

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03477

研究課題名(和文)非線形逆コンプトン散乱による軌道角運動量を運ぶ光子の生成

研究課題名(英文)Generation of photons carrying orbital angular momentum by nonlinear inverse Compton scattering

研究代表者

平 義隆 (Taira, Yoshitaka)

分子科学研究所・極端紫外光研究施設・准教授

研究者番号：60635803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,660,000円

研究成果の概要(和文)：本研究期間内には、三角開口の回折によるX線のらせん波面検出に世界で初めて成功し、また、楕円偏光アンジュレータにおいても位相構造をもつ光の発生が可能である事を理論及び実験の両方で実証した。関西光科学研究所において、高強度円偏光レーザーを用いた非線形逆コンプトン散乱によるらせん波面を形成するガンマ線渦の発生実験を行ったが、ガンマ線渦の特徴である円環強度分布を測定することはできなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ガンマ線渦の発生と計測手法確立のための研究開発を行ってきた。三角開口を用いたX線渦のらせん波面検出は、干渉法以外でらせん波面を検出できる最も簡便な方法である。楕円偏光アンジュレータを用いた光渦の発生方法は、位相構造を連続的に変化できる光を発生することが可能となり、円偏光レーザーを用いた非線形逆コンプトン散乱にも適用可能な技術である。

研究成果の概要(英文)：During this research period, we succeeded in detecting the helical wavefront of X-rays by diffraction from a triangular aperture for the first time in the world, and also demonstrated both theoretically and experimentally that it is possible to generate light with a phase structure in an elliptically polarized undulator. At the Kansai Photon Science Institute, we conducted experiments on the generation of gamma-ray vortices forming helical wavefronts by nonlinear inverse Compton scattering using an intense circularly polarized laser, but we were unable to measure the annular intensity distribution, which is a characteristic feature of gamma-ray vortices.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：光渦 ガンマ線渦 軌道角運動量 トムソン散乱 コンプトン散乱

1. 研究開始当初の背景

近年、軌道角運動量 (Orbital angular momentum: OAM) を運ぶ新規量子ビーム源の開発及び応用研究が活発に行われている。図 1 に OAM を運ぶ光の概要を示す。OAM を運ぶ光は、光渦と呼ばれ、らせん波面を形成し横方向平面内で位相が変化する。また、その空間分布は特徴的な円環形状になる。OAM を運ぶビームは、現在までに可視光レーザー、20 keV X 線等においてその発生が可能になっている。しかし、エネルギー sub-MeV 以上の X 線 (ガンマ線) に関しては、その発生に成功したという例は無い。

研究代表者は、2017 年に OAM を運ぶガンマ線が円偏光レーザーを用いた非線形逆コンプトン散乱によって発生できることを世界で初めて理論的に見出した (Y. Taira et al., Sci. Rep. 7 (2017) 5018)。その概要を図 2 に示す。通常の逆コンプトン散乱は、高エネルギー電子によるレーザー光子の散乱によってガンマ線が発生する過程である。ここで、ピークパワーがテラワット級の高強度レーザーを使用すると、電子の進行方向に加えて垂直方向の非線形運動が誘起され、結果として高次高調波ガンマ線が発生する。n 次の高調波は 1 次ガンマ線に対して n 倍のエネルギーを持つ。2 次の高調波 X 線が円環状の空間分布になることは図 2 左下に示すようにすでに測定されていた。研究代表者はこの円環分布がらせん波面に由来し、n 次の高調波ガンマ線が $(n-1)h$ の OAM を運ぶことを理論的に示すことに初めて成功した (h はプランク定数)。

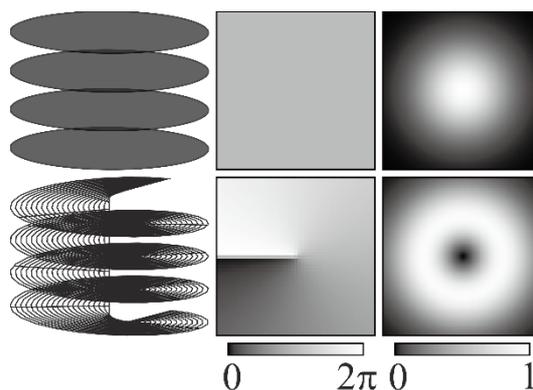
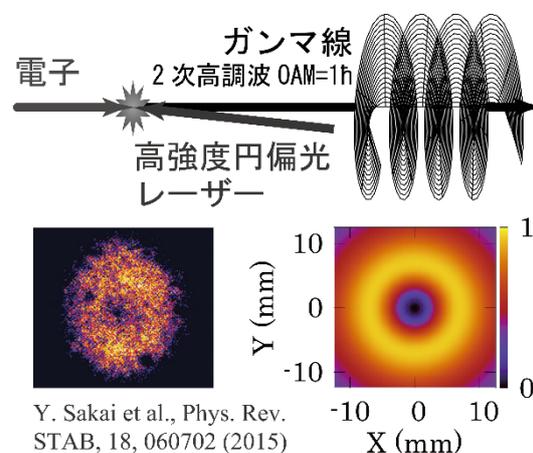


