

# ILC 衝突点でのビームサイズのビーム強度依存性シミュレーション INTENSITY DEPENDENCE SIMULATION OF ILC IP BEAM SIZE

奥木敏行<sup>#A,B)</sup>, ATF 国際コラボレーション

Toshiyuki Okugi<sup>#A,B)</sup>, ATF International Collaboration

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

## Abstract

Both of static and the dynamic intensity dependence exist for the ATF2 virtual interaction point (IP). It was found that the static and dynamic intensity dependences and correlate the Wakefield, and the corrections of the static and dynamic intensity dependences were worked well in ATF2 beamline. The static effect of the intensity dependence was corrected by optimizing the position of the on-mover Wakefield source. The dynamic effect of the intensity dependence was reduced by using the two-dimensional ( $y, y'$ ) feedback to be performed. The intensity dependence of the beam size at ILC IP was simulated by using the same correction methods to ATF2 beamline. In the simulation, two case of Wakefield distribution in the ILC beamline was performed. The static effect of the intensity dependence correction was evaluated by the IP beam size simulations of the ILC beam size tuning with/without the on-mover Wakefield position optimization. The dynamic effect of the intensity dependence will be reduced by using the two-dimensional ( $y, y'$ ) feedback to be performed at the upstream of the ILC final focus beamline. The effect of the two-dimensional ( $y, y'$ ) feedback was evaluated by the IP beam size simulation for the beam with IP angle jitter. It was found that both of static and dynamic intensity dependence can be corrected by using these correction methods in ILC beamline.

## 1. はじめに

KEK の Accelerator Test Facility (ATF) [1] では、International Linear Collider (ILC) [2] の衝突点でビームを絞るために必要な技術開発をおこなっている。ATF では ILC の衝突点でビームを絞る研究をおこなっており、ILC の最終収束ビームラインでのビーム収束に関する研究のための ATF2 ビームライン[3] がある。ATF2 の焦点では、2016 年にビームサイズを設計ビームサイズである 37 nm に近い 41 nm までビームを絞ることができた[4]。しかし、ビーム強度依存性が強く、ビーム電荷は  $N = 1 \times 10^9$  と ILC の設計電荷の 1/20 であった。ATF2 におけるビーム強度依存性の主たる原因は Wakefield による影響であると考えられている[5]。

そこで、ILC における Wakefield によるビーム強度依存性の影響を考えることにする。Wakefield が引き起

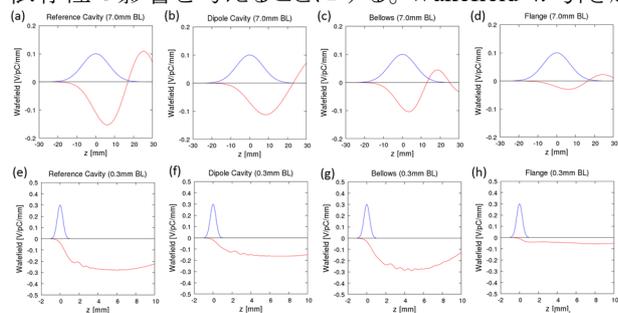


Figure 1: Wakefield calculation by GdfidL code for reference cavity (a), (e), dipole cavity (b), (f), bellows (c), (g), and flange gap (d), (h). (a)-(d) are calculation for 7 mm bunch length, and (e)-(h) are for 0.3 mm bunch length.

こすビーム強度依存性には、静的・動的の二種類のビーム強度依存性が考えられる。静的ビーム強度依存性は、Wakefield 源の設置位置誤差により引き起こされるもので、ビーム軌道を Wakefield 源の中心に近づけることで減少させることができる。動的ビーム強度依存性は、ビームジッターにより引き起こされるものなので、ビームジッターを低減させない限り、軌道調整等では減少させることは出来ないものである。

