

令和 3 年 8 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01070

研究課題名(和文) 可干渉アンジュレータ超放射の光電場重畳による偏光制御の研究

研究課題名(英文) Polarization control for crossed-undulator superradiance

研究代表者

濱 広幸 (Hama, Hiroyuki)

東北大学・電子光物理学研究センター・教授

研究者番号：70198795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 40,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、直線から円偏光まで任意の偏光操作が可能なテラヘルツ(THz)光源実現を目指したものである。超短パルス電子ビームが2つのアンジュレータ(交叉型アンジュレータシステム)を通過して放つ、2つのコヒーレント放射を重畳して得られるTHz光の強度や偏光の特性と、交叉型アンジュレータ中のビーム動力学を理論的・実験的に研究した。偏光度は放射の角度分布に極めて敏感であり、光速より僅かに遅い低エネルギー電子と放射の位相とのずれは無視できず、慎重なガイド磁場のデザインが必須であることが明確になった。これらを十分考慮することで、当初目標としたような偏光可変THz光源が実現可能であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鏡像異性体が互いに異なる性質を持つキラリティ(chirality)は自然における対称性破れの一つであり、生命科学や創薬分野で重大な事象と認識されている。また円偏光を制御した光で分子合成時のキラリティ操作が可能であり、磁場と分子のスピンの軌道角運動量相互作用によるカイラル分子の機能発現制御などが注目されている。DNAなどの生体高分子の振動や分子間相互作用の共鳴波長域であるTHz光を用いたカイラル生体高分子の識別やその円二色性(左右円偏光に対する応答の違い)から分子機能発現を調べることや、鏡像ペアのどちらかを選択的に振動励起するなど、生体高分子に関する知見の蓄積から将来の医療革新も期待できる。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to establish understanding for variable polarized Terahertz (THz) radiation source. In addition to theoretical and experimental study on characteristics of polarized radiation of which is superimposed electric fields of two coherent radiations emitted from an ultra-short electron beam passing thorough the crossed undulator system, the beam dynamics under the magnetic field of the undulator system was studied. It was found out that the degree of polarization is pretty sensitive to the radiation angle, and small slippage between the radiation and the electrons that is a bit slower than the velocity of light is not negligible. Consequently a fully considered and perfected design of the guide magnetic field including the undulators is absolutely necessary for the accelerator-based variable polarized THz source to be attained.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：コヒーレント放射 テラヘルツ光 電子加速器 交叉型アンジュレータ 偏光操作

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 鏡像異性体が互いに異なる性質を持つカイラリティ (**chirality**、キラリティ、掌性とも呼ぶ) は自然界における対称性破れの一つであり、生体分子から素粒子といったさまざまな階層で発現する。分子の鏡像異性体が互いに異なる化学的性質や機能を持つ事は、例えば創薬分野では機能発現を左右する重大な事象と認識されている。生体内で合成されるアミノ酸は全て左手系であり、その理由は解明されていないが、最近の研究では生体内で鏡像異性体である右手系に変化したアミノ酸の蓄積が加齢による疾患と相関する事が分かって来た。また円偏光の左廻り/右廻り (ヘリシティ) を制御した光で分子合成時のカイラリティ操作が可能である報告があり、円偏光が持ち込む磁場と分子のスピン-軌道角運動量との相互作用がカイラル分子の機能を制御できる可能性が注目されており、物質のカイラリティは重要な特性情報の一つである。

(2) カイラリティに関する光科学研究はこれまで紫外-赤外波長領域を中心に研究されており、最近では軟X線での測定もあるが、DNAなどの生体高分子の振動や分子間相互作用の共鳴吸収波長域であるテラヘルツ (THz) 光を用いたカイラル生体高分子の識別やその円二色性 (左右円偏光に対する応答の違い) から分子機能発現を調べることや、円偏光 THz 光によって鏡像ペアのどちらかを選択的に振動励起することは興味深い。円二色性は非常に僅かな応答の差異であるため、円偏光の右-左廻り (ヘリシティ) を短時間で切り替えを繰り返して観測しなくてはならないが、一般に速い偏光制御は容易ではないため THz 域でのカイラル高分子研究例は非常に少なく、偏光制御はテラヘルツ科学の発展に向けて大きな課題の一つである。

### 2. 研究の目的

(1) 電子加速器からの電子ビームは一般的に進行方向に数ピコ秒の塊 (バンチ) 形状であるが、これを 100 フェムト秒程度まで圧縮することで、縦方向にも横方向にも干渉性が高いコヒーレント放射が得られる。本研究グループではこれまで開発してきた 50MeV 試験電子線形加速器 (t-ACTS) を用いて 80 フェムト秒 (24  $\mu\text{m}$ ) のバンチ長の電子ビーム生成技術を確立している。このような短パルス電子ビームがアンジュレータと呼ぶ周期磁場を通過して放つ超放射 (super-radiance) は縦方向に単一モードの電磁波であるが、この性質を利用して光電場を重ね合わせることで、円偏光からだ円偏光および直線偏光まで自在な偏光操作が可能であることを明らかにすることが、本研究の第一の目的である。

