

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540537

研究課題名(和文)フェムト秒電子ビームによる相対論的レーザープラズマ相互作用の超高速観測

研究課題名(英文)Ultrafast observation of relativistic laser-plasma interactions by a femtosecond electron beam

研究代表者

時田 茂樹 (Shigeki, Tokita)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・講師

研究者番号：20456825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：高強度超短パルスレーザーとプラズマの相互作用により過渡的に生じる強い電場および磁場を定量的に測定するため、レーザー加速フェムト秒電子ビームを用いた新しい時間分解計測手法を開発・実証した。高強度超短パルスレーザーを照射した金属ワイヤー近傍にフェムト秒電子ビームを通過させ、偏向角を計測した。その結果、高強度レーザー照射直後に、ワイヤーに沿ってほぼ光速で伝播する非常に高強度の高いピコ秒パルス表面電磁波が発生することを新たに発見した。本実験結果はレーザー光のエネルギーが非常に効率よくサブテラヘルツ領域の表面電磁波へと変換できることを示している。新しい高強度テラヘルツ波発生手法として応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated a novel time-resolved measurement technique using a laser-accelerated femtosecond electron beam for measuring transient electric and magnetic fields produced by intense ultrafast laser interactions with plasmas. A femtosecond electron beam was passed through near a metal wire, and its deflection angle was measured. As a result, we discovered that a high-intensity picosecond electromagnetic surface wave which propagate on the wire with a velocity very close to the speed of light can be produced. This results indicates that an energy of a laser pulse can be converted to an electromagnetic surface wave with the frequency range of sub-terahertz. This phenomenon can be applied to generate high-intensity terahertz waves.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：レーザープラズマ テラヘルツ サブミリ波 超高速 高強度レーザー レーザー加速 電子ビーム

1. 研究開始当初の背景

レーザー光の集光強度がおおよそ  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> を超えると、相対論的速度で運動するターゲット中の電子と高強度レーザー光との相互作用により、レーザー光のエネルギーが効率よく相対論的高エネルギー電子(高速電子)へと移行するようになる。この作用を利用して、高強度超短パルスレーザーを用いた粒子加速(電子、イオン)、超短パルス放射光源(テラヘルツ波、X線等)、高速点火核融合などの研究が盛んに行われている。超高速で複雑に変化する高速電子の挙動とプラズマの進展を如何にして制御するかが、これらの研究の主題である。

しかしながら、X線ストリークカメラや時間分解光干渉計に代表される従来の光学的時間分解計測手法では、膨張するプラズマの密度や形状を捉えることはできるが、現象を左右する高速電子のふるまいを正確に計測することは一般に困難である。そのため、実験結果から直接的に現象の解釈を得ることが難しいという課題がある。測定に基づき現象を可視化するには、ピコ秒以下の時間分解能を有する高度な電磁場計測技術が必要とされる。

我々は2010年頃に、高強度超短パルスレーザーにより加速した電子ビームを磁気パルス圧縮器により時間的に圧縮する超短パルス電子ビーム発生法を開発し、パルス幅500fsのフェムト秒電子ビームを得ることに成功した。このような超短パルス電子ビームを用いることで、高い時間分解能による電磁場計測が可能になる。

2. 研究の目的

我々の開発した超短パルス電子ビーム源を、レーザーと高密度プラズマとの相互作用における超高速現象の観測へ応用し、実験プラズマ物理の新たな可能性を開くことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

我々は数センチメートル以上の長い金属ワイヤーに高強度フェムト秒レーザーを照射した際、ワイヤー軸方向に強く高速電子が放射される興味深い現象を2011年に発表した。実験結果は、放射された高速電子群と導体ワイヤーが相互作用し、長距離にわたって電子の誘導が生じた事を示唆しているが、詳しいメカニズムは明らかになっていなかった。

高強度フェムト秒レーザーを用いたレーザー電子加速と磁気パルス圧縮機を組み合わせた独自の手法によりフェムト秒電子ビームを発生させ、これをプローブとして高強度レーザーを照射した金属ワイヤーの表面付近に発生する電場および磁場を時間・空間分解計測する。また、実験結果を数値シミュレーションで再現することにより、電磁場の発生メカニズムを考察する。

