

## 6 一般物理実験

### 6.1 高瀬研究室

高瀬研究室では、核融合発電の実現を目標に磁場閉じこめ型トーラスプラズマの研究を行っている。柏キャンパスに設置された TST-2 装置を用いた球状トカマクプラズマの基礎研究を行うと共に、量子科学技術研究開発機構で建設中の JT-60SA 装置、核融合科学研究所の LHD 装置、京都大学の LATE 装置、九州大学の QUEST 装置、米国 MIT の Alcator C-Mod 装置を対象とした共同研究を進めている。

#### 6.1.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク (ST) 型の装置であり、プラズマの主半径、小半径はおよそ 0.36、0.23 m、電磁誘導、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120、25 kA である。球状トカマクは高い規格化圧力を安定に維持できる方式として近年注目を浴び、当研究室では早い時期からその基礎研究を行ってきた。現在もっとも重要な研究課題は、高周波 (RF) 電流駆動とそれによるプラズマの立ち上げであり、TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW) を用いた電流駆動実験を行ってきた。2015 年度は、弱磁場側静電結合型コムライン (Capacitively-Coupled Compline, CCC) アンテナを用いた実験を行い、磁場増強、上下リミターの設置等により、最大 25 kA のプラズマ電流の駆動・維持に成功した。維持されたプラズマの特性を理解するために種々の計測を行った。電子温度分布は中心が低いホローな分布であり、波動電力変調実験の結果から周辺加熱が示唆された。また、干渉計による密度計測からプラズマ上部に密度の高い領域があることがわかった。これらの測定結果と波動コードによる予測から、弱磁場側アンテナから放射されたパワーは、中心部ではなく周辺部やプラズマ上部に投入されており、電流駆動の効率が低下していることが示唆された。波動コードで様々な入射条件を検討した結果、上側からの入射で良好な中心加熱 (電流駆動) が期待されることがわかり、上側アンテナを新たに設計製作した。製作後に特性試験、調整を行い、2015 年度末に TST-2 に設置した。これまでの初期的な実験では、13 kA の電流駆動に成功している。

	CCC	グリル	ICC
偏波	LHW	LHW	FW
エレメント数	13	4	11
プラズマとの結合度	100 %	40 %	50 %
到達 $I_p$	25 kA	10 kA	13 kA
$I_p=10$ kA での電力	15 kW	70 kW	50 kW

表 6.1.1: TST-2 で使用されたアンテナの性能比較。

#### 6.1.2 高周波プラズマ立ち上げ実験

##### CCC アンテナ実験

米国 General Atomics 社と共同開発した静電結合型コムライン (CCC) アンテナを用いて、低域混成波 (LHW) による非誘導プラズマ電流立ち上げ実験を行った。CCC アンテナの特徴は、一般的な LHW アンテナである導波管列アンテナの使用が難しい 200 MHz であっても、指向性の高い LHW を低い反射率で直接励起できる点である。これにより高パワー実験 (~100 kW) が可能となり、最大 25 kA の非誘導電流立ち上げに成功した。また、更に高い電流値を得る為にはトロイダル磁場の増強が必要であることがわかった。これは、現状ではプラズマ電流の上昇と共にプラズマ密度が上昇するため、トロイダル磁場強度を強めることで LHW のモード変換密度限界を緩和させる必要があるためである。実際、実験における高密度限界は入射波の磁場方向の屈折率  $n_{||}$  ( $= -5.5$ ) のモード変換密度に対応している。トロイダル磁場は、パラメトリック崩壊による損失が顕著になる磁場 ( $\omega \geq \omega_{LH}$ ) よりも低くある必要があり、密度と電流のスケールアップから外挿すると、約 35 kA が限界値となる。トロイダル磁場の増加なしにプラズマ電流を上昇させるには、入射  $n_{||}$  を増加させることで近接条件を緩和することが考えられるが、プラズマ中心部に到達する前に吸収され、有効に電流駆動できないことが危惧される。実際トムソン散乱計測システムで計測された温度分布は、中心で 10–30 eV、外側で 60–100 eV とホローであったため、入射  $n_{||}$  の増加により、プラズマ周辺部での吸収が強くなってしまった。これを解決する手法として考えられるのが次節で説明する LHW の上側入射である。これにより LHW の密度限界の緩和、及びプラズマ中心付近での強い吸収が期待できる。

得られた結果から、これまで TST-2 で使用された導波管列 (グリル) アンテナ、誘電結合型コムライン (ICC) アンテナとの性能比較を行った。表 6.1.1 からわかるように、CCC アンテナが 200 MHz で LHW を入射する上で、最も効率的に電流を立ち上げていることがわかる。ICC アンテナは CCC アンテナと同様、コムライン型ではあるが FW アンテナであるためプラズマとの結合度が 50% と良くない。グリルアンテナはボンデロモータティブ力によるアンテナ前面密度の希薄化が原因で結合度が 40% と良くない。エレメント数の増加は入射  $n_{||}$  スペクトルの指向性を

