



## インフォメーション

## ■会議報告

## 第55回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (APS-DPP) 年会

大谷寛明(核融合研), 宇佐見俊介(核融合研),  
神吉隆司(海上保安大学校), 砂原 淳(レーザー総研),  
金子俊郎(東北大)

2013年11月10日～15日まで米国コロラド州デンバーにて、標記会合が開催された。デンバーは標高が1600 mと高く、週半ばの寒波の到来も相まって晩秋の肌寒さを感じる状況であったが、会場のヒルトンホテルにて熱心な発表、議論が交わされた(図1)。月曜日最初の基調講演は M. Greenwald 氏 (MIT) により Alcator C-MOD トカマクにおける20年の研究成果が報告された。磁場核融合研究が ITER へと発展していく途上であり、Alcator-C が輸送、閉じ込めの物理解明に果たしてきた役割の重要性を認識できた。磁場、慣性の閉じ込め方式に依らず米国の核融合研究所・大学への予算が厳しくなる中で、多くの研究所が今後を模索しており、過去を振り返り、未来を考える重要な講演であった。また、Maxwell Prize は Phillip Sprangle 氏 (Narval Research Laboratory および University of Maryland) に贈られた。レーザーと気体やプラズマとの相互作用の研究が評価されたものである。来年は10月27日～31日まで、ルイジアナ州ニューオーリンズで開催される。以下、それぞれの分野ごとに詳細を報告する。

## 1. 基礎プラズマ物理

今回の基礎プラズマ関係のセッションは、プラズマジェット・ビーム・流れ、リコネクション、宇宙プラズマ、基礎プラズマ物理、波動・振動・不安定性、ショック・磁場形成・天体物理などがあり、活発な議論がかわされた

(図2)。これらのセッションの中から、筆者らが興味をもった磁気リコネクション部門とジェット関係の講演について紹介する。

磁気リコネクションは、宇宙・天体プラズマから核融合プラズマという幅広いテーマに関連している現象である。同時に、リコネクション自体が興味深いトピックスであり、「磁気リコネクション」テーマだけで招待講演セッションなど複数のセッションが開かれたほどである。

磁気リコネクション研究は、考えやすいこともあって、2次元、衝突無視、古典的、対称、Harris 平衡という理想的な状況設定で取り組まれてきた。しかし今日、より一般的な状況における研究が多く報告されており、リコネクション研究が新たなステージに入ったといえるのではないかと、という印象を受けた。目を引いたのが、Los Alamos National Laboratory (LANL) の W. Daughton 氏が関わっている多くの発表であった。W. Daughton 氏のグループは、 $10^{12}$ 個もの粒子による大規模3次元 PIC シミュレーションを用いて、磁場・速度シアにより発生する Kelvin-Helmholtz 不安定性がリコネクションのトリガーとなる渦を生み出すこと、磁気圏界面 (magnetopause) のように密度・温度が非対称の場合は、渦の端にそって発生する2次的な不安定性が大きく成長することを示した。同じく W. Daughton 氏が共著者である発表に、Coulomb 衝突効果が電子の運動論的構造を変形し、リコネクション率、エネルギー解放の振る舞いを変化させるという報告があった。この結果は、高密度環境の実験室プラズマに適用できそうである。他にも、B. Cerutti 氏 (Univ. Colorado) が輻射の効果を取り入れたシミュレーションを使って超相対論的リコネクションを扱い、蟹星雲のガンマ線フレアを説明しようとするなど幅広い研究成果が見られた。

また、長く薄い電流シートありきで研究がスタートして



図1 CBET and Hohlraum Drive の口頭講演会場の様子。部屋の外にまで聴衆が溢れている。



図2 波動、不安定性、リコネクションなどがテーマであるポスターセッション VI の様子。

いることに疑問を呈するもの、非等方圧力における流体方程式のクロージャーを提案するもの、プラズマが流入する上流方向が非対称の場合におけるHarris解に代わる新しい平衡解の構築など、「そもそも論」にまで踏み込んだ興味深い研究が報告されている。

次にジェット関連の講演について紹介する。ジェットも磁気リコネクションと同様に、ブラックホールや原始星から実験室まで、様々な物理条件で発生している現象である。以下では、高エネルギー密度プラズマのジェットに関して、実験とシミュレーションによる興味深い研究報告があったので、それぞれ紹介したい。

E. Merritt 氏 (LANL) らは、超音速アルゴンプラズマの2本のジェットを斜めに合体させる実験について報告を行った。この実験は、このようなジェットを使って内側に崩壊する球状プラズマ・ライナーを形成できるかどうかを評価して、高エネルギー密度物理へ応用することを目的としている。実験では、準衝突状況から完全衝突状況までのプラズマショックについて高い空間解像度で計測が行われた。密度の増加や定性的な形状は、ショックの流体力学理論やシミュレーションと一致していることが確かめられた。しかし、プラズマ・ライナーを形成する上で好ましい電子温度の急上昇は観測されなかった。

