

誘導加速シンクロトロンにおける任意パルス制御

由元崇, 高山健, 岡村勝也, 門倉英一 (KEK)

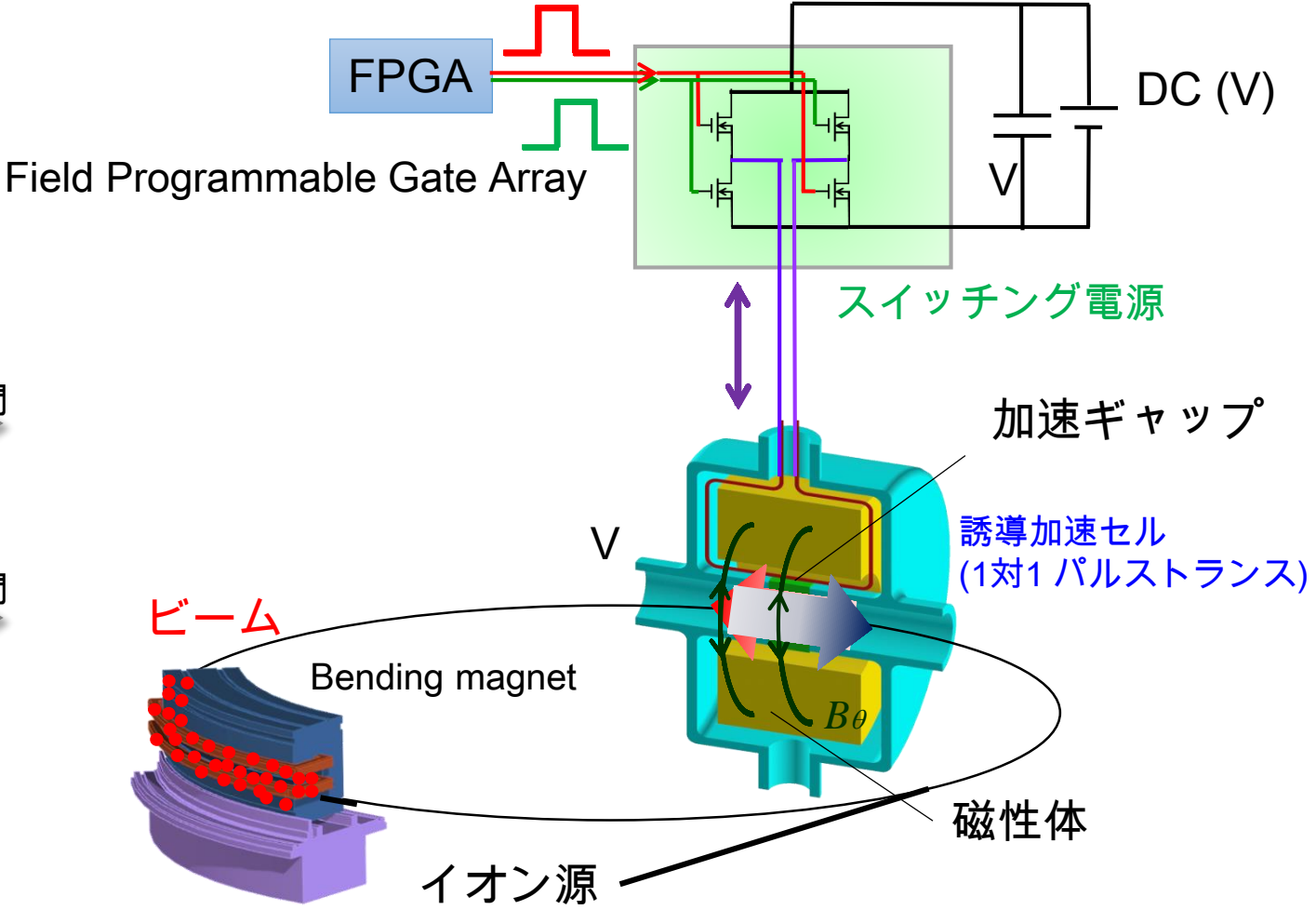
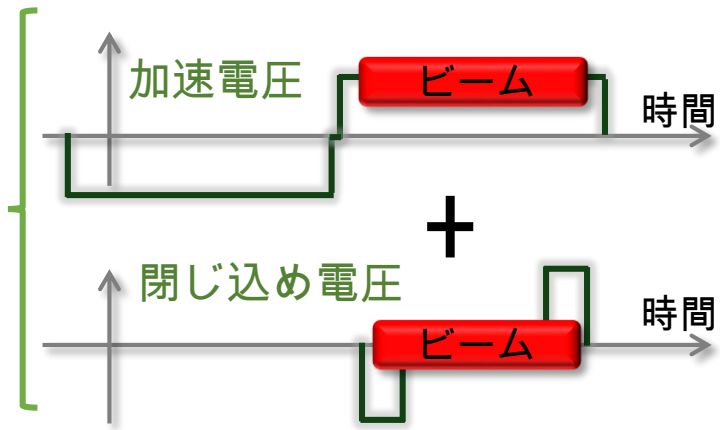
要旨

