

# NIFS NEWS

ISSN 1884-1600



No.255



プラズマシミュレータ雷神



2020 AUG/SEP

>>> 特集 …… 2-5

「プラズマシミュレータ雷神」運用開始 石黒静児  
総研大核融合科学専攻「夏の体験入学」 大谷寛明

>>> 研究最前線 …… 6-7

液晶電気対流を使った乱流の実験研究 永岡賢一

>>> 特集 …… 8

総研大-サントベテルブルク工科大学 合同夏の学校 田村直樹

>>> トピックス …… 8

「新プラズマシミュレータ披露会」を開催しました

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

核融合科学研究所

## 「プラズマシミュレータ雷神」運用開始

石 黒 静 児

プラズマは極めて多数の電荷を帯びた粒子から構成されており、これらの粒子は電気力、磁気力により相互作用しながら非常に速く動くため、全体として極めて複雑な振る舞いをします。核融合研究においては、この複雑なプラズマの振る舞いを解析・予測するためにスーパーコンピュータによるシミュレーション研究が不可欠となっています。核融合科学研究所では、このようなシミュレーション研究を遂行するために、スーパーコンピュータシステム「プラズマシミュレータ」を運用しています。プラズマシミュレータは、日本のプラズマ・核融合分野のシミュレーション研究の中核装置として、全国の大学等の研究者にも広く利用されています。このプラズマシミュレータを、従来システム比で4倍となる10.5ペタフロップス(PFLOPS)の性能を持つ大規模並列型計算サーバを中心とするシステムへと更新し、2020年7月1日より運用を開始しました。ここで10.5ペタフロップスとは1秒間に1京500兆回の浮動小数点演算(浮動小数点形式の加減乗除の計算)を実行する能力を持つことを意味しています。

今回の運用開始にあたっては、一般の方にこの新しいプラズマシミュレータに愛着を持っていただくために、ホームページ等を通じて愛称の公募を行いました。全国から約200件の応募があり、その中から、所長を中心に構成された所内の愛称公募選考委員により、秋田県在住の男性からの案である「雷神」が採用されました。「雷神」は日本の民間信仰において雷を司る神です。プラズマの一形態である雷を操る雷神は、高温プラズマを自在に制御する研究のために雷光のごとく一瞬の間に膨大な計算をする新プラズマシミュレータにふさわしい愛称です。また、「雷神」は俵屋宗達筆の風神雷神屏風などの国宝にも表現されてきた古くからの東洋美術のモチーフであり海外の方々からの知名度も高いことから、日本のスーパーコンピュータの愛称に適しているとして選ばれました。表紙写真に示すように筐体(コンピュータラック)の側面に愛称にふさわしいデザインを施しました。

プラズマシミュレータ雷神の中心となるのが、大規模並列型計算サーバです。一度に膨大なデー

タを処理できるベクトルエンジン8基とOS処理を行うベクトルホストを搭載したNEC SX-Aurora TSUBASA A412-8(図1)が高速のインターコネクトで540台結合されています。これにより、全体として4,320基のベクトルエンジン全てを使った大規模シミュレーションが可能となっています(ここで、ベクトルエンジンは、大量のデータを一括して処理できるベクトル演算器を複数搭載した演算カードです。ベクトルホストは、これら演算機のホストとなり主としてOS処理を担います)。計算に使うことのできる記憶領域の総容量は202テピバイト(TiB)です。ここで、テピ(Ti)とは、2のべき乗を単位とする時に用いられる二進接頭辞の一つで、2の40乗(約1兆1,000億)を意味します。この記憶領域の総容量は、旧システム比で約2.5倍で、約2,000億個のプラズマ粒子を計算機上で扱うことができる量に相当します。

