



## プロジェクトレビュー

# 特別推進研究 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

## Plasma Turbulence Observatory (PLATO) for Puzzling out the Principles of Structural Formation and Functional Expression in Turbulent Plasma

藤澤彰英, 稲垣 滋, 井戸 毅<sup>1)</sup>, 飯尾俊二<sup>2)</sup>

FUJISAWA Akihide, INAGAKI Shigeru, IDO Takeshi<sup>1)</sup> and IIO Shunji<sup>2)</sup>  
九州大学応用力学研究所, <sup>1)</sup>核融合科学研究所, <sup>2)</sup>東京工業大学原子炉工学研究所

(原稿受付: 2019年5月23日)

特別推進研究「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」(平成29年度-令和3年度)の目的と進行状況について報告する。本研究は乱流プラズマ中で起こる諸現象の解明を目的とした計画で、実験を主体とする5年のプロジェクトである。現在、計画の要であるプラズマ乱流の物理解明に特化したPLATO装置を製作中である。トモグラフィと重イオンビームプローブなど先進計測器を用いて乱流場の全域局所精密観測を実現し、理論シミュレーションと協働で乱流プラズマの学理体系化をめざす。

### Keywords:

$\gamma$ -rays, particle acceleration, runaway electron, bremsstrahlung, thundercloud, lightning discharge

### 1. はじめに

自然界には、太陽、雷、オーロラなどプラズマに関連する多くの現象が見られる。プラズマの発光は美しく、躍動する神秘的な動きは人を魅了する。一方で、プラズマは、核融合、小型加速器、新物質創生、医療応用、農業応用など現代や近未来の技術にとっても欠かすことのできない重要な対象である。さて、今ではプラズマを構成する電子とイオンとその間に働く相互作用もわかっている。では、我々はプラズマを思い通りに制御し、その性質を十分に理解しているといつてよいのだろうか。

多くのプラズマは熱平衡からは遠く離れた状態にあり非線形性の強い媒質である。例えば、もっとも野心的なプラズマ応用である磁場閉じ込め核融合においても臨界プラズマの達成に半世紀以上の月日が流れている。この事実は遠非平衡系としてプラズマが十分に理解されていないためである。プラズマ全体として示す遠非平衡かつ強非線形系としての性質は、新しく興味深い物理学的な対象である。

さて、探求すべき非平衡系の特徴の一つに「揺らぎ」がある。非平衡系の構造やダイナミクスを決定するのが「揺らぎ」であり、その極限的な状態が「乱流」である。磁場閉じ込めプラズマの性質を主として決めるのは乱流である。核融合研究において乱流は高温高圧のプラズマを実現するために半世紀以上に渡って研究されてきた。その中で、プラズマ乱流に関するデータや知見も蓄積され、学術

体系化の指針となる概念も得られてきている。また、自然界には、トーラス型の磁場閉じ込めプラズマと共通すると思われる現象が多く見られる。例えば、乱流が引き起こすと考えられているブラックホール周りの降着円盤での異常輸送、乱流が原因と思われる磁場や渦などの軸性ベクトルの生成、太陽中に存在する速度の不連続面と磁場閉じ込めプラズマ中の輸送障壁などである。実験室の磁場閉じ込めプラズマにおいて、乱流が起こすこれらの現象を詳細に観測し研究すれば宇宙や自然界におこる乱流プラズマに関連した現象の解明にも貢献できるだろう。

そこで、プラズマ乱流の体系的理解をめざして提案されたのが、ここで紹介するプロジェクトである。本プロジェクトは、科学研究費特別推進「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」によって実現した。本プロジェクトでは、プラズマ乱流の実態を捉えるための実験装置を製作し、観測に基づいてプラズマ乱流の学術体系化を行うことを目的とする。本プロジェクトは、核融合のための閉じ込めに関わる理解を進展させるのみならず、乱流プラズマの研究を通して遠非平衡系の物理学的理解をめざしたプロジェクトである[1-3]。現状と今後の計画などについて述べる。

## 2. プロジェクトの目的

### 2.1 乱流プラズマの新しい研究の指針

1970年代に、マイクロ波散乱計測によってトカマクプラズマが乱流状態にあることが初めて実験的に示された[4,5]. その後、乱流とプラズマ閉じ込めの関係が国際的に研究されてきた。当時は、揺らぎそのものの相関時間や距離は極めて短く、乱流の理解は「局所仮説」に基づいて進められてきた。

