・双曲型方程式系の形を取る. プラズマの崩壊機構を説明するためにザハロフが導入した方程式であるが, 実際にはザハロフ方程式系の代りに非線型シュレディンガー方程式を用いて解の爆発の形式的証明を与えた事でも有名となった. この論法の数学的定式化やザハロフ方程式のイ

オン音波高速化極限における非線型シュレディンガー方程式への収束問題を巡って，非線型シュレディンガー方程式の数学解析の発展の原動力となった．

磁場に沿って伝播し，磁場に垂直な方向に振動する横波としてのアルベン波の電波を記述する方程式として，微分非線型シュレディンガー方程式もプラズマ閉じ込めの関連で良く用いられる方程式である．

以上の方程式は双曲型，放物型，分散型に分類されるが，対応する定常状態は楕円型方程式の形を取るため，プラズマ現象を記述する偏微分方程式は代表的なものを見ただけでも全ての分類に亙っており，その数学解析の全貌を把握するには全ての方法論が必要となる．それは同時に，プラズマ現象が階層構造を持ち，単純な視点と方法論だけではその全貌を捉えられない複雑で多様な側面を備えている事を如実に示すものとなっている．

5. 核融合との係わり

筆者は学部生として物理学科に所属していた事もあり，電磁流体力学やプラズマ物理は電磁気学の続編として興味の赴くまま学ぶ事が出来た．当時は学部において電磁流体力学やプラズマ物理の講義は無かった（現在もそうである）が，老舗の出版社から本格的な専門書が出ており，入手して独習する事が容易であった．力学や電磁気学の講義でも，荷電粒子の運動について詳しい解説が行われていた．大学院から助手時代の 1980 年代に非線型シュレディンガー方程式の研究とザハロフ方程式の研究に参入した時には，その導出法を中心にプラズマの専門書を系統的に学び直したが，核融合への興味はその当時は希薄であった．1990 年代後半に『数学辞典』第 4 版の編集が始まった頃，吉田善章先生と共に第 3 版の物理学関連の項目の改訂に携わった事が吉田先生との出会いである．2008 年に現在の所属に移ってからは物理学科と応用物理学科の数学専門科目を担当しているが，基礎科目の力学を担当した事も有る．日本学術会議に会員として在籍していた期間（2016 年 5 月－2023 年 9 月）には，数理科学委員会のほか物理学委員会 物性物理学・一般物理学分科会 プラズマサイエンス小委員会 副委員長（2021 年－2023 年 9 月）として吉田善章先生の下で，見解『プラズマサイエンス―その学際的発展と豊かな未来社会のために―』の取りまとめに参画し，数学，複雑性科学，素粒子物理学，天体物理学，地球惑星科学，生物物理学，量子ビーム科学，材料科学・デバイス科学，触媒化学，計算・データ科学，医療科学，植物科学とプラズマサイエンスの学際的関係を論じた．2021 年 4 月に吉田先生が核融合科学研究所の所長に就任した際，核融合科学の学際性の観点からの協力を依頼され，運営会議に入る事になり，核融合科学研究所の運営体制全般から，外部評価委員

として，研究の学際性，外部研究資金の獲得状況から個別の人事に至る迄，その活動評価に携り，吉田先生の所長退任（2025 年 3 月）後も引き続き運営に携わっている．

以上の様に，筆者と核融合科学との関係は昔からのもので，気が付けば深いものに進展してきた経緯が有る．

6. プロジェクト採択まで

核融合科学との係わりの中で，核融合炉開発までは全く想像出来なかったもののプラズマサイエンスに於ける数学的方法論の活用を徐々に考える様になったのは世の中がコロナ騒動で混乱していた頃であった．プラズマ現象を記述する非線型偏微分方程式の数学解析は定常問題を除いて，全空間，半空間，周期境界条件等の領域の対称性を大前提とする研究が圧倒的多数を占め，一般領域を扱った理論は 1980 年代から目立った進展が見られなかった．その理由は勿論問題固有の難しさに由来する訳であるが，誰も見向きもしない様になって久しい問題は妙に心地良く，コロナ騒動のお蔭で暫く集中してザハロフ方程式系をはじめとする非線型分散方程式を一般領域で研究する事が出来た．その過程で，領域の形状や境界条件が解に及ぼす影響が，プラズマや核融合に於いても重要な研究対象であると知るに至った．プラズマや核融合の研究集会で講演すると云う貴重な機会も何度か得たが，案の定反応は乏しく，主催者には申し訳ない事をした．そんな中，ムーンショット目標 10 が設定され，プロジェクトマネージャーの公募が 2024 年の春に始まった．数学的貢献の可能性とその意義を

