

## ATF2 焦点における FONT パルス内フィードバックを使ったジッター低減 BEAM JITTER REDUCTION WITH FONT INTRA-TRAIN FEEDBACK AT ATF2

奥木敏行<sup>#, A) B)</sup>, Talitha Bromwich<sup>D)</sup>, Philip Burrows<sup>D)</sup>, Glenn Christian<sup>D)</sup>, 加納勇也<sup>C)</sup>,  
駒宮幸男<sup>C)</sup>, Neven Blaskovic Kraljevic<sup>D)</sup>, Colin Perry<sup>D)</sup>, 照沼信浩<sup>A) B)</sup>  
Toshiyuki Okugi<sup>#, A) B)</sup>, Talitha Bromwich<sup>D)</sup>, Philip Burrows<sup>D)</sup>, Glenn Christian<sup>D)</sup>, Yuya Kano<sup>C)</sup>,  
Sachio Komamiya<sup>C)</sup>, Neven Blaskovic Kraljevic<sup>D)</sup>, Colin Perry<sup>D)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>A) B)</sup>

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

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

<sup>C)</sup> University of Tokyo

<sup>D)</sup> Oxford University

### Abstract

KEK-ATF (KEK Accelerator Test Facility) is a test accelerator to be investigated the accelerator technologies for International Linear Collider (ILC), and the ATF2 beamline is a prototype beamline of the ILC final focus system. The multi-bunch beam with 1312 bunches (554 ns bunch separation) will be operated within a single pulse in ILC, and the beam positions within the pulse will be corrected by using an intra-train feedback system. ATF2 beamline can operate the 2 bunch beam (180 ns bunch separation), and the intra-train feedback system (feedback on a nanosecond time scale; FONT) has been developed by Oxford University with the beam in ATF2 beamline. The ATF2 beam was focus at ATF2 focus point less than 50 nm, and the position and angle stabilities at the focus point were 20-30% of the beam size and the beam divergence at present. In this presentation, we will report the 2<sup>nd</sup> bunch beam size for 2 bunch operation, and the effect of FONT intra-train feedback to the 2<sup>nd</sup> bunch beam size measurement.

### 1. はじめに

KEK にある加速器試験施設 ATF[1] では、国際リニアコライダー計画 (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。ILC の模式図を図 1 に、ATF の模式図を図 2 に示す。

ILC で高いリミノシティを実現するためには、衝突点でビームを出来る限り小さく絞らなければならない。そのため、ILC ではダンピングリングと呼ばれるストレージリングに電子を蓄積して、放射減衰を使用してエミッタンスを小さくしている。そして、主リニアックで加速されたのち、最終収束ビームラインで各種収差を抑えながら衝突点でのビームを小さく絞るように考えられている。

ATF には ILC と同様にダンピングリングがあり、ILC で要求されるエミッタンスと同等のエミッタンスを実現している[3,4]。更に、ATF には ILC の最終収束光学系の研究のための ATF2 ビームライン[5]があり、ATF2 ビームラインでは、仮想衝突点でビームを絞るために必要な技術研究が進められている。

### 2. ATF2 ビームライン

#### 2.1 ATF2 ビームラインの概要

リニアコライダーの最終収束光学系を試験する施設としては、1990 年代に SLAC の Final Focus Test Beam (FFTB) という施設<sup>1</sup>があった。FFTB では Global Chromaticity Correction という収差補正方法の最終収束光学系でビーム収束試験をおこない、電子ビームを 70 nm 程度まで絞り込むことに成功した[6]。一方、現在



Figure 1: ILC layout.

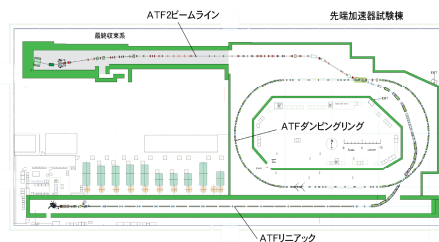


Figure 2: ATF layout.

