

# ATF-DR ターンバイターンモニターを用いた $\beta$ 関数の測定 $\beta$ FUNCTION MEASUREMENTS BY TURN-BY-TURN MONITORS AT ATF-DR

阿部優樹 \*<sup>A)</sup>、久保浄 <sup>A, B)</sup>、奥木敏行 <sup>A, B)</sup>、照沼信浩 <sup>A, B)</sup>  
Yuki Abe\*<sup>A)</sup>, Kiyoshi Kubo<sup>A, B)</sup>, Toshiyuki Okugi<sup>A, B)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup>SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

<sup>B)</sup>KEK, High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

The damping ring (DR) of the Accelerator Test Facility (ATF) at KEK generates low emittance beam, required by ATF2 project realizing nano-meter beam. Accurate measurement of  $\beta$  functions in DR is important as a diagnosis of the ring optics and for producing extremely small emittance beam. The  $\beta$  functions at a quadrupole magnets are evaluated from change of tunes due to strength (k-value) change of the magnet (Dtune-Dk method), while strength of each magnet can be controlled independently. However, this process is time consuming. Also, the ring optics can be disturbed during the measurement due to hysteresis of the magnets. Faster and non-invasive method is desirable. Since turn-by-turn (TBT) beam positions can be measured at all beam position monitors in ATF DR, we have setup a tool evaluating the  $\beta$  functions from harmonic analysis of the TBT data. In this report, we describe the method and comparison of the measured results with Dtune-Dk method.

## 1. はじめに

KEKの先端加速器試験施設(ATF)では国際リニアコライダー(ILC)において必要とされる極小ビーム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[1]。極小ビームを実現する上で必要となる低エミッタンスビームはATFのダンピングリング(DR; Fig. 1, Table 1, 2)で生成される[2, 3]。リング全体のoptics診断は低エミッタンスビームを生成する上で重要な事である。現在、ATFで使用されているDtune-Dk法(次章参照)による測定は電磁石のリターンヨークのヒステリシ

ス特性のためDR全周の $\beta$ 関数を測定する場合、opticsを乱してしまう可能性が有る。加えて、8時間程度の時間を要する。このようなoptics診断に加えて非線形磁場の影響評価などのスタディを行う場合、迅速に全周の $\beta$ 関数が測定できるツールが必要となる。ATF-DRのボタン電極型BPM(96台)ではターンバイターン(TBT)測定が可能であるため、TBTモニターと調和解析を用いた迅速な $\beta$ 関数の測定が出来るツールの整備を行う事にした。本論文では、TBTデータの振幅情報から $\beta$ 関数を算出する方法を述べ、Dtune-Dk法の測定結果との比較とこれら作業の進捗について報告する。