P. Gourdain 氏 (Cornell Univ.) は、磁化された高エネルギー密度プラズマのジェットにおけるHall物理の役割についてシミュレーションで調べた結果を報告した。これまでの研究で、極限条件における流れをもった物体の基礎的な物理機構の理解が進められ、コリメイトされたプラズマジェットの形成や安定化で磁場が重要な役割を果たしていることがわかった。ブラックホールや原始星から発生するジェットでも、磁場は重要な役割を果たしていると考えられる。この報告では、ジェットを取り巻く低密度プラズマの領域では、ダイナモ効果よりもHall物理が支配的であることが拡張MHDコードPERSEUSによって示された。これは、イオンと電子が分離して、バルクなフロー速度よりも数桁大きな速度を電子がもつためである。この効果はZピンチのジェットにおけるキンクモードの安定性にも影響を与えていることが報告された。(大谷, 宇佐見)

## 2. 磁場閉じ込め核融合分野

磁場閉じ込め核融合分野の発表は実験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、実験装置 (Alcator C-Mod, DIII-D, NSTX, ITER, MST, Pegasus, C-2 など) や物理テーマ (①ディスラプションと安定性, ②乱流と輸送, ③高エネルギー粒子, 3次元効果の物理, ④加熱, フロー, 輸送, ⑤安定性限界と輸送, ⑥トカマクシナリオ, 輸送障壁, 安定性, ⑦エッジとペデスタルなど) ごとにセッションが分かれているのが特徴であり、一つの物理現象を閉じ込め配位にとらわれることなく包括的に理解しようとしていると感じた。閉じ込め配位別の発表件数は、トカマクが圧倒的に多いが、ヘリカル, RFP, コンパクト・トラスも多いのが印象的であり、米国における磁場閉じ込め核融合研究の裾野の広さを感じ

た。以下にいくつかの印象に残った発表の紹介をしたい。

C-Mod では、Xポイント・ターゲット・ダイバータの有効性, Iモードプラズマのコア乱流の軽減, LH入射によるエッジ/SOL乱流の抑制およびトロイダル回転への影響などの報告があった。特にLH入射によるトロイダル回転への影響についての報告では、コアの $q$ 分布に依存してトロイダル回転の方向が変化することが観測されている。トロイダル回転の方向は、 $q_0 < 1$ の放電ではプラズマ電流と反対向きに、 $q_0 > 1$ ではプラズマ電流と同じ向きになっている。この回転の変化は、磁気シアの依存性を通じた残留応力の極性の変化と一致していることが示された。

DIII-D では、ITERの物理ベースに貢献する研究としてRMPによるELMおよびペデスタル制御, ディスラプション回避, ELMのないQHモードなどの報告があった。特に静的非対称磁場をプラズマに印加することによって、QHモードが維持されている。ピーリング・バルーニングモードの安定性解析によってQHモードの運転にはエッジでの十分なトロイダル回転シアが必要であることが示されており、最近の実験で静的非対称磁場によって生じる新古典トロイダル粘性によるプラズマ電流と反対向きのトルクが、必要なエッジ回転シアを生成することが示された。

NSTX では、コンパクト核融合科学施設設計をめざした完全非誘導運転を達成するための次期装置NSTX-Uの現況と研究計画, ディスラプション回避のためのRWMとプラズマ回転の制御, 非誘導電流立ち上げ, 高温液体リチウムプラズマ対向機器, Hモードにおけるエネルギー閉じ込めと輸送の衝突度依存性, ジャイロ運動論的シミュレーションによるマイクロテアリングモードの解析, ペデスタルHモードの理解の進展などの報告があった。特に同軸ヘリシティ入射による非誘導電流立ち上げのNIMRODコードを用いたMHDシミュレーションによって、閉じた磁気面の形成機構は、2方向のピンチフローによる2D Sweet-Parker型リコネクションが起ることによって説明されることが示された。

MST では、MHDの実証性, テアリングモードと高速イオンの相互作用, V3FITコードを用いた3Dヘリカル平衡の再構成, 2色SXRトモグラフィ・システムによる電子温度分布の計測, 運動量と電流輸送などの報告があった。特に1 MW, 25 keVのNBIを用いた高速イオンの閉じ込めと安定性の研究では、高速粒子駆動不安定性が高速イオン密度を制限するが、高速イオンの閉じ込めはほぼ古典的であることが示された。その他、実験と理論シミュレーションとの比較が行われ、運動量緩和やダイナモ電流駆動機構の理解が進展している印象を受けた。

