

# 繰り返し 20kHz, 1.2 J, ナノ秒レーザーを用いた トムソン散乱法による過渡的プラズマ電子・温度分布計測

安原 亮<sup>A</sup>、舟場 久芳<sup>A</sup>、上原 日和<sup>A</sup>、Den Hartog Daniel<sup>B</sup>

## Transient plasma electron temperature and density profiles using Thomson scattering method with a 20 kHz repetition rate, 1.2 J, nanosecond laser

Ryo Yasuhara<sup>A</sup>, Hisamichi Funaba<sup>A</sup>, Hiyori Uehara<sup>A</sup>, and Daniel Den Hartog<sup>B</sup>

レーザー結晶の熱緩和時間よりも早くバーストモード動作することによって、固体レーザーで発生する熱効果による繰り返し率の上限を回避したものであるレーザーエネルギー1.2 J、パルス幅 20 ns で 100 パルス以上の 20 kHz レーザー出力が実現した。本レーザーを用いることでプラズマ中での固体水素の溶発現象などの過渡的・突発的プラズマ現象のダイナミクス研究が可能となった。

Keywords: Pulse burst laser, High energy laser, Thomson scattering, Plasma diagnostics

### 1 はじめに

レーザートムソン散乱装置は高強度パルスのプローブレーザーをプラズマに入射した際に生じる散乱光を集光し分光することで電子温度・密度分布を、非接触・不干涉で計測可能である。レーザーの指向性を活かし、光軸上に発生する散乱光の多点計測を行うことで、核融合プラズマの性能に直結する電子温度・密度分布を高空間分解能で評価することが可能で、プラズマ制御や物理研究の基幹計測として位置付けられている[1-5]。しかしながら、高強度パルスのレーザー装置は、レーザー媒質の発熱による制限から、数 10Hz~100Hz 程度の繰り返し率に留まる。従って、サブ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、例えばプラズマの突発的な消滅現象である「ディスラプション」、核融合反応の定常維持に必要な固体水素ペレットの溶発現象、局所的なプラズマ崩壊、加熱装置による急速なプラズマ加熱といった現象を追跡することができなかった。

本研究では、熱蓄積型のパルスバーストレー

ザーによって、繰り返し 20kHz, 1.2 J, ナノ秒レーザーを開発した[6]。これにより、これまで 100Hz 程度に制限されていたレーザートムソン散乱計測装置の測定周期を二桁以上向上させたの 20kHz へと高速化した。これにより、計測されていなかった領域を注意深く観察することで、プラズマを理解し、核融合発電実現に向けた高圧力磁場閉じ込めプラズマの長時間維持に必須な突発・過渡現象の制御方法のヒントが得られる。特に、本計測手法は、プラズマへの固体水素ペレット入射、プラズマ崩壊現象、といった高時間分解能を有する分布計測が存在しなかったため、理論モデルの実験検証が不可能だった状況を解決する重要なステップとなる。

### 2 レーザー装置

パルスバーストレーザーのコンセプトは、例えばローレンスリバモア研究所で開発されたヒートキャパシタレーザーが有名である[7]。このコンセプトは、レーザー媒質で発生する熱が外部へ伝達し、温度分布を形成する時間スケールよりも短い時間スケールでレーザー動作を

著者連絡先 [yasuhara@nifs.ac.jp](mailto:yasuhara@nifs.ac.jp)

A 核融合科学研究所 (〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 322-6)

National Institute for Fusion Science (322-6 Oroshi-cho, Toki, Gifu, 509-5292)

B ウィスコンシン大学マディソン校 (Chamberlin Hall, 1150 University Ave #2320, Madison, WI 53706)

University of Wisconsin-Madison (Chamberlin Hall, 1150 University Ave #2320, Madison, WI 53706)

