

令和元年6月6日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03912

研究課題名(和文) テラヘルツ帯高強度コヒーレントエッジ放射の利用による自由電子レーザー制御の研究

研究課題名(英文) Study of free-electron laser operation using intense coherent edge radiation in the terahertz region

研究代表者

清 紀弘 (Sei, Norihiro)

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・主任研究員

研究者番号：20357312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：日本大学量子科学研究所の電子線利用研究施設LEBRAにて、自由電子レーザー用の直線部に高出力コヒーレントエッジ放射源及び観測システムを開発した。コヒーレントエッジ放射のスペクトルを用いて、自由電子レーザー発振中の電子ビームマイクロパルスのバンチ長を評価できることを示し、コヒーレントエッジ放射観測が電子ビームモニタとして自由電子レーザー制御に役立つことを実証した。さらに近赤外線自由電子レーザーと同時に利用可能なテラヘルツ帯コヒーレントエッジ放射ビームラインの建設や新奇コヒーレント放射源の実証などの成果を挙げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、自由電子レーザー発振を行った電子バンチが発生するコヒーレントエッジ放射を自由電子レーザーを損なうことなく利用し、電子バンチ構造の解析を通じて自由電子レーザー相互作用を解明するという、学術的にインパクトのある意義を有する。また、我々が開発した電子バンチ長評価法は、社会的要請の高いX線自由電子レーザー装置を含む多くの電子加速器に対して低コストで導入が可能である。さらに、他の加速器光源と同時に利用可能な高出力テラヘルツ光源の供給により、複合光源による新しい計測法の開拓を期待でき、社会への貢献も果たせるであろう。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high-power coherent edge radiation (CER) source and a measurement system of the CER in a free-electron laser (FEL) straight section of Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) at Nihon University. It was demonstrated that lengths of electron-beam micropulses on FEL oscillations could be evaluated using spectra of the CER and the observation of the CER was useful for the control of the FEL oscillation. Moreover, we constructed a terahertz-band CER beamline that could be used simultaneously with the near-infrared FEL, and we succeeded in demonstrating a novel coherent radiation source.

研究分野：加速器科学

キーワード：量子ビーム計測 コヒーレントエッジ放射 自由電子レーザー テラヘルツ

## 1. 研究開始当初の背景

自由電子レーザーは任意の波長で発振可能であり、他の光源技術では高出力光を得難い波長領域において、国内外で自由電子レーザー施設の建設が行われている。テラヘルツ領域では生体物質の機能の発現解明などが、X線領域では非破壊なタンパク質結晶構造解析を利用した創薬への応用などが期待され、光科学研究の推進に自由電子レーザーが果たすべき役割は大きい。

これらの自由電子レーザー施設では主に線形加速器が使用され、電子ビームは長さがピコ秒（0.3 mm）以下のマイクロパルスで構成されている。自由電子レーザーの利得はマイクロパルスのパルス長（バンチ長）と相関がある。加速高周波の影響を受けやすく、シミュレーションとの乖離が比較的大きいバンチ長を実測して制御する技術は、自由電子レーザーの安定発振にとって極めて重要である。近年、電子ビームに影響を与えず非破壊的にピコ秒以下のバンチ長を計測するために、短パルス電子バンチが発生するテラヘルツ帯のコヒーレント放射を利用する技術が注目されていた。

しかし、代表的なコヒーレント放射の一つであるコヒーレント放射光は、電子ビームの軌道接線上に放射される。自由電子レーザー発振に影響を与えないためには、コヒーレント放射光の発生に自由電子レーザー直線部の偏向磁石を利用できない。このため従来法では、自由電子レーザーを増幅した直後の電子ビームの特性を直接的に計測することは困難であった。コヒーレント回折放射は回折子の形状が放射スペクトルに影響するためバンチ形状測定には不向きであり、コヒーレント遷移放射は電子ビーム軌道にターゲットを設置するので、自由電子レーザー直線部にて利用することは不可能であった。