誘導加速シンクロトロンでは既存の高周波加速とは異なり1対1のパルストランスである誘導加速セルを用いてビームを加速する。その実証機であるデジタル加速器ではECRイオン源で生成された50keV/u重イオンビームをリングに直接入射・加速させることに成功し、さらにはパルス加速の利点を生かしてビームの形状制御も可能である。誘導加速セルを駆動するスイッチング電源のゲート回路のON/OFFはFPGAからのデジタル信号によって制御されるが、そのパルスはnsの精度で50msec発生させる必要がある。近年、既存のFPGA制御システムでは対応できないような様々なビームに対する要請が高まり、より柔軟に対応できる加速制御が求められていた。本発表では、任意波形発生器を用いた任意パルス制御システムについて詳細に報告する。

誘導加速シンクロトロンとは

誘導加速シンクロトロンでは既存の高周波加速とは異なり1対1のパルストランスである誘導加速セルを用いてビームを加速する。その実証機であるデジタル加速器ではECRイオン源で生成された50keV/u重イオンビームをリングに直接入射・加速させることに成功し、さらにはパルス加速の利点を生かしてビームの形状制御も可能である。誘導加速セルを駆動するスイッチング電源のゲート回路のON/OFFはFPGAからのデジタル信号によって制御されるが、そのパルスはnsの精度で50msec発生させる必要がある。

FPGAを用いた完全予測制御によりビーム加速する



デジタル加速器
(旧KEK-PS 500MeV Boosterを改装した誘導加速シンクロトロン)

誘導加速シンクロトロンの利点

半導体スイッチングにより加速電圧を発生させることができるので、以下のことが可能

- ・ 広帯域ビーム加速 (kHz < ビーム周回周期 < a few MHz)¹
- ・ ビーム形状制御(例えばバンチ圧縮)²
- ・ 非対称加速電圧によるスーパーバンチ加速(未実証)³

広帯域ビーム加速¹

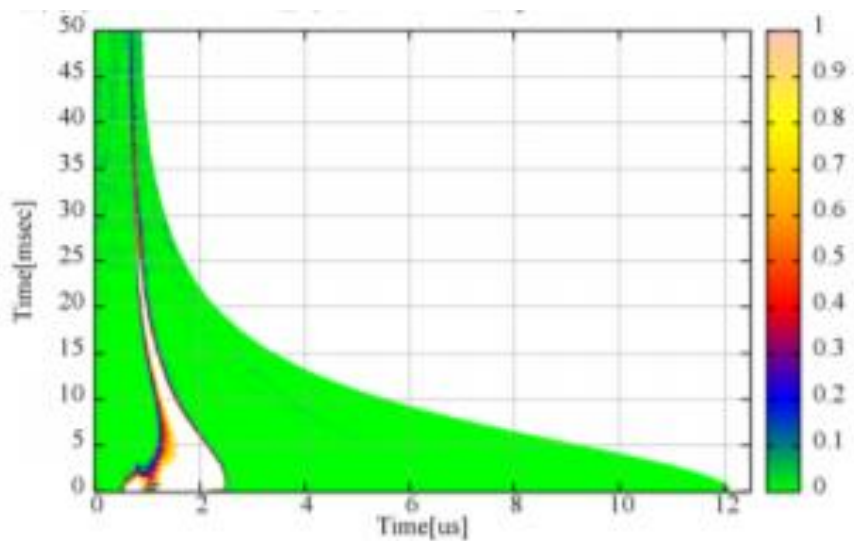
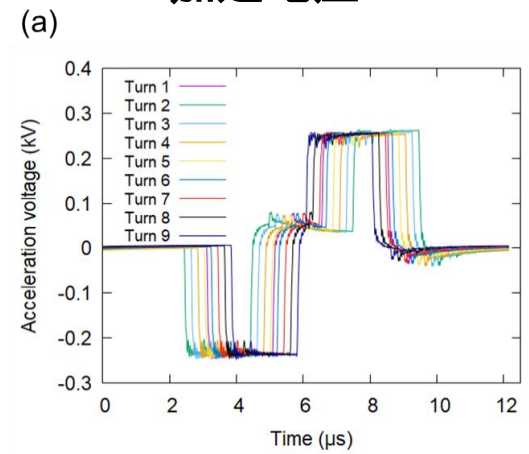