- 領域に関する問題（超高温・高密度プラズマの安定維持に最適な領域の決定）
  安定したプラズマを維持する磁場空間の幾何学的諸条件（体積，表面積，曲率，トポロジー指標等）の決定．乱流の要因となる渦の生成消滅機構に対する領域の影響の解明．
- 境界条件に関する問題（発生する熱の安定排出に最適な境界条件の決定）
  ステファン・ボルツマンの 4 乗則と非線型境界条件下の非線型偏微分方程式の解析によるダイバータ設計の数理的基礎の確立．
- 方程式に関する問題（融合炉内のプラズマの階層構造の解明）
  ブラゾフ・マクスウェル系と MHD 系，ザハロフ系と非線型シュレディンガー系の階層を繋ぐ漸近解析による核融合プラズマの統一的理解．

の三点から説き起こし，従来の「経験則・実験データ・シミュレーションの組合せによる半経験的な核融合炉開発」から「数理に基づく設計可能な理論体系による核融合炉開発」への転換を図るプロジェクト案「プラズマサイエンスの数理」を纏め，公募に応募した．幸い書類審査は無事通過し，第一次面接審査に臨んだものの，数学的方法論の優位性を強調する余り目標 10 全体に対する配慮を欠いたものと評価されたらしく，第二次面接審査に進めなかった．2025 年の春の公募の際には，この点を反省し，数値解析・数値シミュレーションによるアプローチにも重点を置き，数学的研究と核融合科学研究の連携と協働が円滑に進むよう研究体制を見直し，再び同じタイトル「プラズマサイエンスの数理」で応募した．第 2 次面接では，国家プロジェクトに数理が参画する意義，効果，将来性について，エニアック計画やマーキュリー計画の例を挙げて説明した．（図 1, 2）採択通知を受け取ったのは 2025 年 10 月であった．