しかし、現在は、プラズマ乱流は大域的であることがわかってきている。そこではミクロな揺らぎが帯状流などより大きなスケール（メソスケール）の構造を創生し、これらの構造が再帰的に局所的なミクロな揺らぎに影響を与えている（クロススケール結合）ことがわかってきている[6-9]. 例えば、乱流が創生する構造が局所的な揺らぎを結びつける働きをする。直線プラズマの観測例であるが、粒子束を円筒プラズマの周りに多点計測してみる。すると、局所的な一点の分布関数と多点平均した分布関数は異なっている[10]. なぜかといえば、揺らぎに空間相関があり駆動される各点の揺らぎが結びつくためである。この例からも、乱流プラズマが発現する機能である輸送を理解するには、乱流場全体としての時空間構造を知る必要がある。

一方、トーラス型の閉じ込め装置では電荷分離が起き、電場に非対称性ができ Pfirsch-Schlüter 電流が駆動される。乱流は磁気面上で非対称であることが観測されている[11-13]. そうすると、磁気面上の異なる点では異なる粒子束が誘起されている。このとき Stringer's spin-up[14, 15]で知られるようにプラズマ流が誘起される。誘起された巨視的な流れは局所乱流に影響を与えるだろう。このことから、乱流プラズマの理解は局所的知見からだけでは不十分である。クロススケール結合や乱流偏在（対称性の破れ）は大域相関を生み、局所乱流を同調させることでプラズマの構造形成や機能発現に影響する。乱流プラズマを理解する上では避けては通れない概念である。

しかし、現在の核融合研究のプラズマ装置は大型化の時代を迎え、燃焼プラズマの実現へと近づいている。乱流の観測は容易な状況にはなく、数点あるいは一次元的と言って良いだろう。その意味では、局所から全体を想像する群盲象をなでるといった状況だろう。乱流の実態を捉えるためには、最低でも、2次元観測が必要である。この現状を打破するために、プラズマ乱流場全域を局所精密に観測（大域局所精密観測）できる実験装置の実現が必要である。それを実現するのがこの計画である。

### 2.2 解決すべき課題

では、この観測によってどのような成果がもたらされるだろうか。これまで磁場閉じ込めプラズマの性能は、エネルギー閉じ込め時間の磁場強度、電流、形状、粒子の種類（水素同位体）などに対する依存性を調べ、経験的にスケールリング則として纏められてきた。具体的には、○アイソトープ効果、○パワーデグラデーション、○閉じ込めの楕円度や三角度など形状依存性が経験的にスケールリング則[16, 17]として知られてきた。しかし、背景にある物理はい

まだ謎のままである。プラズマ閉じ込め装置が大型化していくこれからの研究では、装置サイズはコストに直結するので、より正確にプラズマの性能を予測すべきであろう。そのためには、スケールリング則の背景にある物理を知る必要があるのではないだろうか。そのほかにも、過渡状態に現れる非局所輸送[18, 19]は長年研究されてきたが、乱流場の過渡的な時空間変化や長距離相関を捉えることで実態が明らかにできるのではないだろうか。また、Hモードをはじめとする輸送障壁形成機構[20-22]の更なる理解にも乱流パターンの観測は重要だろう。本プロジェクトは、乱流観測に特化した装置 PLASMA Turbulence Observatory (PLATO) を製作し磁化乱流プラズマに関わる未解決問題を実験的に理論シミュレーションと協働で探求する。

## 3. プロジェクトの基本構想

### 3.1 PLATO の概要

さて、PLATOとはどのような装置なのだろうか。PLATOは乱流計測に特化した物理実験装置である。観測対象はトカマク型配位のプラズマである。大事なことは、PLATO装置の目的は乱流観測にある。もちろん、核燃焼領域のプラズマの特性を調べるには、高温高圧という意味での高性能プラズマの生成が必須であろうが、ここでは科研費で実現できる範囲で乱流プラズマの特性を観測することが主眼である。ちなみに、PLATO装置は応用力学研究所の所内報「乱流実験トーラスの設計」[23]に基づいた科研費（低コスト）版である。

では、どのような方法で乱流を観測するのか。大域計測の要はトモグラフィーである。一方、局所計測の要は重イオンビームプローブおよび静電あるいは磁気プローブである。トモグラフィー、重イオンビームプローブやプローブとプラズマ生成部が一体となって PLATO 装置である。また、PLATOは乱流場の計測を主体とした装置である。

