

平成22年5月10日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18204055
 研究課題名（和文）：超高強度レーザー励起マルチフレーム点エックスによる高速ランダム過渡現象の理解
 研究課題名（英文）：Study of Fast Random Phenomena Using Multi-Frame X-ray Sources with Ultra Intense Laser
 研究代表者
 兒玉 了祐 (KODAMA RYOSUKE)
 大阪大学・工学研究科・教授
 研究者番号：80211902

研究成果の概要（和文）：

超高強度短パルスレーザーと高エネルギー密度電子制御プラズマデバイスにより、シングルショットでも時間分解可能なプローブ光源として高輝度 keV-X 線源を開発した。電子ガイドされた X 線源を利用し、レーザーで誘起した高密度物質中の過渡現象の観測を試み、高い S/N で従来に比べより高い空間分解で過渡現象を捉えることができた。さらにランダムな過渡現象を得る試みを行った。

研究成果の概要（英文）：

We have developed pulse keV-X-ray sources by utilization of plasma photonic devices to control high energy density electron beams and intense light as well as of ultra-intense lasers. The radiation source was useful to probe high speed phenomena in high density material with a high temporal resolution for a single shot base. This intense pulse radiation sources would be a new toll to probe random transient phenomena.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,300,000	3,990,000	17,290,000
2007年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ応用

1. 研究開始当初の背景

超高強度短パルスレーザーと物質との相互作用により短バンチで高エネルギー密度の電子ビームが効率的に発生する。例えば波長 $1\ \mu\text{m}$ で集光強度が $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上のレーザー光が固体と相互作用するとき、高エネルギー密度電子は電流密度に換算すると

$100\text{GA}/\text{cm}^2$ 以上にも達する。プラズマ中においては逆起電流によって実効的に無電流に近い状態ができ、伝播が可能となる。また電子流は高密度であるため伝搬経路は自己加熱し伝導率を上げ、その径方向空間変化による磁場による閉じ込め効果などによる安定した伝播が実験的に確かめられている。この

ような光速に近い速度で伝播する高エネルギー密度電子によって容易に keV 領域のパルス高輝度 X 線を発生できる。このパルス高輝度 X 線は、固体内の格子構造変化など高速過渡現象を調べる上で重要なパルス光源として注目されている。

一方、超高強度レーザーと固体との相互作用で発生する短バンチ高エネルギー密度電子は、ビーム状に発生するもの平面固体などの自由空間内でその拡がり角は、30-40 度以上と広く、電子の飛程内で極端にエネルギー密度を下げると同時に X 線の発光領域が広がる。このような観点から従来、超高強度レーザー生成高エネルギー密度電子によって励起する点 X 線源の効率には限界があった。

ところが、申請代表者が提案・実証したプラズマフォトニックデバイスを使用し、短パルス超高強度レーザーとプラズマとの相互作用で発生する短バンチ高エネルギー密度電子ビームの伝播を制御することで、シングルショットでもマルチフレームが可能な効率的な高時間分解を可能とする keV-X 線源が期待できる。これにより、高密度物質におけるランダム過渡現象やカオティック現象の自己組織化など、従来法では観測が困難であった高速過渡現象を観測できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究計画では、超高強度短パルスレーザーと高エネルギー密度電子制御プラズマデバイスにより、シングルショットでも時間分解可能なプローブ光源として高輝度 keV-X 線源を開発する。これにより、従来困難であった高速ランダム過渡現象を観測する手法を確立する。高密度物質におけるランダム過渡現象やカオティック現象の自己組織化など、従来のマルチショット・マルチフレーム法では観測が困難であった高速ランダム過渡現象を観測する手法を確立することが、目標である。

3. 研究の方法

本研究では、超高強度短パルスレーザーと高エネルギー密度電子制御プラズマデバイスにより、高輝度 keV-X 線源を開発しこれにより高密度物質中での過渡現象を直接観測する。そのための要素技術として以下の具体的項目を実施する。

