

Electron Beam Bunch Length Measurement Using Higher Mode RF Cavity

Kazuyuki Sakaue^{1,A)}, Ryo Moriyama^{A)}, Ryunosuke Kuroda^{2,A)}, Masakazu Washio^{A)},
Shigeru Kashiwagi^{B)}, Hitoshi Hayano^{C)}, Junji Urakawa^{C)}

^{A)} Advanced Research Institute of Science and Engineering, Waseda University
1-4-3 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555

^{B)} The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
1-8 Mihogaoka, Osaka, 567-0047

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0081

Abstract

Bunch length measurement using higher mode RF cavity, so-called "RF-Kicker" technique, has been developed at Waseda University. The principle of this technique is similar to that of streak camera, which converts the time domain of the electron beam to the spatial domain of that. This technique is directly streak the electron bunch using transverse magnetic field on the beam orbit. Therefore, this technique is able to measure the longitudinal profiles of the bunch, and to achieve higher resolution than streak camera technique. The characteristics and the measurement results of RF-Kicker technique at Waseda University will be presented at the conference.

高次モードRF Cavityを用いた電子ビームバンチ長測定

1. はじめに

早稲田大学喜久井町キャンパスではフォトカソードRF電子銃を用いてピコ秒の高品質電子ビームを生成し、それを用いた応用研究としてレーザーコンプトン散乱を用いた軟X線生成^[1]・放射線化学初期過程解明のためのパルスラジオリシス実験^[2]を行っている。これらの応用研究に電子ビームを用いるにあたり、ビームの品質を理解するためのビーム診断装置の開発やビームのさらなる高品質化を進めている。^[3]

現在、その電子ビームのバンチ長の測定方法として、高次モードのRF空腔を用いた『RF-Kicker法』を開発・試験している。RF-Kicker法は直方体型の空腔内の磁場により電子の縦方向を横方向に投影してバンチ長を測定する方法で、その原理はストリークカメラ法に似ている。

この方法では電子ビームを直接磁場によって『掃引』することによって、光子に一度変換するストリークカメラ法より空間電荷効果を抑制でき、より高分解能な測定が可能である。

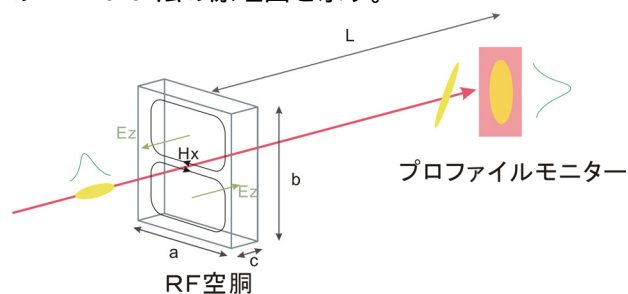
本研究会ではこのRF-Kicker法の原理と特徴、早稲田大学RF-Gunにおけるバンチ長測定試験結果について報告する。

2. RF-Kicker法の原理

RF-Kicker法とは、高周波空腔を用いることにより、ビーム軌道上に横方向の磁場(電場)を生成し、

その磁場によってバンチを掃引することにより、バンチの縦方向を横方向に投影し、バンチ長を測定する技術である。ストリークカメラ法とは電子を光子に変換し、さらにストリークカメラ内で電子に変換して掃引するという過程がなく、バンチを直接掃引する点で異なっている。

バンチ長の測定に用いる高周波空腔として、進行波型と定在波型の二つが挙げられる。進行波型空腔の場合、高周波との相互作用を大きくすることが出来るため、より高分解能な測定が可能である。^[4] 現在早稲田大学で開発しているRF-Kicker空腔には定在波型の空腔を採用している。^[5] 定在波型空腔は相互作用が小さくなるものの、システムをコンパクトにすることが出来る。以下に早稲田大学で開発中のRF-Kicker法の原理図を示す。



