



インフォメーション

■会議報告

第56回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (APS-DPP) 年会

洲鎌英雄 (核融合研), 森田 繁 (核融合研),
長友英夫 (阪大), 伊藤 淳 (核融合研)

2014年10月27日～31日の5日間, 米国ルイジアナ州ニューオリンズにて, 標記会合が開催された。会場となったニューオリンズマリOTTホテルは, フランス植民地時代の雰囲気を残すフレンチクォーター地区の一角に位置し, 近くのミシシッピ川を通る蒸気船の汽笛が時折ホテルの窓越しに聞こえてくるところにある (図1)。月曜日の朝, 最初に行われた "Ignition at NIF: Where we have been,

and where we are going" というタイトルの基調講演では, M. Rosen 氏 (LLNL) により, NIF のここ数年の研究成果と今後について詳細な報告がなされた。イグニッションに向けて, 流体力学的不安定性等の諸問題を克服するために, 様々な努力と工夫を重ねた研究現場の様子が伝わってきた。James Clerk Maxwell Prize は, C.M. Surko 氏 (UCSD) に贈られた。陽電子プラズマの閉じ込めと応用のための技術開発およびトカマクプラズマにおける波動と乱流の実験に関する研究業績が評価されたことによるものであり, 木曜の朝に "Antimatter Plasmas in the Laboratory" というタイトルで C.M. Surko 氏による記念講演が行われた。サンクトペテルブルクでの IAEA 核融合エネルギー会議の直後ということもあり, 多少参加者が減るかとも心配されたが, 月曜から金曜まで, 広いマリOTTホテルの大中小様々な会議室において, プラズマ物理の関わる多種多様な研究テーマに関する膨大な件数の講演とポスター発表 (図2) を通して, 熱気のある議論が交わされた。次回は, 2015年11月16日～20日にジョージア州サバンナで開催される。以下, それぞれの分野ごとに詳細を報告する。 (洲鎌)



図1 会場のマリOTTホテルから見えるミシシッピ川の蒸気船。

磁場閉じ込め核融合プラズマ (実験)

会議では周辺プラズマ物理, ダイバータ物理, ITER 物理, 高エネルギー粒子輸送, 3次元構造を有する磁場によるプラズマ閉じ込め, MHD 物理に関する招待講演が会期中の午前のセッションで行われ, 同時に DIII-D, NSTX, Alcator C-mod, ASDEX, KSTAR トカマクの実験結果について特別セッションが設けられていた。本会議直前に IAEA 会議が開催されたことも影響したのか, 米国以外の国 (特にアジア) からの発表が少なかったように感じた。

磁場閉じ込めの実験分野では, これまでの「コアプラズマの輸送研究」に代わって「ダイバータを含む周辺プラズマ制御とその輸送研究」が会議の中心課題になりつつあった。具体的には, ITER での ELM バーストに起因したダイバータ高熱流束を軽減するための RMP 磁場印加による周辺プラズマ制御とその物理機構の理解, 定常核融合プラズマでのダイバータ熱流束軽減のための周辺不純物放射を利用したデタッチプラズマの生成とその物理機構の理解, 同じくダイバータ熱流束軽減のための新しいダイバータ配位 (例えばスノーフレイクダイバータ, スーパー X ダイバータ等) の研究に関連して, 非常に多くの結果が報告された。

JET ではタングステンダイバータとベリリウム第一壁を採用した結果, H モード遷移後の周辺ペDESTAL 圧力が改造前のカーボンダイバータ放電と比較して減少していることが観測された。装置改造後に炭素不純物が激減した結果, 周辺部の BS 電流分布が変化したこと, 周辺の Z_{eff} の低下とイオン密度の上昇によりイオンの加熱効率が低下したこと等をその理由として挙げている。不純物ガスパフを導入し周辺 Z_{eff} を変化させながら H モードの特性を調べている。DIII-D ではプラズマ形状 (三角度 δ) をより急峻にし, kink-peeling モード限界を拡張することにより, 従来の QH モードから SuperH モードへの遷移を観測した。SuperH



図2 ポスターセッション会場の様子。

モード遷移に伴いペデスタル部の密度は急激に上昇するが、遷移後100ms程度で電子温度が急激に減少した。安定な状態を維持することが今後の課題となっている。同じくDIII-DではRMP磁場を印加した時の磁場応答が高磁場側（トラス内側）で観測され始めた。これまでの低磁場側（トラス外側）での磁気プローブ計測では（RMPコイルがトラス外側に配置されているため）観測が難しかったプラズマによる磁場応答を精度よく観測できるようになり、RMP磁場と周辺プラズマの相互作用の研究が加速するものと期待される。デタッチプラズマや新しいダイバータ配位におけるプラズマ周辺部での不純物挙動に関連して、多くの不純物輸送に関する研究がシミュレーション結果と共に報告されていた。これら一連の周辺プラズマに関する研究は最近の核融合研究の動向を端的に反映している。DIII-Dのポスターセッションでもほとんどの発表がデタッチプラズマ、RMPコイル、新ダイバータ配位に関連していた。