図 1: 通常の光 (上段) と OAM を運ぶ光渦 (下段) の概要。左から波面、位相、強度分布を表す。



Y. Sakai et al., Phys. Rev. STAB, 18, 060702 (2015)

図 2: (上) 非線形逆コンプトン散乱による OAM を運ぶガンマ線発生の概要。
(左下) 2 次高調波空間分布の測定結果。
(右下) 研究代表者が導出した理論式を用いて計算した 2 次高調波の空間分布。測定結果と良い一致を示している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者が見出した非線形逆コンプトン散乱法を用いて OAM を運ぶガンマ線が発生可能であることを世界に先駆けて実証する事である。図 2 左下に示すように、非線形逆コンプトン散乱で発生する OAM を運ぶ X 線が円環状の空間分布になることは既の実証されているが、それがらせん波面を形成し OAM を運んでいることは未だ実験的に確かめられていない。

本研究期間内には、非線形逆コンプトン散乱を用いたガンマ線渦の発生とガンマ線のらせん波面計測手法確立のための研究開発を行った。本研究成果報告書では、下記の 3 項目についてその内容を述べる。

- (1) 円偏光レーザー非線形逆コンプトン散乱で発生する 2 次高調波ガンマ線の空間分布測定
- (2) 三角開口の回折法による X 線のらせん波面検出 (発表論文 Journal of Optics, 21 (2019) 045604)
- (3) 楕円偏光アンジュレータで発生する高次高調波の位相構造の計算と測定 (発表論文 New Journal of Physics, 22 (2020) 093061)

3. 研究の方法

(1) 高強度円偏光レーザーを用いた非線形逆コンプトン散乱によるガンマ線発生実験を量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所において行った。実験の概要を図3に示す。電子ビームは、マイクロトン電子加速器から発生する150 MeV電子ビームを用いた。レーザーは、J-KARENを使用し、波長800 nm、パルスエネルギー0.245 J、パルス幅43 fs(FWHM)、ウェストサイズ $5.9 \times 4.8 \mu\text{m}$ 、繰返し周波数2 Hz、レーザー強度因子1.7の条件で運転し、水平90度方向から電子ビームに入射した。このレーザー強度は、高次高調波を発生するのに十分である。これらの条件から計算されるガンマ線のエネルギーは、基本波が110 keV、2次高調波が220 keVである。



図3: 関西研で行った円偏光レーザーを用いた非線形逆コンプトン散乱実験の概要。

1次と2次の高調波ガンマ線は、同軸上に発生する。1次ガンマ線の強度が2次よりも高いために、2次元検出器を置いただけでは2次高調波ガンマ線の円環分布を測定することはできない。そこで、1次よりも2次ガンマ線のエネルギーが高いことを利用し、検出器の前に鉛板を設置することで1次高調波ガンマ線の強度を減衰して2次高調波ガンマ線の空間分布を測定する。実験時には厚さ2 mmの鉛板をイメージングプレートの前面に貼りつけて測定した。

(2) 図4に三角開口を用いたX線渦のらせん波面測定の概要を示す。実験は、SPring-8のBL29XUにおいて行った。エネルギー7.7 keVのX線軸上にX線渦を発生するためのらせんフレネルゾーンプレート(SFZP)を設置し、その集光位置に1辺の長さが $6 \mu\text{m}$ の三角アパーチャーを設置し、その回折像をイメージング検出器で測定した。らせん波面の状態を表す指標であるトポロジカルチャージは+1と-1であった。SFZP位置でのX線の横方向コヒーレント長を向上させるために1辺の長さが $5 \mu\text{m}$ の正方形スリットを上流に設置し、SFZP位置でのコヒーレント長は $310 \mu\text{m}$ であった。この値は、SFZPの直径よりも十分に大きい。



