

J-PARC 主リングにおけるビームの縦方向振動解析 ANALYSIS OF LONGITUDINAL BEAM OSCILLATION IN J-PARC MR

杉山泰之^{*A)}、吉井正人^{A)}、大森千広^{A)}、長谷川 豪志^{A)}、原 圭吾^{A)}、古澤 将司^{A)}、
田村 文彦^{B)}、山本 昌亘^{B)}、野村 昌弘^{B)}、島田 太平^{B)}

Yasuyuki Sugiyama^{*A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Masashi Furusawa^{A)},
Fumihiko Tamura^{B)}, Masanobu Yamamoto^{B)}, Masahiro Nomura^{B)}, Taihei Shimada^{B)}

^{A)}J-PARC/KEK

^{B)}J-PARC/JAEA

Abstract

J-PARC Main Ring (MR) is a high intensity proton synchrotron which accelerates protons from 3 GeV to 30 GeV. The beam power for fast extraction reached 470 kW, which corresponds to 2.4×10^{14} proton per pulse, in February, 2017. We have observed the longitudinal dipole coupled bunch instabilities in the MR for beam power beyond 470 kW. To investigate the source of instabilities and to mitigate them, we have identified the modes of the longitudinal dipole coupled bunch oscillation and measured their growth during the cycle using the beam signal. The identification and measurement were done with two different methods which use the motion of bunch centers and the frequency spectrum around the harmonics of the revolution frequency. In the presentation, we present the method and the result of the measurement of the longitudinal coupled bunch instabilities in the J-PARC MR.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の主リング (MR) シンクロトロンでは陽子ビームを 30GeV まで加速し、ニュートリノおよびハドロン各実験施設へと供給している。Table 1 に速い取り出しモードにおける MR 及びその RF 加速システムの運転パラメータを示す。速い取り出しにおいては、 2.4×10^{14} ppp の陽子を加速して 2.48 秒繰り返して取り出すことで 2017 年 2 月に取り出し強度 470kW を達成している。

Table 1: Operation Parameter of J-PARC MR and RF system for Fast Extraction

circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
beam intensity	(achieved) 2.4×10^{14} ppp
beam power	(achieved) 470 kW
repetition period	2.48 s
accelerating period	1.4 s
accelerating frequency f_{RF}	1.67–1.72 MHz
revolution frequency f_{rev}	185–191 kHz
harmonic number: h_{RF}	9
number of bunches N_b	8
maximum rf voltage	300 kV
fundamental harmonic cavities	7
second harmonic cavities	2

MR においては金属磁性体を用いた加速空洞によって陽子を加速している。Figure 1 に示すように、加速空洞のインピーダンスは加速に必要な周波数の範囲である 1.67–1.72 MHz をカバーしており、1 種類の加速空洞で入射から取り出しまでの加速を行うことが出来る。

* yasuyuki.sugiyama@kek.jp

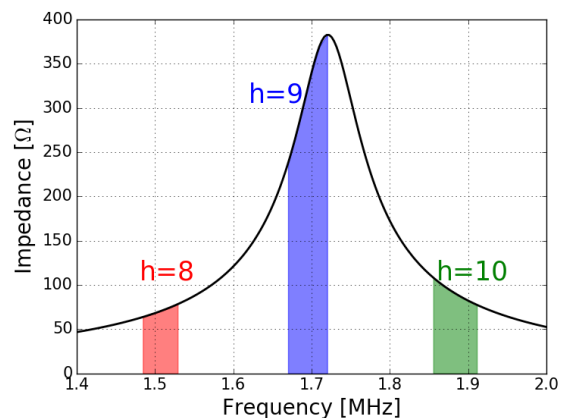


Figure 1: The frequency response of the impedance of the RF cavity.