## 2. 研究の目的

ビーム物理学上の課題である「自由電子レーザー発振中の電子バンチ計測」を解決するため、本研究では、自由電子レーザー直線部の下流偏向磁石にて電子ビームが射出するテラヘルツ帯のコヒーレントエッジ放射を観測し、マイクロパルス毎のバンチ長評価の実現を目的とした。偏向磁石の端面にて電子ビームが射出するエッジ放射は、テラヘルツ領域では放射光よりも強度が高い。しかも中空状に放射されるため、自由電子レーザーの発生・増幅を妨げることはなく、自由電子レーザー発生直後の電子ビームのパルス特性を観測できる。我々が開発した高速バンチ長測定法をコヒーレントエッジ放射に応用すれば、マイクロパルス毎のバンチ長評価を行うことが可能になる。

さらに、自由電子レーザー出力とバンチ長との同時計測を行い、加速高周波位相と自由電子レーザーの増幅過程の関係を解明する。本研究の推進により、コヒーレントエッジ放射観測に基づく自由電子レーザー制御技術を確立する。

## 3. 研究の方法

自由電子レーザー及びコヒーレントエッジ放射を発生し、自由電子レーザー相互作用による電子ビームへの影響を解明するためには、自由電子レーザー発振実績のある線型加速器施設が必要である。このため本研究は、コヒーレント放射光によるバンチ長計測技術開発や真空容器内のテラヘルツ波非共鳴散乱現象解明など、テラヘルツ光源研究においても実績がある日本大学の自由電子レーザー施設を利用して遂行する。高強度のコヒーレントエッジ放射源の開発とそれをを用いた自由電子レーザー制御技術を、3年の研究期間内に実現するため、以下の項目の要素技術開発を計画した。

### (1) コヒーレントエッジ放射の特性解明

自由電子レーザー施設の直線部にてコヒーレントエッジ放射源を開発する。テラヘルツカメラまたは高感度検波器を利用してコヒーレントエッジ放射の空間分布を測定し、放射強度が中空構造であることを確認する。また、中空鏡を利用して共振器型自由電子レーザーを損なうことなくコヒーレントエッジ放射を光共振器から取り出し、測定した放射強度やスペクトルが理論と一致していることを示す。

### (2) コヒーレントエッジ放射を利用したバンチ長評価

干渉計を使用して測定した放射スペクトルからマイクロパルス平均のバンチ長を評価する。さらに形状因子の周波数依存性を評価し、高時間分解能な複数の狭帯域検波器を使用して強度変動を測ることで、マイクロパルスのバンチ長変化を明らかにする。

### (3) 加速高周波位相最適化による自由電子レーザー制御の実証

加速高周波の位相変化は、マイクロパルス波形変調を介してコヒーレント放射および自由電子レーザーの出力に影響する。コヒーレントエッジ放射特性と加速高周波位相および自由電子レーザー出力の関係を実験によって明らかにし、コヒーレントエッジ放射強度を一定にする加速高周波調整によって、自由電子レーザーの安定制御が可能なることを実証する。

### (4) 自由電子レーザー相互作用によるマイクロパルス構造への影響の解明

自由電子レーザーとエネルギーの授受を行った電子マイクロパルスは、バンチ波形に歪みを誘起する。共振器型自由電子レーザーの増幅課程において、線型加速器電子ビームのマイクロパルス構造変化はこれまで報告されていないが、コヒーレントエッジ放射を周波数分解すれば、その変化を捉えることが期待できる。自由電子レーザー相互作用による電子マイクロパルス構造変化を明らかにし、自由電子レーザーの発振技術向上に貢献する。

#### 4. 研究成果

日本大学量子科学研究所の電子線利用研究施設 LEBRA にて、自由電子レーザー用の直線部にコヒーレントエッジ放射源を開発し、その放射特性を明らかにすると共に自由電子レーザー発振調整用のモニターとして活用した。さらに近赤外線自由電子レーザーと同時に利用可能なテラヘルツ帯コヒーレントエッジ放射ビームラインの建設や新奇コヒーレント放射源の開発などの成果を挙げた。各要素技術に対する研究成果を以下に記す。

