

CURE OF TRANSVERSE INSTABILITIES BY CHROMATICITY MODULATION AT NewSUBARU

Takeshi Nakamura^{1 A)}, Haruo Ohkuma^{A)}, Noritaka Kumagai^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Hideki Takebe^{A)}, Sakuo Matui^{A)}
Ainosuke Ando^{B)}, Yoshihiko Shoji^{B)}, Satoshi Hashimoto^{B)}, Tadashi Hattori^{B)}
Keiko Kumagai^{C)}

^{A)} JASRI / SPring-8, 1-1-4 Kouto, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 678-5198, Japan

^{B)} LASTI, Univ. of Hyogo, 3-1-2 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo 678-1205, Japan

^{C)}RIKEN, 2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract

Chromaticity modulation by synchrotron frequency produces betatron tune spread inside of a bunch and suppress transverse instabilities in storage rings by Landau damping. We tested this method at the NewSUBARU storage ring with an developed AC sextuple magnet and its power supply and we obtained less than 1ms damping time and the suppression of horizontal and vertical beam instabilities are observed.

クロマチシティ変調による横方向不安定性の抑制実験

1. はじめに

クロマチシティをシンクロトロン周波数で変調すれば、ベータトロン周波数にバンチ内部で広がりを持たせることができ、コヒーレント振動の減衰を早め、横方向の不安定性の抑制が可能となる[1,2]。今回、このための交流六極電磁石およびその電源を製作し、昨年度に製作済みの、セラミックスチェンバを組み込むための真空チェンバーとともに、NewSUBARUリングに設置し、ビーム試験を行い、不安定性の抑制に成功した。

2. NewSUBARU 蓄積リング

NewSUBARU蓄積リングのパラメータを表1に示す。

1.5 GeVの運転が可能であるが、実験は、1GeVで行った。

表1 NewSUBARU蓄積リングでの実験パラメータ

エネルギー	E	1.0 GeV
エネルギー広がり r.m.s.	σ_δ	4.7×10^{-4}
周回周波数	f_0	2.5 MHz
シンクロトロン周波数	f_s	5 kHz
ベータトロン放射減衰時間	τ_β	22 ms

3. クロマチシティ変調

この手法ではクロマチシティを以下のように変調する。

$$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 \cos \omega_s t \quad (1)$$

ここで、 $\omega_s = 2\pi f_s$ はシンクロトロン角周波数であり、 ξ_0 をDCクロマチシティ、 ξ_1 をACクロマチシティと呼ぶことにする。

DCクロマチシティは瞬間的にはチューンシフトを生じるが、シンクロトロン振動の周期のスケールでは、位相の進みと遅れが打ち消し合い、不安定性には大きな効果は示さない。一方、ACクロマチシティは、バンチ内部にr.m.s. 広がりとして

$$\sigma_v = \frac{1}{2} \xi_1 \sigma_\delta \quad (2)$$

のGaussian分布をもつチューン広がりを生じる。これによるLandau減衰[3]によって、

$$\frac{1}{\tau_L} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} 2\pi f_0 \left(\frac{1}{2} \xi_1 \sigma_\delta \right) \approx 2.5 f_0 \xi_1 \sigma_\delta \quad (3)$$

より小さな成長率をもつ不安定性は抑制される。

3. ディスパーションのあるラティス

交流六極電磁石を設置した長直線部でのディスパーションは通常のラティスでは0であるので、ここにディスパーションを作り出すラティスに変更する必要がある。この様なラティスは昨年度に開発され[4]、今回の実験に用いられた。ただし、このラティスでの入射は困難であったので、通常のラティスで入射・蓄積ののち、このラティスへの遷移を行った。また、エネルギーランピングで用いている手法を適用し、この遷移を自動化した。作り出すことのできたディスパーションの値は、1mであり、十分な大きさである。

4. 交流六極電磁石

交流六極電磁石および電源を完成させ、電力試験、NewSUBARUへの設置を行った。Fig. 1に設置されたところの写真を示す。電磁石の電気特性の測定では、インダクタンスはほぼ計算値どおりであったが、交流抵抗がかなり大きく、予定していた300Apの定格では900Wの発熱が予想される。コイルは図1に示すように、半ターンのもを外側と内側に回しているが外側の場合の交流抵抗と、内側の場合の交流抵抗が大きく異なるため、この交流抵抗は、コアでの損失ではなく、内側のコイルが外側のコイルの生成する磁場中に浸っているため、内側のコイルに渦電流が流れるためと考えられる。実際に通電するとやはりコイルの温度上昇が大きく300Apeakでは5分程度で70度を超えたが、しかし、短時間であれば運転は可能であるので、ビーム試験には十分であった。コイル形状やその設置場所は電流密度からくるジュール損失や表皮厚などから決められているため変更は困難

