

■会議報告

第53回 APS プラズマ物理分科会 (DPP)

四竈泰一 (京都大学), 永島芳彦 (九州大学),
石澤明宏 (核融合科学研究所), 長友英夫 (大阪大学)

2011年11月13日から18日までユタ州ソルトレイク市の中心部にあるソルトパレスコンベンションセンターで標記会議が開催された。ユタ州はアメリカ西部、ロッキー山脈の西側に位置し、ソルトレイク市は州の北部にある。市の北西にあるグレートソルト湖は面積が琵琶湖の約7倍ある大きな湖で、湖水の塩分濃度が海よりも高い湖として有名である。市は2002年冬季オリンピックの開催地としても知られているが、近くの山岳部での平均年間積雪量は1mを超えるそうである。会議期間中は最高気温は約10℃、最低気温は約0℃だったが、遠くに見える山々には雪が積もっており、市内でも雪がちらついている日があった。

会議は例年のように核融合プラズマ、ビーム物理、プラズマ宇宙物理、強結合プラズマ、低温プラズマ等に関する広範囲の研究テーマに関して発表があった。今年度は第64回 APS 気体エレクトロニクス分科会 (GEC) と同じ日程、会議場で開催され、プラズマエッチングおよびダストプラズマに関する2つの基調講演、低温プラズマに関する2つのセッションが共同で開催された。両学会のポスター発表は同じ部屋を利用して行われたためDPP, GEC双方の分野に興味のある筆者のような人間には有用であった。今年度はJames Clerk Maxwell賞がダストプラズマの研究 (プラズマ結晶の発見, 土星の環の構造に関する研究, 微小重力下でのダストプラズマ実験) に対してGregor Morfill (マックス・プランク研究所) に贈られた。また、The John Dawson Award が反水素閉じ込めの研究 (反水素閉じ込めにおける先進的プラズマ技術の利用および紹介) に対してDaniel Silveira (理研) 他に贈られた。

会場では、ウィスコンシン大学による研究の一環として、DPP, GEC参加者の交流度合いの測定が試みられていた。希望者にはradio-frequency identification (RFID) tagと呼ばれる小型発信器が配布され、2人の研究者が対面し、かつ両者の距離が一定以上に近づいた場合を接触イベントとして認識することで、職位、国籍、研究分野等に応じた相互作用を定量化するそうである。山のように国際会議やワークショップが開催される今日、このような研究で会議の効率化を図るのも有用ではないかと感じた。

以下、磁場閉じ込め核融合プラズマ (実験・理論)、慣性核融合プラズマ、その他の基礎プラズマ等に関する発表を報告する。(四竈泰一)

磁場閉じ込め核融合プラズマ (実験)

米国の磁場閉じ込め核融合実験は、口頭発表件数を考慮するとトカマク実験の比重が圧倒的に高く、ITER・デモに向けた研究に力点を置いている。しかしヘリカルやRFPなどの装置も現役で稼働し、抜かりのなさを感じた。

トカマク実験は、ITERでめざす低 q_{95} ・高HH因子・高規格化ベータ値や高自発電流率を維持した放電の開発、

RMPによるペDESTAL・ELM制御の研究に主流が置かれていた。また、BESや反射計などの密度揺動計測や乱流モデリングの進展に伴い、ITERでのH-mode実現に向けた、H-mode遷移時やペDESTALの詳細な乱流分析結果が散見された。乱流観測とモデルの比較では、両者の整合を無理に主張せず、不整合な点を露わにして観測の理解を深めている点が印象的であった。発表件数としては、DIII-D (General Atomics), NSTX (Princeton Plasma Physics Laboratory), Alcator C-Mod (Massachusetts Institute of Technology) からの発表が多数を占めた。DIII-Dでは、off-axisのNBI導入により $q_{min}>2$ の3/2や2/1のテアリングモードが抑制される条件で最大の規格化ベータ値を得た。また後方散乱反射計により、RMPによる密度閉じ込めの劣化の候補として、周辺拡散係数の増大と内向きピンチの減少が見出された。さらに、L-H遷移時に帯状流・乱流モデルのプレダタープレイモデルに基づくリミットサイクル振動が実験的に見出された。NSTXでは、蒸発リチウムコーティングの放電を対象に、BESと反射計によりH-modeでの低波数マイクロテアリング乱流の詳細な実験研究が報告され、衝突率依存性が調べられた。また、電子ラーマー半径スケールの乱流と閉じ込め改善モードの相関が調べられた。C-Modでは、I-modeの詳細な乱流計測、ICHやLHCD中の波動の伝搬特性やそれらによる回転制御と内部輸送障壁の研究、タングステン表面の毛羽構造について発表された。ポストデッドライン招待講演では、先進トカマクに向けた運転シナリオが提案された。特にDIII-Dでは、非軸対称磁場による新古典トロイダル粘性効果を用いてNBIトルクを制御し、高閉じ込めのQH-modeの燃焼プラズマへの適用可能性を示した。

