

J-PARC MR 次世代 LLRF 制御システム

NEXT GENERATION LLRF CONTROL SYSTEM FOR 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)}、
田村 文彦^{B)}、山本 昌亘^{B)}、野村 昌弘^{B)}、沖田 英史^{B)}、島田 太平^{B)}
Yasuyuki Sugiyama^{*A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Keigo Hara^{A)},
Fumihiko Tamura^{B)}, Masanobu Yamamoto^{B)}, Masahiro Nomura^{B)}, Hidefumi Okita^{B)}, Taihei Shimada^{B)}
^{A)}J-PARC/KEK, ^{B)}J-PARC/JAEA

Abstract

The digital low-level-rf (LLRF) control system for J-PARC Main Ring (MR) with RF feedforward method for beam loading compensation has contributed to the stable beam acceleration in the MR for more than ten years. The longitudinal coupled-bunch instabilities (CBI) were observed in the MR for the beam power beyond 470 kW due to cavity impedance. To mitigate the CBI, we designed the new LLRF control system with multi-harmonic vector rf voltage control function to suppress the beam-induced wake voltages in the RF cavity. The prototype modules of the new LLRF control system were installed in MR in 2019 and contributed to reaching the beam power beyond 500kW. The new system was deployed in 2021. We present the configuration of the new LLRF control system and preliminary beam test results.

1. はじめに

J-PARCの主リング(MR)シンクロトロン[1]では30 GeVまで加速した陽子を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にニュートリノ実験に対する速い取り出し運転モードにおける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、 2.66×10^{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2021年4月に利用運転での取り出し強度515 kWを達成している。J-PARC MRは更なる大強度を目指したアップグレードを進めており、周回陽子数の増加と、加速の繰り返しサイクルの高速化により将来的には1.3 MWを目標としている[2]。

Table 1: Parameters of the J-PARC MR and Its RF System for the FX as of 2021

Parameter	Value
Circumference	1567.5 m
Energy	3–30 GeV
Beam intensity	(achieved) 2.66×10^{14} ppp
Beam power	(achieved) 515 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	320 kV
No. of cavities	7 (h=9), 2 (h=18)
Q-value of rf cavity	22

470 kWを越えるビーム強度ではビーム加速後半にバンチ結合(Coupled Bunch, CB)振動が観測され、

* yasuyuki.sugiyama@kek.jp

500 kWを越えるビーム強度での安定的な加速にはこれに対する対処が必要となった。ビーム信号解析を用いてCB振動が顕著であるのが加速ハーモニック $h=9$ の隣接ハーモニック成分である $h=8, 10$ の成分であることが判明し、加速空洞のインピーダンスによるビームローディングが原因の一つと考えられた[3]。現在のMRのRF高周波制御(LLRF)システム[4]では $h=8, 10$ の成分に対してはRFフィードフォワード法によるビームローディング補償が行われていたが、470 kWを越えるビーム強度においては補償が不十分である可能性があり、LLRF制御システムの改良が必要となった。

既存のMRデジタルLLRF制御システムはVMEモジュールで構成されているが、VMEモジュールが開発から10年以上経過しておりFPGA等の部品や開発環境の維持が難しい事に加えて、ビームローディング補償の改善や加速空洞の増設への対応など追加すべき機能も多岐にわたるため、既存のシステムの改修ではなく新たなLLRF制御システムの開発に着手することとした。

2. MR次世代LLRF制御システム

2.1 次世代LLRF制御システムへの要求

MRの次世代LLRF制御システムに要求される基本的な機能は以下の通りである。

- 周回周波数パターン生成機能
- 加速空洞電圧の位相・振幅の制御
- 加速空洞におけるビームローディング補償
- 加速空洞電圧信号のベクトル合成
- ビームに対する位相フィードバック
- RCS及びMRの他機器とのトリガ信号・参照信号の管理

加速空洞電圧の位相・振幅の制御に関しては、J-PARC RCS次世代LLRF制御システム[5]で実績のあるマルチハーモニックベクトルフィードバック制御を採用し、各ハーモニクス成分でのWake電圧を電圧

