

あいち SR 電子蓄積リングにおける共鳴線の観測

OBSERVATION OF RESONANCE LINES IN AICHI-SR ELECTRON STORAGE RING

中尾海斗^{#,A)}, 保坂将人^{B,C)}, 木村圭吾^{A)}, 石田孝司^{B,C)}, 真野篤志^{B)}, 郭磊^{B,A,C)},
高嶋圭史^{B,A,C)}, 藤本将輝^{E)}, 大熊春夫^{F,C)}, 加藤政博^{D,E,B)}

Kaito Nakao^{#,A)}, Masahito Hosaka^{B,C)}, Keigo Kimura^{A)}, Takashi Ishida^{B,C)}, Atushi Mano^{B)},
Lei Guo^{B,A,C)}, Yoshifumi Takashima^{B,A,C)}, Masaki Fujimoto^{D,E,B)}, Haruo Ohkuma^{F,C)}, Masahiro Katoh^{D,E,B)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{C)} Aichi Synchrotron Radiation Center

^{D)} Hiroshima University

^{E)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

^{F)} Osaka University

Abstract

In order to achieve stable operation of a circular accelerator, it is necessary to select an appropriate betatron tunes that avoids dangerous resonance lines. The 1.2 GeV electron storage ring of Aichi Synchrotron Radiation Center (hereinafter Aichi SR) has been operating stably since its commissioning, but detailed investigation has not been conducted on resonance lines. We investigated the influence of each resonance line on the beam near the current operating point. The betatron tunes were changed by changing the excitation current of the quadrupole magnets, and the variation of the beam size was measured by imaging the beam profile using the synchrotron light. We found that the second- and third- order resonances give rise to beam loss. We also found that at the current operating point, the beam sizes are affected by the second sum resonance and their increases in both horizontal and vertical directions depending on the distance to the resonance were confirmed. We also found that undulator operation and COD have significant effect on the fourth-order resonances.

1. はじめに

放射光源用の蓄積リングでは、高輝度の放射光を安定に供給することが最重要課題である。ビームの安定性を乱すものの一つにベータロン振動の共鳴現象がある。あいちシンクロトロン光センター(以下、あいち SR)の中核装置である 1.2 GeV 電子蓄積リングは開設以来 300 mA のトップアップモードで安定に運転されているものの、これまでベータロン振動共鳴についての十分な調査は行われていなかった。

そこで本研究では、通常の運転で用いられている動作点の近傍でベータロン振動数を変化させて、共鳴線の強さやビームへの影響を調べた。また、アンジュレータを動作させることで生じるラティスの対称性の破れやアンジュレータの生み出す非線形効果により非構造共鳴や高次の共鳴線の出現も予想されたことから、特に非線形性の強いと考えられるアンジュレータを垂直偏光モードにした際の共鳴線の強さのアンジュレータギャップ依存性についても調べた。

2. ベータロン振動の共鳴現象

蓄積リングのある点で電子を観測するとき、周回する電子は毎周観測するたびに異なる位置と傾きを持っている。一般にこの位置と傾きはガウス分布する。チューンが整数の場合、ビームが1周するたびに同じ位置に同じ傾きで戻ってくる。このような条件下で誤差二極磁場が存

在するとビームは同じ方向に摂動を受け続けることから、振動振幅は増大する。最終的にビームはダクトに衝突し、ビームが失われてしまう。このような二極誤差磁場が引き起こす整数共鳴の他にリング内に存在するより高次の磁場によって発生する高次の共鳴もある[1,2]。一般に共鳴の条件式は次式で表される。

$$mv_x + lv_y = jN \quad (1)$$

ここで m, l, j は整数であり、 N はラティスの対称数である。Equation (1) で表される共鳴を構造共鳴 (Structure Resonance) と呼び、強く励起される共鳴である[3]。ラティスが完全に対称であるとき、 N が増加するほど励起される共鳴の数は少なくなる。しかし誤差磁場や挿入光源の影響で対称数が崩れると、本来励起されないはずの共鳴が励起される場合がある。

3. 実験方法

3.1 実験の概要

本研究ではまず、アンジュレータの影響がない状態であいち SR 電子蓄積リングのベータロン振動の動作点を 2 次共鳴, 3 次共鳴, 4 次共鳴にそれぞれ接近させ、その際のシンクロトロン光を結像することで電子ビームのイメージ画像からビームサイズを求め、共鳴の影響について調査した。次にアンジュレータを垂直偏光モードに設定し、アンジュレータギャップを縮めて動作点を 4 次共鳴に接近させ、その際のビームサイズとビーム寿命を求めた。

