

## あいち SR における APPLE-II 型アンジュレータ運転中の不安定性の解析

### STUDY OF BEAM INSTABILITY CAUSED BY APPLE-II UNDULATOR IN VERTICAL POLARIZATION MODE IN AICHI-SR

木村圭吾<sup>#,A)</sup>, 保坂将人<sup>B)C)</sup>, 石田孝司<sup>B)C)</sup>, 真野篤志<sup>B)</sup>, 高嶋圭史<sup>B)C)</sup>, 大熊春夫<sup>C)D)</sup>, 加藤政博<sup>B)E)</sup>  
Keigo Kimura<sup>#,A)</sup>, Masahito Hosaka<sup>B)C)</sup>, Takashi Ishida<sup>B)</sup>, Atsushi Mano<sup>B)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>B)C)</sup>,  
Haruo Ohkuma<sup>C)D)</sup>, Masahiro Katoh<sup>B)E)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Engineering Nagoya University

<sup>B)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

<sup>C)</sup> Aichi Synchrotron Radiation Center

<sup>D)</sup> JASRI/SPring-8

<sup>E)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

#### Abstract

In the Aichi SR storage ring, an APPLE-II type undulator is mainly operated in the horizontal polarization mode. However, when the undulator is operated in the vertical polarization mode, transverse coupled bunch instability is excited and the oscillation amplitude grows till the electron beam is lost. We experimentally studied the instability and found that the main source of the instability is the higher order mode of the accelerating RF cavity. We also studied the effect of the magnetic field of the undulator on the electron beam by experiments and simulations and found that the multipole magnetic field of the undulator has some effect on the beam instability.

#### 1. はじめに

APPLE-II 型アンジュレータは比較的単純な磁気回路でありながら様々な偏光の準単色光を生成できるという特徴から多くの施設で導入されており、あいちシンクロトロン光センター(以下、あいち SR)にも導入されている。しかしあいち SR では APPLE-II 型アンジュレータを垂直偏光モードで運転した場合、電子ビームに水平方向のビーム不安定性が生じ、さらには不安定性の振幅の増大とともに電子ビームが失われる現象が観測されている。一方、水平偏光モードで用いた場合、この不安定性は生じないため、通常運転ではアンジュレータは水平偏光モードで運転されている。この不安定性を改善し APPLE-II 型アンジュレータを垂直偏光モードで安定的に運転させることがあいち SR の課題の 1 つとなっている。ここであいち SR の運転パラメータを Table1 に示す。

Table 1: Each Parameter of AichiSR

Beam Energy	1.2 GeV
Circumference	72.0 m
Beam Current	300 mA
Emittance	53 nm·rad
Betatron Tunes	(4.73 , 3.18)
RF-frequency	499.7 MHz
Damping Time	(6.69,6.69,3.34) ms
Harmonic Number	120
Revolution Time	240 ns

本研究ではあいち SR における APPLE-II 型アンジュレータ運転中のビーム不安定性の改善が最終目標であるがいまだそのビーム不安定性の発生メカニズムははっきりしていない。そこでまずビーム不安定性の振動モードを実験的に調べた。またその不安定性発生に影響を与える可能性があると考えられる[1]APPLE-II 型アンジュレータの多極磁場について研究した。あいち SR の APPLE-II 型アンジュレータの主要パラメータを Table 2 に示す。

Table 2: Main Parameters of APPLE-II Type Undulator

Magnet Material	Nd-Fe-B(NMX-46CH)
Remanent Magnetic Field	1.313 T
Magnet Size	width 40×height 40×depth 15 mm
End Pole Dimension	Inside 40×40×7.5mm
	Outside 40×40×9.0mm
Period Length	60 mm
Number of Periods	33
Total Length	2025 mm
Maximum Gap	200mm
Minimum Gap	24mm

