

J-PARC T2K実験における 陽子ビーム位置検出回路の開発の現状と 実ビームデータを用いた性能評価

2017/09/12 日本物理学会 秋季大会

彌益 紗希(岡山理)

開発メンバー(岡大理 KEK素核研 Open-It)

坂下 健, 小汐 由介, 内田 智久, 池野 正弘,
庄子 正剛, Megan Friend, 中平 武

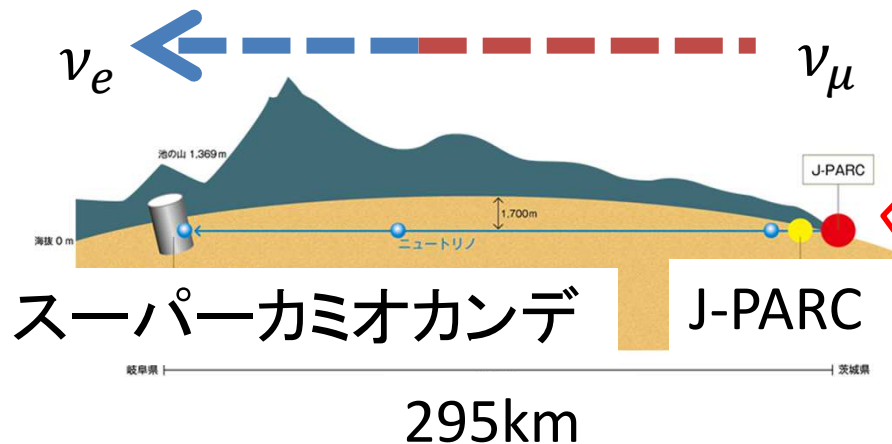
目次

1. 開発の概要
2. 陽子ビームを用いた動作試験
3. 実ビームデータを用いたfirmwareの検証
4. 今後の展望

目次

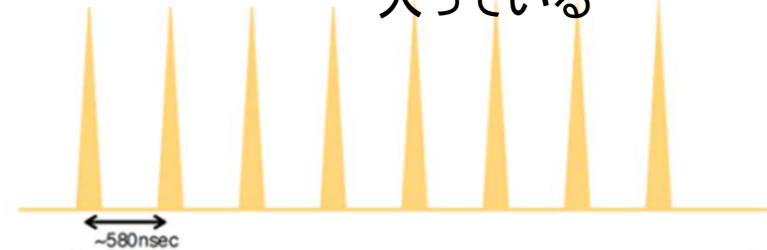
1. 開発の概要
2. 陽子ビームを用いた動作試験
3. 実ビームデータを用いたfirmwareの検証
4. 今後の展望

T2K実験



<陽子ビームの時間構造>

$\sim 20\text{nsec} = \text{bunch}$ 1 spillに8bunchの塊が入っている



現在T2Kでは、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 事象の統計数を上げて、ニュートリノ振動でのCP対称性の破れを探している。

