

## インフォメーション

### ■会議報告

#### 第 58 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (APS-DPP) 年会

吉村信次 (核融合研)  
田村直樹 (核融合研)  
鈴木康浩 (核融合研)  
長友英夫 (大阪大学)

##### 1. 概要

2016 年 10 月 31 日から 11 月 4 日までの 5 日間、米国カリフォルニア州サンノゼにおいて、第 58 回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。サンノゼは、サンフランシスコ・ベイエリアの南に位置するシリコンバレーの中心都市で、アドビシステムズの本社も置かれている。会場となった San Jose McEnery Convention Center (図 1) はダウンタウンの中心にあり、サンノゼ国際空港から車で 10 分程度に位置する。近年、アメリカで開催される会議ではホテル代が高騰しているが、市内は VTA のライトレール (路面電車) や DASH と呼ばれる無料バスで移動できるため、やや離れた比較的安価なホテルからでも会場へのアクセスは良好であった。

今回の APS-DPP 年会では、1900 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 (200 件程度の推薦から選ばれている)、招待講演 98 件、口頭発表約 700 件、ポスター発表約 1100 件であった。

毎朝 8 時から 60 分間 (発表 50 分 + 質疑 10 分) で行われるレビュー講演から紹介する。月曜日が T.S. Pedersen 氏 (IPP, Greifswald) による “Results from the first operation phase of W7-X”, 火曜日が V. Smalyuk 氏 (LLNL) による “Laboratory, Hydrodynamic instabilities in high-energy-density settings”, 水曜日が J. Foster 氏 (Univ. of Michigan) による “Towards plasma-based water purification: challenges and prospects for the future”, 金曜日が P.J. Morrison 氏 (Univ. of Texas at Austin) による “Structure and structure-preserving algorithms for plasma physics” であった。大型磁場閉じ込め装置の初期実験結果、超高強度



図1 会場のサンノゼコンベンションセンター。

レーザー実験における流体不安定性、大気圧プラズマを用いた水の浄化技術、プラズマの数値計算のための幾何アルゴリズムと多岐に渡る講演がバランス良く選択されていた。大気圧プラズマ応用に関するレビュー講演が APS-DPP で行われるのは (筆者の記憶する限り) 初めてのことであり、時代の流れを感じた。

今年度の James Clerk Maxwell Prize for Plasma Physics は、「天体プラズマのエナジェティックス・安定性・ダイナミクスに関する独創的な研究およびプラズマ物理と天体現象を結びつけるリーダーシップ」に対して E. Zweibel 氏 (Univ. of Wisconsin-Madison) が受賞し、木曜日の朝 8 時から “The Basis for Cosmic Ray Feedback: Written on the Wind” と題した受賞記念講演が行われた。星間ガスと宇宙線の間の星間磁場を介した結合の物理に関する講演で、数天文単位から数千光年という空間スケールに渡る壮大な内容であった。1975 年の Lyman Spitzer 氏の受賞に始まる Maxwell Prize の歴史の中で、初の女性受賞者ということであった。Zweibel 氏は学部時代をシカゴ大学で過ごしたこともあり、シカゴ・カブスの 108 年ぶりのワールドシリーズ優勝の年の受賞は、良い記念となったのではないだろうか。

全体講演の後には、7 つのオーラルセッション、ポスターセッション、場合によってはミニコンファレンスが並行で行われる。会議のプログラムを網羅したモバイルアプリが提供されており、関心のある分野の発表を探しやすくなっているが、同じ時間帯であるため聴講を諦めざるを得ない発表も多々あった。次回は、2017 年 10 月 23 日から 27 日までの 5 日間の日程で、ウィスコンシン州ミルウォーキーで開催される予定である。以下、分野ごとの詳細を報告する。(吉村)

