

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 18 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287103

研究課題名(和文) 超高強度場物理研究を目指した飛翔鏡の集光性能の評価

研究課題名(英文) Focusability evaluation of relativistic flying mirrors for ultrahigh intensity physics

研究代表者

神門 正城 (Kando, Masaki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：50343942

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーの集光強度を上げると真空が破壊されるような現象が理論的に予測されているが、実験的には到達できていない。本研究では、ブレイクスルーとなる可能性を秘めた「飛翔鏡による集光強度の向上」のための基礎研究を行った。我々は飛翔鏡の実験を行い、反射された光(極端紫外光領域)を観測し、そのサイズは、従来の半分以下である $7.1\mu\text{m}$ 以下となっていることがわかった。また、高分解能の結晶を用いたサイズ計測法を開発し、 $1\mu\text{m}$ 以下で計測できることを示した。さらに、飛翔鏡からの信号の安定化には飛翔鏡の観測が不可欠であると考え、これを計測できる極短パルスプローブ計測によりその構造を観測できた。

研究成果の概要(英文)：In ultra-high field of focused laser beam vacuum breakdown is expected to happen theoretically but is hard to achieve experimentally. To approach such high fields, a relativistic flying mirror (RFM) was proposed. We have demonstrated some of the proof-of-principle of RFM. Within the scope of the current project we seek for the focusability improvements by RFM. We conducted RFM experiments and observed reflected light from the RFM at an extreme ultraviolet region. The source size of the RFM was smaller than  $7.1\mu\text{m}$ , which is approximately half of the previously measured value. In addition we have found a better spatial resolution method and shown that it is possible to measure with a resolution of  $1\mu\text{m}$ . In order to improve stability, we tried to observe the RFM structure and have seen the RFM (actually nonlinear wake) with a short probe pulse.

研究分野：ビーム物理

キーワード：高強度レーザー コヒーレントX線 飛翔鏡 高強度場科学 航跡波 航跡場 レーザー・プラズマ相互作用 相対論的プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

レーザーの集光強度を高め、その高い場によって引き起こされる物理現象を理解しようとする「超高強度場物理」が欧州を中心に日本でも研究をしようという機運が、レーザー、プラズマ、素粒子実験、原子核物理実験、素粒子論などの研究者を巻き込んで高まっている。これらが目指す物理は、理論的にはこれまで知られていたが、実験的には到底たどり着けないとされていた、 $10^{29}$  W/cm<sup>2</sup> というような強度を究極的には目指すものである。このような強度では真空から電子・陽電子生成が起こったり、真空の複屈折効果が顕著になったりする。また、アクシオン探索や、Unruh 放射の計測実験などの学術的にも面白い、様々な提案がなされている。実際のレーザー強度は、現状では  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> であるが、欧州では 2015 年に  $10^{25}$  W/cm<sup>2</sup> を達成しようという野心的な計画 (Extreme Light Infrastructure) が進行中である (注:計画は遅れており 2016 年度現在まだ未完成である)。

高強度を得るには、集光強度の式  $I = E/(Lw^2)$  から分かるように、レーザーエネルギー  $E$  を増やす、パルス幅  $L$  を短くする、スポットサイズ  $w$  を小さくするのが常道である。レーザーエネルギーを増大させるのは、建設コストの増大に直結する。パルス幅を短くするには、レーザーのバンド幅を狭げなくてはならず、通常の高強度レーザーでは 10 fs 程度が限界であろう。スポットサイズは、回折限界により波長程度に制限されるため、高強度レーザーでよく使われる波長  $1 \mu\text{m}$  程度となる。このため、必然的にエネルギーを上げざるを得ず、高価な装置となる。また予め楕円鏡のターゲットを作り、これをプラズマミラーとして使い、第一集光点とその楕円鏡の焦点を合わせて、集光  $f$  ナンバーを 0.4 と小さくする方法でレーザー強度をすでに上昇させる方法が実証されている。実際に、楕円鏡を用いて第一焦点の集光径  $4.4 \mu\text{m}$  (半値全幅) を  $0.9 \mu\text{m}$  (半値全幅) へ小さく絞ることに成功している。これは今現在利用できる技術としては魅力的であるが、繰返しを上げられない、強度の増幅率も高々数倍程度という弱点がある。