(2) 互いに偏光方向が直交する2つの直線偏光超放射を発生させる交叉型アンジュレータと呼ぶユニークな光源装置の概念設計を行い、電子ビーム動力学および放射光源物理の観点から詳細な特性評価を行う。短パルス電子ビームが放つ位相が揃った2つの高強度コヒーレント放射の光電場重畳による偏光操作の可能性を追求し、円偏光ヘリシティ (右廻り/左廻り) の高速スイッチングや、数十ピコ秒パルス内で偏光切り替えなどの機能を詳細に探ることが第2の目的である。この偏光制御手法の実験的研究を進展させる事で、THz 域における生体高分子の鏡像異性体の存在比の偏りの検出等様々な研究分野への貢献が期待できる。

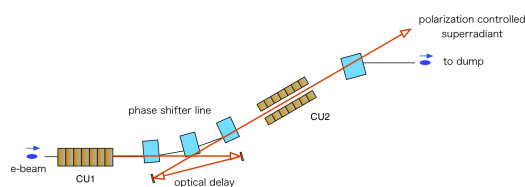


図1 交叉型アンジュレータシステム概念図

### 3. 研究の方法

(1) 【短パルス電子ビーム生成とビーム診断】短パルス電子ビーム生成用に独自開発した独立2空洞型高周波電子銃を装備した試験加速器 (t-ACTS) ではバンチ圧縮試験を終えており、研究環境は概ね整っていることから、独自開発した放射シミュレーターやビーム動力学計算コードを用いて実験データと互いにフィードバックして安定なフェムト秒電子パルス生成技術を確立する。そのために遷移放射やチェレンコフ放射を利用したバンチ長・ビームサイズ計測等のビーム診断系の高度化を推進する。

(2) 【交叉アンジュレータ】交叉アンジュレータの磁気回路設計および位相シフターも含めたシステム全体を設計する。アンジュレータ部はネオジウム系永久磁石を用いて、t-ACTS 加速器のビームエネルギー範囲で共鳴周波数が 0.5 から 3THz 程度までカバーするようにした、周期数7の交叉アンジュレータを精密設計。2台のアンジュレータから構成されるが、磁場強度にある程度の誤差が存在し得るので、磁場強度を変えるギャップを各々独立に調整出来るようにして両者の共鳴波長を合致させるが、本研究で用いるアンジュレータはシンプルな機械的構造でギャップを手動で変える機能で十分である。

(3) 【THz 超放射偏光特性】電子からの放射については、Lienard-Wiechert ポテンシャル逐次

積分する計算コードおよびマックスウェル方程式の時間発展を時間領域差分法で計算するコードを開発・整備し、製作・設置したアンジュレータからの超放射の特性を調べる。偏光度についてはストークスパラメータを用いて特性評価を行うが、重畳した超放射の強度と偏光度がどのような関係を示すのか、マルチパラメータで詳らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 交叉型アンジュレータのパフォーマンス評価をを睨んで、電子からの放射の数値シミュレーション計算を行うために波動方程式から Lienard-Wiechert ポテンシャルを積分するコードを3次元磁場計算コードである Radia (フリーウェア) と結合したプログラムを開発した。これによって、実際のアンジュレータ磁場に近い磁場分布における電子ビームの軌道と超放射の特性を精密に知ることができ、例えば不正磁場が存在した時にビーム挙動と超放射の質的变化を予測することが可能である。また、このコードとは完全に独立でアンジュレータの磁場計算を行い、放射を計算する3次元コードを開発済みであったため計算結果のクロスチェックが可能になり、非常に良い整合性を得られた。

(2) 超短パルス電子ビーム生成用加速器 t-ACTS から安定にコヒーレント THz 放射を得るために運転パラメータの最適化に加え、電子ビームの診断系を整備した。t-ACTS においては速度圧縮法 (Velocity Bunching) によりバンチ圧縮を行い、放射スペクトルが 3.5THz におよぶ広帯域のコヒーレント遷移放射と狭帯域のコヒーレントアンジュレータ放射 (超放射) の発生を確認した。3THz 以上のコヒーレント放射を安定に得られる加速器施設は世界的に僅かしかないので、t-ACTS は極めて特徴的な THz 光源施設と言える。また、チェレンコフ光を用いたバンチ長測定を試みた研究では、従来にはない高効率な非線形反射鏡 (球面と放物線を組み合わせた反射鏡) で集光する光学系は極めて有用である事が実験的に示された。

