

平成 22 年 4 月 23 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2004 ～ 2009
 課題番号：16082208
 研究課題名（和文） 核燃焼プラズマ制御のための干渉・偏光計測法の開発
 研究課題名（英文） Development of Interferometry/Polarimetry for
 Burning Plasma Control
 研究代表者
 川端 一男 (KAWAHATA KAZUO)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授
 研究者番号：60109353

研究成果の概要（和文）：短波長の遠赤外レーザーを用いた 2 波長干渉計を、大型ヘリカル装置の高性能運転並びに ITER のような燃焼プラズマ実験のために開発した。THz レーザー光源として、波長 57.2 μm と 47.6 μm での高出力同時発振を実現した。新型 2 波長レーザー干渉計を開発し、その基本性能である、振動補正を確認した。偏光計測用に新しく光弾性変調素子を開発し、ITER の計測要求を満足する偏光計測を可能にした。

研究成果の概要（英文）：A two color laser interferometer using short wavelength far-infrared laser sources has been developed for high performance operation on the Large Helical Device and for future burning plasma experiments such as ITER. Through investigation of THz laser sources, we have achieved high power simultaneous oscillations at 57.2 μm and 47.6 μm of a CH₃OD laser. We have developed a new two color laser interferometer, and confirmed its original function, vibration subtraction. A new Photo-elastic Modulator (PEM) was developed for a polarimetry, and we confirmed that the achieved angle and time resolutions satisfy ITER diagnostic requirements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	8,300,000	0	8,300,000
2005年度	9,200,000	0	9,200,000
2006年度	9,700,000	0	9,700,000
2007年度	8,400,000	0	8,400,000
2008年度	17,550,000	0	17,550,000
2009年度	4,600,000	0	4,600,000
総計	57,750,000	0	57,750,000

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：核燃焼プラズマ計測、遠赤外レーザー、2 波長レーザー計測、
 レーザー干渉計測、レーザー偏光計測、

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合研究は、世界各国における大型核融合実験装置（JT-60:日本, JET:EU, TFTR:USA）の研究の進展によって、核融合研究の最終目標である核燃焼プラズマの実験（ITER計画）が国際協力によって進められようとしている状況であった。

(2) 核燃焼プラズマの実現に向けて、プラズマ制御、加熱手法の開発と並んで、燃焼プラズマによる高強度中性子発生環境下での信頼性の高い計測手法の開発が急がれる状況下にあった。

(3) ITER計画では、アルファ粒子の有効な閉じ込めを確保することが重要であり、このためにプラズマの電流分布計測が必須の情報となる。この計測手法として運動シタルク効果を用いた内部磁場分布計測を整備することが検討されていたが、中性粒子入射を使用しない運転モードでの計測手法の開発が課題となっていた。

(4) 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置では、研究の進展に伴って当初計画を大きく超える電子密度のプラズマ生成が可能となっていた。高密度での信頼性の高い電子密度計測法の確立が望まれていた。

2. 研究の目的

(1) 国際協力によって進められている核燃焼プラズマの実験（ITER計画）を成功させるためには、核燃焼によって生成されるアルファ粒子を制御し、反応を持続させることが不可欠である。そのためには、閉じ込められたアルファ粒子の振る舞いを調べることは重要な研究課題であるが、その生成、閉じ込めに関係したプラズマパラメータの詳細な分布計測も核燃焼プラズマの自立性を確保するために重要である。本研究計画では、核反応率に密接に関係する密度分布と、プラズマの閉じ込め特性及びアルファ粒子の閉じ込めに密接に関係する内部磁場分布の計測法を新たに確立しようとするものである。

(2) ITERプラズマ計測に最適な波長領域と考えられる $50\mu\text{m}$ 近傍の遠赤外レーザー光源を新たに開発し、同レーザー光を用いたプラズマ内部磁場分布計測法を確立する。

3. 研究の方法

(1) ITERのような高温・大口径のプラズマのレーザー計測に最適な波長である $50\mu\text{m}$ 帯のレーザー光源の開発のために双子型遠赤外レーザー発振装置を整備し、短波長発振への

最適化を図る。

(2) 波長 $50\mu\text{m}$ 帯は、光と電波の谷間の波長領域にあり、最も開発の遅れた波長領域である。この領域での計測法の確立のために、検出器・光学素子の開発を進める。このために必要となる光学材料の光学定数計測システムを整備する。

(3) 短波長のレーザー干渉計測においては、機械的振動成分の信頼性の高い補正が課題となる。そのために必要となる計測テストスタンドを整備し、機械的振動の補正システムを確立する。

