

■会議報告

第9回慣性核融合科学とその応用に関する国際会議

藤岡慎介, 佐野孝好

(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター)

標記国際会議 (9th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 以下 IFSA) が, 米国ワシントン州ベルビュー市で2015年9月20日-25日に開催された。ベルビュー市はシアトルにとって最大の郊外都市であり, 市の中心部は, 高層のオフィスビルやマンションが立ち並んでいた。歩道は極めて清潔で, 歩道脇の花壇と街路樹はよく手入れされており, 高級ブランドのブティックも散見され, 市の財政と住民の豊かさがひしひしと感じられた。

IFSAは慣性核融合分野における最大の国際会議であり, 世界各国から400名近くの専門家が集まる。オーラル発表のセッション名を開始順に並べて眺めて見ると, "Central Ignition Target Physics (中心点火方式の物理)", "Laboratory Astrophysics (実験室宇宙物理)", "Strong Field Science and Applications (高強度場科学と応用)", "ICF/Plasma Diagnostics (慣性核融合/プラズマ診断)", "Radiation Hydrodynamics (放射流体力学)", "Short Pulse Laser Facilities/Technology (短パルスレーザー施設/技術)", "Alternative Target Physics (Fast Ignition, Shock Ignition, etc.) (その他の点火方式の物理, 高速点火, 衝撃波点火等)", "EOS and Condensed Matter Physics (状態方程式及び凝縮物性物理)", "Ultra-High Intensity Laser-Matter Interactions (超高強度レーザーと物質の相互作用)", "Implosion Hydrodynamics and Hydro Instability (爆縮に関わる流体力学及び不安定性)", "Laser and Beam Plasma Interaction (レーザー, ビーム及びプラズマの相互作用)", "Z-pinch and Pulsed Power (Zピンチ及びパルスパワー装置)", "Heavy Ion Beam Drivers (重イオンビーム源)", "Inertial Fusion Energy Power Plant Technology (慣性核融合発電炉技術)", "Hot Dense Plasma Atomic Process (高温高密度プラズマ中での原子過程)", "High Energy Laser Technology and Ignition Facility (高エネルギーレーザー技術と核融合点火施設)", "Target Fabrication (ターゲット製造)"と多岐にわたる。

核融合分野で最も興味があるのは, National Ignition Facility (以下 NIF) の動向であろう。米国ローレンスリバモア研究所 (以下, LLNL) のHurricane氏がNIFの成果をまとめて報告した。NIFでは, ホーラムと呼ばれる重金属の缶の中に球殻状の核融合燃料ターゲットを置く。レーザー光をホーラムの内面に照射し, 発生したX線で核融合燃料を爆縮する。残念ながら未だNIFは点火に至っていないが, その原因として①燃料表面に照射されるX線の様子が時間的に変化しそれをコントロールできていないことと, ②核融合燃料をホーラム中で支持する部品が流体不安定性の種となっていることが指摘された。①は, ホーラム内に充満するプラズマの中で, レーザー・プラズマ不安定性が成長し, レーザー光のエネルギーが損失するためと考

えられている。核融合燃料を封入するカプセル材として, 高密度炭素やベリリウムを用い, 短い時間で爆縮・圧縮を終え, 真空のホーラムを使用するというデザインが検討されている。②については, 「テント」と呼ばれるわずか100 nm程度の薄いプラスチック薄膜が, 流体不安定性の種になっていることが報告された。カプセルの支持方法の再検討が行われている。その他には, 核融合燃料内部を伝搬する衝撃波の圧力を時間的に制御することで, 流体不安定性の成長を抑制するadiabat shapingのデザインが報告された。

個人的に大変印象に残ったのは, 直接照射方式においても, Cross Beam Energy Transfer (CBET) が広く議論されていたことである。CBETとは, プラズマ中で二つ以上の高強度レーザービームが交錯する時, イオン音波を介して, 一方のレーザービームのエネルギーが, もう一方のレーザービームに移行する現象であり, かねてから間接照射方式では問題であると認識されていた。直接照射方式においても, 入射ビームと反射したビームがプラズマ中で交錯し, 反射したビームが入射してくるビームのエネルギーに移行することが危惧されはじめている。米国ロチェスター大学の研究グループは, CBETに関する実験及びシミュレーションを行い, CBETの影響を低減する方法として, 核融合燃料の半径が縮小するのに追従して, 照射するレーザーのビーム径を小さくする"Zooming"を検討している。Zoomingは, レーザーから爆縮エネルギーへの変換効率を最大化するために, 海軍研究所が昔から提案していたアイデアであり, 久しぶりに耳にした。固体ガラスレーザーでZoomingを行う手法として, 二つの異なる発振器で, 口径の小さいビームと, 小さいビームを通す部分を抜いたドーナツ・ビームを作り, カプセル照射の直前に重ね合わせて位相板を通して集光することで, 二段階で時間的に集光径を変える手法が検討されていた。

ロチェスター大学のBetti氏は, 流体力学における相変換を用いて, OMEGAレーザーにて直接照射で達成されているプラズマ条件を使い, NIFにて直接照射方式で達成可能な一般化ローソン条件の値を導いた。一般化ローソン条件とは, ホットスパーク部の圧力と慣性閉じ込めの時間の積を, 点火に必要な積で割った値であり, 1が「点火」に対応する。彼の評価では, 一般化ローソン条件の値は, 直接照射においても0.6であり点火しない。直接照射においても, CBETに起因する爆縮圧力の低下が起こっていると考えられる。

