

KEK-ATF におけるナノメートル極小ビームのビーム強度依存性の評価 EVALUATION OF INTENSITY DEPENDENCE FOR NANOMETER SMALL BEAM AT KEK-ATF

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)}, Kiyoshi Kubo^{A,B)}, Nobuhiro Terunuma^{A,B)}

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

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Accelerator Test Facility (ATF) at KEK is RD facility for the final focus system to develop the nanometer beam technology required for International Linear Collider (ILC). Growth of the vertical beam size at IP depending on the bunch intensity has been observed at ATF. In November 2016, the beam size intensity dependence has been evaluated. It has been shown that beam size intensity dependence is mainly caused by wakefield. However, the prediction by the simulation exhibited a discrepancy, roughly twice smaller than experimental result. It is important to understand the effects of wakefield more quantitatively for the stable generation of nano meter small beam. This study aimed to evaluate the bunch intensity dependence of beam size in relation to wakefield effects at the ATF. It performed simulations including almost wakefield sources in ATF beamline to reproduce realistic beamlines for the estimation of the detailed effects as an entire beamline. In addition, we incorporated experimental method to reduce systematic error. As a result, we obtained a discrepancy less than 15 % between simulation and experiment results. It was shown our wakefield model assumed almost reasonable. In this report, we present the detailed evaluation results, the progress and current status of our work.

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, Fig. 1) では国際リニアコライダー (ILC) において必要とされるナノメートル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 [1]。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 [2,3] は最終収束ビームラインへ出射され、仮想衝突点 (Fig. 1, 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) [4] 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を概ね実証した [5]。

ATF のナノメートル極小ビームはビーム強度増加に伴い IP における鉛直ビームサイズが増大するビーム強度依存性を持つ。ウェイク場が主要因であると考えられ、その影響を調べるため 2016 年 11 月には ATF 最終収束ビームラインの大幅な改造が行われた。一部のモニターや真空部品などを撤去し、真空部品 (真空排気ポート、ペローズ、フランジ) にはビームから見て段差がなくなるような内部シールドを取り付ける等のウェイク場対策を施した。その結果、ビーム強度依存性は緩和され、ウェイク場が主原因であることが示された [6]。

ナノメートルオーダーまで収束された極小ビームでは、小さなキックの影響もビームサイズの変化として現れる。安定な極小ビームの生成のために各ウェイク源にて励起されるウェイク場の影響とビームライン全体としてのビームへの影響の更なる理解が重要である。ATF

では数 μm ~ nm オーダーのビームサイズ測定が可能な IPBSM と数十 nm のビーム位置分解能を有する空洞型位置モニター (Cavity BPM) [7] が多数設置されている。様々な試験装置も導入可能であることから、ATF はウェイク場の影響を定量的に研究する最適な場と言える。

特定のウェイク源の位置を物理的に動かすことでキックを生成し、その際のビーム軌道の応答を基にウェイク源単体のビームへの影響評価が行われた。シミュレーションと実験結果は 20 % の範囲で良い一致を示した [8]。一方、ビームライン全体としてのウェイク場のビームへの影響評価はシミュレーションよりも実験結果の方が 2 倍程度大きかった。本研究では、ビームへの影響が小さいと思われるウェイク源などを考慮することでより実際のビームラインに近いウェイク場モデルを用いたシミュレーションによる、ビームライン全体におけるウェイク場のビームへの影響評価を行った。実験結果との比較から想定するウェイク場モデルの妥当性を確認した。特にビーム位置・角度の揺らぎとビーム強度依存性の関係に注目することでナノメートル極小ビームに対するウェイク場の影響の定量化を行った。本旨ではこれら評価結果について報告する。

2. ウェイク場によるビームサイズの増大

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。構造体の形状的变化があるような場所をビームが通過すると電磁場 (ウェイク場) が励起される。横方向 (Transverse) のウェイク場の場合、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。対照的な内部構造を持つウェイク源であっても構造中心からズレた位置をビームが通ると横方向 (Transverse) ウェイク場によるキック

