

ATF 最終収束ビームラインの高度化に向けたウェイク場低減効果の定量的評価 EVALUATION OF WAKEFIELD MITIGATION EFFECTS FOR UPGRADING THE ATF FINAL FOCUS BEAMLINE

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

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

^{A)} KEK

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

Abstract

The KEK-ATF (Accelerator Test Facility) was constructed as an R&D facility for the final focus system to develop the nanometer beam technology required for the ILC (International Linear Collider). ATF is the best research environment for the study of wakefield effects on the nanometer small beam. The vertical beam size growth as a function of the bunch intensity was observed at the focal point (IP), which is mainly caused by wakefield. The evaluation results of wakefield effects were shown wakefield sources installed in high beta function section in ATF final focus (FF) beamline, e.g. cavity BPM and vacuum flange etc, have strong effects on the small beam. We will upgrade the ATF-FF beamline to mitigate wakefield effects on the small beam. Therefore, internal shield parts were inserted on the vacuum flange, which is one of the strong wakefield source, to confirm the mitigation affection. The mitigation effect is estimated and evaluated based on the orbit response and IP vertical beam size. This report shows the evaluation results of the mitigation of the wakefield effects and the progress and current status of the work to upgrade the beamlines to reduce the effects of the wakefield.

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) [1] では国際リニアコライダー (ILC) [2] において必要とされるナノメートル極小ビーム (極小ビーム) を安定に実現するためのビーム制御、計測技術の研究開発が行われている [3]。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 [4,5] は最終収束ビームライン [6] (Fig. 1, Table 1) へ出射され、収束点 (IP) にて最小となる。IP におけるビームサイズはレーザー干渉縞型ビームサイズモニター (IP Beam Size Monitor) [7,8] を用いて計測する。ATF の目標鉛直ビームサイズは ILC の設計値 (250 GeV, 7 nm) に相当する 37 nm である。2016 年には 41 nm まで到達していることを確認し、最終収束技術の有効性は概ね実証された [9]。

幾何学的形状変化のあるところをビームが通過した際に励起される電磁場をウェイク場と呼ぶ。励起されたウェイク場は同一バンチ内後方や後続のバンチに作用し、バンチ位置の変化やビームサイズ増大を引き起こすことがある。実際に、ATF ではバンチ強度の増加に伴った IP におけるビームサイズ増大が観測されており、その主たる要因はウェイク場とされている [10]。安定な極小ビームを実現する上でウェイク場の影響を詳細に調査することは重要な研究課題である。

ATF は低エミッタンスかつナノメートルサイズの高品質なビームの生成が可能な加速器を有する。また高精度なモニターを使用したビームの位置とサイズを精密に測定可能であることから、極小ビームに対するウェイク場の影響を詳細に研究できる理想的な研究環境であると言える。本研究では、極小ビームに対する影響が大きいウェイク源の一つである ICF70 フランジのウェ

イク源単体としての極小ビームに対する影響を実験的に評価した。また ICF70 フランジに RF シールドを挿入することでウェイク場の影響が緩和されることを確認した。現在、極小ビームに対するウェイク場の影響を低減するための FF ビームラインの高度化を計画しており、ビームライン全体における RF シールドによるウェイク場低減効果について解析的に評価した。本報告ではそれら評価結果と現在のウェイク場低減に関する作業状況について報告する。

Table 1: ATF-FF Nominal Beam Parameters for the Nanometer Small Beam Study

Parameter		Unit	Value
Beam energy	E	GeV	1.3
Max. bunch population	Q	10^9 electrons/bunch	20
Bunch length	σ_z	mm	7
Energy spread	σ_E	%	0.08
Emittance	ε_y	pm.rad	12
Beta function at the IP	β_y	mm	0.1

2. ウェイク場とビームの運動

ウェイク源の構造中心からズレた位置をビームが通過すると横方向ウェイク場によるキックが作用する。ビームから見たウェイク源の内部構造が非対称であると、構造中心を通過しても励起されたウェイク場が打ち消し合わず、キックとして作用する。バンチ中心からの距離を z として、ある位置 z における単粒子に作用するウェイク場のキックをある位置 z における単粒子の角度変化は $\Delta y'(z) = eq W_y(y_m, z)/E$ として表すことができる。ここで粒子の運動量 p_0 、ビームエネルギー E 、バンチの総電荷量 q 、電子の電荷量 e とした。

