

インフォメーション

■会議報告

第57回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (APS-DPP) 年会

長谷川裕記(核融合科学研究所)

笠原寛史(核融合科学研究所)

城崎知至(広島大学大学院工学研究院)

神吉隆司(海上保安大学校)

1. 概要

2015年11月16日から20日までの5日間、米国ジョージア州サバンナにおいて、アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (APS-DPP) 年会が開催された。十数年前にも、サバンナにおいて APS-DPP 年会が開催されているので、ご記憶の方もおみえかと思うが、サバンナは、米国南東部、大西洋近くに位置し、大西洋に注ぐサバンナ川に沿って開けた港湾都市である。19世紀には綿花貿易などで栄え、街には往時をしのばせる歴史的な建造物が立ち並んでいる。会場となったサバンナ国際貿易コンベンションセンターはサバンナ川沿いにあり(図1)、対岸のダウントウンからは連絡船で川を渡るか、APSが用意したシャトルバスで斜長橋を渡って向かうこととなる。

今回の APS-DPP 年会では、およそ1,800件を超える講演登録があり、その内訳は、レビュー講演4件、チュートリアル講演4件、招待講演97件、口頭発表約600件、ポスター発表約1,100件であった。毎朝8時から行われるレビュー講演では、月曜日が M. Mauel 氏(コロンビア大学)による“The physics of the Laboratory Magnetosphere”, 火曜日が J. Bailey 氏(サンディア国立研究所)による“Measuring the opacity of stellar interior matter in terrestrial laboratories”, 水曜日が F. Jenko 氏(UCLA)による“Turbulence in laboratory and natural plasmas: Connecting the dots”, そして、金曜日が W.B. Mori 氏(UCLA)による“Synergy Between Experiments and Simulations in Laser and Beam-Driven Plasma Acceleration and Light Sources”と、多岐に渡る分野それぞれの第一人者による講演がなされ、毎年のことではあるが、米国におけるプラズマ研究の裾野の広さを感じずにはいられなかった。

本会議では、毎年、プラズマ物理分野に大きく貢献



図1 ダウントウン側から見た会場のサバンナ国際貿易コンベンションセンター(左側の建物)。

した研究者に James Clerk Maxwell Prize が授与されているが、今回は、山田雅章氏 (PPPL) に贈られた。宇宙や核融合プラズマなどで生起する磁気リコネクション現象解明のための基礎的実験に関するこれまでの研究業績が評価されたことによるものであり、木曜日の朝に山田氏による受賞記念講演が行われた(図2)。

朝のレビュー講演、受賞記念講演が終わると、ポスターセッションとおおよそ5つ程度のオーラルセッションがパラレルで開かれ、それぞれのセッションにおいて、白熱した議論が交わされていた(図3)。ただひとつ難点を挙げるとすれば、同分野のポスターセッションとオーラルセッションが同じ時間帯に設定されていることも多く、興味ある発表を聞き逃してしまうことがある点であろうか。次回は、2016年10月31日から11月4日までの5日間の日程で、カリフォルニア州サンノゼで開催される予定である。以下、それぞれの分野ごとに、その詳細について報告する。(長谷川)

2. 磁場閉じ込め核融合プラズマ(実験)

プリンストンプラズマ研究所(PPPL)の球状トカマク装置(NSTX-U)においては、トロイダル磁場を1.0 Tまで増強する改造が終了し、更なる高性能プラズマを閉じ込める研究が開始されたことが報告された。また、新しい実験装置の立ち上げとしてドイツのマックスプランク研究所のステラレータプラズマ生成装置Wendelstein7-X (W7-X)について、プラズマ実験開始



