

次世代光源における過渡的電圧補償の ためのバンチ位相再構成手法の検討

第18回日本加速器学会年会@ オンライン

2021/8/12

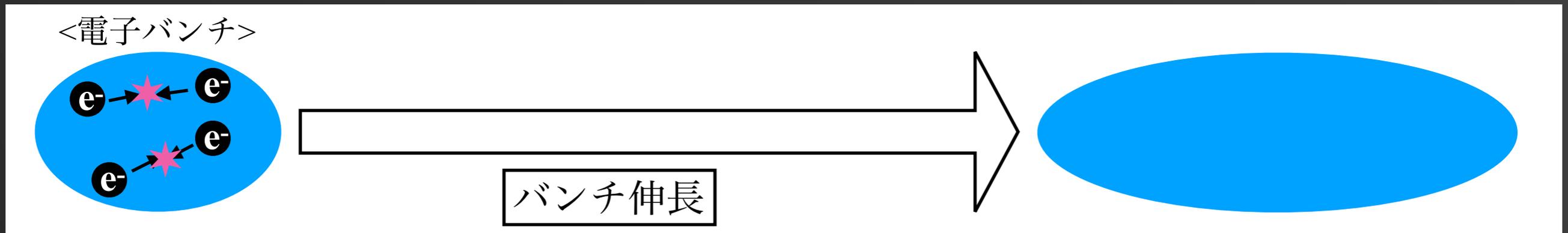
内藤大地^A, 坂中章悟^A, 山本尚人^A, 高橋毅^A, 山口孝明^B

^AKEK, ^BSOKENDAI

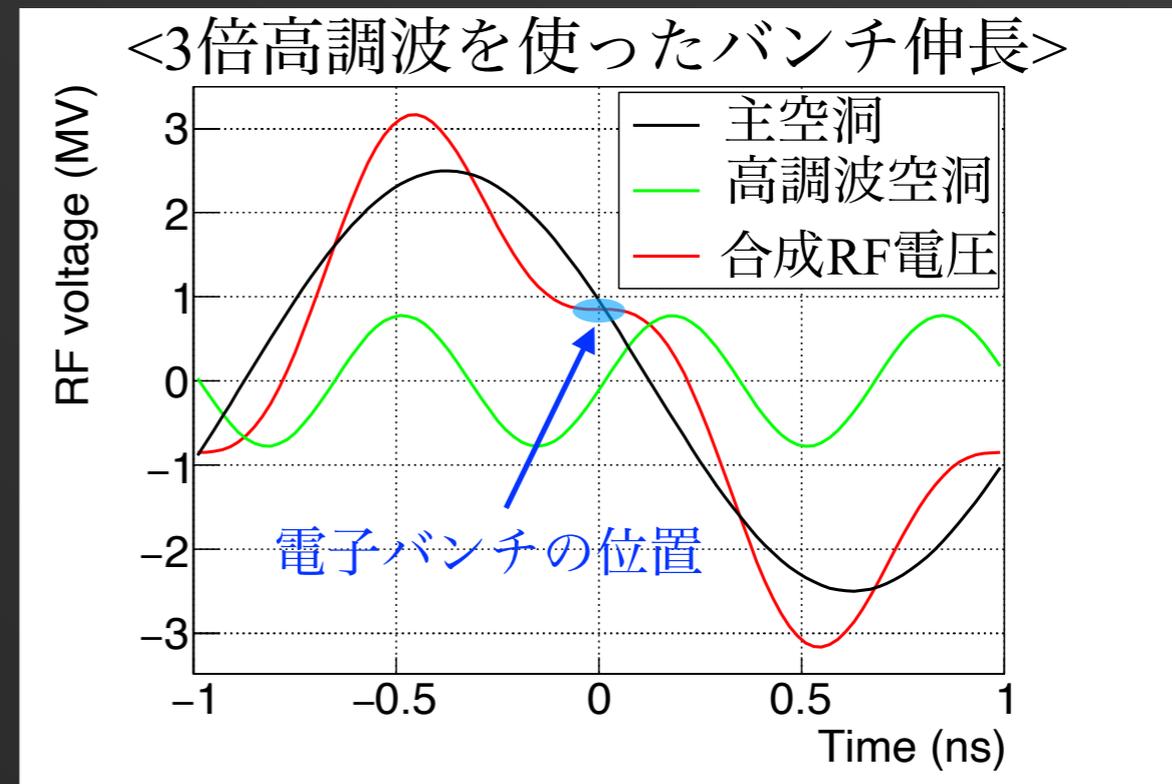
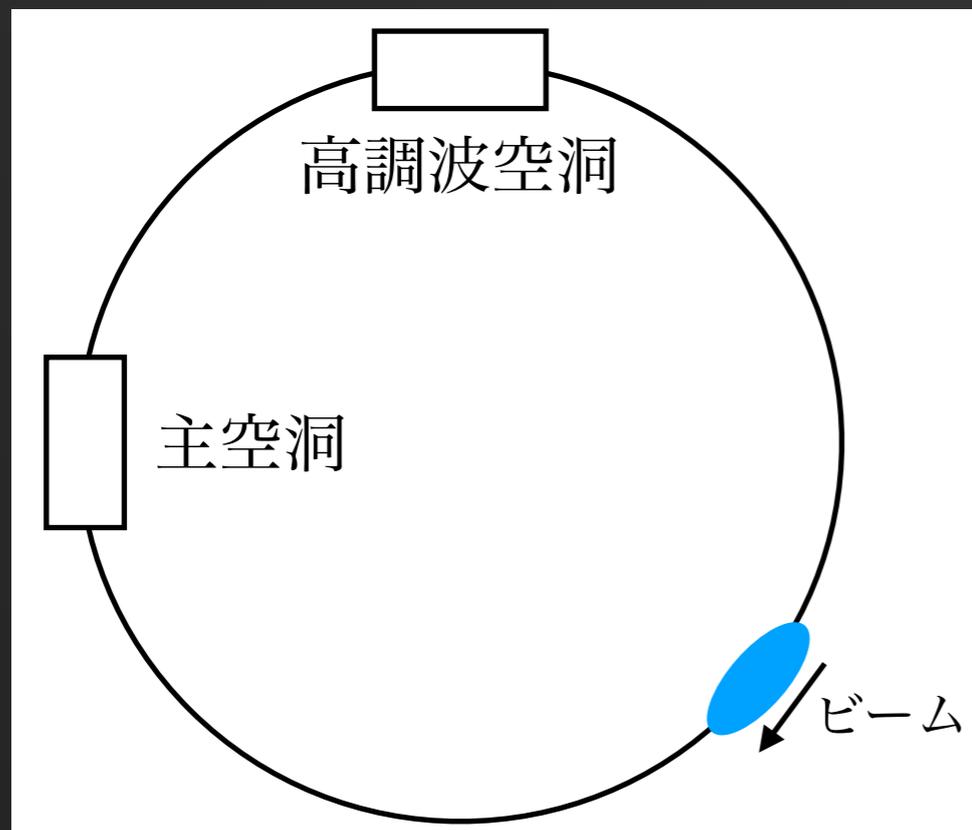
- 次世代光源での課題
- バンチ位相モニター原案
- KEK-PF ハイブリッドモードでのバンチ位相測定
- まとめと今後

