

# 伸長ワイヤー法による縦方向結合インピーダンス測定値の因果律による吟味 EVALUATION BY CAUSALITY FOR MEASUREMENT DATA OF LONGITUDINAL COUPLING IMPEDANCES WITH STRETCHED-WIRE METHOD

外山 毅<sup>#, A)</sup>, 小林 愛音<sup>A)</sup>, 菖蒲田義博<sup>B)</sup>

Takeshi Toyama<sup>#, A)</sup>, Aine Kobayashi<sup>A)</sup>, Yoshihiro Shobuda<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>KEK

<sup>B)</sup>JAEA

## Abstract

Longitudinal microstructure in the debunching bunches causes a problem including beam instabilities at the flattop energy in the slow extraction (SX) mode. In the fast extraction (FX) mode a similar problem is foreseen, because longitudinal phase space manipulation will be required for peak beam current reduction and debunching is included in this process. As a first step for understanding this longitudinal microwave instability and taking a countermeasure, we are evaluating the longitudinal coupling impedances of major devices of a large coupling impedance such as kickers, septa, rf cavities. Especially previously measured impedances are reanalyzed by checking the causality using Hilbert transform between the real and imaginary parts of the impedance.

## 1. はじめに

J-PARC MR において、遅い取出し(SX)モードのフラットトップでデバンチ時にマイクロバンチ構造が発生し問題となっている。一方、速い取出し(FX)モードのフラットトップで縦方向位相空間でのバンチ操作・整形によりピーク電流を低減する方法が議論されている。ここでもマイクロバンチ構造発生の可能性が問題となってくる。これらのマイクロバンチ構造(マイクロウェーブ・インスタビリティ)発生の原因を明らかにして、対策を講じるための第一歩として、J-PARC MR のビーム結合インピーダンスを評価している。本報告では、その中で、J-PARC MR の主要な機器(キッカー、セプタム、RF 空洞)に関するビーム結合インピーダンスの伸長ワイヤー法による測定結果を示す。特に、取得した縦方向インピーダンスの実部と虚部のヒルベルト変換(因果律)の確認によるデータの信頼性評価について述べる。

## 2. 経緯・動機

大強度ビームを加速・蓄積する陽子リング、陽電子リングで電子雲の影響が問題になってきた[1]。J-PARC MR (Main Ring)でも、SX モードの遅い取出し前のデバンチ時に電子雲の成長 (Fig. 1) が観測されている[1]。電子雲の観測には“retarding field analyzer”タイプ [2, 3]を使用している。Figure 2 の下図の赤色の実線が、電子雲が発生した時のビーム縦方向プロファイルを示している。Figure 2 上図の緑色の実線は真空ダクト壁に設けたスロットに入射した電子雲の信号、青色の実線はシミュレーションの計算結果である。電子雲は、真空悪化、ビーム・インスタビリティ、ビームロスを引き起こし、SX モードで問題になっている。今後、FX モードのフラットトップでビームのピーク電流値を低減するために、位相

空間内でバンチ操作を行う場合、同様の問題が予想されている。インスタビリティは以下のような機序で発生すると考えている：

1. デバンチ時に microwave instability が発生する、
2. この高周波 強度変調ビーム電流によって、電子雲が成長する (Fig. 1)、
3. 電子雲によって陽子ビームの水平方向、または垂直方向のインスタビリティが発生する。

この大元の原因となる縦方向結合インピーダンスの評価と対策が緊急課題となっている。

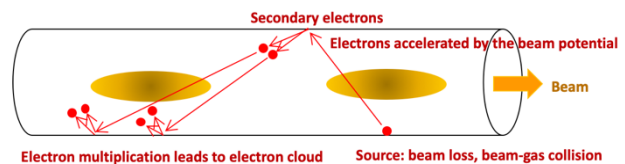


Figure 1: Electron cloud buildup.

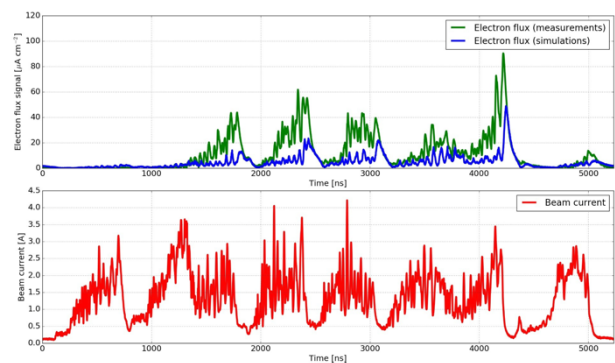


Figure 2: Longitudinal beam profile signal measured by the WCM (red curve), an electron cloud signal (green) and a simulation results (blue) [1].