##### (1) コヒーレントエッジ放射の特性解明

コヒーレントエッジ放射源の開発に先立ち、テラヘルツ光観測システムを構築するために、広帯域テラヘルツ光源としては国内加速器施設で最高出力となるコヒーレント遷移放射源を日本大学 LEBRA にて開発した。このコヒーレント遷移放射の特性を報告した論文は JJAP の Spotlights に選定された<sup>1)</sup>。

LEBRA や京都大学エネルギー理工学研究所の自由電子レーザー施設 KU-FEL にてコヒーレントエッジ放射源を開発した。テラヘルツカメラ Pyrocam IV (Ophir 社) にてコヒーレントエッジ放射を測定してそのプロファイルが中空構造であることを実証し、テラヘルツ帯におけるコヒーレントエッジ放射出力がほぼ理論と一致していることを示した<sup>2)</sup>。また、膜厚 2  $\mu\text{m}$  のペクリルをビームスプリッターとして採用した Michelson 干渉計および Martin-Puplett 干渉計を利用して、コヒーレントエッジ放射のスペクトルを測定した。測定したスペクトルは電子バンチがポアソン分布していると仮定して計算したスペクトルと良く一致しており、スペクトル測定から電子バンチ長を評価できることを示した。

さらに、LEBRA の自由電子レーザー直線部に中空ミラーおよび全反射ミラーを挿入できるミラー調整機構を設置した。この装置を使用して、図 1 が示すように、世界で初めて自由電子レーザー発振直後の電子ビームが射出したコヒーレントエッジ放射の観測に成功した<sup>3)</sup>。二枚のミラーを使用して得られたスペクトルを比較することで、hole couple がスペクトルに与える影響は無視できることを確認した。

##### (2) コヒーレントエッジ放射を利用したバンチ長評価

測定したコヒーレントエッジ放射スペクトルからバンチ形状因子の周波数特性を導出し、マクロパルス内で平均化した二乗平均平方根 (RMS) バンチ長を評価した。自由電子レーザー強度が十分に高い場合、RMS バンチ長は 0.2 ps 程度であることが明らかになり、電子バンチが十分に圧縮されていることが確かめられた<sup>3)</sup>。測定したスペクトルからバンチ長変化に対して形状因子が変化しやすい周波数と変化しにくい周波数を抽出し、それらの周波数帯で動作する高時間分解能ダイオード検波器を用いてマクロパルス内の RMS バンチ長変化を観測した (図 2)。計算した RMS バンチ長の時間発展は FEL マクロパルス形状を説明するものであり、我々が開発した RMS バンチ長評価技術はリニアック電子ビームのマイクロパルスに対して適用できることが示された<sup>2)</sup>。

##### (3) 加速高周波位相最適化による自由電子レーザー制御の実証

加速管に入射する高周波位相を調整して位相空間内の電子分布に変化を与え、コヒーレントエッジ放射スペクトルと自由電子レーザー出力の相関を調べた。加速位相がクレスト付近のときに FEL 出力は極大になるが、コヒーレントエッジ放射スペクトルも高周波数側へシフトし、RMS バンチ長が短くなることが明らかになった<sup>2)</sup>。発振しなければ出力を計測できない自由電子レーザーと異なり、コヒーレントエッジ放射の放射強度は加速高周波位相や四重極電磁石の収束力が最良値から外れていても観測できる。このため LEBRA では、自由電子レーザー発振に至る前の電子ビームモニターとしてコヒーレントエッジ放射強度を測定して加速器運転を行っている<sup>4)</sup>。

