

A SIMULATION STUDY ON BEAMTRANSPORT INCLUDING EFFECTS OF WAKEFIELDS

Takuya Kamitani, Atsushi Enomoto, Satoshi Ohsawa, Yujiro Ogawa,
Hitoshi Kobayashi, Jae-Young Choi, Isamu Sato

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

A beam tracking simulation code which includes the effects of the transverse and longitudinal wake fields has been developed. Using this code, the transverse deflective motions of the bunch tail are studied in the case of the KEK B-factory injector linac. The preliminary simulation result is compared with the approximate analytic solution. They are in good agreement under the conditions where the solution is applicable. Further simulation result beyond the conditions is also shown.

ウエーク場の影響を考慮したビームトランスポートのシミュレーション

1. 始めに

KEK B-Factory 計画の蓄積リングへ入射するビームに要求される仕様を達成するために、現 2.5 GeV 電子/陽電子ライナックの改造を行っている[1]。改造の眼目の一つは、陽電子ビームの強度の飛躍的向上(20倍)である。これを実現するためには陽電子生成用金属標的にこれまでより高いエネルギー(3.7 GeV以上)の大強度電子ビーム(シングルバンチ、10 nC以上)を当てる設計となっている。電子をこのエネルギーまで加速するには約 270 m の加速長が必要になる。

このように大強度のビームを長い距離にわたって加速する際には、ビームが加速構造内に誘起するウエーク場によりビーム自身が受ける影響が問題になる。この影響には2種類ある。一つはビームの中の先行する粒子の作る縦ウエーク場のため後続の粒子が減速されることにより、ビームエネルギーの拡がりが大きくなる効果である。もう一つは先行する粒子が加速構造の対称軸からはずれたところを通過する場合に発生する横ウエーク場により後続の粒子が横向き(ビーム進行方向と垂直方向)に力を受けるものである。この結果、ビームの後ろの方が大きく外側へ変形されてバナナのような形状になり、ビームサイズひいてはエミッタンスの増大を起し、変形がひどい場合にはビームの一部がビームダクトと衝突して失われるようなことになる。(ビーム不安定性: Beam Breakup Instability [BBU] と称される)

現在、既存の 2.5 GeV ライナックを用いて、大強度(10 nC以上)の電子ビームを加速するマシンスタディーを進めている。しかし、加速電場が弱い(8 MV/m)ことと、ビーム位置を知るためのモニターの精度、台数が不十分であるためにビーム不安定性の影響が強く、ビ

ームロスが大きいのが現状である。改造後の加速電場は 20 MV/m となりモニター系も強化されるので、状況は改善されると考えられるが、いずれにしてもウエーク場の影響を定量的に把握して対策を検討しておくことが重要となることには変わりがない。

これらの影響(特にビーム不安定性)を定量的に評価するにはいくつかの方法がある。その一つは適当な仮定、近似の下にビームの横方向の運動に関する運動方程式を積分した解を解析的に求めるやり方である[2]。この解析解を用いたビーム不安定性についての検討は KEK の小川氏がすでに精力的に行っており、当ライナック改造の設計に目安を与えている[3]。しかし、この解析解を求めにあたっては、いくつかの仮定、近似が設けられておりその適用には限界がある。たとえばエネルギーの低いところでは近似が正しくないし、バンチ内の各部でエネルギーが異なることも考慮されていない。そのため、さらに詳細な検討を進めるには十分ではない。

そこで、別の方法としてビームの運動方程式を数値的に積分して運動の時間変化をステップごとに追いかける粒子追跡シミュレーションを行う計算機コードを製作することにした。ウエークの影響を計算するためのコードはいくつか存在するが[4]、それらの汎用のコードでは考慮されていない項目、現実の加速器に即した事柄を柔軟に取りこめるように自主開発を行うことにした。例えば、ステアリングコイルにより所々でビームにキックを与えてビーム発散を押さえたり、ビームモニターのところでのビームの状態について情報を取り出したりと、現実のライナックのレイアウトに即し、実際の運転での測定と比較できるような形のシミュレーションコードとなるよう開発を進めて行く。

この論文では、このコードの概要とこれを用いてバンチ末尾の運動の様子を計算した結果について報告する。

2. 計算機コード (SAZANAMI code) の概要

2.1 ビーム粒子の取り扱い

B-Factory 蓄積リングへの入射に用いられるビームは基本的には、加速周波数 2856 MHz についてシングルバンチ (長さ ~ 10 psec = 3 mm) であるので、コード内でもシングルバンチとして取り扱う。また、ウエーク場の形も粒子間距離が短い領域については、計算により詳しく求められているので計算精度も高くなる。

