

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03473

研究課題名(和文) 回折放射による大強度テラヘルツベクトルビーム

研究課題名(英文) High power terahertz vector beam by diffraction radiation

研究代表者

本田 洋介 (Honda, Yosuke)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：40509783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ光と呼ばれる周波数1THz付近には、特徴のある光源が少ない。最新の電子線形加速器は大強度のテラヘルツ光を発生できる可能性があり、また放射のメカニズム次第で特徴のあるテラヘルツ光を得ることもできる。コンパクトERL試験加速器において回折放射によるコヒーレントテラヘルツ光を発生し、それを加速器遮蔽の外の実験室まで輸送するビームラインを構築した。ビーム運転調整によって、パンチを圧縮し、強いコヒーレント放射を発生する条件を確立し、回折放射標的の穴あきミラーを通過する条件を確立した。輸送先でのテラヘルツ光のプロファイルを測定し、損失なく、空間分布の特徴を保って輸送できる状態を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ光と呼ばれる、周波数1THz付近の領域は、身近な多くの現象の基本的なエネルギースケールである。例えば、分子構造の振動や回転モードのエネルギー準位に対応し、その励起、脱励起はテラヘルツ光を伴う。テラヘルツ光を照射して、これらのモードを選択的に励起することにより、熱平衡状態では実現しない物質の新たな機能を見いだすことができる。テラヘルツ光領域では強度はもちろん、特徴的な光源が少ない。回折放射は偏光特性が空間的に特徴を持つベクトルビームと呼ばれる光の一種である。テラヘルツの領域の特徴的な光源として、応用可能性が広がる。さらに、本方式は連続運転超伝導加速器により大強度化の可能性もある。

研究成果の概要(英文)：The technologies of the light source in the spectrum range of around 1 THz have not been established. The modern electron accelerators have a possibility to be a high power terahertz source. We have developed a terahertz source based on coherent diffraction radiation mechanism at compact ERL test accelerator.

We have established the beam tuning to realize short bunch beam for efficiently produce coherent radiation in the terahertz range, and to path the beam through a hole mirror target which is the source of the diffraction radiation. The radiation was transported through a newly built vacuum transport line to the experimental room located outside of the accelerator. The spatial profile of the terahertz radiation was measured. The characteristic donuts shape and radial polarization were confirmed by the measurement. It shows efficient transport of the accelerator based terahertz radiation for application experiments.

研究分野：加速器

キーワード：テラヘルツ 電子加速器 レーザー ベクトルビーム 超伝導加速器

## 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ光と呼ばれる、周波数 1THz 付近の領域は、身近な多くの現象の基本的なエネルギースケールである。例えば、分子構造の振動や回転モードのエネルギー準位に対応し、その励起、脱励起はテラヘルツ光を伴う。テラヘルツ光を照射して、これらのモードを選択的に励起することにより、熱平衡状態では実現しない物質の新たな機能を見いだすことが出来る。

テラヘルツ光は、高周波技術と光学技術の境界にあって、光源が未発達である。強度はもちろん、特徴的な光源が少ない。近年、ベクトルビームと呼ばれる光の新しい自由度が注目されている。これは、偏光特性が空間的に特徴を持った分布をする光である。例えば、光渦とよばれるものは、らせん状の位相面を持っており、軌道角運動量を持つ。テラヘルツの領域で、ベクトルビームの特徴をもつ光源があれば、応用が広がる。

近年、レーザー技術によるテラヘルツ光源の開発が進んでいる。一方で、電子加速器によるテラヘルツ光源の研究も行われてきた。電子加速器が連続運転できれば、そのまま大平均強度テラヘルツ光源となり得るのが、電子加速器光源の利点である。従来の常伝導加速器はパルス動作であるのにたいし、近年発達している超伝導加速器は連続動作が可能で、大強度テラヘルツ光源の応用に適している。

