

OCTUPOLE-FIELD DEPENDENCE OF NONLINEAR RESPONSE OBSERVED IN EXCITATION OF BETATRON OSCILLATION

T. Honda¹, A. Ueda, T. Mitsuhashi

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

Nonlinear response in the vertical betatron oscillation of the stored electron beam was investigated as a function of octupole-field strength using a real time spectrum analyzer. A wideband flat-response magnetic shaker was installed for the excitation source. When the octupole magnet was excited to a minus polarity, an asymmetrical wide resonance curve was observed. And a sideband on the double frequency of the betatron tune was found in the real-time spectra. When the octupole was strongly excited to a plus polarity, the response curve came back to a symmetrical and narrow shape. The shape of the resonance was drastically affected by change of the frequency-sweep direction.

電子ビームのベータトロン振動励起にみられる非線形性の八極磁場依存性

1. はじめに

PFリングは通常蓄積エネルギー2.5GeV、入射電流値450mAでユーザー運転を行っている。ハーモニク数312のうち280バンチに電子をつめ、間に32バンチの間隔を空けパーシャルフィルにすることによってイオン捕獲による不安定性を緩和している。そして蓄積電流値が高いときに生じる垂直方向のビーム不安定性を、八極電磁石を励起することによって抑制している。不安定性抑制のメカニズムは、チューンスプレッドの増加をもたらすランダウダンピングであると説明されている。リングには4台の八極電磁石が設置されており通常4台とも-15Aに励磁されている。入射時は、八極電磁石を励磁すると入射効率の低下が見られるので励磁を行わない。またシングルバンチ運転の際は、マルチバンチ運転のような垂直方向のビーム不安定性は見られないのでやはり八極の励磁はしていない。

八極電磁石が励磁された状態でチューン測定を行ったときやビーム電流を削るべく強めに垂直方向のベータトロン振動を励起したときに、しばしば周波数に関して対称でない幅の広い共鳴波形が観測される[1]。振動励起信号を掃引する方向によっても共鳴波形の形が大きく異なるような現象も起こる。今回はこのベータトロン振動の共鳴波形が八極磁場の強度や極性を変えたときに変化する様子を詳しく調べてみたので以下に報告する。

2. シングルバンチでの共鳴波形の観測

通常運転時はシングルバンチモードでは八極電磁石は励磁されないが、振動の様子を同時にストリークカメラでも観測することができるので、まず手始めに共鳴波形の八極磁場依存性をシングルバンチビームに対して観測した。

ベータトロン振動の励起源には、フェライトと2

ターンコイルによって構成した磁気ビームシェイカー[1]を用いた。励起信号の掃引周波数は最低次のベータトロン振動数に対応して約400kHzから500kHzへ増加する方向で、掃引周期は約1秒とした。振動波形はボタン電極信号で $f_r=500.1\text{MHz}$ の右側のサイドバンドをリアルタイムスペアナ(Tektronix RSA230)を用いて観測した。各々の共鳴波形はスペアナの平均操作をMax Holdに設定し、多数回の掃引に対する平均として得られた波形である。図1は八極電磁石の励起電流を-20Aから+20Aまで少しずつ変えたときの、共鳴波形の変化の様子である。縦軸はdB単位であるが、わかりやすくするため各波形は縦方向に適当にずらして表示した。