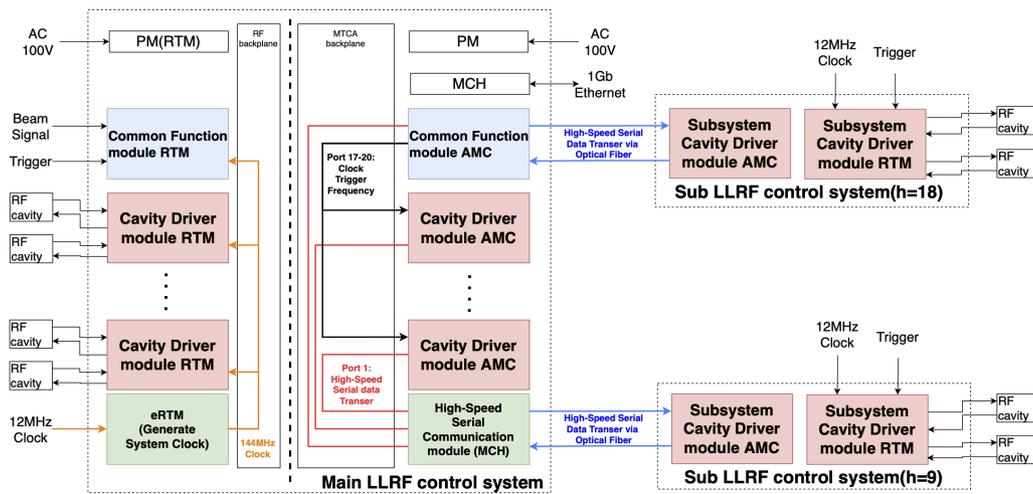


Figure 1: Block diagram of the LLRF control system.

フィードバック制御によって抑制することとした。
上記の基本的な LLRF 制御機能に加えて、MR 独自の要求として下記する機能が必要となる。次期システムにおいてはビーム信号からオンラインでバンチ結合振動の各モードの振幅を検出し、必要であれば補正のためのフィードバック制御が求められる。MR では加速用基本波 (h=9) 空胴とバンチ操作用二倍高調波 (h=18) 空胴の二種類の空胴が存在するのでそれぞれ別のハーモニクスへの制御が必要となる。また、MR では早い繰り返しサイクルの実現によるビーム強度増強のために加速空胴の増設を行っている。これまでの 9 台の加速空胴はすべて MR の同じ直線部に設置されており LLRF 制御システムも 1 ステーションに集約出来たが、2021 年までに別の直線部に加速空胴を 2 台増設したため LLRF ステーションを別の離れた建屋に設置する必要が生じた。空胴電圧制御に関しては各ステーションで個別に行えるが、ビームに対する位相フィードバックなどはステーションをまたいだ信号のやりとりが必要となる。

2.2 次世代 LLRF 制御システムの構成

図 1 に開発した MR 用次世代 LLRF 制御システムの構成を示す。LLRF 制御システムのデザインは J-PARC RCS 次世代 LLRF 制御システムを参考にしつつ、上記の MR 独自の仕様を追加して開発を行った。次世代 LLRF 制御システムは大型の主システムと小型の副システムから構成され、主システムは既存の 9 台の加速空胴の基本波電圧制御とビームに対するフィードバック、副システムは増設空胴の基本波または二倍高調波の電圧制御を担当する。

次世代 LLRF 制御システムは MicroTCA.4 規格に基づいており、主システムは RF バックプレーン付きのフルサイズ MTCA.4 シェルフを用い、副システムは数スロット分の小型シェルフを用いる。LLRF 制御システムでは共通機能モジュールと空胴ドライバモジュールの 2 種類の制御モジュールを用いる。これらの制御モジュールは FPGA を搭載した制御用の AMC(Advanced Mezzanine Card) と RF 信号入出力用

の Rear Transition Module (RTM) から構成されている。LLRF 制御システムでは制御モジュールの他に、セルフ管理と通信スイッチを兼ねた MCH(Mezzanine Carrier Hub) モジュール、電源モジュール (PM)、クロック生成モジュール (eRTM)、バックプレーン高速通信用の高速シリアル通信モジュールが用いられる。副システムは空胴ドライバモジュールに周波数生成機能を追加して単独で用いる。