また、大規模並列型計算サーバでのシミュレーションにより生み出される膨大な数値データを保存するために32.1ペタバイト(PB、ペタは1,000兆)の並列分散ファイルシステムで構築された大容量かつ高速の「外部記憶装置」が接続されています。この容量は旧システム比で約3.2倍です。さらに、得られたシミュレーション結果の解析をするための「データ解析サーバ」、可視化を行うための「可視化処理サーバ」等が整備されています(図2)。このような「プラズマシミュレータ雷神」により、核融合プラズマの複雑な振る舞いの物理機構解明、実験結果の解析や予測等のシミュレーションをこれまで以上に高速、高精度かつ大規模に行うことができるようになります。

プラズマシミュレータを利用する全国の多くの共同研究者のための研究支援体制も整備されています。数値実験炉研究プロジェクトの研究者を中心に構成された計算機作業班は、利用者から寄せられた意見を基に、システムの特長を生かした運用計画の策定・改良を行い、計算機会社と協力しながら運用にあたっています。システムを利用するにあたって必要となる様々な情報を利用者に提供するために、7月に4日間にわたってプラズマシミュレータ利用者講習会を開催しました。今回は、新型コロナウイルス感染症拡大防止に配慮す

るとともに遠隔利用者の便宜を図るためにオンライン開催としました。この講習会では、システムの概要、利用方法、プログラムの最適化手法、並列化手法の解説、さらには可視化ソフトの実習を含む講義が行われました。この講習会の資料及び講義の様子を録画した動画を利用者専用のホームページで公開しています。また、日常的に利用者が直面する問題の解決や計算プログラムの開発支

援のために、今回導入したシステムの特長を熟知した計算機の専門家が常駐する「プログラム開発支援室」を設けています。

「プラズマシミュレータ雷神」を最大限に活用することにより、全国の共同研究者のプラズマ・核融合研究が大きく進展することを期待しています。

(基礎物理シミュレーション研究系 研究主幹・教授)

