

KEK-ATF における極小ビームのビーム強度依存性とウェイク場の影響評価 INTENSITY DEPENDENCE OF NANO METER SMALL BEAMS AT KEK-ATF AND EVALUATION OF WAKE FIELD EFFECTS

阿部優樹^{*A)}、奥木敏行^{A,B)}、久保浄^{A,B)}、照沼信浩^{A,B)}

Yuki Abe^{**A)}, Toshiyuki Okugi^{A,B)}, Kiyoshi Kubo^{A,B)}, Nobuhiro Terunuma^{A,B)}

^{A)}SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies, ^{B)}KEK

Abstract

KEK Accelerator Test Facility (ATF) is an R&D facility for the final focus system to develop the nanometer beam technology required for the International Linear Collider. We have confirmed 41 nm vertical beam size at the focal point of the KEK-ATF final focus test beamline, while the original designed goal is 37 nm. However, strong intensity dependence of the beam size exists due to wakefield. In order to produce the small beam stably, clear understanding of wakefield effects is necessary. In past studies, simulation results were compared with experiments and showed that the influence of some vacuum components and BPMs were significant. However, these results did not well agree quantitatively. Further investigations of the wakefield effect to the beam are being performed with more realistic simulations of the wakefield calculation including some wakefield sources, which were not considered in the past studies. This report presents the current status of the research.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の先端加速器試験施設 (ATF) ではダンピングリングにて生成された高品質な低エミッタンスビーム [1, 2] を用いて、国際リニアコライダー (ILC) [3] において必要とされるナノメートル極小ビーム (以降、極小ビームと呼ぶ) を実現するためのビーム制御、計測技術の研究開発と最終収束技術の検証が行われている [4, 5]。ダンピングリングから出射された低エミッタンスビームは取り出しビームライン、最終収束ビームライン (Fig. 1) を経て極小ビームとなる。2016 年には目標鉛直ビームサイズ 37 nm (ILC 設計ビームサイズ 7 nm に相当) に対して 41 nm まで到達していることを確認した [6]。

ATF の極小ビームはビーム強度の増加に伴いビームサイズが増大するビーム強度依存性を持つ (Fig. 2)。ウェイク場が主要因であると考えられ、2016 年 11 月、ATF2 ビームラインの大幅な改造を行った。ビームライン全体から不要なウェイク源を撤去し、最終収束ビームラインの一部の真空部品にはウェイク場を低減するための内部シールドを取付けた (Fig. 3)。実験によりある程度緩和された事を確認したが、未だにビーム強度依存性は観測されている [7-9]。ATF のような nm オーダーの極小ビームへのウェイク場の影響は大きく、安定な極小ビームの生成、ATF ビームラインの更なる高度化を検討する上で各ウェイク源に対する更なる理解が重要とされている。

これまでの解析では、極小ビームに強い影響を与えると考えられる最終収束ビームラインの主要なウェイク源 (空洞型 BPM、ベローズ、フランジなど) の影響評価が行われた。一方で、影響が小さいと考えられる取り出しビームラインのウェイク源やウェイク場低減の改造を施したウェイク源などは考慮されていなかった。加えて、ベローズの変形など実際のビームラインにて起こる現象

も考慮していなかった。本研究では、十分考慮されていなかった加速器コンポーネント (真空部品、可撓部品など) の電磁場解析を実施した。また、それらを考慮したより現実のビームラインに近いモデルによるトラッキングシミュレーションを行い、ウェイク場の詳細な影響評価を行った。本報告では、新たに考慮したウェイク源のビーム強度依存性への影響について報告する。

2. ウェイク場の計算

ビームの周りには常に荷電粒子が形成する電磁場があり、ビームはその場と共に加速器内を移動する。構造体の構造的変化があるような場所をビームが通過すると電磁場が励起される。この電磁場のことをウェイク場と呼ぶ。バンチの中心から見て後方の位置 s_w にいる粒子はこのウェイク場によってキックされる。その際の運動量変化 $\Delta p_{x,y}$ は $q_1 W_{x,y}(x, y, s_w)$ のように表され、横方向のウェイクポテンシャル $W_{x,y}(x, y, s_w)$ は以下のように定義される。ここで、バンチの総電荷量 q_1 の超相対論的ビームが位置 (x, y) を通過すると仮定し、 $t = (z + s_w)/c$ 。時間 $t = 0$ でバンチ中心が $z = 0$ を通過すると考える。

$$W_{x,y}(x, y, s_w) \equiv \frac{e}{q_1} \int \{E_z(x, y, z, t) \mp cB_{y,x}(x, y, z, t)\} dz \quad (1)$$

