

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12539

研究課題名(和文) テラヘルツ帯高強度コヒーレント遷移放射における波長可変光渦光源の研究

研究課題名(英文) Research on tunable wavelength optical vortex source in high-power terahertz coherent transition radiation

研究代表者

境 武志 (SAKAI, Takeshi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：20409147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、日本大学における電子線形加速器を用いて、テラヘルツ帯域の遷移放射の波長可変な光渦生成を目的としている。テラヘルツ波源は螺旋形状のアルミ製ターゲットで製作し、特異点周りでの断面内位相が何回転しているかを表わす量であるトポロジカルチャージは1とした。また、螺旋形状の可変機構に関しては、汎用のメカニカルシャッターをチタンへ改良して製作した。測定ではこのアルミの螺旋形状ターゲットをビームラインへ挿入し、遷移放射を発生させ、大気中へ取出した。大気中の水蒸気の影響があったが、スペクトル、2次元分布、パワー強度、ワイヤーグリッドを用いた偏光状態を測定でき、光渦と考えられる遷移放射光渦を測定できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに国内外で実施されている高強度短パルスレーザーやアンジュレーター、ジャイロトロン等を用いるようなテラヘルツ帯域の光渦生成とは違い、金属ターゲットを用いたテラヘルツ帯の遷移放射光渦生成が大学レベルの小型加速器を用いて可能になったことから、今後さらなる詳細測定、性質解明、利用実験など幅広く進めていくことで、応用研究も波及していくと思われる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to generate tunable THz-band vortex beam using a 100 MeV electron linac at the LEBRA, Nihon University. The THz coherent transition radiation vortex beam source was manufactured using aluminum with a helical target with a topological charge of 1. The topological charge represents the number of phase rotations within the cross-section around a singularity. A versatile mechanical shutter blade was modified with titanium to achieve the tunability of the helical structure. The aluminum helical target was inserted into the beamline to induce transition radiation, which was then extracted and measured in the atmosphere. Although influenced by absorption by atmospheric water vapor, the spectrum, two-dimensional distribution, power intensity, and polarization state were successfully measured using a wire grid, demonstrating the generation of the THz coherent transition radiation vortex beam.

研究分野：加速器科学

キーワード：テラヘルツ波 光渦 コヒーレント遷移放射 電子線形加速器

### 1. 研究開始当初の背景

近年、光渦やベクトルビームといった位相幾何学的な性質を持つレーザー光が幅広い波長帯で実現され、注目を集めている。軌道角運動量によって特徴付けられる光渦は、L. Allen らによって示され[L. Allen *et al.*, Phys. Rev. A 45, 8185, 1992.]、光学分野においては回折限界を超える誘導放出制御顕微鏡の基盤をなすなど、各分野での応用で活発に研究開発が進み、多くの応用研究が見いだされている。しかし、光渦の利用応用面では可視光領域では進んでいるが、テラヘルツ帯域での光渦の開発例は少ない。可視光同様にレーザーベースでの光源開発が主に進められているが、光渦発生に使用する光学素子の制約のため、波長は固定であり高強度光源の開発は困難な状況である。テラヘルツ帯の周波数は、電波と光の中間に位置している興味深い波長域であり、大きな分子郡などの固有振動に相当する帯域でもあるため、テラヘルツ帯の光渦には生体分子や高分子結晶の構造解析などの可視化も期待できる。このような背景から、テラヘルツ帯における高強度かつ波長可変な光渦の開発は学術的に非常に重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、テラヘルツ帯における高強度で波長可変な光渦の発生を目的としている。発生方法としては、金属ターゲットに電子ビームを当てて発生する高強度テラヘルツ帯のコヒーレント遷移放射光(CTR)において、螺旋形状のターゲットを用いて行う。また、ターゲット面の位置を調整することで位相条件の変更を行い、波長可変な光渦の生成及び、光渦状態の高強度テラヘルツコヒーレント遷移放射(THz-CTR)発生と本研究開発後の応用利用に向けた研究開発を目指す。