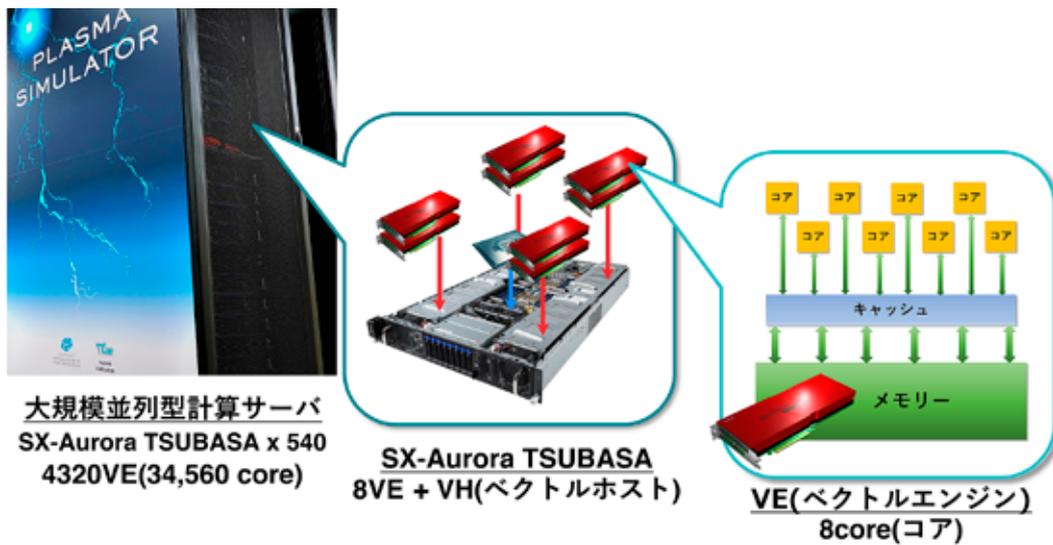


図1 大規模並列型計算サーバの構成

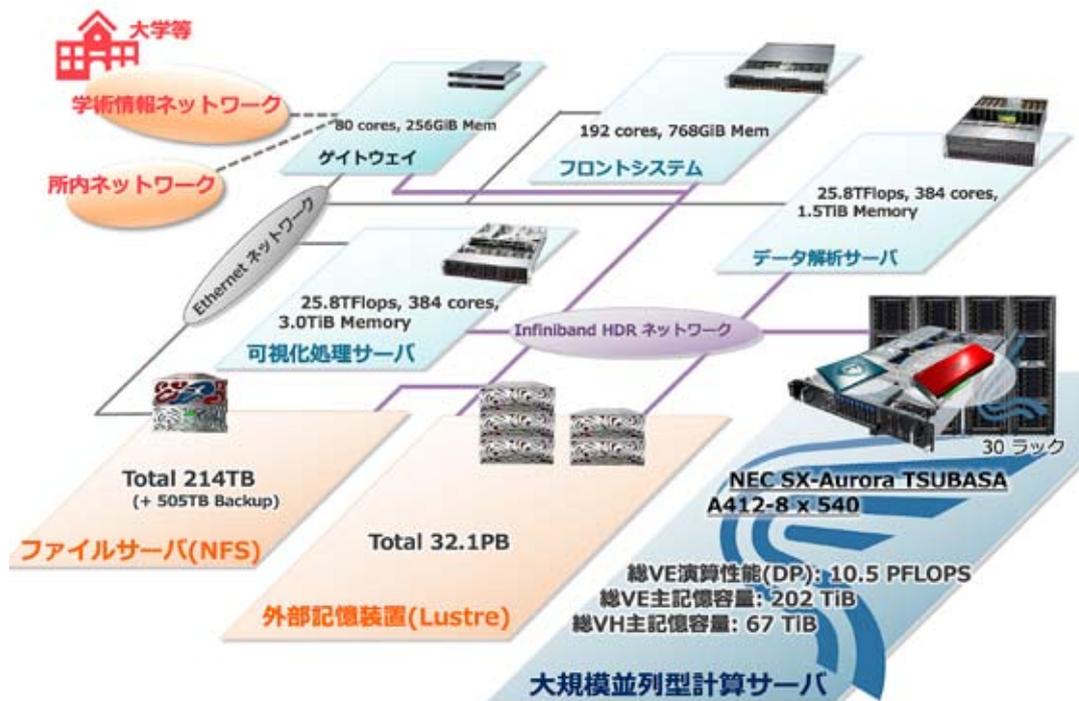


図2 システムの全体構成

# 総研大核融合科学専攻「夏の体験入学」

大 谷 寛 明

2020年8月24日から28日までの5日間の日程で、核融合科学研究所（以下「NIFS」）において、「夏の体験入学」を開催しました。

NIFSに併設されている国立大学法人・総合研究大学院大学（以下「総研大」）・物理科学研究科・核融合科学専攻では、2004年から毎年「夏の体験入学」を開催しています。本専攻では、「夏の体験入学」を総研大核融合科学専攻の志望者獲得を第一義的な目的とし、さらに、将来の核融合エネルギーの実現に向けた人材育成、社会への情報発信・広報等を重要な位置づけとして、大学の1年生から4年生及び高等専門学校の4、5年生と専攻科生を対象に行ってきました。17回目となる今年は、新型コロナウイルス（COVID-19）の感染が拡大する中、マスク着用や消毒の徹底、三密を避けるなど感染予防対策をとりながらの開催となりました。そのような状況の中でも11名の学生（内訳：大学生10名、高専生1名）が参加しました（写真1）。参加学生たちは、研究所内にある宿泊施設「ヘリコンクラブ」に宿泊しながら、核融合研究の最前線を体験しました。



写真1 参加学生と教員との集合写真

核融合科学の研究は、プラズマ物理学、原子物理学、電気工学、低温・超伝導工学、材料工学、真空工学、シミュレーション科学など多岐にわたっており、これらが密接に結びついて進められていることから、本専攻には幅広い専門分野の教員が揃っています。今回の体験入学には、プラズマ実験・加熱・計測系から4課題、核融合工学系・自然科学系から2課題、解析・理論・シミュレーション系から3課題の計9課題が用意されました（表1）。解析・理論・シミュレーション系の2課題は、COVID-19感染対策の一環、また、初めて

