

# 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とその抑制

## BEAM INSTABILITY CAUSED BY APPLE-II UNDULATOR AND ITS SUPPRESSION AT AICHI-SR

保坂将人<sup>#,A),B)</sup>, 木村圭吾<sup>C)</sup>, 高嶋圭史<sup>A),B),C)</sup>, 石田孝司<sup>A),B)</sup>,

真野篤志<sup>A)</sup>, 郭磊<sup>A),B),C)</sup>, 大熊春夫<sup>B),D)</sup>, 藤本将輝<sup>E)</sup>, 加藤政博<sup>E),F),A)</sup>

Masahito Hosaka<sup>#,A),B)</sup>, Keigo Kimura<sup>C)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>A),B),C)</sup>, Takashi Ishida<sup>A),B)</sup>,

Atsushi Mano<sup>A)</sup>, Lei Guo<sup>A),B),C)</sup>, Haruo Ohkuma<sup>B),D)</sup>, Masaki Fujimoto<sup>E)</sup>, Masahiro Katoh<sup>E),F)</sup>

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

<sup>C)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University, <sup>D)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University,

<sup>E)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, <sup>F)</sup> HiSOR, Hiroshima University,

### Abstract

In Aichi SR storage ring, excitation of a transverse coupled bunch instability is observed when APPLE-II type undulator is operated in vertical or helical polarization mode. We studied on the instability and found that the main source of the instability is the higher order mode of the RF accelerating cavity. Observation of the betatron tune spread and simulations on the undulator magnetic field strongly suggest that the Landau damping which suppress the instability is degraded by the dynamical multipole field of the undulator. We performed an experiment to compensate the octupole field of the undulator using multi-wires method and succeeded in restoration of the tune spread and in widening the stable undulator operating region. However, complete suppression of the instability around the minimum undulator gap have not yet been realized.

## 1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター(以下、あいち SR)には APPLE-II 型アンジュレータが導入され、真空紫外から軟エックス線までの準単色の放射光の発生に利用されている。Table 1 にあいち SR のアンジュレータのパラメータを挙げる。APPLE-II 型アンジュレータの特徴は磁石列の位相を変えることで水平偏光に加えて垂直偏光、円偏光の放射光が取り出せることにある。しかし、あいち SR では現在、水平偏光モードでの運転のみ行われている。この理由はアンジュレータを垂直偏光および円偏光モードで運転したときに水平方向にビーム不安定性が励起されるからである。

APPLE-II 型アンジュレータの垂直および円偏光モードの利用の開始をめざして研究を始めた。まずアンジュレータの垂直偏光モードでの電子ビームに対する影響について研究を行った[1]。本稿ではこれまでの研究の結果を概観し、マルチワイヤ法によってこの不安定性を抑制する実験を行った結果について報告する。

## 2. アンジュレータ運転中のビーム不安定性の観測と考察

### 2.1 不安定性の観測

あいち SR の電子蓄積リングでは 300 mA 運転時に垂直偏光モードアンジュレータギャップを 36 mm よりも縮めると、水平方向のビーム不安定性が励起される。不安定性が励起されている時に行われたスペクトル測定によ

Table 1: Parameter of APPLE-II Type Undulator

|                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| Magnetic material      | Nd-Fe-B(NMX-46CH) |
| Remnant magnetic field | 1.3 T             |
| Period length          | 60 mm             |
| Number of periods      | 33                |
| Full length            | 2025 mm           |
| Maximum gap            | 200 mm            |
| Minimum gap            | 24 mm             |

て、励起されている不安定性の周波数は RF 加速空洞の高次高調波 TEM110H モードの周波数と一致することが明らかになった。したがって、このモードの電場によって結合型バンチ不安定性が励起されていると考えられた。

### 2.2 アンジュレータの蓄積ビームへの影響の観測 (Landau 減衰)

アンジュレータの電子ビームへの影響を調べるために、アンジュレータのギャップを変えながらビーム集団的振動の減衰時間を調べた。この実験では早いキッカーを用いて電子ビームの集団的ベータatron振動を励起する。ベータatron振動の広がり(Tune spread)が存在すると、異なる振動数が入り混じるために集団的振動が smear out され、減衰時間が短くなる。したがって減衰時間の測定から電子ビームの Tune spread を求めることができる。アンジュレータギャップの関数として Tune spread をプロット

