

No.116 (グランドビジョン⑭)

プラズマ物理の学際的展開—集団現象の理解に向けて—

① ビジョンの概要

プラズマ物理が目指すのは、多数の要素が共同して起こす集団現象であり、現実世界の在り様を理解するという問題意識を宇宙・天体、大気・海洋、生命、社会などの科学と共有している。これらの分野と連携し、プラズマ物理がカッティングエッジとなって、集団現象に関する科学を発展させる。

② ビジョンの内容

星を「質点」としてモデル化することからルネッサンスを迎えた物理学は、有限な大きさや多様な形相をもつ物体、さらには目に見えない存在である電磁場や量子場へと領野を拡大し、自然の諸相に現れる、より複雑で多様な現象の理解に挑んできた。その知的生産物のいくつかは、具体的な対象物を超越して、自然界に限らず人工物や情報、精神、さらには社会にまでも通底する普遍的な知の枠組みに基本構造を与え、学際的な知の創造においてカッティングエッジの役割を果たしてきた。なかでも特に一般的な概念や方法を生み出すことを志向する分野が一般物理学であり、その現代的なテーマの一つが「集団現象」である。

現実の世界の複雑な現象に対する理解の明証性を確立する方法論として、デカルトが『方法序説』に提案した「細分化」という戦略は、対象を「要素」に分解してゆくという要素還元の方法において大きな成功を収めてきた。しかし、互いに関係しあう多数の要素が「集団」としてどのように振る舞い、どのような機能を創発するのかという問いに対して、要素への分解は解決に向かわない。そこで、現実世界に生起する事象を「意味の単位」へ細分化すること、すなわち「分節化」によって、科学的研究のテーマを定式化するというアプローチをとる。集団現象は多様なテーマの多元的な集合体である。具体的には、秩序、乱れ、階層性、循環、持続性、突発現象などである。これらを科学の視点から定式化し、発生の原理やダイナミクスの法則などを解明することが、集団現象の科学の学際的な課題である（図1）。

宇宙の典型的な物質状態である「プラズマ」において生起する多様な現象は、「集団現象」の探究にとって絶好の研究材料である。プラズマという存在の宇宙的な普遍性によって、その研究は宇宙・天体現象を理解するための基礎として重要であるのみならず、星の活動メカニズムである核融合を地上で利用しようという核融合エネルギー開発にとって核心的な重要性をもつ。また、プラズマ状態にある物質が、他の相にある物質と相互作用する界面は、集団現象によって生み出される独特な非平衡状態の構造をもち、宇宙における反応プロセスの典型的な場であるとともに、これを応用するさまざまな工学に未知の可能性を拓きつつある。

プラズマ物理は、流転する世界のリアルな在り様を理解するという問題意識を、宇宙・天体、大気・海洋、生命、さらには社会の科学と共有している。新しい科学の指針となる概念や方法を生み出し、秩序と複雑性が共存する自然、そして社会の実相に関する人類のより深い理解を支える科学として、未来のエネルギーと環境の問題解決に貢献する。

③ 学術研究構想の名称

プラズマの高精度計測で解明する集団現象の物理

④ 学術研究構想の概要

宇宙の典型的な物質状態であるプラズマは、荷電粒子の集団であり、電磁場（光を含む）を用いたさまざまな計測法や制御法を駆使して研究できる点に特長がある。精密性、定量性、再現性を極めることから、新しい科学の概念や方法を生み出すことができる。

集団現象というテーマを共有する多くの分野との学際的協力によってプラズマ物理学を発展させるための研究基盤として、プラズマ実験システムを建設し運用する。実験対象のプラズマは、集団現象の本質が現れるために十分高い温度と閉じ込め特性が必要である。さらに重要なのは、プラズマ内部で起こる現象を制御し、高い精度で計測することである。この実験システムは超高温プラズマで生起する現象を透視し分析する能力で世界トップの性能をもつ。集団現象の中で未解明な物理が多く残されている速度空間の物理現象、突發現象、プラズマ中の量子プロセスに関する詳細なデータを得ることができ、理論・シミュレーション研究科学及びデータ科学と連携協働して、プラズマ物理のパラダイム転換を先導する。