高めるため、エレメント数が13本であるCCCアンテナは最も指向性の高い入射  $n_{\parallel}$  スペクトルを励起することができる。

### 上側入射アンテナ

TST-2ではこれまでLHWの弱磁場側入射によるプラズマ電流駆動実験を行ってきた。LHWによるプラズマ電流駆動の効率を下げる要因として、最外殻磁気面外でのLHW吸収が挙げられる。光線追跡コードGENRAYによる計算の結果、プラズマの上側から入射されたLHWの屈折率が、入射時には  $n_{\parallel} = 5.5$  であるのが、プラズマ中心部に伝搬するにもなって  $n_{\parallel} \sim 30$  程度まで増加することがわかった。このことにより、高密度でも波がプラズマ中心部まで伝搬し、そこで強い吸収が起こるため、球状トカマク型プラズマでのLHWを用いた電流駆動方式の実用性が高まると期待される。新アンテナの調整に関しては、まず真空容器外でインピーダンス整合をとる調整をした結果、 $200 \pm 3$  MHzで1%以下の反射率が実現された。その後、アンテナを真空容器内(アンテナ全面  $z = 335$  mm)に設置し、フィードスルーも含めてインピーダンス整合をとったところ、 $200 \pm 3$  MHzで8%以下の反射率が実現された。200 MHzの電源からアンテナまでの伝送路の接続も完了し、上側CCCアンテナを用いた運転が開始された。

### 硬X線計測

LHWにより駆動される電流は高速電子が担っており、硬X線計測を行うことでその速度分布や空間分布を知ることができる。2014度の研究ではNaIシンチレータと光電子増倍管(PMT)を用いた計測器により、硬X線放射の径方向分布を測定した。しかし、PMTはトロイダル磁場の影響を受けてしまうので、シンチレーション光を光ファイバーで真空容器から離れたPMTまで伝送する必要があった。そのため、シンチレーション光が減衰しエネルギー分解能が悪化してしまうという問題があった。そこで、磁場の影響を受けないAPD(Avalanche Photo Diode)をシンチレーション光の読み出しに用いたシステムの開発を行った。PMTの信号の増倍率が105倍であるのに対して、APDは50–100倍程度しかないので、さらにオペアンプを用いた160倍の反転増幅回路を製作した。セシウム137からのエネルギースペクトルを測定した結果、エネルギー分解能はPMTが10.8%であったのに対しAPDは5.5%となった。信号のパルス幅はPMTが2  $\mu$ s、APDが5  $\mu$ sであり、時間分解能では現状PMTの方が優れている。またAPDでは60 mV程度の熱雑音があるため、35 keV以下の信号は見えない。この装置を用いて測定を行ったところ、当初はLHWによる高周波ノイズとコイル電源由来のノイズが非常に大きくX線測定は困難であった。しかし、貫通コンデンサーの使用、1点アース、APD以外の機器(オシロスコープ、電源)をTST-2から離す、グラウンドループやケーブルを

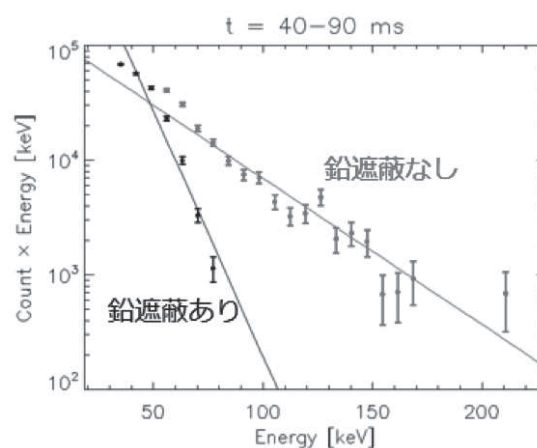


図 6.1.1: NaI+APD により計測された、RF プラズマにおける硬 X 線放射エネルギースペクトル。

束ねることによるループの減少、解析時のバンドパスフィルターの使用により、通電時のノイズはほぼ全て除去することができた。LHWで生成したプラズマのエネルギースペクトルを計測し、計測器を鉛で囲んだ場合と囲まない場合と比較した。図 6.1.1 から、視線を鉛で遮蔽すると放射が減るので、プラズマ由来の硬 X 線が計測されていることがわかる。

### 軟 X 線計測

可視光–軟 X 線 (1 eV–10 keV) の範囲に感度を持つフォトダイオードアレイを用いてプラズマの放射光強度計測を行った。LHWの入射電力に1.12 kHzの変調をかけて計測を行ったところ、プラズマ電流の増加が大きい30–45 msでは発光強度の変調成分の振幅の分布は非変調成分の分布によく一致していた。また、変調の遅れ時間がプラズマ中心付近で最も小さく、周辺で増加していることから、LHWの吸収はプラズマ中心付近で主に起こっていると考えられる。一方で、電流上昇が緩やかになる55–80 msの分布については、変調成分の振幅の分布が大半径の小さい領域に集中しているのに対して、非変調成分はプラズマ中心にピークを持っている。変調の遅れ時間もプラズマ中心でピークを持っていることから、この時間帯ではLHWのパワーはプラズマ周辺部で吸収され、プラズマ中心へ向かって輸送されていることが示唆される。

### アンテナからの銅不純物の影響

CCCアンテナ表面は銅であり、これが不純物としてプラズマ電流立ち上げに影響を与えている可能性があった。そこでRFプラズマにおいて銅のラインスペクトルを可視分光器で測定することにより、銅の同定と銅の発生機構の解明を試みた。分光測定の結果、プラズマ中には中性銅 (CuI: 324.7 nm, 327.4 nm)

が存在することがわかった。また、アンテナ近傍の視線で銅の発光強度が他の視線と比べて大きいことがわかり、銅はアンテナから放出されていることが示された。さらに、発光強度はLHWのパワーにほぼ比例しており、銅はRFシーススパッタリングによりアンテナ表面から放出されている可能性が示唆された。また、波長範囲0–900 nmにおける中性銅のラインスペクトルの強度(200–900 nmの強度は測定値、0–200 nmの強度は相対強度を用いて推定)が40 W程度であると見積もられ、LHWのパワー(約50 kW)に比べて小さく、プラズマに与える影響は小さいことがわかった。

