

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02127

研究課題名(和文) 高強度レーザー駆動表面電磁波による電子光学系の概念実証

研究課題名(英文) Conceptual demonstration of electron optical system with surface electromagnetic waves driven by high-intensity laser

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) 30,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では高強度フェムト秒レーザーと固体との相互作用による電子の「発生・加速」と「誘導」の機能を分離して制御できることを実験的に検証した。つまり、高強度レーザー-固体相互作用により発生する巨大電流により誘起される電磁波を、近傍に設置した金属ワイヤー表面に表面電磁波として変換・転送することを実験的に観察した。

また、我々が開発してきたレーザー加速電子を用いた超高速電子線回折装置の技術を基に、レーザー加速極短パルス電子線を用いた偏向法により、レーザーアブレーション現象を超高速で捉えることに成功した。これらの研究の派生として、真空中を集光伝搬するレーザーパルスの世界で初めて捉えることにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

以上の成果は、高強度短パルスレーザーが光物質相互作用を誘起するだけでなく、その高速現象を観察するための量子線(電子や電磁波など)を複合的に発生し、それらを巧みに制御(短パルス化など)できれば、相互作用の高速観察を高強度短パルスレーザーだけで自己完結型で行えることの実証である。

本研究の成果は、高強度相対論的レーザープラズマ科学分野において新たな研究展開をもたらすだけでなく、様々な分野に関連した複雑系相互作用物理の解明に貢献できるものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we experimentally verified that the functions of "generation / acceleration" and "induction" of electrons by the interaction of intense femtosecond laser with a solid (plasma) target can be separated and controlled. That is, it was experimentally observed that an electromagnetic wave induced by a huge current generated by high-intensity laser solid interaction is converted and transferred as a surface electromagnetic wave on a metal surface placed in the vicinity. This strong surface wave has potential applications of fast deflection electron-optics and terahertz wave sources.

Also, based on our developed technologies of the ultrafast electron diffraction instrument using laser accelerated electrons, we have successfully observed the ultrafast phenomena of laser ablation by the laser accelerated short electron pulses. As a derivative of these studies, we have succeeded in capturing the laser pulse being focused and propagating in vacuum for the first time in the world.

研究分野：レーザープラズマ科学

キーワード：高強度短パルスレーザー レーザー電子加速 レーザー誘起電磁波 レーザープラズマ相互作用 超高速電子線偏向法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) CPA レーザーの発明（2018年ノーベル物理学賞）と短パルスレーザー技術の発達により高強度レーザーは飛躍的に発展してきた。その結果、レーザー応用の可能性は高エネルギー科学（加速器科学、放射線科学、素粒子・核物理学、宇宙・天文学、中性子科学など）にまで広がりを見せている。今までは、レーザー核融合研究に代表される超大型大出力レーザー施設でしか実現されなかった高強度が比較的小型の施設でも可能となり、これらの分野に関連する基礎研究の萌芽期に入っている。加えて、従来の大出力レーザーの技術と短パルスレーザーCPA技術が相まって、世界で大型超高強度レーザー施設が完成、建設、計画されている。

(2) このような高強度短パルスレーザーと物質との相互作用の結果、様々な量子線を発生させることができる。電子線、x線、イオン線、THz波（表面波を含む）、など、そして2次的には陽電子、中性子、 $\gamma$ 線、RI線と、まさにレーザープラズマは「量子線（放射線）の泉」である。しかも、すべてレーザーにより駆動されるので、大元のレーザーを分岐して仕様すれば、これらすべての量子線（元のレーザーを含め）は完全同期して発することができる。すアン和知、すべての量子線を自己完結型で生成することができ、将来、すべての量子線発生装置がこれに置き換わることが期待される。同時にこれらの特質を生かして従来の量子線応用が広がっていくものと考えられる。

### 2. 研究の目的

(1) 上述のように、すべての量子線の高強度短パルスレーザーによる発生の可能性があるが、課題は要求する量子線を目的に応じて制御して発生することである。そのためには、発生の基礎物理と制御法を明らかにする必要がある。その基盤となるのは、レーザー光電場による電子加速である。他の量子線はこの電子発生に追従する現象である。

