6.2. 高瀬研究室

# 6.2 高瀬研究室

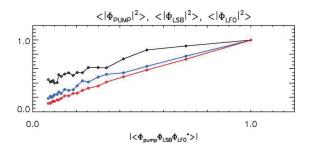
高瀬研究室では,核融合研究に用いられる「トカ マク」と呼ばれるプラズマ閉じ込め装置の高性能化 に向けた研究を行っている。特に磁場によるプラズ マ閉じ込め効率の指標である  $\beta$  (=プラズマ圧力/磁 場圧力)を高くとれる「球状トカマク」(ST)という 方式の TST-2 装置を用いて研究を行っている。トカ マクプラズマは大域的には電磁流体力学(MHD)で 記述され、その安定性を維持するにはトーラス大周 方向の電流(プラズマ電流  $I_{
m p}$  ) を駆動し, 定常的に 保つ必要がある。その有力な候補が高周波(RF)波 動による電流駆動である。現在2種類の方法を用い , 原理検証実験を行っている。また共同研究を通じて 高性能トカマクプラズマの自発電流発生機構の分析 を実施している。トカマクプラズマは遠非平衡の代 表的な物理系の典型例であり、その輸送現象は微視 的乱流揺動によって支配され, 乱流の理解と制御法 の確立がプラズマ閉じ込めの高性能化を可能にする。 TST-2 装置の乱流揺動の詳細な計測を通じ, 乱流揺 動の物理機構の解明を目指し,共同研究でプラズマ 中の乱流揺動に関わる遷移現象の分析を行っている。

## 6.2.1 TST-2 実験

TST-2 は柏キャンパスに設置された小型球状トカ マク型装置であり,プラズマ電流約  $100~{
m kA}$  の電磁誘導で駆動されるオーミックプラズマや電子サイク ロトロン波 (ECW) で駆動される RF プラズマを安 定に生成できる。 $\operatorname{ST}$  は高  $\beta$  で優れた  $\operatorname{MHD}$  安定性を もつが,核融合炉の小型化を実現するにはトーラス 内側に位置する中心ソレノイド(CS)を撤去する必 要がある。定常核融合燃焼時にはプラズマ電流をほ ぼ自発電流のみで維持することが可能であるが,ゼ 口から核融合燃焼に必要とされるレベルまでプラズ マ電流を非誘導法により立ち上げる方法はまだ確立 されていない。当グループでは3種類のRFを使った 実験研究を行っている。(1) 21 MHz の高次高調速波 (HHFW)によるプラズマ加熱,(2)2.45 GHz の電子 サイクロトロン共鳴を利用したゼロからのプラズマ 立ち上げ,(3)200 MHz の低域混成波(LHW)によ る RF 電流駆動の研究である。2009 年度には , LHW 電流駆動実験用の RF 電力伝送系等の整備, ECW を使ったプラズマ立ち上げの最適化,トムソン散乱 計測器やマイクロ波干渉計による観測研究が進捗し た。また, HHFW 加熱実験時の波動分析を行い,強 い RF 電場による非線形波動物理現象の更なる解明 を目指した研究が行われた。

#### 高周波加熱・電流駆動実験

TST-2 ではこれまで HHFW による電子加熱を研究してきた。HHFW はイオンサイクロトロン周波数の高次高調波帯の周波数を持ち,高  $\beta$  プラズマ中でも伝播可能であり,ランダウ減衰や走行時間減衰による電子加熱が期待できる。TST-2 を含む ST 装置

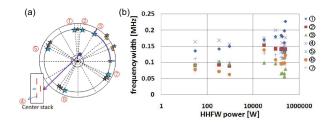


 $\boxtimes$  6.2.10: Comparison of autopowers of the pump wave (black), lower sideband wave (blue), low frequency oscillation (red) and the bispectral power of the three components. The y-intercept corresponds to the propagating mode component. The low frequency oscillation has a zero y-intercept, indicating that it is driven entirely by nonlinear beating of the pump and lower sideband waves. The pump and lower sideband waves have finite y-intercepts, indicating the presence of propagating wave components. [Y. Nagashima, et al., Physical Review Letters, 2010 in press.]