以上のように、レーザーの集光強度を飛躍的に向上できる方法があれば、ブレークスルーとなり、超高強度場の研究にはずみがつくであろう。

一方、研究申請者のグループは、そのような超高強度に迫る手法として「相対論的飛翔鏡」に着目している。この手法は、レーザーを、プラズマ中を進行する高密度電子群により反射させることで、ドップラー効果により短波長・短パルス化し、さらに湾曲した構造で集光も行おうとする野心的なものである。理論では、鏡の相対論因子の 3 乗に比例して集光強度が高まるとされている。これまでに研究代表者のグループは、この飛翔鏡の原理検

証実験に成功し、反射率がほぼ理論通りであることも確かめた。しかしながら、集光性能に関しては検証が十分ではなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、我々が研究開発してきた、相対論的飛翔鏡法の性能のうち、未だ実証されていない「集光特性」について、その限界性能を実験的に検証することである。今回、理論的に予測されているこの「集光特性」が実証できれば、現在主に理論的に検討されている超高強度場へ一気に到達できる画期的な技術となり得る。本研究では、これまでに我々が実証していた集光径  $15 \mu\text{m}$  (半値全幅) という下限を、 $1 \mu\text{m}$  以下まで下げること目標とする。このために必要となる軟 X 線集光計測システムの改良、飛翔鏡の安定な生成方法の実証及び、レーザープローブ光を用いた飛翔鏡の可視化にも挑戦する。

### 3. 研究の方法

本研究では、飛翔鏡によって生成された軟 X 線の生成点付近でのスポットサイズを取得するのが主目的である。理論が予測するシナリオでは、飛翔鏡は湾曲した構造を持ち、反射された後集光される。この集光された像を軟 X 線多層膜球面鏡にほぼ直入射させ、CCD や LiF 結晶などの撮像素子上に拡大した像を結像させ、その大きさを評価する。飛翔鏡の生成点にはふらつきがあると予測されるので、出来るだけ生成点が安定になるように、レーザーのポインティング安定性を向上させる。また、飛翔鏡の発生位置を制御するために、密度勾配法を導入する。さらに、飛翔鏡の生成点を光学的なプローブ法 (シャドウグラフィと周波数領域の干渉計) によって観測し、シングルショットで位置を測る方法を試みる。

実験体系図は、図 1 のような配置で行う。ドライバー光を  $f=475\text{mm}$  の軸外し放物面鏡でヘリウムガスジェット上に集光する。その対向方向からソース光を  $f=775\text{mm}$  の軸外し放物面鏡で集光し、衝突の様子を  $90$  度方向から導入したプローブ光にて観察し、ソース光の位置、タイミング調整を行う。飛翔鏡が生成されると、波の破壊により高速電子が発生するので、その電子を永久磁石による偏向磁石、蛍光板を用いたエネルギー分析器にて検出する。軟 X 線の計測は、軟 X 線用多層膜球面鏡を用いて軟 X 線像を真空内に設置した CCD へ拡大結像することで行う。この装置には、

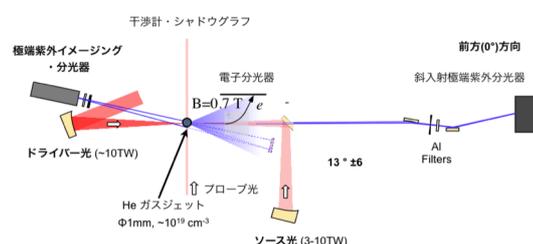


図 1. 実験体系図

透過型回折格子 (5000 本/mm) を挿入することで、軟 X 線分光イメージング装置として作用する。

本研究の主テーマとなる、軟 X 線分光器イメージングの改良を行う。以前は、直径 2 インチ、 $f=250$  mm の多層膜球面鏡を用いておよそ 3 倍の拡大率にて CCD 上に結像させていた。今回は、配置位置の見直しにより、これを 5 倍にまで増大させて計測を行なう。また、撮像素子としてはリアルタイムにて計測が行える背面照射の X 線 CCD(charge coupled device) を用いるが、X 線 CCD のピクセルサイズは 1 画素あたり  $13 \mu\text{m}$  であるので、空間分解能はこれにより制限される。このため、分解能をあげるため、LiF 結晶を撮像素子として用いる手法をバックアップとして用いる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 要素技術開発