* abeyuki@post.kek.jp

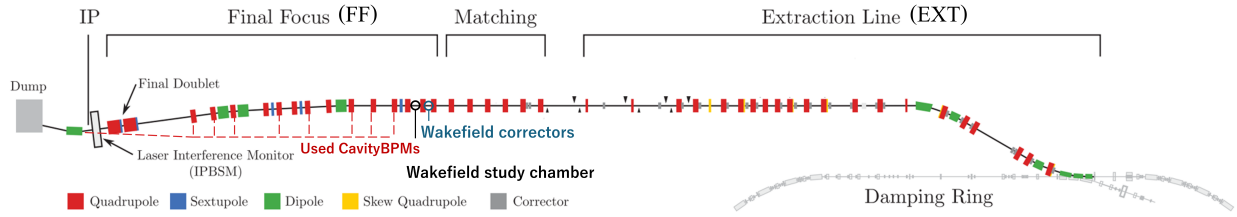


Figure 1: The layout of extraction(EXT) and final focus(FF) beamline [6].

$W_y(y_m, z)$ はウェイクポテンシャル [11] と呼ばれ、ある電荷分布を持つ超相対論的な線電荷が位置 (x, y) を通過した際に励起したウェイク場による位置 z の単粒子に作用するローレンツ力がある区間 (s_1, s_2) で積分した量である。近似的に全ての粒子が $(x, y) = (0, y_m)$ をビームラインと平行に、あるウェイク源の入口 s_1 から出口 s_2 まで通過すると仮定した場合のウェイクポテンシャルを Eq. 1 に示す。 $E_y(x, y, s, t)$ 、 $B_x(x, y, s, t)$ は励起された電磁場、 q は総電荷量である。時間 t は $ct = s + z$ という関係性を持ち、 c は光の速さである。

$$W_y(y_m, z) = \frac{1}{q} \int_{s_1}^{s_2} [E_y(0, y_m, s, t) + cB_x(0, y_m, s, t)] ds \quad (1)$$

転送行列から IP における粒子の位置の変化 Δy^* は Eq. 2 のように示される。 EXT ビームライン入口から i 番目のウェイク源の地点でのベータ関数を $\beta_{y,i}$ 、 IP でのベータ関数を β_y^* 、そのウェイク源から IP までの位相進度を $\Delta\phi_i$ とした。 E はビームエネルギーである。

$$\Delta y^*(z) = \frac{eq}{E} \sum_i W_{y,i}(y_{m,i}, z) \sqrt{\beta_{y,i} \beta_y^*} \sin \Delta\phi_i \quad (2)$$

IP におけるウェイク場によるバンチのビームサイズ増大を Eq. 2 の分散として以下のように表す。ここで $\lambda(z)$ はバンチの電荷分布を表し、 $\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(z) dz = 1$ を満たす。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_y^2 &= \left(\frac{eq}{E} \sqrt{\beta_y^*} \right)^2 \\ &\times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_i W_{y,i}(y_{m,i}, z) \sqrt{\beta_{y,i}} \sin \Delta\phi_i \right\}^2 \lambda(z) dz \right. \\ &\left. - \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \sum_i W_{y,i}(y_{m,i}, z) \sqrt{\beta_{y,i}} \sin \Delta\phi_i \lambda(z) dz \right\}^2 \right] \quad (3) \end{aligned}$$

ウェイク源によるビームへの影響を議論する際、 Eq. 2 や Eq. 3 に示すように、各ウェイク源のウェイクポテンシャル、それぞれがインストールされている地点のベータ関数とインストール数を考慮する必要がある。ウェイク源地点でのベータ関数が小さく、そのインストール数が少なければウェイク場のキックの影響も小さくなる。

3. ATF 最終収束ビームラインにおけるウェイク源と極小ビームに対する影響

Table 2 に ATF 最終収束ビームライン (Fig. 1, Final Focus beamline : FF) と取り出しビームライン (Fig. 1, Extraction beamline : EXT) にインストールされているウェイク源の一覧とそのインストール数を示す。これら全てのウェイク源に関して、 Eq. 1 に示すウェイクポテンシャルを 3次元電磁場解析ソフト (GdfidL [12]) を用いて計算し、新たなウェイク場モデルを構築した。