ヘリカルプラズマでは、HSXから自発フロー, 径電場, ブートストラップ電流の計測, LHDからマルチ・スケール乱流と非局所輸送の観測などの報告があった。コンパクト・トラスプラズマでは、C-2から合体生成されたFRCの寿命が通常のFRCのスケーリング予測を超え5 msに達し、また、NBIによる加熱および維持の実験とそのシミュレーションの比較が詳細に行われ、今後の進展が期待される。



その他、HIT-SI と HIST から小型装置の特徴を生かしたヘリシティ入射実験とその理論シミュレーションが行われ、2 流体ダイナモ緩和機構の理解が着実に進捗していることが窺えた。(神吉)

### 3. 慣性核融合分野

レーザー核融合では米国の国立点火施設 (National Ignition Facility: NIF) の点火に向けた実験結果が注目された。NIF は現在、1.8 MJ、192本のレーザーが完全に稼働し、ホーラム (hohlraum) ターゲットを用いた間接照射方式により爆縮点火実験が行われている。当初の計画であった昨年の米国会計年度までの核融合点火に至らず、予算縮小の憂き目にあいながらも点火実験が続けられているが、2013 年の夏以降大きな研究の進展がみられた。2012年までの実験条件を変更し、レーザーのフットパルス強度を高くして、メインパルスまでの時間を短くした新しい高フットパルス条件で実験を進めた結果、爆縮性能が大幅に向上した。圧縮燃料部に注入されたエネルギー以上の核融合出力が得られ、20 kJ の核融合出力が得られた。効率としては 1.8 MJ の入力に対して 20 kJ であるので、まだ 1 % 程度である。しかし、より重要なことはアルファ粒子による自己加熱が確認され、爆縮による外部からのエネルギー注入を超えて自己加熱が支配的になる領域に入りつつあることが報告されたことである。アルファ粒子加熱が外部からの圧縮燃料部へのエネルギー付与を超えつつあり、これから先、アルファ粒子加熱が点火部の加熱において支配的なことにより急速な核融合中性数の増大が見込める。2012年までの実験に比べ高いエントロピーの爆縮であるため、燃料球の圧縮に関しては、従来の低いエントロピー爆縮で  $1.2 \text{ g/cm}^2$  であった面密度が  $0.8 \text{ g/cm}^2$  と、2/3 程度に低下したが、これは予想されたほど大きくない。これは 2012 年までの低エントロピー爆縮条件でも高速電子による先行加熱があり、実際には設計値ほど低エントロピーになっていない可能性が指摘された。

一方、爆縮性能低下の最大の原因である流体不安定性については計測データの質、量が共にこの一年間で格段に進歩した。従来、ホーラム横の観測窓から観測していた P モードに加え、ホーラムの軸方向からの観測 (M-モード) の観測が始まった。目下、P、M のモード 1 ～モード 4 を爆縮の各時刻で計測し、実験条件を入力したシミュレーションとの比較によって、爆縮が包括的に理解できるようになってきている。高エントロピー条件ではほぼシミュレーションどおりの中性子発生数が得られている。また、流体不安定性と並び、もう一つの大きな話題はビーム間のエネルギーのエネルギー輸送 (Cross-Beam Energy Transfer: CBET) であった。NIF ではホーラムの両端から多数のレーザービームを 2 つのバンドル角度で入射しており、イオン音波を介したブリルアン不安定性により、一方のバンドルから他のバンドルへとレーザーエネルギーが移る。これによって、実効的にレーザーのポインティングが移動し、照射不均一性の原因となる。この CBET は NIF だけでなく、直接照射型のレーザーでも入射レーザーと反射レー

ザーの間で生じ、レーザー散乱光の増大、爆縮速度の低下につながる。この CBET のモデリングについては University of Rochester のプラズマ理論グループの貢献が大であり、招待講演で同大の J. Myatt 氏からモデリングの詳細が披露された。CBET とレーザープラズマの大きな課題である非局所電子熱輸送のモデルを組み合わせることにより、レーザーアブレーション、爆縮過程を定量的に高精度で評価することができるようになった。これによりレーザーアブレーションの長年の課題の一つクリアしたことになる。まだ NIF 条件に関してはビームごとの CBET の計算はできておらず、光線追跡をベースにした CBET の評価が今後の課題である。

さらに NIF 実験の大きな謎として、Missing energy 問題が報告された。即ち、シミュレーションとの比較から、レーザーエネルギーの 15% 程度がどこかに消えたように見える問題が未だ解決していない。これに関しては原子過程、非局所電子熱輸送、レーザー照射されたホーラム内壁の膨張など多くの視点から解析が報告されたが、まだ結論を得るにはいたっていない。

