

J-PARC T2K実験における 陽子ビーム位置検出回路の開発

2017/2/14 修士論文発表会
自然科学研究科 数理物理学専攻
素粒子物理学研究室
41428223 彌益紗希

[学会発表]

日本物理学会:2016年秋季大会(2016/9/24),2017年年次大会(2017/3/18),2017年秋季大会(2017/9/12)
Unification and Development of the Neutrino Science Frontier (2018/3/5~2018/3/6@京都大学)(予定)

目次

1. ニュートリノ振動について
2. T2K実験について
3. PAPILLON BOARDの動作試験報告
4. 動作試験をふまえたFirmwareの改良
5. まとめ

陽子ビーム位置検出回路⇒“PAPILLON”と命名。
→beam **P**osition **A**nd **P**rofile interLock m**O**dule
for **N**eutrino experiment



目次

1. ニュートリノ振動について
2. T2K実験について
3. PAPILLON BOARDの動作試験報告
4. 動作試験をふまえたFirmwareの改良
5. まとめ

陽子ビーム位置検出回路⇒“PAPILLON”と命名。
→beam **P**osition **A**nd **P**rofile interLock m**O**dule
for **N**eutrino experiment



ニュートリノ振動とは

フレーバー
固有状態

PMNS(Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)行列

質量
固有状態

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

ニュートリノが質量を持つとき、その存在確率はニュートリノが飛行する距離Lに従って周期的に変化(振動)する

ニュートリノ振動

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \cong \sin^2\theta_{23}\sin^2 2\theta_{13}\sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} - \frac{\sin^2 2\theta_{12}\sin 2\theta_{23}}{2\sin\theta_{13}} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \sin^2 2\theta_{13} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \sin\delta_{CP} + \dots$$

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

⇒質量二乗差

L:飛行距離

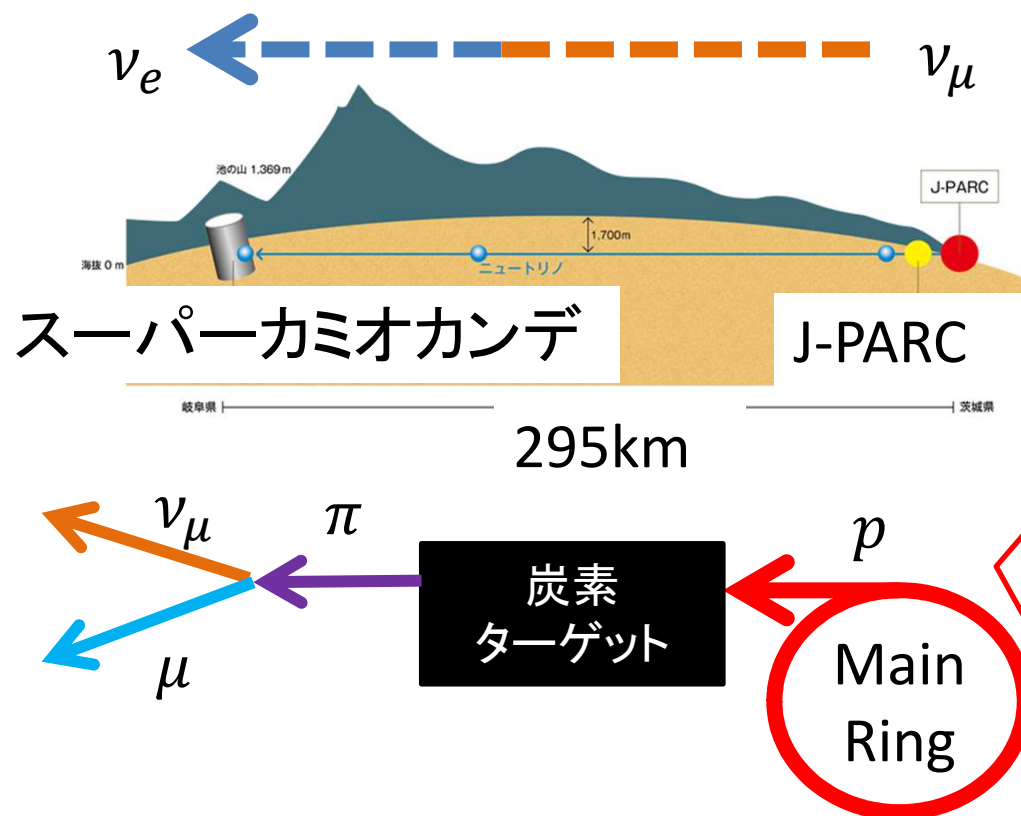
E_ν :ニュートリノのエネルギー

δ_{CP} :CP位相

$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動の場合
 $\delta_{CP} \rightarrow -\delta_{CP}$

