

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：63902
 研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
 研究期間：2016～2019
 課題番号：15KK0245
 研究課題名（和文）高速トムソン散乱計測による過渡的プラズマ物理現象の解明（国際共同研究強化）

 研究課題名（英文）Study of transient plasma physics by fast Thomson scattering system(Fostering Joint International Research)

 研究代表者
 安原 亮（Yasuhara, Ryo）

 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

 研究者番号：30394290
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,700,000円
 渡航期間： 3ヶ月

研究成果の概要（和文）：レーザーの繰り返しを30倍以上に向上することが可能な「バーストレザー」を開発することによって、画期的な高速計測が可能となる高速トムソン散乱計測装置を実現した。レーザー媒質で発生する熱によって媒質内に温度勾配ができる時間スケールより短い時間でレーザー増幅することによって、熱の影響を排除した高繰り返しレーザー動作によって達成された。従来の計測では、30Hz程度に制限されていた測定時間分解能が、本研究によって1kHz以上まで上昇した。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置で実際のプラズマ実験で測定が行われており、固体水素ペレットの溶発現象のような過渡的に変化するプラズマの計測に用いられている。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 トムソン散乱計測の高速化は、計画段階のものも含めて世界的な潮流となってきた。マックスプランクプラズマ物理研究所のW7-Xで、レーザー技術で先端を行くドイツの半導体励起固体レーザーを導入した1kHzの計測計画等、各国で取り組みが進んでいる。このような国際的な状況は、時間分解能の向上が新たな物理現象発見へのクリアな研究戦略であるためだと推測される。本課題で開発した高速トムソンシステムは世界最先端の性能であり、各国のプラズマ実験装置で行われている測定との比較や共同実験などで広く国際共同研究に寄与できる。本手法を用いることで、過渡的なプラズマ物理現象の総合理解が期待される。

研究成果の概要（英文）：By developing a "burst laser" that can improve laser repetition by 30 times, we have realized a fast Thomson scattering system that enables high time resolution measurement. It was achieved by highly repetitive laser operation without heat influence by laser amplification within a time shorter than the time scale of thermal diffusion in the laser medium. As the result, the measurable time resolution was increased to more than 1 kHz. It is at least 10 times faster than the conventional measurement, which was limited to about 30Hz. Measurements have been performed in actual plasma experiments using a large helical device at the National Institute for Fusion Science, and are used to measure transiently changing plasma such as the ablation phenomenon of solid hydrogen pellets.

研究分野：レーザー装置、プラズマ計測

キーワード：バーストレザー 過渡的プラズマ現象 トムソン散乱計測 プラズマ電子温度 プラズマ電子密度

1. 研究開始当初の背景

レーザートムソン散乱装置（以下、トムソン散乱装置）はプラズマ局所電子温度・密度分布を、非接触・不干渉かつ幅広い温度密度領域で計測可能であることから、核融合プラズマ研究に欠かせない装置となっている。しかしながらトムソン散乱装置に必要な大パルスエネルギーのレーザー装置は、プローブ用レーザー装置の制限により、数 10Hz~100Hz 程度の繰り返し率に留まっている。従って、ミリ秒オーダーで過渡的に変化するプラズマの電子温度及び電子密度の空間分布変化、例えば水素ペレットの溶発、プラズマ崩壊、加熱装置による急速なプラズマ加熱といった現象を追従することができない。これらはプラズマ電子温度・電子密度分布が急激に変化するため、他の計測装置の測定が難しく、局所計測が可能なトムソン散乱装置の高速化が強く望まれている。上記課題に対して、申請者は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）において、複数台レーザーを使用した時間分解能の向上などトムソン散乱装置の高時間分解能化を進めてきた。本課題の基課題では、固体レーザーで問題となる発熱による熱レンズ等の熱光学効果の解消を目的に、レーザー媒質の熱拡散時間よりも早くバーストレザー動作を終えることで克服し、1ms 以下の時間間隔に複数パルスのレーザー光を発生するバーストレザーの開発、半導体レーザー励起方式を用いることによりレーザー媒質内の発熱量を低減した高繰り返しレーザーの実現、といったアプローチでトムソン散乱計測システムの高繰り返し化に向けた取り組みを進めてきた。

