

プラズマ物理への新たな取り組みと将来の磁場閉じ込め研究に対する期待
**New approach to plasma physics and expectation and request for
 magnetic fusion research in the near future**

稲垣 滋
 INAGAKI Shigeru

九州大学 応用力学研究所
 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

1. はじめに

現在、大型ヘリカル装置(LHD)の次期装置が検討されている。このひとつの候補として、LHD 実験の知見と近年の最適化手法に基づいた新たな先進的磁場配位装置が考えられている。自己点火を伴う経済的な核融合炉の実現のため、次期装置の磁場配位には輸送と MHD 安定性の改善・向上が求められる。このような改善・向上を考える上でプラズマ乱流は重要である。輸送特性の改善には乱流輸送の低減が必要であるにも関わらず、これまでの配位最適化には乱流は考慮されてこなかった[1]。そこで次期装置では最適化による乱流輸送の低減が大きな課題である。

次期装置が乱れ無きプラズマを探求する一方で、自然界に存在するプラズマ、特に入熱があり不均一である非平衡プラズマは本質的に乱れている。この乱れが太陽ダイナモ、地球磁気圏プラズマ、降着円盤等の形成に重要であると考えられている[2]。乱れ無きプラズマは自然界には異質な存在であるため、その達成は非常に挑戦的であるが、その実現に向けた取り組みによってプラズマの乱れの役割が更に明らかになる事が期待できる。

本シンポジウムでは乱れたプラズマの基礎研究を行っている立場から、1) 核融合炉実現に向けた乱流最適化という取り組みに関連する最近の基礎プラズマ研究の動向と期待、そして 2) 次期装置を大型実験室プラズマとして見た際の期待と要望、について議論したい。

2. トロイダルプラズマにおける乱流詳細観測

乱流は非線形効果が強く、時空間スケールが広範囲であるので、観測や数値シミュレーションでその全貌を捉える事が非常に困難である。このため乱流の定式化は発展途上であり、その最適化を大きな課題である。乱流の

定式化は核融合プラズマに限らず、宇宙天文プラズマや産業応用プラズマでも同様である。このため観測に適したプラズマ装置を用いて、制御した再現性のあるプラズマ条件下で乱流を多地点同時計測する試みが行われ成果を上げている[3]。このような乱流シミュレーション実験では対象とする現象と時空間スケールが大きく異なっている事が多いため、支配方程式が不変となる様、空間、時間、及びその他のパラメータを注意深くスケールし調和する事が重要となる。これまで、乱流シミュレーション実験には直線型装置が用いられる事が多かったが、磁力線が閉じているトロイダルプラズマの乱流を実験シミュレーションするにはトロイダルプラズマ装置が適している。このため小型トカマクを用いた統合乱流観測プロジェクトが特別推進研究(代表: 藤澤彰英(九大))として認められ開始された(2017-2022)[4]。本プロジェクトの中核を成す統合乱流観測システム PLATO (Plasma Tubulence Observatory) の諸元を表 1 に示す。PLATO の最も特筆すべき点は計測にあり、1500 以上の視線を持つスーパーパートモグラフィシステムを 2 系統、HIBP を 3 系統、inboard/outboard マイクロ波コムドップラー散乱計、各種プローブ、を有し、プラズマ全域を観測することでスケール間揺動結合や乱流の偏在を明らかにする。

パラメータ	典型的な値
装置大半径 (m)	0.6
プラズマ平均半径 (m)	0.2
磁場強度 (T)	0.3
プラズマ電流 (kA)	50
パルス幅 (ms)	200

表 1 PLATO の諸元

3. 最適化配位の探求

乱流最適化では乱流の自己組織化機構が重要である。ゾーナル流のような二次不安定性が自己組織化に大きな役割を担っている。このため乱流揺動の線形成長率を最小にするのみならず、ゾーナル流を最大化する様な配位で飽和乱流輸送が小さくなる可能性がある。PLATO プロジェクトでは実験シミュレーションにより乱流パターン形成機構を明らかにしようとする一方で、近年、大規模数値シミュレーションにより乱流のスケール間結合の観測が試みられており、イオン系の乱流パターン形成に及ぼす電子系乱流の影響が示されている[5]。最適化のためには実験と大規模数値シミュレーションが連携する必要がある。

