

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01233

研究課題名(和文) 小型高輝度X線源のためのレーザーコンプトン散乱クラブ衝突化の実現

研究課題名(英文) Realization of laser Compton scattering by crab collision for compact high-brightness X-ray source

研究代表者

鷲尾 方一 (Washio, Masakazu)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70158608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,830,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は電子ビームとレーザーパルスの相互作用によりX線を生成するレーザーコンプトン散乱において電子ビームに傾き角を付与し、正面衝突時に近いルミノシティを実現するクラブ衝突レーザーコンプトン散乱に関する研究である。現時点で、薄ディスクYb:YAGを用いたリング型再生増幅器を構築することで衝突レーザーシステムとしてミリジュールピコ秒の高品質レーザーパルス生成に成功している。なお、電子レーザーの衝突タイミング制御が十分でない状況にあり、今後、RF信号発生器をマスターオシレータとして2台のサーボシステムを用いるか、レーザー発振器を一つにし、パルスを分けることでジッターフリーにすることが考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーコンプトン散乱X線源は放射光施設に匹敵する、高品質・高強度のエネルギー可変X線発生を実用化できる手法である。本研究において、これまで十分な出力が得られないという難点を克服するための技術を極め、レーザーの高出力化、電子ビームの高品質化等を通じ、クラブ衝突スキームによって2桁以上の共同増強を実現できる技術的見通しを得ることができた。これにより、世界各地で開発が進められてきている当該技術について非常に大きなインパクトを与えることができるようになった。近くこの開発で達成された技術をKEK-LUCXにおいて実用し、短時間でイメージングができるようになることが期待される。

研究成果の概要(英文)：This study is concerned with club collisional laser Compton scattering, in which a tilt angle is given to the electron beam in laser Compton scattering, which produces X-rays through the interaction between the electron beam and the laser pulse, to achieve a luminosity close to that of a head-on collision. At present, we have succeeded in generating high-quality laser pulses of millijoule picoseconds as a colliding laser system by constructing a ring-shaped regenerative amplifier using thin-disk Yb:YAG. Note that the electron-laser collision timing control is still insufficient. In the future, we may use two servo systems with an RF signal generator as a master oscillator or a single laser oscillator and separate the pulses to make them jitter-free.

研究分野：ビーム物理

キーワード：逆コンプトン散乱 高輝度X線 高輝度レーザー 高品質電子ビーム クラブ衝突 タイミングスタビリティ

1. 研究開始当初の背景

現代において汎用な X 線発生装置といえば X 線管であり、最も広く使用されている。しかしながら先端的な科学研究や高度の分析においてはより高輝度の X 線が求められ、大型電子加速器に依存した放射光が使われることが一般的である。このような背景から小型かつ高強度の X 線源のニーズは非常に大きい。レーザーコンプトン散乱はその有力候補であり、エネルギー可変性や準単色性などの魅力を兼ね備えるが、さらなる高強度化が求められている。図 1 にレーザーコンプトン散乱の模式図を示す。レーザーコンプトン散乱は電子ビームとレーザー光の相互作用であるが、一度の相互作用で生成される散乱 X 線の光子数はルミノシティというパラメータで決定付けられ、ルミノシティは電子ビームとレーザーの衝突角(図 1 の θ)に依存する。ルミノシティを最大化するためには衝突角が 0 度の正面衝突が理想的であることが知られているが、特に小型線形電子加速器と光蓄積共振器を使った配置では、その実現は困難を極めるため、衝突角に開きを設け妥協した配置が多いという課題がある。

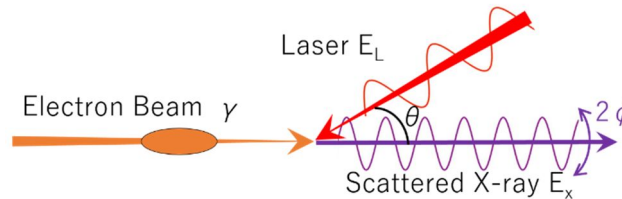


図 1. レーザーコンプトン散乱の模式図.