次世代光源での課題1

- ・次世代光源：極低エミッタンスの達成 ($\varepsilon \ll 1$ nm-rad)
- ・3GeVクラスの次世代光源の課題：バンチ内散乱の抑制

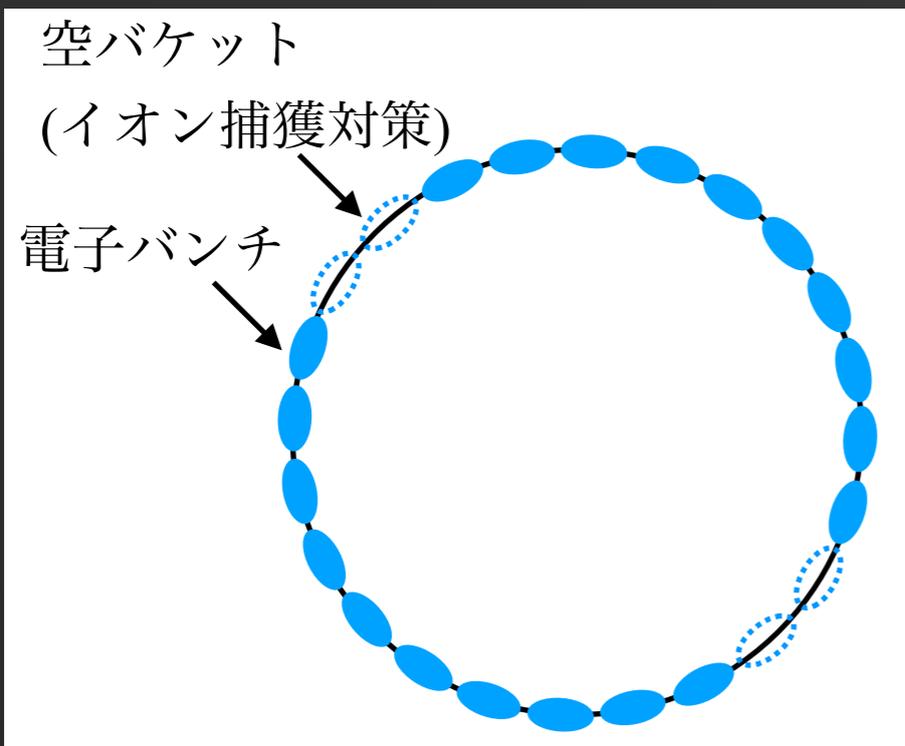


- ・エミッタンス増加
- ・Touschekビーム寿命の減少

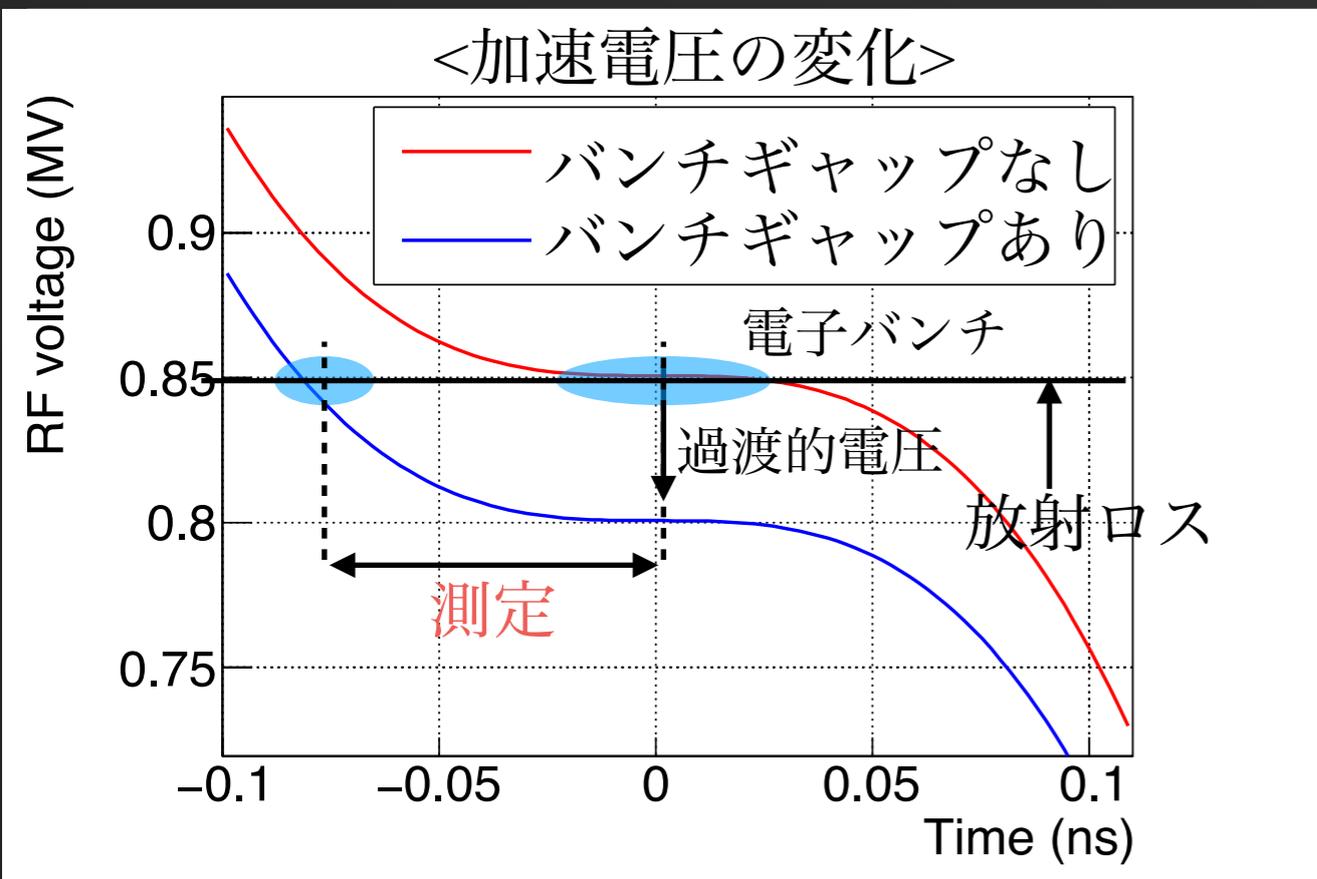
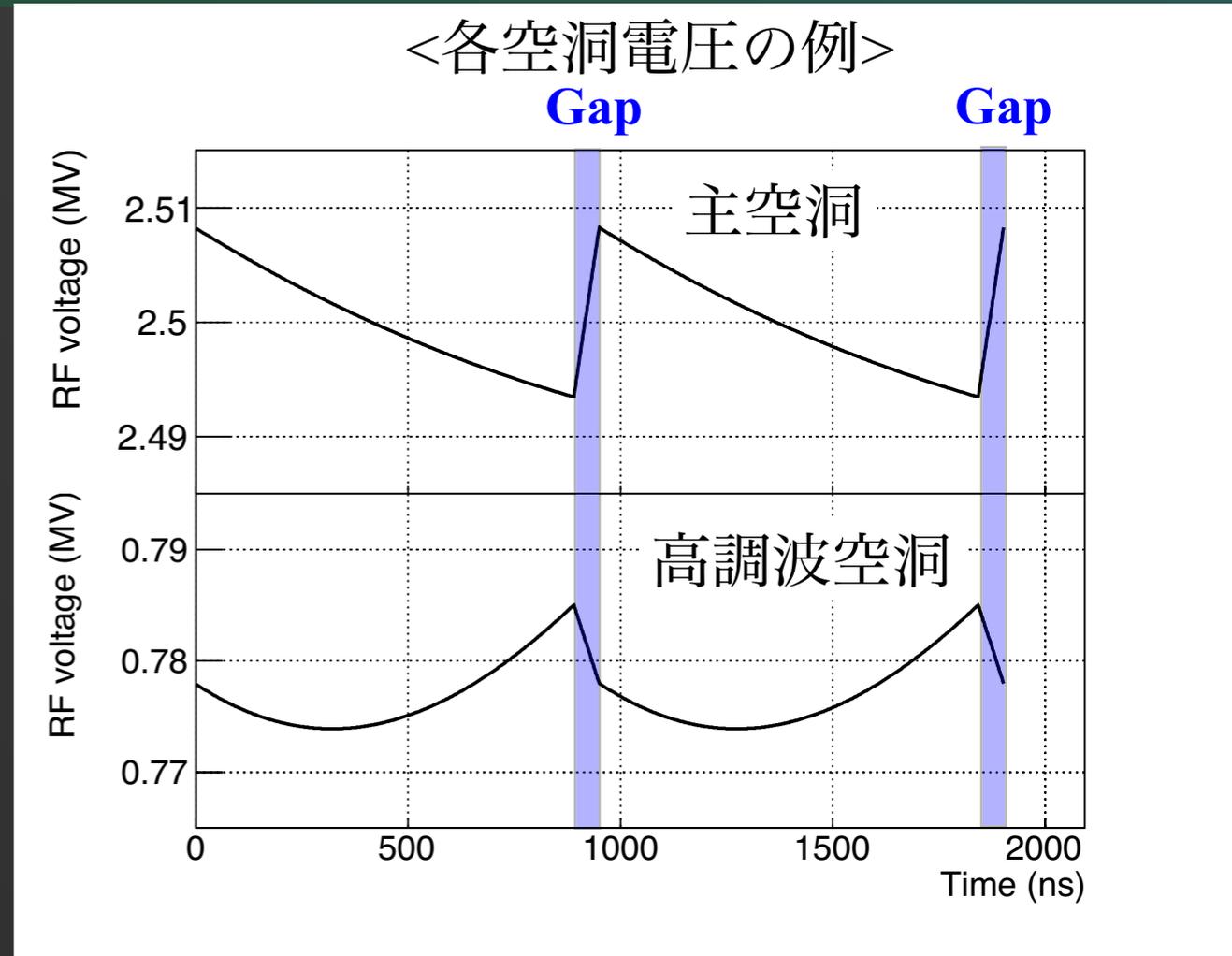


