

氏 名 手島 昌己

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大乙第 171 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 ビーム位置モニタの高精度ビーム・ベースド・キャリブレーション法の開発

論文審査委員 主 査 教授 佐藤 康太郎
教授 生出 勝宣
教授 春日 俊夫
教授 小磯 晴代
教授 黒川 眞一
教授 平松 成範
教授 安東 愛之輔(兵庫県立大学)

本論文は、KEKBファクトリー（KEKB）に設置されたビーム位置モニタの測定誤差を評価するために開発された3電極ビーム位置コンシステンシー・チェック法と、誤差発生的主要原因であるBPM電極の信号出力応答感度の変化を校正するために開発されたビーム・ベースド・キャリブレーション法とその適用について述べるものである。

ビーム位置モニタ（BeamPositionMonitor, BPM）は、加速器の中を運動している電子などの荷電粒子ビームの軌道を測定するためのビーム診断装置であるが、KEKBファクトリー加速器（KEKB）では、多くの電子シンクロトン加速器で採用されている静電誘導型BPMが設置されている。同軸コネクタに円盤電極を付けたものをボタン電極と呼び、BPMは4個のボタン電極を真空容器に取り付けた構造を持つ信号検出器である。

1. 本研究の動機

KEKBのような電子ビームと陽電子ビームの2リングの衝突型加速器では、高いルミノシティ（衝突の頻度）を実現する上で、衝突部におけるビーム軌道を最適に保つことが重要である。BPMの測定精度は $2\sim 3\mu\text{m}$ 以下を要求されている。

BPMの測定精度を実現するために、従来から全BPMを対象に四極電磁石の磁場中心からのBPMオフセット、及びビーム信号の出力応答の感度の校正を全BPMにおいて加速器の建設時に行ってきた。KEKBの約900台のBPMにおいても、テストベンチでのBPMのマッピング測定、BPMヘッドの設置位置の測定、信号検出回路と信号伝送線路のバランス検査を実施された。

これらの校正で得られた測定値に基づいて、実際のビーム位置の補正を行ったにもかかわらず、予想以上の大きな測定誤差の存在が確認された。本研究を始めた動機は、この誤差を小さくする方策について研究することである。

2. ビーム位置のコンシステンシー・チェック法

ビーム位置はBPMの4電極信号電圧から計算するが、BPMの測定誤差を監視するため、4通りの3電極ビーム位置を計算して、その標準偏差の大きさからビーム位置の測定誤差を評価する方法、即ち、コンシステンシー・チェック法が開発された。

3. KEBBのBPM測定誤差

多数のBPMで次のような測定誤差を確認した。

- ・ 数 $100\mu\text{m}$ 以上の大きなコンシステンシーの存在
- ・ 連続する3台のBPMのビーム位置の線形関係から、加速器のラティス・モデルのトランスファー行列に基づくデザイン上のビーム位置とBPMの測定値の不一致
- ・ ビーム・ベースド・アライメント法で、最大で $-2.1\text{mm}\sim +1.6\text{mm}$ 、その平均が約 0.3mm のBPMオフセットを測定

4. ビーム・ベースド・キャリブレーション法の適用

ビームによる電極応答ゲイン校正法は、1995年にKEKBの佐藤康太郎氏（筆者も共著者である）によって“Recalibration of position monitors with beams”の論文で提案された。

それはボタン電極の出力応答モデルを仮定し、加速器のビームを信号源とするボタン電極の出力電圧から、その出力応答ゲインを非線形最小二乗近似で計算して求める方法である。

ボタン電極の出力応答モデルはBPMの様々な形状に対応するために、境界要素法を用いて電磁気学的な解析で求めたボタン電極の出力応答電圧から定義するが、ボタン電極の出力応答モデルの精度を上げるためにFloatingボタン電極モデルが開発された。

A) 従来のボタン電極モデルとは

BPMの内面の断面形状を境界とし、ボタン電極部もBPMチェンバーの境界面と同じようにポテンシャルを持たないと仮定して求めたモデルである。

B) Floatingボタン電極モデルとは

実際のボタン電極では、ボタン電極の負荷としてBPMチェンバーとのギャップに生じる静電容量と負荷抵抗が並列に接続されており、ボタン電極間のポテンシャル結合の影響を考慮する必要がある。本研究では負荷抵抗を考慮した場合のボタン電極モデルは複素数で取り扱うことになり複雑になるため、実数での取り扱いで済む静電容量のみのFloatingボタン電極モデルである。

境界要素法による計算で、上記2つのボタン電極モデルを比較した結果、BPM内周に対するボタン電極のサイズの占める割合が大きい場合は、ボタン電極間結合を無視できないが、KEKBの12mmφのボタン電極のような小さいボタン電極サイズの場合は、ボタン電極間結合の影響が小さいことが確認された。

ビーム信号でゲイン校正を行うため、4点以上の異なるビーム位置における各ボタン電極の出力電圧を測定する必要がある。これをビームマッピングと呼ぶが、KEKBのラティス上のベータatron位相が90度シフトしている2箇所の水平と垂直用ステアリングマグネットの磁場の強さを変えて、シングルキックビーム軌道を作りマッピングデータを得た。