完了することで、熱光学効果を伴わない、高出力レーザー動作を可能とする。温度分布を形成する時間スケールより長時間のレーザー動作を行えないというデメリットはあるものの、短時間で超高繰り返しかつ大エネルギーパルス出力が必要なアプリケーションには非常に強力なコンセプトである[7-9]。トムソン散乱計測用途にもウィスコンシン大学マディソン校で、10 パルス程度のナノ秒かつ出力エネルギー2Jのフラッシュランプ励起 Nd:YAG バーストレザーが開発され、研究が進められてきた[9]。今回、我々は、ウィスコンシン大学の結果を基にレーザー設計とフラッシュランプ励起電源を新開発し、1.2 J, 20ns, 20kHz パルスバーストレザーを開発した。Figure 1 に開発したパルスバーストレザーの外観を示す。本システムは、フラッシュランプ励起の Nd:YAG レーザー発振器と、前置増幅器及び 2 台の主増幅器によって構成されている。発振器は 40m の長距離伝搬中にビームウェストが伝搬経路のオプティクス上に発生しないよう、平面ミラーによって構成した。Qスイッチ発振を行うためにポッケルスセルを高繰り返し電源で駆動し、ナノ秒パルスを得た。発振器より出力されたレーザー光は直後の前置増幅器を経て、レンズ系によってビーム直径 9 mm から 12 mm へとビーム拡大される。拡大されたレーザー光は、光アイソレータを経て、2 台の主増幅器によって増幅される。

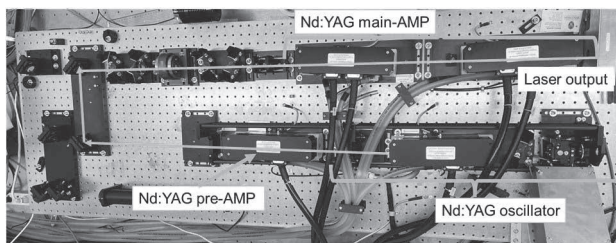


Fig. 1. パルスバーストレザーの外観

Figure 2 にフラッシュランプ励起電源の外観を示す。20kHz のパルスバースト動作は、長時間パルス励起をフラッシュランプによって行う。電源は IGBT とコンデンサバンクによって構成される。20kHz 動作では合計 4 台のレーザー増幅器に、10ms 間のパルス電圧を供給し、

フラッシュランプを点灯する。その間、発振器の Q スイッチを動作させ、20kHz のナノ秒パルスを発生させることで、バースト動作を行う。



Fig. 2 レーザー電源の外観

### 3 レーザー出力特性

Figure 3 に、開発したパルスバーストレザーの典型的なバーストパルス列を示す。各パルスがトムソン散乱計測に必要な 1 J 以上で出力されていることがわかる。トムソン散乱計測では、パルス毎のエネルギーを計測し、電子温度・密度評価に用いている。各パルスのエネルギー変化も許容の範囲内だった。

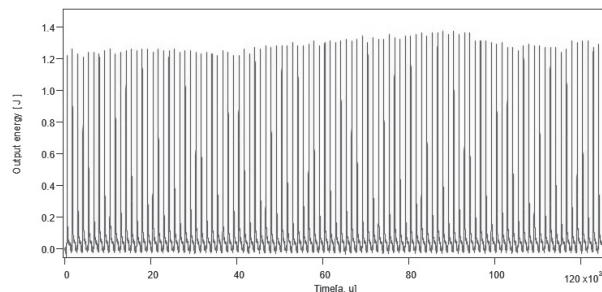


Fig. 3 繰り返し 20kHz, レーザーエネルギー 1.2 J のバーストパルス列

Figure 4 にバーストパルス列中の単一パルスの典型的なパルス時間波形を示す。パルス幅は、半値全幅で 20ns であった。磁場プラズマで利用するトムソン散乱計測では、プラズマの背景光とトムソン散乱光とのコントラストを向上し、信号ノイズ比を大きくするためにレーザーパルス幅を数十ナノ秒以下にする必要がある。今回の開発では、20ns のパルス幅が得られ、十分要求を満たした。