実際のバンチ内に存在する多数の粒子を少数のマクロパーティクルで代表させ、そのマクロパーティクルの運動を追跡する。バンチ内の横方向の粒子分布の広がり、進行方向の広がりには考えない。(=> エミッタンスについては考慮しないのと同様。次のバージョンのコードでは考慮する予定) バンチを縦方向については等間隔にスライスして、各スライスについてその中心位置に電荷が集中しているようなマクロパーティクルを想定する。それぞれのマクロパーティクルの電荷については、バンチの電荷分布はガウス分布であると仮定してそれに基づいて割り当てる。マクロパーティクルの個数については適宜設定できる。

追跡する各マクロパーティクルの状態を表す力学変数は、中心軸からのずれ量 $x_i(s)$ 、その微分 $dx_i/ds(s)$ 、それぞれのエネルギー $E_i(s)$ である。なお、バンチ内でのそれぞれの位置 z_i と電荷量 q_i は変化しないものとしている。(次のバージョンでは変数とする)

2.2 トランスポートコンポーネントの取り扱い

現在の第1バージョンのコードではトランスポート系のコンポーネントのうち、Qマグネット、ドリフトスペース、加速構造についてのみ取り扱えるようになっている。シミュレーションにおいて、ステップごとに各力学変数の値を計算するが、そのステップの区切りは、基本的にはこのコンポーネントが単位となる。ドリフトスペースやQマグネットに関しては、そこでの運動方程式を積分した式が簡単な形で求められるので、それを用いて入口での力学変数から出口での値がすぐに得られる。これに対して、加速構造については次節で述べるようにウエーク場による力の影響について細かく数値積分しなければならないので、コンポーネントの長さを数十分の1に分割して計算する。

2.3 加速構造の取り扱い

(1) 縦ウエーク場と加速電場

粒子が連続的に分布しているとき、先行粒子による縦ウエーク場は次のような表式で後続粒子に減速電場をもたらす。[5]

$$E^{(b)}(z) = -\int_z^\infty dz' \rho(z') W_0'(z-z')$$

ここで $\rho(z)$ は縦方向の電荷分布、 $W_0'(z)$ は縦ウエーク関数である。電荷分布はガウス分布とし、縦ウエーク関数には Wilson の式を用いると

$$\rho(u) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad W_0'(u) = A \exp\left\{-\left(\frac{u}{cB}\right)^n\right\}$$

ここで、 Q はバンチの全電荷量、 σ_z はバンチの長さ (1 σ 値) であり、ウエーク関数中のパラメータの値は $A = 2.26 \cdot 10^{14}$ [V/C/m], $B = 6.13 \cdot 10^{-12}$ [sec], $c = 3.00 \cdot 10^8$ [m/sec], $n = 0.605$ である。

計算機コード内ではマクロパーティクルとして取り扱うので

$$E^{(b)}_j = -\sum_{i=1}^{j-1} q_i(z_i) W_0'(z_i - z_j)$$

となる。

一方、加速電場の寄与は

$$E^{(a)}_j = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{RF}} z_j + \varphi_0\right)$$

となり、 j -番目のマクロパーティクルが受ける縦方向電場はこれら2つの和である。

(2) 横ウエーク場

粒子が連続的に分布しているとき、先行粒子による横ウエーク場は次のような表式で後続粒子に横方向電場をもたらす。

$$E_x^T(z) = -\int_z^\infty dz' \rho(z') W_1(z-z') x(z')$$

ここで $\rho(z)$ は縦方向の電荷分布、 $W_1(z)$ は横ウエーク関数である。横ウエーク関数には Wilson の式を用いると

$$W_1(u) = \frac{W_0}{z_0} u$$

$$W_0 = 3 \cdot 10^{15} \text{ [V/C/m}^2], \quad z_0 = 3.0 \text{ [mm]}$$

である。

計算機コード内ではマクロパーティクルとして取り扱うので、それらについての運動方程式を立てると

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left[\gamma_j(s) \frac{dx_j(s)}{ds} \right] + k_\beta^2 \gamma_j(s) x_j(s) \\ = -\sum_{i=1}^{j-1} \frac{q_i(z_i) r_0 W_1(z_i - z_j)}{\gamma_i L} x_i \end{aligned}$$

q_i, x_i, γ_i は各マクロパーティクルの電荷量、横方向位置、エネルギーであり、 r_0 は古典電子半径、 L は加速構造の周期長 (=35mm) である。なお、 k_β はベータatron振動を起こさせる収束力の強さであり、この項は連続的な収束力を仮定する場合のみ取り入れる。

3. 計算結果

この SAZANAMI コードを用いて、ビームの初期オフセットがあるとき、バンチの後端がどのような運動をするかについて求める。まず計算結果の妥当性をチェックするため、解析的な解と比較する。解析解の表式につ