これまでの光渦の研究では、主に千葉大や北海道大学などで行われているような高強度ファイバーレーザー光源を用いて光渦を生成する技術が非常に進歩しており、多くの研究者が取り組んでいる。また加速器分野では、Spring-8、東北大、分子研などで、アンジュレーターの複数配置やヘリカル構造化、逆コンプトン散乱で用いるレーザー光源の円偏光化で発生させている。このように、これまでの既存の研究開発では、レーザー由来光源は、光学素子を使うことで波長を固定し且つ、光学素子の耐性もあるため、強度が弱い問題がある。また他の加速器光源ではアンジュレーターなどの開発、逆コンプトン散乱ではレーザー開発が必須であり、高コスト化、スペースの問題などが挙げられる。そこで本研究では、加速器で加速された自由電子レーザー発振などにも用いている質の良い電子ビームを金属ターゲットに当てることで生成されるテラヘルツ帯遷移放射の技術を応用し、厚さ方向に厚さを可変ならせん状の金属ターゲットを配置する新しい方法で光渦生成を目指す。このようなターゲットを用いる事で、生成方法、生成のための構成要素が非常に単純になる。さらに加速器ベースで発生させる光源であるため、マイクロパルス当りの強度が高いことから、高強度化も狙ったテラヘルツ帯遷移放射の光渦を生成させることが可能であると考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究は、日本大学工学部船橋校舎に設置されている電子線利用研究施設 LEBRA の電子線形加速器を用いて行う。LEBRA の電子線形加速器と各ビームラインの概要図を図 1 に示す。LEBRA における電子ビームは最大 100 MeV、マクロパルス幅 20  $\mu$ s、繰返し最大 10 Hz の加速が可能である。

通常の運転モードでのパンチ当りの電荷量は 30 pC 程度であるが、64 分周の間引き運転では 500 pC の高電荷量加速運転も可能である。このような電子ビームを用い、赤外領域の自由電子レーザーとコヒーレント X 線を発生させている。またこれらのビームラインではテラヘルツ領域のコヒーレントエッジ放射(CER)、コヒーレント遷移放