ATF2 ビームラインにおけるウェイク源を Fig. 1 に示す。ATF ビームライン上には空洞型 BPM、真空排気ポート、ベローズ、フランジ、Optical Transition Radiation monitor などのウェイク源がある。これらのウェイク場の計算には 3 次元電磁界シミュレーションコード GdfidL [11] を用いた。計算用の 3 次元モデルは実際のウェイク源の形状を再現するように構築した。例として 5 mm 変形した RF シールド付きベローズの 3 次元モデルを Fig. 4 に示す。ベローズの段差やフランジ部のギャップなど、ビームから見て構造が急激に変化するような場所でウェイク場は励起される。

* abeyuki@post.kek.jp

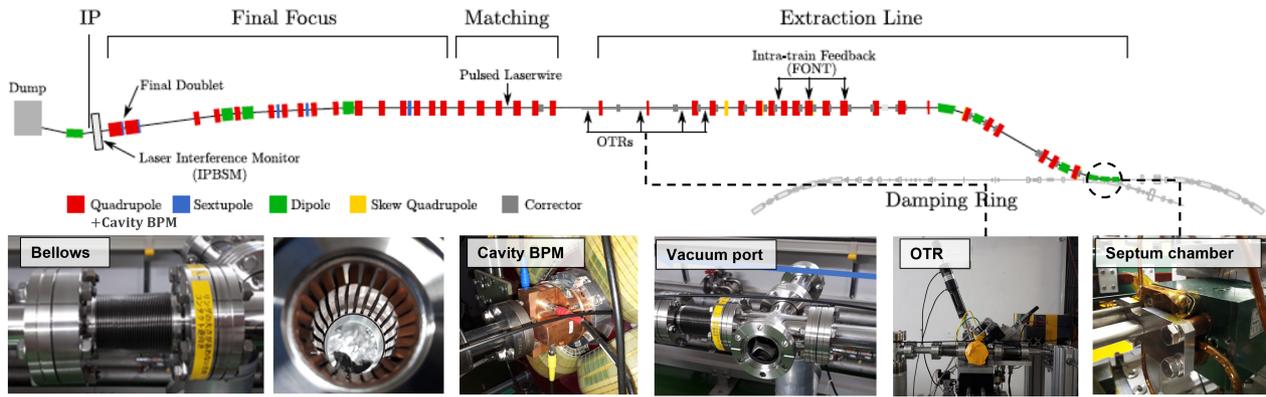


Figure 1: ATF2 beamline layout and wakefield sources.

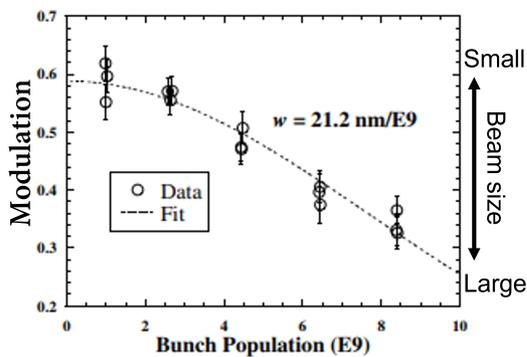


Figure 2: Beam size growth of nano meter small beam in ATF by intensity dependence (Measured by IPBSM 30 degree mode in 2016/10) [10].

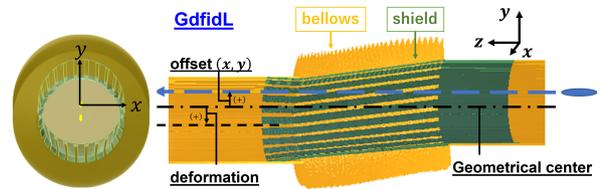
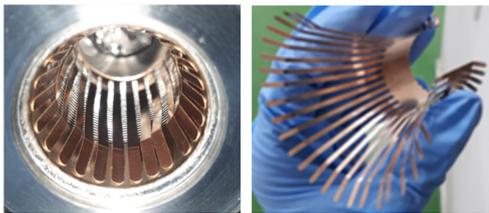


Figure 4: GdfidL calculated model of deformed bellows with wakefield mitigation shield.



(a) Inner shield of vacuum ports



(b) RF shield contact attached to bellows
 Figure 3: Attachments for wakefield mitigation.