### 3.2 大域計測—乱流トモグラフィー

プラズマ分野では、トモグラフィーは鋸波状振動現象など MHD 不安定性などに伴う巨視的構造やその変化を観測することで役立ってきた[24, 25]. PLATO 計画では、トモグラフィーによる微視的な乱流構造観測に挑戦する。PLATO 装置では、3つの異なる波長領域のプラズマ光を、それぞれ250チャンネルの検出器で観測するトモグラフィーシステムを2つの断面に配置する。H $\alpha$  光、X線、紫外光を用いてプラズマの周辺、プラズマの中心部分、その間の領域を狙うことでプラズマ全域を観測する。2019年度には、H $\alpha$  光、紫外光用のトモグラフィーシステムを PLATO 装置に設置する。その後、プラズマが安定に生成できるようになった後、放出される X 線のエネルギー領域を調べ適切なフィルターとシンチレータを用いて観測する。

よって PLATO 装置では H $\alpha$  光、X線、紫外光それぞれ 512チャンネルずつ、総計1536チャンネルの受光器を配置する。これだけの数をプラズマの周りに配列するにはそれなりに工夫が必要である。受光器1チャンネルあたり 2 cm<sup>2</sup> のスペースを必要とするならば大凡 3000 (~60×60) cm<sup>2</sup> の面積が確保しなくてはならない。相当大きなフランジが

必要である。また、トモグラフィーの画像がもっとも精度高く得られる視線配置を選ぶことも重要で、そのためには受光器なども真空容器内の任意の場所に設置できるように製作しなくてはならない。この場合、どのように光を真空外に伝送するかも問題となる。PLATO 装置では特別な真空容器（あるいはフランジ）が設計されている。また、後述するように、トモグラフィーのための真空容器内受光器と大気側に光を伝送するための工夫が PLATO プロジェクトではなされている。

### 3.3 局所計測—重イオンビームプローブとプローブ

トモグラフィーはプラズマの全域観測には適した計測器だが、一方で、密度や電位などの物理量を局所的かつ精密に観測できる相補的な計測が必要である。重イオンビームプローブは高温プラズマの内部の密度、電位、磁場、それぞれの揺動を同時に計測できる強力な揺動計測器である。実際、輸送障壁形成時の電場遷移の観測[26, 28]や帯状流や帯状磁場の存在を証明した優れた揺動観測装置である[6, 29]。

PLATO では、この重イオンビームプローブ 3 台による乱流プラズマ観測をめざしている。重イオンビームプローブは、ビーム加速系、ビーム伝送系、ビーム分析系と極めて複雑なプラズマ計測器である。しかし、PLATO 装置の場合、必要とされるビームエネルギーが小さく加速管を必要とせずイオンガンのみで十分である。またビームを制御あるいは分析するための電源電圧も低く抑えることができ複数台据え付けても比較的安価である。

では、3 台あると何がわかるか。例えば、帯状流を完全に同定するためには、トロイダル方向の対称性を証明する必要があり、少なくとも HIBP 2 台を異なるトロイダル位置に設置して電場を計測する必要がある。3 台となれば、さらに帯状流に関しては磁気面上の対称性に関する情報や空間構造もより精密に調べることができる。例えば、2 台は定点観測、残り一台はプロファイルの観測に使うなど、全体構造と帯状流を含む局所揺動と構造の関係などを調べることができる。また、乱流の偏在する様子を確かめる意味でも、同一磁気面 3 点の局所揺動の違いもより詳細に知ることができる。

そのほか、本プロジェクトでは、多チャンネル化が易しく機動性に富んだ伝統的なプローブを最大限活用する。

PLATO には内側にもポートが設けられていて内側にもプローブを置くことができる。プラズマの周辺や端に限られるがプローブによる内外上下などの非対称性の観測も重要な課題である。重イオンビームプローブと伝統的なプローブの局所観測とトモグラフィーの全体計測を相補的に用いれば、乱流場の様子がこれまでにない正確さで得ることができるようになる。

### 3.4 プラズマ生成部—コイルと真空容器

さて、PLATO の観測対象はトカマクプラズマである。トカマクを選択した理由はステラレータに比較してコイルの製作が容易であること、加熱装置が必須ではなくコスト面から見て安価なことなどである。またトカマクは軸対称性があり乱流の非対称性に関する問題を扱うのに容易だろうとの判断もある。

PLATO プラズマのスペックを述べると、主半径 0.7 m、副半径 0.3 m、トロイダル磁場最大値 0.3 T、通電時間 0.3 秒 (0.3 T)、プラズマ電流 40 kA、形状パラメータとしては、楕円度 1.6、三角度 0.3 である。図 1 に PLATO 装置の断面図を示す。ポロイダルコイルとしては基本となる D (ipole), Q (uadropole), H (exapole) の 3 対のコイルと 2 対のフィードバックコイル F (eedback) 1, F 2 コイルからなる。中心にある OH (mic) コイルは中央と上下に 3 分割されている。トロイダルコイルは D 型のコイル 16 本で構成されている。計測に対する鉄心効果を避けてオーミックコイルは空芯とした。得られる磁束は 1 kA 通電時で約 0.12 Vs である。

