

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11918

研究課題名（和文）高強度レーザー駆動短パルス電子を用いた超高速過渡電磁場の時間分解ラジオグラフ測定

研究課題名（英文）Time-resolved radiograph measurement for ultrafast transient electromagnetic fields with intense laser-accelerated short pulse electrons

研究代表者

井上 峻介（Inoue, Shunsuke）

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：40724711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：高強度短パルスレーザーを物質に照射すると、エネルギー密度の高いレーザープラズマが生成される。このプラズマを利用した高エネルギー粒子加速や、超短パルス放射光発生、高速点火核融合などに関する研究が精力的に行われている。これらのレーザープラズマを媒介とした物理現象は、高強度短パルスレーザー光により瞬時に作り出される非常に強い電磁場で加速される、電子の運動を起点として発生する。このため、この電子の挙動を高い時間・空間分解能で調べることは重要である。本研究課題では、電子運動により作り出され、100fsの時間スケール変化する超高速過渡電磁場を観察するための、時間分解ラジオグラフ測定の実証を目的とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質が超高速に変化する様子を直接観測することが可能となれば、基礎物理や物質科学をはじめとする広範な分野の基礎研究に発展をもたらす。短パルス電子源はこれを可能にする魅力的な放射線源の一つとして精力的に研究されている。しかし、現行の短パルス電子発生手法では飛躍的な高強度化が本質的に困難であり、新たな超高強度短パルス電子源の開発が望まれている。本研究では、パルス幅が100fs以下の超短パルス電子源を開発し、この光源を用いて超高速に変化する電磁場のダイナミクスを可視化する二次元画像計測法を実証した。

研究成果の概要（英文）：An irradiating substance with an intense laser pulse produces laser plasma with high energy density. This plasma attracts significant attention due to its applications on such as high-energy particle acceleration, ultrashort pulse radiations, and high-speed ignition fusion. These laser plasma-mediated phenomena occur from electron motion, which is accelerated by a strong electromagnetic field instantly created by the intense laser pulse. Therefore, it is important to investigate the behavior of these electrons with high temporal and spatial resolution. The purpose of this research is to demonstrate time-resolved radiograph measurement for observing an ultrafast transient electromagnetic field created by electron motion and changing on a time scale of 100 fs.

研究分野：高強度レーザー科学

キーワード：高強度レーザー 短パルス電子源 高強度電子源

### 1. 研究開始当初の背景

近年、物質内諸現象の解明を目指し、短パルスの量子ビームを用いた物質中の超高速に変化する現象を捉える研究が急速に発展している。特に、エネルギーが数 10keV から数 100keV の電子パルスは、様々な超高速現象を観測する研究への応用が期待され、精力的に研究されている。パルス幅が短く、1パルスあたりの電子数の多い高強度短パルス電子源を開発できるか否かが、これら超高速現象研究の発展の鍵を握っている。

しかしながら、フォトカソード RF 電子銃やフォトカソード DC 電子銃に代表される従来型の電子源は、空間電荷効果のために電子の短パルス化と高強度化の両立が本質的に困難であるという問題を抱えている。さらに、フォトカソード表面の光学損傷のため、1パルスあたりの電子数を飛躍的に増大させることが難しい。超高速現象研究のさらなる発展のためには、現行手法に替わる超高強度短パルス電子源の開発が必須となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、パルス幅が 100fs 以下であり、1パルスあたりの電子数が 1pC を超える、超強度短パルス電子源を開発し、この光源を用いて超高速に変化する電磁場のダイナミクスを可視化する二次元画像計測法、“ラジオグラフ測定法”の実証を目的とした。従来型の電子銃とは発生原理が全く異なる電子源として、高強度短パルスレーザーにより直接加速される電子パルスを電子源として用いることで、空間電荷効果やフォトカソード表面の光学損傷などの問題を回避することができる。また、この電子パルスを用いることで、超高速に変化する電磁場のラジオグラフ測定法の確立を目的とした。

### 3. 研究の方法

京都大学化学研究所に設置されている高強度短パルスレーザーおよびレーザープラズマより発生する電子を短パルスビームへと成型するパルス圧縮装置を用いて研究を行った。レーザー装置やパルス圧縮装置のアップグレードや精密制御、電子パルス特性の測定方法の開発などを実施することで、(1)パルス幅が 40fs-rms の超短パルス電子の開発、(2)数時間にわたってタイミングジッターが 15fs 以下になる極めて安定な電子源の開発、及び(3)100fs の時間スケールで変化する超高速過渡電磁場を観察する、時間分解ラジオグラフ測定の実証、の三つの課題を段階的に実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) パルス幅が 40fs-rms の超短パルス電子の開発

