

# Measurements of Transverse Instabilities in the Photon Factory Storage Ring

Tsukasa Miyajima\*, Yukinori Kobayashi, Kentaro Harada and Shinya Nagahashi  
Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

## Abstract

In the Photon Factory electron storage ring (PF ring), transverse instabilities have been observed in multi-bunch operation mode. The instabilities can be suppressed by octupole magnets which produce amplitude dependent tune shifts. We have measured the response of the instabilities to the tune shifts with varying the field strengths of the octupole magnets to extend our knowledge on the instabilities. The thresholds of the instabilities were observed at a certain field strength, and they depended on the bunch filling pattern of the beam and the beam current per bunch. In addition, we have observed that the present behavior of the instabilities is clearly different from that before the reconstruction of the ring.

## PF ring での横方向不安定性の測定

### 1. はじめに

放射光電子ストレージリングである PF ring では、マルチバンチ運転時に横方向のビーム不安定性が観測されている。この不安定性は光の強度変動の原因となるビームサイズの増大を引き起こすため、2005年に完了した PF ring 直線部改造<sup>[1]</sup>後のユーザー運転においては横方向のバンチ毎フィードバック<sup>[2]</sup>を用いて、また、フィードバックが導入される以前は、8極電磁石を励磁しビームにチューンの拡がりを与え、ランダウ減衰を引き起こすことによって不安定性を抑制していた。我々はこの不安定性の性質についての研究を継続しており、1) 真空チェンバー内の圧力、2) バンチ列のフィリングパターン、3) 1バンチあたりのビーム電流に対する依存性を明らかにしてきた。これまでの研究結果より、この不安定性の原因の一つはイオン捕獲による2流体不安定性である可能性が高いことがわかっている。

この不安定性の原因特定とその性質を明らかにできれば、不安定性抑制のためのより進んだ知見を得られるとともに、これらのことが問題となる大強度ビームを蓄積する加速器の設計において、不安定性をより正確に評価できるようになると期待される。さらに、イオン捕獲による不安定性は、放射光電子ストレージリングだけでなく、新たな光源として検討が進められているエネルギー回収型リナック (ERL) においても検討されるべき課題の一つとなっている。この研究における最終的な目的は、1) 現在観測されている不安定性の原因を特定し性質を明らかにすること、2) イオン捕獲によるものならその影響を明らかにして ERL 等における検討をより正確にするための基礎を確立する、ということである。

ここで紹介する実験は、現在の PF ring で観測されている不安定性の基礎的な情報を得ることを目的として行われた。本実験では、通常ユーザー運転で用いられるビーム光学関数の下で、8極電磁石の磁場によって作られる振幅依存チューンシフトが変化したときの不安定性の応答を測定している。振幅依存

チューンシフトを変化させることは、ビームのチューン拡がりを変更することに対応し、すなわち、本測定はランダウ減衰による減衰率を変更したときビーム不安定性がどのように変化するかを観測することに相当する。不安定性の減衰率が増大率より勝っている状態ではビームは安定状態となり、逆の場合には不安定性が発生することとなる。実験では、1) バンチ電流を 1.6 mA、0.8 mA に固定しバンチ数が変化したときのビーム不安定性の8極磁場依存性、2) PF ring 直線部改造前後での不安定性の変化、3) 横方向バンチ毎フィードバックを ON/OFF した状態での不安定性の変化を測定した。

### 2. 8極磁場による振幅依存チューンシフト

ベータatron振動の振幅を表す作用変数を  $J_x, J_y$  とすると、振幅に依存したチューンシフト  $\Delta\nu_x, \Delta\nu_y$  は、

$$\begin{pmatrix} \Delta\nu_x \\ \Delta\nu_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix}, \quad (1)$$