表1 夏の体験入学実施課題

|   |
|---|
| プラズマ実験・加熱・計測系                             |
| 放射線計測技術を用いたプラズマ中における高エネルギー粒子の閉じ込め研究       |
| レーザー光発生実験                                 |
| 電子サイクロトロン波ビーム入射アンテナの特性評価                  |
| HYPER-I 装置を用いたプラズマの温度計測実験                 |
| 核融合工学・自然科学系                               |
| 磁場遮蔽試験装置および ANSYS を用いた磁気シールドの性能評価         |
| 核融合炉で用いられる半導体放射線検出器の特性評価                  |
| 解析・理論・シミュレーション系                           |
| モンテカルロ法による運動論的輸送シミュレーションの基礎<br>※オンライン実施課題 |
| Particle-in-Cell シミュレーションによるプラズマ複雑現象の研究   |
| LHD プラズマ実験での計測信号を用いた揺動解析入門<br>※オンライン実施課題  |

の試みとしてオンラインでの実習を行うこととしました。残念ながら今回はこの2課題を希望する学生がおらず実施することができませんでしたが、新しい生活様式が求められている現在、オンライン実習を考える良い機会となりました。その他の各課題には1名から3名の学生が、申込時に表明していただいた希望に沿って配属されました。

体験入学の1日目は、開校式で始まり、竹入康彦専攻長の挨拶の後、各研究課題のテーマ概要説明、担当教員と大学院生ティーチングアシスタントの紹介、及び参加学生の自己紹介を行いました。その後、大型ヘリカル装置（LHD）の実験設備並びにシミュレーション施設見学を行い（写真2）、参加した学生は世界有数の研究設備を目の当たりにして感心している様子でした。見学の後、管理・福利棟第1会議室で懇親会を催しました。COVID-19感染対策としてアクリル板衝立を立てたテーブルでの着席形式で、更に出席者を限定しての開催でしたが、教員を含めた出席者全員の自己紹介をするなど、参加学生は教員との交流を深めていました。

実習が行われる2日目から4日目までは、毎日朝礼で始まり、朝礼後、いよいよ参加学生は配属された各課題実習に取りかかりました。いずれも担当教員が実際に取り扱っている実験機器や

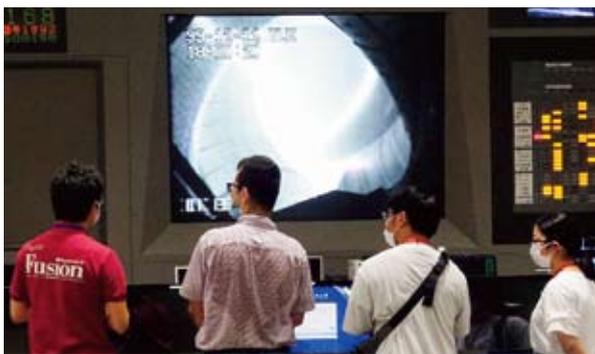


写真2 施設見学の様子



写真3 研究体験の様子

計算機を用いて、専門的な研究課題に熱心に取り組んでいました(写真3)。2日目の午前中に、榊原悟副専攻長による特別講義(写真4)があり、参加学生は、研究開発が進められている核融合発電の原理、LHDに代表される磁場閉じ込め核融合プラズマ研究の概要や研究課題、核融合研究の歴史などについて学びました。2日目の課題実習を終えた後、研究者へのキャリアパスに関心のある学生を対象に、ヘリコンクラブの交流サロンでキャリアビルディングを開催しました。本企画は任意参加でしたが、結果、ほぼ全ての学生が出席し大盛況でした。NIFSの若手研究者2名をパネリストに迎え、座談会形式で、こういった道筋を経て核融合研究者になったのか、研究者になるために大事なことは何かなど、いくつかのテーマでパネリストの経験から発表が行われ、それに対する学生との質疑応答が行われました。学生は皆パネリストの話を