2. 研究の目的

本研究の目的は電子ビームに傾き角を付与することで、衝突角に開きがあるような状況下でも正面衝突に近いルミノシティを実現することでルミノシティの増大、散乱 X 線光子数の増大を実現することである。このような衝突方式はクラブ衝突と呼ばれる。クラブ衝突によってレーザーコンプトン散乱 X 線をどの程度高強度化できるか理論的計算によって見積もりを行い、また実験的な検討も行った。

3. 研究の方法

電子ビームは早稲田大学の加速器システムを用いた。フォトカソード RF ガンによって 4.7MeV の高品質電子ビームを発生させ、傾き付与は RF 偏向空胴によって行う。RF 偏向空胴によって精密な傾き角制御が可能である。レーザーは超短パルス性が重要であるため、CPA (チャープパルス増幅) を利用した新たなレーザーシステムの開発を行った。Yb (イットリビウム) 添加ファイバーを利得媒質としたファイバーレーザー発振器を構築し、波長 1030 nm のモードロックレーザーパルス生成を行った。これを Yb ファイバーを用いてプリアンプし、メインアンプには Yb:YAG thin-disk 媒質を利用した再生増幅器を構築した。再生増幅器の共振器構成は光が往復するリニア型と光が周回するリング型の双方を試験し、リニア型で直面した横モードのマルチモード化を、リング型では抑制することに成功した。パルス圧縮は透過型回折格子対によって行った。レーザーシステムの完成を経て加速器システムとタイミング同期を取り、衝突点では平凸レンズで集光し、電子ビームとの衝突を行った。X 線検出は MCP (マルチチャンネルプレート) を用い、電子ビームの傾きの有無によって X 線信号の増大に挑戦した。実験セットアップ図を図 2 に示す。

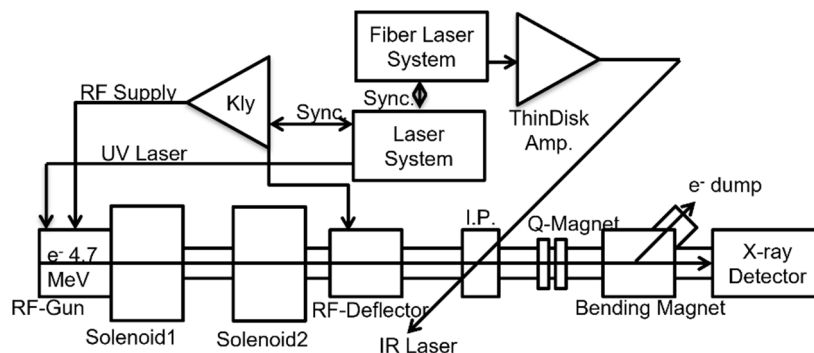


図 2. クラブ衝突レーザーコンプトン散乱の実験セットアップ.

4. 研究成果

クラブ衝突によるルミノシティの増大率を大きくするためにはレーザーパルスのパルス時間幅を小さくすることが重要であると理論的検討からわかった。そのためピコ秒ミリジュールのレーザーパルス生成を可能とするコンパクトなレーザーシステム開発を行った。Thin-disk 再生増幅器においては 10^6 倍を超えた増幅に成功し 10mJ のパルス生成に成功しただけでなく、ビーム品質も M^2 が 1.5 と高品質であることを実証することができた。図 3 に再生増幅のビルドアップ波形を示し、図 4 にビーム品質計測の結果を示す。

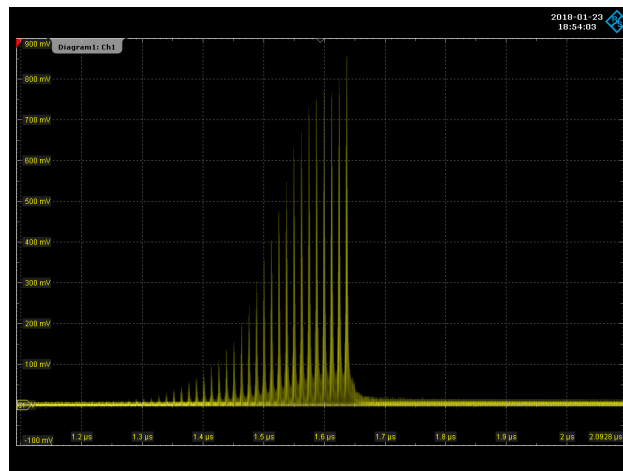


図 3. 再生増幅を示すビルドアップ波形.

