

■会議報告

19th International Congress on Plasma Physics (ICPP2018) 報告

矢木雅敏 (量子科学技術研究開発機構)

佐藤浩之助 (東京理科大学, 中部電力)

藤岡慎介 (大阪大学)

樋田美栄子, 宇佐見俊介 (核融合科学研究所)

赤塚 洋 (東京工業大学)

第 19 回プラズマ物理に関する国際会議 (19th International Congress on Plasma Physics) は 2018 年 6 月 4 日～8 日までバンクーバー (ピナクルホテルハーバーフロント) で開催された。バンクーバー市は横浜市と姉妹都市関係にあり、雨が多く気温は北海道に近い。

ICPP はプラズマ科学の進展と将来展望に関して議論する重要な会議と位置付けられており、基礎プラズマ物理、核融合プラズマ、宇宙プラズマ、プラズマ応用、複雑性プラズマ、高エネルギー密度プラズマ、量子プラズマ、レーザープラズマ相互作用等、多岐にわたる。日本はこの国際会議に当初から関わってきた経緯があり、第 1 回 (名古屋, 1980)、第 8 回 (名古屋, 1996)、第 14 回 (福岡, 2008) と 3 回ホスト国として会議を開催している。今回、カナダは第 10 回 (ケベック, 2000 : APS と共催) について 2 回目、ただしホスト国としては初めて ICPP を開催した。R. Sydora 教授 (アルバータ大学) 及び A. Smolyakov 教授 (サスカチュワン大学) の 2 名が共同実行委員長を、プログラム委員会委員長は S. Cappello 博士 (IGI Consorzio RFX, イタリア) が勤めた。

本会議の参加者数は 201 人であり、内訳は、米国 35 人、日本 29 人、地元のカナダ 27 人、インド 21 人などであった。発表件数は 223 件、内訳は基礎プラズマ物理 51 件 [招待/口頭 (I/O) 31, ポスター (P) 20], 核融合プラズマ 54 件 [I/O 40, P 14], 宇宙プラズマ 27 件 [I/O 14, P 13], プラズマ応用 34 件 [I/O 17, P 17], レーザープラズマ相互作用等 30 件 [I/O 19, P 11] 等々、また変わったところでは、カナダにおけるプラズマ物理・応用に関する紹介的なポスター発表が 16 件行われた (ただしポスターでは発表取り下げも多く見られ、当初予定の 101 件が実質上 67 件であった)。日本人のプレナリーはなかったが、招待講演は 15 件あり、米国 (プレナリー 2 件, 招待講演 18 件) に次ぐ件数であった。招待・口頭及びポスター発表を含めると日本からの発表件数は 29 件であり、米国の 36 件に次ぐ講演件数であった。IUPAP プラズマ物理 2018 年度若手科学者賞は E. Viezzer 博士 (西) が受賞した。R. Blandford 博士 (米) が “The Limits of Plasma Physics” の題目で基調講演した。 (文責 矢木, 佐藤)

1. 磁気閉じ込め核融合

プレナリーセッションにおいて、R. Buttery 博士 (米) は定常核融合エネルギーをめざす先進トカマク研究に関する講演を行った。F. Jenko 博士 (独) は運動論的プラズマ乱流のシミュレーション研究に関する講演を行った。Y.K Oh 博士 (韓) は ITER 及び K-DEMO における定常高

