

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600138

研究課題名(和文) 超高強度レーザー誘起パルス表面波の金属細線伝送による表面プラズマ電子長距離加速

研究課題名(英文) Surface plasma electron acceleration by intense-laser induced pulse surface wave traveling on a metal wire

研究代表者

阪部 周二 (Sakabe, Shuji)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：50153903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)： 超高強度極フェムト秒パルスレーザーと物質との相互作用により、様々な放射線(電子、イオン、X線など)が発生し、次世代の放射線源として注目され研究が活発に行われているが、電磁波についてはまだ調べられていない。代表者らは、レーザーと金属極細線との相互作用によりレーザー生成加速電子が細線方向に誘導されという今までの成果をもとに、パルス表面電磁波が生成伝搬すると考え、その実証実験を行った。レーザー生成・加速フェムト秒電子パルスを用いた電子偏向法により、細線周辺の電磁波のダイナミクスを調べた。その結果、Sommerfeld波が金属細線に沿って伝搬していることを捉えるのに初めて成功した。

研究成果の概要(英文)： The interaction of intense femtosecond laser pulse with matter can generate various radiations (electrons, ions, X-rays and so on), and being expected as next-generation radiation sources, it has been intensively studies. However, laser-generated electromagnetic wave is not well studied. Based on our last study of divergence-free transport of laser-produced electrons along a long metal wire, we have experimentally demonstrated that a pulse surface electromagnetic wave is generated and travel along the wire. With electron deflectometry using femtosecond laser generated and accelerated electrons, the dynamics of electromagnetic fields around the wire has been investigated, and it has been successfully observed for the first time that the Sommerfeld wave is induced by the intense laser pulse and travels along the wire.

研究分野：数物系科学

キーワード：フェムト秒高強度レーザー レーザー電子加速 表面電磁波

1. 研究開始当初の背景

近年の超高強度極短パルスレーザー技術の飛躍的な発展により、次世代の高エネルギー加速器として注目され世界中で研究が行われているのがレーザー加速である。代表的なものが「レーザー航跡場加速」である。プラズマ中に高強度レーザーで航跡波（電子プラズマ波）を誘起し、その波の電界（縦波）で電子を捕捉加速するもので、装置の巨大さ故に加速エネルギーが飽和の現状を打破し装置を極めて小型化する可能性があるとして期待されている。しかしながら、高い加速勾配（電界）は実現できても、レーザー集光点近傍だけでの加速のため加速長に限界があり、実用化への道は極めて険しく、ブレークスルーできる新たな方式の提案が待たれている。代表者らは新たな方式の可能性を提案している。金属細線（ワイヤー）に沿って伝搬すると考えられるパルス表面波（電磁波）を航跡波の駆動源とするものであり、長距離に渡り伝送することができる。このパルス表面波を超高強度極短パルスレーザーで誘起する。また、駆動される航跡波は細線表面プラズマ波である。

代表者らのこれまでの研究から、高強度短パルスレーザーと金属細線の相互作用により発生した電子は細線方向に誘導され高い指向性をもって放射されることの発見を踏まえて着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では上述の原理の可能性の裏付けを取るべくその物理要素について検証する。すなわち、細線に超高強度レーザーを照射し、細線方向にパルス表面電磁波が進行していることを実証することを目的としている。

3. 研究の方法

レーザー光を金属細線に照射した場合、細線周辺の電磁場の時間変化を調べる。集光照射実験は京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センターが所有する T⁶-レーザー及び集光照射真空容器を用いた。10¹⁸W/cm²の強度を実現するべく数ミクロンに集光出来る軸外し放物面鏡を用いてワイヤーに集光した。細線周辺の電磁場測定は、フェムト秒電子パルスによる電子偏向法により行った。フェムト秒電子パルスは代表者らが別途開発中の時間分解電子線回折装置（図1）のレーザー生成・加速・圧縮パルス電子源を用いた。この電子パルスを金属細線近傍で直交させ、電子パルスの偏向の程度を、電子線パルスと細線照射レーザーパルスの時間遅延を変化させながら測定した。図1に装置概略を示す。ポリエチレン薄膜に高強度フェムト秒レーザーを集光照射し、裏面より生成加速す