## 2. 研究の目的

超伝導加速器の試験施設である、KEK のコンパクト ERL 加速器において、大電流ビームに適用できる、コヒーレント回折放射のメカニズムでテラヘルツ光を発生し、そのベクトルビームとしての特長を示すことで、加速器テラヘルツ光源による大強度テラヘルツベクトルビームの応用可能性を示す。

回折放射は、相対論的荷電粒子ビームが導体境界を通過する際に発生する電磁波である。ここではとくに、穴あき金属ミラーを電子ビームが通過する状況を考える。電子ビームはミラーに衝突せず破壊されないため、大電流の電子ビームに対応出来、大強度化が可能である。回折放射はミラーからドーナツ状の角分布を持つ、ラジアル偏光で放射される。これはベクトルビームの一種であり、通常の高スカラーモードとは異なる。偏光の空間分布と高次横モードの強度分布の特徴を持つ。

電子ビームからの電磁波の放射は、電子バンチのバンチ長が放射の波長と比べて短い場合、コヒーレントになり、バンチ電荷の 2 乗に比例する強度が得られる。これは、バンチ電荷に比例するインコヒーレント放射と比べて圧倒的に強い。強い放射を得るために短バンチ電子ビームを実現するには、最新の高性能電子加速器とバンチ圧縮技術が必要である。また、回折放射の穴あきミラーを通過させるために、良質のビームが必要である。コンパクト ERL 加速器は、高性能電子銃を有しており低エミッタンスビームを発生できる、さらに設計段階からバンチ圧縮を想定し建設されており、最適な施設である。また、連続運転ができる超伝導加速器であり、大強度化も可能である。図 1 に、コンパクト ERL 加速器と本実験装置のレイアウトを示す。

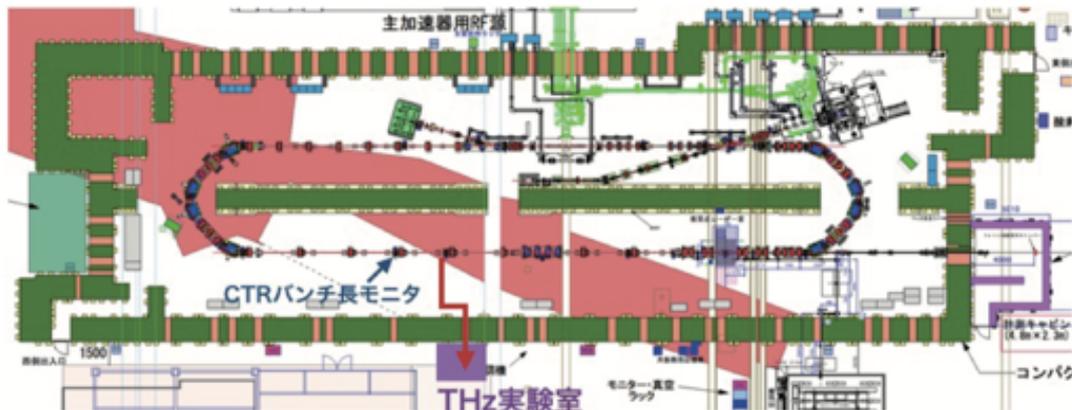


図 1: コンパクト ERL とテラヘルツ実験室

## 3. 研究の方法

コンパクト ERL 加速器において、短バンチビームが得られる周回部の直線部に、回折放射の発生源となる穴あきミラーシステムを設置した。これは、ビーム軸にたいして 45 度傾いた穴あき

ミラーをビーム軸上に挿入および引き抜きと、そこでのビームサイズを測定するスクリーンモニタが一体となった真空導入システムである。テラヘルツ光はビーム軸と直交方向に発生し、テラヘルツ帯域に透過率をもつ石英窓を通過して大気中に取り出される。