ヘリカルプラズマでは、LHDからは非局所輸送に伴う潜在的な相転移現象の発見や磁気島のヒーリング効果の研究、HSXからは自発電流を加味した3次元平衡に関する招待講演があった。RFPでは、RFX-modやMST, RELAXで磁気カオスを抑制するシングルヘリカル構造について口頭発表があり、また高速イオンや粒子の輸送に関して研究が進捗していた。(永島芳彦)

磁場閉じ込め核融合プラズマ (理論)

磁場閉じ込めの理論・シミュレーションに関する発表の全体の印象は、運動量輸送や外部摂動磁場のような大きなトピックに対する発表はそれほど多くはなく、それぞれの実験装置で観測される結果を説明する試みや単純な磁場配位を用いて宇宙プラズマと共通する物理の解明を試みる発表が多かった。

ジャイロ運動論シミュレーションの動向については、アメリカやヨーロッパのグループのコードがトカマクのコア領域のみならず、トカマクのエッジ領域、ステラレータ、逆転磁場ピンチでの乱流輸送解析に適用されている。これらの適用に対して求められるモデルの拡張やそれぞれの配位に特徴的な微視的不安定性が議論されていた。これらのシミュレーションの対象はイオン温度勾配不安定性のみならず、補足電子不安定性、トロイダルアルフェン固有モー

ド、マイクロテアリングモードなどである。そして、DIII-D, NSTX, Alcator C-Mod, などの実験結果と比較を試みる計算があった。また、近年のスーパーコンピュータの発達を利用して高解像度の乱流シミュレーションを行い、エネルギースペクトルの議論も行われるようになりつつある（磁場配位は単純である）。

フルトラスの3次元MHD（もしくは二流体）シミュレーションを行うM3DおよびNIMRODグループはSherwood国際会議（春）とアメリカ物理学会（秋）の前に合同ミーティングを行うため、本会議ではこれらのグループからの発表が多い。最近の動向はM3Dの拡張版であるM3D-CがS. Jardinらによって開発され、トカマクの電流拡散時間程度（大型装置で秒のオーダーに相当）の計算が可能になった。そして、数周期のSawtooth振動が計算されていた。また、粒子ハイブリッド計算への拡張が行われたM3D-Kによりアルフェン固有モードの解析が行われた。NIMRODグループは、M3Dグループより組織的にコードの拡張および計算対象の拡大を行っており、エッジローカライズモード（ピーリングバルーニングモード）、Sawtooth崩壊、アルフェン固有モード、ディスラプションの解析を行っている。

その他のいくつかの講演を紹介する。M. Landremanによるヘリカル系の講演では、オーミノロジーという非軸対称概念が紹介された。この理論では一般化ヘリシティを用いて分布に対する解析解が得られるため、シミュレーションコードのベンチマークテストに有用であると思われる。N. Howardによる講演ではジャイロ運動論による不純物輸送のシミュレーションが紹介された。（石澤明宏）

慣性核融合プラズマ

レーザープラズマ分野では、本会議の2か月前の9月に国際会議IFSA2011（International Conference of Inertial Fusion and Applications：フランス・ボルドー市）が開催され、最近の主要成果はすでに発表済みであったことからやや新鮮さには欠けた。しかも、リバモア研にある国立点火施設（National Ignition Facility :NIF）における点火実験キャンペーン（NIC）に直接関係する研究者の大半は週半ばに予定されていた実験ショットのために最初の2日間だけ参加して帰った方が多かったことから、後半は例年よりNIC関係のセッションへの参加者が減っていたようだ。それにも関わらず残りのNIF関連セッション、高速点火、レーザープラズマ相互作用、計測、シミュレーションなどの多彩な発表があり、米国のこの分野の研究者層の厚さを実感した。

