

## Modeling for the injection bump system at the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron

Hiroyuki Harada<sup>1,A)</sup>, Kenta Shigaki<sup>A)</sup>, Yoshiro Irie<sup>B)</sup>, Tomohiro Takayanagi<sup>B)</sup>, Tomoaki Ueno<sup>B)</sup>,  
Kenichiro Kanazawa<sup>B)</sup>, Fumiaki Noda<sup>B)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>B)</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>B)</sup>, Hirohiko Someya<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8526

<sup>B)</sup> J-PARC, JAEA&KEK, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

### Abstract

We have made a model for the shift bump magnets at J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS). The shift bump magnets and quadrupole magnets are located closely with each other. Therefore, it causes the interference of magnetic field between magnets. It is important to make an appropriate model for these fields in order to simulate the influence on beam in injection, dump lines and RCS ring. We will present an introduction of injection system at RCS and the method of modeling for shift bump magnets.

### J-PARC 3 GeV RCS入射バンプシステムのモデル化

#### 1. 研究背景

J-PARC 3 GeV RCSでは、電磁石の設置および現地での総合試験が行われており、平成19年9月からはビームコミッショニングを開始する。

そのRCSの入射部の概要図を図1に示す。RCSでは、入射部の四極電磁石間に設置された水平シフトバンプ電磁石4台を用いて、周回軌道の上にバンプ軌道を立ち上げ、バンプ軌道の上にLINACから181MeVのH<sup>-</sup>ビームを入射する。バンプ軌道の上に設置された第一の荷電変換フォイルでH<sup>-</sup>ビームをH<sup>+</sup>ビームへと変換し、周回軌道へと入射される。また、H<sup>+</sup>ビームに変換されなかったH<sup>-</sup>, H<sup>0</sup>粒子は、第二および第三の変換フォイルでH<sup>+</sup>に変換し、ビーム廃棄へと導かれる。また、シフトバンプの上流部と下流部に水平ペイントバンプ電磁石を2台ずつ配置しており、その4台で周回軌道を時間的に変動させることで、ペインティング入射を行う[1]。RCSでは、上記で述べた手法でLINACから約240ターン、ビームが入射される。

図1のように、水平シフトバンプ電磁石4台と四極電磁石2台が各々近接して設置されるため、磁場の干渉の影響が予想される。そこで、各電磁石を組み合わせて磁場測定を行い、四極電磁石間のビーム進行方向における全領域について垂直成分(y方向)の磁場Byを測定した。磁極中心(x=0, y=0)におけるビーム進行方向の磁場分布を図2に示す。口径が大きい為、フリッジ磁場の広がりが大きくなり、その結果、磁場の干渉が発生し、磁石間の距離の違いによってシフトバンプ電磁石4台間の積分磁場(BL積)に違いが見られ、SB1とSB4の磁極中心のBL積がSB2に対してそれぞれ-0.78%, -0.69%であった。それ故に、バンプ軌道が閉じないため、中心周回軌道に軌道のずれ(COD)が生じる。しかしながら、シフトバンプ電磁石4台は直列に接続され、1台の電源で励磁するため、各々の励磁量を変化させてその影響を補正することができない。そこで、上下の鉄心間に薄い絶縁シートを挿入し、ギャップを調整することで、4台のシフトバンプ電磁石の磁場のバランスをとる

