

3.3 先進トムソン散乱計測

波多江 仰紀¹⁾, HOWARD John²⁾, 中塚 正大³⁾, 吉田 英次³⁾

¹⁾日本原子力研究開発機構, ²⁾オーストラリア国立大学, ³⁾大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

Keywords:

Thomson scattering, LIDAR, YAG laser, Fourier transform spectroscopy, polarization interferometer

3.3.1 はじめに

非協同トムソン散乱 (以降トムソン散乱と略す)[1]は, 磁場閉じ込めプラズマの電子温度・密度の計測手法であり, 核融合プラズマ実験において基幹計測装置として位置づけられている. 旧ソ連の T3 トカマクにおける測定[2]から約40年が経過した現在, この測定手法は発展的に確立し, T3 に代表される在来方式に加えて, ICCD カメラを用い多空間測定点を多波長分解で測定可能な「TV トムソン散乱」[3], 高繰り返し発振が可能な YAG レーザーを用い時間分解能を向上させた「YAG レーザートムソン散乱」[4, 5], レーダーの原理を応用した「LIDAR (Light Detection and Ranging) トムソン散乱 (以降 LIDAR と略す)」[6]が開発され, これらの手法は多数の磁場閉じ込め装置で利用されている.

ITER など本格的な核融合炉におけるトムソン散乱計測装置を考えた場合, 核融合炉では装置が大型かつ複雑になり, 強放射線環境下に常時さらされるため, 計測装置の構成に様々な制約が課せられる. LIDAR 方式以外のトムソン散乱手法は高い空間分解能で計測できるが, プラズマ中心部からプラズマ境界までの領域を測定しようとすると, レーザーの入出射および観測のために多数のポートを占有し, 現実的ではない. 一方, LIDAR トムソン散乱方式を用いると, 後方散乱の光学配置を取るため, レーザー入射と観測用のポートは1つですみ, ポート利用や放射線遮蔽の観点から利点がある. ITER においてもコアプラズマ計測用トムソン散乱装置は LIDAR 方式を採用している. しかしながら, 既存の技術を応用した現状の設計[7]では空間分解能が約7 cmであり, Hモードの周辺輸送障壁の構造を測定するには十分な空間分解能がないため, 空間分解能5 mmの YAG レーザートムソン散乱方式を用いた測定系も検討されている[8].

JT-60における高性能の負磁気シア放電では, 数cmの幅に内部輸送障壁が形成されることもあり[9], ITERにおけるコアプラズマ計測においても空間分解能の改善が求められている. そこで, 本研究では燃焼プラズマの物理研究(輸送障壁などの物理機構の解明など)をさらに進展させるために, 詳細な電子温度・密度分布計測のための, 高空間分解・高時間分解 LIDAR トムソン散乱診断システムのご概念検討および要素開発を進めている.

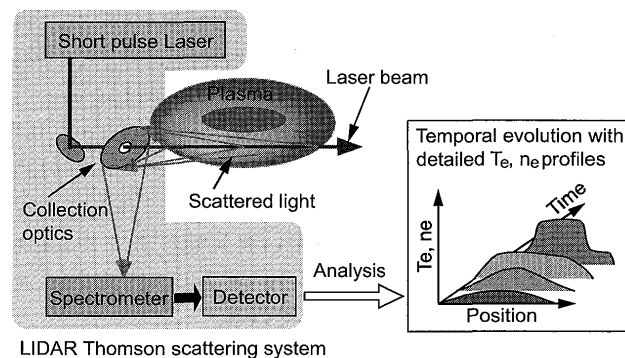
3.3.2 高空間・高時間分解能 LIDAR トムソン散乱計測法の検討

LIDAR の検討はこれまでも行われてきた[10]. 本研究ではコアプラズマから周辺プラズマまで, 高空間分解能かつ1系統の LIDAR システムで測定可能とするため, 測定性能は空間分解能1 cm程度, 測定周期100 ms以下, 電子温度測定領域100 eV~40 keV, 密度測定範囲 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上を目標とした. 図1に LIDAR システムの概念図を示す. 短パルスレーザーから出射されたレーザー光は, プラズマ中に入射され, プラズマからの後方散乱光は集光器で集め, それを分光器で分光分析することにより電子温度・密度の空間分布の時間変化を測定する. ここでは特にレーザー, 分光器, 検出器, 較正手法について検討している.

