

100 テラワット レーザーと高速点火実験

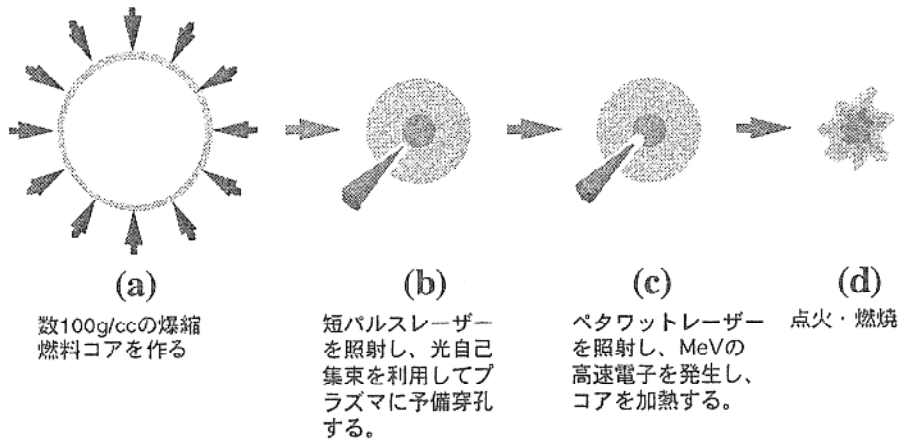


田 中 和 夫*

100TW Laser and Fast Ignitor Experiment

Key Words : Ultra-high intensity laser, new concept for laser fusion

ペタワットレーザーの開発は流体不安定性を回避し
新しい点火方式（高速点火）を可能にする



レーザーチャンネルの形成や数百万電子ボルトの電子やイオンの発生によるプラズマ加熱は極限レーザープラズマの研究の中心課題となっている。

図 1

1. はじめに

レーザー慣性閉じ込め爆縮核融合(ICF: Inertial Confinement Fusion)の研究は、核融合

点火を実現し、プラスの利得を得ようとするフェイズに入っている。アメリカ・フランスでは核融合点火を目標にして国家プロジェクトとしての計画が進行しており、出力規模メガジュールのガラスレーザーシステムの建設が開始された。計画が順調に進めば、核融合研究における最初の点火実験は米国で2004年-2007年ごろ、レーザー核融合によって達成されることになる。

さらに新しい手法として、数年前、一旦燃料を十分な密度にまで爆縮しておき、その爆縮プラズマコアが慣性で静止している時間内に外部から超高強度、超短パルスレーザーを導入し強制的に核融合点火を行うという「高速点火」

*Kazuo TANAKA
1951年4月4日生
大阪大学・工学部・電気工学科卒業
現在、大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻、助
教授、Ph. D.、プラズマ物理・レー
ザー核融合
TEL 06-879-7233
FAX 06-877-4799
E-Mail katanaka@ile.osaka-u.
ac.jp



提案がなされた¹⁾。これによりレーザー核融合加熱・点火の効率を大幅に向上できる可能性が出てきた。超高強度レーザーを用いた実験では、レーザー光集光強度が 10^{18} W/cm^2 を超えるため、プラズマ内の電子はレーザーの電界内で相対論的な振る舞いをする事になり、実験をすすめるに従って今までにない新しいプラズマ物理の知見が数多く得られようとしている。また、こうした超高強度レーザーを照射した際、高速電子、高エネルギーイオン、中性子、ガンマ線、X線、ポジトロンなどが、 μm オーダーの空間にせいぜいピコ秒程度の時間の間にせめぎ合うことになる複合場を形成しこれの応用も様々なものが考えられる。

高速点火の概念

図1のように、高速点火の第一段階では、パルス幅の比較的長い(数ナノから数十秒)レーザーを燃焼シェルに均一に照射することにより、そのシェル中心部に向かって爆縮を開始させる。この爆縮により非常に密度の高い燃料コア(固定密度の1000倍程度)が形成される。このタイミングで燃料コアプラズマを囲むプラズマに予め100ピコ秒程度のパルス幅のレーザーで予備穿孔(要するにプラズマに穴を開ける)する。次に燃料爆縮コアが最大密度に達したタイミングで1~10ピコ秒程度のパルス幅の超高強度レーザーを注入する。超高強度レーザーは、燃料コア付近で強い吸収を受け、コアの直接加熱、高速電子によるコア加熱などにより核融合反応の点火に至る。高速点火という言葉は、非常に高い密度のコアが静止している慣性時間内の極短時間に点火してしまうことに由来している。