る電子とアパーチャーで集めた。これを2つのダイポール磁極に通し、位相を回転する。四重極磁石で電子のエネルギー収差を補正し、パルスの圧縮点を通してスクリーンに照射され、その像を CCD カメラで撮像する。このパルス圧縮点に金属細線が直交するように配置する（図2）。

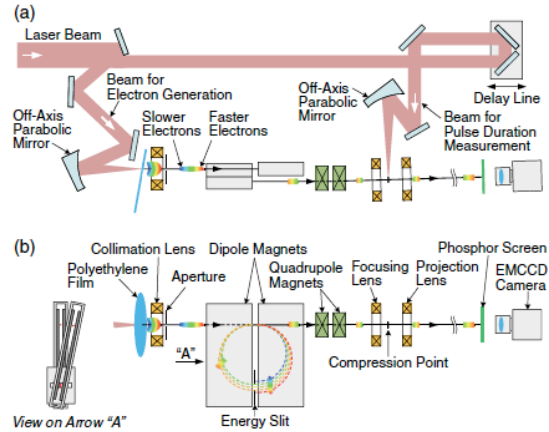


図1 本研究の電子偏向法に用いた超高速電子線回折装置

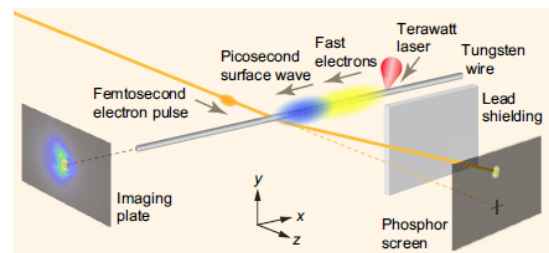


図2 レーザー照射金属細線近傍の電磁場測定フェムト秒電子偏向法

4. 研究成果

実験結果から、以下のことが解明した。
 (1) 電子は細線に垂直だけではなく細線方向にも偏向する。
 (2) 電子は円回転のように偏向する。
 (3) 偏向は細線上のレーザー照射位置と電子パルス直交位置との距離に依存しない。
 (4) 場のパルス幅は 10ps 程度である。
 (5) 場は光速で細線方向に進行している。
 これらの実験事実から、細線方向に表面電磁波 (Sommerfeld wave) が進行していると考えられる。偏向特性から、表面波の電界強度は 200MV/m、磁場強度は 0.7T、エネルギー 0.4mJ と評価された。また、細線端での電磁波測定から、径方向の偏向を持っていることが確認された。この電磁波の強度はレーザーエネルギーの増大に伴って、二乗で増大した。
 これらの成果から、高強度フェムト秒レーザーを金属細線に照射することにより強力な表面（電磁）波を生成することができることを実証した。
 高強度単パルスレーザーは次世代の放射線源として注目され、電子線、イオン、X線などは活発に研究されているが、本研究では高強度の表面（電磁）波源にもなることを実

験的に示した。得られた知見は今後の高強度レーザー科学に大きな意義を与えるものであると考えられる。

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 2 件) (全て査読有)

- 1) S. Inoue, S. Tokita, M. Hashida, and 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)
- 2) S. Tokita, S. Sakabe, T. Nagashima, M. Hashida, and 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)

[学会発表] (計 27 件)