の ILC のデザインでは、当時とは違う Local Chromaticity Correction の原理に基づいた最終収束光学系の使用を考えている[7]。Local Chromaticity Correction 方式の最終収束光学系は、大きな色収差を発生させる電磁石の近くに、色収差を補正するための六極電磁石を配置することで、局所的に色収差を補正する。これにより現在の ILC の最終収束系の設計は、FFTB で試験された方式の最終収束光学系に比べ、全長が約 1/3 と短く、エネルギーアクセプタンスが広くとれ、かつ、最終収束電磁石から衝突点までの距離を長くできるという特徴がある。Local Chromaticity Correction 方式の最終収束光学系は、

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

このように多くの利点があるが、ビーム調整が複雑なことや、何よりも実験的に原理証明がされていないという問題もあった。

そこで、2004年11月のLCWS2004においてATFでLocal Chromaticity Correction方式の最終収束光学系の試験が可能だという提案がなされた。ATFが作り出す低エミッタンスビームを使うことで、ILCよりも2桁以上低いビームエネルギーのATFでもILCの最終収束光学系の原理証明が可能であると考えたのである(表1)。このATFのビームを使った最終収束光学系の試験計画をATF2プロジェクト、ATFに新設された最終収束光学ビームラインをATF2ビームラインと呼ぶ[5]。

ATF2ビームラインはILCの最終収束光学系の原理証明を目的としているので、Local Chromaticity Correction方式のビーム光学系で、電磁石の配置や名前もILCの最終収束光学系と同じである(図3)。更に、色収差の強さもILCと同程度になるように設計されている。ただし、ILCのビームエネルギー250 GeVに対して、ATF2は1.3 GeVと低いので、絞れるビームサイズは、ILC衝突点の5.9 nmに対して、ATF2では37 nmである。

ATF2プロジェクトは、アジア、ヨーロッパ、アメリカの3地域が同程度の貢献をすることを目指して、設計、製造および建設が分担された。そして、ILC最終収束系の技術開発に興味を持つ世界中の研究者が参加できる枠組みを整備した。世界各国の研究機関との協力のもと、ATF2ビームラインは建設され、2009年に運転を開始した。ビーム運転に関しても、ビームラインの建設と同様、世界各国の研究者が参加している。

Table 1: IP Parameters of ILC, FFTB and ATF2

	ILC-500GeV	FFTB	ATF2
<b>Chromaticity Correction</b>	Local Correction	Global Correction	Local Correction
<b>Beam Energy</b>	250 GeV	46.6 GeV	1.3 GeV
$L^*$	4.1 m	0.4 m	1.0 m
$\beta_y^*$	0.48 mm	0.10 mm	0.10 mm
$\epsilon_y$	0.07 pm	20 pm	12 pm
$\sigma_y^*$	5.9 nm	45 nm	37 nm

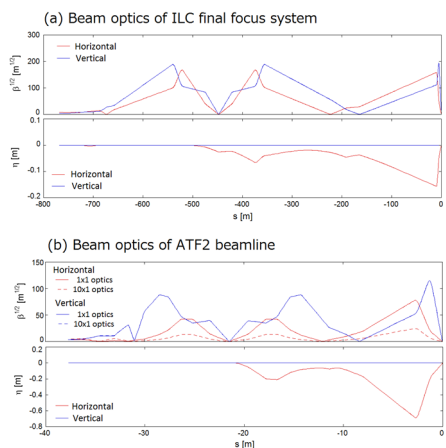


Figure 3: Beam optics of ILC and ATF2. They are based on “Local Chromaticity Correction Scheme”.