で, HHFW 加熱実験中に, 非線形波動現象の代表例 であるパラメトリック崩壊不安定性(PDI)が発生 し,外部から入射されたポンプ波の周辺に低域・広 域サイドバンドやイオンサイクロトロン周波数帯の 低周波振動が観測されている。PDI はポンプ波強度 の空間勾配程度の空間スケールを持つ局所的な非線 形現象であるが, TST-2 では局所的磁場強度が大き く異なる場所でも同様の周波数にスペクトルピーク が観測されている。これは局所的であるはずの PDI の非局所性を表す興味深い結果であり, 近年注目さ れている非局所的輸送現象の一つのチャンネルとし て , その物理機構の解明は大きな関心事である。 我々 は,新しい非線形データ解析手法であるバイスペク トルパワー解析を実験データに適用し,以下のよう な物理機構と矛盾しない実験解析結果を得た。まず PDI がある空間点で発生することによって,低域サ イドバンド周波数をもつ伝搬モードと,伝搬しない イオンサイクロトロン準モードが励起される。次に、 その伝搬モードはプラズマ中を伝搬し、そのエネル ギーは離れた場所に伝達される。そして,ポンプ波 と低域サイドバンドとのビートによってプラズマを 振動させ,その結果観測位置によらず,同様なポン プ波・低域サイドバンド・低周波振動のスペクトル ークが観測される。この分析によって,単純なパ ワースペクトル解析からでは判別不可能な、ビート 成分と伝搬モード成分の差別化に初めて成功し,観 測の背景に潜む物理機構の解明につながった。

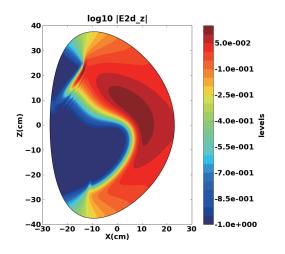
昨年度までの HHFW 加熱実験で、ポンプ波 (HHFW) 成分の有意な周波数広がりが観測され、ポンプ波がプラズマ中を伝搬するにつれ散乱を重ね、周波数幅が増大していくことが明らかとなった。今年度は、周波数広がりの原因が PDI である可能性を検証すべく、閾値パワーを見出すため低パワー(数  $W \sim 1 \, \mathrm{kW}$ )で実験を行った。低パワー入射時の周波数幅を昨年の

6.2. 高瀬研究室 6. 一般物理実験



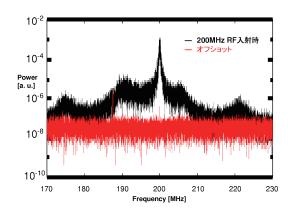
⊠ 6.2.11: (a) Locations on RF magnetic probes on the midplane cross section of TST-2. (b) RF power dependence of the frequency width of the pump wave, measured by magnetic probes.

高パワー  $(30\,\mathrm{kW}\sim250\,\mathrm{kW})$  入射時の周波数幅と比較したところ,図 6.2.11 に示すように周波数幅に,入射パワーに対する非線形な振る舞いは見られなかった。従って,周波数広がりの原因が PDI である可能性は低いと考えられる。



⊠ 6.2.12: Wave field distribution in the cross section of TST-2 plasma.

LHW による電流駆動の有効性を検討するため TST-2 における波動の励起, 伝搬, 吸収を数値解析 コードを用いて評価した。波動励起は有限要素法コー ド COMSOL に基づく RF アンテナ解析コードを用 いて計算した。プラズマは冷たいプラズマ近似の誘電 率をもち,強い損失をもつ媒体としてモデルされてい る。計算の結果,TST-2で使用予定のコムラインア ンテナにより , 電場はポロイダル成分 , 磁場はトロイ ダル成分がそれぞれ支配的である速波(FW)の進行 波が励起されることが確認された。効率よい電流駆動 を達成するには FW が LHW にモード変換される必 要がある。回折効果を正しく取り扱える TORIC-LH 全波コードにより, TST-2 における LHW 電流駆動 実験の解析を行った。ECW で生成した低密度,低 電流プラズマでは LHW による中心電流駆動が可能 であることが示された。電流を増加させている間は 低密度に保つことが重要であり、中心電流駆動を保



⊠ 6.2.13: Power spectrum of the RF signal measured by an RF magnetic probe inside TST-2 vacuum vessel.

