

## SuperKEKB 入射器のビーム誘起波測定

### MEASUREMENT OF BEAM-INDUCED FIELD FOR SuperKEKB INJECTOR LINAC

片桐広明<sup>#</sup>, 荒川 大, チュウ フェン, 松本修二, 松本利広, 三浦孝子, 矢野喜治

Hiroaki Katagiri<sup>#</sup>, Dai Arakawa, Feng Qiu, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Yoshiharu Yano

High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

Measurement of beam-induced field using RF monitor system has been achieved in KEK injector linac. While RF timing is delayed, beam-induced field is separated from the RF pulse. The power difference between both signals is about 50 dB. However, dynamic range of the RF monitor system was only 30 dB. The measurement accuracy has been improved by introducing externally controlled attenuator. Measurement of the beam-induced field is used for beam commissioning of the linac.

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子入射器では、SuperKEKB 実験に向けて導入した高周波モニタシステム[1]に、ビーム誘起波測定を行うためのハードウェアを追加し、位相調整やビーム調整に活用する計画を進めている。入射器では TRISTAN 実験の期間においては、ビーム誘起法による位相調整を行っていた[2]。これはビームが加速管を通過する際に発生するビーム誘起波の位相を測定し、大電力高周波をクレスト位相に調整するものである。KEKB 実験の期間でも、更新した高周波モニタ系[3]によりビーム誘起波測定自体は行われたが、KEKB 加速器に供給するシングルバンチビームでは、ビーム誘起波の位相検波波形にパルス内で 10~20 度の位相の傾きが見られたことから位相調整には用いられなかった。この位相の傾きは、加速管の冷却水を 1 方向に流しているため上流から下流にかけて生じる温度差による中心周波数のズレが要因と推測された。

SuperKEKB に向けた入射器増強の一つとして、複数リングへの同時入射運転に対応した高周波モニタシステムが導入された。KEKB 期間中にビームポジションモニタ(BPM)を用いたビームエネルギー法による位相調整[4]が確立されていたこともあり、新しい高周波モニタシステムの導入計画時期にはビーム誘起波測定は想定されていなかった。モニタシステムの稼働後、入射器上流部バンチングセクションのビーム調整に誘起波位相測定を利用する提案があったことから、KEKB 期間中に使用していたハードウェアを流用して一部の加速ユニットで誘起波測定を試験した。ビーム誘起波測定の手法と、これまでの成果について報告する。

#### 2. 誘起波測定の概要

Figure 1 に示す通り、ビーム加速中に大電力クライストロンを加速(ACC)モードから待機(STB)モードに設定すると、加速管透過波出力ポートではビーム誘起波と大電力高周波パルスが時間的に分離した状態で観測される。大電力クライストロン出力を停止すれば誘起波単独での観測は可能であるが、短時間であっても加速管の熱負荷の変化により、誘起波の測定結果も変化してしまう。そ

のため入射器では TRISTAN 実験の期間から STB モードに設定する方式を採っている。シングルバンチビームでは、誘起波と大電力高周波パルスとの間には、電荷量にも依るが概ね 50~60 dB のゲインの差があり、モニタユニットのダイナミックレンジを越えてしまう。KEKB の時期に使用していた位相検出器では高速に ON/OFF 可能な 30 dB 減衰器を内蔵し、ビーム誘起波が観測されるタイミングでのみ減衰器を OFF することで、誘起波と大電力高周波両方の測定を行っていた。現行の高周波モニタシステムでは、大電力高周波源 1 台毎に設置された高周波モニタユニットがクライストロン出力、SLED 出力、加速管透過波の各モニタ信号を測定している。モニタユニットの入力部には入力レベル調整のための固定減衰器が挿入されており、加速管透過波ラインの減衰器を前述の 30 dB ON/OFF 式減衰器に置き換え、KEKB の時期と同じ手法で誘起波測定を行うことにした。

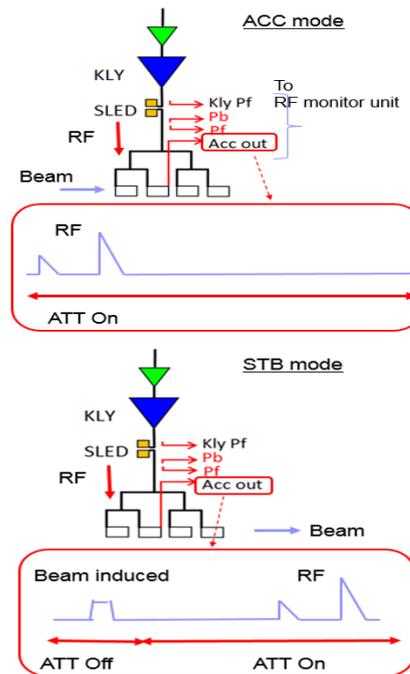


Figure 1: The technique of measurement of beam-induced field.

