

平成 21 年 5 月 12 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18340187  
 研究課題名 (和文) 偏光 X 線分光法による超高強度レーザー生成プラズマ中のエネルギー輸送診断  
 研究課題名 (英文) X-ray polarization spectroscopy for the energy transport in ultra-short, high-intensity laser produced plasma  
 研究代表者  
 西村 博明 (NISHIMURA HIROAKI)  
 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
 研究者番号：60135754

## 研究成果の概要：

超高強度レーザー生成プラズマは、核融合や X 線放射、粒子加速などの分野で応用がひろがっており、プラズマ中での高速電子を介したエネルギー輸送は重要課題である。このような背景から、非等方高速電子速度分布の直接診断を目標として、偏光 X 線分光に着目した研究を実施した。プラズマ実験ならびに原子モデル、時間発展偏光分光計算コードを用いた研究を実施し、高速電子の速度分布関数の非等方性に起因している偏光 X 線の存在を確認し、高速電子診断に偏光分光計測が有用であることを初めて示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2007 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：プラズマ分光、レーザープラズマ物理

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：高速電子輸送、偏光 X 線分光、相対論的プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

高出力レーザー技術の進展に伴い、レーザー照射強度  $10^{17} \sim 10^{20} \text{W/cm}^2$  の高強度電磁場が実現できるようになった。この高強度レーザーと物質との相互作用の結果、数  $10 \text{keV}$  ～ 数  $\text{MeV}$  の高速電子が発生しプラズマ内部を伝搬し、背景プラズマを加熱するとともに、高エネルギーイオンやピコ秒パルス X 線、 $\gamma$  線などが放射される。超高強度レーザープラズマのこのような特徴を生かして、高速点火核融

合、粒子加速、超短パルス X 線源、レーザー核科学などの新しい研究分野が急速に進展している。

プラズマ中の高速電子の電流密度は数  $\text{TA/cm}^2$  ともなり、自己生成磁場やワイベル不安定性、2 流体不安定性などの様々な電磁流体不安定性が誘起され、高速電子の異常輸送が起こると予測されている。一方で、爆縮プラズマの追加熱やターゲット裏面からの X 線放射が観測されるなど、理論的予測を超え

る実験結果も数多く得られている。これらの例が示すように、応用面での重要性に反して超高強度レーザー生成プラズマ中の高速電子輸送に関する物理はまだ十分には理解されておらず、理論・実験両面から解明すべき課題は多かった。

従来の電子スペクトロメータや遷移放射では、高密度領域を伝搬する高速電子の速度分布関数を直接観測することは困難であるため、新しいプラズマ診断法として偏光X線分光を提案した。図1は、プラズマ中にレーザーが侵入したときの、高速電子の分布関数の変化を予測したスケッチである。

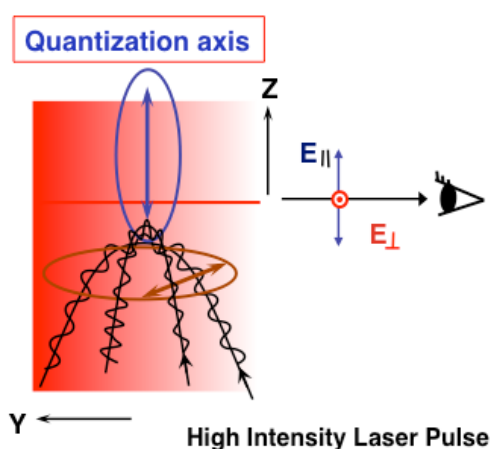


図1 プラズマ中にレーザーが侵入し、相互作用を通じて高速電子が生成されるが、その分布関数の形状は臨界密度を挟んで、密度勾配に直交する方向から沿う方向に変化すると予測される。

## 2. 研究の目的

本研究は、超高強度レーザープラズマ中の高速電子輸送に着目し、放射される偏光X線分光からその速度分布の直接観測を可能にする(1)新しいプラズマ診断法を開発するとともに、(2)高速電子輸送からX線放射過程までを統合した新しい計算コードによるシミュレーション解析手法を確立して、高密度プラズマ中の高速電子輸送を解明することを目的として開始した。

## 3. 研究の方法

まず、直交偏光成分を同時測定できるように既存計測器を改良し、非相対論領域である $10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ 照射下のプラズマ実験を実施した。平行して、これまで独自開発を進めてきた原