MR ではハーモニック数 9 の基本波加速空洞 7 台で最大 300kV の加速電圧を発生させて陽子を加速すると共に、ハーモニック数 18 の 2 倍高調波空洞 2 台を用いてビームの縦方向プロファイルの最適化を図っている。ビーム電流によってこれらの空洞に発生するビームローディングに関しては、壁電流モニター (WCM) [1] から得られたビーム信号を元にそれを打ち消す RF フィードフォワード法 [2] を用いて補償を行っている。

大強度化に伴い、加速される陽子ビームの縦方向の振動が観測されるようになってきた。大振幅の縦方向振動はリング内でのビーム損失の原因となりうる。また、取り出しビームの運動量に大きなばらつきが生じることは、有限の運動量分散を持つ実験側ビームラインからは受け入れられないものである。速い取り出しにおいては強度が増すにつれて縦方向の振動の増加が顕著になってきており、500kW を越える取り出し強度の実現には縦方向振動の抑制が必要であると考えられた。

2. ビーム加速中のバンチ振動

MR のリング中に設置された壁電流モニター (WCM) の信号をオシロスコープを用いて波形情報として記録し、周回している陽子ビームの縦方向の運動を観測した。オシロスコープでのデータ収集においては、WCM の 1 ターン分の波形情報を LLRF からの周回周波数クロック f_{rev} 信号と合わせて 1ms 毎に記録することによって加速開始から取り出し直前までのビームの縦方向振動情報を記録出来るようにした [2]。波形の取得には、LeCroy 社 WP715zi を用いてサンプリング周波数 500MHz でおこなった。

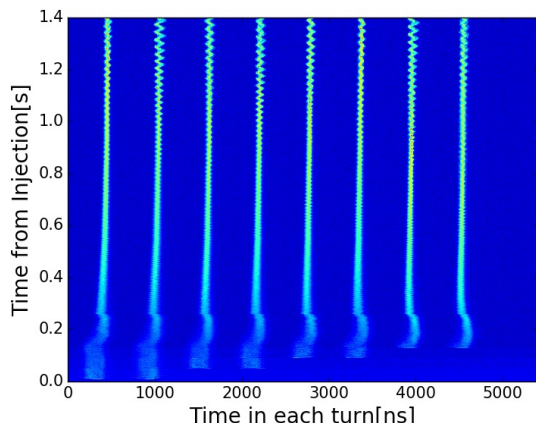


Figure 2: Mountain plot of 8 bunches in the J-PARC MR for 480 kW during study.

ビームスタディ時の際に強度 480 kW の取り出しを行った際のマウンテンプロットを Figure 2 に示す。各バンチが二極振動を起こしており、その振幅が加速終盤に近づくにつれて増大していることが分かる。また、その振動の振幅や位相がバンチ毎に異なっていることが分かる。このような振動はバンチ結合 (Coupled Bunch, CB) 振動と呼ばれ、それによる不安定性はバンチ結合不安定性 (Coupled Bunch Instabilities, CBI) と呼ばれる。バンチ結合振動のモードを同定しそれに対応する周波数のインピーダンス源を探ることによって、その原因を明らかにすることが可能となる。

3. バンチ結合振動モード

バンチ結合振動モードは以下のように定義される。加速バケツの数、つまりハーモニック数が M の場合には M 個の振動モードが存在し、隣接するバンチ間の振動の位相差が $2\pi n/M$ である振動をモード n のバンチ結合振動と呼ぶ。この際、それぞれのバンチは各モードで位相は異なるが同じ振動数及び振幅で振動を行う。

また、バンチ結合振動はビーム信号の周波数スペクトルにおいては以下のように周回周波数 f_{rev} のハーモニックのサイドバンドとして現れる。[3]

$$f_{p,m,n} = |(pM + n)f_{\text{rev}} + mf_s|, (-\infty < p < \infty) \quad (1)$$

ここで、 n は振動モード、 f_s はシンクロトロン振動周波数である。また、 m は振動の種類を表し、 $m = 1$ の

場合は二極振動、 $m = 2$ の場合は四極振動に相当する。本稿においては、MR においてみられている二極振動のみ注目することとする。 $p \geq 0$ の場合には上側波帯 (Upper Side Band, USB) に現れ、 $p < 0$ の場合には下側波帯 (Lower Side Band, LSB) に現れる。加速ハーモニックまでの範囲の周波数に注目すると、モード n の振動成分が現れる周波数は

$$f_n^+ = nf_{\text{rev}} + f_s \quad (2)$$

$$f_n^- = (M - n)f_{\text{rev}} - f_s \quad (3)$$

となる。MR の場合には、 $M = 9$ となり、Figure 3 に示すような振動モードが存在する。

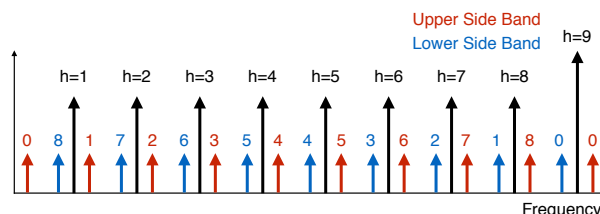


Figure 3: Coupled Bunch Oscillation mode for J-PARC MR. ($M=9, m=1$)