<sup>#</sup>hiroaki.katagiri@kek.jp

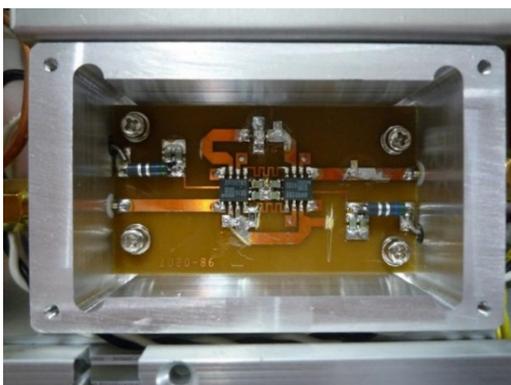


Figure 2: 30 dB attenuator unit.

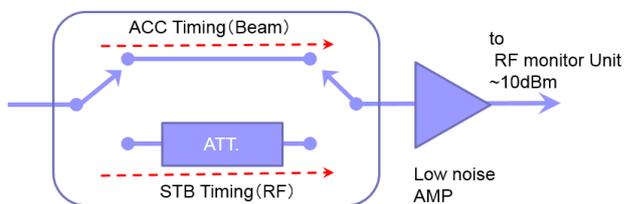


Figure 3: Block diagram of 30 dB attenuator unit.

Figure 2, 3 は 30 dB ON/OFF 式減衰器の外観及びブロック図である。SPDT スイッチを 2 つ組み合わせ、減衰器チップを通るパスとスルーを切り替える。ON/OFF による位相差は $\pm 1$  度以内に抑えられている。誘起波の振幅はビームの電荷量に依存するため、ON/OFF 式減衰器の最適な減衰量はビームモードや測定系を導入するユニットにより異なる。これまでに元の 30 dB のほか、40 dB、46 dB の 3 種類を試験した。減衰量を大きく採ることで誘起波と大電力高周波とのゲインの差は小さくなるが、モニタユニットへの入力レベルも減少し S/N が悪化するため、ローノイズアンプを挿入し測定精度を向上させた。

減衰器を OFF とする操作は、ビーム誘起波が観測されるタイミングでのみ行われる必要がある。タイミングを誤ると過入力でもモニタユニットが破損する恐れがあることから、ハードワイヤードロジックによりビームトリガと大電力パルス出力タイミングを決める高圧トリガとの時間差を検知して ON/OFF 制御を行っている。この制御回路についても KEKB 期間中のものを流用している。

### 3. 測定結果と検証

Figure 4 は、RF モニタシステムで取得したビーム誘起波の振幅/位相波形の表示例である。Waveform Viewer では高周波モニタユニットのデータをリアルタイム表示することが可能である。波形表示領域の前半が ACC タイミング、後半が STB タイミングである。ACC と STB には実際には 100  $\mu$  秒の時間差がある。ビーム誘起波、大電力高周波ともにゲートで設定された範囲のデータが抽出され EPICS アーカイバに蓄積される。他の EPICS PV と同様に Archiver Viewer にてトレンドグラフ表示が可能で、入射器バンチングセクションの位相調整に対する誘起波位相変化量を確認する際に利用された。

Waveform Viewer で波形を観測し、ビーム電荷量と誘起波の振幅との大まかな関連を掴む事ができた。陽

電子生成用一次電子ビーム(1 バンチ当たり約 10 nC)では、30 dB の減衰器で誘起波と大電力高周波が同程度の振幅で観測された。SuperKEKB リングに供給する電子ビーム(KBE、約 1 nC)を測定した際には、大電力高周波との差が大きくなり誘起波測定精度が低下したため、40 dB、さらに 46 dB の減衰量を試すこととなった