測定は加速器の放射線シールドの外にある実験室で行うため、テラヘルツ光をそこまで輸送するビームラインを製作した(図2)。テラヘルツ光は大気による吸収が大きいので、真空輸送路が必要である。また、テラヘルツ光は波長が長く回折効果が大きいため、輸送路の開口は大きくとり、途中で収束システムを設置して伝搬させる必要がある。輸送の際に損失なく効率よく、ベクトルビームの空間的特徴を保つようにしなければならない。

ビーム実験では、電子ビームを調整して穴あきミラーを損失無く通過する手順の確立する。さらに、加速器の加速空洞のRF位相とアーク部の分散を制御するバンチ圧縮運転を確立し、コヒーレント放射の強度を最大化する。発生した回折放射の発散を、まず輸送前の上流部で調整したうえで輸送路に入力し、輸送路出口での空間分布を測定する。図3に、輸送路の上流で光の発散を調整するために開発した光学系を示す。多軸を遠隔操作する多数のレンズとミラーで構成されている。輸送路を調整して、損失なく輸送する条件を確立する。実験室で得られたテラヘルツ光の空間分布や偏光分布を測定し、ベクトルビームの特徴を確認する。

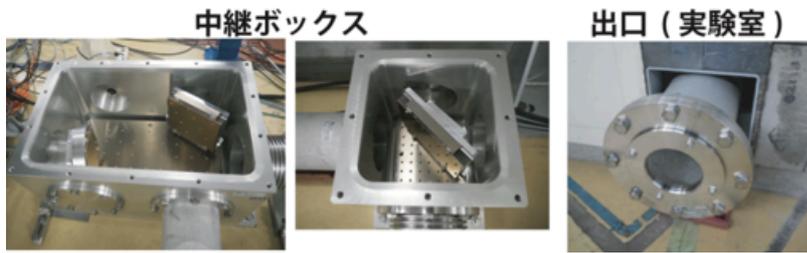
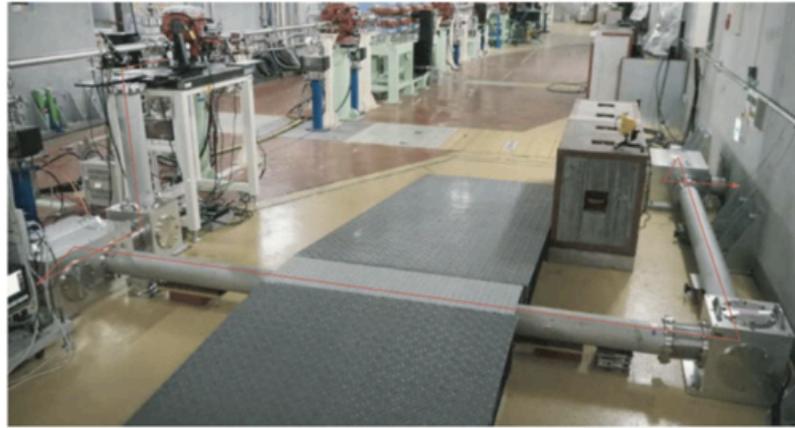


