

機関番号：14401  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2010  
 課題番号：19206099  
 研究課題名（和文） 臨界密度以上のプラズマでの相対論的レーザー光自己集束現象の研究  
 研究課題名（英文） Study for relativistic laser self-focusing in overdense plasma  
 研究代表者  
 田中 和夫（TANAKA KAZUO）  
 大阪大学・工学研究科・教授  
 研究者番号：70171741

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では相対論的光自己集束現象を導波路とした高速点火の基礎研究を行い、①高強度レーザーの集光位置を制御することで高強度レーザーが安定に高密度領域まで伝搬しうることを明らかにし、②自己集束下において、電子の放出角度分布が非常に狭くなることを実験的に示し、さらに③電子スペクトルの計測から効率的に燃料を加熱する理論モデルを提案した。これらの結果により、本方式が成立するだけでなく、非常に効率的に燃料を加熱・点火に至らしめる可能性があることを示すことが出来た。

## 研究成果の概要（英文）：

We investigated the fast ignition with self-guiding of ultra-intense laser pulse via relativistic self-focusing effect. In this research, we demonstrated the possibility of stable propagation of laser pulse by choosing an optimum focusing position, and narrowing of electron emission angle under self-focusing. We also propose a new heating mechanism of fast electrons against the core plasma from the measurement of electron energy spectrum. These achievements could exhibit the possibilities of efficient heating and ignition of the fuel under this scheme.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,600,000	4,080,000	17,680,000
2008年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	0	0	0
年度			
総計	33,500,000	10,050,000	43,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：慣性核融合、高速点火、相対論的自己集束

## 1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合における高速点火方式は、レーザー爆縮により高密度に圧縮された燃料コアをその静止時間内（～100ピコ秒）に、①コアを取り巻くプラズマコロナ中に導波路を確保し、そこに超高強度レーザー（強度 $>10^{18}$ W/cm<sup>2</sup>）パルス（時間幅1-10ピコ秒）を注

入し、②そのレーザーエネルギーを燃料コア近傍にて高エネルギーの電子に変換し、③この電子により瞬時に密度燃料コアを加熱し、高速（瞬間）点火しようとするものである。コアは密度だけを高くすれば良いため、レーザー爆縮時に従来を中心点火方式で最重要課題とされてきた流体力学的不安定性の回

避が本質的に必要なく、数分の1のレーザーエネルギーで核融合点火を達成できると考えられている。我々は既に、高速点火ターゲットとして中空の金コーンを超高強度レーザーパルスの真空ガイドとして使用し、1keVまでイオン温度の加熱を世界で初めて実証した。

本研究では金コーンのガイドは使わず、レーザーとプラズマの非線形性を極限まで利用するという独自の発想に基づいて生み出された、レーザー光自己集束チャンネルをレーザーパルス自身のガイドとして利用する高速点火方式を提案する。レーザー光圧力であるポンドロモティブ力と、相対論効果で誘起されるプラズマ中のレーザー光異常透過性を利用し、通常では伝搬不能な高密度プラズマにレーザー光自己集束を起こし、プラズマ穿孔によるチャンネルを生成する。レーザーは、コア近傍まで到達し、そこでパルスのレーザーエネルギーをコア加熱に使用するというものであり、将来レーザー核融合炉設計の観点から、①コーンの debris (ゴミ) 問題が無い、②爆縮が均一になり、容易に高密度コアが形成できるなどの利点のある「金コーンを使用しない高速点火方式」に繋がる研究することは、レーザー核融合のより早い実現を目指す場合、非常に重要な研究となりうる。

## 2. 研究の目的

本研究は私たちが新たに提案している高速点火レーザー核融合の新方式、相対論的光自己集束現象を導波路とした高速点火の基礎研究として、①相対論的光自己集束現象の詳細を明らかにし、②その内部又は先端から発生する高速電子の発生とエネルギー輸送の詳細を明らかにすることを目的としている。金コーンの真空ガイドを使わないで燃料コアを加熱するためには、爆縮された高密度コアを取り巻く大スケールのコロナと臨界密度を超えるプラズマを切り裂き、加熱の為にレーザー光パルスを通すための真空チャンネル形成が必要となる。またチャンネルが、爆縮コア付近まで形成された場合、その先端から燃料コアを加熱する高速電子を発生させコアを加熱する必要がある。このチャンネル生成条件が明らかになり、発生する高速電子の特性が判れば、高速点火実験に応用する事が可能となる。

