

STATUS OF THE FAST LOCAL BUMP SYSTEM FOR HELICITY SWITCHING AT THE PF RING

Kentaro Harada^{#A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Shunya Matsuba^{B)}

^{A)} KEK-PF, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Hiroshima University, 2-313 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-0046

Abstract

The fast local bump system for helicity switching was installed at a long straight section (B15-B16) of the Photon Factory storage ring in the spring 2008. Recently we have introduced new control system for the fine tuning. In this paper, we present the new control system and tentative results of beam studies.

PF リング 16 番直線部における 高速偏光スイッチング用バンプシステムの現状

1. はじめに

高速局所バンプによる偏光スイッチングは、ロックインアンプによる信号検出技術と組み合わせ、磁気円二色性^[1]など、物質の偏光に対する応答の微小な差の測定に有効な方法である^[2]。2008年の春、PFリング16番直線部に偏光高速スイッチングの為のバンプ電磁石5台が設置され、ビームを使った調整が開始された。

軌道スイッチングを実現する際に問題となるのは、電磁石の履歴や渦電流の影響、電源や制御系の誤差などが原因となって生ずるバンプの漏れ、すなわち、局所バンプの外側のリング全周にわたってビームが振動してしまう現象である。PFリングのユーザー運転においては、不安定性や挿入光源を含む各種パラメータ変化に起因するビームの振動を、目安としてビームサイズの1/10以下に抑えることが必要とされている。そこで、バンプの漏れによるビーム振動を同程度以下に調整することがビームスタディの目標であり、ユーザー運転開始時までこれを達成

する必要がある。2008年から2009年末までビームスタディの結果、スイッチング周波数0.1Hzではビーム振動はほぼ目標値まで抑制することができた。また、スイッチングの周波数は、ビーム振動は抑え切れていないものの、70Hzまであげられることが分かった^[3]。

ビーム振動を更に抑制し、ユーザーの要求する10Hzのスイッチングを実現する為、2010年の春に制御系をアップグレードし、新たに4台の任意波形発生器と6チャンネルの電圧制御型減衰器を導入した。また、系統的に誤差の補正を行い、ビーム振動を抑制する為、振動の位相情報を使う新たな調整方法を導入した。ここでは、新制御系の概要、調整手法の概略、10Hz運転に対するスタディの途中経過について発表を行う。

2. 新しい制御系、誤差の影響

新しい制御系として、2chの任意波形発生器(AFG)4台と6chの電圧制御型減衰器を導入した(図1)。それぞれのキッカーに対する、局所バンプを作る為に必要な蹴り角は、

$$\theta_j = K_{DC} + K_{AC} \sin(\omega t + \delta_j)$$

と与えられる。式中の各パラメータを表1に、電流波形を図2に示す。上下流でのバンプ高さが最大のタイミング及び両者が等しいタイミングでのバンプの様子を図3に示す。上下流のバンプ高さが等しいタイミング(図中の(b))は電流がDC成分のみの場合だが、この時の位相を $2n\pi$ とした(n は整数)。また、上流側で高さ最大の場合(a)は $\pi/2 + 2n\pi$ 、下流側で高さ最大(c)は $3\pi/2 + 2n\pi$ となる。

2.1 位相の誤差と振幅の誤差

位相の誤差と振幅の誤差の影響を考える。式に位相と振幅の誤差を入れると、

$$\theta_{ACj} = (A_j + \Delta A_j) \sin(\omega t + \delta_j + \Delta \phi_j),$$

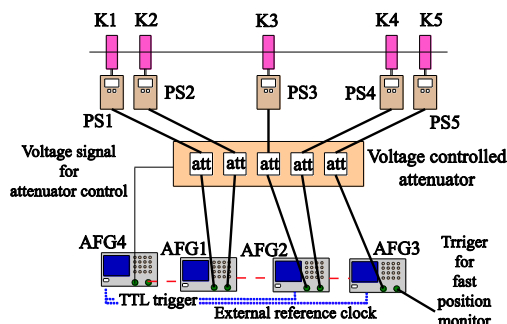


図1: 新しい制御系。K1~5はバンプ電磁石、PS1~5は電源、AFG1~4は任意波形発生器である。バンプの開始と終了時の為に電圧制御減衰器6chの内5chを使う。