ヘリカル装置に加えて、トカマク装置でも3次元磁場構造を反映した輸送研究（例えばRPM磁場印加時の周辺プラズマ研究等）の重要性が認識され始めており、Spong氏による「3次元磁場構造とトロイダルプラズマ物理」についてのチュートリアル講演は注目を集めていた。3次元磁場構造に関連した実験研究の一例として、DIII-Dでの結果（磁気島の磁場構造変化）がLHDでの結果と比較検討する形で居田氏（核融合科学研究所）より招待講演として報告された。究極の3次元磁場構造を有するC-2装置（Tri Alpha Energy, Inc.）を代表とするFRC装置についても多くの研究報告があり、その招待講演も非常に多くの聴衆を集めていた。残念ながら米国ではヘリカル装置研究はあまり活発ではないが、よりトカマクに近い磁場配位を追究した準軸対称装置QUASAR（PPPL）計画がGates氏によりポスター発表された。同じポスターセッションではドイツのW7-X計画やLHDの実験結果についても、小型ステラレータ装置（HSX：ウィスコンシン大、CTH：アーバーン大）の実験結果と共に報告された。小型ステラレータ装置（SCR-I: $R/a = 24/6$ cm）ではあるが、中南米では初めてのヘリカル装置計画がコスタリカで進行中であり、磁場コイルの製作に3Dプリンターを活用した装置建設の現状報告がなされていた。個人的に非常に親しみを感じた。その他トピックスとして、いかにも米国らしい「Who will save the tokamak - Harry Potter, Arnold Schwarzenegger, or Shaquille O'Neil?」と題したFreidberg氏（MIT）による報告があった。核融合炉が巨大な大きさになることや定常運転の難しさを指摘したごく一般的な内容ではあるが、ポスター発表の巧妙さもあって常に黒山の人だかり状態で、核融合炉をめざしている米国研究者の危機意識を強く感じた。

新装置の建設に関しては、球状トカマクのMAST（2016年稼働予定）およびNSTX（2015年春稼働予定）について、また、Alcator C-modの後継機としてADX計画について報告があった。MASTも新しいダイバータ配位の研究を装置改造の主眼の一つに置いているが、ADX（Advanced Di-

vertor test eXperiment）はその名の通り、タングステン材料を第一壁とするダイバータ研究トカマク装置である。高磁場（6.5 T, 1.5 MA）を用いたコンパクトな装置でITER並みのダイバータ熱流束（ $P_{aux} \cdot B/R \sim 110$ MW-T/m）を実現し（現有装置のダイバータ熱流束はITERの1/5-1/10程度、 < 30 MW-T/m）、ダイバータプラズマの有効な制御法を確立することを目的としている。（森田）

磁場閉じ込め核融合プラズマ（理論）

以下では、磁場閉じ込め核融合理論分野で印象に残った発表について紹介する。拡張MHDあるいは二流体モデルによる磁場閉じ込めプラズマのシミュレーション研究が、NIMRODチームを中心に行われている。C.R. Sovinec氏（Univ. Wisconsin）のポスターでは、RFPやスフェロマックの磁気緩和現象、球状トカマクにおける非誘導電流、トカマクにおけるELM、RWM不安定性や共鳴磁場摂動（RMP）等の研究へのNIMRODコードの応用に関するオーバービューが示された。C.M. Jacobian氏（Univ. Wisconsin）のポスターでは、MST装置のRFPプラズマに対するNIMRODコードと一流体MHDコードの非線形シミュレーション結果の比較がなされ、前者の方が磁場揺動の振幅が小さく、より実験値に近い値を与え、実験結果の定量的再現には二流体効果が必要であるとの報告がなされた。

ヘリカル系やRMPが加わったトカマク配位におけるプラズマ回転、電場やブートストラップ電流の分布を正確に予測するために、新古典輸送シミュレーションコードの高精度化、シミュレーション結果のベンチマークテストや実験結果との比較が精力的に進められている。M. Landreman氏（Univ. Maryland）による講演では、W7XやLHDの磁場配位に対するシミュレーションの例を示しながら、ドリフト運動論の方程式に含まれる $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト項や衝突演算子モデルの違いが新古典輸送係数の計算結果に与える影響やその精密化についての詳細が報告された。従来よく用いられる非圧縮 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ フロー近似は、典型的な実験条件では妥当なものであるが、ポロイダルマッハ数が1/3を超えるような高速 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが生じる場合には、圧縮性を考慮した正確な取り扱いが必要であるという結果が得られている。