図 3: 製作したテラヘルツ輸送路

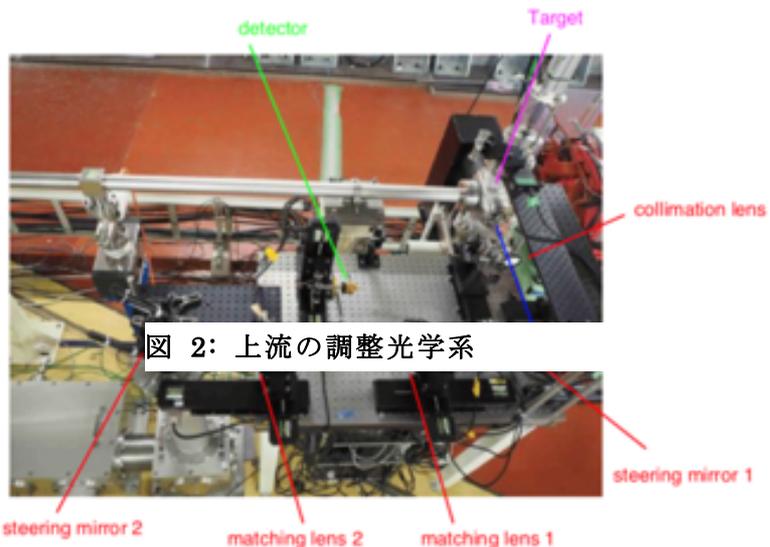


図 2: 上流の調整光学系

#### 4. 研究成果

コンパクト ERL のビーム運転において、それまでの運転電荷から大幅に大電荷した条件である、バンチ電荷 60pC の条件でビーム調整を行った。コヒーレント放射は電荷の2乗に比例するため、バンチ長などの質が保たれるのであれば大電荷になると圧倒的に強度が上がるためである。60pC のバンチ電荷でビームエミッタンスを保って周回する調整に成功した。また、バンチ

圧縮の調整によりテラヘルツ放射強

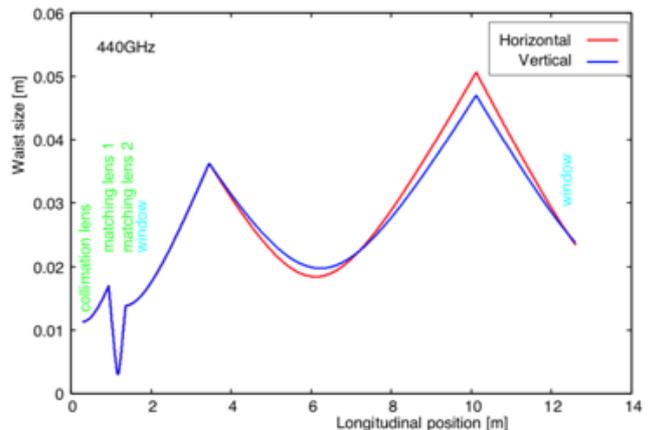


図 4: テラヘルツ輸送光学設計

度を最適化することも出来た。しかし同時に、バンチ圧縮する際に、マイクロバンチ不安定性が発生し、完全にバンチ全体を短バンチ化することは困難であることも判明した。これは、縦方向空間電荷効果に起因する現象で、シミュレーションによる検討でも再現されている。ストリークカメラ装置を持ち込んで可視光領域のインコヒーレント遷移放射を観測し、バンチ長が理想的には短くなってはいないことが、実験的にも確認した。この測定は、テラヘルツ輸送路を可視光輸送に転用して遂行できた。

テラヘルツ輸送調整は、ダイオード検出器を2次元スキャンして空間形状を確認しながら、上流から調整を進めた。図4に示す輸送光学系を設計し、実験的にもこれと一致するサイズで伝搬出来ていることを確認し、損失なく輸送する状態を確立した。

最終的な輸送後のテラヘルツ光の観測には、画像で取得できるテラヘルツカメラを導入した。図5に測定のセットアップを示す。

図6はテラヘルツカメラで測定された回折放射(CDR)および遷移放射(CTR)のプロファイルである。CDRはビームを穴あきミラーに通過させ、破壊しない条件である。CTRは、ミラーに衝突させた条件である。CTRがやや強度が高いものの、CDRでも同程度の強度が得られており、ビームを破壊せずにテラヘルツ光を取り出せることを示している。これは、将来的に大電流運転で

