

# ANALYSIS OF J-PARC MAIN RING ORBIT DATA USING SINGULAR VALUE DECOMPOSITION

Shuei Yamada, Noboru Yamamoto

Accelerator Laboratory,

High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

## Abstract

Singular Value Decomposition (SVD) has shown its potential in extracting various sources of orbit distortion, as well as in evaluation the impact of countermeasure applied in order to diminish the distortion. Orbit data acquired by Beam Position Monitors (BPM) installed along the J-PARC Main Ring (MR) was decomposed by means of SVD. Those components with major singular value were investigated and sources of orbit distortion were extracted. It is important to understand sources of orbit distortion and evaluate impact of improvements in order to achieve higher intensity proton beam and stable operation. Results of application of SVD to MR are reported.

## 特異値分解を用いたJ-PARC Main Ring軌道データの解析

### 1. はじめに

J-PARC 主リング (MR) はMW 級の大強度陽子シンクロトロンである。前段の加速器である RCS から MR に入射された 3GeV の陽子ビームは 30GeV まで加速され、T2K 長基線ニュートリノ振動実験や様々な素粒子原子核実験に供される。そのためには、より強くより安定したビームを発生させなければならない。MR は現在、物理ランへ向けてコミッショニング中である。

MR には186台のビームポジションモニタ (BPM) が全周にわたって設置されており、ビームの水平方向と垂直方向の位置を入射から出射まで1ミリ秒毎に測定することができる。本論文では、RCS から MR へ入射された 3GeV の陽子ビームを加速せずに1秒間 MR で周回させた際の水平方向の軌道データを解析した。

### 2. 特異値分解

$M$  を  $m$ 行 $n$ 列の行列とすると、 $M$  の特異値分解は

$$M = U \cdot S \cdot V^T \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $U$  と  $V$  はユニタリ行列である。 $S$  は  $M$  の特異値を対角成分に持つ行列で、対角成分以外は零である。

MR の軌道データを特異値分解で解析すると、空間的・時間的に際立った特徴を持つ成分を抽出することができる。BPM で測定したリング一周分の

軌道データからなる行ベクトルを考える。この行ベクトルを入射から出射までの時系列に沿って列方向に並べると、1000行186列の行列を組み立てることができる。

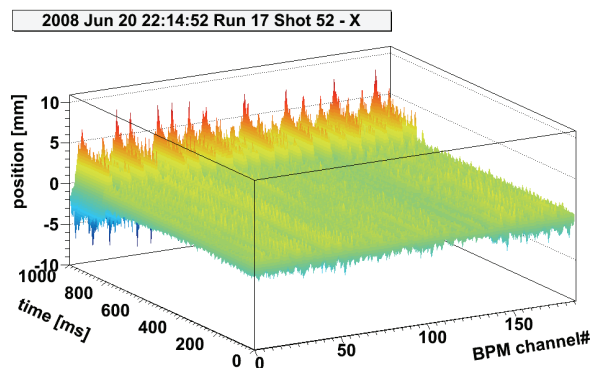


図1: MRの軌道データ

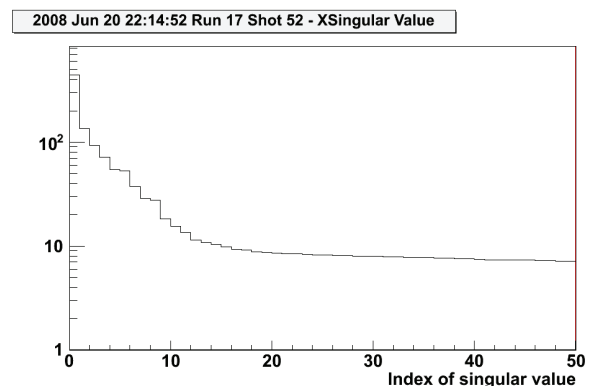


図2:大きい方から50番目までの特異値

この行列を特異値分解して得られた行列  $V$  の列ベクトル  $v_i$  は正規直行ベクトルで、 $i$  番目の軌道変動のパターンを表している。行列  $U$  の列ベクトル  $u_i$  も正規直行ベクトルで、 $i$  番目の軌道変動の時間変化を表している。また、 $S$  の対角成分  $s_i$  は  $i$  番目の軌道変動の強度を表している。