ジャイロ運動論的シミュレーションに基づく乱流輸送研究も盛んに進められている。優れた業績を挙げている若手女性研究者に贈られるWeimer Awardを受賞したA. White氏（MIT）の記念講演では、Alcator C-ModのI-modeプラズマに対するジャイロ運動論的シミュレーションと実験結果の比較が行われ、コアプラズマのトロイダル回転に伴う $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ フローシアアがI-modeにおける乱流揺動の低減をもたらしているとの見解が示された。他にも、DIII-D, ASDEX-U, EAST, KSTAR等のトカマク、LHD, HSX等のヘリカル系プラズマやNSTX, MAST等の球状トカマク等多数の実験装置に対して、ジャイロ運動論的シミュレーションによる乱流輸送研究が広く行われるようになってきている。また、N.T. Howard氏（GA）のポスター発表では、Alcator C-Modにおける重水素イオン-電子プラズマの

ITG-TEM-ETG 乱流に対する大規模な多階層ジャイロ運動論的シミュレーションの結果が紹介され、イオンと電子の異なるジャイロ半径スケールに現れ共存する乱流構造の粒子・熱輸送に与える影響が示された。

Z. Wang 氏 (UCI) の講演では、DIII-D において高エネルギー粒子により駆動される TAE モードに対するグローバル・ジャイロ運動論的シミュレーションの結果が報告され、非線形的に生成されるゾーナルフローの影響により TAE の飽和振幅が大幅に減少することが明らかにされた。B. Breizman 氏 (Univ. Texas, IFS) の講演では、逃走電子に関する理論研究の最近の進展が報告された。トカマクにおいて雪崩機構により生成され急激に増加する相対論的逃走電子のつくる電流は、初期のバルク電子のつくる電流と同程度になり、その電流に伴う磁気エネルギーは運動エネルギーより遙かに大きくなり得ることが示され、電子雪崩を考慮した電流の時間発展が非線形オームの法則により表現された。

周辺プラズマ輸送の研究も盛んに行われており、O. Schmitz 氏 (Univ. Wisconsin) の講演では、3 次元流体プラズマ運動論的中性粒子輸送コード (EMC3-Eirene) を用いて、ITER における ELM 制御を目的とする RMP 印加時の周辺プラズマ輸送のシミュレーションを行った結果が報告され、MHD や 2 流体コードにより、RMP により誘起される 3 次元的なプラズマ境界形状を適切に取り入れた輸送モデルの開発の重要性が強調された。他に、TRINITY, TGYRO, TOPICS, CRONOS, TASK3D 等の統合輸送コードに開発に関連するポスター発表がいくつもあり、DIII-D, JT-60U, JET, LHD 等に適用され、各コード間のベンチマークテストや実験結果との比較による統合輸送コードの Verification & Validation の進展状況が報告されていた。

(洲鎌)

慣性核融合プラズマ

冒頭の LLNL の M. Rosen 氏のレビュー講演では、間接照射方式で点火をめざす最新の NIF の研究成果がまとめられていた。昨年春から行われてきた high foot シリーズ実験ではアブレタを薄くしたり、ウランの hohlraum を用いることによって加速度、発生中性子数の上昇が確認された。また、燃料とアブレタが混合していないこともわかった。さらにシミュレーションとの一致も確認されたことから high foot 実験は一段落した。初期の点火キャンペーン (NIC) で行われていた low foot では燃料混合が大きかったことが最大の問題点であったが、これは hohlraum 入口付近のレーザーの重なりによる cross beam energy transfer (CBET)、シェル内面粗さなどによって起因されていたことも明らかになってきた。また、テントと呼ばれる hohlraum 内で燃料球を支える薄膜の影響、シェル内部の酸素の影響などシミュレーションと一致しなかった原因も明らかになってきた。これらを踏まえ、今後は "low foot" よりもやや foot pulse のエネルギーが大きい波形で点火をめざすことが発表された。NIF 関係の招待講演、および一般講演

では、それらを裏付ける多くの実験データ、解析結果が示された。また、ターゲットでは、アブレタを高密度炭素 (HDC) に変更した場合は low foot でも燃料との混合が見られなかった点、LANL と共同開発したベリリウムを用いた実験を準備していることなどの改善点が示された。さらに、hohlraum については、フランス CEA と共同開発を行っているラグビー球の形状をしたラグビー hohlraum、内部ガスの圧力を下げた hohlraum について検討、実験準備がなされており、多くの関連研究発表があった。

直接点火方式では、NIF を使った Polar-drive 方式に関してロチェスター大学の Hohenberger 氏が招待講演で、NIF で Polar Direct Drive (PDD) 方式の爆縮初期段階の基礎実験を行い、ビーム平滑化の問題が残るもののアブレタの材質を選べば two-plasmon-decay の影響を低減できるなど点火実験に繋がる可能性を示した。また、ロチェスター大学の Theobald 氏の招待講演などでは、衝撃波点火方式における高速電子への高い変換効率とその加熱への寄与についてなど高強度衝撃波実験、理論シミュレーションに関する発表があった。