(1) 計測用高出力・高繰り返し超短パルスレーザー

上記の測定目標を達成するために, 波長700–800 nm, パルス幅47 ps, エネルギー>7 J, 繰り返し周波数>10 Hzの性能を設定し, これを満たすことのできるレーザーの検討を行なった. YAG レーザー (2倍高調波) 励起のチタンサファイアレーザーまたはアレキサンドライトレーザーが最適なことわかり, 概念設計を行った. 励起方式としては低コストなフラッシュランプ励起とした.

近年, 固体レーザー媒質のセラミックス製作技術の進歩により, 従来の結晶媒質と同様な性能を持つレーザー材料が開発され, さらに結晶では添加することが困難だったイオンが添加出来るようになった. チタンサファイアレーザーの励起用高出力 YAG レーザー媒質として, 従来の Nd:YAG 単結晶ではなく, Cr, Nd:YAG セラミックスの使用を検討した. この媒質では, Cr^{3+} イオンに吸収された近紫外



LIDAR Thomson scattering system

図1 LIDAR トムソン散乱のご概念図.

～可視光のエネルギーが効果的にNd³⁺イオンへ移るため、レーザー効率が格段に改善することが期待され、ITER 用計測用レーザーにおいてもその利用が検討されている[8, 11-13]

ロッドの発振効率を比較したところ、Nd: 1.0% のイオン濃度では2%, Cr: 0.1%+Nd: 1.0% のイオン濃度では約4.9%の発振効率を得られ、倍以上の改善を見た。そこで(a) Cr: 0.1%+Nd: 1.0%, (b) Cr: 0.05%+Nd: 1.0%, (c) Nd: 1.0%の3種類のイオン濃度のレーザーロッド(φ8 mm)をJT-60のトムソン散乱[14, 15]で使用しているフラッシュランプ励起高出力増幅器に組み込み、小信号利得測定を行った。励起入力約93 J (励起パワー4650 W, 50 Hz 運転) 時の小信号利得を比較すると、Ndのみの利得36倍に対し、Cr: 0.05% 添加 YAG で約51倍、Cr: 0.1% 添加 YAG で46倍となった。Cr 添加 YAG は励起光の吸収効率が大きく、ロッドの中心温度が従来ロッドに比べ高くなるため、利得ピーク波長がシフトし、大幅な利得増加とはならなかった。Cr濃度0.1%よりも0.05%ロッドの利得が高いのも、熱負荷の違いであると考ええる。熱レンズ効果も従来のNd: YAG に比べ、約2倍以上大きくなった。媒質内での熱効果を軽減する手段としては、ロッド形状からスプリットディスク型やジグザグスラブ型形状とすることであり、これによりCr, Nd:YAGセラミックスの性能を十分に発揮できると考える。

(2) 超高速検出器

検出器で47 ps 未満の時間応答を得るには、現状ではストリークカメラしか解はなく、トムソン散乱に必要なS/N比が得られるストリークカメラの検討を行った。既存のストリークカメラではS/Nの問題が指摘されてきたが、光電面にGaAsPを用いたストリークカメラを開発すれば、JETで用いられたストリークカメラの数倍の量子効率が見通しである。

(3) 分光システム

光学的に明るい干渉フィルター型ポリクロメータや、後述のフーリエ変換分光器の概念設計を行った。

(4) 較正手法など

チタンサファイアレーザー(波長750 nm)では、励起用の2倍高調波YAGレーザー光(波長532 nm)、2倍高調波発生用YAGレーザー光(波長1064 nm)も散乱計測に利用可能である。3波長で測定を行えば、電子温度測定性能の改善が考えられる。しかしながら、YAGレーザーはナノ秒オーダーのパルス幅であるため、LIDAR計測に用いるには100 ps オーダーまでパルス圧縮する必要がある。誘導ブリルアン散乱(SBS)によるパルス圧縮の検討を行った。フロリナートFC-75を用いた場合、基本波で900 ps (効率95%)、2倍高調波で540 ps (効率80%)までパルス圧縮できた。今後、SBS媒質を変え更なるパルス圧縮を目指す。一方、2波長レーザーを用い波長感度較正をin-situで行う手法[16]が提案されており、上記の3波長でin-situ波長感度較正することを検討している。