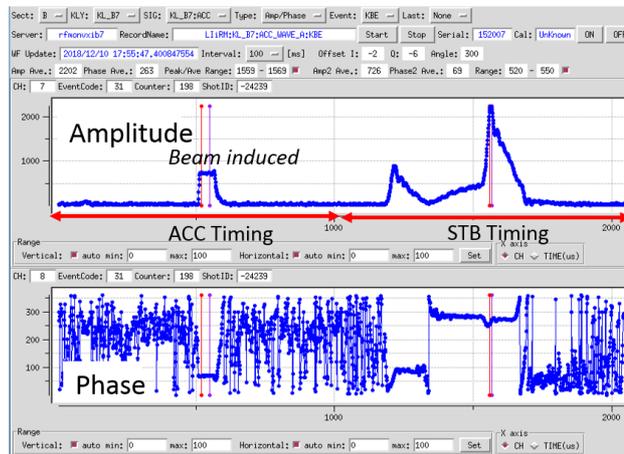


Figure 4: Waveform Viewer.

最新の試験では、KL\_45 ユニットに 46 dB 減衰器を導入した。さらに大電力高周波測定時にモニタユニットへの入力レベルが飽和しないようアンプのゲインを選定し、現状で最も測定精度の高い構成となっている。Figure 5 は、KBE の 1 バンチ当たり約 1 nC のビームで測定した誘起波振幅のピーク部分を拡大したものである。パルス毎の変動を確認するため 5 パルス分のデータを重ねて表示している。振幅には最大で 5% 程度の変動がみられる。Figure 6 は同じ測定で得られた位相波形である。位相については、KEKB 期間中の測定と同様に 15 度程度の傾きが確認された。パルス毎の位相変動(ピークツーピーク)を拡大すると、0.5~0.6 度の変動が見られた(Fig. 7)。これら振幅の変動、位相の傾き・変動は全てのユニットで見られるわけではない。Figure 4 の測定は KL\_B7 ユニット(J-ARC と呼ばれる入射器の 180 度偏向部より上流側)にて行ったが、ここまで顕著な傾向は見られなかったことから、原因について今後調査していく必要がある。

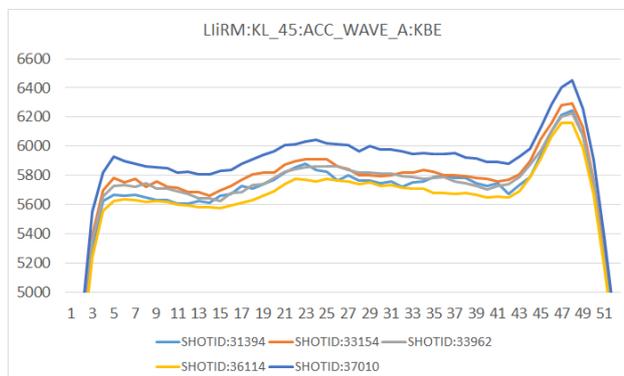


Figure 5: Amplitude of beam-induced field.

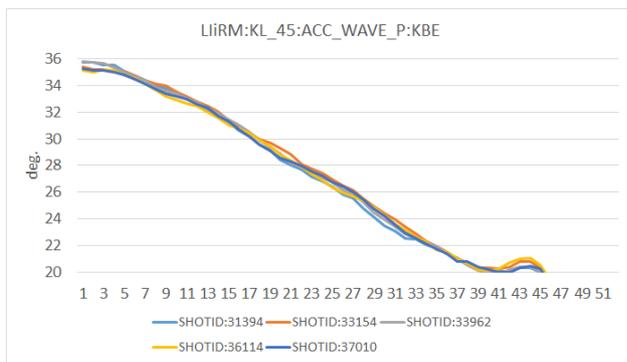


Figure 6: Phase of beam-induced field.

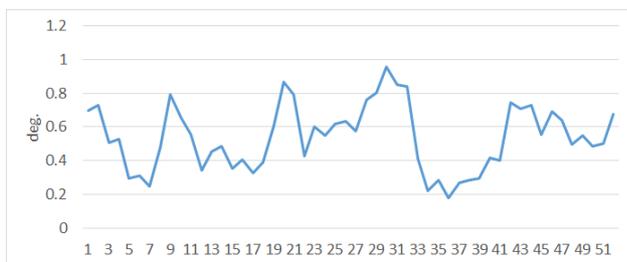


Figure 7: Fluctuation of the phase.