### 干渉計による密度分布推定

RFプラズマに対してマイクロ波干渉計の水平方向計測視線を用いることで、水平方向線積分電子密度の鉛直方向の分布を得た。プラズマ電流が10–15 kA以上ある時に分布がフラットな形状を持つことがわかった。トムソン散乱で計測されたミッドプレーン上の密度は主半径方向に釣鐘状の分布をとることから、LCFS内の電子密度と同等の密度が $z = 200$  mmに存在することが示唆された。

### MEGAによるRFプラズマモデリング

TST-2のLHW立ち上げプラズマでは、バルク電子の担う圧力は全体の1%程度にすぎず、ほとんどの圧力は高速電子が担っていることが示唆されている。そこで、高速粒子・MHD連結シミュレーションコードMEGAを用いて、プラズマ電流9 kAの放電のモデリングを行った。低圧力、低密度の計算を行うため、MEGAの数値的安定性を改善した。また、磁気面から大きく外れる高速電子の振る舞いを調べるため、粒子軌道追跡を実装した。初期分布関数としては、光線追跡コードGENRAYとFokker-PlanckコードCQL3Dにより得られたものを参考にした。得られた時間平均圧力分布、及び温度分布は3流体平衡計算[6]の結果と比較し、定性的・定量的に一致することが確認された(図6.1.2)。揺動成分については、さらなる解析が必要である。ポロイダル断面での電場揺動の空間構造を図6.1.3に示す。これらの計算では空間的に一様な電子分布関数を用いたが、もう少し現実的な、ホローな高速電子分布を初期条件としたモデリングが進行中である。初期的な解析では、かなりの高速電子がリミターに衝突し損失することが示された。高速電子の平衡への影響の解析、硬X線計測との比較を行っていく予定である。

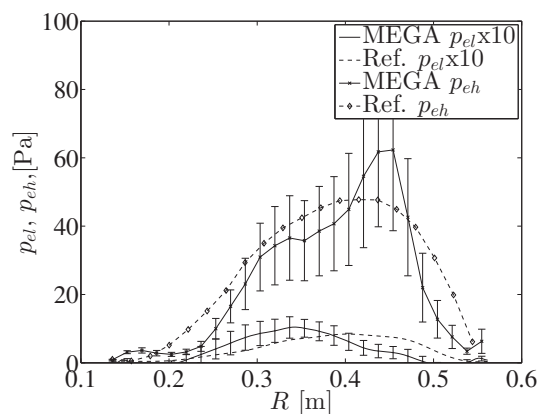


図 6.1.2: MEGA により得られた時間平均圧力分布と3流体平衡計算[6]の比較。エラーバーは時間的揺動振幅と分布関数モデル依存性を含む。

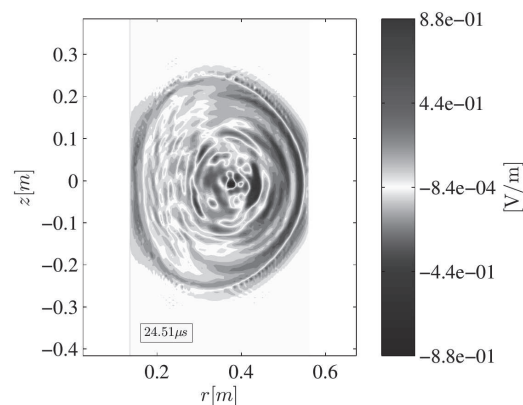


図 6.1.3: MEGA により得られた  $E_{\parallel}$  分布。

### 6.1.3 OH プラズマ実験

#### ログスキープローブを用いたプラズマ周辺部の局所電流計測

球状トカマク TST-2 においては、プラズマ平衡、乱流、不安定性に関する種々の研究がなされている。プラズマ内部を流れる電流密度分布はそれらと深い関係があり、電流密度分布計測は極めて意義が高い。TST-2 では、局所電流の直接計測が可能な小型高巻線密度ログスキークoilを開発し、そのログスキークoil 2つと、磁場計測用のピックアップコイル 5つ、電子密度温度計測用の静電プローブ 2つを搭載したログスキープローブを設計製作した。プラズマとの絶縁のためにログスキープローブヘッドはセラミックで覆われている。ログスキープローブを用いて、電流貫通穴を貫通した電流の直接計測が可能である。また、本プローブはトカマクの主半径方向に移動可能で、貫通穴の向きをトロイダルポロイダル面で回転可能なことから、電流の流れる向きを含めた分布計測が可能である。プローブの主半径位置を固定し、プラズマ放電ごとに電流貫通穴の向きとトロイダル方向の成す角を変えながら電流信号を計測した結果、磁場が穴を貫通できない角度においても有限な電流信号が観測され、計測した角度分布の幅が幾何学的条件から計算した曲線の幅より広がることわかった。この違いはセラミックとプラズマの境界に形成されたプラズマシースの影響であると考え、ログスキープローブを用いた計測条件を考慮したシースモデルを新たに考案した。そのシースモデルをもとに磁場が穴を貫通できない条件において電子の軌道を数値計算したところ、電子の軌道がシース電場による  $E \times B$  ドリフトの影響を貫通方向に受け、電子が穴を貫通し得ることがわかった。特に、角度分布の幅は電子温度に比例し磁場の強さに反比例することがわかった。

本プローブを用い、球状トカマクにおける磁気再結合現象 (IRE) を調査した。本計測では、ログスキープローブの計測結果から、IRE 中の局所的な電流揺動の存在が明らかとなり、IRE の瞬間に局所電流の流れる方向が反転することがわかった。高速度カメラを用いて電流信号を同時に観測したところ、電流の流れる方向が反転する瞬間にプローブの発光箇所も反転することがわかり、電流反転現象を支持するデータを得ることができた。