高速点火方式では、これまでに研究されてきた中心点火方式のような爆縮の最終段階での主燃料/スパーク構造を作らない。中心点火方式では、爆縮されたコアの最中心部は、比較的密度は低いが、温度が十分に高く点火にいたらしめる部分と、これを取りまく密度が高く、温度は低い主燃料部分という構造を形成する必要がある。爆縮してきたターゲットは、中心部分でぶつかり出すと急激な減速を受ける。中心部分は密度が低く爆縮してくる主燃料部分は密度が

高い。密度の異なる二つのプラズマ流体は不安定になり、混ざり合ってしまう。高速点火方式ではこうした爆縮コア構造をとらず、密度さえ充分高いコアを生成したら、瞬間的に外部から点火をさせようということなので、流体不安定性の問題にあまり気を使わなくても済む。また、全体的なエネルギー効率が向上できるため高利得となる、より小さいレーザーエネルギーで点火できる可能性があるなど魅力的な点が多い。高速点火方式が、提案されて以来、ほぼ機を一にしてチャープパルス増幅²⁾という超短パルス、超高強度を得るレーザーシステムの技法が確立し超短パルス(1~10ピコ秒)を持つ大型のガラスレーザー装置の建設が可能となりフランス、英国、米国で基礎的な実験が開始されようとしている³⁾。

大阪大学での実験

大阪大学では、レーザー核融合研究センターに最終目標値ペタワット(PW)を目指す、レーザー装置ペタワットモジュール(出力100 TW、レーザー波長 $1 \mu\text{m}$ 、パルス幅0.5ピコ秒、集光強度 10^{19} W/cm^2)を昨年(1997年)に完成し、これまで爆縮実験に使用してきた激光12号ガラスレーザーシステムと同期したプラズマ実験を実施することができるようになった。この装置は、現在出力的には米国リヴァモア国立研究所のペタワット(出力1000 TW)レーザーにはかなわないが、激光12号の12ビームのレーザー光を自在に使ってこれと組み合わせる実験できるという非常にユニークなものとなっている。例えば、12本のレーザーで一旦ターゲットを爆縮しておいて、そこにペタワットモジュールレーザーを照射し、高速点火のモデル実験をすることも可能となるかもしれない。

予備穿孔実験

高速点火において、超高強度レーザーを照射する際に必要となるかもしれない予備穿孔に関する実験を行った。この方法は、レーザー光の強度(I)の空間方向の傾き(∇I)が光からプラズマに与える力になることを利用したものである。これは、レーザー光のポンドロモードプカと言