#### 4. BPM との連携

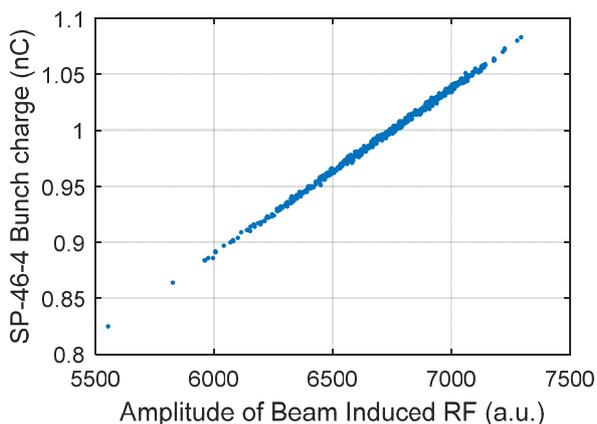


Figure 8: Beam-induced vs. bunch charge (KBE).

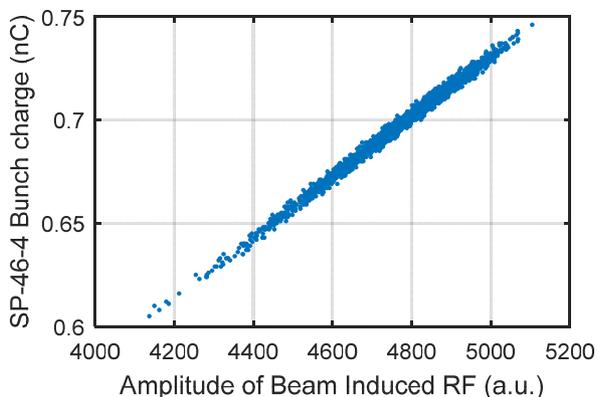


Figure 9: Beam-induced vs. bunch charge (KBP).

ビーム誘起波の測定に使用している高周波モニタユニットは、アナログ I/Q 検出器、ADC/DAC ボード、FPGA ボードなどから構成されている。FPGA には Xilinx の高速シリアルインタフェースである GTX トランシーバを使用したイベントレシーバが組み込まれている。これにより、入射器のビームモードやタイミングを統括するイベントタイミングシステム[5]から配信されるイベント信号を直接受信することで、ビームモードの識別を行っている。さらにショット ID と呼ばれるパルスカウント情報を検出する機能を追加し、BPM など他の装置とのデータの同期が可能となった。そこで、誘起波測定値と BPM との整合性を確認するため、ショット ID で同期したデータ取得を行った。

Figure 8, 9 は KL\_45 ユニットにて測定した誘起波振幅と、直近の BPM(SP-46-4)測定値から換算されたビーム電荷量をプロットしたグラフである。Figure 7 の KBE、Fig. 8 の KBP (SuperKEKB 陽電子)とも誘起波振幅と電荷量とが比例関係にあることが確認された。このことから、前章で述べたパルス毎の振幅変動は測定のエラーではなく、実際の電荷量の変化を検出していると推測される。

#### 5 まとめ

SuperKEKB に向けて導入した高周波モニタシステムにビーム誘起波測定用のハードウェアを追加した。これまでに、ビーム調整などに有効データが得られることが確認された。KL\_45 で見られるような誘起波の不安定性については調査する必要がある。運用面ではいくつか課題がある。誘起波を測定する際は必ず大電力クライストロンを STB モードに設定する必要があり、常時測定できるユニットに限られる。また STB モードへの変更によるビーム軌道への影響もあることから、予め誘起波測定用のパラメータを設定する等の対応が求められる。測定精度にも改善の余地がある。誘起波の振幅がビーム電荷量に依存するため、ON/OFF 減衰器の減衰量及びアンプゲインの最適値がビームモード毎に異なる。特定のビームモードに特化するか、減衰量を可変にするか今後検討していく。

#### 参考文献

- [1] H. Katagiri *et al.*, “RF Monitor System for SuperKEKB Injector Linac”, Proceedings of the IPAC18, Vancouver, BC, Canada, Apr. 29 – May 4, 2018, WEPAK016.
- [2] H. Hanaki *et al.*, “Phase Control System of the KEK 2.5 GeV Electron Linac”, in Proc. 1986 International Linac Conference, Stanford, California, USA, pp. 481-483.
- [3] H. Katagiri *et al.*, “RF Monitoring System in the Injector Linac”, Proceedings of the 7th international conference on accelerator and large experimental physics control systems, ICALEPCS’99, Trieste, Italy, 1999, pp. 69-71.
- [4] T. Kudou *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器におけるフェーシングシステムの開発”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan.
- [5] T. Kudou *et al.*, “The Event Timing System in KEK Linac”, Proceedings 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, August 4-6, 2010.