

ATF2 仮想衝突点でのビームサイズのビーム強度依存性 INTENSITY DEPENDENCE OF ATF2 VIRTUAL IP BEAM SIZE

奥木敏行^{#, A, B)}, ATF 国際コラボレーション

Toshiyuki Okugi^{# A, B)}, ATF International Collaboration

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

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 design beam size at the ATF2 virtual interaction point (IP) is 37 nm, and the beam was focused at the ATF2 virtual IP to be less than 41 nm. However, the bunch population at the tuning was $N = 1 \times 10^9$, which was smaller than that for the ILC design, for the strong beam intensity dependence. The intensity dependence was considered to have both for static and dynamic components, the intensity dependence was considered to be generated by Wakefield in beamline. Therefore, a lot of Wakefield sources were removed for the ATF2 beamline at November 2016, and the relation between Wakefield and the intensity dependence was investigated. It was found the Wakefield and the static and dynamic intensity dependences had strong correlation. The corrections of static and dynamic intensity dependences were also performed in ATF2 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。図 1 に ATF の模式図を示す。ILC で高いレ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る必要がある。ILC では電子・陽電子をダンピングリングという円形加速器で、放射減衰によりエミッタンスを小さくする。その後、ビームは主リニアックで加速されたのち、衝突点で小さく絞られる。

ILC と同様に、ATF にもダンピングリングがあり、ATF ダンピングリングでは 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 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の研究のための ATF2 ビームライン[5]がある。

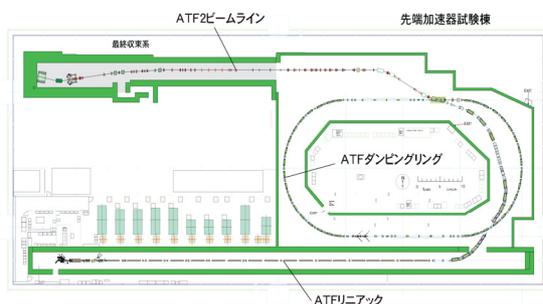


Figure 1: ATF layout.

ATF2 の焦点において、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[6]。しかし、ビーム強度依存性が大きかったため、この時のビーム電荷は $N = 1 \times 10^9$ 程度と 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て、ATF2 における Wakefield の影響は、ILC よりも約一桁大きいと考えられている[7]。つまり、ATF2 におけるビーム強度依存性の主要因が Wakefield であることが同定できれば、現在の ATF2 でのビーム電荷でのビームサイズ収束は、ILC の設計ビーム電荷と同程度のビーム強度依存性の下での測定であるということが出来る。

2. ATF2 ビームラインの WAKEFIELD 低減

ATF2 ビームラインにおけるビーム強度依存性に対する Wakefield の影響を調べるために、2016 年 11 月に ATF2 ビームラインの真空チェンバーを改良して、ビームラインから大幅に Wakefield 源を除き、その前後のビーム強度依存性を比較することで、ビーム強度依存性と Wakefield の関係を調べることにした。

Wakefield が引き起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。これらの影響をビームラインの改良前後で調べてみた。

[#] toshiya.okugi@kek.jp

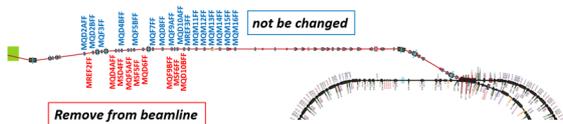


Figure 2: Cavity BPM arrangement in ATF2 beamline. Red BPM names were removed from beamline at the beginning of November 2016 operation. Blue BPM names were kept in the beamline.

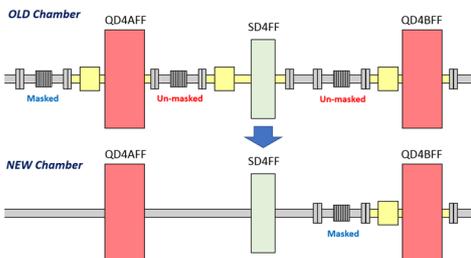


Figure 3: Cavity BPM arrangement around QD4AFF-QD4BFF. The vertical beta functions around this region is larger in the ATF2 beamline.