→そのためにはビームパワーの増強が必要になる
繰り返し時間を短縮し、ビームパワーを増強させる

T2K 陽子ビームライン

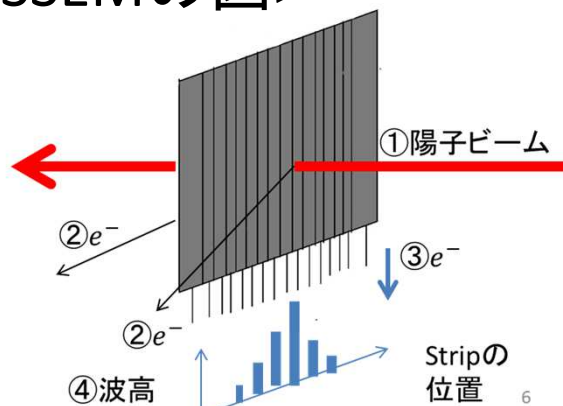
<ビームモニター>

⇒強度, 位置, プロファイル, ビームロスモニターしている

- ビーム軌道の測定, ターゲット上の位置やサイズの測定
→ニュートリノfluxの見積もり

• ビームの監視

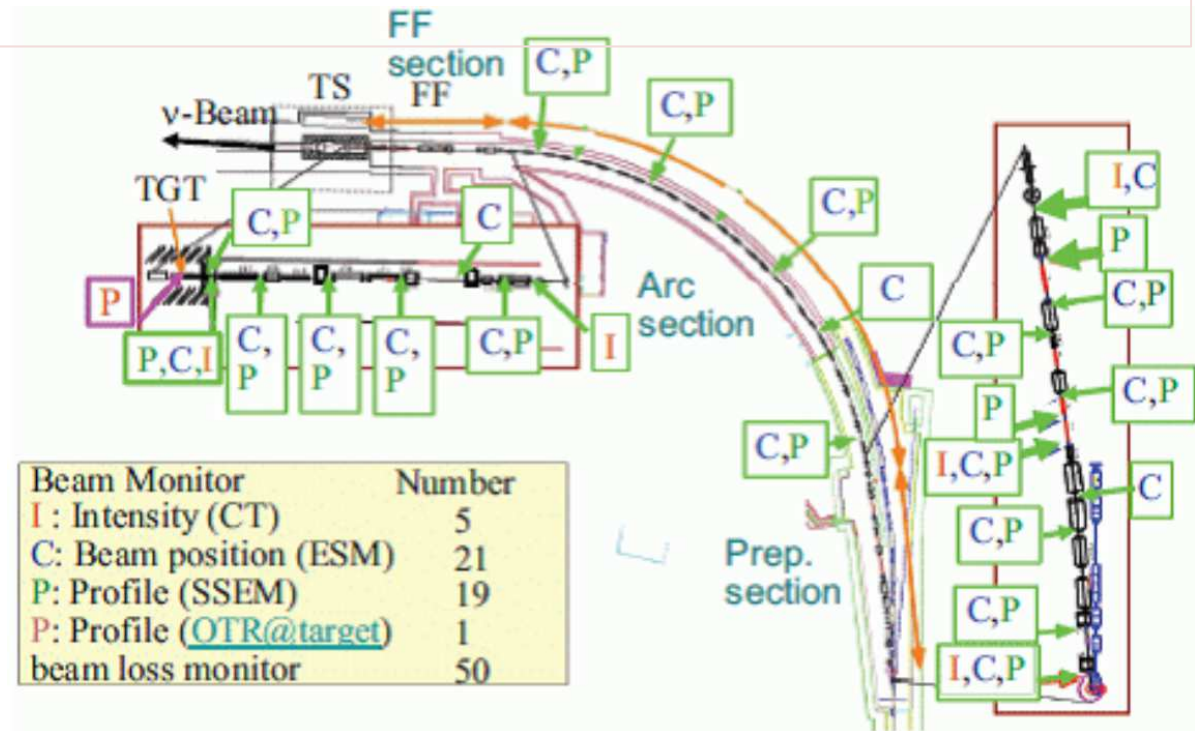
<SSEMの図>



材料:チタンホイル

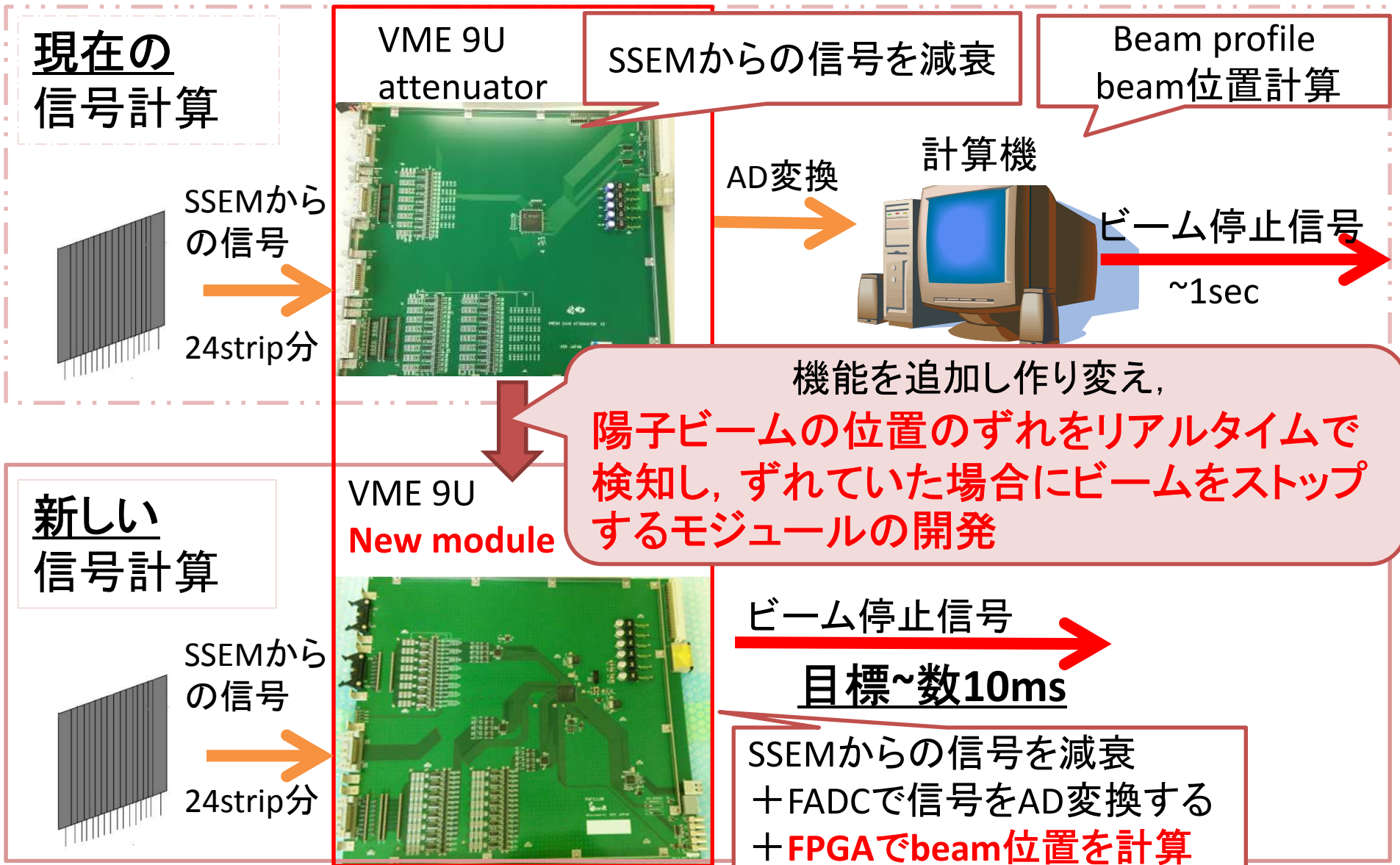
厚み:5 μ m

Stripと呼ばれる帯が
24個並んでいる



0.47MW→1.3MW!!

開発の動機



開発スケジュール

		回路開発		firmware開発		ボード試験
2016	Apr	回路図製作 (ver.1)	レイアウト 製作(ver.1)	ビーム位置 計算ロジック 開発		
	May					
	Jun					
	Jul					
	Aug	プロトタイプ(ver.1)製作				
	Sep					
	Oct					
	Nov					
	Dec					動作試験(1回目)
	Jan					
	Feb					
	Mar					
2017	Apr	回路図製作 (ver.2)	レイアウト 製作(ver.2)	ver.2に向けた 改良	実ビーム試験 の データを用いた デバック	実ビーム試験
	May					
	Jun					
	Jul					
	Aug	プロトタイプ(ver.2)製作				
	Sep					
	Oct					
	Nov					
	Dec					動作試験(2回目)
						ビームを用いた 長期動作試験

目次

1. 開発の概要
2. 陽子ビームを用いた動作試験
3. 実ビームデータを用いたfirmwareの検証
4. 今後の展望

陽子ビームを用いた動作試験

目的

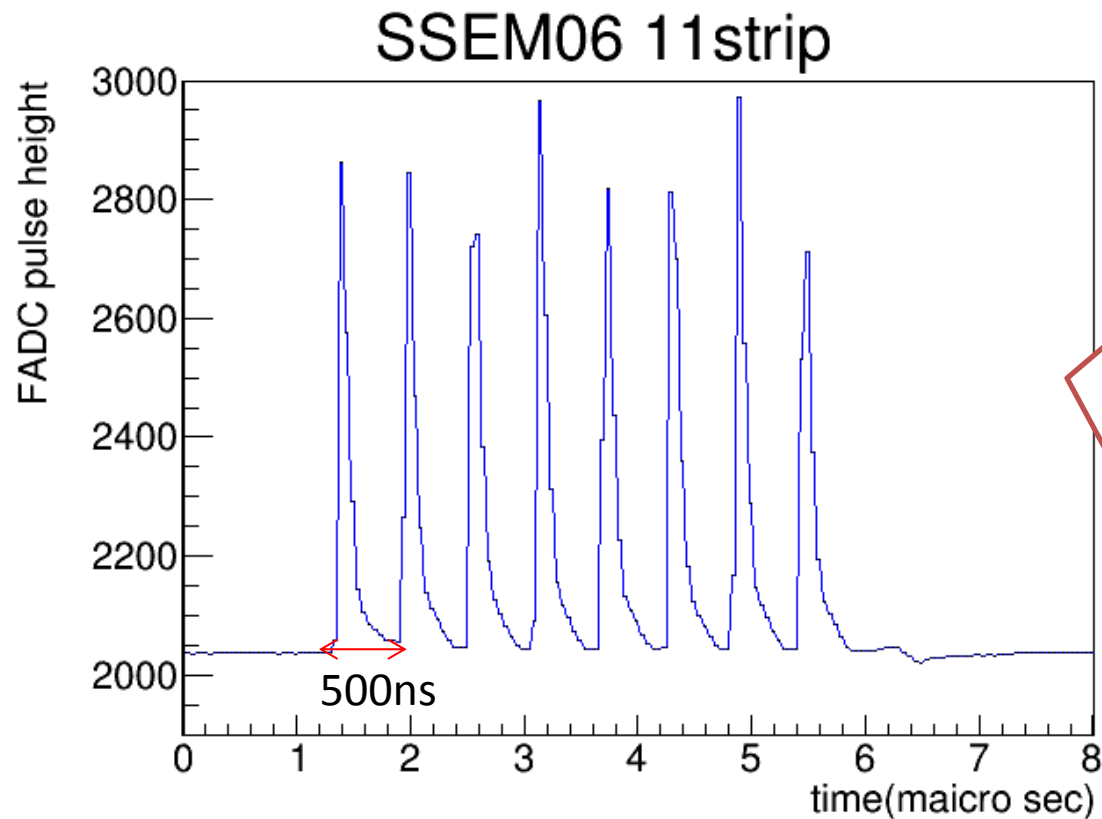
- ビームプロファイルモニター(SSEM)からの信号波形を開発したボードで読み込む
- 位置計算firmwareが信号位置を正しく計算するか調べる。

方法

- T2Kビームラインで19台あるプロファイルモニタの1つSSEM06の信号を用いる
- 弱い強度のビーム(8bunch,35kW相当)を1 shot ずつ入射して, データ取得(48shot分のデータを取得)
- 取得したデータを元にオフラインで解析を行い, firmwareの計算結果と比較する



実ビーム試験のデータ取得及び位置計算結果



←SSEMからの陽子ビーム
信号取得結果(11 strip)

Bunch構造が見えている
(bunch pulse幅 $\cong 500ns$)