Table 2: Wakefield Sources in ATF EXT and FF Beamline

Name	Location	Amount
Vacuum Port	EXT	15
Bellows	EXT	34
Optical Transition Radiation Monitor	EXT	4
Septum magnet chamber	EXT	3
Stripline BPM	EXT	12
Stripline kicker	EXT	2
Rectangular chambers	EXT	4
Vacuum Flange (ICF70)	EXT, FF	223
Reference Cavity	EXT, FF	2
Cavity BPM (CBPM)	EXT, FF	25
Gate valve	EXT, FF	3
Stripline BPM	FF	1
Shielded Vacuum Flange (ICF70)	FF	20
Shielded Bellows	FF	34
shielded Vacuum Port	FF	13
manual gate valve	FF	1
Collimator	FF	1
Wakefield corrector	FF	1
Wakefield Study chamber	FF	1
Vacuum Flange (ICF114)	FF	12
Vacuum Port (ICF114)	FF	2

先行研究では入射ビームの軌道揺らぎに起因する極小ビームに対するウェイク場の影響が優位に大きいことがシミュレーションと実験的により示された [13]。ウェイクポテンシャルの大きさが通過するビームのオフセット y_m に比例する ($W_y(0, 1\text{mm}, z) \approx y_m W_y(0, 1\text{mm}, z)$) と近似すると、ウェイクポテンシ

ルとベータ関数の総和の積によって軌道揺らぎに起因する極小ビームに対する各ウェイク源の影響度を見積もることができる (Eq. 4) [14]。 $\Delta\sigma_{y,j}$ はある特定のウェイク源のみ考慮した場合の IP ビームサイズの増加量を示す。インデックス j によりウェイク源の種類を区別している。 $W_{y,j}(0, 1\text{mm}, z)$ はあるウェイク源のオフセット $y_m = 1$ [mm] の時のウェイクポテンシャルである。

$$\Delta\sigma_{y,j} \propto W_{y,j}(0, 1\text{mm}, z) \sum_i \beta_{y,j,i} \quad (4)$$

極小ビームに対する各ウェイク源の影響度の計算結果を Fig. 2 に示す。この結果から、ICF70 フランジや空洞型 BPM (CBPM) の影響が大きいことが示された [13]。Figure 3 に ATF-EXT・FF ビームラインのビーム光学系を示す。FF ビームラインの β 関数は EXT ビームラインの β 関数よりも大きく、FF ビームラインの β 関数が大きなセクションにインストールされているウェイク源 (ICF70 フランジや CBPM) の影響が大きくなる。

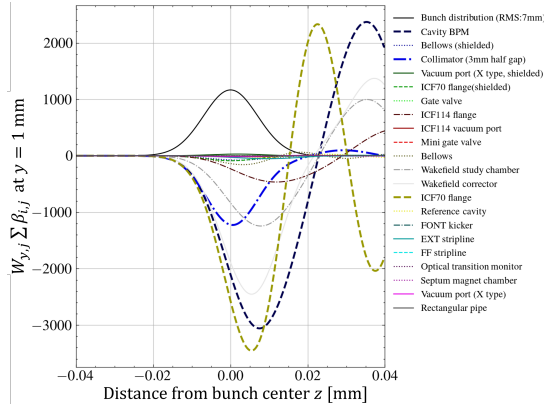


Figure 2: Analytical estimation of the wakefield effects of each type of wakefield sources with orbit fluctuation to the beam size. Horizontal axis: the distance from bunch center, vertical axis: the impact of the wakefield kick on the beam size as $W_{y,j}(0, 1, z) \sum_i \beta_{y,i,j}$ [13].

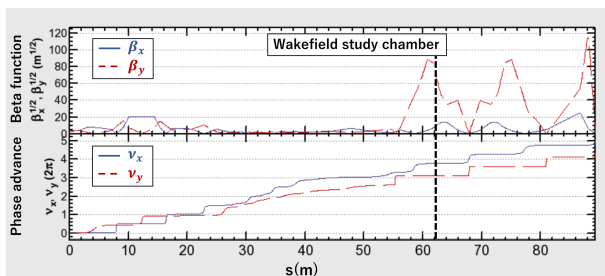


Figure 3: ATF nominal optics ($\beta_x^* \times \beta_y^* : 40 \times 1$).