### 3. MR軌道データの解析

図1は、入射から出射までの1秒間の MR の水平方向の軌道データで、1000行186列の行列を3次元的に表示したものである。図2は最も値が大きなものから50番目までの特異値を示したものである。本論文では最も値の大きな特異値と2番目に値の大きな成分についての解析を報告する。

#### 3.1 セプタム電磁石の漏洩磁場

図3の青い線は、特異値が最も大きかった軌道変動のパターン  $v_1$  に特異値  $s_1$  を乗じたもので、各 BPMでの軌道変動の大きさを示している。図4はこのパターンを補正するのに必要な補正電磁石のキック量を SAD<sup>[2]</sup> を用いて求めたもので、MRの偏向電磁石の蹴り角である 3.75° に対する相対的なキック量を示している。図4では、入射セプタムと出射セプタムに対応した位置に大きなキック量が見られる。補正後に期待される軌道を、図3に赤い線で示してある。

図5は列ベクトル  $u_1$  に特異値  $s_1$  を乗じたもので、軌道変動のパターンの時間変化とその大きさを示している。入射直後から50ミリ秒までと、800ミリ秒から出射までの時間変化は、それぞれ入射セプタムと出射セプタムの励磁パターンに同期している。これらのことから、入射セプタムと出射セプタムの漏洩磁場が軌道変動を引き起こしていると考えられる。

MR では、2008年7月から11月にかけてのシャットダウン期間中に、入射セプタムに磁気シールドを施し、漏洩磁場への対策を図った。

入射セプタムの漏洩磁場の影響を調べるため、ビーム入射から500ミリ秒までの軌道データの特異値分解した。漏洩磁場による軌道変動のパターンを補正するのに必要な補正電磁石のキック量を SAD で求め、漏洩磁場によるキック量を見積もった。

磁気シールドを施す前の入射セプタムの漏洩磁場によるキック量 (図6) と施した後 (図7) との比較から、磁気シールドを施すことによって入射セプタムの漏洩磁場が約60%に減少したことがわかった。

#### 3.2 偏向電磁石電源のリプル

特異値が2番目に大きかった軌道変動のパターン (図8) は偏向電磁石のリプルが原因であると考えられる。図9はこのパターン補正するのに必要な補正電磁石のキック量である。偏向電磁石が設置されている円弧部にだけ、大きなキックが見られる。