##### 2. 磁場閉じ込め核融合プラズマ (実験)

本会議直前の 2 週間前に日本の京都で IAEA 核融合エネルギー会議が開催されたため、講演数が例年と比較して減少すると思われたが、昨年とあまり変わらない発表数で、米国における研究の層の厚さと裾野の広さを改めて実感した。ただし、例年、本年会では米国以外からの発表も多く見受けられるのだが、今年は中国 (HL-2A, EAST) からの発表が特に少ないように感じた。これについては、ビザ取得の観点から、IAEA 会議の影響を受けているのではないと思われる。

磁場閉じ込め核融合プラズマ (実験) に関する招待講演は 24 件あり、年会全体の中で最も多かった。その内訳は、輸送・乱流関係が 6 件、周辺プラズマ・不純物関係が 7 件、MHD 関係が 4 件、ITER を念頭に置いた放電シナリオ関係が 4 件、その他が 3 件であり、全体としてはバランスの取れた構成だったと思う。会議初日に行われたレビュー講演では、T.S. Pedersen 氏 (IPP, Greifswald) により、昨年 12 月に開始されたドイツの大型ステラレーター装置 Wendelstein 7-X (W7-X) における実験で得られた物理に関する初期的な結果が報告された。内容については、こ

れまでのヘリカル型装置と同様に、プラズマコア部で電子ルートが形成されたことによる閉じ込め改善 (Core Electron Root Confinement: CERC) が得られたことなど、既にいくつもの国際会議で同様の発表がなされているためここでは割愛するが、米国の主要な研究所及び様々な大学がW7-X計画に参画しているためなのか、1年近くたった今でも本年会では大きな注目を集めていた。アメリカ物理学会プラズマ物理分科会の年次大会のセッション、特に口頭セッションは磁場閉じ込め核融合プラズマ (実験) に関して言えば、主に装置毎に分けられる。今回は、DIII-D Tokamak, Alcator C-mod and DEMO, NSTX-U & Pegasus等というように分けられており、ここからも米国の主要装置がDIII-D Tokamakであることが伺える。また、“Research in Support of ITER”と題された口頭セッションも設けられ、装置によらず ITERに関する研究成果はこのセッションでまとめて発表されていた。“DIII-D Tokamak”セッションでは、タングステンダイバータ、データメント、RMP磁場印加時のプラズマ応答、そしてITERで基本となるプラズマ運転パラメータの模擬実験など、現在の核融合研究の最先端に関係する多彩な研究が紹介され、聴衆の興味を引きつけていた。“Alcator C-mod and DEMO”セッションでは、E.S. Marmor氏 (MIT) によるオーバービューにおいて、Alcator C-modの最高磁場(8 T)を用いた実験においてもEdge Localized Mode (ELM) のない I-mode 放電の生成に成功したとの報告があった。I-mode遷移閾値スケリングは、磁場強度に対して弱い依存性を示しており、高磁場におけるI-mode運転の容易さが強調されていた。これはMITが昨年発表したARC (Affordable, Robust, Compact) 核融合炉のコンセプトの有効性を後押しするものである。また、会議開催直前の実験最終日である2016年9月30日にトカマクとしては世界最高のプラズマ圧力 (2.05 atm) を達成したとの報告もあり、会場には用意された椅子に座りきれない程の多くの聴衆が詰めかけていた。個人的に気になった発表に、Alcator C-modにおける非局所熱輸送現象に関する発表があった。周辺摂動による冷却パルス波と瞬間的な閉じ込め改善による熱パルス波が混在しているとして、それを定量的に評価しようとしていたが、ヘリカル型装置であるLHDと類似する点が多く、非常に興味深い発表であった。残念ながらAlcator C-modがシャットダウンしてしまうため、今後はDIII-Dに摂動印加装置としてレーザー・ブローオフ装置を設置し、同様の研究を続けるとのことである。ポスターセッションでは、米国の主要な環状磁場閉じ込め装置以外の様々な装置に関する発表も盛況であった。その中でも、Tri Alpha Energy社の磁場反転配位 (FRC) 型装置C-2Uからの発表が多く見受けられたのが、APS-DPP年会の特徴であろうか。H. Gota氏 (Tri Alpha Energy社) によるオーバービューポスター発表によると、C-2Uは既に運転を停止し、NBIなどが増強されるC-2Wへのアップグレードを進めているとのことである。また、D.T. Anderson氏 (Univ. of Wisconsin-Madison) のポスター発表では、小型ステラレータ装置HSXにおける研究の進展の他、米国で新たに計画されている中型の