2. 研究の目的

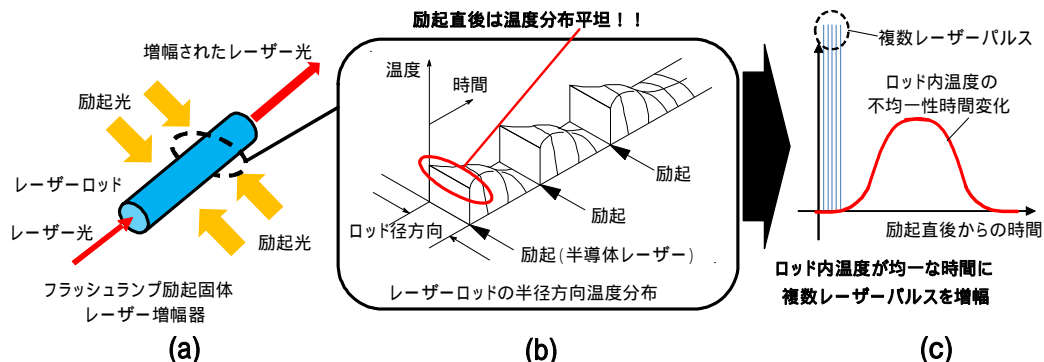
本課題では、基課題で進めた、バーストレザーの開発を国際共同研究によって加速させ、トムソン散乱計測の高速化による過渡的プラズマ現象の研究に取り組んだ。ウィスコンシン大学マディソン校、プリンストンプラズマ物理研究所及びパリ国立高等化学学校との共同研究により研究を加速し、従来の 10 倍以上となるミリ秒以下の時間分解能で連続 100 点計測可能なトムソン散乱装置を開発する。これにより、核融合炉への燃料供給手段である水素ペレットのプラズマ中での溶発や不純物などの影響によるプラズマ崩壊といった過渡的なプラズマ現象の計測が可能となる。

核融合炉を実現するための超高性能プラズマの燃焼制御と定常保持には、これらの過渡的現象の理解と体系化が必須である。本課題は、それらに大きく寄与すると共に、バーストレザーの更なる高性能化によって、測定可能領域を拡大し新しいプラズマ研究を切り開く。

3. 研究の方法

固体レーザーの高繰り返し化では、固体レーザー媒質内の発熱により、熱レンズ効果といった熱光学効果が問題となる（熱光学効果はいわゆる「かげろう」として一般に知られるものと同じ現象）。これはレーザー光の出力低下や光学損傷の原因となり、レーザーの高出力化を制限する。

本研究では、媒質内に温度分布が発生する前に、レーザー増幅を行うことで熱光学効果を回避して 1ms 以下の時間幅で複数回パルスを発生させる熱蓄積型半導体レーザー励起バーストレザーを開発する。図 1 (a)に示すように固体レーザーを半導体レーザーで選光励起すると、図 1 (b)のようにレーザーロッドの冷却過程で温度分布が発生する。しかしながら冷却過程の初期段階のごく短い時間では、ロッド外への熱伝達が間に合わず温度分布平坦な状況が生じる。Nd:YAG をレーザー媒質として用いるため熱伝達の時定数から、1ms 以下の時間スケールではロッド内での温度分布は平坦になる。図 1 (c)のようにロッド内の温度分布が均一な時間帯のレーザー増幅で熱効果を防止した複数回繰り返しレーザー動作が可能となる。また半導体レーザーを用いることで、レーザー準位を選択的に励起し、余計な発熱を抑えていることも本方式の特徴である。



- 光励起直後に、レーザーロッドの熱拡散時間よりも短い間にレーザー増幅をする。
- 熱効果フリーで、1ms以下の複数パルスの出力が可能

図1 バーストレザーの原理

バーストレザー装置は、図2に示すフラッシュランプ励起 Nd : YAG レーザーシステムとウィスコンシン大学マディソン校で開発された IGBT 素子を用いたフラッシュランプ駆動光源(図3)で構成される。プリンストンプラズマ物理研究所では、バーストレザーを用いたトムソン散乱計測装置の技術的課題や実際のプラズマ計測に向けてのシステム設計を行った。パリ国立高等化学学校では、中性粒子検出等の他のレーザー計測技術への展開を目指し、可視レーザーの基礎的な検討を行った。