###### ① レーザーのポインティング安定性の改良

実験に用いる日本原子力研究開発機構関西光科学研究所 (現在、量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所) に設置されている J-KAREN レーザーのポインティングスタビリティ向上のため、パワーアンプ部でヘリウム冷凍機にて冷却を行っている部分の振動除去改造を行った。以前は定盤の上に冷凍機の振動が直接伝わる構造となっていたものを、床面から独立懸架する構造とした。その結果、レーザーのポインティングスタビリティを、 $9 \sim 16 \mu\text{rad}$  から  $2.2 \mu\text{rad}$  へと低減することに成功した。

###### ② 2つのレーザー光の精密アライメント法

我々のグループでは、飛翔鏡実験を行うにあたってこれまでに種々のアライメント手法を開発してきた。今回、新たに正面衝突セットアップにて簡便かつ空間 2 次元でアライメントできる軸方向プローブ法を開発した。これは、2つのレーザー光のうち、1つにアパーチャリットを入れる ( $\phi 50\text{mm}$  のビーム径に対して  $\phi 5\text{mm}$  など) ことで焦点付近でのビームサイズを増大させ、プローブ光として使い、軸方向のシャドウグラフを使うというものである。このビームは誘電体多層膜ミラーから透過してきた光をイメージングすることでフルパワーショットでも行えることが特長である。また、この計測では、ドライバー光がプラズマ中で後方ラマン散乱された光を観測でき、これをアライメント基準に置くことで精度を向上させることができる。図 2 にその結果を示す。

##### (2) 飛翔鏡実験の成果

###### ① 信号の観測、準単色構造の観測

J-KAREN レーザーのパワーアンプモードを用いてパルス圧縮前にビームを分岐し (直径  $5\text{cm}$ )、2つのビーム (飛翔鏡を作るドライバ

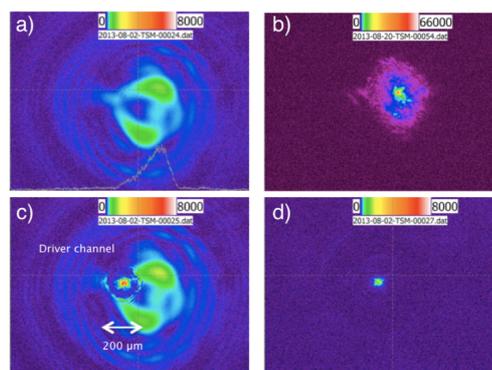


図 2. 軸方向シャドウグラフ結果。a) ドライバー光 OFF でソース光 ( $\phi 5\text{mm}$ 、プローブ光) ON、b) ドライバー光 OFF、ソース光 ( $\phi 50\text{mm}$ ) ON、c) ドライバー光 ON、ソース光 ( $\phi 5\text{mm}$ 、プローブ光) ON、d) ドライバー光 ON、ソース光 OFF。

ー光と反射されるソース光) を作り出し、大型のパルス圧縮器に平行に入れて圧縮した。圧縮後のエネルギーは、 $400 \text{ mJ}$  であった。2つのパルスはターゲットチェンバー内で対向照射した。ドライバー光、ソース光は、それぞれ焦点距離  $775 \text{ mm}$ 、 $475 \text{ mm}$  の軸外し放物面鏡で集光され、それぞれの  $4\sigma$  ビームサイズは  $30 \mu\text{m}$  と  $45\text{--}50 \mu\text{m}$  であった。パルス長は半値全幅で  $30 \text{ fs}$ 、ソース光は  $30\text{--}100 \text{ fs}$  を補償ガラスの挿入で切り替えた。ターゲットはヘリウムガスジェットで、プラズマ密度はおおよそ  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  であった。このとき、2つのレーザー光をアライメントする手法を新たに開発し (論文準備中)、信号探索を行った結果図 3 のような信号を前方の極端紫外分光器にて観測できた。これは入射ソース光 ( $1.55 \text{ eV}$ ) が  $60 \text{ eV}$  にシフトされ、準単色構造を持つ明瞭な信号である。これはシミュレーションで予測される準単色構造が観測された (論文準備中)。同様に、前方から  $13 \pm 7^\circ$  の範囲に反射される光を観測できる分光器にても、同様に準単色構造の反射光を観測した。これにより、飛翔鏡法による反射の再現と同時に明瞭な信号観測に成功した。