- ・マルチフレーム高速 X 線源のためのターゲット形状の最適化
- ・効率的な電子ガイドを目的としたマイクロパルスパワー励起ワイヤープラズマの生成
- ・短バンチ高エネルギー電子発生するためのプラズマミラーの応用

これらの成果をもとに、電子ガイドされた X 線源を利用した高密度物質中での過渡現象の観測を試み、システムとしての評価を行う。また本計画を実施するために、既存の超高強

度レーザーを整備するとともに、国内外のパワーレーザーシステムを効率よく利用する。

4. 研究成果

超高強度短パルスレーザーと高エネルギー密度電子制御プラズマデバイスにより、高輝度 keV-X 線源を開発として以下の成果を得た。

- (1) X 線源のためのターゲット形状の最適化
[コーンデバイスによる高密度相対論電子ビーム発生の最適化]

超高強度レーザーとコーンとの相互作用で発生する高エネルギー密度電子の最適化を図るため、コーンの開き角に対する高エネルギー密度電子のエネルギースペクトル依存性を実験的に明らかにした。また実験結果と相互作用の効果を取り入れた光線追跡計算との比較によりレーザー集光条件に対して高エネルギー密度電子を効率よく発生する最適なコーンの開き角があることがわかった。

[超高強度レーザー生成相対論電子ビームを集光するプラズマデバイス]

超高強度レーザーと固体薄膜との相対論相互作用で発生する高エネルギー密度電子ビームは、固体中を伝搬し薄膜裏面からその一部が 20-30 度という大きな広がり角を持って真空中に放出される。また薄膜裏面において、真空と固体の境界面に強い静電場を自身で作るため、電子ビームの放出割合は、生成電子ビームの数%以下に落ちる。そのエネルギーは薄膜裏面のイオンを加速するエネルギーに多くが変換される。そこで薄膜裏面をプラズマ化することで薄膜裏面に生成される自己静電場を極端に抑え、従来の放出割合の 10 倍以上の電子ビームを真空中に取り出すことに成功した。さらに薄膜裏面の形状を球面に変化させることで、発生電子の広がり角を直接制御し集光させることに初めて成功した。この結果、従来にくらべ 3 ケタ程度高い電子ビームのエネルギー密度を得ることができた。これを利用することで従来以上の高輝度な点 X 線が期待できる。

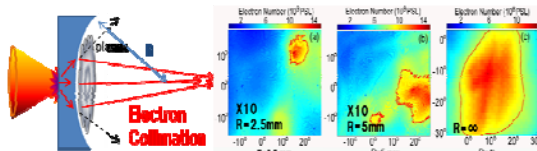


図1. プラズマ電子レンズによる相対論電子ビームガイド

[レーザー誘起 MeV 電子による高速マルチポイント X 線放射]

K α 線発生の実験を行った。ターゲットは銅とニッケルをエミッターとしたコーンワイヤーターゲットであった。図は X 線ピンホールカメラで取得された発光像であり、レーザ

ーが照射されたコーン先端と共に、銅、ニッケルからの発光が確認された。また、同時に計測した X 線スペクトルから、これらの発光がそれぞれの $K\alpha$ 線であることが確認された。この結果、コーンターゲットで生成された相対論電子ビームがワイヤーをサブミクロメートルの距離を伝播し、 $K\alpha$ 線を発光させることが可能であることが明らかとなった。

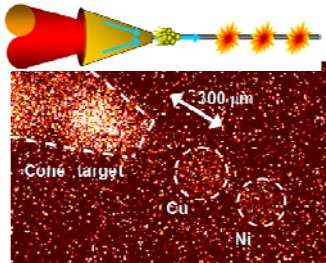


図 2. 高速マルチポイント X 線放射像

(2) ワイヤープラズマによる電子ガイドと励起用マイクロパルスパワー
[マイクロパルスパワーを使ったガイディング用ワイヤープラズマ生成]

