

J-PARC RCS の空胴ギャップ電圧モニタの周波数応答評価 EVALUATION OF THE FREQUENCY RESPONSE OF THE RF GAP VOLTAGE MONITOR OF THE J-PARC RCS

沖田英史^{*A)}、田村文彦^{A)}、山本昌亘^{A)}、野村昌弘^{A)}、島田太平^{A)}、
吉井正人^{B)}、大森千広^{B)}、原圭吾^{B)}、長谷川豪志^{B)}、杉山泰之^{B)}、古澤将司^{B)}

Hidefumi Okita^{*A)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)}, Masahiro Nomura^{A)}, Taihei Shimada^{A)},
Masahito Yoshii^{B)}, Chihiro Ohmori^{B)}, Yasuyuki Sugiyama^{B)}, Katsushi Hasegawa^{B)}, Keigo Hara^{B)}, Masashi Furusawa^{B)}
^{A)}J-PARC center, JAEA
^{B)}J-PARC center, KEK

Abstract

The J-PARC RCS employs the dual-harmonic operation, in which the fundamental and the second harmonic RF voltages are used for the beam acceleration and longitudinal beam manipulation. The I/Q voltages of the harmonics are controlled by the multiharmonic vector RF voltage control feedback. The signals from the RF gap voltage monitors of the accelerating cavities are used as the process variable for the feedback. It is necessary to control the each harmonic voltage and phase taking into account the frequency response of the monitor. The measured frequency response of the monitor agrees with the circuit model. Beam tracking simulations considering the frequency response are carried out. It is confirmed that the simulation reproduces the bunch shapes when accelerating 1 MW beams. Possible improvements of the frequency response of the monitor is also discussed.

1. はじめに

J-PARC RCS では高周波加速空胴に広帯域な金属磁性体コアを使用しており、一つの空胴で複数の高調波を重畳した RF 電圧を出力可能である。RCS ではこの広帯域空胴を用いて基本波と 2 倍高調波の二つの高調波電圧を用いたビーム加速 (デュアルハーモニク運転) を採用している。デュアルハーモニク運転はバンチ形状を扁平に整形可能で、空間電荷効果を緩和した大強度ビームの安定した加速に欠かせないものとなっている。

マルチハーモニク運転におけるバンチ整形では各高調波の電圧位相制御が重要である。RCS では 2019 年から各高調波の電圧位相の制御にマルチハーモニクベクトル RF 電圧制御フィードバック [1] が導入されている。このフィードバックにより、四倍高調波までのビームローディングが補償できるだけでなく各高調波の振幅と位相の制御が可能となった。そのため、最近では三倍高調波を用いたバンチ整形手法の検討も進められており、各高調波の電圧位相制御の精度向上が求められている。

マルチハーモニクベクトル RF 電圧制御フィードバックの概略図を Fig. 1 に示す。このシステムのフィードバックモジュールは、空胴ギャップ電圧モニタで得られる各高調波の電圧位相を利用している。そのため、加速ギャップに印加する各高調波の電圧位相の正確な制御には空胴ギャップ電圧モニタの周波数応答を考慮する必要がある。そこで本研究では、バンチ整形の更なる高精度化を目指した空胴ギャップ電圧モニタの周波数応答の評価を実施し

た。本論文では、空胴ギャップ電圧モニタの周波数応答測定とそれを考慮したビームトラッキングシミュレーションから、空胴ギャップ電圧モニタの周波数応答がバンチ整形に与える影響を評価した結果について報告する。

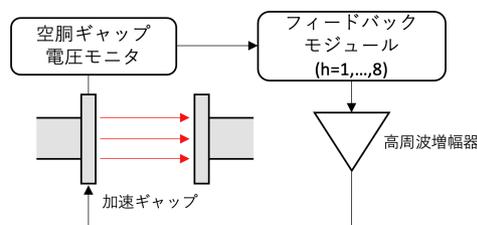


Figure 1: Conceptual view of the multiharmonic vector RF voltage control feedback system.