さて、乱流を精度高く精密に計測するためには近接性の高い真空容器が要求される。トモグラフィーと重イオンビームプローブが主計測だが、トモグラフィーにとっては超多チャンネルを実現可能なこと、重イオンビームプローブには観測範囲を広くとれるような開口部が取り付けられることなど条件を満たさないといけない。その結果、真空容器は 8 分割されたモジュラー型となった。図 1 にあるように、2 種類の真空容器モジュールが存在し (Short 型モジュールと Long 型モジュール)、それぞれ 4 個ずつである多数のポートが配置されている。真空容器は、計測のために多くの観測ポートがある。トラス内外の非対称性を観測するための内側ポートは容器内部から取り付ける構造になっている。

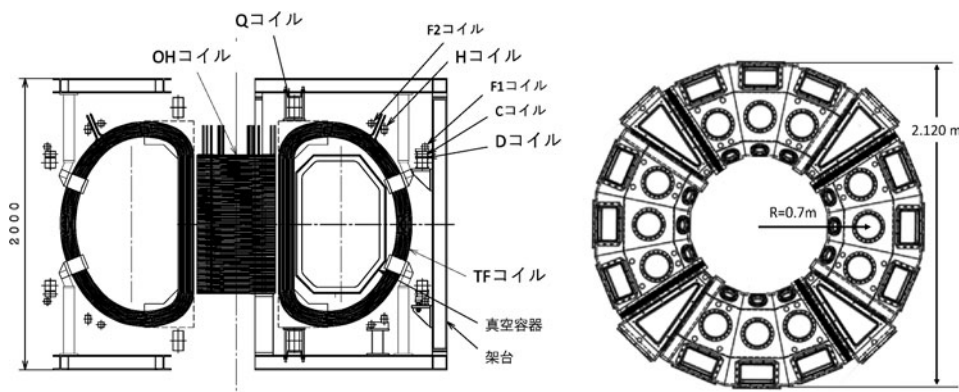


図 1 PLATO 装置の概念図。(左)コイルと真空容器配置。(右)真空容器。

### 3.5 推進母体と方法

本計画の推進の母体は九州大学の極限プラズマ研究連携センターである。同センターは、応用力学研究所核融合力学分野のメンバーを母体とし、プラズマ実験、理論、シミュレーションの研究者が在籍している。実験、理論、シミュレーションが協働して研究を進める体制あるいは方法が同センターの特徴である。このプロジェクトにもその方法は踏襲されている。科研費の分担者として、同センターから稲垣教授、学外からは、核融合科学研究所の井戸准教授（重イオンビームプローブ担当）、東工大の飯尾教授（電源担当）が参加している。松岡核融合科学研究所名誉教授が製作全般、電源に関連して嶋田東工大名誉教授、理論に関連して、伊藤早苗九州大学名誉教授、伊藤公孝核融合科学研究所名誉教授の協力を受けている。

## 4. 計画の進捗状況

### 4.1 乱流トモグラフィーの開発状況

#### i) PANTA でのプロトタイプ実験

トモグラフィーで乱流を観測できるか。この問題に 대응するために、基盤研究 A「2次元乱流ダイナミクス観測のための多波長超多点観測法の開発」(代表者 藤澤彰英 H23-H25 課題番号23246162)によって試行実験を行った。乱流トモグラフィーのプロトタイプを製作し、極限プラズマ研究連携センターの直線装置PANTA実験にて原理が実証されている[30, 31]。その揺動観測の結果を図2に示す。このシステムでは、真空容器内の他チャンネル受光システム、真空側から大気側へ光を伝送するためのオプティカルフィードスルー（住田光学ガラスと共同開発）、光電圧変換器を開発した。真空容器内受光器では、数学的な仮定が成り立つよう視野を直線上に限るコリメータを使用した。光電圧変換器では低ノイズのフォトダイオードを用い  $10^8$  V/A 以上のゲインを達成している。図2に示したシステムは、33チャンネルからなる受光器群（ライトガイド）を45度おきに4セット設置し総計132チャンネルでプラズマを観測できるように製作されている（実際には128チャンネルを用いている）。それぞれの真空容器内受光器は光学フィルターが組込まれアルゴンプラズマのラインを観測するように構成されている。

現在は、さらに2台の同様なシステムが設置されている。一つは上記システムと同じもので、もう一つは21チャンネルずつ30度おきに6組のライトガイドが設置されたものである。総計3台が現在稼働中であり磁場方向3断面における準3次元計測が可能となっている。