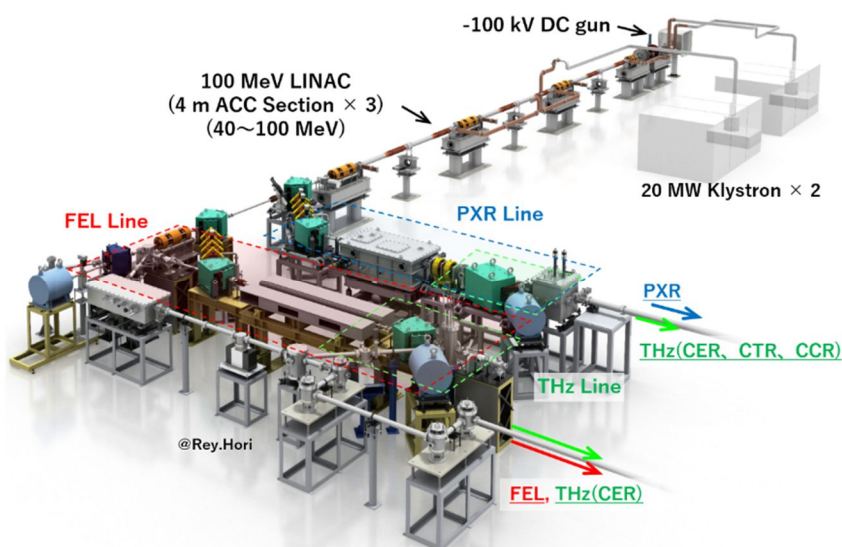


図 1: 日本大学電子線利用研究施設 LEBRA 電子線形加速器と各ビームラインの概要図。

射(CTR)、コヒーレントチェレンコフ放射(CCR)の発生も行っている。特にこのテラヘルツ波に関しては、常時立ち入り可能な放射線管理区域への輸送光学系をそれぞれ整備済みであり、自由電子レーザー、X線の重畳輸送が可能な、特徴あるビームラインとなっている。またこれら光源開発には、非常に安定で高品質な電子ビームが必要不可欠であるが、本研究に用いるための高精度な電子ビーム制御、輸送技術をこれまでの研究活動において確立しており、テラヘルツ帯のカメラ、パワーメーター、検波器など検出器も有している。またFELラインでは、自由電子レーザー発振を妨げない状態での、自由電子レーザー発振に寄与したビームからのテラヘルツ帯のコヒーレントエッジ放射の同時観測に世界で初めて成功し、テラヘルツ帯の同時測定に基づく自由電子レーザーの発振制御など、特殊な測定環境を構築している。このように、日本大学電子線利用研究施設LEBRAでは、加速器をベースとした高強度テラヘルツ帯コヒーレント遷移放射における波長可変光渦に関する研究開発に最適な電子ビーム、輸送光学系、計測環境が整っている。本研究では、このビームラインのうち、図2に示す既存のX線ビームラインの真空チェンバーに、螺線形状の金属ターゲットを設置し行う。測定系は、テラヘルツ帯域のパワーメーター、テラヘルツ帯域のカメラ、テラヘルツ帯域用のレンズ、移動ステージなどを用いて分光測定系を構築した。発生した遷移放射の光渦は真空チェンバー内から結晶石英窓を通して実験室へ取出し、各測定を行った。

#### 4. 研究成果

発生波長はこれまでの利用実験などの結果を参考に、現状の遷移放射発生系での測定結果において、最も強度の出ている波長帯域である0.5~1 THz付近とし、アルミ製の螺線形状ターゲットをトポロジカルチャージ1の場合で製作した。作成したターゲットをチェンバー内に設置している様子を図3に示す。螺線形状の変換機構に関しては、可変機構の構造が非常に複雑化することから、真空中でも使用可能な汎用のメカニカルシャッターを改良して製作を進めた。動作時の強度、電子ビームを当てた場合のターゲット面の構造維持のために、チタン薄板でシャッターブレードを改良し、真空中でも使用可能な構造とし製作できた。製作した可変機構のターゲットの外観を図4に示す。しかし真空中でのシャッター動作試験が真空チェンバー内で行えなかったため、光渦生成測定にはアルミ製の螺線形状ターゲットを用い、コヒーレント遷移放射光渦生成と測定を行った。施設ユーザー利用実験の測定系も活用することで、干渉計の構築、バンドパスフィルター、ワイヤーグリッド、テラヘルツ帯域用のツルピカレンズ、パワーセンサー、テラヘルツ帯域用カメラを用いた測定系を構築し、光渦生成と各測定を行った。測定系は図2のビームライン概要図に示した、ターゲット設置場所の真横に構築した。テラヘルツ帯域用カメラによる測定時の様子を図5に示す。パワーやスペクトルの測定なども同じ場所で行った。ビームラインの真横に測定系を組んだため、放射線の影響を抑えるために、鉛等で嚴重に覆っている。測定は加速器本体室内で行ったため、大気中の水蒸気による吸収の影響はあったが、スペクトル、

