

BEAM POSITION MONITORS FOR SuperKEKB DAMPING RING

Makoto Tobiyama[#], Mitsuhiro Arinaga, John W. Flanagan, Hitoshi Fukuma, Hitomi Ikeda, Hitoshi Ishii, Kenji Mori, and Masaki Tejima

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory,
1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

Abstract

Design work for the beam position monitor systems for SuperKEKB damping ring has been performed. The longitudinal and transverse impedance and the signal output of the button electrode with diameter of 6 mm were calculated using 3D electro-magnetic simulation of GdfidL. The estimated growth rate of the coupled-bunch instability was much smaller than the radiation damping rate. A turn-by-turn position detector using Log-Ratio method has also been designed and fabricated based on the estimated signal outputs.

SuperKEKB ダンピングリング用ビーム位置モニタ

1. はじめに

KEKB 加速器のルミノシティを約 40 倍に増大させる SuperKEKB 加速器は、高ルミノシティを実現するため低エミッタンスでかつ低カップリングの設計となっている。ダイナミックアパーチャーも狭く、ビーム体積の小ささと相まって Touscheck 効果によりビーム寿命は非常に短く 600 秒程度となる。高いルミノシティを実現する高ビーム電流を維持、またビームアポート後の入射時間を短くするため、入射器からは最大 8 nC の陽電子ビームが最大 50 Hz の繰り返しで入射される予定であるが、この 4 GeV ビームはそのままではエネルギー広がり、エミッタンスとも陽電子リング(LER)のアクセプタンスに入らないため、陽電子ダンピングリングを新たに建設し、進行方向、横方向ともエミッタンスを下げる予定である^[1]。

ダンピングリングは周長 135.5 m で線形加速器側に設置され、エネルギー 1.1 GeV の所で取り出された陽電子ビームを入射し、40 ms 後にビームを取りだし、取り出されたビームはバンチ圧縮システム(BCS)でバンチ長を短くし、再び線形加速器に戻し 4 GeV まで加速し LER に入射される。

ダンピングリングの加速周波数は KEKB リングと同期した 508.9 MHz で、2 バンチ加速時はバンチ間隔 98 ns 以上で最大電荷 8 nC のバンチが最大 4 バンチ同時に周回する。このときのビーム電流は 70 mA となる。コミッショニング初期では、陽電子ビームの電荷は KEKB 運転時の実績値から始まると仮定せざるをえないので、モニター系の最低動作ビーム電流値としては 0.5 nC 単バンチ(約 1 mA)となる。Closed Orbit Distortion (COD)及びリングの軌道光学性能を測定するために用いるビーム位置モニター(BPM)は、すべての四極電磁石に取り付ける予定で、この場合リング全体で 84 台必要となる。

本論文では、このダンピングリング用のビーム位置モニターシステムのボタンヘッドの構造、ビーム結合インピーダンスなど高周波特性、信号位置検出回

路の設計及び試作機の試験結果について報告する。ダンピングリングの主要パラメータを表 1 に示す。

表 1 : SuperKEKB Damping ring の主要パラメータ

Parameters			unit
Energy	1.1		GeV
Circumference	135.50207		m
Harmonic number	230		
Revolution frequency	2.21		MHz
Max. No. of bunches	4		
Max. stored current	70.8		mA
Hor. damping time	10.87		ms
Coupling	5		%
Inj.-beam emittance	1700		nm
Ext. emittance(h/v)	42.5/3.15		nm
Total RF voltage	1.0	1.4	MV
Bunch length	7.78	6.5	mm

2. BPM ヘッド

アーク部の真空チェンバー断面は Coherent Synchrotron Radiation (CSR)による進行方向不安定性を抑制するため鉛直方向に非常に狭い(高さ 24mm)レーストラック型をしており^[2]、左右両方向の水平