国内では大阪大学などが推進している, 高速点火レーザー核融合に関して, 二つの大きな進展が発表された。一つは, General Atomics社のWei氏の発表である。爆縮によるガイドコーンの破断を防いだ上で, 高密度に圧縮された核融合燃料を追加加熱した結果, レーザーから核融合燃料の内部エネルギーへの変換効率が上昇したと報告された。以前は2.5%であったが, 爆縮プラズマの密度向上によって, 7%に達したという結論である。近年, 高速点火に対して比較的否定的な論調が目立っていた米国から, よい結果が出たことは大変喜ばしいことである。もう一つの目玉

は、高速点火にとって深刻な問題であるレーザー加速電子ビームの発散を、磁場を使って抑えたという実験結果である。仏国ボルドー大学の Santos 氏らは、大阪大学発明のキャパシター・コイル・ターゲットを使って、キロテスラ級の磁場を作り、高速電子の伝搬領域にこの磁場を印加することで、高速電子を磁力線に沿った方向に流すことに成功した。"Fast ignition is still alive."という文言で、プレゼンテーションを終えたのが印象的であった。高速点火に関しては、最初のデモンストレーションの後に様々な物理的難しさが顕在化し、近年、否定的な論調で語られることが多かったが、多くの研究者の不断の努力により、再び活性化する気配を感じた。

LLNL の研究者らとレストラン等でインフォーマルに議論する機会があり、その中で印象に残った発言を二つ記しておきたい。一つは、プラズマベースの X 線レーザーの歴史を振り返りながら、NIF の難しさを説明した B 氏の言葉である。B 氏が語るところによると、X 線レーザーの発振が最初にデモンストレーションされたのは、LLNL の NOVA プロトタイプの数 J 級のレーザーであった。ところが、今ではテーブルトップの数 J レーザーで X 線レーザーが発振している。この事実は、最初に「閾値」を越える難しさを物語っていると彼は言う。NIF で核融合点火を起こすことは科学的に可能なのであろうが、最初に閾値を越えるには今のエネルギーは物足りないというのが、B 氏の持論である。P 氏と C 氏は異なる機会に、異口同音の発言をしていた。点火の実証をするには、NIF で点火実験に充てられているマシンタイムが少なすぎるという。両氏が現状に対して全く同じ認識を持っていることに驚いた。

前回の奈良開催の IFSA でも見られた傾向であるが、核融合以外のレーザー・プラズマの基礎・応用研究の講演数が、回を追う毎に増加しているように感じられる。今回では、日本の SACLA など XFEL 関連の最近の成果報告が目立っていたように思う。基礎研究に関する発表の中で特に目を引いたのが、NIF を用いた実験結果がいよいよ報告され始めたことである。より大きな空間スケールでプラズマを生成できるという NIF 実験の特徴を活かして、高効率・高精度の計測が行われるだけでなく、積極的に新しい計測手法の導入にも挑戦している点は興味深かった。

LLNL の Remington 氏のレビュー的な講演によると、NIF の基礎実験は、主に「流体不安定」と「物質科学」の二本柱で展開していると言える。爆縮プラズマの不安定性の理解・抑制が非常に注目されている現状で、レイリー・テイラー不安定などの実験が精力的に進められていた。生成プラズマの大きさを活かすことで、従来のシングルモードの解析だけでなく、マルチモードの初期擾乱の時間発展を追うことが可能となっていたのは意義深いと感じた。非線形段階は初期擾乱にあまり依存しないという結論が出されていたが、今後理論・シミュレーションと合わせて理解を進めていくことで面白い研究テーマが見つかりそうであ

る。その他にも、天体现象を模擬する輻射衝撃波やワイベル不安定の実験など、今後の報告が楽しみな実験が多数進められていた。

物質科学に関する最近の成果は、LLNL の Eggert 氏の講演などで詳しく報告された。従来の定常衝撃波を用いた高圧物性計測では、試料を複数個並べた大型ターゲットを用いることで、多数の物性データを一度に取得することが可能となっていた。これは、計測値の信頼性の向上という意味では、非常に大きな技術進歩であると言えるであろう。定常衝撃波の利用だけではなく、パルス形状を工夫することで、非定常衝撃波や減衰衝撃波を制御し、準静的に圧縮された物質の物性量や音速を計測する魅力的な実験も数多く進められていた。また、X 線回折や X 線トムソン散乱など、新しい計測装置の導入も進んでいる様子であった。物質科学関連では、求心衝撃波による Gbar の発生など、NIF の特色を生かした実験が今後も進められていくだろう。

バンケットにおいて、Edward Teller Medal の受賞式が行われた。本賞は、レーザー及び粒子ビームを用いた高温高密度状態の科学研究の分野において先進的な研究成果やリーダーシップを顕著に示した研究者に対して、American Nuclear Society から授与される。2015年は、上海交通大学の Jie Zhang 教授及び大阪大学の疇地宏教授が受賞した。疇地教授の業績は、レーザー爆縮法による超高密度圧縮の実証、短パルスレーザーを用いた高速点火の研究、及びレイリー・テイラー不安定性の定量的な理解である。写真は、受賞式の後、同僚及び指導を受け国内外で活躍中の研究者らが壇上に集まった記念写真である。

クロージングにおいて、前回会議から引き続いて開催された学生賞の表彰が行われた。残念ながら今回は日本からの参加者の受賞はなかったが、学生参加者の増加のためにも、今後も継続してほしい企画である。また、今回は2017年9月にフランスのサン・マロにて開催されることが発表された。イギリス海峡に面し、城壁に囲まれた旧市街が見所の観光地であり、モンサンミッシェルにも近いなど、大変魅力的な開催地である。(原稿受付：2015年11月6日)