図 2 に LLRF 制御システムで用いる制御モジュールの AMC と RTM を示す。開発した LLRF 制御システムでは三菱電機特機システム株式会社が製造した汎用 AMC [6] を用いている。AMC は 8 チャンネル分の ADC と 2 チャンネル分の DAC、高速通信用 SFP ポート 2 つ、そして信号処理用の FPGA を備えている。FPGA としては Xilinx 社製 Zynq SoC FPGA を用いており、Zynq の CPU 上で EPICS-IOC を動作させる事で、各モジュール単体での遠隔操作を可能としている。共通機能モジュールと空胴ドライバモ

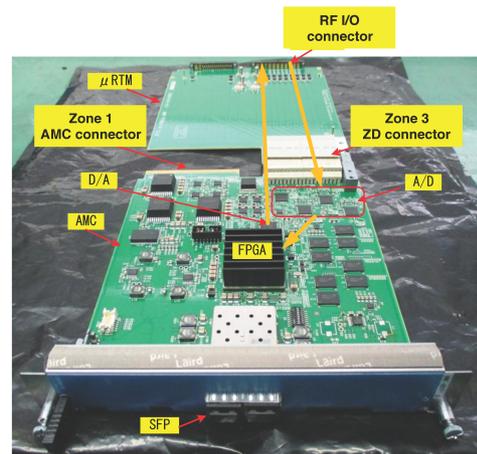


Figure 2: Picture of the AMC board and the RTM board for the developed LLRF control system. [6]

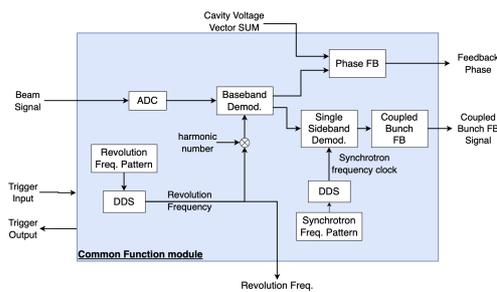


Figure 3: Block diagram for the common function module.

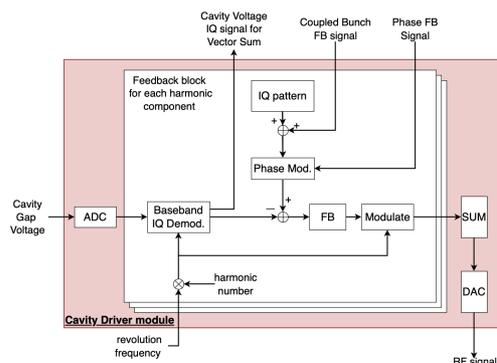


Figure 4: Block diagram for the cavity driver module.

ジュールで同種の汎用 AMC を異なるソフトウェアを実装して使い分けている。RTM に関しては共通機能モジュールと空胴ドライバモジュールで入出力信号の種類や数が異なるため、それぞれ個別の三菱電機特機システム製 RTM モジュールを使うこととした。FPGA の動作に必要な 144 MHz クロック信号は eRTM モジュールで J-PARC 12 MHz メインクロックから生成されて RF バックプレーンを介して各 RTM へと配信され AMC の FPGA へと供給される。

図 3 に共通機能モジュールの概略図を示す。共通機能モジュールは主システム全体で使用する周波数信号の DDS(Direct Digital Synthesizer) による生成と、ビーム信号を用いた各モード毎のバンチ結合振動解析・フィードバック、空胴電圧ベクトル和とビーム信号を用いた位相フィードバックを行う。