<sup>#</sup>takeshi.toyama@kek.jp

### 3. 伸長ワイヤー法による結合インピーダンスの評価

Kicker, septa あるいは RF cavity などの様な複雑な構造を持つ装置の結合インピーダンスを評価するには、“stretched wire method” (伸長ワイヤー法) を用いるのが便利である。ここでは、まず、伸長ワイヤー法について簡単に説明をしたのち、Hilbert 変換による確認方法を述べ、FX kicker についての検討経緯・結果を示す。

#### 3.1 伸長ワイヤー法

この方法は、Fig. 3 の様に、DUT (被測定物) と直管、変換部を含む容器の中心に、ビームの代わりに、ワイヤーを通して形成した伝送線路に電気信号を通す。ネットワークアナライザで透過係数  $S_{21}$ (DUT) を測定し、“reference pipe” の透過係数  $S_{21}$ (REF) と合わせて、Log formula

$$Z_L(\omega) = -2Z_c \ln \frac{S_{21}(\text{DUT})}{S_{21}(\text{REF})}$$

に代入し結合インピーダンスを得る[4]。特性インピーダンス  $50\Omega$  系から直管への変換部には matching 抵抗を図の青色四角の付近に取り付ける[5]。J-PARC MR で標準の内径  $\phi 130$  mm の真空ダクトに直径  $\phi 0.16$  mm のワイヤーを通す場合は、 $Z_c = 60 \ln(130/0.16) = 402 \Omega$ ,  $Z_{\text{match}} = 402 - 50 = 352 \Omega$  である。FX キッカーの場合は、 $Z_c = 60 \ln(200/0.16) = 428 \Omega$ ,  $Z_{\text{match}} = 428 - 50 = 378 \Omega$  である。 $S_{21}$ (REF) は各種デバイスの測定ごとに“reference pipe”を製作、測定することは煩雑なので、 $e^{-j\omega\ell/c}$  で代用することがある。 $\ell$  は測定系の電気長である。

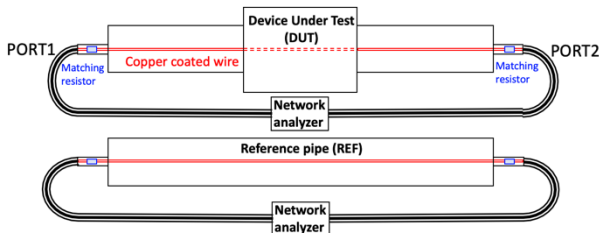


Figure 3: Stretched wire method. The upper setup measures DUT (device under test) with the transition and spacer pipe sections. Lower setup measures the straight pipe of the same length with the same transition.

#### 3.2 ヒルベルト変換による確認方法

ビームまたは電気信号が光速で走る場合は、ビーム (電気信号パルス) の前の電磁場はゼロである。この因果律を満たす場合は、結合インピーダンスは以下の Hilbert 変換を満たす[6]

$$\text{Re } Z_L(\omega) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Im } Z_L(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega'$$

$$\text{Im } Z_L(\omega) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Re } Z_L(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega'$$

### 4. 速い取出しキッカーの結合インピーダンス

2010 年 10 月から運用が開始された改良型 FX kicker [7] の結合インピーダンスを測定した時のセットアップを Fig. 4 に示す。中央のテーブル上にあるのがネットワークアナライザ (Agilent technology E5071C) である。

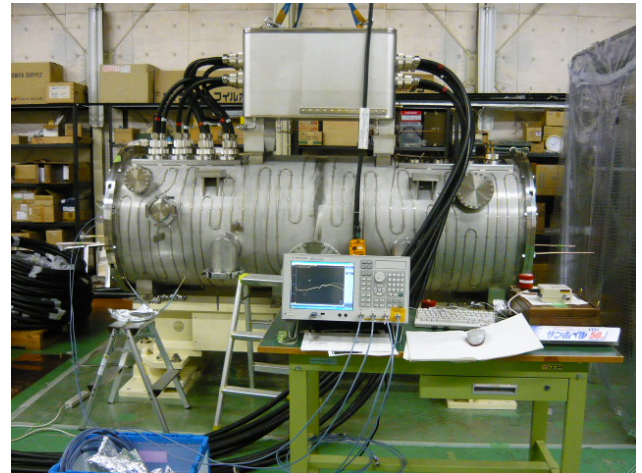


Figure 4: Setup of stretched wire measurement for the FX kicker.