統合最適化では上記の乱流最適化に加え、LHD 実験で得られた新たな知見もフィードバックする必要がある。LHD の内寄せ磁場配位での良好な閉じ込め特性や磁気島の多様な役割についても、乱流のような自己組織化機構が関与していそうである。特に磁気島に関しては乱流への影響は明らかになっていない。不均一プラズマ中に準均一プラズマが共存する系の乱流を計算することは困難であるが興味深い対象であるため今後の LHD 実験によって統合最適化に直結する知見を得ることが重要となる。

4. 大型実験室プラズマとしての期待と要望

乱れは非平衡プラズマに普遍的であり、プラズマ物理において重要な役割を担っている。MHD 乱流、磁力線再結合、粒子加速、衝撃波、運動論的/流体的不安定性、ダイナモ、磁気緩和、ダスト、多イオンプラズマ等、多くの現象にプラズマの乱れが関連し、広く研究されている。国内ではプラズマ中の流れ形成機構の解明に向けて NIFS 共同研究(代表: 金子俊郎(東北大))の元で実験室基礎プラズマネットワークが組まれた[6]。天体宇宙プラズマのダイナミクスの解明、核融合プラズマの安定化、人工衛星スラスターの高効率化等への寄与を目指し、全国の開放端型プラズマ実験装置(PANTA (九大), Hyper-I (NIFS), Hyper-II (九大), QT-U (東北大), MAGA-HPT (東北大), BX-U(京都工繊))で学生やスタッフの相互派遣によるマンパワーの集中、観測・解析技術(ソフトウェア/ハードウェア)の共有による実験の高度化、によりプラズマの流れの理解を目的としている。国外、特にアメリカ

では Laboratory Space Physics という実験室プラズマによる宇宙プラズマシミュレーションが広く行われている[7]。実験装置も直線型、カスプ配位、RFP、Spheromak と非常に多様性に富んでおり、宇宙プラズマ物理のスケールに調和する用に $\beta \sim 1$ の領域を狙ったり、プラズマジェットを衝突させたりと非常にユニークな実験が行われている。このような試みは国内でも UTST(東大)、RT-1(東大)や高強度レーザー実験(阪大)で行われている。

核融合プラズマのベータ値や磁気レイノルズ数といった無次元パラメータは自然界のプラズマを補間、補完するものであり、それが制御され良く再現されるのであれば、基礎プラズマ物理あるいは宇宙プラズマ物理の視点からは実験シミュレーションとして非常に魅力的である。更に乱流最適化による種々の乱流抑制機構に抗う、あるいは従う姿を通じて、乱流の本質のより深い理解が期待できる。このため基礎プラズマや宇宙プラズマ分野と互いに緊密な連携をとることで、実験室プラズマとしての必要性や利便性を加味した設計を進める事を提案したい。例えば速度分布関数の3次元構造とその揺らぎの観測等は基礎プラズマ、核融合プラズマの両者にとって重要なテーマと成り得る。このアプローチは配位最適化と必ずしも排他的ではないと考える。

5. まとめ

LHD の次期装置で乱流最適化が検討されている。乱流最適化による輸送と MHD 安定性の改善・向上は核融合開発研究としては優先度の高い必須事項の一つと考えられる。加えて乱流最適化研究は自然界の乱れたプラズマのより深い理解を与えるものであり、この取り組みは基礎プラズマや宇宙プラズマの広い分野に波及効果があると言える。

- [1] A. Dinklage et. al., Nat. Phys. **14** 855 (2018).
- [2] M. Meneguzzi et. al., Phys. Rev. Lett. **47**, 1060 (1981).
- [3] S. Inagaki et. al., Sci. Rep. **6** 22189 (2016).
- [4] 統合観測システムで解き明かす乱流プラズマの構造形成原理と機能発現機構(17H06089).
- [5] S. Maeyama et. al., Phys. Rev. Lett. **114** 255002 (2015).
- [6] 実験室基礎プラズマネットワークによるプラズマ流れの統合的理解 (NIFS18KNWP007).
- [7] Gregory G. Howes, Physics of Plasmas **25**, 055501 (2018).