つためには,電流が増加するにつれて磁力線方向の波数を減少させる必要がある。これらの計算結果および TST-2 における初期実験結果に基づき,電流立ち上げ実験のために適正な偏波および波数スペクトルの制御性をもつ,最適化された LHW アンテナの設計を行う。電流駆動効率を保守的に見積もっても TST-2 において  $200\,kW$  の RF パワーで駆動できる電流は  $150\,kA$  程度であり,本手法による  $100\,kA$  レベルへの電流立ち上げの有効性を評価するのに適切であると判断できる。本手法は核融合発電炉でも,低密度,低電流の初期プラズマを追加熱をするのに十分な電流レベルまで立ち上げるのに使うことができる。TST-2 における実験の成功は低アスペクト比の核融合炉に必要な CS 性能を定量的に評価する科学的基盤を与える。

LHW 非誘導電流駆動実験に向けて,本年度は RF 発振器(周波数  $200\,\mathrm{MHz}$ )4 系統および伝送路の整備を進め,HHFW 励起用アンテナを用いて  $200\,\mathrm{MHz}$  RF パワーのプラズマ入射を行った。図 6.2.13 に,プラズマに RF パワーを入射した場合と入射しなかった場合の真空容器内磁気プローブで測定した RF 信号のパワースペクトルを示す。2010 年度には,進行波を励起できるコムラインアンテナを用い,電子加熱および電流駆動の効果を調べる予定である。

## 非誘導立ち上げ実験

ST型核融合炉の成立性は、非誘導立ち上げの成否にかかっている。TST-2では、プラズマの無い状態からST型トーラスプラズマをECWを使った非誘導法で立ち上げる研究を行っている。本年度は、イオン種の違いによる相違を、水素プラズマを用いて調べ、密度・温度の計測およるよびでは、十分な壁洗浄を行い放電波形の再現性を保する必要がある。放電波形の履歴やプラズマの放電洗浄が有効であることがわかった。また、重水素と水素の発光強度の解析から、重水素プラズマでも、

6.2. 高瀬研究室

放電中に水素が壁から叩き出され,放電後半では水素と重水素が同程度存在することが分かった。水素放電と重水素放電を比較すると,後者の方がトカマク配位を形成するまでの時間が短いことがわかった(図 6.2.14)。加熱パワーを下げるとこの時間は長くなるので,重水素は水素よりも効率よく加熱されている可能性がある。加熱に用いる波の伝搬・吸収を反映する漏洩電磁波を測定したところ,トーラス配位形成直前に特徴的な振る舞いを示した。

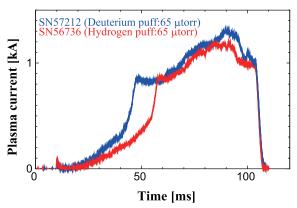


図 6.2.14: Time evolutions of the plasma current for hydrogen (red) and deuterium (blue) plasmas.

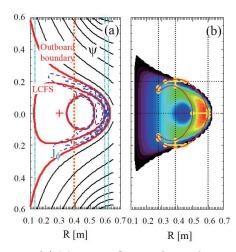
5つの異なる経路のマイクロ波 (50 GHz) 干渉計を整備し、経路積分密度を測定して 2 次元密度分布を推定した。その結果、トーラス外側にパナナ状の高密度領域が存在することがわかった。下記に述べる温度測定から、この領域は温度も高いことがわかった。すなわちバナナ状の高圧力領域が存在する [12]。平衡の観点から考えると、これは、非等方圧力の存在、磁気軸付近の圧力が周辺部に比べて低くなるホロー型圧力分布の存在を意味する。新たに非等方圧力を考慮した平衡解析を行った結果、パナナ状高圧力領域を再現できる平衡解が存在することが分かった(図 6.2.15) [H. Kurashina, et al., Plasma Fusion Res., submitted]。