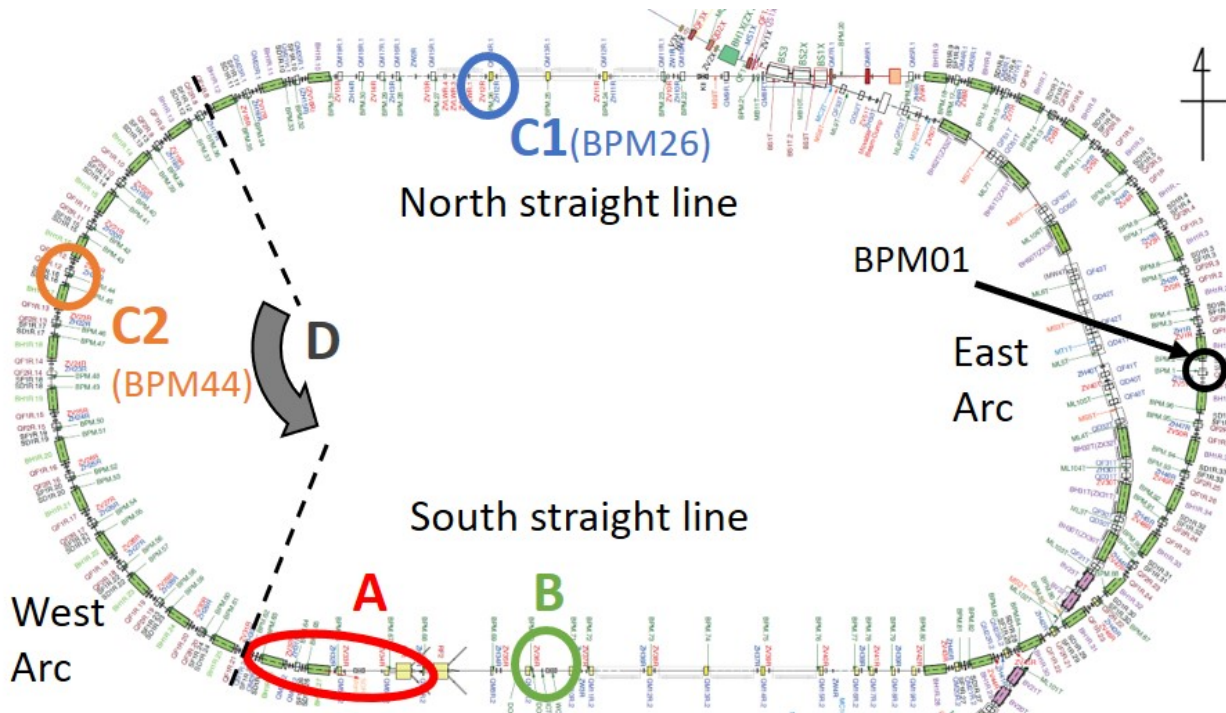


Figure 1: ATF-DR layout.

Table 1: ATF-DR Beam Parameter

Parameter	Value
Beam Energy [GeV]	1.3
Beam repetition frequency [Hz]	3.12
Revolution frequency [MHz]	2.16
RF frequency [MHz]	714
Circumference [m]	138.5
Betatron tune (horizontal)	≈ 15.2
Betatron tune (vertical)	≈ 8.6
Synchrotron tune	≈ 0.005

Table 2: DR Installed Equipments

Component	Amount
Bending magnet (combined function)	36
Quadrupole magnet	98
Sextupole magnet	67
BPM	96

## 2. DTUNE-DK 法による $\beta$ 関数測定

Dtune-Dk 法は 4 極電磁石の強さ  $k$  を  $\Delta k$  変えたときのチューン  $\nu$  の変化量  $\Delta\nu$  から  $\beta$  関数を算出する方法である。ここで強さ  $k$  [1/m] とは磁場勾配  $g$  [T/m]、有効磁場長  $L$  [m]、ビームエネルギー  $E_{\text{beam}}$  [eV]、光速  $c$  [m/s] から  $k = gLc/E_{\text{beam}}$  と算出される値である。その関係は Eq. 1 のように近似的に表すことが可能である。

$$\beta = 4\pi \frac{\Delta\nu}{\Delta k} \quad (1)$$

ビームサイズモニター地点での  $\beta$  関数の測定は周辺 5 台の 4 極電磁石を用いて行う (Fig. 1A)。各電磁石の強さ  $k$  を 1 台ずつ変え、4 極電磁石への印加電流  $I_i$  とその時のチューン  $\nu_i$  を各 5 点取得する。印加電流  $I_i$  [A] は磁場測定結果を基に磁場勾配  $g_i$  [T/m] へ、磁場勾配は定義から 4 極電磁石の強さ  $k_i$  [1/m] に変換可能である。得られたデータ  $(k_i, \nu_i)$  は比例関係にあると考えられる。比例係数  $A$  を最小二乗法により算出し、 $\beta = 4\pi A$  から  $\beta$  関数を算出する。Figure 2 に 2020 年 6 月のビーム運転時に測定された結果を示す。各 4 極電磁石地点での  $\beta$  関数を点で示し、計算コード SAD [4] によってモデル上の  $\beta$  関数をフィッティングした結果を実線で示す。黒線が水平方向の  $\beta$  関数  $\beta_x$ 、赤線が垂直方向の  $\beta$  関数  $\beta_y$  である。この SAD によるフィッティング結果からビームサイズモニター地点での  $\beta$  関数を推定している。

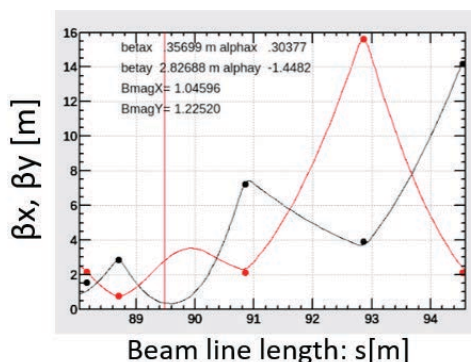


Figure 2: Dtune-Dk results @2020/06. Red: horizontal  $\beta$  function, Black: vertical  $\beta$  function. Points:  $\beta$  function measured at each Q magnets, Lines: fitting result given by SAD.

