

KEK-ATF における極小ビームに対する Wakefield の影響評価

EVALUATION OF THE EFFECTS OF WAKEFIELD TO 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,B)}, Kiyoshi Kubo^{A,B)}, Nobuhiro Terunuma^{A,B)}
^{A)}SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies
^{B)}KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

ATF has studied the final focus technology to realize the nanometer small beam required for the International Linear Collider (ILC). In 2016, the beamline was upgraded to reduce the effect of the wakefield and the beam intensity dependence was mitigated. In order to produce the stable small beam, we are now evaluating the effect of the wakefield on the small beam. In the previous studies, we made a model to reproduce these beamlines and confirmed the effect of the wakefield on the small beam. As a result, it was shown that the influence of vacuum flanges and vacuum bellows with RF shields interpolated was significant, but the analytical and experimental results still do not agree quantitatively. One of the possible causes is the insufficient analysis of the wakefield of flexible components such as vacuum bellows. The further upgrading of the ATF beamline is now under consideration, and the further understanding of each wake source is important for the realization of the modification plan to reduce the wakefield. Therefore, we are studying to confirm the influence of the wakefield based on the beam test and to optimize the calculation model. In this report, we describe the progress and current status of the work.

1. はじめに

KEK の先端加速器試験施設 (ATF, Fig. 1) 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) 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が行われている [3,4]。2016 年には目標鉛直ビームサイズ 37 nm に対して 41 nm まで到達していることを確認した [5]。ATF の極小ビームは Wakefield を主たる原因とするビーム強度依存性 (Fig. 2) を持つ。2016 年 11 月、ビーム強度依存性に対する Wakefield の影響を調べるため、ATF 最終収束ビームラインの大幅な改造が行われた。ビームライン上から大幅にウェイク源を取り除き、一部真空部品品の改良を行ったところビーム強度依存性は緩和された。

安定な極小ビーム生成のため、wakefield の影響理解は重要な研究課題である。先行研究において、ビームへの影響が強いと考えられる主なウェイク源に関する影響評価が行われた [7,8]。現状、解析と実験結果から定量的に一致しないという課題があり、考慮していない wakefield 源の影響ではないかと考えられている。取り出しビームライン上にある wakefield 源や対策が施された真空部品品のビームへの影響は小さいとされ、解析には含まれていなかった。そこで本研究では、今まで考慮されていなかった wakefield 源の極小ビームへの影響を 3 次元電磁場解析ソフト GdfidL [9] と粒子計算コード SAD [10] を用いて確認した。ATF にて追及する極小ビームには鉛直方向の短距離 Wakefield が強い影響を持つと考えられるため、本旨ではこれらの計算結果とビームへの影響に関して報告する。

2. WAKEFIELD とビームの運動

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。構造体の形状の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 (wakefield)。便宜的に Fig. 3 に示す電磁場を励起するビーム (誘導ビーム) と電磁場の作用を受ける荷電粒子 (試験粒子) から成る物理モデルを考える。誘導ビームはある分布を持つ線状電荷として仮定し、その中心から後ろに s 離れた所に試験粒子がいる。この時、試験粒子が受ける Wakefield によるキックをウェイクポテンシャルとして表す (Eq. (1))。

$$\frac{1}{q_1} \int q_2 (\mathbf{E} + c\mathbf{e}_z \times \mathbf{B}) dz \equiv W_{\text{pot},x/y} \quad (1)$$

励起される Wakefield のキックが近似的にビームの位置オフセットに比例するとして、Wakefield によるキックを粒子の角度変化として表す (Eq. (2))。 $W_{\text{pot}|y=1}$ はウェイクポテンシャルを線形近似した際の傾きである。 $\langle y \rangle$ はビームの重心位置を表す。転送行列から仮想衝突点 (IP) における粒子の状態変化を算出する (Eq. (3))。粒子の角度変化を $\Delta y'_{\text{wake}}$ として、仮想衝突点 (IP) における粒子の位置の変化 Δy_{IP} は Eq. (4) のように表される。

$$\Delta y'_{\text{WAKE}} = p_y/p_0 = \frac{q_1}{E} W_{\text{pot}|y=1} \langle y \rangle \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta y_{\text{IP}} \\ \Delta y'_{\text{IP}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta y'_{\text{WAKE}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\text{where } R_{12} = \sqrt{\beta_{\text{wake}}\beta_{\text{IP}}} \sin \Delta\phi_{\text{IP}}$$

$$\Delta y_{\text{IP}} \simeq \sqrt{\beta_{\text{wake}}\beta_{\text{IP}}} \sin \Delta\phi_{\text{IP}} \frac{q_1}{E} W_{\text{pot}|y=1} \langle y \rangle \quad (4)$$

