

KEK デジタル加速器に見られるシンクロベータ結合のコヒーレントな運動 Coherent Synchro-Beta Coupling in the KEK Digital Accelerator

門馬卓海^{#A,B)}、高山 健^{A,B,C,D)}、由元 崇^{A,B)}、Liu Xiguang^{A,B)}
Takumi Monma^{A,B)}, Ken Takayama^{A,B,C,D)}, Takashi Yoshimoto^{A,B)}, and Liu Xiguang^{A,B)}
^{A)}Tokyo Institute of Technology
^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{C)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)
^{D)}Tokyo City University

Abstract

The KEK digital accelerator is a small-scale fast cycling induction synchrotron, where induction pulse voltages are discretely given to circulating particles as the acceleration voltage. Its magnitude does not follow the required acceleration voltage of $V_n = \rho C_0 dB/dt$ at n-th turn but be fixed to be a larger value, V_{out} , than the demanded V_n from some technical restriction. The induction acceleration system is triggered when $\text{Sum } V_n > V_{out}$. Consequently, a perturbation on the betatron oscillation induced by a discrete change of the equilibrium orbit is notably large. This paper discusses a size of this perturbation quantitatively by means of numerical simulation and compare the experimental result.

1. はじめに

Figure 1 に示す KEK デジタル加速器^{[1],[2]}は採用している誘導加速システムが低い方向に加速周波数の制約がない事を利用し、RFQや線形加速器等の入射器を用いない小型の速い繰り返しのシンクロトンである。リングは旧 500 MeV ブースターであり、誘導加速システムは誘導加速シンクロトンの原理実証試験^[3]のために旧 12 GeV 陽子シンクロトン用として開発された物^[3] (Figure 2 に示す) である。「デジタル加速器での加速」目的だけに限定して言えば、以下のハンデキャップを持つ。

- (1) 誘導加速システムの DC 充電器は固定電圧充電であり、負荷としての 1 対 1 のパルストランスである誘導加速セルの出力電圧は原則この固定電圧に限定される
- (2) デジタル加速器リングには運動量分散関数がゼロの領域はない。概ね 1.4 m の大きさの運動量分散関数を持つ

(1) の制約のため、磁場が三角関数で変動する速い繰り返しのシンクロトンで要求される、ハーフサインで表現される様な電圧供給は不可能である。

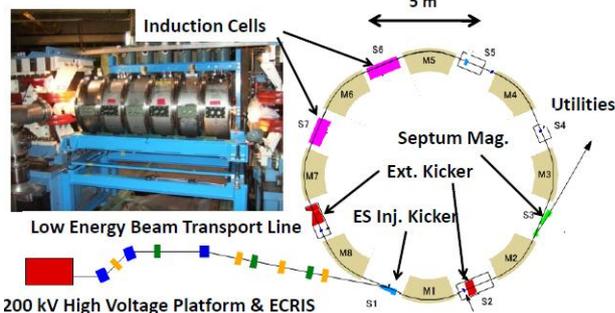


Figure 1: Schematic View of the KEK Digital Accelerator.

そこで要求電圧の合計が誘導加速セルの固定出力電圧に達すると、誘導加速システムをトリガーして、加速電圧パルスを発生させると云う「パルス密度制御」と云う手法^[4]が考案され、使用されている。

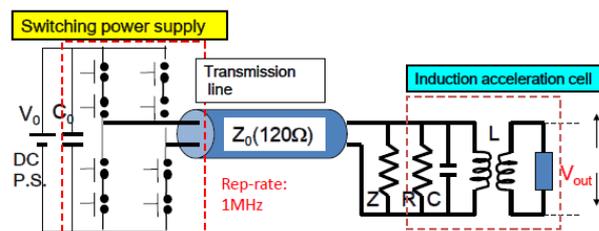


Figure 2: Equivalent Circuit for the Induction Acceleration System.