## 3. TBT データと調和解析による $\beta$ 関数測定

TBT 測定データを用いて  $\beta$  関数を算出する方法 (以降、TBT 法と呼ぶ) は先行研究 [5,6] にて提案されている。今回使用するのは TBT 測定データに対して調和解析を行う事で得られる各 BPM での振幅情報から  $\beta$  関数を算出する方法である。

ATF-DR には全周に渡って 96 台のボタン電極型 BPM が実装されており、COD 測定に加えて TBT 測定が可能なシステム構成 (Fig. 3, 4) となっている。この BPM システムで TBT 振動を観測するために ATF-DR の南直線部 (Fig. 1 中 B) に実装されているストリップライン型キッカー (Fig. 5) を使用してビームを励振した。最大 6500V を印加できるパルス電源 (TSUJICON, T1960-01) を使用している。パルス幅は 200ns 程度であり、ビーム周回周期 452ns より十分短い。

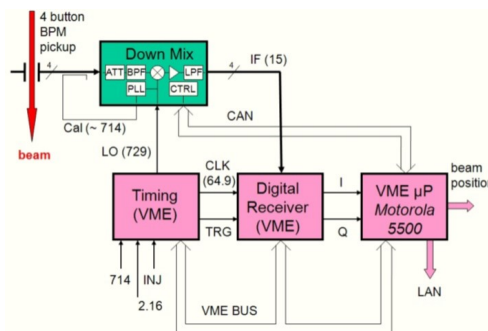


Figure 3: DR BPM system overview. [7]

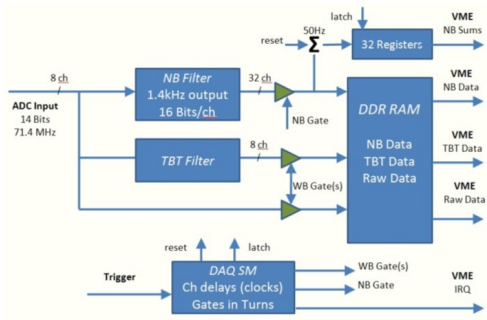


Figure 4: Block diagram of the ATF digitizer firmware. [7]

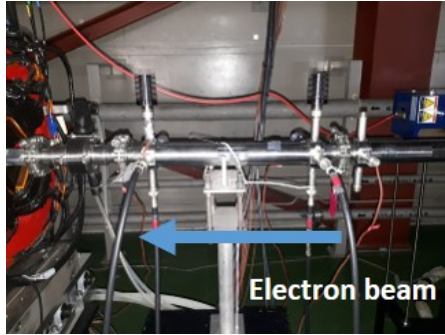


Figure 5: Stipline kicker installed in ATF-DR.

励振のタイミングに合わせて TBT データを取得する。今回は TBT データとして 10shot 分を平均化したものを使用している。取得した TBT データから今回の解析に不要な成分 (DC 成分、励振前のターンの情報、測定不可能な BPM など) を取り除く事で Fig. 6 に示すような振動データが得られる。Figure 1 の C1 (BPM26)、C2 地点 (BPM44) に実装されている BPM の TBT データを一例に示した。この振動データから調和解析によって各 BPM 地点での振幅情報  $x_i$  を取得する (Fig. 7)。今回、調和解析手法として NAFF [8] を採用した。1000 ターン程度の少ないターン数でも一般的な調和解析であるフーリエ変換より高い精度が得られる事が先行研究 [5, 9, 10] により示されている。解析コードを python で記述した。そのため、CERN が開発した python 版の NAFF モジュールである PyNAFF [11] を使用した。

水平方向のベータatron振動を以下の Eq. 2 で考える。n はターン数である。

$$X_i = \sqrt{C_x \beta_x} \cos(2\pi n \nu_x + \phi_x) \quad (2)$$

ここで  $\beta$  関数と調和解析から得られた振幅の 2 乗  $x_i^2$  ( $i$  は BPM No.) に Eq. 3 の様な比例関係があると考える。

$$\beta_i = f_{\beta_x} x_i^2 \quad (3)$$

この係数  $f_{\beta}$  を各 BPM 地点の基準となる  $\beta$  関数との最小二乗法から算出する。係数  $f_{\beta}$  を算出する上で必要となる基準の  $\beta$  関数は今回、Dtune-Dk 法の測定結果から推定される各 BPM 地点での  $\beta$  関数を使用した。TBT 法による測定と Dtune-Dk 法による測定結果の差の二乗和が最小になるように係数  $f_{\beta}$  を決めた。最後に Eq. 3 に従い  $\beta$  関数を算出する。鉛直方向も同様の手順で  $\beta$  関数を求める。

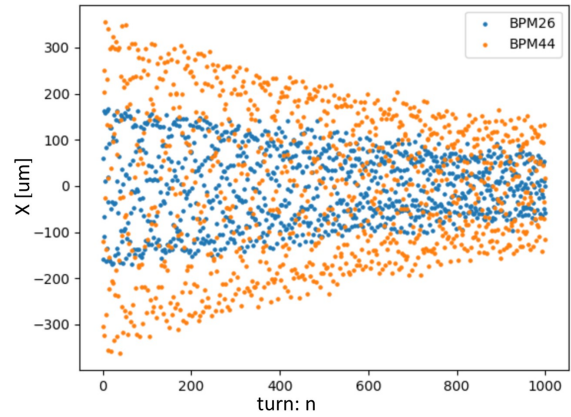


Figure 6: Example of horizontal TBT data. BPM26 installed in straight section. BPM44 installed in arc section.

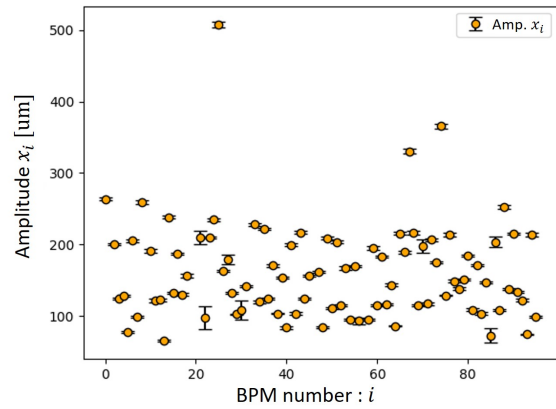


Figure 7: Amplitudes given by NAFF from TBT data of all BPMs.

#### 4. 測定・解析結果

2020 年 6 月のビーム運転において Dtune-Dk 法による  $\beta$  関数の測定と TBT 測定を行った。各 BPM 地点での  $\beta$  関数を、近傍の 2 個の 4 極電磁石での Dtune-Dk 法の測定結果に基づいて、4 極磁石の強さ  $k$  が正しいと仮定した短い区間でのフィッティング (SAD を使用) により算出した。その上で、ATF-DR 西アーク部 (Fig. 1 区間 D) での  $\beta$  関数測定結果について議論する。計算にはアーク部の基本セル (Fig. 8) を使用し、各 4 極電磁石地点で測定された結果を再現するようにフィッティングを行った。ここでフリーパラメーターは入口の Twiss パラメーター  $\beta$ 、 $\alpha$  とした。また、それぞれの電磁石の強さは運転時の設定電流からの計算値を使用した。なお解析区間のアーク部基本セルは 4 極電磁石 2 台 (QF2R・QF1R)、機能結合型主偏向電磁石 1 台 (BH1R)、6 極電磁石 2 台 (SF1R・SD1R)、鉛直/水平方向のステアリング電磁石各 1 台 (ZV1R・ZH1R)、BPM2 台から構成される。

フィッティング結果の一例を、BPM44 が含まれるセル (Fig. 1 の C2) について Fig. 9 に示す。横軸はビームライン長  $s$  [m]、縦軸に  $\beta$  関数 [ $m^{1/2}$ ] を示す。横軸に調和

解析より得られた振幅の2乗  $x_i^2$ 、縦軸に SAD で算出した各 BPM での  $\beta$  関数推定値  $\beta_{\text{model}}@BPM$  と最小二乗法により得られたフィッティングラインを Fig. 10 に示す。概ね線形な関係性を満たしており、フィッティングライン近傍にデータが分布している。

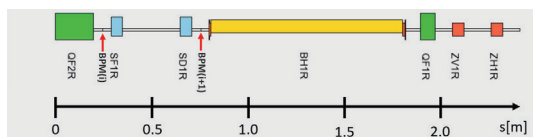


Figure 8: Basic 1 cell optics at arc section in ATF-DR. Combined function bending magnet (BH1R), quadrupole magnet(QF2R,QF1R), sextupole magnet(SF1R, SD1R), steering magnet(ZV1R, ZH1R).

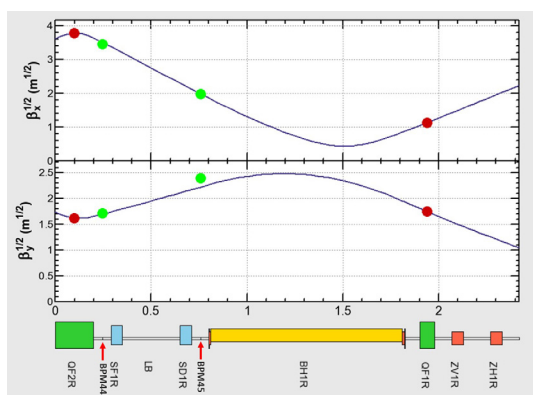


Figure 9: SAD fitting result to Dtune-Dk result. Red dot: measured value(Dtune-Dk), Green dot:  $\beta$  function given by TBT method, Blue line: fitting result give by SAD. Upper graph: horizontal  $\beta$  function, Lower graph: vertical  $\beta$  function.

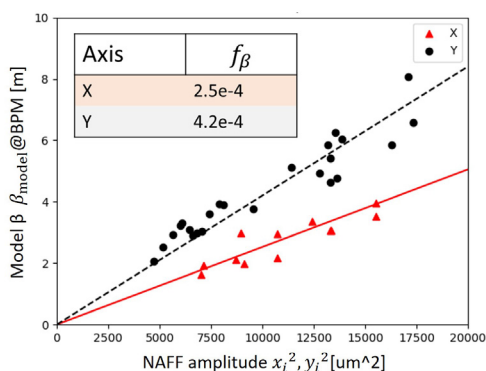


Figure 10: Model  $\beta$  given by SAD vs amplitude  $x_i^2$ (horizontal),  $y_i^2$ (vertical) given by NAFF. Red triangle: horizontal, Black dot: vertical. Line: fitting line of horizontal, Dashed line: fitting line of vertical.

2020年6月の運転の際に得られたDR西アーク部の $\beta$ 関数測定結果を Fig. 11 に示す。横軸はビームライン長 [m]、縦軸は  $\beta$  関数 [ $m^{1/2}$ ] を示し、破線は SAD から得られたフィッティング結果を、点は TBT 法より得られた  $\beta$  関数である。TBT 法による  $\beta$  関数の測定結果は水平方向  $\beta_x$  に関しては Dtune-Dk 法と一致している。一方、鉛直方向  $\beta_y$  に関しては一致していない。Figure 12 に各 BPM 地点での SAD によって求めた  $\beta$  関数と TBT 測定結果の残差  $\Delta\beta/\beta$  を示す。ここで、残差  $\Delta\beta/\beta = \{\beta_{\text{model}} - \beta_{\text{TBT}}\}/\beta_{\text{model}}$  としている。ATF-DR 西アーク部において、TBT 法と Dtune-Dk 法の測定結果は概ね  $|\Delta\beta/\beta| \leq 0.2$  の範囲では一致することを確認した。しかしながら、 $\beta$  関数の測定法として実装するためにはこの残差は大きい。測定の系統誤差や計算に用いた4極電磁石の強さ  $k$  が一致していないことが原因として考えられる。TBT 法においては  $\beta$  関数と調和解析から得られる振幅  $x_i$  の間に Eq. 3 の関係があると考えた。しかし、TBT 法の鉛直方向においては切片を考慮した方がフィッティング残差が小さくなる (Fig. 13, 14)。この事からも得られた結果には系統的な誤差が含まれていると言える。現在、原因については調査中である。今後、電磁石の電流値の読み取り・出力値の誤差、 $\beta$  関数の高次共鳴、非線形成分によるチューンシフトの影響などを確認する。

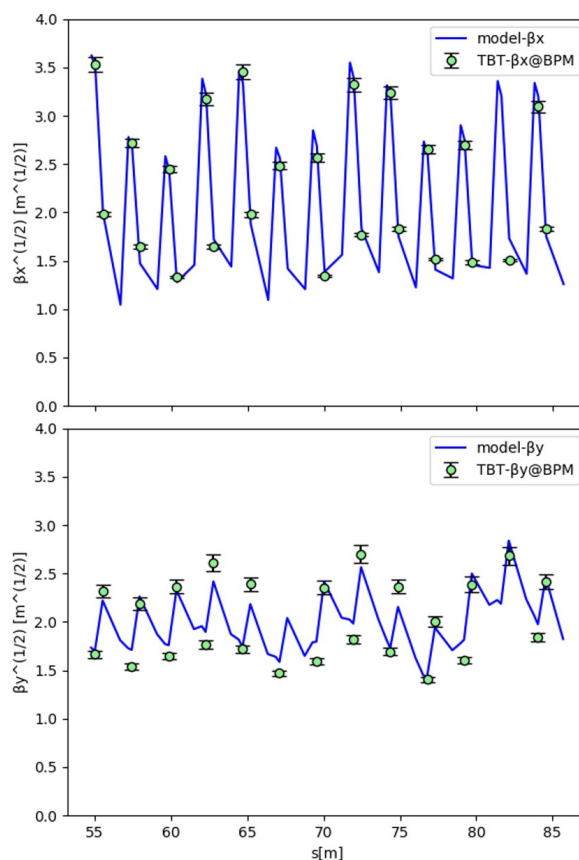


Figure 11: Measured  $\beta$  in ATF-DR west arc section @2020/06. Blue line:  $\beta$  function given by SAD. Green dot: TBT  $\beta$  function. Upper graph:  $\beta_x$ , Lower graph:  $\beta_y$ .

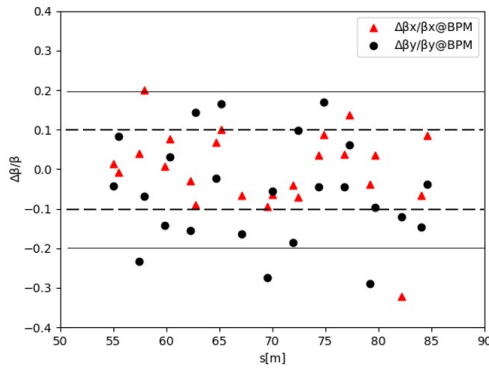


Figure 12: Residual between  $\beta$  function given by SAD and TBT  $\beta$  function at BPM in ATF-DR west arc section @2020/06. Case of not considering the fitting offset.

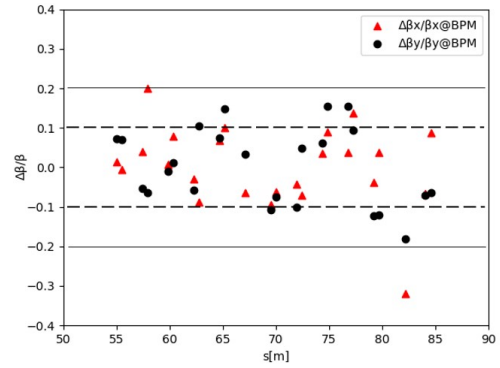


Figure 14: Residual between  $\beta$  function given by SAD and TBT  $\beta$  function at BPM in ATF-DR west arc section @2020/06. Case of considering the fitting offset.

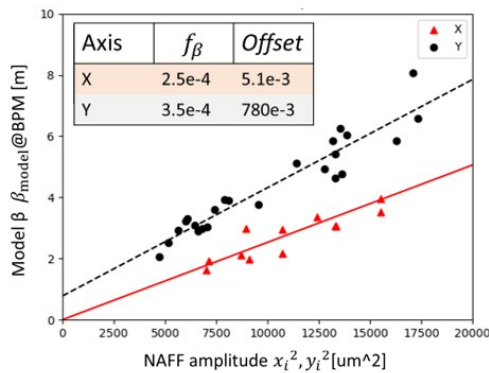


Figure 13: Model  $\beta$  given by SAD vs amplitude  $x_i^2$  (horizontal),  $y_i^2$  (vertical) given by NAFF. Red triangle: horizontal, Black dot: vertical. Line: fitting line of horizontal, Dashed line: fitting line of vertical.

## 5. まとめ

2020年6月のATFビーム運転の際にDtune-Dk法とTBT法による $\beta$ 関数の測定を行った。ATF-DR西アーク部だけではあるが、Dtune-Dk法の測定結果を基にTBTデータから $\beta$ 関数を算出して比較を行った。その結果、TBT法による $\beta$ 関数測定結果は概ね残差 $|\Delta\beta/\beta| \leq 0.2$ の範囲で一致することを確認した。しかし、運転時の $\beta$ 関数測定に使用するためには確認された残差は大きい。各測定における系統的な誤差の評価を行い、残差の原因を調査する。以上の議論は短い区間での4極電磁石の強さ $k$ が合っていると仮定し、ATF-DR西アーク部の局所的な区間の解析結果を基に行った。本報告では詳細に触れなかったが、リング全周でフィットを行った場合、Dtune-Dk法による測定結果とSADのフィッティング結果は一部一致しない。今後、リング全周での評価についても進めていく。DRアーク部では電磁石が密に並んでいることから、磁場の分布が理想的な状態ではないことも考えられる。現状、主偏向電磁石などを含む電磁石の磁場はハードエッジモデルで構築されている。今後、先行研究[12]を参考にしながら非線形磁場の解析も進めていく。

## 参考文献

- [1] N. Terunuma *et al.*, "Nanobeam R&D at the KEK Accelerator Test Facility (ATF)", PASJ2020-THSP07.
- [2] K. Kubo *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 194801.
- [3] Y. Honda *et al.*, Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 054802.
- [4] SAD Home Page; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [5] G. Mitsuka *et al.*, "BETATRON FUNCTION MEASUREMENTS USING THE GATED TURN-BY-TURN MONITORS AT SUPERKEKB", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2019, pp. 473-477; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPI/WEPI018.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPI/WEPI018.pdf)
- [6] Y. Renier, "Turn-by-turn BPM data analysis from the ATF damping ring", CLIC Damping Ring Meeting, 2012; [https://indico.cern.ch/event/207798/contributions/408720/attachments/320176/446657/turn\\_by\\_turn\\_ATF.pdf](https://indico.cern.ch/event/207798/contributions/408720/attachments/320176/446657/turn_by_turn_ATF.pdf)
- [7] N. Eddy, "HIGH RESOLUTION BPM UPGRADE FOR THE ATF DAMPING RING AT KEK", FERMILAB-CONF-11-383-AD, 2012; <https://lss.fnal.gov/archive/2011/conf/fermilab-conf-11-383-ad.pdf>
- [8] J. Laskar, "The chaotic motion of the solar system: A numerical estimate of the size of the chaotic zones", Icarus Volume 88, Issue 2, 1990/12, pp. 266-291; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001910359090084M>
- [9] P. Zisopoulos *et al.*, "REFINED BETATRON TUNE MEASUREMENTS BY MIXING BEAM POSITION DATA", physics.acc-ph, 12 Apr 2019; <https://arxiv.org/pdf/1904.00185.pdf>
- [10] Y. Papaphilippou *et al.*, "An update on the NAFF tool NAFF-UV", 2019; [https://indico.cern.ch/event/797108/contributions/3312193/attachments/1801356/2938840/An\\_update\\_on\\_the\\_NAFF\\_tool.pdf](https://indico.cern.ch/event/797108/contributions/3312193/attachments/1801356/2938840/An_update_on_the_NAFF_tool.pdf)
- [11] PyNAFF; <https://github.com/nkarast/PyNAFF>
- [12] H. Sugimoto *et al.*, "NUMERICAL MODELING OF DIPOLE MAGNETS IN SUPERKEKB POSITRON DAMPING RING", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015, pp. 477-481; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEPO/WEPO27.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEPO/WEPO27.pdf)