RF-Kicker法によるバンチ長測定では、バンチ長 σ_z はRF-offの時のビームサイズ σ_{y_0} 、RF-onの時の

¹ E-mail: kazu-kazu-kazu@suou.waseda.jp

² Present Address: AIST, 1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568

ビームサイズ σ_y 、空洞出口からスクリーンまでの距離 L 、空洞内の最大磁場 B_0 、ビームが空洞に入射するときの位相などを用いて、次式のように与えられる。

$$\sigma_z = \frac{E}{cB_0 L (\cos\phi - \cos(\omega \cdot t_L + \phi))} \sqrt{\sigma_y^2 - \sigma_{y0}^2} \quad (1)$$

このとき、空洞に入射する高周波の周期に対してパンチ長が十分小さいことを仮定している。

3. 空洞設計と製作

RF-Kicker用の高周波空洞の設計にはAnsoft社のHFSS(High Frequency Structure Simulator)を用いた。空洞は概念図(図1)のように方形空洞で、ビーム軌道上に横方向磁場を生成する TM_{120} モードを採用した。共振周波数としては、RF-Gunと同期を取りやすく、かつパンチ長に対して周期が十分に長い周波数である2856MHzで共振するように設計した。以下にHFSSによるシミュレーションの様子を示す。

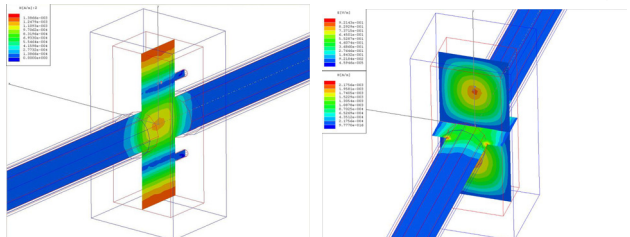


図2：RF-Kicker空洞HFSSシミュレーション

図2は共振周波数2856MHzで方形空洞内に TM_{120} モードが誘起されていることを示している。この設計を元に製作したRF空洞の写真を以下に示す。

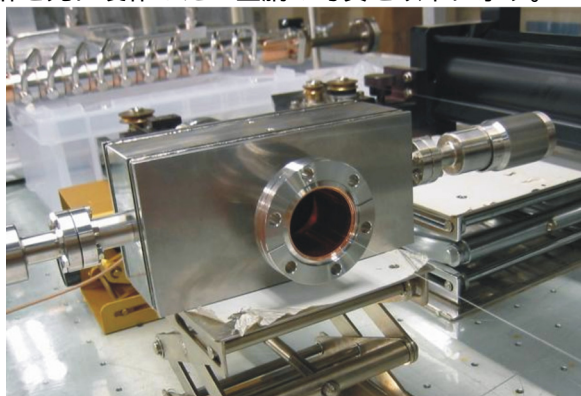


図3：RF-Kicker空洞外観

図3に示すように外壁にはステンレスを用い、内壁に銅を蒸着している。このとき銅の厚さがSkin Depthよりも厚くなるように確認をし、製作している。共振周波数は、図中の両側についている直線導入器がチューナーの役割を担い、調整できるようになっている。また、図3では反対側になっているが、RFの入力ポートとモニターポートが電場とカップルする位置につけられており、それぞれダイポールのアンテナで入力・モニターを行なっている。入力

ポートにはN型のフィードスルーを用い、モニターポートにはSMAのフィードスルーを用いている。

4. 空洞評価試験

空洞評価として透過法による空洞のQ値の測定とRFの入力ポート・モニターポートの結合定数の測定、ビード法による空洞内の電磁場分布の測定を行った。その結果を以下に示す。

共振周波数	2853.69MHz
入力ポート結合定数	1.064
モニターポート結合定数	0.102
Q値(測定値)	8464.3
Q値(HFSS)	16950.6