[#] nakao.kaito@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

3.2 動作点操作

あいち SR には 4 種類の 4 極電磁石が設置されている。動作点を変更するための操作行列を得るために次の実験を行った。なお運転は結合型ビーム不安定性からの影響を避けるためにシングルバンチで蓄積電流値 10 mA で行った。

4 種類の 4 極電磁石のうち 2 つの励磁電流値を微小に変えたときのベータロン振動数の変化量を求め、その逆行列を求めることで操作行列を得た。

3.3 ベータロンチューン測定

ストリップライン電極で電子ビームによる信号を捉え、スペクトルアナライザを用いて信号の周波数解析を行った。別のストリップライン電極に高周波電流を送り、通過する電子ビームにその磁場による蹴りを与えてベータロン振動を励起した。ベータロン振動の励起は x 方向, y 方向をそれぞれ個別で行った。

3.4 ビームサイズ解析

電子ビームが偏向電磁石を通過した際に発生する放射光を、レンズを用いて結像することで得られる電子ビームの像を CCD カメラで撮影した。その画像データを水平, 垂直方向それぞれに正規分布でフィッティングを行い(Fig. 1), 標準偏差 σ を電子ビームサイズとした。

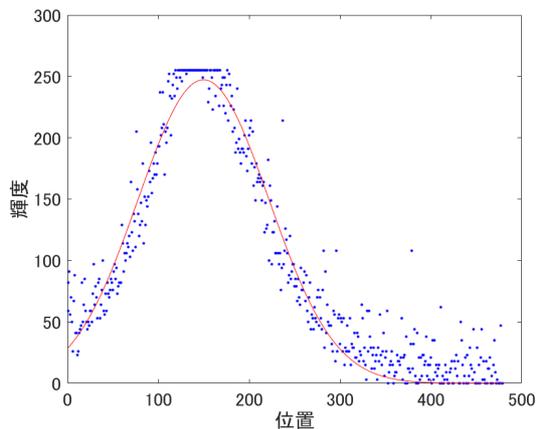


Figure 1: Beam size fitting.

3.5 アンジュレータギャップ依存性

非構造共鳴である 4 次共鳴に対して, アンジュレータを垂直偏光モードとし, ギャップを 50 mm, 35 mm, 30 mm, 24 mm と変化させた際のビームサイズ, ビーム電流を求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 2 次共鳴 ($\nu_x + \nu_y = 1$)

通常運転でのベータロンチューンは(4.73, 3.19)であるが, 本稿ではチューン端数のみを取り扱う。

2 次共鳴 $\nu_x + \nu_y = 1$ が電子ビームに与える影響について調べた。この共鳴は現状の動作点近傍における唯

一の構造共鳴である。Figure 2 に計測中の動作点の移動の様子を示す。また, Fig. 2 中の各領域①, ②, ③における鉛直方向のビームサイズ(以下, ビームサイズ)をそれぞれ Fig. 3, 4, 5 に示す。

Figure 4 に示すように, 現状の動作点から 2 次共鳴に近づけた場合, 最大のビームサイズは現状のビームサイズの約 2.2 倍に増大していることがわかる。また, 動作点が共鳴から遠い場合でも電子ビームは共鳴の影響を受けることがわかる。特に, 現状の動作点から少し水平方向チューンを増やすとビームサイズの増加が始まった。また, 動作点が 2 次共鳴に至る以前に電子ビームは失われた。それぞれの領域についてビームが消失した動作点と共鳴線のチューンダイアグラム上の距離は①: 2.6×10^{-2} , ②: 1.5×10^{-2} , ③: 7.0×10^{-3} となった。この結果より, 鉛直チューンの値が大きくなるにつれて, 共鳴線の影響幅が広くなり, 共鳴の影響が増大することが分かった。

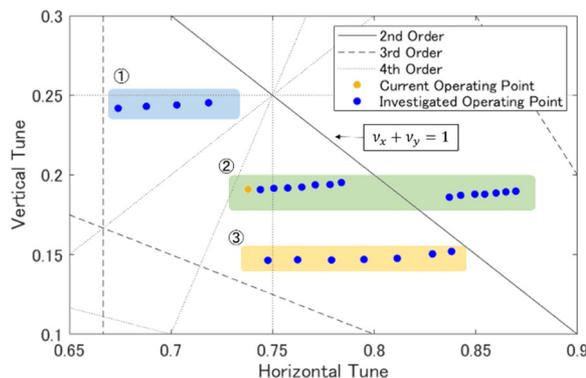


Figure 2: Investigated Operating Point.