ウェイク場の影響を低減するため、特に影響が大きい ICF70 フランジに対して RF シールドを取り付けることにした。Figure 4 に ICF70 フランジの断面図と、そこに挿入する RF シールドを示す。ステンレス製円筒部品をフランジ接続部に内挿することで、フランジ接

続部の段差にて励起されるウェイク場を最小限に抑える。RF シールドによる段差をできるだけ小さくするため、円筒の最薄肉部は 0.5mm とした。これら ICF70 フランジの極小ビームに与える影響と、RF シールドによるウェイク場低減効果を実験的手法を用いて評価した。

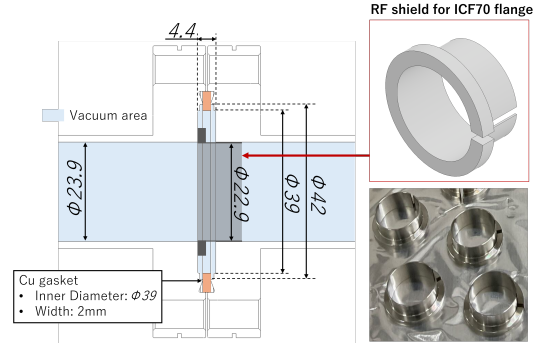


Figure 4: The schematics of the cross-section of the ICF70 flange and inserted RF shield.

4. ウェイク源単体のビームに対する影響の評価方法とウェイク場研究用装置の導入

4.1 評価原理

軌道の応答を基にウェイク源単体がビームに及ぼす影響を評価する。ウェイク源単体がビームに及ぼすキックの大きさをウェイク源下流における軌道応答により定量化する [15–17]。ここで便宜的に平均のウェイクポテンシャル $\overline{W}_y(y_w)$ を以下のように定義する。

$$\overline{W}_y(y_w) \equiv \int W_y(-y_w, z) \lambda(z) dz \quad (5)$$

ビームライン上の可動式ウェイク源の鉛直位置 y_w を変化した際の可動式ウェイク源下流の BPM におけるビーム位置の変化と転送行列からバンチに作用するウェイク場キックを平均のウェイクポテンシャル $\overline{W}_y(y_w)$ として算出する (Eq. 7)。 $y_w = 0$ mm の時の軌道を基準軌道として、その軌道からのビーム位置の変化量を Δy_k とした。 $R_{34,k}$ は可動式ウェイク源から BPM (k) までの転送行列の 34 成分を示し、BPM (k) 地点でのベータ関数を $\beta_{y,k}$ 、位相進度を $\Delta\phi_k$ とした。平均のウェイクポテンシャル $\overline{W}_y(y_w)$ と可動式ウェイク源の鉛直位置 y_w の関係を調べることでウェイク源単体が極小ビームに及ぼす影響を評価する。

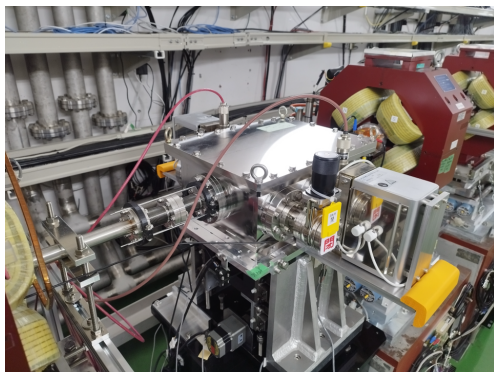
$$\overline{W}_y(y_w) = \frac{E}{eq} \frac{1}{R_{34,k}} \overline{\Delta y_k} \quad (6)$$

$$\text{where } R_{34,k} = \sqrt{\beta_{y,k} \beta_{y,\text{wake}}} \sin \Delta\phi_k$$

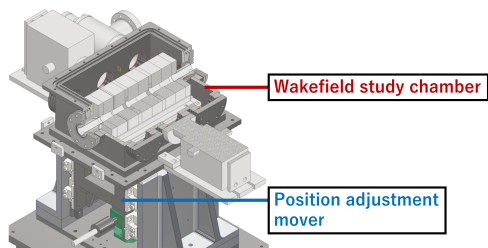
4.2 導入したウェイク場研究用装置

2022 年に可動式のウェイク源 (ウェイク場研究用装置) を設計・製作し、ATF ビームラインに導入した (Fig. 5 (a)) [13]。Figure 5 (b) にウェイク場研究用装置の模式図を示す。この装置は主に真空容器と位置調整機構で構成されている。真空容器内に任意の内部形状をもつ

金属ブロックを配置することで、目的とするウェイク源を構築する。真空容器の鉛直・水平位置は遠隔制御可能な位置調整機構によって調整することができ、移動量に応じた強さのウェイク場キック ($\Delta y' = eq\overline{W}_y(y_w)/E$) を生成可能である。鉛直方向には ± 10 mm、水平方向には ± 5 mm の範囲で駆動可能であり、それぞれの位置調整精度は $1 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ である。また大きな移動に対応するため装置の両端にはそれぞれ 2 つのベローズが取り付けられており (Fig. 5)、重力による撓みを軽減するために直径 2 mm のアルミ棒をベローズに沿わせている。



(a) Installed vacuum chamber for the wakefield study with a remote position adjustable mover.



