

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654050

研究課題名（和文）高強度フェムト秒レーザー駆動極細ワイヤー高エネルギー電子銃

研究課題名（英文）Electron gun using a fine wire with intense femtosecond lasers

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

研究成果の概要（和文）：超高強度極短パルスレーザーと金属極細線（ワイヤー）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、細線端から指向性の高い電子ビームを発生することを実験的に実証した。電子誘導はm級の長さの細線においても実現され、数100keVの電子が数10mradの指向性をもって放射された。数値シミュレーションにより、生成電子は細線周辺に誘起される過渡的電界により細線周囲に補足され、細線方向に誘導されることが示された。

研究成果の概要（英文）：It has been demonstrated that electrons are generated and accelerated in the interaction of an intense femtosecond laser pulse with a metal fine wire and the electrons are guided along the wire and emitted from the wire end with high directivity. The electron guiding is realized even for a 1m wire, and the electrons with energies of hundreds of keV and directivity of tens of mrad are emitted. Numerical simulations reveal that the electrons are trapped by the transient electric field surrounding the wire and guided along the axial direction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	0	1,300,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	420,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：放射線、ビーム物理

## 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、高強度レーザーを用いた高エネルギー放射線（量子ビーム）発生の研究が国内外で行われており、次世代の量子線源として期待されている。しかしながら、実用化には安定性・再現性・拡張性など多くの課題があるとともに、その発生機構の物理

も未だ解明されていない。我々は時間分解電子線回折を目標の一つとして、レーザープラズマ電子を利用した高輝度パルス電子線源の開発研究を行ってきた。薄膜に高強度短パルスレーザーを集光照射し、発生するプラズマ電子をパルス電子源として利用している。この電子線源に関する我々の研究（2009年秋

季第70回応用物理学会学術講演会に報告)では、電子は確かにレーザーの伝搬方向に放射するものの大部分は薄膜面に沿って放射されることが明らかとなった。さらに、粒子コードシミュレーションの結果、電子がレーザー集光点から薄膜両面上を四方に進行していることが示唆された。これらの研究を踏まえて、「極細線(ワイヤー)に側面よりレーザーを照射すれば、細線に沿って電子を誘導し、細線端より比較的指向性の良い電子を放射することができるのでは」と着想し、本研究の提案となった。

## 2. 研究の目的

超高強度レーザー物質相互作用と放射線発生を明らかにし、超高強度短パルスレーザー生成プラズマ電子線源の実用化を目指す。本研究の具体的目的は、超高強度短パルスレーザーと金属極細線(ワイヤー)との相互作用により、生成電子の線方向誘導による線端からの電子ビーム発生(微小点源、高指向性)の可能性を検証し、次世代の小型電子線源の可能性を示すことである。

## 3. 研究の方法

レーザー光を金属極細ワイヤーに正確に集光照射できるターゲット駆動照射系を構築した。集光照射実験は京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センターが所有するT<sup>6</sup>-レーザー及び集光照射真空容器を用いた。10<sup>18</sup>W/cm<sup>2</sup>の強度を実現するべく数マイクロ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。金属ワイヤーターゲットの周辺に飛散する電子に関して、電子の放射空間分布、発生領域、エネルギースペクトルを①金属フィルター付イメージングプレート(図1上)、②電子レンズ拡大結像光学系、③磁場型エネルギー分析器を用いて測定した(図1下)。②と③は独自に製作した。ターゲット極細線方向とそれに垂直な方向に配置して計測した。ワイヤー伝搬方向の電子空間分布は、①に微細な孔を開け、ワイヤーを貫通させることにより測定した。ワイヤー端から放射する電子を測定する場合は、金属ワイヤーを絶縁ワイヤーで引っぱり保持した。電子軌道計算をGeneral-Particle-Traceコードを用いて行った。

## 4. 研究成果

(1) 要素実験として、薄膜に短パルス高強度レーザーを照射することにより発生する電子の放射線特性を調べた。その結果、放射特性は膜の導電性に大きく影響を受けることが明らかになった。裏面からの電子放射角度分布を調べると、ポリエチレン膜からはレー