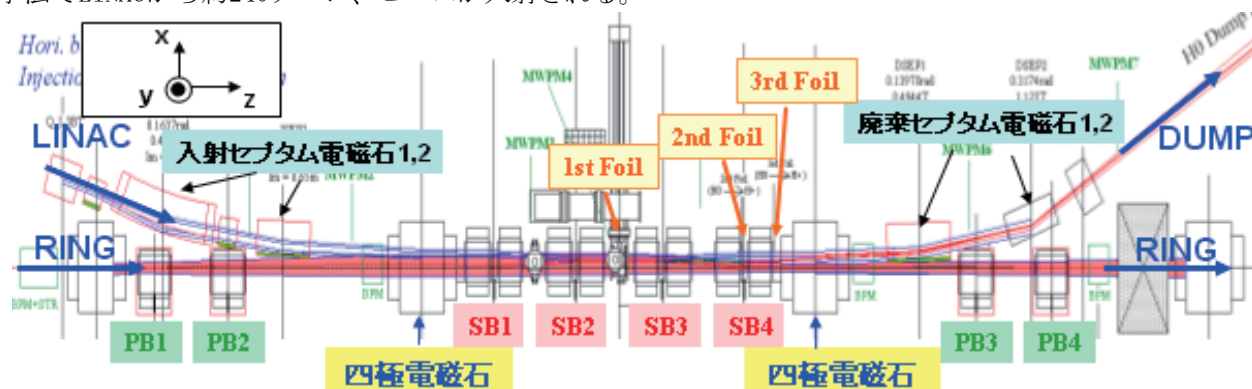


図1. RCS入射部の概要図

SB : 水平シフトバンプ電磁石、PB : 水平ペイントバンプ電磁石

<sup>1</sup> E-mail: harada@hepl.hiroshima-u.ac.jp

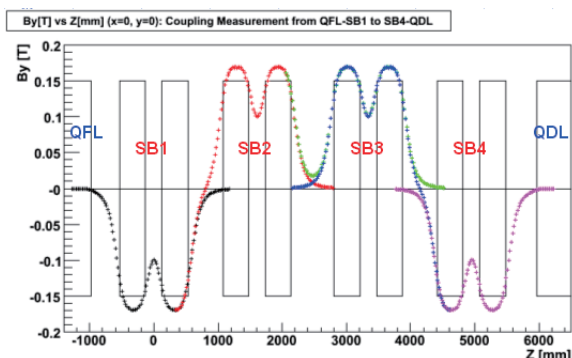


図2. 組み合わせ磁場測定による水平シフトバンプ電磁石全領域の磁場分布

QFL, QDLは四極電磁石、SB1,2,3,4は水平シフトバンプ電磁石4台、黒線はビーム進行方向における各電磁石の鉄心の位置関係を示す

[2]。また、この入射時間の間、シフトバンプ電磁石における高次の磁場成分と大きな軌道のシフトによって周回ビームへの非線形磁場の影響も増大する。加えて、入射バンプ軌道による中心周回軌道の対称性の破れが生じ、それは新たな共鳴の励起へとつながる。それ故に、本研究では水平シフトバンプ電磁石における磁場干渉の影響、高次の磁場成分やフリンジ磁場を含んだ精度の良いモデル化を行い、そのモデルを用いた調整ギャップ量の見積もり、RCSの入射時間における周回ビームに対する影響評価、加えて運転・調整ツールの作成を行い、入射ビームと周回中心軌道との精度良い軸合わせ調整を行う。

## 2. モデル化の手法

本研究では、水平シフトバンプ電磁石4台のモデル化を行い、そのモデルを用いて実際のビーム運転・調整を行う。現在、RCSではSAD[3]をベースとしたツール群の作成を行っており、本研究においてもSADに基づくモデル化を行った。主なモデル化の手法を以下に述べる。

### 2.1 電磁石の分割

図2で示した水平シフトバンプ電磁石の上下流に設置されている四極電磁石間の全領域に分割した電磁石を配置する手法をとった。加えて、その四極電磁石にもれこんだ磁場は、分割した両端の電磁石に組み込んだ。これらの分割した電磁石に磁場の主成分、高次成分、フリンジ成分を実装する。

### 2.2 各次の磁場成分の導出

各次の磁場成分（主成分、四極成分、六極成分など）を導出し実装することで、シフトした軌道に沿った、つまり各粒子の座標に対する蹴り角を各粒子に与えることができる。そこで、本研究では分割した各電磁石における中心面(y=0)における磁場を磁極中心で多極展開し、各次数の係数を導出し分割した電磁石に実装する手法をとった。