## 2.2 ビームサイズモニター (IP-BSM)

ATF2でビームを小さく絞ることができても、それを測定できるビームサイズモニターがないと、実際にビームを絞れた証明はできない。そのため、ATF2ではビームサイズモニター自体も非常に重要である。ATFでは、FFTBで使われていたビームサイズモニターIP-BSM(通称、新竹モニター)[8]を、ATF2での使用に最適になるように設計しなおしたものを使用している[9]。

IP-BSMは、レーザー干渉縞を利用したビームサイズモニターで、1台のレーザーから出射されたレーザー光を2つに分け、仮想衝突点で交差させることで、仮想衝突点にレーザー光の干渉縞を作ることができる。この干渉縞に電子ビームが通過するとき、電子ビームとレーザーとのコンプトン散乱により $\gamma$ 線が生成される。電子ビームのビームサイズが干渉縞に比べて小さいときには、干渉縞の位置に応じて生成される $\gamma$ 線の発生量が変化する(以下、モジュレーションが生じると記す)。一方、干渉縞よりも大きい電子ビームに対してはモジュレーションは生じない。このように、干渉縞の位置を変えたときのモジュレーションの大きさから、ビームサイズを評価することができる。モジュレーションとビームサイズの関係は、

$$\sigma_y = \frac{1}{k_y} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{C |\cos \theta|}{M} \right)}, \quad k_y = \frac{\pi}{d} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 $d$ はレーザー干渉縞のピッチ、 $\theta$ はレーザーの交差角となる。

ATF2では、レーザーの波長をFFTBで使われていた1064 nmから532 nmに変更することで、小さなビームサイズでの感度を高くなるようにしている。ATF2のIP-BSMは、レーザー光の交差角を最大にしたとき(174度)、25-90 nmの範囲のビームサイズの測定が出来る。また、2-8度、30度とさらに2つの小交差角モードを用意することで25 nmから6  $\mu$ mまでの広い測定範囲を実現している(図4)。

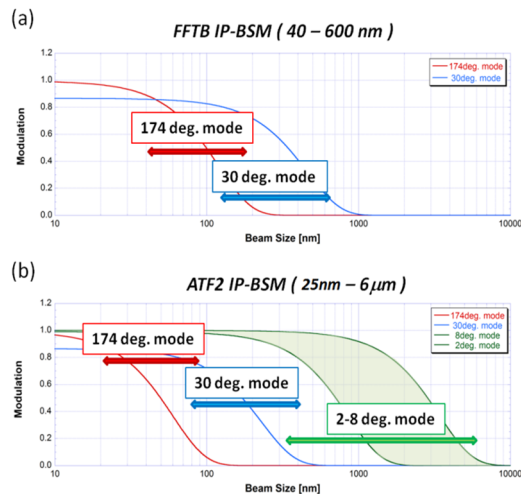


Figure 4: Dynamic range of IP-BSM for FFTB and ATF2.

### 2.3 FONT feedback

ATF2 ビームラインでは、ビームサイズを絞るだけでなく、ILC に必要な様々な技術研究をおこなっている。これらの研究の一つとして、Oxford 大学の研究グループが中心におこなっている同一パルス内でビームの位置を補正する FONT (feedback on a nanosecond time scale) と呼ばれる高速フィードバック技術の研究がある[10]。

ILC では 1 つのパルス内に 1312 個のバンチ(554ns 間隔)が加速され衝突点に送られる。そこで、パルス内の最前方のバンチの位置を測定して、後方のバンチの位置を整えることで、パルス内のビームを正確に衝突させることが出来るようになる。ILC では衝突点でのビーム密度が非常に高く、衝突点でのビーム同士の反跳効果が大きいので、ビーム同士の中心位置がずれると、衝突点後に非常に大きな角度変化が生じる。この角度変化から生じる衝突点後のビーム位置の変化を補正するように、1 つのパルス内でビームの中心位置を整えることで、同一パルス内でのビーム位置を整えることが可能になると考えている(図 5)。そのためには、バンチ間隔以内の応答速度でビームの位置を整える高速なフィードバックシステムが必要になる。

ATF でも、ILC ほど長くはないが、2 つのバンチ(180 ns 間隔)を同時に取り出すことができる。ILC では電子陽電子 2 つのビームの中心位置を合わせているのに対して、ATF2 ではビームが 1 つしかないので、1 番目のバンチの位置情報を基に、2 バンチ目のビーム位置を基準位置に合わせることになる。ただし、ATF2 のバンチ間隔は ILC のものよりも小さいので応答速度の要求が ILC よりも厳しいことや、ILC では衝突点での位置を整えるだけであるのに対して、ATF2 では、2 つのビーム位置モニターの位置情報と 2 つの高速キッカーを使うことで衝突点での位置と角度を同時に合わせることができるといふ利点もある(図 6)。