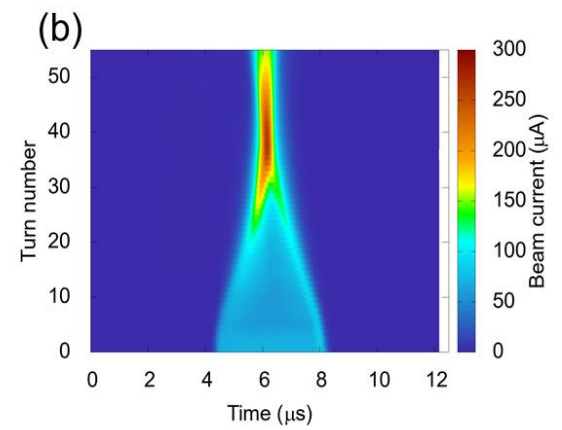
Figure 11: Time-turn plane view of a trapped and accelerated beam signal (experiment).

ビーム形状制御(バンチ圧縮)²

加速電圧



ビームプロファイル

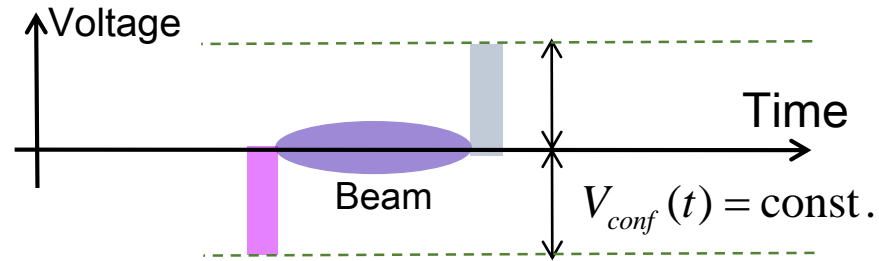


1:“KEKデジタル加速器におけるイオン源からの直接入射ビームの加速”,第十回日本加速器学会,SAOS05.
2:T. Yoshimoto *et al.*, “Fast Ion Bunch Compression by Barrier Pulse Control” *Physics of Plasma*, accepted (2021).
3: K. Takayama, J. Kishiro, M. Sakuda, Y. Simosaki, and M. Wake, “Superbunch Hadron Colliders,” *Phys. Rev. Lett.* 88, 144801 (2002).

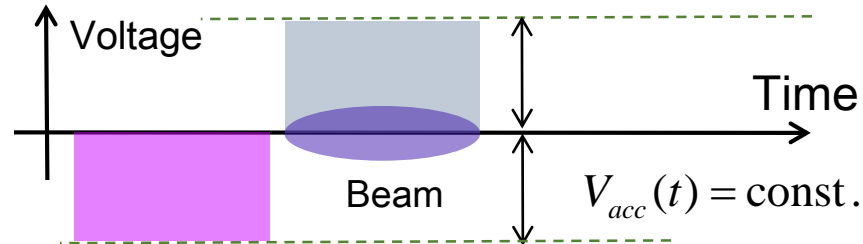
様々な加速制御方式

従来のパルス密度変調型加速

ビーム閉じ込め用加速電圧(毎ターン発生)