* abeyuki@post.kek.jp

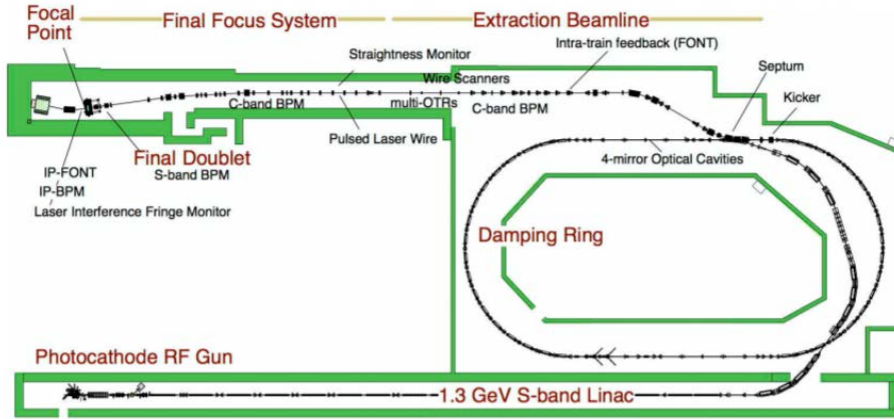


Figure 1: ATF beamline layout.

クが作用する。粒子単体に作用するウェイク場のキックをある位置 z における粒子の角度変化 $\Delta y'_{\text{WAKE}}$ として Eq. 1 のように表すことができる。

$$\Delta y'_{\text{WAKE}}(z) = \frac{\Delta p_y}{p_0} = \frac{eq}{E} W_y(x, y, z) \quad (1)$$

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。 $W_y(x, y, z)$ はウェイクポテンシャルと呼ばれ [9]、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する電磁場を位置 z に対して（ウェイク源の入口から出口まで）区間積分した量である。ある位置 z の粒子の運動量変化を $p_y(z) = eqW_y(x, y, z)/c$ と表すことができる。転送行列と Eq. 1 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。

$$\Delta y^*(z) = \frac{eq}{E} \sum_{i=1} W_{y,i}(0, y_{m,i}, z) \sqrt{\beta_{y,i} \beta_{y,IP}} \sin \Delta \phi_i \quad (2)$$

i は各ウェイク源のインデックスを表す。近似的に全ての粒子が位置 $(x = 0, y = y_{m,i})$ を通過すると仮定し、各ウェイク源がインストールされている地点でのベータ関数を $\beta_{y,i}$ 、IP でのベータ関数を $\beta_{y,IP}$ 、各ウェイク源から IP までの位相進度を $\Delta \phi_i$ とした。Equation 2 に示すように、各ウェイク源がインストールされている地点のベータ関数とウェイクポテンシャルの積が足し合わされ、最終的なウェイク場のキックの影響は IP での粒子の位置の変化として現れる。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. ビーム光学系とウェイク場の動的な影響

実際のビームサイズ測定では複数のバンチの位置と分布を射影した投影ビームサイズを測定している。ビーム軌道の揺らぎによるウェイク場の影響もビームサイズ増大として現れる。このビーム軌道の揺らぎを IP の位置と角度に関係する項に分けて考える (Eq. 3) [10]。

$$y_i = \sqrt{\beta_{y,IP} \varepsilon_y} (a_{\text{pos}} \cos \Delta \phi_i - a_{\text{ang}} \sin \Delta \phi_i) \quad (3)$$