高速点火方式については、加熱用高速電子の角度広がりを抑えるための外部磁場方式、内面照射方式 (阪大)、2 段パルス直接照射方式 (ラザフォード研) などがあった他、中国の核融合研究センターでは爆縮が 0.5 kJ のペタワットレーザーが完成し、SG-II (8 ビーム、1 ビーム 260 J@3 ω) の間接照射爆縮と連動した高速点火統合実験が可能になったとの報告があった。

比較的新しい方式として、Sandia 国立研究所が中心になって実施している Magnetized Liner Inertial Fusion (MagLIF) の実験では DD 反応によって 10^{12} 個の中性子発生を観測した。さらに、二次反応の DT 反応中性子も観測し、イオン温度が 2.5 keV 程度に達していたと思われる旨の発表が SNL の Gomez 氏、および Knapp 氏からあった。

Rosenbluth Award の招待講演はミシガン大学 Manuel 氏で、レーザー加速による R-T 不安定性成長過程の磁場の生成、発展についてプロトンバックライトと X 線で計測した結果、1-10 T の磁場発生が観測されたもののその磁場が R-T 不安定性には影響しなかった点などが示された。このように慣性核融合やレーザーアブレーションと磁場を組み合わせた研究発表が例年より多くあり新しい流れを感じた。

最終日は LLNL の Remington 氏によるレーザーによる高圧下の物質についてレビュー講演があった。小型、大型の様々なレーザー実験装置、計測方法によって明らかになった高圧物性について、相図をふまえながら紹介された。緻密な実験では X 線バックライトの回折を利用した塑性変形の格子移動を時間分解でとらえる量子力学レベルの実験の試みから、大型装置では惑星の核の組成、状態方程式の特定など太陽系形成過程の解明につながる実験まで、高圧物性実験の魅力が伝わった。

(長友)

プラズマ基礎物理

プラズマ基礎物理の分野では、宇宙・天体プラズマで起

きている現象の理解のための実験や理論シミュレーション研究に関する講演が数多く行われた。以下ではその内、印象に残った講演について紹介する。

太陽風における乱流に関して、Chen 氏 (Imperial College London) の招待講演では、太陽風の乱流に見られる MHD から運動論までの様々なスケールの現象について解説し、波数の非等方性、運動論的アルヴェン波とホイッスラー波乱流の違い、運動論的スケールから MHD スケールへの現象の遷移などについて最新の乱流理論と比較した。また Brown 氏 (Swarthmore College) は、MHD 乱流の観測と実験に関するチュートリアル講演を行い、太陽風における磁氣的乱流のカスケードなどについての統計解析の結果と、MHD プラズマ風洞実験装置を用いた磁氣的乱流の計測結果に見られる間欠性などについて解説した。

ダイナモについてのレビュー講演が Forest 氏 (University of Wisconsin, Madison) によって行われ、パラメータ領域、 Ω 効果と α 効果、空間・時間スケールによるダイナモの分類などの基礎理論を紹介した後、惑星における磁場反転や、太陽表面における磁気浮力の効果、渦銀河における超新星爆発駆動の乱流を伴う銀河磁場の Ω モデルなどの観測結果を示し、最後に液体金属を使った実験のレビューを行い、液体金属を攪拌することで起こる乱流がダイナモを引き起こす実験では乱流起電力を直接測定できるなどの利点があることなどを示した。

磁気リコネクションに関して、山田氏 (Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton University) は、リコネクション実験によるプラズマ粒子のリコネクションにおける高エネルギー化に関する招待講演を行い、磁気圏と実験で見られているリコネクション後にイオン温度が電子温度よりも高くなる現象の機構を示した。また、小野氏 (東大) の招待講演では、2つのトカマクプラズマを合体させたときに起きる磁気リコネクションによる大出力加熱に関する実験結果が示された。

Roberts 氏 (Columbia University) はダイポール閉じ込め実験に関する招待講演で、ダイポールプラズマに電極で磁気圏プラズマと同様に沿磁力線電流を印加することのできる実験装置を用いて、交換型不安定性乱流を電流でフィードバック制御できることを示し、フラックスチューブ平均のジャイロ流体モデルのシミュレーションと比較した。

Moser 氏 (Los Alamos National Laboratory) は、慣性核融合や超新星残骸で見られるジェットの衝突の実験検証に関する招待講演を行い、2つの超音速プラズマジェットの衝突過程で無衝突過程から相互貫通する間に電離度の上昇によって衝突的になり、ジェットが止まってショックが形成される機構を明らかにした。

(伊藤)

(原稿受付：2014年11月28日)