ムーンショット目標 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

実施状況報告書

2025 年度版

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

小澤 徹

早稲田大学 理工学術院 先進理工学部

MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

【目　次】

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.....1
PM：小澤 徹（早稲田大学　教授）

偏微分方程式論、調和解析的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定...3
課題推進者：小澤 徹（早稲田大学　教授）

偏微分方程式論、幾何解析的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定...5
課題推進者：小薗英雄（早稲田大学　教授）

確率解析的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定.....7
課題推進者：熊谷隆（早稲田大学　教授）

数値解析的・数値シミュレーション的視点による研究課題の選定と
その解決に向けた研究計画の策定 9
課題推進者：服部 裕司（東北大学　教授）

2025 年度研究開発プロジェクト実施報告書

「吉田 善章 PD
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」

「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」

PM：小澤 徹　早稲田大学 教授

1. 研究進捗状況と成果

コミュニティボードを開催し、核融合研究の革新的な発展につながる研究課題の探索のため、PI 自身の本プロジェクト開始前の研究実績の発表と PI の推薦による核融合研究の最先端の研究者による研究実績の紹介を行い、その核融合研究としての発展性と数理科学的発展性について議論を重ね、論点をまとめ、今後の探索の方向性と来年度の取り組みについて概観した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

ステージゲート以前における本プロジェクトの目標達成は「核融合研究者と数理科学研究者の議論の取りまとめを通じて核融合研究の革新的な発展に繋がる研究課題を決定し、その数学的定式化を明示する事」に在る。2025 年度はテーマの整理と今後の方向性について、打ち合わせを以下のように実施し、議論を開始した。

- 2026/1/16　本研究プロジェクトに関する打合せ
- 2026/2/9　　第 1 回コミュニティボード会議
- 2026/3/21　第 1 回ワークショップ

今年度は課題 1-1～1-4 を分ける段階ではないため全課題を対象とし、本プロジェクトのコミュニティボードおよび核融合関連分野の研究者が集まり、核融合と数理科学の相互理解を深めながら研究課題選定のための議論を行った。

２）代表的な論文

本プロジェクトの目標達成は上記 2.　１）の通りであり、その成果を論文として発表する段階には来ていない。

３）代表的な特許

本プロジェクトの目標達成は上記 2.　１）の通りであり、その成果を特許として発表する段階には来ていない。

以上

2025 年度実施状況報告書（成果）

「吉田 善章 PD
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」

「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」

「偏微分方程式論、調和解析的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定」

課題推進者：
PI：小澤 徹　早稲田大学　教授

1. 研究進捗状況と成果

コミュニティボードを開催し、核融合研究の革新的な発展につながる研究課題の探索のため、PI 自身の本プロジェクト開始前の研究実績の発表と PI の推薦による核融合研究の最先端の研究者による研究実績の紹介を行い、その核融合研究としての発展性と数理科学的発展性について議論を重ね、論点をまとめ、今後の探索の方向性と来年度の取り組みについて概観した。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

ステージゲート以前における本プロジェクトの目標達成は「核融合研究者と数理科学研究者の議論の取りまとめを通じて核融合研究の革新的な発展に繋がる研究課題を決定し、その数学的定式化を明示する事」に在る。2025 年度はテーマの整理と今後の方向性について、打ち合わせを以下のように実施し、議論を開始した。

- 2026/1/16　本研究プロジェクトに関する打合せ
- 2026/2/9　 第 1 回コミュニティボード会議
- 2026/3/21　第 1 回ワークショップ

今年度は課題 1-1～1-4 を分ける段階ではないため全課題を対象とし、本プロジェクトのコミュニティボードおよび核融合関連分野の研究者が集まり、核融合と数理科学の相互理解を深めながら研究課題選定のための議論を行った。

２）代表的な論文

なし

３）代表的な特許

なし

以上

2025 年度実施状況報告書（成果）

「吉田 善章 PD
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」

「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」

「偏微分方程式論、幾何解析的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定」

課題推進者：
小薗英雄（早稲田大学　教授）

1. 研究進捗状況と成果

電磁流体力学（MHD）方程式はプラズマ現象を記述する基礎方程式として知られている．本研究では MHD 方程式の数理解析を行うことにより，研究課題「偏微分方程式論、幾何解析的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定」に寄与する．MHD 方程式は流体と磁場に対する連立方程式系であるが，両者の境界条件の設定が可解性に大きな影響を及ぼす．本研究においては，もっとも単純な斉次境界条件の場合を考察した．その様な設定においても，方程式の可解性は領域の位相幾何学条件と密接な関係がある．実際，3 次元有界領域においては，多重連結領域など種数がゼロでないとき，磁場の運動を支配する線形化偏微分作用素は一般にはゼロを固有値として有し，生成する半群は時間減衰しない．本研究では，ゼロ固有値に対する固有空間が，調和ベクトル場であること明らかにして，MHD 方程式を固有空間と直交する方向に解くことにより，小さな初期データに対する時間大域解を構成することに成功した．その際，3 次元有界領域上の L^r-ベクトル場に対する Hemholtz-Weyl 分解が重要な役割を果たす．更に，調和ベクトル場が，MHD 方程式の非自明な平衡解であることを発見し，その漸近的安定性を証明した．