パターンの時間変動に対して周波数解析を行うと、50Hzと100Hzに大きな成分が見られた (図10)。これ

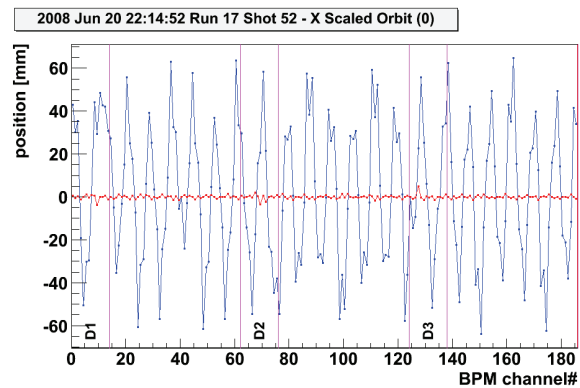


図3：最も強度が大きかった軌道変動のパターン

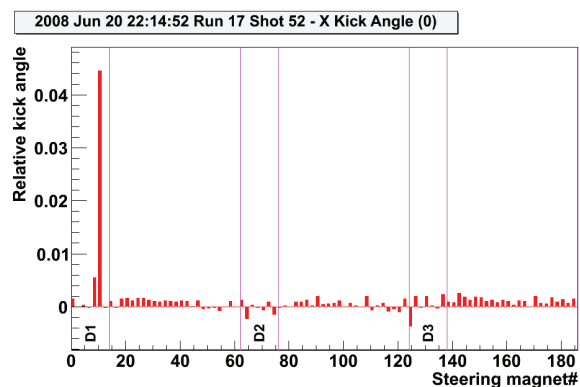


図4：軌道変動を補正するのに必要なキック量

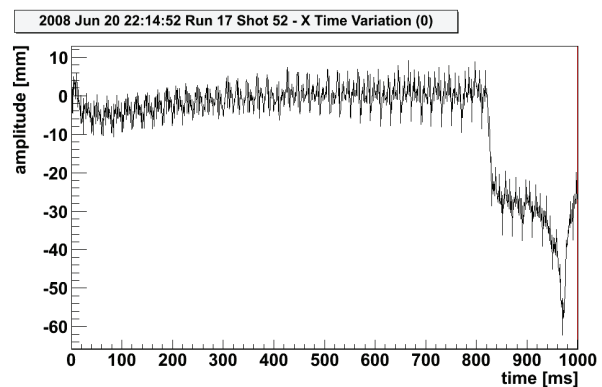


図5：軌道変動の時間変化

らの周波数は偏向電磁石の電源が発生しているリプルと一致している。

MR では、2008年7月から11月にかけてのシャットダウン期間中に偏向電磁石の配線を対称化し、リプルの低減を図った<sup>[3]</sup>。

図11は、配線対称化後に特異値が2番目に大きかった成分の時間変動を周波数解析したものである。配線対称化前には周波数成分に多数のピークが見られたが、対称化後にはリプルがなくなった事がわかる。対称化後にも残った100Hzのピークは、配線を対称化しても取り除くことのできないコモンモードリプルである。また、350HzのピークはMRのシンクロトン振動が軌道変動に影響を及ぼしてい

