

平成 25 年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成 25 年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成 25 年 4 月 19 日現在

研究代表者 氏名	田島 俊樹	所属研究機関・ 部局・職	日本原子力研究開発機構・関西光科学 研究所・所長
研究課題名	相対論工学による超高強度場科学への接近		
課題番号	15002013		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 田島 俊樹（日本原子力研究開発機構・関西光科学研究所・所長） 研究分担者 大道 博行（関西光科学研究所・量子ビーム応用研究部門・研究 主席） BULANOV Sergei（関西光科学研究所・量子ビーム応用研究部門・ 客員研究員） KOGA James（関西光科学研究所・量子ビーム応用研究部門・主任 研究員） 神門 正城（関西光科学研究所・量子ビーム応用研究部門・副主 任研究員） 福田 祐仁（関西光科学研究所・量子ビーム応用研究部門・任期 付研究員）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成 15 年度	88,000 千円
平成 16 年度	95,000 千円
平成 17 年度	77,000 千円
平成 18 年度	87,000 千円
平成 19 年度	77,000 千円
総 計	424,000 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

(1) 光速飛翔鏡の波及の軌跡

・本テーマから派生した、アト秒コヒーレントX線を生成する技術として、基盤研究(A)(代表ブラノフ)が採択された。さらに、原子力機構の中期計画(H17~H21、H22~H24)のテーマの1つとして採用され研究が継続して行われている。この研究の中で、飛翔鏡がほぼ理論値通りの反射率を持つことが実験的に検証され、また、反射光の水の窓領域への短波長化も達成された。

・本テーマに興味を持った、英国D. Neely教授(Rutherford Appleton Laboratory)がAstra Gemini レーザーの研究テーマとして応募し採択された(2008年5-7月)。これはAstra Geminiの2ビームを用いるテーマとしては初めてであり、原子力機構のチームも共同研究者として参画した。飛翔鏡法は実験的な困難があり、マシンタイム中には結果は出せなかったが、後述する相対論高次高調波の成果に結実した。さらに2013年度に再挑戦としてマシンタイムの応募を行っている。

(2) 光速飛翔鏡の高強度化と高強度場科学の推進役

・Kogaらによる光子・光子散乱への研究への展開(J. K. Koga et al., Phys. Rev. A, 2013)が図られている。挑戦的なテーマであるので、実験的には未実証であるが、最新の科研費(神門2013年度、基盤B)により研究を深化する。このような取組みに見られるように、世界的にも超高強度場を実現し新しい物理を開拓しようという機運が高まっている(ELI, IZEST, PIFなどの国際会議開催、組織体/施設の確立)。

(3) 相対論工学の派生研究

・光速飛翔鏡は、相対論的な速度で進む電子群がプラズマ中に作られ、それが鏡として作用するものであった。世界的には、更に固体密度薄膜にレーザーを照射することにより、振動する電子シートが同様な(振動する)飛翔鏡として認知されるようになり、実験も行われている。

・さらに我々のグループでは、ガスプラズマ中での構造に着目し、コヒーレントな電子群が飛翔鏡とは異なる場所に作られることを見出した。この電子群がレーザー場で変調されることで、相対論的な高次高調波が生成された(Pirozhkov et al., Phys. Rev. Lett. 2012、科研費Pirozhkov, Esirkepovなど)。この高次高調波は、Corkumモデルで知られる原子・分子からの高次高調波とは以下の点で異なっている。相対論的強度でも発生する点、奇数次に加え、偶数次の高調波も発生する点、円偏光のレーザー光を用いても発生する点、輝度が高い点などである。この発生機構は、レーザー光の空洞壁と船首波が交わる点に電子カスプが生成され、その電子カスプからのコヒーレント放射であると考えられる。

(4) 単色電子生成への知見

我々は3TW、80fsの(当時)世界最小レーザーでの準単色電子生成を報告した(Mori et al., Phys. Lett. A 2006)が、その研究はその後安定な電子生成へと発展した。特徴は、レーザー光の伝播に伴いイオン化が進むようなAr、N₂などの多価イオンガスを用い、そのガス密度を精密に制御する点である。これにより、準単色電子ビームの位置安定性と再現性を大きく向上させることに成功している(Mori)。世界的には、HeガスにArなどの多価イオンガスを微量に混入させることで航跡波への電子入射を入射させる方式がほぼ同時に提唱されている。