常伝導の主空洞と高調波空洞を使ってバンチ長を伸ばし、バンチ内散乱を抑制。

次世代光源での課題2



バンチギャップによる過渡的ビーム負荷が発生。



- 過渡的ビーム負荷により、バンチ伸長が抑制されてしまう。
- ⇒ **位相のズレを測定し、空洞電圧を補正する。**

位相検出の目標値

- 次世代光源でのバンチ位相モニターの叩き台として、KEK-LS(*)のパラメータで検討。

*KEK-LS : KEK放射光の旧次世代計画

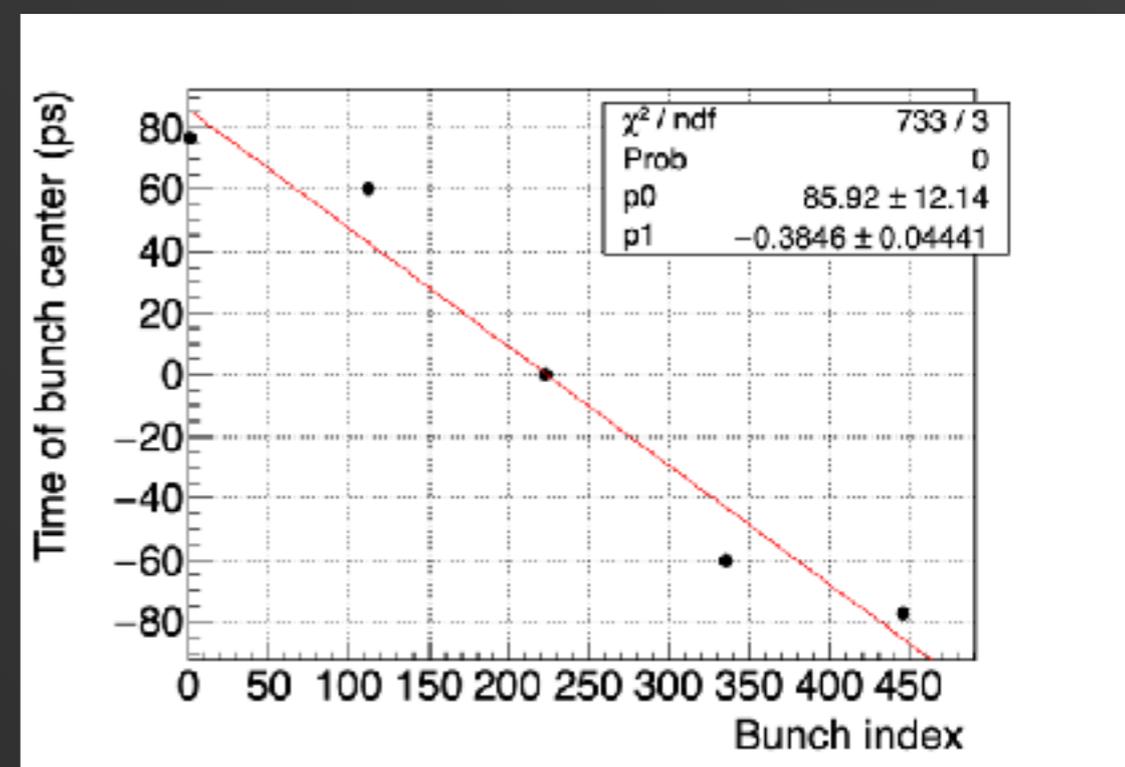
<KEK-LSの主なパラメータ>

Parameter	Value
Beam energy	3 GeV
Momentum compaction factor	2.19×10^{-4}
Average beam current	0.5 A
Beam current per bunch	1 nC
Bunch interval	2 ns
Radio frequency (fundamental)	500.07 MHz
Harmonic number	952
Number of bunch gaps	2
Number of buckets in a gap	30

Parameter	Main RF	Harmonic RF
RF Voltage	2.5 MV	777 kV
Synchronous phase	1.178 rad	-1.708 rad
Tuning angle	-0.962 rad	1.433 rad
Total R/Q	875 Ω	386 Ω
Total shunt impedance	35 M Ω	14.48 M Ω
Cavity coupling coefficient	3.5	0.27

<KEK-LSでのバンチ中心の変動>

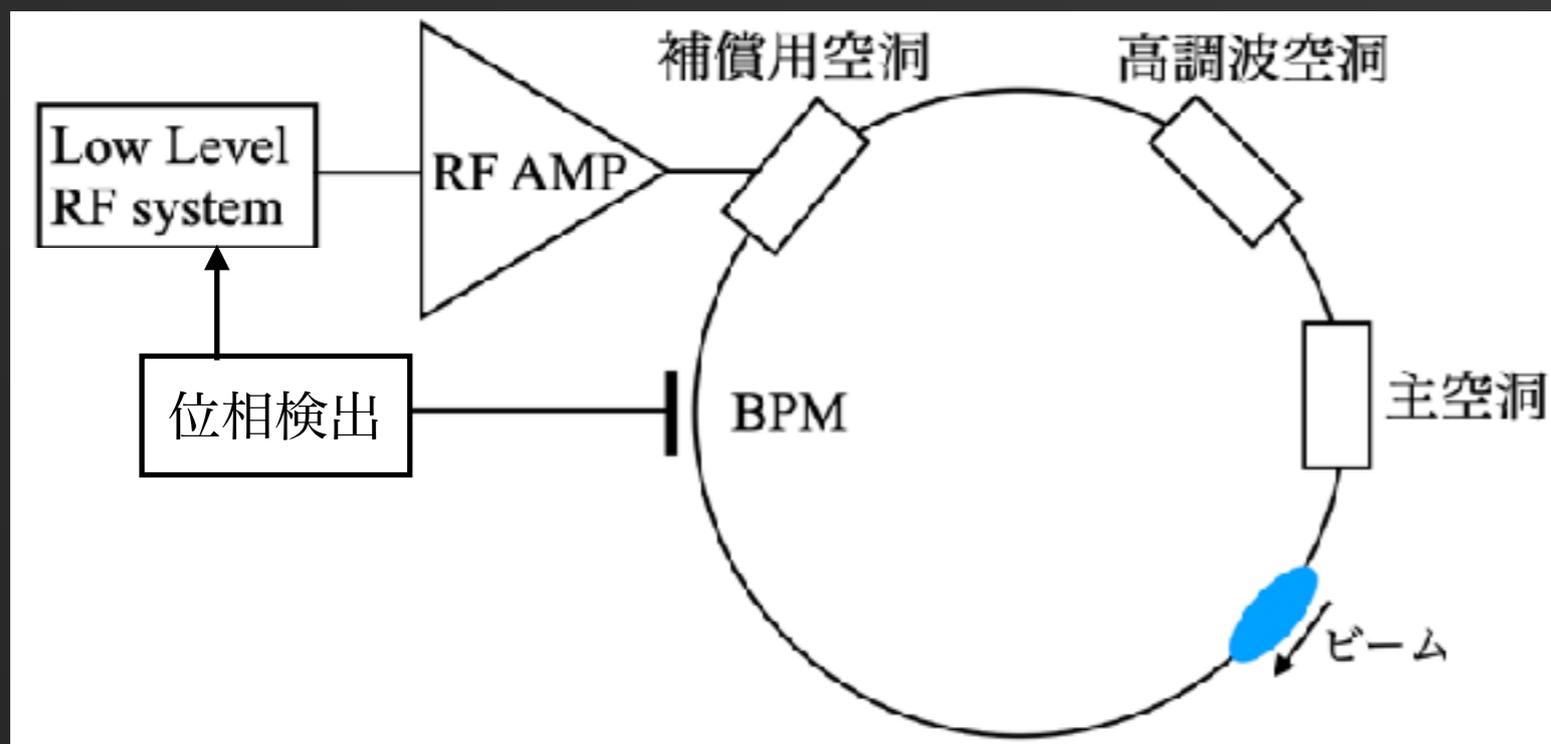
(semi-analytical calculation)