(2) 近年研究が進められている高強度レーザーによる電子発生・加速に加えて、「誘導・制御」の新たな概念を提案実証する。超高強度短パルスレーザーを固体標的に照射した際に瞬時に流れる巨大電流により誘導される電磁波を、標的の近傍に設置した金属固体表面に流れる表面電磁波に変換し、この表面電磁波がレーザー生成加速電子を誘導や集束する電子光学素子として機能することを実証し、高強度レーザー駆動小型電子光学素子の可能性を検証する。高強度相対論的レーザープラズマ科学分野において、新たな研究展開と複雑系相互作用物理の解明に貢献するものである。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究を遂行するためには、レーザーパルスの高品位化が必要であり、そのためにプラズマミラー装置を設計制作し、使用するレーザーシステムに装備させる。

(2) レーザー標的相互作用点の近傍に金属ワイヤーを設置し、相互作用点から放射される加速電子あるいは電磁波が、近傍の金属ワイヤーに表面波として移乗することを実験的に検証する。

(3) そのために、加速用レーザーパルスを分岐したポンプ&プローブ装置を構築する。ワイヤー近傍に設置した結晶にプローブパルスを通し、電気光学的検出方法により金属ワイヤー周辺の電磁場を測定する。

(4) 実験は、京都大学化学研究所のチタンサファイアチャープパルス増幅レーザーシステムを用いて行った。中心波長は810 nm、パルス幅は60 fs、パルスエネルギーは120 mJ。レーザーパルスはf/3.5 軸外し放物面鏡で集束され、 $8.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  のピーク強度が得られた。p 偏光レーザーパルスを、 $45^\circ$  の入射角で11  $\mu\text{m}$  厚のアルミニウム薄膜ターゲットに照射した。直径300  $\mu\text{m}$ 、長さ250 mm のタンダステンワイヤーを薄膜に対して垂直に  $d \text{ mm}$  ( $d=0.5, 1, 2, 4 \text{ mm}$ ) の間隔をあけて配置した。ワイヤーは、厚さ60  $\mu\text{m}$  の2枚の黒色ポリプロピレンフィルムを貫通することによって保持されている。図1は、金属ワイヤに沿って進行する表面波を観察するために使用された実験装置を示す。電場は、電気光学的検出方法によって測定される。アルミニウム薄膜ターゲットの裏面から180 mm の位置に厚さ0.5 mm のZnTe  $\langle 110 \rangle$  結晶を、ワイヤーに近接するように置いた。結晶の[001]結晶軸はワイヤに垂直になるように配置されている。薄膜相互作用のためのレーザーパルスから可変遅延部で部分的に分離された直線偏光プローブレーザーパルスが電気光学的検出に使用される。プローブパルスは、ワイヤから4 mm の距離で金属ワイヤに平行に導かれ、ZnTe 結晶の「110」面に集束される。表面波とプローブレーザーが同時に結晶に入射すると、プローブレーザーの偏光は電気光学効果により楕円に変化する。位相遅延は、ウォラストンプリズムとバランス型フォトダイオードを使用して測定された。ここでは、ワイヤーの半径方向外向きを電界の正方向と定義している。実験は0.1 Pa の真空中で行なった。

### 4. 研究成果

(1) プラズマミラー装置の開発は本研究課題期間前より実施していたが、本期間に入り装置を完成させレーザーシステムに実装に、本課題の研究に使用した①。

(2) 図2(a)は、さまざまな薄膜-ワイヤーギャップ ( $d=0.5, 1, 2, \text{ および } 4 \text{ mm}$ ) に対して、強力なレーザーパルスによる薄膜ターゲットの照射によって誘起されるサブ THz 表面波の典型的な波形を500 fs の時間分解能で示している。電場は各ギャップに対して急速な（サブピコ秒）立ち上がり時間を有する。半周期の表面波が $\sim 10 \text{ ps}$  にわたって観測