[#]kentaro.harada@kek.jp

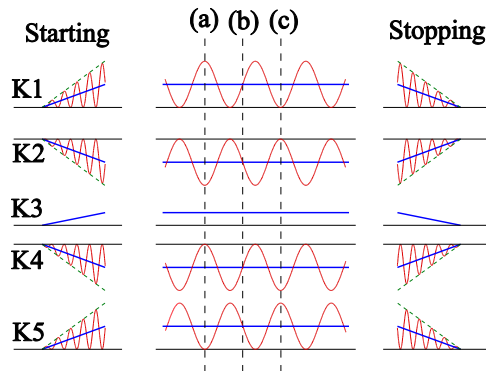


図 2: 5 台の電磁石の電流波形。バンプ開始時及び終了時には、電圧制御減衰器を使い、バンプを徐々に立ち上げ下げする。図中の青線は DC 成分である。タイミング(a)では上流側でバンプ高さ最大、(c)では下流側で最大、(b)は上下流均等な高さになる場合で、このタイミングを位相の原点、すなわち $\varphi=2n\pi$ (n は整数) とした。(図中の横軸は任意であり、通常の運転では開始終了時も周波数は同一である。) それぞれのタイミングでのバンプ形状を図 3 に示す。

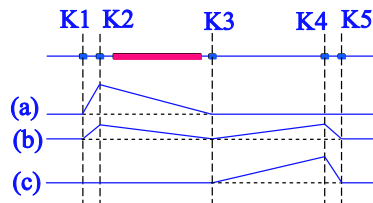


図 3: バンプ形状

となる。ここで、 ΔA_j は j 番目のキッカー電磁石の振幅誤差、 $\Delta\varphi_j$ は位相誤差である。式を展開して 1 次成分のみ残すと、誤差による蹴り角は

$$\Delta\theta_{ACj} = \Delta A_j \sin(\omega t + \delta_j) + A_j \Delta\varphi_j \cos(\omega t + \delta_j).$$

となる。すなわち、振幅誤差はバンプと同位相のビーム振動を、位相誤差は 90° ずれた振動を引き起こすことが分かる。誤差を補正する為には、ビーム振動の位相成分を使い、この 2 つの誤差を分離する必要がある。

2.2 制御系の設定精度

任意波形発生器の電圧設定の精度は $0.001V$ である。電源電流は、任意波形発生からの電圧を使い、 $\pm 100 A \pm 10 V$ で制御されるので、 $0.001V$ は電流に直すと $0.01A$ であり、磁場測定の結果から、それは $0.4 \mu\text{rad}$ の蹴り角となる。一方、任意波形発生器の位相設定精度は 0.01° 、すなわち約 $170 \mu\text{rad}$ である。典型的な蹴り角を 1.2 mrad とすると、 0.01° の位相誤差によって発生する蹴り角は $0.2 \mu\text{rad}$ となる。PF リングのステアリングの応答から考えると、誤差による蹴り $[\mu\text{rad}]$ はその大きさの約 10 倍の COD $[\mu\text{m}]$ を発生させる。従って、蹴り角 $0.4 \mu\text{rad}$ は $4 \mu\text{m}$ の COD となる。ビーム振動の許容量をビームサイズ

表 1: バンプのパラメータ

	K_{DC} [mrad]	K_{AC} [mrad]	δ [rad]	$I_{DC,set}$ [A]	$I_{AC,set}$ [A]
K1	1.15	1.15	0	26.27	26.25
K2	-1.2	1.2	π	-29.94	29.93
K3	0.3			7.59	
K4	-1.2	1.2	0	-29.84	29.84
K5	1.15	1.15	π	26.40	26.39

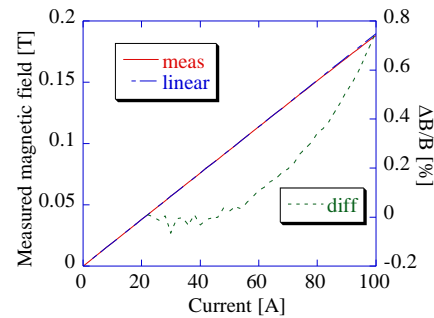


図 4: 励磁曲線。運転で用いる最大電流は約 60A であるが、その領域では飽和の影響は小さい。非飽和領域では $B[T] = 0.001897 \cdot I[A]$ となる。