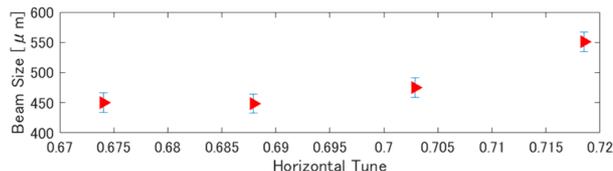


Figure 3: Vertical beam size of area 1.

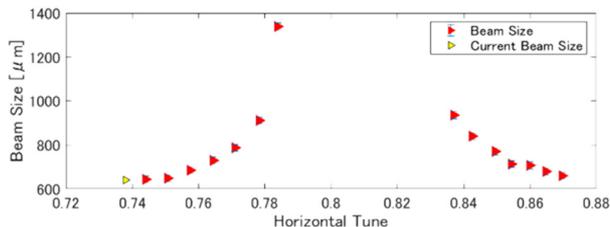


Figure 4: Vertical beam size of area 2.

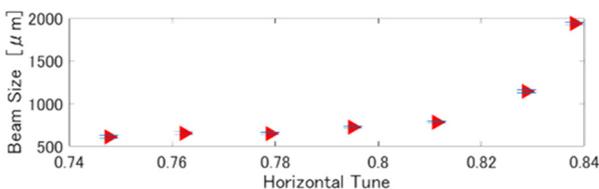


Figure 5: Vertical beam size of area 3.

4.2 3次共鳴($3\nu_x = 2$, $\nu_x + 2\nu_y = 1$)

今回調査した3次共鳴は非構造共鳴であるが、以下に述べるようにあいちSRでは観測できる。Figure 6に3次共鳴線付近で変化させた動作点を示す。また、Fig. 6に対応するビームサイズをFig. 7に示す。

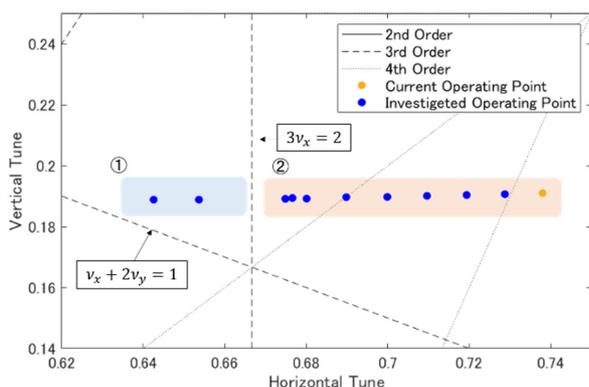


Figure 6: Investigated operating point for 3rd-order resonance.

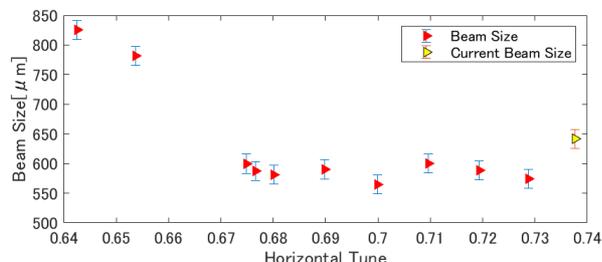


Figure 7: Vertical beam size for 3rd-order resonance.

動作点を現状の動作点から3次共鳴($3\nu_x = 2$)に近づけた場合 (Fig. 6, 領域②), 動作点と共鳴線の距離が 8.2×10^{-3} より小さくなった際にビームロスが起こった。2次共鳴のような急激なビームサイズの増大は確認されなかった。2次共鳴の影響 (Fig. 4) も加味すると、現状の動作点では2次共鳴の影響を受けており、鉛直チューン一定で考えると水平チューンを0.04程度低下させたほうがビームサイズが小さくなり、安定となる可能性がある。

一方で、3次共鳴($3\nu_x = 2$)と($\nu_x + 2\nu_y = 1$)の間の2点 (Fig. 6, 領域①) については、現状のビームサイズの約1.2倍となり、同じ次数の共鳴でもビームに与える影響に違いが見られた。この結果の原因としては、前者は水平方向のみ、後者は水平・鉛直両方向の共鳴の影響を受け、後者のほうがより垂直方向ビームサイズに対する影響が大きくなったからだと考えられる。