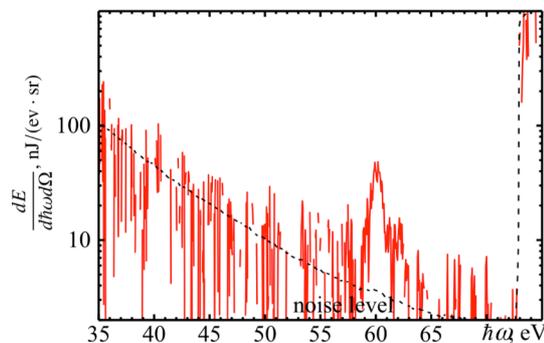


図 3. 飛翔鏡からの反射光スペクトル

## ②集光サイズの確認

集光サイズは、前方  $13 \pm 7^\circ$  の範囲に反射された反射光を、透過型回折格子を用いたイメージング分光器にて計測して行った。図 4 にその結果を示す。図 4 上図は、計測生画像であり、左側に 0 次回折光、右側に 1 次回折光があり、1 次回折光のスペクトルを下図に示している。図 3 に示した  $0^\circ$  方向の反射光と同様に、準単色の極端紫外光が得られた。イメージング分光器であるので、図 3 上図の垂直方向はイメージング点の空間サイズを表しており、半値全幅で  $7.1 \mu\text{m}$  であった。これはおおそ計測器の分解能で制限されている。従来、飛翔鏡での集光サイズは  $15 \mu\text{m}$  であったが、今回この値をおおよそ半分のサイズになっていることを確かめることができた。

## ③LiF を用いた計測法

上記計測は、計測に用いた X 線 CCD の画素サイズ  $13 \mu\text{m}$  によって制限されている。このため撮像素子を CCD から LiF 結晶に変更して計測を行った。LiF 結晶は、放射線により色中心 ( $F_2$ ,  $F_3^+$ ) を作り、そのうち  $F_3^+$  と呼ばれる色中心は、 $460 \text{ nm}$  の光を照射することで発光 ( $540 \text{ nm}$ ) する。これを共焦点顕微鏡により観測することで高い空間分解能 ( $< 1 \mu\text{m}$ ) を持たせることができる。今回、この手法を試みたが、飛翔鏡からの場合には再現性などの問題により取得できなかつた。このため、飛翔鏡の変異版である電子カスプからの放射を撮像した。この結果を図 5 に示す。このように  $0.9 \mu\text{m}$  程度のサイズを得た。また、この計測体系図を光学シミュレーションコード ZEMAX の物理伝播を用いて解析した結果、この幅は球面鏡の収差により制限されており、実験と同様の回折パターンを再現させると軟 X 線の光源サイズは  $200 \text{ nm}$  以下であるとの示唆を得た。

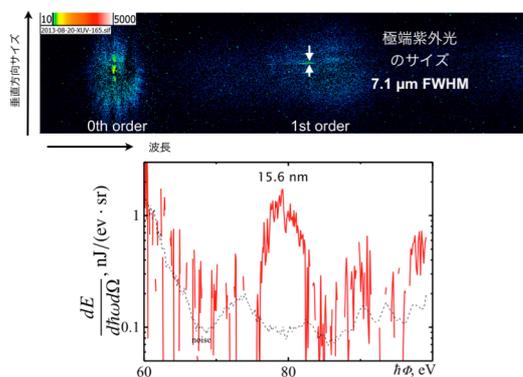


図 4.  $13 \pm 7^\circ$  方向に反射された飛翔鏡の分光イメージング結果。上: X 線 CCD で取得した画像、下: 反射光スペクトル

## (3) 航跡波の計測

実験シリーズを通して、飛翔鏡法のアライメント法はある程度確立し、レーザー光を同軸にアライメントできるようになったと考えられるが、飛翔鏡からの信号の再現性は低いものであった。考えられる原因としては、飛翔鏡の生成される位置、すなわち反射率が高くなる点がショット毎に揺らいでいるもしくは生成されていない可能性が考えられる。このため、飛翔鏡を実際に観測できるような計測を行なっていくことが必要であることがわかった。このため、 $30 \text{ fs}$  プロブを、Ar ガスを封入したホローファイバ中に入射し、自己位相変調により広帯域化して再圧縮を行い  $10 \text{ fs}$  以下のプロブ光を作成した。この光を用いたシャドウグラフ計測により、非線形航跡波の画像を取得できた。