## 2. ILC と ATF2 のビーム強度依存性

### 2.1 バンチ長による Wakefield の影響

ATF2 でのビームのバンチ長は  $\sigma_z = 7$  mm と ILC の  $\sigma_z = 0.3$  mm に比べて長い。バンチ長の違いによる Wakefield を GdfidL コード[6]で計算した結果を図 1 に示す。バンチ長が短い方が Wakefield の振幅は大きくなるが、 $\sigma_z = 7$  mm の時はビームが通過するまでの間に Wakefield が最大振幅に達するのに対して、 $\sigma_z = 0.3$  mm の時は、最大振幅に到達する前にビームが通過してしまうのがわかる。これらバンチ長の違いによる Wakefield の影響を調べるために、ATF2 ビームライン上に Wakefield 源を置いて、二種類のバンチ長のビームを通した時の焦点でのビームサイズのビーム強度依存性を SAD[7] によるトラッキングシミュレーションで調べた。図 2 にシミュレーションにおいて Wakefield 源を置いた位置を示した。また、シミュレーション結果を図 3 に示した。シミュレーションでは複数個の Wakefield 源を図 2 の MREF3FF の位置に置き、縦方向に 1 mm のオフ

<sup>#</sup> toshiya.okugi@kek.jp

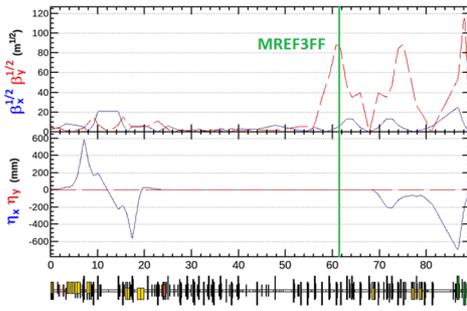


Figure 2: Beam optics of ATF2 beamline. Wakefield sources were put at MREF3FF in the tracking simulation.

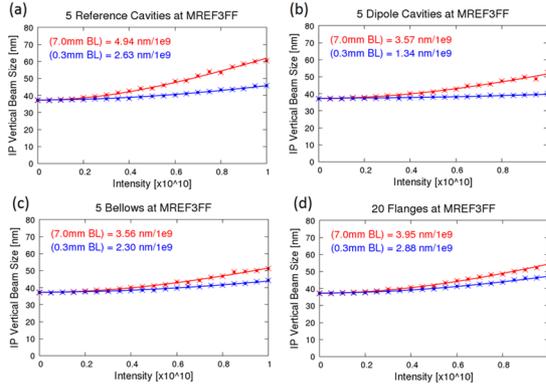


Figure 3: Simulation result for the intensity dependence of the IP beam size. In the simulation, the Wakefield sources were put to MREF3FF in Figure 2 with 1 mm of the vertical position offset.

セットを付けた。シミュレーションの結果、Wakefield 源により多少の違いはあるが、ILC のバンチ長である  $\sigma_z = 0.3$  mm の時の方が、ATF2 のバンチ長である  $\sigma_z = 7.0$  mm に比べて、Wakefield によるビーム強度依存性は 0.4~0.7 倍低くなることがわかった。

## 2.2 数値的なスケリングによる評価

ビーム強度依存性の焦点におけるビームサイズへの影響の大きさは、静的・動的それぞれに対して

$$(static) \quad \frac{\Delta\sigma_y}{\sigma_{y0}} = \frac{qW}{E} \sqrt{\frac{\sum\beta_y}{\epsilon_y}} \quad (1)$$

$$(dynamic) \quad \frac{\Delta\sigma_y}{\sigma_{y0}} = \frac{qW \sum\beta_y}{E} \quad (2)$$

と表すことが出来る[5]。ここで、 $W$  は Wakefield の強さで、バンチ長の効果を考慮すると、ILC では ATF2 より 0.4~0.7 倍低くなる。また、 $\sum\beta_y$  は Wakefield 源が存在する位置での  $\beta$  関数の和であり、ILC でも ATF2 と同じ位置に、同じ数だけ Wakefield 源が存在すると考えると、 $\sum\beta_y$  は重心系エネルギー 250 GeV の ILC の方が ATF2 よりも約 6.4 倍大きくなる(本稿では、以後全ての ILC のパラメータは重心系エネルギー 250 GeV のものを想定して計算、シミュレーションされている)。これらの情報に、100 倍のビームのエネルギーの違い、約 0.01 倍のエミッタンスの違いを考慮に入れると、

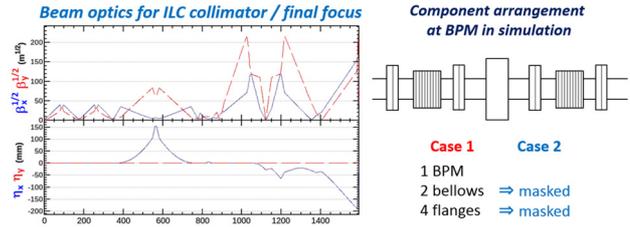


Figure 4: Beam optics of the collimator and final focus sections for ILC at  $E_{CM} = 250$  GeV (left). 107 beam position monitors (BPMs) are located in these section. The right figure shows the vacuum chamber arrangement around each BPM.