2. 空胴ギャップ電圧モニタ

RCS の基本パラメータを Table 1 に示す。RCS には 12 台の高周波加速空胴があり、各空胴には 3 つの加速ギャップがある。各加速ギャップに印加する電圧は基本波で最大 12 kV であり、リング一周当たり最大 440 kV の加速電圧を発生させている。加速ギャップの電圧を観測するために、各加速空胴の加速ギャップの 1 つに空胴ギャップ電圧モニタ (以下、「電圧モニタ」とする。) を設置している。

電圧モニタの回路構成を Fig. 2 に示す。電圧モニタは二つのコンデンサと C_1 、 C_2 とインピーダンス整合用の抵抗 R_1 で構成される。設計値はそれぞれ、9pF, 9000pF, 50Ω である。 R_2 は電圧を観測する場所での負荷抵抗 (50Ω) である。 R_1 と R_2 の間は特性インピーダンス 50Ω の同軸ケーブルで接続されてい

* hidefumi.okita@j-parc.jp

Table 1: Parameters of J-PARC RCS

Circumference	348.333 m
Number of protons	8.33×10^{13} ppp
Injection / Extraction energy	400 MeV / 3 GeV
Harmonic number	2
RF frequency range (h=2)	1.227 MHz~1.671 MHz
Repetition ratio	25 Hz
Acceleration period	20 ms
Max. acc. voltage	440 kV
Number of cavities	12
Number of acc. gaps / cavity	3

る。この同軸ケーブルの影響は今回の評価には含んでいない。Figure 2には実際の運転条件と同様、加速ギャップを模擬した出力インピーダンスが非常に低い電圧源に接続したときの電圧モニタを示している(model 1)。

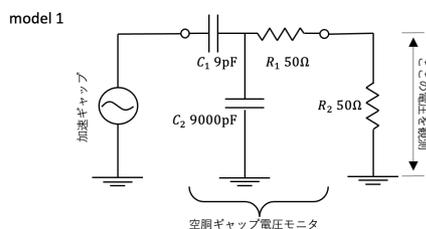


Figure 2: The circuit model of the RF gap voltage monitors connected to the acceleration gap (model 1).

電圧モニタは加速ギャップ電圧をモニター可能な電圧まで降圧する役割を担っている。加速ギャップ電圧はコンデンサによる分圧 (1/1000) と二つの抵抗による分圧 (1/2) の合計で 1/2000 (-66dB) に降圧される。

model 1 での電圧モニタの電圧ゲイン $G(\omega)$ と位相 $\theta(\omega)$ の周波数応答をそれぞれ式で表すと、

$$G(\omega) = 20 \log_{10} \frac{\omega C_1 R_1}{\sqrt{1 + \omega^2 (C_1 + C_2)^2 (R_1 + R_2)^2}} \quad (1)$$

$$\theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{1}{\omega (C_1 + C_2) (R_1 + R_2)} \quad (2)$$

となる。Equation (1), (2) をグラフに示したものが Fig. 3 である。周波数応答を評価する範囲は、将来的な高次高調波を用いたバンチ整形を視野に入れて、現システムの制御可能範囲である四倍高調波までとしている。Figure 3 が示すように電圧モニタの位相の周波数応答は低周波側で位相が大きく変動する。これは、低周波側において C_2 のインピーダンスが、その並列抵抗 ($R_1 + R_2$) と比較して相対的に高いからである。高周波側では C_2 のインピーダンスが低下することで、 $R_1 + R_2$ を無視した単なる容量分圧器

とみなすことができるため周波数による変動は減少する。

電圧モニタの電圧ゲインの周波数応答は過去に何度か測定されており、その応答がバンチ整形に与える影響は小さいことが確認されている。一方で、位相の周波数応答についてはこれまで測定されておらず、バンチ整形に与える影響について詳しく評価されていなかった。そこで本研究では、電圧モニタの位相の周波数応答に着目した評価を行なった。

バンチ整形では、各高調波の基本波に対する位相オフセット $\phi_{h \text{ offset}}$ が重要となる。これを式で表すと、

$$\phi_{h \text{ offset}}(f) = \frac{h}{h_0} \theta \left(\frac{h_0}{h} f \right) - \theta(f) \quad (3)$$