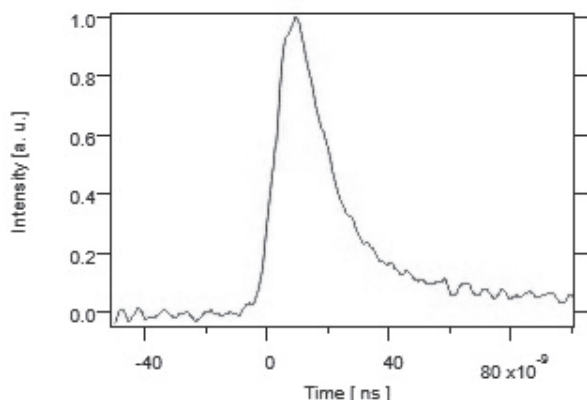


Fig. 4 単一のレーザーパルスの時間波形

Figure 5 に、伝搬距離に依存した単一レーザーパルスの 2 次元強度分布を示す。レーザーから出力された直後 (2m) はフラットトップの強度分布が得られた。20m、40m と伝搬するにしたがって、ビームは広がるが、局所的なピークやビーム収束は生じなかった。これらの結果より、レーザー装置からプラズマへのビーム伝送経路でのレーザーダメージリスクは低いビーム特性を持っていることが確認された。

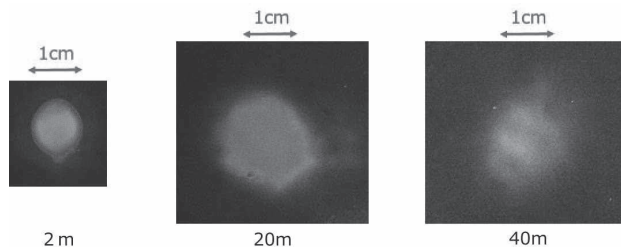


Fig. 5 伝搬距離に依存した単一のレーザーパルスビーム空間強度分布

#### 4 過渡的プラズマ電子温度計測

20kHz パルスバーストレザーをプローブレーザーを、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) のプラズマ実験に用いて、過渡的な電子温度計測を行った。LHD の既存トムソン散乱装置のプローブレーザーを開発したパルスバーストレザーに入れ替え、トムソン散乱光を受光するデータ収集系を高繰り返し計測に対応させた。Figure 6 に、20kHz の高時間分解能で計測した LHD プラズマの電子温度分布時間変化を示す。この結果より、プラズマ半径中央

部の電子温度が 4ms の間に、低下し、回復する過程が捉えられている。この現象は、プラズマ中心で、部分的にプラズマが崩壊することで生じている。従来の繰り返し 30Hz のレーザーを用いたトムソン散乱計測では変化をとらえることが出来なかったが、今回、開発に成功した 20kHz パルスバーストレザーを用いることによって詳細な物理機構が明らかになった。

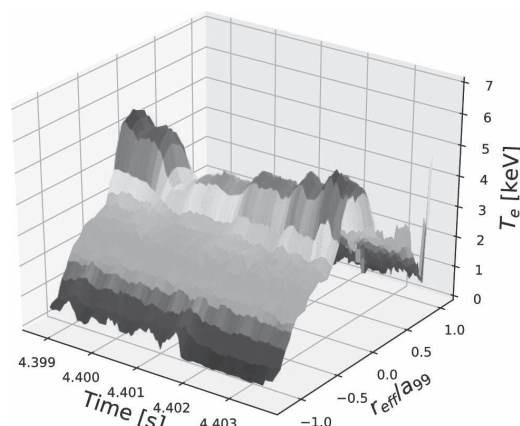


Fig. 6 20kHz パルスバーストレザーで測定したプラズマの部分崩壊時の電子温度分布の時間変化[11]

#### 5 まとめ

レーザー結晶の熱緩和時間よりも早くバーストモード動作することによって、固体レーザーで発生する熱効果による繰り返し率の上限を回避したものであるレーザーエネルギー 1.2 J、パルス幅 20 ns で 100 パルス以上の 20 kHz レーザー出力が実現した。本レーザーを用いることで過渡的・突発的プラズマ現象のダイナミクス研究が可能となった。すでに核融合科学研究所で行われているプラズマ実験に導入され、プラズマ部分崩壊現象の観測[11]や、プラズマ中の固体水素の溶発現象[12]などの研究で大きな成果が得られている。今後は、フラッシュランプ励起から、より発熱量の少ない半導体レーザー励起を適応するなどによって更なる高繰り返し化を進めていく予定である。