信号波形を読み取ることが
出来ている

	shot1	shot2	shot3
オフライン解析のビーム位置(mm)	0.432	0.431	0.432
実ビーム試験時における, firmware 上のビーム位置(mm)	-25.47	-25.49	-25.48

他のモニターの結果
に近い値(0.4mm)が
得られた

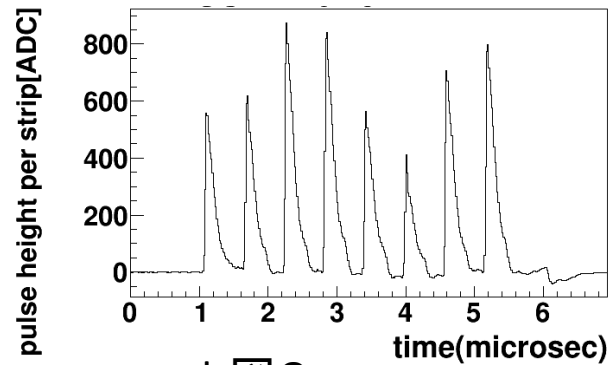
Firmwareで期待通りの計算を行っていない⇒実験のデバックを行った

目次

1. 開発の概要
2. 陽子ビームを用いた動作試験
3. 実ビームデータを用いたfirmwareの検証
4. 今後の展望

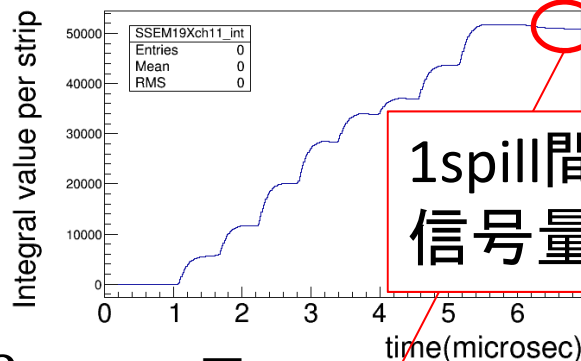
Firmware上のビーム位置計算

$p(t)$ ↓図1



1. FADCから各stripの1spill間の信号波形($p(t)$)を取得する

↓図2

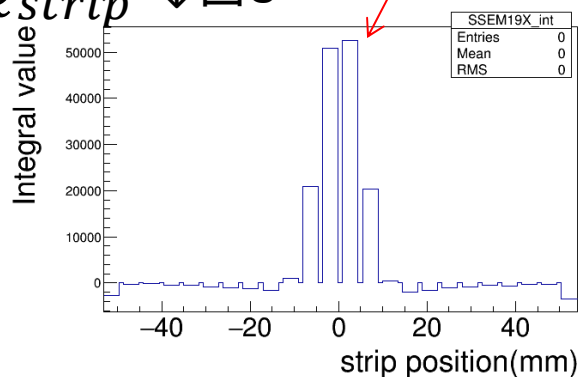


2. 取得した信号波形をspill間で累積積分する

$$Q_{strip} = \int_0^{spill} p(t) dt$$

※Strip=0~23のstrip番号

Q_{strip} ↓図3



3. 全24stripの1 spill間の信号量を集め, 分布の重心平均を計算し, ビーム位置($X(mm)$)とする。

$$X(mm) = \frac{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip} \times x_{strip}}{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip}}$$

各stripの位置(x_{strip})の定義のバグ

- ビーム位置計算に用いる各stripの位置(x_{strip})は, 8bit × 2=16bitの4桁の16進数で定義され, firmware内のレジスタに格納されている

FPGA firmware

<Beam position calculator>

$$X(mm) = \frac{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip} \times x_{strip}}{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip}}$$

<register>

STRIP_POSITION[8*1-1:8*0]=8'hxx
STRIP_POSITION[8*2-1:8*1]=8'hxx

x_0

...

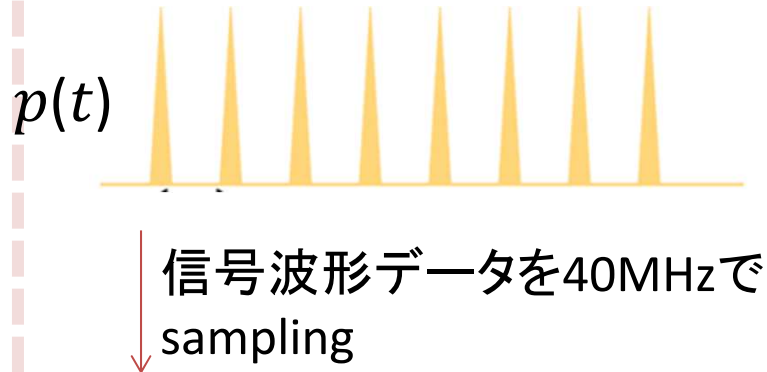
STRIP_POSITION[8*47-1:8*46]=8'hxx
STRIP_POSITION[8*48-1:8*47]=8'hxx

x_{23}

- 実ビーム試験時のfirmwareのビーム位置計算に用いるstripの位置が, firmware上で間違って定義されていた。

	実ビーム試験時のstripの位置	正しいstripの位置
x_0	F4EB	EBF4
x_1	B6ED	EDB6
...	...	...
x_{22}	9F12	129F
x_{23}	6114	1461

firmware上の1 spill間の信号量(Q_{strip})の計算の流れ



p_i	2037	2037	2036		2037
-------	------	------	------	-------	------

← 実際に取り得たデータ
8 μ s=320sample →

1. FADCから各stripの信号波形($p(t)$)を40MHzの周期で8 μ s分のデータをsamplingする
⇒1 spill間の信号波形は40MHz $\times$ 8 μ s=320sample

2. 信号波形を累積積分する

$$Q_{strip} = \int_0^{spill} p(t)dt \cong \sum_{i=1}^{320} p_i$$

firmware開発環境“vivado”のfirmwareの動作をシミュレーション出来る機能を用いて、実ビーム試験時のfirmware上の計算の検証を行った。

実ビーム試験時のfirmware上の Q_{strip} 計算シミュレーション

<想定していた Q_{strip} 計算>

40MHzで320回計算

i	1	2	...	160	...	320
p_i	2037	2038	...	2097	...	2037

実ビーム実験時のfirmwareでは、データsampling周波数40MHzに対して、1 spill間の信号量(Q_{strip})の計算を160MHzで640回計算するように動作させていた。

<実験時の Q_{strip} 計算>

j	1	2	3	4	5	6	7	8	...	637	838	639	640	...	1277	1278	1279	1280
p'_j	2037	2037	2037	2037	2038	2038	2038	2038	...	2097	2097	2097	2097	...	2037	2037	2037	2037

試験時には、実際に取得したデータ(40MHz × 320回=8μs)のうち、(160MHz × 640回=4μs)のデータしか計算に使っていなかったことが分かった。

Firmwareのバグの修正確認

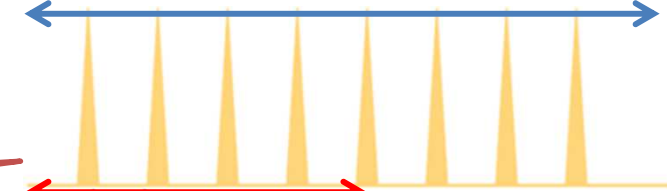
<検証で発見したfirmwareのバグ>

①各stripの位置(x_{strip})の定義

+

②1 spill間の信号量(Q_{strip})の計算範囲

1spillの信号320sample (=8 μ s)



試験時の計算範囲
160sample(=4 μ s)

発見したバグ①②を修正したfirmwareを,実ビーム試験時のデータを用いて位置計算のシミュレーションを行った。

	shot1	shot2	shot3
実ビーム試験時の オフライン解析のビーム位置(mm)	0.432	0.431	0.432
修正したfirmware上の ビーム位置のシミュレーション(mm)	0.43	0.43	0.43