となる。ここで、 $\theta(f)$ は電圧モニタの位相の周波数応答を表す。 h と h_0 はそれぞれ着目する高調波と基本波のハーモニック数を表す。model 1 での四倍高調波までの $\phi_{h \text{ offset}}$ を Fig. 4 に示す。 $\theta(f)$ は低周波 (基本波) 側で大きくなるため、電圧モニタの周波数応答による $\phi_{h \text{ offset}}$ は 10 deg. 以上になる。これはバンチ形状を変形するには十分大きく、実際の電圧モニタの位相の周波数応答を把握することが重要である。

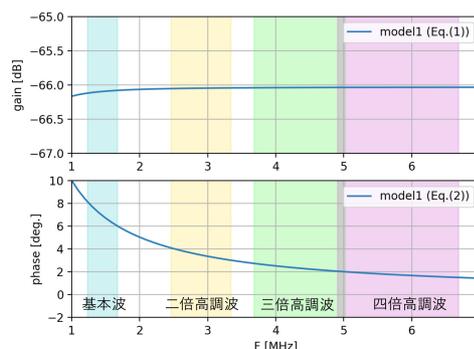


Figure 3: The frequency response of the RF gap voltage monitors of the model 1 calculated by Eq. (1) and Eq. (2).

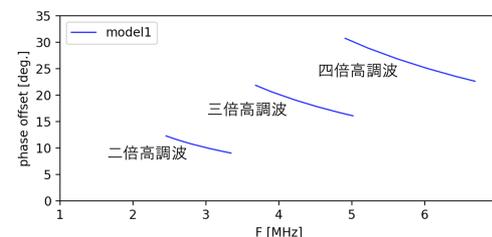


Figure 4: The phase offsets up to 4th harmonic calculated from the frequency response of the model 1.

3. 周波数応答測定

実際の電圧モニタの位相の周波数応答を把握することを目的として二つの手法で周波数応答測定を実

フセットを Fig. 9 に示す。位相オフセットの model 1 からのずれは 1 deg. 程度であることを確認した。

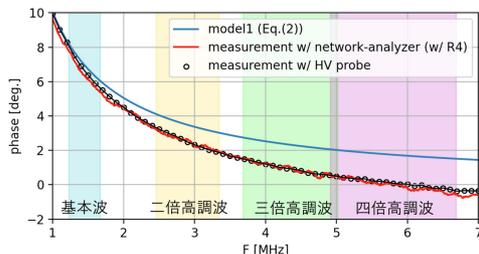


Figure 8: The measured frequency responses of the RF gap voltage monitor. The red line and black circle represent the measurements using the network analyzer and the high voltage probe, respectively.

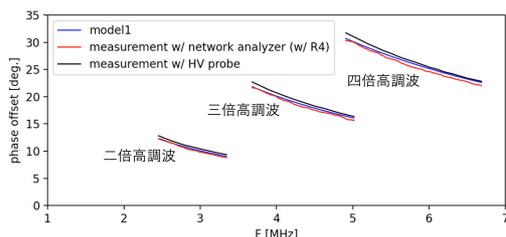


Figure 9: The phase offsets up to fourth harmonics calculated from the results of the frequency response measurements.

4. ビームトラッキングシミュレーション

電圧モニタの位相の周波数応答がバンチ整形に与える影響を評価するため、電圧モニタの位相の周波数応答を反映した縦方向ビームトラッキングシミュレーションを行い、1MW 運転時に観測されたバンチ形状との比較を行なった。計算には、CERN が開発した縦方向ビームトラッキングシミュレーションコード BLonD [3] を使用した。

計算に使用する各高調波の電圧位相には、Fig. 10 に示す 1MW 運転時に電圧モニタで測定された値を使用した。ここでは、高次高調波の含めた評価を行うため、一部の空洞で三倍高調波のビームローディング補償をオフにした条件での電圧モニタの測定値を使用した。また、四倍高調波については電源の制約により全ての空洞でビームローディング補償をオフにしている。各高調波の位相については、Fig. 10 中の実線と破線はそれぞれ、電圧モニタの測定値そのものと、周波数応答測定結果をもとに加速ギャップでの位相を計算したものに相当する。ここでは高圧プローブの測定値を採用したが、ネットワークアナライザの測定値を使用した場合と BLonD シミュレーション結果に大きな差がないことを確認している。BLonD シミュレーションには Fig. 10 に示した四倍高調波までの全ての電圧位相を反映している。

