

# RECONSTRUCTION OF THE 2-DIMENSITONAL BEAM PROFILE AT LONGITUDINAL PHASE SPACE WITH TOMOGRAPHY METHOD IN J-PARC RCS AND MR

Masahiro Yoshimoto<sup>1,A)</sup>, Humihiko Tamura<sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>A)</sup>, Masahiro Yoshii<sup>B)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>B)</sup>, Naoki Hayashi<sup>A)</sup>, Masato Kawase<sup>A)</sup>, Kazuhiko Watanabe<sup>C)</sup>, Muneyoshi Yoshikawa<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA) / J-PARC

Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, JAPAN, 319-1195

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK) / J-PARC

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & service Co., Ltd

## Abstract (英語)

The longitudinal phase space tomography, which was evolved to retrieve the two-dimensional beam distribution in the longitudinal phase space with computer tomography algorithms, is very useful diagnostic tool in the accelerator domain. The simple reconstruction tool was developed for the J-PARC RCS and MR with the convolution back projection method for the beam storage mode. On the assumption that the longitudinal profiles should not be disturbed for one period of the synchrotron oscillation, such two-dimensional profiles can be reconstructed easily from one-dimensional bunch beam profiles, which are measured for every turn by the wall current monitor.

## J-PARC RCS/MRにおけるトモグラフィーを用いた2次元ビームプロファイルの再構成

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設J-PARC<sup>[1][2]</sup>の3GeVシンクロトロン(RCS)及び主リング(MR)において、縦方向位相空間上の2次元ビームプロファイルを得るために、縦方向トモグラフィー (Longitudinal Tomography: LT) アルゴリズムを用いた2次元分布再構成ツールを開発した。LTアルゴリズムは、医療分野で一般に用いられているX線CTの原理を加速器ビーム物理の分野に発展させたもので、これまで色々なLTアルゴリズムが提案された<sup>[3]</sup>。我々はシンクロトロン振動1周期の間で位相空間内のビームプロファイルはほとんど変化しないと仮定して、シンプルでかつ非常に再現性の良いツールを開発した<sup>[4]</sup>。また本ツールは任意の周回後の分布形状を再構成するので、分布形状の変化の様子も観測出来る利点がある。

本論文では、まずLTアルゴリズムについて簡単に紹介した後、再構成ツールの再現性を確認するために行った縦方向のビームトラッキングシミュレーションについて報告する。1ターン毎の2次元プロファイルをシミュレートしておき、投影分布であるバンチ波形を計算して、ツールを用いて再構成したビーム分布との比較を行った。次にRCS及びMRで測定したバンチ波形を用いて実際に位相空間上の分布の変化の様子を報告する。そして最後に本ツールで用いたLT法の技術的課題に

ついて議論する。

### 2. LTアルゴリズム

図1はX線CTの測定原理とLTアルゴリズムの原理との比較したものである。X線CTの原理は、検査対象の周囲360°からX線を照射して角度依存による投影分布を測定し、そのデータを元に元の検査対象の2次元構造を再構成するものである。この原理を加速器分野に応用したものがLTアルゴリズムで、縦方向位相空間上での2次元ビームプロファイルを再構成する。一般にシンクロトロン加速器では、RFでキャプチャーされたバンチビームはRFバケットの中で位相回転をしており、ウォールカレントモニター(WCM)<sup>[5]</sup>などで観測されるバンチ波形はこの位相空間上での2次元ビームプロファイルを時間方向に投影した分布を表している。ここで位相回転1周期の間にバンチビームの2次元プロファイルが変化しないと仮定すると、観測された1周期分のバンチ波形は2次元バンチビームプロファイルを周囲360°に投影した分布そのものであるため、X線CTと同じ方法を用いて、元

<sup>1</sup> E-mail: yoshimoto.masahiro@jaea.go.jp

のビームプロファイルを再構成することが出来る。

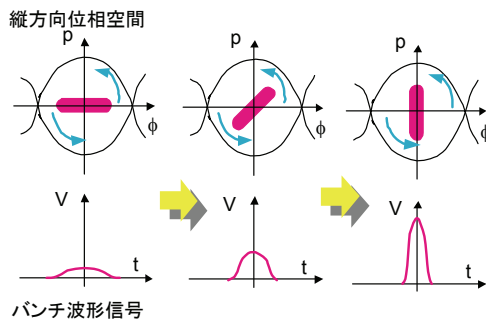
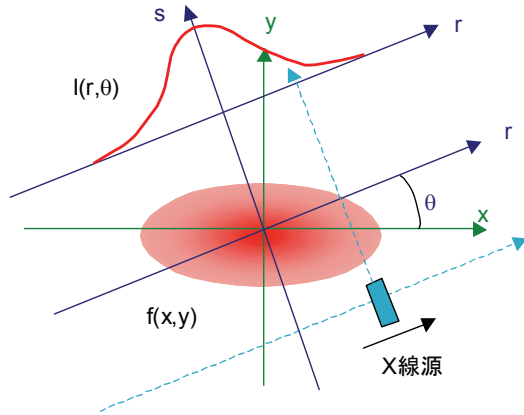