#### 4.1 過去の測定結果

Fig. 5 に 2010 年当時の測定データによる計算結果を示す。赤色の実線が結合インピーダンスの実部、暗緑色の実線が虚部である。当時は、ビームは高々 50 MHz の周波数成分までしか持たないだろうということで、100 MHz までしか測定しなかった。

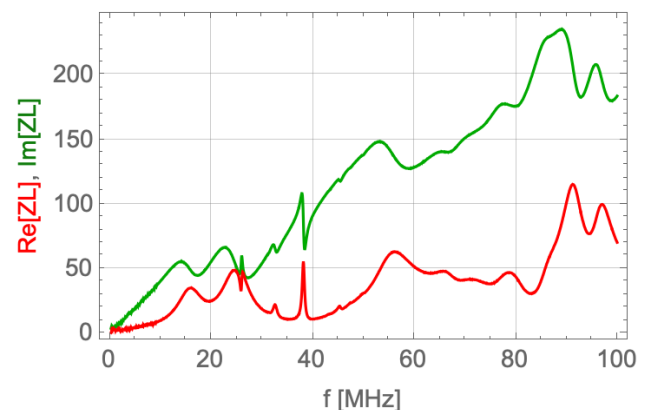


Figure 5: Result for the FX kicker measured in 2011. Red (dark green) line shows real (imaginary) part of the coupling impedance.

#### 4.2 ヒルベルト変換による吟味

上記の結果の結合インピーダンスの実部を数値計算により Hilbert 変換した結果、得られたインピーダンスの虚部をプロットすると、Fig. 6 の暗赤色の破線の様になった。暗緑色の実線（過去の計算結果）と有意の違いが見られ、両者の差は高周波になるほど大きくなっている。 $S_{21}$  の位相角  $\theta = \omega/c \cdot \ell$  で、この位相角が  $\text{Im}[Z_c]$  に足されるので、両者の差は一定の電気長  $\ell$  の誤差を示唆する。

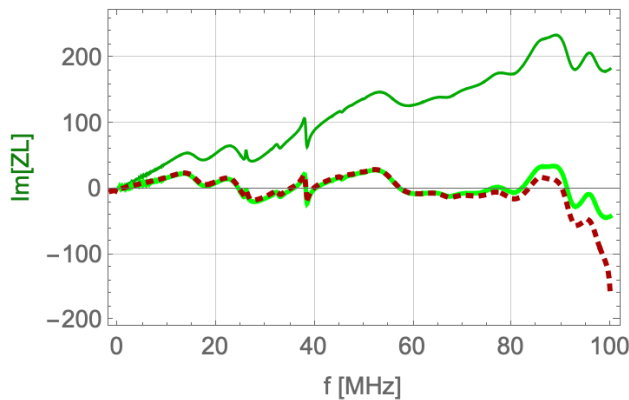


Figure 6: Imaginary part of the longitudinal impedance. Dark green line: original data, dark red broken line: Hilbert transform of the real part of the original data and green line: corrected data.

#### 4.3 誤差の原因

過去の測定のセットアップを吟味した結果、Fig. 7 の写真から判定されるように、片側のフランジのコネクタの種類が通常使っている N 型ジャック・コネクタ（レセプタクル）とは異なる N 型プラグ・コネクタだった。型の変換のために追加で挿入したアダプタの分の電気長が増えたことが一因と考えられた。それ以外にも変換部の電気長を再確認した結果を全て考慮した結果得られた結合インピーダンスの虚部が Fig. 6 の緑色の実線である。70 MHz 以下ではよく一致しているが、それ以上で徐々に Hilbert 変換との差が増えている。その理由は、Hilbert 変換の被積分関数を吟味すると判明する。

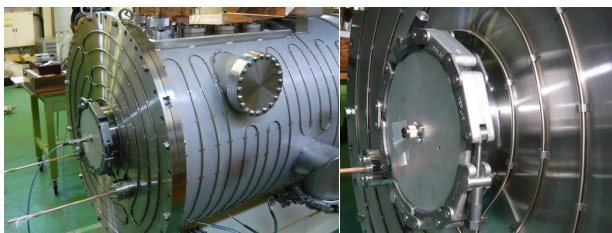


Figure 7: Setup of the FX kicker.