され、低周波数の変動が数十ピコ秒の間ピークのあと続いている。

(3) 図 2 (b) は、さまざまな薄膜-ワイヤーギャップ ( $d = 0.1, 0.2, 0.3, 0.7, 1.5\text{mm}$ ) のピーク付近の波形を示している。電場は各ギャップに対してほぼ同じサブピコ秒の立ち上がり時間を有する。表面波の電場の極性は、ワイヤーをレーザーで直接照射した場合とは逆になる②。すなわち、電界はワイヤー中心に向かっていて、 $d=0.1\text{mm}$  を除くギャップの減衰時間は互いに等しい。薄膜とワイヤが十分に接近していると、薄膜とワイヤの間の放電の影響が表面波に現れる可能性がある。ピーク電界はギャップ  $d$  に依存し、 $d$  が小さいほど強くなる。測定位置におけるピーク電界は、 $0.5\text{mm}$  の場合に  $4.2 \times 10^2 \text{ kV/m}$  に較正される。電場は  $1/r$  に比例すると仮定すると、ワイヤ表面の電場は  $11 \text{ MV/m}$  と推定できる ( $r$  はワイヤの中心からの距離)。波形から表面波のエネルギーを評価すると、薄膜と配線との距離が  $0.1\text{mm}$  のとき、 $r=10\text{mm}$  以内の領域で  $1 \mu\text{J}$  程度であることがわかる。レーザーから表面波へのエネルギー変換効率はおおよそ  $10\text{--}4\%$  である。

(4) 我々は、高強度フェムト秒レーザーと隣接する金属薄膜との相互作用により、 $8.5$  テラヘルツの周波数で  $11\text{MHz/m}$  の電界強度のパルス電磁波 (ゾンマーフェルト波) を誘導できることを実証した。  $10^{18}\text{W/cm}^2$ 。この表面波の電場の極性は、レーザーとワイヤーとの直接相互作用によって得られるものとは反対である。数値シミュレーションは、箔からの電子放出に関連する電磁波が表面波を誘起することを示唆している。タングステンワイヤは、ワイヤがレーザーパルスによって照射されたり損傷を受けたりしないように、アルミ箔に対して垂直に隙間を置いて配置されているため、ワイヤに表面波を繰り返し発生させることが可能である。