#### 6 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金、基盤 B (23H01162) の支援を受けて行われた。



## 参考文献

- [1] N. J. Peacock, D. C. Robinson, M. J. Forrest, P. D. Wilcock & V. V. Sannikov, "Measurement of the Electron Temperature by Thomson Scattering in Tokamak T3", *Nature* 224, 488–490 (1969).
- [2] T. N. Carlstrom, G. L. Campbell, J. C. DeBoo, R. Evanko, J. Evans, C. M. Greenfield, J. Haskovec, C. L. Hsieh, E. McKee, R. T. Snider, R. Stockdale, P. K. Trost, and M. P. Thomas, "Design and operation of the multipulse Thomson scattering diagnostic on DIII-D (invited)," *Rev. Sci. Instrum.* 63(1992), 4901–4906 (1992).
- [3] R. Scannell, M. J. Walsh, P. G. Carolan, a. C. Darke, M. R. Dunstan, R. B. Huxford, G. McArdle, D. Morgan, G. Naylor, T. O’Gorman, S. Shibaev, N. Barratt, K. J. Gibson, G. J. Tallents, and H. R. Wilson, "Design of a new Nd:YAG Thomson scattering system for MAST," *Rev. Sci. Instrum.* 79(2008), (2008).
- [4] R. Scannell, M. J. Walsh, M. R. Dunstan, J. Figueiredo, G. Naylor, T. O’Gorman, S. Shibaev, K. J. Gibson, and H. Wilson, "A 130 point Nd:YAG Thomson scattering diagnostic on MAST," *Rev. Sci. Instrum.* 81(2010), 1–5 (2010).
- [5] A. Encheva, H. Omran, M. P??rez-Lasala, A. Alekseev, S. Arshad, O. Bede, S. Bender, L. Bertalot, M. F. Direz, J. M. Drevon, S. Jakhar, Y. Kaschuk, V. Komarov, R. Lebarbier, F. Lucca, B. Macklin, P. Maquet, A. Marin, A. Martin, S. Mills, D. Netoiu, K. M. Patel, C. S. Pitcher, J. Reich, R. Reichle, G. Sandford, T. Sarot, G. Vayakis, C. Walker, and M. Walsh, "Challenges of ITER diagnostic electrical services," *Fusion Eng. Des.* 88(6–8), 1423–1427 (2013).
- [6] R. Yasuhara, H. Funaba, H. Uehara, and D. D. Hartog, "A 20 kHz, 1.2 J, 20 ns pulse-burst laser for electron temperature and density measurement in a magnetically confined high-temperature plasma," in *Optica Advanced Photonics Congress 2022, Technical Digest Series* (Optica Publishing Group, 2022), paper LsM6C.3.
- [7] C. D. Boley, K. P. Cutter, S. N. Fochs, P. H. Pax, M. D. Rotter, A. M. Rubenchik, and R. M. Yamamoto, "Interaction of a high-power laser beam with metal sheets," *J. Appl. Phys.* 107(4), (2010).
- [8] M. N. Slipchenko, J. D. Miller, S. Roy, T. R. Meyer, J. G. Mance, and J. R. Gord, "100 kHz, 100 ms, 400 J burst-mode laser with dual-wavelength diode-pumped amplifiers," *Opt. Lett.* 39(16), 4735 (2014).
- [9] D. J. Den Hartog, J. R. Ambuel, M. T. Borchardt, a. F. Falkowski, W. S. Harris, D. J. Holly, E. Parke, J. a. Reusch, P. E. Robl, H. D. Stephens, and Y. M. Yang, "Pulse-burst laser systems for fast Thomson scattering," *Rev. Sci. Instrum.* 81, 2–5 (2010).
- [10] H. Funaba, R. Yasuhara, H. Uehara, I. Yamada, R. Sakamoto, M. Osakabe and D. J. Den Hartog, "Electron temperature and density measurement by Thomson scattering with a high repetition rate laser of 20 kHz on LHD", *Sci Rep* 12, 15112 (2022).
- [11] N. Kenmochi, K. Ida, T. Tokuzawa, R. Yasuhara, H. Funaba, H. Uehara, D. J. Den Hartog, I. Yamada, M. Yoshinuma, Y. Takemura and H. Igami, "Preceding propagation of turbulence pulses at avalanche events in a magnetically confined plasma", *Sci Rep* 12, 6979 (2022).
- [12] A. Matsuyama, R. Sakamoto, R. Yasuhara, H. Funaba, H. Uehara, I. Yamada, T. Kawate, and M. Goto, *Phys. Rev. Lett.* 129, 255001 (2022).