## 2. 電子ビームの不安定性

### 2.1 不安定性の振動モード

APPLE-II 型アンジュレータ垂直偏光モードで運転中に起こるビーム不安定性の振動モードの観測を行なった。本実験は通常運転であるビーム電流 300mA で行い、アンジュレータを垂直偏光モードにしてギャップを不安定性が引き起こされる 36mm まで狭め、電子ビームの不安定性を引き起こした。ストリップライン電極で検出した電気信号をスペクトルアナライザーで分析することによって電子ビームの振動の周波数成分の測定を 250MHz から 500MHz まで行った。Figure 1 に不安定性が引き起こされているときの周波数スペクトルを示す。

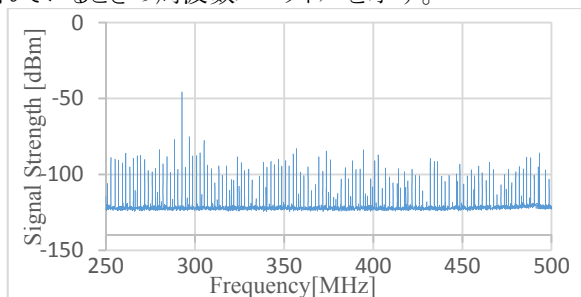


Figure 1: Spectrum of the transverse coupled bunch instability. The highest peak corresponds to the TM110H of the RF accelerating cavity.

このグラフで信号が最も強く出ている周波数は 292.656MHz であり、この値に RF 加速周波数の 499.697MHz を加えた 792.353MHz は RF 加速空洞の高次モードのうちの一つである TM110H の周波数 792.087MHz と一致する。このモードは水平方向に不安定性を引き起こし[2]、RF 加速空洞に存在する共振の中でも最も Q 値が高いものである。この高次モードにより結合型バンチ不安定性が発生していると考えられる。

### 2.2 不安定性を引き起こすアンジュレータ運転条件

あいち SR の APPLE-II 型アンジュレータの垂直偏光モードでの運転中に不安定性を発生させるアンジュレータギャップのビーム電流依存性を調べた。実験方法として様々なビーム電流値において徐々にアンジュレータギャップを狭めていき、スペクトルアナライザーに不安定性によるピーク(水平方向ベータatron振動の周波数)が表れた時のアンジュレータギャップを記録したものを Fig. 2 に示す。

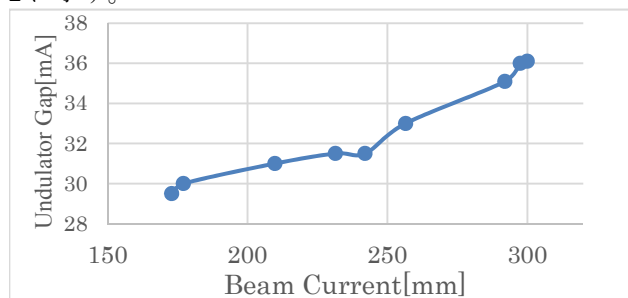


Figure 2: Threshold of undulator gap for the coupled bunch instability.

電流値が 160mA 以下の時、アンジュレータギャップを最小ギャップである 24mm まで狭めても不安定性は発生しなかった。一方、蓄積電流値が 300 mA のときには 36 mm で不安定性が生じる。

## 3. RADIA を用いたシミュレーション

### 3.1 アンジュレータモデルの作製

有限要素法によって 3 次元磁場を計算するコード RADIA[3]を用いて電子ビーム軌道上の磁場の計算を行なった。そのときに Table 2 を参考に作成したアンジュレータモデルの一部を Fig. 3 に示す。

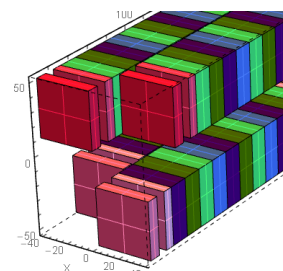


Figure 3: APPLE-II type undulator model by RADIA.