4. ビームのバンチ結合振動モード解析

バンチ結合振動のモード同定の手法としては、隣接バンチ間の位相差を求める手法 [4] と、周波数スペクトルのパターンを元に解析する手法 [5] が存在し、今回はそれぞれの手法を用いてモードの同定を行った。

4.1 バンチ中心振動解析

各バンチ中心の振動を解析することにより、バンチ結合振動のモード同定を行った。まず、Figure 2 を元に、1 ターン分の波形信号を 9 個のバケツに区切って各バケツ内の位相に対する電流情報とした上で、バケツ内の信号の重心を取ることで各ターンでの各バンチ中心の位置を求めた。こうして得られたバンチ中心の軌跡を Figure 4 に示す。それぞれのバンチの中心が、加速開始から 0.8 秒あたりから振動をはじめ、加速終盤になるに従って振幅が増大していることが分かる。また、バンチによって振幅や位相が異なることもわかる。

各バンチ中心の軌跡を以下のように sin 関数でフィットすることにより、各バンチのシンクロトロン振動の振幅 a_i と位相 θ_i を求める。

$$y = a_i \sin(2\pi f_s t + \theta_i) + C_i \quad (4)$$

フィット範囲は加速周波数や偏向電磁石の磁場変化から計算して求めたシンクロトロン振動の 2 周期分とし、フィット範囲をずらしていくことで各ターンでの振動振幅と位相を求めた。バンチ結合振動の位相を求める際には、それぞれのバンチが同じ振動数で振動していなければいけないため、フィットを行う際には、一旦各バンチに対してフィットを行った上で、フィットで得られた各バンチの振動数の平均を共通の振動数として改めてフィットを行った。こうして得られた各バンチ

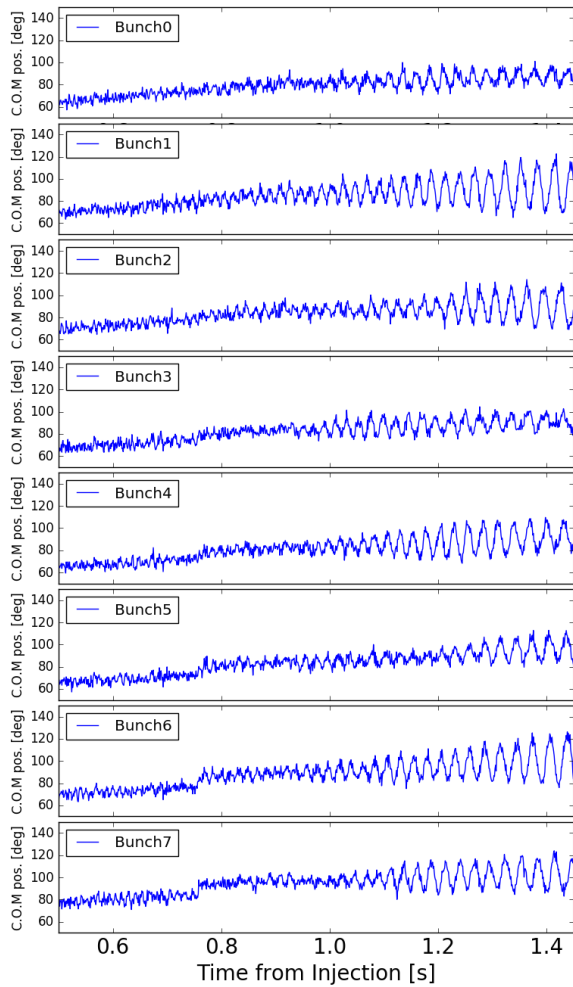


Figure 4: The track of the center of mass of each bunch.