図2 山田氏の受賞記念講演会場の様子。



図3 ポスターセッション会場の様子。

は2015年12月9日頃であるという報告を受けた。MITのC-Modのチームからは、Advanced Divertor and RF tokamak eXperiment (ADX)のコンセプトについてポスター発表がされていた。ADXの目標としては装置サイズを抑えたまま高磁場・高パワー密度トカマク研究を行う装置として位置づけている。特に核融合を目指したダイバータテスト、定常電流駆動を目指したRFシミュレーション、そして高パフォーマンスプラズマの実証を中心に研究を行う装置コンセプトのようである。ADXは現在ではコンセプトであり今後の進展に期待したいと思う。また、2つ興味深い実験装置について紹介したい。一つ目は2014年10月に初めて報告されたアメリカロッキードマーティン社が研究を進めているCompact Fusion Reactor (T4 CFR)装置である。2つのカスプ磁場作成コイルを直線状に設置したカスプ磁場閉じ込めタイプの実験装置である。将来的には中性粒子ビーム(NBI)を用いる予定だが、現在は15 kWの電力で2.4 GHzの電子サイクロトロン加熱(ECRH)により、電子密度 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 $10 \sim 25 \text{ eV}$ のプラズマを約1秒間閉じ込める研究を行っており、現在のエネルギー閉じ込め時間としては100 ms以下である。2つめはアメリカのマイクロソフトの基金によって運営されているTRI Alpha Energy Inc.による研究である。ビーム駆動型Filed Reversed Configuration装置(C-2U)である。6台の正イオン源(15 keV)中性子ビームを用いて10 MWの加熱を行い、中心密度は最大 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度150 eV、イオン温度800 eVのプラズマを0.15 Tの磁場強度で閉じ込めており、粒子の閉じ込め時間は10 msを達成している。C-2Uではビーム駆動型の不安定性が観測されており、プラズマ物理実験装置としても非常に面白く野心的なコンセプトの実験装置であると思う。アメリカではこの他にもワシントン大学のHelicity Injected Torus - Steady Inductive 3 (HIT-SI3)と呼ばれるスフェロマック実験など非常に裾野が広く、プラズマ物理研究に関する好奇心をかき立てられる会議になっていた。(笠原)

3. 磁場閉じ込め核融合プラズマ(理論)

今回のAPS-DPP年会においても、GENEやGYROなどのジャイロ運動論的シミュレーションコードを用いた乱流輸送研究に関する発表が数多くなされていたが、特に、水曜日の朝には、F. Jenko氏(UCLA)によるレビュー講演が行われた。講演では、ジャイロ運動論的シミュレーションによる研究が実験室プラズマにおける乱流現象の理解にもたらしたパラダイムシフト、さらに、核融合プラズマ研究のために開発されたジャイロ運動論的シミュレーションコードを、太陽風などの宇宙プラズマに適用し、自然界のプラズマにおける乱流現象の理解を目指す取り組みなどについて、わかりやすく解説していた。

周辺プラズマ研究においても、いくつかジャイロ運動論的シミュレーションコードの開発が進められている。2015年9月に奈良で開催された15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (PET15)でもR. Cohen氏(CompX)によって紹介されていたCOGENTコードについては、今回、M. Dorf氏(LLNL)が招待講演で、GAMの無衝突減衰や新古典輸送の計算による検証など最近の進捗について報告していた。以前、同コードと同じく連続体的手法を用いたTEMPESTコード計画があったが、今後のCOGENTコードの展開にも注目していきたい。

同じく周辺プラズマ研究のためのジャイロ運動論的シミュレーションコードであるXGC1による研究では、C. S. Chang氏(PPPL)がポスター発表で、ブロップ現象のシミュレーションについて報告していた。実験では、ブロップ輸送の特性を測る指標として、統計的な量であるSkewnessを用いることが多いが、この研究でも、シミュレーション結果からSkewnessを算出し、実験との検証を行っていた点が印象に残った。

一方、周辺プラズマ研究において、近年よく用いられている二流体コードであるBOUT++については、X. Q. Xu氏(LLNL)が招待講演で、これまでに同コードを用いて行ってきたELM現象を中心とした研究の成果について報告していた。また、最近の展開としては、不純物輸送を計算する、Particle-in-Cell (PIC)手法を用いたテスト粒子モジュールを、BOUT++に追加する試みも紹介されていた。