パルス幅が 40fs-rms の超短パルス電子を発生させるための、電子パルス圧縮装置の模式図を図 1 に示す。高強度短パルスレーザー(中心波長:810nm, エネルギー:100mJ, パルス幅:40fs)をアルミニウム薄膜(厚さ 11 $\mu$ m)に照射することで、電子パルスが駆動される。レーザーの電

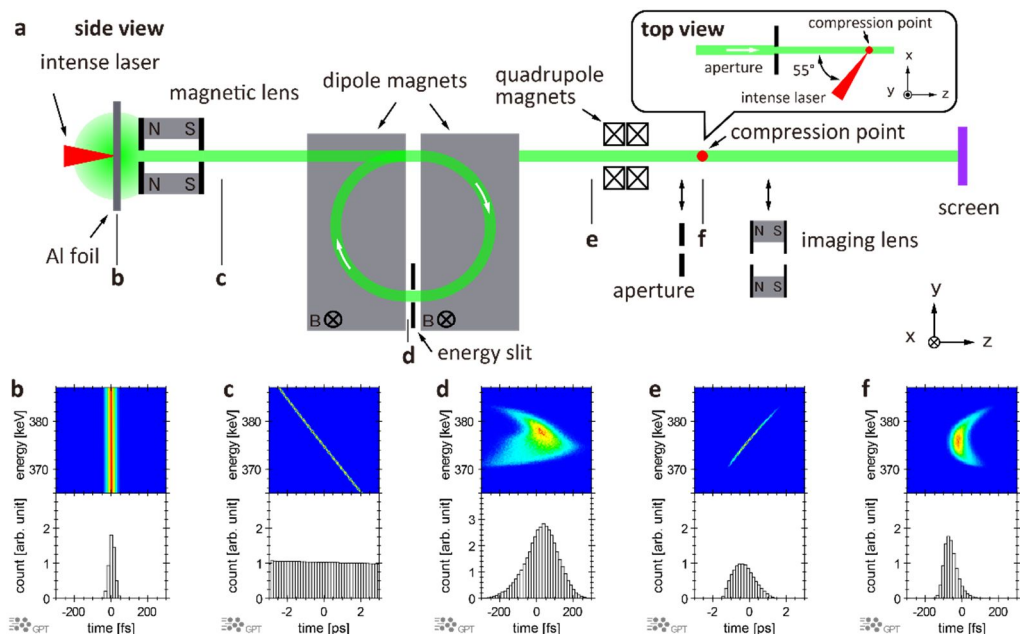


図 1 : (a)短パルス電子発生装置の模式図。(b-f)GPT コードにより計算された縦方向の位相空間での分布とヒストグラム。(b-f)の各図は(a)に示された場所での分布を表している。

場によって微小な領域に瞬間的に高エネルギー密度状態のプラズマが生成され、高エネルギー

の電子が加速される。この時発生する電子パルスのパルス幅は、レーザーのパルス幅とほぼ同等であることが実験やシミュレーションから確認されている。発生した電子パルスは、後段の電子光学系によって圧縮点 (compression point) まで輸送される。それぞれの位置での電子の粒子の時間プロファイルを荷電粒子軌道の計算コード (GENERAL PARTICLE TRACER, GPT) によってシミュレートした結果を図 1 (b)-(f) に示している。数値計算によると、40fs のパルス幅を持つ電子が本装置に入射した場合、圧縮点においては 69fs まで圧縮されると予想される。この理想的なパルス幅を実現するために、レーザー装置や電子パルス圧縮装置の精密制御を実施した結果、圧縮点において、電子のパルス幅は FWHM で 89fs (rms で 38fs) と測定された。シミュレーションにより予想される結果よりも 20fs ほど大きな値となってしまったが、原因は電子パルスの駆動部分にあると考えている。数値計算によると、電子パルスの発生部分において 40fs ではなく 49fs のパルス幅を持った電子が放出された場合、圧縮点においてパルス幅が 89fs になる。高強度レーザーにより生成されるレーザープラズマから電子が放出される際の電磁相互作用が原因で、パルス幅が 9fs ほど伸長したのだと予想している。