3.3.3 フーリエ分光に基づくトムソン散乱計測のための偏光干渉計の開発

トムソン散乱計測では、散乱スペクトルを得るために、回折格子を用いた分光器や干渉フィルターを用いたポリクロメータがこれまで用いられてきた。これらは既に確立された分光方式であるが、波長分割を多く取ると低スループットとなり、S/N比を低下させる。このような問題を改善するために、フーリエ変換分光の手法[17]をトムソン散乱計測に初めて導入し、核燃焼プラズマの電子温度・密度測定の測定性能を向上させる手法を確立することを目的に、トムソン散乱のための偏光干渉計を開発中である[18]。

偏光干渉計は1対の偏光器の間に複屈折結晶で作った平行平板を挿入したものであり、平行光をこの偏光干渉計へ入射するとフレネル・アラゴの法則により干渉像(インターフェログラム)が現れる。偏光干渉計で光源の時間コヒーレンスを測定しフーリエ変換すれば、光源のスペクトル分布が得られる。トムソン散乱へフーリエ変換分光を導入する利点としては、1)高スループットの光学系が使用できる(Jacquinetの利得)、2)ある波長領域を同時に測光することによるS/N比の向上(Fellgettの利得)がある。トムソン散乱ではレーザーのパルス幅が10ナノ秒のオーダー以下であり、そのような短時間では複屈折結晶の厚みを変えることができない。そこで、複屈折結晶の厚さ固定したとき、インターフェログラムのコントラストが電子温度の関数となることを利用し、コントラストから電子温度を評価する。図2にトムソン散乱のための偏光干渉計の概念図を、図3に電子温度を変化させたときのトムソン散乱スペクトル(左図)と、それらに対応したインターフェログラム(右図)を示す。

産業技術総合研究所(本特定領域計画研究A班)との共同研究により、逆磁場ピンチ装置TPE-RXにおいて、既存のYAGレーザートムソン散乱システムを利用し本計測手法の原理実証試験を行った。PPCD(Pulsed Poloidal Cur-

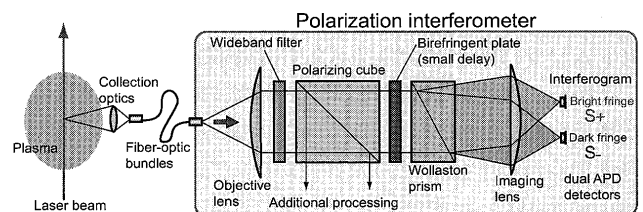


図2 トムソン散乱計測のための偏光干渉計の概念図。

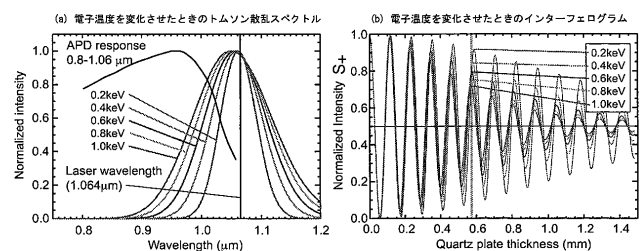


図3 電子温度を変化させたときのトムソン散乱スペクトル(左図)と、それらに対応したインターフェログラム(右図)。

rent Drive) 放電において、干渉フィルターポリクロメーターと偏光干渉計を交互に使い、空間1点（プラズマ中心近傍）の電子温度の測定を行った。ショットの再現性、検出器ノイズおよび較正に問題が残るが、ほぼ同様の電子温度を得て、本方式による有効性を実証した。今後、偏光干渉計の改良を行い、JT-60Uにおいて既存のトムソン散乱装置を利用し、より広い温度範囲かつ、最大空間20点の計測を行うためのイメージング偏光干渉計の開発を行ない、実用性の実証試験を行う予定である。なお、この方式はLL-DARにも応用可能である。