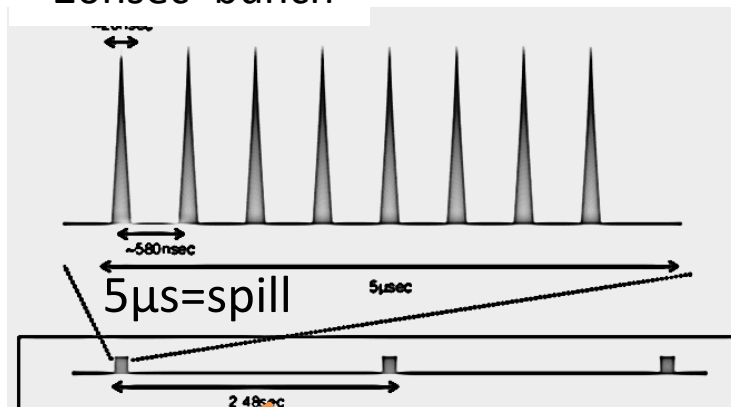
$\delta_{CP} \neq 0$ のとき、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ と $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ で違いが生じる

T2K実験



<陽子ビームの時間構造>

~20nsec=bunch



Spill interval
2.48sec → **1.16sec**

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 事象の統計数を現在の9倍に増やし、ニュートリノにおけるCP対称性の破れを99.7%の信頼度で検証することを目指す
→その方法の1つとして...

繰り返し時間を短縮し、ビームパワーを増強させる!