### 3.2 電子運動のシミュレーション

Runge-Kutta 法を用いて RADIA において導出された磁場中を運動する電子の軌道を計算した。その結果を Fig. 4 に示す。

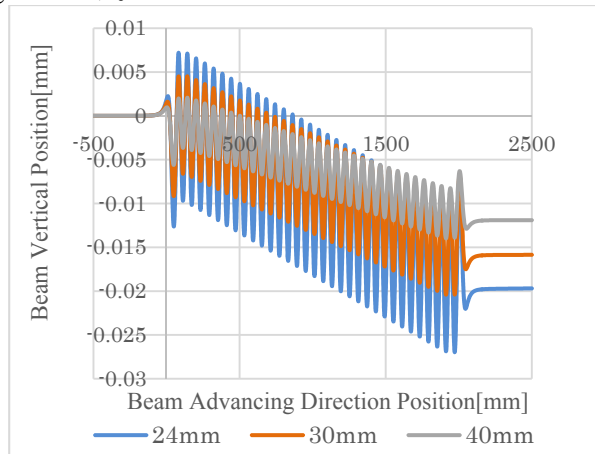


Figure 4: Beam trajectory at each undulator gap.

電子のアンジュレータへの水平方向入射位置を  $x$ [mm]、アンジュレータ通過後の角度を  $x'$ [mrad]とし、 $x$  に対する  $x'$  の関係を導出した。またアンジュレータから通過後の角度  $y'$ [mrad] を電子の垂直入射位置を  $y$ [mm] の関数としても求めた。その結果を Fig. 5, Fig. 6 に示す。

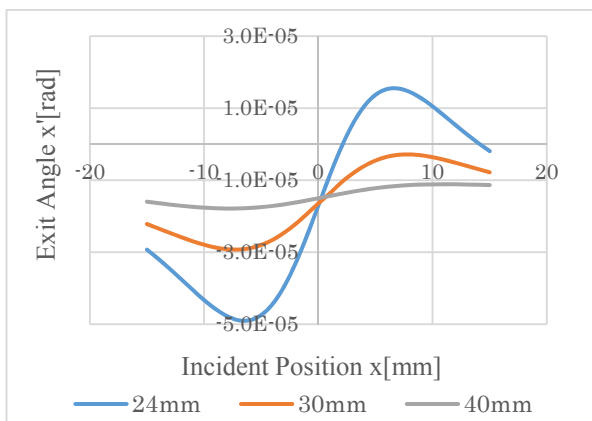


Figure 5: Horizontal exit angle as a function of incident position.

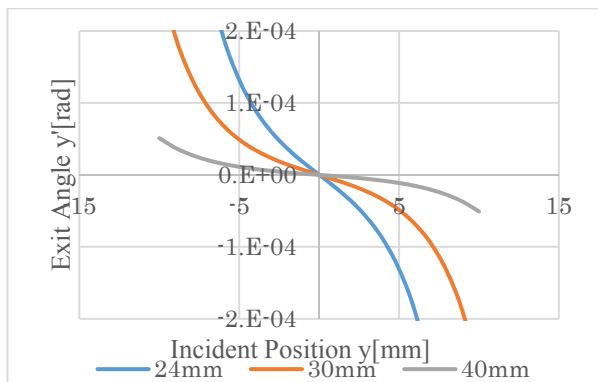


Figure 6: Vertical exit angle as a function of incident position.