#### 6.1.4 計測器開発

##### マルチパストムソン散乱計測

LHW で駆動された TST-2 プラズマの電子温度・密度分布を精度良く計測するため、マルチパストムソン散乱計測システムの開発を行っている。このシステムは通常のトムソン散乱計測システムに加え、Q スイッチ型レーザー装置の光学共振器と同様の光学系を持ち、レーザーパルスはミラー間に同軸上に閉じ込められプラズマ内部を何度も通過する。往復

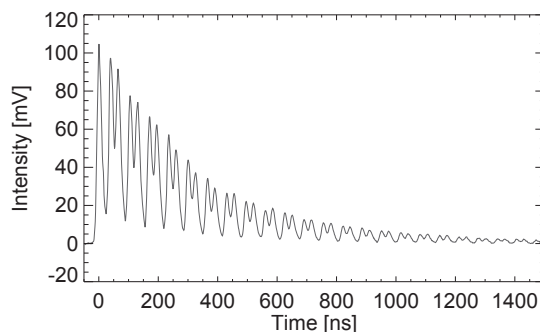


図 6.1.4: マルチパストムソン散乱計におけるラマン散乱信号。

の時間スケールは温度・密度変化のそれに対して十分早い時間スケールで得られた複数の散乱信号を積算することで信号量を稼ぐ。マルチパストムソン散乱計測によって改善される SN 比は 1 往復ごとの光学損失に依存するため、必要最低限かつ高性能（高透過率または高反射率）の部品で構成されるシステムを整備した。このシステムの光学損失は 20% 程度であり、1 パス目と比べて 10 倍の信号量が得られたことを窒素のラマン散乱計測により確認した (図 6.1.4)。

##### マイクロ波散乱計

低域混成波 (LHW) により生成されたプラズマの解析には、波動の数値計算が必須であるが、そのための数値計算コードは実際の実験における計測によって妥当性を検証することが重要である。TST-2 では LHW を直接計測できるマイクロ波散乱計を設計製作中である。プローブ光の周波数・入射方向を掃引し、LHW によって散乱された光を多点計測することで、プラズマ内部の波動の空間構造を推定することが可能である。計測器は 2016 年度に設置予定である。

#### 6.1.5 共同研究

##### QUEST におけるトムソン散乱

2014-2015 年度の 2 年間で開発した制御回路を導入し、1  $\mu$ s 以内の誤差で電子温度・電子密度の計測をすることが可能になった。本システムを用いて、ガスバフ入射とコンパクトトラス (CT) 入射による QUEST プラズマ応答、粒子供給量の評価を行った。8.2 GHz RF プラズマに対するガスバフによって 0.03 s 以下の短い時間で電子温度は減少し、密度は高くなる。その後、高い密度を維持したまま、温度は 2 s で 50% まで回復する。また、OH プラズマへの CT によるインボード/アウトボード側の電子温度・電子密度の変化を観測することに成功した。ガスバフと CT 入射による密度分布の時間変化

から、ガスパフでは供給粒子数  $0.8 \times 10^{16}$  個で供給効率 0.013%、CT では供給粒子数  $4.7 \times 10^{16}$  個で供給効率 0.009% と評価された。

### LHD 装置における反射計計測

高周波はプラズマの加熱や電流駆動に用いられるが、その理解と制御のために、プラズマ中での高周波波動を計測する手段の確立が求められている。マイクロ波反射計は、プラズマ中で反射したマイクロ波の位相を測定する計測であり、微小な電子密度変動を測定できることから、高周波波動計測手法として注目されている。本研究室では、核融合科学研究所の LHD 装置において、ICRF (周波数 38.47 MHz) 波動の計測を行っており、2015 年度は、これまでのデータの解析を進めた。近接した 2 点間の波動由来密度振動の位相を調べた結果、全体としては同相である頻度が最も高いものの、2 点間の距離が離れた場合のデータから、波動がプラズマ外側から磁気軸側に向かって伝搬している傾向 (図 6.1.5(a) 赤線)、吸収が弱いと予測される条件では、定在波構造が見られやすいことがわかった (図 6.1.5(b))。

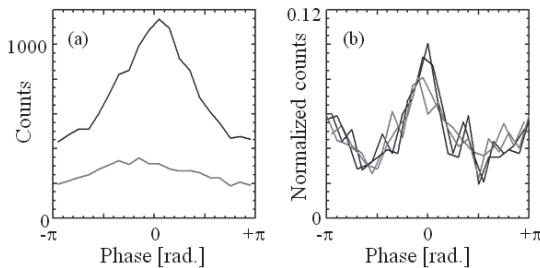


図 6.1.5: (a) 計測された位相のヒストグラム。黒 : 全データ、赤 : 2 周波数のカットオフ間の距離が平均 (=26 mm) より大きいもの。(b) 吸収の弱いパラメータ領域における (a) と同様のヒストグラム。複数のプロットは異なる解析手法を用いて生成したもの。

#### <報文>

(原著論文)