図4: 三角開口を用いたX線渦のらせん波面測定の概要。

(3) 高強度円偏光レーザーの逆コンプトン散乱によってガンマ線渦が発生する機構は、電子の円軌道に由来する。円軌道電子から放射される光の位相構造の計算及び測定がいくつかのグループで行われてきた(M. Katoh et al., PRL 118 (2017) 094801, S. Sasaki et al., PRL 100 (2008) 124801, J. Bahrtdt et al., PRL 111 (2013) 034801, M. Katoh et al., Sci. Rep. 7 (2017) 6130)。また、研究代表者の理論計算によって電子のサイクロイド軌道によってらせん波面を形成する光が発生可能である事が新たに分かった(発表論文 PRA, 98 (2018) 052130)。さらに、電子の楕円軌道からも位相構造をもつ光が発生する事が理論計算により分かった(発表論文 New Journal of Physics, 22 (2020) 093061)。電子の楕円軌道は、楕円偏光レーザー及び楕円偏光アンジュレータと呼ばれる周期磁場を発生する装置でも実現できる。アンジュレータの周期は数 cm なのに対してレーザーの波長は $1 \mu\text{m}$ であるために、電子のエネルギーが同じであれば、レーザーを用いた逆コンプトン散乱は発生する光の波長が約 $1/10^4$ 短くなる。

楕円軌道から放射される光渦の位相構造を調べるために、楕円偏光アンジュレータ放射の位相勾配分布を2重スリットを用いて測定した。実験の概要を図5に示す。実験は、分子科学研究所 UVSOR-III の BL1U において行った。APPLE-II と呼ばれる偏光可変アンジュレータの下流に幅 1

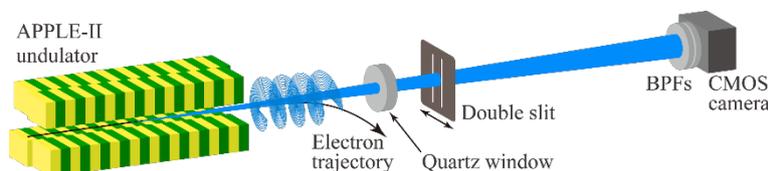


図5: 楕円偏光アンジュレータから発生する光渦の位相勾配測定の概要。New Journal of Physics, 22 (2020) 093061 Figure 3 より抜粋。

mmの2重スリットを設置し、干渉縞をCMOSカメラで測定した。アンジュレータの磁場強度を変えることで1~3次高調波の波長が266 nmになるように設定し、カメラの前に266 nmのバンドパスフィルターを取り付けることでそれぞれの高調波の空間分布を測定した。アンジュレータは、円偏光から楕円偏光、直線偏光に連続的に変えた。また、2重スリットを1 mmステップで2次元操作して干渉縞を測定した。位相勾配は、測定した干渉縞からサンプリングモアレ法を用いて位相差分布を抽出することで計算した。

4. 研究成果

(1) 電子ビームとレーザーの衝突点から 3 m 下流のガンマ線の軸上にイメージングプレートを設置して測定した結果を図 6 に示す。図 6 左に示すように、レーザー起因のガンマ線を検出することができた。しかし、その空間分布は円環形状にならなかった。

今後は、レイリー長に沿って a_0 が異なる事や電子ビームエミッタンスの影響などをシミュレーションに入れて計算し空間分布が円環にならなかった原因を調べる。

(2) 三角開口の回折像は、入射光がらせん波面を形成する場合、1 辺にトポロジカルチャージの絶対値+1 の点が並ぶパターンが現れる。図 7 に三角開口の回折像の測定結果と計算結果を示す。計算結果と良く一致する測定結果が得られ、トポロジカルチャージの符号の反転によって像も反転することが観測された。

この結果は、回折法によってらせん波面を形成する X 線渦の測定に世界で初めて成功した結果である。これまでに、X 線渦の測定法として、フリンジスキャンやタイコグラフィといった方法が開発されてきたが、これらの方法は X 線源に高い安定性が要求される。回折法は、測定手法が簡便であり、X 線の強度が十分高ければ短時間で測定が完了する。