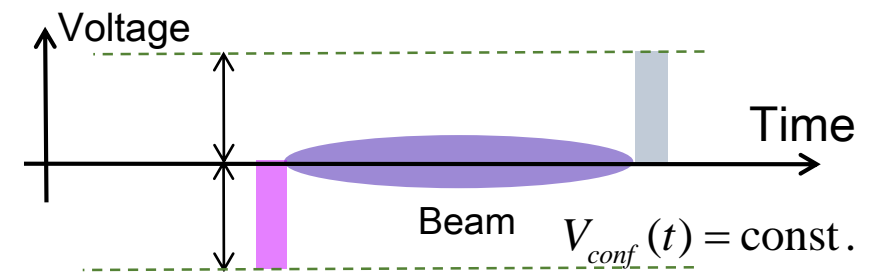


ビーム加速用加速電圧(毎ターン発生せず、
間欠的に発生)

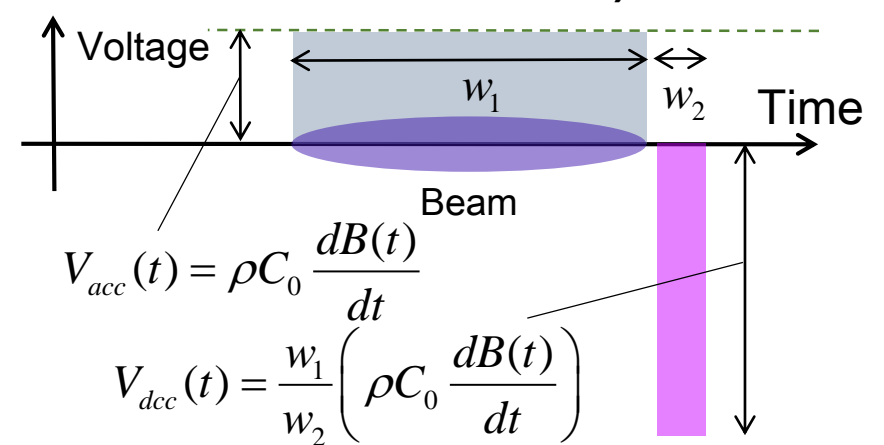


提案されている振幅変調型加速

ビーム閉じ込め用加速電圧(毎ターン発生)



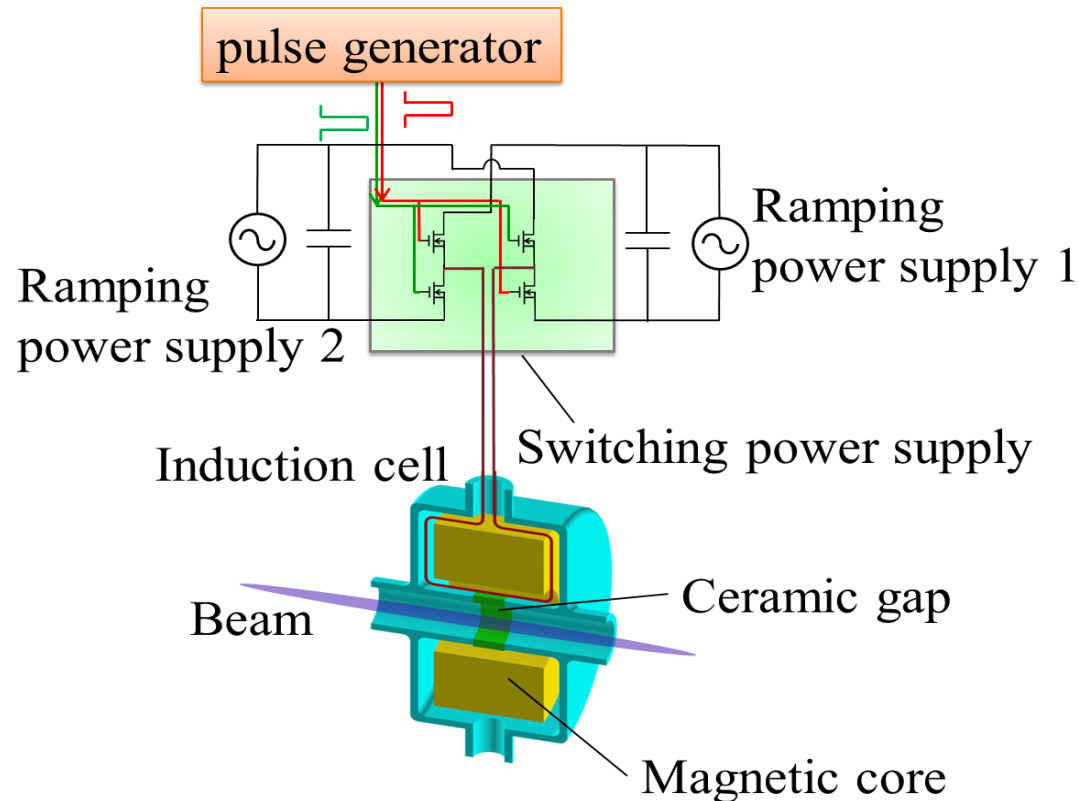
ビーム加速用加速電圧(毎ターン発生、
振幅が必要加速電圧に応じて変化)