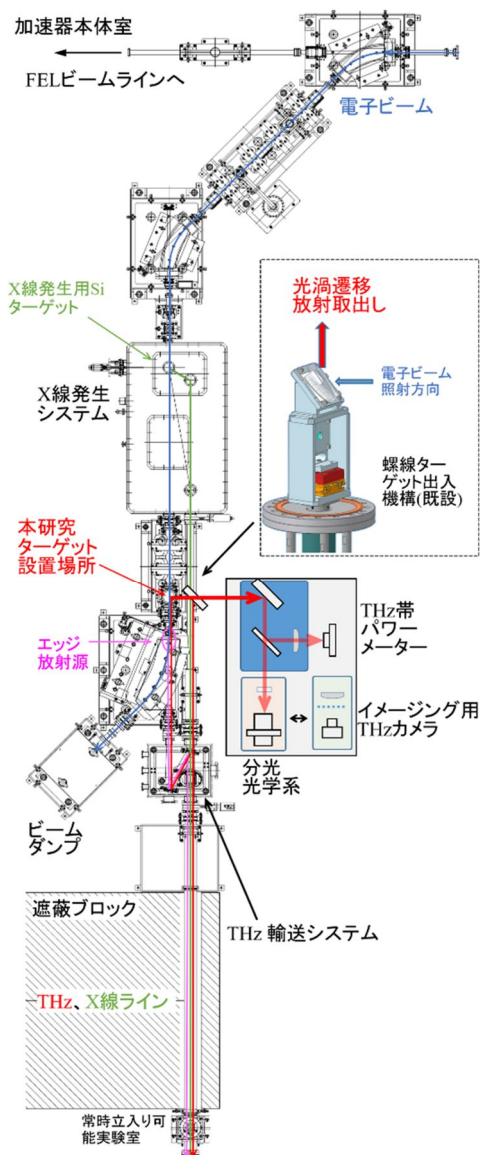


図2: パラメトリックX線放射ビームラインにおける測定系の配置と概要図。

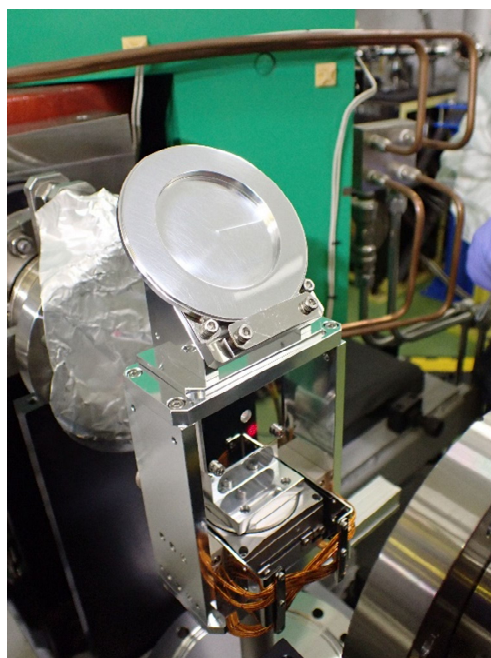


図3: アルミ製の螺線形状ターゲットの設置時の様子。ビームは写真右手から照射。



図4：汎用のメカニカルシャッターをチタン薄板のシャッターブレードに改良して製作した可変ターゲットの外観。

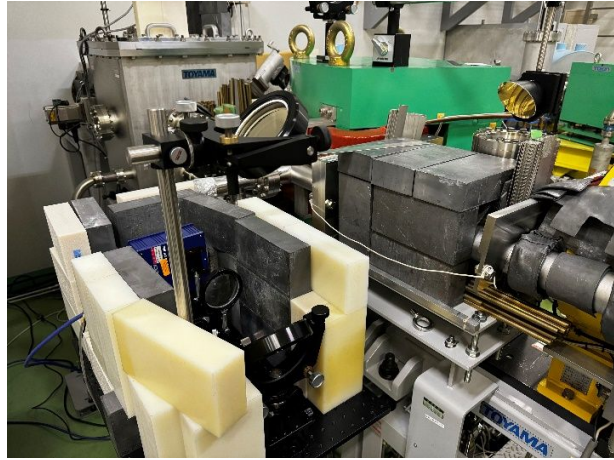


図5：ビームラインの横へ構築したテラヘルツ帯域用カメラによる測定系の様子。

2次元分布、パワー強度、ワイヤーグリッドを用いた偏光状態が測定できた。干渉計を用いて測定したスペクトルの例を図6に示す。2 THz以上は吸収による影響が非常に大きく、ノイズレベルとなっており、0.5~1.5 THzの範囲には代表的な水の大きな吸収による減衰の影響が見えているが、予定の周波数帯のテラヘルツ波の発生が確認できた。ターゲットに照射した電子ビームの条件は、ビームエネルギー100 MeV、ビーム平均電流：49 mA、パルス幅：4.0  $\mu$ s、繰り返し：5 Hzであった。光渦の次数の確認では、ツルピカレンズを用いて集光して行った。レンズを用いた対称性が崩れた光学系によって、エルミートガウスモードに変換されることからトポロジカルチャージ数が確認でき、集光した状態で測定した光渦と考えられる遷移放射光渦を測定できた。図7にレンズで集光時の分布の様子を示す。ワイヤーグリッドも使い、偏光状態の確認、レンズを用いた集光状態での測定ができたが、今後の課題として、ヤングの2重スリットを用いた方法 (S. Wada *et al.*, *Scientific Reports*, volume 13, Article number: 22962 (2023)) なども用いて、光渦の特徴とする性質を確認する必要があると考えられる。しかし本研究において、テラヘルツ帯の遷移放射光渦生成が加速器を用いて可能になったことから、さらなる詳細測定、性質解明、利用実験など幅広く進めていくことで、応用研究にも波及していくと考えられる。