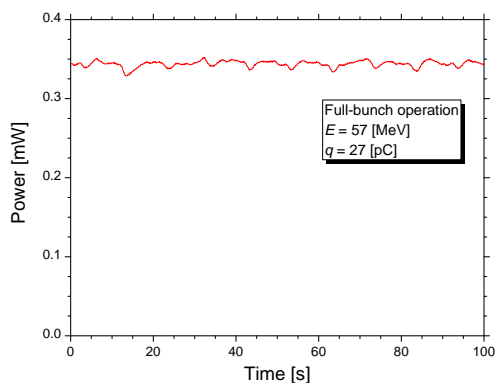


図 1 LEBRA にて観測された FEL 発振中のコヒーレントエッジ放射出力。電子ビームは 2Hz で運転されている。

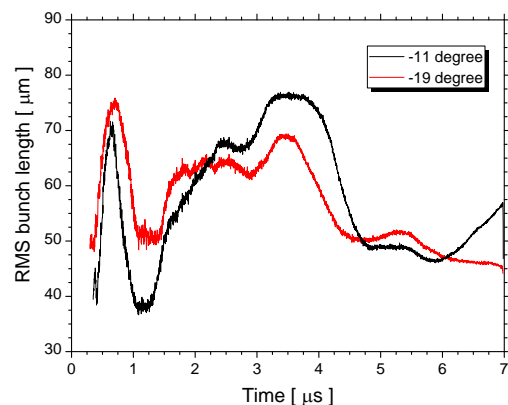


図 2 KU-FEL 電子ビームのバンチ長時間発展。黒線及び赤線は加速管位相差が-11度及び-19度の時に測定されたデータである。

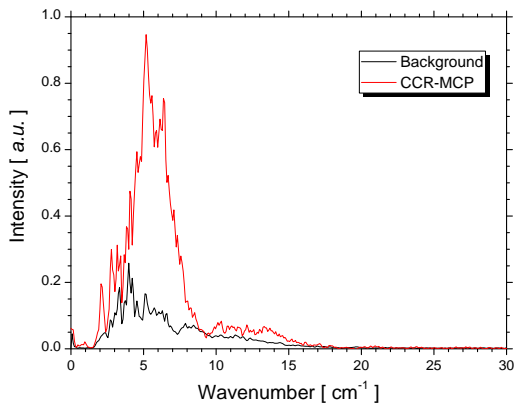


図3 京都大学複合原子力科学研究所にて観測された平面波コヒーレントチェレンコフ放射スペクトル（赤線）及びコヒーレント回折放射スペクトル（黒線）。

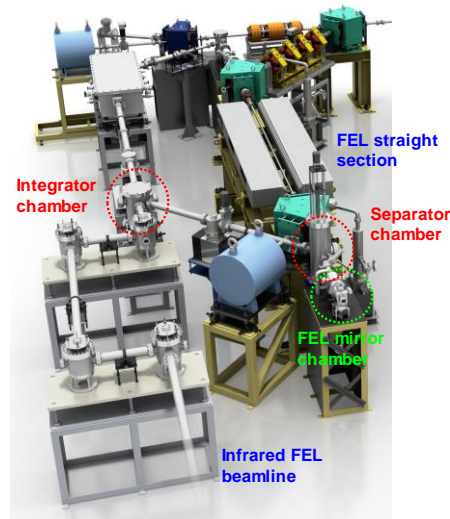


図4 LEBRAにおけるテラヘルツ光ビームライン

- (4) 自由電子レーザー相互作用によるマイクロパルス構造への影響の解明  
 中空ミラーを使用してコヒーレントエッジ放射スペクトルを観測し、光共振器長調整がスペクトルに与える影響を計測した。その結果、スペクトルにはほとんど変化が見られないが、光共振器長が完全同期状態付近の場合にある特定の周波数においてコヒーレントエッジ放射の微弱な増大が観測された<sup>4</sup>。このような研究成果は未だ報告されておらず、詳細について記述することはできないが、今後は測定精度を高めて実験を実施することを計画している。
- (5) 新奇な高強度テラヘルツ光源の開発  
 コヒーレントエッジ放射は光源点を中心として円錐面状に伝播するラジアル偏光放射である。同様の性質を有する放射としてコヒーレントチェレンコフ放射が知られているが、誘電体の屈折率で決まる放射角（チェレンコフ角）が大きく、集光して高出力化することが困難であると考えられていた。我々はチェレンコフ角の半分の頂角を持つ誘電体中空円錐管を利用し、その中空部分に電子ビームを通過させることによって、円錐管底面にて位相整合条件が成立して出力がコヒーレント遷移放射の10倍以上になること—平面波コヒーレントチェレンコフ放射の原理—を見出した。  
 京都大学複合原子力科学研究所の協力を得て平面波コヒーレントチェレンコフ放射の実証実験を行い、図3に示すように、理論に即したテラヘルツ帯の光が放射されていることを世界で初めて観測した<sup>5</sup>。今後はLEBRAのパラメトリックX線直線部に誘電体中空円錐管を設置し、テラヘルツ帯にて非線形光学現象が発現する強度の平面波コヒーレントチェレンコフ放射源を開発する予定である。
- (6) 近赤外自由電子レーザーと同時照射可能なテラヘルツ光ビームラインの構築  
 コヒーレントエッジ放射は中空ミラーを使用してもマクロパルスあたりの放射強度が約0.2 mJと高出力で、加速高周波位相を調整することで2THz以下の領域にて分光測定に利用できる。そこでテラヘルツ光ビームラインを既存の赤外ビームラインに接続し（図4）、その接続部分に近赤外光を透過しテラヘルツ光を反射する酸化インジウムスズ（ITO）基板を使用した<sup>6</sup>。また中空ミラーにはトロイダルミラーを使用することで、コヒーレントエッジ放射の水平・垂直方向における波面の曲率を一致させた。この近赤外自由電子レーザー/テラヘルツ帯コヒーレントエッジ放射ビームラインを使用すれば、2帯域非破壊イメージングや選択的励起を利用したポンププローブ測定など、新たな応用計測の開拓が可能である。従来にない高強度複合光源を利用した革新的計測ツールの開発が期待できる。

<引用文献>

- ① N. Sei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **121** (2017) 023103.
- ② N. Sei *et al.*, Phys. Lett. A, **383** (2019) 389.
- ③ N. Sei *et al.*, Proc. 29th Linear Accelerator Conf., Beijing, China, 2018, p. 154.
- ④ N. Sei *et al.*, to be published in Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf., Melbourne, Australia, 2019.
- ⑤ N. Sei and T. Takahashi, Sci. Rep., **7** (2017) 17440.