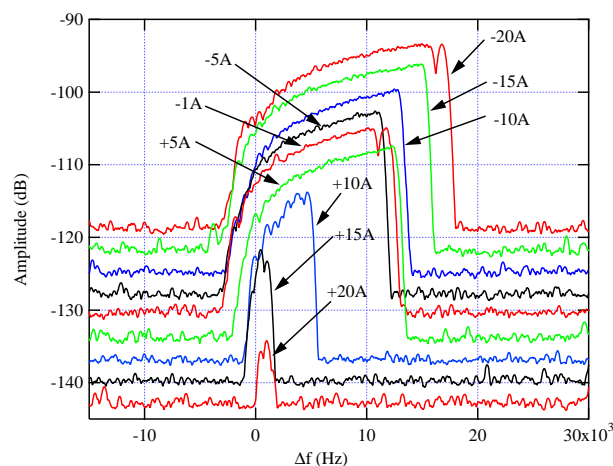


図1: ベータトロン振動波形の八極磁場依存性。シングルバンチ、蓄積電流値4mA~5mAにて、励起信号は正方向の掃引。

八極の励磁によって垂直方向のチューンが最大で10kHzほど変動する。共鳴波形自体の比較をわかりやすくするため、横軸は各波形を測定したときの

¹ E-mail: tohru.honda@kek.jp

チューンが0になるようにあわせて表示した。

各波形はビームロスが起こらない範囲で励起信号をできるだけ強くして測定したものである。八極が負に励磁されているとき、ほぼチューンに相当するところから振動が立ち上がって、10kHzを超える範囲まで共鳴が持続する様子が観測されている。立下りの位置は八極電流値を正の方向へ増やしていくに連れてだんだん右へ寄り、+15Aや+20Aのときはほぼ対称で狭い普通の共鳴波形が見られる。ビームロスを起こさない範囲の入力信号も八極の電流値が正に増えるにしたがって小さくなっていき、+15Aや+20Aのときは入力信号を増加させても共鳴波形が右へ伸びていくことなしに先にビームがロスしてしまう。

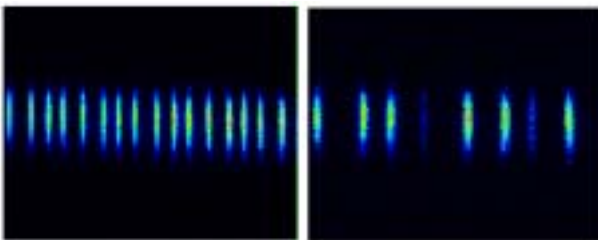


図2：ストリークカメラによる振動の観測。各周のビームどうしの間隔の変動が垂直方向の重心振動に相当。

比較的小さい励起信号に対してはストリークカメラで見ると図2左のように垂直方向の重心振動が観測される。共鳴波形が右のほうへ大きく伸びているような状況では、単なる重心の振動ではなく一周ごとに強度が大きく変動する様子が観測される(図2右)。これはバンチがコヒーレントな振動だけでなく、インコヒーレントな振動を起こしてバンチ内の電子分布が変動している様子を表している。

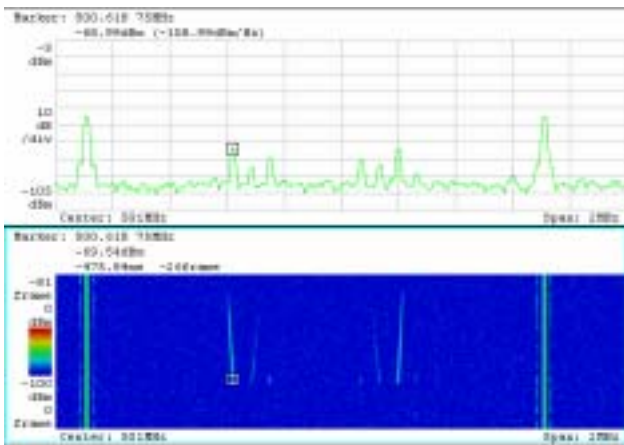


図3：正方向掃引中のスペクトルの時間変動。

図3は同じく共鳴波形が右へ大きく伸びている状況で記録したスペクトルの時間変動である。下の図で左端の明るい太い線が、 $F_{rf}=500.1\text{MHz}$ の周回周波数の信号、右端の明るい太い線が $F_{rf}+F_{rev}=501.7\text{MHz}$ の周回周波数の信号である。 F_{rf} の太い縦線の右側で周波数が増加する方向に長く斜めに流れているのが、

図1で記録した共鳴波形のひとつに相当するベータトロンサイドバンドである。この図には、 $F_{rf}+F_{rev}$ の左側のベータトロンサイドバンドも対称に同時に記録されている。そして、ベータトロン周波数のちょうど2倍の周波数のピークが掃引の後半部に少し薄い線となって現われて斜めに流れていることも確認できる。このようにリアルタイムスペアナで見たときチューンの2倍のピークが観測されるのも、八極電磁石が負に励磁されているときの特徴である。