この結果より  $x-x'$ 、 $y-y'$  のどちらのグラフもアンジュレータの中心あたり( $x=0, y=0$ )ではほぼ直線であり、四極磁場成分が強いことを表しているが、アンジュレータの中心から外れるにつれて曲線になり四極磁場成分以外の多極成分、主に 8 極磁場の影響が強くなっていることが確認できる。またこの  $x-x'$  のグラフを水平偏光モードと垂直偏光モードにおいて比較したものが Fig. 7 である。これより多極磁場は垂直偏光モードより水平偏光モードの方が十分小さく、4 極および 8 極成分が反対符号であることが分かる。

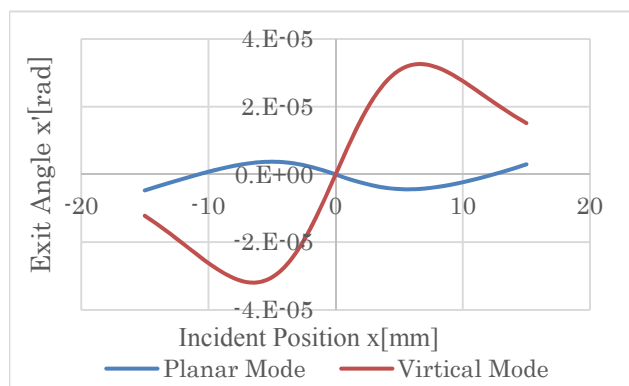


Figure 7: Comparison of multipole fields in planar mode and vertical mode.

## 4. ベータatronチューンシフトの観測とシミュレーションの比較

### 4.1 ベータatronチューンシフト

アンジュレータによるベータatronチューンシフト $\Delta\nu$ を以下の式を用いて計算した。

$$\Delta\nu = \frac{\langle\beta\rangle}{4\pi} \Delta k \quad (1)$$

ここで、 $\langle\beta\rangle$ はアンジュレータ中のベータ関数の平均値、 $\Delta k$ は Fig. 5, Fig. 6 で示された  $x-x'$ 、 $y-y'$  の関係から求められるアンジュレータ磁場の四極成分である[4]。

$x=y=0$ におけるアンジュレータのギャップ変化によるベータatronチューンシフトの測定をアンジュレータギャップが100mm のときを基準として行った。測定は、RF ノックアウトを用いて外部磁場を加えることによってベータatron振動を励起し、それをスペクトルアナライザーで分析しベータatronチューンを計測した。RADIAによって求めたアンジュレータの収束力から求めたチューンシフトと実測値の比較を Fig. 8, Fig. 9 に示す。水平方向におけるベータatronチューンシフトの実測値とシミュレーションで算出した値はよく一致した。また垂直方向におけるベータatronチューンシフトは垂直方向のベータ関数を補正することにより十分な一致を示した。

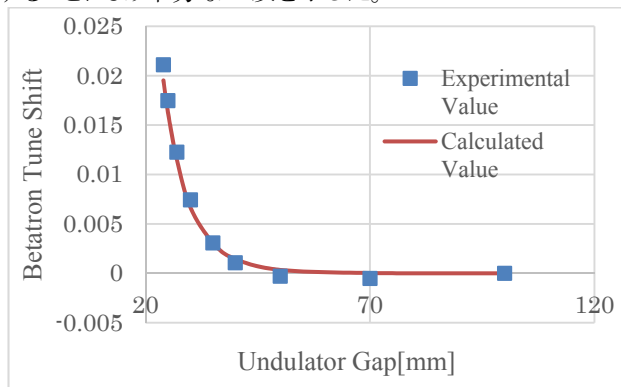


Figure 8: Horizontal betatron tune shift as a function of undulator gap.

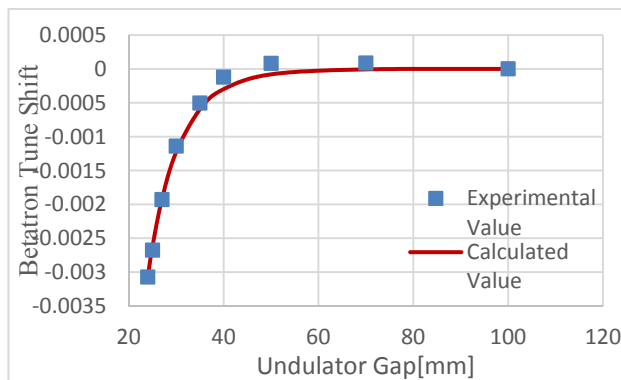


Figure 9: Vertical betatron tune shift as a function of undulator gap.