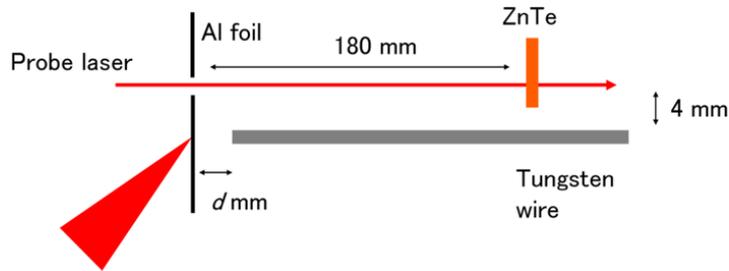


図 1 表面波の発生と測定のための実験装置

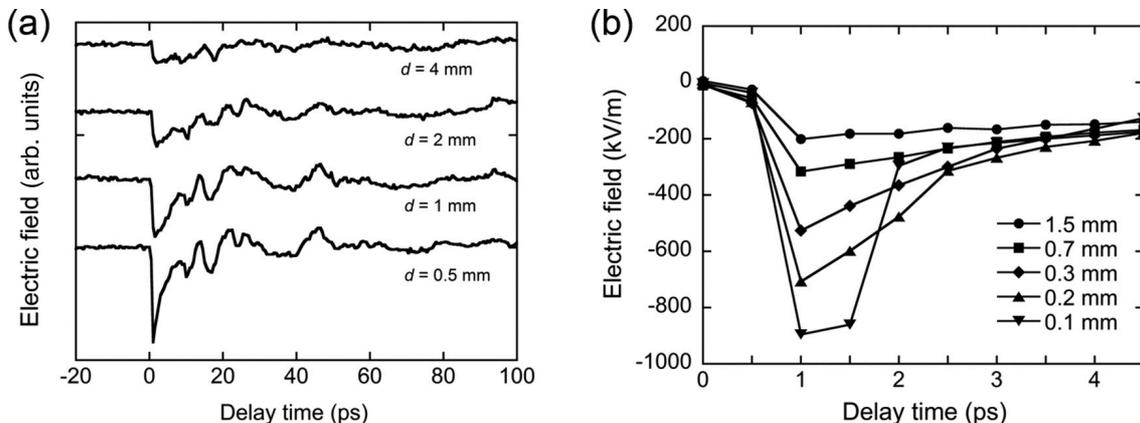


図 2. (a) 薄膜とワイヤーの間のさまざまな距離 ( $d = 0.5, 1, 2, 4 \text{ mm}$ ) における表面波の典型的な波形。 (b)  $d$  の様々な値 ( $0.1, 0.2, 0.3, 0.7, 1.5\text{mm}$ ) に対するピーク付近の波形。

<引用文献>

- ① Shunsuke Inoue, Kazuaki Maeda, Shigeki Tokita, Kazuaki Mori, Kensuke Teramoto, Masaki Hashida, and Shuji Sakabe, “Single plasma mirror providing  $10^4$  contrast enhancement and 70% reflectivity for intense femtosecond lasers”, Applied Optics 55(21), 5647-5651 (2016).
- ② Shigeki Tokita, Shuji Sakabe, Takeshi Nagashima, Masaki Hashida and Shunsuke Inoue, “Strong sub-terahertz surface waves generated on a metal wire by high-intensity laser pulses”, Scientific Report, 5, 8268 1-5 (2015).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Kensuke Teramoto, Shunsuke Inoue, Shigeki Tokita, Ryo Yasuhara, Yoshihide Nakamiya, Takeshi Nagashima, Kazuaki Mori, Masaki Hashida, and Shuji Sakabe, “Induction of subterahertz surface waves on a metal wire by intense laser interaction with a foil”, Physical Review E 97,023204(2018).

- ② Shunsuke Inoue, Yoshihide Nakamiya, Kensuke Teramoto, Masaki Hashida, and Shuji Sakabe, “Highly intensified emission of laser-accelerated electrons from a foil target through an additional rear laser plasma”, Physical Review Accelerators and Beams 21, 041302(2018).

〔学会発表〕 (計 19 件)

- ① S. Sakabe (代表), (Invited)"Ultrafast electron diffraction and deflectometry with laser accelerated electrons", OPIC2016, HEDS2016, Yokohama, Kanagawa, Japan, 2016.5.17-20
- ② K. Teramoto, S. Inoue, S. Tokita, R. Yasuhara, Y. Nakamiya, K. Mori, M. Hashida, and S. Sakabe (代表), “Generation of strong surface waves on a metal wire using intense laser interaction with solid targets”, OPIC2016, HEDS2016, Yokohama, Kanagawa, Japan, 2016.5.17-20
- ③ S. Sakabe (代表), S. Tokita, M. Hashida, S. Inoue, and K. Teramoto, (Invited)"Generation of Sub-THz Surface Waves on a Metal Wire by Intense Femtosecond Laser Pulses", High-Brightness Source and Light-Driven Interactions Congress, Hilton Long Beach, Long Beach, California, US, 2016.3.20-22.
- ④ S. Sakabe (代表), S. Tokita, M. Hashida, S. Inoue, and K. Teramoto, (Invited)"ultrafast electron diffraction and deflectometry with laser accelerated electrons", AFAD2016, 7th Asian Forum for Accelerators and Detectors, Uji Campus of Kyoto University, Uji, Kyoto, Japan, 2016.2.1-3
- ⑤ 井上峻介, 小島完興, 橋田昌樹, 阪部周二 (代表)「レーザー加速 100fs・電子パルスによる高時間分解電子ラジオグラフィー」日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学 (伊都キャンパス・博多市), 2019.3.14-17
- ⑥ 井上峻介, 小島完興, 橋田昌樹, 阪部周二 (代表)「フェムト秒電子バンチを利用した高強度レーザー誘起電磁場の時空間分解測定」日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学・京都府), 2018.9.9-12
- ⑦ 寺本研介, 時田茂樹, 寺尾季倫, 井上峻介, 小島完興, 安原亮, 河中準二, 長島健, 森一晃, 橋田昌樹, 阪部周二 (代表) 「高強度レーザー照射による金属ワイヤー表面波発生」日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス・千葉市), 2018.3.22-25
- ⑧ 井上峻介, 寺本研介, 小島完興, 橋田昌樹, 阪部周二 (代表) 「フェムト秒レーザー加速電子を用いた電磁場の時間分解イメージング測定」日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス・千葉市), 2018.3.22-25
- ⑨ 井上 峻介, 中宮 義英, 寺本 研介, 小島 完興, 橋田 昌樹, 阪部周二 (代表)「高強度レーザー駆動短パルス電子による動的な電磁場のラジオグラフ測定」レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会 (京都市勧業館みやこめっせ・京都市), 2018.1.24-26
- ⑩ 寺本 研介, 時田 茂樹, 寺尾 季倫, 井上 峻介, 安原 亮, 河中 準二, 長島 健, 森 一晃, 橋田 昌樹, 阪部周二 (代表)「金属ワイヤー導波路での MV/cm 級半サイクル THz 表面波発生」レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会 (京都市勧業館みやこめっせ・京都市), 2018.1.24-26
- ⑪ 寺尾 季倫, 寺本 研介, 井上 峻介, 安原 亮, 長島 健, 河仲 準二, 宮永 憲明, 橋田 昌樹, 阪部周二 (代表), 時田 茂樹「金属ワイヤー導波 THz 表面波のシングルショット