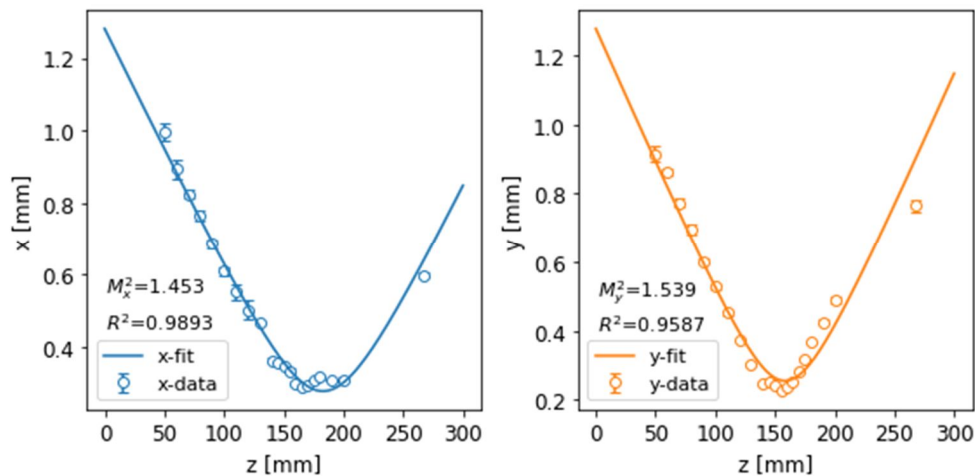


図 4. ビーム品質 M^2 の計測結果.

これをパルス圧縮することで 1.5psec まで圧縮することに成功し、高強度超短パルスレーザーシステムの完成を遂げた。またコンパクトで移動も可能なことから今後様々な応用研究に用いることができる汎用性を兼ね備えている。このレーザーシステムを用いて加速器システムと同期させ、クラブ衝突レーザーコンプトン散乱実験を試み、レーザーコンプトン散乱 X 線の生成に成功している。レーザーコンプトン散乱 X 線の生成には成功したものの、クラブ衝突によるルミノシティ増大を実験的に実証するには至らなかった。主たる原因としてタイミング同期に問題があり、電子ビームとレーザーの相対的なタイミングがドリフトしてしまう問題が明らかになった。その原因として、マスターオシレータである Yb ファイバーレーザーの光路長が温度変動に敏感である知見を得ることができた。温度変動の時系列データと電子ビームのタイミングを計測した結果を図 5 に示す。

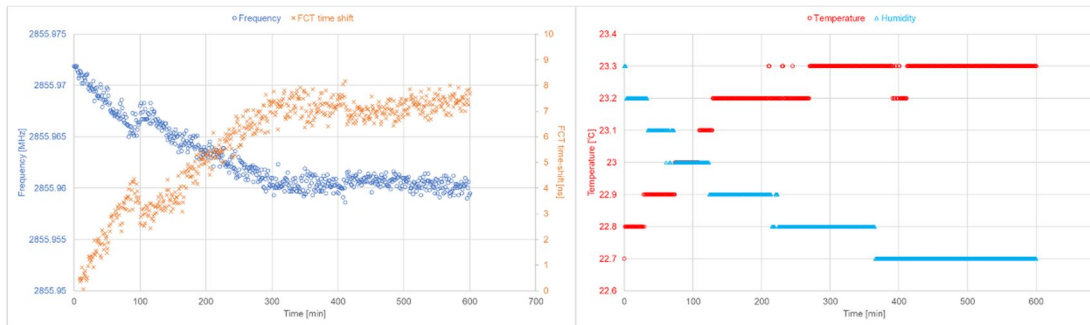


図 5. 電子ビームタイミングと温度変動の計測結果 .