4. 研究成果

実験装置の概略を図1に示す。高強度フェムト秒レーザーパルス(パルス幅150 fs、パルスエネルギー70 mJ、中心波長800 nm)を直径300 μmのタングステンワイヤーの側面に集光照射した。集光強度は  $1 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> と見積もられる。測定用フェムト秒電子ビームのパルス幅は500 fs以下、運動エネルギーは390 keVである。電子ビームはワイヤー上のレーザー照射点から数cm(距離d)離れた位置でワイヤーと交差させた。交差位置でのワイヤーと電子ビームの中心間距離は0.5 mmである。電子ビームがワイヤー近傍で電場または磁場による力を受けると、電子ビームの軌道が曲がり、スクリーン上でビーム変位として計測される。

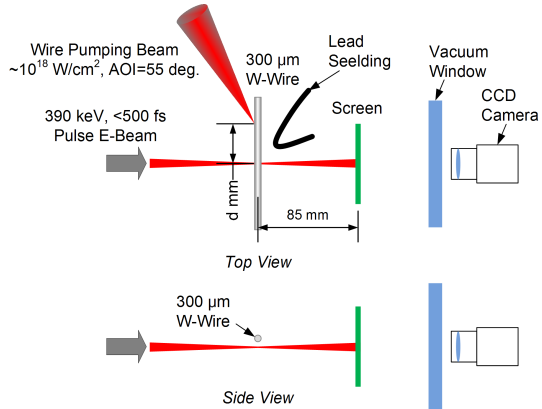


図1 実験装置概略図

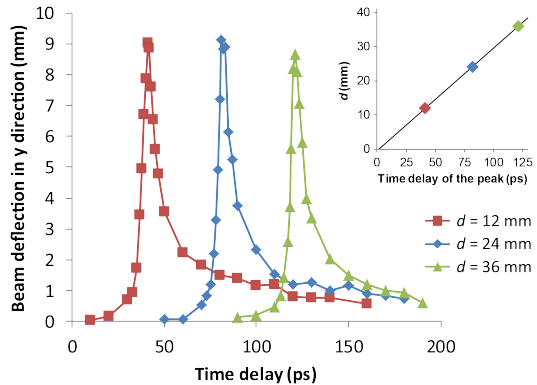


図2 垂直方向ビーム変位の遅延時間依存性

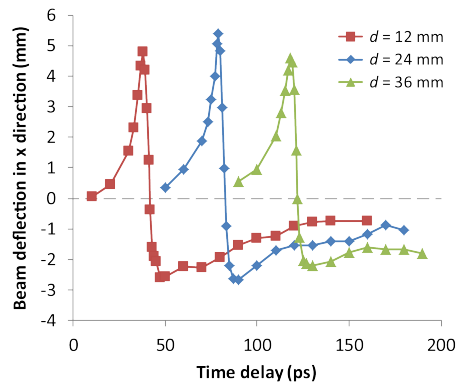


図3 水平方向ビーム変位の遅延時間依存性

レーザーパルスと電子ビームの遅延時間を変化させ水平・垂直方向の電子ビーム変位を測定した結果を図2および図3に示す。垂直方向の変位は約10 psの半値全幅をもつ単一ピークを描き、距離 $d$ を変化させても波形はほとんど変化しなかった。 $d$ の変化に対するピーク位置の変化は光速と一致した。

以上の実験結果は、レーザープラズマ相互作用により強い電磁波パルスが発生し、ワイヤーに沿って伝播していることを強く示唆している。また、パルスの振幅は数センチメートルの伝播長で大きく減衰していないことから、電磁波が自由空間モードではなく、表面波モードで伝播していると考えられる。細い金属ワイヤーにおける表面波モードとしてよく知られているSommerfeld波を仮定すると、ビーム偏向量からピーク電界強度、ピーク磁場強度はそれぞれ2 MV/cm、0.7 T、パルス幅は7 psと見積られる。電磁波のピークパワーは70 MWに達し、総パルスエネルギーは400  $\mu$ Jと見積られる。これはワイヤーへ照射したレーザーパルスのエネルギー(70 mJ)の0.5%に相当する。