と表される。係数  $\alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}$  が振幅依存チューンシフトの大きさを表す。PF ring には4台の8極電磁石が設置されている。実験ではこれらの電磁石を同時に同じ値に設定しているため、積分した8極磁場の有効強さを  $K_3$  とすると振幅依存チューンシフトの係数は、

$$\alpha_{xx} = \frac{1}{16\pi} \frac{K_3}{L_{\text{Oct}}} \sum_{i=1}^4 \int_{s_{i,0}}^{s_{i,1}} ds \beta_x^2(s), \quad (2)$$

$$\alpha_{xy} = \alpha_{yx} = -\frac{1}{8\pi} \frac{K_3}{L_{\text{Oct}}} \sum_{i=1}^4 \int_{s_{i,0}}^{s_{i,1}} ds \beta_x(s) \beta_y(s), \quad (3)$$

$$\alpha_{yy} = \frac{1}{16\pi} \frac{K_3}{L_{\text{Oct}}} \sum_{i=1}^4 \int_{s_{i,0}}^{s_{i,1}} ds \beta_y^2(s). \quad (4)$$

のように表される。これらの係数は、 $K_3$  の線形関数となる。ここで、 $s$  は進行方向の座標、 $s_{i,0}$  と  $s_{i,1}$  は

\* E-mail: tsukasa.miyajima@kek.jp

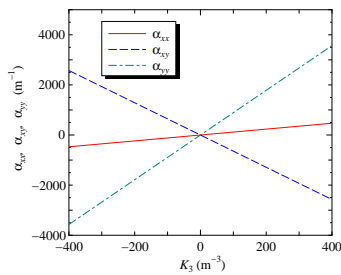


図 1: PF ring 直線部改造後の 8 極磁場による振幅依存チューンシフトの係数。

それぞれ  $i$  番目の 8 極電磁石の入口、出口での進行方向の座標を表し、 $s_{i,1} - s_{i,0}$  は  $L_{oct}$  である。 $\beta_x(s)$ ,  $\beta_y(s)$  はそれぞれ水平、垂直方向のベータatron関数を表す。また、8 極電磁石中での垂直方向の磁場の強さを  $\partial^3 B_y / \partial x^3$ 、8 極電磁石の有効磁場長を  $L_{oct}$ 、magnetic rigidity を  $B_0 \rho$  とすると、積分した 8 極磁場の有効強さ  $K_3$  は、 $K_3 = (1/B_0 \rho) \partial^3 B_y / \partial x^3 \cdot L_{oct}$  と表される。直線部改造後のビーム光学系では、これらの係数は、 $\alpha_{xx} = 1.175 \times K_3 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ ,  $\alpha_{xy} = \alpha_{yx} = -6.435 \times K_3 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ ,  $\alpha_{yy} = 8.923 \times K_3 \text{ (m}^{-1}\text{)}$  と計算される。PF ring に設置されている 8 極電磁石は、 $K_3$  を  $-390$  から  $390 \text{ (m}^{-3}\text{)}$  まで変更することができる。係数と 8 極磁場の強さ  $K_3$  の関係を図 1 に示す。

### 3. 不安定性の測定

不安定性の測定では、ボタン型電極からの信号をスペクトラムアナライザ (Tektronix RSA230) に入力し、そのベータatronサイドバンドのパワーを観測した。スペクトラムの測定範囲は、中心周波数 1.0002 GHz、スパン 5 MHz とした。以下では、 $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_x}$ 、 $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_y}$  のパワーをそれぞれ水平方向、垂直方向の不安定性のパワーとしている。ここで、 $f_{rf}$  は RF 周波数で 500.1 MHz、 $f_{rev}$  は周回周波数で 1.6 MHz である。

今回の実験では、1) バンチ列のフィリングパターン (バンチ数)、2) 1 バンチあたりのビーム電流、という 2 つの条件を変えたときの不安定性の振る舞いを測定した。1) のバンチ列のフィリングパターンを変化させるといことは、イオン除去のための空きバンチ数を変化させることに対応する。また、2) の測定では 1 バンチあたりの電荷を変化させて、不安定性が生じる電荷の閾値を調べることが目的としている。この 2 つの測定条件の他に、PF ring 直線部改造前後での不安定性の変化の様子も観測した。直線部改造では 4 極電磁石部分の真空チェンバーが、より小さい断面形状のものに変更され、インピーダンスが変化していると予想される。

### 4. 測定結果

図 2 にバンチ電流を 1.6 mA に固定しバンチ数を変化させたときの不安定性の 8 極磁場依存性の測定結果を示す。PF ring のハーモニック数は 312 であり、図