(5) ガンマ線生成の展開

レーザーと相対論電子線の掛け合わせの動力学からのガンマ線発生は、光速飛翔鏡に並ぶ相対論工学の重要な応用例である。我々の開発した飛翔鏡法の実験セットアップは、2つのレーザー光を対向してプラズマ中で衝突させるものである。これにタイミングを変更することで、飛翔鏡ではなく高速電子ビーム(準単色ビーム)にレーザー光を衝突させ、逆コンプトン散乱によりX線ないしガンマ線を生成する方法が提唱、実験されている。特に、イタリアのL. Gizzi教授らは、原子力機構のグループと共同で予算獲得(Gamma-RESIST)に成功している。このプロジェクトには本科研費から派生した、2つのレーザー光を衝突させる技術が使われる予定である。更に、研究代表者が当研究終了と同時に退職後、欧州で展開した研究が、この領域で大きく花を咲かせた。ドイツのLMU大学では、こうして発生するガンマ線を使ってできる核光学など新しい学際領域が生まれた。これは、いまガンマ=フォトリクスなどと呼ばれるようになって来ている。例えば、こうして出来るガンマ線は、指向性がよく、エネルギー幅が狭く、エネルギーも使用に従って選択可能という性能があるので、こうした新たな性能を利用し、核医学への可能性が格段に広がった。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

多くの国際会議での招待講演に招かれた。その中には世界の学会の動向に大きく影響を与えたものも少なくない。詳細は <http://www.munich-photonics.de/1/menschen/lectures-and-talks/>にあるが、以下では抜粋したものを掲載する。

[1] 2nd IZEST Annual Conference in the University of Strathclyde, November 13th - 15th, 2012
Programme

[2] High Field Science Frontier, Talk at the LMU in Garching on September 5, 2012

[3] Plasma Acceleration at IZEST: Large-Energy Laser and High-Average Power Laser toward High Energy Physics, Joint Workshop of the France-Japan and France-Korea Particle Physics Laboratories (TYL-FKPPL) Clermont-Ferrand (May 29, 2012)

[4] Nonlinear QED and Beyond with High Intensity Lasers (part 1 and 2), Workshop on Nonlinear QED with High Intensity Lasers, LBNL, Berkeley, CA on May 14, 2012

[5] Exawatt-Zetawatt Laser-Based Fundamental High Energy Physics
Talk on the CLEO Conference, San Jose/CA on May 10, 2012

[6] ICAN (International Coherent Amplification Network) Kickoff Meeting at CERN, Geneva (Feb. 22, 2012)

[7] IZEST Launching Workshop in Paris (November 28-29, 2011):
Science of IZEST

[8] Extreme Lasers and High Field Science, Talk on Monday 31 October, 2011

[9] Nonlinear Optics of Vacuum
Invited Talk at the International Conference 'Nonlinear Optics: East-West Reunion' (NL050 2011) in Suzdal, Russia on Friday 23 September, 2011

[10] Invitation of the French Ministry of Research to give a lecture on IZEST. IZEST is a new initiative (International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology). The Minister gave a startup fund for this fiscal year (i.e. September).

[11] History and Outlook of Plasma Acceleration: Plenary Talk at EuCARD, European Network for Novel Accelerators, CERN, Geneva on Tuesday, May 3, 2011

[12] The Frontier of High Field Science: Plenary Talk at SPIE, Prague, Czech Republic, on Monday April 18, 2011

[13] Laser Wakefield Acceleration and Fundamental Physics, Colloquium Fermilab in Batavia (IL) on July 20, 2011

[14] Intense Lasers, Laser acceleration, and High Field Science, Graduate School on Physics with New Coherent Radiation Sources, Lecture at DESY/Hamburg University (April 5, 2011)

[16] International Bridgelab Symposium for Laser Acceleration: Route toward Reality, Friday, Jan. 14, 2011, L' Orme des Merisiers, CEA, France
Intro of Toshiki Tajima
Talk (Bridgelab: Collider Consideration) of Wim Leemans by Toshiki Tajima