#### 4.2 ベータatronチューンシフトのビーム軌道依存性

アンジュレータ磁場の多極成分はチューンシフトの軌道依存性に現れる。そこでアンジュレータへの電子ビーム入射する軌道を変えてベータatronチューンシフトを測定した。RADIA によるシミュレーションの値と実測値を比較したものを Fig. 10, Fig. 11 に示す。水平方向、垂直方向の両方のベータatronチューンシフトはどちらもビーム軌道依存性を示し多極磁場の影響が表れている。

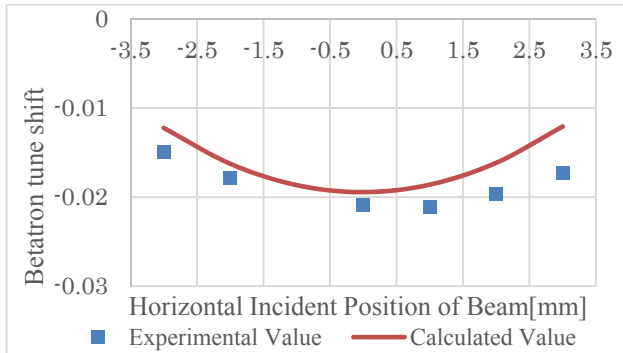


Figure 10: Horizontal betatron tune shifts as a function of incident position.

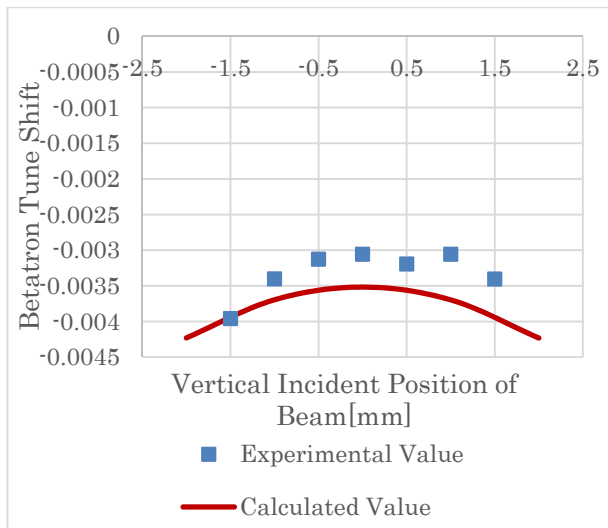


Figure 11: Vertical betatron tune shifts as a function of incident position.

## 5. まとめ

あいち SR の APPLE-II 型アンジュレータ垂直偏光モード運転中に引き起こされる不安定性のモードは RF 加速空洞の共振周波数 7922.180MHz の TM110H であることが判明した。また三次元磁場計算ソフト RADIA を用いたシミュレーションにおいてアンジュレータ垂直偏光モード運転時に多極磁場成分が強くあらわれることが示され、あいち SR における実測においても多極磁場の影響が確認された。この多極磁場が何らかの原因でビーム不安定性を発生させていると考えられる。

## 謝辞

本研究を進める上で、あいち SR の職員の方々をはじめ多くの加速器関係者に実験協力をはじめとした数多くのご支援、ご指示を頂きました。深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 菊地 良貴(名古屋大学):「マルチワイヤによる APPLE-II 型アンジュレータの Dynamic Multipole 補正」博士課程前期課程(2011).
- [2] 久岡 信太郎 (兵庫県立大学) :「ニュースバルにおける 792MHz 高次寄生モードによる水平方向バンチ結合不安定性」博士課程前期過程修士論文(2005).
- [3] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>
- [4] 加藤 政博:「OHO '93 高エネルギー加速器セミナー—光源用加速器と放射光用ビームライン— 電子ストレージリング I —入門—」(1993).