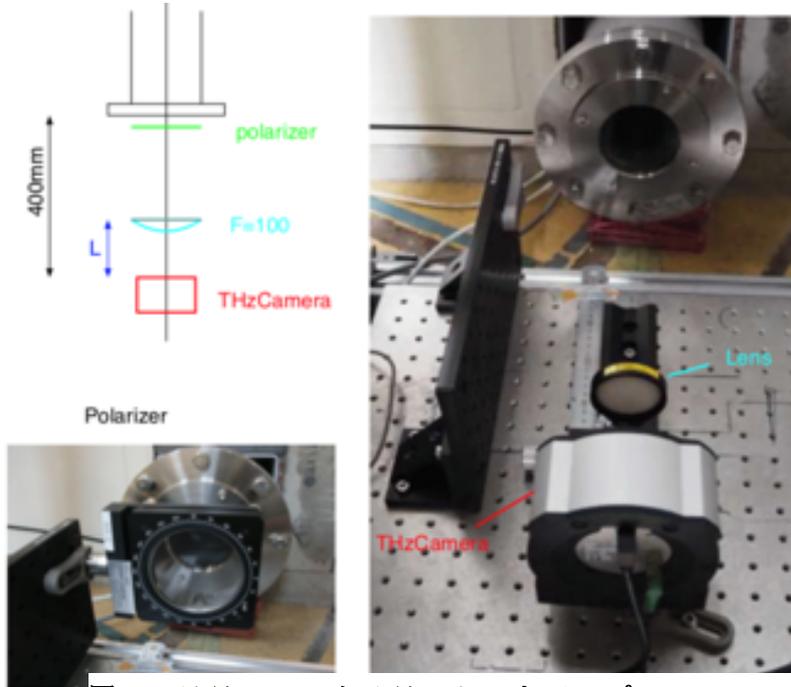


図6: テラヘルツカメラのセットアップ

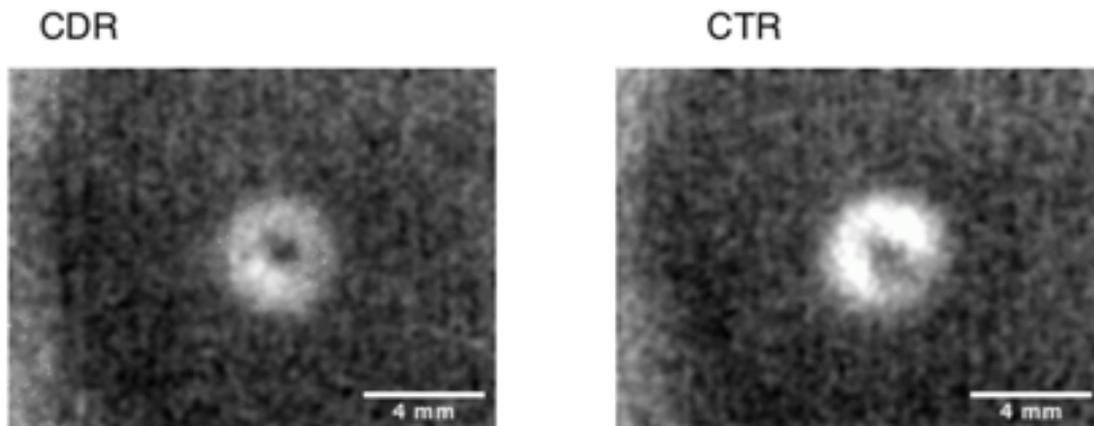


図5: カメラで測定されたプロファイル

大強度テラヘルツ光源が実現できる可能性を示すものである。また、ラジアル偏光ビームの特徴である、ドーナツ型の形状の空間分布が得られており、空間的な特徴を失うことなく、輸送路で伝搬出来ていることを示している。

ベクトルビームの特徴は、空間的に偏光条件が分布していることである。ラジアル偏光は強度だけに注目するとドーナツ型だが、直線偏光に分解すると2山分布になる。カメラの上流にワイヤグリッド偏光板を設置し、それを回転させてプロファイルを観測した結果を図7に示す。確かに2山分布になり、それが偏光方向に依存して向きを変えることが確認できた。