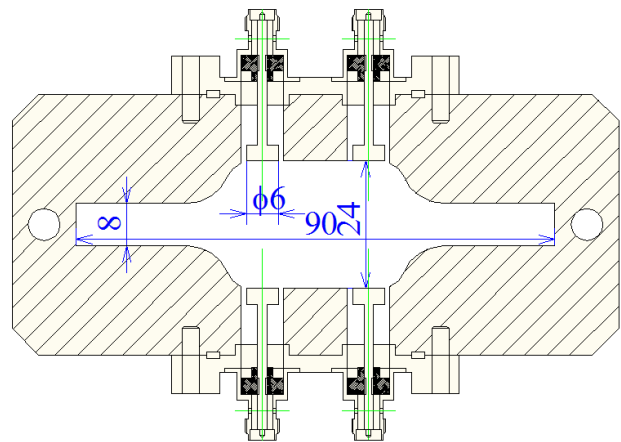


図 1 : モニターチェンバー概形図

[#] makoto.tobiyama@kek.jp

方向は電子雲不安定性を抑制するためアンテチェンバーになっている。この形状に合致する位置モニターチェンバーとして図1のような形状のものを設計した。

ボタン径は 6 mm で、フィードスルー(FT)の構造は SuperKEKB LER で使用する予定の物と同じである。取り付け場所が四極磁石に非常に近いためフィードスルー、フランジを含めすべて非磁性構造とする予定である。ボタンの中心間水平方向間隔は 20 mm で、レーストラック平坦部のほぼ端と端まで使用している。チェンバー本体の材質はアルミニウム合金で、光電子不安定性を抑制するため TiN コーティングをチェンバー受け入れ後 KEK 内で行う予定である。コーティング時にモニターチェンバーに FT がついているとコーティング作業によりセラミックス部などに悪影響があるため、ボタン及び FT はチェンバーにフランジで取り付ける構造とし、コーティング終了後取り付けることとした。1 つずつのボタンを個別に取り付ける余裕はないため、2 個の電極一体構造のフランジに取り付け、真空シールも 2 個電極の外側で一体で行う構造とした。ボタン自体の位置はフランジ側の突き出し加工部がチェンバーの対応する窪み加工部に精密に突き当たることにより決まる構造としたが、2 個の突き当て部が均等に当たる構造には出来ないため、2 つのボタン間にわたってわずかなすきまが生じることになる。このギャップを通じた 2 電極間の信号漏洩について、三次元電磁界シミュレーター HFSS^[3] を使い透過特性をシミュレートしたところ、500 MHz 帯で 80 dB 以上のアイソレーションがある事が確認出来、問題ない事が分かった。

次に三次元電磁界シミュレーター GdfidL^[4] を使いこのモニターチェンバーにバンチ長 5 mm のビームを走らせたときの wake、ビーム結合インピーダンスを推定した。メッシュサイズは 0.2 mm 均等で、5 m までの wake を計算した。図 2 に GdfidL カットモデルを示す。

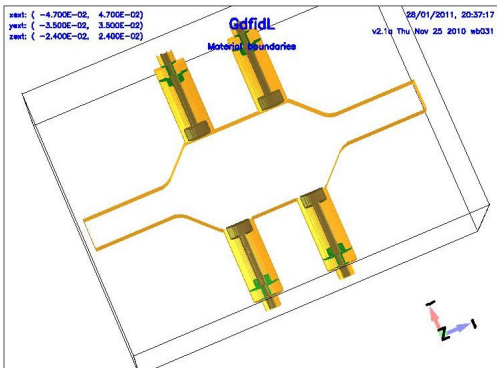


図 2 : モニターチェンバーの GdfidL モデル

進行方向ロスファクターはバンチ長 5 mm のとき約 3 mV/pC で、チェンバーが小さいため SuperKEKB LER の電極より 1 桁以上大きい、全蓄積電流、バンチ電流とも低くバンチ間隔も大きいため問題とはならない。またバンチ長を 0.5 mm と

して windowwake モードで計算した進行方向 wake を用いて CSR による進行方向不安定に対する寄与もシミュレーションにより評価されているが、CSR などの大きなインピーダンスと比べると無視できるほどの大きさで、大きな寄与とはならないことが分かった^[2]。得られた進行方向インピーダンスを図 3