Figure 8 の赤色の線で示した  $\text{Re} Z_L(\omega)$  は最大測定周波数 100 MHz 以上では 0 としている。 $\frac{1}{\omega' - \omega}$ （青色

の線）との積で、 $f > 100$  MHz の寄与が過小評価になるからである。

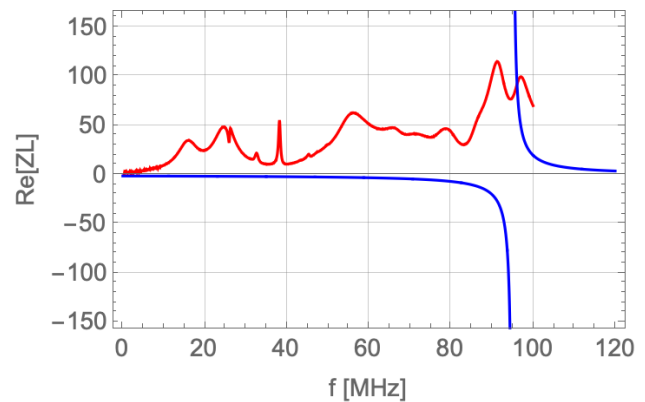


Figure 8: Integrand of the Hilbert transform. Red line: real part of the longitudinal impedance, blue:  $1/(\omega' - \omega)$ . Dark green line: original data, Dark red broken line: Hilbert transform of the Real part of the original data.

その他に、Log formula に用いている  $S_{21}(\text{DUT})/S_{21}(\text{REF})$  の誤差が考えられる。伸長ワイヤー法において、 $S_{21}(\text{DUT})/S_{21}(\text{REF})$  による計算方法と、測定系の変換部と直線部の寄与を 2X-thru de-embedding [8]により正確に除去する計算方法とを、CST studio suite [9]により検証した結果を Fig. 9 に示す。DUT としては簡単のために単純な pillbox 空洞を使っている。

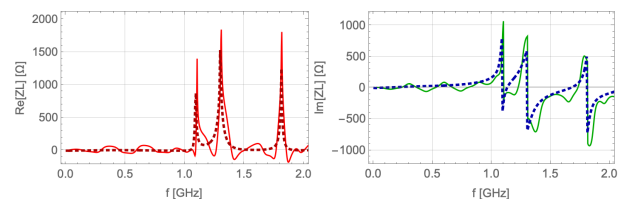


Figure 9: Simulation results with CST studio suite. The results using  $S_{21}(\text{DUT})/S_{21}(\text{REF})$  are red line: real part and dark green: imaginary part of the longitudinal impedance. The results using 2X-thru de-embedding are dark red broken line: real part and blue dashed line: imaginary part of the longitudinal impedance.

## 5. まとめ

### 5.1 Injection kicker

改良型入射キッカー[10]は、2012 年 12 月から運用を開始された。その直前に測定した結果および、Hilbert 変換による検証結果を Fig. 10 に示す。Kicker1 の結果のみ示している。Kicker2 もほぼ同様の結果であった。本デバイスの測定では、“reference pipe”もキッカーの長さに合わせて製作、測定を行った。



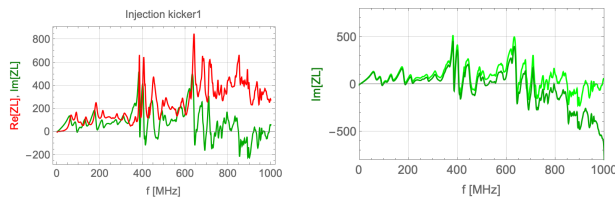


Figure 10: Longitudinal impedance of the injection kicker1. Left figure shows real part (red line) and imaginary part (green line) of the longitudinal impedance. Right figure shows measured (green) and Hilbert transform (dark green) of the imaginary impedance.

## 5.2 SX septum

SX セプタムは 2015 年秋（低磁場セプタム SMS1）、2016 年秋（中磁場セプタム SMS2）から、RF シールドを追加して結合インピーダンスを低減したものを運用開始している [11]。SMS1 の解析結果を Fig. 11 に示す。SMS2 もほぼ同様であった。

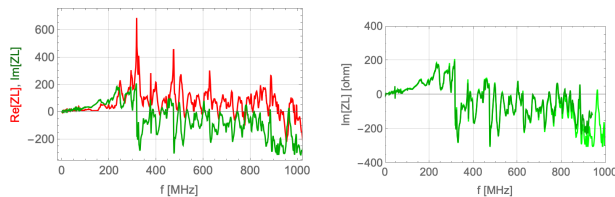


Figure 11: Longitudinal impedance of the SX septum1. Left figure shows real part (red line) and imaginary part (green line) of the longitudinal impedance. Right figure shows measured (green) and Hilbert transform (dark green) of the imaginary impedance.