### (2) 数時間にわたってタイミングジッターが 15fs 以下になる極めて安定な電子源の開発

超高速現象を観察する際には、高速に変化する現象を誘起するためのポンプパルスと現象を観察するためのプローブパルスをを用いたポンプ・プローブ法によって測定が行われる。時間分解能はポンプパルスとプローブパルスのパルス幅だけでなく、二つのパルスのタイミングの同期精度も同じように重要となる。電子パルスとレーザーパルスのクロスコリレーションにより、二つのパルスのタイミングジッターを測定した。図 1 の圧縮点において、レーザーパルスと電子パルスを交差させる。交差させるレーザーパルスの強度は  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> となるように集光されており、そのポンデラモーティブ力によって電子パルスが y 軸方向へ散乱される。その結果、電子パルスの空間分布を観察するとレーザーにより排斥された場所が影となる。図 2 (b) はレーザーパルスによって電子パルスの一部が排斥され、スクリーン上に映された様子を示している。電子パルスとレーザーパルスが交差するタイミングが変化すると、変化した量に応じてスクリーン上に映し出されたレーザーパルスの影の位置が x 方向に変化する。この変化量の時間依存から、装置全体のタイミングジッターを測定することができる。

図 2 (c) に 4 時間にわたって、電子パルスとレーザーパルスのタイミングを測定した結果を示す。赤線に示す通り、電子パルスとレーザーパルスのタイミングが 1 時間あたり 200fs 程度の割合でドリフトして行くことが分かった。このドリフトは真空槽や室温の温度変化、真空槽内の電動ステージの発熱などに起因しており、環境温度安定性の向上や真空槽内の熱除去を実施することで青線のようにタイミングドリフトを抑えることに成功した。タイミングジッターは 4 時間を通して 14fs rms であり、極めて安定な電子パルスの発生に成功した。現在残っているタイミングジッターの由来は蛍光スクリーンおよびこれを撮像する光学系の空間分解能に起因している。今後はこの分解能を向上させることでさらに高い同期精度の実証が可能と考えている。

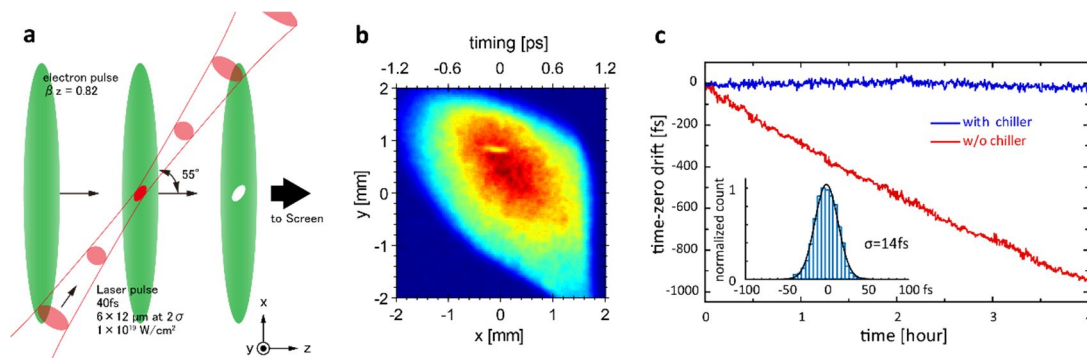


図 2 : (a) タイミングジッター測定概念図。レーザーと交差した電子が y 軸方向へ散乱される。(b) 蛍光スクリーンに結像された電子パルスのビームパターン。[x, y] = [0.8mm, -0.2mm] の部分にレーザーパルスによる影が映っている。(c) タイミングジッター測定結果。

### (3) 100fs の時間スケールで変化する超高速過渡電磁場を観察する、時間分解ラジオグラフ測定の実証

上述のように、パルス幅が 100fs を下回り、ジッターも十分に抑制された電子パルスの開発に成功した。その実力を評価するためのデモンストレーションとして、パルス幅が 40fs の光パルスが真空中を飛行する様子を撮像した (図 3)。蛍光スクリーンでの電子パルスによる発光を CCD カメラで撮像している。楕円形に見える像が電子パルスのビームパターンを表しており、カラースケールは線形である。図 3 (a)-(e) が、電子パルスとレーザーパルスの交差するタイミングを 100fs ステップですらして撮影した写真である。レーザーパルスの強度はタイミングジッター測定の時と同様に  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> であり、レーザーパルスと電子パルスが交差するとレーザーのポンデラモーティブ力によって電子パルスが散乱され、レーザーパルスが存在する空間の電子パルスが散乱される。この散乱した部分が影となって電子パルスのビームパターンに現れる。