表1：空洞評価試験結果

表中の共振周波数はチューナーなし・大気圧下での共振周波数、Q値は無負荷Q値を示している。チューナーでは+6.3MHzまで共振周波数を調整できるため、2856MHzに調整することが可能であることが分かる。また、Q値に関してはシミュレーションの約半分の値を得ることが出来ており、数値的にも高く十分な出来であることがわかる。

次にビード法による空洞内の電磁場分布測定の結果を以下に示す。

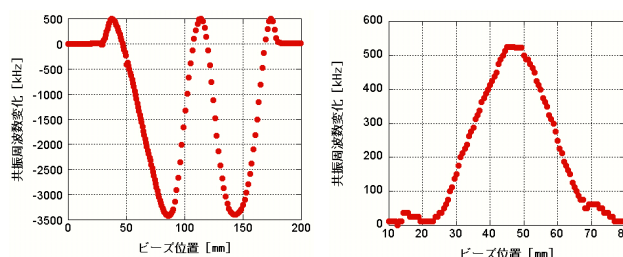


図4：空洞内の電磁場分布

(a)横方向(Vertical) (b)ビーム軌道上

ビード法の測定には直径6mmの導体球を用い、この導体を空洞内で動かすことによる周波数変化を測定し、空洞内の電磁場分布を測定した。図4(a)の横方向の電磁場の分布より、空洞内に2856MHz付近にて TM_{120} モードで共振していることが分かる。(+)の周波数シフトは磁場の強度が強いことを示し、(-)の周波数シフトは電場の強度が強いことを示す)また、図4(b)ではビーム軌道上における電磁場分布を測定している。ビームポートがついているために分布がきれいな矩形にはなっていないものの、ビーム軌道上に磁場が生成されていることが分かる。

5. パンチ長測定実験

以上のように製作した空洞を用いて早稲田大学RF-Gunにてパンチ長測定実験を行った。早稲田大学RF-Gunの基本パラメータを以下の表2に示す。^[6]また、パンチ長測定実験時のRF系のセットアップを図5、ビームラインのセットアップを図6に示す。

エネルギー [MeV]	4.5
電荷量 [pC/Bunch]	~1000
バンチ長(FWHM) [ps]	10~

表2：早稲田大学RF-Gunの基本パラメータ

1.6セルRF-Gunにクライストロンにてアンプされた約10MWのRFを空胴内にため、電子を加速している。電子のバンチ長はレーザー入射時のRF位相を選ぶことにより、レーザーのパルス幅とほぼ同じ10ps(FWHM)程度の値を得ることが出来る。

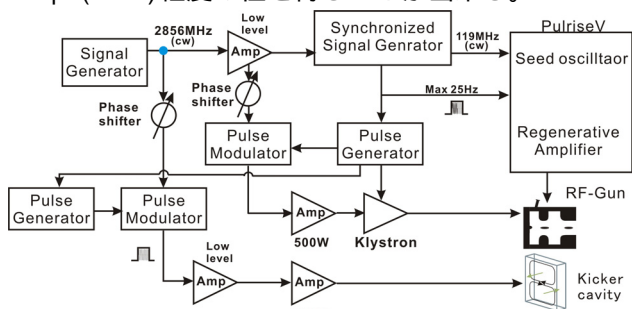


図5：RF系セットアップ

RF-Gun空胴との同期を取るために同一の2856MHzの信号を分岐することにより、RF-Kickerに入力するRFを作り出している。また、RFモニターとしてRF-Kicker空胴直前に方向性結合器を設置し、反射及び入射RFについてもモニターできるようになっている。

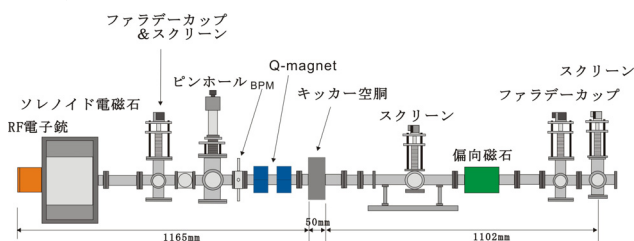


図6：バンチ長測定ビームラインセットアップ

このセットアップでは、横方向のビームサイズモニターとしてスクリーンを用い、RF-Kicker空胴からビームサイズモニターまでの距離Lを1.1mとっている。その他、ビームをより小さく絞るためのQマグネットや空間電荷効果抑制のためにビームを切り出すピンホールなどが設置されている。