図1： X線 CT の測定原理の概念図（上）と RF バケット内の位相回転とバンチ波形についての概念図（下）との比較。

最近では様々なCTアルゴリズムが開発されているが、我々は2次元分布再構成ツールを開発するにあたり重畳積分逆投影 (CBP) 法<sup>[6]</sup>を採用した。この方法はフーリエ変換を用いずに2次元分布の再構成が出来るため、広く用いられている方法の1つである。

実際にRCSでのビーム試験で観測したバンチ波形に対して、今回開発した再構成ツールのデモンストレーションを行った。図2はWCMで測定したバンチ波形とLLRFで作られるRFクロック信号の典型的な測定結果である。この測定結果からバンチ波形をRFクロック信号の立ち上げタイミングに合わせて切り出して並べ替えたものが図3のマウンテンプロットである。このマウンテンプロットから最初のシンクロトロン振動1周期分だけ抜き出して再構成した結果を図4に示す。ビーム試験時の条件は、リニアックから24バンチ分のビームをRCSに入射している。RCSの入射エネルギーでシンクロトロンチューンが約0.0063であるため、最初に入射したバンチビームは最後の24番目のバンチビームが入射す

るまでに約1/7回転する。このため、縦方向のビームの分布は蝶ネクタイの様な形になる。

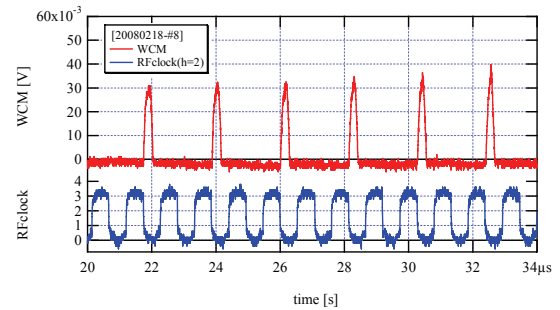


図2： WCM で観測したバンチ波形及び LLRF で作られる RF クロック信号。

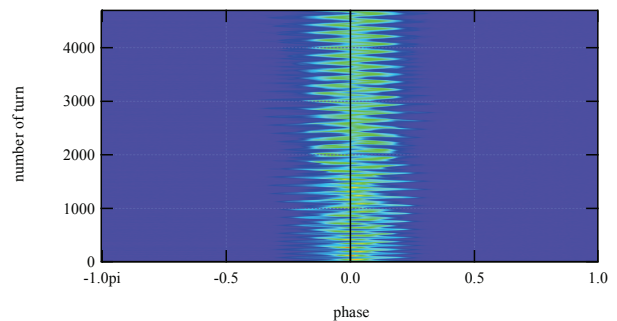


図3： バンチ波形を RF クロック信号のタイミングで切り出して求めたマウンテンプロット。

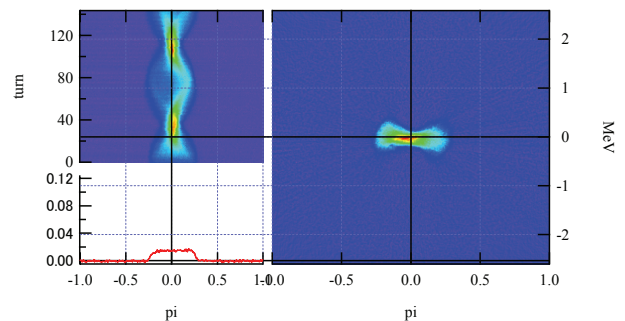


図4： 最初の1シンクロトロン周期分切り出したマウンテンプロット（左）と LT アルゴリズムを用いて再構成した位相空間上での2次元ビームプロファイル（右）。

### 3. シミュレーションによるツールの有効性確認

開発した再構成ツールの有効性を実証するために、ビームトラッキングシミュレーションを実施した。手順としては、まずシミュレーショ

ン結果から2次元ビーム分布を求めておき、既知のビーム分布からターン毎の1次元投影分布を計算する。次にシンクロトン振動1周期分の投影分布を抜き出し、開発したツールを用いて2次元ビームプロファイルを再構成して、既知の2次元ビーム分布と比較する。シミュレーションの条件は、バンチ長さを560nsとして1バンチあたり20個の粒子を仮定し、RF位相が0度の位置に合わせて25バンチ分の多重入射を行った。