Figure 5 に ATF2 ビームラインの各ウェイク源のウェイクポテンシャル $W_y(0, 1, s_w)$ を示す。RMS (root mean square) 7.0 mm の正規分布のビームが各ウェイク源の幾何学的中心から $y=1$ mm オフセットして通過する時のウェイクポテンシャルを縦軸に示した。横軸はビーム中心からの距離 s_w を示す。内部シールドなどによってウェイク場対策が図られたウェイク源は空洞型 BPM などの主要なウェイク源と比べて 1/10~1/100 程度までウェイク場が低減されている。

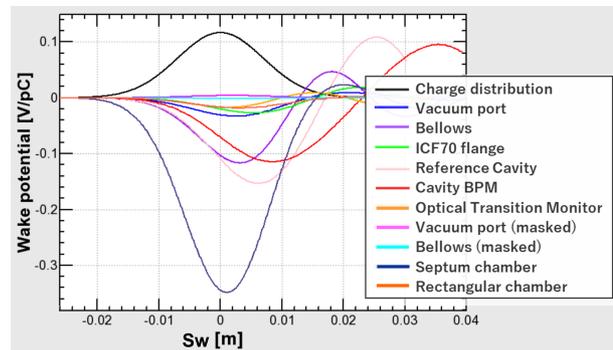


Figure 5: Transverse wakepotentials in ATF2 beamline by GdfidL. Vertical: wake potential $W_y(0, 1)$, horizontal: distance from bunch center s_w .

各ウェイク源のビームに対する影響度をキック量に準ずる値 W_{s-eff} から解析的に見積もる [12]。IP での粒子の位置変化量 Δy_{IP} は近似的に Eq. 2 のように示される。ここで i は各ウェイク源のインデックス、 a_i は各ウェイク源での y 方向のズレ、 β_i は各ウェイク源の地点でのベータ関数、 $\Delta\phi_i$ は各ウェイク源から IP までのフェー

ズアドバンスである。

$$\Delta y_{IP} \simeq \frac{q_1}{E} W_y(x=0, a_i, s_w) \sqrt{\beta_{wake} \beta_{IP}} \sin \Delta \phi_i \quad (2)$$

ウェイク源が RMS a [mm] のランダムなズレを持つと仮定し、 $y(0, 1)(x=0, y=1\text{mm}, s_w)$ として近似的にウェイクポテンシャルのピーク値を用いると Eq. 2 の RMS から $W_{s\text{-eff}}$ が得られる [12]。

$$\begin{aligned} (\text{RMS of } \Delta y_{IP}) &\approx \frac{q_1}{E} \sqrt{\beta_{IP}} W_{s\text{-eff}} \\ W_{s\text{-eff}} &\equiv a W_y(0, 1) \sum_i \sqrt{\beta_i} \sin \Delta \phi_i \end{aligned} \quad (3)$$

Table 1 にウェイクポテンシャルのピークの大きさ、ビームライン上のウェイク源の量とインストールされているビームライン、ビームサイズへの影響度 $W_{s\text{-eff}}$ を示した。ウェイク場の影響は主にウェイク源の数と β 関数に関係する (Eq. 3)。例えば、セプタム電磁石のチャンバーは空洞型 BPM の 4 倍強いウェイクポテンシャルを持っているが、 $W_{texts\text{-eff}}$ が小さいので空洞型 BPM よりビームサイズへの影響は小さいと推定される。ウェイク場のビームへの影響の詳細については次節にて述べる。

Table 1: Peak Wakepotential at Beam Offset $y=1$ mm, Random Misalignment RMS $a=1$ mm

	Wakefield source	Qty	$W_y(0, 1)$	$W_{s\text{-eff}}$
EXT	Bellows	51	0.117	4.07
	Septum magnet chamber*	3	0.440	0.54
	Vacuum port	15	0.027	0.59
	Optical Transition			
	Radiation monitor	4	0.021	0.03
FF	Cavity BPM	24	0.115	10.10
	Shielded bellows*	37	0.001	0.44
	Shielded vac. port*	14	0.004	0.45
EXT	Vacuum Flange	112		2.52
FF	(ICF70)	102	0.028	8.64
	Reference Cavity	2	0.154	2.18

EXT: EXTraction beamline, FF: Final Focus beamline
*newly calculated

また、本研究では今まで考慮されていなかった変形したベローズ (シールド有り・無し) についてもウェイク場の確認を行った。その結果を Fig. 6 に示す。縦軸は各変形量、各オフセット察におけるウェイクポテンシャルのピーク値を示す。変形量の増加に伴ってビームとウェイク源内壁との相対的な距離が変化するため、相対距離の偏りが大きくなるにつれてウェイクポテンシャルも大きくなる傾向がある。RF シールドの効果により励起されるウェイク場は 1/10 以下まで低減されている。なお、ベローズの変形量は Fig. 4 に示す $y(+)$ 方向が正方向である。