#### ii) PLATO 用コンポーネントの開発

さて、PLATOでは真空容器内に総計1500チャンネルの受光器を設置する。そのために、真空容器内部の任意の場所に配置できる受光器が必要である。そのためにコリメータ、光学フィルター、ファイバーが一体となった受光器（オプティカルストリング）を開発した。オプティカルストリングは、ファイバー部分が自由に曲げられる構造になっていて、コリメータからなる先端部を所定の場所に固定し、ファイバー部分をオプティカルフィードスルーに結合することでプラズマ光は大気側に伝送される。大気側に伝送された光は、石英ファイバーによってアンプへと伝送され信号はデジタイザーに記録される。ここで、1500チャンネルもの光電圧変換器とデジタイザーが占めるスペースにも配慮が必要である。省スペースも考えて光電圧変換器とデジタイザーが一体となったもの（オプティカルロガー）を開発中である。現在128チャンネルのもの開発がほぼ終わっている。コンパクトなオプティカルロガーを用いれば収納は通常のラックが2台あれば十分である。また、一括で製作すれば2万円/チャンネルと格安である。

一方、X線トモグラフィーのための予備実験として、紫外光に対して蛍光ガラスによるシンチレーション光を間接的に計測する方法を試行した。試行対象としては京都工繊大のRELAXプラズマを用いた。その結果は紫外光を観測することに成功している[32]。また、オキサイド社の協力を得て適切なシンチレーションを実験も行い吟味した。その結果、X線の検出はシンチレータとしてLGSOを使用する予定である。

#### iii) 画像（トモグラフィーデータ）解析法

PANTAのトモグラフィーでは、一つのシステムの1ショットあたりデータ量は、0.3G（3台でほぼ1G）バイト程度になる。このデータ解析には並列計算を用いている[31]。12コアのMacintoshを10台動かしてトモグラフィーデータを解析している。PLATOの場合、最終的には

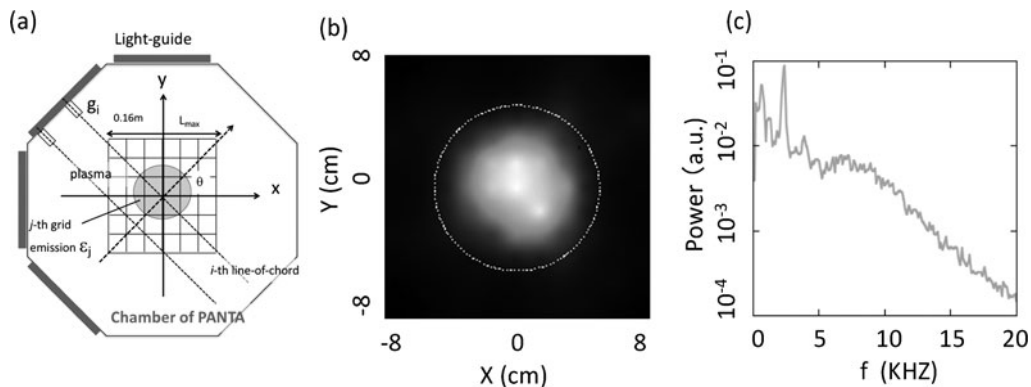


図2 PANTAにおける乱流トモグラフィープロトタイプシステム。(a)概念図(b)トモグラフィーで得られたプラズマの発光分布。(c)発光における局所的ゆらぎのスペクトルの一例。

1500チャンネルなのでPANTAのシステム4台相当となり、システム完成の際は並列計算の大型化も必要だろう。

プロトタイプシステムのデータを使って、Cormack展開、Fourier展開、Fourier-Bessel展開、ART法などトモグラフィ再構成のアルゴリズムとして様々な方法が試行されている。最終的にPETなど医療応用に開発されたMaximum Likelihood-Expectation Maximization (MLEM法)を用いている。MLEM法とは観測領域をグリッドに分割しその上の輻射量を逐次近似により求める方法である[33]。関数展開と違い、基底関数の性質に影響されない利点があり、時空間的に急激な変化を許すプラズマ諸量を解析するのに適している。

また、MLEM法は逐次近似法である。PANTAでは1ショットあたりの600msの時系列データを1 $\mu$ sでサンプルした場合、60万点の画像のMLEM法での再構成は随分と時間がかかりモニターには適さない。実験中のモニターとして相応しいより高速なルーチンとしてTikhonov正規化法を用いた解析法も開発している[34]。乱流トモグラフィの基本的な構成やアルゴリズムの開発は完了している。

