

機関番号：11301  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20612001  
 研究課題名（和文）コヒーレント THz 光生成のための高調波空洞によるバンチ長制御の研究

研究課題名（英文） Study of bunch length control by harmonic cavity for the coherent THz radiation

研究代表者  
 日出 富士雄（HINODE FUJIO）  
 東北大学・電子光物理学研究センター・助教  
 研究者番号：60292207

## 研究成果の概要（和文）：

低エネルギーの電子シンクロトロンに高調波空洞を適用することで電子ビームの短バンチ化をはかり、これによりテラヘルツ帯での大強度のコヒーレント放射光源への実用化を見据えて、縦方向ビームダイナミクスについての理解を深めることを目的として研究を行った。東北大学電子光物理学研究センター（旧 原子核理学研究施設）にある 1.2 GeV 電子シンクロトロン（STB リング）において実証試験のための準備を進めるとともに、マクロパーティクルモデルを用いたトラッキングシミュレーションによる評価を行い、原理的には観測可能な強度のコヒーレント放射が得られる見込みを得ることができた。しかしモデルの不定性も大きいため、今後の展望として、測定データを取り込んだより詳細な評価を検討している。更に実証試験を進めるにあたり必要となる改善項目として、複合機能型電磁石を用いて 6 極磁場を STB リングに導入することで、ヘッドテール不安定性を抑制することも、今後の展開として検討が進められている。

## 研究成果の概要（英文）：

This work aims at studying the longitudinal beam dynamics in the electron synchrotron with the relatively lower energy, which would be a candidate for a light source to be able to generate the coherent radiation in the terahertz wavelength region. As setting up the preparation of the experiment as the demonstration to generate the coherent THz radiation in the 1.2 GeV electron synchrotron (STB ring) at Electron Light Science Center, Tohoku University, a simulation work which employed the macro-particle model was also made. Although the preliminary results of the simulation showed that coherent radiation with a nontrivial intensity could be obtained, more detailed work should be continued because which included quite a few uncertainties. Furthermore, in order to improve the performance of the STB ring which is required to conduct the experiment, it is also considered as the future prospect to introduce the sextupole components in to the ring optics by employing the combined magnets.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：加速器科学

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：電子シンクロトロン、テラヘルツ光源、高調波空洞

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ帯（周波数：0.3 ~ 10 THz、波長：30 ~ 1000  $\mu\text{m}$ ）は、電波の透過性を有するとともに光波の直進性を有する特異な波長領域である。人体に悪影響を及ぼすX線に代わる安全な非破壊検査用などの光源としても、近年、大変に注目されており、その利用範囲は、生物・医学から化学、工学分野まで多岐に渡り、学術・産業界に与える影響は極めて大きい。テラヘルツ光源としてはレーザーによるテラヘルツ光生成の進展が目覚ましいが、一方で電子ビームが発するコヒーレント放射を用いた加速器光源は、平均強度の高い光を得ることができると期待されている。これまで放射光リングにおいては、短バンチ長を実現するようにモーメント・コンパクション・ファクターと呼ばれる量を非常に小さく抑えたlow- $\alpha$ モードでの運転を行うことや、さらにレーザーとの相互作用を用いてバンチ内部に短い構造を作ることによってコヒーレント放射を得るなどの試みがなされてきた。しかしながら、未だ満足のいく強度の光が得られているわけではなく、短バンチ生成を目指した多角的な取り組みは、非常に重要と思われる。

### 2. 研究の目的

本研究は、低エネルギーの電子シンクロトロンに、主高周波加速空洞の共振周波数の3倍の共振周波数をもった高調波空洞を適用することで電子ビームの短バンチ化をはかるとともに、縦方向ビームダイナミクスについての理解を深めることを目的とした。

従来、高調波空洞は、加速電圧の勾配を制御することを通じて、電子ビームのバンチ長を伸ばすように制御し、こうしてバンチ内部の電荷密度を下げることでタウチェック効果を軽減し長いビーム寿命を得ることや、また同時に加速勾配の非線形性によるランダウ減衰の効果で、ビーム不安定性を抑制することを目的として用いられてきた。本研究では、これとは逆に、加速電場の勾配を急峻にするような位相で高調波空洞を用いて、電子ビームのバンチ長を短くすることを目指すもの（短バンチ化レジーム）である。

### 3. 研究の方法

本研究では東北大学・電子光理学研究センターにある1.2 GeV電子シンクロトロン（STBリング）を用いて、入射エネルギー（150又は200 MeV）でビーム貯蔵を行う方針で、短バンチ電子ビーム生成の可能性について検討した。図1はSTBリングの偏向電磁石（曲率半径：3 m）において、200 MeV