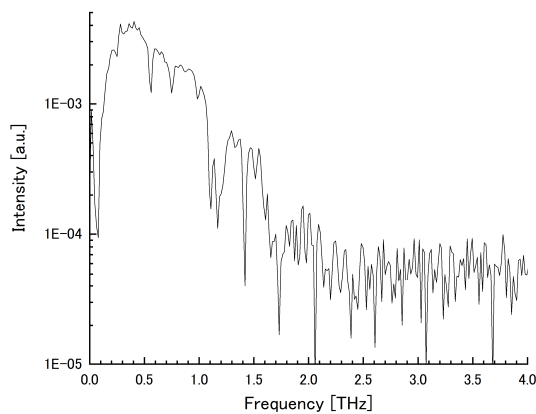


図6：干渉計を用いて測定したスペクトルの例。0.5~1.5 THzの範囲に多くの水の吸収による影響が見えている。

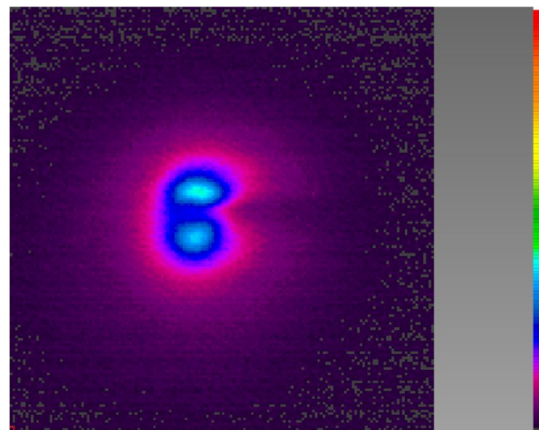


図7：レンズで集光時のテラヘルツ帯の遷移放射光渦の様子。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3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 境 武志, 清 紀弘, 早川 恭史, 住友 洋介, 早川 建, 田中 俊成, 野上 杏子, 高橋 由美子, 長瀬 敦	4. 巻 -
2. 論文標題 日本大学LEBRA電子線形加速器を用いた高強度テラヘルツ光源の研究開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 313-315
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 境武志, 早川恭史, 住友洋介, 清紀弘	4. 巻 31-2
2. 論文標題 日本大学電子線利用研究施設におけるコヒーレントエッジ放射の光源開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 77-83
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 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 野上 杏子, 早川 恭史, 境 武志, 高橋 由美子, 早川 建, 田中 俊成, 住友 洋介, 清 紀弘, 小川 博嗣, 古川 和朗, 道園 真一郎, 土屋 公央, 吉田 光宏, 諏訪田 剛, 福田 茂樹, 榎本 収志, 大澤 哲, 山本 樹, 新富 孝和	4. 巻 -
2. 論文標題 日本大学電子線利用研究施設の電子線形加速器の運転と光源の現状	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1095-1098
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 N. Sei, H. Ogawa, Y. Hayakawa, T. Sakai, Y. Sumitomo, T. Tanaka, K. Hayakawa, K. Nogami, Y. Takahashi, T. Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Design and Construction of an Intense Terahertz-Wave Source based on Coherent Cherenkov Radiation Matched to Circle Plane Wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 2751-2754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPA071	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 清 紀弘	4. 巻 18
2. 論文標題 コヒーレントエッジ放射が紐とく電子パンチ形状	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 加速器	6. 最初と最後の頁 72~80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.50868/pasj.18.2_72	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 境 武志	4. 巻 34-3
2. 論文標題 日本大学 LEBRA 共同利用施設における加速器開発とその応用利用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本放射光学会誌	6. 最初と最後の頁 153-162