Table 1: List of the Wakefield Sources in ATF2 Beamline before/after November 2016

	Cavity BPM	Un-masked Bellows	Flange Gap
Before November 2016	23	11	87
After November 2016	15	5	69
Difference	8	6	18

ATF2 ビームラインにおける大きな Wakefield 源として空洞型ビーム位置モニターが挙げられる。図 2 に改良時にビームラインから取り外された空洞型ビーム位置モニターの配置図を示した。また、改良時には、空洞型ビーム位置モニターを取り外しただけでなく、長めの直管を使うことで、真空チャンバーのギャップやペローズによる Wakefield を最小限に抑える工夫をした。例として、図 3 には、改良前後での六極電磁石 SD4FF 前後の真空チャンバーの配置図を示した。改良前は SD4FF には空洞型ビーム位置モニターが固定されていたため、SD4FF 前後のペローズは可動域を確保するため、内部に RF コンタクトを入れていなかったが、改良後はペローズ内部に RF コンタクトを入れることで Wakefield を抑えている。これらの改良前後での ATF2 ビームラインにある Wakefield 源の数を表 1 にまとめた。

2.1 Wakefield 源と低減と静的ビーム強度依存性

図 4 に ATF2 ビームラインにおける Wakefield の測定の模式図を示す。また、Wakefield の影響をシミュレーションで調べるにあたり、ATF2 ビームラインにおける主要な Wakefield 源は、空洞型ビーム位置モニターのリファレンス空洞、センサー空洞、RF コンタクトの無いペローズ、フランジギャップだと考えられている。これらの Wakefield

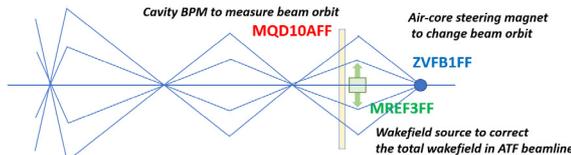


Figure 4: Schematic figure of Wakefield measurement system at ATF2 beamline. The entire Wakefield of ATF2 beamline was evaluated by normalizing with that for MREF3FF.

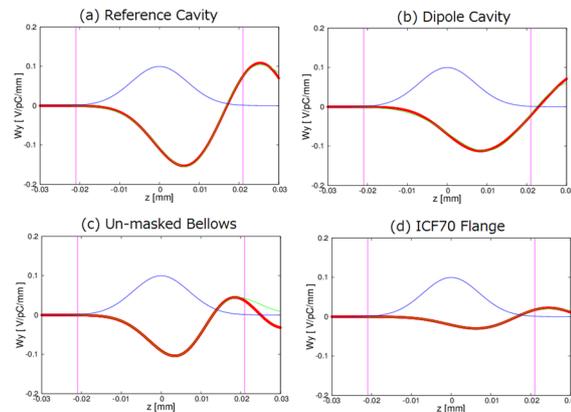


Figure 5: Wakefields of ATF2 vacuum components, calculated by GdfidL code.

を GdfidL コード[8]で計算しシミュレーションに用いた。計算された Wakefield 結果を図 5 に示した。

ATF2 ビームライン全体の Wakefield の大きさは、ムーバーに乗っている Wakefield 源 MREF3FF の Wakefield と比較する形で評価した。測定にあたって、ビーム強度依存性の影響を大きくするために、ビーム強度を通常の運転よりも高めの $N = 7 \times 10^9$ に設定した。次に、ステアリング電磁石 ZVFB1FF によりビーム軌道 (FD phase) を変化させた。そして、それぞれのビーム軌道に対して、焦点でのビームサイズが最小になるように MREF3FF の位置を動かした。ビームラインの改良を加えた前後の 2016 年 10 月と 11 月の運転でのビーム軌道に対応する最適な MREF3FF の位置を、シミュレーション、および、測定で調べた。その結果を図 6 に示す。図 6 から、真空チャンバー改良後には、シミュレーション、測定の両方で