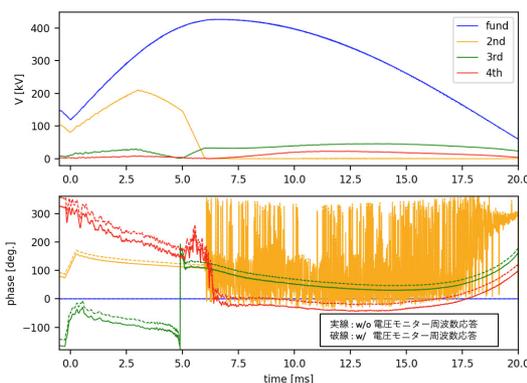


Figure 10: The measurement of the RF gap voltage monitor at 1MW beam operation up to fourth harmonics. The dashed line shows the phase considering the frequency response of the monitor.

BLonD シミュレーションと 1MW 運転時にウォールカレントモニタ (WCM) で観測されたバンチ形状とバンチングファクタ比較したものを Fig. 11 に示す。ここで、バンチングファクタとは各ターンのバンチ平均電流とピーク電流の比であり、各ターンのバンチ形状を特徴づける値である。比較のため Fig. 11 には、電圧モニタの位相の周波数応答を考慮しなかったときの BLonD シミュレーション結果も示している。

Figure 11 に示すように、電圧モニタの位相の周波数応答を考慮することで、BLonD シミュレーションは 1MW 運転時のバンチ形状を全体的によく再現することが分かる。取り出し直前におけるバンチ形状の不一致については、電圧モニタの周波数応答だけでなく、その他の要因の可能性も考えている。以上のことから、電圧モニタの周波数応答を現在の電圧位相制御システムに反映することで、BLonD シミュレーションで予測されるバンチ整形を実際のビーム運転で精度よく実現可能であることが確認された。

5. 周波数による位相の変動の低減に向けた検討

前節までは、現在運転に使用している電圧モニタの周波数応答の評価について述べてきた。しかし、電圧モニタの周波数による位相の変動を低減できれば、元より周波数応答を考慮した制御の必要がなくなるため、これに向けた検討を始めている。

現在の回路をもとに、周波数による位相の変動を低減するためには、回路を C_1 と C_2 のみの容量分圧回路に近づける必要がある。これを実現するためには、必要な周波数範囲内で C_2 のインピーダンスがその並列抵抗 ($R_1 + R_2$) より十分低い条件を作れば良い。

まず考えられるのが、 C_2 の容量を増やすことである。これにより、Eq. (2) が示すように周波数による位相の変動は減少する。しかし、 C_2 はすでに 9000pF と十分大きな容量を持っており、これ以上容量を増

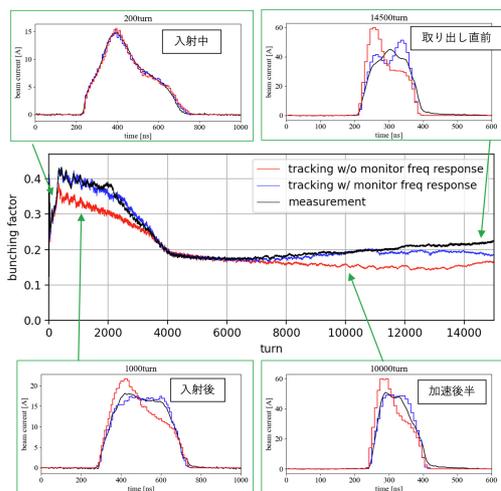


Figure 11: Comparison of the bunch shapes and the bunching factor between the BLongD simulation and measurement. The blue and red lines show the results of the BLongD simulations with and without considering the frequency response of the monitor, respectively. The black line shows the measurement of WCM monitor at 1MW beam operation.