さらに、トモグラフィ画像を解析するための方法もいくつか提案されている。MLEM法で求めた画像は、周方向モード数などを直接評価することができない。そのためMLEM画像に対して、Fourier-Bessel関数展開を適用し空間構造(モード数など)を評価している。このとき問題となるのは、Fourier-Bessel関数展開に用いる基底は有限である。そのため「どの基底の組み合わせが最適か」という問題が生じる。Fourier-Bessel関数の正規直交性を利用してこの問題に解答を与える方法を提案した[35]。他領域に対しても一般性を有する問題である。

そのほか、様々なトモグラフィ画像の解析法を開発している。例えば、プラズマ中に現れるモードは特定の回転方向をもっていることがある。この回転の状態を定量的に解析する方法を、光学分野で知られるストークスパラメータを用いて定量化する方法を提案している[36]。そのほか、通常のXY座標上に張られたグリッドから、円筒座標上のグリッドへと輻射値を変換し径方向分布や周方向の局所構造を抽出する方法[37]や、量子論の方法を利用して対称性を定量化する方法の考案などを今後のPLATOを含めた実験のために開発している。

#### 4.2 重イオンビームプローブ

重イオンビームプローブについて、軌道計算およびハードウェア設計はほぼ終了している。ビーム入射および出射ポート部など、すでに製作中のものもある。PANTA用に開発した1組の重イオンビームプローブとCHSで稼働していた2組の重イオンビームプローブのうち1台をPLATOの重イオンビームプローブとして転用する。コミュニティの意見が許せば、CHSの重イオンビームプローブをもう一台借用することを考えている。そのほか、重イオンビームを用いた密度計測法[38]が提案されていたが、CHSの重イオンビームプローブのデータを用いてこの方法が実際に可能であることが示された[39]。PLATOで

の実施も可能であろう。

#### 4.3 プラズマ生成部の進捗状況

真空容器は設計していただいた湘南技研に発注し、コイルは、堀田電機製作所にて製作予定で令和元年度に完成する。コイルおよび真空容器を支える架台は北野製作所に発注した。PLATOの閉じ込め磁場生成システムは、オーミックコイル、トロイダルコイル、ポロイダルコイル、フィードバックコイルからなる。それぞれのコイルの電源はポロイダルコイル3対とオーミックコイルはニチコンに、トロイダルコイル電源は愛知電機に製作を依頼した。特徴的なのは、トロイダルコイル電源は誘導機を用いたフライホイール型自励発電機を使用している。これは、嶋田東工大名誉教授が製作したもの(現飯尾研究室所有)をアップグレードしたものである[40]。東工大現有のフライホイール電源は同研究室(飯尾研)のPHIXトカマクのトロイダル磁場電源としてすでに稼働していて良好な結果を得ている[41]。

#### 4.4 PANTA実験と理論・シミュレーション

直線装置PANTAでの実験も進んでいる。PANTAで既存成果の一つとしてストリーマの同定がある[42,43]。本プロジェクトのプローブ実験によりストリーマの詳細な特性の理解がさらに進んでいる。例えば、磁場方向に異なる2断面をプローブで測定すると、ストリーマ構造は $m=0$ の対称性を持つことがわかった[44]。また、ストリーマおよびストリーマを生成する重要な働きをする(ここではメディエータと呼ばれる)モードがソリトンとしての性質を持つことが判明した[45]。長谷川・三間方程式に基づいた理論予想と定性的に一致する実験結果である。さらに、ストリーマの大域的な構造が計られ、径方向に長く伸びたストリーマの構造にしたがって粒子も輸送されていることが実測されている[46]。そのほか、加熱あるいは生成パワーを増大させた新領域の実験も進められている[47]。

理論シミュレーションとの協働で、効率的な実験シナリオや必要な時空間分解能を決定することができる。例えば、重イオンビームプローブによってプラズマ乱流がどのように観測されるかを予測する乱流計測シミュレータが開発されている[48,49]。直線装置実験で探求すべき課題と

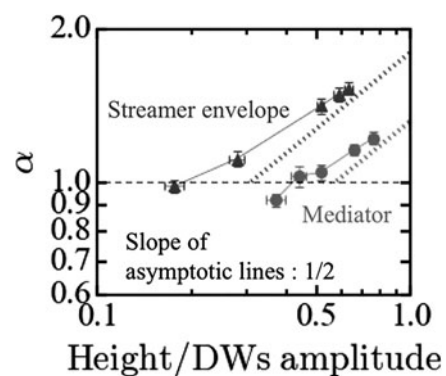


図3 直線装置で観測されるストリーマとメディエータのソリトン性。振幅が増大するに従って波形の突立ちが観測された。Reproduced from [45] with the permission of AIP Publishing.