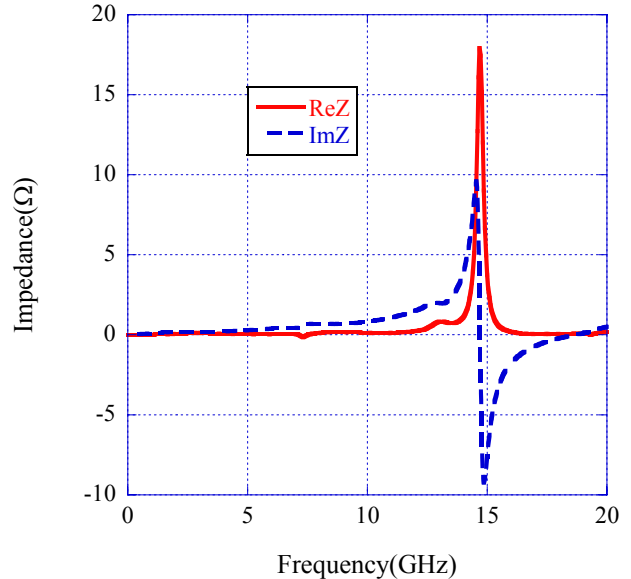


図 3 : GdfidL で計算したモニターチェンバー部の進行方向インピーダンス

に示す。これより、14.5 GHz 付近に共振があり、この部分のインピーダンスをフィットしたところ、18 Ω、Q 値は 50 程度となった。横方向のインピーダンスについても同様に、GdfidL でビームを水平、鉛直にそれぞれずらしたもので計算を行い、共振点付近をフィットすることにより求めたところ、水平方向は 2.2 kΩ/m、Q~90、鉛直方向は 280 Ω/m、Q~140 程度となった。いずれも SuperKEKB LER 用^[5]のものに比べ 10 倍以上大きな値となった。この原因は、ボタン構造に比べ真空チェンバーサイズが小さく、かつボタンがビームに近い事から来していると考えられる。この値であっても、蓄積電流が小さく、かつバンチ間隔が大きいため最悪ケースでもバンチ結合不安定の成長率は放射減衰率より遙かに低い。

モニターチェンバー本体との真空シールの信頼性、BPM フランジとのはめ合わせ、四極電磁石への固定方法を確認するためのモニターチェンバー及びダミーフランジ試作の設計が進んでおり、同時に BPM フランジ本体の試作を行う予定である。BPM 取り付け精度の確認、測量方法についても検討を進めている。

3. 位置検出法

ダンピングリングは通常運転時は同じビームが 40 ms しかリング内に滞在せず、また SuperKEKB LER リングのどのバンチに入射するかによりバンチ数、バンチ間隔も最小 20 ms ごとに変化する。このため、通常の電極切り替え方式のビーム位置検出法

は適当でなく、あるバンチの信号だけを四電極同時に測定する turn-by-turn 方式が実用的である。検出方法としてダイナミックレンジが広い Log-Ratio 法 (LR 法)を採用することとし、設計、試作を行った。

BPM からの信号をまず 800MHz の低域濾波器 (LPF)で帯域制限し、SAW デバイスの帯域濾波器 (BPF, 506MHz バンド幅 24 MHz)で 509MHz 成分を取り出す。この信号を低 NF 増幅器で 20dB 増幅し、もう一段 506MHz BPF を通した後対数増幅器 (ADL5513)で対数変換する。この出力を OP アンプでオフセット調整したあと 14 ビット AD 変換器 AD9245 でデジタル信号に変換する。AD9245 のクロックはリングの revolution 信号をあるバンチに合わせて遅延したものを用いる。変換されたデジタルデータはチャンネル毎に SRAM に記録し、VME バスから読み出す。データ記録トリガーも外部から与え、設定記録長記録した時点でメモリーへの記録を停止するとともに VME バスに割り込みをかけ、データ転送をさせる。

GdfidL で計算した BPM の出力を使い、この回路の信号処理レベルを検討した。図 4 に電荷 0.5 nC のバンチからの BPM 出力(A)、800 MHz LPF 出力(B)、506 MHz BPF 出力(C)の計算例を示す(ケーブルを含めた各部での損失は無視している)。

BPM から測定ステーションまでのケーブル長を最大 100 m とし、8D 程度の物を用いると損失は 8 dB 程度、回路内の損失(LPf、BPF)を 4 dB 程度、その他各接続点などから来る損失を 3 dB 程度とすると、全挿入損失は 15 dB 程度となる。0.5 nC のバンチ信号では、対数増幅器 AD5513L の直前のレベルは-31 dBm 程度となる。AD5513L の実用レンジは-50 dBm~0 dBm であるので、この値は中庸なところと考えられる。リングに最大バンチ電流 8 nC 周回して、かつ測定ステーションに近い BPM からの信号に対しては上側の余裕が厳しいが、その場合は必要に応じて外付けの attenuator でレベルを調整する事となる。

境界要素法を用いた電荷分布を元に、LR 法でのビーム位置マッピングを計算した。LR 法ではビーム位置は、電極からの信号を V_A, V_B, V_C, V_D とすると

$$x = k_x (\log V_A - \log V_B - \log V_C + \log V_D)$$

$$y = k_y (\log V_A + \log V_B - \log V_C - \log V_D)$$

という形で求められる。図 5 に水平鉛直各方向に 1 mm ステップで+10 mm まで求めたボタン電荷分布を入力として LR 法で求めたビーム位置を示す。

チェンバーサイズが小さく、かつ電極が水平についており、電極間隔も狭いため LR 法を用いても線形と見なせる領域はそれほど広くは取れない。図 6(A)に鉛直ビーム位置を 0 mm、2 mm、5 mm に固定して水平方向ビーム位置を動かした時の LR 法による位置計算結果を、(B)に水平ビーム位置を 0 mm、-2 mm、-5 mm に固定して鉛直方向ビーム位置を動かした時の LR 法による位置計算結果を示す。いずれの方向にしても大体+5 mm の範囲内においては線形近似から大きくは逸脱しないことが分かる。さ