3. トラッキングシミュレーション

ウェイク場のビームサイズに対する影響を計算コード SAD (Strategic Accelerator Design) [13] のトラッキングシミュレーションを用いて確認した。ATF2 ビームライ

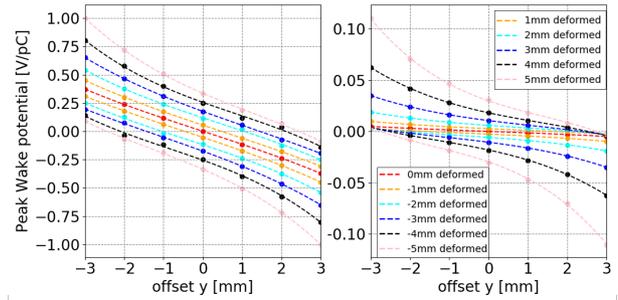


Figure 6: Transverse peak wakepotentials of deformed bellows. Left: bellows without shield, Right: bellows with shield.

ンのビーム光学系を Fig. 7 に示す。

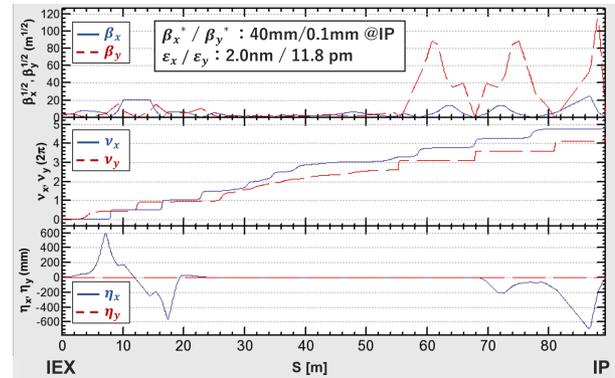


Figure 7: ATF2 design optics calculated by SAD.

ランダムなウェイク源のミスアライメント量を仮定し、50 回トラッキング計算を行った。空洞 BPM のミスアライメントは測定値から平均 0.3 mm、RMS 0.5 mm とし、他の真空部品は平均 0 mm、RMS 1 mm とした。真空フランジは各コンポーネントに取り付けられているため、各ウェイク源と同じミスアライメント量を持つと仮定した。ウェイク場によるキック角は粒子の角度変化 $\Delta y_{wake}'$ として表される。

$$\Delta y_{wake}' = \Delta p_y / p_0 = \frac{q_1}{E} W_y(x=0, y=\bar{y}-y_m, s_w) \quad (4)$$

$$\Delta y_{wake}' \approx \frac{q_1}{E} \sum_{i=0}^3 W_{yi}(x=0, s_w) (\bar{y}-y_m)^i \quad (5)$$

ここで、 \bar{y} はビームの重心位置、 y_m はウェイク源のミスアライメント量である。先行研究においては、ミスアライメント量を基にウェイク場によるキック量をスケールしていた $(q_1 W(y, =, 1, s_w) y / E)$ 。本研究では、3 次多項式によって内挿することで各粒子に対するウェイク場のキックを算出した (Eq. 5, Fig. 6)。

ウェイク場の影響を 50 回のトラッキング計算から得られた RMS ビームサイズの平均値と標準偏差 (SDOM: standard deviation of the mean) を基に評価した。各ウェイク場のビームサイズへの影響を Table 2 に示す。評価の際にはスケールしたウェイク場のキック量を用いた。表から最終収束ビームラインよりも取り出しビーム

Table 2: Calculation Results of Beam Size Growth by Wakefield (Bunch Population: 8.0e9)

	Wakefield Source	Misalign [mm]	Mean beamsize \pm SDOM [nm]
	No wake (design)		37.9
EXT	Septum magnet chamber*	± 1	37.8 ± 0.1
	Vacuum port*	± 1	37.9 ± 0.2
	Bellows	± 1	38.4 ± 0.7
EXT All			38.4 ± 0.7
FF	Cavity BPM	0.3 ± 0.5	40.8 ± 3.2
	Shielded vacuum port*	± 1	37.8 ± 0.007
	Shielded bellows*	± 1	40.9 ± 1.7
	Vacuum flange	-	43.8 ± 2.3
FF All			57.8 ± 3.3
EXT+FF All			66.4 ± 3.2