いては、文献 [2], [3] を参照していただきたい。なお、ウエーク関数は解析解におけるものとコードとで同じ式を用いる。

初期ビーム条件等については、KEK B-factory 入射器の陽電子生成用電子ビームのスペックに従う。すなわち、初期エネルギー 530 MeV、バンチ全長 10 ps、総電荷量 10 nC、実効加速電場 16.7 MeV/m (加速に寄与しない領域の長さを考慮)、加速長 230 m とする。なお初期エネルギーが低くすると解析解の与える結果の精度が悪いので、ある程度ビームが加速され、ベータatron波長が一定 ($\lambda_p=38.4\text{m}$) となる点 (530 MeV 地点) を始点とした。ここでビームが中心軸から 1mm 離れたオフセットを持って軸と平行に入射するとした。このときのバンチ末尾の運動の様子を解析解を用いて求めたものが図2の実線である。もしウエーク場の影響がなければ、加速されていくことによりベータatron振動の振幅は小さくなってゆく (adiabatic damping) はずだが実際には振幅が大きくなってゆくのがある。

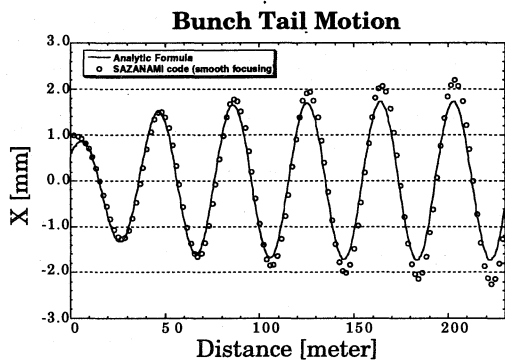


図1. バンチの末尾の運動: 解析解 (実線) と SAZANAMI コード (連続的収束) による結果 (白丸点)

一方、SAZANAMI コードを用いて同様の計算を行ったが、解析解を求める際の近似条件と一致させるためにあえて、各マクロパーティクル (全 20 個) の電荷量は均等とし、縦ウエーク場の効果はゼロとし、バンチ内の位置による加速位相の違いの効果もなし (全てのマクロパーティクルが同じ加速量を受ける) とした。また収束力は全領域にわたって連続的に働くとした。シミュレーションの結果が図1の白丸点であるが、解析解とほぼ一致する値を与えている。

さらに現実的な計算として、シミュレーションにおいて収束は連続的ではなく Q マグネットのみによるものとして、各コンポーネント (QM、加速構造、ドリフトスペース) を現実のレイアウトに従ってならべたものを入力とし、また各マクロパーティクルの電荷量はガウス分布から求めたものを用い、それぞれの加速位相の差、縦ウエーク場の影響でエネルギーが異なることを計算に入

れた結果が図2の黒丸点である。前の図と同様に実線が解析解 (前と同じ条件) である。なお、Qの強さについては、 $\lambda_p=38.4\text{m}$ となるように別途計算して決定した。

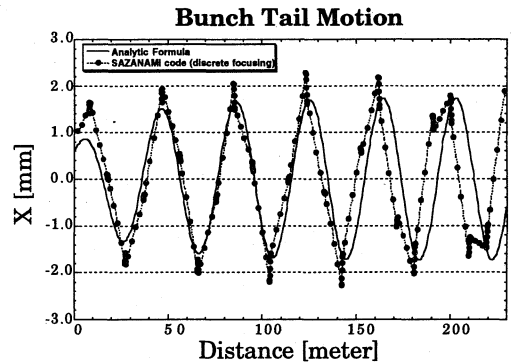


図2. バンチの末尾の運動: 解析解 (実線) と SAZANAMI コード (離散的収束+縦ウエーク効果) による結果 (黒丸点)

このより現実的なシミュレーションも解析解とだいたい一致している。しかし先の方へいくにつれてベータatron振動の位相がずれてゆく。これは縦ウエーク場の影響によりバンチの末尾は先頭に比べて低いエネルギー (この場合 4.3%) を持つので、ベータatron位相進み量が異なってくるためである。

4. 結論

ウエーク場の影響を考慮したビームトランスポートシミュレーションコード (SAZANAMI) の開発を行い、それを用いて、バンチ末尾の横方向の運動について計算した。まず解析解と比較するため、解の適用条件と同じ条件で計算したシミュレーション結果を求めたがこれらはよく一致しており、シミュレーションの計算が妥当であることを示している。さらに現実的な条件においても計算したが、ほぼ同様の妥当な結果を与えている。このシミュレーションコードは解析解を用いる計算よりも適用範囲が広く、必要に応じて改良を加えられる柔軟性があるので、今後コードを発展させて BNS ダンピングの効果、ステアリングコイルによるダンピングの可能性の検討、実際のビームスタディーの測定との比較等を進めてゆきたい。

5. 参考文献

- [1] A. Enomoto, KEK Preprint 93-23
- [2] K. Yokoya, DESY Report 86-084
- [3] Y. Ogawa, KEK Preprint 94-94
- [4] H. Henke, CLIC note 40, April 1987 (LINBUNCH)
K. Bane, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. Ns 32, No.5, p 2389 (LTRACK)
- [5] P. B. Wilson, SLAC-PUB-2884