ステラレータ装置の概要などが示されていた。同氏のポスターには常に多くの参加者が集まり、活発な議論が行われていた様子を見て、個人的に、W7-Xの実験開始を皮切りに、ヘリカルプラズマ研究の一層の発展が加速される気運を感じた会議であった。(田村)

### 3. 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。今回のAPS-DPPでも、ジャイロ運動論シミュレーションの発表と議論が活発に行われていた。特に、ジャイロ運動論シミュレーションの数値アルゴリズムの開発及び計算結果の検証方法についてミニコンファレンスが企画され、活発な議論が行われていた。周辺プラズマ研究のためのジャイロ運動論コードであるXGC1コードに関する発表では、C.S. Chang氏 (PPPL) が XGC1 コードの最近の開発状況、最新の計算結果、及び実験との比較等について発表した。近年、XGC1 コードを利用した周辺プラズマ研究は広がりを見せていて、実験結果との比較、および実験結果の再現に務めている姿勢が印象に残った。R. Hager氏 (PPPL) が XGCコードの仲間であるXGCaコードの紹介と応用例について紹介した。XGCaはジャイロ運動論新古典輸送計算コードであり、応用例としてHモードプラズマのペデスタル中のブートストラップ電流計算を示していた。ペデスタル中の急峻な圧力勾配が駆動するブートストラップ電流を自己無撞着に取り込むことにより、Hモードプラズマ中の複雑な輸送メカニズムをシミュレーションする取り組みを紹介していた。一方、同じく周辺輸送解析用の乱流シミュレーションコードであるBOUT++については、発表はあったものの例年に比べ少ない発表件数であった。他に、グローバルジャイロ運動論シミュレーションコードGENEをAlcator C-Modのペデスタル輸送の解析に応用した例がポスターで発表されており、注目を集めていた。

MHD分野では、NIMROD, M3D-C1をはじめとする非線形、拡張MHDシミュレーションコードを用いたシミュレーション研究が多く発表されていた。特に、NIMRODコードはトカマク、RFP、スフェロマック、ステラレータに応用が進み、様々な成果が報告されていた。RFPでは、C.M. Jacobson氏 (Univ. of Wisconsin-Madison) はMSTと京都工繊大のRELAX装置についてNIMRODコードのシミュレーションを行い、実験結果との詳細な比較を行うことで、散逸パラメータが数値シミュレーションに与える影響についてポスター発表を行った。V.A. Izzo氏 (UCSD) は NIMRODコードに不純物の輻射モデルを取り込み、ガスパフ入射によるディスラプションの緩和シミュレーションの発表を行った。不純物ガスパフが、ある磁束管に沿って拡散し、輻射により局所的にプラズマを冷却する様子が示された。また、近年、NIMRODコードをステラレータの解析に応用する研究が開始され、同じくUniversity of Wisconsin-MadisonのT.A. Bechtel氏が大型ヘリカル装置 (LHD) を模した  $L=2/M=10$  のヘリオトロン配位のシミュレーション結果について紹介していた。しかし、NIMRODコードは、計算境界が軸対称であ

る必要があるため実際のコイル形状を考慮したシミュレーションは難しい。今後の研究の進展が期待される。一方、M3D-C1コードの応用例では、N. Ferraro氏 (PPPL) が垂直不安定性にM3D-C1コードを応用し、非軸対称な垂直不安定性と導体壁、プラズマ回転の関係について議論していた。また、NSTX-U、KSTARなどへの応用も紹介していた。