(3) 図 8 に 1~3 次高調波の平均位相勾配の計算と測定結果を示す。2 次元操作して得られた位相勾配分布の平均値を計算値と比較した。図 8 の横軸は偏光状態を表し、 ± 1 が円偏光、0 が直線偏光、その間が楕円偏光である。図 8(a) に示すように 1 次高調波はどの偏光状態でも球面波であるため、位相勾配は一定である。図 8(b) に示すように 2 次高調波は、円偏光の場合らせん波面を形成し、平均位相勾配は ± 1 の値を取る。楕円偏光の場合は中心軸周りで連続的に位相構造が変化するために平均位相勾配は 0 から 1 の値を取る。図 8(c) に示すように 3 次高調波は位相特異点が 2 つあり、円偏光から楕円偏光に変わることによって位相特異点が分離し中心軸から離れる。その効果によって円偏光周りで ± 2 のピークをもつ分布になる。3 次高調波の測定値が計算値よりも小さい理由は、円偏光の場合でも 2 つの位相特異点が中心軸に位置しないためである。これは、アンジュレータのピーク磁場の揺らぎなどが原因と考えられる。

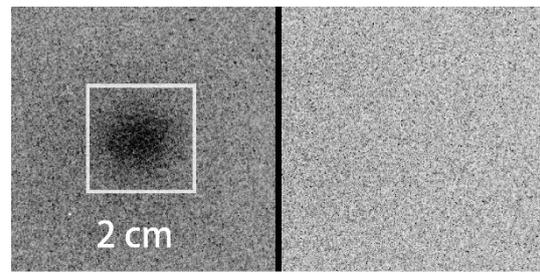


図 6: イメージングプレートの測定結果(前面に厚さ 2mm の鉛板を設置)。(左)レーザー on、(右)レーザー off。測定時間 69 分。

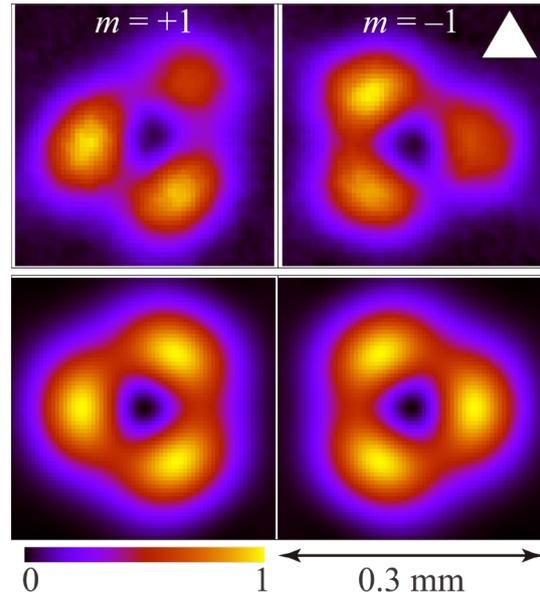


図 7: 三角開口の回折像の測定結果(上段)と計算結果(下段)。トポロジカルチャージは +1(左)、-1(右)。図中白抜き三角形は三角開口の配置。Journal of Optics, 21 (2019) 045604 Figure 2 より抜粋。

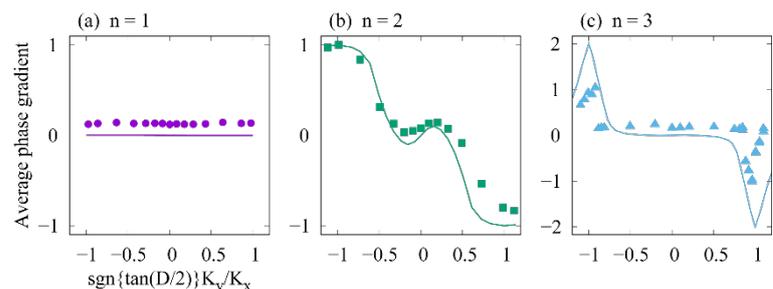


図 8: (a)1 次、(b)2 次、(c)3 次高調波の平均位相勾配の計算(実線)と測定結果(点)。New Journal of Physics, 22 (2020) 093061 Figure 6 より抜粋。

本研究期間内には、ガンマ線渦の発生及びらせん波面計測技術の開発に向けた研究開発を行った。高次高調波が発生するほどの十分な強度の円偏光レーザーを用いて非線形逆コンプトン散乱ガンマ線の発生実験を行った。ガンマ線の発生には成功したが、らせん波面を形成する光の特徴である円環分布を測定することはできなかった。今後は、関西研での研究開発を進めると共に、UVSOR-III にあるパルスエネルギー 50 mJ のレーザーを用いた非線形逆コンプトン散乱実験の光路設計を進める。

