

氏 名 清宮 裕史

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1585 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 加速器における設計性能実現のための軌道及び  
オブティクス補正

論文審査委員 主 査 准教授 久保 浄  
教授 大見 和史  
教授 小林 幸則  
助教 森田 昭夫  
客員教授 鎌田 進  
主幹研究員 高雄 勝  
高輝度光科学研究センター

## 論文内容の要旨

加速器の設計はエミッタンスなどの目標パラメータを設定し、設計軌道を想定し、その上に偏向磁石、四極磁石、高次磁石を配置し、目標パラメータが実現できるように、磁石強度の設定をする。この研究では（設置誤差が存在する）実際の加速器において、磁石を設計軌道に設計した強度で配置するという、最もナイーブな手法により、加速器の設計性能を達成する手法を研究する。

現実の加速器では磁石の設置誤差や磁場強度誤差によって、エミッタンスを始めとする設計性能が悪化してしまう。加速器の設計性能を実現する方法は、磁石を設計軌道に誤差なく設置することである。しかし、BPM (Beam Position Monitor) や磁石にそれぞれの設置誤差、磁場強度誤差が存在する現実の加速器において、設計軌道を推定することは困難である。そのため、現実の運転では最も性能を出すことのできた軌道を記録し、このときの軌道(Golden Orbit)にあわせるようにチューニングしている。

ここで提案する手法は四極の平行移動誤差のみが存在する場合に、BPM と四極の平行移動誤差が一致した条件下では、ビームの軌道から設計軌道が推定できるという事実を利用する。BPM と四極の平行移動誤差を一致させるために KEKB や PF では、ビームが四極の磁場中心を通る場合軌道変化が生じないことを利用した'Quad-BPM'という手法を用いることで BPM を校正している。また、偏向磁石の誤差や四極の回転、磁場強度誤差、六極以上の多極磁石の誤差による軌道の変化が小さく、BPM と四極の平行移動誤差が一致している場合、設計軌道を近似的に推定することができる。本論文では SuperKEKB、PF リングについて、四極の平行移動、回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差、それに加え偏向磁石の回転、磁場強度誤差、BPM と四極間の誤差、オプティクスパラメーターの測定誤差が存在する場合について、BPM と四極の平行移動誤差が一致しているという仮定を用いて四極の平行移動、回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差を推定し、これらを補正後どの程度低エミッタンス化することが可能かを議論し、シミュレーションを行うことで確認した。

四極の平行移動誤差は軌道に影響を与えるため、軌道からこの誤差を推定した。一方、四極の回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差は軌道に大きな影響を与えないがオプティクスに影響を与えるため、オプティクスパラメーターからこれらの誤差を推定した。四極の平行移動誤差は軌道を変化させるため、結果的に六極や多極磁石によってオプティクスが変化する。そのため、これらの誤差の推定または補正は、軌道、オプティクスの順で行った。

六極以上の多極磁石はビームに非線形力を与えるため、誤差を推定するためには非線形方程式を解く必要がある。この研究では、シミュレーションで得られたデータについて、多次元の Newton-Raphson 法を用いてこの非線形方程式を解いた。この方程式を解くに当たって、反復行列の逆行列の条件数や収束を判定するスペクトル半径を利用し、四極の平行移動、回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差を推定した。このとき、Newton 法を収束可能にするために、非線形を弱くするようなステアリングによる COD 補正、ラティスの線形化、反復行列の特異値にしきい値を設定するといった操作を行った。ただし、非線形が強い場合には解の候補が一つに限らない場合があるが、そのような場合には偏向磁

石の誤差が小さい場合には周長を比較することで真の解を選択することができることを示した。また、条件数が大きい程推定量の残差が大きくなり、非線形が強い程スペクトル半径が大きくなるといった傾向があることを確認した。

シミュレーションにより、四極の平行移動、回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差が存在するとき、軌道から四極の平行移動誤差の推定、つまり設計軌道の推定ができることを示した。さらに四極の平行移動誤差を補正後、オプティクスパラメーターから四極の回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差を推定し、補正することでほぼ設計値のエミッタンスを再現することができた。一方、四極の平行移動誤差を補正せずに四極の回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差のみ補正しようとするとうまく補正されない。これは、四極磁石の平行移動誤差による軌道変化によって六極や多極磁石から発生する非線形が強くなってしまふことが原因である。四極の平行移動誤差を補正することが低エミッタンス化するための重要な要素であるといえる。偏向磁石の回転、磁場強度誤差、四極の平行移動、回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差、BPMと四極間の誤差、BPMの分解能による測定誤差、オプティクスパラメーターの測定誤差を考慮した場合でも、四極の平行移動、回転、磁場強度誤差、六極の平行移動誤差を推定し補正することで、SuperKEKB、PFリングの低エミッタンス化ができることがシミュレーションにより確認できた。

## 博士論文の審査結果の要旨

清宮氏の論文は、リング加速器における磁石の平行移動誤差、回転誤差、強度誤差などを、ビーム位置などの測定値を用いて推定する方法について、理論的な研究を記述したものである。

論文ではまず、対応するビーム位置モニタと4極磁石の相対的な位置が精度よくわかっている場合に、ビーム位置（閉軌道）の測定結果から実際の4極磁石の平行移動誤差を精度よく推定するための方法と精度の良い推定が可能になる条件を述べている。そして、PFリング、SuperKEKBといった実際の加速器でのシミュレーションを行うことによりその方法を検討、有効性を検証している。

実際の加速器においては、ビーム位置は、設置誤差に対して非線形の振る舞いをする。この非線形性のために、線形近似を用いた誤差の推定が不可能になることがあり、又、誤差を推定する際の初期条件によっては結果が真の値と大きくずれてしまうことがある。清宮氏は、線形近似による解を求める際の「条件数」、「スペクトル半径」といった数学的概念を適用することで誤差推定の難易を客観的に把握し、このようなことがなぜ、どのような場合に起こるか、どのように回避することができるかを示している。

本論文ではさらに、6極磁石の平行移動誤差、4極磁石の回転誤差、偏向磁石の強度誤差と回転誤差についても、オプティクスパラメータ（ベータ関数、ディスパージョン、カップリングパラメータ等）の測定結果から4極磁石の平行移動誤差の場合と同様に推定する方法を検証した。また、推定に基づく補正を行った後のエミッタンス等、加速器の性能もPFリング、SuperKEKBについてシミュレーションにより確認している。ここでも、オプティクスパラメータのみを補正するのではなく、まず4極磁石の平行移動誤差を補正することで非線形効果を低減させることが、正確な誤差の推定を行うために重要であることが論じられている。

リング加速器における軌道の補正、オプティクスの補正は従来から広く行われているが、加速器によって異なる方法が採用され、また、その方法の妥当性は必ずしも理論的に明確ではないことが多い。本研究は、「条件数」、「スペクトル半径」という数学的概念を導入すること等により、最適な補正方法を得るための新たな知見を与えるものと考えられる。

以上のことにより、本審査委員会は全員一致で、清宮氏の論文は博士論文として十分な内容であり、合格と判断する。