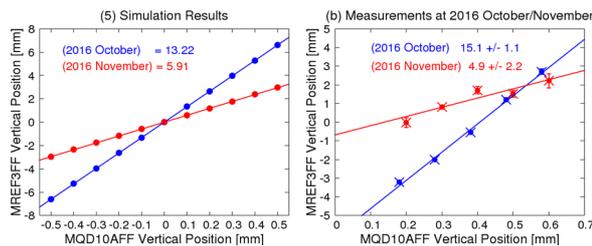


Figure 6: Wakefield simulation (a) and measurement (b) of ATF entire beamline, normalized by MREF3FF.

焦点のビームサイズを最小にするための MREF3FF の移動量の最適値が小さくなっていることが分かる。静的ビーム電流依存性の強さは MREF3FF の垂直方向の移動量に比例して強くなるので、真空チェンバー改良後には、Wakefield の強さが小さくなったのに伴い、静的ビーム電流依存性も想定通り減少した。

2.2 Wakefield 源と低減と動的ビーム強度依存性

動的ビーム強度依存性は、Wakefield 源でのビームジッターの振幅に依存する。特に、ATF2 ビームラインでは、殆どの Wakefield 源は、焦点から位相進度が $(n + 1/2)\pi$ 離れて置かれているので、焦点での角度ジッターに比例して動的ビーム強度依存性は強くなる。

ATF2 焦点では、IP-BSM を使ってビームサイズ測定をおこなっている[9, 10]。このモニターは、複数パルスのビームの射影を測定するタイプのもので、シミュレーションでは、射影されたビーム分布と IP-BSM レーザーの干渉縞を重ね合わせることで測定されるモジュレーションを再現できる。シミュレーションは SAD[11] によるマクロ粒子のトラッキングで、焦点に 30% の角度ジッターを持たせた 1000 のランダムジッターのプロファイルを重ね合わせることで、ATF2 焦点でのビームサイズ測定を再現した。表 1 に示した 2016 年 10 月と 11 月の Wakefield 源を ATF2 ビームラインに配置したときの Wakefield の $N = 1 \times 10^{10}$ のビームへの影響を図 7 に、ビーム強度依存性を図 8, 表 1 にまとめた。

一方、測定では、ビームラインに改良を加えた前後の 2016 年 10 月と 11 月の運転で、焦点での β 関数を変えながら、それぞれの設定における角度ジッターと、ビーム強度依存性を同時に測定することで、角度ジッターとビーム強度依存性の関係を調べた。測定の際には、静的ビーム強度依存性の影響を最小限に抑えるために、2016 年 10 月と 11 月の運転でのビーム軌道は、できるだけ静的ビーム強度依存性が小さくなるように留意して調整した。測定された結果を図 9 に示す。図 8, 9 から、ビームラインの改良を加えた前後で、ビームサイズ依存性の強さがシミュレーション、測定双方で弱まっていることがわかる。このように、ビームラインから Wakefield 源を除くことで動的ビーム強度依存性を小さくすることができた。

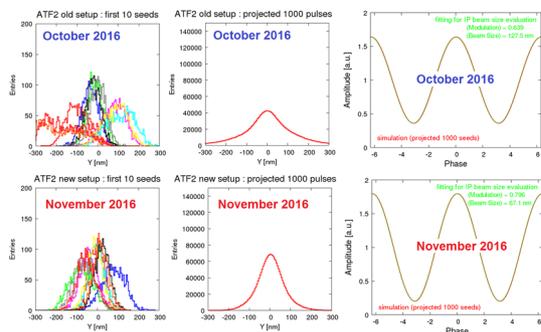


Figure 7: ATF2 Wakefield simulation at $N = 1 \times 10^{10}$ with 30% of IP angle jitter for October/November 2016 Wakefield conditions.