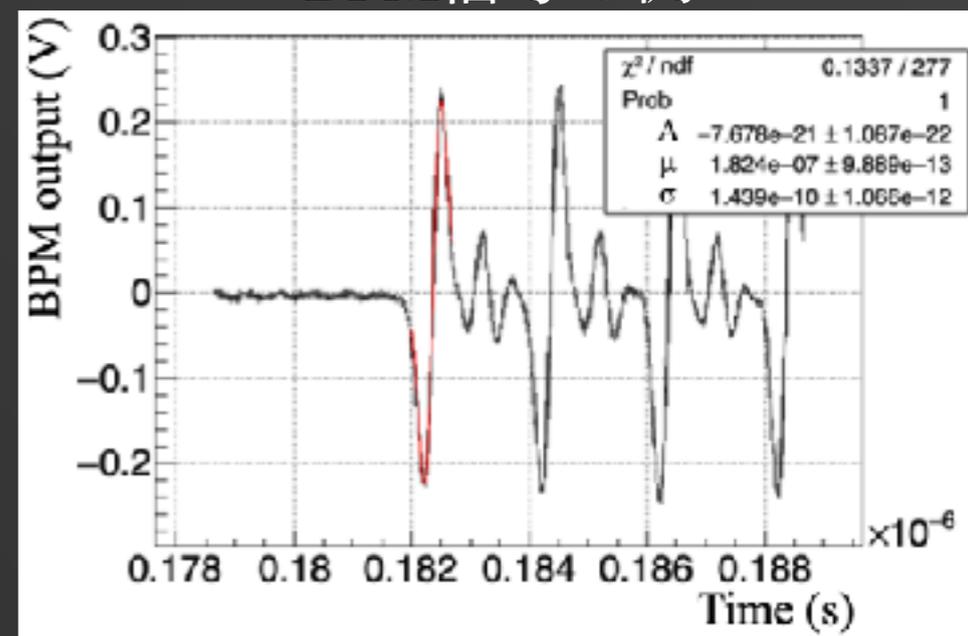
最終目標 : 10バンチ毎のバンチ位相差(4 ps)を判別。0.4 psの分解能、位相にして0.07度
 当面の目標 : 先頭と最後尾のバンチ位相差(160 ps)を判別。16 psの分解能、位相にして3度。

バンチ位相モニター原案1

<バンチ位相モニター構成図>



<BPM信号の例>



<理想的な出力波形[2]>

$$V(t) = -\frac{A}{\sigma^3}(t - \mu)\exp\left\{-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

μ : バンチ中心位置

σ : バンチ長(gaussian)

- 補償用に広帯域補償空洞[1]を用いて加速電圧を補正する。
- BPMから取得した波形を逐次fittingしてバンチ中心の位相を計算。
- 過渡的負荷による位相変動を～100ターン分平均して補正パターンを計算する。
 - KEK-LSだと892バンチあるのでfittingして平均化する手法だと時間がかかりすぎる。
 - 高速度/高精度で波形を取得するシステムが別途必要。

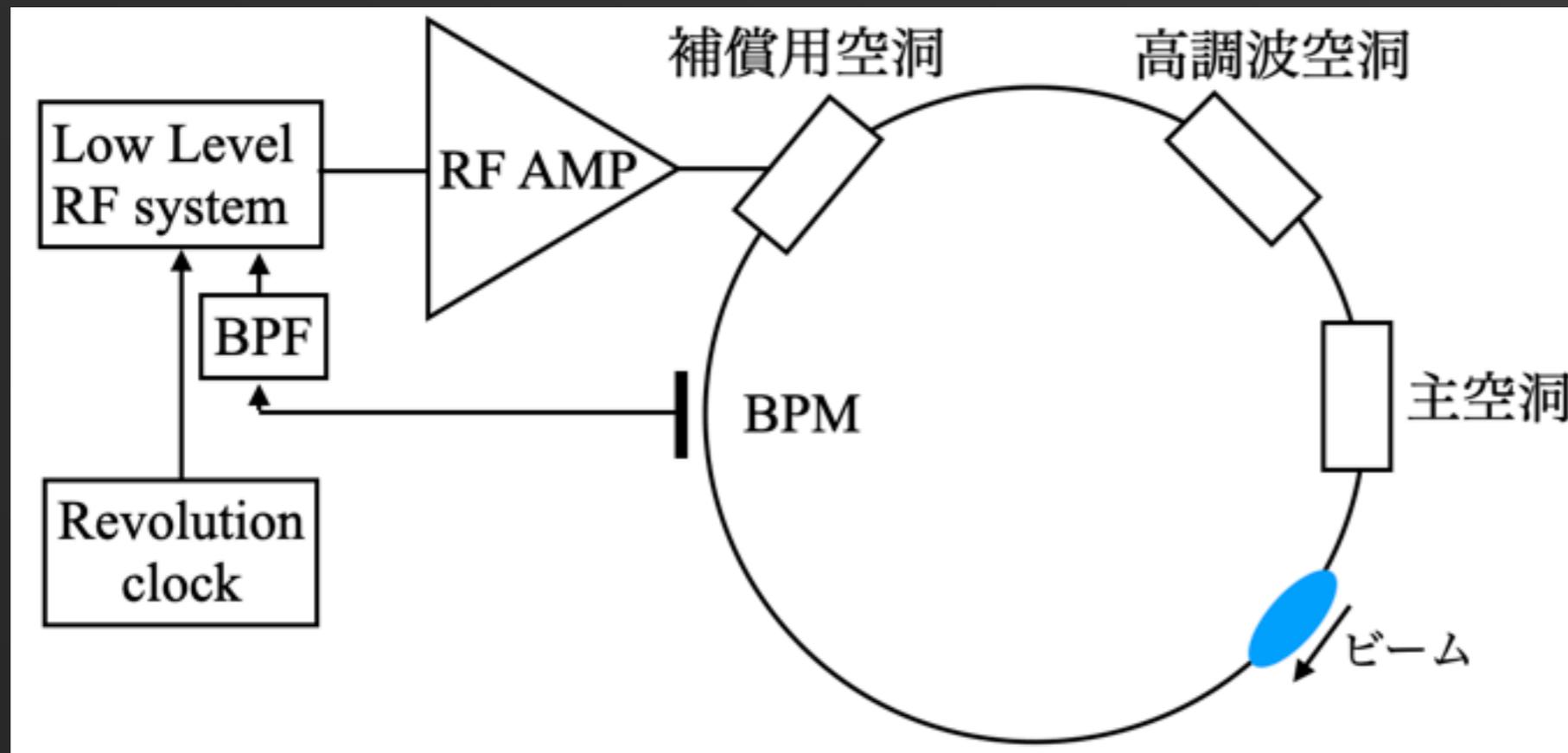
[1] D. Naito *et al.*, in proc IPAC21.

[2] P. Forck *et al.*, CERN-2009-005.