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 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 境 武志, 清 紀弘, 早川 恭史, 住友 洋介, 早川 建, 田中 俊成, 野上 杏子, 高橋 由美子, 斉藤 広斗, 廣原 匠	4. 巻 -
2. 論文標題 日本大学電子線利用研究施設PXRラインにおけるテラヘルツ光源の研究開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第18回日本加速器学会年会	6. 最初と最後の頁 568-571
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8件(うち招待講演 2件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 境武志, 早川恭史, 住友洋介, 清紀弘
2. 発表標題 日本大学電子線利用研究施設におけるコヒーレントエッジ放射の光源開発
3. 学会等名 日本赤外線学会第95回定例研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清 紀弘, 早川 恭史, 境 武志, 住友 洋介, 高橋 由美子, 早川 建, 田中 俊成, 野上 杏子, 全 炳俊, 大垣 英明
2. 発表標題 自由電子レーザーが誘起するコヒーレントエッジ放射変調の観測
3. 学会等名 第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 境 武志, 清 紀弘, 早川 恭史, 住友 洋介, 田中 俊成, 早川 建, 高橋 由美子, 野上 杏子
2. 発表標題 日本大学LEBRAにおけるテラヘルツ光源開発とその応用利用
3. 学会等名 第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 境 武志, 清 紀弘, 早川 恭史, 住友 洋介, 早川 建, 田中 俊成, 野上 杏子, 高橋 由美子, 長瀬 敦
2. 発表標題 日本大学LEBRA電子線形加速器を用いた高強度テラヘルツ光源の研究開発
3. 学会等名 第19回加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上 杏子, 早川 恭史, 境 武志, 高橋 由美子, 早川 建, 田中 俊成, 住友 洋介, 清 紀弘, 小川 博嗣, 古川 和朗, 道園 真一郎, 土屋 公央, 吉田 光宏, 諏訪田 剛, 福田 茂樹, 榎本 収志, 大澤 哲, 山本 樹, 新富 孝和
2. 発表標題 日本大学電子線利用研究施設の電子線形加速器の運転と光源の現状
3. 学会等名 第19回加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清 紀弘、小川 博嗣、早川 恭史、境 武志、住友 洋介、田中 俊成、早川 建、高橋 由美子、野上 杏子、山添 亮、木下 耀、大谷 昭仁、川島 雄介、金田 隆、全 炳俊、大垣 英明
2. 発表標題 高強度コヒーレントエッジ放射光源の開発及び利用研究
3. 学会等名 第30回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清紀弘
2. 発表標題 赤外自由電子レーザー施設におけるTHz帯コヒーレントエッジ放射源の開発
3. 学会等名 2021年度ビーム物理研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 境 武志、清 紀弘、早川 恭史、住友 洋介、早川 建、田中 俊成、野上 杏子、高橋 由美子、齊藤 広斗、廣原 匠
2. 発表標題 日本大学電子線利用研究施設PXRラインにおけるテラヘルツ光源の研究開発
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021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	清 紀弘  (SEI Norihiro)  (20357312)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・上級主任研究員   (82626)	

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