* abeyuki@post.kek.jp

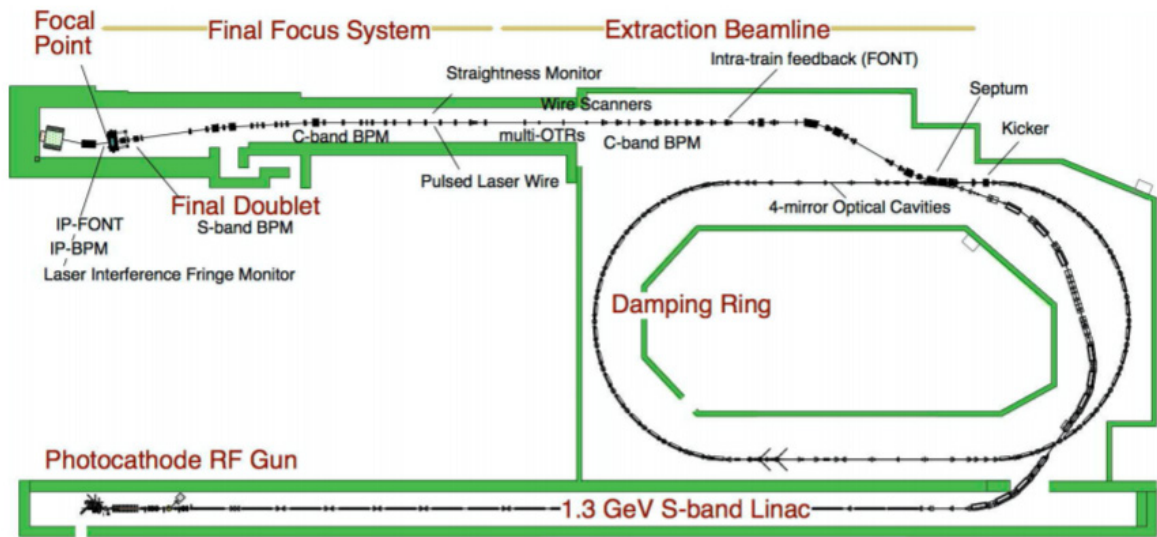


Figure 1: ATF beamline layout.

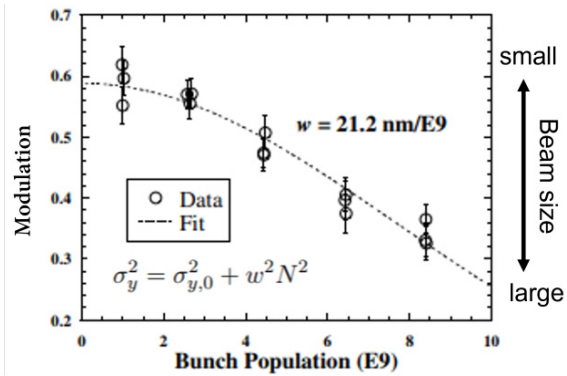


Figure 2: Beam size growth of nano meter small beam by intensity dependence [6].

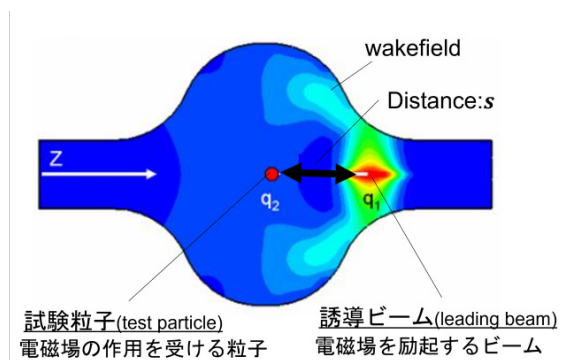


Figure 3: Wakefield phenomena physical model [11].