シミュレーションで試験時のビーム位置を再現できている
⇒位置計算のfirmwareのバグが修正出来ていることを確認

目次

1. 開発の概要
2. 陽子ビームを用いた動作試験
3. 実ビームデータを用いたfirmwareの検証
4. 今後の展望

開発の現状と今後の予定

1. ボード開発の現状

- ボードに必要とされる以下の機能評価を行った
 1. 可変アッテネータの信号の減衰率切り替え確認
 2. ボードのOUT信号の確認
 3. ビーム停止信号の発報, リセットのテスト実験
- 開発ボードver1を改良したボードver2を制作中
- ボードver2に向けたfirmwareの改良

2. 今後の予定

- ボードver2の動作確認
⇒電源投入, 信号波形取得 等
- 実ビームを用いたボードの再試験
⇒位置計算firmwareの動作確認, ビーム停止信号発報の動作確認 等
- ボードの長期動作試験
⇒ボードの動作の安定性の確認 等

まとめと今後の目標

- T2K実験の陽子ビームの大強度化に向けた陽子ビーム位置検出回路の開発を行っている
- 2017年2月に行った実際の陽子ビームを用いたボードの動作試験では, firmware上の位置計算が正しく行われていないことが分かった。
- 動作試験で取得したデータを元に, firmwareの動作検証を行った結果, 以下2点のバグを発見し, 修正した。
 - 各stripの位置(x_{strip})の定義
 - 1 spill間の信号量(Q_{strip})の計算

今秋, ボードの再試験 & 長期試験などを行って・・・
2019年までにボードをT2K実験に導入できるようにする

BACK UP

T2K実験

T2K実験のビームパワーの改善計画

反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへのニュートリノ振動を観測することにより、CP対称性の破れの検証を行う予定である。

現時点で、実験提案の約2割を達成。

今後はビーム強度増強を図り、これまで取得したデータの約13倍のデータを収集することで、CP対称性の破れを 3σ (=有意首位純99.7%)の信頼度で検証することを目指している。

	現在	目標
Beam power[MW]	0.42	1.3
# of proton per pulse	2.2×10^{14}	3.2×10^{14}
Rep.Time[sec]	2.48	1.16

Beam power

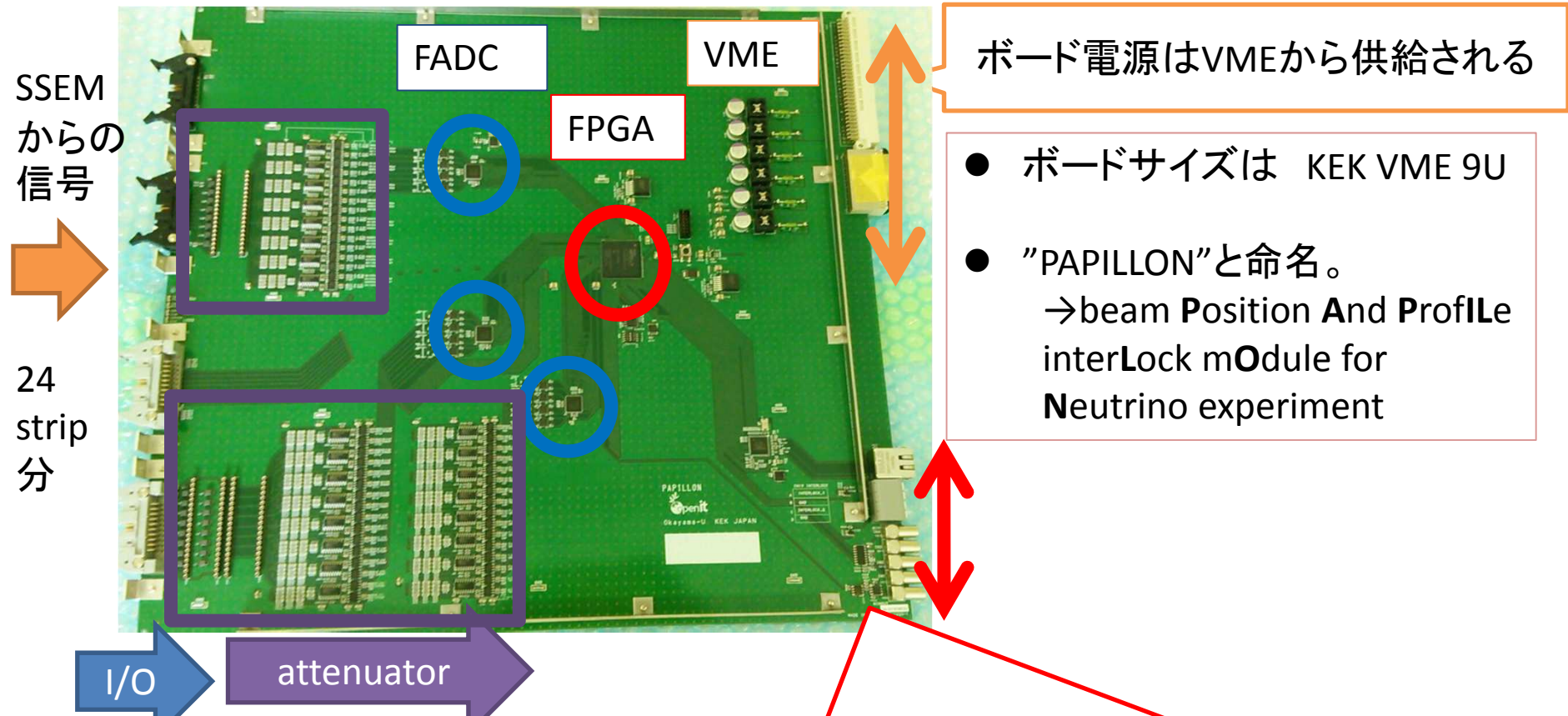
$\propto \# \text{ of proton per pulse} * 1/\text{Rep.Time}$

