

令和元年6月17日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13407

研究課題名(和文) 発振型自由電子レーザーにおける非飽和増幅開拓による高強度テラヘルツ光発生

研究課題名(英文) Study for intense terahertz radiation developing on the unsaturated amplification in the free electron laser oscillator

研究代表者

川瀬 啓悟 (KAWASE, Keigo)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・主幹研究員(定常)

研究者番号：60455277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：発振型FELの増幅において、電子ビームバンチ列のエネルギーを途中で変えることにより飽和現象を回避できるかどうかを検討し、詳細に研究した。既存の数値計算コードに変更を加えてシミュレーションを実施した結果、指数関数的増幅の継続は困難であるが、大振幅領域において一定エネルギーによる増幅よりも早い増幅が可能であることがわかった。また、光共振器損失に関する詳細な実験研究を進めることで、飽和の定量的な評価に必要なパラメータの評価も合わせて研究を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FELの増幅とその飽和を詳細に研究することで、指数関数的増幅の限界と電子ビームのエネルギーを変化させることによる大振幅領域での増幅率の改善の可能性を示すことができた。また、光共振器の損失について詳細に調査することで、共振器の固有モードにおける損失との差異があることがわかってきた。このことをより研究することで、FEL増幅メカニズムの詳細の理解とより高強度化への指針を示すことにつながる。

研究成果の概要(英文)：To investigate the possibility for the unsaturated amplification in FEL oscillator, we made simulation for the FEL with the energy variation on the electron beam. As the result, we find that it is difficult to avoid ceasing the exponential growth. On the other hand, by changing the beam energy at the end of exponential amplification, the growth rate of the FEL amplification in strong signal region will be speed up comparing with the constant energy case. In addition, experimentally we investigated the optical loss of the FEL resonator. It is an important parameter for the FEL amplification and its saturation.

研究分野：加速器科学

キーワード：自由電子レーザー 加速器要素技術開発

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

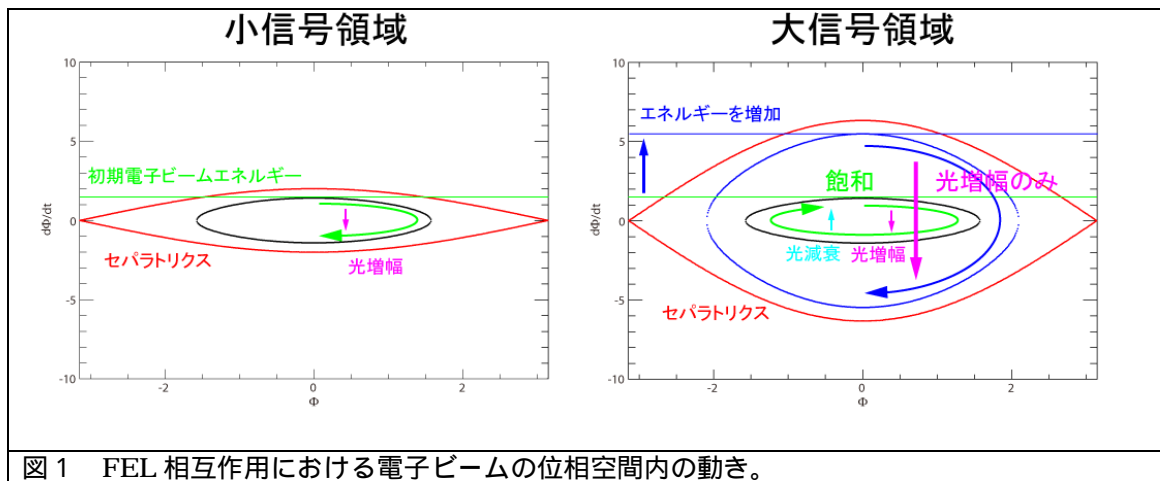
### 1. 研究開始当初の背景

電子ライナックを用いた発振型自由電子レーザー (FEL) は主に近赤外から遠赤外領域の光源として開発、利用されている。国内外において FEL 飽和した光源は数えるほどであるが、その多くは利用研究に供されている。その中で、本提案のような手法で飽和をさらに高強度化する研究は実施されていなかった。