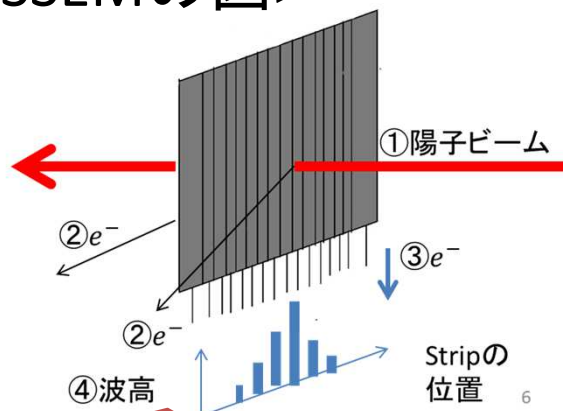
T2K 陽子ビームライン

[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
- 陽子ビームの監視

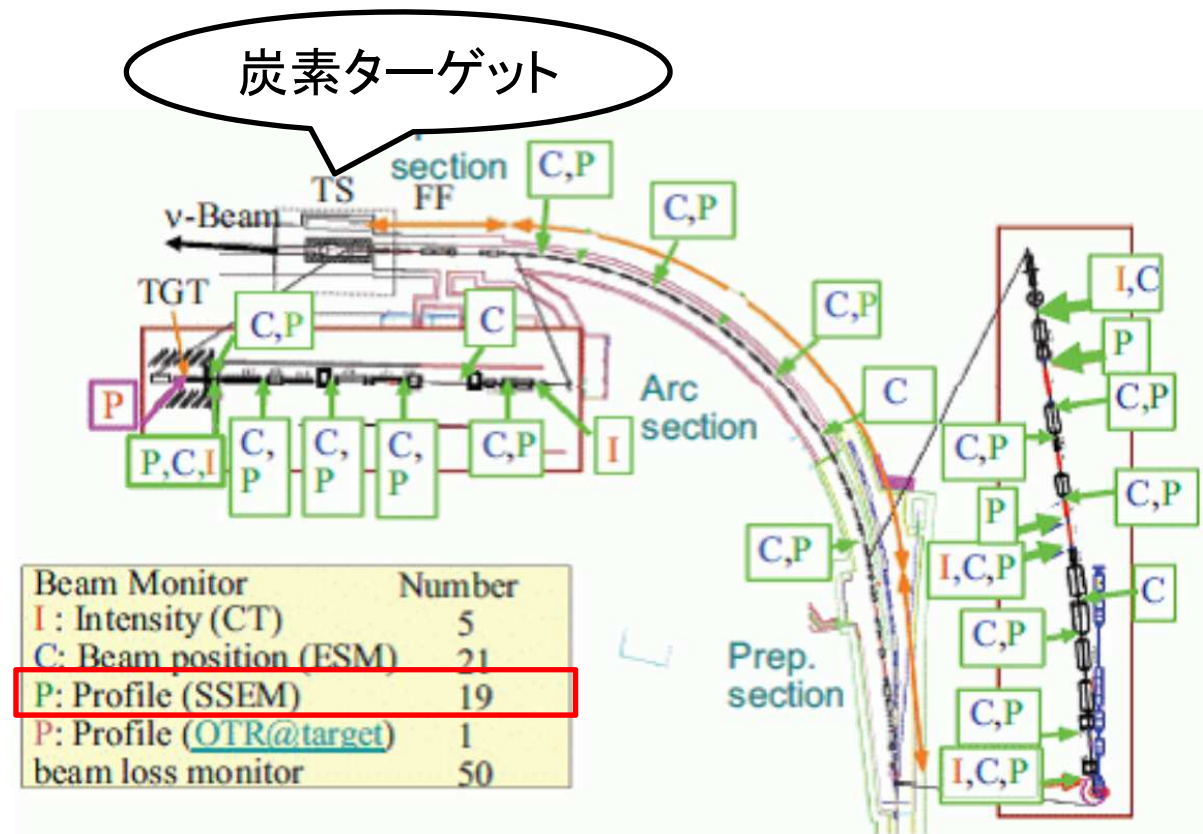
<SSEMの図>



材料:チタンホイル

厚み:5 μm

Stripと呼ばれる帯が
24個並んでいる

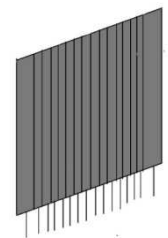


0.47MW→1.3MW!!

陽子
ビーム

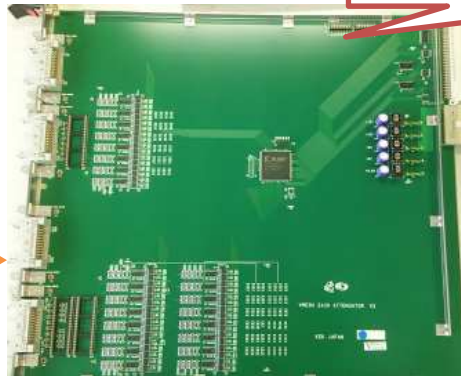
開発の動機

現在の 信号計算



SSEMからの
信号
24strip分

VME 9U
attenuator



SSEMからの信号を減衰

AD変換

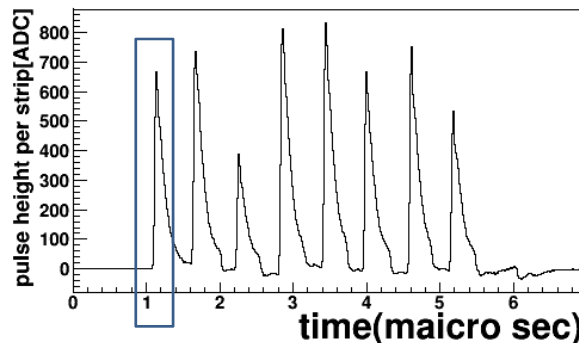
計算機
(T2K DAQ)

Beam profile
beam位置計算

ビーム停止信号
>1.5mm

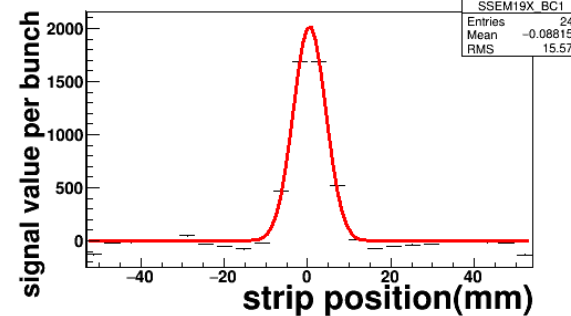
~1sec

各stripの信号波形 × 24
(ex11strip)