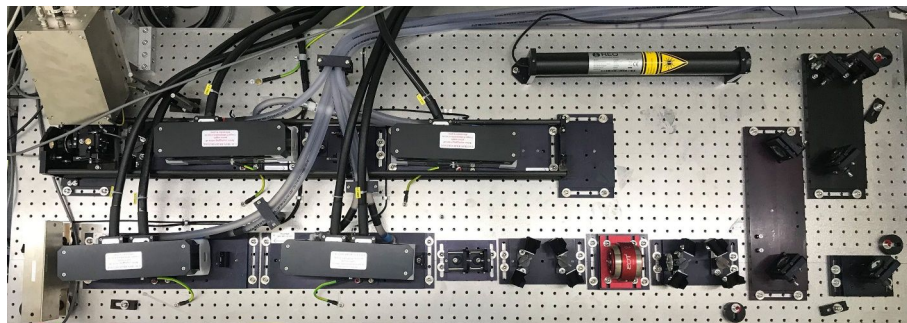


図2 バーストレザーの外観



図3 バーストレザー用フラッシュランプ電源の外観

4. 研究成果

トムソン散乱装置を高速化するための要となるバーストレザーの開発に成功した。トムソン散乱装置では、プラズマからの背景光とトムソン散乱光の SN 比を向上させるために数十ナノ秒程度のレーザーパルス動作が必要である。数十ナノ秒のパルス幅を実現するためにレーザーキャビティ内に設置した電気光学素子を用いて、レーザーを Q スイッチ動作させた。この際に電気光学素子への印加電圧もフラッシュランプ電源と同様にバースト動作させ、高繰り返しレーザーパルスを発生した。図4にバーストレザーから出力されたレーザー光のパルス波形を示す。半値全幅で 20ns 程度のパルス幅が得られており、トムソン散乱計測に適した性能が得られた。

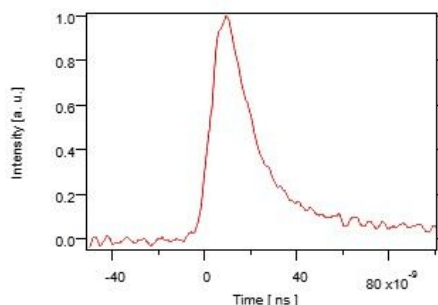


図4 バーストレザーから出力されるレーザー光のパルス波形

図5に、バーストレーザーから出力されたレーザー光のパルス列を示す。ここでは、合計100パルスが1ms以下の繰り返し、レーザー出力エネルギー1J以上で得られている。エネルギーの安定性も、トムソン散乱装置に別途エネルギーモニタを設けて最終的に補正することで計測に足る性能となっている。

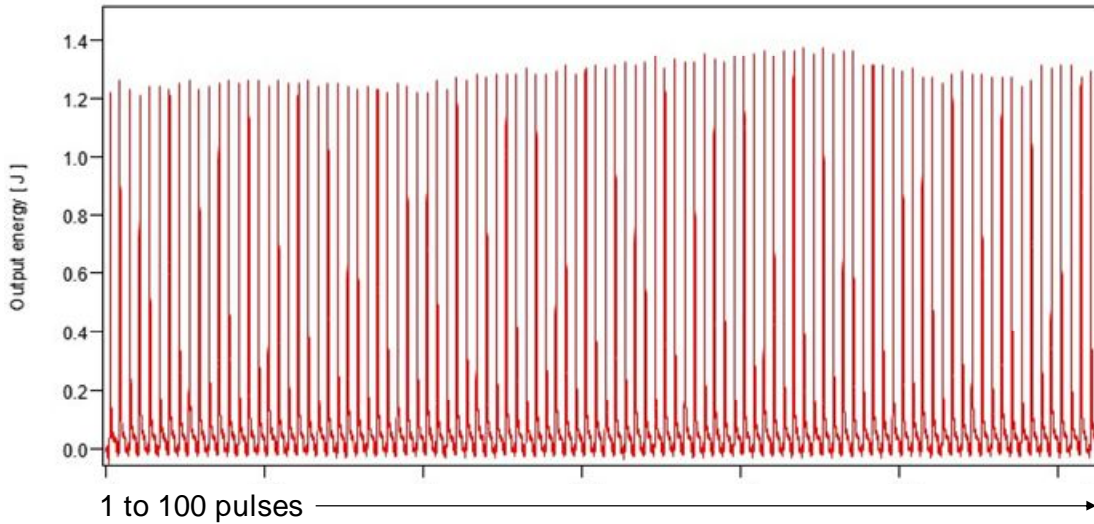


図5 バーストレーザーより出力されたパルス列

図6にバーストレーザーを用いて構築した高速トムソン散乱装置によるプラズマの電子温度測定例を示す。バーストレーザーを用いたことによって、1kHzの時間分解能で10時間点の計測が可能となった（赤丸）。これは従来のトムソン散乱システムで行われている33ms間隔、30Hzの繰り返し計測と比較して約30倍の時間分解能の向上であり、本システムを用いた過渡的なプラズマ現象の解明に期待が持てる。