[17] High Field Science: The Review Talk at the PIF (Physics in Intense Fields)-Conference 2010 on Friday, Nov. 26, 2010 in KEK, Tsukuba

[18] Blaise-Pascal Lectures (2009), see some lectures as videos

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

科研費

研究課題名：「光速飛翔鏡」による新しいX線発生機構の研究

研究種目：基盤研究(A)

研究代表者：Bulanov Sergei

研究期間：2008年度～2010年度

研究費総額：48360千円

科研費以外の競争的研究資金

研究代表者田島は関西研所長として、予算獲得、研究推進に指導的役割を果たした。

制度担当府省：文部科学省

制度名：科学技術振興調整費

研究課題名：「光医療産業バレー」拠点創出

研究代表者：日本原子力研究開発機構 理事長 岡崎 俊雄(H19.7～H22.8.16)、鈴木篤之(H22.8.17～H23.3.31)

研究機関：日本原子力研究開発機構

協働機関：浜松ホトニクス(株)、ウシオ電機(株)、(株)東芝、兵庫県粒子線医療センター、(株)島津製作所、豊田中央研究所、HOYA(株)、(株)フジクラ、日本アドバンステクノロジー(株)、(有)HOC

研究期間：H19年度～H22年度

研究機関全体の配分額：964,123千円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

相対論工学は広い領域をカバーする概念であり、元来高強度レーザーの巧みな操りでその中でも物質破壊の起こらないプラズマを媒体として電子やイオンを加速するレーザー＝プラズマ加速を含有している。

研究代表者は、同じ思想に基づき、大きな電場を作り出してしまう超高エネルギーの粒子を極めて短距離で減速するのにプラズマを利用する方法を提起した。これはいわば、上記のレーザー加速の逆の過程であり、プラズマ減速器は、粒子の持っていたエネルギーを効果的に回収出来るし、その際放射線損傷を起さないように出来る。これは、原子力機構から特許を取得した（スタンフォード大学スタンフォード線形加速器センターA. Chao 教授 との共同特許2013年）。

高強場の創出のためには、高強度レーザーのコンプレッションが必要である。超高強度（EW, ZW の領域）ではこれに耐えるコンプレッサーは普通の物質では存在しない。この困難を克服するために、研究代表者らは、レーザー加速やレーザー減速、光速飛翔鏡に共通する思想を援用し、もうこれ以上物質崩壊しないプラズマをコンプレッサーの媒体に選ぶ事を提起した（IZEST 所長 G. Mourou 教授らと共同で2011年特許申請）。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

ドイツのミュンヘン大学の Habs 教授らは、上記した指向性のよいエネルギー可変のガンマ線を使い、そのガンマ線製薬、ガンマ線に基づく新しい放射線医療の開発に繋げた。

提起された光速飛翔鏡を含めた超高強度場の研究が、世界の先端光科学の研究施設の主要な研究課題として取り上げられ、下記の3. で述べるように EU では ELI 光研究施設の立ち上げに繋がった。その立ち上げには、研究代表者は、ELI の科学諮問委員会の議長として指導性を発揮し、その立ち上げに決定的貢献を行った。

こうした貢献の過程で、世界の高強度場科学の推進の学問的指導を属目、付託され、指導的ポジションを与えられた。すなわち、フランスの 2009 Blaise Pascal Chair、中国の科学院の 2013 Einstein Professorship である。10回に上る Blaise Pascal Lectures は、上記の ELI の立ち上げにも影響を及ぼした。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