垂直方向の磁場 $B_y$ を以下の式で展開する。

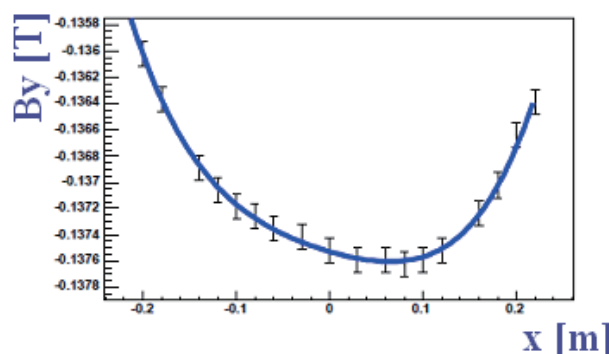


図3. 分割した電磁石における中心面の磁場(誤差つき黒点)と多項式の最小二乗法の近似曲線(青線)

$$B_y(x) = \sum_{n=0}^N a_n x^n, \quad a_n = \frac{1}{n!} \frac{\partial^n B_y}{\partial x^n}$$

実際の多極展開において、次数を増やしても各次数の係数は収束しない。そこで、本研究では次数が低く、影響がありそうな次数から、次数の組み合わせを変化させつつ、 $\chi^2$ が最小となる組み合わせを算出した。その組み合わせは、0次から4次までの多項式となった。その係数を固定して5次以降の高い次数を増やしながらか、展開し高次の次数も求めた。その結果、5次以降の係数は、2桁以上影響が小さいため、4次までの係数( $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ )を各電磁石で導出した。一例として、図2中の $z=510\text{mm}$ における中心面の磁場と最小二乗法の近似曲線を、図3に示す。また、近似後の曲線から $5\sigma$ 以上離れたデータを測定エラーとして除外し、再度最小二乗法近似の動作を繰り返し行い、各次数の係数を導出した。全領域における導出した4次までの各次数の係数の結果を図4に示す。導出した各次数の係数とK値との関係は以下の式である。

$$K_n = \frac{a_n L}{B\rho}$$

Lは磁極長[m]、 $B\rho$ は運動量に比例する係数である。上記の式を用いて各次数のK値を求め、それぞれの電磁石に実装した。

### 2.3 フリンジ磁場の影響

一般的な水平方向の偏向電磁石のフリンジ磁場は、磁極の端部で発生する。フリンジ磁場長を**b**、中心磁場の曲率半径 **$\rho$** 、エッジ角を **$\varepsilon$** とすると、線形フリンジ磁場による水平・垂直方向のマトリックス $M_H, M_V$ は、

$$M_H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\tan \varepsilon}{\rho} & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_V = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\rho} \left( \frac{b}{6\rho \cos \varepsilon} - \tan \varepsilon \right) & 1 \end{pmatrix}$$

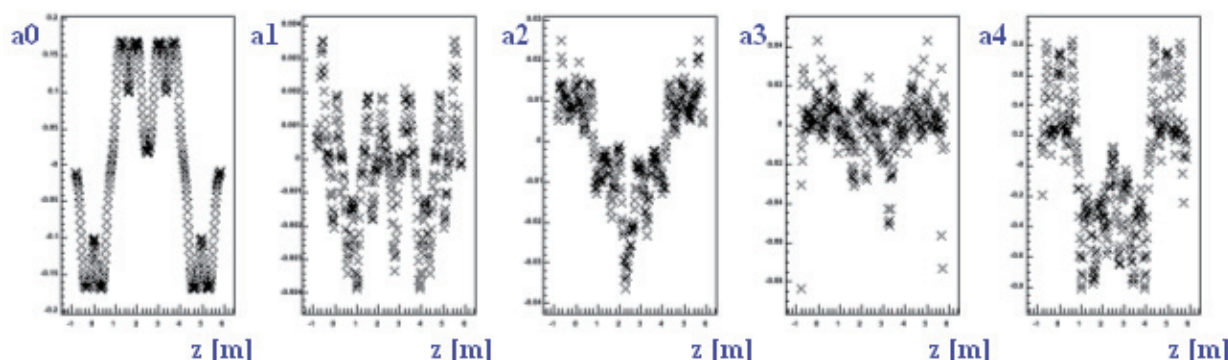


図4. 多極展開で導出した4次までの係数  
左から全領域におけるa0, a1, a2, a3, a4の係数

となる[4]。本研究における水平シフトバンプ電磁石の磁場分布は、フリンジ磁場の広がりが大きいため、ビーム進行方向の全領域において磁場の垂れ下がりの影響を考慮しなければならない。本研究では、分割した各電磁石間での磁場の垂れ下がりやSADにおけるF1の係数で実装した。このF1は、上記のbと同等でフリンジの磁場長である。