(4) ITER計測に要求される計測仕様を満足する偏光検出手法を確立するために、各種計測手法による計測精度等の比較・検討を行なう。また、偏光角度の有力な検出手法である光弾性変調素子を用いた偏光計測法を遠赤外波長領域において確立する。

(5) 大型の核融合実験装置では、レーザー発振装置は実験装置から離れた位置に設置される。これを模擬するためのテストスタンドを整備し、高効率でモード変換の少ない伝送システムを確立する。

4. 研究成果

(1) 2波長短波長遠赤外レーザーの開発

近年の核融合研究の進展によって20乗を超える電子密度のプラズマが比較的容易に生成可能となった。このような高密度プラズマの計測用に炭酸ガスレーザー励起のレーザー光源の開発を進めた。その結果、 $50\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の間で複数の有力なレーザー発振を確認した。その中で、 CH_3OD をレーザー媒質とする発振において、2本のレーザー線（ $57\mu\text{m}$ と $48\mu\text{m}$ ）が同時発振することを確認した。同時発振時における各々のレーザーの出力は1.8W及び0.8Wであり、合計出力は遠赤外レーザーとして世界最高出力であった。

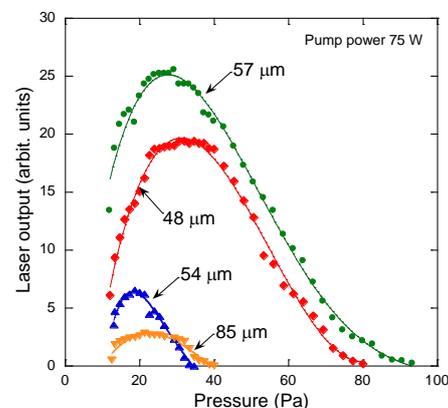


図1 レーザー発振出力の圧力依存性

図1は、レーザー出力の圧力依存性を示したもので、54 μm と85 μm も励起可能であることがわかる。ただし、動作圧力を最適化することによって57 μm と48 μm の2波長発振を得ることが可能となった。

この新しい2波長同時発振を利用することで、新しい2波長レーザー干渉計が可能となる(図2)。この干渉計の特徴は、(i)同一のレーザーからの2波長同時発振を用いている、(ii)発振波長が57 μm と48 μm であり、現在の磁場閉じ込め装置の干渉計測装置に用いられている波長119 μm レーザーと比べて、プラズマによる屈折効果が約4分の1となり高密度プラズマに対応できる、(iii)使用する2波長の値が近接していることから、同じ光学素子及び検出器が利用可能である、(iv)レーザーの出口から検出器まで全く同じ光学経路を伝搬することから、理想的な機械的振動の補正が期待できる。

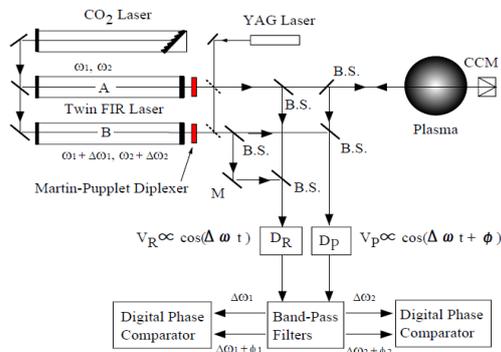


図2 新型2波長レーザー干渉計概念図

(2) 50 μm 帯で動作する高感度検出器の開発

検出器の問題であるが、119 μm より長波長領域で用いられているSBDは、50 μm 帯ではカットオフ周波数に近くなることから、検出感度が低下し使用が困難となる。そこで、これに代わる検出器としてGe:Gaフォトコンダクターを導入した。図3は、Ge:Ga検出器の波長感度特性であり、50 μm 帯における感度はピーク値よりも劣るが、干渉計測には十分な感度が得られた。この検出器を用いて観測し

