

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^{#, A)}, 保坂将人^{B, C)}, 石田孝司^{B)}, 藤本将輝^{D)}, 真野篤志^{B, C)}, 郭 磊^{B)} 高嶋圭史^{B, C)}, 加藤政博^{D, E)},
大熊春夫^{C, F)}

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

^{A)} Graduate School of Eng. Nagoya Univ.

^{B)} SR Center, Nagoya Univ.

^{C)} Aichi SR center

^{D)} UVSOR Facility

^{E)} Hiroshima Univ.

^{F)} RCNP, Osaka Univ.

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 observed damping of coherent betatron oscillation excited by a kicker. The observed damping time and the deduced tune spread strongly depend on the undulator gap. Presumably, the variation of the tune spread affects the Landau Damping rate and accounts for the instability growth.

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ながら様々な偏光の準単色光を生成できる特徴から多くの施設で導入され、あいちシンクロtron光センター(以下、あいち SR)にも導入されている。しかしながらあいち 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、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アンジュレータは水平偏光モードで通常運転されている。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 つである。あいち SR の運転パラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Main Parameters 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 (hor., ver., long.)	(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明確ではない。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。またアンジュレータの動作に伴う電子ビームの Tune spread の変化について研究した。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 APPLE-II 型アンジュレータの多極磁場について研究した[1]。

2. 電子ビームの不安定性

2.1 不安定性の振動モード

以前のあいち SR におけるアンジュレータ運転中の不

[#]kimura.keigo@e.mbox.nagoya-u.ac.jp

安定性の観測結果より、励起されている不安定性の周波数は RF 加速空洞の TEM110H という高次モードの周波数と一致することが明らかになった。このモードはこの RF 加速空洞に存在する高次モードの中でも最も Q 値が高いものであり、これ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]。したがってアンジュレータの多極磁場等によって直接なんらかの不安定性が励起されていることは考えにくい。

2.2 電子ビーム不安定性を引き起こすアンジュレータ運転条件

APPLE-II 型アンジュレータの垂直偏光モードでの運転中に結合型ビーム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。その結果を Fig. 1 に示す。

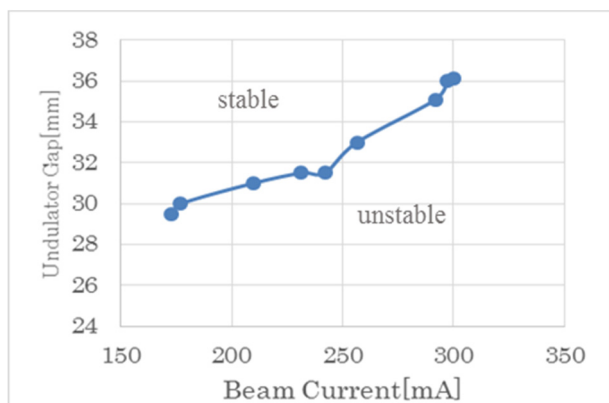


Figure 1: Threshold of undulator gap for the instability.

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値である 24mm まで狭めても不安定性は発生しない。これより十分高い蓄積電流値 300 mA のときには 36 mm 以下のギャップ値で不安定性が生じることが観測された。一方、160mA 付近では不安定性は 29.5mm-30mm のギャップ値でもっとも励起されやすく、また、そのギャップ値よりさらに縮めるとビームは安定になった。このことから垂直偏光モードのアンジュレータギャップが 30 mm 付近で最も不安定性に対する影響が大きいことが示唆された。

3. ベータトロン振動の減衰時間の測定

3.1 加速器における減衰について

加速器には不安定性の成長を抑制する減衰が存在する。例えば電子蓄積リングにおいては放射減衰が挙げられる。我々はアンジュレータが不安定性を直接的に引き起こすのではなく、元から存在していた減衰効果を抑制することによって不安定性が励起されているのではないかと考え、アンジュレータ動作中の電子ビームのベータトロン振動の減衰についての観測を行った

3.2 ベータトロン振動の減衰時間測定

通常運転下での減衰時間を測定するため、様々なビーム電流値において入射用パルスキッカー一台を用いてパルス幅 2μsec で電子ビームを蹴り、その後の電子

ビームの軌道を周回ごとに測定した。測定には Libera brilliance を用いた[3]。結果を Fig. 2 に示す。

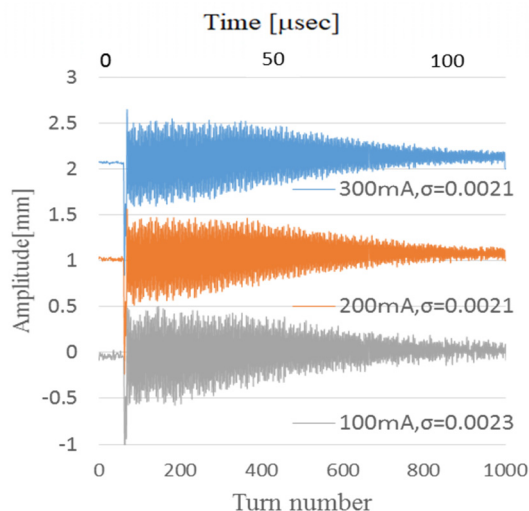


Figure 2: Attenuation at each stored beam current.