の 1/10 とすると、水平方向に約 $30 \mu\text{m}$ となる。制御系の設定分解能は十分だと考えられる。

2.3 渦電流、飽和、履歴の効果

励磁曲線を図 4 に示す。磁場測定の結果から、バンプで必要な範囲においては、飽和の効果はほとんどみられない。また、渦電流による位相の遅れは、振幅にはほぼ独立で、周波数にのみ依存することが分かっている。従って、周波数を固定すれば、磁場の位相遅れは全ての電磁石に対して等しい (DC 成分しかなく K3 を除く) と思われる。位相の誤差による影響はそれほど大きくないと予想される一方、磁場の減衰はきちんと補正する必要がある。

ビームエネルギーを 3GeV まであげた場合、電流は $60A$ よりも大きくなる為、飽和の効果が避けられない。そのような場合、励磁曲線を多項式で近似すると、以下の様になる。

$$B(I) = cI + c'I^2 \dots = cI_0 \sin \omega t + c'I_0^2 \sin^2 \omega t \dots \\ = cI_0 \sin \omega t + \frac{c'I_0^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) + \dots$$

5 台のキッカーそれぞれで最大電流は異なる為、飽和の効果によって高次周波数の振動が観測されることとなる。これは補正電磁石等、外部の補正系で補正することが必要となる。

電磁石のコアは珪素鋼板であり、履歴の効果が避けられない。初期化を経てループをまわす際の典型的な履歴曲線を図 5 に示す。履歴の効果による磁場

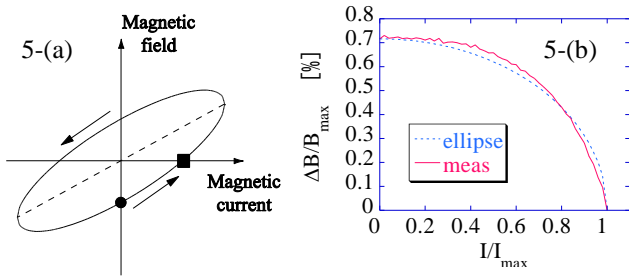


図 5: 典型的な履歴曲線。履歴の効果がない場合、磁場は電流に比例し、図(a)の点線の様になる。履歴による磁場のずれは、傾いた楕円 (図(a)の直線) の様になり、実際に楕円で近似できる。楕円で近似すると、磁場のずれは位相のずれと等価であり、位相を調整することで履歴の効果を打ち消すことができる。図(a)で位相原点を黒丸の点から黒四角の点にずらすことに相当する。

のずれを楕円で近似すると、媒介変数表示によって磁場のずれは以下の様に書ける。

$$\begin{cases} I/I_{\max} = \sin \omega t \\ \Delta B/B_{\max} = 0.007 \cos \omega t. \end{cases}$$

電流は正弦的であるので、履歴の効果は電流と位相が 90° ずれた磁場の誤差と考えられる。これは位相誤差と等価であり、位相の調整によって打ち消すことができる。

3. 補正方法

誤差の原因と制御系の分解能を考えると、バンプ外側のビーム振動は調整によって数ミクロンまで抑えることが可能であると期待される。補正には、誤差による振動の位相情報が不可欠である。 j 番目の BPM で観測されるビーム振動を、

$$\Delta x_j = \sum_{i=1}^5 (R_{ji} \Delta A_i \sin \phi + R_{ji} A_i \Delta \phi_i \cos \phi)$$

と書く。ここで、 R_{ij} は j 番目の BPM の、 i 番目のキッカーに対する応答である。誤差を補正し、振動を抑制する為には、ビーム振動をバンプと同位相成分 (便宜上、正弦成分とする) と 90° ずれた位相成分 (余弦成分とする) に分ける、それぞれに対して必要な振幅補正值と位相補正值を計算し、設定してやればよい。