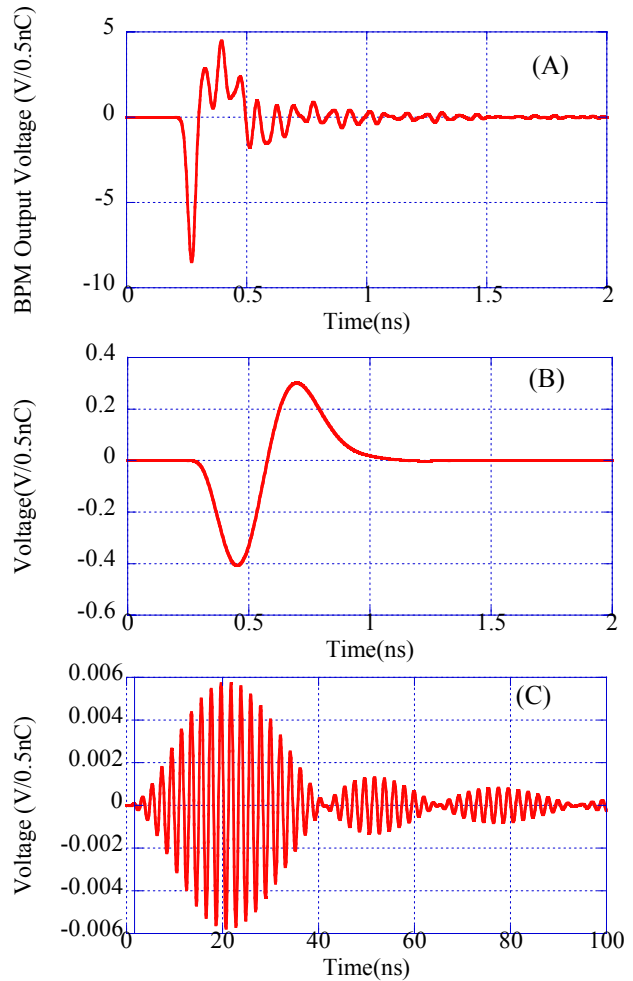


図 4 : GdfidL の出力を元にした 0.5nC バンチ信号の (A)BPM 出力、(B)LPF 後、(C)BPF 後の信号レベル

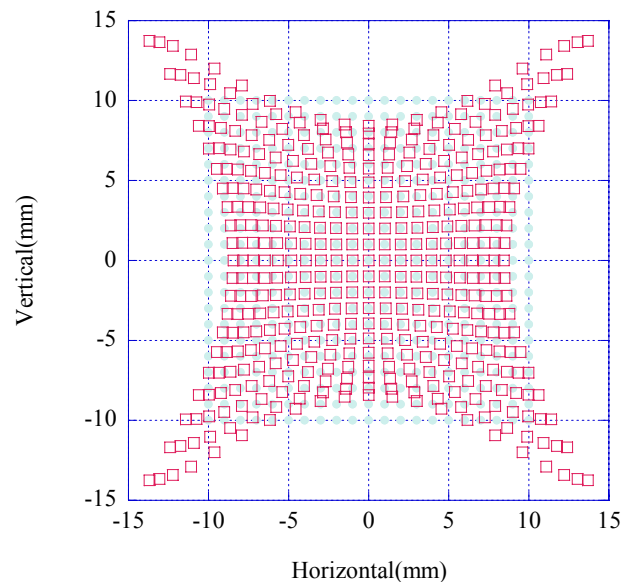


図 5 : LR 法を用いたビーム位置マッピング

らに遠くの領域を使う必要がある場合(大きなバンプをたてる場合など)には、このマッピング結果をもとに位置補正をする事も可能である。

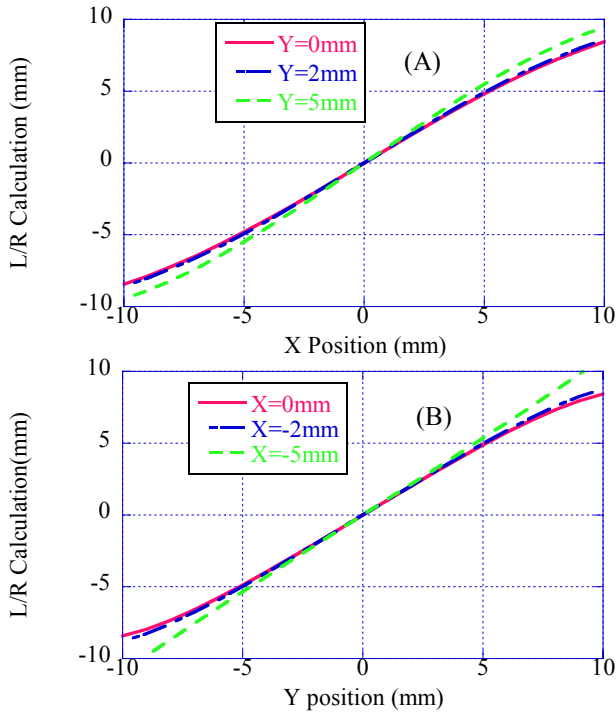


図 6 : (A)鉛直位置を固定して水平位置を変えたとき、(B)水平位置を固定して鉛直位置を変えたときのビーム位置と LR 法でのビーム位置

試作したビーム位置検出回路(Digitex 18K07 型)の写真を図 7 に示す。VME 2U1 幅のボードサイズで、1 枚のボードで一箇所の BPM の位置検出を行う。IOC として MVME5500 を使用した場合、EPICS R314 環境下で 10 枚のボードそれぞれ 32k ターン分

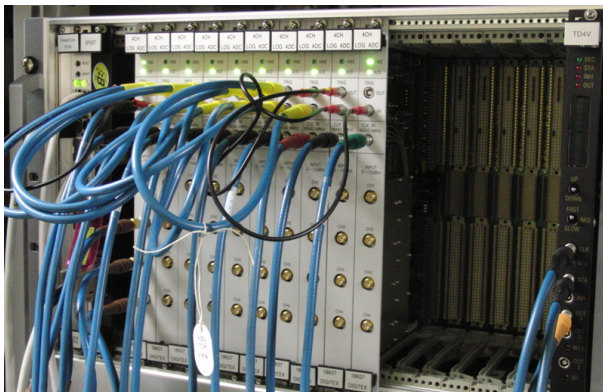


図 7 : Log-ratio 検出回路 Digitex 18K07

(14.8 ms)のデータを転送、処理させた場合 MVME 5500 の非常に遅い VME バス転送速度が大きなボトルネックとなり、1 Hz でのデータ取得は厳しい。現在、改善策を検討しているが、このままでも 2 秒に 1 回程度の COD 測定は可能であり、実用上は許容

範囲である。

18K07 に CW の RF 信号を入れ、データのばらつきについても評価している。当初 ADC の前段にある信号オフセット調整用差動アンプがノイズ源となり、大きなふらつきが測定されていたが、この部分を改善することにより、現時点で ADC のカウントの標準偏差で 2.3 カウント程度となっている。この値は ADC の有効ビットにも近く、これ以上の改善は容易でないが、この誤差がある場合、ビーム観測位置では水平方向では 7 μm 、鉛直方向では 10 μm 程度のばらつきとなる。さらにノイズを減らすよう検討を続けている。