ここで、 a_{pos} 、 a_{ang} はそれぞれ IP のビームサイズと角度拡がりによって正規化された振幅である。

Figure 2 に ATF のビーム光学系を示す。ベータ関数が大きくウェイク場の影響が大きいと思われるセクションに注目すると、ベータ関数が大きいセクションではほとんどのウェイク源は IP から位相進度が $(n+1/2)\pi$ 離れて設置されている (n は整数)。 $\cos \phi_i \approx 0, \sin^2 \phi_i \approx 1$ であることから Eq. 4 に示すような IP での角度に関係する軌道の変化に伴い、IP における位置の変化を生み出す。ここで近似的にウェイクポテンシャルが位置オフセットに比例する $W_{y,i}(0, y_{m,i}, z) = y_{m,i} W_{y,i}(0, 1, z)$ と仮定した。

$$\Delta y^*(z) = -a_{\text{ang}} \frac{eq}{E} \sqrt{\beta_{y,IP} \varepsilon_y} \sum_{i=1} W_{y,i}(0, 1, z) \beta_{y,i} \sin^2 \Delta \phi_i \quad (4)$$

シングルバンチ内の粒子の位置の変化を示したが、実際のビームサイズ測定では複数のバンチの位置の変化と y 方向に関する分布の拡がりを含む投影ビームサイズとして測定される。IP におけるビームの角度の揺らぎが大きくなることで、バンチ毎に作用するウェイク場の影響も大きくなり、観測されるビーム強度依存性としても強くなる。この関係性をシミュレーションと実験により確認することでビームライン全体でのウェイク場の影響を調べることが出来る。本研究ではこのビームの IP 角度揺らぎとビーム強度依存性の関係に注目し、ナノメートル極小ビームに対するウェイク場の影響の定量的理解を深めることにした。

4. ATF ビームラインのウェイク場

Table 1 と Fig. 3 に ATF ビームライン上の各 Wakefield 源と各インストール数について示した。ベローズやフランジ、真空排気ポートなどの真空部品、各種モニター、コリメーターなどがインストールされている。それらの実際の形状をより再現した内部構造モデルを構築し、3次元電磁場解析ソフト GdfidL [11] を用いてウェイク場の計算を行った。Figure 4 に一例としてシールドを取り付けたベローズの内部構造モデルを示す。蛇腹構造や内部シールドなど実際の内部構造を再現した。本研究

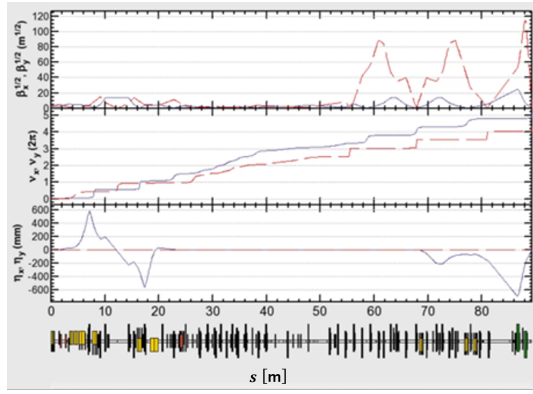


Figure 2: ATF optics ($\beta_x^* \times \beta_y^* : 40 \times 1$).

ではビームに対する影響が小さいと見積もられたウェイク源（内部シールドを取り付けた真空部品やコリメーター [12] など）や 2016 年以降にウェイク場研究用のために新たにインストールされた真空機器を新たに考慮し、より実際のビームラインに近いウェイク場モデルを構築した。ただし、一部真空機器やモニターは本研究のシミュレーションでは考慮していない。先行研究において取り出しビームライン上のウェイク源のビームへの影響が小さいことが示されており [13]、評価の上で大きな影響がないと判断した。また他ウェイク源と比べると ICF114 系統の真空部品は内径が大きく、評価の上で大きな影響がないと判断した。Figure 5 に GdfidL より得られたウェイク場の計算結果を示す。縦軸はウェイクポテンシャル W_y を、横軸は誘導ビームの中心からの距離 z を示す。正規分布を取るバンチ長 7.0 mm のビームを仮定し、比較のため各コンポーネントの構造中心から y 方向に 1 mm オフセットした位置を通過する場合のウェイクポテンシャルを示した。Equation 2 に示したように、ウェイクポテンシャルの大きさ、そのウェイク源のインストール数そして、インストールされている地点におけるベータ関数によってビームへの影響が決まる。図からセプタム電磁石チャンバーによって励起されるウェイク場が大きいことが分かるが、ベータ関数が小さいセクションに 3 台インストールされているため、ビームへの影響としては小さくなる [14]。