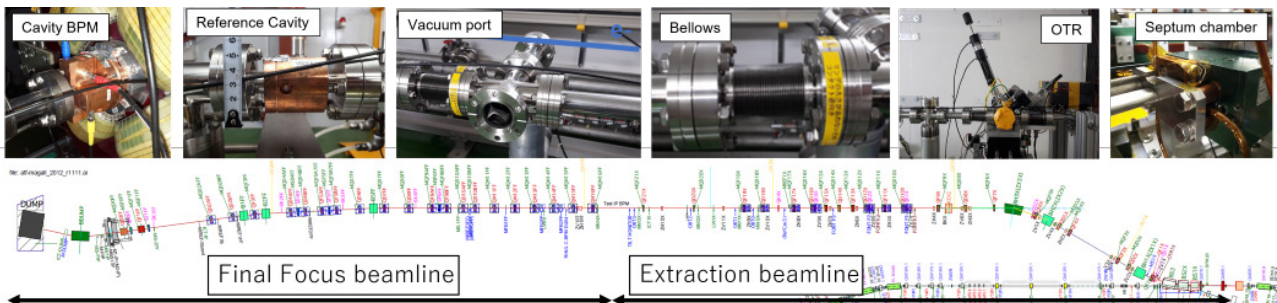


Figure 4: Wakefield source in ATF beamline.

3. WAKEFIELD の計算

3.1 ATF ビームラインの Wakefield 源

Figure 4 と Table 1 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。それらの実際の形状をより再現したモデルを構築 (Fig. 5) し、3次元電磁場解析ソフト GdfidL を用いてビーム通過時に励起される wakefield の計算を行った。表中の項目 1 から 6 は先行研究において既に計算されているが、近似的な計算モデル (3D モデル) を用いていた。項目 7 から 10 は新たに計算した wakefield 源である。2016 年のビームラインの改造の際には最終収束ビームラインの真空部品の内部にシールドが取り付けられた。計算時は正規分布を取るパンチ長 7.0 mm の誘導ビームが構造中心から 1 mm のオフセットを持って通過すると仮定し、計算している。

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	237
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	37
9	Septum magnet chamber	EXT	3
10	Rectungular chamber	EXT	4

EXT : Extraction beamline, FF : Final focus beamline

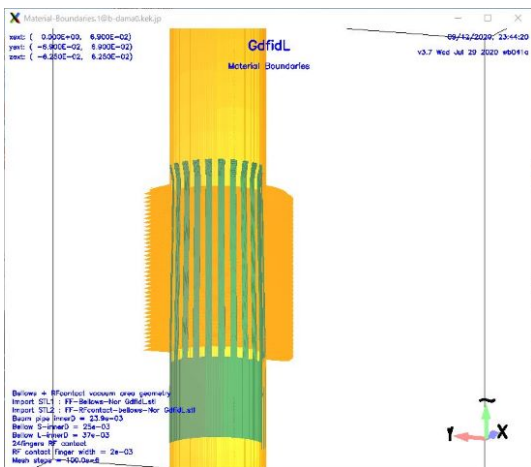


Figure 5: Wakefield calculation model (Bellows with RF shield).

3.2 Wakefield の計算結果

Figure 6 に得られた計算結果を示す。縦軸はウェイクポテンシャル (鉛直)、横軸は誘導ビームの中心からの距離を示す。それぞれ取り出しビームラインの wakefield 源、最終収束ビームラインのウェイクポテンシャルの計算結果を示す。比較のため、ビームオフセットは 1 mm としている。また、ビームオフセット $y = 1$ mm 時の各 wakefield 源のウェイクポテンシャルの最大値を Table 2 に示した。

以上の結果から、wakefield 対策を施された最終収束ビームラインの wakefield 源の方が励起される wakefield が小さいことが分かる。特に、ベローズに関しては 1/100 程度励起される wakefield が抑制されていることが分かる。一方、取り出し部に実装されているセプタム電磁石にて励起される電磁場が非常に大きい事が分かる。先行研究においてビームへの影響の強い wakefield 源として議論されてきた CavityBPM と比べると、その最大値は 4 倍程度大きい。