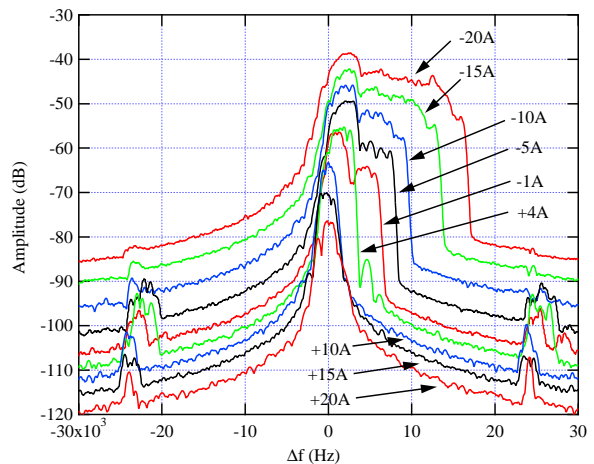


図4：ベータトロン振動波形の八極磁場依存性。マルチバンチ、蓄積電流値33mA ~ 45mAにて、励起信号は正方向の掃引。

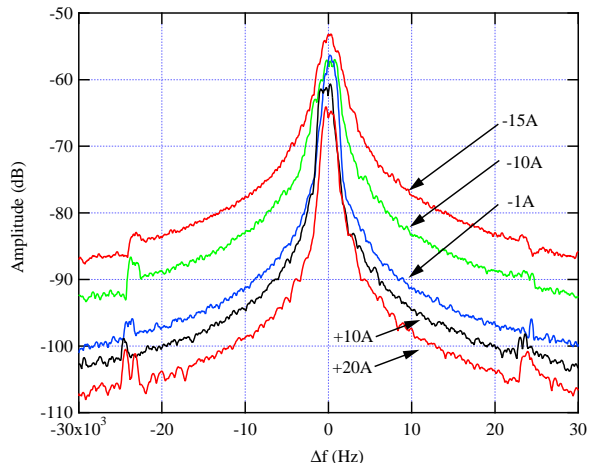


図5：ベータトロン振動波形の八極磁場依存性。マルチバンチ、蓄積電流値33mA ~ 45mAにて、励起信号は負方向の掃引。

3. マルチバンチでの共鳴波形の観測

図1と同様の測定をマルチバンチビームに対して行った結果が図4である。シングルバンチのときは波形の形が多少異なり、チューンの近傍で一旦ピークを描き、八極が負のときは右の方へやはり10kHzを超える範囲まで共鳴が持続している。そして八極の電流値を正の方へ変えるにしたがって共鳴の持続する範囲がだんだん狭くなるのはシングルバンチのときと同様である。

八極電磁石の電流が-5Aより正側では、シングルバンチの時には見られなかったシンクロトロンサイドバンドが両側に表れている。そして+10Aよりも正側では、共鳴波形はほぼ左右対称になっている。シングルバンチの時と同様に、ビームロスが起こらない範囲で強めにビーム振動を励起しているが、八極の電流が正側に増えるにしたがってビームロスが発生する励起信号強度が下がっていった。

図5は図4とまったく同じ状況で、振動の励起信号の掃引方向を逆にしたときの共鳴波形の八極磁場依存性をプロットした図である。正方向掃引の時とは異なり、八極の電流値に関わらずほぼ左右対称で狭い普通の波形となる。微小な入力信号で測定したチューンとピーク位置もほとんどずれていない。ビームの振幅自体は大きくなっているはずであるが、振幅に依存したチューンのずれもあまりないかのようである。ただし、-15Aと-10Aの時の波形は、その他の電流値の波形よりも明らかに幅が広い。このあたりの変化が振幅依存のチューンスプレッドを反映しているのであろうか。