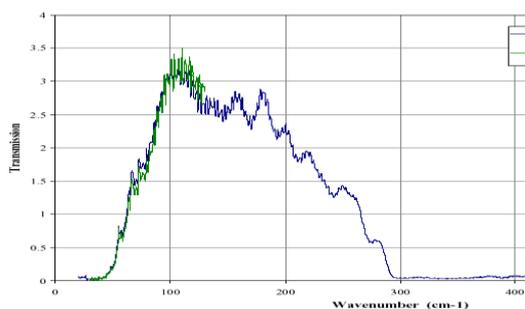


図3 検出器の波長感度特性

た2波長(57 μm と48 μm)のビート信号を図4に示す。40dB以上の高精度計測に十分なS/Nが得られた。



図4 Ge:Ga検出で観測した2波長ビート

(3) 2波長干渉計による振動補正の実証

2波長レーザーを用いた干渉計テストベンチを組み上げ、基本性能を確認した。プラズマ、又は機械的変動を模擬するために干渉計を構成する反射ミラーをピエゾ素子駆動のステージに取り付けてテストを行った結果を図5に示す。(a)はピエゾの駆動信号である。(b)は57.2 μm 及び47.6 μm の干渉計で測定された反射ミラーの変動の様子である。信号に見られる約140Hzの高周波成分は反射ミラーホルダーに人為的に機械的ショックを与えたことによる振動成分である。(c)は2波長干渉計出力の差分を示しており、低周波成分及び高周波成分ともに良くキャンセルされている様子が見られる。現状のシステムで補正出来ない振動成分の大きさは約0.6 μm であり、この値はITERの電子密度として4 x 10¹⁷m⁻³に相当する値である。

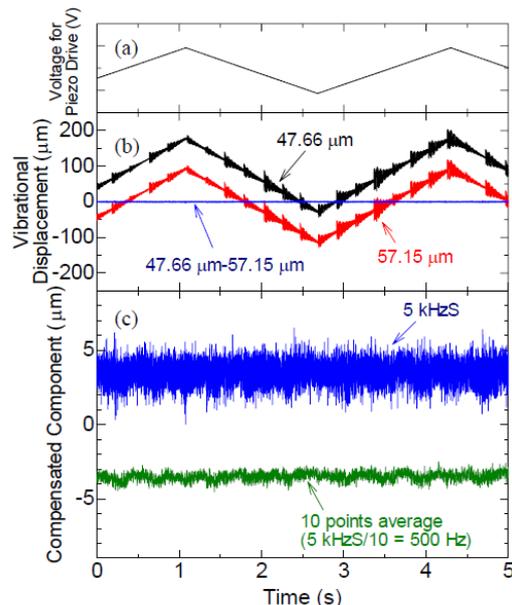


図5 2波長干渉計による振動補正結果

(4) 光弾性変調素子の開発

偏光角度の測定には、図 6 に示す光弾性変調器 (Photoelastic modulator: PEM) を用いた方式を採用している。本方式は、信号強度の比を用いるため、レーザーの出力・周波数変動の影響を受けにくい利点を持つ。しかし、PEM の使用はこれまで可視～赤外領域に限定されていたため、50 μm 帯で透過特性の良い高抵抗シリコンを光弾性素子とした遠赤外線領域用 PEM を新規に開発した。長波長域では変調効率を決める光学遅延量が小さい問題があるが、偏光計測に十分な遅延量 $\lambda/4$ が得られた。

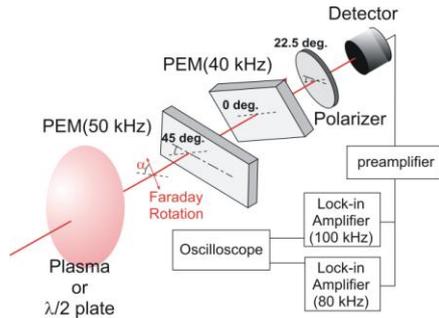


図 6 光弾性変調素子を用いた偏光計測

(5) 偏光計測による偏光角度検出

プラズマによる偏光面回転を 1/2 波長板の光学軸を回転して模擬し、真の回転角と偏光計で評価した偏光角の関係を図 7 に示す。両者の間に、良い直線性が得られている。現在得られている偏光角分解能は、時定数 1 ms (0.1 ms) で 0.01 度 (0.025 度) である。ファラデー回転角、線平均電子密度、磁気データに、それぞれ 0.05 度 (57 μm)、 $2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、0.2 mT の誤差を仮定し、ITER の平衡再構成を行うと、q 分布の誤差が約 5% となる。ITER にて要求される q 分布計測精度は、時間分解能 10 ms で 10% であるため、本偏光計では、ITER の要求を十分満足する測定精度が達成されたと言える。