して、ケルビンヘルムホルツ型不安定性が引起こす構造形成に関する予想などが提案されている[50]。また、トラスプラズマではGeodesic Acoustic Modeと微視的乱流の相互作用に関する予想[51]などが得られておりPLATOの稼働後に追求すべき課題を提示している。さらに、今後の研究において、実空間のみならず位相空間の状態が影響を与える現象を捉えることだろう[52]。実験で位相空間を直接観測するのは、まだまだ難しいかもしれないが、挑戦すべき課題だろう。

## 5. 終わりに

PLATO プロジェクトの概要について述べてきた。設置場所も見つかり、PLATO 装置の真空容器や電源など基幹設備が揃ってきている。2019(令和元)年10月より装置を組み上げ、プラズマの乱流場の観測をめざした装置が完成する。「百聞は一見に如かず」—乱流場を観測できれば長年謎とされてきた問題が「こんなことだったのか」ということにならないだろうか。また、多くの新しい事実や現象の発見につながるのではないだろうか。17世紀、顕微鏡が発明された。フックはいち早く観測結果をマイクログラフィアとして出版し、ミクロの世界の豊かさを世に示した。コルクは穴だらけ、細胞の語源「セル」と呼んだ小部屋の存在、コルクがなぜ軽いか明らかだった。

核融合研究は核燃焼装置の時代を迎えている。炉の実現のためにはエネルギーを取り出して見せることが焦眉の急であろう。そのために大型装置が必須である。しかし、炉の効率的な実現には、これまで得られた知見やデータを見直し学術体系化することも必要である。そのためには機動性と柔軟性に富む小中型の物理実験装置は不可欠であろう。ドイツでは粒子軌道の最適化から優れた磁場閉じ込め配位を設計してきた。しかし、プラズマの閉じ込め性能を決めているのは乱流なのだから乱流から配位の最適化をめざす方が直裁的である。また、トカマクよりも炉に適した磁場配位があるかもしれないが、その時に巨大な実験装置による試行実験が不要となるくらいに、精密な核融合科学を完成しておくことは重要な課題である。

また、PLATO 計画が担う物理学に対する側面についても触れておきたい。非平衡系の理解は今世紀の物理学の課題の一つである。熱力学の発展は永久機関の研究から始まった。そこで、永久機関の研究から得られた経験則はエネルギー保存則やエントロピー増大の法則という普遍的法則へと昇華した。無尽蔵のエネルギーを追求するという試みは今まだ、ワットの蒸気機関が完成し、カルノーサイクルが考えられた以前の状況にあるかもしれないが、この現代の夢からより普遍的な非平衡系の法則が導かれるのではないだろうか。プラズマは遠非平衡強非線形の状態にある。非平衡にあるプラズマは絶えず変化する。一見定常に見えても中では構造の生成消滅が繰り返される[53]。究極の物質を探るように、万物がどのように変化していくのか、科学的に探求する学術領域がある。「万物流転」—古代からのテーマに挑戦するプラズマ科学のアカデミアをPLATO (プラトン) が実現する。

## 謝 辞

本プロジェクト全般の進展において、九州大学の永島芳彦准教授、糟谷直宏准教授、山田琢磨准教授、小菅佑輔准教授、文賛鎬助教、佐々木真助教、山崎広太郎博士、花田和明教授、出射浩教授、中村一男名誉教授、池添竜也准教授、長谷川真助教、恩地拓己助教、島根大学の荒川弘之准教授、核融合科学研究所の居田克巳教授、清水昭博助教、小林達哉助教に感謝いたします。PLATO 装置製作に関して松岡啓介核融合科学研究所名誉教授、嶋田隆一東工大名誉教授、伊藤早苗九州大学名誉教授、伊藤公孝核融合科学研究所名誉教授に感謝します。電源の製作に当たっては、日大加藤修平助教、東工大村山真道氏、ニチコンの森威男氏、吉本宏氏、青木大利氏、大塚智幸氏、安河内徹氏、愛知電機の桑原祐氏、水野秀則氏、吉野真氏、小久保佳伸氏、高田正臣氏、メカトロニクス研究所の寺田聖一氏、川口卓志氏に感謝します。また、真空容器製作に関しては、湘南技研の太田和勲氏、北野製作所伊藤俊之氏、伊藤貴志氏に感謝します。コイルの製作に関しては、堀田電機の松本秀敬氏、宗田益男氏、薮哲也氏に感謝いたします。計測に関しては、京都工繊大の政宗貞夫教授、住田光学の春木俊紀氏、高橋信仁氏、九州計測の友納寿氏、安倍宏和氏、また、装置建設全般にわたって、研究室の杉谷宏子氏、日永田美子氏、舟木美香氏、九州計測の森康輔氏と豪創建の宮崎勇美氏に感謝いたします。本プロジェクトは科研費 (JP17H06089, JP23246162) LHD 計画共同研究 (NIFS17KOCH002) の支援を受けています。