大阪大学産業科学研究所 (産研) では L バンド電子ライナックを用いて THz 領域の発振型 FEL の研究を推進し、本研究開始当初までに電子バンチ電荷量を増大させることによる FEL の高強度化を実現しており (S. Suemine, K. Kawase, et al., Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A 773 (2015), 97 - 103)、これに伴い、FEL 増幅は急速に飽和に達するようになった。高ゲインを保持したまま飽和させずに光パルス強度を発展させることができれば、より高い強度の光を生成できる可能性がある。飽和を防ぐためには電子ビームのバンチ列において後半のバンチのエネルギーを高くすればよく、そのような電子ビームの運転を実現する研究と検証が必要であった。また、この時まで電子ライナックのハイパワー高周波 (RF) パルスの高品質化の研究を実施し、低レベル RF の位相・振幅制御を適用して高品質化を達成しており (K. Kawase et al., Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A 679 (2012), 44 - 53)、この手法を応用して電子ビームエネルギーのバンチ列に対する制御が可能であろうということで本研究を提案した。

### 2. 研究の目的

本研究では発振型 FEL の飽和現象を回避する方法の探求を目的とした。FEL の最も単純な描像では、電子と光の場との相互作用は単振子の方程式で記述される。光の増幅開始過程では、光の強度が小さいので光は単調に増幅されるが、光の強度が高くなると、電子はエネルギーを光に与えるだけでなく、吸収過程も存在する。そのため、正味のゲインが低下し、やがて共振器損失と同等のゲインとなることで、光の強度は飽和する。これが発振型 FEL 増幅の飽和現象である。これは、電子ビームがアンジュレータを通過する際、光強度が小さい場合は電子ビームの位相空間内での変化が小さく、エネルギー軸の方向について一定方向にのみ移動するが、大強度になると位相空間内で回転してしまうこととみることができる。一方、大強度の場合は位相空間内での束縛領域 (セパトトリクス) が広がるので、電子ビームと相互作用できるエネルギー領域も広がる (図 1)。そこで飽和現象を回避するためには、電子ビームバンチ列の後半部のエネルギーを変化させ、電子による光のエネルギーの吸収を避ける。この描像を詳細に調査することで、現状の光強度と比べて格段に高い強度の FEL パルス発生の可能性について研究した。



### 3. 研究の方法

発振型 FEL の飽和現象の振る舞いを理論的に検討し、電子ビームバンチ列のエネルギーを変えることで飽和を避けることができるかどうかを研究した。特にイギリスのグループにより開発され配布されている発振型 FEL のシミュレーションコード FEL0 (B.W.J. McNeil et al., Proc. FEL2006, p. 59 (2006), <https://www.astec.stfc.ac.uk/Pages/FELO-Software.aspx>) を一部書き換え、電子ビームバンチ列の途中でビームエネルギーを変化させてシミュレーションを実施した。エネルギーの変化としては、バンチ列の途中でステップ状にエネルギーを変える方法と一定の比率でエネルギーを増加させる方法の 2 種を試験した。

実験研究としては、FEL 増幅と飽和における時間発展を、強度計測や外部レーザーを用いたクロスコリレーション計測などで詳細に計測研究を実施した。また、飽和現象で重要なパラメータである光共振器の損失についての計測研究とそれを再現するための光学計算の理論研究なども合わせて実施した。

#### 4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

シミュレーション研究の結果より、産研の FEL のビームパラメータにおいては初めの 10 回程度の増幅で指数関数的な増幅が終了し、その後、緩やかに強度を増大させながら飽和に達するという結果を得た。そこで、指数関数的増幅が終了する 10 回目の増幅以降の電子ビームのエネルギーを変えることで、その増幅発展の変化を計算した結果、指数関数的増幅の継続を示唆する兆候は見られず、劇的な光エネルギーの出力向上には至らなかったが、線形増幅の領域においてのより速い強度成長が見られた(図2)。この結果は、電子ビームのエネルギーを指数関数的増幅が終了した後に変化させることで、より少数のバンチ列で FEL の飽和パワーに到達できることを示唆している。

共振器損失の計測結果については、波長 70  $\mu\text{m}$  から 90  $\mu\text{m}$  程度まではおよそ、共振器の固有モードに対する損失と同等であるのに対して、それよりも長い波長領域では計算結果以上の損失があることがわかった(図3)。この損失についての原因は現在詳細な研究を継続実施している。