バンチ位相モニター原案2

<バンチ位相モニター構成図>

<direct sampling(under sampling)法>



$$I = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_i \cos \left(2\pi \frac{m}{n} i \right)$$
$$Q = -\frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_i \sin \left(2\pi \frac{m}{n} i \right)$$

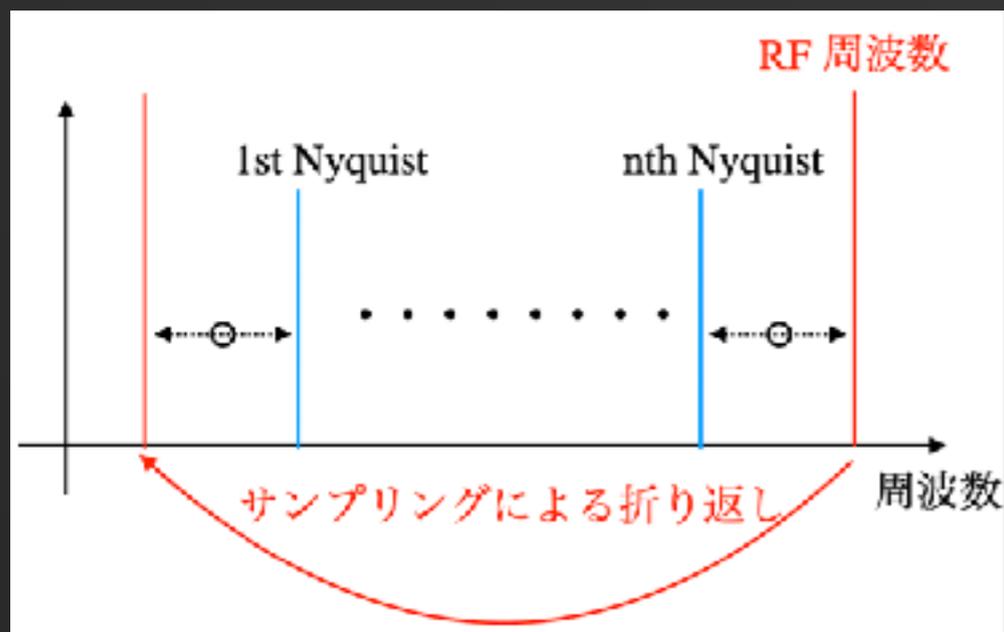
$\phi = \text{atan} \left(-\frac{Q}{I} \right)$ バンチ位相

V_i : BPM出力
 m, n : 任意の整数

- BPMの出力信号を周回ビームのrevolution clockに同期して測定。
 - LLRFにて300 MHz程度のサンプリング周波数でA/D変換し、direct sampling法でIQ変換。
 - IQから位相を計算。
 - **メリット：高速処理が可能、別途のハードウェアが不要。**
- direct sampling法を用いて精度よく位相変動が計算できるか、KEK-PFで実測して確認。

IQ変換パラメータに対する制限

1. バンドパスフィルターに対する帯域制限。



- ・ダイレクトサンプリングするとナイキスト周波数 (サンプリング周波数の $n/2$)でRF周波数が折り返される。
- ・RF周波数にノイズや高調波成分が重畳。
 - ・バンドパスフィルター(BPF)による帯域制限が必須。
 - ・ナイキスト周波数と基準周波数との差が大きいくほどBPFの帯域を広げられる。

2. サンプリング周波数(f_s)に対する制限。

- ・使用を想定しているA/D変換器： $f_s < 370$ MHz (分解能： ± 1.7 V/16 bit)
- ・サンプリング周波数とRF周波数(f_{RF})の関係： $f_s = \frac{n}{nk+m} f_{RF}$ k, m, n : 任意の整数

3. $nk+m$ に対する制限。

- ・リングのハーモニクス(PFの場合は312)の整数倍でないといけない。
- ・1度のIQ変換でサンプリングされるバンチ数に相当するので、10程度でないといけない。

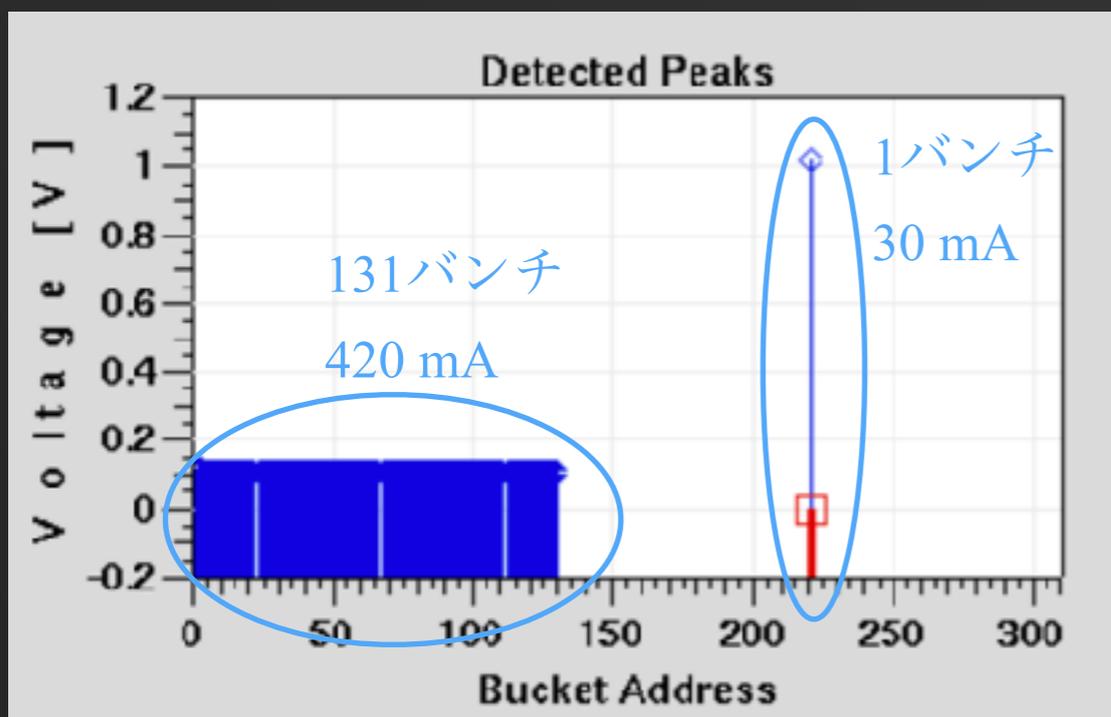
<KEK-PFで許される組み合わせ>

k	m	n	$nk+m$	f_s	ナイキストと f_a の差
1	5	7	12	291.73 MHz	62.51 MHz
1	5	8	13	307.75 MHz	38.47 MHz
1	4	9	13	346.23 MHz	19.24 MHz

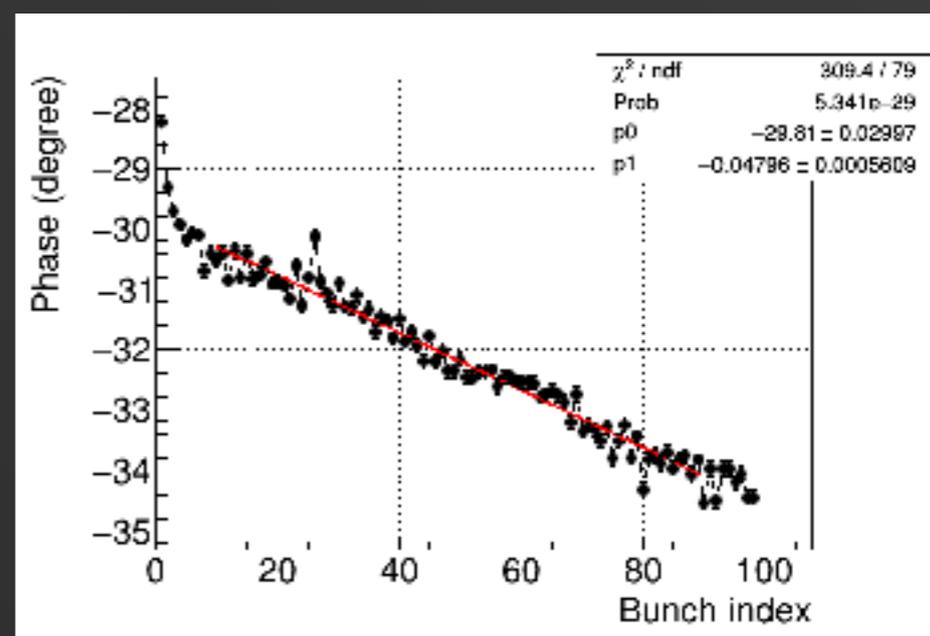
KEK-PFでのバンチ位相変動測定

- KEK-PFのハイブリッド運転中にBPM信号を取得。
=>PFの運転モードで一番、過渡的ビーム負荷による位相変動が大きい。
- バンチ位相測定に最適なダイレクトサンプリングの定数を検証。
- 蓄積電流を変化させて位相変動の変化を測定。

