

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：87202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390125

研究課題名(和文) 3極型超伝導ウィグラーにおける長波長領域放射の研究

研究課題名(英文) Investigation of long wavelength radiation from a superconducting three-pole wiggler section

研究代表者

江田 茂 (Koda, Shigeru)

公益財団法人佐賀県地域産業支援センター九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・主任研究員

研究者番号：50311189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：3極型超伝導ウィグラー設置直線部からの長波長域放射をエッジ放射の観点から研究した結果、実験理論両面で重要な結果を得た。実験面では蓄積電子の軌道歪みを制御し一般的手法として単純明瞭にエッジ放射を定量的に観測できる技術を確立したこと、これを応用しウィグラー励磁状態で直線部からの可視域の放射観測を行い、放射強度が増大していることが観測されたことである。理論面ではウィグラー設置部からの長波長放射がウィグラー前後の直線部のエッジ放射間の干渉として理解でき、3極ウィグラー設置直線部における一般的現象であることを示した。さらに3極ウィグラーの周期的配置が放射輝度を大きく増大させる新たな可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We investigated long wavelength radiation from a superconducting three-pole wiggler section. The following important theoretical and experimental results were obtained. As the experimental results, (1) clear and simple observation method for edge radiation was established and (2) an increase effect of edge radiation at superconducting three-pole wiggler section was observed by usage of the observation method. As a theoretical result, the increase effect was understood as interference effect of edge radiation between upward and downward straight sections of the wiggler. Basing on the interference model, we proposed further large increase effect of edge radiation, which was obtained by periodic alignment of three-pole wiggler.

研究分野：加速器科学

キーワード：超伝導3極ウィグラー エッジ放射 放射光

1. 研究開始当初の背景

エッジ放射は、二つの偏向磁石間の直線部を高エネルギー電子が通過する際に発生する長波長域の光(図1参照)で、その非常に単純な磁石構成にもかかわらず、偏向磁石による長波長域の放射光に比べ桁程度高輝度で、その放射角は電子の前方  $1/\gamma$  程度に集中する興味深い放射である。これまでその放射の基礎から応用の側面まで様々な観点から研究されてきた、

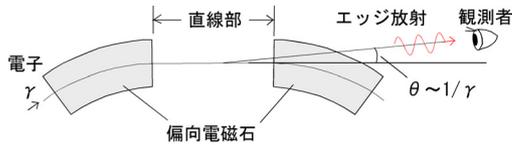


図1 典型的なエッジ放射

他方で本研究の研究代表者、共同研究者の所属グループでは、放射光施設 SAGA-LS において硬 X 線発生を目的にメインポール磁場 4T の 3 極型超伝導ウイグラー-SAGA-LS-SCW を開発した、。このウイグラーを設置した直線部は、蓄積リングの 2 つの偏向磁石による典型的なエッジ放射系の中央部に、強磁場の超伝導磁石を置くという特徴的な磁石配置となっていることに注目し、長波長域において固有の高輝度放射が発生する可能性があると考えた。図2に SAGA-LS-SCW ウイグラー及び蓄積リング偏向磁石配置の概念図を示す。放射光計算コード SRW を用いて数

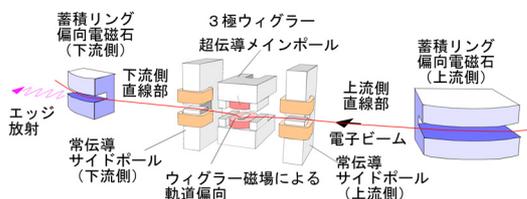


図2 超伝導ウイグラー-SAGA-LS-SCW と SAGA-LS 蓄積リング偏向磁石から成る磁石系の概念図

値計算を行った結果、単純な直線部エッジ放射に比べてウイグラー設置直線部からの放射強度は数倍増大する結果が得られた。3 極型超伝導ウイグラーセクションは硬 X 線領域のみならず長波長域に及ぶ広範囲で高い輝度の放射が発生している可能性が示唆された。