$$\text{Rep.time} = \frac{2.48}{1.16} \sim 2.14$$

$$\text{Ppp} = \frac{3.2}{2.2} \sim 1.45$$

$$\text{Beam power} = \frac{1.3}{0.42} \sim 3.09$$

回路の構造 ~基板の構造~



Ethernet: 計算機とのデータ通信及びボードの制御

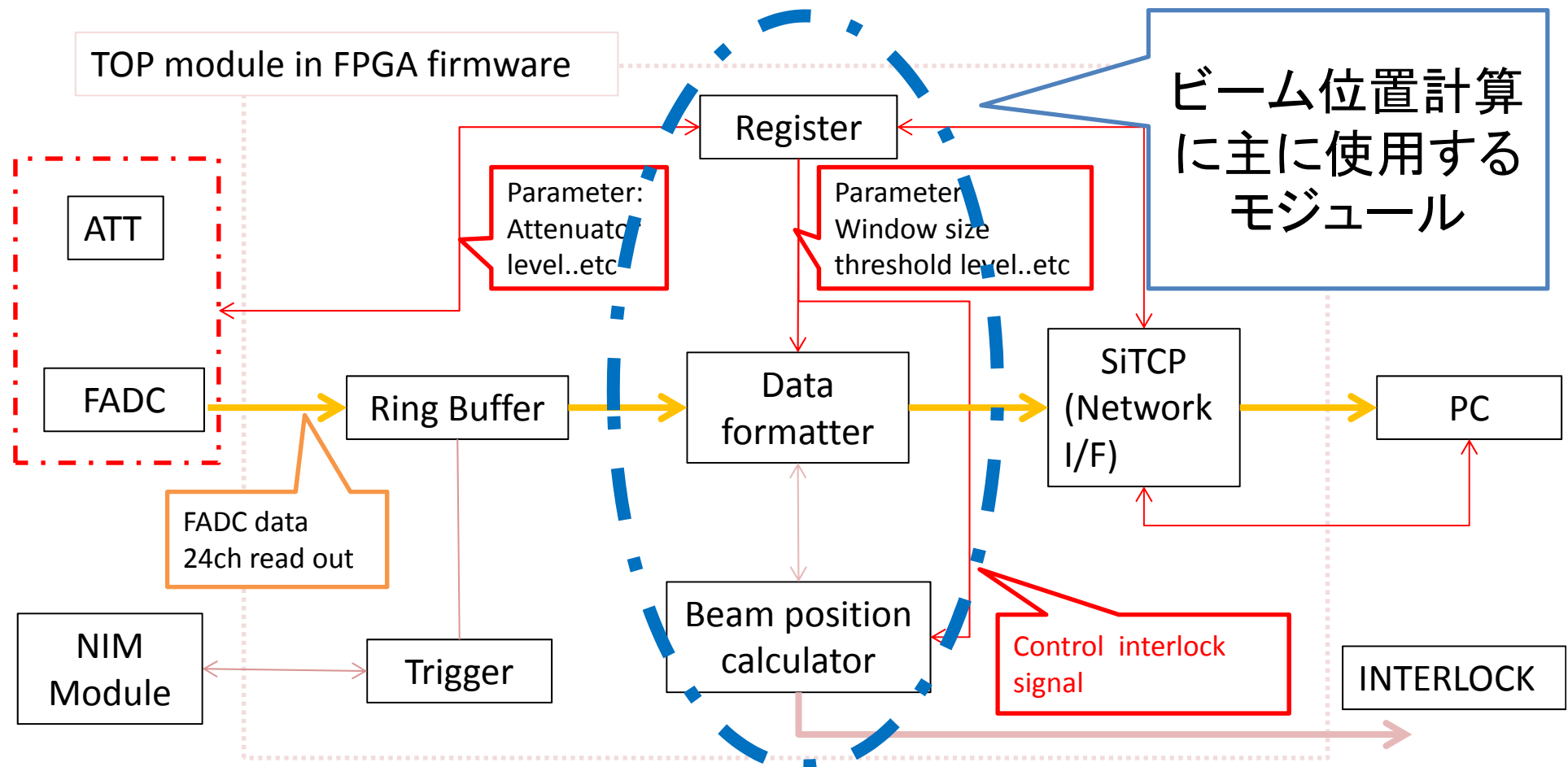
Interlock: ビーム停止信号発報

NIM(IN,4 OUT,1):トリガー信号

配線をVMEラックから出すため、VMEの隙間10cmに固めてある

firmwareの構造

1. ビーム位置計算
2. ネットワーク通信を用いての信号波形, 位置計算, インターロック状態の読み出し
3. PCを用いてのボード制御



各stripの位置(x_{strip})の定義のバグの検証

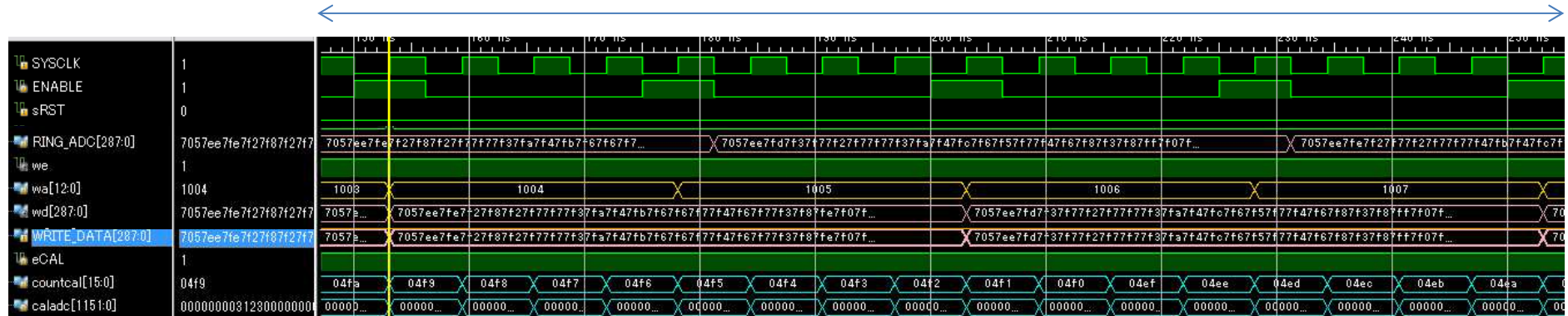
- 実験で取得したデータを実ビーム試験時と同様のstripの位置で再度オフラインで解析し, 実験時のfirmware上のビーム位置を再現するかを確認するデバックを行った

	shot1	shot2	shot3
オフライン解析のビーム位置(mm)	-25.614	-25.598	-25.609
実ビーム試験時における, firmware上のビーム位置(mm)	-25.47	-25.49	-25.48

デバックの結果, オフライン解析のビーム位置計算結果が実験時のfirmware上のビーム位置計算結果に近づいたが, 値を再現することはできなかった

Vivado のシミュレータについて

時間

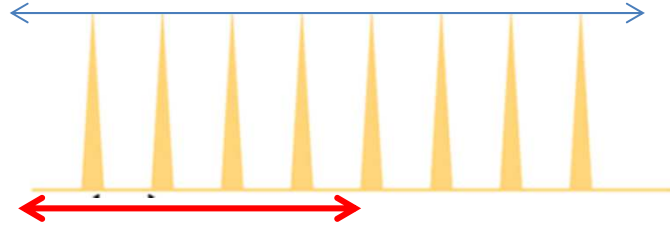


↑各信号(CLK,DATA...)

Vivadoのシミュレータは、Verilog HDLで記述したfirmwareによって、各信号がどのように処理されているかの時間経過やタイミングをモニターすることが出来る。

積分計算範囲によるビーム位置計算結果の変化の検証

1spillの信号320sample (=8 μ s)



これまでの検証から予測される
試験時の積分範囲
160sample(=4 μ s)

Shot1.txt 各stripの信号波形データ
Shot2.txt 各stripの信号波形データ
Shot3.txt 各stripの信号波形データ

試験時のデータを用いて, firmware
のシミュレーションを行った。

Beam position calculator

	実験時 offline(mm)	実験時 Firmware(mm)	シミュレーション (160sample)(mm)	シミュレーション (320sample)(mm)
shot1	-25.614	-25.47	-25.47	-25.60
shot2	-25.598	-25.49	-25.47	-25.59
shot3	-25.609	-25.48	-25.48	-25.60

積分範囲を160sampleに設定すると実験時のfirmwareの計算結果,
320sampleにするとofflineの計算結果を再現することを確認した。

Q_{strip} 計算の修正

i =sampling数
 p_i =データ

i	1				2				...	320			
p_i	2037				2037				...	2037			
j	1	2	3	4	5	6	7	8	...	1277	1278	1279	1280
p'_j	2037	2037	2037	2037	2037	2037	2037	2037	...	2037	2037	2037	2037

計算範囲=8 μ s=320sample

$$Q_{strip} = \sum_{j=1}^{1280} p'_j = \sum_{i=1}^{320} 4 * p_i$$

データsampling周波数40MHzに対して,
1 spill間の信号量(Q_{strip})の計算を
160MHzで1280回計算するようにした。

Firmware修正後のビーム位置計算

- $Q_{strip} = \sum_{i=1}^{320} p_i$ 修正前
- $Q'_{strip} = \sum_{j=1}^{1280} p'_j = \sum_{i=1}^{320} 4 * p_i$ 修正後