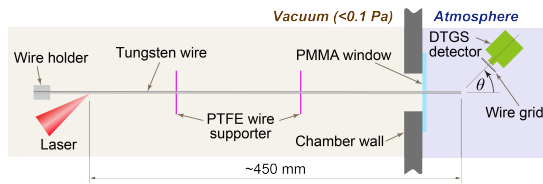


図4 DTGS 検出器による電磁波の観測

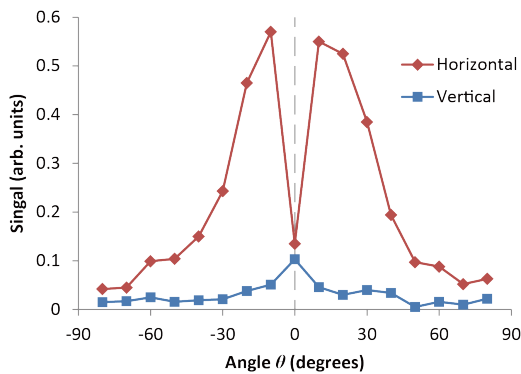


図5 電磁波の放射角度分布

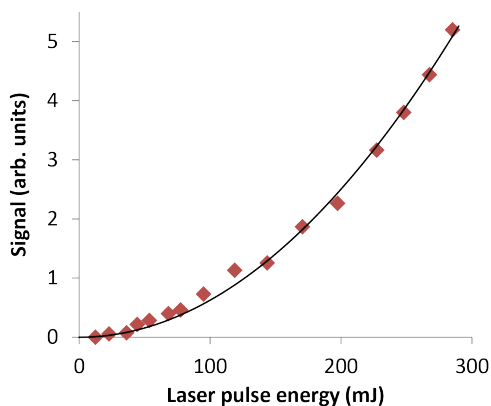


図6 電磁波強度のレーザーパルスエネルギー依存性

Sommerfeld 波が発生していることを確かめるため、ワイヤーの先端から放射される電磁波を焦電検出器(DTGS 検出器)により測定した。実験装置の概略を図4に示す。レーザー照射位置から先端までの距離が約450 mmの長いワイヤーを用い、先端を真空チャンバーの外部へ突き出すことにより、大気中で観測を行った。水平面上の電磁波の放射角度分布を図5に示す。10~40°および-10~-40°の角度範囲で水平偏波の強い信号が計測された。一方で、垂直面では逆に垂直偏波で強い信号が観測された。実験結果は電磁波がラジアル偏波を持つことを示している。Sommerfeld 波がラジアル偏波を有することから、観測した電磁波は、Sommerfeld 波がワイヤー先端で反射される際に一部のエネルギーが自由空間へ放射されたものであると考えられる。また、観測方向を20°に固定した場合、電磁波強度のレーザーパルスエネルギー依存性を図6に示す。電磁波強度はレーザーパルスエネルギーの2乗に比例して増加した。パルスエネルギー285 mJでの信号強度は70 mJでの信号強度の10倍以上となっており、表面波のパルスエネルギーとして5 mJ程度が得られていることが示唆される。

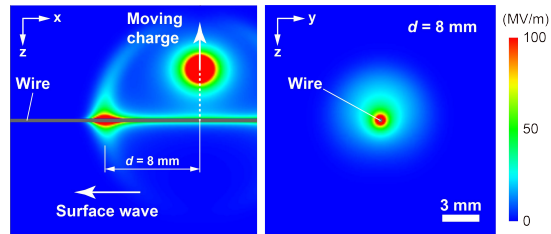


図7 電場強度分布の計算結果

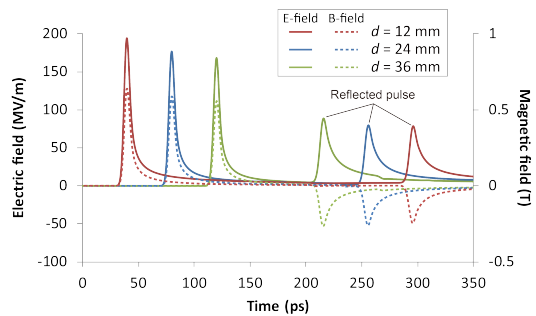


図8 電場および磁場波形の計算結果

表面電磁波の発生メカニズムを調べるため、時間領域差分法(FDTD法)により電磁場の数値シミュレーションを行った。レーザー照射により発生する高速電子の挙動を詳しく模擬することは困難であるため、ここでは、高速電子による電流を大幅に単純化して表現した。すなわち、一定速度でワイヤーから真空へ向かって離れてゆく電荷を仮定し、これを電磁波の発生源とした。電荷の移動速度は $0.5c$ (79 keVの電子の速度に相当)とした。図7に、電場強度分布の計算結果を示す。ワイヤーを取り巻く電場はラジアル偏波を