# m-hosaka@nusr.nagoya-u.ac.jp

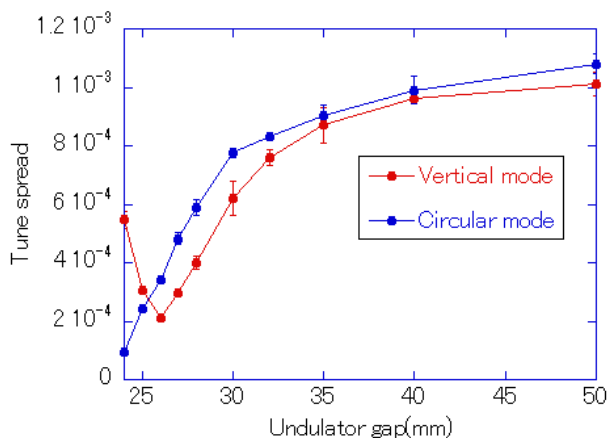


Figure 1: Measured tune spread as a function of the undulator gap, in vertical mode and circular mode.

した図を Fig. 1 に示す。この図から明らかなようにアンジュレータギャップを縮めることにより Tune spread は小さくなり、特に最小ギャップ近くではギャップが開いているときの約 1/5 の大きくなる。Tune spread によって不安定性が抑制される現象は Landau 減衰と呼ばれる[2]。Landau 減衰の減衰時間は Tune spread の逆数に比例した時間で定義され、この減衰時間より遅い成長時間の不安定性は抑制される。

以上の研究からアンジュレータを垂直および円偏光モードで運転してギャップを縮めることで、周波数広がり小さくなり、そのことで Landau 減衰の減衰時間が長くなって RF 加速空洞起因の不安定性が抑制できなくなると考えた。

次にアンジュレータの Tune spread に対する影響について調べた。電子ビームがアンジュレータを通過するときに、ビームは蛇行運動(あるいはらせん運動)しながらアンジュレータ磁場の影響を受ける。このことで電子ビーム収束発散力を受けることになるが、本研究では高次の多極磁場、特に 8 極成分に注目した。8 極磁場はベータatron 振幅に依存した振動数ずれを生じさせ、ビームエミッタンスで記述されるような振幅の分布をもった電子ビームに対しては、Tune spread を生じさせる。この影響を逆に受けることによってアンジュレータの影響のない状態を持っていた Tune spread が小さくなる可能性が考えられる。その影響を調べるために、3次元磁場計算コード RADIA[3]を用いたシミュレーションによって、アンジュレータ磁場中を通過する電子ビームの受けるダイナミカルな 8 極磁場成分を導出した。さらに求めた 8 極磁場成分より生じる Tune spread について算出した。この Tune spread と電子ビームの振動の減衰時間から求めた Tune spread の比較を Fig. 2 に示す。8 極成分から求めた周波数広がりアンジュレータギャップ依存性は実測と比較すると絶対値としては小さいものの、大きな隔たりはなくおおよその傾向の説明ができると考えられる。

### 3. マルチワイヤによる多極磁場補正

#### 3.1 マルチワイヤ法について

マルチワイヤ法とは多数のフラットワイヤをアンジュ

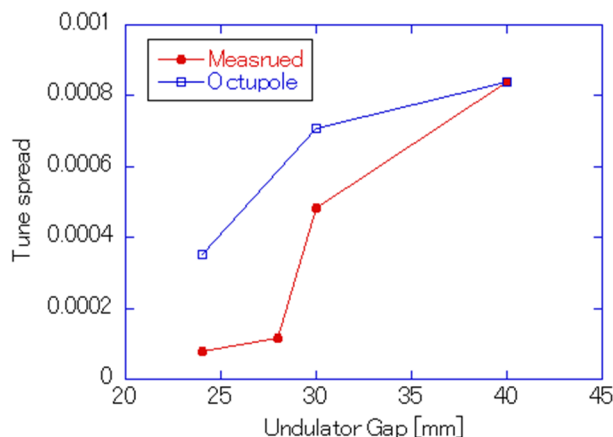


Figure 2: Comparison between measured tune spread and deduced one from undulator dynamical multi-pole field as functions of undulator gap.