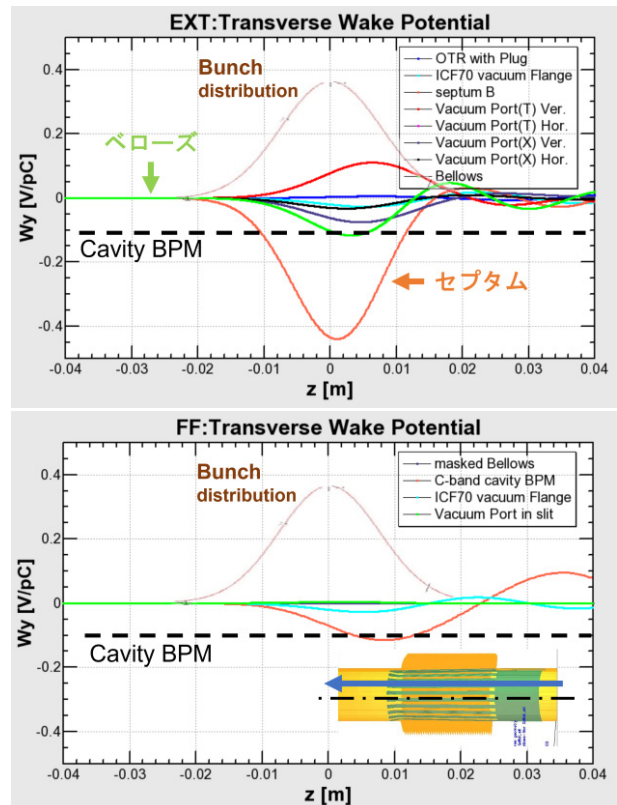


Figure 6: Wakepotential of wakefield sources. Upper figure: extraction beamline, Lower figure: final focus beamline. Vertical: wake potential(vertical) at beam offset $y=1$, Horizontal: distance from center of leading beam.

Table 2: Maximum Wakepotential at Beam Offset $y=1$ mm

Wakefield source	Location(Amount)	Wakepotential (Max. at $y=1$)
Septum magnet chamber	EXT (3)	0.440
Rectangular chamber	EXT (4)	0.018
OTR	EXT (4)	0.021
Vacuum port	EXT (0)	0.027
Bellows	EXT (42)	0.117
Vacuum flange	EXT (102)	0.028
Cavity BPM	FF (24)	0.115
Reference cavity	EXT(1) FF(1)	0.154
Vacuum port (sheild)	FF (11)	0.004
Bellows (RF sheild)	FF (56)	0.001
Vacuum flange	FF (102)	0.028

4. 極小ビームに対する WAKEFIELD の影響

4.1 評価方法

Wakefield のビームへの影響は粒子トラッキング計算コード SAD を用いて確認した。Figure 7 に SAD の粒子トラッキングによる計算の流れを示した。

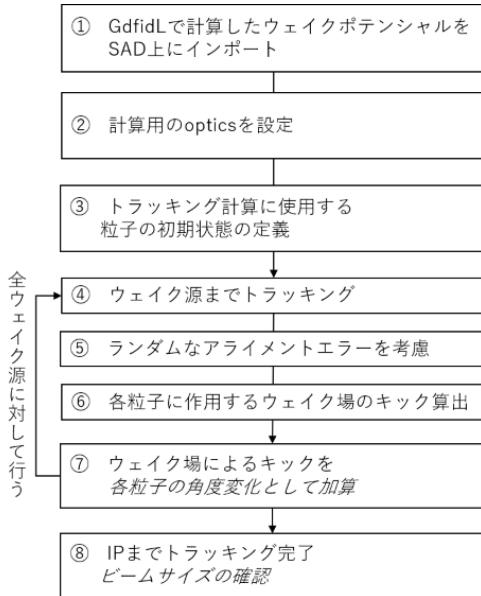


Figure 7: Calculation flow of wakefield effect evaluation by SAD.