この加速電圧が発生するまで、周回と共に粒子の平衡軌道 $D(s)\Delta p/p$ は徐々に移動して行くが、加速電圧発生後、平衡軌道はゼロに戻る (ここでは簡単のために、粒子個々は運動量分布を持っていないと仮定する)。しかし、実軌道自身 $x(s) = x_\beta(s) + D(s)\Delta p/p$ は動くわけではないので、ベータトロン運動の振動の振幅と位相が瞬時にして変化する事になる。しかしながら、加速電圧生成に伴い $\Delta p/p$ が不連続に変化する誘導加速セルの位置の運動量分散関数 ($D(s)$, $D'(s)$) がゼロであれば、ベータトロン運動の振動の振幅と位相が変化する事はないので、特に問題は生じないのだが、残念ながらデジタル加速器はハンデキャップ (2) を持つので、ベータトロン振動への摂動は避け得ない。

以下にこの効果を定量的に評価する。

2. 電圧パルス密度制御による誘導加速

KEK デジタル加速器では、ハンデキャップ (1) を持つ。そこで「電圧パルス密度制御」という手法を使用し加速を行っている。これは、要求電圧の合計が誘導加速セルの固定出力電圧に達したときに加速電圧をパルスを発生させる手法である。Figure 3 は理想的な要求電圧である。

monma@post.kek.jp

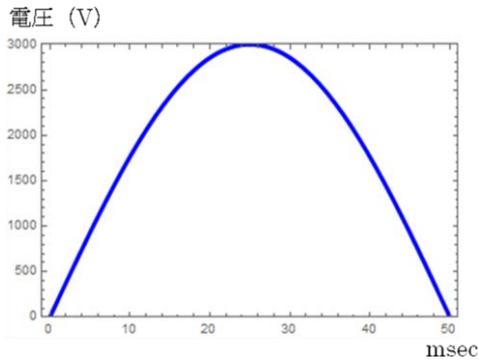


Figure 3 Required acceleration voltage per turn.

Figure 4 は、0.5 kV の固定加速電圧を発生させる領域 (Figure 3 における 0~500 V の領域) で、実際に固定加速電圧が発生したタイミングを示している。

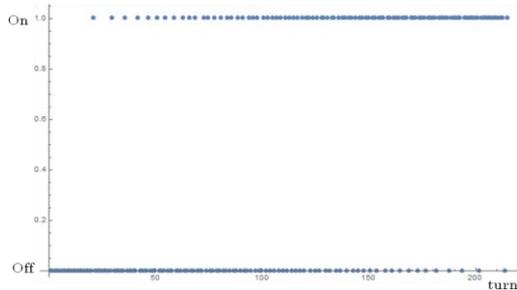


Figure 4: Timing to generate the induction voltage pulse.

今回行った加速シミュレーションでは、0.5 kV、1 kV、1.5 kV、2 kV、3 kV の 5 つの固定加速電圧を出力させている (Figure 5 に示す)。またバリア電圧はどれも 1 kV である。

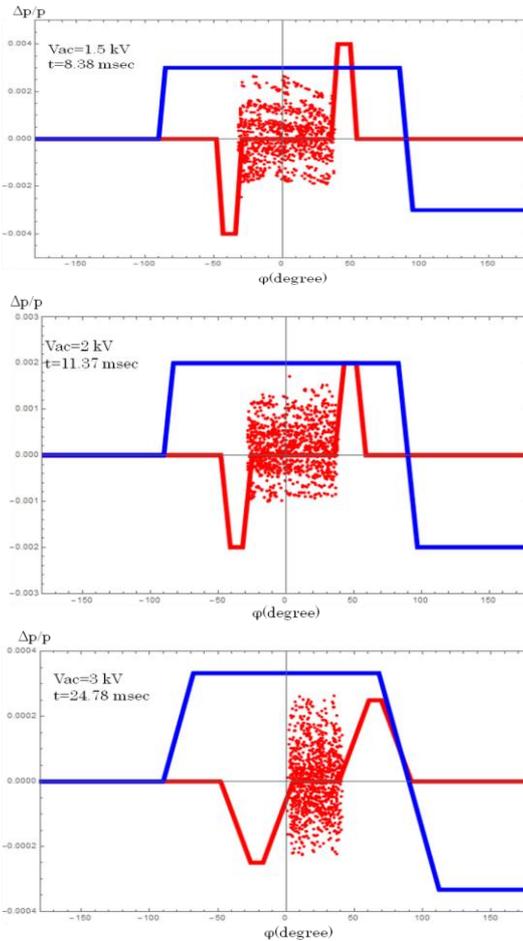
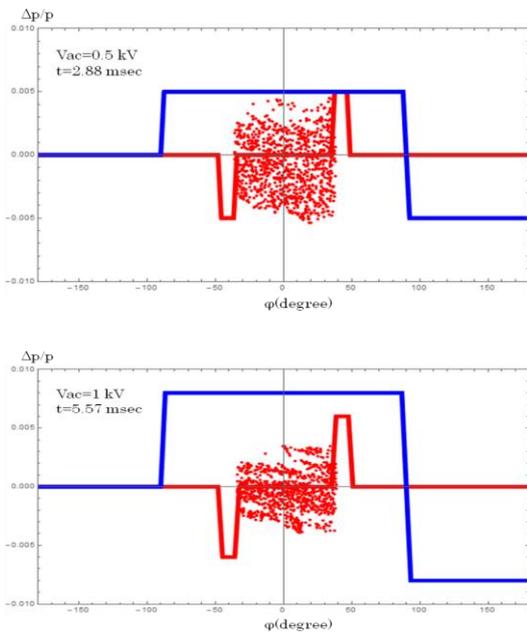