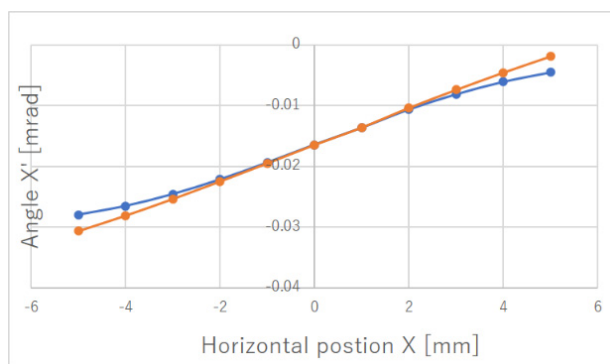


Figure 3: Correction of octupole component of undulator field using multi-wire method. Blue: multi-pole dynamical field of undulator. Yellow: corrected field using multi-wire.

レータダクトに取り付けて、そこに流す電流によって発生する磁場によってアンジュレータ多極磁場を相殺する方法である[4]。本研究では試験実験としてマルチワイヤとして市販のフラットケーブル(40 芯、導体断面積 28AWG、最大電流値 1.4 A, Fig. 4 参照)をビームダクトの上下面に取り付けることを考えた。フラットケーブルはアンジュレータダクト全体に取り付けるため、電子ビームの感じる磁場長はダクトで長さである 3 m となった。

マルチワイヤに流す電流は以下のように決定する。まず、1 本のワイヤに電流を流した時生じる磁場分布を算出し、座標をずらして 32 本×2 に流した時に生じる実験を計算した。実際は対称性で計算量を減らすことができる。また、アンジュレータによるダイナミカルな磁場を完全に補正しようとするワイヤに流す電流が大きくなりすぎる。そこで今回は 8 極成分にだけ注目し、垂直偏光モードギャップ 30 mm における 8 極磁場補正について計算を行った。完全に補正しようとする電流値が大きくなり過ぎる。そこで固有値分解法を用いて、対称性により 16 本のワイヤに流す電流値を決めた。この場合、最大で固有値は 16 になるが、本研究では固有値数を 4 まで落として、設定電流値を小さくすることに成功した。この時に流

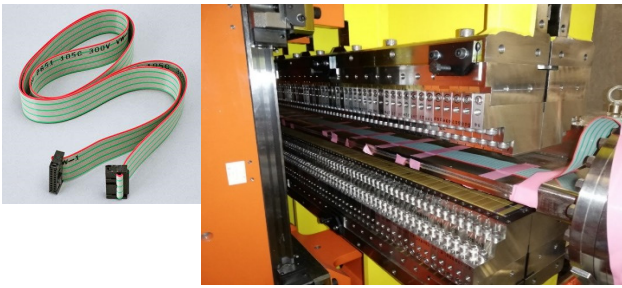


Figure 4: Photographs of a flat cable(left) and installed flat cables on undulator duct.

す最大電流値は 1 A 以下となった。Figure 3 に電子ビームがアンジュレータ入射する位置とアンジュレータによって蹴られる水平方向角度の関係を示す。この計算は Radia を用いてアンジュレータ磁場とマルチワイアの磁場を足し合わせることで行った。補正電流を流していない場合、明らかに 8 極成分 ( $x-x'$  図の 3 次の関係の部分) が見られるが、補正電流によってほぼ打ち消されることがわかる。今回の方法では 4 極成分 ( $x-x'$  図の 1 次の関係の部分) は補正できなかった。

### 3.2 マルチワイア実装実験

Figure 4 にアンジュレータダクトにフラットケーブルの取り付けけた写真を示す。取り付け精度は 1 mm 以下をめざした。アンジュレータの最小ギャップは通常では 24 mm であるが、フラットケーブルの厚みおよび通電による熱発生を考慮して実験中の最小ギャップは 30 mm とし、そのときの垂直偏光モードでのビーム不安定性を抑制することを目標とした実験を行った。各ケーブルに流す電流は遠隔で操作できるようにし、使用した電源が片極性であるので別途極性切り替え回路も作成した。