GdfidLにて計算したウェイクポテンシャル (Fig. 6) を SAD にインポートし、多粒子モデルの粒子トラッキング計算を行う。各 wakefield 源の地点で Eq. (4) に基づ

いた角度変化を作用させた際の仮想衝突点におけるビームサイズの変化を確認する。計算には Fig. 8 に示す ATF の設計ビーム光学系を用いた。

各 wakefield 源のミスアライメントはビームに作用するキック量に大きく影響する。計算モデルに反映する必要があるが、本研究においては測量結果を参考にランダムなミスアライメントが一様に生じていると仮定した。CBPM は 0.3 ± 0.3 mm、真空排気ポート、ペローズに関しては高さ方向に ± 1.0 mm のランダムなミスアライメントがあると仮定した。真空フランジに関しては各ウェイク源の端部に溶接されている。そこで真空フランジのミスアライメント量は装着されているそれぞれのウェイク源に依存すると仮定した。ランダムな要素を含むため計 250 回計算し、平均のビームサイズと標準偏差を基に影響評価を行った。

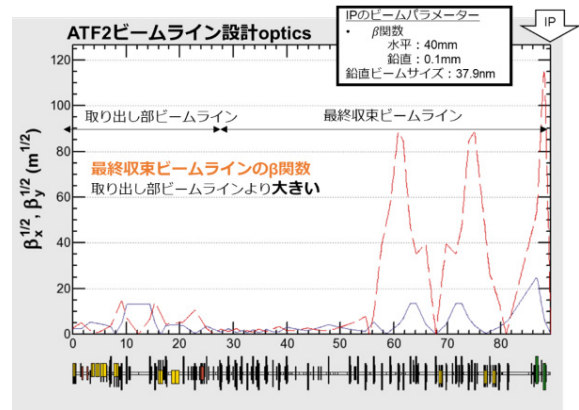


Figure 8: Design optics of ATF beamline.

4.2 評価結果

得られた計算結果を Table 3 に示す。また、全 wakefield 源を考慮した際に得られるビームの分布を Fig. 9 に示す。取り出し部ビームライン上の wakefield 源を考慮した場合は設計ビームサイズに対して 4.7% ビームサイズが増加する。一方、最終収束ビームライン上の wakefield 源を考慮した場合は設計ビームサイズに対して 38.3% もビームサイズが増加する。Figure 6 において、取り出し部ビームラインにて励起される wakefield が大きいという結果が得られたが、ビームへの影響は最終収束ビームラインにおける wakefield 源の影響が明らかに大きいことが計算上確認できた。中でも最終収束ビームラインにおける真空フランジやペローズの影響が大きい事が分かる。Eq. (4) から、wakefield のビームへの影響は各 wakefield 源におけるウェイクポテンシャルとベータatron関数で決まる。また、各 wakefield 源のビームラインへのインストール数も影響する (Eq. (5)、[12])。以上を踏まえると、ベータatron関数が大きい最終収束ビームラインに多くインストールされている真空フランジやペローズの影響が大きい事が説明できる。ただし、本研究にて計算したペローズは変形がない状態を仮定している。実際に励起される wakefield は計算よりも大きくなる事が予想される。変形を考慮したペローズにて励起される wakefield については現在、確認を進めている。

$$\Delta y_{\max\text{IP}} \propto W_{\text{pot}}|_{y=1} \langle y \rangle \sqrt{\sum_i \beta_{\text{WAKE},i}} \quad (5)$$

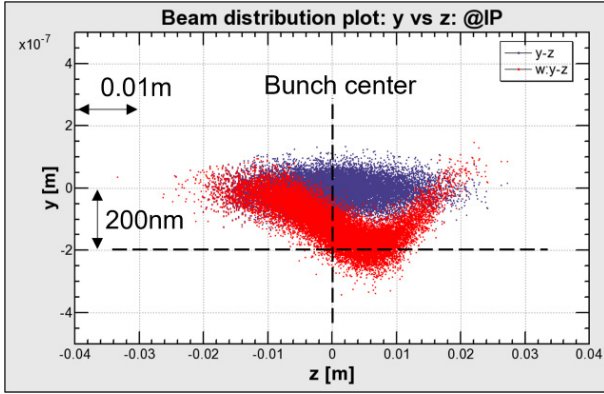


Figure 9: Beam distribution at ATF-IP. Particle Tracking result by SAD. Vertical: horizontal position y , Horizontal: longitudinal position z . Blue: no wake, Red: include all wakefield effects.

