

BUNCH CONTROL BY RF MANIPULATION IN A HYBRID SYNCHROTRON

Yoshito Shimosaki¹, Ken Takayama, Kota Torikai

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

Abstract

A hybrid synchrotron was demonstrated at the KEK PS, in which a bunch is trapped by an RF voltage and accelerated by a step voltage. In this type of accelerator, while a strict acceleration step voltage is necessary for the orbit of a charged particle to be balanced in the radial direction, the confinement voltage can be arbitrarily manipulated as long as the particles are sufficiently confined in the stationary bucket, so that a feasibility of a bunch control can be developed.

縦方向機能（加速・閉じ込め）分離型加速器におけるバンチ制御

1. はじめに

RF電圧またはバリア電圧でビームを閉じ込め、ステップ電圧でビームを加速する、縦方向機能分離型加速器が提案されている^[1]。RF電圧でバンチを閉じ込めるハイブリッド・シンクロトロンは、昨年秋に KEK-PS MR 8GeVパターンで実証された^[2]。バリア電圧で長いバンチ：スーパーバンチを構築して加速する誘導シンクロトロンについては、平成17年度冬に実証試験が行われる予定である。

縦方向機能分離型加速器では、ビームの軌道を保持する為の加速がステップ電圧で行われる為、閉じ込め電圧は任意に操作することができ、自由なバンチ制御が可能となる。その適用例として、ハイブリッド・シンクロトロンにおいて、断熱・非断熱デバンチング過程と加速を組み合わせ、トランジションエネルギー近傍における非断熱現象を抑制することが考えられる。

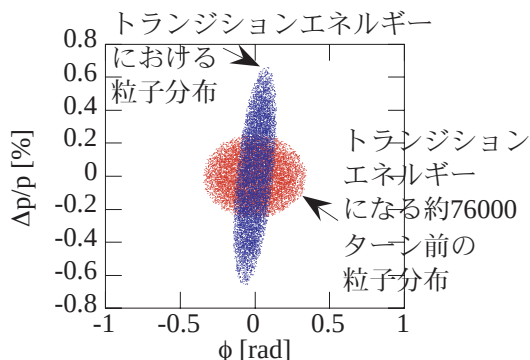


図1： トランジションエネルギーの粒子分布。

1.1 トランジションエネルギー

円形加速器において、粒子のエネルギーがトランジションエネルギー近傍になると、シンクロトロン振動は遅くなり、バンチの形状が著しく変型される。

すなわち、(1) 時間軸方向にバンチは圧縮される、また (2) 理想粒子に対する粒子集団の運動量偏差 ($\Delta p/p$) は増大する (図1参照。非断熱現象と呼ばれる)。バンチ圧縮は粒子分布の線密度を増大させ、縦方向空間電荷効果に起因する不安定性の原因となる^[3]。また運動量偏差の増大は横方向ビームサイズの増大を招き、真空容器との衝突によりビームロスを引き起こす。また、運動量偏差の増大により、シンクロトロン振動の非線形効果 (Johnsen effect) が無視できなくなり、トランジション通過後のミスマッチに起因する縦方向エミッタンス増大により、ビームロスを引き起こす可能性がある^[4]。

1.2 断熱・非断熱デバンチング

バンチビームからコースティングビームに移行する過程をデバンチング過程と言う。デバンチングには非断熱的に行う方法と断熱的に行う方法の2種類があり、それぞれ異なる運動形態を示す。

非断熱デバンチング過程では、RF電圧の振幅を実効的に瞬時にゼロにする。シンクロトロン振動は瞬時に止まり、粒子集団は運動量偏差に対応した向きにドリフト運動をする。このとき個々の粒子が持つ運動量偏差は変化せず、バンチ幅のみが時間軸方向に急速に伸びる (図2参照)。

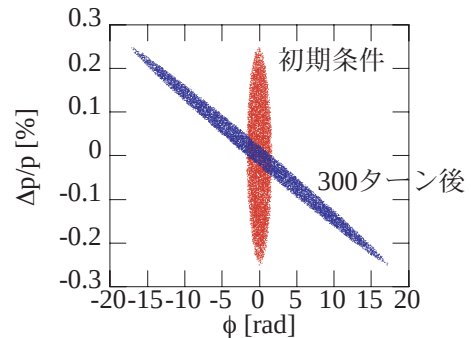


図2： 非断熱デバンチング例。

¹ E-mail: shimo@www-accps.kek.jp

一方、非断熱デバンチング過程では、RF電圧を有限の時間をかけてゆっくりとゼロにする。粒子集団はシンクロトロン振動を維持しながら、ゆっくりとデバンチされる。このときのバンチ挙動はトランジション近傍でのものと正反対で、バンチ幅は時間軸方向に伸び、運動量偏差はデバンチ前よりも小さくなる（図3参照）。