4. まとめ

SuperKEKB ダンピングリングに設置するビーム位置モニターの設計を行った。三次元電磁界計算ソフトウェア HFSS 及び GdfidL を使い、モニターチェンバーの wake、ビーム結合インピーダンスを評価し、いずれも問題が無い事を確認した。また、境界要素法を用いてビーム位置マッピングを行い、十分広い範囲で実用的にビーム位置検出が行える事を確認した。

ビーム位置検出法として Log-ratio 法を使った検出回路を設計、試作し評価を行った。GdfidL で得られたバンチ出力から、最低電荷 0.5 nC から最大電荷 8 nC まで使用可能であることを確認した。また、システム全体としての繰り返し速度を測定し、許容範囲内であることを確認した。

モニターチェンバー、ボタン電極フランジについては今年度試作を行い、来年度全数の製造を行う予定である。

モニターチェンバーの詳細設計は真空グループ柴田恭氏によるものであり、モニター設計において多くの協力をいただいていることを感謝する。

参考文献

- [1] M. Kikuchi et. al, in Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, TUPEB054, 2010.
- [2] H. Ikeda et. al, to be published in Proceedings of IPAC'11, San Sebastian, Spain, 2011.
- [3] Ansoft HFSS ver.11.
- [4] <http://www.gdfidl.de/>
- [5] M. Tobiyama et. al. 第 6 回加速器学会プロシーディングス WPBDA20, 東海村, 2009.