2. 代表的な成果事例

１）MHD 方程式の磁場に関する非線形構造を明らかにした．実際，方程式の非線形項は，線形化偏微分作用素の核空間と直交していることを証明した．この直交性によって，非線形偏微分方程式である MHD 方程式の初期値境界値問題を３次元有界領域上においては，調和ベクトル場と直交するベクトル場上で定式化可能であるとの知見を得た．実際，吉田善章―儀我美一の方法を用いて，彼らの単連結領域における小さな初期値に対する時間大域的古典解の一意存在定理を領域の位相幾何学的条件を課すことなく．任意の有界領域へと拡張できた．更にゼロという自明解の周りだけでなく，領域の位相幾何学な条件に依存して存在する調和ベクトル場が L^1 ノルムの位相で十分小さければ，漸近安定な平衡解であることも証明できた．　この知見は任定常問題へと発展し，少なくとも斉次境界条件下では，外力に大きさの制限を課すことなく，弱解の存在が示せる可能性がある．ただし，その場合には磁場に対する外力が調和ベクトル場に直交することを仮定する必要である．この直交性の妥当性に関しては，MHD 方程式が Maxwell-Ohm の方程式の近似方程式であることに立ち返り，カレントが領域の法線ベクトルと平行であれば保証されることが確認できた．

２）代表的な論文

１）で得られた新たな知見を執筆中であり，現時点で公表することは控える．

３）代表的な特許

なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

「吉田 善章 PD
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」

「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」

「確率解析的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定」

課題推進者：
PI：熊谷隆　早稲田大学　教授

1. 研究進捗状況と成果

PM の小澤徹教授が開催したコミュニティボードに参画し、核融合研究の革新的な発展につながる研究課題の探索のため、核融合研究の最先端の研究者による研究実績のレビューを受け、その核融合研究としての発展性と数理科学的発展性について議論を行った。研究開発課題参加者の正宗淳教授と打ち合わせを重ね、来年度の取り組みの方向性と進め方について取りまとめた。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

ステージゲート以前における本プロジェクトの目標達成は「核融合研究者と数理科学研究者の議論の取りまとめを通じて核融合研究の革新的な発展に繋がる研究課題を決定し、その数学的定式化を明示する事」に在る。2025 年度はテーマの整理と今後の方向性について、PM 主催の打ち合わせを以下のように実施し、議論を開始した。

- 2026/1/16　本研究プロジェクトに関する打合せ
- 2026/2/9　　第 1 回コミュニティボード会議
- 2026/3/21　第 1 回ワークショップ

今年度は課題 1-1～1-4 を分ける段階ではないため全課題を対象とし、本プロジェクトのコミュニティボードおよび核融合関連分野の研究者が集まり、核融合と数理科学の相互理解を深めながら研究課題選定のための議論を行った。

２）代表的な論文

なし

３）代表的な特許

なし

以上

2025 年度実施状況報告書（成果）

「吉田 善章 PD
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」

「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」

「数値解析的・数値シミュレーション的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定」

課題推進者：服部 裕司　東北大学　教授

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は本プロジェクトのステージゲートまでに数値解析的・数値シミュレーション的視点による研究課題の選定とその解決に向けた研究計画の策定を行うものである。そのために、核融合科学・数学・流体物理学・燃焼工学・数値シミュレーションの分野から専門家を招き、両者の相互理解を深めながら研究課題の候補を探索・検討する課題検討会を開催した。2025 年度は「階層性」と「真空」を主なテーマとし、話題提供と議論を通して、研究課題の選定のための有力な材料を得ることができた。

2. 代表的な成果事例

１）目標達成に最も寄与する成果

ステージゲート以前における本プロジェクトの目標達成は「核融合研究者と数理科学研究者の議論の取りまとめを通じて核融合研究の革新的な発展に繋がる研究課題を決定し、その数学的定式化を明示する事」に在る。2025 年度はテーマの整理と今後の方向性について、PM 主催の打ち合わせを以下のように実施し、議論を開始した。

- 2026/1/16　本研究プロジェクトに関する打合せ
- 2026/2/9　 第 1 回コミュニティボード会議
- 2026/3/21　第 1 回ワークショップ

今年度は課題 1-1～1-4 を分ける段階ではないため全課題を対象とし、本プロジェクトのコミュニティボードおよび核融合関連分野の研究者が集まり、核融合と数理科学の相互理解を深めながら研究課題選定のための議論を行った。

２）代表的な論文

なし

３）代表的な特許

なし