有しており、Sommerfeld 波が発生していることを確認した。各位置における電場および磁場の時間波形を図 8 に示す。電場波形は実験結果から予想される波形とよく一致している。電荷量を 16 nC とした場合、表面波の電場と磁場の強度はそれぞれ 194 MV/m と 0.64 T となり、実験結果とよく一致した。16 nC の移動電荷の総運動エネルギーは 1.3 mJ に相当し、実験のレーザーパルスエネルギー 70 mJ の約 2% に相当する。この比率は  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> のレーザー強度でのレーザー光から高速電子への典型的なエネルギー変換効率と比べ低く、エネルギー収支として妥当な値である。

以上の研究成果をまとめると以下のようになる。高強度超短パルスレーザーとプラズマの相互作用により過渡的に生じる強い電場および磁場を定量的に測定するため、レーザー加速フェムト秒電子ビームを用いた新しい時間分解計測手法を開発・実証した。高強度超短パルスレーザーを照射した金属ワイヤー近傍にフェムト秒電子ビームを通過させ、偏向角を計測した。その結果、高強度レーザー照射直後に、ワイヤーに沿ってほぼ光速で伝播する非常に高強度の高いピコ秒パルス表面電磁波が発生することを新たに発見した。本実験結果はレーザー光のエネルギーが非常に効率よくサブテラヘルツ領域の表面電磁波へと変換できることを示している。新しい高強度テラヘルツ波発生手法として応用が期待される。

## 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)

S. Inoue, S. Tokita, K. Otani, M. Hashida, M. Hata, H. Sakagami, T. Taguchi, S. Sakabe, “Autocorrelation measurement of fast electron pulses emitted through the interaction of femtosecond laser pulses with solid target” *Physical Review Letters* **109**, 185001 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.185001, 査読有

F. Jahangiri, M. Hashida, S. Tokita, T. Nagashima, K. Otani, M. Hangyo, and S. Sakabe, “Directional Terahertz emission from air plasma generated by linearly polarized intense femtosecond laser” *Applied Physics Express* **5**, 026201 (2012), DOI: 10.1143/APEX.5.026201, 査読有

時田茂樹, 村上政直, 清水政二, 橋田昌樹, 阪部周二, “高出力中赤外ファイバーレーザー”, *日本レーザー医学会誌* **33**, 158-165 (2012), 査読有

H. Nakajima, S. Tokita, S. Inoue, M. Hashida, S. Sakabe, “Divergence-free transport of laser-produced fast electrons along a meter-long wire target”, *Physical Review Letters* **110**, 155001 (2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.155001, 査読有

F. Jahangiri, M. Hashida, S. Tokita, T. Nagashima, M. Hangyo, and S. Sakabe, “Enhancing the energy of THz radiation from plasma produced by intense femtosecond laser pulses” *Appl. Phys. Lett.* **102**, 191106 (2013), DOI: 10.1063/1.4804582, 査読有

M. Shimizu, M. Hashida, Y. Miyasaka, S. Tokita, S. Sakabe, “Unidirectionally oriented nanocracks on metal surfaces irradiated by low-fluence femtosecond laser pulses”, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 174106 (2013), DOI: 10.1063/1.4827296, 査読有

L. Gemini, M. Hashida, M. Shimizu, Y. Miyasaka, S. Inoue, S. Tokita, J. Limpouch, T. Mocek, S. Sakabe, “Metal-like self-organization of periodic nanostructures on silicon and silicon carbide under femtosecond laser pulses”, *J. Appl. Phys.* **114**, 194903 (2013), DOI: 10.1063/1.4832829, 査読有

L. Gemini, M. Hashida, M. Shimizu, Y. Miyasaka, S. Inoue, S. Tokita, J. Limpouch, T. Mocek, S. Sakabe, “Periodic nanostructures self-formed on silicon and silicon carbide by femtosecond laser irradiation”, *Applied Physics A* **117**, 49-54 (2014), DOI: 10.1007/s00339-014-8502-4, 査読有