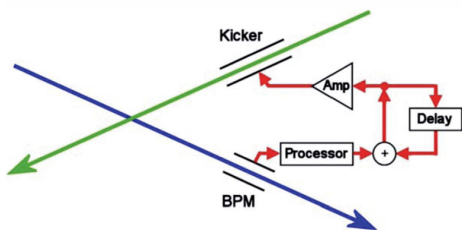


Figure 5: Schematic figure of ILC FONT system.

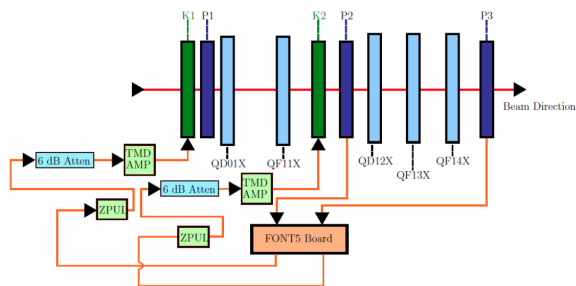


Figure 6: Schematic figure of ATF2 FONT system.

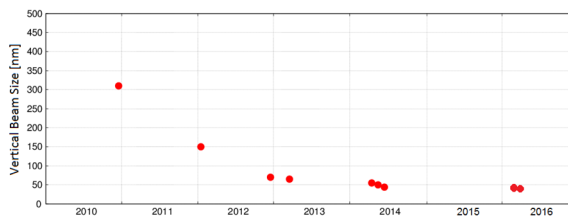


Figure 7: History of the vertical beam size at ATF2.

### 2.4 ATF2 でのビーム調整の現状

ATF2 ビームラインのすべての四極電磁石および六極電磁石は、電磁石ムーバーの上に設置されている。仮想衝突点でのビームサイズ測定は、電磁石ムーバーで六極電磁石の位置を変えることで、線形光学系の調整をおこない、2 次の非線形光学系の調整は、六極電磁石、スキュー六極電磁石の強さを変えることでおこなっている[11]。

図7にATF2の仮想衝突点で測定された最小ビームサイズの履歴を示す。ATF2では現在 50 nm以下までビームサイズを絞れている[12]。ただし、現在のところIP-BSMの系統誤差を完全には把握できていないため、現在公表しているビームサイズは IP-BSM の系統誤差が全くないとの仮定のもと、式(1)で  $C = 1$  としてビームサイズを算出しているため、実際のビームサイズよりも大きい値で評価している可能性がある。

## 3. 2 バンチでのビームサイズ測定

### 3.1 2 バンチ目のビームサイズ測定システム

現在、ATF2の仮想衝突点では電子ビームの位置ジッター、角度ジッターがビームサイズや角度分散の 20-30%程度であることが上流のビーム位置モニターなどの解析からは見積もられている。衝突点でのビームサイズを正しく評価するためには、これが衝突点でのビームサイズ影響を与えていないかを判断する必要がある。そこで、ビームジッターの効果がビームサイズ測定に影響を及ぼしているかを判断するために、FONT feedback により仮想衝突点での位置および角度を安定化させた 2 バンチ目のビームサイズを測定するための IP-BSM の準備を 2014 年から開始した。

IP-BSM の  $\gamma$  線測定器には大きな信号量を取るため CsI(Tl) シンチレーターを使用していた。しかし、CsI(Tl) の時間応答は ATF2 のバンチ間隔よりも遅いので、まずは時間応答が早いアクリルチェレンコフ検出器の信号量が大きく取れるように検出器の最適化をおこなった。アクリルの長さの最適化図 8(a) に示す[13]。アクリルの長さを伸ばすと生成されるチェレンコフ光子数が増えるので信号量が増えるが 30 cm あたりでチェレンコフ光子数の増加と伝搬時の光の減衰とが釣り合い信号量が伸びなくなる。そこで、アクリルの長さは 30 cm に固定した。