子過程コードを改良し、主量子、方位角量子に加え、磁気副準位を加味した新しいレート方程式求解法を整備して実験結果の解釈を行うことにより、原理実証を行う。さらに高エネルギーの相対論領域(照射強度 $10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ )を対象とした実験を実施して、自己形成磁場による電子輸送制限(Alvén limit)下での高速電子輸送現象を明らかにするとともに、本研究で提案する偏光X線分光法の可能性と課題とを明らかにした。後者の研究においては、既存のレーザー装置による実験研究と併に、海外との共同研究を視野に入れ、実験データの拡充を図ると併に、粒子計測などの併用でデータの確度を向上させた。

## 4. 研究成果

主な成果を列記すると以下のようになる。

(1) 超高強度レーザー生成プラズマ中の非等方高速電子速度分布の観測には、偏光X線分光が有用であることを示す。ポリスチレンと塩化ポリスチレンの2層からなるターゲットから放射される塩素のHea線( $2.79\text{keV}$ )の偏光を、表面ポリスチレン層の厚みを変化させながら、トロイダル湾曲結晶偏向分光器により観測した。ターゲット表面における偏光は、ターゲット面に沿う方向に偏り、深部では、これに垂直方向に偏光していることが見出された。このX線の偏光は高速電子の速度分布関数の非等方性に起因しており、その診断に偏光分光計測が有用であることを初めて示した。

(2) 2. 超高強度レーザー生成プラズマ中のエネルギー輸送に関する実験研究を実施した。 $10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ の強度で照射された3層ターゲットから放射されるX線を分光器、単色X線画像系、ならびに偏光分光器で観測し、プラズマの密度勾配方向の温度構造、加熱領域の横方向広がり、ならびに高速電子速度分布関数の偏りを測定した。ペタワットレーザープラズマでは、極めて浅い( $\sim 0.5\text{mm}$ )表面領域のみが $650\text{eV}$ 程度の温度まで加熱されているが、深層部では、せいぜい $100\text{eV}$ 程度であることが判った。これらの深さは、高速電子の古典的侵入長と比較して、遙かに短い。このような局所加熱は、 $10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ の照射強度下でも見出されている。この照射強度で、塩素のHea線( $1s^2 1S_0-1s2p^1P_1$ )の偏光度も観測し、表面における偏光は、ターゲット面に沿

う方向に偏り、深部では、これに垂直方向に偏光していることが見出された。これらの結果にもとづき、2次元マックスウェル分布にある高速電子速度分布関数を仮定した解析を行い、プラズマ深部でビーム状の分布に成っていることが判った。

(3) 130fs のパルス幅をもつレーザーパルス照射した3層ターゲットから放射されるエネルギー2.79keV のヘリウム様塩素 Cl Hea 線 ( $1s^2S_0-1s2p^1P_1$ ) の偏光度観測を行った。偏光度は、3層ターゲット表層に設けたオーバーコート層の厚みの関数として観測した。2層ターゲットの場合と同様、ターゲット表面における偏光は、ターゲット面に沿う方向に偏り、深部では、これに垂直方向に偏光していることが見出された。これらの結果にもとづき、2次元マックスウェル分布にある高速電子速度分布関数を仮定した解析を行い、プラズマ深部でビーム状の分布に成っていることが判った。

(4) 130fs のパルス幅をもつレーザーパルス照射した3層ターゲットから放射されるエネルギー2.79keV のヘリウム様塩素 Cl Hea 線 ( $1s^2S_0-1s2p^1P_1$ ) の偏光度観測を行った。偏光度は、3層ターゲット表層に設けたオーバーコート層の厚みの関数として観測した。2層ターゲットの場合と同様、ターゲット表面における偏光は、ターゲット面に沿う方向に偏り、深部では、これに垂直方向に偏光していることが見出された。これらの結果にもとづき、2次元マックスウェル分布にある高速電子速度分布関数を仮定した解析を行い、プラズマ深部でビーム状の分布に成っていることが判った。

(5) Breti-Pauli の  $R$ マトリックス法を用いて、17の詳細準位を対象とした衝突励起による He 様塩素の基底準位から磁気副準位への積分断面積を計算した。計算は、基底状態から全ての励起状態に対する  $1snI(I=0, 1)$  で表される全ての詳細準位への遷移に対して行った。低電離から He 様に電離したイオンからの  $w(1s^2S_0-1s2p^1P_1)$ ,  $y(1s^2S_0-1s2p^3P_1)$  ならびに  $x(1s^2S_0-1s2p^3P_2)$  遷移に伴う偏光度の原子番号依存性に関する系統だった解析を実施した。He 様塩素イオンの偏光度の計算結果は、実験や他の理論解析と非常に良い一致を示した。