L. Gemini, M. Hashida, M. Shimizu, Y. Miyasaka, S. Inoue, S. Tokita, J. Limpouch, T. Mocek, S. Sakabe, “Periodic surface structures on Titanium self-organized upon double femtosecond pulse exposures”, *Applied Surface Science* **336**, 349-353(2015), DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.12.135, 査読有

S. Tokita, S. Sakabe, T. Nagashima, M. Hashida, S. Inoue, “Strong sub-terahertz surface waves generated on a metal wire by high-intensity laser pulses”, *Scientific Reports* **5**, 8268 (2015), DOI: 10.1038/srep08268, 査読有

S. Inoue, S. Tokita, M. Hashida, S. Sakabe, “Transient changes in electric fields induced by interaction of ultraintense laser pulses with insulator and metal foils: Sustainable fields spanning several millimeters”, *Physical Review E* **91**, 043101 (2015), DOI: 10.1103/PhysRevE.91.043101, 査読有

[学会発表](計 16 件)

S. Tokita *et al.*, “Femtosecond laser-plasma electron sources for ultrafast electron diffraction and imaging” *International Conference on High Energy Density Sciences*, 2012 年 4 月 25 日, パシフィコ横浜

S. Tokita *et al.*, “Single-shot sub-picosecond electron diffraction using laser-plasma electron sources” *Collaborative Conference on Materials Research 2012*, 2012 年 6 月 25 日, ソウル

S. Tokita *et al.*, “Electron beam emission from metallic wires irradiated by intense femtosecond laser pulses” *The 8th Asia Pacific Laser Symposium*, 2012 年 5 月 27 日, 黄山(中国)

時田茂樹ら, “フェムト秒電子ビームによるレーザープラズマ相互作用の観測 ワイヤータゲットを伝播する強電場”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 18 日, 横浜国立大学

時田茂樹ら, “フェムト秒電子ビームによるワイヤータゲット表面電磁場の時間・空間分解計測” レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会, 2013 年 1 月 28 日, 姫路商工会議所

時田茂樹ら, “高出力中赤外ファイバーレーザー” レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会, 2013 年 1 月 28 日, 姫路商工会議所

S. Tokita *et al.*, “Single-shot ultrafast electron diffraction using electrons accelerated by an intense femtosecond laser pulse” The 3rd Banff Meeting on Structural Dynamics Ultrafast Dynamics with X-Rays and Electrons, 2013 年 2 月 17 日, Banff (カナダ)

時田茂樹ら, “高強度レーザー固体相互作用による フェムト秒電子ビーム発生とその計測応用” 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学

S. Tokita *et al.*, “Intense THz Surface-Wave Generation From Intense-Laser Interactions with Metal Wires” The 10th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013 年 6 月 30 日, 国立京都国際会館

時田茂樹ら, “レーザー加速電子による高強度テラヘルツ表面波による高強度テラヘルツ表面波の発生と計測” 第 74 回応用物理学会周期学術講演会, 2013 年 09 月 16 日, 同志社大学

時田茂樹ら, “レーザープラズマによる半サイクル高強度ピコ秒表面電磁波の発生” 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 20 日, 徳島大学

S. Tokita *et al.*, “Intense Terahertz Surface-Wave Generated from Laser-Plasma Interactions” Collaborative Conference on Materials Research 2014, 2014 年 6 月 23 日, 仁川 (韓国)

時田茂樹ら, “1J, 100Hz 低温冷却 Yb:YAG TRAM マルチパス増幅器” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 17 日, 北海道大学

S. Tokita *et al.*, “High Power 3  $\mu\text{m}$  Erbium Fiber Lasers” Advanced Solid State Lasers, 2014 年 11 月 16 日, 上海

S. Tokita *et al.*, “Generation of 1 J nanosecond pulses from a diode pumped Yb:YAG TRAM laser amplifier” 10th Laser Ceramics Symposium, 2014 年 12 月 1 日, ヴロツワフ (ポーランド)

時田茂樹ら, “金属ワイヤータゲットによる高強度サブテラヘルツ表面波発生” レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, 2015 年 1 月 11 日, 東海大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/rdl/>  
<http://laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

時田 茂樹 (TOKITA SHIGEKI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・講師  
研究者番号: 20456825

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし