

NONLINEAR DISPERSION AND CHROMATICITY MEASUREMENT IN J-PARC MR

Susumu Igarashi ^{#,A)}, Ainosuke Ando^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{B)}, Tadashi Koseki^{A)}, Yoichi Sato^{A)},
Masashi Shirakata^{A)}, Junpei Takano^{A)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Takeshi Toyama^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

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

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakatashirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

The dispersion function and chromaticity have been measured for the main ring of the Japan Proton Accelerator Research Complex and parameterized with nonlinear functions of the fractional momentum deviation ($\delta = \Delta p/p$). The dispersion function was derived from the closed orbit distortion for the range of $|\delta| < 1.3\%$. The measured linear and first order nonlinear dispersion functions at every available beam position monitor were in a good agreement with the optics calculation. The chromaticity was derived from the tune measurements for the same range of δ . We found that the agreement was good between the measurement and the optics calculation taking the sextupole component of the bending magnets into account. We were able to understand the optics parameters for the wide range of the momentum deviation.

J-PARC MR における非線形ディスパージョンとクロマチシティの 測定

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の主リング(MR)は大強度の陽子を 3 GeV で入射し、30 GeV まで加速して取り出す加速器で、2012 年 6 月には 1.08E14 個の陽子、ビームパワーとして 200 kW のビームをユーザーに供給した。機器の放射化を最小限にするため、ビームロスの低減とコリメータへの局在化が重要となっている。ビームロスの低減とコリメータへの局在化が重要となっている。ビームロスは主に 3 GeV のときに発生し、平均的なロス粒子数は 2 % 程度で、ロスパワーは 450 W であった。ビームロスを低減するため、MR は横方向、縦方向ともに大きなアパーチャーを確保しており、横方向は 81π mmmrad、縦方向は運動量偏差 $\delta = \Delta p/p$ で 0.67 % となっている。ビームサイズが小さい場合にはより大きな偏差が許容できる。この大きなアパーチャーの範囲で MR の光学パラメータの理解のために、広い運動量偏差の範囲でのディスパージョンとクロマチシティの測定を行った。

MR はクロマチシティ補正のために 72 台の六極電磁石を使用しており、非線形効果を考慮する必要がある。広い運動量偏差の範囲で測定を行い、ディスパージョンの非線形の項までの測定を行った。

ベータatron振幅関数(β)とディスパージョン(η)については、いままでに測定されている^[1,2]。測定された水平方向の β 変調は rms で 12.0%あり、その変調には 3 回対称性が見られた。11 ファミリーの四極電磁石の設定のずれを仮定して、k 値の補正により、光学補正を行った。補正後、水平方向の β 変調は rms で 4.5%と改善した。垂直方向 β については元々あまりずれがなかったため、 β 変調の rms は補正前

の 4.3 % から補正後の 4.7 % とほぼ変化なかった^[3]。

2. ディスパージョン測定

ディスパージョンの測定のために、運動量偏差 δ が-1.3 %から+1.3 %の範囲で、閉軌道のずれ(COD)を測定した。運動量偏差の設定は rf 周波数の設定によって行った。測定は図 1 のように、入射期間(0.17 s)で行い、入射後 0.05 s から 0.1 s の間で rf 周波数を変化させた。シンクロトロン振動に比べて充分遅くアディアバティックな変化となる。ビームは通常の運転では 4 回で 8 バンチ入射するが、この測定では 1 回(K1)、1 バンチのみで、加速開始時(P2)で取り出している。ビーム強度は 5×10^{11} ppb、rf 電圧は 130 kV、チューンは(22.37, 20.77)とした。COD は、それぞれのビーム位置モニター(BPM)を使い、10 ms 毎に測定し、変化前の 5 回の測定と、後の 5 回の測定の平均の差を軌道の変化とした(図 1)。

この軌道の変化を、それぞれの運動量偏差の設定についてプロットしたものを図 2 に示す。この結果は 2 次の多項式で良くフィットできている。1 次の項は線形ディスパージョンとなり、2 次の項は非線形の 1 次のディスパージョンとなる。