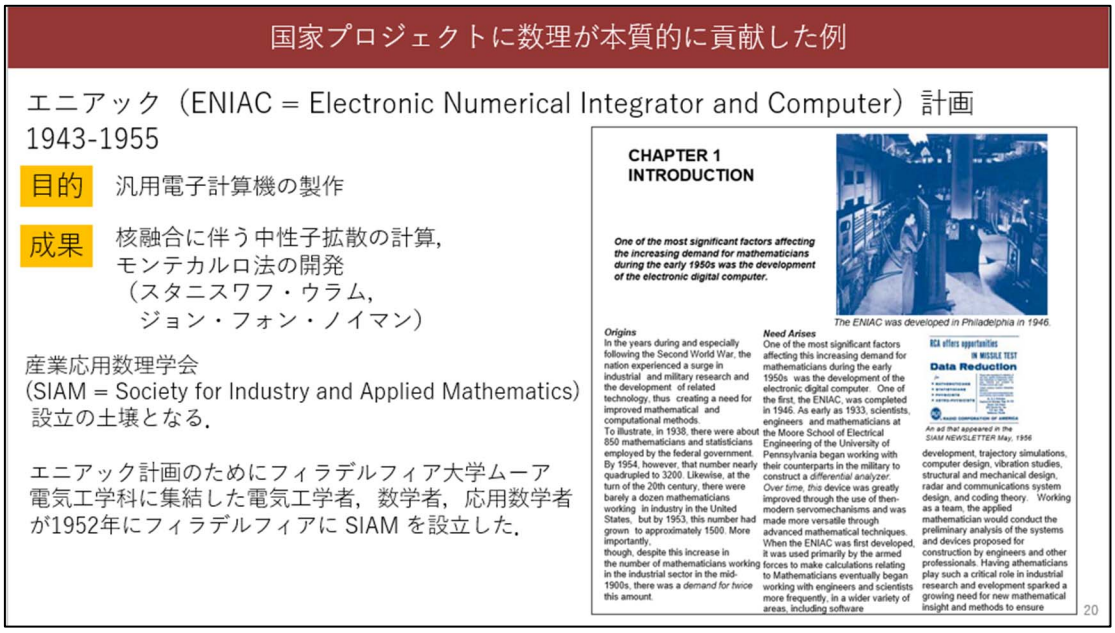


図 1. エニアック計画　1943-1955

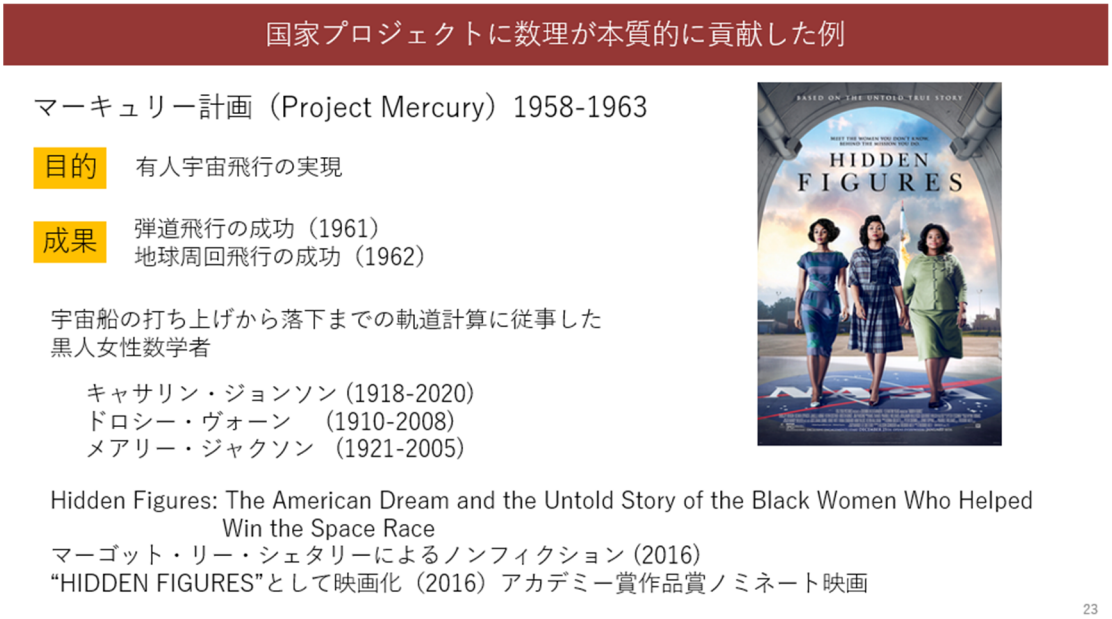


図 2. マーキュリー計画　1958-1963

7. プロジェクトの概要

こうして筆者はプロジェクト・マネージャー (PM) として採択された訳であるが，プロジェクト開始までには計画を見直す「作り込み」を経る必要が有り，当初の構想の大半は変更を余儀無くされた．先ず PD から

- 本格的に研究開発に進む為には，核融合研究の現場で何が問題とされているのか，そのために数理で貢献できるものは何かを整理する事が必要
- 本プロジェクトの活性化の為には PM が PI を兼任するのが適切
- プロジェクト名の変更

の提案が有った．目標 10 全体の構想を内閣府の担当官に効果的に伝え理解を得易くする為の方策として理解したので，その方針を受入れる事にしたが，プロジェクト計画を JST の様式に沿って書類に纏めるのは大変であった．そもそもムーンショット型研究開発制度は理学よりも工学，理論よりも実験・計測・応用に重点が置かれており，数学の研究を想定していない様に思われる．JST の担当者とは何度か対面で素直な意見交換を行ったが，数学研究を担当した経験の無い人に取っては酷だったかも知れない．「作り込み」の作業には 3 ヶ月を要した．

さて，次が本プロジェクトの概要である（以下敬称略）

実験物理学として発展してきたプラズマ物理学, 核融合炉材料の物質科学と数理科学が協働し, 具体的な課題, 豊富な実験データ・数値シミュレーションを基盤として, 数理科学の新たな概念および方法論を提示するために, フュージョン分野の革新的な発展につながる課題を選定し, 数学的な定式化を図り, その解決に向けた研究遂行の道筋を探索する. 研究開発課題を 4 つの視点に分け

1-1. 偏微分方程式論の調和解析的視点（PI 小澤 徹）
1-2. 偏微分方程式論の幾何解析的視点（PI 小薗 英雄）
1-3. 偏微分方程式論の確率解析的視点（PI 熊谷 隆）
1-4. 偏微分方程式論の数値解析・数値シミュレーション的視点(PI 服部 裕司)

からそれぞれ検討するとともに, 緊密な連携を通じて, 2 年目のマイルストーンの達成に取り組む.