## 3. 研究の方法

### (1) 1次元大スケールプラズマでの相対論的自己集束レーザーチャンネル形成

高速点火レーザー核融合実現の重要な選択肢となる超高強度レーザー光のプラズマ中の相対論的光自己集束(プラズマチャンネル形成)の生成メカニズム及び生成条件を

明らかにする。そのため、①臨界密度を超える密度を持つ次元空間大スケールプラズマを生成させ、②相対論的光自己集束チャンネル生成(特性の判った次元プラズマ中のレーザーによるチャンネル形成)を行い、その生成過程及び条件を明らかにする。臨界密度とは、通常その密度以上にはレーザー光が伝搬できず、急激にプラズマ中に吸収される密度を指す。臨界密度を超えた領域では、レーザー光が  $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$  以上(超高強度領域)のレーザー強度を保つと、電子は相対論効果である質量変調により振動数が低下し、異常侵入・伝搬が可能となる。本研究は、この相対論効果を利用し相対論的自己集束を起こすことが可能となる。

### (2) 相対論的自己集束チャンネル形成時の高速電子発生メカニズム及び特性の解明・制御

チャンネル内部または先端からレーザー光圧などにより発生する高速電子(エネルギー=1-50MeV)の諸特性の計測(エネルギースペクトルや空間分布)を行う。高速電子は将来爆縮コアの加熱媒体として使用するため、特にレーザーから燃料コアへのエネルギー変換効率を考えた場合、その特性の解明は大きなキーポイントとなる。

### (3) 高速電子の高密度プラズマ中での伝搬・加熱メカニズムの解明・制御

チャンネルから発生する高速電子の高密度プラズマへの加熱機構の解明、及び加熱効率の計測を、プラズマの局所的な温度分布及びターゲット中の熱核反応計測により行う。高速電子の温度は数 MeV(メガ電子ボルト)から数 10MeV にも上るため、燃料プラズマでの阻止能を考えると、効率よくエネルギーを燃料プラズマに与えずに通過してしまうが、レーザープラズマ相互作用で生成する高密度高速電子の集団運動により異常加熱が起き、固体密度プラズマへ効率的に加熱することを代表者のグループが日英共同研究で明らかにしてきた。しかし最近の粒子シミュレーションでは燃料プラズマ近傍では非常に電子密度が高いため集団効果を誘起するレーザープラズマ非線形相互作用が殆ど成長せず、衝突過程のみが重要であることが示されている。

そのため、光チャンネルで生成する高速電子による高密度プラズマの加熱特性(エネルギー輸送)を計測する。このプラズマは平板ターゲットを別のレーザービームの照射による衝撃波圧縮で生成し、密度を制御・変化させる事が可能で、最大 16 倍の固体密度を生成し高密度燃料コアを模擬することが可能である。この高圧縮プラズマの長さを変化させ、高速電子による加熱された温度がどう

変化するかを調べることにより、その加熱メカニズムを調べることが可能となる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 超高強度レーザー光自己集束によるプラズマ中でのチャンネル形成と強度評価

以前の実験において、Super-penetrationによる異常透過が起こるためには、大スケール爆縮プラズマに対し、高強度レーザーは適切な集光位置を選ぶ必要があることが示唆されていた。そのため、集光位置がレーザー伝搬にどのように影響を与えるのかを調べるため、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 MII 号ガラスレーザー施設を用いてプラズマ実験を行った。使用した高強度レーザーは波長  $1\mu\text{m}$ 、パルス幅約  $600\text{fs}$  で、真空中における集光強度は  $3.3\text{--}4.4 \times 10^{18} \text{Wcm}^{-2}$  である。爆縮プラズマを模擬した大スケールプラズマは別のビームラインで生成することが出来、レーザーのエネルギーを変化することにより最大電子密度をレーザー臨界密度  $n_c$  の 23 倍から 75 倍の密度まで変化する事が出来る。

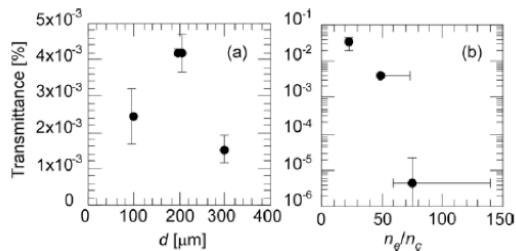


図1 レーザー透過率の(a)照射位置依存性 (b)プラズマ密度依存性。[T. Matsuoka et al., PPCF 50 (2008) 105011]