### 3. 周回軌道計算とギャップ調整

今後、本モデルの定量的な検証は必須となる。今回、本モデルを用いて、磁場干渉による周回軌道への影響とギャップ調整手法を検討した。本モデルを用いて、ギャップ調整無しの場合とSB2とSB3に薄い絶縁シートを挿入しそれぞれの磁場を0.6%減少させた場合の中心周回軌道への影響を評価した。それらの結果を図5に示す。設計中心軌道(黒線)に対するシフトバンプ電磁石間の磁場の干渉が引き起こす水平方向のCOD(赤線)は±7mm程度、ギャップ調整後COD(青線)は±2mm程度となった。SB2とSB3のギャップ調整から電磁石間のバランスがとれ、中心周回軌道のCODが抑制される結果を得た。モデル検証後、定量的な評価よりギャップ調整量を見積もる。

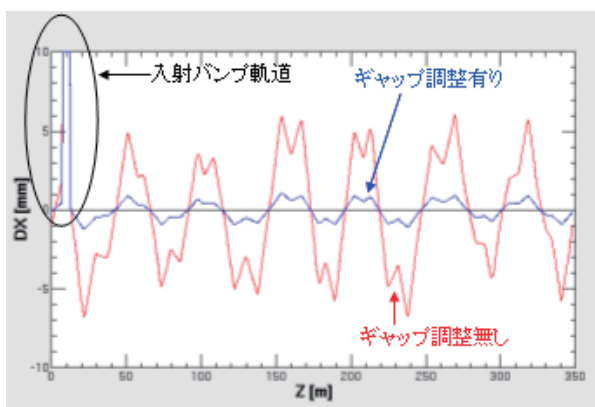


図5. 入射バンプ軌道と中心周回軌道

### 4. まとめと検討課題

本研究では、J-PARC 3 GeV RCSの入射バンプシステムのモデル化を行った。入射部の水平シフトバンプ電磁石は、2つの四極電磁石間に4台設置され

るが、大口径電磁石が各々近接して設置されるため、フリンジ磁場領域が広がり、磁場の干渉が生じる。これらの磁場のモデル化(計算への組み込み)は、周回軌道にマッチした入射軌道の調整や、周回ビームへの影響の評価において、非常に重要となる。そこで、磁場の干渉、高次の磁場成分、ビーム進行方向の磁場の垂れ下がりやを考慮したモデルを作成した。加えて、本モデルを用いて、磁場干渉による周回軌道への影響とギャップ調整手法を検討した。

今後の検討課題として、以下の4つを挙げる。

- 1、本モデルの定量的な評価が必須となる。そこで、ルンゲクッタ法とモデルを用いたSADによるビームトラッキングの結果を比較し、モデルの検証を行う。
- 2、本モデルを用いてギャップ量の算出やその他の電磁石を用いたCODの補正手法の検討を行う。
- 3、多周回のビームトラッキングによって、入射期間(240ターン)におけるビームの振る舞い、ダイナミックアパーチャ調査、新たに励起された共鳴線の探索などを行う。
- 4、実際のビーム調整試験において、実時間で計算可能な精度の良い本モデルを入射ビームと周回中心軌道との精度良い軸合わせ調整に使用し、入射軌道を確認させる。

### 謝辞

SADにおけるモデル化について、ご教授くださったKEKの生出教授(KEKB)、森田助手(KEKB)、安東教授(J-PARC)、RCSコミッショニンググループの方々に対して深く感謝いたします。

### 参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design report for high intensity proton accelerator facility project", JAERI-Tech 2003-044, March, 2003
- [2] T. Takayanagi, et al., "Measurement of the injection bump magnets at J-PARC 3 GeV RCS", This proceedings
- [3] SAD Home Page, <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [4] C. Bovet, et al., "A SELECTION OF FORMULAE AND DATA USEFUL FOR DESIGN OF A.G. SYNCHROTRONS", CERN/MPS-S/Int, April. 23, 1970