

MEASUREMENT OF WAKE-FIELD EFFECTS DUE TO ELECTRON CLOUD

Takao Ieiri¹, Hitoshi Fukuma, Yukiyoishi Ohnishi and Makoto Tobiya
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The effects of electron clouds produced by a positron beam limit the performance of KEKB. An effect of the transverse dipole wake-field due to the electron cloud including the impedance effects was tried to measure at the KEKB LER using a tune-shift method. A test bunch was placed behind a bunch-train of a positron beam. The tune shift as a function of the current of a test bunch was measured under a constant train-current, while changing the bucket position of the test bunch. The horizontal tune shift did not quite change as a function of the bucket position. Compared to that, the vertical tune shift indicated a strong defocusing field and changed to a focusing field when a test bunch greatly approached a train. The measurements also indicated an asymmetric contribution of the solenoids between the horizontal and vertical planes.

電子雲によるウエイク場効果の測定

1. はじめに

KEKB^[1] (非対称電子/陽電子衝突型加速器) は世界最高のルミノシティを生成しているものの、電子雲による陽電子ビームの垂直方向サイズ増大に悩まされている。電子雲の影響を抑えるために、ソレノイドを陽電子リング真空チャンバーのほぼ全周に巻いた結果、ビームサイズ増大に対するビーム電流の閾値は上がった^[2]。しかし、バンチ電流が高くその間隔が狭くなると、ビームサイズ増大現象が依然として現れる。ビームサイズ増大は、陽電子バンチと電子雲の相互作用で生じたウエイク場による Strong Head-Tail 不安定性によることが指摘されている^[3]。又、電子雲はその空間電荷力により陽電子バンチのベータatronチューンを増加させる。そのチューンシフトから電子雲密度を推定することができる^[4]。サイズ増大時に観測されたベータatron振動のサイドバンドを説明するために、ある共振型のウエイク場が提案されている^[5]。本稿はバンチ電流依存性チューンシフトから電子雲によるウエイク場を測定することを試みた。ただし、測定は、バンチ全体の平均的なウエイク場である。

2. チューンシフト

ベータatronチューンは、リング一周当たりのベータatron振動数として定義されている。しかし、実際の加速器におけるバンチは、非線形な磁場やバンチに働く各種の電磁場によってそのチューンが変化する。バンチ内の粒子数が増加すると、バンチ先頭部の電磁場とチャンバー構造体との相互作用により、バンチ後尾部がその跳ね返り電磁場の影響を受ける。いわゆるHead-Tailウエイク場によってバンチのチューンがバンチ電流とともに変る。通常、横

方向 Head-Tail ウエイク場は発散力となり、

$$\Delta v_q = -\frac{T_0 I_b}{4\pi E/e} \sum_i \beta_{qi} k_{qi}$$

で表され、負方向のチューンシフトを引き起こす。ここで、 T_0 回転周期、 I_b バンチ電流、 E ビームエネルギー、 β_q ベータ関数、 k_{qi} (V/Qm) i -番目のキックファクターである。シングルバンチでのチューンシフトから実効的インピーダンスを推定することができる。KEKBのように、1つ1つのバンチ強度が強く、しかも多数バンチから成るリングでは、前方バンチによるウエイク場が後方バンチ群に影響を及ぼすため、バンチ毎にウエイク場の効果が違ってくる。先頭部に位置する陽電子バンチにより生成された電子雲は、次々と生成され、後方に行くに従って蓄積される。今、一様な電子雲密度 ρ_e を陽電子バンチが通過する時、そのチューンシフトは

$$\Delta v_q = \frac{r_e}{2\gamma} \oint \rho_e \beta_q ds$$

となる。ここで、 r_e は古典電子半径、 γ ローレンツ因子。このチューンシフトは正方向で、電子雲密度に比例する。

3. 測定法

ベータatronチューンはスペクトラムアナライザを用いて測定された。周波数掃引時間は約2秒で、チューンの測定分解能は $\delta v = 1.0 \times 10^{-4}$ である。このモニター^[6]はある特定のバンチをゲートすることによりバンチ毎のチューンを測定することができる。モニターシステムを2セット用意し、異なるバンチのチューンを同時に測定した。これにより、軌道変動などで生じるチューン変動による測定エラーを小さくすることができる。