ベータ運転のための重要課題解決に向けた KSTAR プログラムに関する講演を行った。

マルチスケール物理セッションでは磁気島と乱流の相互作用に関する KSTAR 実験 (韓) 及び理論シミュレーション (仏) 研究報告があった。ステラレータ・ヘリオトロンセッションでは W7-X における磁気ダイバータとプラズマ周辺における乱流に伴うプラズマ回転と径電場計測に関する研究報告があった (独)。3 次元形状効果による乱流輸送の低減化をめざすステラレータ配位の最適化に関する研究報告があった (米)。長崎博士 (京大) は Heliotron J における磁場配位と加熱・電流駆動に対するプラズマ性能の応答に関する研究を招待講演した。SOL・ダイバータセッションでは、利根川博士 (東海大) は直線装置による曲率や発散を伴う磁場配位を用いたダイバータプラズマの研究を招待講演した。中規模トカマクの SOL における輸送計測のための新しい診断法の開発や応用に関する研究報告があった (豪)。本島博士 (核融合研) は LHD におけるダイバータ吸排気を利用した中性粒子制御に関する研究を招待講演した (日)。トカマクの先進プラズマセッションでは、定常トカマク領域における乱流輸送シミュレーションに関する研究報告があった (米)。EAST と DIII-D を用いた高ポロイダル・ベータプラズマの定常化をめざした研究報告があった (米・中)。EAST におけるタイプ III ELM の回復フェーズにおけるペデスタル形成の動力学に関する研究報告があった (中)。小型・中型トカマクのセッションでは EAST における LHCD を用いた高性能の定常化研究に関する研究やプラズマ回転における LHCD の影響に関する研究報告があった (中)。核融合プラズマの構造形成に関するセッションでは、核融合プラズマにおける自己組織化臨界性や径乱流輸送に関する研究発表があった (西)。ヘリコンプラズマにおける自己組織化による遷移によるプラズマのディタッチに関する研究報告があった (米)。FT-2 トカマクにおける GAM に支配された TEM 乱流の自己組織化や輸送の同位体効果とジャイロ運動論モデルに関する研究報告があった (露)。ジャイロ運動論理論セッションでは数値実装のためのジャイロ運動論理論に関する研究報告があった (独)。ゲージに依存しない電磁ジャイロ運動論理論に関する研究報告があった (米)。トカマクにおけるバナナ運動論方程式に関する研究報告があった (台)。沼波博士 (核融合研) は多種プラズマにおける不純物の新古典及び乱流輸送シミュレーション研究に関して招待講演を行った。特別プレナリーセッションでは核融合への道として、ITER や NIF の延長上にある道と General Fusion の Spherical Tokamak の圧縮を用いる核融合や Tri Alpha Energy (TAE) テクノロジー社のビーム駆動型 FRC による核融合に関し報告があり、パネルディスカッションが行われた。企業で行っている核融合研究は野心的であり先進技術を駆使したものであり、現時点ではいくつものブレークスルーがなければ実現困難と言える。これらの研究がいつまで継続可能かは投資家の忍耐との戦いではなかろうか。高エネルギー粒子物理のセッションでは磁気閉じ込め核融合プラズマにおける相対論的逃走電子

の研究報告があった(米). 松山博士(量研)はトカマクディスラプション時における逃走電子シミュレーション研究の最近の進展に関して招待講演を行った. Hモードセッションでは, ASDEX U トカマクにおけるHモード維持のためのキーとなるイオン輸送機構に関する研究方向があった(西). 周辺プラズマにおける外部輸送障壁の生成, 発展の非線形シミュレーションに関する研究報告があった(仏). 革新的概念セッションでは線形トラップにおける新しい閉じ込め領域と核融合へ向けた再期待に関する研究報告があった(露). 磁気閉じ込めターゲット核融合の進展に関する研究報告があった(加). 西浦博士(東大)はRT-1を用いた双極子磁場プラズマ実験の進展に関する招待講演を行った. 新方式核融合炉セッションでは, プラズマセンターポストにより球状トカマクの閉じ込めを実現するPROTO-SPHERAの実験報告があった.

(伊). FTUにおける液体金属ダイバータ実験に関する研究報告があった(伊). トカマクエネルギーのコンパクト球状トカマクST40の初実験に関する研究報告があった(英). 全体を通じて, 企業を中心とした新方式核融合炉研究や先進プラズマ研究等, ITER路線とは異なる研究報告が多くなされ裾野の広がりを感じられた会議であった.

(文責 矢木)

2. 高エネルギー密度プラズマ・慣性核融合

高エネルギー密度プラズマ・慣性核融合に関するプレナリー講演は残念ながらなかった. また, 中国及びインドから申し込まれた講演の多くがキャンセルされたのも大変残念であった.

慣性核融合に関しては, ローレンス・リバモア国立研究所のO. Harricane氏が, 米国 National Ignition Facilityにおける進捗について発表した. 高密度カーボン(実際はダイヤモンド)の燃料シェルの用いることで, より効率的にレーザー・エネルギーを燃料圧縮のエネルギーとして活用出来るようになった. 同時に, レーザーパルス波形の調整により, 流体不安定性の成長率を低減したことで, 爆縮により350 Gbarという過去最高の圧力を達成したことが報告された. 核融合反応で発生した α 粒子で, 更に周りの核融合燃料が加熱される「核燃焼」の領域に入りつつある. ただ, 加熱領域からのエネルギー損失を上回るほどの加熱はまだ起こっておらず, 燃焼の持続には至っていない. どれほどのレーザーエネルギーがあれば, 利得が得られるのか? という質問に対して, 現在の手法の延長では2.5 MJであるとはっきりと数値で答えたのが大変印象的であった. 公式な回答では無いことを, 念のため補足しておく.