従来の加速方式に比べて、振幅変調型誘導加速はよりビーム力学的に安定したビーム加速が実現できると考えられる。また、非対称誘導加速電圧の使用によりスーパーバンチの加速も原理的に可能である。この二つの加速方式を柔軟に実現できる制御装置が不可欠である。

提案されている制御システム

振幅変調型誘導加速にも対応できるように加速制御システムにランピング電源 2 台を導入したとすると、誘導加速電圧の正負振幅を変調(時定数:~msec)できる¹。従来は信号発生器としてFPGAボード(Xilinx)を使用していたがより柔軟な加速制御信号の発生が求められていた。



¹: T. Yoshimoto, X. Liu, T. Adachi, T. Kawakubo, H. Kobayashi, S. Takano, E. Kadokura, K. Okamura, and K. Takayama, "Super-bunch induction acceleration scheme in the KEK Digital Accelerator," MOPA17, in *Proceedings of the 13th Heavy Ion Accelerator Technology Conference (HIAT2015)*, Yokohama, Japan (2015).

制御信号波形(実測)

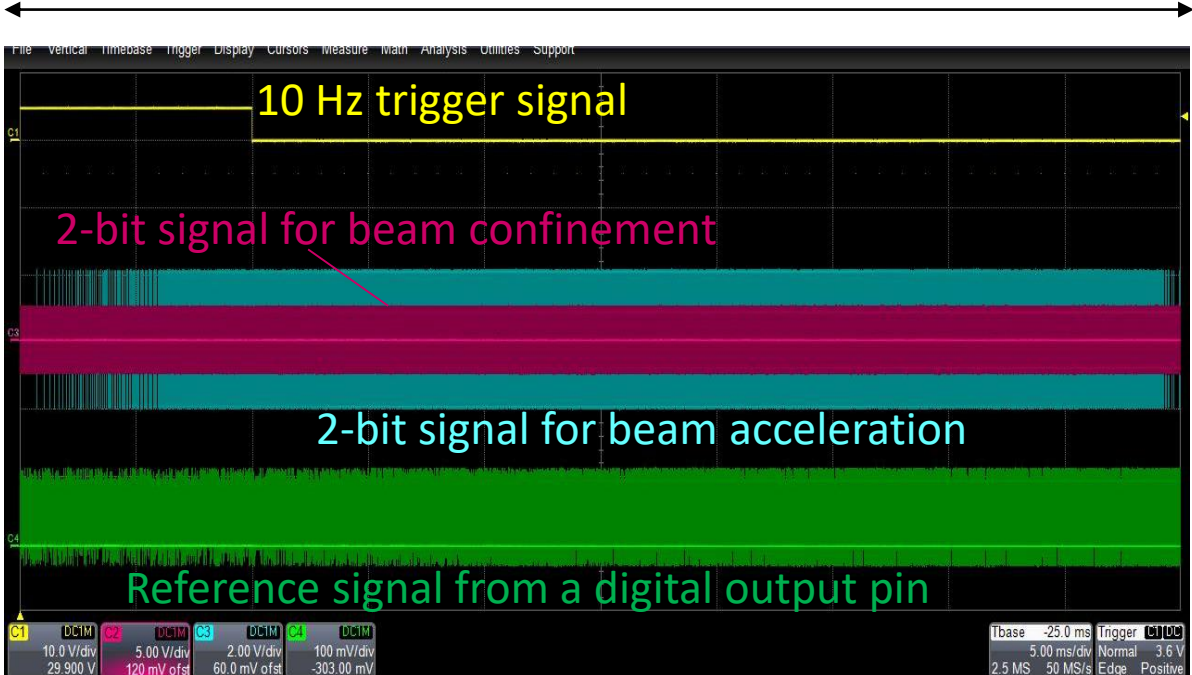
従来は複雑なhand-madeのFPGAプログラミングによりパルス密度変調型加速を実現していた。近年、高性能任意波形発生器が登場したので、この任意波形発生器で代用することが可能か、また振幅変調型加速の加速にも使用できるかを検証した。