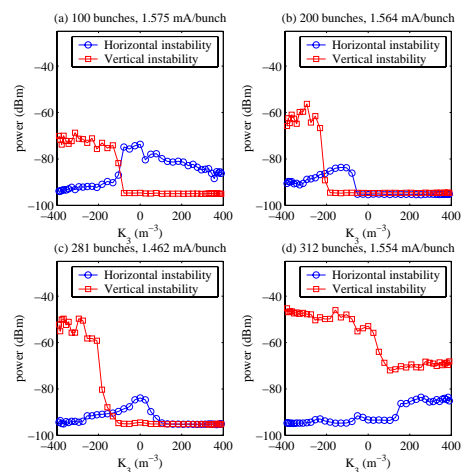


図 2: バンチ電流 1.6 mA 時の測定結果。水平方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_x}$ 、垂直方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_y}$  の不安定性のパワーを示す。(a) 100 バンチ、(b) 200 バンチ、(c) 281 バンチ、(d) 一様フィリングパターン 312 バンチ。

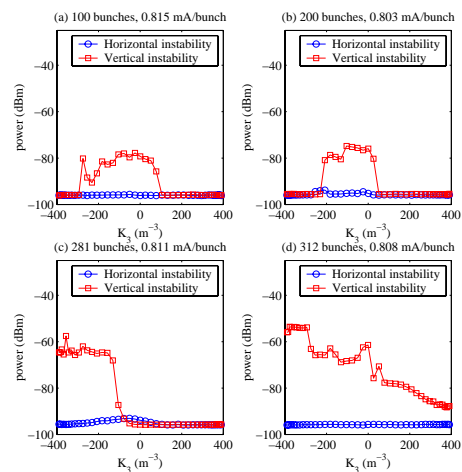


図 3: バンチ電流 0.8 mA 時の測定結果。水平方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_x}$ 、垂直方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_y}$  の不安定性のパワーを示す。(a) 100 バンチ、(b) 200 バンチ、(c) 281 バンチ、(d) 一様フィリングパターン 312 バンチ。

2 (a)-(c) はイオン除去のための空きバケットがある状態であり、図 2 (d) は一様フィリングで空きバケットがない状態となる。通常のユーザー運転では、初期バンチ電流 1.6 mA で 281 個のバケットにビームを蓄積している。空きバケットがある場合、100 バンチでは  $K_3 < -100 \text{ (m}^{-3}\text{)}$ 、200 バンチでは  $K_3 < -200 \text{ (m}^{-3}\text{)}$ 、281 バンチでは  $K_3 < -150 \text{ (m}^{-3}\text{)}$  の範囲で垂直方向不安定性が観測された。一方、一様フィリングである 312 バンチでは、 $K_3$  の測定範囲全てにおいて垂直方向不安定性が観測された。

図 3 にバンチ電流を 0.8 mA に固定しバンチ数を変化させたときの不安定性の 8 極磁場依存性の測定結果を示す。バンチ電流 0.8 mA の場合、1.6 mA の

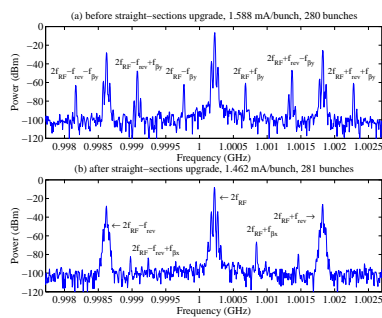


図 4: PF ring 直線部改造前後でのボタン電極からの信号のスペクトラムの変化。  $K_3 = 0$  のときの測定結果。(a) 直線部改造前、(b) 直線部改造後。

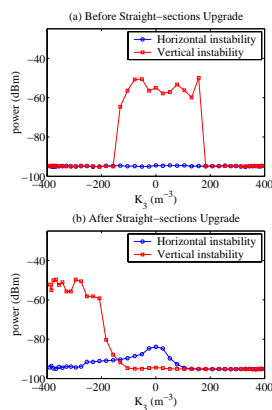


図 5: PF ring 直線部改造前後での不安定性の 8 極磁場応答の変化。水平方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_x}$ , 垂直方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_y}$  の不安定性のパワーを示す。(a) 直線部改造前、(b) 直線部改造後。