長さが最適化されたアクリルチェレンコフカウンターと、以前から使われていた CsI(Tl)シンチレーターで測定した信号のふらつきを比較したものを図 8(b)に示した。図 8(b)から 2 つの測定器の分解能に大差がないことが分かる。これらの基礎実験により、信号の応答速度の速いア

クリルチェレンコフ検出器が、ビームサイズの測定に使用することができることがわかった。

次に、レーザーおよび測定系のタイミングシステムの構築をした。現在 IP-BSM に使用しているレーザーのパルス幅は約 8ns (HWHM) であるため、180 ns 離れた 2 つのバンチと同時に衝突させることはできない。そこで、レーザー発振のタイミングを変えることで 1 番目のバンチ、2 番目のバンチと、各バンチを選択的に衝突させることにする。また、測定器のゲートトリガーに関しても、レーザー発振と同期するように測定するバンチ毎に変えるようにした。図 9 にレーザーおよび測定器のタイミングを(a) 1 バンチ目、(b) 2 バンチ目に合わせた時のタイミング信号を示す。青の信号はビーム位置モニターからのピックアップで 2 つのバンチが存在していることが分かると思う。また、ピンクはレーザーの信号を光学定盤上に置かれた photodiode で検出した信号、黄色が測定器のゲート信号となっている。1 バンチ目に衝突させるときは図 9(a) のようにレーザーの発振のタイミングをセットし、2 バンチ目と衝突させる際には図 9(b) のようにセットする。このようにタイミングを調節することで、各バンチのビームの情報を選択的に測定することができる。

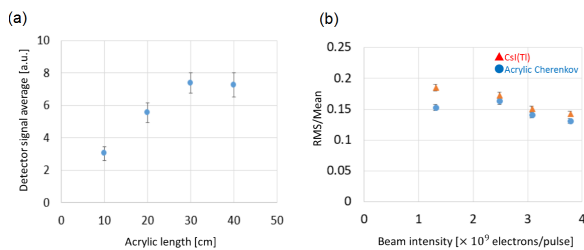


Figure 8: Optimization of acrylic Cherenkov detector. (a) Optimization of acrylic length. Error bars show the standard deviation of 100 pulse. (b) Comparison of signal fluctuations of CsI(Tl) scintillator and acrylic Cherenkov detector.

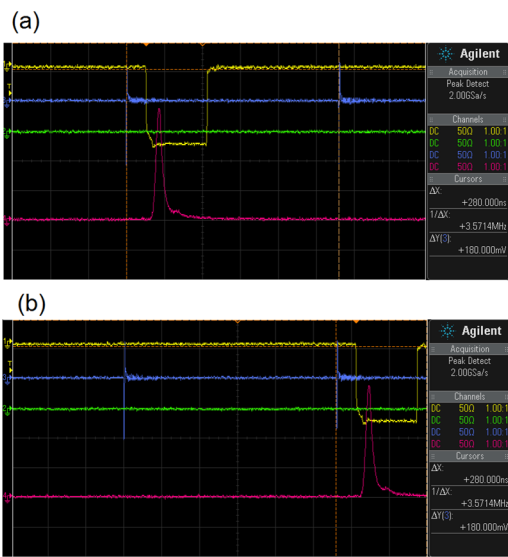


Figure 9: IP-BSM laser timing signals. (a) The laser timing was set to 1<sup>st</sup> bunch, (b) the laser timing was set to 2<sup>nd</sup> bunch.