この結果からベータトロン振動の減衰時間はおおよそ 0.1msec であり放射減衰の 6.7msec に比べると非常に短いことが分かる。また、観測された減衰時間が蓄積電流値に依存しないことから、Head-Tail damping のようにインピーダンスを原因とした減衰ではないと考えられる[4]。

どのようなアンジュレータギャップ値においても不安定性の観測されない蓄積ビーム電流値 100mA においてアンジュレータギャップを変えながらそのときの減衰時間の測定を行った。その結果を Fig. 3 に示す。

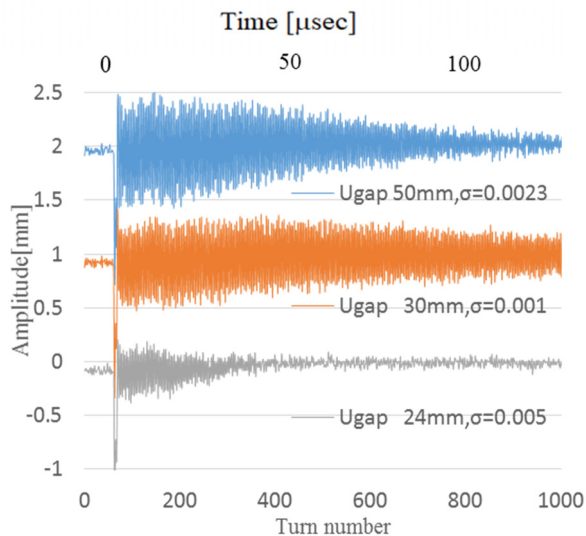


Figure 3: Attenuation at each undulator gap.

図から明らかなように減衰時間がアンジュレータギャップに大きく依存することが分かった。最も減衰時間が長かったのはアンジュレータギャップが 30mm 付近であり、Fig. 2 で示した最も低い電流値で不安定性が引き起こされるアンジュレータギャップのしきい値とほぼ一致した。またアンジュレータの最小ギャップにおける減衰時間は

アンジュレータの影響が極めて小さいと考えられるギャップ 100mm での減衰時間よりも短いことが判明した。

4. アンジュレータによるベータatronチューン 拡がりへの影響

4.1 ベータatronチューン拡がり と重心運動

ここでベータatronチューン拡がりを持った電子バンチに横方向キックを与えた際の重心運動を計算する。個々の電子の位置 $x(t)$ は周波数を ω とするベータatron振動の方程式

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (1)$$

の解として

$$x(t) = \frac{A}{\omega} \sin(\omega t) \quad (2)$$

とかける。ここで A は初期値で決まる定数である。電子バンチ内の電子の振動数が ω_0 の周りの分散 σ の Gauss 分布をなすと仮定すると、その分布関数は以下のようにあらわされる。

$$f(\omega) = \frac{\exp(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2})}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (3)$$

また、 x の位置の平均値 $\langle x \rangle$ が重心位置となり、その時間変化を計算すると

$$\begin{aligned} \langle x \rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega) \frac{A}{\omega} \sin(\omega t) d\omega \\ &\propto \exp\left(-\frac{\sigma^2 t^2}{2}\right) \cos(\omega_0 t) \end{aligned} \quad (4)$$

となり、時間と共に個々の電子の振動位相がずれるため重心運動は減衰する。ここでチューン広がり Δv とすると

$$\Delta v = \frac{\sigma}{2\pi} \quad (5)$$

と表される。電子ビームの重心の振幅が周波数広がりにより減衰する様子を Fig. 4 に示す。

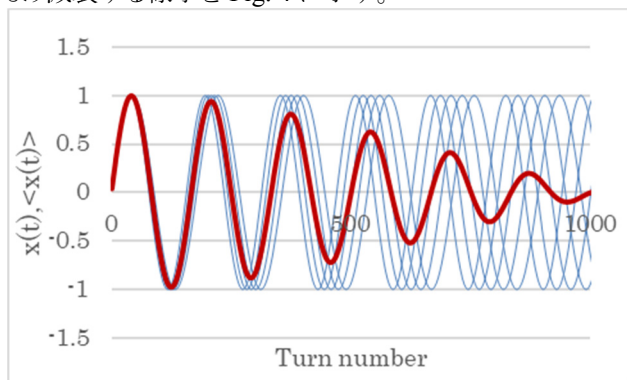


Figure 4: Beam response with tune spread.