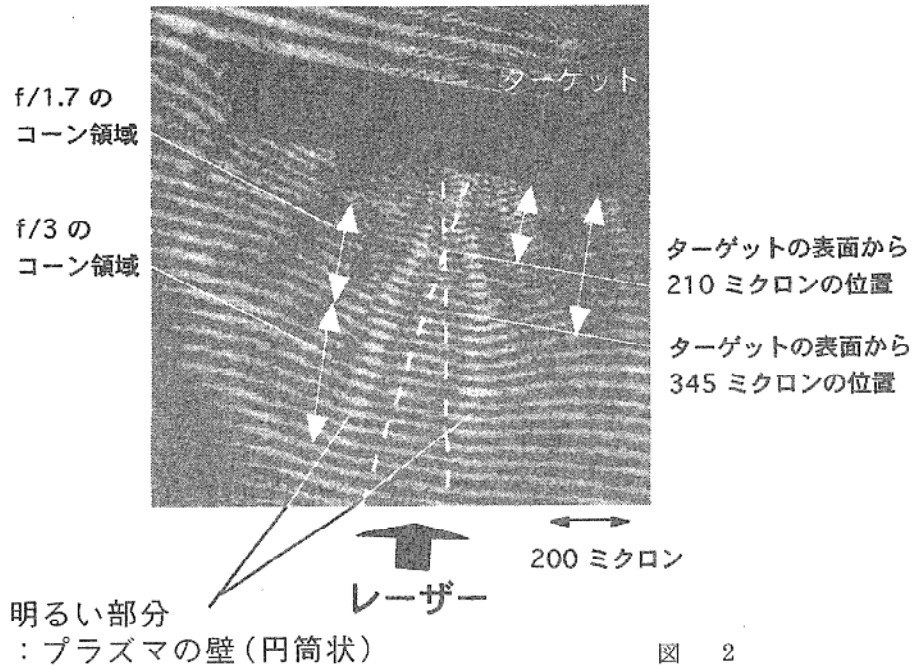


図 2

われる。この力がプラズマに作用してプラズマを少しでも凹ませると、屈折率はプラズマ密度の薄いほうが大きくなりレーザー光は凹んだほうへと導かれる。するとさらにレーザー強度が高くなり、ポンドロモーティブ力は大きくなりさらにプラズマは凹んで行き、穴を穿つことになる。この場合のレーザー光自己集束は、電子だけではなくイオンも充分に追従できる比較的長い時間スケールで行われる。

実験は、激光12号レーザーの2本のレーザービームを先ず、プラスチック平板のターゲット上に照射し、密度長60 μm 程度の準一次元プラズマを生成した。この後、1ナノ秒後にこのプラズマにレーザー光エネルギー130J、照射強度 $10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ 、波長1 μm 、パルス幅100ピコ秒のものをプラズマの吹き出し軸に沿って照射した。照射ポイントは、プラスチック表面から200 μm 程度のところに設定された⁴⁾。その際観測された紫外プローブ(波長263nm)による干渉写真像を図2に示す。これにより、レーザーにより、臨界密度以下のプラズマ中にレーザー光による穿孔がおこなわれていることが確認された。

図で、レーザーは、下方向から入射し、ターゲット表面から離れたところでは、レーザー集光コーン(f/3)に沿ってレーザーが伝搬しポン

デロモーティブ力(光の圧力)による光自己集束が始まるとレーザー集光の度合いは、早くなる(f/1.7)。明るく見える対称な筋の様なものは、レーザー光のポンドロモーティブ力により押されたプラズマが壁になったことを示している。此処でポンドロモーティブ力とは、

$$F_p = -1/2(\omega_p^2/\omega_0^2) \nabla \langle E_0^2 \rangle \quad (1)$$

で表される光からプラズマに働く力のことである。 ω_p は、電子プラズマ周波数、 ω_0 は、レーザー周波数、 E_0^2 は、集光レーザーの電界強度である。電界強度の傾きによる力がプラズマに作用することを示している。また、 ω_p^2 は、プラズマの密度に比例する関係にあるのでこの力は、密度が高いプラズマほど大きくなる。この干渉計写真からは、データ処理を行うことで密度情報が引き出せる。処理の結果、明るく見れるところのプラズマ密度は、バックグラウンドのプラズマ密度に対して5倍ほど高い密度となっていることが判る。

同様な、穿孔実験として、激光12号のレーザー10ビームを使用し、予め470 μm のプラスチック球殻(中空)を爆縮し三分の一ほど球殻が縮んだ段階で予備穿孔ビームを入射した。その際のX線写真を図3に示す。リング状に写っているのが球殻を照射した10本のレーザービー