写真4 榊原副専攻長による特別講義の様子

熱心に聴いて、研究内容に関することから私生活に至るまで、研究者から直接話を聞く機会が得られ、将来を考える上で大変参考になったようです。

5日目最終日の発表会は、参加学生と課題担当者、夏の体験入学関係者が参加して、発表時間10分・質疑応答5分の口頭発表を行いました。苦労して仕上げた発表資料を基に、発表会参加者らに対して実習の詳しい内容の説明を行いました。学生たちは、結果だけでなく体験を通して学んだことを生き活きと発表していました(写真5)。このような口頭発表をすることが初めてという学生もいましたが、質疑応答にも堂々と答え、大変活発な発表会でした。

発表会の後、榊原悟副専攻長からの専攻紹介及び入学案内があり、閉校式での竹入康彦専攻長の挨拶の後、全日程を終了しました。



写真5 成果発表会の様子

最終日に参加学生が提出した体験入学についてのアンケートからは、本事業への満足度が大変高いことがうかがえ、このCOVID-19の感染拡大の中、このような夏の体験入学が開催されたことに感謝する学生もいました。またここ数年、過去に本事業に参加した学生が本専攻を受験しており、総研大の広報事業としての成果が目に見えるようになってきています。体験入学に参加した学生の中から、数年後、将来の核融合研究を担う研究者が現れてくれることを期待しています。なお、これまでの体験入学の課題概要や参加学生の体験談などを総研大核融合科学専攻のホームページ(<https://soken.nifs.ac.jp/open/>)で公開しています。

最後に、本体験入学は、総研大の「新入生確保のための広報的的事业」及び核融合科学研究会からのご支援により実施することができました。ここに厚く御礼申し上げます。

(基礎物理シミュレーション研究系 准教授  
総合研究大学院大学・物理科学研究科  
核融合科学専攻/兼任)

## 液晶電気対流を使った乱流の実験研究

永岡 賢一

水やプラズマのような流体の状態の一つとして、大小さまざまな渦が入り乱れた乱流があります。大型ヘリカル装置（LHD）のような磁場で閉じ込められた高温のプラズマでも、乱流状態が観測されています。乱流中の渦はプラズマをかき混ぜて、熱や粒子を素早く運ぶことがあります。これを乱流輸送といいます。乱流輸送は、プラズマの粒子や熱閉じ込めに大きな影響を及ぼすため、プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには、乱流の生成、減衰のメカニズム、及び乱流輸送の性質を理解し、制御することが重要な研究課題となっています。実験、理論、計算機シミュレーションなどを用いた様々な研究が行われていますが、本稿では、テレビ画面にも使われる液晶を使った乱流実験研究について紹介します。

液晶は、ディスプレイパネルに使われているためご存知の方も多いと思います。液晶に電圧をかけると液晶分子の向きが揃うため、光スイッチとして応用したものが液晶ディスプレイです。この液晶に更に大きな電圧をかけたときに対流（電気対流と呼ばれる）が駆動されることが知られています。更に大きな電圧をかけると対流は小さな渦構造に分裂して、乱流状態になります。この電気対流乱流が起こっても液晶の性質が保持されているため、乱流の流れパターンを透過する光強度のパターンとして観測することができます。つまり、通常の水や空気などの流体中の乱流よりも流れパターンの計測が容易であるという特徴があります。図1に、電圧を変えた場合に観測される乱流の流れパターンの例を示します。

一般的に、乱流が強くなると、流れが速くなり渦の分裂がより盛んになります。そのため、より小さな渦が生成されます。図1から印加する電圧が高くなると流れが速くなり、小さい渦が生成されることが分かります。これは乱流強度が大きくなっていることを示しています。このように、外部から印加する電圧だけで、乱流の強さを制御することができることも実験をするうえで大きな利点となっています。これらの利点を最大限に生かして、通常流体（水や空気）やプラズマの乱流にも共通する性質を調べることを目的とした乱流実験研究を行っています。