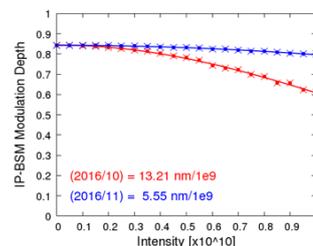


Figure 8: ATF2 dynamic intensity dependence simulation with 30% of IP angle jitter for October/November 2016 Wakefield conditions. Intensity dependences were evaluated by P-BSM 30-degree mode.

Table 2: Evaluation of the Normalized Dynamic Intensity Dependence from the Simulation

	October 2016	November 2016
Intensity dep.	13.21 nm/10 ⁹	5.55 nm/10 ⁹
IP angle jitter	104 μ rad	
Normalized	0.127nm/10 ⁹ μ rad	0.053nm/10 ⁹ μ rad

一方で、絶対値としては測定結果がシミュレーションの約 2 倍大きかった。これは、実際のビームラインにはシミュレーションに入っていない Wakefield 源が存在していることを示唆している。

3. ATF2 でのビーム強度依存性の補整

3.1 静的ビーム強度依存性の補整

静的ビーム強度依存性を補正するためには、各々の Wakefield 源の中心にビーム軌道を調整する必要がある。しかし、実際には各々の Wakefield 源には設置位置誤差があり、ステアリング電磁石の数も有限なので、完全に各々の Wakefield 源の中心にビーム軌道を調整することは出来ない。そこで、全ビームラインの Wakefield を代表する形で、ビームライン上にムーバーに乗った Wakefield 源を用意して、このムーバーの乗った Wakefield 源の位置を調整することで、ビームライン全体の Wakefield による影響を補正することを考える。図 5 に示したように Wakefield の時間応答は Wakefield 源によって違うので、二種類の時間応答の異なる Wakefield 源を独立なムーバー乗せて、この二種類の Wakefield 源の位置を最適化することで、ビームライン上の全ての Wakefield の影響を補正することにした。

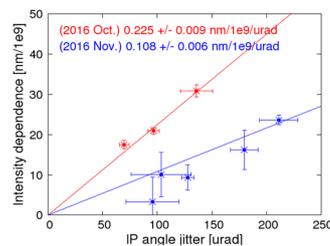


Figure 9: ATF2 dynamic intensity dependence measurement at October/November 2016.

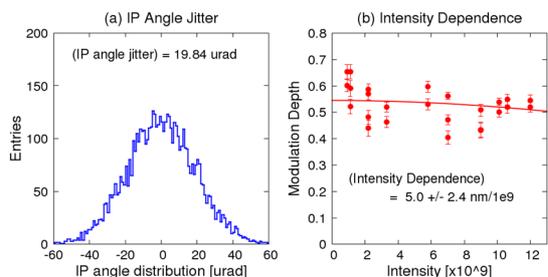


Figure 10: Results of the IP angle jitter (a) and the intensity dependence (b) after the position optimization of two on-mover Wakefield sources at October 2018.

2018年10月の設定では、キャパシティブな Wakefield 源であるセンサー空洞と、レジシティブな Wakefield 源であるベローズを補正のための Wakefield 源としてムーバーに乗せた。また、動的ビーム強度依存性の効果を抑えるために、焦点での β 関数を大きく設定し、角度ジッターを低減させた状態で測定はおこなわれた。図 10(a)は、焦点での角度ジッターの測定を示す。測定結果から測定時の動的ビーム強度依存性の影響は $\Delta\sigma_y/N = 2 \text{ nm}/10^9$ 程度と非常に小さい条件下であったと見積られる。よって、測定は静的ビーム強度依存性が主要となる条件で測定がおこなわれたことが分かる。ビーム電荷を変えながらビームサイズを測定した結果を図 10(b)に示す。二種類の Wakefield 源の位置を最適化することで、ビーム強度依存性を $\Delta\sigma_y/N = 5 \text{ nm}/10^9$ まで低減することができた。