(b) Components schematics of the wakefield study chamber and remote position adjustable mover.

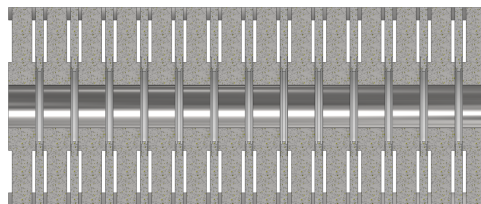
Figure 5: Installed wakefield study chamber as remotely position adjustable wakefield source.

4.3 実験のセットアップと評価方法

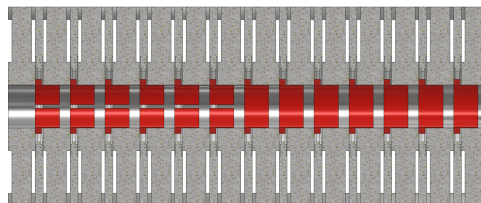
本研究ではビームへの影響が強いと評価された ICF70 フランジのウェイク源単体での極小ビームに対する影響と、RF シールドによるウェイク場の低減効果を確認する。ICF70 フランジの内部構造を再現した SUS ブロックをウェイク場研究用装置に設置し、その影響を評価した。単一の ICF70 フランジによるウェイク場の影響は小さく、CBPM の約 1/3 程度である。ビームに作用するウェイク場キックを増大させるため、Fig. 6 (a) に示すように計 13 個の ICF70 フランジブロックを装置内に設置した。さらに Fig. 6 (b) に示すように、RF シールドによるウェイク場の低減効果を確認するため、全てのブロックに RF シールドを取付けた評価も行った。実際の ICF70 フランジブロックと RF シールドを設置している様子は Fig. 7 に示している。比較のため、本研究では金属ブロックの代わりに直管を配置し

た場合のビームへの影響も調べた。

評価実験ではウェイク場研究用装置を ± 8 mm の範囲で 1 mm 間隔で移動させ、各セットアップにおける平均のウェイクポテンシャル \overline{W}_y を調査した。ビーム軌道の測定にはウェイク場研究用装置の下流に配置されている 9 個の CBPM を使用し (Fig. 1)、 $y_w = 0$ mm の時の軌道を基準として各 BPM 地点でのビーム位置の変化量 $\overline{\Delta y_k}$ を算出した。300 ショット分のデータを取得し、 $\overline{\Delta y_k}$ の平均値から Eq. 7 に基づいて各 BPM での \overline{W}_y の平均値を算出した。ATF の CBPM はサブミクロン程度の位置分解能を持つ [18] が、ウェイク場キックの影響を測定しやすくするためにパンチ強度は約 $8.0 \times 10^9 e^-/\text{bunch}$ とした。シミュレーションでは、ビームライン上にあるウェイク源として ICF70 フランジブロック、ICF70 フランジブロック + RF シールド、および直管の 3 つのケースを考慮し、それぞれ粒子トラッキング計算による評価を行った。EXT ビームライン入口での Twiss パラメーターを基に正規分布に従うマクロパーティクルモデルを作成した。計算には計算コード SAD (Strategic Accelerator Design) [19] を使用した。実験と同様に $y_w = \pm 8$ mm の範囲 (1 mm 間隔) としてトラッキング計算を実施した。



(a) 13 SUS blocks with internal geometry of ICF70 flange.



(b) 13 SUS blocks with internal geometry of ICF70 flange with RF shield (Red parts in the figure).

Figure 6: Schematics of the experimental setup for the evaluation of wakefield effects of ICF70 flange and mitigation effects by RF shield of the ICF70 flange.