図1 (a)は最大プラズマ密度を50倍の臨界密度に固定し、高強度レーザー照射位置を変化させたときの透過率を示す。最大透過率は  $n_c/4$  に集光したときに得られ、その値は約0.5%であった。(b)は逆に照射位置を  $n_c/4$  に固定し、プラズマ密度を変化させ時の結果で、密度が最も少ない場合に最大透過率が得られた。

実験結果を解析するため、光軸近軸近似を用いたプラズマ中のレーザー伝搬の波動計算を行ったところ、 $n_c/4$  に集光した場合、相対論的自己集束と回折効果とのバランスにより最も効率的にレーザーが高強度を保ったまま長い距離を伝搬しうることが明らかになった。加えて、2次元の粒子コードでレーザープラズマ相互作用を計算したところ、 $n_c/4$  でのレーザー径がレーザー波長の2倍程

度までであれば  $n_c/4$  で起こる誘導ラマン散乱とそれに続くフィラメント不安定性の成長が抑制され、またそれに近いほどフィラメント化による散乱で失うレーザーエネルギーが少なくなりえることが明らかになった。

以前の実験において異常透過が見られたときの集光位置も  $n_c/4$  であり、これらの結果から、レーザー集光位置を適切な場所を選ぶことにより、レーザーが臨界密度以上の高密度領域まで安定に伝搬しうる事を初めて実験的、理論的に明らかにすることが可能となった。

##### (2) チャンネル内部及び先端より生成される高速電子の発生エネルギー (1~50MeV)

Super-penetration ではレーザーは相対論臨界密度近傍まで伝搬し、そこでレーザーエネルギーは高速電子に変換される。レーザーがプラズマと相互作用する際、プラズマの大きさによってその様相が変化する事はよく知られており、それに伴い放出分布も変換することが予想される。高速電子の放出分布、すなわちエネルギー密度は燃料コアへの加熱効率に非常に重要なパラメータであるため、Super-penetration 下の高速電子放出分布を計測する実験を大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの PW レーザーを用いて行った。

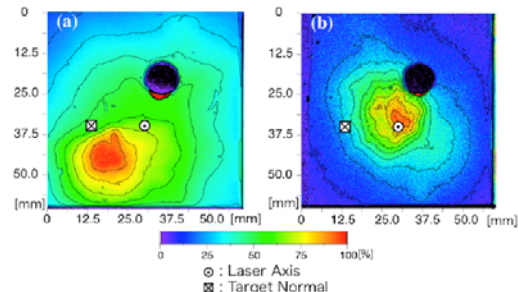


図2 高速電子放出分布。(a)プラズマスケール長が短い場合。(b)長い場合 [T. Tanimoto et al., J. Phys. Conf. Ser. 112 (2008) 022095].

図2はプラズマスケール長が(a)短い場合と(b)長く、異常透過が起こった場合の電子放出分布を、ターゲット裏面に垂直においた Imaging plate で検出したものである。色スケールは信号の強さを表し、赤くなるほど沢山の電子がその位置に飛んできたことを示す。図中の黒丸は他の計測器の観測窓でデータが無いことを示しており、また小さい白丸と四角はそれぞれレーザー軸とターゲット法線方向を表している。その結果、スケール長が短い場合、電子はレーザー軸からずれ、放出角度も半値全幅で66度であったのに対

し、Super-penetration 下ではレーザー軸に 33 度で放出することが分かり、非常に効率よくコアを加熱できることが明らかになった。

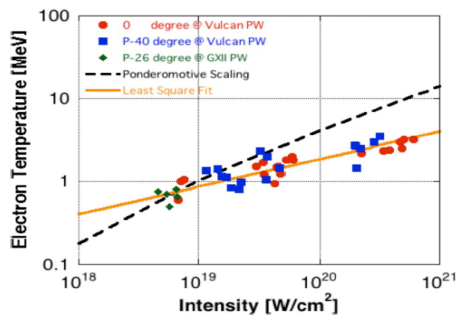


図3 高速電子平均エネルギーのレーザー強度依存性。各点は実験値を表し、点線はシミュレーションから予測されていた依存性、実践はデータの最小2情報によるフィッティングを表す。[T. Tanimoto et al., Phys. Plasmas 16 (2009) 062703]