(3) 共鳴波長を約  $150\mu\text{m}$  (周波数では 2THz) として、実証実験に用いる周期長 8cm、周期数 7 の交叉型アンジュレータシステムの詳細磁場設計を行い、プロトタイプ器を製作した。実証実験に最適化するために、2台とも全く同一構造の固定ギャップのシンプルな構造とした。磁場測定結果は計算とよく一致した。共鳴が長波長であるため、磁場精度に問題は全くない。この交叉型アンジュレータから理論的にどの程度の偏光度を得られるか (1) で開発した数値シミュレーションコードを用いて検討した。光の横方向モード特性を示すストークスパラメータを用いて偏光状態や偏光度を詳しく調べた結果、理想的な電子ビームと周期数が無限大アンジュレータを用いた場合、観測臨み角が約 2mrad の範囲で 100% の円偏光度が得られる事が明らかになったが、周期数 7 の交叉型アンジュレータシステムでは円偏光度が 92%程度に低下すると見積もられたが、本質的に影響を及ぼすほど大きな量ではないと結論づけられる。

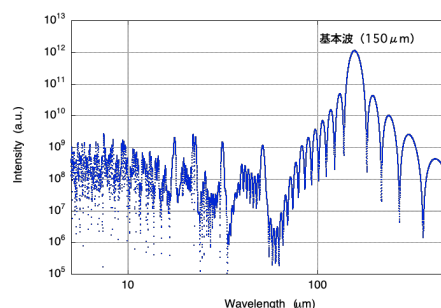


図2 交叉型アンジュレータからの超放射

(4) 一つの超放射を電子ビームより遅らせて2台目のアンジュレータの超放射とオーバーラップさせるために反射鏡を用いてメカニカルに位相制御を行う機能を持つファーズシフター内の電磁石配列を、ビームダイナミクス計算を精密に行って設計した。その結果、偏光度は電子加速器のチューニングに大きく依存し再現性が乏しいという、やや想定外の事象が露わになった。これは電子ビーム速度が光速の 99.973% と完全に光速に至っていないため、自由空間においても非常に僅かな縦方向位相空間分布の変化があることが主たる原因であることが判明した。また、通常は無視されるアンジュレータ磁場内でのエネルギー分散効果も偏光度に影響を与えることが分かった。原因・理由が明らかになったため、電子ビームの位相空間を制御するビーム輸送ガイド磁場の策定作業を進めた。その結果、実際に加速器のチューニング手法を確立することができ偏光操作実証の目処が立った。

(5) 本研究が用いる電子ビームのエネルギーは 22MeV とさほど高くないため、アンジュレータ放射の角度広がり大きい。そのため観測点が軸上から外れると偏光度は変化し、円偏光の左廻り右廻りが逆転する。さらに有限のアンジュレータ周期数であるために偏光度は次第に 0 に近付くことが、アンジュレータ放射の理論式から明確になり、およそ 3mrad 以上の範囲では円偏光の利用ができないことが判明した。