Thomson Reuter の Web of Science の引用数を基に上位から選んだ。

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“Optics in the relativistic regime”, G. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov, Rev. Mod. Phys. 78, 309 (2003).	相対論光学の概念をとりまとめたレビュー論文。相対論領域では、プラズマは安定な光学素子として働くことを指摘。	560
2	“Light intensification towards the Schwinger limit”, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, T. Tajima, Phys. Rev. Lett. 91, 085001 (2003).	相対論工学の1例である光速飛翔鏡による集光強度の増大を理論、シミュレーションで指摘した論文。	209
3	“Demonstration of laser-frequency upshift by electron-density modulations in a plasma wakefield”, M. Kando et al., Phys. Rev. Lett. 99, 135001 (2007)	相対論工学の1例である光速飛翔鏡によるレーザー光の反射と周波数上昇を観測した初めての論文。	71
4	“Quasi-monoenergetic electron beam generation during laser pulse interaction with very low density plasmas”, A. Yamazaki et al., Phys. Plasmas 12, 093101 (2005).	準単色電子ビーム生成を低強度、低密度で初めて観測した実験論文。	58
5	“Frequency multiplication of light back-reflected from a relativistic wake wave”, A. S. Pirozhkov et al., Phys. Plasmas 14, 123106 (2007)	相対論工学の1例である光速飛翔鏡によるレーザー光の反射と周波数上昇を観測した初めての論文のフルペーパーであり、理論、実験、解析方法の詳細が記述されている。	48
6	“Many-electron dynamics of a Xe atom in strong and superstrong laser fields”, K. Yamakawa et al., Phys. Rev. Lett. 92, 123001 (2004).	レーザーの集光強度をXeガスのイオン化を用いて評価した論文。	44
7	“Transverse dynamics and energy tuning of fast electrons generated in sub-relativistic intensity laser pulse interaction with plasmas”, M. Mori et al., Phys. Lett. A 356, 146 (2006).	準単色の電子ビームを世界最小の集光強度で達成した実験論文。	40
8	“Electron, positron, and photon wakefield acceleration: Trapping, wake overtaking, and ponderomotive acceleration”, T. Zh. Esirkepov et al., Phys. Rev. Lett. 96, 014803 (2006)	レーザー航跡場加速の第一周期での加速を理論的に解析し、電子、陽電子、光子加速について統一的な理解を行った。簡単なモデルにより、準単色電子構造が得られることを示した。	37
9	“Study of x-ray emission enhancement via a high-contrast femtosecond laser interacting with a solid foil”, L. M. Chen et al., Phys. Rev. Lett. 100, 0454004 (2008)	高コントラストのレーザーを薄膜に照射することで、レーザープラズマX線の強度が増大することを示した実験論文。	27
10	“Electron acceleration by a nonlinear wakefield generated by ultrashort (23-fs) high-peak-power laser pulses in plasma”, M. Kando et al., Phys. Rev. E 71, 015403 (2005)	レーザー航跡場加速の最短レーザーパルス幅で行った実験。プリパルスによる電子入射により高電流の電子を観測した。	25

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“Relativistic laser-matter interaction and relativistic laboratory astrophysics”, S. V. Bulanov et al., Euro. Phys. J. D 55, 483 (2009).	レーザー・プラズマ相互作用により、実験室宇宙物理へ展開できる可能性を示した論文。高強度領域でのレーザー・プラズマ相互作用で引き起こされる現象は天体で観測される現象と類似していることを指摘。	30
2	“High temporal and spatial quality petawatt-class Ti:sapphire chirped-pulse amplification laser system”, H. Kiriya et al., Opt. Lett. 35, 1497 (2010).	相対論工学の基礎となる高出力レーザーのコントラストを更に向上させ、PWクラスのレーザーを構築した論文。このレーザーを基に、イオン加速や電子加速、飛翔鏡実験を実施した。	29
3	“Generation of high-contrast and high-intensity laser pulses using an OPCPA preamplifier in a double CPA, Ti:sapphire laser system”, H. Kiriya et al., Opt. Commun. 282, 625 (2009).	相対論工学の基礎となる高出力レーザーのコントラストを向上させる OPCPA を用いた論文。このレーザーを基に、イオン加速や電子加速、飛翔鏡実験を実施した。	29
4	“Controlled electron injection into the wake wave using plasma density inhomogeneity”, A. V. Brantov et al., Phys. Plasmas 15, 073111 (2008).	電子密度勾配によりレーザー航跡場電子加速の安定な生成ができることを示した理論、シミュレーション論文。	29
5	“Enhancement of Photon Number Reflected by the Relativistic Flying Mirror”, M. Kando et al., Phys. Rev. Lett. 103, 235003 (2009).	本相対論工学の手法を更に発展させ、飛翔鏡がほぼ理論通りの反射率を持つことを示した世界初の論文。	27
6	“0.56 GeV laser electron acceleration in ablative-capillary-discharge plasma channel”, T. Kameshima et al., Appl. Phys. Exp. 1, 066001 (2008).	レーザーを長距離伝播できるプラズマ導波路にアブレーションタイプの細管を用いてレーザー電子加速実験を行ない、0.56GeV を達成した論文。Nature Photonics でも紹介された。	26
7	“Interaction of electromagnetic waves with caustics in plasma flows”, A. V. Panchenko et al., Phys. Rev. E 78, 056402 (2008).	飛翔鏡の反射率を様々な形状のカスプに対して求めた理論論文。	25
8	“Electron Optical Injection with Head-On and Countercrossing Colliding Laser Pulses”, H. Kotaki et al., Phys. Rev. Lett. 103, 194803 (2009).	飛翔鏡の実験技術を用いて高品質の電子ビーム生成を行った論文。	23
9	“More Intense, Shorter Pulses”, G. Mourou and T. Tajima, Science 331, 41 (2011).	レーザー強度とパルス幅には相関があり、より高い強度のレーザーを用いることにより、より短パルスが得られることを示唆した論文。相対論工学の飛翔鏡がそれに有効であることを指摘。	21
10	“Boosted High-Harmonics Pulse from a Double-Sided Relativistic Mirror”, T. Zh. Esirkepov et al., Phys. Rev. Lett. 103, 025002 (2009).	相対論工学の1つの例であり、固体を極めて高い強度のレーザーで加速することにより、飛翔鏡として働くことを理論、シミュレーションで示した。	18