一連の研究を通して、加速器テラヘルツ光源において必要な、テラヘルツ発生システムとテラヘルツ光の輸送技術が確立した。また、短バンチ生成のビーム調整手法の確立とビームダイナミクスの理解も進んだ。実際にテラヘルツ光の観測も行い、ベクトルビームとしての特徴を確認した。ここまでのビーム実験は、高バンチ電荷条件ではあるものの、パルス運転モードであり、平均電流は制限され

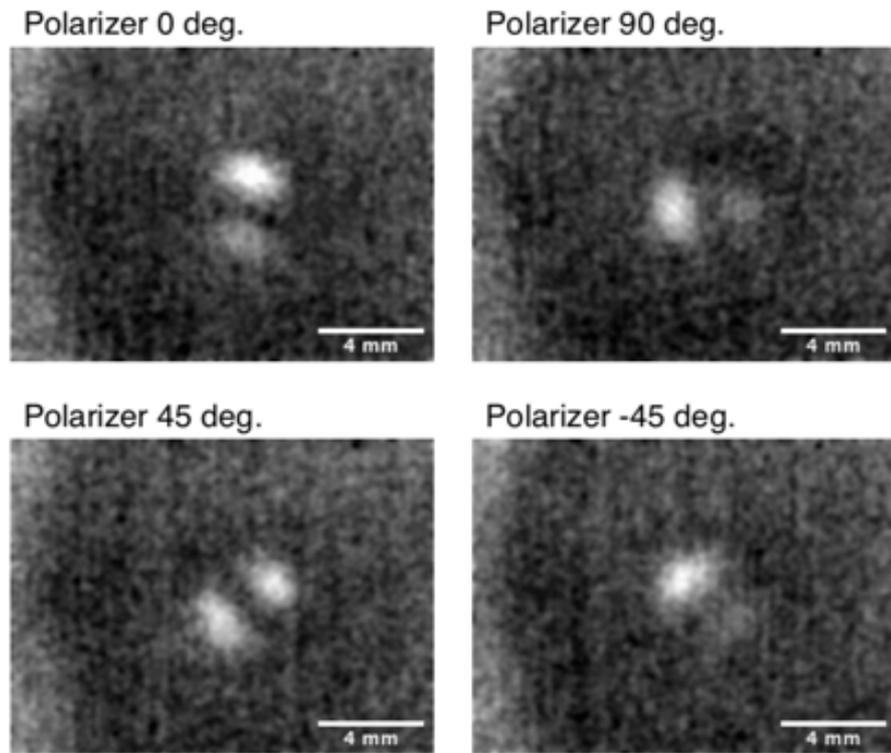


図 7: 偏光板を通過した回折放射のプロファイル

ていた。実際に大強度光源を確立するには、大電流連続運転が必要である。その場合、僅かのビーム損失でも放射線遮蔽上の問題になり得るので、慎重なビーム調整が必要になる。大電流連続運転におけるテラヘルツ光発生の実証は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 3件）