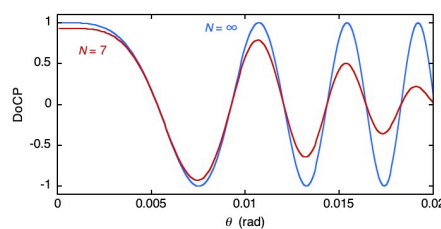


図3 円偏光度 (右廻り+1、左廻り-1) の角度依存性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 H. Saito, H. Hama, S. Kashiwagi, T. Muto, K. Nanbu, N. Morita, H. Yamada	4. 巻 1
2. 論文標題 CROSSED-UNDULATOR CONFIGURATION FOR VARIABLE POLARIZED THZ SOURCE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 39th Free Electron Laser Conf.	6. 最初と最後の頁 69-72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-FEL2019-TUP014	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 H. Saito, S. Kashiwagi, F. Hinode, S. Miura, T. Muto, K. Nanbu, I. Nagasawa, K. Takahashi, K. Kanomata, S. Ninomiya, N. Morita, H. Yamada and H. Hama	4. 巻 1
2. 論文標題 CHARACTERISTICS OF POLARIZED COHERENT RADIATION IN THZ REGION FROM A CROSSED-UNDULATOR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf.	6. 最初と最後の頁 1769-1771
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPRB038	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 Nanbu Ken-ichi, Saito Yuki, Saito Hirotooshi, Kashiwagi Shigeru, Hinode Fujio, Muto Toshiya, Hama Hiroyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Bunch Length Measurement Employing Cherenkov Radiation from a Thin Silica Aerogel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Particles	6. 最初と最後の頁 305 ~ 314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/particles1010025	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 Hirotooshi Saito, Hiroyuki Hama, Fujio Hinode, Ken Kanomata, Shigeru Kashiwagi, Sadao Miura, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken-ichi Nanbu, Shingo Ninomiya, Ken Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on Generation of Variable Polarized Coherent THz Radiation Using a Crossed Undulator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. 29th Linear Accelerator Conf. (LINAC'18)	6. 最初と最後の頁 157-159
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 Hiroyuki Hama, Taro Abe, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Ken-ichi Nanbu, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa, Ken Kanomata, Hidetoshi Saito and Yuki Saito	4. 巻 1
2. 論文標題 Demonstration of Coherent Radiation Generation up to 3THz from Femtosecond Electron Pulses	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Int. J. Opt Photonics Eng.	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Nanbu, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto, I. Nagasawa, K. Takahashi, K. Kanomata, H. Saito, T. Abe, Y. Saito and H. Hama	4. 巻 1
2. 論文標題 Study of Cherenkov Radiation from Thin Silica Aerogel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Int. J. Opt Photonics Eng.	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Hama, K. Nanbu, H. Saito, Y. Saito	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Study of Cherenkov Radiation from Thin Silica Aerogel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. 38th Int. Free Electron Laser Conf.	6. 最初と最後の頁 471-473
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 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Hiroyuki Hama
2. 発表標題 CROSSED-UNDULATOR CONFIGURATION FOR VARIABLE POLARIZED THZ SOURCE
3. 学会等名 39th Free Electron Laser Conf., Hamburg, Germany (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirotooshi Saito
2. 発表標題 CROSSED-UNDULATOR CONFIGURATION FOR VARIABLE POLARIZED THZ SOURCE
3. 学会等名 10th Int. Particle Accelerator Conf., Melbourne, Australia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森田希望
2. 発表標題 交叉型アンジュレータにおける移相器の設計と開発
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 齊藤寛峻
2. 発表標題 交叉型アンジュレータからの THz 域コヒーレント放射の偏光特性(II)
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 Hirotooshi Saito
2. 発表標題 Study on Generation of Variable Polarized Coherent THz Radiation Using a Crossed Undulator
3. 学会等名 29th Linear Accelerator Conference (Beijing) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮 慎吾
2. 発表標題 チェレンコフ光リングを用いた非破壊型ビームモニターの検討
3. 学会等名 日本加速器学会 第15回年会（長岡）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤 寛峻
2. 発表標題 交叉型アンジュレータからのTHz域コヒーレント放射の偏光特性
3. 学会等名 日本加速器学会 第15回年会（長岡）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱 広幸
2. 発表標題 On the Tamm's problem in the Cherenkov light
3. 学会等名 日本加速器学会 第15回年会（長岡）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤 寛峻, 柏木 茂, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 西森 信行, 武藤 俊哉, 南部 健一, 柴崎 義信, 高橋 健, 長澤 育郎, 鹿又 健, 齊藤 悠樹, 濱 広幸
2. 発表標題 交叉型アンジュレータを用いた偏光可変テラヘルツ超放射生成の検討
3. 学会等名 日本加速器学会第14回年会（札幌）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齊藤 悠樹, 柏木 茂, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 西森 信行, 武藤 俊哉, 南部 健一, 柴崎 義信, 高橋 健, 長澤 育郎, 鹿又 健, 齊藤 寛峻, 濱 広幸
2. 発表標題 チェレンコフ放射を用いた極短電子パンチ長測定の評価
3. 学会等名 日本加速器学会第14回年会(札幌)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柏木 茂, 鹿又 健, 齊藤 寛峻, 齊藤 悠樹, 高橋 健, 長澤 育郎, 南部 健一, 西森 信行, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 武藤 俊哉, 濱 広幸
2. 発表標題 東北大学t-ACTSにおける極短電子ビームを用いた広帯域・狭帯域コヒーレントテラヘルツ放射発生
3. 学会等名 日本加速器学会第14回年会(札幌)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Hama, K. Nanbu, H. Saito, Y. Saito
2. 発表標題 Numerical Study of Cherenkov Radiation from Thin Silica Aerogel
3. 学会等名 38th Int. Free Electron Laser Conf., (Santa Fe, NM)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

加速器・ビーム物理研究部 研究紹介  
<http://hayabusa1.lns.tohoku.ac.jp/research/abpg/>



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	武藤 俊哉  (Toshiya Muto)  (10431496)	東北大学・電子光理学研究センター・助教    (11301)	
研究分担者	日出 富士雄  (Fujio Hinode)  (60292207)	東北大学・電子光理学研究センター・准教授    (11301)	
研究分担者	柏木 茂  (Shigeru Kashiwagi)  (60329133)	東北大学・電子光理学研究センター・准教授    (11301)	
研究分担者	南部 健一  (Ken-ichi Nanbu)  (00422072)	東北大学・電子光理学研究センター・技術専門職員    (11301)	

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