### 3.2 2バンチ運転時のビーム調整

ATF における 2 バンチ運転は、ダンピングリング内に 2 つのビームを溜めた後、取り出しキッカーでリングに溜まった 2 つのビームを同時に取り出すことでおこなわれる。この際、取り出しキッカーの平坦性の問題により、取り出しキッカーのどのタイミングにビームを合わせるかで、取り出されるビームの軌道が変わってしまう。また、1 バンチ目と 2 バンチ目のビームでは、取り出しキッカーに乗るタイミングが違うので、違ったビーム軌道を通ることになる (ILC ではターンアラウンドと呼ばれる区間でビーム軌道を揃える設計になっている[2])。

一方、ATF2で主に使われている空洞型ビーム位置モニターは高分解能が得られる[14]反面、信号の減衰時間が長いので、1 バンチ目の信号と 2 バンチ目の信号を完全に分離することはできない。そのため、数少ない stripline BPM の信号を頼りにビームの位置を調整しなければならない (ATF2 ビームライン内には 1 個のみ)。そこで、2 バンチ運転でのビーム調整は諦め、単バンチ運転においてビーム調整をおこなったのち、2 バンチ運転に切り替えるという手順を追うことにした。また、単バンチ運転時と 2 バンチ運転の 2 バンチ目の軌道ができるだけ変わらないように、最初に単バンチ運転で調整をおこなう時のキッカーのタイミングは、2 バンチ運転時の 2 バンチ目のタイミングと同じにした。

### 3.3 2バンチ運転でのビームサイズ測定

FONT フィードバックシステムは、2 バンチ目のビームの軌道を 1 バンチ目のビームの軌道から基準軌道へ変えるように働く。更に、現在の ATF のビームは 1 バンチ目と 2 バンチ目の軌道はキッカーの蹴り角が違うため同じではない。その結果、フィードバックが ON/OFF で、ビーム軌道が変わってしまうという問題が残っている。そのため、測定は ON/OFF の状態を交互に測定するのではなく、FONT ON の状態で ATF2 ビームラインの軌道を整えて FONT ON のデータを収集して、その後 FONT OFF の状態で軌道を整えて FONT OFF のデータを纏めて取得した。この軌道調整は、空芯ステアリングコイルを使った軌道ドリフトフィードバックにより自動でおこなうようにした。

2016 年 3 月に取得した FONT フィードバック ON の状態と OFF の状態の ATF2 の仮想衝突点でのビームサイズの測定結果を図 10 に示す。バンチ電荷を変えながら FONT ON/OFF それぞれのビームサイズを測定した。全てのバンチ電荷に対して FONT フィードバックを使い、ジッターを補正した時の方がモジュレーションが大きく (ビームサイズが小さく) なったことがわかったと思う。

### 3.4 FONT FB による軌道安定化

前節のビームサイズ測定時の FONT システムのビーム位置モニターの情報から、仮想衝突点でのビームの位置と角度を外挿した結果を図 11 に示す。高電荷領域では、FONT システムにより、ビームの位置、および、角度の安定化が進んでいることが分かる。一方、低電荷領域では、焦点点でのビーム位置は FONT ON/OFF で大きな違いはなく、角度についても若干の安定化が見られるだけであるということがわかる。低電荷領域で FONT フィー

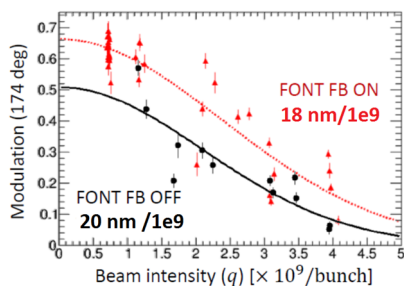


Figure 10: 2<sup>nd</sup> bunch IP beam size for FONT ON/OFF as a function of bunch charge. Error bars in the figure show the fitting errors for each modulation measurement.

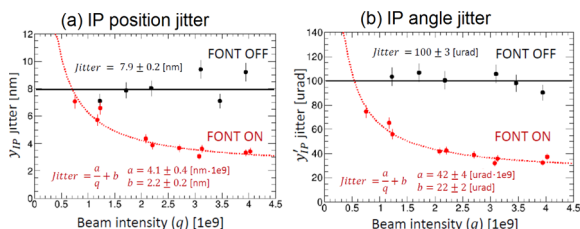


Figure 11: 2<sup>nd</sup> bunch IP beam position and angle jitters for FONT ON/OFF as a function of bunch charge.