4.3 4次共鳴の影響

4次共鳴 $4\nu_y = 1$ に動作点を接近させた際のチューンダイアグラム、ビームサイズをそれぞれ Fig. 8, 9 に示す。これらの結果より、共鳴線 $4\nu_y = 1$ は2次, 3次のようにビームサイズを増大させることはなく、また、共鳴の影響幅は非常に狭いもの (7.1×10^{-3}) であったがビームロスが発生した。一方で、Fig. 2の領域②に示すように4次共鳴 $4\nu_x = 3$ はビームに対して影響を与えなかった。

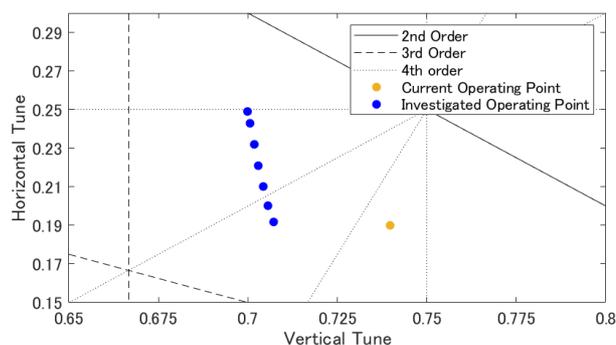


Figure 8: Operating point for 4th-order resonance: $4\nu_y = 1$.

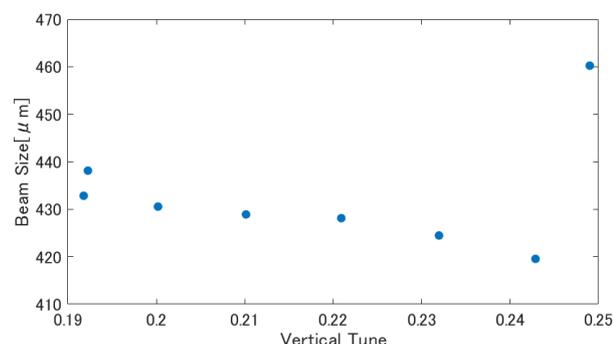


Figure 9: Beam size for 4th-order resonance: $4\nu_y = 1$.

あいちSRのラティスは4回対称であり $4\nu_y = 1$ は非構造共鳴であるため、ラティスが完全に対称であればこの共鳴は励起されない。あいちSRではユーザー利用のためにCODの一部を意図的に大きくしている。そのため、この共鳴によるビームロスはCODによりラティスの対称性が破れていることに起因すると考えた。そこでCODを補正して再度共鳴線 $4\nu_y = 1$ に動作点を接近させた。その際のCODとチューンダイアグラム、ビームサイズを Fig. 10, 11, 12 に示す。この結果よりCODを補正すると、共鳴線 $4\nu_y = 1$ ではビームロスが起きないことが分かった。非構造共鳴である共鳴線 $4\nu_y = 1$ が励起される原因はCODのずれによるラティスの対称性の破れであると考えられる。

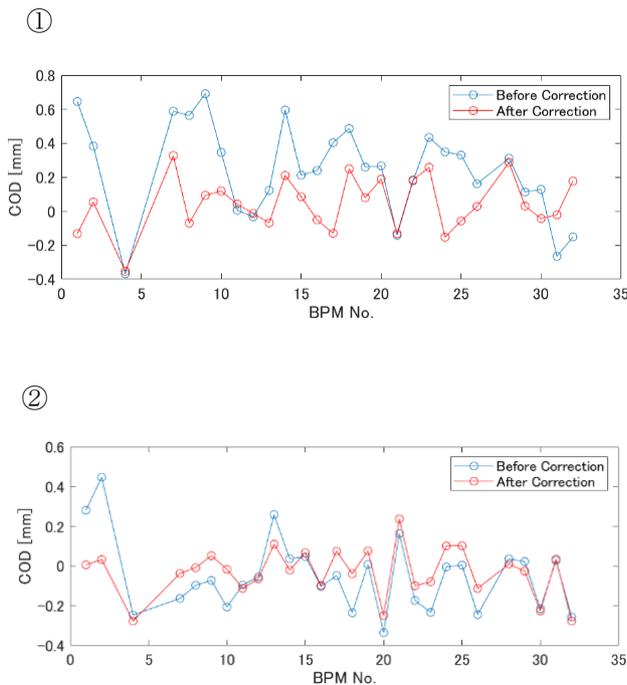


Figure 10: COD (①:horizontal, ②:vertical).