点火に向けた NIF の今後の展開に関しては、レーザーピーク強度を高めることにより爆縮速度を 340 km/s から 370 km/s まで増加させる、ダイヤモンドアブレーターを用いて流体不安定性を抑制するだけでなく爆縮速度の増大もめざす、最適化により流体不安定性の成長を抑制し、中性子を少なくとも 2 倍に増加する、中性子を 2 倍に増加する、CBET が生じないラグビーボール型のホーラムを用いる、さらなる先進的点火のアイデアとして高強度磁場印加による熱流およびアルファ粒子のストッピングレンジを抑制するなど、多くのアイデアが発表された。

NIF の実験以外にも University of Rochester のクライオジェニックターゲット爆縮、Polar Direct 爆縮、高速点火、衝撃波点火など多くの議論があったが、ここでは NIF の話題を中心にまとめた。(砂原)

### 4. プラズマ応用

プラズマ応用の分野で、今回、特に注目すべき講演は会議 4 日目午後のチュートリアル「Plasmas in Medicine」であった。プラズマ応用分野の国際会議では、近年、プラズマ医療に関する研究発表が急激に増大しているが、APS-DPP においてはプラズマ物理が中心であるため、これまであまり発表されていなかったと思われる。しかしながら、今回のチュートリアル講演では、300 人程度収容できる比較的大きな会場の 7 ～ 8 割は聴衆で埋まっており (図 3)、プラズマ医療への関心の高さが伺われた。講演は、D. Graves 氏 (Uni. California, Berkeley) により Low Temperature Plasma Medicine と題して行われた。これまでのプラズマ医療研究の歴史がレビュー的に紹介され、その後、最近の成果である低温プラズマジェットによる、がん治療、創傷治癒、殺菌・滅菌について報告された。また、これらの作用には低温プラズマ中で生成される活性酸素種 (Reactive Oxygen Species: ROS) と活性窒素種 (Reactive Nitrogen Species: RNS) が重要な役割を果たしており、こ



図3 Plasmas in Medicine のチュートリアル講演会場の様子。

これらの活性種のプラズマ中での挙動についてのシミュレーション結果を紹介するとともに、今後はプラズマ中の紫外線、電場、荷電粒子なども考慮した解析が必要であることが示された。将来展望として、この低温プラズマは、医療のみならず、農業、食品、ヘルスケア等の分野にも大きく広がっていくことが強調された。

そのチュートリアルの直後に、「Technology Applications of Plasma and Charged Particle Beams」セッションで、プラズマ応用分野の4件の招待講演が行われた。特筆すべきは、4件中3件が企業の研究者による講演であり、実際に実用化されている技術について報告された。A. Agarwal 氏 (Applied Materials Inc.) は、半導体産業に不可欠なプラズマプロセスシステムの最適な形状等を解析できる3次元のプラズマモデリングについて報告した。容量結合プラズマおよび誘導結合プラズマを生成する高周波の周波数を 60 MHz まで増加させることで、高密度で空間

的に均一なプラズマを実現できることなどを、詳細な計算結果を用いて示した。また、S. Shankar 氏 (Intel Corporation) による講演は、新しいモデリングと評価技術を開発することでナノスケール物質の特性を理論的に予測し、新規ナノ複合物質創製をめざすという挑戦的な内容であった。これらの報告のように、企業では実験を行う前にモデリングにより最終生産物を予想し、プラズマプロセスを最適化することで、生産コストを削減することが重要な課題となっている。一方、実験研究に関しては、筆者が講演し、気液界面プラズマ（液体と接触する非平衡プラズマ）を用いたナノ粒子とカーボンナノチューブの複合物質創製について、その合成手法とナノエレクトロニクスやバイオ・医療分野への応用展開について紹介した。

上記の他にも、「Low Temperature Plasma Science, Engineering, and Technology」のセッションでは、大電力マイクロ波放電プラズマおよび高周波放電プラズマにおいて複数種のガスを混合することによって放電電圧が低下すること、バイオ医療応用をめざした非平衡プラズマ中に過酸化水素を導入することで上述した ROS や RNS および水酸基ラジカルを多量に生成可能であること等が報告され、新規材料合成や高効率殺菌に対して有用な技術であることが示された。いずれも大気圧領域で生成されたプラズマを扱っており、今後もウェットな環境である生体細胞への適用等も視野に入れると、大気圧領域でのプラズマに関する研究はますます重要になってくると考えられ、そのようなプラズマ中での基礎的な物理現象を解明することが望まれている。

(金子)

(原稿受付：2014年2月7日)