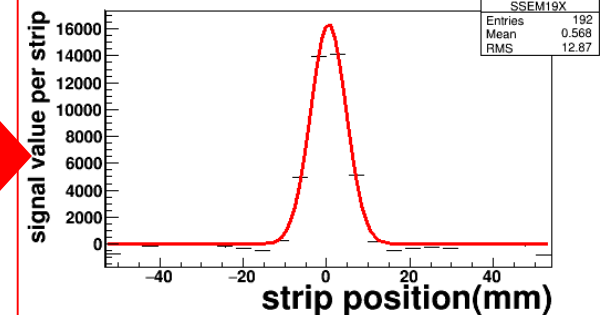


⇒1bunchごとに信号量計算し、beam profileを作る

Beam profile(bunch) × 8
(ex1bunch)



Beam profile(spill)

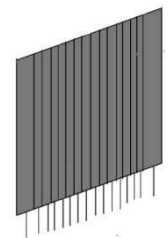


Fittingして...

⇒位置計算

開発の動機

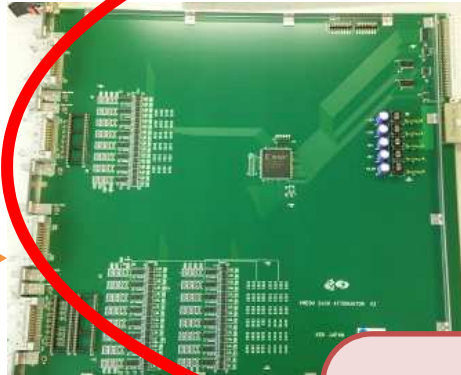
現在の 信号計算



SSEMからの
信号

24strip分

VME 9U
attenuator



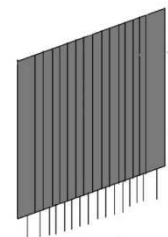
AD変換

計算機
(T2K DAQ)

ビーム停止信号
>1.5mm

~1sec

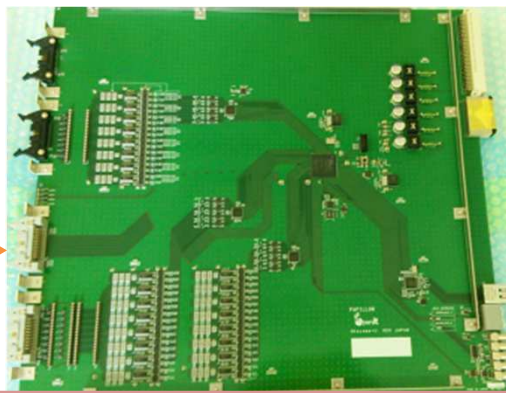
新しい 信号計算



SSEMからの
信号

24strip分

VME 9U
PAPILLON



ビーム停止信号

目標~10ms

SSEMからの信号を減衰
+ADCで信号をAD変換する
+ **FPGA(ICの一種)**でbeam位置を計算

機能を追加し作り変え、
陽子ビームの位置のずれをリアルタイムで
検知し、ずれていた場合にビームをストップ
するモジュールの開発

目次

1. ニュートリノ振動について
2. T2K実験について
3. PAPILLON BOARDの動作試験報告
4. 動作試験をふまえたFirmwareの改良
5. まとめ