チューン測定は図1に示すようなバンチ構造で行

¹ E-mail: takao.ieiri@kek.jp

われた。始めに100個以上のバンチからなるバンチトレインを作った。このトレインに沿ってバンチ毎のチューンシフトを測定した。次に、トレインの後にテストバンチを入射した。トレイン電流は一定の基で、テストバンチを入射しながら、その電流依存性チューンシフト (CDTS) を測定した。実験条件は表1に示されている。バンチ結合型不安定性を抑制するために、各バンチに横方向フィードバックが働いている。しかし、チューン測定にフィードバックの影響を与えないために、測定バンチのチューンはフィードバックオフで計測された。



図1：バンチトレインとテストバンチの位置関係

表1：実験条件

Condition	M-1	M-2
Bunch Structure	4/200/4	1/1371/3.5
Bunch Current in a Train	0.5, 0.7 mA	1.0 mA
Solenoid Field	0 G	40 G
Synchrotron Tune ν_s	0.025	0.025
Chromaticity ξ_x/ξ_y	1.6/4.6	0.9/3.2

註：Bunch Structure の n/m/s はトレイン数/トレイン内のバンチ数/バケット単位のバンチ間隔を示す。

4. 測定結果

4.1 ソレノイド磁場なし

測定は表1のM-1の実験条件で行われた。陽電子ビームは、衝突なしの状態であった。バンチトレイン内の各バンチは8ns等間隔に置かれ、ほぼ等しいバンチ電流であった。図2(a)にトレイン内でのチューンシフトを示す。水平方向と垂直方向のチューンシフトはトレインに沿ってほぼ等しく増加する。チューンシフト $\Delta\nu=0.01$ は電子雲密度 $\rho_e \approx 1 \sim 2 \times 10^{12} m^{-3}$ に相当する。図2(b)はトレイン後のチューンシフトで、水平・垂直方向とも急激に減少し、D=3とD=60での値を比べると、約1/4から1/5に減衰していることがわかる。

テストバンチの電流依存性チューンシフト (CDTS) を図3 (水平) と図4 (垂直) に示す。トレインから最も離れたD=60ではチューンシフトはシングルバンチでのチューンシフトと両方向ともほぼ同じ値を示す。これは、トレインによるウエイク場の影響がないことを示唆している。テストバンチをトレインに近づけていくと、水平方向シフトはほとんど変わらないのに対し、垂直方向のそれは、負の方向にシフトしてから、D=10以内になると、急激に正方向に変化していることがわかる。D=10付近で

大きく異なる2つの値があるのは、テストバンチの電流によって、チューンシフトの勾配が大きく変わったためである。この急激な勾配の変化は、図2(b)で示されるように、電子雲密度が急激に増加する場所に対応していることがわかる。

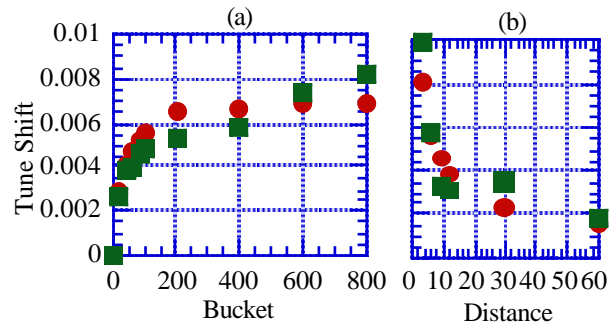


図2：(a)バンチトレインに沿ったチューンシフト、(b)テストバンチのチューンシフト、横軸はバケット単位の距離 Distance(D)。赤丸が水平、緑四角が垂直方向、バンチ電流はともに0.5mA。