(6) 塩素の Hea 線に対する偏光の解析を行う計算コードを用いて、超高強度レーザー生

成プラズマ中のエネルギー輸送に関する理論的研究を実施した。Breti-Pauli の  $R$ マトリックス法を用いて Li 様ならびに He 様の塩素イオンに対する電子衝突における磁気副準位に対する弾性、非弾性散乱の断面積を計算した。電子密度に対する偏光度の依存性を、時間発展衝突輻射原子コードを用いて調べた。電子密度の増加に伴い弾性衝突が支配的となるため、偏光度は、“見かけ上”低下することを見出した。

(7) 超高強度レーザー生成プラズマの偏光 X線分光診断を目的として、Breti-Pauli の  $R$ マトリックス法を用い、31の詳細準位を対象とした He 様塩素の基底準位から磁気副準位への非弾性衝突励起の振幅を計算した。偏光 X線放射に直結するアラインメントをもたらす非弾性散乱に対する衝突強度を、基底準位から  $1s2I(I=0, 1)$   $1s3I(I=0, 1, 2)$  で表される全ての励起状態における詳細準位への遷移に対して求めた。励起状態におけるアラインメントを崩す弾性衝突の衝突強度も  $1s2p^1P_1$  状態にある磁気副準位に対して求めた。共鳴構造を含んだ衝突強度をアラインメントのポピュレーション解析に用いた。弾性衝突における共鳴がアラインメントの緩和効果をもたらす主要因であることを見出した。

(8) 高速点火核融合研究に関連した高速電子の輸送による偏光 Ha 線の発生に関する知見を得る目的で、時間発展原子コードを開発した。磁気副準位間の頻繁な弾性衝突の結果、臨界密度の100倍以上の高密度領域では、偏光度が大きく低下する一方で、臨界密度の10倍以下の密度では、高い偏光度が得られることが計算より判った。高速電子は電磁的な不安定性によりコリメートされ、低密度領域では伝搬方向に非等方な分布をもった高速電子が生成されていることが示唆された。

(9) 高強度レーザー生成プラズマ中を伝搬する高速電子の速度分布関数を直接求める手法として、偏光 X線分光を研究した。フランス CEA/CESTA にある Alise レーザーから得た、 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$  の強度のレーザーパルス ( $\sim 10\text{J}$ ,  $1\text{ps}$ ) を用い、塩素を含有する3層構造のターゲットを照射して、放射される塩素の Hea 線を偏光分光器で観測した。ターゲットの表面コートが薄い場合には、偏光度は弱く負になったのに対して、コート厚さの増加に伴い、正に転じ、最後にはゼロとなった。この結果は、時間発展原子コードによる予測と良く一

致している。表面における偏光度の低下はプラズマ中の背景電子温度の上昇が原因しており、また、深層部での偏光度の低下は、高密度領域における弾性散乱に起因していると考えられる。

(10) 超高強度レーザーの斜入射照射下でのプラズマを対象とした偏光 X 線分光観測を実施した。ポリ塩化ビニールターゲット表面垂直から、平均照射強度  $10^{17}$ - $10^{18}$ W/cm<sup>2</sup> の下、7 度ならびに 67 度の入射角度でプラズマを生成した。入射角度に応じて、塩素のシフト Ka 線のスペクトルに大きな変化があることが見出された。これは、斜入射では吸収が低下した為であると考えられる。塩素の Hea 線にも変化があることが見出され、入射レーザーの偏光が超高強度レーザーにより生成された高速電子の分布関数に影響を与えた為であると考えられる。

(11) 照射強度  $5 \times 10^{17}$ W/cm<sup>2</sup> で得た偏光度 10% は、高速電子の主たる伝搬方向の勾配温度 200keV に対して、直交方向の勾配温度は 3keV に相当すること、また、この速度比は、高速電子の広がり角度 (全角) で 14 度に相当することが明らかとなった。従来、この広がり角度は 20-30 度であるとされてきたが、その測定法ターゲット裏面における過渡放射やトレーサの Ka 線画像から診断したものであり、本研究で示した偏光分光による高速電子相度分布の直接計測は、新しいプラズマ診断法をあたえる手段として重要である。図 2 は、3 層ターゲットのコート厚さを変えたときの塩素 Hea 線の偏光度の変化を示した実験結果である。