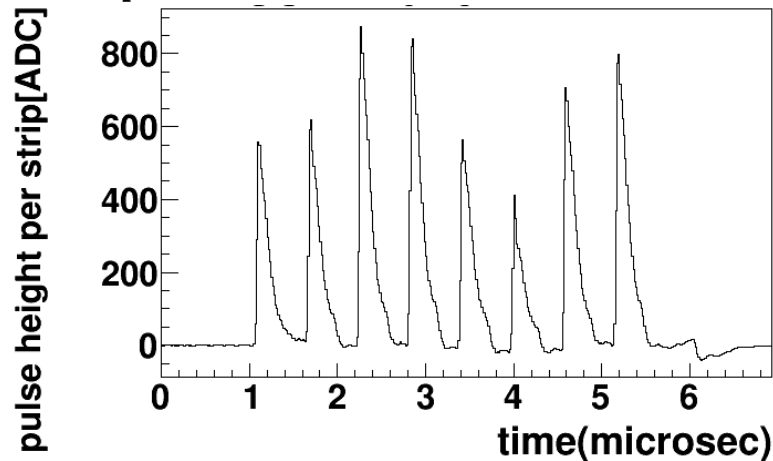
陽子ビーム位置検出回路⇒“PAPILLON”と命名。
→beam **P**osition **A**nd **P**rofile interLock m**O**dule
for **N**eutrino experiment



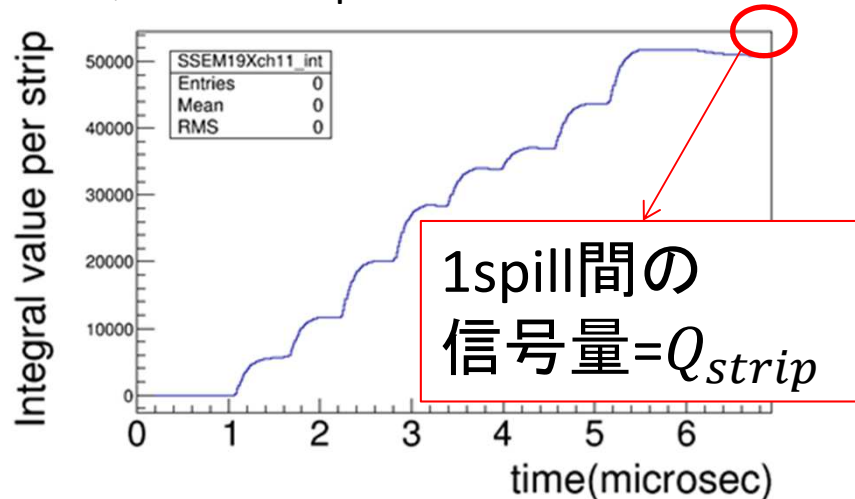
新しいビーム位置計算手法(1)

現在計算機で使われているbeam profileとbeam 位置の計算手法は複雑
→単純かつ高速にbeam profileとbeam位置を計算できないか？

$p_{strip}(t)$ ↓図a:11stripの信号波形



↓図b:11stripの累積積分結果



1. ADCから各stripの1spill間の信号波形($p_{strip}(t)$)を取得する

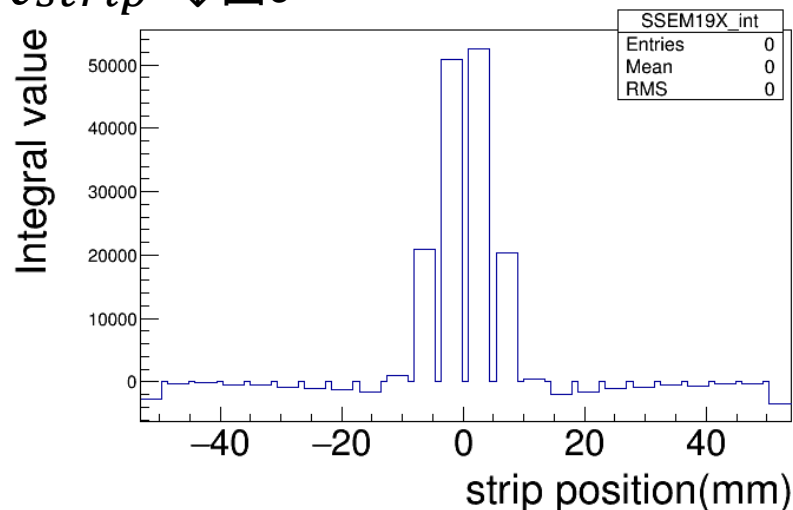
2. 取得した信号波形をspill間で累積積分する

$$Q_{strip} = \int_0^{spill} p_{strip}(t) dt$$
$$\cong \sum_{i=1}^{640} p_{strip}^i$$