上記のセットアップを用いて、バンチ長測定を行った。以下バンチ長測定結果(図7・図8)を示す。

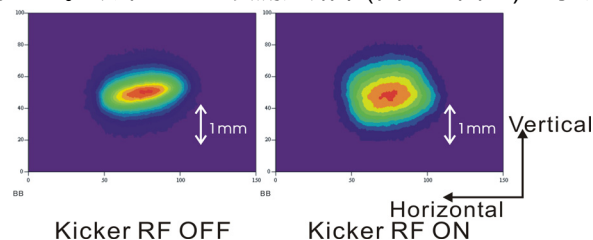


図7：Kicker ON/OFF時のビームプロフィール

RF-Kickerによりバンチが掃引され、縦方向が横方向に投影できていることが分かる。しかし、バンチ長に対して掃引が小さいため、RF OFF時の横方向

プロフィールに比べRF ON時のVertical方向の伸びが少なく、縦方向のプロフィールを測定するには至っていない。

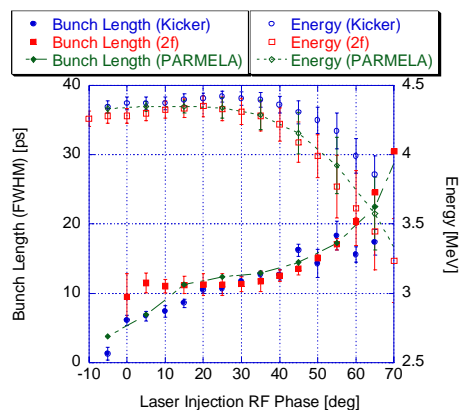


図8：バンチ長測定結果

上図はレーザー入射時のRF位相に対するバンチ長の変化をRF-Kicker法・2周波解析法[7]・PARMELAによるシミュレーションの3つに対して比較した図である。バンチ長の値はほぼPARMELAのシミュレーションの結果と一致していることが分かる。現状では縦方向プロフィールを測定するには至っていないが、バンチ長の値を測定するには十分であることが分かる。

また、短いバンチ長を測定するのに適していない2周波解析法と比較して低位相領域(0~15deg)の測定に対してシミュレーションと良い一致を示している。逆に、高位相領域(50deg~)では、ビームのプロファイルがガウス分布でなく乱れてくるため、測定の精度が落ちてきていることが分かる。これはRF-Gunの特性上、高位相領域でエネルギー分散が大きくなっていくことに起因する。

6. まとめと今後の予定

高次モード高周波空胴を用いたRF-Kicker空胴を設計・製作し、評価した。また、このRF-Kicker空胴を用いることにより早稲田大学RF-Gunにてバンチ長を測定した。その結果シミュレーションと良く一致する結果が得られ、分解能は0.9ps程度であった。

今後、空胴の最適化及びRFの増強を行うことにより、より高分解能な測定系を構築し、バンチの縦方向プロフィールを測定していく。

参考文献

- [1] S. Minamiguchi, et al., Proceedings of this Meeting, 21P104
- [2] M. Kawaguchi, et al., NIMB in Press.
- [3] R. Moriyama, et al., Proceedings of this Meeting, 20P054
- [4] R. Akre, et al., Proceedings of PAC'01, Chicago, p.2353
- [5] X. J. Wang, et al., Proceedings of PAC'99, New York, p.229
- [6] M. Washio, et al., Proceedings of this Meeting, 21P070
- [7] K. Sakaue, et al., Proceedings of EPAC'04, Lucerne, p.2688