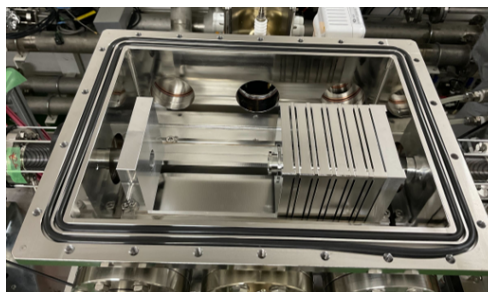


Figure 7: Installed ICF70 blocks and RF shields into the wakefield study chamber.

5. ウェイク源単体の極小ビームに対する影響の評価結果

ICF70 フランジのウェイク源単体での極小ビームに対する影響と RF シールドによるウェイク場の低減効果を確認するため、3つのセットアップについてシミュレーションおよび実験的手法を用いたウェイク源単体の影響評価を行った。Figure 8 にシミュレーションと実験の結果を示す。縦軸は平均のウェイクポテンシャル、横軸はウェイク場研究用装置の移動量 y_w である。プロットされた点は測定値を示し、各 BPM で測定した平均のウェイクポテンシャルの平均値である。一方で、破線はシミュレーション結果を多項式でフィットしたものである。評価の結果、極小ビームに対して有意に大きな影響を持つ ICF70 フランジに RF シールドを装着することでウェイク場の影響を大幅に低減できることが分かった。その効果により、ICF70 フランジを直管と同程度のウェイク源にまで低減できることが示された。なお、それぞれの結果にはウェイク場研究用装置の両端にあるダブルベローズによる影響も含まれている。

シミュレーション結果と実験結果は概ね一致しており、実験結果を再現するような ICF70 フランジおよび RF シールド付 ICF70 フランジのウェイク場モデルを構築できたと言える。現在、ATF ではウェイク場の影響を低減するためのビームラインの高度化を検討している。ビームライン全体の ICF70 フランジに対して RF シールドを装着した際のウェイク場低減効果について解析的に評価した結果を Fig. 9 に示す。評価の結果、挿入型 RF シールドによりウェイク場の影響を約 1/30 にまで低減できることが示された。ただし、0.5 mm の段差 (Fig. 4) が残るため完全なウェイク場低減には至らない。そのため、ウェイク場の影響が大きくなるベータ関数の大きなセクションについてはクランプチェーン型のフランジで構成されるビームラインへアップグレード予定である。

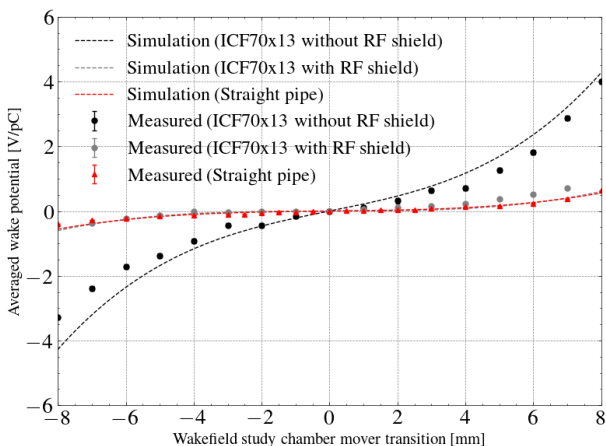


Figure 8: The comparison of the simulation and experimental results of the wakefield effects of single wakefield source with different setups of wakefield source. Horizontal axis: the distance from bunch center, vertical axis: averaged wake potential.

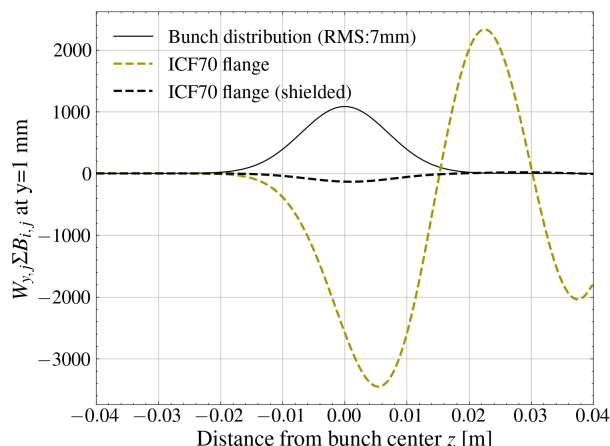


Figure 9: Analytical estimation of the wakefield effects of ICF70 flange with and without RF shield. horizontal axis: the distance from bunch center, vertical axis: the impact of the wakefield kick on the beam size as $W_{y,j}(0, 1, z) \sum_i \beta_{y,i,j}$.