ただし、K1 と K2、K4 と K5 は設置場所が非常に近い為、区別するのが難しい。例えば、K2 に対する応答行列成分は、K1 に対する応答を使い、

$$R_{j2} \approx \sqrt{1 + \frac{\Delta\beta}{\beta}} R_{j1} + \tilde{R}_{j1} \Delta\phi_{12}$$

と近似して書ける。ここで、 $\Delta\beta$ は K1 と K2 の β 関数の差であり、 $\Delta\phi_{12} \approx 0.03$ はベータatron位相差である。 \tilde{R}_{j1} は応答の式の中の余弦関数を正弦関数

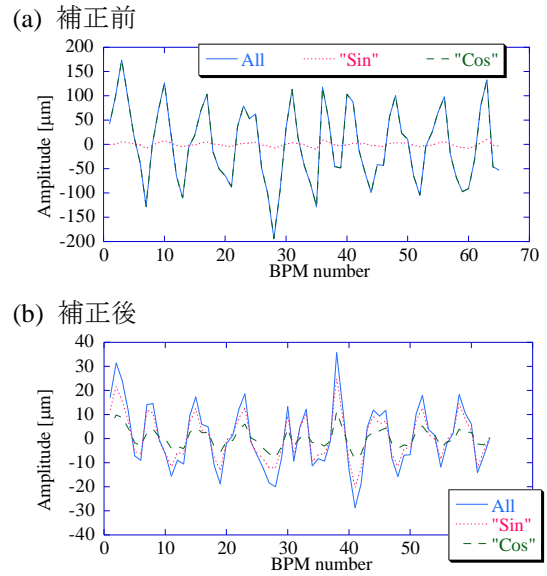


図 6: 遅い周波数でのビーム振動例

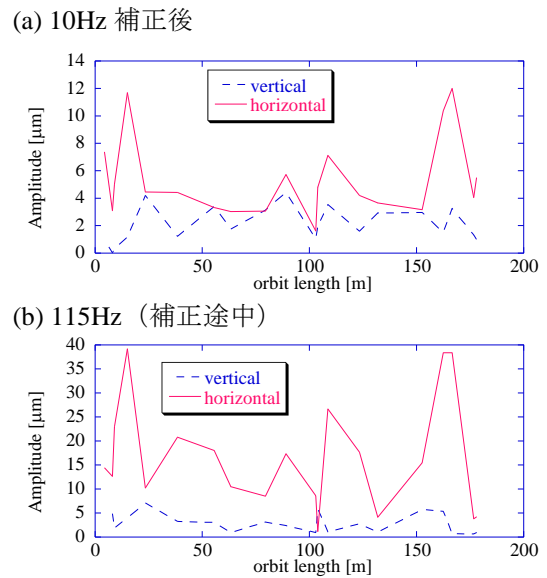


図 7: 速い周波数でのビーム振動例

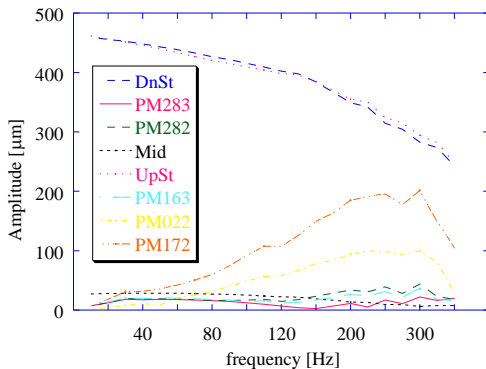
に置き換えた様な値であり、リング全体としては大きさは R_{j1} と同程度としてよい。従って、 R_{j1} と R_{j2} の差はおよそ数%しかないことが分かる。K1 と K2 はほとんど区別できないということだが、逆に、K2 の誤差を K1 で補正することが可能であることを示している。補正の際には、キッカーそれぞれの絶対値よりも、K1 と K2、K4 と K5 の相対的な位相差とバランスの方が効くということである。