のシンクロトロン振動の振幅 a_i と位相 θ_i に対して以下のようにフーリエ変換を行うことによって、振動モードの同定を行う。

$$A_n e^{-i\Theta_n} = \frac{1}{M} \sum_k a_k e^{-i\theta_k} e^{2\pi i k n / M} \quad (5)$$

ここで、 A_n 、 Θ_n はモード n の振動振幅と位相である。Figure 2 に対応する各モードの振幅の時間変化を Figure 5 に示す。振動の振幅が最も顕著であるのがモード $n = 8$ であることが分かる。また、それ以外にもモード $n = 4, 6, 7$ など複数のモードで振動していることも分かる。

取り出し直前での各モードの振幅のビーム強度に対する変化を Figure 6 に示す。どの振動モードについても 470 kW 以上の強度で振幅が増大していることが分かる。その中でも特にモード $n = 8$ の振動の振れ幅が大幅に増大することが分かる。

4.2 ハーモニクス振動解析

WCM で得られるビーム信号の周回周波数のハーモニクス成分を取りだして解析し、どのハーモニックのどのサイドバンドが振動しているかを調べることに

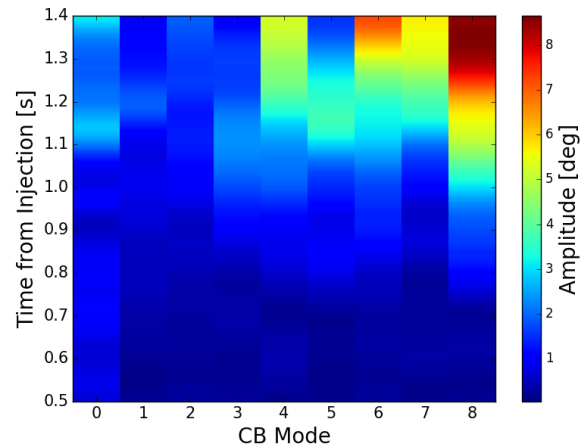


Figure 5: Amplitude of CB Oscillation Modes.

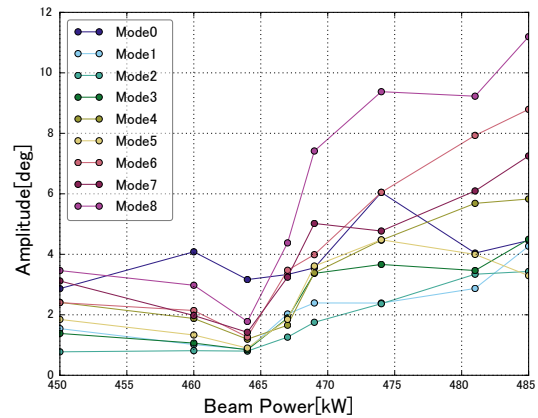


Figure 6: Amplitude of CB Oscillation Modes at the extraction timing.

り、振動モードの同定を行った。

ハーモニクス成分の振動解析の流れを Figure 7 に示す。オシロスコープで得られた WCM 波形に対して、直交検波を行うことでハーモニクス成分の検出を行い、さらに片側波帯フィルタリング (Single-SideBand filtering, SSBF) と呼ばれる処理を行うことで USB と LSB を選択的に取り出している。

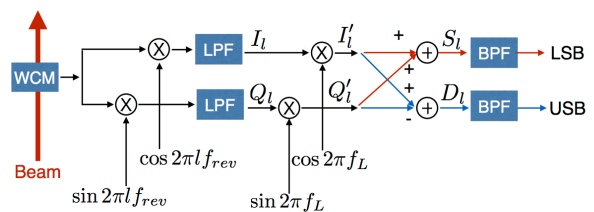


Figure 7: Procedure of Single Side Band Filtering.