今回は、乱流が駆動される「乱流駆動領域（高い電圧を印加している領域）」と乱流駆動がない「安定領域（電圧を印加していない領域）」の境界に注目した実験を行いました。図2（左）に示したのは、安定領域と乱流駆動領域の境界における乱流パターンです。乱流駆動領域では、発達した乱流が駆動されており、その乱流渦が安定領域に浸み込んでいることが分かります。乱流の空間的な広がりについて詳細な解析を行った結果の一例を図2（右）に示します。乱流は安定領域に入っただけで減衰するのではなく、強度を保っている領域（位置0から-20の領域）があることが分かります。この領域の幅は、液晶セルの厚み（50  $\mu\text{m}$ （マイクロメートル））のほぼ半分程度であり、最も大きい乱流渦（液晶セルの厚みの大きさの渦）の半分程度までは、乱流がほとんど減衰せずに広がれると考えられます。この領域を過ぎると乱流強度は、指数関数的に減衰することが分かります。これは、乱流の減衰が乱流強度に比例していることを示唆しています。

一般的には、乱流強度が大きいと乱流輸送も大きくなる傾向があります。乱流駆動領域と安定領域の境界における乱流輸送特性を調べた実験結果を紹介します。図2（左）には、緑色の粒子/粒子塊が見られます。これは、乱流輸送の性質を調べるために混ぜ込んだトレーサー粒子の発光です。トレーサー粒子は、乱流の流れ場によってランダムな動きをします。その時々刻々の動きを計測することにより乱流輸送の性質を解析できます。安定領域から十分に離れた乱流駆動領域と安定領域と乱流駆動領域の境界付近の二つの領域（乱流強度はほぼ同じ）に注目して乱流輸送を解析しました。その結果、乱流駆動領域では粒子拡散が大きく、境界領域では粒子拡散が小さいことが分かりました。これにより、乱流強度だけでは、乱流輸送の性質が決まらないことが明らかとなりました。粒子の振る舞いについて更に詳細な解析を進めて、乱流輸送の性質に影響する要因を突き止めたいと考えています。

最後に、この電気対流乱流を用いた乱流輸送の研究は、様々な流体に共通する普遍的な乱流輸送の性質があるという仮定に基づいており、実験の

制御性や計測技術の利点を最大限に生かした野心的な研究です。通常流体やプラズマに普遍的な性質の理解を深めることができれば、その研究成果は、核融合プラズマ研究だけにとどまらず、身近な流体現象から宇宙プラズマにまで、幅広い研究

領域への貢献も可能と考えています。これからも様々な視点から乱流輸送の研究を展開していきたいと考えています。

(プラズマ加熱物理研究系 教授)