ザー入射方向や膜に垂直な方向に放射されるのに対して、アルミ膜からは10倍以上の強度で膜の面に沿って径方向に分布することが判明した。また、ポリエチレン膜の裏面に薄くアルミ蒸着することにより、放射線量分布ともアルミ薄膜に類する特性を示した。これらより、放射特性は裏面の導電性により決まると考えられる。裏面に帯形状のアルミ蒸着をしたポリエチレン膜では、面に沿って帯の長手方向により強い放射が観察された。すなわち、電子は導電性の高い箇所に収束する傾向がある。これらは、レーザー集光点へ周辺の導電部分より自由電子が流れ込むことにより、正電荷部分が広がるとともに、飛び出した電子が膜側に引き戻され、膜周辺の電場が弱まった際に、面方向に放射すると考えられる。これらの基礎研究を基に、超高強度レーザーを金属極細ワイヤーに側面より照射することにより電子がワイヤー端より発生すると予測された。

(2) 高強度短パルスレーザーとワイヤーとの相互作用による電子線発生の実験を実施した。超高強度レーザーを数10ミクロンの金属極細ワイヤーに側面より照射し、ワイヤー方向の電子線の放射特性(空間角度分布、エネルギースペクトル)を調べた。その結果、次のことが明らかになった。①集光点より発生する電子(数100keV)がワイヤーにより収束し、ワイヤー端より高い指向性(65mrad)で放射した(図2上)。②長いワイヤーほど電子の強度が高い(図3)。③ワイヤー端から放射される電子のエネルギースペクトルは上下限を持つ(図3)。④絶縁体ワイヤーではこのような収束は観測されない。これらの実験条件を荷電粒子運動計算コードによりシミュレーションした結果、電子の空間分布は再現され(図2下)、⑤電子はワイヤー周囲を螺旋運動するように収束し、ワイヤー端より放射していることが示された(図4)。具体的には、(i) 初期にワイヤー垂直に近い方向に加速された電子は瞬時に電界により減速され僅かに軌道を曲げる。(ii) 初期にワイヤー方向に加速された電子はスパイラル状にワイヤーに沿って進み、すなわち収束される。(iii) 短ワイヤーではワイヤー端で軸方向電界により減速し、ビームが広がり出射する。(iv) 長ワイヤーでは電界が既に減衰しているためワイヤー端での減速は小さく、収束性が保たれ指向性の良いビームが出射する。これらの計算結果と合わせて、③については次のように考察された。レーザー集光点より電子が加速放射された結果、その領域は正に帯電する。発生した電子のうち高エネルギー電子はこの正電荷が作る電界による引力に打ち勝って四方に放射されるが、低い電子はこの電界により引き戻されワイヤーに巻き付く。巻き付いた電子がワイヤー

端に到達した時にはワイヤーの正の帯電が弱まり、ワイヤー端より放射される。しかし、さらに低いエネルギーの電子は正に帯電したワイヤーから抜け出すことはできない。さらに、⑥この金属ワイヤーによる電子収束誘導は、メートル級のワイヤーを用いても実現することが実験的に実証された。これらの研究は、レーザーとワイヤーとの相互作用による電子線発生の世界で初めての成果であり、今後のレーザープラズマ生成・加速電子の制御法として新しい知見を与えるものである。