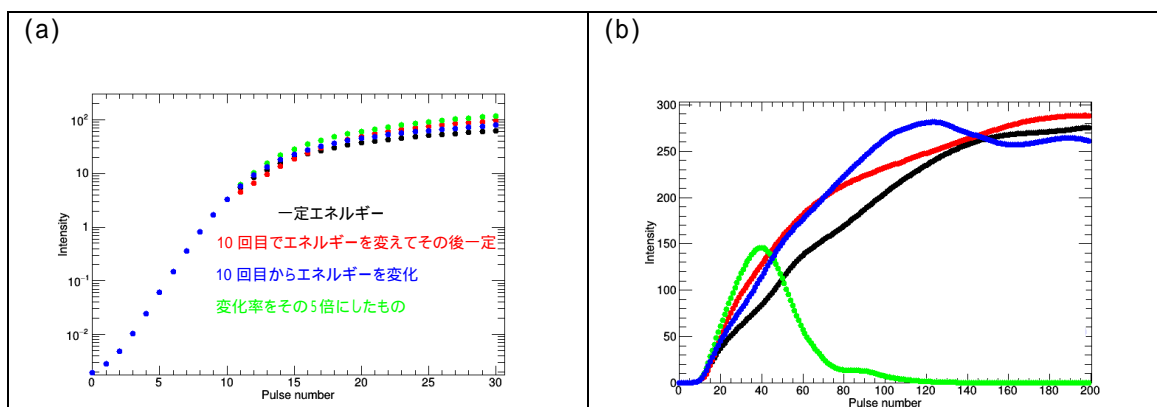


図2 エネルギーを途中で変えた時の FEL 増幅の様子。(a)指数関数的増幅領域を縦軸対数で表示。(b)到達光強度の縦軸線形で表示。

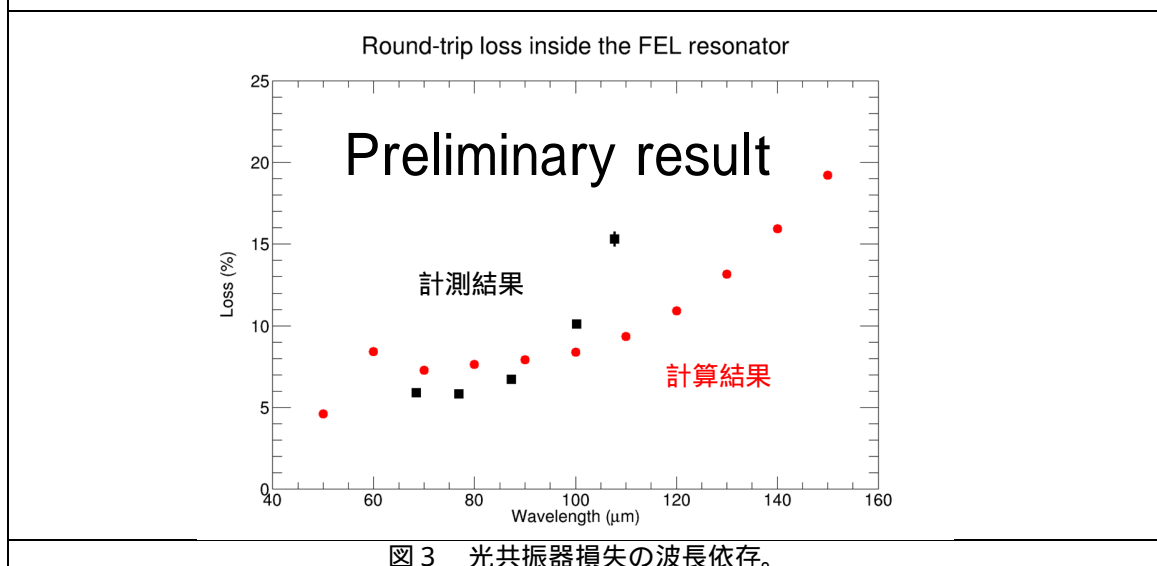


図3 光共振器損失の波長依存。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

川瀬 啓悟、加藤 龍好、磯山 悟朗、「産研 FEL 光共振器の詳細評価」、第 15 回日本加速器学会年会プロシーディングス 343 - 345 頁(査読無) 2018 年