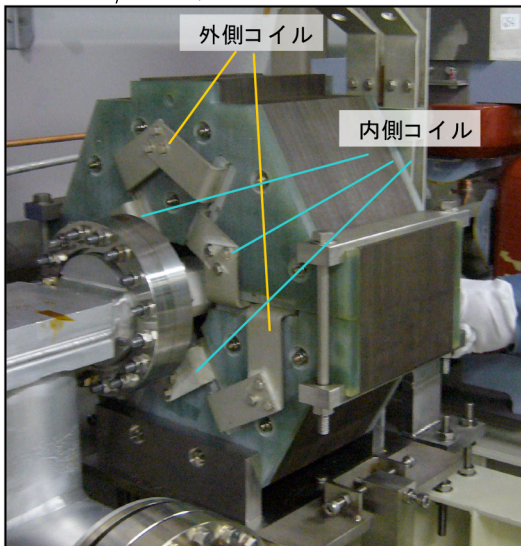
¹ E-mail: nakamura@spring8.or.jp

であり、それ以外の方法を検討しなければならない。

表2 交流六極電磁石のパラメータと測定値

磁極長		150 mm
ボア直径		80 mm
六極磁場強度†	B''_{peak}	36 T/m ² (~計算値)
ターン数	N	1 (=1/2+1/2)
ピーク電流	I_p	300 A _{peak}
周波数	f_s	4~6 kHz
インダクタンス	L	~8.2mH (~計算値)
交流抵抗	R	20mΩ at 5kHz
β 関数*	β_x/β_y	17.3 m / 13.3 m
ディスパージョン*	η	0.73m
ACクロマティシティ	$\xi_{1,x}/\xi_{1,y}$	1.63 / 1.25

† 磁場は $B = 1/2 B'' x^2$, *: 値は磁石の場所



交流六極電磁石用電源

交流六極電磁石用の電源は、LC並列共振型とし、Lを交流六極電磁石のインダクタンスとして、Cを用意する。このCは電磁石の直近に置くため磁石本体の架台内に収納した。Q値として16.5(5kHz)が得られた。この共振回路を駆動するためのアンプは、NF電子回路ブロックのNF4520(DC~20kHz, 170Vpeak, 23Apeak)を用い、これを加速器の収納部の外に置いた。これにより定格としていた300Apeak, 100Vpeakでの交流六極電磁石の駆動を実現した。キャパシタンスCには、80uF ~ 1uFまでのいくつかのキャパシタを用意して、これを遠隔操作により切り替えてキャパシタンスの値を可変とし、共振周波数を可変とした。また、コイルが発熱することが判明したので、コイルに温度接点を用意し、60度で警告灯点灯、80度で電源停止となる安全系を組み込んだ周波数の切換えは、電源に数種類の異なる容量のキャパシタを置いて、それを遠隔操作によりつなぎ変えることにより行った。

5. ビーム試験

アラインメント

交流六極電磁石とビーム軸のアラインメントは、交流六極電磁石の磁場中心とビーム軸がずれた場合に引き起こされるコヒーレントなシンクロトロン振動の大きさを測定することにより実施した[2]。0.1 mm程度までこの方法で追い込むことができたが、NewSUBARUリングのビームがもともと行っているシンクロトロン振動があり、これ以上は、これに隠れて不可能であった。ということはこれで十分ということでもある。

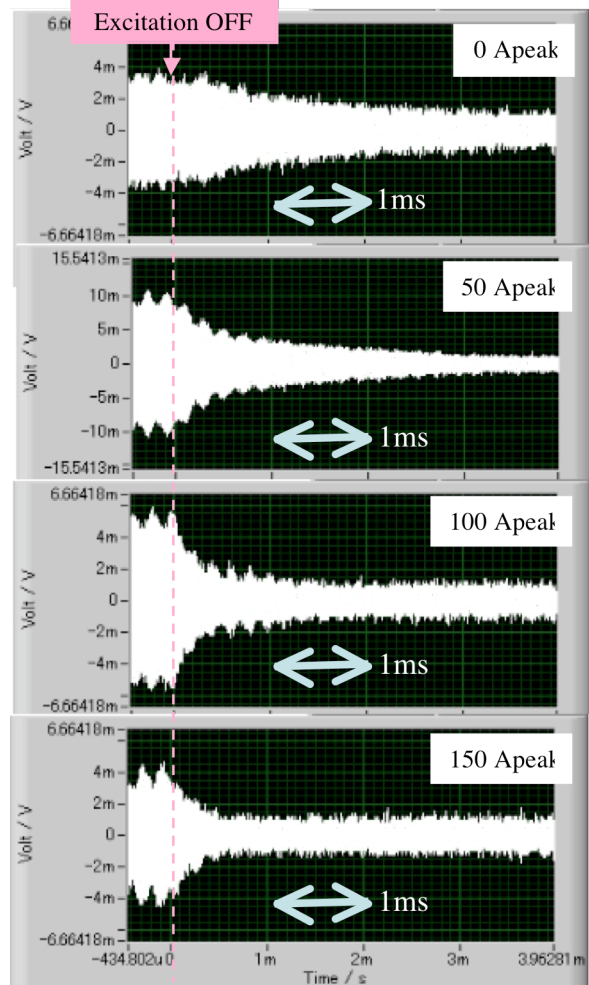


Figure 2: Damping time measurement of vertical betatron oscillation of center of mass of bunches at several excitation current of the AC sextupole. The vertical betatron motion is excited by external force and the force is turned off at the timing shown by a dashed line. The damping time much less than 1ms is obtained with the current 150Apeak. At 0Apeak, the damping time is much shorter than the natural damping time listed in Table 1 and it is supposed by the tune spread produced by amplitude dependent tune shift.