<電子バンチの充填パターン>



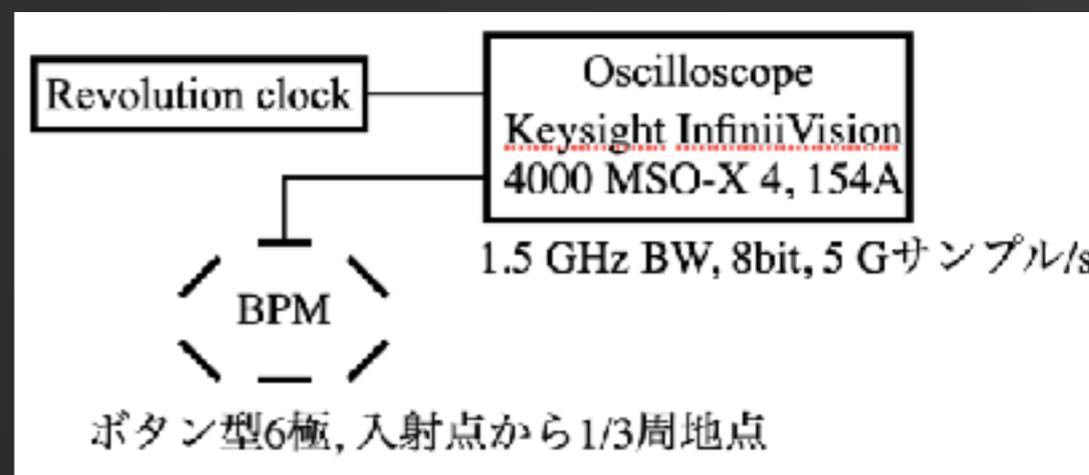
<波形fitting法で計算した位相変動の例>



<主なビームパラメータ>

Parameter	Value
Energy	2.5 GeV
RF frequency	500.1 MHz
Beam current	450 mA

<実験セットアップ>

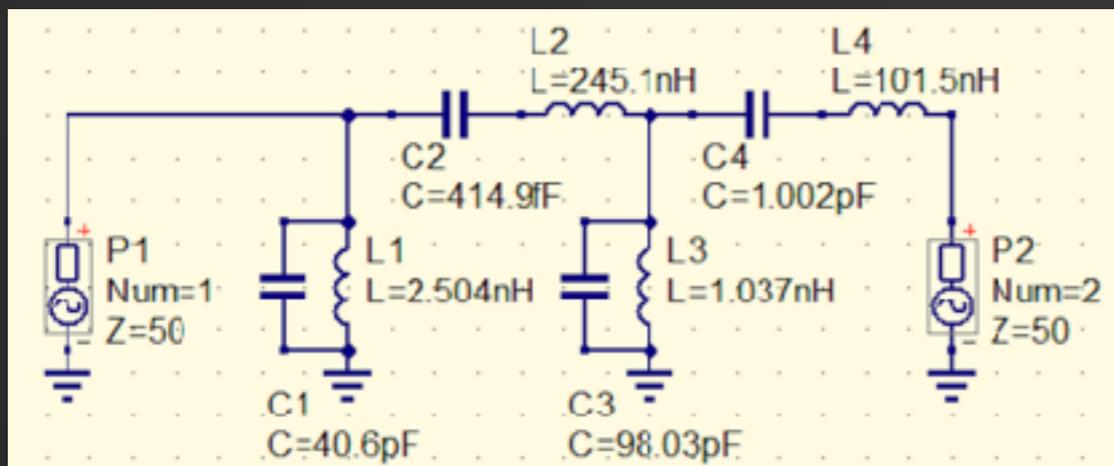


解析手法

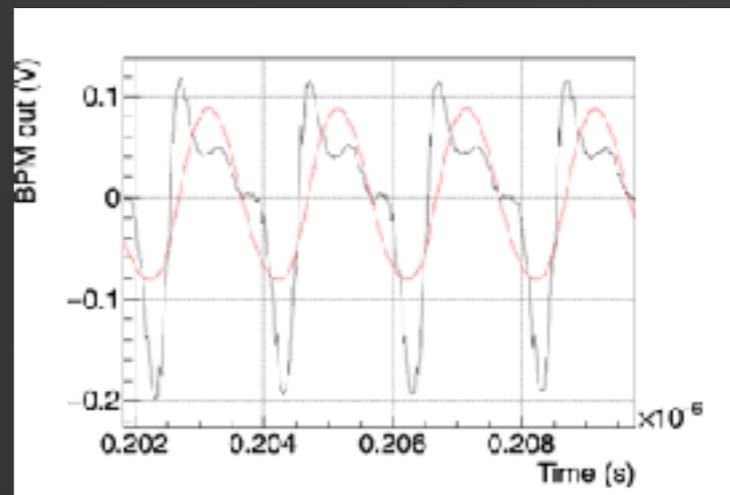
1. BPMの信号をspice上でバンドパスフィルター(BPF)に入力、出力を利用。

- ・ BPFは様々な帯域のものをQucsStudioで設計。

<BPFの例(BW=30 MHz)>



<フィルター前後の波形>

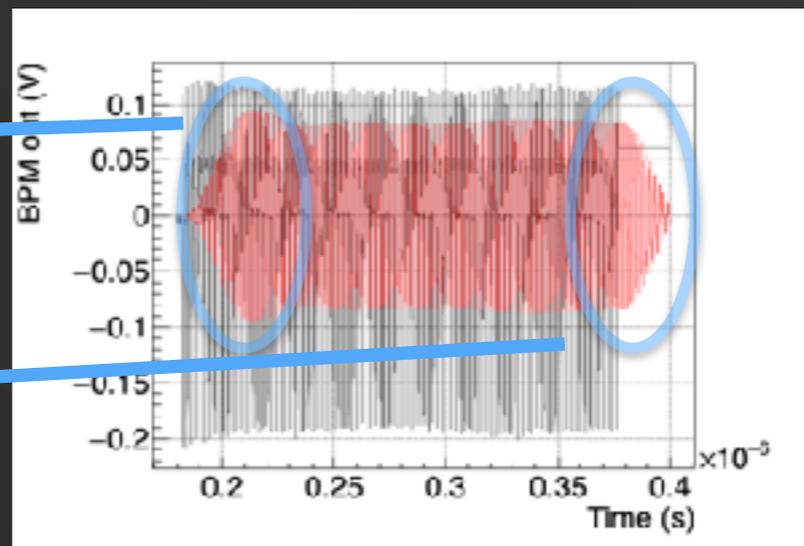
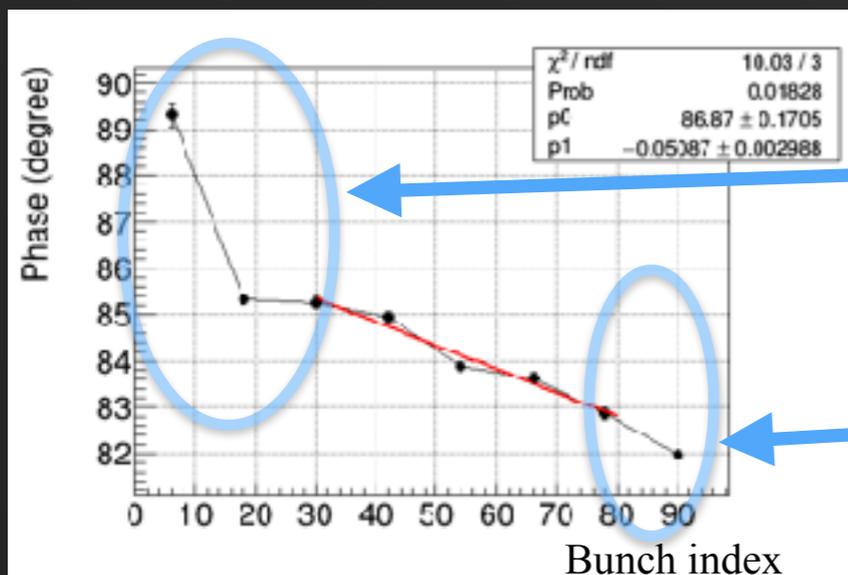