4. ビームスタディの結果

4.1 遅い周波数での試験結果

制御系の性能試験と補正方法の確認の為、250 μHz (1周期が約 1 時間強)での励磁、補正試験を

(a) 水平方向



(b) 垂直方向

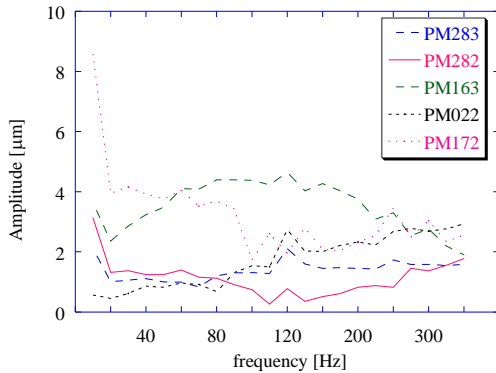


図 8: 周波数をあげた場合のビーム振動の変化。PM は速い BPM の場所を、“DnSt”、“Mid”、“UpSt”はそれぞれバンブ内側の下流、中央（下流側）、上流の位置を表す。AC 成分のみをプロットしているので、定格のバンブが立った場合、バンブ内側の上下流では振幅 450mm、中央下流側では振幅 35mm となる。

行った。65 個の遅い BPW を使い、ビーム振動を測定した (図 6-(a))。誤差のほとんどが余弦成分、すなわち位相誤差であることが分かる。必要な位相補正値を計算し、補正した後の様子を (b) に示す。ビーム振動は完全ではないが抑制できており、新しい方法が有効であることが確かめられた。

4.2 10Hz、115Hz での試験結果

10Hz で軌道スイッチングを行い、速い BPM を用いてビーム振動を測定した。挿入光源の影響は別の速いステアリングを用いて補正する予定である為、ここでは、挿入光源のギャップを開いてその影響を排除した。バンブ内側の 3 カ所でビーム振動を測定し、規定のバンブが作られていることを確認した後、バンブ外側の 19 カ所でビーム振動を測定し、誤差の補正を行った。補正後の測定結果を図 7-(a) に示す。水平方向の最大振幅は約 11.7 μm 、垂直方向は 4.4 μm となり、振動の最大振幅がビームサイズの 1/10 という条件は、測定誤差を考えればほぼ達成された。

周波数 115Hz でも同様の試験を行った。(50Hz の電源ノイズを防ぐ為、周波数は半端な値としてある。) 最初に、渦電流の影響で減衰したバンブの高さを、励磁電流を増加させることで回復させた。その後、ビーム振動の抑制の為に誤差の補正を行ったが、ビームを使ったスタディ時間の都合で、補正を十分に行うことはできなかった。途中ではあるが、結果を図 7-(b) に示す。測定誤差の影響や振動測定方法の検討を含め、100Hz 以上の速い周波数に対しては今後も検討を続けていく予定である。

4.3 周波数の上限

古い制御系ではスイッチング周波数の上限は 70Hz であったが、今回、制御系に任意波形発生器を導入したことで、350Hz まであげることができた。ただし、渦電流の影響で磁場は減衰するが、バンブ高さを回復させる調整は行っていない。) 古い制御系 (DAC モジュールを用いたもの) では、電流制御の信号波形が周波数に関わらず階段状に変化していたのに対し、任意波形発生器では滑らかである為だと考えられる。350Hz まで行った場合の、バンブ高さの様子を図 8 に示す。

5. 今後の課題

挿入光源の影響がない場合、スイッチング周波数 10Hz でビーム振動がビームサイズの 1/10 という条件をほぼ満たすことができた。今後、2010 年の夏に ID162 が新規設置されることで、ハードウェア的には軌道スイッチングが可能となる。挿入光源の磁場誤差の影響や、パラメータ変化に対するバンブの調整、ユーザーに対する光軸の調整などは、別の速い水平垂直ステアリング電磁石を用いて行う予定であるが、そのシステムを現在整備中である。秋からのビーム運転でも、バンブの調整を続ける予定である。

参考文献

- [1] G. Schutz et al., Phys. Rev. Lett. 58, (1987) 737
- [2] T. Hara et al., “Helicity switching of circularly polarized undulator radiation by local orbit bumps”, NIM A, 498 (2003) pp496-502
- [3] S.Matsuba et al., Proceedings of PAC09, (2009)