減衰時間測定

垂直方向のベータatron振動を、ストリップラインキッカーに励振信号を入力して励起し、その励振信号を断った時のベータatron振動の減衰を、交流六極電磁石の電流を変えて測定した。結果をFig. 2 に示す。各トレースの右上が交流六極電磁石の電流値(ピーク値)である。150Apeakですでに1msを切る電流値が得られている。式(3) の値と計算と一致する。

マルチバンチ不安定性の抑制

加速空洞の高次モードチューナを動かして、高次モードによる水平方向のマルチバンチ不安定性を励起し、それをこの手法が抑制できるかを試験した。結果をFig.3 に示す。上の図は、不安定性が生じているときのピックアップ電極からの信号のスペクトルを示す。右は周回周波数の整数倍の信号であり、左は水平方向のベータatron周波数に対応するサイドバンドであり、不安定性により水平方向のベータatron振動が生じていることを示している。下の図は、これらのピークの時間変化を示しており、上が過去である。不安定性のピークが矢印で示している時点から消失しているが、このときAC六極が駆動電流187Apeakで起動された時点であり、不安定性が抑制されたことを示している。

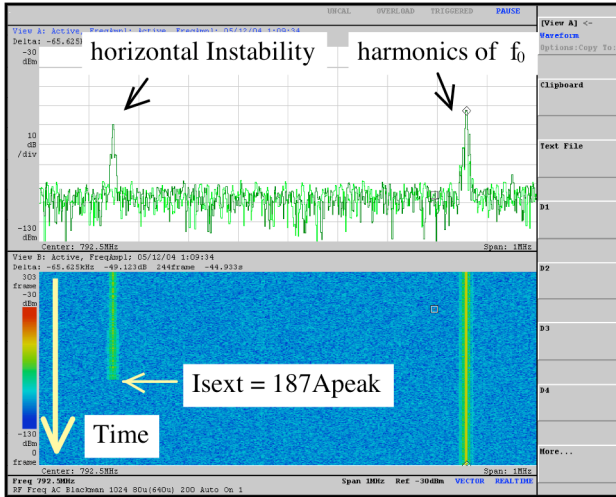


Figure 3: Upper figure shows the spectrum of the signal taken from the pickup electrode. The right peak is the harmonics of revolution frequency and the left peak is the horizontal betatron sideband produced by a beam motion excited by the horizontal instability. Lower figure shows the time dependence of the peaks and the left peak is disappeared when the AC sextupole is turned on by a current 187Apeak.

シングルバンチ不安定性の抑制

NewSUBARUでは、低いDCクロマティシティのとき、シングルバンチ不安定性である mode-coupling不安定性が

3mA/bunch 程度の閾値で発生している。これの抑制を試みた。結果を表3に示す。上から順にパラメータを変えていった。

表3 シングルバンチ不安定性

交流六極電流	DC クロマティシティ	バンチ電流、安定性
0 Apeak	3.2	10mA 安定
	1.0	2.5mAに減少後、安定
275 Apeak	3.2	10mA 安定
	1.0	10mA 安定
275 Apeak	0.6	2mAに減少後、安定
		10mA 安定
200 Apeak	1.0	3.8mAに減少後、安定
0 Apeak		3.8mA 安定

これから、275Apeakのとき、DCクロマティシティを1.0に下げても10mAで安定であったことがわかり、不安定性の抑制が実現していることがわかる。しかし、DCクロマティシティを0.6に下げると、不安定性が発生した。Head-tail減衰が不安定性の抑制を手助けしている可能性がある。

まとめ

クロマティシティをシンクロtron周波数で変調をかけてベータatronチューンの広がりを生じさせるという新たな手法を用いて、ビームのコヒーレントな振動の減衰を放射減衰に比べて一桁以上早くすることにより、ビーム不安定性の抑制を実現した。また、得られた減衰時間は、計算とほぼ一致した。また、このための交流六極電磁石およびその電源を開発した。今後は、この手法を用いてより大電流での蓄積を目指すことを検討している。

謝辞

本研究は平成16、17年度の文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号16360043)の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] T. Nakamura, "Cure of Transverse Instabilities by Chromaticity Modulation" in Proc. of the 1995 IEEE Particle Accelerator Conference (Dallas, 1995), Vol. 5, p. 3100.
- [2] T. Nakamura, et al., "Status of Cure of Transverse Instabilities by Chromaticity Modulation at New SUBARU", Proc. of the 2nd Meeting of Accelerator Society in Japan, Tosu(Saga), Jul. 20-22, 2005.
- [3] A. Chao, "Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators", John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [4] Y. Shoji, "Off-Momentum Injection into Non-Achromatic Lattice", Proc. of the 2nd Meeting of Accelerator Society in Japan, Tosu(Saga), Jul. 20-22, 2005.