BPM 処理回路は動作不安定となる場合があり、186 台のうち今回は 2 台の測定ができなかった。正常に読み出せた全ての BPM 測定について同じ解析を行い、線形ディスパージョンを図 3 に示す。測定結果は良い三回対称性を示している。また、SAD^[4]による計算値とも良く一致している。測定値の計算値からのずれの最大値は 0.1 m であった。

[#] susumu.igarashi@kek.jp

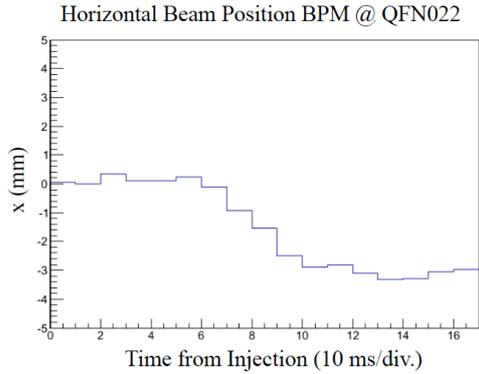


図 1 : BPM022 での水平方向軌道位置の時間的な変化。入射後 0.05 s から 0.1 s の間で運動量偏差 0.5 % に対応する rf 周波数を変化させている。

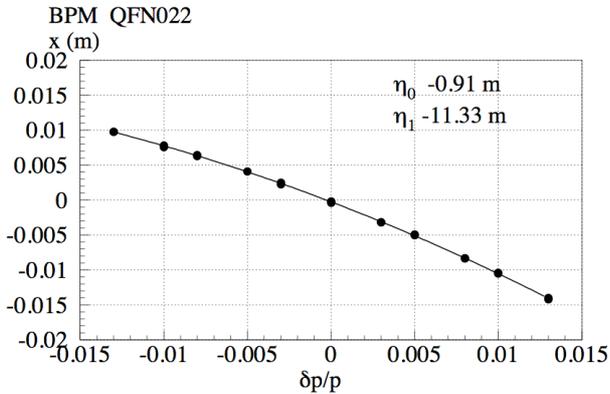


図 2 : BPM022 での水平方向ビーム位置についての運動量偏差依存性。

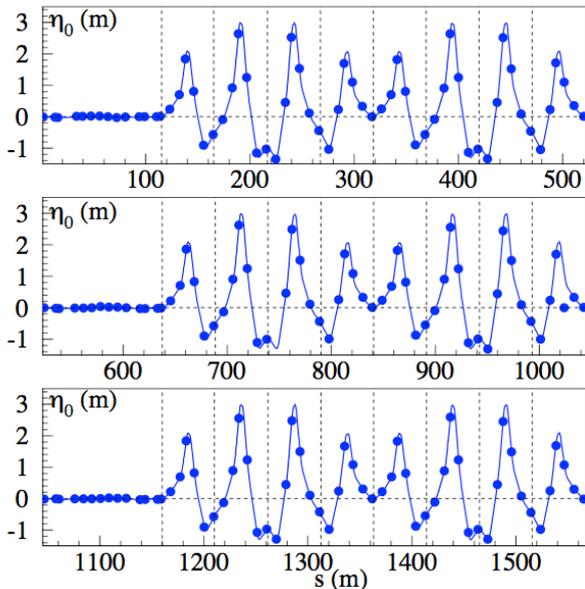


図 3 : 線形ディスパージョンの測定値 (●) と SAD による計算値 (実線)。MR 全周のうち、上図に直線部 A とアーク部 A、中図に直線部 B とアーク部 B、下図に直線部 C とアーク部 C を示す。

3. 非線形ディスパージョン

運動量偏差 δ について水平方向運動 x を展開して式(1)のように表す場合、

$$x = \eta_0 \delta + \eta_1 \delta^2 + O(\delta^3) \quad (1)$$

非線形ディスパージョン関数 η_n は、式(2)の漸化式で表すことができる^[5]。

$$\eta_n'' + (K_x^2 + g_0) \eta_n = \Omega_n(\eta_0, \dots, \eta_{n-1}) \quad (2)$$