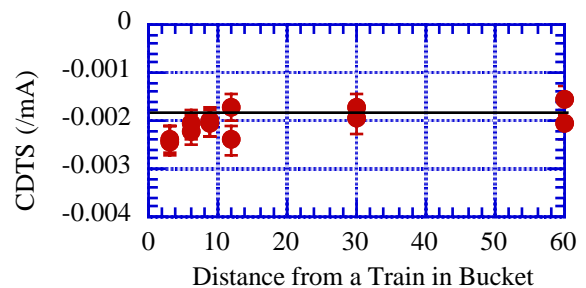


図3：テストバンチの電流依存性水平方向チューンシフト (CDTS)、黒の実線はシングルバンチでの測定値。

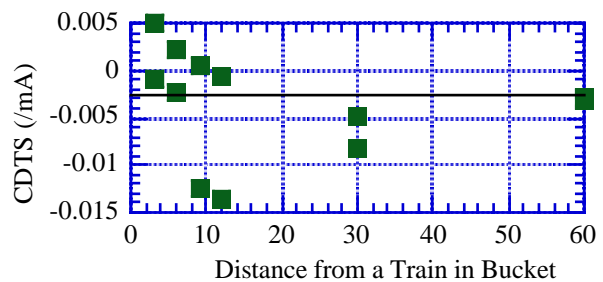


図4：テストバンチの電流依存性垂直方向チューンシフト (CDTS)、黒の実線はシングルバンチでの測定値。同じDistanceで2つの値があるのは、電流によってチューンシフトの勾配が異なるため。

4.2 ソレノイド磁場あり

同様な測定が表1 M-2に示すソレノイド磁場ありの実験条件で行われた。この条件は通常の運転とほぼ同じであるが、ビーム衝突なしである。図5(a)にトレインに沿ったチューンシフトを示す。図2(a)と

比べると、水平方向チューンシフト、すなわち電子雲密度は、ソレノイドによって完全に抑えられていることがわかる。これに対し、垂直方向のチューンシフトは依然として残っている。同じバンチ電流で比べても、およそ半分しか減少していない。図5(b)はテストバンチのチューンシフトで、図2(b)に示すソレノイド磁場なしに比べ、垂直方向のシフトの減衰が遅いことがわかる。これは、陽電子バンチのチューンがソレノイド磁場でチェンバー壁付近にトラップされた電子の影響を受けているものと思われる。図6に、テストバンチの垂直方向電流依存性チューンシフトを示す。ソレノイド磁場なし(図4)と比べると、電流依存性チューンシフト(CDTS)は、かなり抑えられているものの、ほとんど同じ特性を示している。

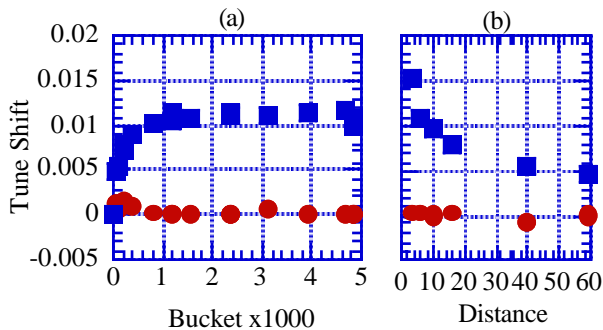


図5 : (a) バンチトレインに沿ったチューンシフト、バンチ電流 1.0mA (b) テストバンチのチューンシフト、バンチ電流 0.8mA。赤丸が水平、青四角が垂直方向。