⑤ 学術的な意義

本研究構想は、プラズマ物理学を集団現象の科学という学問の大きな文脈のうえに位置づけ、学際的な視点から、プラズマが荷電粒子の集団であるために光を含む電磁場によって計測あるいは制御できることを活かした先端的研究を実施するものである。これまでもプラズマの研究からエントロピー、カオス、自己組織化など、さまざまな分野に広がる普遍的なテーマについて重要な成果が生まれてきた。それを可能とするのは実験の厳密さ、精度と蓋然性の高さ、さらには理論・シミュレーション研究との密接な連携である。プラズマ内部の現象を透視する能力を高精度・高分解能に増力した実験システムを活かした研究によって、これまで見えなかった事象の発見、メカニズムの解明、さらに新しい概念や方法論の発明を目指す。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置づけ

プラズマ物理は核融合研究をブーストとして急速に進歩してきた。世界の核融合研究は、ITERを中核とした国際協力によって進められている。同時に、ITER後を見据えた核融合発電炉の開発に関する取り組みが各国で加速されており、日本では内閣府に核融合戦略有識者会議が設置され、国としての開発方針が示されている。英米を中心に核融合ベンチャーの活動も拡大しており、実用化に向けた国際競争の時代を迎えようとしている。こうした核融合エネルギー開発の進展を見据え、学術研究の役割として、一般性のある研究課題を定式化し、学際的な頭脳循環を起こし、科学の未来を担う人材を育成する。

⑦ 社会的価値

未来技術の開発に貢献する学術研究と自然科学の最先端研究という二つの焦点を統合した研究の実践の場からは、新しい科学技術の領域を開拓する人材が育つ。プラズマ物理は、天体内部で起こるエネルギー発生と元素合成のプロセスを地上で再現し、これをエネルギープラントとして利用しようという研究であり、その推進は、学術の振興としての効果と、革新的技術による新エネルギーの獲得と産業創成を合わせたという二重の社会貢献となる。

⑧ 実施計画等について

【実施計画】核融合科学・プラズマ物理の持続可能な発展のために、研究施設の大型化を追求するのではなく、パラダイム転換によって、研究テーマおよび共同研究体制のダイナミックな脱構築が行われるシステムのもとで研究を推進する。実験対象であるプラズマを生成する装置と、そ

れを計測し分析する装置を、交互に「高性能化」してゆく成長戦略である。本計画は、1998 年から LHD を中核的実験施設として実施されてきた研究成果を礎としつつ、2023 年度から新しいパラダイムへ転換する学術研究基盤事業 LHD としての 3 年間のフェイズを経て、2026 年度からプラズマ生成部をコンパクトな装置に転換し、計測器やプラズマ制御機器を大幅に増力して、プラズマの集団現象に関する研究を実施する。これと並行して、プラズマ生成部を新しいシステムへ更新するための装置設計・製作を進め、**2030 年度に**プラズマ生成部を更新する改造を実施する。**さらに、位相空間（実空間、速度空間、時間）におけるプラズマの集団運動のこれまでにない高精度な計測を開発する。精密な実験・データ科学・理論シミュレーションによって集団現象の理解を深め、プラズマ物理の学際的展開を図る。**

【実施機関】本計画は、自然科学研究機構・核融合科学研究所が中核となり、国内外の広い分野の研究者を巻き込んだ、学際的・国際的共同研究プロジェクトとして推進する。

【所要経費】総額 **475513** 億円（10 年計画）うち設備費 **275213** 億円、運用経費 **200300** 億円
本計画は、LHD の資産を有効に再利用するとともに、プラズマ生成部および計測システムを循環的に高性能化する合理化によって大幅な経費削減を行う。~~プラズマ生成部の転換（2026 年度：25 億円、2027～2031 年度：125 億円）。計測システムの構築（2026 年度：25 億円、2031～2034 年度：100 億円）。運用経費（2027～2029、2031～2035 年度：200 億円）。—~~

⑨ 連絡先

~~吉田—善章~~**山田 弘司**（自然科学研究機構 核融合科学研究所）