らせん波面の計測技術開発として、簡便な方法である回折法が 7.7 keV の X 線にも適用可能

であることを実証した。今後は、さらに高エネルギー領域のガンマ線渦のらせん波面計測方法についても開発する。

一方で、電子の楕円軌道から発生する高次高調波も位相構造をもつことが新たに分かった。これは、研究開始当初には予期していなかったことである。偏光可変アンジュレータや楕円偏光レーザーを用いて、真空紫外からガンマ線領域の位相構造を連続的に変化できる光渦を発生することができ、利用研究推進に貢献する事が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 4件）

1. 著者名 Taira Yoshitaka, Fujimoto Masaki, Ri Shien, Hosaka Masahito, Katoh Masahiro	4. 巻 22
2. 論文標題 Measurement of the phase structure of elliptically polarized undulator radiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 093061 ~ 093061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abb54a	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. Taira, M. Fujimoto, S. Ri, M. Hosaka, M. Katoh	4. 巻 -
2. 論文標題 楕円偏光アンジュレータ放射の位相構造	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 166-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Taira Yoshitaka, Katoh Masahiro	4. 巻 860
2. 論文標題 Generation of Optical Vortices by Nonlinear Inverse Thomson Scattering at Arbitrary Angle Interactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 45 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aac211	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 Taira Yoshitaka, Katoh Masahiro	4. 巻 98
2. 論文標題 Gamma-ray vortices emitted from nonlinear inverse Thomson scattering of a two-wavelength laser beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 052130 ~ 052130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.052130	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 Taira Yoshitaka, Kohmura Yoshiki	4. 巻 21
2. 論文標題 Measuring the topological charge of an x-ray vortex using a triangular aperture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 045604 ~ 045604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2040-8986/ab0a51	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 Y. Taira, M. Katoh	4. 巻 -
2. 論文標題 非線形逆トムソン散乱によるガンマ線渦の発生	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 70-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 平義隆
2. 発表標題 アンジュレータを用いた光渦の発生
3. 学会等名 研究会「光の軌道角運動量の発生機構と物質相互作用の理解」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平義隆、神門正城、小瀧秀行、林由紀雄、中新信彦、黄開、大東出、川瀬啓悟、早川岳人
2. 発表標題 高強度円偏光レーザーを用いた非線形逆トムソン散乱によるガンマ線渦の発生2
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Taira, M. Fujimoto, S. Ri, M. Hosaka, M. Katoh
2. 発表標題 Phase structure of elliptically polarized undulator radiation
3. 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Taira, M. Katoh
2. 発表標題 Gamma-ray vortices emitted from nonlinear inverse Thomson scattering of circularly polarized light
3. 学会等名 5th International Conference on Optical Angular Momentum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平義隆、藤本將輝、李志遠、保坂将人、加藤政博
2. 発表標題 楕円偏光アンジュレータ放射の位相構造
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平義隆
2. 発表標題 軌道角運動量を運ぶガンマ線の生成
3. 学会等名 第25回HiSOR研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Taira
2. 発表標題 Generation of gamma-ray vortices by nonlinear inverse Thomson scattering
3. 学会等名 The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平義隆、加藤政博
2. 発表標題 非線形逆トムソン散乱によるガンマ線渦の発生
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 平義隆
2. 発表標題 非線形逆トムソン散乱を用いた軌道角運動量を運ぶガンマ線の発生
3. 学会等名 ビーム物理研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平義隆
2. 発表標題 円偏光高強度レーザーを用いた軌道角運動量を運ぶガンマ線渦の発生
3. 学会等名 研究会「光・物質・生命・宇宙におけるキラリティ」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平義隆
2. 発表標題 非線形逆トムソン散乱を用いたガンマ線渦の発生
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平義隆、加藤政博
2. 発表標題 円偏光レーザーによるガンマ線渦の発生
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
研究 分担者	神門 正城 (Kando Masaki) (50343942)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究 所 光子科学研究部・グループリーダー（定常） (82502)	

	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 協力者	加藤 政博 (Katoh Masahiro)		
研究 協力者	藤本 将輝 (Fujimoto Masaki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	保坂 将人 (Hosaka Masahito)		
研究協力者	李 志遠 (Ri Shien)		
研究協力者	小瀧 秀行 (Kotaki Hideyuki)		
研究協力者	林 由紀雄 (Hayashi Yukio)		
研究協力者	中新 信彦 (Nakanii Nobuhiko)		
研究協力者	黄 開 (Huang Kai)		
研究協力者	大東 出 (Daito Izuru)		
研究協力者	川瀬 啓悟 (Kawase Keigo)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	早川 岳人 (Hayakawa Takehito)		
連携研究者	香村 芳樹 (Kohmura Yoshiki) (30270599)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・ユニットリーダー (82401)	

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