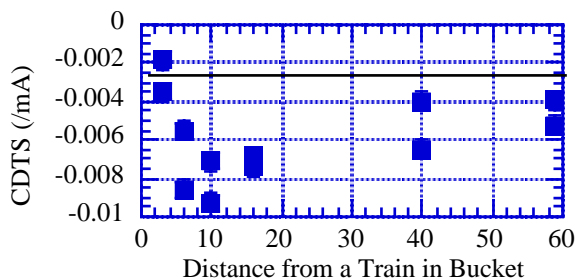


図6 : ソレノイド磁場ありで、テストバンチの電流依存性垂直方向チューンシフト。黒の実線は、シングルバンチでのチューンシフトの値。

5. 議論

図2(a)で示されるように、ソレノイド磁場がない場合、トレインに沿ったチューンシフトは水平・垂直方向でほぼ同じように、トレイン先頭部で急激に増加した後、飽和又はゆっくり増加する傾向を示した。図3から、水平方向のウエイク場は、トレインに極近傍を除いて、ほとんどないと言える。しかし、図4に示されるように、垂直方向ウエイク場は強く、特徴的な振舞いを示した。これは、少し離れた場所(〜20ns付近)で、垂直方向には強い発散的

なウエイク場、トレイン極近傍では強い収束力のウエイク場が発生していることを示唆している。ソレノイド磁場を与えると、ウエイク場がほとんどない水平方向電子雲効果をほぼ完全に抑ええることができた。しかし、ウエイク場の強い垂直方向の電子雲密度は半分程度しか抑えられなかった。

この水平・垂直方向非対称性の原因は何であるか。有力な候補はバンチのフラットな形状と考えられる。バンチの垂直方向電場は水平方向電場より1桁以上も強いと予想される。陽電子バンチ近傍にきた電子は垂直方向に強く加速される。40Gのソレノイド磁場は数100eVのエネルギーの電子を壁面にトラップさせることはできないであろう。非対称性を作るもう1つの候補は、ソレノイドを巻くことができない偏向磁石内にトラップされた電子雲であろう。偏向磁石内での電子の運動は垂直磁場で制約されている。

テストバンチのチューンスpekトルはベータatronチューンに対応して、図7(a)に示すように、共振カーブ特性を示した。ところが、トレイン電流がサイズ増大の閾値を越した状態で測定したところ、テストバンチのspekトルは、図7(b)に示すように、双峰特性を示した。この時、電流依存性チューンシフトは正方向性を示した。この異常spekトルは、陽電子バンチに電子雲が接近し、ビーム・ビーム効果のように直接的に相互作用した結果であると推定している。

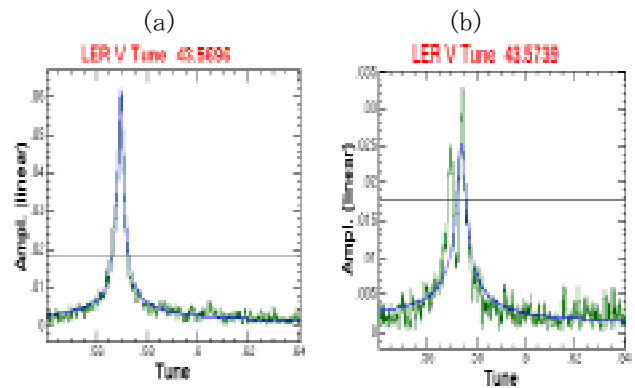


図7 : ソレノイド磁場なしでのテストバンチの垂直方向チューンスpekトル、共にD=3で観測した。左(a)がトレイン内バンチ電流0.5mA、右(b)が0.7mA、2つのピークのチューン差は約0.005。

参考文献

[1] K. Akai et al., Nucl. Instrum. Methods A499, 191 (2003).
 [2] H. Fukuma, Proc. of ECLLOUD04, Napa, California (2004).
<http://icfa-ecloud04.web.cern.ch/icfa-ecloud04/>.
 [3] K. Ohmi et al., Phys. Rev. Lett. 85, 3821 (2000).
 [4] T. Ieiri et al., Proc. of the 14th Symp. on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, 386 (2003).
 [5] J. Flanagan et al., Phys. Rev. Lett. 94, 054801 (2005).
 [6] M. Arinaga et al., Nucl. Instrum. Methods A 499, 100 (2003).