図5は比較結果をまとめたもので、右がシミュレーションで得られた2次元ビーム分布とその1次元投影分布を、左が本ツールを用いて再構成した2次元ビームプロファイルとその1次元投影分布を表している。これらの比較結果から今回開発した再構成ツールの再現性及び信頼性が非常に高いことが分かった。

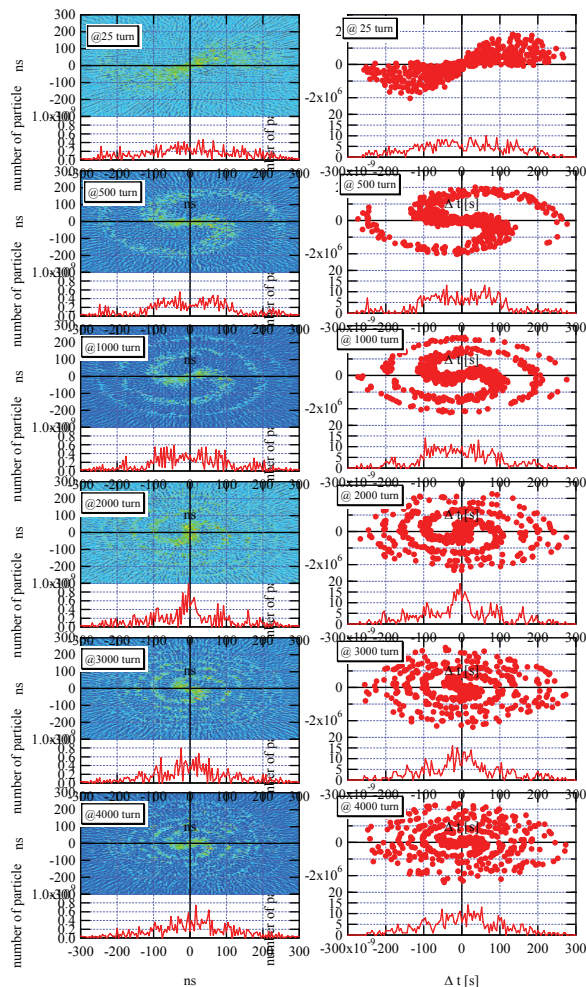


図5：ビームトラッキングシミュレーションによる位相空間上のビーム分布とその投影分布（右）と開発したツールを用いて再構成した2次元プロファイルとその投影分布（左）の比較。

このシミュレーションからもう1つ重大な結

果が分かった。今回開発した再構成ツールには、シンクロトン振動1周期の期間ではバンチビームの分布は変化しない、つまりシンクロトン振動の振幅依存による非線形性効果は無いとの前提条件を用いているにもかかわらず、非線形性効果によるフィラメンテーション過程をはっきり観測することが出来た。本ツールは1シンクロトン周期分のみ抜き出して再構成しており、それまでの途中の遷移過程は一切影響しないために、このような非線形性効果によるビームプロファイルの変化する様子を知らることが出来るのである。

#### 4. RCS及びMRでの2次元プロファイルの再構成

RCS及びMRでの実験データに対する2次元ビームプロファイルの再構成を行なった。ビーム試験の条件はそれぞれ加速をしないビームストレージモードで行なった。図5はRCSでの測定結果で入射ビームのバンチ長が280nsと560nsとの2つの条件で比較したものである。バンチ長が長くなるにつれてビームプロファイルのフィラメンテーションの効果が大きく現れているのが観測される。図6はMRでの測定結果で、RCSにビーム入射を行なう際にオフセット入射をした時のマウンテンプロット及び再構成した2次元プロファイルの変化をまとめたものである。再構成によりビームのプロファイルが穴あき構造になっていることが明確に観測された。これはバンチ波形やマウンテンプロットからでは決して見えなかったものである。これら実験データに対する再構成結果からも、本ツールがビームダイナミクスを知るための非常の協力で有効なツールであることが確かめられた。

#### 5. まとめと今後の課題

縦方向位相空間上のビームの2次元分布を獲得するために、J-PARC RCS及びMRではLTアルゴリズムを用いたシンプルな再構成ツールを開発した。トラッキングシミュレーションを行い既知の2次元分布と再構成した2次元分布との比較からこの再構成ツールが再現性に優れ信頼性の高いことが確かめられた。また実験データに対する再構成結果からシンクロトン振動の振幅依存による非線形性効果で生じるフィラメンテーションの成長過程や穴あき構造と言った従来のバンチ波形やマウンテンプロットでは見えなかったことを明確に観測することが出来た。今回開発した再構成ツールは非常に有用でかつ