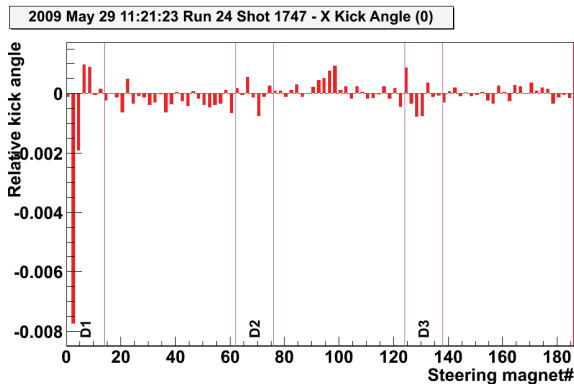


図6：磁気シールドを施す前のキック量

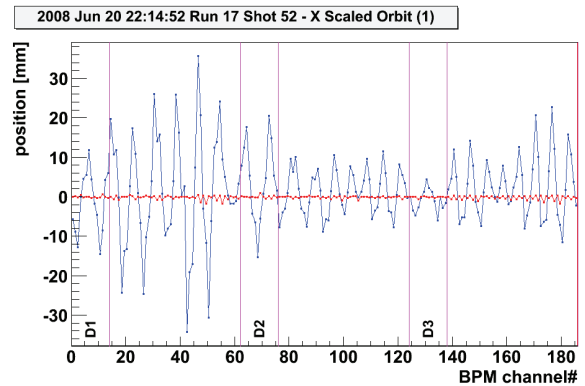


図8：2番目に強度が大きい軌道変動のパターン

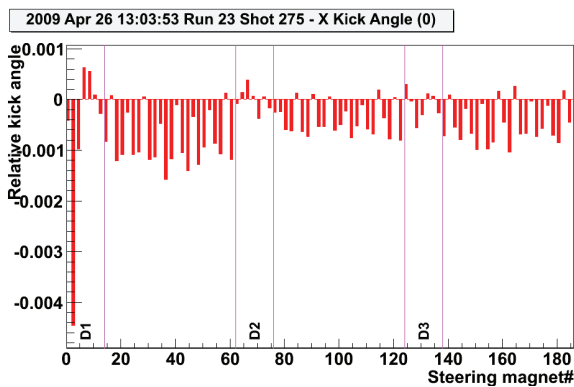


図7：磁気シールドを施した後のキック量

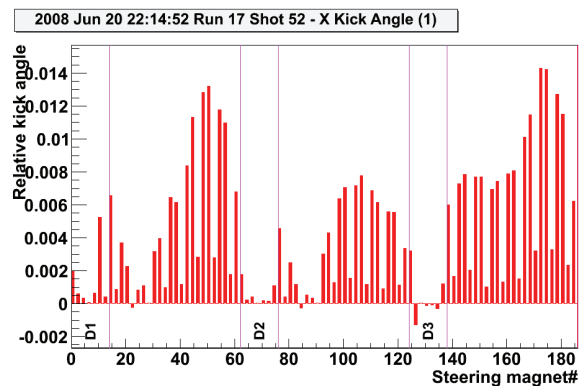


図9：2番目のパターンの補正に必要なキック量

るために現れたものである。

#### 4. MRの性能向上へ向けて

特異値分解を用いることで、複合的な軌道変動の原因を分解できることがわかった。また、問題への対応策の効果を確認できることがわかった。

特異値分解で得られる様々な軌道変動のパターンを蓄積しモニタすることで、既知の問題点の変化を追跡したり、新たな問題の発生を検出したりするなど、MRの更なる性能向上に特異値分解を活用していく。

#### 参考文献

- [1] A.Wolski, et al., "Initial Results from Model Independent Analysis of the KEK ATF", Proceedings of EPAC 2002, Paris, France, 1205-1207
- [2] SAD home page, <http://acc-physics.kek.jp/SAD/index.html>
- [3] 中村衆, "J-PARC MRにおける電磁石電源の問題点と対策", 第6回日本加速器学会年会、技術研修会, Tokai, Japan, Aug.5-7, 2009

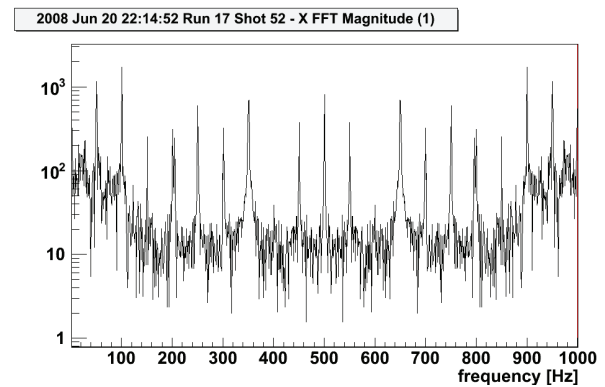


図10：2番目のパターンの時間変動の周波数成分

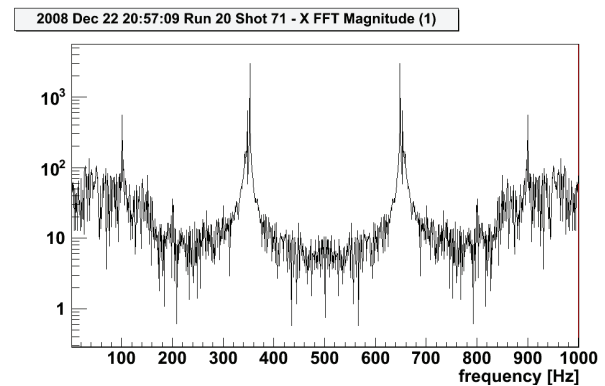


図11：配線対称化後の時間変動の周波数成分