ハーモニクス成分の検出に用いる直交検波の流れは以下の通りである [2]。振幅 $A_l(t)$ を持つハーモニック数 $h = l$ に対応する振動成分を $\phi_l(t)$ とすると、WCM

の波形信号に含まれるハーモニクス成分は

$$y = \sum_l A_l(t) \sin(2\pi l f_{\text{rev}} + \phi_l(t)) \quad (6)$$

と書ける。WCM の各ターンの波形情報に対して、 $\cos(2\pi l f_{\text{rev}})$ 、 $\sin(2\pi l f_{\text{rev}})$ をかけてローパスフィルタ (LPF) に通し、ハーモニック数 $h = l$ に対応する I、Q 信号 I_l 、 Q_l を取り出す。ここで、 I_l 、 Q_l は以下のように書ける。

$$I_l = \frac{A_l(t)}{2} \sin \phi_l(t) \quad (7)$$

$$Q_l = \frac{A_l(t)}{2} \cos \phi_l(t) \quad (8)$$

IQ 信号を取り出し、DC 成分を取り除くことにより各ハーモニック成分の振動成分を検出することが出来る。各ハーモニックの IQ 信号をハイパスフィルタ (HPF) に通すことで得られた振動成分の振幅の時間変化を Figure 8 に示す。振動成分の振幅が最も顕著であるのがハーモニック数 $h = 8$ の成分であり、そこからハーモニック数が小さくなると共に振幅が減少することがわかる。

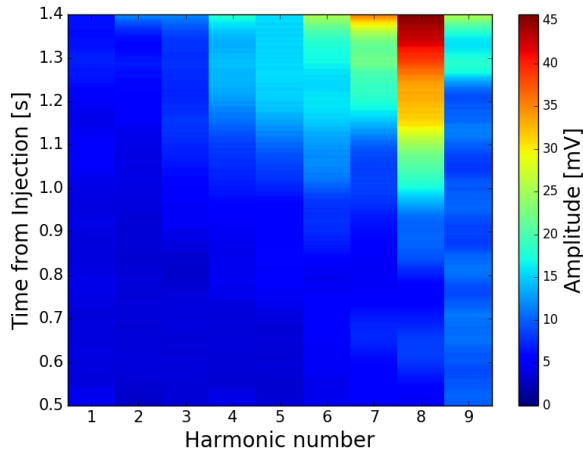


Figure 8: Amplitude of each harmonic component.

FFT を用いて得られたハーモニック数 $h = 8$ の I 成分のスペクトログラムを Figure 9 に示す。ハーモニック数 $h = 8$ 成分の振動成分の周波数がシンクロトロン振動数の計算値によく一致していることが分かる。

IQ 成分の FFT 結果からは振動しているのが USB か LSB かを判別することは出来ず振動モードの同定は出来ない。このため、IQ 成分に対して SSBF 処理を行い USB と LSB を分離してモード同定を行う。IQ 信号に対して $\cos 2\pi f_L t$ 、 $\sin 2\pi f_L t$ をかけたものを I'_l 、 Q'_l とおく。ここで、 f_L はシンクロトロン振動数 f_s に任意のキャリア周波数 f_c を加えた周波数である ($f_L = f_s + f_c$)。

$$\begin{aligned} I'_l &= I_l \cos 2\pi f_L t \\ &= \frac{A_l(t)}{4} (\sin(\phi_l(t) + 2\pi f_L t) \\ &\quad + \sin(\phi_l(t) - 2\pi f_L t)) \end{aligned} \quad (9)$$

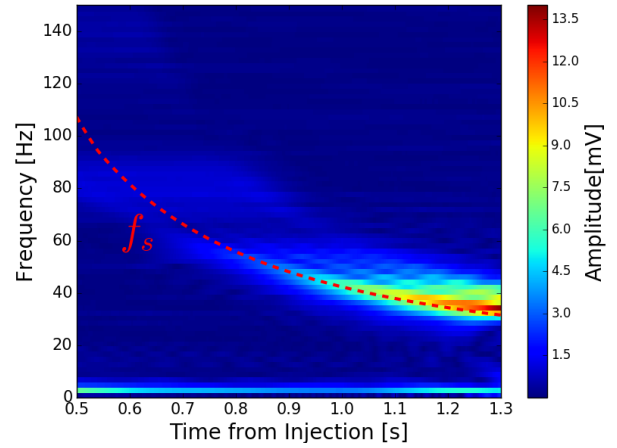


Figure 9: Spectrogram for I component ($h=8$). Red dotted line represents the estimated synchrotron frequency.