- [1] T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide, Y. Takase: Simulation of plasma current ramp-up with reduced magnetic flux consumption in JT-60SA, *Plasma Phys. Control. Fusion* **57**, 065005 (2015).
- [2] Shintaro TSUDA, Akira EJIRI, Hitoshi TANAKA, Yuichi TAKASE, Masaki UCHIDA, Takashi MAEKAWA, Naoto TSUJII and Toshihiro TAKEUCHI: Measurement of Ion Temperature and Flow in RF Start-Up Plasmas in TST-2 and LATE, *Plasma Fusion Res.* **10**, 1202064 (2015).
- [3] Kishore Mishra, H. Zushi, H. Idei, M. Hasegawa, T. Onchi, S. Tashima, S. Banerjee, H. Hanada, H. Togashi, T. Yamaguchi, A. Ejiri, Y. Takase, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, A. Kuzmin and QUEST team: Self organization of high  $\beta$  p plasma equilibrium with an inboard poloidal magnetic field null in QUEST, *Nucl. Fusion* **55**, 083009 (2015).
- [4] T. Shinya, Y. Takase, T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, H. Kasahara, R. Kumazawa, C. Moeller, T. Mutoh, Y. Nagashima, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, K. Saito, T. Seki, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, N. Tsujii, T. Yamaguchi: Non-inductive Plasma Start-up Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak Using Waves in the Lower-hybrid Frequency Range, *Nucl. Fusion* **55**, 073003 (2015).
- [5] N. Tsujii, M. Porkolab, P. T. Bonoli, E. M. Edlund, P. C. Ennever, Y. Lin, J. C. Wright, S. J. Wukitch, E. F. Jaeger, D. L. Green, and R. W. Harvey: Validation of full-wave simulations for mode conversion of waves in the ion cyclotron range of frequencies with phase contrast imaging in Alcator C-Mod, *Phys. Plasmas* **22**, 082502 (2015).
- [6] A. Ishida, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, H. Togashi, Y. Yoshida, T. Shinya and S. Tsuda: Three-fluid axisymmetric equilibrium model and application to spherical torus plasmas sustained by RF electron heating, *Plasma Fusion Res.* **10**, 1403084 (2015).
- [7] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, T. Shinya, Y. Takase, K. Toida, N. Tsujii, T. Yamaguchi, Y. Yoshida, M. Hasegawa, Y. Nagashima, H. Furui, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, M. Sonehara, S. Yajima and H. Yamazaki: First measurement of electron temperature and density profiles for spherical tokamak plasmas sustained by lower hybrid wave, *Plasma Fusion Res.* **10**, 1202082 (2015).
- [8] T. Ii Tsujimura, S. Kubo, H. Takahashi, R. Makino, R. Seki, Y. Yoshimura, H. Igami, T. Shimozuma, K. Ida, C. Suzuki, M. Emoto, M. Yokoyama, T. Kobayashi, C. Moon, K. Nagaoka, M. Osakabe, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Mizuno, K. Okada, A. Ejiri, T. Mutoh and the LHD Experiment Group: Development and application of a ray-tracing code integrating with 3D equilibrium mapping in LHD ECH experiments, *Nuclear Fusion* **55**, 123019 (2015).
- [9] Akira EJIRI, Yuichi TAKASE, Naoto TSUJII, Takahiro SHINYA, Satoru YAJIMA, Masateru SONEHARA, Hirokazu FURUI, Hiro TOGASHI, Hiroto HOMMA, Kenta NAKAMURA, Toshihiro TAKEUCHI, Yusuke YOSHIDA, Wataru TAKAHASHI, Kazuya TOIDA, and Hibiki YAMAZAKI: RF central solenoid operation for plasma produc-

tion and current drive in TST-2, Plasma Fusion Res. **11**, 1202004 (2016).

(会議抄録)

- [10] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, T. Shinya, Y. Takase, K. Toida, N. Tsujii, T. Yamaguchi, Y. Yoshida, H. Furui, M. Sonehara, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, S. Yajima, H. Yamazaki, M. Hasegawa, Y. Nagashima and H. Tojo: Thomson scattering measurements in low-density plasmas in the TST-2 spherical tokamak, JINST **10**, C12020 (2015).
- [11] A. Ejiri, T. Tokuzawa, N. Tsujii, K. Saito, T. Seki, H. Kasahara, S. Kamio, R. Seki, T. Mutoh, I. Yamada and Y. Takase: Measurements of ICRF wave-induced density fluctuations in LHD by a microwave reflectometer, JINST **10**, C12032 (2015).

(学位論文)

- [12] 角田英俊: Wavenumber Measurement of the Lower Hybrid Wave by an Electrostatic Probe with and Embedded High Impedance Resistor in the TST-2 Spherical Tokamak (博士論文).
- [13] 新屋貴浩: Non-Inductive Plasma Current Ramp-up on the TST-2 Spherical Tokamak Using the Lower Hybrid Wave (博士論文).
- [14] 古井宏和: Study of equilibrium and instabilities using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak (博士論文).
- [15] 竹内敏洋: Spectroscopic measurements of impurity line radiation from TST-2 spherical tokamak plasmas (修士論文).
- [16] 矢嶋悟: Radiation profile measurements in TST-2 spherical tokamak plasmas driven by the lower hybrid wave (修士論文).
- [17] 吉田裕亮: Reconstruction of electron density profile in non-inductively driven plasmas in the TST-2 spherical tokamak (修士論文).
- [18] 本間寛人: トムソン散乱計測法を用いた QUEST 球状トカマクへの燃料入射に対するプラズマ応答の研究 (修士論文).
- [19] 中村建大: 硬X線計測システムの開発と TST-2 球状トカマクプラズマへの適用 (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [20] N. Tsujii, M. Porkolab, P.T. Bonoli, E.M. Edlund, P.C. Ennever, Y. Lin, J.C. Wright, S.J. Wukitch, E.F. Jaeger, D.L. Green and R.W. Harvey: Measurement and simulation of ICRF wave intensity with a recalibrated phasecontrast imaging diagnostic on Alcator C-Mod, 21st Topical Conference on Radiofrequency Powers in Plasmas, Lake Arrowhead, California, USA, Apr. 27-29, 2015.