10TW 超高強度レーザーで生成する高エネルギー密度電子の効率的な伝搬を実現するため、高エネルギー密度電子流を補償する帰還電流トリガーを目指したマイクロパルスパワーを開発した。レーザーギャップスイッチを用いることで安価に高速スイッチを実現し、固体-プラズマ中間状態の伝導率を考慮した高速加熱（立ち上がり時間：7ns）を実現した。また $>GW/cm^2$ のエネルギー注入に成功した。これはテーブルトップレーザーで実現できるエネルギー密度に近い状態をマイクロパルスパワーで実現できたことになる。以上よりレーザー高密度相対論電子ビームのガイディング実験の準備が整った。

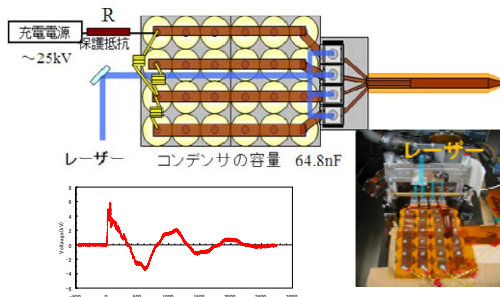


図 3. 超高速マイクロパルスパワーと高速電圧波形

[超高密度ワイヤープラズマ中の高密度相対論電子ビームガイド]

固体の 5-10 倍程度の高密度プラズマ中での高密度相対論電子ビームガイドを明らかにし論文化した。固体ワイヤーでは電子ビーム自己生成静電場による閉じ込め効果が支配的であったが、密度勾配の大きな高温高密度プラズマ中では静電場は固体の 1/10 以下

となり代わりに自己生成磁場による閉じ込め効果が重要であることが明らかになり、マイクロパルスパワーを利用したパルス超高磁場により高エネルギー密度電子のコリメーションに有用な知見を得た。

[ワイヤードバイスにおける高密度相対論電子ビーム伝搬の直性計測]

レーザー生成高密度相対論電子ビームを効率よくガイドするワイヤープラズマデバイスが関して、実験及びシミュレーションにより、ワイヤーの表面での逆起電流やこれによるオーム加熱の重要性が明らかになった。また電子ビームをガイドするうえでプラズマ中の逆起電流の振る舞いや伝導率を決定する自己加熱機構を理解することが重要であることが明らかになった。

さらに、ワイヤードバイスにおける高密度相対論電子ビームガイドに重要な電界分布の計測を超高強度レーザー励起プロトンビームによるバックライト法により実施した。ワイヤーに沿って電子がガイドされ伝搬していく様子を数 psec の時間分解で直接観測することに成功した。またワイヤーの導電率の違いにより電界の働き方が異なることがわかった。さらに銅のワイヤーにおいては電界分布が不均一であることがわかった。今後、ワイヤーの材質について固体-プラズマ中間体物性値のデータベースの構築とそれによる効率的な伝搬材質を評価する必要があることが分かった。

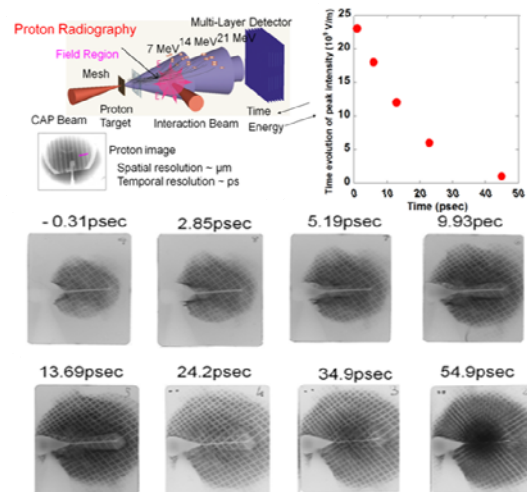


図 4. ワイヤードバイスを伝搬する高エネルギー密度電子による電界分布

(3) 短バンチ高エネルギー電子発生するためのプラズマミラーの応用

[相対論振動プラズマミラーによる時間変調パルス生成と電子加速の検証]