場合に対して、どのバンチ数においても、水平方向の不安定性がほとんど励起されていないことがわかる。一様フィリングの 312 バンチの場合、バンチ電流 1.6 mA ( 図 2-(d) ), 0.8 mA ( 図 3-(d) ) の両方のバンチ電流において  $K_3$  の測定範囲内全てで垂直方向不安定性が観測された。すなわち、一様バンチ電流では通常ユーザー運転の半分のバンチ電流 0.8 mA にしても、8 極電磁石を励磁することによって垂直方向不安定性を抑制できないことがわかる。

PF ring 直線部改造 [1] 前後で、次のような不安定性の変化が観測された。図 4 に  $K_3 = 0$  で不安定性が励起されている状態でのビームスペクトラム、図 5 に不安定性の 8 極磁場依存性の測定結果を示す。直線部改造以前は  $-200 < K_3 < -200 \text{ (m}^{-3}\text{)}$  の範囲で垂直方向不安定性が観測されていたが、改造後は  $K_3 < -100 \text{ (m}^{-3}\text{)}$  で垂直方向不安定性が観測されるようになった。さらに、改造以前は観測されなかった水平方向不安定性が  $K_3 < 100 \text{ (m}^{-3}\text{)}$  で観測された。

図 6 にバンチ毎フィードバック [2] あり、なしでの不安定性の 8 極磁場依存性を示す。図 6-(a) は 200 バンチ、図 6-(b) は 312 バンチでの測定結果であり、上段にバンチ毎フィードバックなし、下段にありの状態での測定結果を示す。200 バンチの場合は、バンチ毎

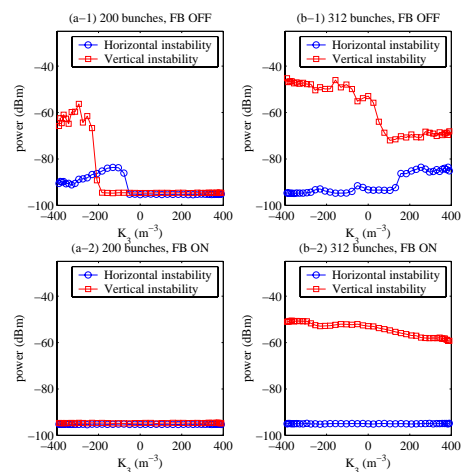


図 6: 横方向バンチ毎フィードバック ON / OFF での不安定性の変化。水平方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_x}$ , 垂直方向  $2f_{rf} - f_{rev} + f_{\beta_y}$  の不安定性のパワーを示す。(a) 200 バンチ、(b) 一様フィリング 312 バンチ。上段はバンチ毎フィードバックなし、下段はフィードバックあり。

フィードバックありにすると、 $K_3$  の全測定領域にわたって不安定性が抑制された。一方、一様フィリングである 312 バンチの場合、バンチ毎フィードバックを用いても不安定性を抑制することができなかった。

## 5. まとめ

PF ring で観測されている横方向のビーム不安定性の基礎的な情報を得ることを目的として、不安定性の 8 極磁場依存性を測定した。バンチ電流を変化させたとき、不安定性の生じる領域が変化することが観測された。イオン除去のための空きバケット数を変化させて測定した結果、一様フィリングパターンでは、8 極磁場によって不安定性を抑制できないことがわかった。PF ring 直線部改造では、4 極電磁石部分の真空チャンバーの断面形状が小さいものに変更され、インピーダンスの変化が起きていると予想されるが、改造前後で不安定性の振る舞いが変化していることが観測された。

さらに、ビーム不安定性の増大、減衰率を測定するために、本実験と平行してパルス 8 極電磁石 [3] を用いて、振幅依存チューンシフトが 1ms の間にステップ的に変化した後の不安定性の時間変化を現在調べている。これらの結果を総合して、不安定性の原因および性質を明らかにしていく予定である。

## 参考文献

- [1] Photon Factory Activity Report 2002, **20A**, 2003, pp. 82-86.
- [2] Photon Factory Activity Report 2004, **22A**, 2005, pp. 117-118.
- [3] T. Miyajima, Y. Kobayashi, and S. Nagahashi, "Pulse Octupole Magnet System at the Photon Factory Storage Ring", PAC2003, Portland, May 2003, pp. 2171-2173.