*newly calculated

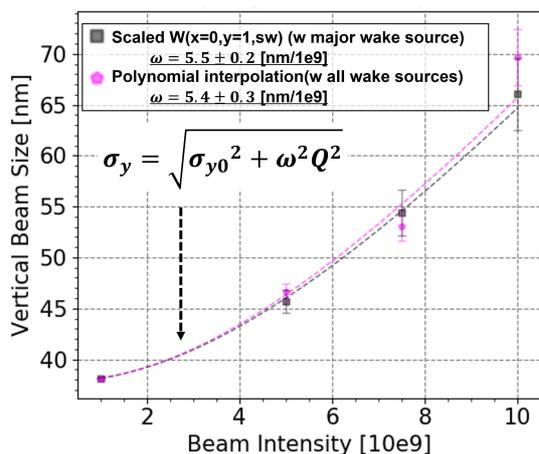


Figure 8: ATF2 intensity dependence calculation comparison. Vertical: IP beamsize, Horizontal: beam intensity.

ラインのウェイク場の影響が小さいことが分かる。これは最終収束ビームラインよりも取り出しビームラインのベータ関数が小さいためである。

次に主要なウェイク源（空洞型 BPM、ペローズ、真空フランジ）のみ考慮した場合とより現実的に計算されたウェイク場（取り出しビームラインのウェイク源、ペローズの変形など）を考慮した場合のビーム強度依存性について示す。この時、ペローズの変形量 u は付属部品のミスアライメント量の差とした。例えばキャビティ BPM の両端に 2 つのペローズを取り付けた場合、空洞型 BPM のミスアライメント量を y_2 、各ペローズの他部品との接続部のズレを y_1 、 y_3 とするとペローズの変形量は $u_1 = y_1 - y_2$ 、 $u_2 = y_2 - y_3$ と定義される。以上の仮定の下、計算した結果を Fig. 8 に示す。横軸はビーム強度、縦軸は IP での鉛直ビームサイズである。破線はビーム強度依存性をパラメーターフィッティングした結果であり、 ω と σ_{y0} はフィッティングパラメータ、 Q はビーム強度、 ω はウェイクフィールドの効果を定量化するビーム強度依存性パラメーターである。結果

として 2 つの計算結果に有為な差は見られず、新たに考慮したウェイク場の影響が小さいことが示された。

4. まとめと今後の展望

ATF の極小ビームはビーム強度の増加に伴いビームサイズが増大するビーム強度依存性を持つ。ATF では安定な極小ビームの生成、ATF ビームラインの更なる高度化を検討するためにその主要因であると考えられるウェイク場の影響評価を進めている。本研究では主要なウェイク源（空洞型 BPM、ペローズ、フランジなど）に加えて、影響が小さいと考えられる取り出しビームラインのウェイク源やウェイク場低減対策を施したウェイク源、更にはペローズの変形などを考慮した現実のビームラインに近いモデルによるビーム強度依存性の影響評価を行った。その結果、新たに考慮したウェイク源やペローズの変形の影響は小さいことが示された。

本研究ではウェイク源のミスアライメントに起因する静的なウェイク源の影響を確認した。しかし、実際のビームラインでは軌道や角度の変化による動的なウェイク場の影響や理想的なビーム光学系のからズレ（例：磁石のミスアライメント、 x - y カップリング）などもある。以上の影響は今後考慮していく予定である。

謝辞

本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2136 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Kubo *et al.*, Phys.Rev.Lett.88,194801(2002).
- [2] Y. Honda *et al.*, Phys.Rev.Lett.92,054802(2004).
- [3] “The International Linear Collider: Technical Design Report (TDR)”, Tech. Rep. ILC-REPORT-2013-040, 2013. doi:10.48550/ARXIV.1306.6329
- [4] “ATF2 Proposal”, KEK Report 2005-2 (2005).
- [5] N. Terunuma *et al.*, PASJ(19th), WEP059,2022; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/abstracts/html/WEP059.htm
- [6] T. Okugi *et al.*, Proceedings of LINAC16, 2016,MO3A02.
- [7] J. Snuverink *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 19, p. 091002, 2016.
- [8] P. Korysko, P. N. Burrows, A. Latina, and F. G. Angeles, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 23, p. 121004, 2020.
- [9] T. Okugi, ATF International Collaboration, PASJ17,Kyoto, Japan, Oct. 2019, FRPI023.
- [10] A. Aryshev *et al.*, “ATF report 2020”, Tech. Rep. CERN-ACC-2020-0029, CERN, Geneva, 2020.
- [11] GdfidL: <http://www.gdfidl.de/>
- [12] K. Kubo, Asian Linear Collider Workshop (ALCW'18), Fukuoka, Japan, 2018.
- [13] SAD Home Page; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>