## 5.3 加速 RF 空洞

改良版の 5 ギャップ加速 RF 空洞[12]の測定データおよび Hilbert 変換による確認結果を Fig. 12 に示す。250 MHz 付近に大きな共振が存在し、 $n = f/f_{rev}$ で規格化 ( $Z_L/n$ ) しても、設置されているデバイスの中で最も大きい値となり、インスタビリティの主要な原因と予想されている。今期のシャットダウン中にこの共振の低減の対策を試す予定である。

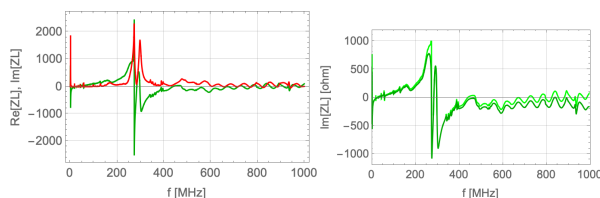


Figure 12: Longitudinal impedance of the 5-gap acceleration RF cavity with the magnetic alloy, FT3M. Left figure shows real part (red line) and imaginary part (green line) of the longitudinal impedance. Right figure shows measured (green) and Hilbert transform (dark green) of the imaginary impedance.

## 5.4 現状と展望

上記にまとめたデバイス以外に、compensation kicker は電気長の補正の検討中、FX kicker は 1 GHz 以上までの測定を行う予定である。FX septum は新規に製作中のもの[13]を測定予定である。同時に、電波吸収体 (SiC) を利用して共振を減衰させる方法を検討中である[14, 15]。

これらの結合インピーダンスの測定値および resistive wall impedance の計算値を使ってインスタビリティ評価作業が進行中である。

## 謝辞

各デバイスのインピーダンス測定に協力していただいた加速器メンバーに感謝します。またデバンチ時のインピーダンスに関するタスクフォースのメンバーにも、検討のきっかけ、Hilbert 変換の使用を示唆いただき感謝します。

## 参考文献

- [1] B. Yee-Rendon *et al.*, “PYECLOUD SIMULATIONS OF THE ELECTRON CLOUD FOR THE J-PARC MR”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 197-200.
- [2] R.A. Rosenberg, K.C. Harkay, Nucl. Instrum. Meth. A 453 (2000) 507-513.
- [3] M. Uota, T. Toyama, “OBSERVATION OF ELECTRON CLOUD IN J-PARC MAIN RING”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 462-465.
- [4] L. Walling *et al.*, “Transmission Line Impedance Measurements for an Advanced Hadron Facility”, Nucl. Instrum. Meth. A 281 (1989) pp. 433-447.
- [5] F. Caspers *et al.*, “Impedance Evaluation of the SPS MKE Kicker with Transition Pieces between Tank and Kicker Module”, CERN-SL-2000-0071, 2000.
- [6] A. Chao, “Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators”, Wiley Series in Beam Physics and Accelerator Technology, 1993, ISBN: 9780471551843.
- [7] K. Koseki, H. Matsumoto, “The fast extraction kicker for J-PARC with a novel pulse compression system”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 739 (2014) 63-67.
- [8] Ellison J, Smith SB, Agili S. “Using a 2x-thru standard to achieve accurate de-embedding of measurements.” Microw Opt Technol Lett. 2020;62:675-682. <https://doi.org/10.1002/mop.32098>
- [9] CST Studio Suite 電磁場解析シミュレーション, [https://www.aetjapan.com/software/CST\\_Overview.php](https://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php)
- [10] K. Fan *et al.*, “COUPLING IMPEDANCE STUDY OF THE INJECTION KICKER MAGNETS OF THE JPARC MAIN RING”, Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012, pp. 3725-3727.
- [11] M. Tomizawa, “Status of Slow Extraction”, ATAC2017.
- [12] 大森千広, 「加速器」 Vol. 9, No. 2, 2012(72-81).
- [13] T. Shibata *et al.*, presented in this conference, MOP015 and THP014.
- [14] A. Kobayashi *et al.*, presented in this conference, MOP022.
- [15] Y. Hashimoto *et al.*, presented in this conference, TUP024.