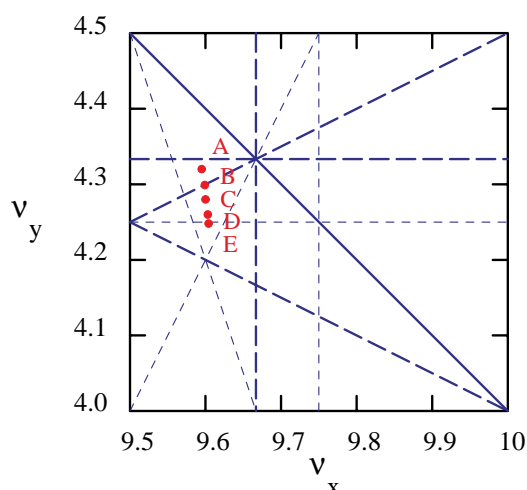


図6：共鳴波形を測定したオペレーションポイント。

図1あるいは図4のような共鳴波形の形が、チューンダイアグラム上のストップバンドに関連しているのではないかと思い、ささやかではあるがオペレーションポイントを変更して振動の共鳴波形がどのように変動するかを調べてみた。図6に測定したオペレーションポイントと、近くを通る4次までの共鳴線を同時に図示した。実線は2次、破線が3次そして、細めの点線が4次の共鳴線である。図1から図5までの測定を行ったポイントは通常運転のオペレーションポイントとほぼ同じで、図中のC(9.60, 4.28)近傍であった。垂直方向のチューンを30kHzくらいずつ変えて、AからEの5点で振動波形をとった結果を図7に示す。

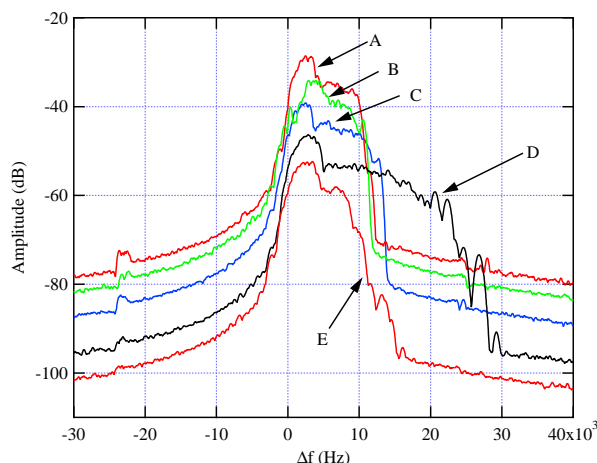


図7：垂直チューンを変えたときの共鳴波形の様子、八極の電流値は-15Aのとき。

A, Bのポイントは、3次の共鳴線の近傍であるがA, B, Cの3つのポイントでは振動波形にほとんど違いは見られない。逆にDではシンクロトロンサイドバンドを超えるところまで共鳴が持続しているが、EではまたA, B, Cとあまり変わらない波形に戻っている。ポイントD, Eの近傍を横切っているのは4次の共鳴線であり直接関連しているかどうか定かではない。

4. 考察とまとめ

八極磁場による不安定性の抑制に関してはPFリングでも、パルス八極電磁石[2]や位相空間モニターとファーストキッカーを用いて[3]チューンシフトの測定など定量的な実験が多く行われてきている。蓄積ビームの振動観測を直接チューンシフトの振幅依存などの基本量と定量的に結びつけることは容易ではないが、今回観測されたベータatron振動の共鳴の様子は、八極磁場に依存したビーム不安定性の抑制や、ダイナミックアパーチャーの変動などと深く関わっていると思われる。Turn-by-turnの測定でも、今回のような測定でも八極磁場による非線形性が強くなると単なる重心の振動としては扱えなくなり、バンチ内電子の分布の変動が生じていることに注意してデータを取り扱う必要がある。

参考文献

- [1] T. Honda et al., "Nonlinear behaviour of betatron oscillation measured with a wideband magnetic beam shaker", Proc. 14th Symp. Accelerator Science and Technology, 2003, P485.
- [2] T. Miyajima et al., "Pulse octupole magnet system at the Photon Factory storage ring", PAC 2003, p2171.
- [3] T. Miyajima et al., "Experimental measurement of third-order resonance islands at the Photon Factory storage ring", PAC 2001, p1729.