加させると数 nH 程度の小さな寄生インダクタンス (ESL) でも周波数応答に影響を与える。そのため、 C_2 の容量の増加は最適策ではないと考えている。

次に考えられるのが C_2 の並列抵抗を増やすことである。しかし、現在の回路構成で R_1, R_2 の抵抗値を 50Ω から変更することは、 R_1, R_2 間でのインピーダンス不整合を招き信号伝送に問題が生じるため別の手法を考える必要がある。

そこで、オペアンプを使用した回路の予備検討を実施した。電圧モニタにオペアンプを使用することは既に CERN の PSB で採用されている。オペアンプは一般的に周波数による電圧位相の変動が小さく、入力インピーダンスが非常に高く出力インピーダンスが低いという特徴を持っている。このような特徴を持つオペアンプを途中に挟みインピーダンス変換を行うことで、インピーダンス整合を保ちつつ、 C_2 の並列抵抗を増やすことが可能になると考えている。

現在、Fig. 12 のような回路 (model 4) について検討を進めている。一例として CERN の電圧モニタでも使用されているオペアンプ AD811 を使用した電圧モニタについて LTspice [4] を用いて周波数応答を計算した結果を Fig. 13 に示す。このようにオペアンプを用いた回路により電圧ゲイン、位相の両方で大幅に周波数による変動を低減可能な見込みがある。

6. まとめ

本研究では、J-PARC RCS におけるマルチハーモニク運転のバンチ整形の精度向上を目的とした電圧モニタの周波数応答評価を行なった。実際の電圧モニタの位相の周波数応答を把握するため、二つの

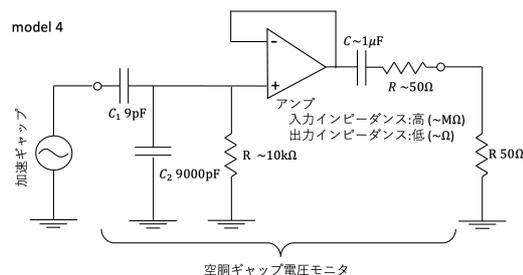


Figure 12: The preliminary design of the RF gap voltage monitor with an operational amplifier.

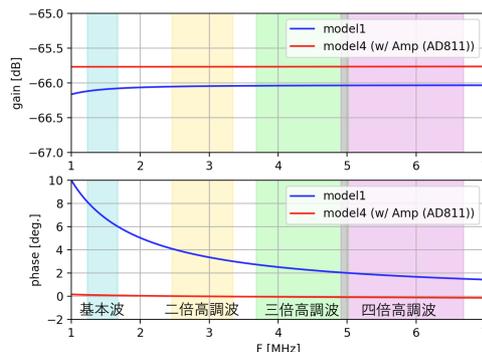


Figure 13: The frequency response of the RF gap voltage monitor with an operational amplifier (AD811) calculated by the LTspice.

手法で測定を実施し、実際の電圧モニタがほぼ設計通りの応答を示すことを確認した。電圧モニタの位相の周波数応答測定結果を反映した BLongD シミュレーションは 1MW 運転中のバンチ形状を全体的によく再現することを確認した。この結果から、電圧モニタの周波数応答を現在の電圧位相制御システムに反映することで、BLongD シミュレーションで予測されるバンチ整形を実際のビーム運転で精度よく実現可能であることを確認した。

今後はオペアンプを用いた電圧モニタの実用性などを考慮した詳細な検討を実施する。加えて、高次高調波を用いた新たなバンチ整形手法の検討も進める。

参考文献

- [1] F. Tamura *et al.*, "Multiharmonic vector rf voltage control for wideband cavities driven by vacuum tube amplifiers in a rapid cycling synchrotron", *Phy. Rev. Accell. Beams*, 22, p. 092001 (2019).
- [2] M. Yamamoto *et al.*, "Conceptual design of a single-ended MA cavity for J-PARC RCS upgrade", *J. Phys. Conf. Ser.*, 1067 52014 (2018).
- [3] CERN, Beam Longitudinal Dynamics code BLongD version 2.0.11; <https://blond.web.cern.ch>
- [4] Analog Devices, LTspice version 17.0.21.0; <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>