Time series of T_e at single spatial point

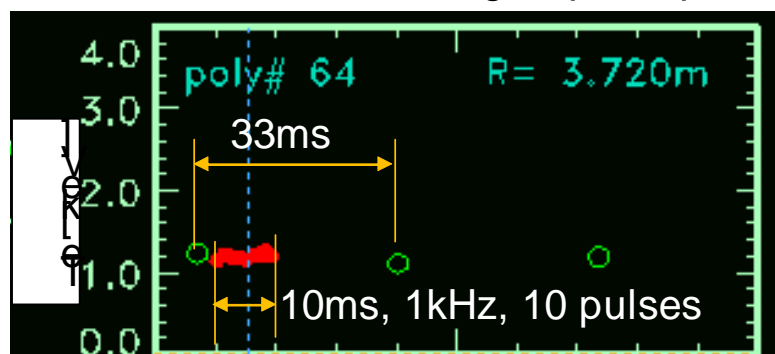


図6 バーストレーザー測定された電子温度例

トムソン散乱計測の高速化は、計画段階のものも含めて世界的な潮流となってきている。マックスプランクプラズマ物理研究所のW7-Xでは、レーザー技術で先端を行くドイツの半導体励起固体レーザーを導入して1kHzの計測を模索している。またプリンストンプラズマ物理研究所では、ウィスコンシン大学と協力し、10kHzレーザートムソン散乱計測を構築中である（残念ながら現在NSTX-Uが停止中のため当面実証できない）。イギリスの装置であるMASTでも8台のレーザーを使った高速トムソン散乱計測が行われている。このような国際的な状況は、時間分解能の向上が新たな物理現象発見へのクリアな研究戦略であるためだと推測される。本課題で開発した高速トムソンシステムは世界的な研究状況の最先端を行くものであり、各国のプラズマ実験装置で行われている測定との比較や共同実験などで広く国際共同研究を進めていく予定である。また本課題の研究進展により、ウィスコンシン大学マディソン校と研究代表者の所属機関である核融合科学研究所間で学術協定の締結等広く国際共同研究体制の構築に成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 H. Chen, H. Uehara, H. Kawase, and R. Yasuhara	4. 巻 28
2. 論文標題 Efficient visible laser operation of Tb:LiYF ₄ and LiTbF ₄	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 10951-10959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1364/OE.385020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hengjun Chen, Hiyori Uehara, Hiroki Kawase, and Ryo Yasuhara	4. 巻 28
2. 論文標題 Efficient Pr:YAlO ₃ lasers at 622nm, 662nm, and 747nm pumped by semiconductor laser at 488nm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3017-3024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1364/OE.380635	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 D.J. Den Hartog, M. T. Borchartd, D. J. Holly, O. Schmitz, R. Yasuhara, I. Yamada, H. Funaba, M. Osakabe, T. Morisaki
2. 発表標題 High-rep-rate Thomson scattering for LHD
3. 学会等名 APS DPP 2017, 2017-10-23 - 2017-10-27, Milwaukee, Wisconsin (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryo Yasuhara
2. 発表標題 High time resolution Thomson scattering on LHD
3. 学会等名 Laser Aided Plasma Diagnostics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yasuhara, A. Ikesue
2. 発表標題 Near-infrared Wavelength Dependence of Verdet Constant in Tb2Zr2O7 Transparent Ceramics
3. 学会等名 CLEO&Europe-EQEC 2019 ((国際学会))
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	デンハートック ダニエル (Den Hartog Daniel)	ウイスコンシン大学・文理学部・Dis scientist	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ダリオ アメッド (Diallo Ahmed)	プリンストンプラズマ物理研究所・Plasma Science & Technology・Research Physicist	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	アカ ジェラード (Aka Gerard)	パリ国立高等化学学校・Team MPOE・Professor	