4.2 ベータatronチューン拡がりの測定

Equation (4)の式を用いて実験結果を回帰分析しチューン拡がりを見積もり、Fig. 5 に示す。

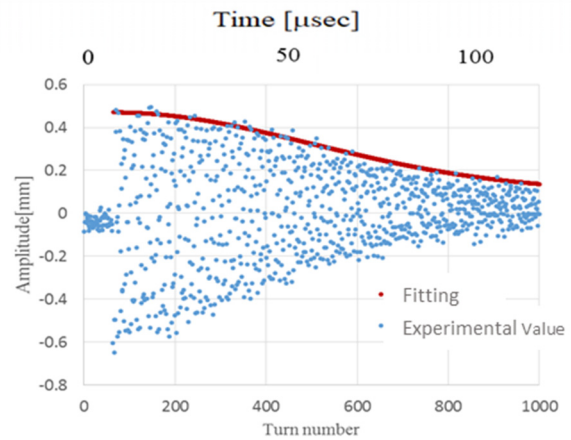


Figure 5: Betatron oscillation damping at the undulator gap of 50mm.

ここでアンジュレータギャップとチューン拡がりの関係を Fig. 6 に示す。

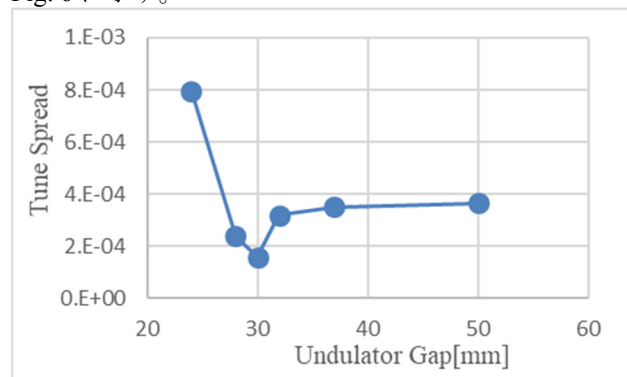


Figure 6: Undulator Gap vs. Betatron Tune Spread.

この結果からアンジュレータがチューン拡がりに影響を与え、ギャップを狭める程チューン拡がりが小さくなりギャップ 30mm を境にチューン拡がりが大きくなるように働いていることが分かる。これはアンジュレータは常に元あったチューン拡がりを打ち消す方向に働いており、ギャップが 30mm 付近でもっとも強く打ち消して、それ以下のギャップではアンジュレータによる影響が主要となるチューン拡がりが大きくなっているのではないかと考えられる。

5. アンジュレータによる Tune spread への影響

5.1 アンジュレータの八極磁場

ビーム不安定性を抑制するために八極磁石が用いられることがある。八極磁場でもたらされる Tune spread に伴って生じる Landau damping を利用してビーム不安定性を抑制する[5]。アンジュレータの作り出す八極磁場成分を調べるために 3 次元磁場計算コード RADIA を用いて電子ビーム軌道上の磁場の計算を行なった[6]。そのときに作成したアンジュレータモデルの一部を Fig. 7 に示す。

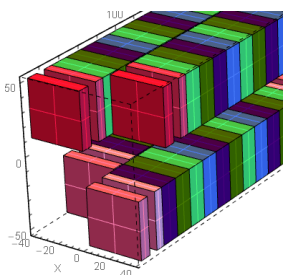


Figure 7: APPLE- II type undulator model by RADIA.

そして RADIA において導出された磁場中を運動する電子の軌道をシミュレーションにより導出した。その結果を Fig. 8 に示す。

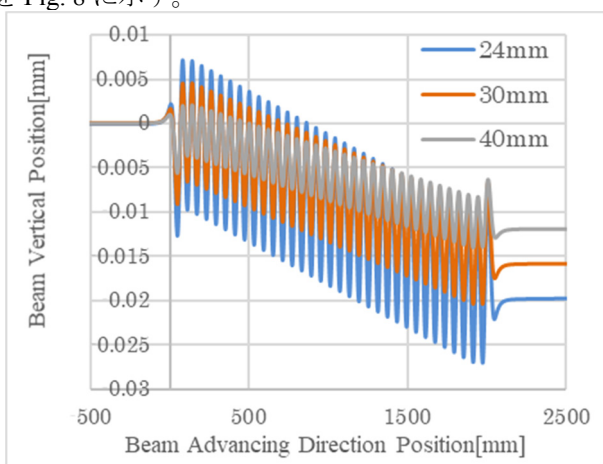


Figure 8: Beam trajectory at each undulator gap.