- [21] Y. Takase, A. Ejiri, T. Inada, C.P. Moeller, T. Shinya, N. Tsujii, S. Yajima, H. Furui, H. Homma, K. Imamura, K. Nakamura, K. Nakamura, M. Sonehara, T. Takeuchi, H. Togashi, S. Tsuda and Y. Yoshida: Plasma current start-up using the lower hybrid wave on the TST-2 spherical tokamak, 21st Topical Conference on RF Power in Plasmas, Lake Arrowhead, CA, USA, Apr. 27-29, 2015.
- [22] A. Ejiri: Basics and practical applications of plasma diagnostics for tokamak experiments, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [23] H. Homma, Y. Takase, A. Ejiri, T. Yamaguchi, H. Togashi, N. Tsujii, S. Masateru, T. Shinya, H. Furui, T. Takeuchi, K. Nakamura, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, K. Toida, H. Yamazaki, G. Benoit, M. Hasegawa, K. Hanada, H. Zushi, Y. Nagashima, S. Fujisawa, E. Uetaki, K. Nakamura, K. Tokunaga, H. Watanabe, O. Watanabe, T. Onch, H. Idei, Y. Oyama, K. Miura, QUEST Team, N. Fukumoto, M. Nagata, CT Team: Thomson scattering measurement of plasma behavior by gas injection in QUEST, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [24] T. Takeuchi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, W. Takahashi, T. Shinya, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida, H. Yamazaki, TST-2 team: Spectroscopic measurement of impurity radiation in TST-2, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [25] W. Takahashi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Takeuchi, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: Ion flow measurement using a visible spectrometer in TST-2 ohmic plasmas, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [26] K. Toida, A. Ejiri, H. Togashi, H. Homma, Y. Takase, N. Tsujii, M. Sonehara, T. Shinya, H. Furui, T. Takeuchi, K. Nakamura, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, H. Yamazaki: Development of a fiber alignment system for the Thomson scattering measurement in TST-2, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [27] H. Yamazaki, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, M. Sonehara, T. Shinya, H. Furui, H. Togashi, T. Takeuchi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima,

- Y. Yoshida, W. Takahashi and K. Toida: Properties of hard X-ray emission from TST-2 RF sustained plasmas, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20- 24, 2015.
- [28] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, T. Shinya, Y. Takase, K. Toida, N. Tsujii, T. Yamaguchi, Y. Yoshida, H. Furui, M. Sonehara, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, S. Yajima, H. Yamazaki, M. Hasegawa, and Y. Nagashima: Electron temperature and density profile measurement on the TST-2, 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.
- [29] H. Furui, Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, F. Cheng, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, H. Homma, K. Nakamura, T. Takeuchi, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, K. Toida and H. Yamazaki: The measurement of plasma equilibrium and fluctuations near the plasma edge using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak, 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.
- [30] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, H. Furui, H. Homma, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, H. Togashi, K. Toida, T. Shinya, M. Sonehara, S. Yajima, H. Yamazaki and Y. Yoshida: Measurement of lower-hybrid waves with microwave scattering on TST-2, 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.
- [31] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, H. Furui, H. Homma, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, H. Togashi, K. Toida, T. Shinya, M. Sonehara, S. Yajima, H. Yamazaki and Y. Yoshida: Design of a microwave scattering diagnostic for lower-hybrid waves on TST-2, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Nov 16-20, 2015, Savannah, Georgia, USA.
- [32] T. Shinya, S. G. Baek, G. M. Wallace, S. Shiraiwa, R. R. Parker, D. Brunner, B. LaBombard, and Y. Takase: Wavenumber measurement of lower hybrid waves using multiple RF magnetic probes on Alcator C-Mod, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Nov 16-20, 2015, Savannah, Georgia, USA.
- [33] H. Homma, A. Ejiri, H. Togashi, Y. Takase, K. Toida, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Hanada, N. Fukumoto, TST-2 Team, QUEST Team: Thomson Scattering Overview in QUEST, Joint Meeting on VEST and QUEST, Kyushu University, Kasuga, Japan, Dec. 17, 2015.
- [34] Y. Takase for the TST-2 Group: Experimental Study of Plasma Current Ramp-Up by the Lower Hybrid Wave (LHW) in the TST-2 Spherical Tokamak, 10th Asia Plasma & Fusion Association Conference (APFA2015) Gandhinagar, India, Dec. 14-18 2015.
- [35] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, S. Yajima, T. Shinya, H. Yamazaki, C.P. Moellera, H. Togashi, K. Toida, H. Homma, H. Furui, H. Kasahara, T. Mutoh, K. Nakamura, B. Roidl, K. Saito, T. Seki, M. Sonehara, W. Takahashi, T. Takeuchi, Y. Yoshida: Plasma start-up experiments on the TST-2 spherical tokamak, Japan-Korea Workshop on “Physics and Technology of Heating and Current Drive in Fusion Plasmas” Hitachi Civic Center, Hitachi, Ibaraki, Dec 21-22, 2015.
- [36] A. Ejiri and TST-2 team: Recent activities in TST-2, The Fourth A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Seoul National University (SNU), Seoul, Korea, Mar 3-4, 2016.
- [37] K. Toida, A. Ejiri, H. Togashi, H. Homma, Y. Takase, N. Tsujii, R. Benedikt, M. Sonehara, T. Shinya, H. Furui, T. Takeuchi, K. Nakamura, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, H. Yamazaki: Electron temperature and density measurements by Thomson scattering in TST-2, The Fourth A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Seoul National University (SNU), Seoul, Korea, Mar 3-4, 2016..
- [38] W. Takahashi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Takeuchi, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: Study of ion flow in TST-2 ohmic plasma, The Fourth A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Seoul National University (SNU), Seoul, Korea, Mar 3-4, 2016.
- [39] H. Yamazaki, H. Furui, K. Yamasaki, T. Ushiki, Y. Takase, Y. Ono, A. Ejiri, N. Tsujii, B. Roidl, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, T. Takeuchi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi and K. Toida: Measurement of the current inside the current sheet of UTST merging plasma using a Rogowski prob, The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Napa, California, USA, Mar. 7-11, 2016.
- [40] W. Takahashi, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, H. Furui, T. Takeuchi, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: Measurement of ion flow in ohmic plasmas by Doppler spectroscopy on TST-2, The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Napa, California, USA, Mar. 7-11, 2016.
- 招待講演
- [41] Y. Takase: Non-inductive plasma start-up experiments on the TST-2 spherical tokamak: 18th Inter-

national Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.