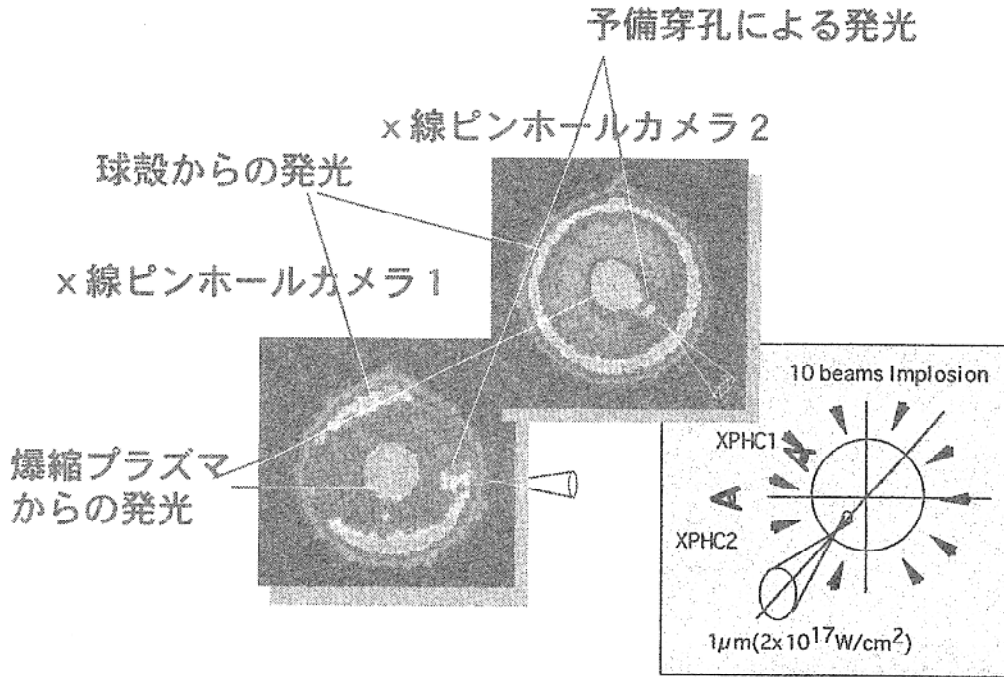


図 3

ムによるプラズマからのX線発光である。この発光は、レーザー照射された球殻が静止状態の時に発光するものであるので、発光の直径は球殻の直径となる。1ナノ秒(ナノ=10⁻⁹)の時間遅れのあと、光自己集束を利用しレーザー予備穿孔を行った。これにより、球殻の一部が自己集束したレーザー光により、部分的に加熱され微小な領域からX線を発光していることが見て取れる。高速点火の実証ではないが、模擬的な実験として球状爆縮したプラズマにレーザー予備穿孔で部分加熱を行った事になる。

100TW レーザーとプラズマとの相互作用実験

大阪大学レーザー核融合研究センターの最新装置ペタワットモジュールは、波長1μm、パルス幅0.5ps、エネルギー50Jを出力として持ち、ターゲット上に集光した際の電界強度は、10¹⁹W/cm²を超える事が出来る。こうした電界強度下では、レーザープラズマ相互作用は、相対論的な振る舞いとなる。プラズマの屈折率は、

$$n = 1 - 1/2(\omega_p^2/\omega_0^2)n_0/n_c \gamma \quad (2)$$

で表される。此処でn₀は、電子プラズマ密度、n_cは、レーザー光の波長できまる臨界密度、

γは、ローレンツファクターである。相対論的な効果は、レーザー電界内で振動する電子の振動速度が高速に近づく際に、質量変調として現れる。こうした効果を与えるレーザー強度は10¹⁸W/cm²以上となる。これ以上のレーザー強度でレーザー光をプラズマ内に集光すると、通常の臨界密度以上にレーザー光が侵入出来ることになり、高密度プラズマコア近傍へのエネルギー付与が可能となる。またレーザー集光スポットは通常ガウス強度分布するので、中心部のレーザー強度の高いところと、端部の強度の低いところでは、屈折率が異なり、光は端部より中心部に向かって自己集束する。これを相対