ここで各アンジュレータギャップにおける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、Fig. 9 に示す。

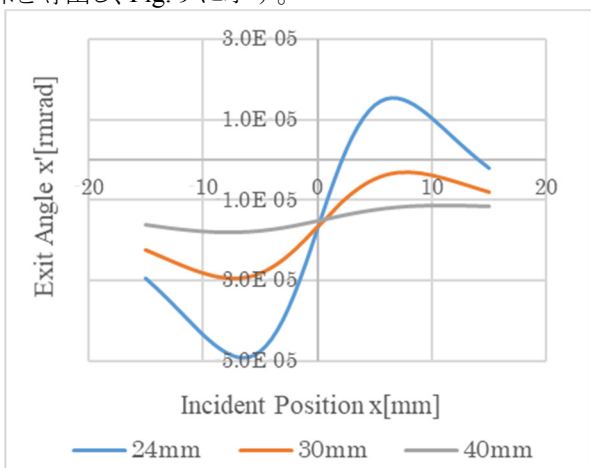


Figure 9: Horizontal exit angle as a function of incident position.

この結果よりアンジュレータのギャップが狭くなる程、磁場の三次の項である八極磁場が強くなっていることが分かる。

5.2 八極磁場によるチューン拡がり

蹴り角 θ を与えるローレンツ力をもたらす垂直磁場 B_y [T] は以下のように表される。

$$B_y = \frac{B\rho}{l} \theta \quad (6)$$

ここで l [m] は電子ビームに磁場が影響を及ぼす長さである。八極磁場の強さ O_3 [T/m³] は以下ようになる。

$$B_y = O_3 x^3 \quad (7)$$

ローレンツ力を与える垂直磁場の存在する部分の水平 β 関数 B_x [m]、ビームエミッタンス J_x [rad] を用いるとチューン広がりの変化量 ΔQ_x は以下のように表される。

$$\Delta Q_x = \left[\frac{3}{8\pi} \int \beta_x^2 \frac{O_3}{B\rho} ds \right] J_x - \left[\frac{3}{8\pi} \int 2\beta_x \beta_y \frac{O_3}{B\rho} ds \right] J_y \quad (8)$$

Equation (8) と Fig. 9 からアンジュレータの八極磁場によるチューン広がりの変化量を計算したものと Fig. 6 から予想される ΔQ_x を Fig. 10 に示す。

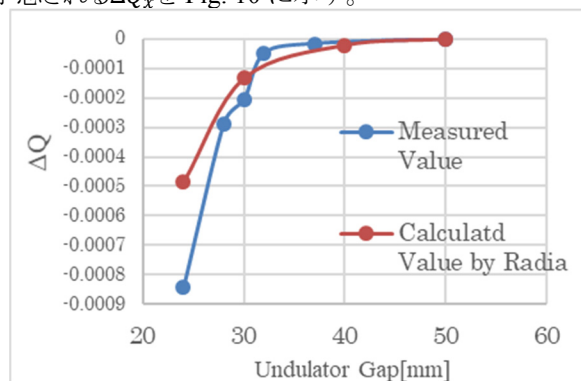


Figure 10: Comparison of change of tune spread.

この結果から RADIA や八極磁場によるチューン広がり計算の近似や誤差を考慮するとアンジュレータ運転によるチューン広がりの変化はアンジュレータの八極磁場による影響であると考えて良いと思われる。よってアンジュレータによる八極磁場をマルチワイヤや八極電磁石によって打ち消すことにより不安定性の抑制が期待される。

6. 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 792.180MHz 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八極磁場成分の存在が示され、この八極磁場が Tune spread に影響を与え、加速器の効果による減衰を妨害することで不安定性が励起されていると考えられる。またアンジュレータ運転の際、八極磁場を与え電子ビームを安定化させることが期待される。

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] T. Honda *et al.*, “Nonlinear Frequency Response of the Betatron Oscillation at the Photon Factory Storage Ring”, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 2, No. 2, 2005.
- [2] S. Hisao *et al.*, “ニュースパルレにおける 792MHz 高次寄生モードによる水平方向バンチ結合不安定性”, Master’s thesis of University of Hyogo, 2005.
- [3] <https://www.mttis.co.jp/items/>
- [4] N. Kuroo *et al.*, “TRANSVERSE IMPEDANCE MEASUREMENT IN SUPERKEKB”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, August 1-3, 2017.
- [5] W. Herr, “Introduction to Landau Damping”, Published by CERN in the Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics, Trondheim, Norway, 19–29 August 2013, edited by W. Herr, CERN-2014-009.
- [6] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>