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad X(mm) &= \frac{\sum_{strip=0}^{23} Q'_{strip} \times x_{strip}}{\sum_{strip=0}^{23} Q'_{strip}} \\
 &= \frac{\sum_{strip=0}^{23} \sum_{i=1}^{320} 4 * p_i \times x_{strip}}{\sum_{strip=0}^{23} \sum_{i=1}^{320} 4 * p_i} \\
 &= \frac{\sum_{strip=0}^{23} \sum_{i=1}^{320} p_i \times x_{strip}}{\sum_{strip=0}^{23} \sum_{i=1}^{320} p_i} \\
 &= \frac{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip} \times x_{strip}}{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip}} \quad \text{計算結果は変わらない}
 \end{aligned}$$

ver.2について



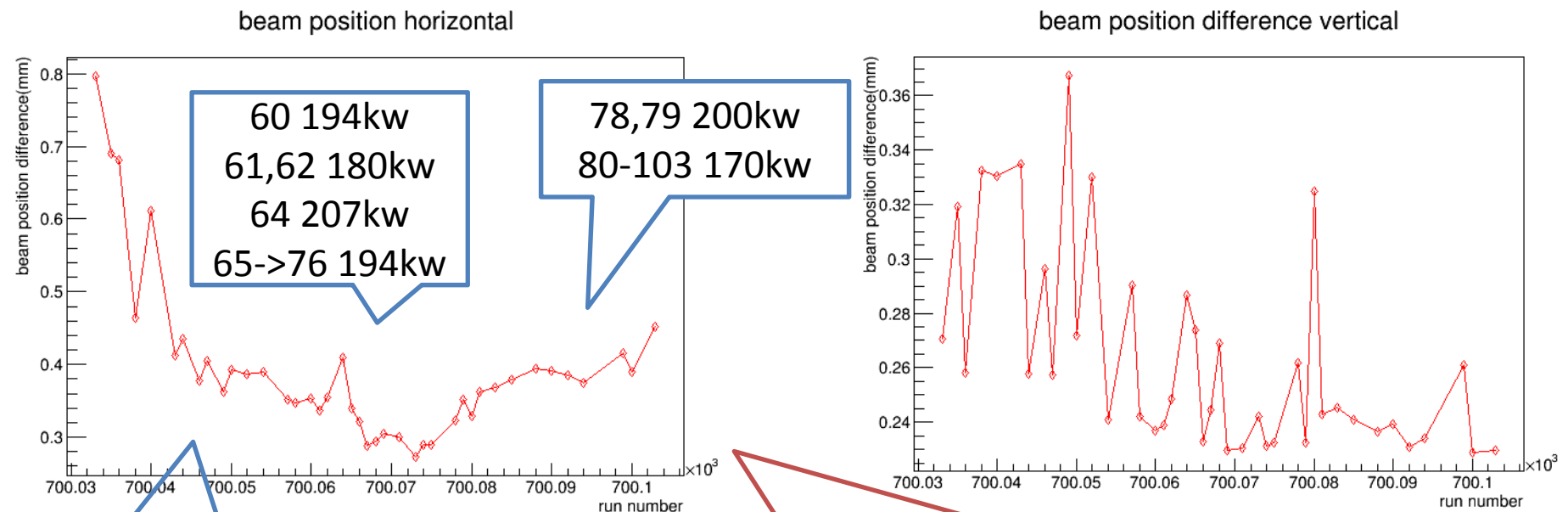
Eventトリガー & 番号 VMEで取得

- 現在, T2K実験におけるビーム位置計算は, VMEでevent番号を取得し, 65MHz FADCでAD変換されたデータを用いて計算されている。
- 将来, papillonボードをT2Kのデータ解析にも使用できるようにするため, ver1のボードに以下の2点の機能を追加したver2のボードを製作している。
 - VMEでイベントトリガー & 番号の取得(回路図の変更)
 - 80MHzのsampling rate I/F (firmwareの変更)

長期試験のプラン

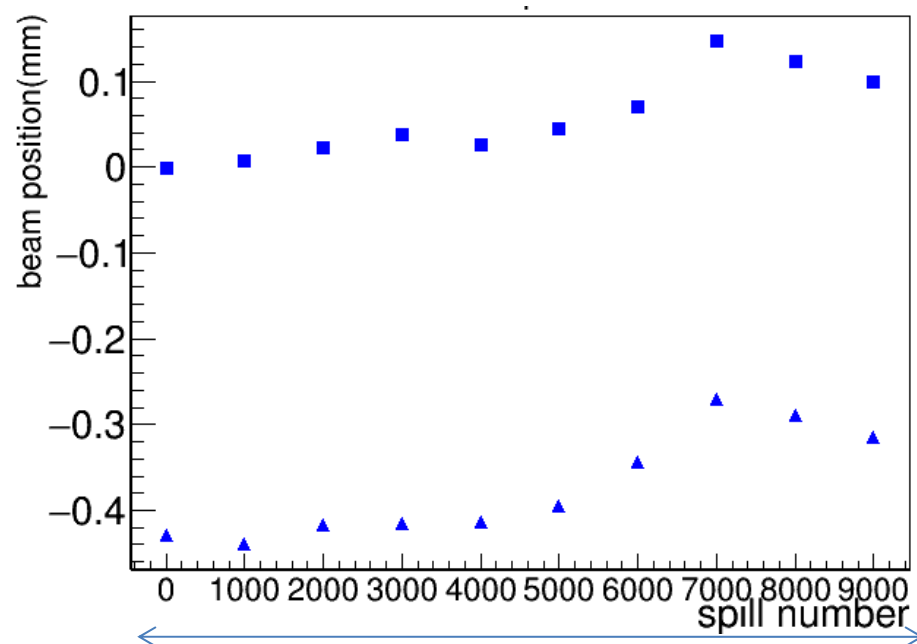
1. 修正firmwareの再試験
2. ビームパワーによる計算結果の違い
3. 長期連続ビームランによる安定度を見る

下図
Firmware計算による
ビーム位置と
T2K official計算による
ビーム位置の差の
解析



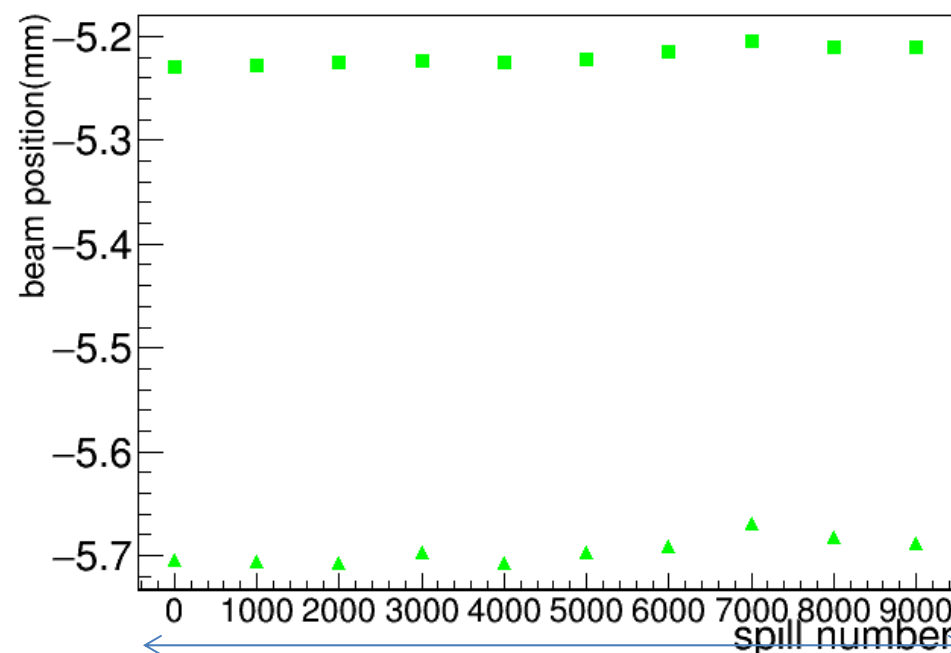
陽子ビームの時間によるビーム位置の移り変わり

Horizontal SSEM



約7時間

Vertical SSEM



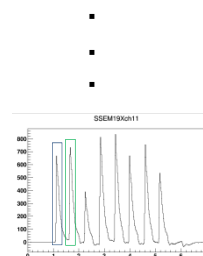
約7時間

- ① 現在の信号計算のビーム位置の1000 spillごとの平均 ■
 - ② 新しい信号計算のビーム位置の1000 spillごとの平均 ▲
- 時間によるビーム位置の動きを再現できている
=FPGA上でオフセットを工夫できる