- ⑥ T. Sakai *et al.*, to be published in Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf., Melbourne, Australia, 2019.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Norihito Sei, Heishun Zen, Hideaki Ohgaki, Measurement of bunch length evolution in electron beam macropulse of S-band linac using coherent edge radiation, Physics Letters A, 査読有、**383**、2019 年、pp. 389-395.  
DOI : 10.1016/j.physleta.2018.11.010
- ② Norihito Sei, Hiroshi Ogawa, QiKa Jia, Switching of the harmonic order in free-electron lasers by controlling the density modulation of an electron bunch, Journal of Synchrotron Radiation, 査読有、**25**、2018 年、pp. 1317-1322.  
DOI : 10.1107/S1600577518008937
- ③ Takeshi Sakai, Norihito Sei, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Yoske Sumitomo, Ken Hayakawa, Kyoko Nogami Hiroshi Ogawa, High Power Coherent Terahertz Wave Sources at LEBRA Linac in Nihon University, Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)、査読有、**24**、2018 年、pp. 1-2.  
DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8509923
- ④ Norihito Sei and Toshiharu Takahashi, 逆コンプトン散乱を用いた相対論的電子線分光法の開発、日本赤外線学会誌、査読有、**27**、2018 年、pp. 42-49.  
[http://www.jsir.org/wp/?page\\_id=7582](http://www.jsir.org/wp/?page_id=7582)
- ⑤ Norihito Sei and Toshiharu Takahashi, First demonstration of coherent Cherenkov radiation matched to circular plane wave, Scientific Reports, 査読有、**7**、2017 年、pp. 17440.  
DOI : 10.1038/s41598-017-17822-z
- ⑥ Norihito Sei, Hiroshi Ogawa, Takeshi Sakai, Ken Hayakawa, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Kyoko Nogami, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有、**56**、2017 年、pp. 032401.  
DOI: 10.7567/JJAP.56.032401
- ⑦ Norihito Sei, Hiroshi Ogawa, Shuichi Okuda, Demonstration of Narrowband X-ray Beam by Inverse Compton Scattering with Stored Spontaneous Emission, Journal of Applied Physics, 査読有、**121**、2017 年、pp. 023103.
- ⑧ Norihito Sei, Heishun Zen, Hideaki Ohgaki, Development of intense terahertz coherent synchrotron radiation at KU-FEL, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読有、**832**、2016 年、pp. 208-213.