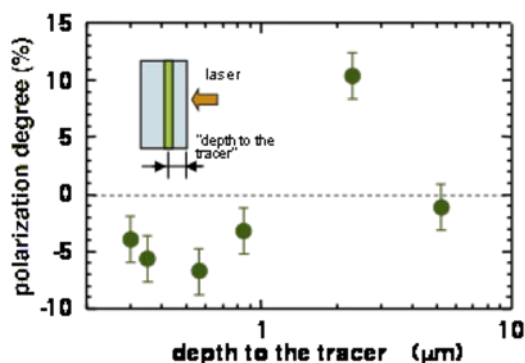


図2 塩素 Hea 線の3層ターゲット表面コート厚さ依存性

## 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 11 件)

- 1) *Diagnostics of anisotropic hot electron velocity distribution using x-ray polarization spectroscopy*  
Y. Inubushi, Y. Okano, H. Nishimura, S. Fujioka, T. Kai, T. Kawamura, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima,  
 Journal of Physics: Conference Series **112**, p. 022105 (2008). (査読有)
- 2) *Integral cross sections with magnetic sublevels of He-like ions by electron impact excitation for x-ray polarization spectroscopic analysis*  
T. Kai, T. Kawamura, S. Nakazaki, Y. Inubushi, H. Nishimura, Y. Okano, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, S. Fujioka, and K. Mima  
 Journal of Physics: Conference Series **112**, p. 022104 (2008). (査読有)
- 3) *X-ray polarization measurement for fast electrons in intense-laser-produced plasma under oblique incidence*  
Y. Okano, Y. Inubushi, H. Nishimura, S. Fujioka, T. Kai, T. Kawamura, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima  
 Journal of Physics: Conference Series **112**, p. 022101 (2008). (査読有)
- 4) *Study on anisotropic fast electron transport by polarized K-shell radiation in ultra-short intense laser produced plasmas*  
T. Kawamura, T. Kai, F. Koike, S. Nakazaki, Y. Inubushi, Y. Okano, S. Fujioka, H. Nishimura, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima  
 Journal of Physics: Conference Series **112**, p. 022097 (2008). (査読有)
- 5) *X-ray polarization spectroscopy to study energy transport in ultra-high intensity laser produced plasmas,*