(国内会議)

一般講演

- [42] 古井宏和、永島芳彦、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、新屋貴浩、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田祐亮、高橋航、戸井田和弥、山崎響: 球状トカマク TST-2 におけるロゴスキープローブを用いた電流揺動計測、第 11 回 QUEST 研究会、九州大学 筑紫キャンパス、2015 年 7 月 23-24 日。
- [43] 富樫央、江尻晶、高瀬雄一、戸井田和弥、本間寛人、永島芳彦、長谷川真、花田和明、TST-2 Team、QUEST Team: QUEST および TST-2 における トムソン散乱計測、第 11 回 QUEST 研究会、九州大学 筑紫キャンパス、2015 年 7 月 23-24 日。
- [44] 高瀬雄一、TST-2 グループ: TST-2 の最近の結果および TST-2 と LATE でのフロー測定結果、第 11 回 QUEST 研究会、九州大学 筑紫キャンパス、2015 年 7 月 23-24 日。
- [45] 富樫央、TST-2 チーム: TST-2 球状トカマクプラズマに対する電子温度・密度分布計測、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日。
- [46] 吉田裕亮、TST-2 チーム: マイクロ波干渉計を用いた電子密度分布の再構成、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日。
- [47] 矢嶋悟、TST-2 チーム: フォトダイオードアレイを用いた、TST-2 における低域混成波による加熱効果の測定、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日。
- [48] Wataru Takahashi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Takeuchi, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: TST-2 オーミックプラズマにおける可視分光器を用いたイオンフローの測定、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日。
- [49] 戸井田和弥、TST-2 チーム: TST-2 におけるトムソン散乱計測のファイバーアライメントシステムの開発、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日。
- [50] 山崎響、TST-2 チーム: TST-2 における高周波電流駆動プラズマの硬 X 線計測とその特性、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日。
- [51] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、新屋貴浩、古井宏和、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田祐亮、高橋航、戸井田和弥、山崎響: 最近の TST-2 の研究、NIFS 共同研究 ST 研究会 核融合研、土岐、2015 年 8 月 18-19 日。
- [52] 古井宏和、江尻晶、永島芳彦、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、山口隆史、新屋貴浩、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田裕亮 B、高橋航、戸井田和弥、山響: 小型ロゴスキークォイルを用いた電流計測におけるプラズマシースの影響の研究、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日。
- [53] 新屋貴浩、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、矢嶋悟、曾根原正晃、高橋航、竹内敏洋、戸井田和弥、富樫央、中村建大、古井宏和、本間寛人、山響、吉田裕亮、C. P. Moeller: LHW を用いた電流立ち上げ実験における波動計測、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日。
- [54] 矢嶋悟、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、山口隆史、新屋貴浩、古井宏和、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、吉田裕亮、高橋航、戸井田和弥、山響: TST-2 におけるフォトダイオードアレイを用いた軟 X 線計測によるエネルギー輸送の研究、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日。
- [55] 富樫央、江尻晶、戸井田和弥、本間寛人、山口隆史、新屋貴浩、高瀬雄一、辻井直人、吉田裕亮、曾根原正晃、高橋航、竹内敏、中村建大、古井宏和、矢嶋悟、山響、永島芳彦、長谷川真: 球状トカマク TST-2 におけるトムソン散乱計測法を用いた電子温度・密度分布計測、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日。
- [56] 吉田裕亮、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、曾根原正晃、山口隆史、新屋貴浩、古井宏和、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、高橋航、戸井田和弥、山響: マイクロ波干渉計による電子密度分布計測、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日。
- [57] 古井宏和、永島良彦、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、新屋貴浩、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田祐亮、高橋航、戸井田和弥、山崎響: 球状トカマク TST-2 におけるロゴスキープローブを用いた電流揺動計測、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (26pC03)。
- [58] 辻井直人、高瀬雄一、江尻晶、古井宏和、本間寛人、中村建大、高橋航、竹内敏洋、富樫央、戸井田和弥、新屋貴浩、曾根原正晃、矢嶋悟、山響、吉田裕亮: TST-2 におけるマイクロ波後方散乱を用いた低域混成波による非誘導プラズマ立ち上げの研究、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (26aD30P)。
- [59] 富樫央、江尻晶、戸井田和弥、本間寛人、新屋貴浩、高瀬雄一、辻井直人、吉田裕亮、曾根原正晃、高橋航、竹内敏洋、中村建大、古井宏和、矢嶋悟、山崎響、永島芳彦、長谷川真: TST-2 における非誘導立ち上げ球状トカマクプラズマの電子温度・密度分布計測、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (24pD28P)。
- [60] 江尻晶、新屋貴浩、古井宏和、辻井直人、矢嶋悟、吉田祐亮、高瀬雄一、曾根原正晃、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、高橋航、戸井田和弥、山響: 球状トカマク TST-2 における交流オーミックコイル運転によるプラズマ電流立ち上げ、第 32 回プラズマ・核融合



学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (27pC04).