タイミングを 100fs ステップでずらしていくと、レーザーパルスが徐々に進行している様子がわかる。このように、光パルスの影絵を、電磁場との相互作用によってダイレクトに、100fs ごとに可視化することに成功した。また、図 3 (f)-(i)はタイミングを大きく変えた時の様子を表している。-600fs では左端から光が集光し始めている様子がわかり、600fs では光が通り過ぎている。このとき、レーザーが最も集光された場所には明るい線が見える。レーザーが真空中の残留ガスと相互作用することで残留ガスをプラズマ化し、そのプラズマが作る電磁場を電子パルスによって撮像している。ガスプラズマ付近を通過した電子パルスがその電磁場によって軌道を曲げられ、スクリーン上で集束することによって明るく見えている。このガスプラズマは 5ps 後にはより強い電磁場を発生させており、図 3 (i)に示すように輝線の強度が強くなる。このように真空中に形成されるプラズマダイナミクスが観察されており、その強さや空間分布などを 100fs の時間分解能で詳細に調べることが可能となった。

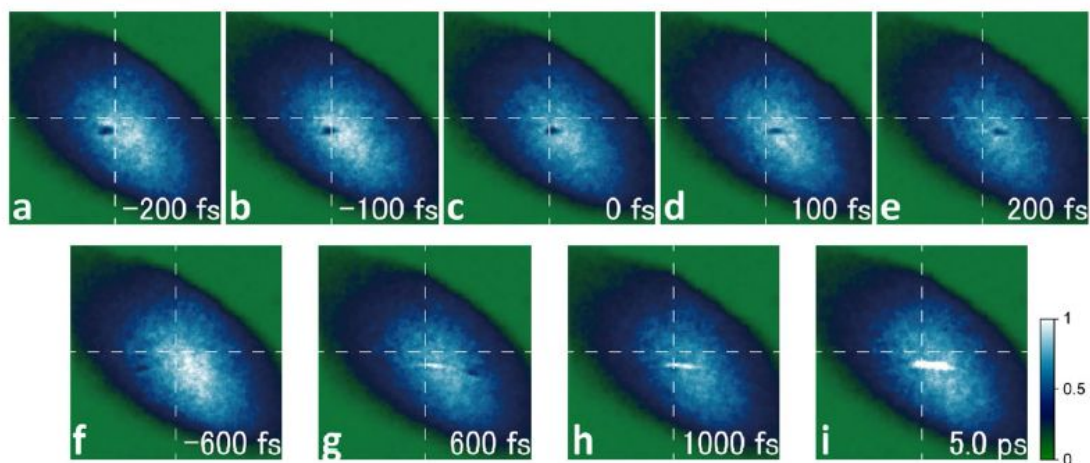


図 3 : (a-i) 電子パルスでバックライトした光パルス。a~e では撮影するタイミングを 100fs ステップでずらしており、光パルスが光速で左から右へ飛行している様子を表している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mori Kazuaki, Hashida Masaki, Nagashima Takeshi, Li Dazhi, Teramoto Kensuke, Nakamiya Yoshihide, Inoue Shunsuke, Sakabe Shuji	4. 巻 9
2. 論文標題 Increased energy of THz waves from a cluster plasma by optimizing laser pulse duration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015134 ~ 015134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5075712	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishiura Yosuke, Inoue Shunsuke, Kojima Sadaoki, Teramoto Kensuke, Furukawa Yuki, Hashida Masaki, Sakabe Shuji	4. 巻 90
2. 論文標題 Detection of alpha particles from ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^4\text{He}$ and ${}^{19}\text{F}(p, \gamma){}^{16}\text{O}$ reactions induced by laser-accelerated protons using CR-39 with potassium hydroxide/ethanol/water etching solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 083307 ~ 083307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5098863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takenaka Keisuke, Tsukamoto Masahiro, Hashida Masaki, Masuno Shinichiro, Sakagami Hitoshi, Kusaba Mitsuhiro, Sakabe Shuji, Inoue Shunsuke, Furukawa Yuki, Asai Satoru	4. 巻 478
2. 論文標題 Ablation suppression of a titanium surface interacting with a two-color double-pulse femtosecond laser beam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 882 ~ 886
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apsusc.2019.02.051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Shunsuke, Nakamiya Yoshihide, Teramoto Kensuke, Hashida Masaki, Sakabe Shuji	4. 巻 21
2. 論文標題 Highly intensified emission of laser-accelerated electrons from a foil target through an additional rear laser plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Accelerators and Beams	6. 最初と最後の頁 041302-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevAccelBeams.21.041302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井上 峻介、橋田 昌樹、阪部 周二
2. 発表標題 高強度レーザー加速サブ100fs電子パルスのタイミング同期の長時間安定化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上峻介, 小島完興, 橋田昌樹, 阪部周二
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上峻介, 小島完興, 橋田昌樹, 阪部周二
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 第 74 回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------