16-bit Arbitrary Waveform Generator
(LECORY, T3AWG3352) [1.2-GHz, 1-Giga sample points]

KEK-DA(10 Hz)で全加速期間50 msecの間、 $< \sim 3$ nsの時間分解能でスイッチング電源におくるパルス密度変調型加速用の制御信号(数万ターン)が生成できることがわかった。

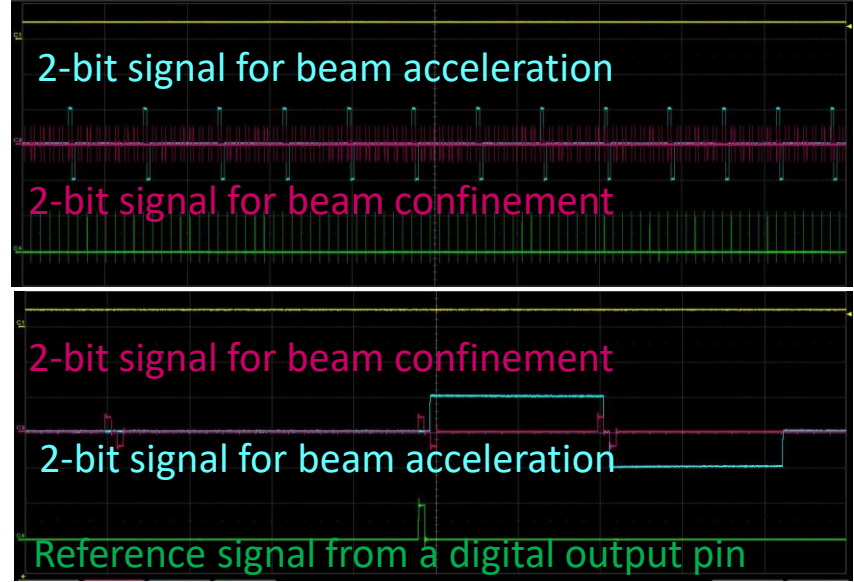


50 msec



全体図

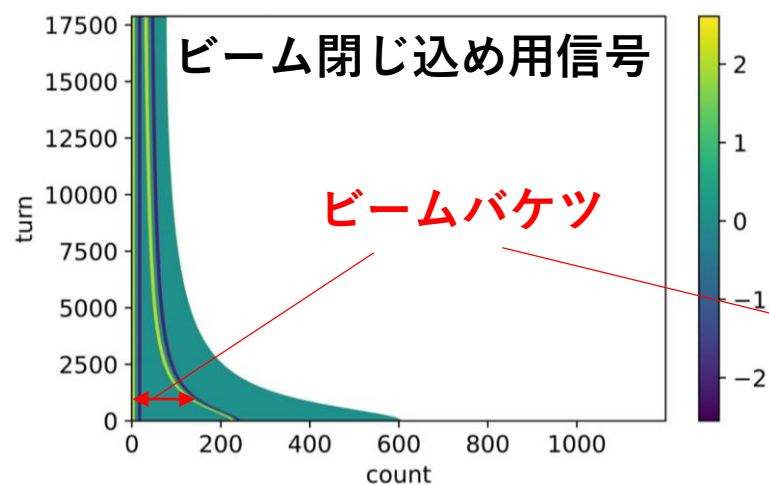
拡大図1: 加速信号は間欠的に発生している