で蓄積された電子ビーム（ビーム電流：1 mA）が放出する光を評価した例である。受光角として10 mradを仮定した。1 psのバンチ長が実現できると、僅か1 mAの周回電流であっても、THz領域において $10^{15}$ 個/sec/0.1%BWを超える生成量を得ることが可能と見込まれている。平衡状態での電子バンチの自然バンチ長は、シンクロトロン振動数の逆数とエネルギー広がり積の形で表すことができるが、このエネルギー広がり積は周回ビームのエネルギーに比例するため、この観点からは低エネルギーでの運転が有利と考えられる。ただし、低エネルギーにおいては放射減衰の効果が非常に小さくなるので、様々な不安定性が生じやすくなり、バンチ内の密度を上げるような操作が困難になる側面もあり、可能な限りの条件を含めた評価を行うことが重要である。

短バンチ電子ビーム生成の手法としてさらに、3倍高調波空洞の適用がはかられた。図2には、短バンチ化レジームにおけるRFポテンシャルの変形の様子を模式的に示してある。200 MeV程度の低エネルギー運転においては、放射光損失は50 eV程度と極めて小さいため、リング内を周回する電子は、RFポテンシャルの底に対応する空洞電圧0 Vの近傍でシンクロトロン振動を行う。ただし周回ビーム電流が大きくなると、ビーム自身が空洞に誘起する電場の影響や、更にリング内の真空ダクトに少なからず存在する不連続さなどのインピーダンス源の影響が大きくなり、これらの影響を含めた評価を行う必要がある。特にインピーダンス源については不定性が大きいため、簡単な構造を仮定したモデルを用いることでシミュレーションにより評価を行うこととした。

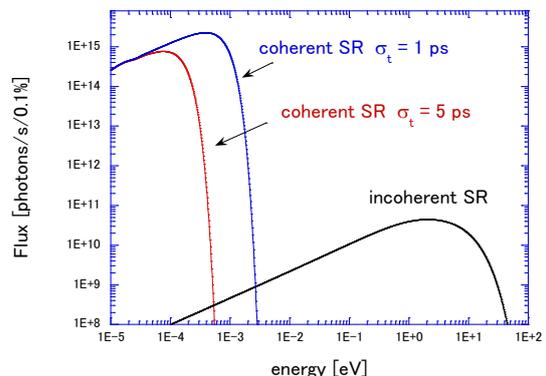


図1 期待されるコヒーレント放射光の強度

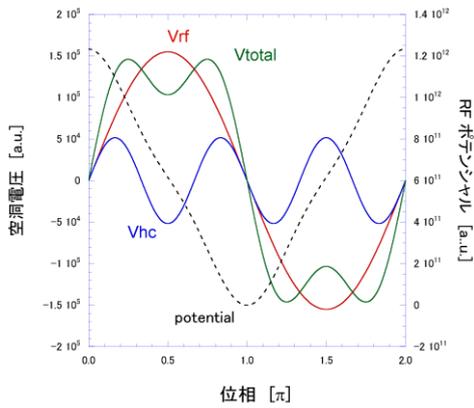


図2 3倍高調波空洞によるRFポテンシャルの変形を示した模式図

本研究で用いた3倍高調波空洞を図3に示した。可動チューナーによる共振周波数の可調範囲は12.6 MHzと広い値を有している。無負荷Q値は22,200で、シャントインピーダンスは3.8 MΩと見積もられている。この空洞は、もともとはランダウ減衰を用いてビーム不安定性を抑制することを目的として製作されたものであり、外部から電力を供給するのではなく、周回ビームにより誘起される電圧を利用する受動励振型の空洞として利用することを想定していたため、比較的高いR/Q値を有している。従って、ビームが誘起する電圧の影響が大きく、空洞のチューニングを大きくずらすことで、その影響を小さく抑える必要がある、このため所定の電場を励振するためには、その分だけ大きな高周波電力を投入する必要がある。



図3 1.5 GHz 高調波空洞

#### 4. 研究成果

##### (1) トラッキングシミュレーションによるバンチ長制御の評価

マクロパーティクルモデルを用いて、トラッキングシミュレーションを行い、高調波空

洞やリング内にあるウェーク場の影響を含めて、バンチ長の評価を行った。図4は、リング内に多数存在する真空ダクトの接続部のギャップによる短距離ウェーク場をモデル化して、ABCIコードを用いてウェークポテンシャルを評価した結果である。横軸は先頭バンチからの距離である。図では接続部として100カ所分を計上してある。こうして得られたウェークポテンシャルを用いてトラッキングシミュレーションを行った結果を図5に示す。ビーム電流が低い場合にはバンチ長は次第に減衰していくが、ビーム電流が多くなると、ウェーク場の影響により次第にバンチ長を短くできなくなることがわかる。なおビームエネルギーが200 MeVと低いため放射減衰による減衰時間は1秒近い値となっている。このため400万ターン以上にわたる膨大な周回数にわたってトラッキングをする必要があり、計算時間を抑えるためにはマクロパーティクルの数を50個程度に減らすなどして、精度を犠牲にせざるを得なかったが、インピーダンス源のより正確な評価とともに、今後検討すべき課題として残されている。