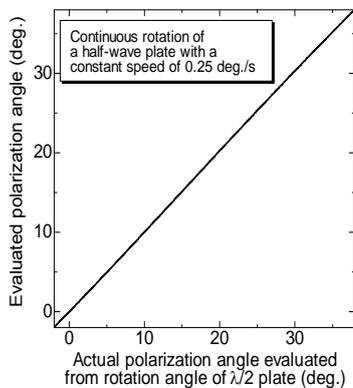


図 7 真の偏光角と偏光計で評価した偏光角の関係

(6) 高効率・高性能伝送路の開発

大型の核融合実験装置でのレーザー計測では、計測の中心となるレーザー発振装置はプラズマ実験装置から離れた位置に設置する必要がある。そのため、レーザー光の低損失、安定な伝送系の開発が必要となる。誘電体導波路として長さ 9 m、内径 24 ϕ のアクリルパイプを用いて、THz レーザーの伝送特性を調べた。その結果、2 枚のバンドを含んだ伝送効率は 90% 以上であること、導波路を伝播した後の光軸は、2 波長ともに導波路の光軸に一致していること、伝送後のビームプロファイルはガウス分布 (図 8) をしていることが確認された。誘電体伝送路が低損失のレーザー伝送路として使用できることを確認した。

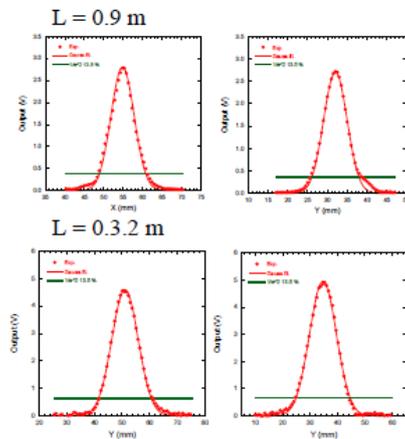


図 8 誘電体導波路 (長さ: 9 m) を用いて伝送した後の 2 地点で計測された放射レーザー光のビームプロファイル測定。

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 46 件)

- ① T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, and K. Nakayama “Performance evaluation of short-wavelength FIR laser polarimeter with dual silicon photoelastic modulator”, Plasma Device and Operation, 査読有, Vol. 17, 2009, pp. 117-125,
- ② K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Nakayama and S. Okajima, “Development of terahertz laser diagnostics for electron density measurements”, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 79, 2008, pp. 10E707-1-10E707- 4,

- ③ K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka, S. Okajima, K. Nakayama, “Development of the FIR laser diagnostics for Burning Plasma experiment”, J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology, 査読有, Vol. 17, 2008, pp. 31 - 38,
- ④ T. Akiyama, K. Kawahata, K. Tanaka, S. Okajima and K. Nakayama, “Short wavelength far infrared laser polarimeter with silicon photoelastic modulator”, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 79, 2008, pp. 10E720-1 - 5,
- ⑤ K. Tanaka, K. Kawahata et al., “Two Dimensional Phase Contrast Imaging for Local Turbulence Measurements in LHD”, Review of Scientific Instruments, 査読有 Vol. 79, 2008, 10E702-1 - 7,
- ⑥ K. Tanaka, K. Kawahata, K. Muraoka et al. “Density Reconstruction Using a Multi-Channel Far-Infrared Laser Interferometer and Particle Transport Study of a Pellet-Injected Plasma on the LHD” Plasma and Fusion Research Regular Articles, 査読有, Vol. 3, 2008, 050,
- ⑦ K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka et al., “Advanced Laser Diagnostics for Electron Density Measurements”, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 2, 2007, S1027
- ⑧ R. Pavlichenko, K. Kawahata, and T. Donne “Design of the 48, 57 mm Poloidal Polarimeter for ITER”, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 2, 2007, pp. S1040-1-4,
- ⑨ T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, T. C. Oarberg, “Bench testing of new polarimeter with silicon photoelastic modulator for short wavelength FIR laser”, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 2, 2007, pp. S1113-1-4,
- ⑩ T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima et al., (名1番目), “Far Infrared Laser Diagnostics on the Compact Helical System”, J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology, 査読有, Vol. 16, 2007, pp. 62 - 70,
- ⑪ T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, et al., “Change of optical properties of retroreflector installed in LHD”, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 78,

2007, pp. 103501-1-7,

- ⑫ K. Tanaka, K. Kawahata, T. Akiyama, et al., “Improvements of CO₂ Laser Heterodyne Imaging Interferometer for Electron Density Profile Measurements on LHD”, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 2, 2007, pp. S1033-1 - 5,
- ⑬ K. Nakayama, S. Okajima, K. Kawahata, K. Tanaka, T. Tokuzawa, T. Akiyama, Y. Ito, H. Ohkuma, “Development of a two-color far-infrared laser interferometer for plasma diagnostics”, J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology, 査読有, Vol. 16, 2007, pp. 71 - 76,