5. IP ビームサイズのビーム強度依存性評価

IP におけるビームサイズのビーム強度依存性はビーム強度依存性 (変数) ω [nm/1e+9] を用いて定量的に評価する。測定された鉛直ビームサイズとその時のビーム強度から Eq. 5 に基づくフィッティングにより算出される。 ω が大きいほどビーム強度依存性は強いことを意味する。

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y0}^2 + \omega^2 Q^2 \quad (5)$$

この時、IP における鉛直ビームサイズを σ_y [nm]、ビーム強度ゼロの時のビームサイズ σ_{y0} [nm]、ビーム強度 Q [1e+9] としている。

ある IP 角度揺らぎ σ_A [μrad] におけるビーム強度依存性 (変数) ω [nm/1e+9] から、IP 角度揺らぎに依存する項 ω_1 と依存しない項 ω_0 に分けることができる (Eq. 6)。 ω_1 が Eq. 4 にて示したような IP での角度変化に関連す

Table 1: Wakefield Source in ATF EXT and FF Beamline

No.	Name	Location	Amount
1	Vacuum Port	EXT	15
2	Bellows	EXT	51
3	Vacuum Flange(ICF70)	EXT, FF	196
4	Reference Cavity	EXT, FFT	2
5	Cavity BPM	EXT, FF	24
6	Optical Transition Monitor	EXT	4
7	Vacuum Port (Shield)*	FF	14
8	Bellows (RF shield)*	FF	52
9	Septum magnet chamber	EXT	3
10	Gate Valve*	EXT,FF	3
11	Collimator*	FF	1
12	Wakefield Study chamber*	FF	1

EXT : Extraction beamline, FF : Final focus beamline

*newly calculated, (x)not considered

る軌道変化に起因するビーム強度依存性を示す。

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \omega_1^2 \sigma_A^2 \quad (6)$$

5.1 粒子トラッキングシミュレーション

SAD [15] による粒子トラッキングシミュレーションを行い、ナノメートル極小ビームに対するウェイク場の影響を見積もった。IP 角度揺らぎの分布 (RMS: σ_A) に従うランダムな IP 角度変化 Δy_i^* を仮定し、その角度変化を作り出すようなビームライン入口における位置と角度の変位 ($\Delta y_i, \Delta y_i'$) を転送行列を基に算出した。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 (x, x', y, y', z, E) を作成し、その位置と角度の初期値として加えている。

IPBSM は測定時の干渉縞のスキヤンの関係から複数のバンチのビームサイズを測定し、投影ビームサイズとして測定結果が得られる。ビーム位置、角度の揺らぎの影響でバンチ単体のビームサイズよりも投影ビームサイズの方が大きくなる傾向にある。シミュレーションでは IPBSM によるビームサイズ測定を再現するため、IP までトラッキングした複数バンチを重ね合わせ、射影されたビーム分布から投影ビームサイズを算出した。

各粒子に作用するウェイク場キックはビームの位置オフセットに応じて変化する。各ビームオフセット毎 ($y_{m,i} = \pm 3, 1$ mm step) に計算したウェイクポテンシャルを基に、多項式近似によって内挿した (Eq. 7) [16]。

$$\Delta y'_{\text{WAKE},i}(\bar{y}, z) = \frac{eq}{E} \sum_{j=0} \bar{y}_i^j W_{y,i,j}(z) \quad (7)$$

ある IP 角度揺らぎにおいてビーム強度を変えた時のビームサイズの変化を Fig. 6 に示す。横軸はビーム強度、縦軸は IP における鉛直ビームサイズである。破線は Eq. 5 に基づくフィッティングラインである。また横軸を IP 角度揺らぎ σ_A 、縦軸をビーム強度依存性変数 ω として、IP 角度揺らぎとビーム強度依存性の関係を Fig. 7 に示す。実線は Eq. 6 に基づいたフィッティングラインである。図から IP での角度揺らぎが大きくなるにつれてビーム強度依存性が大きくなっていることが分かる。