プラズマミラーを相対論強度で使用すると、反射面は相対論的速度で振動を起し反射光は強い変調を受けて反射する。この変調

反射光による電子の加速を検証した。変調パルスによる加速長を増やすことでより高いエネルギーの電子ビームを発生することを初めて実証した。高エネルギー密度電子ビームの効率的な発生によりより高輝度なX線が期待できる。

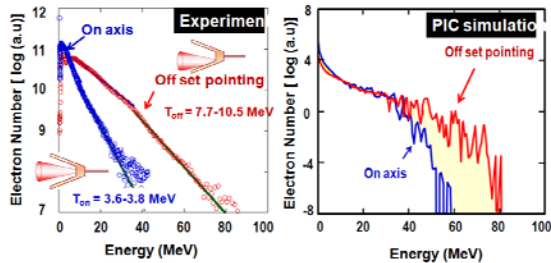


図5. 相対論プラズマミラーによる電子生成

[集光プラズマミラーによるレーザー集光効率向上]

従来、超高強度レーザーの集光光学系はワーキングディスタンスの制約やプラズマデブリの問題から光学系のF値に制限があった。これを解決する新しいプラズマ集光ミラーの幾何学配置を考案した。回転楕円体のプラズマミラーによる像転送型の集光配置をとることにより、従来困難とされていた高精度集光を実現することができた。その結果、従来の集光強度の10倍以上高い集光強度を実現することができた。これによりさらに効率的に高輝度X線を発せることが期待できる。

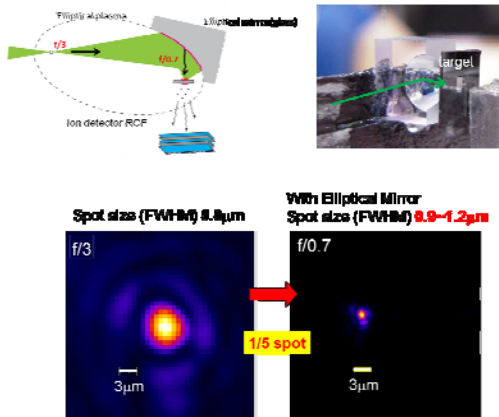


図6. 集光プラズマミラーによる高効率集光

[電子ガイドされたX線源を利用した高密度物質中での過渡現象の観測]

超高強度レーザーと固体との相互作用で発生する高エネルギー密度電子ビームを細線プラズマでガイドし、小さな領域からX線を効率よく発生させることは、シャドウグラフなどイメージング用の光源として重要な要素となる。この観点に立ち、細線プラズマからのX線のイメージング用の光源として性能評価を行った。

超高強度レーザーをワイヤーデバイスに照射した際に発生するkeV領域X線と平板に

レーザーを集光し発生するX線によるイメージングの違いを評価した。ワイヤーデバイスでは電子がガイドされ小さな発光体となるため、単純に平板にレーザーを集光するより高い空間分解(10マイクロオーダー)が得られることが実験的にも明らかになった。またこのX線を利用し、レーザー駆動衝撃波が固体中を伝搬の様子を10psの時間分解で撮影することに成功した。