[学会発表] (計 62 件)

- ① 川端一男, 秋山毅志, 田中謙治, 岡島茂樹, 中山和也, 2波長THzレーザーマ計測の開発II、第26回プラズマ核融合学会年会、2009. 12. 3、京都市国際交流会館
- ② 川端一男, 秋山毅志, 田中謙治, 伊藤康彦, 岡島茂樹, 中山和也, 2波長THzレーザー計測の開発、第25回プラズマ核融合学会、2008. 12. 4、栃木総合文化センター
- ③ 秋山毅志, 川端一男, 岡島茂樹, 中山和也, 光弾性変調器を用いたテラヘルツレーザー偏光計の開発、第69回応用物理学会学術講演会、2008. 9. 4、中部大学
- ④ 中山和也, 富本昌宏, 金場貴宏, 松原章浩, 岡島茂樹, 秋山毅志, 田中謙治, 川端一男, 2波長CO₂レーザー励起による遠赤外レーザー発振 (II)、第69回応用物理学会学術講演会、2008. 9. 4、中部大学
- ⑤ 川端一男, 秋山毅志, R. Pavlichenko, 田中謙治, 岡島茂樹, 中山和也, THzレーザープラズマ計測と関連技術の開発、第7回核融合エネルギー連合講演会、2008. 6. 19、青森市民ホール
- ⑥ 秋山毅志, 川端一男, 田中謙治, 岡島茂樹, 中山和也, 光弾性変調器を用いた短波長遠赤外レーザー偏光計の開発、第7回核融合エネルギー連合講演会、2008. 6. 19、青森市民ホール
- ⑦ 岡島茂樹, 中山和也, 富本昌宏, 金場貴宏, 松原章浩, 村岡克紀, 川端一男, 田中謙治, 徳沢季彦, 秋山毅志, 大熊春夫, THzレーザープラズマ計測と関連技術の開発、レーザー学会第28回年次大会、

2008. 1. 30 -2.1、名古屋国際会議場

- ⑧ 川端一男、秋山毅志、田中謙治、徳沢季彦、R. Pavlichenko、岡島茂樹、中山和也、2波長遠赤外レーザー干渉計の開発(IV)、第24回プラズマ核融合学会年会、2007. 11. 30、イーグレひめじ
- ⑨ 秋山毅志、川端一男、伊藤康彦、岡島茂樹、中山和也他、Cotton-Mouton効果を利用した電子密度計測、日本物理学会2007年春季年次大会、2007. 3. 21、鹿児島大学
- ⑩ 川端一男、秋山毅志、R. Pavlichenko、徳沢季彦、田中謙治、伊藤康彦、岡島茂樹、中山和也、新型2波長遠赤外レーザー干渉計の開発、第6回核融合エネルギー連合講演会、2006. 6. 13、富山国際会議場
- ⑪ 川端一男、田中謙治、徳沢季彦、伊藤康彦、秋山毅志、R. Pavlichenko、岡島茂樹、中山和也、新型2波長レーザー干渉計の開発、第22回プラズマ核融合学会、2005. 12. 30、タワーホール堀越
- ⑫ 中山和也、岡島茂樹、大熊春夫、川端一男、田中謙治、徳沢季彦、秋山毅、伊藤康彦、短波長遠赤外レーザー干渉計用Siエタロンの高精度設計光学定数の温度依存性、第66回応用物理学会学術講演会、2005. 9. 9、徳島大学

〔図書〕(計1件)

- ① 川端一男、他、コロナ社、プラズマ診断の基礎と応用、2006、377

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：ディスパージョン干渉計及び非測定物の物理量の計測方法

発明者：秋山毅志、川端一男、岡島茂樹、中山和也

権利者：同上

種類：特願

番号：2008-282085

出願年月日：2008年10月31日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ：

<http://adbplhd.nifs.ac.jp/plasma.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川端一男 (KAWAHATA KAZUO)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授
研究者番号：60109353

(2) 研究分担者

秋山毅志 (AKIYAMA TSUYOSHI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：80370138

徳沢季彦 (TOKUZAWA TOKIHIKO)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：90311208

田中謙治 (TANAKA KENJI)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50260047

岡島茂樹 (OKAJIMA SHIGEKI)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：90113084

中山和也 (NAKAYA KAZUYA)

中部大学・工学部・講師

研究者番号：40434584

(3) 連携研究者

無し