$$\begin{aligned} Q'_l &= Q_l \sin 2\pi f_L t \\ &= \frac{A_l(t)}{4} (\sin(\phi_l(t) + 2\pi f_L t) \\ &\quad - \sin(\phi_l(t) - 2\pi f_L t)) \end{aligned} \quad (10)$$

I'_l 、 Q'_l の和・差をそれぞれ S_l 、 D_l とおくと、

$$\begin{aligned} S_l &= \frac{A_l(t)}{2} \sin(\phi_l(t) + 2\pi f_L t) \\ &= \frac{A_l(t)}{2} \sin \phi_S(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_l &= \frac{A_l(t)}{2} \sin(\phi_l(t) - 2\pi f_L t) \\ &= \frac{A_l(t)}{2} \sin \phi_D(t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\phi_S(t) = 2\pi t \times \begin{cases} f_L + f_s & (\phi_l(t) = 2\pi f_s t) \\ f_c & (\phi_l(t) = -2\pi f_s t) \end{cases} \quad (13)$$

$$\phi_D(t) = 2\pi t \times \begin{cases} f_c & (\phi_l(t) = 2\pi f_s t) \\ f_L + f_s & (\phi_l(t) = -2\pi f_s t) \end{cases} \quad (14)$$

となり、USB が振動しているとき、つまり $\phi_l(t) = 2\pi f_s t$ である時には差信号 D_l がキャリア周波数 f_c で振動することが分かる。同様に、LSB が振動しているとき、つまり $\phi_l(t) = -2\pi f_s t$ である時には和信号 S_l がキャリア周波数 f_c で振動することが分かる。 S_l 、 D_l を、キャリア周波数 f_c 近傍のみを通過するバンドパスフィルタ (BPF) に通すとそれぞれ LSB、USB 成分を選択的に取り出すことが出来る。

Figure 2 に対応する WCM 信号に対して SSBF 処理を行って得られた各ハーモニック成分の USB、LSB の振幅の時間変化を Figure 10、11 に示す。どのハーモニック成分についても LSB はあまり振動せず、主に USB の振動が顕著である。USB のうち振動が顕著であるのがハーモニック数 $h = 8$ の USB 成分であり、これは振動モード $n = 8$ に相当する成分である。

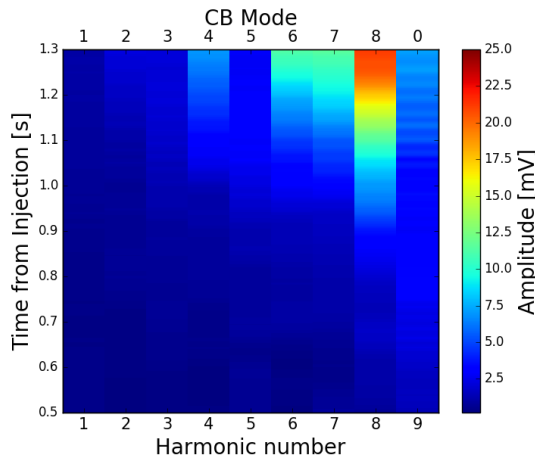


Figure 10: Amplitude of USB components.

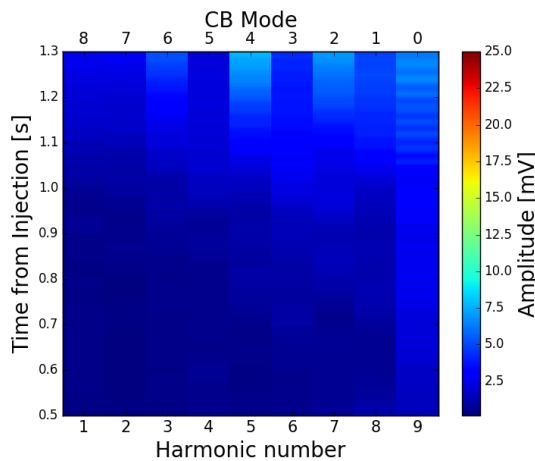


Figure 11: Amplitude of LSB components.