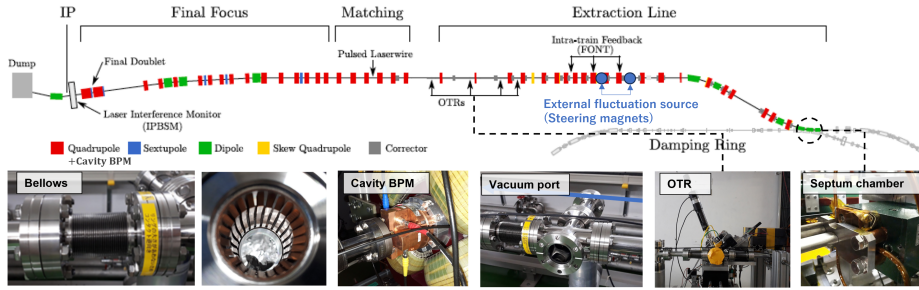


Figure 3: Layout of ATF extraction and final focus beam line.

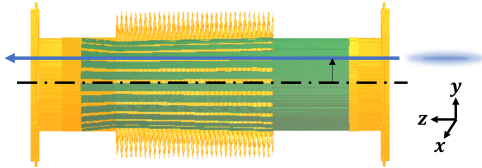


Figure 4: GdfidL calculated model (shilded bellows).

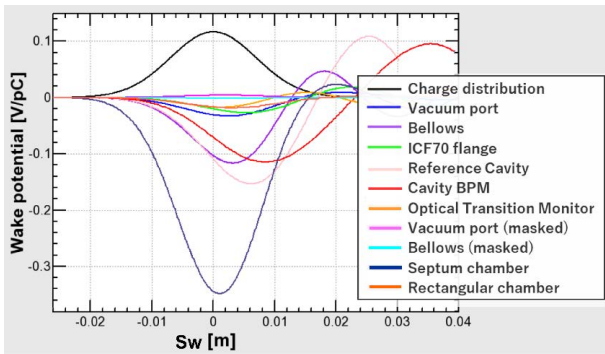


Figure 5: Transverse wakepotentials in ATF2 beamline by GdfidL. Vertical: wake potential, horizontal: distance from bunch center z .

計算結果から IP 角度揺らぎに依存するビーム強度依存性 ω_1 が $0.055 \text{ nm}/1\text{e}+9$ と見積もられた。ウェイク源のミスアライメント量などは考慮していないため、 ω_0 はほぼゼロであった。

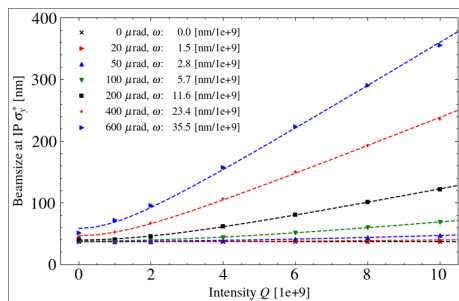


Figure 6: Calculated beam size growth with increasing bunch intensity under different IP angle fluctuation.

5.2 実験的手法による評価

実験では IP でのビームの角度揺らぎの振幅を任意に変化させることができる様、外部揺らぎ源として空芯型ステアリング電磁石 2 台をビームライン上流に設置した (Fig. 3 青丸部)。各電磁石によるキック角を $\theta_{1,2}$ と

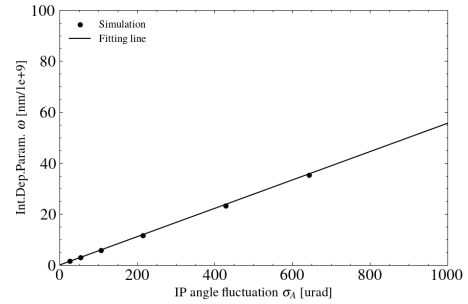


Figure 7: Calculated IP angle fluctuation dependence of bunch intensity dependence.