Figure 5: Discrete Acceleration. (Red and blue lines V_{bb} and V_{ac} , respectively.)

3. ベータートロン運動と平衡軌道の不連続変化

Figure 6 は、加速セルを置いた位置で観測するベータートロン運動に関するポアンカレ平面である。原点 O' は理想粒子の位置。ここでは簡単のために、同じ運動量偏差 $\Delta p/p$ 、同じベータートロン振幅 ($A=B$) を持つが、異なるベータートロン位相を持つ 2 つの粒子を考える。

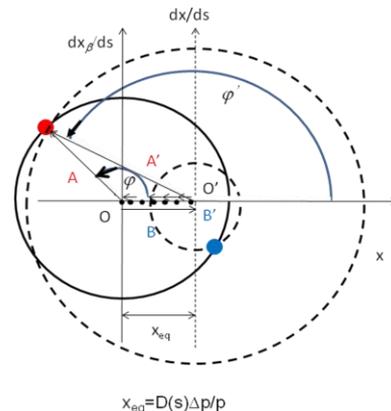


Figure 6: Betatron motions in the phase space.

パルス密度制御による加速電圧が発生するまで、周回と共に粒子の平衡軌道 $D(s)\Delta p/p$ は徐々に移動して行く (O'から Oへ移動) が、加速電圧発生後、平衡軌道は原点 O'に瞬時に戻る。しかし、実軌道自身 $x(s)=x_\beta(s)+D(s)\Delta p/p$ は動くわけではないので、ベータートロン運動の振動の振幅と位相が A'と B'にそれぞれ瞬時にして変化する事になる。しかしながら、加速電圧生成に伴い $\Delta p/p$ が不連続に変化する誘導加速セルの位置の運動量分散関数 ($D(s)$, $D'(s)$) がゼロであれば、ベータートロン運動の振動の振幅と位相が変化する事はないので、特に問題は生じないのだが、残念ながらデジタル加速器はハンディキャップ (2) を持つので、ベータートロン振動への摂動は避け得ない。

Figure 7 は、1000 個の粒子の $x(s)$ の重心を追うことで、コヒーレントなベータートロン振動がどのように変化していくかを示している。また、 $D(s)=1.4$ m、 $D'(s)=0$ の場所で観測している。A の図は、 $V_{ac}=0.2$ kV (1~300 turn)、0.7 kV (301~800 turn)、1.2 kV (801~1000 turn) と 3 段階にしている。B の図は $V_{ac}=1.2$ kV (1~1000 turn) である。