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

高強度場科学への熱意が国際的に高揚し、特に欧州共同体（EU）は、ELI（Extreme Light Infrastructure）を立ち上げ800Mユーロの研究費をつぎ込むことにし、研究の展開が始まっている。研究代表者は、ELIの立ち上げで「科学諮問委員会」の議長を務めEUのELI決定に重要な貢献を果たした。特にELI-Nuclear Pillar（約350Mユーロ）では、上記のガンマ=フォトンクスがその主要テーマに入れることに尽力した。2013年には、ELI Delivery Consortium International Associationが遂に立ち上がった。

研究代表者は、2008年から当該領域での国際貢献を評価され、高強度レーザーの国際組織ICUIL（International Committee for Ultrahigh Intensity Lasers）の議長を務めている。研究代表者の指導で、加速器の国際組織ICFA（International Committee for Future Accelerators）と共同体制を敷き、レーザーを駆使した加速器研究の世界展開を始めた。このことで、国際レーザー組織と国際加速器組織の協調性が確立された。

更に、この協力研究中ではっきりして来た事に一つが、レーザー駆動の加速のためには、効率の高い、高繰り返し効く高強度レーザーの必要性が分かってきたので、そのための技術の革新を提案し、特許化（IZEST 所長 Mourou らと共同提出）すると共に最新成果を Nature Photonics 誌に出版した。このレーザーを使えば、上記で既に記述したエネルギー可変で指向性の良いガンマ線の創出に役立つので、コンパクトでポータブルにすれば露出している福島核燃料の非接触でできる成分分析に使えよう。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）**(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）**

当計画に関与した全ての若手研究者は、その後大きくはばたき、それぞれの分野で指導的役割を果たしている。即ち、

1. Liming Chen（日本原子力研究開発機構 特定課題推進員）

現在、Professor, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

Part-time Professor, Shanghai Jiao Tong University

2. Jinglong Ma（日本原子力研究開発機構 特定課題推進員）

現在、Associate Professor, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

3. Alexander Pirozhkov（日本原子力研究開発機構 特定課題推進員）

現在、日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 副主任研究員

4. 川瀬 啓吾（日本原子力研究開発機構 特定課題推進員）

現在、大阪大学 産業科学研究所 助教

5. 大東 出（日本原子力研究開発機構 特定課題推進員）

現在、京都大学 エネルギー理工学研究所 特定研究員

6. 福田祐仁（日本原子力研究開発機構 任期付研究員）

現在、日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 副主任研究員

7. 桐山博光（日本原子力研究開発機構 研究員）

現在、日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 副主任研究員

8. 神門正城（日本原子力研究開発機構 副主任研究員）

現在、日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 グループリーダー／主任研究員