参考文献

- [1] J. Sheffield, *Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation*, (1975) p.191.
- [2] N.J. Peacock *et al.*, *Nature* **224**, 488 (1969).
- [3] N. Bretz *et al.*, *App. Opt.* **17**, 192 (1978).
- [4] H. Röhr *et al.*, *Nucl. Fusion* **22**, 1099 (1982).
- [5] T.N. Carlstrom *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 4901 (1992).
- [6] H. Salzmann *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **59**, 1451 (1988).
- [7] M.J. Walsh *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 10E525 (2006).
- [8] T. Hatae, M. Nakatsuka, H. Yoshida, K. Ebisawa, Y. Kusama, K. Sato, A. Katsunuma, H. Kubomura and K. Shinobu, *Trans. Fusion Sci. Tech.* **51**, 58 (2007).
- [9] T. Fujita *et al.*, *Nucl. Fusion* **38**, 207 (1998).
- [10] 村岡克紀, 前田三男, 的場徹, 山本新, レーザー研究 **20**, 375 (1992).
- [11] T. Hatae, T. Kondoh, O. Naito, M. Nakatsuka and H. Yoshida, *Proc. 12th International symposium on Laser-Aided plasma diagnostics*, Snowbird (CD-ROM), 309 (2005).
- [12] T. Hatae, O. Naito, M. Nakatsuka and H. Yoshida, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 10E508 (invited) (2006).
- [13] T. Hatae, O. Naito, S. Kitamura, T. Sakuma, T. Hamano, M. Nakatsuka and H. Yoshida, *J. Korean Phys. Soc.* **49**, S 160 (2006).
- [14] T. Hatae *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 772 (1999).
- [15] T. Hatae, M. Nakatsuka and H. Yoshida, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 870 (2004).
- [16] O.R.P. Smith *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 725 (1997).
- [17] J. Howard, *Plasma Phys. Control. Fusion* **48**, 777 (2006).
- [18] T. Hatae, J. Howard, Y. Hirano, M. Nakatsuka, H. Yoshida and O. Naito, *Plasma Fusion Res.* **2**, S1026 (2007).

3.4 高性能荷電交換分光システム

居田克巳¹⁾, 坂本宜照²⁾

¹⁾核融合科学研究所, ²⁾日本原子力研究開発機構

Keywords:

charge exchange spectroscopy

荷電交換分光はイオン温度分布を計測する方法として最も有力なものと考えられている。一般に計測には、高精度、高時間分解能、高空間分解能が要求されるが、これらは相反する要求であるので、同時に達成するのは容易ではない。さらに重要なのは、時間分解能や空間分解能の向上に伴い、微小な時間変化、空間変化を計測しなければならないので、時間分解能・空間分解能を決めると、必要な精度もおおずと決まってしまう。それゆえに、プラズマの早い現象を観測するには時間分解能に特化したシステムが、微細な空間構造を議論するには空間分解能に特化したシステムが必要となってくる。プラズマ燃焼実験のための先進計測として、高時間分解能と高空間分解能を対象となるプラズマで切り替えることで、高時間（周波数： $f_{\text{ccd}} < 400$ Hz）・高空間分解能（空間点： < 320 点）を持つ荷電交換分光システムを開発した。

このシステムは高速の荷電交換分光システムの対物レンズを piezo 駆動型のステージに固定することで、空間観測点のモジュレーション（周波数： $f_{\text{mod}} < 35$ Hz）を行い実効的な空間分解能を向上させるものである。そのシステム構成は図1に示されている。分光器の高さ8mmのスリット上に32本の光ファイバー（コア径200ミクロン、クラッド径

220ミクロン）を256ミクロンピッチで配列している。配列ピッチを CCD ピクセル（16ミクロン）の整数倍である256ミクロンにすることで、CCD ピクセルをビンニングした時に CCD ピッチとファイバーピッチのズレが生じないようにしてある。時間分解能・空間分解能が従来のシステムに比べ1桁程度高いので、要求される精度、すなわち光学系の「明るさ」も1桁以上高くなっている。その「明るさ」を確

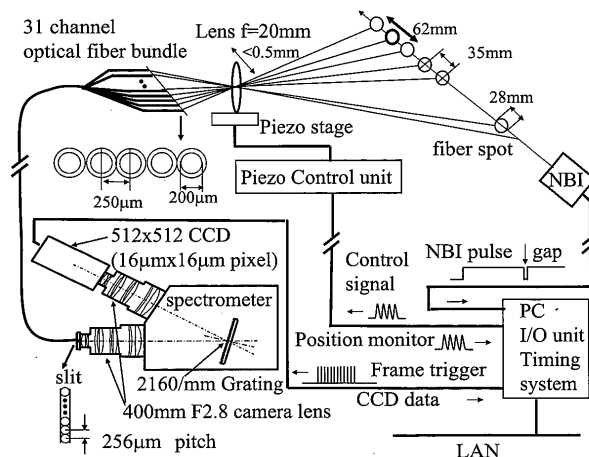


図1 モジュレーション荷電交換分光計測のセットアップ。