今回のAPS-DPPで特筆すべきことは、ステラレータ分野においてドイツ・Wendelstein 7-X (W7-X) の解析結果が発表され始めたことである。特にファースト実験キャンペーンであるOPI.1はリミター放電であったため、リミター上の熱粒子束の解析の研究が報告されていた。F. Effenberg氏 (Univ. of Wisconsin-Madison) は、EMC3-EIRENEコードを用いてリミター上の熱粒子束の数値シミュレーションを行った。計算結果は、おおむね実験計測結果と一致することが示されたが、今後予定されている高ベータのダイバータ放電では、プラズマ応答の効果を考慮した実際の磁場配位を含む計算が重要であることが指摘された。今後、3次元平衡計算コード等との結合による解析の進展が期待される。(鈴木)

#### 4. 慣性核融合プラズマ

ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) の国立点火施設 (NIF) で行われているレーザー核融合の点火実験に関連した発表が多かったが、NIF関係でも基礎的な研究については、高エネルギー密度科学 (HED) 分野のセッションに割り振られた発表もあり、結果としてレーザー核融合は例年より多くのセッションに分散した印象を受けた。さらに、会場が広いので、講演時間が連続する別セッションの講演を聴講することは困難であった。

レビュー講演では V. Smalyuk氏 (LLNL) が、「高エネルギー密度環境における流体力学的不安定性」と題して、レーザープラズマ中の流体力学的不安定性について、過去数十年にわたる各国の大型レーザー施設における主な実験結果を引用しながら紹介した。さらに、不安定性低減の試み、宇宙プラズマ観測と実験室プラズマの比較まで踏み込んだ内容も興味深く、良くまとまった講演であった。

招待・一般講演では、NIFにおいて点火を妨げる物理の原因究明とその解決方法に関する発表が多くを占めていた。流体力学的不安定性によるアブレーターと燃料の混合、燃料内での分子レベルの分離などに関する発表がLLNL、Univ. of Rochesterの研究者を中心に数多くあった。いずれも決定的なものではなく、複数の要因が影響していることが示唆されていた。さらに、SRS、SBS、TPDなどの非線形レーザープラズマ相互作用に関しては、Polar Direct Drive (PDD)、Shock Ignition (SI) 方式などの関連発表も含め、様々な観点からの発表があった。

工学的にはhohlraumターゲットの構造の問題も指摘されており、その原因に関する計測、解析、および改良案などをまとめた招待講演 (Weber: LLNL) が印象的であった。hohlraum内部でカプセルを支えるテントと言われる薄膜が不安定性の原因になっていることから、その支え

る接点の位置を適正化することによって性能改善が期待できる。さらには、燃料注入チューブに強度を持たせてテントの代替として機能させることができないか検討を行っていた。ただし、別の講演では、hohlraum内部で燃料注入チューブがターゲット表面にX線の影を作ることが不安定性の種の一つになっている可能性も示されていた (MacPhee: LLNL)。NIFの実験では、少しでも影響を及ぼす可能性があれば改善していくという姿勢が強くあらわれていた。

高速点火関連の発表は、阪大レーザー研のFIREXの実験期間と重なったため発表件数が少なくなってしまったものの、ポストデッドラインで3 keV加熱を示唆する結果 (Fujioka: ILE, Osaka)、および LFEXレーザーによる超高強度レーザーのピコ秒照射によるイオン加速 (Iwata: ILE, Osaka) など注目された発表があった。(長友)

#### 5. プラズマ基礎物理

APS-DPPではプラズマ基礎物理とのみ銘打ったセッションはないため、上記3分野以外ということになるが、非常に裾野の広い分野である。今回の報告では、特にAPS-DPPで盛んに行われている磁気圏や宇宙・天体現象をプラズマ物理の観点から理解しようとする研究を取り上げる。

MITのIan Hutchinson氏による“Electron Holes in phase-space: what they are and why they matter”と題したチュートリアル講演があった。地球磁気圏においてGEOTAIL衛星によって観測された静電孤立波は、電子ビーム不安定性の非線形発展によって形成される位相空間の電子ホールであることが簡単な1次元PICシミュレーションで示された。講演では、電子ホール (孤立した電位構造) が宇宙プラズマ乱流における重要な構成要素であることや、2次元、3次元での電子ホールの安定性まで、最近の研究成果も含めて丁寧に解説された。“Principles of Plasma Diagnostics”の著者として有名なHutchinson氏による非常に教育的な講演で、多数の推薦の中から選ばれただけあって、個人的にも勉強になった。若手夏の学校的な内容かもしれないが、プラズマ・核融合学会の年会にも、このようなチュートリアル講演があると (担当される先生は大変でしょうが) 良いと思った。