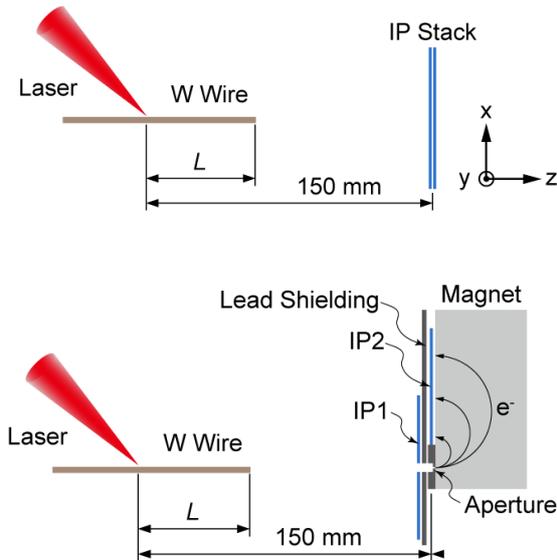


図1 ワイヤーとレーザーとの相互作用実験上はイメージングプレートを用いた電子の空間分布測定、下は磁場型エネルギー分析器を用いた電子エネルギースペクトル測定。

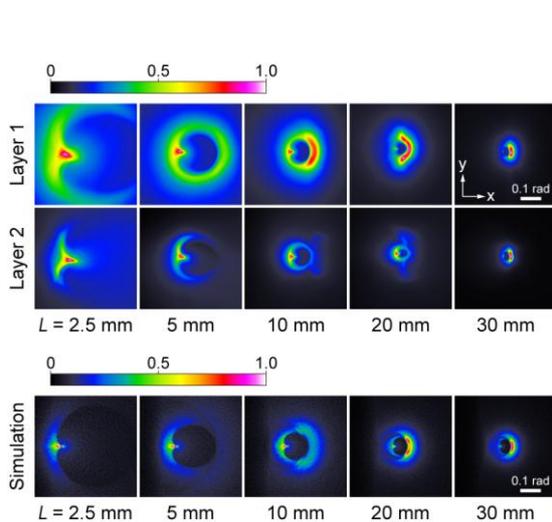


図2 ワイヤー端から放射された電子の空間分布 (上: 実験、下: 計算) L はレーザー集光点からワイヤー端までの距離。実験の Layer1,2 はそれぞれ >100keV, >400keV のエネルギーの電子)。