ロチェスター大学のR. Betti氏は, エネルギー開発としての米国における慣性核融合研究について講演した. 米国においては, 慣性核融合は安全保障のための研究であり, エネルギー開発としては位置づけられていないと明言した. また, National Ignition Facilityで点火・燃焼が実現していない状況で, 慣性核融合に基づいたエネルギー開発は時期尚早であるとの意見を表明した. 科学的な部分は, 最近同氏が行っているスケールリングに基づいた,

慣性核融合プラズマの最適化について講演をした. この詳細は, 既に昨年のAPS-DPPの出張報告に記述しているので, ご参考にして頂きたい.

高エネルギー密度プラズマの応用としては, レーザー加速電子からのベータトロンX線の発生, 及びレーザー加速電子からの制動放射X線の応用が興味を引いた. 特に制動放射では, MeVを優に超える高エネルギー光子が発生しており, コンパクトで高輝度なX線として, 安全・安心社会の実現を目的として使用されることが期待されている. また, レーザーによる電子加速メカニズムについて, Particle-in-Cellシミュレーション及び理論解析が報告された.

(文責 藤岡)

3. 基礎・宇宙プラズマ

このカテゴリでは, プレナリー講演6件, 招待講演26件, 口頭発表13件, ポスター発表33件が行われた. このうち, 基礎プラズマの発表件数は51件, 宇宙プラズマの発表件数は27件であった. 前回のICPP2016に比べると宇宙プラズマの発表件数は半数以下であったが, 基礎プラズマの講演には宇宙との関連の深いものも多くあった.

基礎プラズマの講演内容は, 磁気再結合, 乱流, 不安定性, 波動粒子相互作用, 強結合プラズマ, 量子効果などに多岐にわたるが, 全体としては, バランスよくプログラムされていた. 以下, 筆者が特に興味を持った講演を記す. 磁気再結合に関しては, C. Z. (Frank) Cheng博士(台)が基調講演を行い, まず, 流体モデルに基づいた理論・シミュレーションから始まりkineticなモデルへと発展していった磁気再結合研究の歴史を概観した. Cheng博士自身の研究成果は, 粒子シミュレーションモデルによるものであり, 磁気再結合におけるイオン, 電子の異なるダイナミクス, それに伴う電場形成, さらにイオン・電子の加速・加熱について詳しく解説を行った. 小野博士(東大)は, プラズマ合体装置TS-3, TS-4, UTST, TS-U(東大), MAST(英国カラム研究所)などによる, 磁気再結合を通じてのプラズマ加熱実験結果を紹介した. 特に, イオン温度(加熱エネルギー)がポロイダル磁場の2乗に比例するというスケールリング則が見出されており, このことから, 新しい装置TS-U(東大)やST-40(Tokamak Energy Ltd.)では, 燃焼プラズマにつながる強い加熱が期待されることを示し, 聴衆の関心を集めた. 不安定性・波動粒子相互作用に関しては, 女性若手研究者であるRigby博士(英)が, 磁化プラズマ中の衝撃波のレーザー励起実験と計算機シミュレーションの比較について招待講演を行い, 磁場を横切るイオンによって励起される低域混成波による電子の加速を議論した. また, 古くて新しい課題として, Sen博士(印)が, 超音速で動く物体の周りに励起される非線形波とその前方に形成される波(プリカーサー)について, 理論と実験を紹介した. Sen博士の研究は静電波に関するものであったが, 電磁的な波に研究を拡張し, そのプリカーサーを宇宙空間で捉えることができれば, 宇宙空間を漂うゴミ(デブリ)の存在を予知することが可能になると指摘し,