Table 3: Calculation Results of Beam Size Growth by Wakefield at FF

Wakefield source	Mean beam size \pm Standard deviation	unit
No wake (Design)	37.9	nm
Septum magnet chamber	37.8 ± 0.1	nm
Rectangular chamber	37.9 ± 0.004	nm
Vacuum port (shield)	37.9 ± 0.2	nm
Bellows (RF shield)	38.4 ± 0.7	nm
Vacuum flange	37.9 ± 0.2	nm
EXT	38.4 ± 0.7	nm
All wakefield source		
Cavity BPM	40.8 ± 3.2	nm
Reference cavity	37.8 ± 0.014	nm
Vacuum port	37.8 ± 0.007	nm
Bellows	40.9 ± 2.9	nm
Vacuum flange	43.8 ± 5.4	nm
FF	52.4 ± 11.0	nm
All wakefield source		
EXT+FF	54.0 ± 16.6	nm
All wakefield source		

5. まとめ

2016年に目標鉛直ビームサイズ 37 nm に対して 41 nm を到達した ATF の極小ビームは wakefield を主たる原因とするビーム強度依存性を持つ。先行研究において、ビームへの影響が強いと考えられる主なウェイク源に関する影響評価が行われ、定量的理解が進んだ一方で解析と実験結果から定量的に一致しないという課題が残った。考慮していない wakefield 源の影響ではないかと考えられていたため、今まで考慮されていなかった wakefield 源の極小ビームへの影響を 3次元電磁場解析ソフト GdfidL と粒子計算コード SAD を用いて確認した。その結果、取り出し部ビームラインにおける wakefield のビームへの影響は小さく、最終収束ビームラインにおける wakefield の影響が大きいことを確認した。最終収束ビームライン上の wakefield 源を考慮した場合、設計ビームサイズに対して 38.3% もビームサイズが増加する。一方、取り出し部ビームライン上の wakefield 源を考慮した場合は設計ビームサイズに対して 4.7% の増加であった。取り出し部ビームラインの各 wakefield 源にて励起される wakefield は最終収束ビームラインと比べ大きい、ビームへの影響は小さいと結論付ける。

最終収束ビームラインにおいて真空フランジやペローズの影響が大きい事が示された。特にペローズに関しては変形を考慮しておらず、過小評価の可能性も高い。現在、変形を考慮したペローズの検討と wakefield の影響をより低減可能な構造の検討を進めている。2020年のATF国際レビューを開催し、今後の ILC 技術開発の提案内容さらに ILC 以外の技術開発への ATF 利用について審議した。最終収束系ビームラインの高度化改造計画 (ATF3 計画) においてこれら真空フランジやペローズの改造も検討されている。

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] "ATF2 Proposal", KEK Report 2005-2 (2005).
- [4] N. Terunuma *et al.*, "Nanobeam R&D at the KEK Accelerator Test Facility (ATF)", PASJ18, WEP059,2021;
- [5] T. Okugi *et al.*, Proceedings of LINAC2016(2016), MO3A02.
- [6] "ATF Report 2020", 2020; https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_Review_Report_2020_0831.pdf
- [7] J. Snuverink *et al.*, PHYS.REV.ACCEL.BEAMS 19, 091002 (2016).
- [8] T. Okugi *et al.*, "INTENSITY DEPENDENCE OF ATF2 VIRTUAL IP BEAM SIZE", PASJ16, FRPI023, 2019.
- [9] GdfidL Home Page;<http://www.gdfidl.de/>
- [10] SAD Home Page;<http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [11] http://www.mweda.com/cst/cst2013/mergedProjects/CST_PARTICLE_STUDIO/special_overview/special_beams_wakefield_solver_overview.htm
- [12] K. Kubo, "ILC new luminosity design and small beam experiments at ATF", presentation at ALCW2018 (2018)