ドバックによる位置や角度の安定性が悪くなるのは、FONT システム内のビーム位置モニターの分解能が電荷に依存して悪くなるからであると考えられる。また、FONT OFF での焦点のビーム位置のジッターは 8 nm 程度であり、このジッターは ATF2 仮想焦点での 40-50 nm のビームサイズに大きな変化を与えるものではないこともわかる。

#### 4. 実験結果の考察

ATF2 仮想焦点におけるビームサイズは、低電荷領域においても FONT ON/OFF で大きな差を示した。一方、軌道測定の結果は、低電荷領域では FONT ON/OFF の影響は仮想焦点でのビーム位置には大きな差異を示さず、FONT OFF でのビーム位置ジッターもビームサイズに影響を及ぼすほど大きくはなかった。

ただし、角度ジッターに関しては低電荷領域でも若干の差異が見られた。図 3 の ATF2 のビーム光学系からも分かるように、ATF2 の他の大部分のビームラインは非常にベータ関数が大きく、ATF2 の仮想衝突点からは位相が  $\pi/2$  または  $3\pi/2$  離れている。つまり、ATF2 仮想衝突点でビーム角度ジッターがあるということは、上流の殆どのビームラインでの軌道がジッターしていることを意味する。

ビームライン上には沢山の空洞型ビーム位置モニターをはじめとする wakefield 源があるため、ここでは wakefield を通して、仮想衝突点でのビームサイズが、どの程度変わり得るかを tracking simulation[15] で考えてみた。ビーム電荷毎の wakafield の効果を入れた場合の仮想衝突点のビームサイズを図 12 に示す。

図中には仮想衝突点の角度ジッターが 75 urad と 100 urad の 2 種類の結果を示したが、これらはバンチ電荷が

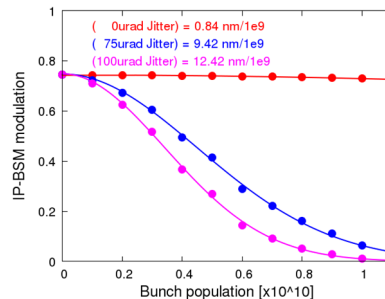


Figure 12: Tracking simulation results of IP beam size with IP angle jitter via wakefield in ATF2 beamline.

$0.7 \times 10^9$  の時の FONT ON/OFF それぞれの状態での角度ジッターに相当する。このように、低電荷領域でのビームサイズの違いは、wakefield や、今回は示さなかった電磁石の多重極誤差などでは明確に説明できていない。

#### 5. まとめ

ATF2 の仮想衝突点では、ビームサイズ、角度広がりに対して 20-30%程度程度のジッターがある。2 バンチ運転における FONT feedback で 2 バンチ目のビームジッターを抑制することで、このジッターが仮想衝突点でのビームサイズに影響を及ぼしているかを調べた。その結果、FONT feedback で 2 バンチ目のジッターを低減させると、低電荷領域でも仮想衝突点でのビームサイズが小さくなった。ただし、何故小さくなったかの明確な理由は説明できていない。

#### 謝辞

今回の結果を発表するにあたり、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の意を表します。

#### 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] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **2**, 022801 (1999).
- [4] K. Kubo *et al.*, Phys. Rev. Lett., **88**, 194801 (2002).
- [5] “ATF2 Proposal”, KEK Report 2005-2 (2005).
- [6] V. Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., **74**, 2479 (1995).
- [7] P. Raimondi and A. Seryi, Phys. Rev. Lett. **86**, 3779 (2001).
- [8] T. Shintake, Nucl. Instru. Meth., **A311**, 455 (1992).
- [9] T. Suehara *et al.*, Nucl. Instrum. Meth., **A616**, 1 (2010).
- [10] N. B. Kraljevic *et al.*, Proc. of IPAC16, THPOR035 (2016).
- [11] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **17**, 023501 (2014).
- [12] S. Kuroda, Proc. of ICHEP14, Valencia (2014).
- [13] 加納勇也, 東京大学修士学位論文 (2016).
- [14] Y. Inoue *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **11**, 062801 (2008).
- [15] SAD code; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>