一方、Super-penetration のように長スケールのプラズマが存在する場合、レーザープラズマ相互作用で生成する電子のエネルギーがレーザー強度の1/2乗で増加し、そのため将来の燃焼実験に必要な高強度レーザーでは電子温度が高すぎて、燃料コアで効率よくエネルギー付与をせず、そのまま透過してしまう可能性が指摘されていた。そこで、英国ラザフォード研究所と共同研究を行い、生成される高速電子平均エネルギーの強度依存性を初めて広いレンジで計測した。その結果を図3に示す。今まで予測されていた依存性と異なり、レーザー強度の1/3で増加することを実験的に明らかにし、今まであまり考えられてこなかった、レーザー進行方向のポンドロモティブ力を考慮したモデルを構築し、実験結果と一致することを示した。この結果、将来の点火・燃焼実証炉や商用炉においても高速点火方式の有用性を示すことが出来た。

### (3) 必要な計測装置の開発・製作

H19年度に、自己集束の様子を制動放射X線によるプラズマ自発光2次元画像計測を行う目的でX線ピンホールカメラを作成し、さらに筒頭に永久磁石を取り付けシングルヒット計測法によるプラズマ媒質の $k\alpha$ 線計測が同時に出来るように改良した。これにより計測した $k\alpha$ 線の強度から、生成された高速電子数を直接計測できるようになったことで、高速点火においてレーザーから高速電子へのエネルギー変換効率を計測するというプラズマコア加熱に直接関連する非常に重要なパラメータを調べることが可能にな

った。

また自己集束時の高速電子スペクトルの空間分布を計測することは、高速電子からプラズマコアへのエネルギー付与を考えるのに非常に重要となる。そのため、レーザー軸から40度まで数度刻みに多方向から電子スペクトルを計測できるマルチチャンネル電子スペクトロメータの開発をH19年度からH20年度にかけて行った。モンテカルロコードで爆縮プラズマにおける高速電子の散乱を見積もり、それにより角度刻み、範囲、エネルギー範囲などを決定した。真空チャンバーに取り付け、マイクロオーダーの高精度調整できるような機構を導入、これにより高速点火で重要となる高速電子のエネルギー分布を一度に様々な方向から計測できるようになった。これにより高速電子計測を通じてレーザープラズマ相互作用の様子を探ることが可能となった。

### (4) 全電流量 100MA を超える高速電子の異常エネルギー付与機構の理論提案

生成された高速電子がどのようにプラズマ燃料にエネルギーを付与するのかは、高速点火研究にとって本質的な問題の一つである。本研究計画を実行する過程において、近コーン付き爆縮コアでの高速電子計測を、本研究計画で整備した電子スペクトロメータで行ったところ、図4に示すように、高速電子により加熱が起こり、核融合反応中性子が増大した場合にのみスペクトル形状に変調が見られた。

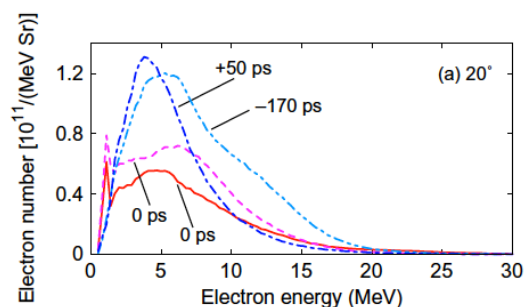


図4 ガイドコーン付きターゲットを用いた高速点火爆縮追加熱実験における高速電子スペクトル。時間は、燃料プラズマが最大密度に到達する時間に対する高強度レーザーの照射時間 [T. Yabuuchi et al., New. J. Phys. 11 (2009) 093031]

これは高速電子による加熱が起こっていることを初めて直接的に示す証拠であり、高速点火の成立性を実証する極めて重要な成果である。またさらに、電子のエネルギー1-10MeVの範囲においてスペクトルの減少が見られた。これは燃料コアプラズマの密度か