図 5 からマスターオシレータ付近の温度と電子ビームのタイミングにはっきりと相関があることがわかる。これらの知見から、電子ビーム発生用のカソードドライブレザーパルスと、レーザーコンプトン散乱用のレーザーパルスを同一の発振器によって生成し原理的にジッターフリーな実験系とする改善案が考えられる。またクラブ衝突による増大率が実験パラメータでは2倍程度と予想され、実証が難しいという課題もあった。増大率を大きくするためには衝突用レーザーのパルス時間幅を小さくすることが重要であるが、フーリエ限界パルス幅も 1psec 程度である。よってシードレーザーをより高強度にし、メインアンプ部での利得狭帯化を低減することや、メインアンプ後に非線形光学効果によってスペクトル幅を広帯域化するなどの対策が考えられる。

本研究では初めてファイバーレーザーをマスターオシレータとして加速器システム、カソードドライブレザー、レーザーコンプトン散乱用レーザーの同期を行った。本研究で得られた知見、明らかになった課題を改善し小型高強度レーザーコンプトン散乱 X 線源の開発を継続する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tatsunori Shibuya, Kazuyuki Sakaue, Hiroshi Ogawa, Daisuke Satoh, Thanh-Hung Dinh, Masahiko Ishino, Masahito Tanaka, Masakazu Washio, Takeshi Higashiguchi, Masaharu Nishikino, Akira Kon, Yuya Kubota, Yuichi Inubushi, Shigeki Owada, Yohei Kobayashi, and Ryunosuke Kuroda	4. 巻 29(21)
2. 論文標題 Independent contribution of optical attenuation length in ultrafast laser-induced structural change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 33121-33133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.432130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Koshiba, Y. Tadenuma, S. Otsuka, M. Washio, T. Takatomi, J. Urakawa, and K. Sakaue	4. 巻 24
2. 論文標題 High-Charge Ultrashort Electron Bunch Generation by an Energy Chirping Cell-Attached Rf Electron Gun and Its Measurement Using a Transverse Deflecting Cavity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Accel. Beams	6. 最初と最後の頁 083401 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.083401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takeo Ejima, Shunsuke Kurosawa, Akihiro Yamaji, Tadashi Hatano, Toshitaka Wakayama, Takeshi Higashiguchi, and Mamoru Kitaura	4. 巻 219
2. 論文標題 Luminescence properties of scintillators in soft X-ray region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Luminescence	6. 最初と最後の頁 116850, 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jlumin.2019.116850	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 Takeo Ejima, Toshitaka Wakayama, Natsumi Shinozaki, Misaki Shoji, Genta Hatayama, and Takeshi Higashiguchi	4. 巻 10
2. 論文標題 Demonstration of stimulated emission depletion phenomenon in luminescence of solid-state scintillator excited by soft X-rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports (Nature Research)	6. 最初と最後の頁 5391, 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-62100-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiromu Kawasaki, Atsushi Sunahara, Yuta Shimada, Takeo Ejima, Weihua Jiang, Gerry O'Sullivan, Masaharu Nishikino, Shinichi Namba, and Takeshi Higashiguchi	4. 巻 10
2. 論文標題 Electron temperature and soft x-ray intensity scaling in laser heavy element plasma interaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 065306, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0009946	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 該当する