BOUT++を用いた研究では、以前から、ブロップ現象に関する研究が盛んに行われているが、今回は、L. Easy氏(ヨーク大学)がその口頭発表で、磁力線方向の抵抗の効果について議論していた。これは、非接触ダイバータプラズマでは非接触領域で抵抗値が上がるため、それを考慮した3次元計算を行ったものである。発表では、抵抗値が高い場合、ブロップの速度が速くなる結果が得られたことなどが報告されていた。

非接触ダイバータプラズマについては、木曜日の午後に、S. I. Krasheninnikov氏(UCSD)による、“Divertor detachment”と題したチュートリアル講演があった。講演では、非接触状態の達成に必要な高リサイクリングな状況について、その物理過程の丁寧な解説を行っていた。また、非接触ダイバータプラズマにおける再結合過程などの効果についても、これまでの実験的、理論的研究を体系的にまとめて、説明がなされていた。

また、今回のAPS-DPP年会では、プラズマ物質相互作用に関するミニカンファレンスも1日半にわたって開催されていた。セッションでは、分子動力学シミュレーションを用いた、タンガステンと水素・ヘリウムプラズマの相互作用に関する研究についても、いくつか発表がなされていたが、階層間連結的な手法による研究は見当たらなかった。この分野の近年の進展には目覚ましいものがあるが、ITERなどの大型実験計

画を見据え、壁を含む周辺プラズマの理論的、数値的研究の今後の更なる展開が期待される。(長谷川)

4. 慣性核融合プラズマ

本会議は、9月に行われた慣性核融合に関する国際会議 IFSA2015 から2か月後の開催ということで、顕著な進展報告はなかった。一方で、IFSA では総括的報告が多いのに対して、APS-DPP 年会では個々のテーマに対する詳細報告が行われるため、より多くの情報に触れることができる。慣性核融合研究の中心はやはり米国であり、学生からベテランまで多くの研究者から報告がなされた。IFSA の後とはいえ、日本からの参加者が非常に少なかったのは残念であった。日本から参加した学生は IFSA 以上に非常に刺激を受けたとのことであった。より積極的な参加が望まれる。

米国では慣性核融合研究に関してローレンスリバモア国立研究所、ロスアラモス国立研究所、サンディア国立研究所、ロチェスター大レーザーエネルギー研究所と大きな研究組織があり、これらに加えて多数の大学で研究が行われており、層の厚さは圧倒的である。今回の報告の特徴は、(a)米国国立点火施設(NIF)での課題解決に向けた研究の集中、(b)ロチェスター大での NIF 間接照射に関する研究に加え、NIF での直接照射を想定したポーラー直接照射(PDD)、サンディアでの MagLIF のレーザーによる先行加熱や磁場圧縮に対する要素実験であった。一方で、中心点火の代替方式として進められている衝撃波点火(shock ignition)や高速点火(Fast Ignition)に関する発表はほとんどなかった。

NIF における間接照射実験に関しては、ハイフット実験により爆縮特性は改善したものの点火までの道のりはまだクリアではない。様々な課題(交差するレーザー間でのエネルギー輸送"CBET"による爆縮効率の低下、爆縮後半における照射非一様性によるモード2の擾乱成長、ターゲット保持用テントによる擾乱印加等)により、点火に要する爆縮コア特性(中心点火部の温度や面密度)に達していない。これらへの対策として、ホーラム内のガス圧を下げ CBET を抑制し(Low fill gas)、ホーラムの長さを大きくし(Long)、全体としてのサイズも大きくする(Large)ことで、ホーラム内壁からのアブレーションプラズマによる影響を防ぐ方策(L3 キャンペーン)や、爆縮の高速化や安定化のため、燃料アブレータをプラスチックから HDC(高密度炭素)や Be に変えること、擾乱原因の一つとなっているテントを用いず、燃料注入用のチューブ(fill tube)による燃料保持の検討等が行われている。また爆縮中の燃料の熱的状态(adiabat)をコントロールする波形調整や、燃料内面の初期擾乱を抑えるために初期燃料温度を若干高くしてフォーム層に液体状態で DT 燃料を浸透させた状態にする液体フォーム燃料の検討も行われている。個々の方策対