5. 考察

バンチ中心振動解析結果 (Figure 5) とハーモニクス振動解析結果 (Figure 10, 11) を比較すると、いずれも振動モード $n = 8$ が最も振動が顕著であることがわかる。おなじ振動モードでも、 $h = 1$ の LSB はあまり振動しておらず、 $h = 8$ の USB が主に振動している。Figure 5 から得られたバンチ中心振動のモード $n = 8$ の振幅の時間変化と、Figure 10 から得られた $h = 8$ の USB でモード $n = 8$ に相当する成分の振幅の時間変化を比べたものが、Figure 12 である。共に加速開始から 0.8 秒あたりで振動が始まり、振幅の増加傾向もほぼ同じであることが分かる。よって、解析に用いる物理量は異なるものの、いずれの手法も同じバンチ結合振動現象を観測していると考えられる。それぞれの手法の物理量間の定量的な関係に関しては今後の研究課題である。

いずれの解析結果においても、バンチ結合振動は単一モードのみならず複数のモードで振動している。これは MR のハーモニック数 $h_{RF} = 9$ に対してリング中のバンチ数が $N_b = 8$ であるためであると考えられる。

振動が顕著であるのは $h = 8$ の成分であった。この周波数域では加速空胴が有意なインピーダンスを持っているため (Figure 1)、ビームローディング補償で打ち

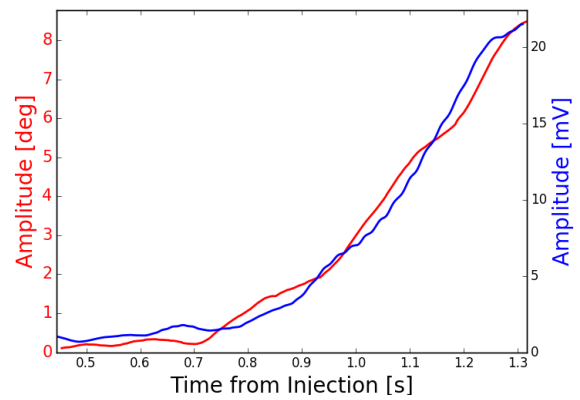


Figure 12: Comparison between Bunch Center Motion analysis (Red) and Harmonics analysis (Blue).

消しきれなかったインピーダンスが残っている場合には、バンチ結合振動の原因となり得る。

6. 対策

Figure 9 のように、ビーム信号のハーモニクス成分の振動がシンクロトン振動数の計算値とよく一致するため、その近傍のみ透過する BPF を用いてビーム信号からシンクロトン振動成分のみを検出できると考えられる。Figure 1 に示すように加速空胴は最も振動が顕著であるモード $n = 8$ に対応するハーモニック数 $h = 8$ の周波数域で有意なインピーダンスを持つため、BPF によって得られた振動成分の情報を元にフィードバック信号を加速空胴に対して与えることでビームの縦方向の振動を抑制するシステムの開発を予定している。

7. まとめ

J-PARC の MR ではニュートリノ実験への速い取り出しで取り出しビーム強度 470 kW を達成した。さらなる強度増加を実現する上での障害として、強度の増大に伴って顕著となるビームのバンチの縦方向振動が観測されたため、その原因究明と対策を行うために、バンチ結合振動モードの解析を行った。WCM の波形信号を元に、バンチ中心振動解析とハーモニック成分振動解析という二つの異なる手法によってバンチ結合振動のモードとそれに対応するハーモニクスを明らかにする手法を確立した。確立した手法を用いて実際のビーム信号を解析し、バンチ結合振動モードの同定を行った。二つの異なる手法を用いた解析の結果、いずれの手法を用いてもモード $n = 8$ の成分の振動が顕著であることが分かった。また、この振動成分がハーモニック数 $h = 8$ の USB 成分であることが分かった。

参考文献

- [1] T. Toyama *et al.*, Proc. PAC05, 2005, pp. 958-960.
- [2] F. Tamura *et al.*, PRST-AB, 16, 051002 (2013).
- [3] F. Pederson *et al.*, IEEE-TNS, NS-24, 1396 (1977)
- [4] H. Damerou *et al.*, Proc. PAC07, 2007, pp. 4180-4182.
- [5] B. Kriegbaum *et al.*, IEEE-TNS, NS-24, 1695 (1977).