ATF2 におけるビーム強度依存性は、静的・動的双方で ILC よりも約一桁強いことになる。しかし、この評価は ATF2 と ILC で同数の Wakefield 源が、同じ位置に置かれているという仮定の下で単純にスケールした結果なので、実際には ILC で想定されているビーム位置モニター等を入れたシミュレーションで評価するのが適当である。

## 3. ILC でのビーム強度シミュレーション

### 3.1 Wakefield 分布のモデリング

ILC で主リニアックを通過した後のビームラインで  $\beta$  関数が多い区間は、コリメータ部、および、最終収束部になる。ILC のコリメータ部、および、最終収束部のビーム光学系を図 4 に示す。現在の ILC の設計では、これらの区間に合計 107 個の空洞型ビーム位置モニターを配置する設計になっている。それらの空洞型ビーム位置モニターの前後にはベローズが配置され、接続部にはフランジがある。ILC の Wakefield シミュレーションのモデルとしては、これらの構造体から生じる Wakefield の影響を考えることにする。また、シミュレーションでは、接続部のベローズ、および、フランジは RF コンタクトを全く入れない場合(ケース1)と、RF コンタクトを入れて Wakefield の影響を完全に無くした場合(ケース2)の二つの場合を検討した(実際は、これらの間になると思われる)。

Table 1: List of the Magnet Errors for the Beam Tuning Simulation

	Bending	Quadrupole	Sextupole
Alignment (x,y)	N. A.	100 $\mu$ m	100 $\mu$ m
Magnet - BPM (x,y)	100 $\mu$ m	10 $\mu$ m	10 $\mu$ m
Strength	0.01 %	0.01 %	0.01 %
$B_2/B_1$ at $r = 1$ cm	N. A.	0.01 %	N. A.
Rotation	100 $\mu$ rad	100 $\mu$ rad	100 $\mu$ rad

### 3.2 静的ビーム強度依存性の補整

ビーム調整シミュレーションの中に Wakefield の影響を入れ込むことで、静的ビーム強度依存性の影響を評価した。ビーム調整シミュレーションでは、表 1 に示すような電磁石の誤差を仮定した。また、電磁石とビーム位置モニターの相対位置誤差は、初期アライメントは  $100 \mu\text{m}$  を仮定しているが、四極電磁石、六極電磁石に関しては、Beam based alignment をおこなうことを想定して  $10 \mu\text{m}$  まで抑えることが出来るとしている。また、四極電磁石には多重極誤差として六極電磁石成分の誤差も入れている。また、ビームラインには、3.1 節で定義した Wakefield 源を挿入して、これら Wakefield 源の設置位置誤差は  $300 \mu\text{m}$  としている。

ILC のビームサイズ調整は、Beam based alignment による軌道調整をおこなった後に、線形ノブ、非線形ノブを繰り返すことで、焦点ビームサイズ(ルミノシティ)の最適化をおこなう[8]。ケース1、ケース2の Wakefield に対して、同様の手順による焦点のビームサイズ調整のシミュレーションをおこなった。ビームの強度は ILC の設計値である  $N = 2 \times 10^{10}$  を想定しており、静的ビーム強度依存性の影響に関しては、ビームライン上に置かれた補整用 Wakefield 源の位置を調整することで (Wakefield ノブ) おこなった。ATF2 ではバンチ長が  $\sigma_z = 7 \text{ mm}$  と長いため、各構造物から発生する Wakefield は、capacitive なものと, resistive なものの中間である場合が多く(図 1)、構造物の形状によってキックの時間構造が違っていた。そのため、ATF2 では、capacitive よりの構造物と resistive よりの構造物の二種類の Wakefield 源をビームラインに挿入することで静的ビーム強度依存性を補正した[9]。一方、ILC ではバンチ長が  $\sigma_z = 0.3 \text{ mm}$  と短いため、殆どの構造物の Wakefield は capacitive になる(図 1)。そこで、シミュレーションでは、ビームライン上の構造物からの Wakefield を代表する形で、空洞型ビーム位置モニターをムーバーに置き、この位置を調整することで静的ビーム強度依存性による影響を補正した。