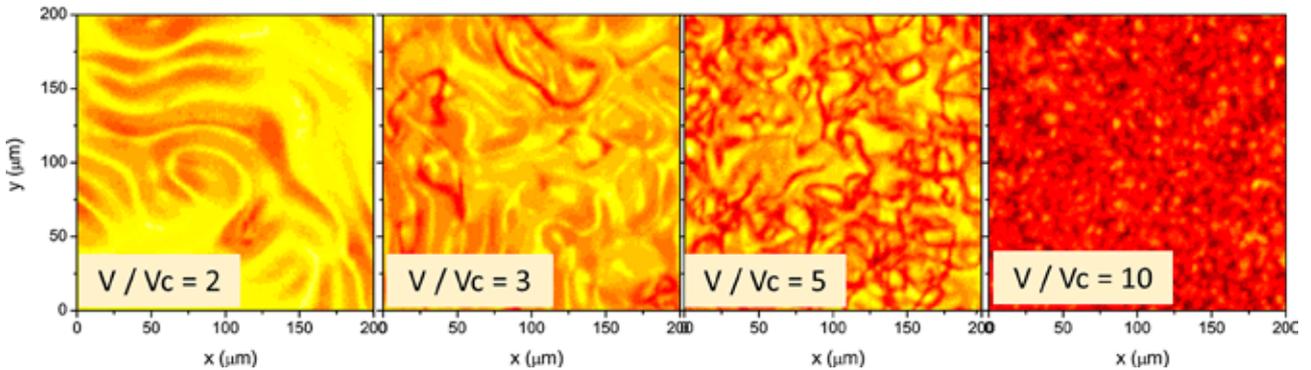


図1 液晶を透過する光強度の2次元パターン。このパターンは、視線方向の流れ速度に対応しています。黄色から赤になる程、流れが速いことを表しています。大きな電圧を印加するとパターンが細くなり、流れが速くなって、発達した乱流が駆動されていることが分かります。ここで、Vは印加電圧、Vcは対流が駆動される閾値電圧です。

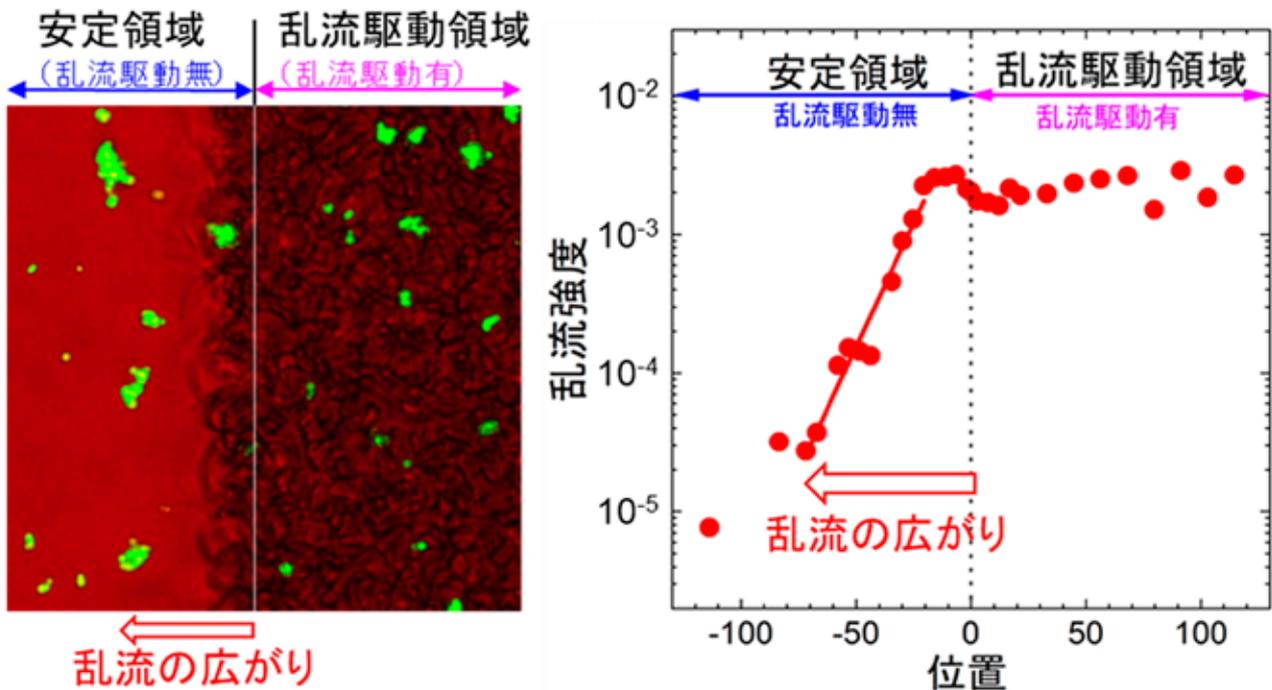


図2 (左) 乱流駆動領域と安定領域の境界付近の乱流パターンの一例。赤色の透過光強度が流れ場のパターンを表しています。緑色の粒子/粒子塊は、乱流輸送の性質を調べるために混入したトレーサー粒子の発光です。(右) この領域の乱流強度の空間分布。安定領域へ浸み込んだ乱流の強度が、指数関数的に減衰することが分かります。