5. ゲイン校正の結果

KEKBのBPMにおける第1回目のゲイン解析の結果によると、多数のBPMにおいて、最大で±10%、数%以上のゲインが測定された。これらのゲインをBPMの位置のオフセットに換算し、ビーム・ベースド・アライメントによるオフセット値と比較すると、両者の間に明らかな相関があることから、オフセット誤差発生的主要原因が、BPMの出力応答ゲインの変化によるものであることが確認された。また、測定されたゲインで、ボタン電極の出力電圧[V]補正し、コンシステンシーを再計算すると、すべてのBPMのコンシステンシーが50μm以下にトさくなり、この方法でBPMの測定誤差を校正できることも確認された。また、ゲイン校正における最小自乗近似計算の残差は $4 \cdot 10^{-5} \sim 5 \cdot 10^{-5}$ [ΔV]を得ており、モデルと実測の出力応答電圧の差が信号検出回路の測定分解能と同レベルであることを確認した。尚、通常のボタン電極モデルより、Floatingボタン電極モデルの残差が若干小さくなったが、その差は微小であった。

6. ゲイン校正の最小二乗近似計算における誤差伝播

誤差伝播の原理から、ビーム・ベースド・キャリブレーション法で測定されたゲインの誤差について評価したが、BPMの信号検出回路が1/10000の測定分解能を持つのに対して、ゲインへの伝播誤差は約1/5000になり、ビーム位置誤差に換算して2~3μmの精度でゲイ

ンが校正できていることを確認した。

7. 結論

加速器建設時の校正だけではBPMの精度を保証し維持することはできない「KEKBでは加速器の稼働中においても3電極ビーム位置によるコンシステンシー・チェックを常時行いBPMの測定異常を監視している。コンシステンシーが大きくなったBPMに対しては、ビーム・ベースド・キャリブレーション法を適用して、ボタン電極の出力応ゲインを校正できる。加速器のビームを用いることにより、誤差が2-3 μm 以内の高精度ビーム位置モニタを実現した。

加速器の性能を安定に保持する条件の一つとして、ビーム軌道の安定があげられる。このためビーム位置モニター(BPM)系によるビーム位置の高精度の測定が常に要求される。特に、先端的なKEKBの性能を保持するには、厳しい測定絶対精度(数 $10\mu\text{m}$ 以下)を実現しかつ保持する位置モニター系が必須である。本論文は、これまでにないような精度を要請するKEKBに対応できるビーム位置モニター系の完成までに行われた研究開発をまとめたものである。

論文では、KEKBで要求されるビーム位置の測定精度をまずとりあげた。衝突点でのビームサイズ(特に垂直方向では数 μm)がきわめて小さいことから、ビームサイズを小さく保ち、かつ衝突を安定に保持するため、絶対/相対測定精度への要請が決められる。これらの要請にそってKEKBの位置モニター系は設計され建設された。モニター電極の校正方法、信号伝送系の校正方法、及びモニター電極設置の際の測量方法について述べ、これらによって期待される測定精度を議論している。

しかしながらKEKBの当初のビーム運転によって、特に絶対精度が達成されていないことが判明した。BPMシステムの絶対精度を低下させる要因を解析し、4電極からの信号の大きさが期待される整合性(コンシステンシー)を欠いていることから、4電極からの伝送系が当初の校正値から変動したことが原因にあげられた。そこで、ビームを使って4電極からの信号を再校正するという、ビーム・ベースド・ゲイン・キャリブレーション法(ゲイン解析法)が初めて導入された。再校正の過程では非線形最小二乗法が使われるが、誤差行列及び信号の測定精度を評価することによって、十分な精度でゲインの再校正が可能であることをまず確認した。その上で、この方法によりKEKBの2リングにある合計約900台のBPMの4電極からの信号の再校正を行った。その結果、全てBPMにおいて4電極からに信号の間に十分な整合性が認められるようになり、ビームによる再校正が期待どおり遂行されたことを確認した。最後にビーム・ベースド・アライメント法によって、BPMそれぞれについてその近くの4極磁石を設置基準とした絶対位置の再校正を行わない、要請された絶対/相対測定精度を達成できた。

その後、気温の変動などにより電極ゲインの長期的な変化が起こりうることから、4電極からの信号についてコンシステンシー・チェックを常時おこなうことによって精度の低下を監視するシステムも作成し、必要に応じてゲインの再校正を行っている。これらの研究開発により、BPMによるこれまで達成されたことのない極めて高精度の位置測定が可能となるとともに、高精度維持が常時保証されるシステムが完成した。

本研究はKEKBの性能を支える重要な基盤の一つを完成させるものとして進められたが、ここで開発された成果は普遍性を持つものであり、将来の加速器において極めて高い精度が要求されるBPMシステムを導入するに際し重要な設計指針を与えるものである。よってこの研究の加速器科学への大きな貢献を評価し、審査委員全員一致で論文審査を合格とした。