ら決まる阻止能よりもはるかに高いエネルギーの電子が異常吸収されていることを示している。この現象を物理的に考察するため、インド・プラズマ研究所の P.K. Kaw 所長と共同研究を行い、電子電磁流体力学理論モデルを導入した。この理論モデル下で、爆縮プラズマのように急峻な密度変調があるプラズマに高速電子が入射されると、電磁ショックを誘発し、電子ビームの界面で不安定性が成長することによりそのエネルギーが急激に散逸することを予測した。数値計算により、その過程が起こりうる電子エネルギーが実験で得られた 10MeV に非常に近いことを明らかにした。これにより、Super-penetration 下においても高いエネルギーを持つ高速電子が非常に効率よくエネルギーを付与する可能性を示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

- ① Study of ultraintense laser propagation in overdense plasmas for fast ignition, A Lei, K.A. Tanaka, H. Habara 他 25 名, Phys. Plasmas 16, 056307 (2009). 査読有
- ② Summary of Inertial Fusion Sessions, K.A. Tanaka, Nucl. Fusion 49 (2009) 104004 査読有
- ③ Evidence of anomalous resistivity for hot electron propagation through a dense fusion core in fast ignition experiments, T. Yabuuchi, K.A. Tanaka, H. Habara 他 7 名, New J. Physics 11 (2009) 093031 査読有.
- ④ Monte-Carlo Simulations for Heating of Superdense Matter by Relativistic Electron, A. OKABAYASHI, T. YABUCHI, H. HABARA and K.A. TANAKA, J. Plasma Fusion Res. 8 (2009) 1222 査読有.
- ⑤ Measurement of hot electron scaling generated by Petta Watt lasers, T. Tanimoto, H. Habara, 他 19 名, Phys. Plasmas 16 (2009) 062703 査読有.
- ⑥ Focus optimization of relativistic self-focusing for anomalous laser penetration into overdense plasmas (super-penetration), T. Matsuoka, K.A. Tanaka 他 13 名, Plasma Phys. Control. Fusion 50 (2008) 105011 査読有

⑦ Fast heating of cylindrical imploded plasmas by PW laser light, H Nakamura, K.A. Tanaka, 他 9 名, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 165001 査読有

⑧ Use of imaging plates at near saturation for high energy density particles T. Tanimoto, H. Habara, K.A. Tanaka 他 5 名, REV. SCI. INSTRUM. 79 (2008) 10E910 査読有

⑨ Relativistic laser channeling in plasmas for fast ignition, A.L Lei, K.A. Tanaka, H. Habara 他 14 名 Phys. Rev. E 76, (2007) 066403 査読有

⑩ On the behavior of ultraintense laser produced hot electrons in self-excited fields, T. Yabuuchi, H. Habara, K.A. Tanaka 他 10 名, Phys. Plasmas 14 (2007) 040706 査読有

[学会発表] (計 28 件)

- ① 羽原英明, Measurement of fast electrons inside the dielectric material via observation of its Cherenkov radiation (invited), 第 51 回米国物理学会プラズマ物理分科会, 2009. 11. 6, 米国・アトランタ
- ② 羽原英明, 長スケールプラズマ中における高強度レーザーの自己集束と高速電子生成, 日本物理学会 2009 年秋期大会, 2009. 9. 27, 熊本大学
- ③ 羽原英明, Stable single channel formation in long scale plasma for fast ignition (Invited), The 6th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, 2009. 9. 10, 米国・サンフランシスコ
- ④ 田中和夫, Long scale plasma 中での高速電子エネルギー輸送に関する研究, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009. 3. 27, 立教大学
- ⑤ 田中和夫, World of Relativistic Field Created by Ultra-intense Laser and its application, プラズマ科学シンポジウム 2009, 2009. 2. 3, 名古屋大学
- ⑥ 羽原英明, Study of ultra-intense laser propagation in overdense plasmas for fast ignition (invited), 第 50 回米国物理学会プラズマ物理分科会, 2008. 11. 21, 米国・ダラス

⑦田中和夫, Hot Electron Production for High Energy density Physics (Invited), International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers Development, Science and Emerging, 2008.10.28, 中国・上海

⑧田中和夫, Inertial Fusion Summary IAEA Fusion Energy Conference, 2008.10.15, スイス・ジュネーヴ

⑨田中和夫, Study of hot electron behaviors relevant to fast ignition, Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2007.9.12, Kobe, Japan

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 和夫 (TANAKA KAZUO)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号：70171741

### (2) 研究分担者

近藤 公伯 (KONDO KIMINORI)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：80225714  
(H19 まで分担者として参画)

羽原 英明 (HABARA HIDEAKI)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：60397734