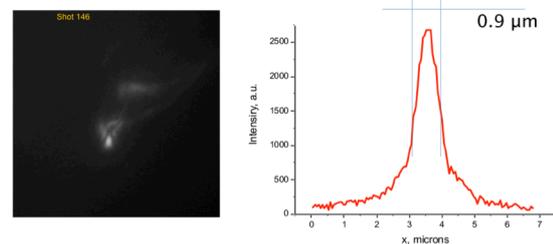


図 5. LiF 結晶にて計測した極端紫外光像。Zr と Zr/Al フィルターを用いて計測し、倍率は 5.53 倍。波長は  $18 \text{ nm}$  程度。

## 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 1 件)

① (査読有) A. S. Pirozhkov, M. Kando, T. Zh. Esirkepov et al., "High order harmonics from relativistic electron spikes", *New Journal of Physics*, **16**, 1-30, 2014.

DOI:10.1088/1367-2630/16/9/093003

[学会発表] (計 10 件)

① 神門正城, 「レーザー航跡場における階層構造」、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 20 日、東北学院大学 (宮城県仙台市) (シンポジウム講演、依頼講演)

② 神門正城, 「プラズマ中のカスプから放射されるコヒーレント放射」、平成 27 年度超短パルスレーザーとプラズマに関する研究会、2016 年 1 月 18 日、光産業創成大学院大学 (静岡県浜松市)

③ M. Kando, "J-KAREN-P Upgrade and Perspective on High Field Sciences", *High Energy Density Sciences 2015*, 2015 年 4 月 24 日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市) (招待講演)

④ M. Kando, "High-field sciences explored with the upgraded J-KAREN-P: current status and perspective", *SPIE*

Optics+Optoelectronics, 2015年4月14日、  
(チェコ プラハ)

⑤ M. Kando, "Coherent X-ray generation using infrared, intense, short pulse lasers", Asian Forum for Accelerators and Detectors 2015, 2015年1月26日、Hsinchu, Taiwan

⑥ M. Kando, "Laser light reflection by the nonlinear plasma wave formed in laser-plasma", Plasma Conference 2014, 2014年11月18日、Toki Messe (Niigata, Niigata)

⑦ M. Kando, "Prospects of J-KAREN Upgrade and High Field Science", International Committee for Ultrahigh Intensity Lasers 2014, 2014年10月17日、Goa, India (招待講演)

⑧ M. Kando, "High Field Sciences Explored with High-Peak-Power Lasers at JAEA", High Energy Density Sciences 2014, 2014年4月24日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市) (招待講演)

⑨ 神門正城、「超高強度場物理研究を目指した飛翔鏡の集光性能の評価」、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月28日、東海大学 (神奈川県平塚市)

⑩ 神門正城、「レーザープラズマ中に生成される飛翔鏡による準単色極端紫外光の発生」、平成25年度レーザー産業創成とプラズマ加速に関する研究会、2014年1月14日、光産業創成大学院大学 (静岡県浜松市)

〔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〕

ホームページ等

<http://www.kansai.qst.go.jp/organization-1-1.html>

(移設中)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神門 正城 (KANDO, Masaki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用  
研究センター・研究主幹

研究者番号：50343942

### (2) 研究分担者

ピロジコフ アレクサンダー (PIROZHKOVA, Alexander)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機

構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用  
研究センター・研究副主幹

研究者番号：00446410

### (3) 連携研究者

小瀧 秀行 (KOTAKI, Hideyuki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用  
研究センター・研究主幹

研究者番号：60354974

林 由紀雄 (HAYASHI, Yukio)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用  
研究センター・研究副主幹

研究者番号：20360430