高輝度、低エミッタンスビーム発生のための重要な要素として期待できるものである。

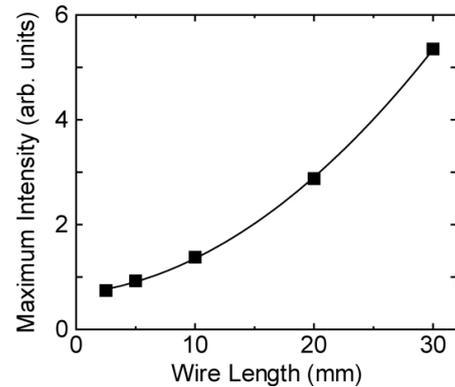


図3 ワイヤー端より放射する電子強度とワイヤー長さの関係。

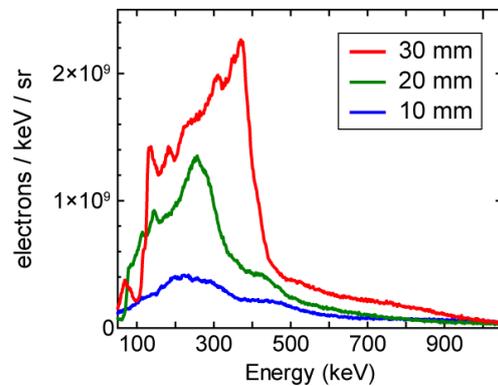


図4 ワイヤー端から放射された電子のエネルギースペクトル。

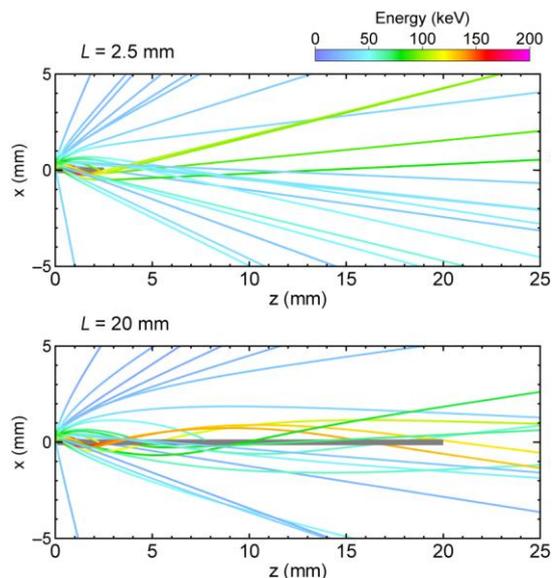


図4 General-Particle-Trace コードを用いた電子の軌道計算 長いワイヤーの周囲に電子が巻き付いて螺旋運動をしている。

## 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 3 件) (全て査読有)

- ① S. Tokita, K. Otani, T. Nishoji, S. Inoue, M. Hashida, and S. Sakabe, “*Collimated Fast Electron Emission from Long Wires Irradiated by Intense Femtosecond Laser Pulses*”, *Physical Review Letters* 106, 255001(2011). (DOI= 10.1103/PhysRevLett.106.255001)
- ② S. Inoue, S. Tokita, T. Nishoji, S. Masuno, K. Otani, M. Hashida, and S. Sakabe, “*Single-shot microscopic electron imaging of intense femtosecond laser-produced plasmas*”, *Review of Scientific Instruments* 81(12), 123302(2010). (DOI= 10.1063/1.3514084)
- ③ S. Tokita, M. Hashida, S. Inoue, T. Nishoji, K. Otani, and S. Sakabe, “*Single-Shot Femtosecond Electron Diffraction with Laser-Accelerated Electrons: Experimental Demonstration of Electron Pulse Compression*”, *Physical Review Letters* 105, 215004(2010). (DOI= 10.1103/PhysRevLett.105.215004)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 中島宏章, 「高強度短パルスレーザー照射 1メートルワイヤーによる高速電子の長距離誘導」, 2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会, 2012/3/17, 早稲田大学・新宿区.
- ② 中島宏章, 「高強度短パルスレーザー照射極細金属ワイヤーによる高速電子の m 級長距離誘導」, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, 2012/1/30, TKP 仙台カンファレンスセンター (仙台市).
- ③ S. Tokita, “*Highly directional sub-MeV electron emission from long wires irradiated by intense laser pulses*”, *Plasma Conference 2011*, 2011/11/24, 石川県立音楽堂(金沢市).
- ④ H. Nakajima, “*Long-distance Guidance of Fast Electrons with Fine Wires Irradiated by Intense Femtosecond Laser Pulse*”, *Plasma Conference 2011*, 2011/11/24, 石川県立音楽堂(金沢市).
- ⑤ S. Sakabe, S. Tokita, M. Hashida, K. Otani, S. Inoue, and T. Nishoji, “*Single-shot ultrafast electron diffraction using electrons accelerated by an intense femtosecond laser pulses*”, *CLEO/Europe*, 2011/5/26, Munich, Germany.
- ⑥ 阪部周二, 「超高強度短パルスレーザー加速プラズマ電子を用いた単一ショット

超高速電子線回折」, 日本顕微鏡学会第 67 回学術講演会, 2011/5/17, 福岡国際会議場.

- ⑦ 時田茂樹, 「高強度短パルスレーザー照射金属ワイヤーの軸方向へ放射される高速電子の特性」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011/3/28, 新潟大学・新潟市. (震災により中止、予稿は公式発表)
- ⑧ 井上峻介, 「2本のフェムト秒レーザービーム生成電子線間相互作用の時間・空間分解測定」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011/3/28, 新潟大学・新潟市. (震災により中止、予稿は公式発表)
- ⑨ 井上峻介, 「電子結像系とレーザー生成電子パルスを用いたフェムト秒レーザープラズマ近傍の電場の超高速時間分解測定」, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 2011/1/10, 電気通信大学・調布市.
- ⑩ 二正寺敏彦, 「高強度短パルスレーザーと薄膜との相互作用による電子線放射の特性」, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 2011/1/10, 電気通信大学・調布市.
- ⑪ 阪部周二, 「超短パルス高強度レーザー照射金属ワイヤーの軸方向へ強く放射される高速電子の特性」, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 2011/1/10, 電気通信大学・調布市.

[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)  
京都大学・化学研究所・助教  
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

大谷 一人 (OTANI KAZUTO)  
京都大学・化学研究所・特任研究員  
研究者番号：10541980

田口 俊弘 (TAGUCHI TOSHIHIRO)  
摂南大学・工学部・教授  
研究番号：90171595