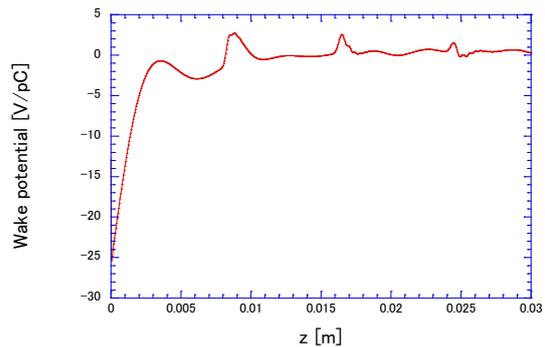


図4 ABCIコードを用いた真空ダクトのウェークポテンシャルの評価

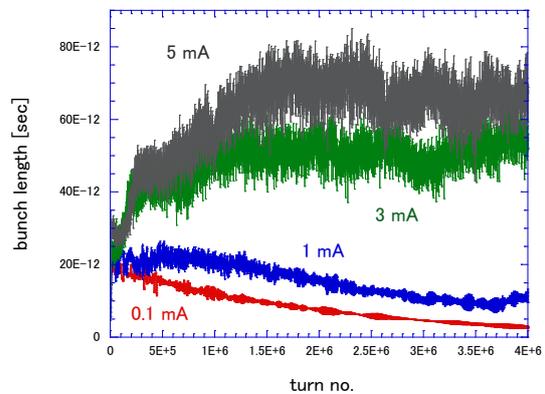


図5 トラッキングシミュレーションによるバンチ長の評価 (ビームエネルギー: 200 MeV)

## (2) 複合機能型電磁石の導入による STB リングの性能向上の検討

STB リングは、いわゆる放射光リングのような貯蔵リングとして設計された物ではないため、ある一定量以上のビームを長時間に渡って蓄積するには、種々の困難が存在している。最も大きな問題はクロマチシティーを補正するための 6 極電磁石が存在しないことであり、その結果、ヘッド-テール不安定性と呼ばれるビーム不安定性を引き起こしている。このため特に、低いエネルギーで入射された周回ビームにおいて、著しいビーム損失が生じており、大電流のビームを周回させることができない状況となっており、短バンチ化に関わる実験の実施を困難にしている。

現在、この問題を回避するために、複合機能型電磁石を用いて STB リングへ 6 極磁場を導入することが検討されている。現状の STB リングには新たに電磁石を設置する空間的余裕はないため、現在の 4 極電磁石を 6 極成分の含まれた複合機能型電磁石と交換するとともに、ここでのディスパージョン関数を有限の大きさに調整することでクロマチシティーを補正することを検討している。図 6 には検討中の複合機能型電磁石の 3 次元磁場計算の結果を示してあるが、磁極内部での飽和の影響は問題ないレベルである。必要とされる  $37 \text{ T/m}^2$  程度の 6 極磁場強度も、現状の電源と同程度の電流値で実現が可能であり、STB リングの直線部に 0.6 m 程度のディスパージョンを入れることで、十分にクロマチシティーの補正が可能と見込まれている。ビーム入射の確認やミスアラインメントの影響についても評価を進めているが、いずれも実現に当たって特に困難となる問題は見られず、早期の改良が望まれている。

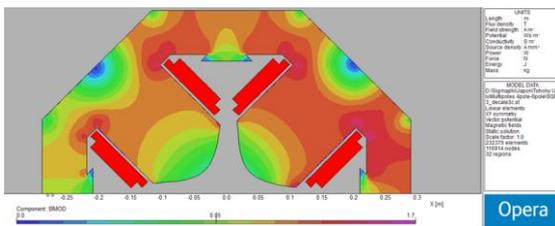


図 6 6 極成分を含んだ複合機能型電磁石の磁場計算の結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 濱広幸、安田真冬、河合正之、日出富士雄、南部健一、宮原房史、Intense Coherent THz Generation from

Accelerator-Based Sources、査読有、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 637 (2011) S57-S61

[学会発表] (計 2 件)

1. 日出富士雄、濱広幸、河合正之、柴崎義信、高橋重伸、南部健一、長澤育郎、武藤俊哉、平賀正之、Electron Accelerator Complex at Tohoku University, 42-Year-Operation and Future、The 7th International Workshop on Accelerator Operations、2010 年 4 月 12 日、Daejeon (Korea)
2. 濱広幸、河合正之、日出富士雄、南部健一、宮原房史、安田真冬、Development of Accelerator-Based THz Sources at Tohoku University、The 23rd Particle Accelerator Conference、2009 年 5 月 6 日、Vancouver (Canada)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/fy2011/research/index.htm> に関連内容を掲載

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

日出 富士雄 (HINODE FUJIO)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教

研究者番号：60292207

(2) 研究分担者

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

河合 正之 (KAWAI MASAYUKI)  
東北大学・電子光物理学研究センター・准教授

研究者番号：60374899

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：