## 参考文献

- [1] 藤澤彰英：パリテイ 1, 28 (2019).
- [2] K. Itoh *et al.*, Plasma Fusion Res. **13**, 1102113 (2018).
- [3] A. Fujisawa, AIP Conference Proceedings **1993**, 020011 (2018).
- [4] E. Mazzucato, Phys. Rev. Lett. **36**, 792 (1976).
- [5] C.M. Surko and R.E. Slusher, Phys. Rev. Lett. **37**, 1747 (1976).
- [6] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 165002 (2004).
- [7] S. Inagaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 115001 (2011).
- [8] A. Fujisawa, Nucl. Fusion **49**, 013001 (2009).
- [9] P.H. Diamond *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **47**, R35 (2005).
- [10] Y. Nagashima *et al.*, Phys. Plasmas **18**, 070701 (2011).
- [11] A. Fujisawa *et al.*, Nucl. Fusion **36**, 375 (1996).
- [12] C. Watts *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 1759 (1995).
- [13] G. Birkenmeier *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 025001 (2011).
- [14] T. Stringer, Phys. Rev. Lett. **22**, 770 (1969).
- [15] A.B. Hassam *et al.*, Phys. Rev. Lett. **66**, 309 (1991).
- [16] ITER Physics Basis 1999, Nucl. Fusion **39**, 2175 (1999).
- [17] U. Stroth *et al.*, Nucl. Fusion **36**, 1063 (1996).
- [18] K. Gentle *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 3620 (1995).
- [19] J.G. Cordey *et al.*, Nucl. Fusion **39**, 301 (1999).
- [20] F. Wagner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **49**, 1408 (1982).
- [21] K. Itoh, S-I Itoh, Plasma Phys. Control. Fusion **38**, 1 (1996).
- [22] A. Fujisawa, Plasma Phys. Control. Fusion **48**, R1 (2003).
- [23] K. Ida and T. Fujita, Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 033001 (2018).

- [23] 松岡啓介：設計 RIAM レポート 九州大学応用力学研究所所報 第141号 (51-85) 2011年9月.
- [24] Y. Nagayama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **61**, 1839 (1988).
- [25] Y. Nagayama *et al.*, J. Appl. Phys. **62**, 2702 (1987).
- [26] T. Ido *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 055006 (2002).
- [27] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 1054 (1997).
- [28] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 2669 (1999).
- [29] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 165001 (2007).
- [30] A. Fujisawa *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **58**, 025005 (2016).
- [31] A. Fujisawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **10**, 1201080 (2015).
- [32] T. Onchi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 113502 (2014).
- [33] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Plasmas **17**, 104503 (2010).
- [34] L.A. Shepp and Y. Vardi, IEEE Trans. Med. Imag. **1**, 113 (1982).
- [35] K. Yamasaki *et al.*, Plasma Fusion Res. **12**, 1201045 (2017).
- [36] K. Yamasaki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **88**, 093507 (2017).
- [37] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Plasmas **26**, 012305 (2019).
- [38] K. Yamasaki *et al.*, *submitted to* J. Appl. Phys.
- [39] A. Fujisawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 3335 (2003).
- [40] A. Shimizu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **89**, 113507 (2018).
- [41] M. Murayama *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **28**, 5700704 (2018).
- [42] T. Yamada *et al.*, Nat. Phys. **4**, 721 (2008).
- [43] T. Yamada *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 225002 (2010).
- [44] T. Yamada *et al.*, J. Phys. Soc. **87**, 34501 (2018).
- [45] F. Kin *et al.*, Phys. Plasmas **25**, 062304 (2018).
- [46] F. Kin *et al.*, Phys. Plasmas **26**, 042306 (2019).
- [47] Y. Kawachi *et al.*, Plasma Fusion Res. **13**, 3401105 (2018).
- [48] N. Kasuya *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 1403002 (2011).
- [49] N. Kasuya *et al.*, Plasma Sci. Technol. **13**, 326 (2011).
- [50] Y. Kosuga *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 72006 (2017).
- [51] M. Sasaki *et al.*, Phys. Plasmas **25**, 012316 (2018).
- [52] M. Sasaki *et al.*, Sci. Rep. **7**, 16767 (2017).
- [53] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 2256 (1998).