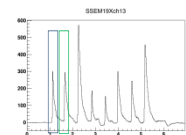
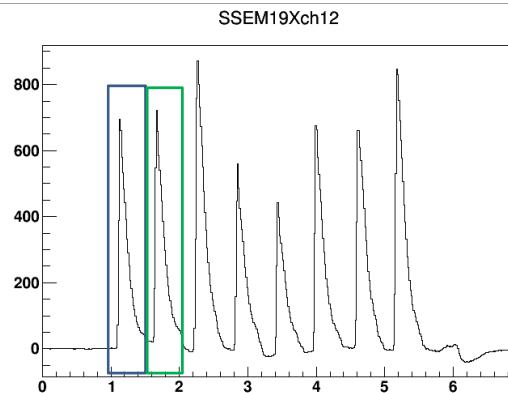
SSEMのbeam position の解析方法

T2Kで現在行われているビーム位置計算方法

1. 各stripでバンチ毎の信号量Qを計算。QはADC peak-5bin ~ peak+15binの間のADCの和



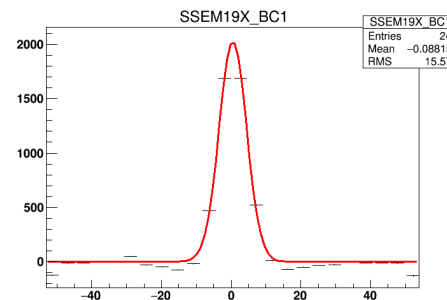
SSEM19Xch12



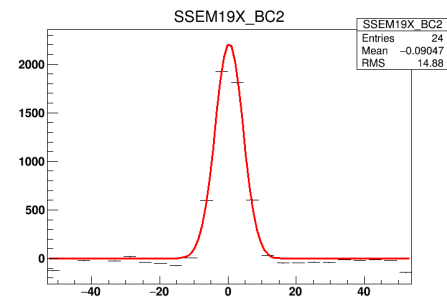
※他のstripも同様に

2. 各バンチ毎のbeam profileを作る

BC1(=bunch1)

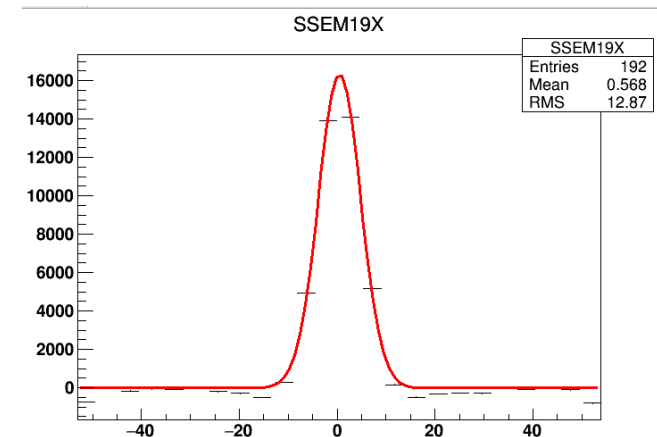


BC2(bunch2)