する詳細な報告が行われ、一定の成果が上がっていることが示された。更に精度を上げた研究が進められ、取捨選択を行いつつ、統合化を図り点火実証へと進むものと考えられる。多くの研究者・機関が寄与して進めているが、点火の実現まではまだ数年はかかりそうだというのが印象であった。

サンディア国立研究所の磁化慣性核融合 MagLIF については、昨年の APS-DPP 年会での発表が非常にセンセーショナルであったが、本年はより精度を上げるための基礎研究をロチェスター大のオメガレーザーシステムを用いて開始しており、地味ではあるが、堅実な研究進展が見られた。MagLIF は、初期磁場を印加した円筒管内に閉じ込められた燃料ガスに kJ クラスのレーザーを照射して先行加熱を行ったうえで、MJ クラスのパルスパワーで燃料・磁場を爆縮し、核燃焼を実現する方法である。圧縮磁場により、先行加熱され圧縮された高温点火部からの電子熱伝導による熱損や核反応生成 α 粒子の閉じ込めを行う点の特徴である。サンディアでは、先行加熱を行うレーザーの品質や計測システムが不十分であることから、同等のエネルギーを有し、より高品質なロチェスター大のオメガ EP システムとその計測システムを用いた先行加熱実験によるレーザー波形やレーザー導入窓の影響が実験・シミュレーションにより評価され、最適化が進められている。また、磁場圧縮に関してもパルスパワーの代わりにオメガレーザーシステムによる円筒爆縮実験での評価も行われ、要素過程の理解・最適化が着実に進められている。

直接照射爆縮については NIF レーザーシステムを用いる場合、極軸方向にレーザー照射ポートが偏っているため、ポーラー直接照射(PDD)手法がとられる。この場合、間接照射と同様に、CBET が問題となる。また、レーザー強度が 10^{14} W/cm² を超えるため、臨界密度の 1/4 における 2 プラズモン不安定性、誘導ラマン散乱、誘導ブリリアン散乱等の非線形相互作用による高速電子生成が燃料を先行加熱して爆縮特性を低下させる。CBET を抑えるため、レーザー照射径を爆縮の進展に伴って小さくする Zooming が提案された。一方、照射径が小さくなる分、強度を高くする必要が生じ、非線形効果が増大する。これを抑えるため、アブレータ物質を中 Z 材質に変え、1/4 臨界密度領域のスケール長を短くし、レーザー吸収率を高くして電子温度を上げる方策が提案され、一定の成果が見られている。衝撃波点火においても、加熱用衝撃波を駆動するためのパルスの強度が 10^{16} W/cm² に達し、非線形効果により高速電子が生成される。しかし、生成電子のエネルギーが 100 keV 程度であり、爆縮後半の燃料面密度に比べ飛程が短く、駆動衝撃波の手前ですべて吸収されるため、逆に衝撃波駆動力を増強させる正の効果が生じることが示された。これは前述の PDD 中心点火の場合とは逆の効果であり、同じ現象が全く逆の効果を示す点で非常に興味深い。

高速点火に関しては、日本からの FIREX 実験・シミュレーションに関する招待講演 1 件＋一般講演 4 件のみであった。加熱レーザーコントラスト向上による高速電子の低温化と外部磁場印加による電子ビームガイドニングに関する進展が報告され、次年度の統合実験による高効率加熱の実証がまたれる。