- [61] 辻井直人、TST-2 グループ: TST-2 における低域混成波を用いた非誘導電流立ち上げ、第 5 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」、核融合科学研究所、2015 年 12 月 3 日.
- [62] 矢嶋悟、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、新屋貴浩、山崎響、曾根原正晃、高橋航、竹内敏洋、戸井田和弥、富樫央、中村建大、古井宏和、B. Roidl、本間寛人、吉田裕亮、C. P. Moeller: TST-2 における LHCD 用上側アンテナの設計及び取り付け計画の進展、第 5 回 ICRFICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」、核融合科学研究所、2015 年 12 月 3 日.

## 6.2 佐野研究室

佐野研究室では、熱平衡から遠く離れた系における法則を探索・解明することを目指し、実験・理論両面から研究を行っている。研究対象は大きく分けて、大自由度で熱ゆらぎが無視できるマクロな非平衡系、熱ゆらぎと非平衡ゆらぎが競合するミクロな非平衡系、そして非平衡性が本質的役割を果たす実例として、生命現象を取り扱う。

非平衡系では、外部からエネルギーや物質が絶えず流入・流出することにより、自発的な秩序やマクロな乱れが生じることが知られている。これらは一般に自己組織化現象と呼ばれ、流体现象などにおいてその存在が知られていたが、力学系の分岐理論やアトラクターの概念、カオスなどの理解の進展により、流体系に限らず、より広範な物理現象を含む大きなクラスとしての非線形力学系が持つ一般的性質として学問体系が再編成されつつある。そのような観点からは、流体力学、液晶やコロイドなどのソフトマター、化学反応系、生命システムまで含めて、パターン形成や非線形振動、カオスや乱流といった自己組織現象の動力学は共通した特徴を持っており、系の詳細によらず統一的に記述し扱うことが可能である。以上に加えて最近では、微小な系におけるゆらぎの法則や、系の記憶と制御に伴う情報量の寄与を含めた非平衡熱統計力学に関しても著しい進展が見られ、1 分子計測技術やナノテクノロジーの発展とも相まって、非平衡系におけるゆらぎの理解が飛躍的に進みつつある。さらに近年、細胞や分子モーター、異方性を利用して自己推進する粒子など、エネルギーを消費して自発的運動を示す物体、いわゆるアクティブマターが非平衡特有の物理現象として大いに注目を集めており、当研究室では実験・理論の両面からアクティブマター特有の物理法則の探索とより広範な非平衡系の枠組みとの融合に取り組んでいる。

以上の研究を通して我々は、広い範囲の非平衡系に適用可能で、一般的な熱統計力学的枠組みの構築を模索している。一方で、非平衡現象は多彩であり、系の対称性や境界条件、初期条件、有効自由度の数などにより多様な運動形態が生じ、普遍性だけではなくくりきれない多様性と新奇な現象が発見される自然現象の宝庫でもある。こうした非平衡系の個性と

普遍性の理解に向け、我々は典型的な非平衡系と思われる実験系を選び、非平衡度を制御して観測される新現象を詳細に観測するアプローチを取っている。また、実験結果と理論との緊密なフィードバックにより、新たな手法開発と概念構築を目指して研究を行っている。

スタッフの構成としては、助教の平岩徹也と客員共同研究員の太田隆夫（京大名誉教授）が在籍している。

### 6.2.1 非平衡系の動力学・統計力学

#### 古典乱流転移の普遍性

パイプ流やチャンネル流のような、開放せん断流と呼ばれる流れでは、整った流れである層流が線形安定であるにもかかわらず乱流への遷移が見られる。このような遷移における普遍的な法則の解明は一世紀以上の間未解決問題である。本研究室では、この遷移現象が非平衡系における相転移現象として捉えられる可能性に着目して研究を行っている。特に、Directed Percolation 普遍クラス (DP) という吸収状態 (系が一度入ると 2 度と出て行けない状態) への転移を示す系が属する代表的な非平衡臨界現象の普遍クラスに、属する可能性がある。実際、前年度までの研究で、大型のチャンネル実験系を構築して秩序変数や相関長の測定を行い、3 つのうち少なくとも 2 つの独立な臨界指数について DP と整合する結果が得られていた。

今年度は、前年度までに確立した実験系を用いてさらなる統計の蓄積を行った。その結果、残りひとつの臨界指数であった、相関時間の発散を特徴付ける臨界指数について、DP と整合する結果が得られた。さらに、活性状態の境界条件と流れがある系において、境界から十分遠方における非活性状態の時間間隔分布が普遍的なスケールリング則に従うことを数値計算で見出し、実験でも同様のスケールリング則が成り立っていることを確認した。一連の結果から、我々は、チャンネル流における乱流への遷移が DP に属すると結論付けた [14, 28, 61, 68]。

#### 成長界面ゆらぎの初期条件依存性に関する研究

ランダム界面の成長を記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 方程式は、普遍クラスを形成し、初期条件に応じて異なる普遍的なゆらぎの性質を発現する。これまでの研究により、液晶電気乱流中での界面成長は KPZ 普遍性クラスに属し、直線から成長する界面 (直線界面)・一点から成長する界面 (円形界面) でのゆらぎの性質が、対応する初期条件での厳密解と一致することが示された。

我々は、直線界面・円形界面の「中間」と考えられる、曲率を持った界面初期条件からの成長過程を、数値モデル・液晶の電気乱流中での界面成長過程について調べた。その結果、正の曲率を持った初期条件では直線界面から円形界面へのゆらぎの性質のクロス