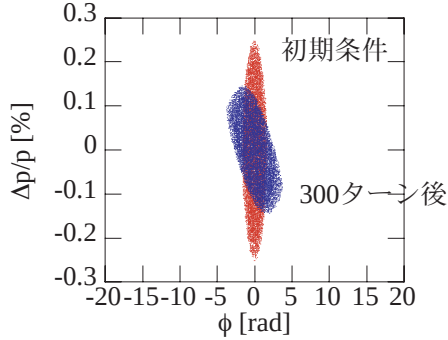


図3：非断熱デバンチング例。300ターンでRF電圧振幅が0になる場合。

1.3 Focusing-free transition crossingとNovel Focusing-free transition crossing

ハイブリッド・シンクロトロンでは、縦方向機能分離性から、ステップ電圧でビームの加速を行いつつ、RF電圧の振幅をゼロにしてデバンチさせることが可能である。デバンチング過程における上述のビーム挙動により、トランジションエネルギー近傍の非断熱現象を抑制することが期待できる。非断熱デバンチング過程を用いた加速方法：Focusing-free transition crossing (FFTC)^[4]と、断熱デバンチング過程を用いた加速方法：Novel Focusing-free transition crossing (NFFTC)^[5]について、理論と実験の両面から検証したので報告する。

2. 理論的考察

RF電圧の振幅 V_{rf} に関して、有限の時間 t_0 をもって、FFTCでは

$$V_{rf}(t) = \begin{cases} 0 & |t| \leq t_0 \\ V_0 & |t| > t_0 \end{cases} \quad (1-a)$$

と、NFFTCでは

$$V_{rf}(t) = \begin{cases} \alpha|t|^r & |t| \leq t_0 \\ V_0 & |t| > t_0 \end{cases} \quad (1-b)$$

と設定する。ここで時間 t について、 $t = 0$ で粒子はトランジションエネルギーに到達するよう定義した^[7]。線形トランジションクロッシング理論を仮定すれば、トランジションエネルギー前後でシンクロトロン振動は対称となる^[7]。トランジションエネルギー前後における位相空間でのミスマッチを抑える為に、上式のようにトランジションエネルギー近傍で時間に関して対称な電圧振幅が必要となる。上式中、 r は正の実数または0で、 $r = 0$ の時は通常のRF加速方法：Normal transition crossing (NTC)を意味する。

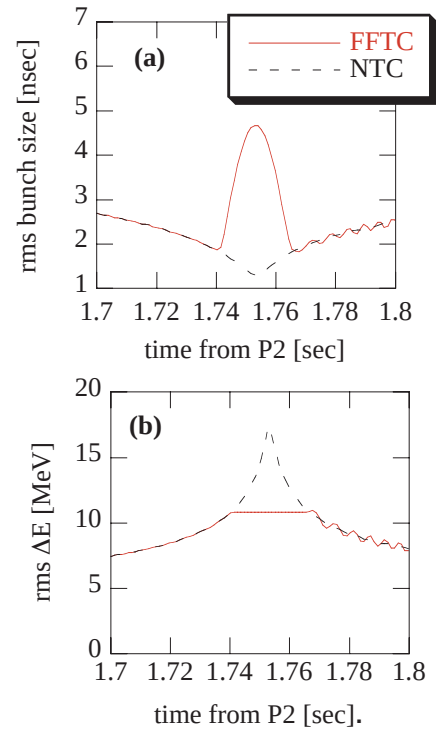


図4：FFTC例。トランジション近傍における(a)時間軸方向と (b)エネルギー方向のバンチ幅。

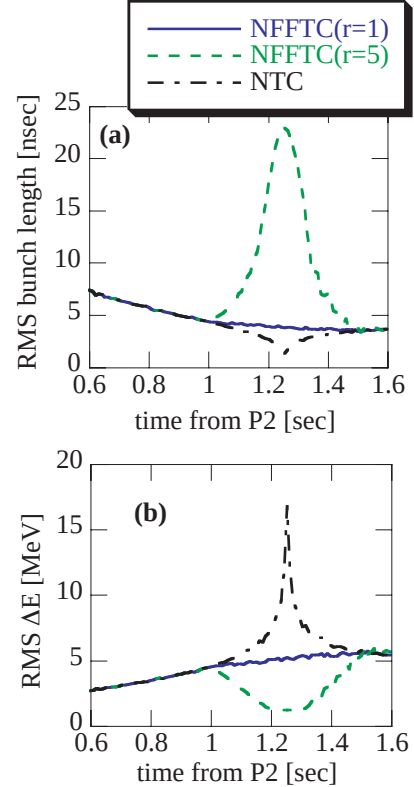


図5：NFFTC例。トランジション近傍における(a)時間軸方向と(b)エネルギー方向のバンチ幅。

上記RF電圧振幅を用いると、シンクロトロン振動に関する位相方程式は

$$\Delta E_{n+1} = \Delta E_n + eV_{rf}(t)\sin\{\omega_{rf}(t)\Delta t_n\}$$

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n + \eta_{n+1}T_{n+1} \frac{\Delta E_{n+1}}{(\beta_{n+1})^2(E_s)_{n+1}}$$