さらにレーザー誘起相転移を本パルスX線を利用したX線回折、散乱計測を行い高速で起こる高密度物質中のマイクロな変性を診断することを試みた。

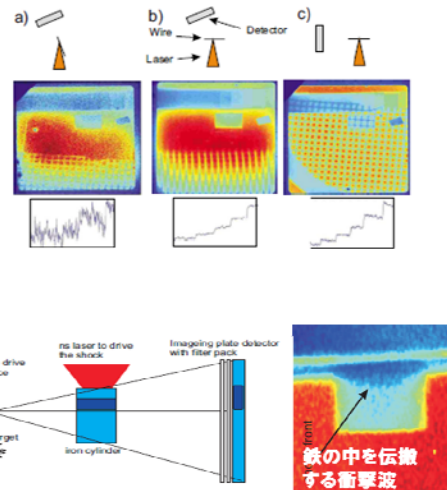


図7. ワイヤーターゲットからのX線による空間分解評価と固体中を伝搬するレーザー駆動衝撃波像

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 25 件)

1. A. Kon, et al, "Geometrical optimization of an ellipsoidal plasma mirror toward tight focusing of ultra-intense laser pulse" J. Phys., 査読有, Accepted(2010)
2. Y. Inubushi, et al, "Plasma photonic devices with complex refractive index in EUV region" J. Phys., 査読有, Accepted(2010)
3. A. Morace, et al, "Study of plasma heating induced by fast electrons" Phys. Plasmas **16**(12), 査読有, 122701_1-122701_9(2009) doi:10.1063/1.3261807
4. H. Yoneda, et al, "Ultra-fast switching of light by absorption saturation in vacuum ultra-violet region" Optics Express **17**, 査読有, 23443-23448(2009)
5. B. Loupias, et al, "Highly efficient easily spectrally tunable X-ray backlighting for the study of extreme matter states" Laser Part. Beams **27**, 査読有, 601-609(2009)
6. E. Brambrink, et al, "Direct density measurement of shock-compressed iron using hard x rays generated by a short laser pulse" Phys. Rev. **E80**, 査読有, 056407_1-056407_5(2009)
7. Y. Fukuda, et al, "Energy Increase in Multi-MeV Ion Acceleration in the Interaction of a Short Pulse Laser with a Cluster-Gas Target" Phys. Rev. Lett. **103**, 査読有, 165002_1-165002_4(2009)
8. T. Tanimoto, et al, "Measurements of fast electron

- scaling generated by petawatt laser systems” Phys. Plasmas**16**, 査読有, 062703(2009)
9. S. A. Reed, et al, “Relativistic plasma shutter for ultraintense laser pulses” App. Phys. Lett.**94**, 査読有, 201117_1-201117_3(2009)
 10. A. L. Lei, et al, “Study of ultraintense laser propagation in overdense plasmas for fast ignition” Phys. Plasmas**16**, 査読有, 056307_1-056307_6(2009)
 11. S. D. Baton, et al, “Inhibition of fast electron energy deposition due to preplasma filling of cone-attached targets” Physics of Plasmas**15**, 査読有, 042706(2008)
 12. H. Nakamura, et al, “Superthermal and efficient-heating modes in the interaction of a cone target with ultraintense laser light” Physical Review Letters**100**, 査読有, 045009(2008)
 13. M. Nakatsutsumi, et al, “Space and time resolved measurements of the heating of solids to ten million kelvin by a petawatt laser” New Journal of Physics**10**, 査読有, 043046(2008)
 14. M. Nakatsutsumi, et al, “Heating of solid target in electron refluxing dominated regime with ultra-intense laser” Journal of Physics: Conference Series**112**, 査読有, 022063(2008)
 15. D. Batani, et al, “Recent experiment on fast electron transport in ultra-high intensity laser interaction” Journal of Physics: Conference Series**112**, 査読有, 022048(2008)
 16. J. Rassuchine, et al, “Enhanced energy localization and heating in high contrast ultra-intense laser produced plasmas via novel conical micro-target design” Journal of Physics: Conference Series**112**, 査読有, 022050(2008)
 17. M. Nakatsutsumi, et al, “Heating of solid target in electron refluxing dominated regime with ultra-intense laser” J. Phys. Conf. Ser., **112**(2), 査読有, 022063_1-022063_4 (2008)
 18. Z. Jin, et al, “Estimation of Smith-Purcell Radiation in Laser-plasmas Interaction” J. Phys. Conf. Ser., **112**(2), 査読有, 022087_1-022087_4 (2008)
 19. Z. Chen, et al, “Plasma Devices to Control Energetic Electrons Produced by Ultra-intense Lasers” Rev. Laser Eng **36**, 査読有, 1146-1149 (2008)
 20. M. Nakatsutsumi, et al, “Re-entrant cone angle dependence of the energetic electron slope temperature in high-intensity laser-plasma interactions” Physics of Plasmas**14**, 査読有, 050701-050701(2007)
 21. J. Fuchs, et al, “Space- and time- resolved observation of single filaments propagation in an underdense plasma and of beam coupling between neighbouring filaments” Plasma Physics and Controlled Fusion**49**, 査読有, B497-504(2007)
 22. J. S. Green, et al, “Surface heating of wire plasmas using laser-irradiated cone geometries” Nature Physics**3**, 査読有, 853 – 856(2007)
 23. S. D. Baton, et al, “Relativistic electron transport and confinement within charge-insulated, mass-limited targets” High Energy Density Physics**3**, 査読有, 358-358(2007)
 24. K.L.Lancaster, et al, “Measurements of Energy Transport Patterns in Solid Density Laser Plasma Interactions at Intensities of $5 \times 10^{20} \text{ Wcm}^{-2}$ ” Physical Review Letters**98**, 査読有, 125002-125002(2007)
 25. 中埜基彰、et al, “超高強度レーザーと固体との相互作用におけるターゲット裏面異常加熱” 社団法人レーザー学会, 査読有, 第 35 巻第 1 号, pp33-37 (2007)