- 1) S. Inoue, M. Hata, S. Tokita, M. Hashida, and S. Sakabe, “*Enhancement of Electron Beam Intensity Generated by Irradiation of Foil Target with Two Femtosecond Laser Pulses*”, APLS/OPIC2014, 2014/4/21-25, Yokohama, Kanazawa.
- 2) K. Teramoto, S. Inoue, Y. Nakashima, D. Ikeda, M. Hata, M. Hashida, and S. Sakabe, “*Guidance of Fast Electrons Generated by Interaction of Intense Femtosecond Laser and Metal Wire*”, APLS/OPIC2014, 2014/4/21-25, Yokohama, Kanazawa.
- 3) M. Hata, S. Inoue, D. Ikeda, H. Sakagami, M. Hashida, and S. Sakabe, “*Development of Comprehensive Simulation Including High-intense Femtosecond Laser Plasma Interaction and Electron Beam Transport and Emission*”, APLS/OPIC2014, 2014/4/21-25, Yokohama, Kanazawa.
- 4) 寺本研介, 井上俊介, 中島裕人, 渡邊浩太, 中宮義英, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度レーザーと薄膜との相互作用により発生・加速され金属ワイヤーにより誘導される電子線の放射特性」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015/3/21-24, 早稲田大学早稲田キャンパス (東京) .
- 5) 井上峻介, 寺本研介, 中島裕人, 中宮義英, 橋田昌樹, 阪部周二, 「サブナノ秒の遅延時間を持つ 2 つのフェムト秒レーザーパルス照射薄膜からの電子ビーム特性」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015. 3. 21-24, 早稲田大学早稲田キャンパス (東京) .
- 6) 井上峻介, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度短パルスレーザーと金属薄

膜・細線との相互作用により電子発生・加速」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015/3/21-24, 早稲田大学早稲田キャンパス (東京) .

- 7) 寺本研介, 井上峻介, 中島裕人, 渡邊浩太, 中宮義英, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度レーザーと薄膜との相互作用により加速される電子の金属ワイヤーを用いた長距離誘導」, レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, 2015/1/11-12, 東海大学高輪キャンパス (東京) .
- 8) 時田茂樹, 橋田昌樹, 井上峻介, 長島 健, 阪部周二, 「金属ワイヤーター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, 2015/1/11-12, 東海大学高輪キャンパス (東京) .
- 9) 寺本研介, 井上峻介, 中島裕人, 渡邊浩太, 中宮義英, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度レーザーと薄膜との相互作用により発生・加速される電子の金属ワイヤーを用いた長距離誘導」, *Plasma Conference 2014*, 2014/11/18-21, 朱鷺メッセ (新潟市) .
- 10) 井上峻介, 寺本研介, 中島裕人, 中宮義英, 橋田昌樹, 阪部周二, 「フェムト秒レーザープラズマを背面にもつ薄膜ターゲットを用いたレーザー加速電子ビームの特性」, *Plasma Conference 2014*, 2014/11/18-21, 朱鷺メッセ (新潟市) .
- 11) 阪部周二, 橋田昌樹, 井上峻介, 時田茂樹, 「高強度フェムト秒レーザー加速電子を用いた超高速時間分解電子線回折の開発」, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014/9/7-10/8, リンクステーションホール青森 (青森市) .
- 12) S. Sakabe, M. Hashida, S. Tokita, and S. Inoue, “*Intense femtosecond laser accelerated electron pulses for single-shot ultrafast electron diffraction and electron deflectometry*”, *Femtosecond Electron Imaging and Spectroscopy (FEIS2013)*, 2013/12/9-12, Keywest, Florida.
- 13) S. Sakabe, M. Hashida, S. Tokita, and S. Inoue, “*Ultrafast Electron Diffraction and Electron Deflectometry Using Electrons Accelerated by an Intense Femtosecond Laser pulse*”, *The 8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2013)*, 2013/9/8-13, Nara, Japan.
- 14) S. Sakabe, M. Hashida, S. Tokita, and S. Inoue, “*Emission Characteristics of Electrons Accelerated in a Thin Foil and a Metal Wire by Intense Femtosecond Laser Pulses*”, *CLEO-Pacific Rim, and OPEC/Photonics in Switching*, 2013/7/1-3, Kyoto Japan.
- 15) S. Inoue, S. Tokita, M. Hashida, and S.