マルチワイアによる Tune spread の補正の実験はこれまでと同様に早いキッカーを用いて電子ビームに集団的ベータatron振動を励起し、その減衰時間に観測によって行った。減衰時間から導出した Tune spread とフラットケーブルに流した電流の関係を Fig. 5 に示す。この時のアンジュレータ設定は垂直偏光モードでギャップは 30 mm である。このアンジュレータ条件で 8 極成分を打ち消すと計算上に予想された値を電流の基準とした。実際には計算で予想された電流の 2 倍を流すことで Tune spread は回復した。一方逆方向に補正と逆方向に流すことでさらに Tune spread が小さくなるのが観測された。

300 mA 通常運転でマルチワイアによるビーム安定化について調べた。Figure 6 にアンジュレータ運転時の安定領域とフラットケーブルの流した電流の関係を示す。ビームの安定性はビームのスペクトル上で水平方向のベータatron振動によるピークの有り無しで判断した。この場合も基準としたのは Fig. 5 の時と同様な電流である。この実験では基準電流の 2 倍の電流を用いることでギャップ 31 mm まで安定に運転することができた。一方、逆の電流を流すことでの安定領域が小さくなるのが明らかになった。また、蓄積電流値を変えた実験ではアンジュレータギャップ 30 mm において、290 mA までビームは安定であることが観測された。

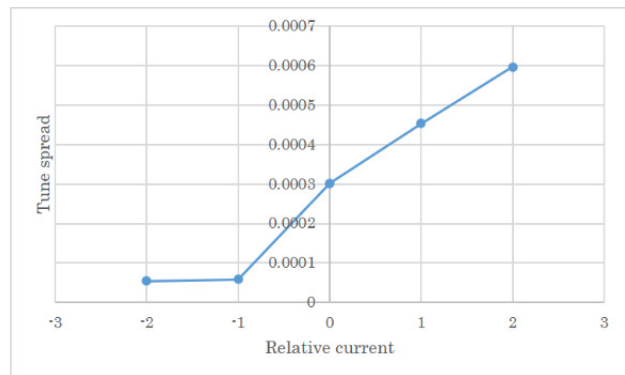


Figure 5: Variation of tune spread as a function of multi-wire electric current.

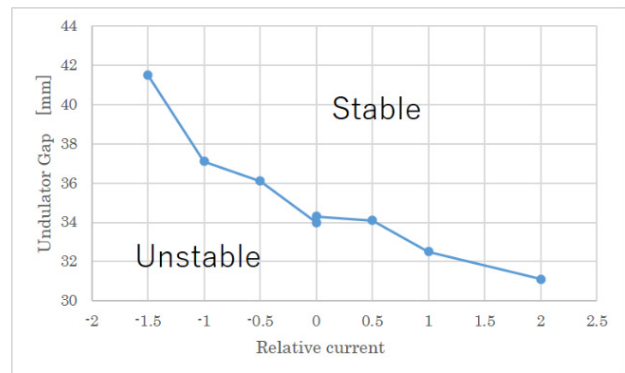


Figure 6: Stable and unstable operating point as a function of undulator gap and multi-wire electric current.

## 4. まとめと今後の展望

あいち SR における APPLE-II アンジュレータ運転時のビーム不安定性原因の究明および解消を目指した研究を行った。フラットケーブルを用いた、マルチワイア法によるアンジュレータの 8 極磁場補正によって、不安定性の抑制は可能であることが示されたが、完全には抑制できていない。また、計算上の電流値の 2 倍の強度が必要とされた。今後は理論的計算およびシミュレーションでこれまでの実験で観測された Tune spread の振る舞いについて研究を行うことを考えている。その上で、不安定性抑制のもっとも効果的な方法について考察する予定である。

## 参考文献

- [1] K. Kimura *et al.*, "STUDY OF BEAM INSTABILITY CAUSED BY APPLE-II UNDULATOR IN VERTICAL POLARIZATION MODE IN AICHI-SR", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, pp. 1059-1063.
- [2] A. W. Chao, "Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators", Wiley-Interscience Publication, 1993.
- [3] O. Chubar, P. Elleaume, J. Chavanne, "A 3D Magnetostatics Computer Code for Insertion devices", SR197 Conference August 1997, J. Synchrotron Rad. (1998). 5, pp 481-484.
- [4] P. Kuske, *et al.*, Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conference (2001) 1656.