2. フィルター後の波形をダイレクトサンプリングでIQ変換して位相変化を計算。

3. 100周分のバンチ位相を平均する。

<位相変化の例(BW=30MHz,100周平均)>

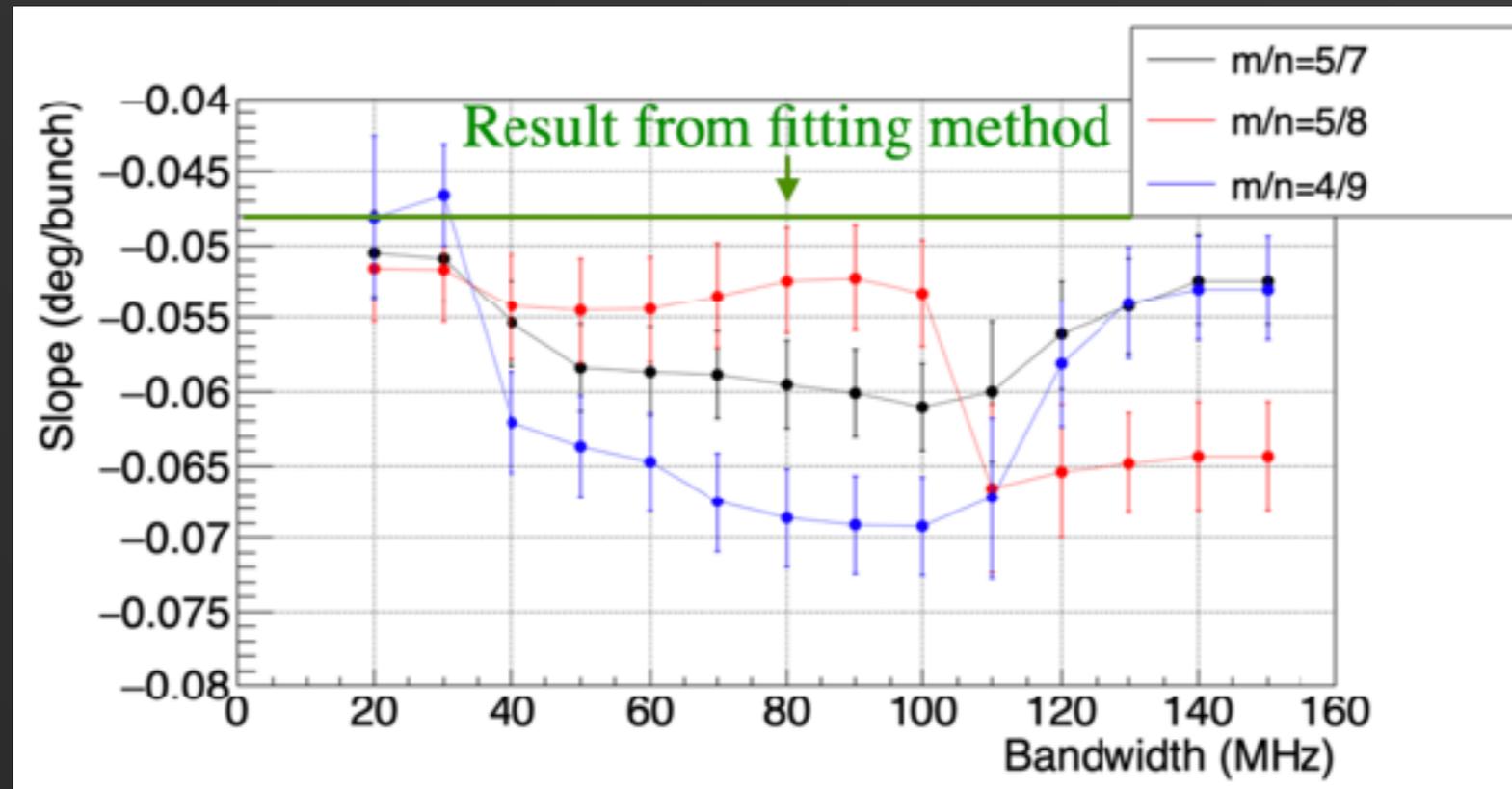
<フィルター前後の波形の全体図>



- ・ BPFのバンド幅が狭いと波形がなまって位相変動の計算に使える領域が減る。
- ・ 様々なフィルター定数、IQサンプリングのパラメータで位相変化を計算した。

解析結果

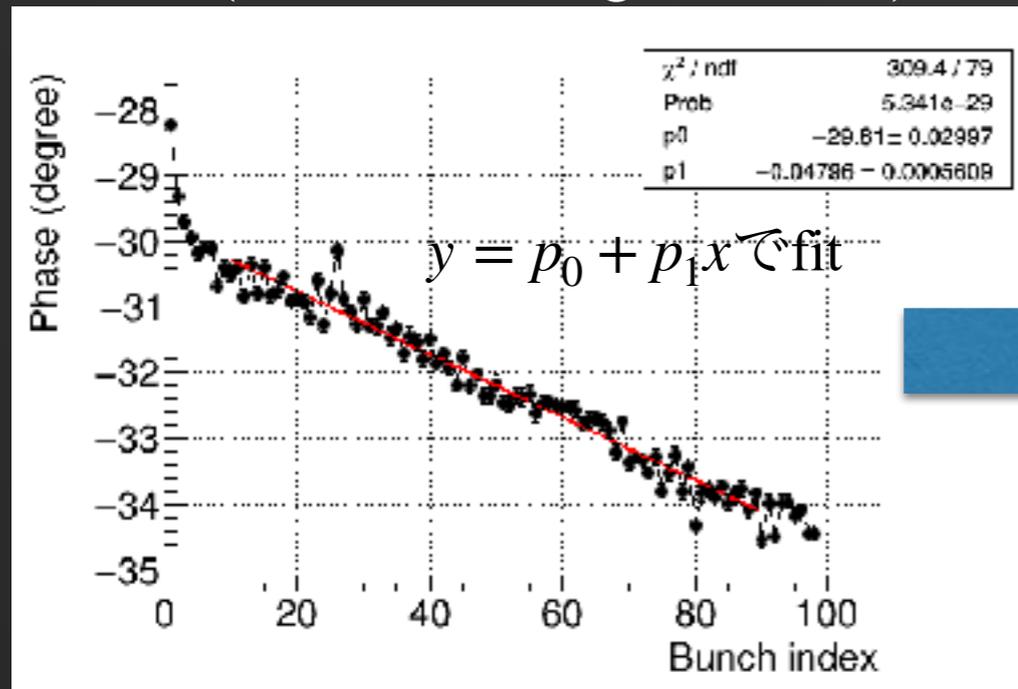
- 位相のバンチ依存性を線形fitして傾きを評価。



- Bandwidthを広げると除去されない成分がナイキストで折り返されてRF周波数と重畳され、位相変動の傾きが変化しているように見える。
- 今回の測定では電圧測定の分解能(8 V / 8 bit)がメインエラーだが、100周分を平均化する事で十分な精度を達成。
- バンドパスのBWに対して変化の少ないm/n=5/8をIQ変換のパラメータに決定。
 - 周波数の折り返しによるノイズや高調波成分の混入をうまく避けられている事が示唆。
 - KEK-PFの次期BPM、LLRFのIQ変換パラメータとして採用。**

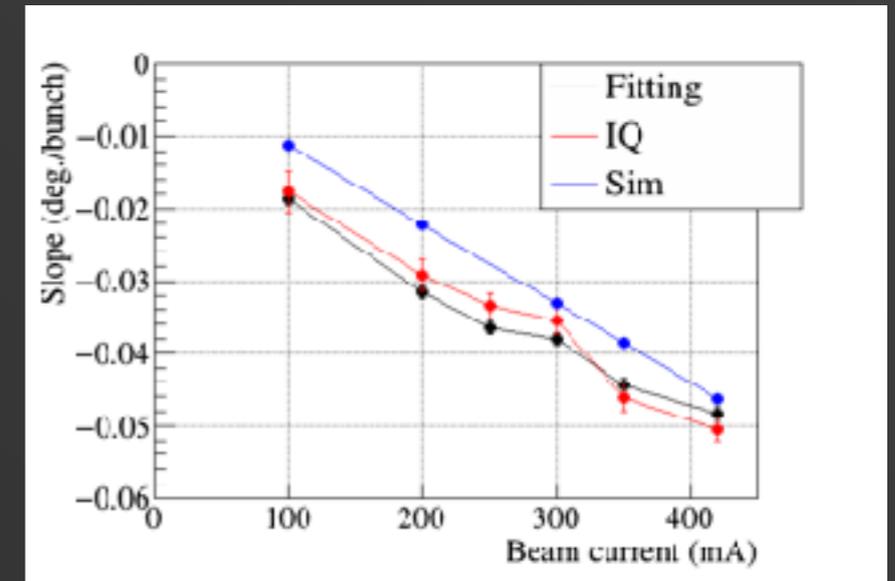
位相変動の電流依存性

<位相変化のバンチ依存性(100波形平均)>
(420 mA, fitting法の結果)