2. 研究の目的

3 極型超伝導ウイグラーは電子蓄積リング直線部に配置される硬 X 線発生のための放射光光源であり、偏向磁石タイプの放射光光源としてよく理解されていると考えられてきた。しかしながら長波長領域におけるウイグラー設置直線部からの放射は、長波長域でエッジ放射が支配的となる事を考慮すると、偏向磁石からの単純な放射光でもエッジ放射

でもない固有の高輝度光が得られる可能性があるという考えに至った。3 極ウイグラーをエッジ放射というこれまでにない観点からとらえ、長波長域における 3 極ウイグラー設置直線部からの放射の特性を探求することを目的とした。

3. 研究の方法

偏向磁石間直線部に設置された 3 極型超伝導ウイグラーの長波長域放射を、実験と理論両面から研究した。理論面ではエッジ放射の paraxial 近似理論を基礎にエッジ放射の干渉という考え方を応用した解析的放射モデルをつくり、また一般的な放射光計算コード SRW による数値計算でのモデル検証及び観測結果との比較を行った。実験面ではまず SAGA-LS 電子蓄積リングの挿入光源の設置されていない直線部 LS8 下流において典型的なエッジ放射の基礎的理解を目的に観測実験を行った。エッジ放射は既設ミラーにより超高真空のビームダクトから大気中に取り出され、スクリーンに投影され CCD カメラで観測した。この実験で明瞭なエッジ放射を観測する実験手法の確立及び測定結果と計算との比較を行った。観測実験の次の段階として 3 極超伝導ウイグラー-SAGA-LS-SCW が設置された直線部 LS2 下流にミラーチャンバーを新設し、ここに設置したミラーによって光を大気外に取り出しスクリーンに投影し、その空間分布を CCD で測定した。図3に LS2 周辺の磁石配置及び新設した観測系を示す。

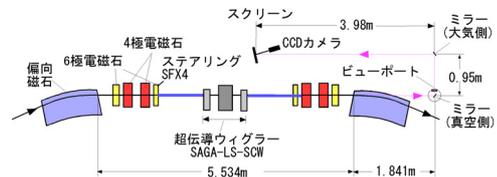


図3 ウイグラー設置直線部 LS2 磁石配置とエッジ放射観測系

4. 研究成果

理論面では paraxial 近似によるエッジ放射理論を基礎に研究して、新たに直線部中央に大きな軌道偏向を導入したモデルが得られた。ウイグラー設置直線部における軌道は長手方向に大きく 3 つの領域、(1)ウイグラー上流直線部、(2)下流直線部、(3)大きな軌道偏向を受けるウイグラー本体部に分けられる。Paraxial 近似における一般的考察から、大きな軌道偏向を伴うウイグラー本体部領域から放射される電場はその位相変化が大きく平均すると遠方観測点では、その寄与が無視できるという結果が得られ、これを基礎にウイグラー部から放射された電場の寄与を無視し、上流下流直線部からの電場を paraxial 近似理論に基づく位相因子を考慮して足し合わせるという近似モデルを導入することで非常に単純な解析的モデルを作ることが出来、放射光計算コード SRW によ

る直接的な数値計算の結果とよく一致した。この解析モデルが意味する重要な点は、超伝導ウイグラー本体部はその大きな軌道偏向によって放射への寄与は無視でき、むしろ前後直線部のエッジ放射間の干渉をコントロールする空間的ファクターとして機能するという事であった。この解析モデルから SAGA-LS-SCW 設置直線部からのエッジ放射は干渉し光強度が増大するという計算結果が得られた。また SAGA-LS 蓄積リングに限らず放射光用電子蓄積リングでは3極ウイグラー設置直線部では前後の直線部のエッジ放射が強く干渉することが一般的であることが示された。さらにこのエッジ放射の最大の干渉条件で3極ウイグラーを周期的に配置すると、直線部の数の自乗に比例してピーク輝度が増大するというエッジ放射における新しい放射増大効果を数値計算において見出した。これらの結果は原著論文として発表した。3極ウイグラーの周期配置と周期数に対する強度依存性を図4に示す。