で与えられる。ただしFFTCとNFFTCの効果を明瞭に見るため、ここでは非線形項を考慮していない。上式を用いたFFTCに関するシミュレーション結果を図4に、NFFTCに関する結果を図5に示す。ここではKEK-PS MR 8GeVパターンのビーム/マシンパラメータを用いた。

FFTCの特徴として、時間軸方向の急激なバンチ幅の増大が挙げられる。非断熱デバンチング過程を用いている為、FFTC期間中、エネルギー偏差は時間に依らず一定となる。

一方、NFFTCでは、「トランジションエネルギーにおける非断熱現象」を相殺する向きにビームが挙動する「断熱デバンチング過程」を用いている為、特に $r = 1$ の場合、バンチサイズをほとんど変化させずにトランジションエネルギー以上まで粒子を加速することが可能となる^[6]。

3. 実験的検証

昨秋、KEK-PS MRにおいて、誘導加速シンクロトロン実証の為にハイブリッドシステム（RF電圧閉じ込め、ステップ電圧加速）が導入された^[2]。これに、RF電圧の振幅を式(1)のように設定する^[8]ことで、FFTC及びNFFTC($r = 1$)の検証実験を行った。これらの効果を見る為に、 γ_T ジャンプは用いていない。

「ビーム強度」、「FFTCとNFFTCを行う為に設定したプログラム電圧」及び「壁電流モニターで測定したrmsバンチ幅」の結果を図6及び7に示す。理論では、トランジション前後でビームサイズは対称となるはずだが^[7]、実験ではFFTC、NFFTCによらず、NTCの場合でも、トランジションエネルギー直後にバンチ幅が増大する現象が確認された。現在、原因を調査中である。トランジションエネルギー直前のFFTC及びNFFTC($r = 1$)の時間領域では、予測通りバンチ幅がNTCの場合よりも増大する結果を得た。特にNFFTC($r = 1$)においてはバンチ幅が一定となることが確認できた。RF電圧の振幅を式(1)のように変えた以外、ビーム/マシンパラメータは変えていないが、FFTC、NFFTCの場合、ビームロスが削減された。

4. まとめ

トランジションエネルギー近傍における非断熱現象を抑制する為に、FFTC、NFFTCについて、理論と

実験の両面から検証を行った。バンチ幅の増大、ビームロスの削減を確認した。今後も実験を行う予定である。

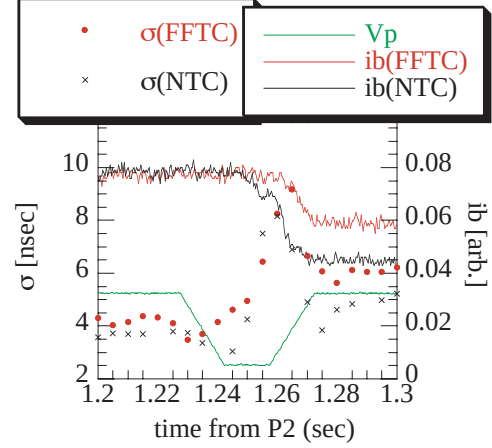


図6： FFTC実験結果。バンチ幅、ビーム強度そしてRF振幅の設定電圧。

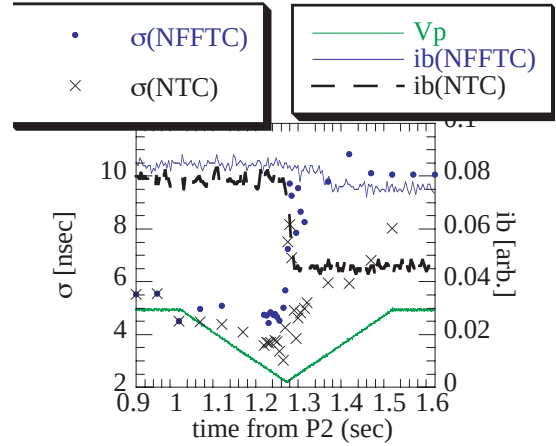


図7： NFFTC実験結果。バンチ幅、ビーム強度そしてRF振幅の設定電圧。

参考文献

- [1] K. Takayama and J. Kishiro, Nucl. Inst. Meth. A 451, 304(2000).
- [2] K.Takayama et al, Phys. Rev. Lett. 94, 144801 (2005).
- [3] (例えば) K. Takayama, D. Arakawa, J. Kishiro, K. Koba and M. Yoshii, Phys. Rev. Lett. 78, 871(1997).
- [4] K. Johnsen, Proceedings of the CERN Symposium on HE Accelerators and Pion Physics, Geneva, 1956 (CERN Report No. 56-25, 1956).
- [5] Y. Shimosaki, K. Torikai, K. Takayama, submitted to PRL.
- [6] Y. Shimosaki, submitted to PRSTAB.
- [7] E. D. Courant and H. S. Snyder, Annals of Physics 3, 1(1958).
- [8] S. Ninomiya, "Ferrite Loaded RF Cavity", Frontier of Accelerator Technology, (Published by World Scientific, 1999). S. Takano, private communication.