3.2 動的ビーム強度依存性の補整

動的ビーム強度依存性を低減するためには、焦点での角度ジッターを低減させなければならない。ATF では Oxford 大学のグループが中心となって、焦点での位置、および、角度のジッターを抑えるためのフィードバックの研究を進めている (feedback on a nanosecond time scale; FONT[12])。フィードバックは、ダンピングリングから取り出された200~300 ns離れた2つのビームのうち、最初のビームの位置を測定して、その位置を基準位置に修正するように、キッカーで2番目のビームの位置を補正する方法となっている。また、90 度位相が離れた位置に置かれている2組のキッカー、および、ビーム位置モニターを使ってフィードバックをおこなうことで、ビームの位置と角度が同時に補正できる。

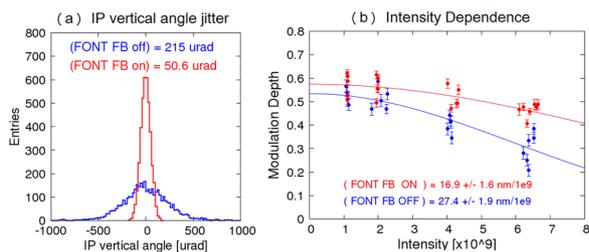


Figure 11: Result of the IP angle jitter(a) and the intensity dependence(b) with/without FONT two-dimensional (y,y') feedback at June 2018.

2018年6月に、同一ビーム条件下で、フィードバックがある時と、無い時の双方でビーム強度依存性の測定をおこなった。この際の焦点の角度ジッターと、ビーム強度依存性の測定結果を図 11, および, 表 3 に示す。測定ではフィードバックの効果を際立たせるため、焦点での β 関数を小さく設定し、角度ジッターを増大させた。

Table 3: Summary of the IP Angle Jitter and the Intensity Dependence with/without Two-dimensional (y,y') Feedback

	Angle jitter	Intensity dependence
1 bunch.	220 μrad	25.1 $\text{nm}/10^9$
2 bunch w/o FONT	215 μrad	27.4 $\text{nm}/10^9$
2 bunch with FONT	50.6 μrad	16.9 $\text{nm}/10^9$

4. まとめ

ATF2 ビームラインでは、ビーム強度依存性が強いいため、通常 $N = 1 \times 10^9$ 程度の低いバンチ電荷でビームサイズ調整をおこなっている。このビーム強度依存性は Wakefield から来ていると考えられている。そこで、ビーム強度依存性と Wakefield の関係を調べるため、2016年11月に真空チェンバーを改良して Wakefield 源を減らし、その前後でビーム強度依存性を測定した。チェンバー改良後は、静的・動的双方のビーム強度依存性が減少した。また、ビーム強度依存性を補正するための研究もおこなった。2018年10月には、ビームライン上にムーバーに乗せた Wakefield 源を用意して、Wakefield 源の位置を最適化することで、静的ビーム強度依存性を補正した。また、2018年6月には、フィードバックにより焦点の角度ジッターを低減することで、動的ビーム強度依存性が減少することも確認した。これらのビーム強度依存性の低減方法は ILC でも適用可能だと考えられる。

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] 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] T. Okugi, Proceedings of LINC2016 (2016) MO3A02.
- [7] K. Kubo, "ILC new luminosity design and small beam experiments at ATF", presentation at ALCW2018 (2018).
- [8] Simulated by A. Lyapin with GdfidL code (running on a cluster at RHUL), wake potentials of ATF2 are summarized in <http://atf.kek.jp/twiki/bin/view/ATF/Atf2Wakes>.
- [9] T. Shintake, Nucl. Instrum. Meth., A311, 455 (1992).
- [10] T. Suehara *et al.*, Nucl. Instrum. Meth., A616 (2010) 1.
- [11] SAD is a computer program for accelerator design; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [12] D. Bett *et al.*, Proceedings of IPAC19 (2019) WEPGW092.