- Sakabe, “*Time-resolved Measurements of Electromagnetic Fields Produced by Intense Femtosecond Laser Irradiation on Metal and Polyethylene Foil Target*”, International Conference on High Energy Density Science(HEDS)/OPIC, 2013/4/23-25 Yokohama, Japan.
- 16) D. Ikeda, S. Inoue, S. Tokita, M. Hashida, and S. Sakabe, “*Energy-resolved Electron-Microscopic Diagnostics of Laser-Produced Plasma Electron Sources*”, International Conference on High Energy Density Science (HEDS)/OPIC, 2013/4/23-25, Yokohama, Japan.
- 17) 畑昌育, 井上峻介, 池田大記, 坂上仁志, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度フェムト秒レーザープラズマ相互作用マイクロ領域と量子線輸送・放射マクロ領域を包括する広域シミュレーションの開発」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013/3/27-30, 東海大学湘南キャンパス (平塚市) .
- 18) 寺本研介, 井上峻介, 中島裕人, 池田大記, 畑昌育, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度短パルスレーザーと金属ワイヤーとの相互作用による発生電子線誘導」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013/3/27-30, 東海大学湘南キャンパス (平塚市) .
- 19) 井上峻介, 「高強度レーザー誘起超高速過渡電場測定のためのフェムト秒電子偏向法」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013/3/27-30, 東海大学湘南キャンパス (平塚市) .
- 20) 井上峻介, 畑昌育, 池田大記, 前田一弥, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「レーザーパルス照射による薄膜ターゲットからの電子ビームの放射特性」, 第 34 回レーザー学会学術講演会, 2014/1/20-22, 北九州国際会議場 (小倉市) .
- 21) 畑昌育, 井上峻介, 池田大記, 坂上仁志, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度フェムト秒レーザープラズマ相互作用に関する粒子シミュレーションと実験観測系との接続」, 第 34 回レーザー学会学術講演会, 2014/1/20-22, 北九州国際会議場 (小倉市) .
- 22) 池田大記, 井上峻介, 畑昌育, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度レーザープラズマ電子線源～ターゲットと放射特性～」, 第 34 回レーザー学会学術講演会, 2014/1/20-22, 北九州国際会議場 (小倉市) .
- 23) 寺本研介, 井上峻介, 池田大記, 畑昌育, 中島裕人, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高強度短パルスレーザーと帯状金属ターゲットの相互作用による高速電子線発生と誘導」, 第 34 回レーザー学会学術講演会, 2014/1/20-22, 北九州国際会議場 (小倉市) .
- 24) 井上峻介, 畑昌育, 池田大記, 前田一弥,

時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「高・低強度レーザーの複合照射による薄膜からの高エネルギー電子ビームの制御」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/25-28, 徳島大学常三島キャンパス (徳島市) .

- 25) 池田大記, 井上峻介, 畑昌育, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「レーザーと薄膜との相互作用による電子生成加速領域の顕微観察」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/25-28, 徳島大学常三島キャンパス (徳島市) .
- 26) 池田大記, 井上峻介, 畑昌育, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「生成電子線源の空間分布から考察するレーザープラズマ相互作用」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013/9/16-20, 同志社大学京田辺キャンパス (京田辺市) .
- 27) 井上峻介, 畑昌育, 池田大記, 前田一弥, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, 「アルミ蒸着絶縁体薄膜への高強度レーザー照射により生成される電磁場の時間分解電子偏向法による観測」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013/9/16-20, 同志社大学京田辺キャンパス (京田辺市) .

[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

<http://laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪部 周二 (SAKABE SHUJI)
京都大学・化学研究所・教授
研究者番号：50153903

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

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

橋田 昌樹 (HASHIDA MASAKI)
京都大学・化学研究所・准教授
研究者番号：50291034

井上 峻介 (INOUE SHUNSUKE)
京都大学・化学研究所・助教
研究者番号：40724711