中性ヘリウムの発光線(706.5 nm, 728.1 nm)の強度比は電子温度に依存することが知られている。分光システムを新たに製作・設置して測定を行った。衝突輻射モデルを用いて電子温度分布を推定したところ,電子温度が中心部より周辺部の方が高くなる傾向がみられた。測定温度の絶対値は他の計測と系統的な違いがみられた。これは,準位分布が低電子密度では平衡に達していないためと考えられる。

非誘導電流立ち上げを補助するため,電子銃を用いて電子を供給し,磁力線に沿った電流を供給する(coaxial helicity injection)ためのバイアス電源を製作し,試験運転を行った[13]。

## トムソン散乱計測

トムソン散乱計測は,プラズマの基本パラメータである電子温度・電子密度を測定する手法として知られているが,散乱信号が微小であること,精度のよ



⊠ 6.2.15: (a) Magnetic flux surfaces obtained from equilibrium analysis, and (b) shape of the high density region (red) and equilibrium pressure contours.

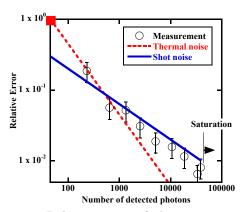


図 6.2.16: Relative error of the time integrated signal (open circles). Theoretical thermal noise (dashed line) and theoretical shot noise (solid line) are also plotted.

6.2. 高瀬研究室 6. 一般物理実験

い絶対校正が必要であることから,システム構築には高度な技量と経験が要求され,国内でも稼働しているシステムは数少ない。本年度,レーザーパワーの増強による S/N 比の改善,多チャンネル化の準備として新規ポリクロメータの設計・製作,マルチパス散乱光学系のための準備研究を行った。

現在用いているポリクロメータは,核融合科学研究所の LHD 装置のために開発されたものである。TST-2では,LHDで用いられているファイバーよりも開口数の大きなファイバーを採用しており,新規にポリクロメータを製作するにあたり,より大きなファイバーを採用しており,新規に対したできる光学系を設計した。また,測をできるマルチパスによる前方散乱,後方散乱計測をできるであり,APDのプランプを設計・試作・評価した。試作した検出系では,パルス測定時の半値全幅は10 nsであり,従出来には、アンプを設計・試作・評価した。また,測定以びて高速応答を得ることに成功した。また,測定となて、関係というでは、対したところ,検出光では、対したところ,検出光で表があるの以上でショットノイズが支配的となり,ほかが表した。となり,は、1000以上でショットノイズが支配的となり,ほの100以上であることが確認できた(図 6.2.16)。

前方・後方散乱による温度の非等方性の検出,低密度プラズマの測定には,マルチパス入射光学系対適している。マルチパス光学系として,簡便で効果的であると考えられる球面鏡共焦点システムについて検討・予備実験を行った。レーザー光路の解析的対近似式を導出し,十分な精度を持つことを数値計算と比較して確認した。また実際に,可視光を用いた実験を行い,この近似式が成立していることを開いた。近似式によって,光学系の設置・軸合わせ誤差の影響を評価することが可能となり,実際に TST-2 装置に共焦点システムを導入した場合のアライメント精度の許容誤差を求めた。

トムソン散乱計測に用いるレーザーを出力  $0.45~\mathrm{J}$  のものから  $1.6~\mathrm{J}$  のものに交換した結果 ,  $\mathrm{S/N}$  比が増加した。また , ポリクロメーターの校正分解能を  $0.4\mathrm{nm}$  に改善し , 計測する波長分解チャンネルを 3 から  $5~\mathrm{cr}$  に増やした。このシステムを用いてオーミックプラズマの電子温度分布を求めることに成功した (図 6.2.17) [10]。

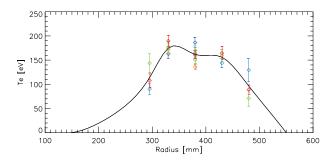
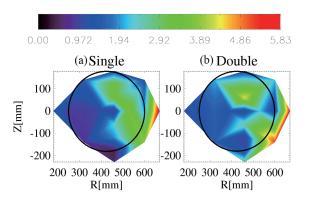


図 6.2.17: Electron temperature profile measured by Thomson scattering.

## オーミックプラズマの揺動計測

TST-2 では MHD 緩和現象に伴う間欠的揺動,お よび間欠的/非間欠的な乱流揺動が観測されている。 本年度は硬エックス線測定器や周辺ラングミュアフ ローブを整備し,観測を行った。硬エックス線観測で は,オーム加熱によって高速電子が生成され,MHD 緩和現象に伴う揺動により高速電子が径方向外側に 輸送され,真空容器と衝突することによって硬エッ クス線が発生することが判明した [11]。またプラズマ 周辺部における,ラングミュアプローブによる間欠 的乱流揺動の解析により,周辺プラズマでは間欠的 揺動が径方向輸送を大きく担うことが明らかになっ た [14]。一方 , トカマクの乱流輸送モデルでは , 温 度勾配に起因する乱流揺動が重要な役割を担ってい るが,その同定には乱流温度揺動の計測が必要であ り,本年度は条件付き場合分けによる電子温度揺動 の計測法を開発した [Y. Nagashima, et al., Plasma Fusion Res., Special Issue, in press. J. Ozaki, et al., Plasma Fusion Res., submitted.

## 6.2.2 UTST 実験



 $\boxtimes$  6.2.18: Spatial distribution of the RF toroidal magnetic field amplitude on the R-z plane for (a) single-strap excitation and (b) double-strap excitation. The field amplitude decreases rapidly in the evanescent region outside the plasma boundary shown by the black ellipse. [T. Wakatsuki, et al., Plasma Fusion Res., in press.]

ST で実現できる高  $\beta$  および高閉じ込め特性を活用すれば,小型装置で体積中性子源或いは発電実証を実現し,核融合開発の加速に貢献できる。UTST はST の特徴である高  $\beta$  を更に高めた「超高ベータ ST プラズマ」を生成・維持する新手法の開発を目的として建設された。ST 核融合炉で採用されるためには,トーラス中心部に位置する CS を用いない方法でなければならない。UTST では,真空容器外に配置された上下 2 対のコイルが作る磁気中性点付近に 2 個の ST プラズマを生成し,軸対称合体させる。磁場強度は 0.15 T 程度で,合体後には大半径 0.4 m,アス

**6.** 一般物理実験 6.2. 高瀬研究室

ペクト比 2, 最大プラズマ電流 100 kA 程度の高ベー タ ST プラズマ生成に成功している。プラズマ加熱 は合体に伴う磁気リコネクション(磁力線の繋ぎ換 え)による磁場から粒子へのエネルギー変換による と考えられる。このようにして生成された高ベータ ST プラズマの加熱・維持を目的として HHFW の入 射を行った。ダブルストラップアンテナによりトロ イダルモード数  $\pm 8$  の波,シングルストラップアン テナによりモード数0を中心とした幅広いモード成 分をもつ波を励起した。UTST 内部に挿入されてい るトロイダル方向,鉛直方向の磁場を計測する $9 \times 9$ の磁気プローブアレイを用いて, RF 磁場の空間分 布を直接計測した。波動磁場はトロイダル方向偏波 が強く,HHFW の励起と矛盾しない。 また RF 磁場 振幅分布からは、真空容器内側で磁場振幅が小さく なっていることが分かった 6.2.18。更に遅延時間解析から波動の吸収は弱く、波動が長い距離をトロイダル方向に伝播していることを示す結果が得られた。 しかし, TST-2 における HHFW 加熱実験で見られ たような PDI は , UTST 実験では今のところ観測さ れていない。

# 6.2.3 CHS 装置の閉じ込め遷移現象の実 験解析

高閉じ込めモード (H-mode) プラズマへの遷移を トリガーする物理機構は現在でも判明していない重 要な研究テーマである。H-mode で観測されている 速度シアの生成要因として, 乱流渦の傾斜による乱 流から平均速度シアへの運動量輸送が重要な役割を 担うと考えられている。核融合研・九州大学との共同 研究で CHS プラズマの H-mode プラズマの乱流揺 動の実験解析の結果,遷移前に乱流レイノルズ応力 の増大とそれに対応した静電ポテンシャル構造の変 動の観測に成功した [Y. Nagashima, Plasma Fusion Res., in press。ポロイダル方向と径方向の速度揺動 間の位相解析を行い,遷移の前で平均的なポテンシャ ル変動の兆候が無い時間帯では位相差が  $-\pi/2$  程度 であったのが,遷移の前に平均ポテンシャルの変動 が始まるのとほぼ同期して0に近づくことが判明し, 確かに乱流渦の傾斜の発生の観測に成功した。

## <報文>

#### (原著論文)

- M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri and Y. Takase: "Transient excitation of zonal flows by geodesic acoustic modes", Plasma Phys. Control. Fusion 51 085002 (2009).
- [2] Y Nagashima, K Itoh, A Fujisawa, K Shinohara, S-I Itoh, T Ido, M Yagi, K Hoshino, A Ejiri, Y Takase, K Uehara and Y Miura: "Boundary of the geodesic acoustic eigenmode in the vicinity of the magnetic separatrix", Plasma Phys. Control. Fusion 51 065019 (2009).
- [3] A. Ejiri, Y. Takase, T. Oosako, T. Yamaguchi, Y. Adachi, O. Watanabe, Y. Nagashima, B.I.

- An, H. Kobayashi, H. Kurashina, H. Hayashi, H. Matsuzawa, K. Yamada, H. Tojo, T. Masuda, M. Sasaki, R. Kumazawa, H. Kasahara and F. Shimpo: "Non-inductive plasma current start-up by EC and RF power in the TST-2 spherical tokamak", Nucl. Fusion 49 065010 (2009).
- [4] T. Oosako, Y. Takase, A. Ejiri, Y. Nagashima, Y. Adachi, H. Kasahara, T. Yamada, O. Watanabe, H. Tojo, S. Kainaga, J. Sugiyama, T. Yamaguchi, B. An, H. Hayashi, H. Kobayashi, H. Kurashina, H. Matsuzawa, K. Yamada, R. Kumazawa, F. Shimpo, Y. Ono, T. Masuda and M. Sasaki: "Parametric decay instability during high harmonic fast wave heating experiments on the TST-2 spherical tokamak", Nucl. Fusion 49 065020 (2009).
- [5] H. Tojo, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Nagashima, O. Watanabe, Y. Adachi, T. Oosako, T. Yamaguchi, B.I. An, H. Kobayashi, H. Kurashina, H. Matsuzawa, K. Yamada, M. Sasaki, T. Masuda: "Phase Alignments between MHD Modes Followed by Minor Collapses on TST-2", Plasma Fusion Res. 4 015 (2009).
- [6] Y. Nagashima, A. Ejiri, A. Fujisawa, and Y. Takase: "Calculation of Beam Trajectories of a Heavy Ion Beam Probe Diagnostic in the TST-2 Spherical Tokamak", IEEJ Trans. FM, 129 pp.575 (2009).
- [7] M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri, Y. Takase: "Poloidal eigenmode of the geodesic acoustic mode in the limit of high safety factor", J. Plasma Phys. 75 721 (2009).

#### (学位論文)

- [8] 増田鉄也: "Analysis of Tokamak Plasmas with High Self-Driven Current (高自発電流をもつトカマクプラズマの解析)" (博士論文).
- [9] 大迫琢也: "A Study of the High Harmonic Fast Wave in Spherical Tokamak Plasmas (球状トカマクプラズマにおける高次高調速波の研究)" (博士論文).
- [10] 山口隆史: "Electron temperature and density measurements by Thomson scattering in the TST-2 spherical tokamak (TST-2 球状トカマクにおけるトムソン散乱による電子密度・温度計測)" (修士論文).
- [11] 安秉日: "X 線測定による球状トカマクプラズマにおける電磁流体力学的現象の研究" (修士論文).
- [12] 倉品博樹: "TST-2 球状トカマクにおける非誘導立ち 上げプラズマの電子密度分布計測" (修士論文)
- [13] 林裕之: "電子サイクロトロン共鳴加熱プラズマにおける熱放出型電子銃を用いた電流制御の研究"(修士論文).
- [14] 山田幸太郎: "TST-2 プラズマのスクレイプオフ層に おける静電プローブを用いた揺動測定" (修士論文).

6.2. 高瀬研究室 6. 一般物理実験

#### <学術講演>

## (国際会議)

#### 一般講演

- [15] T. Oosako, et al.: "High Harmonic Fast Wave experiments on TST-2 and UTST": The 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Gent, Belgium, June 24-26, 2009.
- [16] A. Ejiri, et al.: "Microwave reflectometry and interferometry in the TST-2 spherical tokamak": International Workshop on Microwave Laser Diagnostics for burning plasma experiment (IWML-2009) Toki, Aug. 17-18, 2009.
- [17] T. Yamada, et al.: "Merging Start-up and Sustainment Experiments on UTST": The 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, Madison, USA, Oct. 22-24, 2009.
- [18] Y. Takase, et al.: "RF Experiments on TST-2": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [19] Y. Nagashima, et al.: "Observation of non-locality of parametric decay during rf injection experiments on TST-2": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [20] T. YAMADA, et al.: "Spherical tokamak start-up and sustainment experiments on UTST": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [21] R. Imazawa, et al.: "Experimental Demonstration of Double Null Merging Start-up on UTST": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [22] T. Wakatsuki, et al.: "Measurements of HHFW profile in UTST": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [23] A. Ejiri, et al.: "Development of a bright polychromator for Thomson scattering measurements": 19th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 8 - 11, 2009, P1-81
- [24] T. Yamaguchi, et al.: "Development of a Thomson scattering system in the TST-2 spherical tokamak": 19th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 8 11, 2009, P1-82
- [25] M. Sugihara, et al.: "Density regime of low-aspectratio RFP plasmas in RELAX": 19th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 8 - 11, 2009, P2-34
- [26] Y. Nagashima, et al.: "Nonlinear phenomena of edge fluctuations in RF range during high harmonic fast wave heating experiments in the TST-2 spherical tokamak": US-Japan RF WorkShop, General Atomics USA, Mar. 8-10, 2010.

#### 招待講演

- [27] Y. Takase, for the TST-2 Group: "Equilibrium Analysis of EC-Sustained and RF-Sustained ST Plasmas": The 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Gent, Belgium, June 24-26, 2009.
- [28] Y. Takase, Y. Ono, T. Maekawa, H. Zushi: "ST Research in Japan (invited)": MAST Research Forum, Culham, UK, Sep. 14-15, 2009.
- [29] Y. Takase, TST-2 Team, UTST Team: "RF Start-up, Heating and Current Drive Studies on TST-2 and UTST (invited)": The 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, Madison, USA, Oct. 22-24, 2009.
- [30] H. Idei, et al.: "Recent Progress in QUEST and Development of CW EBWH/CD System (invited)": The 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, Madison, USA, Oct. 22-24, 2009.

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [31] 江尻晶,高瀬雄一: "非誘導トカマク立ち上げ過程における電場,粒子軌道,電流":日本物理学会2009年 秋季大会(熊本)2009年9月25日-28日:28pYP-6
- [32] 花田和明,他: "QUEST における高周波を用いた電流立ち上げ":日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本) 2009 年 9 月 25 日-28 日:28pYP-2
- [33] 永島芳彦,他:"高次高調速波入射実験中のパラメトリック崩壊に伴う揺動のプラズマ表面近傍の振る舞い":日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本) 2009 年9月25日-28日:25aYP-2
- [34] 大迫琢也,他: "UTST 球状トカマクにおける 高次 高調速波空間分布測定":日本物理学会 2009 年秋季 大会(熊本) 2009 年 9 月 25 日-28 日: 25aYP-1
- [35] 江尻晶:"TST-2 における非誘導立ち上げ実験 とモデリング": 自律燃焼系プラズマでの特性予測の高精度化に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に関する体系的研究」及び核融合エネルギーフォーラム「閉じ込め・輸送サブクラスター会合」合同研究会プログラム(土岐)2009年1月8-9日
- [36] 江尻晶,高瀬雄一: "高周波波動およびマイクロ波反射計を用いた高周波 tae 計測模擬実験": 特定領域「プラズマ燃焼のための先進計測」及び核融合エネルギーフォーラム計測サブクラスター合同シンポジウム/ 講演会(土岐)2010年2月24-26日
- [37] 平塚 淳一, 山口 隆史, 高瀬 雄一, 江尻 晶: "共焦点ミラーを用いたトムソン散乱計測": 第13回若手科学者によるプラズマ研究会(那珂)2010年3月10-12日
- [38] 山口隆史,他:"ECH スタートアッププラズマにおけるトムソン散乱計測":第 13 回若手科学者によるプラズマ研究会(那珂)2010年3月10日-12日
- [39] 永島芳彦,他:"コンディショナル法による電子温度 揺動の推定":第65回日本物理学会年次大会(岡山) 2010年3月21日

6.3. 坪野研究室

#### 招待講演

[40] 永島芳彦: "若手企画講演 プローブデータの揺動解析 入門": プラズマ科学のフロンティア 2009 研究会 (土 岐) 2009 年 9 月 2 日-4 日

[41] 永島芳彦: "乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究 4. 基礎プラズマ乱流実験研究": プラズマ・核融合学会第 26 回年会(京都)2008 年 12 月 1 日-4 日,シンポジウム IV-5

# 6.3 坪野研究室

本研究室では重力および相対論に関する実験を行っているが、その中でも重力波検出実験は一貫して最大の研究テーマとなっている。今年度はそれまで助教を務めていた安東正樹氏が京大准教授に転出し、かわりに麻生洋一氏が助教に着任した。

重力波は光速度で伝搬する時空のひずみであり、 超新星爆発や連星中性子星の合体などの非常に激し い天体現象にともなって発生する。また宇宙のごく 初期に起源をもつ重力波も予想されており、将来的 には重力波によって、電磁波では決して見ることが できない宇宙の姿をとらえるようになると期待され る。これらの重力波観測によって、新しい分野「 力波天文学」を確立することが現在の重力波研究の 目的である。重力波を使って宇宙を見ることは、人 類の新たな知の開拓につながる。

これまでの研究では、TAMA300による重力波探 査と、次世代レーザー干渉計 LCGT の開発が2つの 主軸となっていた。最近これにくわえて、宇宙空間 を利用した重力波検出計画が構想されるようになっ た。地上に干渉計を作る限り、基線長の制限や地面 振動といった障害は避けることができない。しかし 自由な宇宙空間ではこれらの制限が取り払われ、理 想的な環境が期待できる。特に、地上では不可能な 低周波の重力波検出が可能となることが大きな魅力 である。われわれは、日本独自のスペース重力波検 出器 DECIGO を提唱している。これを実現するため の基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験など の準備を進めている。これらの基礎研究をもとにし て、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初 期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえ ようとする計画を推進中である。[42, 52, 55, 57, 58]

## 6.3.1 地上レーザー干渉計重力波検出器

次期大型レーザー干渉計計画 LCGT

日本のグループが中心となって進めている LCGT 計画は、基線長  $3 \, \mathrm{km}$  のレーザー干渉計型重力波検出器を神岡地下のサイトに建設するものである。この重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を  $20 \, \mathrm{K}$  の低温に冷却するとともに、高出力レーザー光源を用い、干渉計方式を RSE と呼ばれる方式を採用する事で、TAMA より  $2 \, \mathrm{tm}$  が以上高い感度が実現される。それによって、連星合体からの重力波については約200 Mpc 遠方のイベントまで観測する事ができる見込みである。その範囲にある銀河数を考慮すると、1年に  $10 \, \mathrm{tm}$  回程度の頻度で重力波イベントを観測できることが期待できる。また、もし我々の銀河系内で超新星爆発が発生すれば、そこからの重力波も、LCGTによって十分観測可能である。[2, 13, 32, 49]