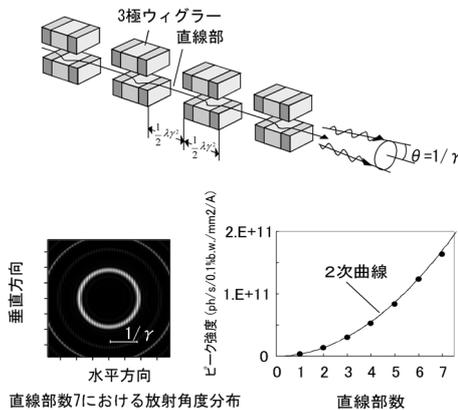


図4 3極ウイグラー周期配置モデル(上)とその空間分布(左下)及び直線部数に対する放射強度(右下)。

実験面では、最初の成果として SAGA-LS 電子蓄積リングの挿入光源の設置されていない直線部 LS8 において典型的な偏向磁石間直線部における基礎的エッジ放射測定実験を行い、新しいエッジ放射観測手法が確立されたことである。実験開始当初エッジ放射特有の放射角  $\sim 1/\gamma$  程度の同心円状の明瞭な放射分布は観測されなかった。原因は直線部に設置されている4極電磁石等偏向電磁石以外の磁石磁極の残留磁場によって発生したダイポールキックによって、直線部でのビーム軌道が各所で僅かに偏向し、軌道上の各場所からのエッジ放射の電場が干渉し分布が擾乱されたものと考えられた。明瞭なエッジ放射を観測するために、逆に意図的に直線部上流側ステアリング磁石 SFX16 を励磁し、軌道歪みを生成し、4極磁石等による残留ダイポール磁場のない純粋な直線部からのエッジ放射だけを他の磁石セクションから分離して観測する手法を開発した(図5参照)。これによりこれまでになく明瞭なエッジ放射

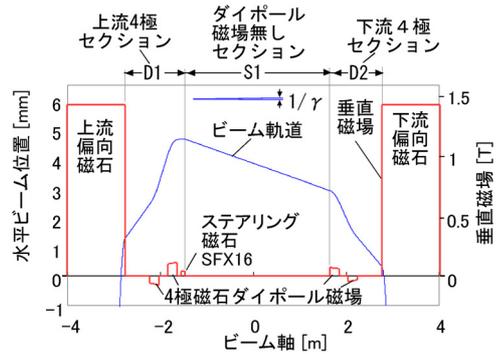


図5 直線部 LS8 における軌道補正用磁石 SFX16 の励磁によって発生した軌道歪み及びこれによる偏向電磁石間の軌道上ダイポール磁場分布の計算結果。SFX16 と4極磁石 QF1 間の磁石のない直線区間 S1 が他のセクションに対し、観測上の角度で  $1/\gamma$  より十分大きく偏向されていることがわかる。このセクションからの放射はほぼ理想的なエッジ放射となる。

の観測が容易に実現し、計算との定量的な比較が可能となった。観測されたエッジ放射は paraxial 近似理論 により、よく理解できた。観測結果と SRW による計算の比較の例を図6に示す。

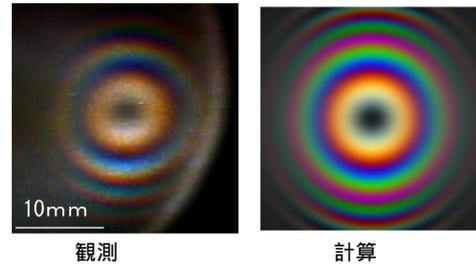


図6 観測スクリーン上で明瞭に観測された可視域エッジ放射(左)と同じ条件での数値計算結果(右)