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Y. Honda, M. Shimada, A. Aryshev, R. Kato, T. Miyajima, T. Obina, R. Takai, T. Uchiyama, N. Yamamoto | 4. 巻<br>22          |
| 2. 論文標題<br>High-efficiency broadband THz emission via diffraction-radiation cavity                             | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Accelerator and Beams  | 6. 最初と最後の頁<br>40703 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/physrevaccelbeams.22.040703   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Y. Honda, A. Aryshev, R. Kato, T. Miyajima, T. Obina, M. Shimada, R. Takai, T. Uchiyama, N. Yamamoto          | 4. 巻<br>1350        |
| 2. 論文標題<br>Stimulated emission of THz coherent diffraction radiation in an optical cavity by a multibunch electron beam | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physics: Conf. Series  | 6. 最初と最後の頁<br>12038 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1088/1742-6596/1350/1/012038  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Y. Honda, M. Shimada, A. Aryshev, R. Kato, T. Miyajima, T. Obina, R. Takai, T. Uchiyama, N. Yamamoto                 | 4. 巻<br>121          |
| 2. 論文標題<br>Stimulated excitation of an optical cavity by a multibunch electron beam via coherent diffraction radiation process | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>Phys. Rev. Lett.   | 6. 最初と最後の頁<br>184801 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevLett.121.184801  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Y. Honda               |
| 2. 発表標題<br>共振器型誘導回折放射における共振器設計の比較 |
| 3. 学会等名<br>日本加速器学会年会              |
| 4. 発表年<br>2019年                   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda                   |
| 2. 発表標題<br>cERLにおけるCDRテラヘルツビームラインの製作 |
| 3. 学会等名<br>日本加速器学会年会                 |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda  |
| 2. 発表標題<br>Stimulated Emission of THz Coherent Radiation in an Optical Cavity by a Multibunch Electron beam |
| 3. 学会等名<br>International Particle Accelerator Conference (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda   |
| 2. 発表標題<br>THz source development at KEK ERL   |
| 3. 学会等名<br>SPECTROSCOPY AND IMAGING WITH THZ RADIATION USING ULTIMATE RADIATION SOURCES (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Miho Shimada  |
| 2. 発表標題<br>High-Efficiency Broadband THz Emission via Diffraction-Radiation Cavity |
| 3. 学会等名<br>Energy Recovery Linac 2019 (招待講演) (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Honda  |
| 2. 発表標題<br>Stimulated Emission of THz Coherent Diffraction Radiation |
| 3. 学会等名<br>International Free Electron Laser Conference (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda                        |
| 2. 発表標題<br>共振器型回折放射による広帯域テラヘルツ自由電子レーザーの発振 |
| 3. 学会等名<br>日本加速器学会年会                      |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda                   |
| 2. 発表標題<br>cERLにおけるCDRテラヘルツビームラインの計画 |
| 3. 学会等名<br>日本加速器学会年会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda   |
| 2. 発表標題<br>Observation of Resonant Stimulated Radiation from a Multi-bunch Electron Beam Passing Through an Optical Cavity |
| 3. 学会等名<br>LINAC2018 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda                    |
| 2. 発表標題<br>コンパクトERLにおけるCDRテラヘルツビームライン |
| 3. 学会等名<br>放射光学会                      |
| 4. 発表年<br>2019年                       |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda                 |
| 2. 発表標題<br>共振器型回折放射による広帯域テラヘルツ放射発生 |
| 3. 学会等名<br>物理学会                    |
| 4. 発表年<br>2019年                    |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Y.Honda             |
| 2. 発表標題<br>cERLにおける テラヘルツ光源の開発 |
| 3. 学会等名<br>日本加速器学会年会           |
| 4. 発表年<br>2020年                |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|   |
|---|
| KEK超伝導加速器利用推進チーム<br><a href="http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/">http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/</a> |
|---|

## 6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                                  | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                      | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究協力者 | 島田 美帆<br><br>(Shimada Miho)<br><br>(10442526)              | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・講師<br><br><br><br>(82118)  |    |
| 研究協力者 | 宮島 司<br><br>(Miyajima Tsukasa)<br><br>(50391769)           | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授<br><br><br><br>(82118) |    |
| 研究協力者 | 帯名 崇<br><br>(Obina Takashi)<br><br>(60290855)              | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授<br><br><br><br>(82118)  |    |
| 研究協力者 | 高井 良太<br><br>(Takai Ryota)<br><br>(20533780)               | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授<br><br><br><br>(82118) |    |
| 研究協力者 | 山本 尚人<br><br>(Yamamoto Naoto)<br><br>(60377918)            | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教<br><br><br><br>(82118)  |    |
| 研究協力者 | アリシェフ アレクサンダー<br><br>(Aryshev Alexander)<br><br>(70801588) | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教<br><br><br><br>(82118)  |    |

## 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 |
|---------|---------|