1. 著者名 Yuya Koshiba, Ryosuke Morita, Koki Yamashita, Masakazu Washio, Kazuyuki Sakaue, Takeshi Higashiguchi & Junji Urakawa	4. 巻 1811420
2. 論文標題 Study on X-ray enhancement in Laser-Compton scattering for auger therapy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 INTERNATIONAL JOURNAL OF RADIATION BIOLOGY	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09553002.2020.1811420	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 Hiroki Oikawa, Takeshi Higashiguchi, and Hitoshi Hayano	4. 巻 58
2. 論文標題 Design of niobium-based mushroom-shaped cavity for critical magnetic field evaluation of superconducting multilayer thin films toward achieving higher accelerating gradient cavity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 028001, 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aaf46a	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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 R. Morita, Y. Koshiba, S. Ota, M. Washio, K. Sakaue, T. Higashiguchi, J. Urakawa
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF YB-BASED LASER SYSTEM FOR CRAB CROSSING LASER-COMPTON SCATTERING
3. 学会等名 IPAC2019 Melbourne (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Koshibam R. Morita, M. Washio, K. Sakaue, T. Higashiguchi, J. Urakawa
2. 発表標題 X-ray Generation by Crab Crossing Laser-Compton Scattering
3. 学会等名 ICRR2019 Manchester (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小柴裕也、森田遼介、鷺尾方一、坂上和之、東口武史、浦川順治
2. 発表標題 クラブ衝突レーザーコンプトン散乱に向けたリング型再生増幅器の開発
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会 京都
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryosuke Morita, Yuya Koshiba, Koki Yamashita, Masakazu Washio, Kazuyuki Sakaue*, Takeshi Higashiguchi**, Junji Urakawa
2. 発表標題 Development of Yb-based Laser System for Crab Crossing Laser-Compton Scattering
3. 学会等名 RREPS-19、Belgorod (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下洸輝、小柴裕也、森田遼介、坂上和之、東口武史、浦川順治、鷺尾方一
2. 発表標題 クラブ衝突を用いたレーザーコンプトン散乱のためのThin-diskレーザー開発
3. 学会等名 ビーム物理研究会・若手の会、大阪
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森田遼介、小柴裕也、太田昇吾、坂上和之、鷲尾方一、東口武史、浦川順治
2. 発表標題 クラブ衝突レーザーコンプトン散乱のためのYb系レーザーシステム開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Koshiba, S. Ota, R. Morita, K. Sakaue, M. Washio,
2. 発表標題 Enhancement of Laser-Compton X-ray by Crab Crossing
3. 学会等名 The 9th International Particle Accelerator Conference(IPAC18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小柴裕也、太田昇吾、森田遼介、坂上和之、東口武史、鷲尾方一、浦川順治
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱のクラブ衝突化
3. 学会等名 第15回日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Ota, Y. Koshiba, R. Morita, K. Sakaue, M. Washio
2. 発表標題 Development of thin disk laser system for crab crossing laser-Compton scattering
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific Symposium on Radiation Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.Koshiba, S.Ota, R. Morita, K. Sakaue M. Washio,
2. 発表標題 Adopting Crab Crossing to Laser-Compton Scattering X-ray
3. 学会等名 EUV Lithography Source Workshops 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大塚誠也、小柴裕也、鷺尾方一、Aryshev Alexander、浦川順治、大森恒彦、照沼信浩、福田将史、本田洋介、上杉祐貴、菅原直人、坂上和之、高橋徹、保坂勇志
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱光源に向けた自発共鳴型光共振器の現状
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大塚誠也、小柴裕也、Aryshev Alexander、上杉祐貴、浦川順治、大森恒彦、坂上和之、菅原直人、高橋徹、照沼信浩、福田将史、保坂勇志、本田洋介、山下洸輝、鷺尾方一
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱光源に向けた自発共鳴型パルスレーザー共振器の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下洸輝、小柴裕也、鷺尾方一、Aryshev Alexander、浦川順治、大森恒彦、照沼信浩、福田将史、本田洋介、上杉祐貴、菅原直人、坂上和之、高橋徹、保坂勇志
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱に向けた自発共鳴型光蓄積共振器の開発
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Otsuka, Y. Koshiba, M. Washio, Y. Uesugi, T. Takahashi, Y. Hosaka, K. Sakaue, A. Aryshev, M. Fukuda, Y. Honda, T. Omori, N. Terunuma, and J. Urakawa
2. 発表標題 Development of a Self-Resonating Optical Cavity for High Brightness Laser-Compton Scattering Sources
3. 学会等名 IPAC20 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Koshiba, S. Otsuka, M. Washio, N. Sugarawa, Y. Uesugi, T. Takahashi, Y. Hosaka, K. Sakaue, A. Aryshev, M. Fukuda, Y. Honda, T. Omori, N. Terunuma, and J. Urakawa
2. 発表標題 Study on a Self-Resonating Optical Cavity for Laser-Compton Sources
3. 学会等名 IPAC21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福島千夏良、山下洸輝、小柴裕也、鷲尾方一、Aryshev Alexander、浦川順治、大森恒彦、照沼信浩、福田将史、本田洋介、上杉祐貴、菅原直人、坂上和之、高橋徹、保坂勇志
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱に向けた自発共鳴型光共振器の開発
3. 学会等名 ビーム物理研究会・若手の会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福島千夏良、山下洸輝、小柴裕也、鷲尾方一、Aryshev Alexander、浦川順治、大森恒彦、照沼信浩、福田将史、本田洋介、上杉祐貴、坂上和之、高橋徹、保坂勇志
2. 発表標題 レーザーコンプトン散乱のための自発共鳴型光蓄積共振器の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022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
研究 分担者	東口 武史 (Higashiguchi Takeshi) (80336289)	宇都宮大学・工学部・教授 (12201)	
研究 分担者	坂上 和之 (Sakaue Kazuyuki) (80546333)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・主幹研究員 (12601)	

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
---------	---------