2 年目のマイルストーン : 核融合研究の革新的な発展につながる「核融合炉開発に関する重要問題を数学的に定式化した研究課題」を掲げ, その解決に向けた研究遂行の道筋を提示し, その課題解決に関する取り組みに着手する研究体制を構築する.
2 年目のマイルストーン達成後は, 新研究体制のもとで次のマイルストーンの達成に向けて取り組む計画である.

4 年目のマイルストーン : 数学的に定式化された核融合炉開発に関する重要問題を解決し, 体系化した理論を構築するとともに, フュージョンエネルギー技術に関するモデリング, 数値シミュレーション, 制御システムとの関連性を明示し, 革新的な核融合システムの開発の基盤を完成する.

9 年目のマイルストーン : 核融合炉開発に関する数理的理論体系の実装化を図り, フュージョンエネルギーの実用化に寄与する実装展開の仕組を構築する.

国内外で類似する研究は, 偏微分方程式論, 確率論, 数値解析の個別のテーマに特化した場合に優れたものが数多く見られるが, 核融合研究との関連性は数値解析的研究を除いて希薄であり, 既に確立された個別のテーマの枠組の中で論じられている. 特に, 従来の偏微分方程式の研究では, 方程式と各種限定条件（初期条件や境界条件等）が与えられて初めて研究対象となるので, 粒子像（運動論）と波動像（流体論）が混在するような状況を扱うのが困難である. 核融合研究に関連した数値解析的研究は数多いが, 数値プログラムやスキームの改良や実データとの比較が主要な論点とな

った結果, 本来の基礎方程式との整合的理解や境界条件の取扱いに充分な説明が与えられていないのが現状である．本研究開発プロジェクトでは，こうした見過ごされ易い問題にも焦点を当て，数学的定式化につなげて行く計画である．

PM はプロジェクト全体を統括する立場であり, 小川卓克サブ PM はその補佐に当る．研究参加者は上記 PI のほか，石毛 和弘（東京大学 教授），正宗 淳（京都大学 教授），久保 英夫（北海道大学 教授），太田 雅人（東京理科大学 教授），駒田 洸一（早稲田大学 次席研究員），Chatziafratis Andreas（早稲田大学 次席研究員），柳澤 卓（早稲田大学 教授），荻野 尚三（東北大学 博士課程），廣田 真（東北大学 准教授），Tabe Jamaat Golsa（東北大学 学術研究員）であり，アドバイザリーボードとして儀我 美一（東京大学 特任教授），矢野 良輔（東京海上ディーアール株式会社 上級主任研究員）のアドバイスを受けつつ研究を推進している．現在は 2 年目のマイルストーン達成を目指し，日々格闘中である．

8. 謝辞

本稿の執筆に当たり，久保英夫先生と佐藤周友先生にご推薦いただきました．記して謝辞といたします．

[1] ムーンショット型研究開発制度，内閣府
https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html
[2] ムーンショット型研究開発制度とは
https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/system.html
[3] 総合科学技術・イノベーション会議（本会議）
https://www8.cao.go.jp/cstp/giji.html
[4] ムーンショット型研究開発制度 プログラム一覧
https://www.jst.go.jp/moonshot/#topTab-1
[5] ムーンショット型研究開発制度 事業について
https://www.jst.go.jp/moonshot/jigyou.html
[6] 若山正人，内閣府ムーンショット：数理科学研究をいかに進めるか,『数学通信』第 26 巻第 2 号，44-59
https://www.mathsoc.jp/assets/file/publications/tushin/2602/moonshot.pdf
[7] 日本成長戦略本部／日本成長戦略会議，内閣官房
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/nipponseichosenryaku/index.html