

小特集

レーザー核融合における新点火方式：衝撃点火

New Twist for Inertial Fusion : Impact Fast Ignition

1. はじめに

疇地 宏

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

(原稿受付：2007年7月10日)

いまや、米国の国立点火施設 (NIF) やフランスのレーザーメガジュール (LMJ) といった巨大レーザー核融合実験施設で、慣性核融合の点火燃焼が現実のものになろうとしている。これら二大施設が目指す核融合点火は、米国などを中心に1970年代から着実に研究が積み重ねられてきた中心点火と呼ばれる方式[1]を採用している。この方式では、球状の燃料ペレットを四方八方から多数のレーザービーム (あるいは軟X線) で照射し、主燃料を固体密度の3-4千倍という超高密度に圧縮することが高エネルギー利得の必要条件となる。しかし、それだけでは点火・燃焼は起きない。中心部のホットスポットと呼ばれる低密度・高温燃料部を点火に足るだけの温度 (5 keV) と面密度 (ρR) 値 (0.4 g/cm^2) を持つところまで、外部主燃料自身の爆縮過程を通して圧縮してやる必要がある。特に流体不安定性の観点から、こうした自己圧縮による点火ホットスポット実現は困難を極め、その克服の歴史がレーザー核融合の歴史そのものと言っても過言ではない。

一方、1980年代半ばになって我が国において提唱された高速点火方式[2]に関しては、(1)米仏等列強の物量型研究と対峙しつつも世界の慣性核融合研究をリードし得ること、(2)コンパクトで高効率な核融合炉を目指す我が国独自のエネルギー安全保障の理想に叶うこと、が研究開発をする上で強いモチベーションとなり、1990年半ば過ぎには我が国における慣性核融合研究は高速点火方式に一本化されることとなった。現在では高速点火の実現を目指す第一期計画 FIREX-I (Fast Ignition Realization Experiment) が進行中である。FIREX を含む高速点火の主流方式としては、金等の高Z物質への超高強度のペタワット (PW) レーザー照射により生成される高エネルギー電子ビームによって圧縮燃料を外部から強制加熱することで、その外縁部を点火に至らしめるというものである。この高速点火方式は

中心点火方式に比べて1桁少ない投入エネルギーで点火するポテンシャルを持っている。大阪大学レーザーエネルギー学研究センター (以下、阪大レーザー研) におけるPWレーザーを用いたこれまでの実験で、入射レーザーの2割程度のエネルギーがコアプラズマの熱エネルギーに変換されたことが確認されている[3]。現在、高速点火の基礎研究は日本のみならず世界各国で高い関心を持って続けられている。しかしながら、高速点火研究においては、超高強度レーザーと物質との相互作用や相対論的電子ビームのプラズマ中の輸送といった核心物理の比例則は未だ確立されたとは言えない。

こうした中、最近、本小特集の主題である衝撃点火と呼ばれる全く新しい点火方式が阪大レーザー研から提案された[4]。この衝撃点火は、外部から強制的に点火ホットスポットを生成せしめるという観点から高速点火に大別されるが、次章以下に見るようにこれまでのどの点火方式とも本質的に異なっている。衝撃点火の発想自体は極めてシンプルで、圧縮された主燃料部に対して外部から別の燃料小片 (インパクター) を超高速で激突させることにより、インパクターの運動エネルギーを直接インパクター自身の内部エネルギーに変換し、点火を起こすものである。いわばインパクターが点火プラグ (ホットスポット) と化するのである。この点において、従来型の高速電子を介する高速点火が主燃料の一部を点火に足る温度に加熱して点火スポットを作るのとは対象的である。衝撃点火の特徴として次の3点が挙げられる：

- (1) 主要物理がシンプルであること (基本は流体物理)
- (2) 高利得設計が可能であること
- (3) 低コストであること (PW レーザーが不要)