ト磁場分布イメージング」レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会（京都市勧業館みやこめっせ・京都市），2018.1.24-26

- ⑫ 井上峻介，中宮義英，寺本研介，橋田昌樹，阪部周二（代表）「固体 プラズマ複合ターゲットからのレーザー加速電子パルスの特性」日本物理学会第 72 回年次大会（大阪大学豊中キャンパス・豊中市），2017.3.17-20
- ⑬ 寺本研介，井上峻介，時田茂樹，安原亮，森一晃，中宮義英，橋田昌樹，阪部周二（代表）「高強度レーザー生成プラズマ近傍金属ワイヤー導波路への表面波誘起」日本物理学会第 72 回年次大会（大阪大学豊中キャンパス・豊中市），2017.3.17-20
- ⑭ 寺尾季倫，寺本研介，時田茂樹，井上峻介，安原亮，長島健，橋田昌樹，河仲準二，阪部周二（代表）「高強度レーザー誘起金属ワイヤー表面波の電場計測」レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会（徳島大学常三島キャンパス・徳島市），2017.1.7-9
- ⑮ 寺本研介，井上峻介，時田茂樹，安原亮，寺尾季倫，河仲準二，長島健，橋田昌樹，阪部周二（代表）「高強度レーザー誘起金属ワイヤー表面波の磁場計測」レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会（徳島大学常三島キャンパス・徳島市），2017.1.7-9
- ⑯ 井上峻介，中宮義英，寺本研介，橋田昌樹，阪部周二（代表）「レーザー駆動高強度電子源のための固体-プラズマ複合ターゲット」レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会（徳島大学常三島キャンパス・徳島市），2017.1.7-9
- ⑰ 中宮義英，井上峻介，橋田昌樹，阪部周二（代表）「光励起超高速現象観測のためのレーザー加速電子線回折装置」レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会（徳島大学常三島キャンパス・徳島市），2017.1.7-9
- ⑱ 寺本研介，井上峻介，時田茂樹，安原亮，森一晃，中宮義英，橋田昌樹，阪部周二（代表）「高強度レーザーと薄膜の相互作用によるゾンマーフェルト波誘起」日本物理学会 2016 年秋季大会（金沢大学・金沢市），2016.9.13-16
- ⑲ 井上峻介，中宮義英，寺本研介，橋田昌樹，阪部周二（代表）「固体プラズマハイブリッドターゲットによるレーザー加速電子パルスの高強度化」第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（朱鷺メッセ・新潟市），2016.9.13-16

〔図書〕（計 1 件）

- ① S. Sakabe et al., Pan Stanford Publishing “Lithium-Ion Batteries”2019、213-238

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし

### (2) 研究協力者（連携研究者）

研究協力者氏名：橋田昌樹、井上峻介

ローマ字氏名：(HASHIDA Masaki, INOUE Shunsuke)