この観測手法及び解析結果は原著論文として発表した。この成果を踏まえ次の段階の成果として、超伝導ウイグラー SAGA-LS-SCW 設置直線部 LS2 からの放射観測に成功した。LS2 下流部に可視域観測系を設置し、直線部 LS8 での実験と同様の手法でその空間分布を測定した。直線部上流側ステアリング磁石 SFX4 によって意図的な軌道歪みを発生し、ウイグラー前後の残留磁場のない直線部からの放射のみ他のセクションからの放射と分離した観測が実現できた。図7に電子軌道とその軌道上のダイポール磁場分布計算を示す。ウイグラー励磁状態においてウイグラー前後の直線部のみ他のセクションからの放射と明瞭に分離して観測された。観測の結果、明らかにウイグラー励磁状態の放射は、ウイグラー励磁のない単純直線部のエッジ放射に比べ光強度が増大した。図8にウイグラー励磁ありなしに対するエッジ放射のスクリーン上の観測画像を示す。図8で左右それぞれ

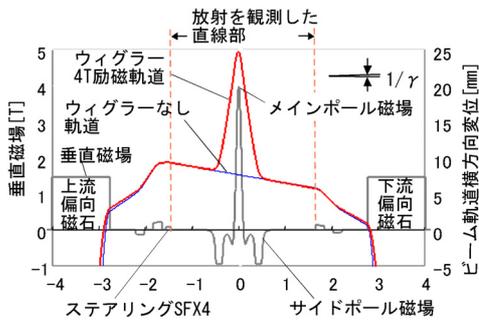


図7 直線部 LS2 において3極ウイグラー励磁状態で図3と同様に上流側ステアリング SFX4 によって軌道歪みを発生した条件での軌道及びダイポール磁場分布の計算結果。ウイグラー前後の直線部のエッジ放射が他のセクションから分離されるのがわかる。

この画像の中央部がウイグラー設置直線部からのエッジ放射で、その左側の一部欠けたリング状の光は、ステアリング SFX4 励磁による軌道ゆがみによって分離された他のセクションからのエッジ放射である。この光はウイグラーの励磁には依存しない。この光強度を基準にウイグラーが励磁されるとエッジ放射の強度が明らかに増大していることがわかる。

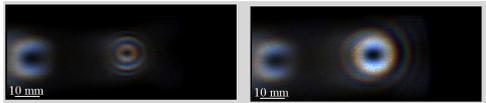


図8 ウイグラー励磁なし(左)/あり(右)における観測スクリーン上のエッジ放射画像。

また観測スクリーン上のエッジ放射の垂直方向強度分布を図8に示す。これら観測結果からエッジ放射の干渉による放射強度増大というウイグラー直線部固有の放射効果が観測されたと考えている。観測の結果は2017年1月に開催された日本放射光学会において報告した。

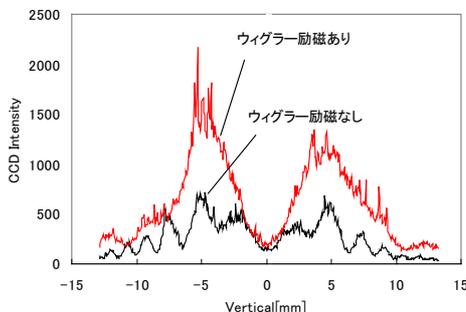


図9 ウイグラー励磁あり/なしによるエッジ放射の観測スクリーン上の光強度の垂直分布。

本課題研究期間において、エッジ放射の単純かつ明瞭な観測法の確立、3極型超伝導ウイグラー直線部におけるエッジ放射の光強度増大の観測とその理論的理解、さら

に放射強度を大幅に増大させるウイグラー周期配置による新しい放射増大効果の可能性という重要な成果が得られた。今後さらに3極ウイグラー直線部での長波長域放射についての理論的検討、観測実験をすすめる理解の精度を高め、かつ複数直線部によるエッジ放射の多重干渉による輝度増大効果について研究を進める予定である。