強力な測定ツールであることを実証することが出来た。

現状の本ツールを用いた2次元分布再構成はRCS及びMRのいずれの場合も加速をしないビームストレージモードにしか対応していない。加速モードでは周回周波数が変化するため、投影角度が一定でなくなる。また加速中はシンクロトロン振動の位相が変化するため位相空間上のセパトリティクスも一定ではなくなる。これらの諸問題に対して、現在のLTアルゴリズムを大幅に変えることなく加速モードへの拡張をすすめている。

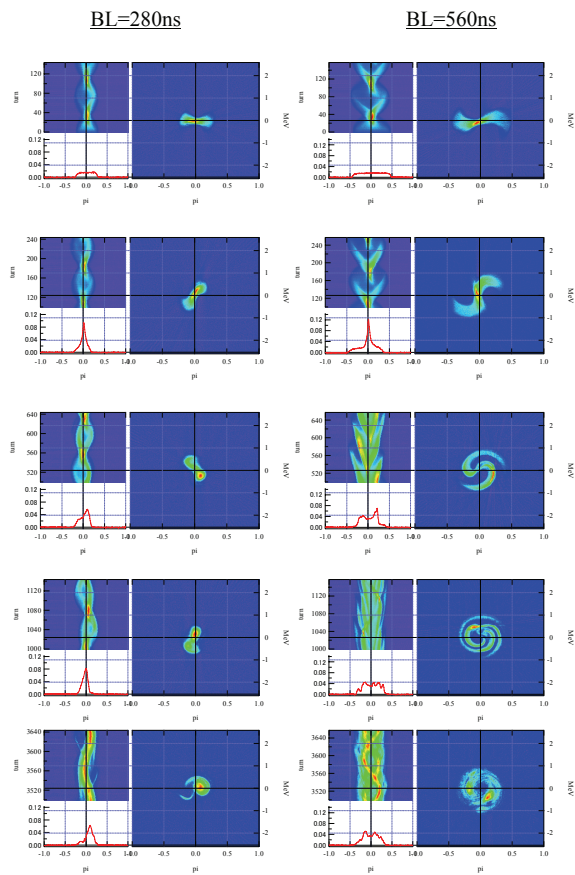


図5： RCSでの2次元ビームプロファイル再構成。入射ビームのバンチ長が280ns(左)と560ns(右)との比較。

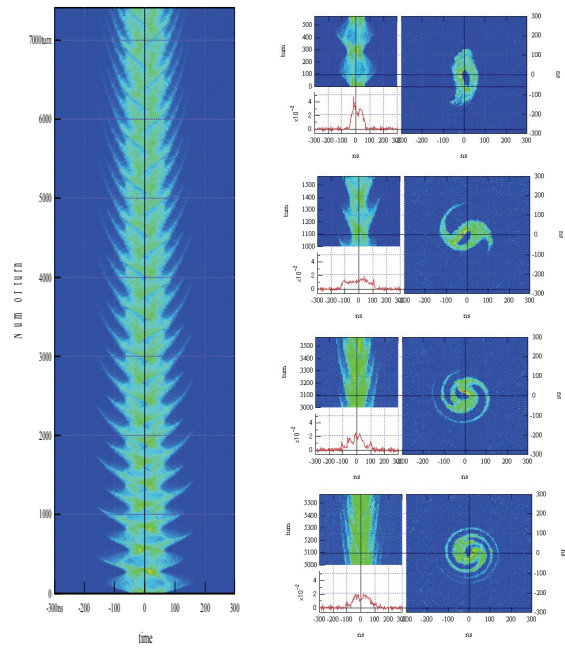


図6： MRでのマウンテンプロット(左)再構成の結果(右)。RCSでオフセット入射をした。

### 参考文献

- [1] JAEA/KEK Joint Project Team, KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, March 2003.
- [2] M. Kinsho, "J-PARC Progress and Challenges of Proton Synchrotrons", Proc. EPAC08, Genoa, pp. 2897-2901, (2008).
- [3] S. Hancock, et al., "Longitudinal phase space tomography with space charge", Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 3, 124202 (2000).
- [4] M. Yoshimoto et al., "Longitudinal Phase Space Tomography At J-PARC RCS", Proc. PAC09, Vancouver.
- [5] N. Hayashi et al., "Beam Instrumentations for the J-PARC RCS Commissioning", Proc. EPAC08, Genoa, pp. 1125-1127, (2008).
- [6] A. C. Kak, M. Slaney, "Principles of Computerized Tomographic Imaging", IEEE Press, 1979.