## 総研大-サンクトペテルブルク工科大学 合同夏の学校

田村直樹

総合研究大学院大学（総研大）核融合科学専攻では、昨年度からロシアのサンクトペテルブルク工科大学（SPbSTU）と合同でプラズマ・核融合に関する夏の学校を開催しています。この夏の学校の開催経緯は、以下のとおりです。総研大核融合科学専攻の卒業生で、現在はSPbSTU所属のPavel Goncharov研究員から、ロシアの大学でも国際化は極めて重要な課題となっており、その一環として、これまでSPbSTUが単独で開催してきたプラズマ・核融合に関する夏の学校をぜひ総研大と合同で実施させてほしいという熱心なお誘いがありました。総研大としても、総研大核融合科学専攻を海外のより多くの学生に知ってもらう絶好の機会であることから、両大学による合同開催の実現に至りました。

昨年度はSPbSTUで開催し、今年度も同校で開催する予定でしたが、新型コロナウイルスの影響により、TV会議システムを使用したオンライン形式に切り替え、2020年7月13日から24日まで開催しました。今年度は、パキスタン、ハンガリー、中国、ロシアの計4ヶ国から合計39名の参加がありました。昨年度の参加国数9ヶ国より大幅に減ってしまいましたが、参加者は昨年度より少し増え、学部生から博士課程学生まで、様々なバックグラウンドを持った学生が聴講しました。今回は、SPbSTUのPavel Goncharov研究員、国際原子力機関（IAEA）のMatteo Barbarino氏、総研大核融合科学専攻の鈴木康浩准教授と筆者の合計4名が講師として、オンライン形式による講義を行いました。まずBarbarino氏からIAEAにおける核融合に関する活動についての紹介があり、Goncharov研究員よりプラズマの基礎から磁場閉じ込め核融合に至るまで幅広く、基礎的な講義が行われました。鈴木准教授は、磁場閉じ込め核融合の紹介から電磁流体力学的不安定性とプラズマの輸送について、筆者は、日本における核融合研究の現状及びプラズマ分光について、専門的な講義を行いました。参加した学生から、講義後すぐにTV会議システムのチャット機能を通じて質問があり、それに対して講師がチャットで参考論文を示しながら答えるといったオンライン形式ならではの光景も見られました。参加した学生からは、総研大核融合科学専攻に大変興味を持ったといった意見が寄せられており、今後このような学生たちが総研大核融合科学専攻に志願し、入学してくれることを願っています。

総研大核融合科学専攻とSPbSTUとの合同夏の学校は来年度も引き続き開催する予定です。

（高温プラズマ物理研究系 准教授）



オンラインでの開校式の様子

### 「新プラズマシミュレータ披露会」を開催しました

核融合科学研究所は、新プラズマシミュレータ（プラズマシミュレータ雷神）の運用開始を記念して、8月29日（土）に披露会を開催しました。披露会では竹入所長、小森自然科学研究機構長の挨拶に続き、上野文部科学副大臣、古屋衆議院議員、加藤土岐市長から祝辞をいただきました。



上野文部科学副大臣、古屋衆議院議員、小森機構長と竹入所長らによる記念撮影



大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

核融合科学研究所 発行

NIFS NEWS

No.255

2020年8,9月号

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6  
TEL : 0572-58-2222(代) FAX : 0572-58-2601  
URL : <https://www.nifs.ac.jp/>  
E-mail : [nifs-news@nifs.ac.jp](mailto:nifs-news@nifs.ac.jp)

※過去のニュースはホームページにてご覧いただけます。

複写される  
方へ

本紙に掲載された著作物を複写したい方は(社)日本複写権センターと包括複写特許契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F  
TEL:03-3475-5618 FAX:03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp 著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本研究へご連絡ください。