ビーム調整シミュレーションの結果を図 5, 6 に示す。シミュレーションは各条件で 100 のランダム誤差が入ったビームラインに対しておこなった。図 5 は各ノブ調整でビームサイズがどのように変化していくかの様子を示しており、図 6 に最終的なビームサイズの結果を示してある。また、図 5, 6 には、それぞれのケースに対して、Wakefield ノブ有り無しの結果を両方示してある。また、シミュレーションの結果を表 2 にまとめる。

シミュレーションでは、ILC のビームラインに静的ビーム強度依存性の影響を考慮に入れて、Wakefield に対する補正をおこなわないと、焦点でのビームサイズは、設計ビーム強度である  $N = 2 \times 10^{10}$  に対して、ケース1の場合は 39%、ケース2の場合は 2.4% 増加するという結果が出た。そして、静的ビーム強度依存性の影響を Wakefield ノブにより補正することで、焦点でのビームサイズ増大は、ケース1の場合で 4.8%、ケース2の場合には 0.3% にまで減少することがわかった。

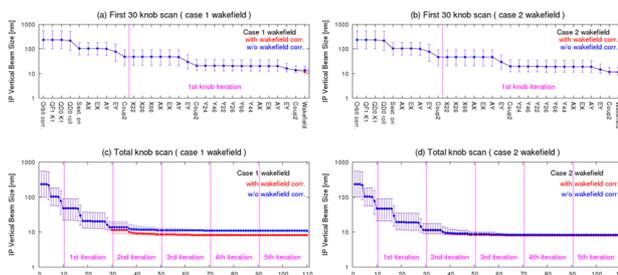


Figure 5: IP beam size trend of the ILC beam tuning simulation results. The simulations both for Case 1 and 2 Wakefield conditions were done with/without Wakefield correction knob. Each point shows the average of 100 random seeds.

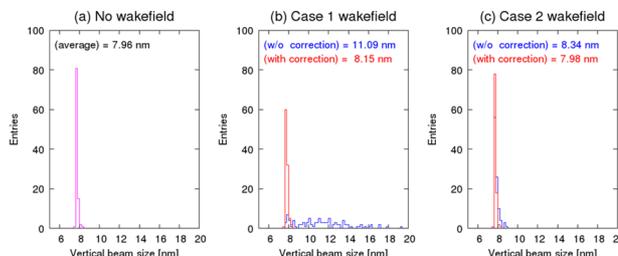


Figure 6: Final IP beam size distribution of the ILC beam tuning simulation results for 100 random seeds. The simulations were done both for Case 1 and 2 Wakefield condition, and with/without Wakefield correction knob.

Table 2: Summary of the ILC Beam Tuning Simulation with the Static Wakefield Effect

	w/o correction	with correction
No Wakefield	7.96 nm	
Case 1 Wakefield	11.09 nm (39 %)	8.15 nm (2.4 %)
Case 2 Wakefield	8.34 nm (4.8 %)	7.98 nm (0.3 %)

### 3.3 動的ビーム強度依存性の補整

ILC では、上流のビームラインに置かれる  $(y, y')$  二次元フィードバックで、入射ビームの位置、および、角度ジッターを補正することが出来る。動的ビーム強度依存性の影響は焦点の角度ジッターの大きさで決まるので、 $(y, y')$  二次元フィードバックは、動的ビーム強度依存性の影響を低減するために有用であると考えられている。そして、その効果は ATF2 において実証された[9]。ATF2 では、焦点でのビーム位置、角度はビームサイズの 10% 以下まで低減されている(実際には、それ以上低減していると思われるが、ビーム位置モニターの精度の問題で、それ以上は確認できていない)。そこで、フィードバックなしの場合としてビームに 30% の角度ジッターを持たせた場合と、フィードバックをかけた場合としてビームに 10% の角度ジッターを持たせた場合の 2 種類の条件でのシミュレーションをおこなうことで、動的ビーム強度依存性の影響を評価した。

シミュレーションでは、3.1 節で定義した 2 つのケースの Wakefield が存在するビームラインに対して、SAD によるトラッキングシミュレーションで Wakefield の影響を