ここで、非斉次項 $\Omega_n(\eta_0, \dots, \eta_{n-1})$ は以下の様に表される。

$$\Omega_0 = K_x \quad (3)$$

$$\Omega_1 = g_0 \eta_0 - \frac{1}{2} \lambda_0 \eta_0^2 - K_x \left(1 - \frac{1}{2} \eta_0'^2 \right) \quad (4)$$

$$+ 2K_x^2 \eta_0 - K_x^2 \eta_0 - K_x^3 \eta_0^2$$

ここで K_x は偏向電磁石の曲率、 g_0 、 λ_0 は四極、六極電磁石の強さを示す。軌道計算プログラム SAD を用い、非斉次項をエラー源としたときの軌道のずれを求め、非線形 1 次のディスパージョンの計算値を求めた。

非線形の 1 次のディスパージョンについても同様のプロットを作成した (図 4)。測定結果は良い三回対称性を示している。また、SAD による計算値とも概ね一致している。

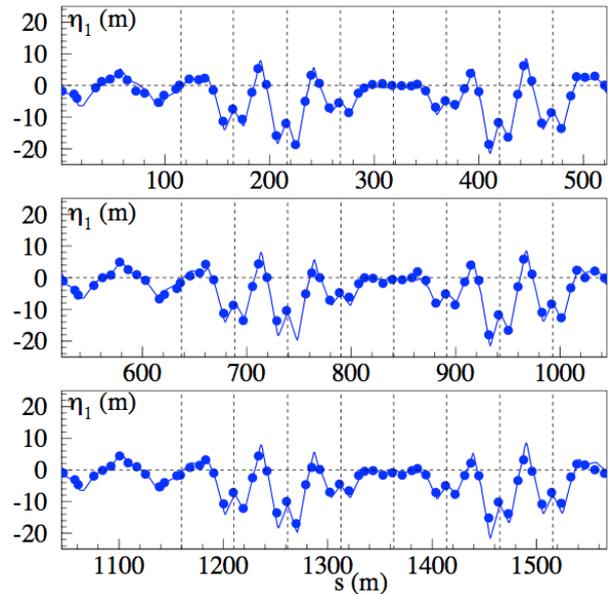


図 4 : 非線形 1 次ディスパージョンの測定値 (●) と SAD による計算値 (実線)。MR 全周のうち、上図に直線部 A とアーク部 A、中図に直線部 B とアーク部 B、下図に直線部 C とアーク部 C を示す。

更に、水平方向ビーム位置 x の測定値を運動量偏差 δ についての 3 次の関数としてフィットを行い、非線形 2 次のディスパージョンについて測定値を求めた。また SAD を用いて計算を行い、比較したが、あまり良い一致にはならなかった。図 2 に見られる

様に、2次関数として良くフィットできており、更に高次の項を求めるには、軌道の測定精度を上げる必要がある。今回は10 ms サンプルのデータを用いたが、1 ms サンプルでデータを取ることで、より精度を上げることが可能だと考えられる。

4. モーメントムコンパクションファクタ

ディスページョンの高次項に起因するモーメントムコンパクションファクタについて検討した。運動量偏差 δ に関する周長 C の変化は、式(5)で表すことができる^[6]。

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{1}{C} \oint \frac{\eta}{\rho} ds \cdot \delta = \alpha_0 \delta + \alpha_1 \delta^2 + O(\delta^3) \quad (5)$$

SAD を使って計算すると、線形ディスページョンに対応する δ の1次の係数 α_0 は-0.00092、非線形1次に対応する α_1 は-0.028 となった。 δ が1 %の場合、2次の効果は、1次に比べて30 %となる。スリッページファクタについては、 δ が1 %の場合で、2次の効果は、1次に比べて、3 GeV のとき0.5 %、30 GeV のとき15 %となる。

5. クロマティシティ測定

ディスページョン測定と同様に、運動量偏差 δ が-1.3 %から+1.3 %の範囲で変えたときの、チューンの変化を測定した。チューンの測定は、それぞれ水平方向、垂直方向のエキサイターでビームのベータトロン振動を励起し、BPM 信号のリアルタイムスペクトラムアナライザを用いた周波数解析によって行っている^[7]。水平方向チューンの運動量偏差 δ 依存性を図5に、垂直方向チューンの運動量偏差 δ 依存性を図6に示す。