※同様に8bunch作る

3. バンチ毎のbeam profileを足し合わせたbeam profileをつくる



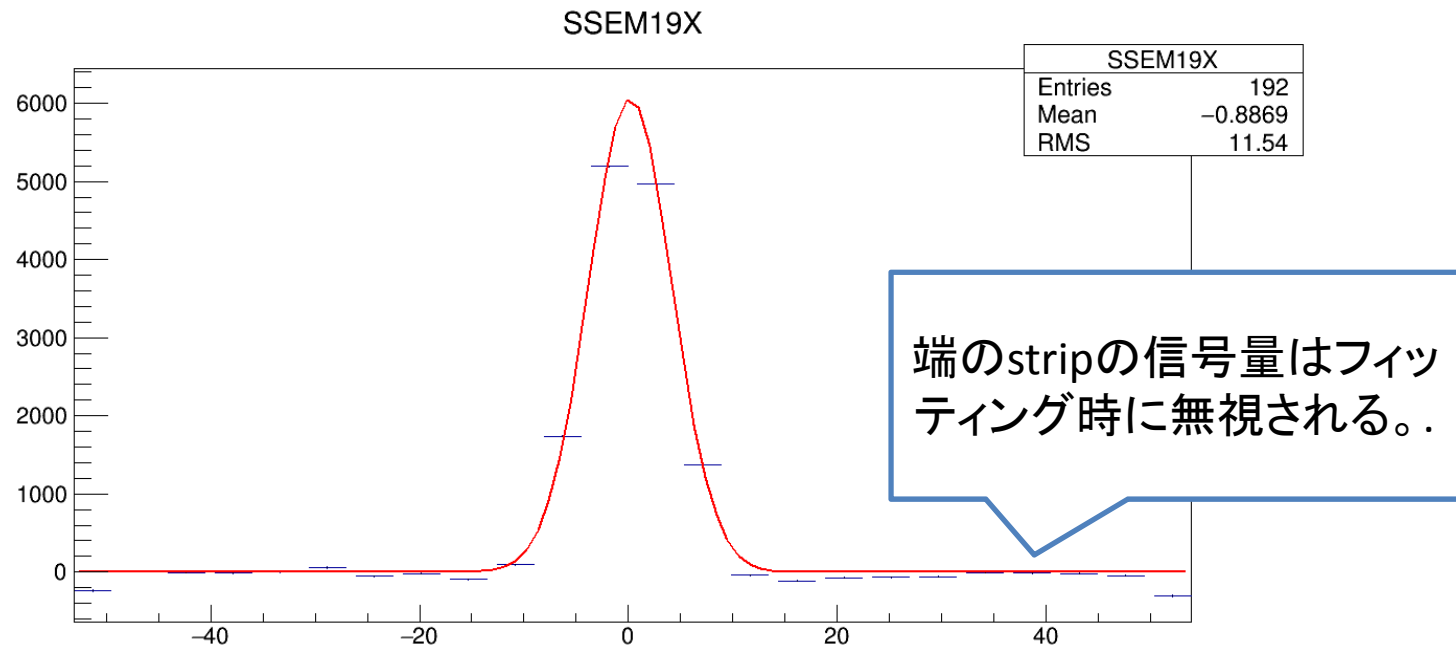
4. そのbeam profileをfitしてbeam位置を算出



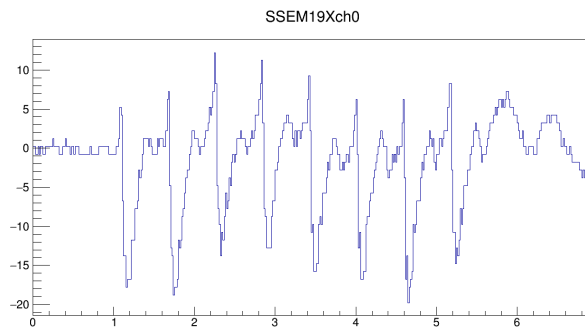
Run700033

Thu Oct 27 16:14:03 2016 Thu Oct 27 16:24:47 2016

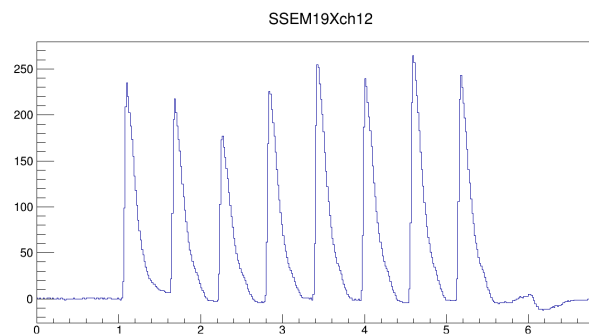
87kW w/+250kA, SSEM out



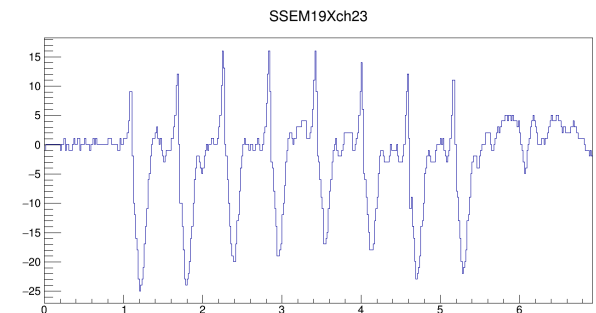
Amplitude -20~10



Amplitude 0~250



Amplitude -25~15

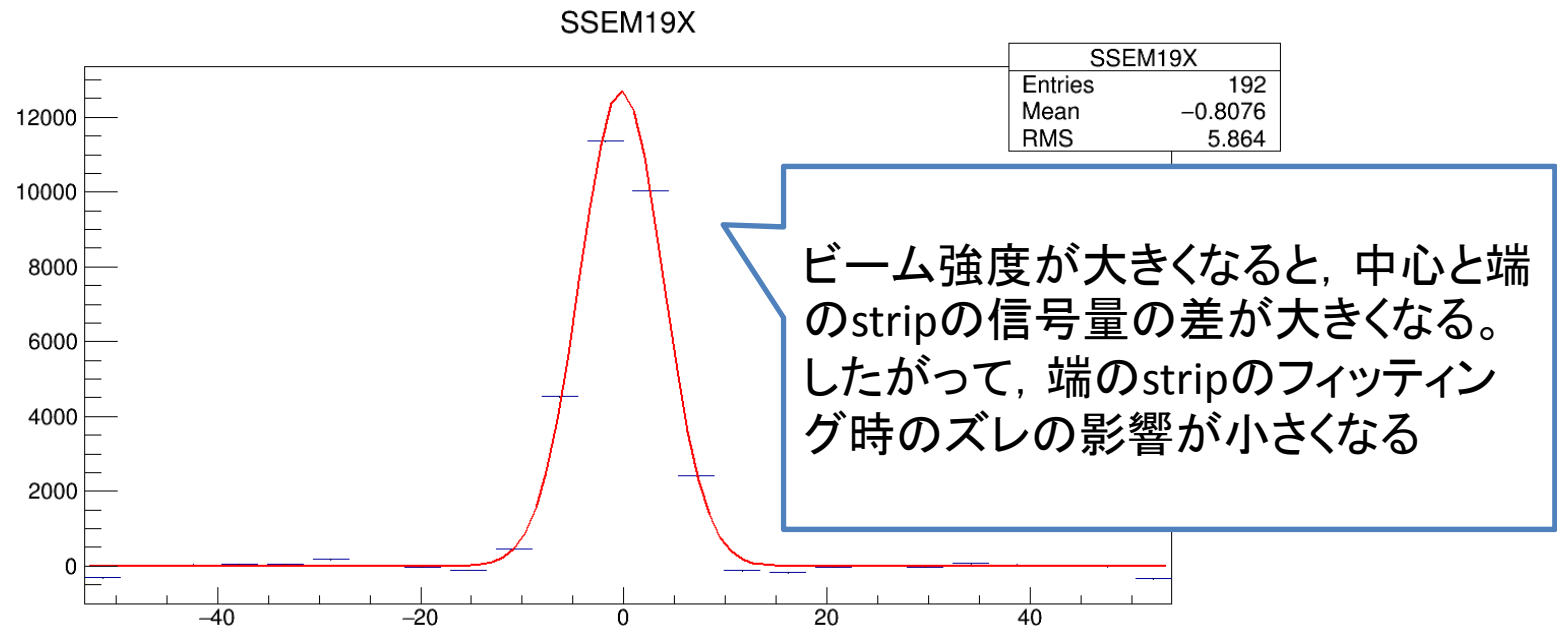


Run700058

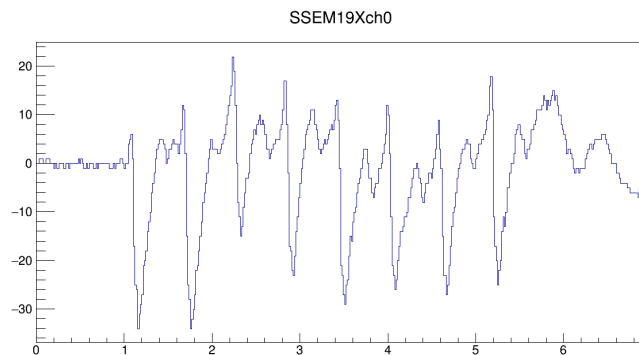
Thu Oct 27 22:32:11 2016

Thu Oct 27 23:31:29 2016

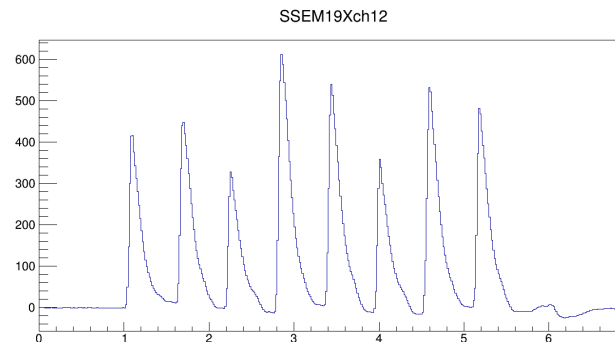
207kW w/+250kA, SSEM out



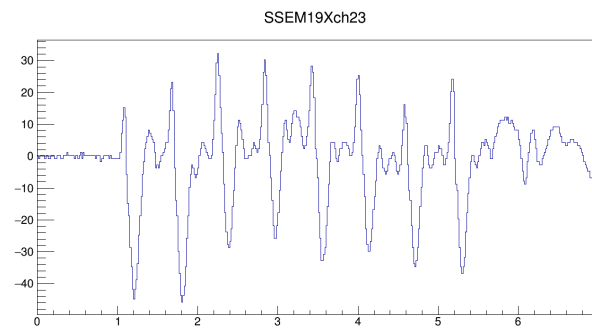
Amplitude -30~20



Amplitude 0~600



Amplitude -40~30



Firmware上のビーム幅計算について

- 現在T2K実験ではbeam profileをgauss fit(x: double gauss fit)してビーム幅を計算している。
- 現在, RMSを計算し, ビーム幅をモニターするfirmwareを開発中。

- Beam width(mm) =
$$\sqrt{\frac{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip} \times x_{strip}^2}{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip}}} - X^2$$

- 計算コードは書き終わったので, 実ビームデータを用いたシミュレーションを用いて, 正しく計算することを確認中

INTERLOCK信号に要求される機能

1. 各ビーム取出し毎に位置を計算し, 閾値と比較して閾値を超えていたらインターロック信号(level信号)を出す
2. UDP通信によるレジスタ操作(外部制御)で
 - ① 閾値を設定
 - ② 強制的にインターロック信号を発報
 - ③ ビーム位置のオフセットを設定
 - ④ 強制的にインターロック信号をリセット