図 4 に空胴ドライバモジュールの概略図を示す。空胴ドライバモジュールでは 1 台で 2 空胴分の電圧制御が可能であり、空胴毎に 8 ハーモニクス of 独立電圧制御を行う。ADC でデジタル化された空胴ギャップ電圧信号は IQ 検波を行った後電圧 IQ パターンと比較されベクトルフィードバック制御が行われ、IQ 変調の後に DAC で RF 信号へと変換される。この際、バンチ結合振動フィードバックとビーム位相フィードバックを適用した電圧 IQ パターンが比較に用いられる。検波された各ハーモニック成分の空胴電圧 IQ 信号は高速シリアル通信を通じてベクトル合成にも用いられる。副システムは上記の機能に加えて単独動作を可能とするために周波数生成機能が実装される。

図 5 に LLRF 制御システムにおける高速シリアル

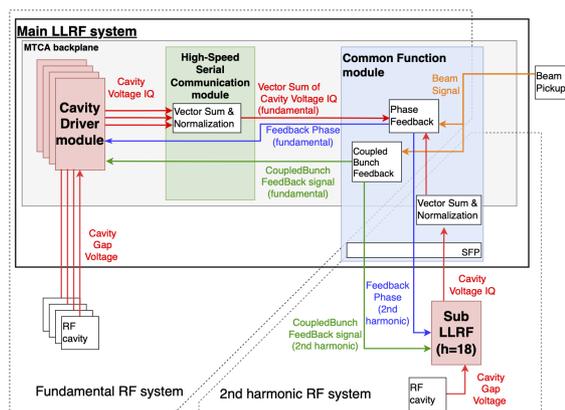


Figure 5: Block diagram for serial data transfer in the LLRF control system.



Figure 6: Picture of the prototype cavity driver module.

通信の概略図を示す。開発した LLRF 制御システムでは、MTCA バックプレーンや SFP ポート経由で Xilinx 社の AURORA をプロトコルに用いて、制御モジュール間的高速シリアル通信を行っている。主システムにおいては MTCA バックプレーンの Port1 を高速シリアル通信ポートとして用いることでモジュール間的高速データ通信を行っている。この高速通信は、シェルフに設置出来る 2 台の MCH のうち 1 台を専用通信スイッチ (高速シリアル通信モジュール) として用いることで実現される。各空胴ドライバモジュールからの空胴電圧 IQ 信号は MTCA バックプレーン経由で高速シリアル通信モジュールに集められてベクトル合成され共通機能モジュールに送られる。共通機能モジュールからの位相フィードバック信号やバンチ結合振動フィードバック信号は高速シリアル通信モジュールを介して各空胴ドライバモジュールへと配信される。副システムのモジュールに関しては主システムと MTCA バックプレーンを共有しないため、代わりに各モジュールの SFP ポートに光通信モジュールを取り付けて光ファイバで的高速シリアル通信を行う。主システム内では基本波の信号を通信するのに対し、副システムにおいては空胴の役割によって基本波と二倍高調波のいずれかを主システムとやりとりする事になる。基本波用の副システムの場合は高速シリアル通信モジュールと直接光通信することで主システムでの基本波のベクトル合成に参加する。二倍高調波用の副システムの場合は直接共通機能モジュールと光通信を行って二倍

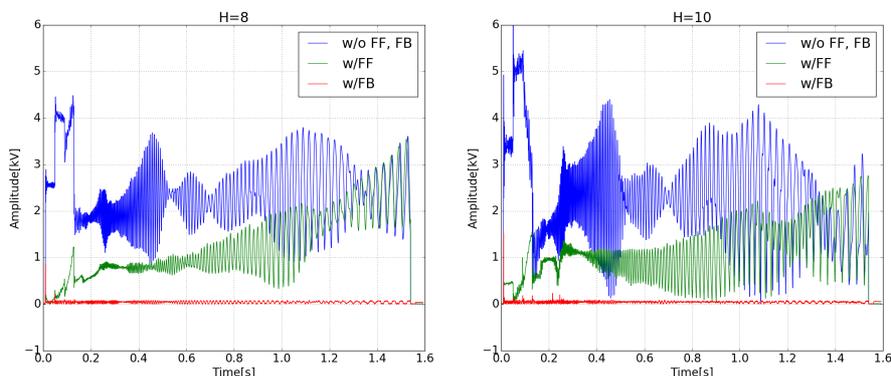


Figure 7: Comparison of the wake voltage in single RF cavity with the beam power of 480 kW.