して、IP での位置変位をゼロとすると Eq. 8 に示すように各電磁石から IP までの転送行列の比から IP 角度変位 $\Delta y'_{IP,i}$ のみを変えるための各電磁石の強さの比を算出することができる。敷設した空芯型ステアリング電磁石は空芯型かつコイルターン数も同じである。故にキック角の比は各電磁石の強さの比と等価である。

IP における位置と角度変位 ($\Delta y_{IP,i}, \Delta y'_{IP,i}$) の測定は各 BPM の位置測定結果の最小二乗法によって求めた (Eq.9)。ここで i はショット数のインデックス、 j は BPM のインデックスを示し、各 BPM にて測定された位置 $y_{msr,j,i}$ 、その平均である $\bar{y}_{msr,i}$ 、位置変位 $\Delta y_{msr,j,i}$ 、各 BPM の位置分解能 σ_j を表す。

$$\theta_2 = -(R_{34, str1 \rightarrow IP} / R_{34, str2 \rightarrow IP}) * \theta_1 \quad (8)$$

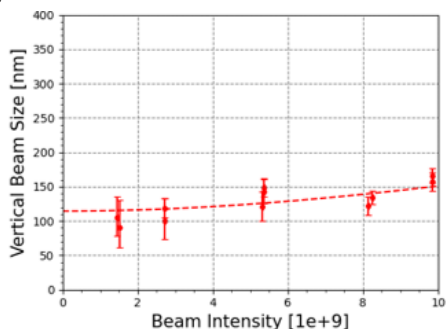
$$\chi^2_i = \sum_j \left(\frac{\Delta y_{msr,j,i} - \Delta y_{cal,j,i}}{\sigma_j} \right)^2 \quad (9)$$

where $\Delta y_{msr,j,i} = y_{msr,j,i} - \bar{y}_{msr,i}$

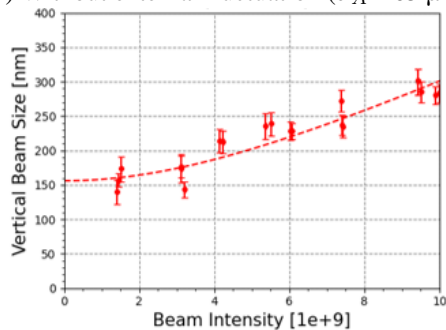
$$\Delta y_{cal,j,i} = R_{33, IP \rightarrow BPM_j} \Delta y_i^* + R_{34, IP \rightarrow BPM_j} \Delta y_i'^*$$

ビーム強度を変えた時のビームサイズの変化を Fig. 8 に示す。上図は外部角度揺らぎなし、下図は外部揺らぎありの場合のビーム強度依存性測定結果である。横軸はビーム強度、縦軸は IP における鉛直ビームサイズを示し、Eq. 5 に基づいてフィッティングを適用した。また横軸を IP 角度揺らぎ σ_A 、縦軸をビーム強度依存性変数 ω として、IP 角度揺らぎとビーム強度依存性の関係を Fig. 9 に示す。Equation 6 に基づいてフィッティングを適用した。IP での角度揺らぎが大きくなるにつれてビーム強度依存性が大きくなっていることが分かる。フィッティング結果から ω_1 が $0.048 \text{ nm}/1\text{e}+9$ であることが明らかとなった。

Table 2 にシミュレーションと実験結果をまとめた。両結果は 15 % の範囲で一致しており、想定しているウェイク場モデルがある程度妥当であることが示された。先行研究においてはシミュレーション結果に対して実験結果が約 2 倍程度大きかった。先行研究では、IP のベータ関数を変更することで IP の角度揺らぎの大きさを調整していた。本実験にて適用した 2 台のステアリング電磁石による外部揺らぎの生成はビーム光学系を変えることなく、同条件の下、IP の角度揺らぎのみを変えることが出来る。またステアリング電磁石の強さを変更することで IP における角度揺らぎの大きさを手軽に調節出来ることから、一連の測定にかかる時間を大きく短縮することが出来た。その結果、ビーム軌道のドリフト等の影響も排除することができ、系統的な誤差の要因を極力排した測定を実現した。IP の角度揺らぎとビーム強度依存性の関係からナノメートル極小ビームに対するウェイク場の影響を定量化することに成功し、理解を深めることが出来た。



(A) Without external fluctuation ($\sigma_A : 63 \mu\text{rad}$)



(B) With external fluctuation ($\sigma_A : 512 \mu\text{rad}$)

Figure 8: Measured beam size growth with increasing bunch intensity.