- H. Nishimura, Y. Inubushi, Y. Okano, S. Fujioka, T. Kai, T. Kawamura, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima  
Journal of Physics: Conference Series **112**, p. 022080 (2008). (査読有)
- 6) *Polarization of Hea Radiation due to Anisotropy of Fast-Electron Transport in Ultraintense-Laser-Produced Plasmas*  
T. Kawamura, T. Kai, F. Koike, S. Nakazaki, Y. Inubushi, and H. Nishimura  
Phys. Rev. Lett. **99**, pp.115003-1~4 (2007). (査読有)
- 7) *Elastic- and inelastic-scattering collision strengths between magnetic sublevels for electron impaction He-like Cu ions*  
T. Kai, S. Nakazaki, T. Kawamura, H. Nishimura, and K. Mima  
Physical Review **A 75**, pp.062710-1~7 (2007) (査読有)
- 8) *Time-dependent x-ray polarization analysis for anisotropic distribution of hot electrons in ultrahigh intensity laser plasmas*  
T. Kai, T. Kawamura, Y. Inubushi, H. Nishimura, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, S. Nakazaki, S. Fujioka and K. Mima  
High Energy Density Physics **3**, pp.131-135 (2007). (査読有)
- 9) *Integral cross section with magnetic sublevels and polarization degree of He-like Cl ions by electron impact*  
T. Kai, S. Nakazaki, T. Kawamura, H. Nishimura, and K. Mima  
P hys. Rev **A 75**, 012703-1~8 (2007). (査読有)
- 10) *Analysis of X-ray polarization to determine the three-dimensionally anisotropic velocity distributions of hot electrons in ultra-high intensity laser produced plasma*  
Y. Inubushi, T. Kai, T. Nakamura, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Mima  
Phys. Rev. **E 75**, pp026401-1~5, (2007). (査読有)
- 11) *X-ray line polarization spectroscopy to study hot electron transport in ultra-short laser produced plasma*  
Y. Inubushi, H. Nishimura, M. Ochiai, S. Fujioka, T. Johzaki, K. Mima, T. Kawamura, S. Nakazaki, T. Kai, S. Sakabe, and Y. Izawa  
J. Quantitative Spectroscopy and Radiation Transfer **99**, 305-313 (2006). (査読有)
- [学会発表] (計 8 件)  
\*以下、主なものだけ、列記
- (1) 偏光 X 線分光法を用いた超高強度レーザー生成高速電子 速度分布関数の診断  
西村 博明  
日本分光学会関西支部講演会 (招待講演)・日本原子力研究開発機構  
関西光科学研究所 (2008 年 7 月)
- (2) 偏光 X 線分光法を用いた超高強度レーザー生成高速電子速度分布関数の直接診断  
西村博明  
日本物理学会第 62 回年次大会・シンポジウム (招待講演) 北海道大学 (2007 年 9 月)
- (3) X 線偏光分光計測による超高強度レーザー生成高速電子輸送のレーザー偏光依存性の観測  
岡野泰彬, 犬伏雄一, 西村博明, 甲斐健師, 河村徹, 藤岡慎介, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, 中村龍史, 城崎知至, 長友英夫, 三間園興  
日本物理学会第 62 回年次大会・北海道大学・24aRS-11 (2007 年 9 月)
- (4) 高強度レーザー生成プラズマ中の非平衡非等方 K 殻放射  
河村徹, 甲斐健師, 小池文博, 中崎忍, 犬伏雄一, 岡野泰彬, 中村龍史, 城崎知至, 長友英夫, 西村博明  
日本物理学会・天文学会・SGEPSS 合同プラズマ共催セッション, 岐阜大学 (2007 年 9 月)
- (5) 偏光 X 線分光法による衝突輻射モデルと電子衝突磁気副準位別断面積の理論的研究,  
甲斐健師, 河村徹, 犬伏雄一, 西村博明, 中村龍史, 城崎知至, 長友英夫, 中崎忍, 藤

岡慎介, 三間囿興,  
日本物理学会 2007 年秋季大会, 北海道大学,  
(2007 年 9 月)

[その他]

\* 国際会議発表 (計 14 件)

\* 以下は招待講演のみ記載

- 1) *Polarized He-alpha Radiation by Anisotropic Fast Electron Transport in Ultra-intense Laser Produced Plasmas*  
T. Kawamura, T. Kai, F. Koike, S. Nakazaki, H. Nishimura, Y. Inubushi, Y. Okano, H. Nagatomo, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, S. Fujioka, T. Nakamura, T. Johzaki, and K. Mima,  
The 16th International Conference on Atomic Processes in Plasmas, Monterey, California, USA, March 22-26, 2009. (招待講演)
- 2) *X-ray polarization spectroscopy to study energy transport in ultra-high intensity laser produced plasmas*,  
H. Nishimura, Y. Inubushi, Y. Okano, S. Fujioka, T. Kai, T. Kawamura, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, C. Fourment, J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, M. Koenig, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima  
The 5th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007). (招待講演)
- 3) *X-ray polarization spectroscopy of ultra-short high intensity laser produced plasmas*,  
T. Kai, T. Kawamura, Y. Inubushi, H. Nishimura, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, S. Nakazaki, S. Fujioka, and K. Mima,  
The 2nd Canada-Japan SRO-COAST Symposium on Ultrafast Intense Laser, (2007) (招待講演)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西村博明 (NISHIMURA HIROAKI)  
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号 : 60135754

### (2) 研究分担者

#### (3) 連携研究者

長友英夫 (NAGATOMO HIDEO)  
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・准教授  
研究者番号 : 10283813  
城崎知至 (JOHZAKI TOMOHARU)  
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員  
研究者番号 : 10397680  
藤岡慎介 (FUJIOKA SHINSUKE)  
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・助教  
研究者番号 : 40372635  
阪部周二 (SAKABE SHUJI)  
京都大学化学研究所・教授  
研究者番号 : 50153903  
甲斐健師 (KAI TAKESHI )  
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員  
研究者番号 : 70403037  
河村 徹 (KAWAMURA TOHRU)  
東京工大総合理工学研究科・講師  
研究者番号 : 10370214  
岡野泰彬 (OKANO YASUAKI)  
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員  
研究者番号 : 00393819  
中村龍史 (NAKAMURA TATSUFUMI) 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員  
研究者番号 : 40318796