p1をプロット

<位相変化の傾きの電流依存性>



データ点を直線fitした傾き

Sim : mbtrack (multi particle simulation)で位相変動を計算。

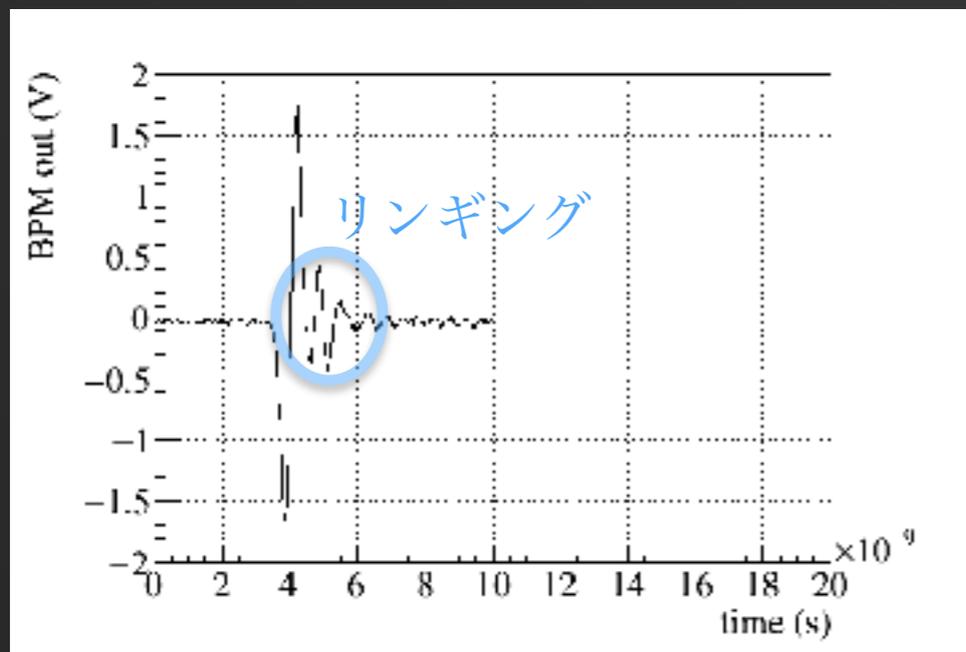
	位相変動の傾きの変化
fittingで計算した傾きの変化	$(-0.91 \pm 0.04) \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{bunch/mA}$
IQ変換で計算した傾きの変化	$(-1.03 \pm 0.08) \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{bunch/mA}$
Simulationで計算した傾きの変化	$(-1.09 \pm 0.003) \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{bunch/mA}$

- ・ 位相変動の傾きの電流依存性はデータ同士ではエラーの範囲で一致。
- ・ **BPMの信号から位相変動の変化を捉えられる事が実証できた。**
- ・ ただし、実測値はシミュレーションに対してオフセットがあるように見える。

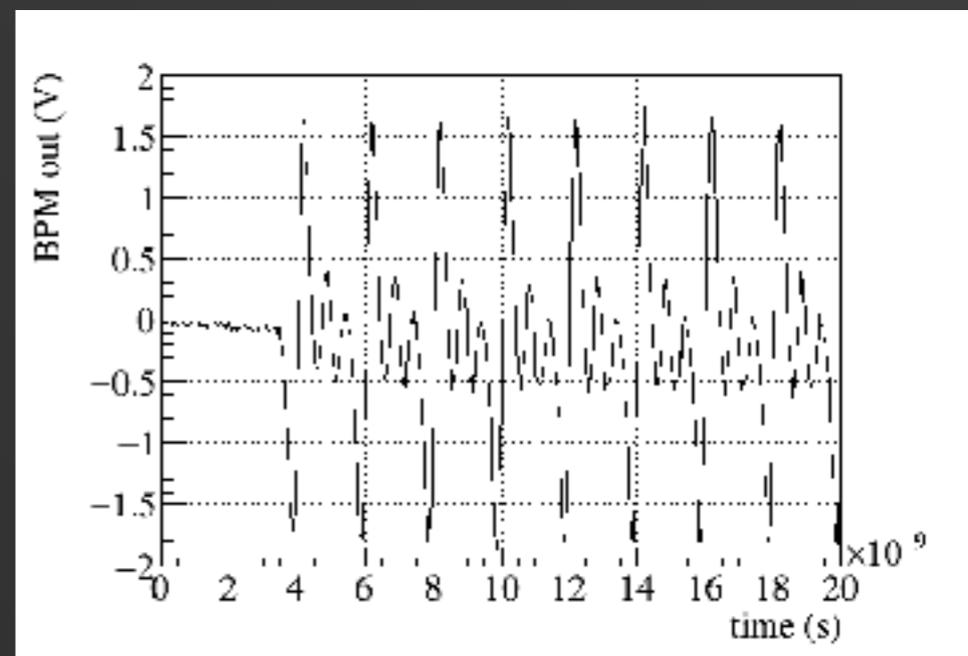
オフセットに対する考察

- ・オフセットの原因としてBPM波形のリングングを調査した。
- ・KEK-PFでハイブリッドモードでのシングルバンチの波形を測定。

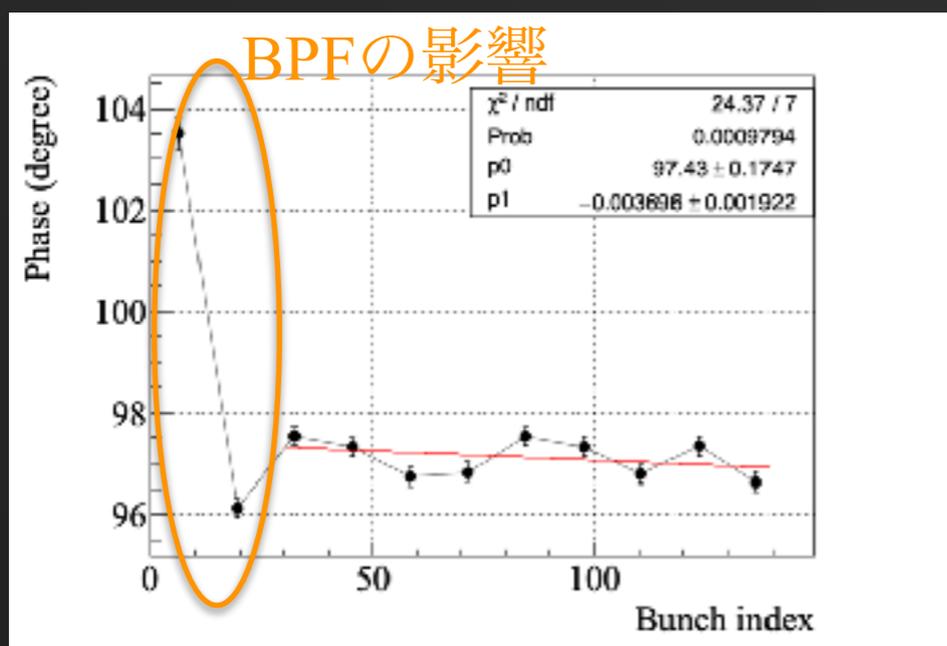
<シングルバンチの波形>



<シングルバンチの重ね合わせ>



位相変化(IQ変換, 1shot波形)



- ・リングングと後方のバンチ波形の重ね合わせによって位相オフセットが発生しないか確認。
- ・有意な傾きは観測されなかった。
- ・今後：
空洞ピックアップから位相変動を測定し、BPM信号での位相変動と比較する。

まとめ

まとめ

- ・ BPM信号をダイレクトサンプリング法でLLRFに取り込んで計算した位相変動から、TBLによる空洞電圧変化を補正する手法を考案。
 - ・ **メリット：高速処理が可能、別途のハードウェアが不要。**
- ・ KEK-PFのハイブリッド運転で位相変動を測定。
 - ・ KEK-PFで位相変動を測定するのに最適なダイレクトサンプリングのパラメータを決定。
 - ・ BPM信号から位相変動を測定できる事を実証。

今後

- ・ 次期PF-LLRFの試験機で位相変動を実測し、実機での精度を評価。
- ・ 空洞ピックアップとBPM信号を同時に測定し、位相変動を比較する。

本研究は JSPS 科研費 JP20H04459 の助成を受けたものです。