川瀬 啓悟、「発振型自由電子レーザーの飽和についての考察」、第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス 1040 - 1043 頁(査読無) 2016 年

川瀬 啓悟、加藤 龍好、入澤 明典、藤本 将輝、古川 和弥、久保 久美子、磯山 悟朗、「電気光学サンプリングによる THz-FEL のマイクロパルス時間構造測定」(口頭発表) 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス 174 - 176 頁(査読無) 2015 年

〔学会発表〕(計17件)

川瀬 啓悟、「大阪大学産業科学研究所テラヘルツ自由電子レーザー」(依頼・口頭発表)、日本物理学会第74回年次大会、2019年3月  
川瀬 啓悟、「産研FELの基礎特性測定」(口頭発表)、平成30年度大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設成果報告会、2019年3月  
川瀬 啓悟、「産研FELのE0クロスコリレーション計測に関するフーリエ解析」(口頭発表)、第25回FELとHigh-power Radiation研究会、2019年2月  
川瀬 啓悟、加藤 龍好、磯山 悟朗、「産研FEL光共振器損失の評価」(ポスター発表)、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1月  
川瀬 啓悟、加藤 龍好、磯山 悟朗、「産研FEL光共振器の詳細評価」(ポスター発表)、第15回日本加速器学会年会、2018年8月  
川瀬 啓悟、「FEL発振器におけるサブハーモニックバンチャの振幅位相と光強度の関係について」(口頭発表)、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月  
川瀬 啓悟、「THz-FELのE0クロスコリレーション計測結果の解析」、日本物理学会第72回年次大会、2017年3月  
Keigo Kawase, “Characteristics of THz-FEL at ISIR, Osaka University”, AFAD2017 (invited, oral), 2017年1月  
川瀬 啓悟、「発振型自由電子レーザーの飽和についての考察」(ポスター発表)、第13回日本加速器学会年会、2016年8月  
川瀬 啓悟、入澤 明典、藤本 将輝、磯山 悟朗、「E0クロスコリレーションによるTHz-FELの時間構造評価」(口頭発表)、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月  
Keigo Kawase, “Status and Recent Progress of THz-FEL at ISIR”, AFAD2016 (oral), 2016年2月  
川瀬 啓悟、「産研THz-FELのE0計測」(口頭発表)、第22回FEL and High-Power Radiation研究会、2016年1月  
川瀬 啓悟、加藤 龍好、入澤 明典、藤本 将輝、磯山 悟朗、「阪大産研テラヘルツ自由電子レーザーの光源性能」(ポスター発表)、第29回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2016年1月  
Keigo Kawase, Ryukou Kato, Akinori Irizawa, Masaki Fujimoto, Kazuya Furukawa, Kumiko Kubo, Goro Isoyama, “Single Pulse Extraction from the THz-FEL Oscillator Using a Laser Activating Semiconductor Reflective Switch” (poster), The 19th SANKEN International, the 14th SANKEN Nanotechnology Symposium, 3rd KANSAI Nanoscience and Nanotechnology, 11th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2015年12月  
川瀬 啓悟、「E0クロスコリレーションを用いたTHz-FELの時間構造評価」(口頭発表)、平成27年度第2回量子ビーム科学施設研究会、2015年12月  
Keigo Kawase, Ryukou Kato, Akinori Irizawa, Masaki Fujimoto, Kazuya Furukawa, Kumiko Kubo, Goro Isoyama, “Single picosecond THz pulse extraction from the FEL macropulse using a laser activating semiconductor reflective switch” (poster), 37th International Free Electron Laser Conference (FEL 2015), 2015年8月  
川瀬 啓悟、加藤 龍好、入澤 明典、藤本 将輝、古川 和弥、久保 久美子、磯山 悟朗、「電気光学サンプリングによるTHz-FELのマイクロパルス時間構造測定」(口頭発表)、第12回日本加速器学会年会、2015年8月

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：松葉 俊哉

ローマ字氏名：MATSUBA, Syunya

所属研究機関名：広島大学

部局名：放射光科学研究センター

職名：助教

研究者番号(8桁)：00635477

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。