“Physics of Radiation Belts: Collaboration Between Laboratory, Theory and Satellite Observations”と題したミニコンファレンスでは、地球の放射帯における2機の観測衛星からなるVan Allen Probesミッションの成果を参加者が共有することで、高エネルギー粒子の発生をはじめとした様々な物理過程を対象とした議論が行われた。普段はAPS-DPPに参加しない衛星観測の専門家を交えて、プラズマの理論、シミュレーション、実験分野から衛星観測結果の解釈について提案がなされていた。プラズマ実験からは、West Virginia Univ.のEarl Scime氏がレーザー誘起蛍光法によるヘリコンプラズマ中の高エネルギーテールをもつイオンの速度分布関数計測について紹介し、宇宙プラズマ現象との関係に言及していた。良くデザインされた実験であったが、衛星観測とシミュレー

ションとの深い関係と比べると、パラメータの違いもあり、衛星観測の専門家の興味を十分引き付けていたとは言い難い印象であった。このような連携研究は日本でも進みつつあり、その中でプラズマ基礎実験をどう位置付けるかを考える良い機会となった。

ポスター発表に関しては、リヨン大学のグループによる“Stirring a slightly magnetized column of plasma”を紹介する。Univ. of Wisconsin-MadisonのMPDXグループによるPRL論文“Stirring unmagnetized plasma”をもじったようなタイトルだが、こちらは直線装置を用いたものである。円柱磁化プラズマ中にホットカソードとアノードを

挿入し径方向に電流を流すことで、 $J \times B$ による回転流を駆動する。今回は、レーザー誘起蛍光法とマッハプローブによる流速計測の初期結果が報告されていた。本格的な実験はこれからだが、将来的にはプラズマ柱の両端を逆回転させてvon-Kármán型の流れをつくり、磁気プラントル数を変化させたときのダイナモ効果の研究を目指している。近年、様々なグループによってプラズマを用いたダイナモ実験が提案されているが、決定的な報告は未だなされておらず、今後が楽しみな分野である。

(吉村)

(原稿受付：2017年1月6日)

## 青森温泉巡り

### その40

#### 桑畑温泉「湯ん湯ん」・・津軽海峡の漁り火を眺める露天風呂

下北半島の北端の大間温泉には露天風呂がないので、この温泉が本州最北の露天風呂のある温泉になります。津軽海峡沿いにむつ市から大間に向かう国道沿いの小高い丘の上に建つ温泉です。

天気の良い日には、津軽海峡を隔てて北海道の山並みを望むことができます。また、夏から秋にかけての真イカ釣りのシーズンには、漁火で埋まる津軽海峡を眺めながら露天風呂に入ることができます。

泉質は、ナトリウム・カルシウム-塩化物泉。灰を流したような乳白色の濁った湯です。成分合計は1リットル中8.4gと濃く、特に硫酸イオンを1g、炭酸水素イオンを1.5g含み、いかにも効きそうな湯です。

玄関を入ってすぐの所に広く綺麗な休憩所があり、ラーメンやカレーなどの軽食も美味しいので、一日のんびり過ごすことができます。

全館禁煙というのも居心地がいい要因のひとつです。青森県は、特に下北半島に多い漁師の方々の喫煙率は高く、全館禁煙にするにはすごく抵抗があったと風間村の村長さんが仰っていました。それらの

意見に流されず、健康のための温泉施設を全館禁煙にした英断にエールを送ります。



Tel: 0175-32-6045

入浴料: 400円

10:00-20:30 (第2月曜休)

晴れた日には、津軽海峡の向こうに北海道の山々が見える。