Table 2: Wakefield Source in ATF EXT and FF Beamline

	Intensity Dep. Param. ω_1 [nm/1e+9/ μrad]
Simulation	0.055
Experiment (2023/04)	0.048 ± 0.002

6. まとめ

ATF のナノメートル極小ビームはビーム強度増加に伴い収束点における鉛直ビームサイズが増大するビーム強度依存性を持つ。ウェイク場が主要因であると考えられ

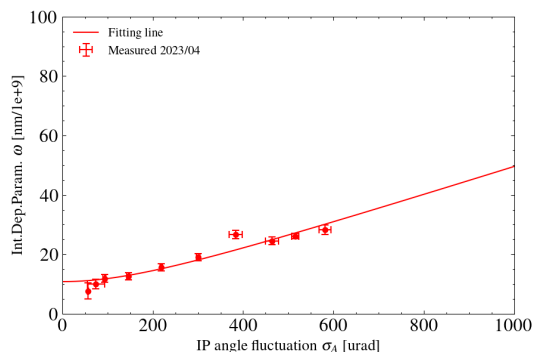


Figure 9: Measured IP angle fluctuation dependence of bunch intensity dependence.

ている。ナノメートルオーダーまで収束された極小ビームでは小さなキックの影響もビームサイズの変化として現れるため、安定な極小ビームの生成のために各ウェイク源、ビームライン全体としての更なる理解が重要である。ATF は精密測定可能なモニターを有し、様々な試験装置も導入可能であることからウェイク場の影響を精密に研究する最適な場と言える。本研究ではビームへの影響が小さいと思われるウェイク源などを考慮したより実際のビームラインに近いウェイク場モデルを構築し、シミュレーションと実験結果を比較することでビームライン全体のより詳細なビーム強度依存性の評価を行った。特に IP におけるビーム角度揺らぎとビーム強度依存性の関係に注目することでナノメートル極小ビームに対するウェイク場の影響の定量化を行った。シミュレーションと実験結果は 15 % の範囲で一致しており、構築したビームライン全体でのウェイク場モデルがある程度妥当であることが示された。

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] T. Okugi *et al.*, PASJ20,TFSP16 (2023).
- [2] K. Kubo *et al.*, Phys.Rev.Lett.88,194801 (2002).
- [3] Y. Honda *et al.*, Phys.Rev.Lett.92,054802 (2004).
- [4] T. Shintake, NIM A 311, p. 455 (1992).
- [5] T. Okugi *et al.*, LINAC2016, MO3A02 (2016).
- [6] T. Okugi *et al.*, PASJ16, FRPI023 (2019).
- [7] Y. I. Kim *et al.*, Phys.Rev.Accel.Beams 15,042801 (2012).
- [8] J. Snuverink *et al.*, Phys.Rev.Accel.Beams 19, 091002 (2016).
- [9] GdfidL Home Page. <http://www.gdfidl.de/>
- [10] "ATF Report 2020", 2020. https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_Review_Report_2020_0831.pdf
- [11] GdfidL Home Page. <http://www.gdfidl.de/>
- [12] N. Fuster, NIM A 917, p. 31 (2019).
- [13] Y. Abe *et al.*, PASJ19, TUOB02 (2022).
- [14] Y. Abe *et al.*, PASJ18, TUOB06 (2021).
- [15] SAD Home Page. <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [16] Y. Abe *et al.*, IPAC22, MOPOTK043 (2022).