多くの注目を集めていた。

宇宙プラズマのセッションでは、Zelenyi 博士 (露) が惑星磁気圏の電流シートについて、Ferrario 博士 (豪) が、高磁場コンパクト星への降着流について、それぞれプレナリー講演を行った。招待講演としては、渡邊博士 (名大) の磁気圏と電離層の結合系におけるオーロラ構造形成のミュレーション研究の講演や、Schroeder 博士 (米) のイナーシャルアルヴェン波によるオーロラ電子加速を模擬した、Iowa 大学の LAPD 実験の報告などがあった。また、Dorfinan 博士 (米) は、地球磁気圏衝撃波上流における低周波電磁波の成長を人口衛星で初観測した結果を紹介した。太陽研究の重要プロジェクトである Parker Solar Probe に関する招待講演が取りやめになったのは残念であったが、総じて、プラズマ物理に基づく研究の講演が多く、その重要性を改めて感じる事ができた。(文責 樋田, 宇佐見)

4. 低温プラズマ, プラズマ応用

今回のプレナリーの中で、直接にこの分野にあたる講演は見当たらず、若干寂しい思いをした。しかし、特に直接の応用には関わらないテーマであっても、低温プラズマとその応用研究が、地味ながらも物理学を重視した形で脈々と続けられていることも理解され、興味深い招待講演および Contributed Talk が展開された。

この分野の講演を紹介すると、以下のようである。

プラズマ源開発として、Denisov 博士によるジャイロデバイスのプラズマ応用 (露)、豊田博士による分子気体プロセスのためのメーター級大気圧マイクロ波プラズマ源開発 (日)、Tsankov 博士による大面積プラズマ生成のための周期的渦場の統計的加熱コンセプト (独) の 3 件が招待講演としてなされた。他に一般口頭講演として、Paskalov 博士による RF プラズマと多孔体材料との相互作用 (露)、Stelmashuk 博士による長寿命プラズモイド生成機構の実験研究 (チェコ) の 2 件が披露された。

プラズマ化学・生物応用としては、Gibson 博士による高アスペクト比の針状電極による非熱平衡プラズマ照射における化学カインेटックス (英)、勝木博士によるパルスパワー電界の生物学応用 (日) の 2 件の招待講演があった。また一般講演として、蒸着誘電体薄膜の容量の In-situ 測定 (チェコ)、反応性イオンエッチングによる負荷インピーダンスのエンドポイント解析 (シンガポール)、イオンインプラネーションによる照射量予測コード (加) に関し口頭発表がなされた。

流れ現象に関連するセッションでは、Leonov 博士による高速流制御のための準 DC 放電 (米)、茂田博士による熱プラズマ流ダイナミクスの数値モデリング (日)、安藤博士による膨張型・ラバル型磁場中の遷音速プラズマ流に関する研究 (日) の 3 件が招待講演としてなされた。我が国から 2 件もの講演があり、流れ場におけるプラズマ基礎研究での我が国の研究レベルの高さが披露された。

ナノ材料合成応用関連では、弱電離プラズマによるナノ粒子の成長と凝集 (米)、熱プラズマジェットによる低次元ナノ材料合成 (加)、古閑博士によるプラズマ-ナノ粒子相互作用に関する考察 (日) の 3 件の招待講演があった。

最終日は宇宙用電気推進機の基礎開発に関連する招待講演が 2 件あり、赤塚博士による低電離度膨張アークジェットの基礎実験とそのハイブリッドシミュレーション (日)、Sydrenko 博士によるホールスラスタの不安定性・異常輸送現象を対象とした PIC シミュレーション研究 (加) が紹介された。その他、基礎プラズマの色彩が濃いのが、一般講演として Chalise 博士による斜め磁化プラズマシースにおける粒子モデルシミュレーションの講演があり、プラズマ分野におけるネパール初の論文を発表したとの自己紹介もあって、地味な低温プラズマ分野でもいまなお新興国からの参入があり、新たな研究展開が日々なされていることが理解された。

その他、ポスター発表においても、環境・農業応用 (露)、材料表面処理 (露)、ZnO 膜生成 (バングラデシュ)、篠原博士および古川博士による無電極ヘリコン波プラズマスラスタの開発・計測研究 (日)、電離圏・熱圏プラズマ探査のためのピコサテライト向けラングミュアプローブ (ネパール)、マグネトロンスパッタリング応用のためのプラズマ源開発 (メキシコ)、佐藤名誉教授・利根川博士によるセシウムフリー負イオン源開発研究 (日)、誘電体バリア放電プラズマジェットの最適化研究 (ベトナム)、など、研究水準に広がりはあるものの、様々な国々で様々なプラズマ応用研究が展開されていることが興味深く感じられた。(文責 赤塚)

なお、今回の ICPP2020 は慶州 (韓国) で開催予定である。

(原稿受付: 2018 年 6 月 22 日)