初日のレーザー核融合に関する招待講演6件（Glenzer, Callahan, Hicks, Celliers, Regan, Spears）はすべてNICに関する発表であった。彼らは点火の状況を確認するパラメータとして、発生中性子数と面密度などから成る関数ITFXを定義している。ITFX=1.0に到達すると50%の確率で点火が起こると予測される値であり、IFSA2011の時点で、9月8日のショットでITFX=0.1を達成したと報告するとともに、ITFXを上げるためにシミュレーションとの比較

から設計値の90%であった実験の爆縮速度をさらに上げる必要性に言及していた。本会議では、直前に実施されたvelocity campaignでhohlraumのレーザー光入口の大きさを調整するなどして爆縮速度が目標の95%まで達したことが示された。今後、ウランhohlraumの採用、入射レーザーのビーム相互作用などの調整によって爆縮速度が設計値の99%まで到達できると予測している。なお、来年中には点火（ITFX=1.0）に達することを目標に掲げていた。米国からはロチェスター大学を中心としてOMEGAレーザーを用いたNICをサポートする実験、直接照射爆縮、および衝撃波点火の研究の進展なども見られた。

高速点火については、これまでの阪大レーザー研、およびロチェスター大学で行われた実験結果の解釈、加熱効率向上のための実験設計に関する発表、討論が活発に行われた。特に、GA, UCSDなどの実験における電子ビームの広がり角に関する計測結果とそのシミュレーション解析が示されたほか、磁場を制御することによって加熱効率を向上できる可能性を示したシミュレーション結果も注目された。特に、城崎（レーザー総研）、Solodov（ロチェスター大）はいずれも電子ビームが通過する部分のresistivityの勾配を変化させることで電子ビームを収斂させる磁場を生成する手法を提案している。双方とも次回の実験シリーズに反映させたいとしており、その結果が期待されている。さらに、ロチェスター大学の発表（Hohenbergerら、およびFikselら）では、爆縮実験の初期に静磁場を与え、爆縮によって数10MGまで圧縮された磁場が、熱流束を抑制することによってイオン温度が15%、発生中性子数が30%も向上したことを示した。このような磁場圧縮は高速点火の電子ビーム制御にも応用できる可能性があり、今後の展開が興味深い。その他、粒子加速、Warm dense matter、レーザー宇宙物理などのセッションも並行して行われ、活発な議論が行われていた。（長友英夫）

その他の基礎プラズマ等

核融合以外のプラズマに関しては、各分野の一般講演セッション数がそれぞれ以下のものであった。ビーム物理6、プラズマ宇宙物理5、プラズマ乱流・輸送4、ダスト・強結合プラズマ2、低温プラズマ2、コヒーレント光源1。

Joel Fajans（カリフォルニア大学バークレー校）による反水素の閉じ込めに関するレビュー講演では、CERNで行われているALPHAプロジェクトの進展が報告された。特に反陽子と陽電子の閉じ込めに非中性プラズマの閉じ込め研究が重要な貢献を果たしている旨が述べられた。James Stone（プリンストン大学）による宇宙プラズマジェットと降着円盤に関するレビュー講演では、MHDシミュレーションを利用したジェットの生成メカニズムに関する研究が報告された。輻射や不安定性により降着円盤内でプラズマの対流が生じ、その結果、角運動量が輸送されジェット生成に至るというモデルおよび計算結果が紹介された。プラズマ銃、Zピンチ、レーザを利用した模擬実験についても紹介があり、特に非線形不安定性の成長をシミュレ

ションと比較するために実験が有用であるとの指摘があった。Victor Malka (パリ工科大学) によるレーザープラズマ加速に関するレビュー講演では、近年の当該分野の進展および、小型 X 線源、ガン治療、材料科学への応用についての報告があった。また、ビームの質および安定性を向上させるために粒子入射方法の制御、計測方法の開発が今後の研究課題としてあげられていた。その他、今回の DPP の特徴として、GEC と共同の低温プラズマに関するセッション

で基礎から応用まで低温プラズマを対象とする多様な研究発表があり、両分野の研究者の交流の場となった。低温プラズマに関する講演では、電子エネルギー分布関数等のパラメータを制御する際に局所的なプラズマ条件だけではなく空間的に離れた領域が影響するという非局所性に着目した研究が多く見られた。

(四竈泰一)

(原稿受付：2011年12月21日)