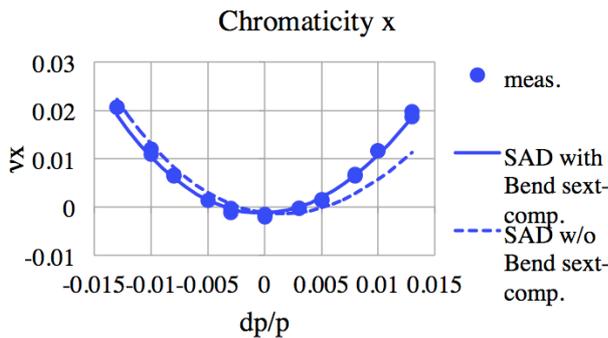


図5：水平方向クロマティシティの測定値（●）とSADによる計算値、偏向電磁石磁場の六極成分を考慮したもの（実線）と考慮しないもの（点線）。

MR は六極電磁石なしでは、水平、垂直ともに-30 程度の大きなナチュラルクロマティシティを持つ。六極電磁石3つのファミリー、SFA 24台、SDA 24台、SDB 24台で補正して、その強さはSFA 0.54 m^2 、SDA と SDB は-0.44 m^2 で、水平方向クロマティシティ -0.02、垂直方向クロマティシティ +0.26 とほぼ0に補正されている。

磁場測定から偏向電磁石磁場はダイポール磁場に

比べれば非常に小さいが、-0.0073 m^2 の強さの六極成分を持つ。偏向電磁石は96台あり、単純に積算するとSDAの1.5台分程度となる。SADを用いて、運動量偏差 δ を変化させたときのチューンを計算した（図5、6）。偏向電磁石の六極成分の効果が、水平、垂直方向の両方で見られ、六極成分を考慮したほうが測定結果と良く一致している。

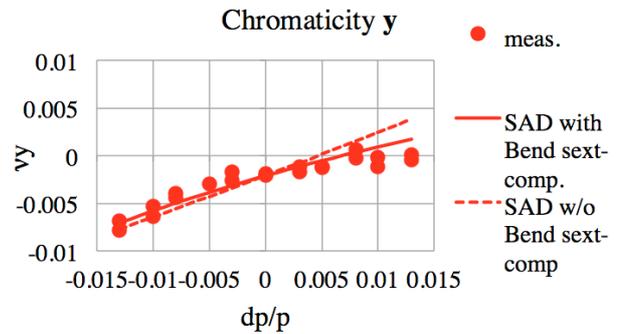


図6：垂直方向クロマティシティの測定値（●）とSADによる計算値、偏向電磁石磁場の六極成分を考慮したもの（実線）と考慮しないもの（点線）。

6. まとめ

運動量偏差 δ が-1.3 %から+1.3 %の範囲でディスページョンとクロマティシティの測定を行った。測定された線形ディスページョンと非線形1次のディスページョンは良い三回対称性を示し、計算とも良く一致している。大きなナチュラルクロマティシティは、72台の六極電磁石でほぼ0に補正でき、偏向電磁石の六極成分を考慮した計算と良く一致している。広い運動量偏差の範囲で光学パラメータを理解することができた。

参考文献

- [1] J. Takano, et al., “ステアリング電磁石を用いた J-PARC MR の β 関数測定”, Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Aug. 5-7, 2009
- [2] J. Takano, et al., “J-PARC MR の Dispersion 測定”, Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Naka, Ibaraki, Aug. 5-7, 2009
- [3] S. Igarashi, et al., “J-PARC MR における光学測定とその補正”, Proceedings of the 8th Particle Accelerator Society Meeting, Tsukuba, Ibaraki, Aug. 1-3, 2011
- [4] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [5] K. Soutome, et al., “Higher Order Formula for Nonlinear Dispersion”, Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, Sweden, Jun. 22-26, 1998
- [6] A. Ando, et al., “Synchrotron Oscillations with Very Small η ”, IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-30, No. 4, 2604, 1983
- [7] T. Toyama, et al., “J-PARC MR のビーム診断”, Proceedings of the 4th Particle Accelerator Society Meeting, Wako, Saitama, Aug. 1-3, 2007