<引用文献>

G. Geloni, et al., "Theory of edge radiation. Part I: Foundations and basic applications", NIM A605 409-429 (2009)

J. Ablett, et al., "NSLS-II Conceptual Design Report", Brookhaven National Laboratory, 8-16, 8-20 (2006)

V.N. Korchuganov, et al., "Edge Radiation at SIBERIA-2 Storage Ring", Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, 146-150 (2008)

S. Koda, et al., "Design of a Superconducting Wiggler for the Saga Light Source Storage Ring", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 32 (2011)

江田茂、他、"SAGA-LSにおける超伝導及び常伝導マグネットから成るハイブリッド型3極ウイグラーの開発と運用状況", 放射光学会誌「放射光」,24, 141 (2011)

O. Chubar, P. Elleaume, "Accurate And Efficient Computation Of Synchrotron Radiation In The Near Field Region", Proceedings of EPAC98, 22-26, 1177 (1998)

S. Koda, Y. Takabayashi, "Interference effect of edge radiation at three-pole wiggler section", Japanese Journal of Applied Physics, 55, 096301, 1-6 (2016)

S. Koda, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, Y. Iwasaki, "Observation of edge radiation from a straight section of SAGA-LS storage ring", Japanese Journal of Applied Physics, 54, 056401, 1-5 (2015)

江田茂, 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊、超伝導ウイグラー設置直線部からの長波長域放射研究の現状、第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集、査読なし、9P001、神戸芸術センター、2017年

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6件)

S. Koda, Y. Takabayashi, "Interference effect of edge radiation at three-pole wiggler section", Japanese Journal of Applied Physics, 査読あり, 55, 096301, 1-6 (2016)

S. Koda, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, Y.

Iwasaki, "Observation of edge radiation from a straight section of SAGA-LS storage ring", Japanese Journal of Applied Physics, 査読あり, 54, 056401, 1-5 (2015)

江田茂, 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊, 超伝導ウイグラー設置直線部からの長波長域放射研究の現状, 第 30 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集, 査読なし, 9P001, 神戸芸術センター, 2017 年

江田茂, 高林雄一, 岩崎能尊, 金安達夫, 3 極ウイグラー設置直線部における長波長域放射の検討, 第 29 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集, 査読なし, 67, 柏の葉カンファレンスセンター, 柏, 2016 年

江田茂, 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊, 観測の観点からみたエッジ放射の一般的特性についての検討, 第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 査読なし, 542-545, 幕張メッセ, 千葉, 2016 年

江田茂, 高林雄一, 岩崎能尊, 金安達夫, SAGA-LS蓄積リング直線部LS8 におけるエッジ放射の観測, 第 28 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集, 査読なし, 105, 立命館大学びわこ・草津キャンパス, 草津, 2015 年

〔学会発表〕(計 4 件)

江田茂, 高林雄一, 岩崎能尊, 金安達夫, SAGA-LS蓄積リング直線部LS8 におけるエッジ放射の観測, 第 28 回日本放射光学会年会, 立命館大学びわこ・草津キャンパス, 草津, 2015 年

江田茂, 高林雄一, 岩崎能尊, 金安達夫, 3 極ウイグラー設置直線部における長波長域放射の検討, 第 29 回日本放射光学会年会, 柏の葉カンファレンスセンター, 柏, 2016 年

江田茂, 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊, 観測の観点からみたエッジ放射の一般的特性についての検討, 第 13 回日本加速器学会年会, 幕張メッセ, 千葉, 2016 年

江田茂, 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊, 超伝導ウイグラー設置直線部からの長波長域放射研究の現状, 第 30 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 神戸芸術センター, 2017 年

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江田 茂 (KODA, Shigeru)  
公益財団法人佐賀県地域産業支援センター  
九州シンクロトロン光研究センター・主任研究員

研究者番号 : 50311189

(2) 研究分担者

岩崎能尊 (IWASAKI, Yoshitaka)  
公益財団法人佐賀県地域産業支援センター  
九州シンクロトロン光研究センター・副主任研究員

研究者番号 : 40450952

(3) 連携研究者

( )

研究者番号 :

(4) 研究協力者

( )