なかんずく(1)は、阪大レーザー研が長年蓄積してきた流体不安定性に関する研究の延長線上に衝撃点火研究があると

同時にその総決算ともいえるべきものであることを意味する。これが、R&Dの観点からも高速点火に比べて開発リスクの低減が期待される所以である。かくして、中心点火を第一、高速点火を第二とすれば、この衝撃点火は第三の点火方式という位置づけとなろう。発案からまだ3年ではあるが、衝撃点火は着実に実験成果を積み上げ、既にいくつかのブレイクスルーを経験している。例えば、平板ターゲットを使った実験でアブレイティブ加速としては世界最高の640 km/sを達成し、また球ターゲットを使った統合実験では高速点火の記録に迫る中性子発生数 2×10^6 個を記録している。国際的にも衝撃点火のアイデアは高い関心を引いており、例えば昨年秋には欧州共同レーザー装置のPALS (チェコ) を使って衝撃点火基礎実験がポーランド／チェコ合同チームによって行われている。また、阪大とアメリカ海軍研究所 (NRL) およびレベデフ研究所 (ロシア) との国際共同研究も既に一昨年より進行している。さらに、現在進行中のFIREX計画に若干の補正を加えればほぼ共通の実験設備のもとで衝撃点火研究の本格的なR&D

が可能となる。本研究は、まだ緒についたばかりではあるが、何よりも最終目的地へ繋がり得るパイパスが増えることは戦略的にも望ましい。

本小特集では、理論、シミュレーション、実験といった異なる角度から衝撃点火にスポットを当てる。以下の各章では、第2章が衝撃点火の理論モデル、第3章が二次元統合シミュレーション、第4章が平板ターゲットを用いた超高速飛翔体生成実験、第5章が統合ターゲットによる原理実証実験、第6章がNRLとの共同研究による衝撃点火における中性子発生に関する理論モデルについて述べてある。

参考文献

- [1] J. Nuckolls *et al.*, Nature **239**, 139 (1972).
- [2] 山中龍彦：大阪大学レーザー核融合研究センター内部資料 (1985)。
- [3] R. Kodama *et al.*, Nature **412**, 798 (2001).
- [4] M. Murakami and H. Nagatomo, Nucl. Instrum. Methods A **544**, 67 (2005).

小特集執筆者紹介



あぜ ち ひろし
疇 地 宏

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・理学研究科協力講座教授。79年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。80年阪大助手，81年米国イエール大助手などを経て，99年より現職。レーザー核融合のマイルストーンであった固体密度の600倍の圧縮を実現して以来，超高密度圧縮と流体力学的不安定性を本職とする。レーザー核融合による点火・燃焼を実現させたいと思っている。



むら かみ まさ かつ
村 上 匡 且

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター准教授。1988年大阪大学工学研究科博士課程修了後，独マックスプランク量子光学研究所，レーザー技術総合研究所，大阪大学レーザー核融合研究センター等を経て2003年より現職。専門は慣性核融合ターゲット設計，放射流体物理，イオン加速，非線形物理，自己相似解等に関する理論・シミュレーション研究。趣味はテニス，スキューバダイビング，二胡。



なが とも ひで お
長 友 英 夫

1996年東北大学工学研究科博士課程機械工学専攻修了。現在，大阪大学レーザーエネルギー学研究センター准教授。レーザー核融合を中心とするレーザープラズマの数値シミュレーションに従事している。運動も趣味も幅広くいろいろなことをやっている（やっていた）が，家族のプレッシャーによって縮小済み。最近は安上がりなウォーキング，縄跳，プール，スケートなど，子どものための運動を余儀なくしている。やってみると結構楽しいことが多い。まさに童心に返ったようです。



さかい や たつ ひろ
境 家 達 弘

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻助教。博士(理学)。平成17年3月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了後，大阪大学レーザーエネルギー学研究センター特任研究員を経て，平成19年4月から現職。専門はプラズマ科学，惑星内部物質学。趣味はバスケットボール，映画鑑賞。平成18年2月博士論文「アブレーティブ レイリー・テイラー不安定性の実験的研究」で井上研究奨励賞受賞。



Alexander L. Velikovich

Alexander L. Velikovich was born in Moscow, Russia. He received M.S. degree in physics from Moscow State University in 1974, the Ph. D. degree from the Kapitza Institute for Physical Problems, Moscow, in 1978, and an advanced degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences from the Institute of High Current Electronics, Tomsk, Russia, in 1991. Since moving to the U.S. in 1993, he worked for the Naval Research Laboratory in Washington, DC, first as a contractor and since 1999 as an employee with the Plasma Physics Division. He specializes in the Inertial Confinement Fusion/High Energy Density Plasma-related hydrodynamics. Dr. Velikovich is a Fellow of the American Physical Society (2005).