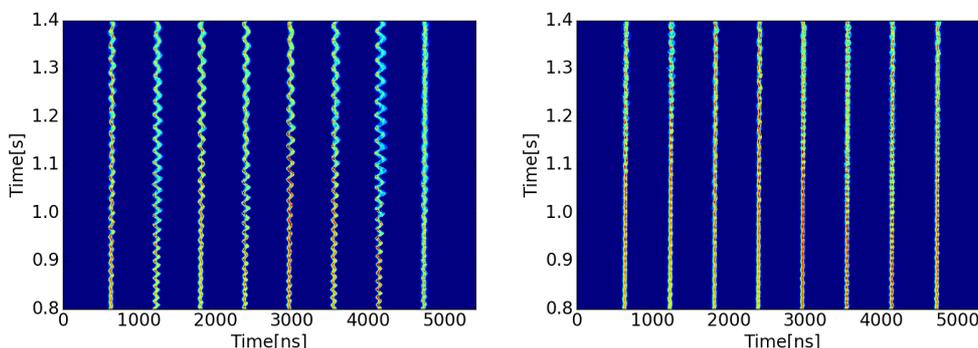


Figure 8: The mountain plot for the fast extraction in the J-PARC MR with the beam power of 480 kW (Left: with RF feedforward method for $h=8,10$. Right: Voltage vector feedback for $h=8,10$).

高調波用信号の送信と位相フィードバック・バンチ結合振動フィードバック信号の受信を行う。

3. 空洞電圧制御による CB 振動抑制

新たな LLRF 制御システム全体の開発に先立ち、空洞ドライバモジュールの試作機を開発してビームローディング補償の改善と CB 振動抑制の効果を確かめることとした。図 6 に空洞ドライバモジュールの試作機を使った空洞電圧制御試験装置の写真を示す。空洞電圧制御試験装置は小型シェルフに空洞ドライバモジュールのプロトタイプモジュールを一組搭載しており、単体で周波数パターンの生成と 2 空洞の電圧制御が行える。2019 年夏に空洞電圧制御試験装置 4 台を MR にインストールして 8 台分の空洞の空洞電圧制御のビームを用いた試験を行った。この際、加速に直接関わる $h=9$ の電圧成分の制御は現行の LLRF 制御システムで行い、 $h=8,10$ の成分の電圧フィードバック制御を空洞ドライバモジュール試作機で行うこととした。

図 7 にビームローディング補償の手法の違いによる加速空洞 1 台辺りの Wake 電圧の比較を示す。空洞電圧のベクトルフィードバック制御によって Wake 電圧が 0.1 kV 以下に抑えられていることが分かる。図 8 にビーム強度 480 kW におけるビームローディング補償の手法の違いによるマウンテンプロット

の比較を示す。フィードフォワード補償の場合には時間が経つにつれて振動が増大するのに対し、電圧フィードバック制御の場合には振動がよく抑えられていることが分かる。大強度でのバンチ結合振動抑制が確認出来たため、空洞ドライバモジュール試作機は利用運転に導入されて 2020 年以降の MR における 500 kW を越えるビーム運転の実現に貢献することとなった。

4. 次世代 LLRF 制御システムの導入状況とビーム試験結果

2019 年度のビーム試験の結果を受けて、次世代 LLRF 制御システム全体の開発と製作を 2020 年度に行った。図 9 に完成した MR 用次世代 LLRF 制御システム（主システム）の写真を示す。主システムには空洞ドライバモジュールが 5 台設置されており現行の基本波用空洞 9 台分の制御がこのシステムで行えるようになっている。副システムに関しては、図 6 に示した試作機のモジュールのハードウェアに対してソフトウェアを入れ替えて使用した。

完成したシステムは MR の 2021 年夏から 2022 年 6 月までの長期シャットダウン期間中にインストールされ、2022 年 6 月末からビームを用いた動作試験を実施した。加速試験は夏以降に行うこととし、今回は新システムで大強度ビームが安定に入射・周回



Figure 9: The photo of the developed LLRF control system. (Left: AMC side. Right: RTM side.)