慣性核融合に関連した高エネルギー密度プラズマ科学研究についても、いくつかのトピックスを紹介する。ロスアラモスと MIT のグループから、高温・高密度プラズマ中での核融合反応率の計測結果が報告された。通常の高エネルギー物理実験では扱えない集団効果を、高温・高密度なプラズマを使って定量的に明らかにしようとする試みである。集団効果による反応率の変化は観測できずという結論であったが、高エネルギー密度科学研究の新しい展開として興味深い。対向プラズマ流による無衝突衝撃波生成に関して、NIF にて実験が行われ解析が進められている。今回の実験では密度が高かったために、無衝突状態を作りだせてはいないが、ターゲット設計の変更により無衝突状態を作り出せるという結論であり、今後の展開が期待される。ヨーク大学のグループは、実験室宇宙物理実験として、レーザー生成プラズマの背景磁場中での膨脹の様子を観測した。電磁場プローブ信号の詳細解析により、プラズマの膨脹フロントからのホイッスラー波の伝播が観測されたことを報告した。磁化した高エネルギー密度プラズマでの波動という新しい研究テーマであり、更なる発展が期待される。(城崎)

5. プラズマ基礎物理

プラズマ基礎物理分野の発表は、実験・観測から理論・シミュレーションまで幅広い研究分野が含まれているが、その中で「Plasma Energization – 流体的スケールと運動論的スケール間の相互作用」という切り口で、実験室プラズマから宇宙・天体プラズマまで様々な講演が行われていたのが印象的であった。また、磁場閉じ込め及び慣性核融合プラズマと関連した磁気リコネクション、フロー、乱流、ダイナモ、不安定性といった基礎物理研究も多く見受けられた。以下に強く印象に残ったいくつかの講演の紹介をしたい。

M. Mauei 氏(コロンビア大学)のレビュー講演では、高ベータのトロイダルプラズマの閉じ込めにおける乱流と関連した揺動や自己組織化の逆カスケードを含む非線形過程を研究するために、MIT と東大での磁気浮上したダイポール磁場によって実験室で産み出される磁気圏、「実験室磁気圏」の観測結果が報告され

た。また、ジャイロ運動論的シミュレーションとドリフト運動のクロージャーを有するバウンス平均化された流体モデルを用いて、交換モードやエントロピーモードの構造やカオティックなダイナミクスが示され、乱流輸送過程を調べるための実験室磁気圏の新しい物理が紹介された。

A. Bhattacharjee 氏 (PPPL) のチュートリアル講演では、最近の磁気リコネクション理論の進展についての解説が行われた。超アルヴェン速度で成長する薄い電流シートのプラズモイド不安定性が、抵抗性 MHD モデル内では Sweet-Parker モデルの予測を質的に変更し、リコネクション速度が Lundquist 数 S に依存しなくなる高速リコネクションの新しい領域を導くことが示された。合体により成長し、大きなサイズになるプラズモイドは、グローバルなスケールと運動論的スケールの間の結合だけでなく、高エネルギーへの効率的な粒子加速器の機構を提供する。また、3 次元解析ではプラズモイドは自己生成し、強い非等方性乱流を産み出し、エネルギースペクトルは非等方性 MHD 乱流現象論とずれていることが示された。

S. You 氏 (ワシントン大学) は、プラズマ流と磁場の間の相互作用を解釈するのに役立つ新しい正準場の理論を構築した。正準ヘリシティが流体的領域だけでなく運動論的領域においても保存され、これらの領域では粒子種間のヘリシティの移送がフローや磁場の形成を支配し、密度勾配が浅いときヘリシティは全エネルギーに比べてほとんど変化しないことを示した。また、同理論によって、正準波相互作用としての磁気リコネクション間の particle energization partitioning の説明の可能性を示した。

James Clerk Maxwell Prize が贈られた M. Yamada 氏 (PPPL) による受賞講演は、“Study of Magnetic Reconnection in Plasma: how it works and energizes plasma particles” というタイトルで行われた。約 20 年間の磁気リコネクション研究の成果が報告された。無衝突 (2 流体) リコネクション層は、高速リコネクションを容易にするホール効果、磁気エネルギーから粒子エネルギーへのエネルギー変換機構、エネルギー分配を明らかにすることによって理解された。最後の室内実験、理論・シミュレーション及び天体観測の分野連携がリコネクションの問題を解決する上で極めて効果的だったという言及が感慨深く感じた。

(神吉)

(原稿受付：2016 年 1 月 25 日)