[学会発表] (計 21 件)

- ① 清 紀弘、小川 博嗣、全 炳俊、大垣 英明、田中 俊成、早川 恭史、境 武志、住友 洋介、高橋 由美子、早川 建、野上 杏子、赤外自由電子レーザー施設におけるテラヘルツ帯コヒーレントエッジ放射源の開発、第 32 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2019 年
- ② 清 紀弘、小川 博嗣、田中 俊成、早川 恭史、境 武志、住友 洋介、高橋 由美子、早川 建、野上 杏子、全 炳俊、大垣 英明、Coherent Edge Radiation Sources in Linac-Based Infrared Free-Electron Laser Facilities、29th Linear Accelerator Conference、2018 年
- ③ 境 武志、清 紀弘、田中 俊成、早川 恭史、住友 洋介、野上 杏子、高橋 由美子、早川 建、小川 博嗣、日本大学電子線利用研究施設における高強度コヒーレントテラヘルツ波光源開発、第 15 回日本加速器学会年会、2018 年
- ④ 清 紀弘、小川 博嗣、田中 俊成、早川 恭史、境 武志、住友 洋介、高橋 由美子、早川 建、野上 杏子、全 炳俊、大垣 英明、電子バンチ長計測のためのコヒーレントエッジ放射の研究、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年
- ⑤ 境 武志、早川 建、早川 恭史、野上 杏子、田中 俊成、小川 博嗣、清 紀弘、Development of the High Power Terahertz Light Sources at LEBRA Linac in Nihon University, The 8th International Particle Accelerator Conference、2017 年
- ⑥ 清 紀弘、小川 博嗣、田中 俊成、早川 恭史、境 武志、早川 建、野上 杏子、全 炳俊、大垣 英明、テラヘルツ帯コヒーレント放射を利用した電子ビーム制御の基礎的研究、日本赤外線学会第 26 回研究発表会、2016 年

[図書] (計 1 件)

全 炳俊、清 紀弘、入澤 明典、加藤 政博、化学工業社、「化学工業 Vol. 68No. 3」、2017 年、pp. 12-17.

[その他]

ホームページ情報：

国立研究開発法人産業技術総合研究所分析計測標準研究部門放射線イメージング技術研究グループのホームページ

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

- ① 研究分担者氏名：境 武志  
ローマ字氏名：SAKAI, takeshi  
所属研究機関名：日本大学  
部局名：理工学部  
職名：助教  
研究者番号（8桁）：20409147
- ② 研究分担者氏名：田中 俊成  
ローマ字氏名：TANAKA, toshinari  
所属研究機関名：日本大学  
部局名：理工学部  
職名：教授  
研究者番号（8桁）：30155147
- ③ 研究分担者氏名：小川 博嗣  
ローマ字氏名：OGAWA, hiroshi  
所属研究機関名：産業技術総合研究所  
部局名：計量標準総合センター  
職名：主任研究員  
研究者番号（8桁）：60356699