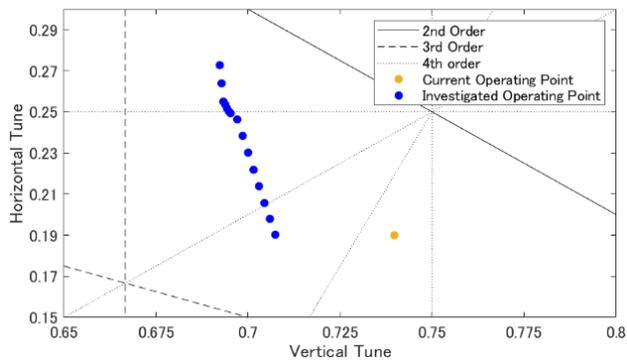


Figure 11: Tune survey for 4th-order resonance after COD correction.

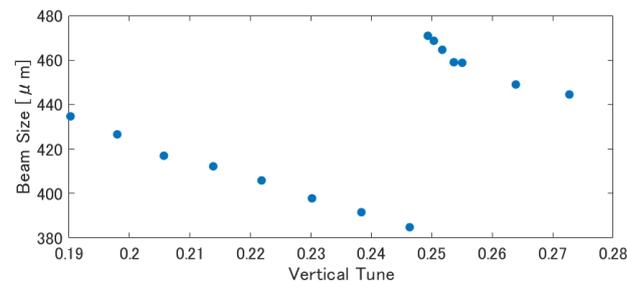


Figure 12: Beam size vs. vertical tune.

4.4 アンジュレータによる4次共鳴の影響

アンジュレータギャップが大きい際にビームに対して影響がなかった $4\nu_x = 3$ に対して、垂直偏光モードにしたアンジュレータギャップを変化させた際のビームサイズ

を Fig. 13 に示す.

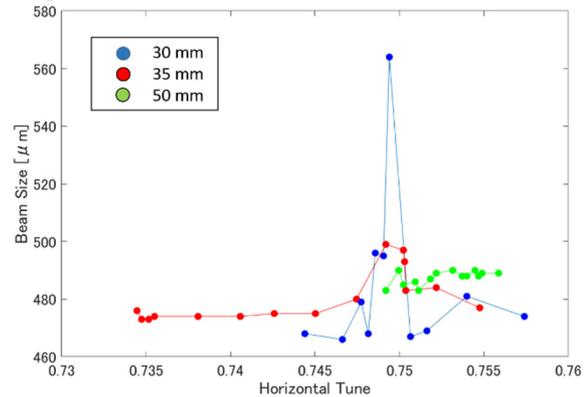


Figure 13: Beam size near the 4th-order resonance with different undulator gap.

Figure 13 に示されるように、ギャップ 35 mm, 50 mm ではビームサイズに大きな変化は見られず, 30 mm からビームサイズが増大し, 24 mm では共鳴線からの距離が 1.1×10^{-2} より小さいときにビームが消失した. この現象はラティスの対称性がアンジュレータによって乱されるためか, あるいは垂直偏光モードにおけるアンジュレータの作り出す 8 極磁場成分による共鳴の励起のどちらか, あるいは両方と考えられる.

5. まとめ

本実験ではあいち SR における共鳴線の観測を行った. 現在の動作点付近は構造共鳴である $\nu_x + \nu_y = 1$ の影響を受け, わずかながらビームサイズが増大している可能性があることがわかった. また, 一部の非構造共鳴が励起されており, これは意図的に大きくしている COD の影響でラティスの対称性が破れていることに起因することが判明した. アンジュレータの影響については, 本来励起していない共鳴線がアンジュレータギャップを縮めることによって励起された. 今後は高次の共鳴がどのような要因で発生しているかを調査したいと考えている.

謝辞

あいち SR の施設関係者の方々には, 本研究において多大なるご支援を頂きました. ここに深く感謝いたします.

参考文献

- [1] M. Katoh, Introduction to electronic storage rings OHO '93.
- [2] K. Harada, Outline of circular accelerator and basics of single particle dynamics OHO '08.
- [3] Helmut Wiedman, Particle Accelerator Physics.