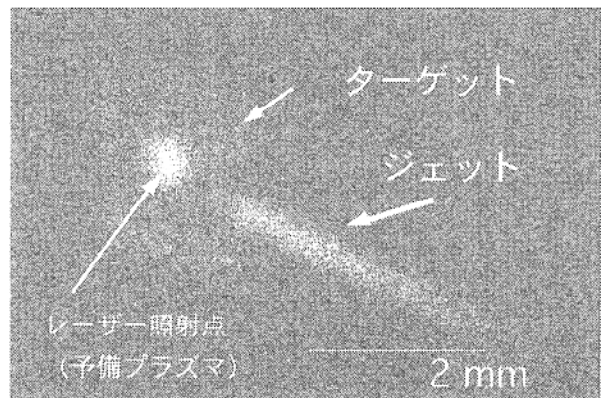


図 4

論的自己集束という。こうした詳細を検証するために、100 TW レーザーによるプラズマへの照射を開始した。図4は、予め激光12号の3ビームを用いて作成したプラズマにこのペタワットモジュールを照射した際のX線像である。観測エネルギー範囲は1 keV 程度である。

プラズマの条件は、先ほどの予備穿孔で用いたものと同様である。ペタワットレーザーは、140 μm ターゲット表面から離れたプラズマ中に集光し、45 J のエネルギーであった。集光スポット径は、約30 μm である。2 mm にも及ぶ長いジェット様のX線発光する構造を初めて観測した。こうしたジェットは、電子がレーザー光の先端の光圧により加速された結果と考えられ、現在、詳細な2次元粒子コートシミュレーションとの詳細比較が行われており、加速機構の詳細を明らかにしようとしている。こうした光圧は、100 ギガバール(ギガ=10⁹, 1 バール=1 気圧)にも達するものであり、そこで発生する電子、イオン、磁場は、複雑に相互作用しあう。ここで発生した電子のエネルギーは700 keV 以上、4 MeV 以下であり、高速点火に必要な電子エネルギー1 MeV を満たしている。

結 び

上記実験から、予備穿孔が可能であり、超高強度レーザーをプラズマに照射すれば、メガエレクトロンボルト程度の加熱用高速電子が生成されることが確かめられた。高速点火実験の次の段階は、予備穿孔により爆縮プラズマに穴を穿ち、その中を超高強度レーザーをガイドして通してやり、高い密度に圧縮されたコアに到達させ加熱を試みることである。この超高強度レーザーを用いた高速点火へむけた実験は、従来のレーザープラズマ実験計測では、考えられないパラメーター領域をカバーするため、計測器自身にも新しい工夫を凝らしながら進めなければならない。こうした工夫により見いだされた新

しい物理知見により、粒子加速や、超高輝度X線源などの新たな応用を生み出す効果もあり、魅力に満ちた研究になろうとしている。

参 考 文 献

- 1) M. Tabak et al., Phys. Plasmas 1, 1626 (1996)
- 2) D. Strickland, G. Mourou, Opt. Commun., 56, 219 (1985)
- 3) M. Perry et al., SPIE Conf. on Generation, Amplification and Measurement of Ultrashort Laser Pulses III, 28-30 Jan. 1996, San Diego, USA
- 4) R. Kodama, K. Takahashi, K. A. Tanaka, M. Tsukamoto, H. Hashimoto, Y. Kato, and K. Mima, Phys. Rev. Lett., 77, 4906 (1996)

「謝 辞」

本研究は、以下に示す大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻、大阪大学レーザー核融合研究センターの実験及びレーザーチームの努力により実施された。

山中龍彦, 児玉了祐, 千徳靖彦, 泉 信彦, 砂原 淳, 高橋兼次郎, 岩田 学, Mathew Allen, 岡田一範, 松下知広, 岩谷卓也, 三好和則, 前川 修, 正崎敏哉, 東 寛之, 本田朋子, 押川幹生, 加藤義章, 藤田尚徳, 金辺 忠, 北川米喜, 大道博行, 白神宏之, 西村博明, 実野孝久, 川崎鉄次, 吉田英次, 松尾悟志, 北村寿男, 坂本高保, 波多野潤一, 林 智美, 高橋敏子, 松尾秀昭, 中上時夫, 守井 保, 秋月 寿, 徳村啓雨, 森尾 登, 酒屋典之, 島田京子, 漆原新治, 大井真紀子, 伊山功一, 上田 勲, 栗田隆史, 吉井健裕, 岡田照夫, 浅原浩雄, 乗松孝好, 高木 勝, 木村泰子, 森本克己, 中島 貢, 前田 正, 三間園興 (敬称略, 順不同)