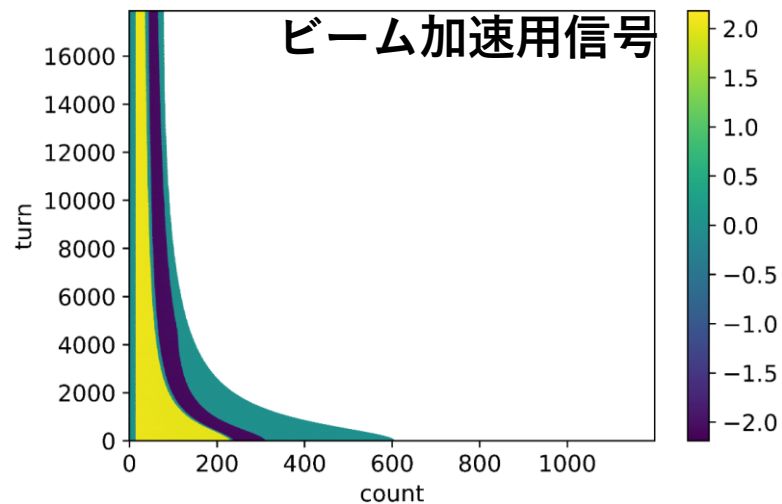
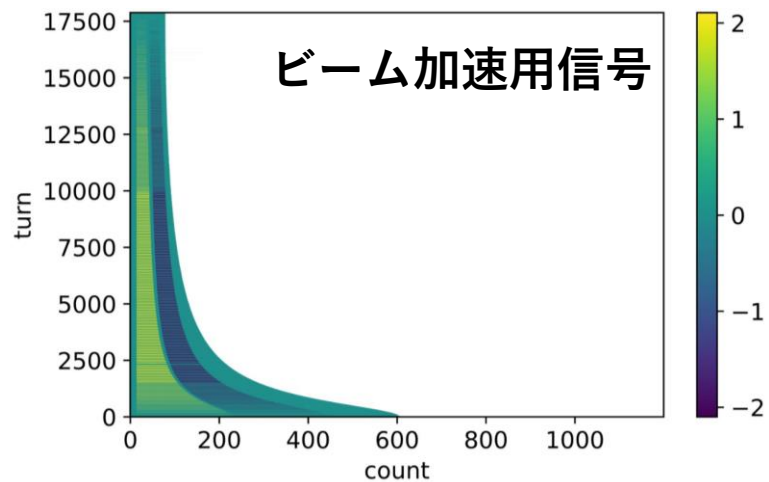
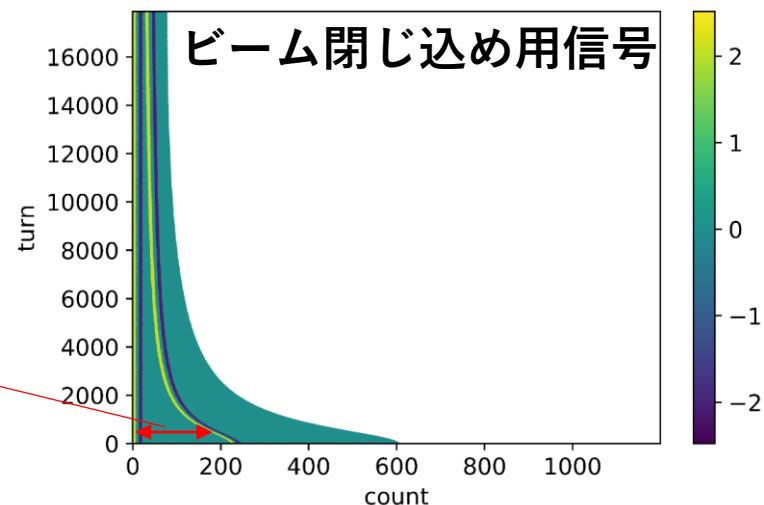
拡大図2: 閉じ込め用信号が加速用信号に同期して発生している

マウンテンプロット

従来のパルス密度変調型加速



提案されている振幅変調型加速



前頁の制御信号をマウンテンプロット(横軸: 周回周期、縦軸: 入射からのターン数)で表示した。また振幅変調型加速用の信号も発生でことを確認した。この結果から任意波形発生器を用いることで制御を著しく簡素化できることが示された。