[学会発表] (計 33 件)

1. 兒玉了祐, レーザー誕生 50 周年記念シンポジウム Feb. 2, 2010 「高強度レーザーと高エネルギー密度科学」(invited)
2. 兒玉了祐, 日本学術会議日本学術会議シンポ

ジウム 「物性物理学・一般物理分野の大型施設の現状と将来」 January 27, 2010 「レーザーによる高エネルギー密度科学」(invited)

3. R. Kodama, CLEO/Pacific Rim 2009, Aug.30-Sept.3 2009 Shanghais, China, “High Energy Density State, Material and Device with High Power Lasers” (invited)
4. H. Nakamura et al., the 238th ACS National Meeting & Exposition Fall 2009 “Developments of nuclear diagnostics for fast ignition experiments in laser fusion” (invited)
5. R. Kodama, Plasma Science Symposium 2009, Feb 2-4 2009, Nagoya, Japan “Toward Creation of Novel Material and Devices in High Energy Density States with High Power Lasers” (invited)
6. R. Kodama, The Optical Society of America and Frontiers in Optics **2008**, Oct 20-24 2008, Rochester, USA “Novel Matter and Devices in High Energy Density Science with High Power Lasers” (invited)
7. 兒玉 了祐, “光を使った高エネルギー密度科学の展開 Exploring of High Energy Density Science with Photons” 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学(2008.3.24) (invited)
8. R. Kodama, “Exploring of High Energy Density Science with High Power Lasers” The 6th Asia Pacific Laser Symposium, Nagoya, Japan (2008.1.31)(invited)
9. R. Kodama, “High Energy Density Plasma Photonics” Conference on Inertial Fusion Science and Applications, Kobe, Japan (2007.9.13)(invited)
10. M. Nakatsutsumi, et al., “Heating of solid target in electron refluxing dominated regime with ultra-intense laser” Conference on Inertial Fusion Science and Applications, Kobe, Japan (2007.9.13)(invited)

他 23 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/ef/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

兒玉 了祐 (KODAMA RYOSUKE)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：80211902

(2) 研究分担者

尾崎 典雅 (OZAKI NORIMASA)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：70432515

羽原 英明 (HABARA HIDEAKI)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60397734