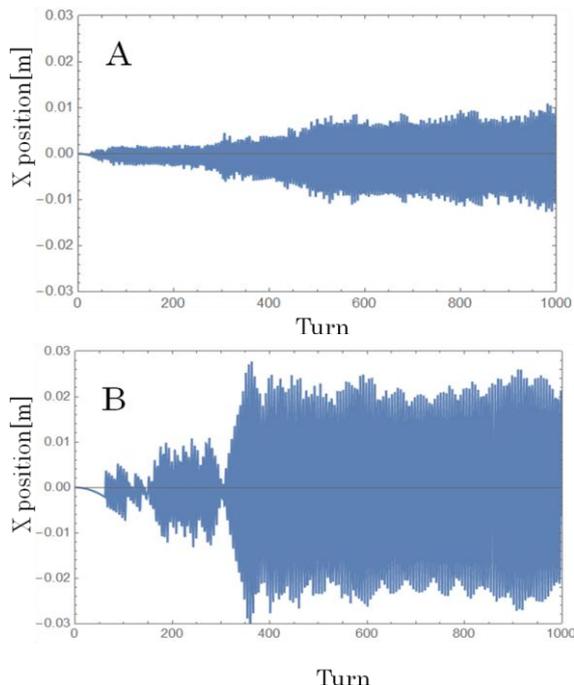


Figure 7: Simulation of temporal evolution of the beam center for plan A and plan B.

A も B もコヒーレントに粒子重心の振動の振幅が増大していることが分かる。しかし、電圧を段階的に変化させた A のほうが増大は抑えられているのが分かる。

4. 実験結果との対比

Figure 8 は、KEK デジタル加速器で前節のパラメーターに従って行われた加速実験の中で、リング

内に配置したビーム位置モニターで検出されたコヒーレントな重心の変化の観測結果^[2]である。

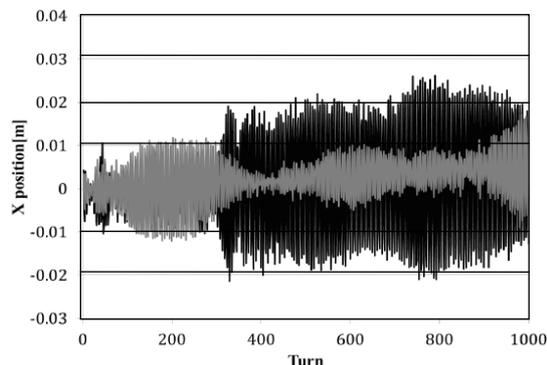


Figure 8: Experimental result of temporal evolution of the beam center for plan A (grey) and plan B (black).

実験結果とシミュレーション結果とは絶対値も含め比較的良く合致している様に評価している。重心のこの振動励起が、結局ビームエミッタンスに繋がるのは言を待たない。

結論

ハンディキャップ (2) のため、ビーム重心の振動は不可避である事を実験とシミュレーションの両方から確認した。加速電圧を段階的に細かく変化させることで重心の振動の増大が抑えられる事が、Figure 7A, 8A から明らかである。一方、 $D(s)=0$ m、 $D'(s)=0$ の領域があるような加速器ラティス^[5]を設計し、そこに加速セルを設置することでこの重心の振動励起は無くせる。

参考文献

- [1] T. Iwashita, T. Adachi, K. Takayama, K.W. Leo, T. Arai, Y. Arakida, M. Hashimoto, E. Kadokura, M. Kawai, T. Kawakubo, Tomio Kubo, K. Koyama, H. Nakanishi, K. Okazaki, K. Okamura, H. Someya, A. Takagi, A. Tokuchi, and M. Wake, "KEK digital accelerator", Phys. Rev. ST-AB 14, 071301 (2011).
- [2] K. Takayama, T. Yoshimoto, Liu Xingguang et al., "Induction Acceleration of Heavy Ions in the KEK Digital Accelerator: Demonstration of a Fast-Cycling Induction Synchrotron", Phys. Rev. ST-AB 17, 010101 1-6 (2014).
- [3] K. Takayama et al., "Experimental Demonstration of the Induction Synchrotron", Phys. Rev. Lett. 98, 054801 (2007).
- [4] T. Dixit, T. Iwashita, and K. Takayama, "Induction Acceleration Scenario from an Extremely Low Energy in the KEK All-Ion Accelerator", Nucl. Inst. Meth. A 602, 326-336 (2009).
- [5] Leo, Kwee Wah, T. Adachi, T. Kwakubo, T. Monma, T. Dixit, and K. Takayama, "A Compact Hadron Driver for Cancer Therapies using Continuous Energy Sweep Scanning", submitted to Phys. Rev. ST-AB (2015) and K. Takayama et al., in this conference