調べた。二種類の Wakefield 条件のビームラインに対して、 $(y, y')$  二次元フィードバックをかけた場合と、かけていない場合のビーム強度依存性に対するシミュレーション結果を図 7 に示す。また、ILC の設定ビーム電荷  $N = 2 \times 10^{10}$  での衝突点でのビームサイズを表 3 にまとめた。フィードバックにより衝突点の角度ジッターを押さえることで動的ビーム強度依存性の影響を低減することができ、焦点でのビームサイズ増大は、ケース1の場合で 0.35 %、ケース2の場合には 0.04 % にまで減少することがわかった。

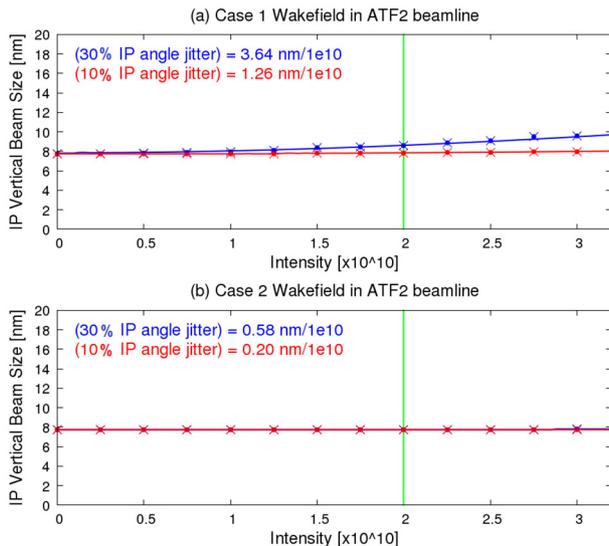


Figure 7: Results of dynamic intensity dependence simulation with/without FONT two-dimensional  $(y, y')$  feedback.

Table 3: Summary of the ILC Beam Tuning Simulation with the IP Angle Jitter

	w/o correction (IP angle jitter: 30%)	with correction (IP angle jitter: 10%)
No Wakefield	7.65 nm	
Case 1 Wakefield	8.45 nm (10.3 %)	7.69 nm (0.35 %)
Case 2 Wakefield	7.78 nm (1.52 %)	7.66 nm (0.04 %)

#### 4. まとめ

ILC では、静的ビーム強度依存性に対しては、ムーバに乗せた Wakefield の位置を最適化する Wakefield ノブを使って、動的ビーム強度依存性に対しては、最終収束系の上流に配置する  $(y, y')$  二次元フィードバックを使い、影響を抑制することを考えている。この ILC での Wakefield に由来するビーム強度依存性の影響と、その抑制効果をシミュレーションにより評価した。ビームライン上の全ての BPM には空洞型ビーム位置モニターの Wakefield を与え、その前後にベローズ、および、フランジのギャップ効果を入れた場合、入れない場合の2つのケースについての評価がおこなわれた。静的・動的双方の Wakefield に対して、ベローズ、およ

び、フランジのギャップ効果は顕著で、真空チェンバーを考える際に、これらの RF コンタクトの重要性が再確認された。また、ILC において、静的ビーム強度依存性に対しては Wakefield ノブが、動的ビーム強度依存性に関しては  $(y, y')$  二次元フィードバックが非常に有用であることがわかった。

#### 謝辞

本稿執筆にあたり、運転、解析にかかわった ATF2 グループの方々や、アドバイスを頂いた方々に感謝します。

#### 参考文献

- [1] ATF Collaboration, Phys. Rev. Lett., **88**, 194801 (2002).
- [2] “ILC Technical Design Report”;  
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [3] “ATF2 Proposal”, KEK Report 2005-2 (2005).
- [4] T. Okugi, Proceedings of LINC2016 (2016) MO3A02.
- [5] K. Kubo, “ILC new luminosity design and small beam experiments at ATF”, presentation at ALCW2018 (2018).
- [6] Simulated by A. Lyapin with GdfidL code (running on a cluster at RHUL), wake potentials of ATF2 are summarized in below URL;  
<http://atf.kek.jp/twiki/bin/view/ATF/Atf2Wakes>
- [7] SAD is a computer program for accelerator design;  
<http://acc-physics.kek.jp/SAD/>.
- [8] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **17**, 023501 (2014).
- [9] 奥木敏行, “ATF2 仮想衝突点でのビームサイズのビーム強度依存性” 第 16 回日本加速器学会年会 (2019) FRPI023.