6. まとめ

安定な極小ビームを実現する上でウェイク場の影響を詳細に調査することは重要な研究課題であり、ATF は極小ビームに対するウェイク場の影響を詳細に研究できる理想的な研究環境である。本研究では、ビームへの影響が強いと解析的に評価された ICF70 フランジの影響と RF シールドによるウェイク場の低減効果を確認するため、ウェイク場研究用装置を用いてウェイク源単体での極小ビームに対する影響を評価した。3つのセットアップにおいてシミュレーションおよび実験的手法を用いた影響評価を行った。ICF70 フランジの極小ビームに対する影響は有意に大きいが、RF シールドを装着することでウェイク場の影響を大幅に低減できることが明らかとなった。シミュレーション結果と実験結果は概ね一致しており、それぞれ実験結果を再現するようなウェイク場モデルを構築できた。ビームライン全体でのウェイク場低減効果について解析的に見積もった結果、RF シールドの取付けによって影響を約 1/30 にまで低減できることが示された。ただし、挿入型 RF シールドでは完全なウェイク場低減には至らないため、ウェイク場の影響が大きくなるセクションにはフランジ接続部の段差がないクランプチェーン型のフランジを導入予定である。今後、ビームライン全体としてのウェイク場低減効果を実験的に評価する予定である。また、コリメーターや CBPM は依然としてビームライン上で影響度の大きなウェイク源として存在している。そのため、これらの効果を補正するためにウェイク場補正ベンチのさらなる調査と改良を進める予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] F. Hinonde *et al.*, “ATF Accelerator Test Facility - Design and Study Report”, 1995.
- [2] C. Adolphsen, M. Barone, B. Barish *et al.*, “The International Linear Collider: Technical Design Report (TDR)”, 2013.
- [3] T. Okugi *et al.*, “Development of the nanometer beam technology at the accelerator test facility”, in *Proc. PASJ21*, TFSP18, 2024.
- [4] K. Kubo *et al.*, “Extremely low vertical emittance beam in the accelerator test facility at KEK”, *Phys. Rev. Lett.* 88, 194801, 2002.
- [5] Y. Honda *et al.*, “Achievement of ultralow emittance beam in the accelerator test facility damping ring”, *Phys. Rev. Lett.* 92, 054802, 2004.
- [6] G. R. White *et al.*, “Experimental Validation of a Novel Compact Focusing Scheme for Future Energy-Frontier Linear Lepton Colliders”, *Phys. Rev. Lett.* 112, 034802, 2014.
- [7] T. Shintake, “Proposal of a Nanometer Beam Size Monitor for e+e- Linear Colliders”, *NIM A* 311(3), 1992, pp.453-464.
- [8] J. Yan *et al.*, “Measurement of nanometer electron beam sizes with laser interference using Shintake Monitor”, *NIM A* 740, 2014, pp.131-137.
- [9] T. Okugi *et al.*, “Achievement of Small Beam Size at ATF2 Beamline”, in *Proc. LINAC' 16*, Michigan, USA, 2016, MO3A02, pp.27-31.
- [10] T. Okugi *et al.*, “Intensity dependence of ATF2 virtual IP beam size”, in *Proc. PASJ16*, FRPI023, 2019.
- [11] P. B. Wilson, “Introduction to wakefields and wake potentials”, *Proceedings of AIP conference*, vol.184, pp.525-564 (1989).
- [12] GdfidL, <http://www.gdfidl.de/>
- [13] Y. Abe, “Evaluation of wakefield effects to nanometer small beam”, PhD thesis, Accel. Sci. Dept. SOKENDAI, 2024.
- [14] K. Kubo, “ILC new luminosity design and small beam experiments at ATF”, ALCW2018 (2018).
- [15] P. Tenenbaum *et al.*, “Direct measurement of the transverse wakefields of tapered collimators”, Report No. SLAC-PUB12086, 2007.
- [16] J.L. Fernandez-Hernando *et al.*, “Measurements of Collimator Wakefields at End Station A”, in *Proc. EPAC' 08*, Genoa, Italy, 2008, WEPP163, pp. 2868–2870.
- [17] J. Snuverink *et al.*, “Measurements and simulations of wakefields at the Accelerator Test Facility 2”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 091002, 2016.
- [18] Y. I. Kim *et al.*, “Cavity beam position monitor system for the Accelerator Test Facility 2”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 15, 042801, 2012.
- [19] SAD, <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>