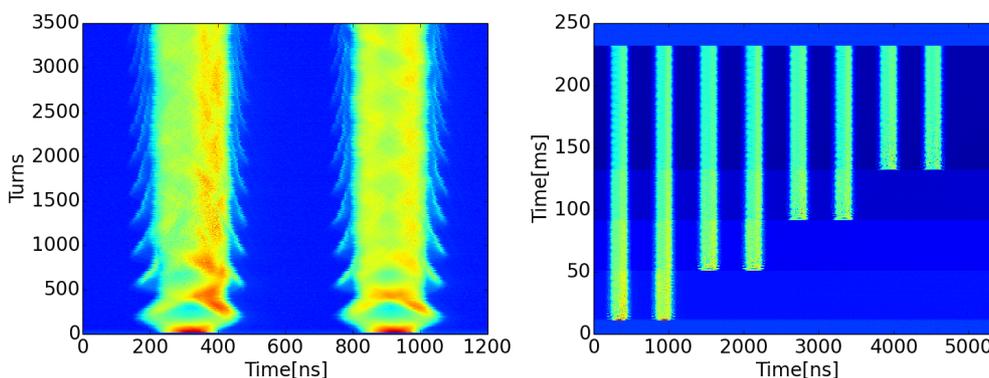


Figure 10: The mountain plot with the beam power of 2.4×10^{14} ppp. (Left: During injection period for 2 bunches. Right: Injection and circulation of 8 bunches.).

出来るかの確認を行った。図 10 に、MR に入射した
ビーム強度 2.4×10^{14} ppp. の陽子ビームのマウン
テンプロットを示す。この際、基本波は空胴 8 台を用い
て $h=9$ の合計電圧は 155 kV とし $h=6\sim 12$ の成分に対
して電圧フィードバックを行い、二倍高調波は空胴 2
台を用いて $h=18$ の合計電圧 110 kV とし $h=15\sim 21$ の
成分に対して電圧フィードバックを行った。大強度
ビームが安定に入射・周回出来ていることが分かる。

5. まとめ

J-PARC MR における 2.48 秒サイクルでのビーム
強度 500 kW を越える大強度運転と 1.36 秒サイク
ルでの空胴増設を伴う大強度ビーム加速を実現する
ために、MR の RF 加速空胴のための次世代 LLRF 制御
システムの開発を行った。空胴電圧制御試験装置の
試作機は 2019 年に MR にインストールされて CB 振
動の抑制に効果を発揮し、2020 年以降のビーム強度
500 kW を越える大強度利用運転に貢献した。次世
代 LLRF 制御システムの製作は 2020 年度に完了し、
2021 年に MR へとインストールされた。2022 年 6、
7 月に行われたビーム試験において RCS からの 3 GeV
陽子ビームを安定に入射・周回出来ることが確認出
来た。今後は、秋以降の加速試験においてビーム位
相フィードバックの調整や高繰り返しサイクル下で
の大強度ビームの安定加速に向けた空胴電圧フィー

ドバックゲイン調整等を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, “Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron,” *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2012, no. 1, p. 2B004, 2012.
- [2] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring,” *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2021, no. 3, pp. 33–34, mar 2021.
- [3] Y. Sugiyama *et al.*, “Measurement of the Longitudinal Coupled Bunch Instabilities in the J-PARC Main Ring,” in *Proc. Int. Beam Instrum. Conf. 2017*, 2017, pp. 225–228.
- [4] F. Tamura *et al.*, “Multiharmonic rf feedforward system for compensation of beam loading and periodic transient effects in magnetic-alloy cavities of a proton synchrotron,” *Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams*, vol. 16, no. 5, p. 051002, may 2013.
- [5] F. Tamura *et al.*, “Commissioning of the next-generation LLRF control system for the Rapid Cycling Synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex,” *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sect. A*, vol. 999, p. 165211, may 2021.
- [6] M. Ryoshi *et al.*, “MTCA.4 FPGA(Zynq) A/D·D/A board,” in *Proc. 12th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Japan*, Tsuruga, 2015, pp. 818–822.