※Strip=0~23のstrip番号
i=sampling数

新しいビーム位置計算手法(2)

Q_{strip} ↓ 図c



x_{strip}

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

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

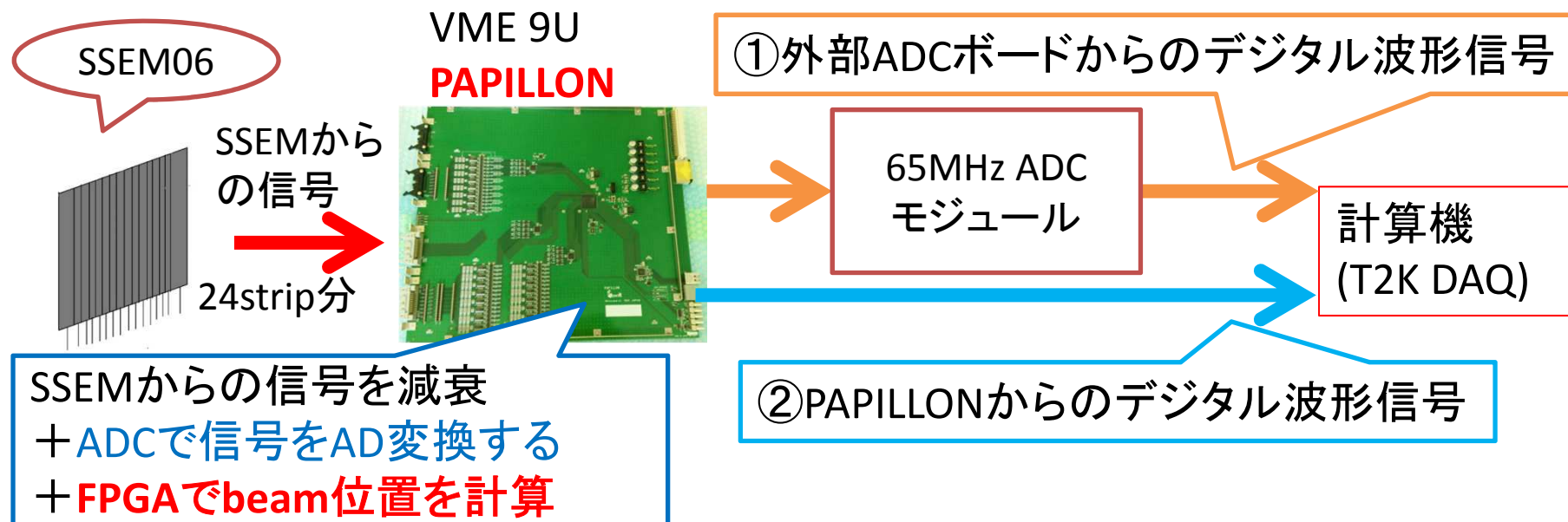
データを取得してから位置計算が終わるまでの時間を測定した結果、 $9.04\mu s$ であることが分かった。

⇒10ms以内でInterlockを出すのが目標だったため、要求を満たしていることを確認

陽子ビームを用いた動作試験(2017/11/20)

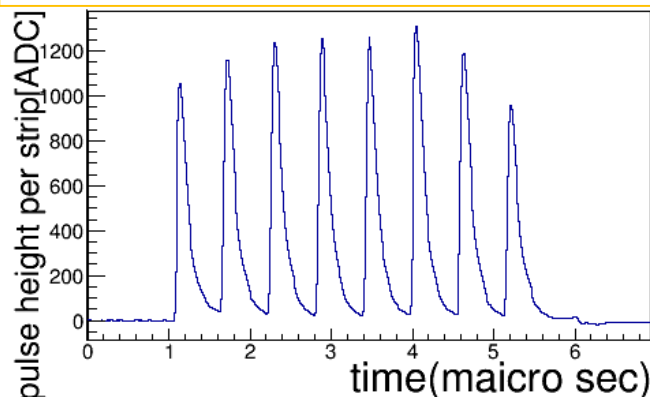
目的

- 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(PAPILLON)で読み込むことが出来るか検証する。
- ビーム位置計算手法が信号位置を正しく再現するかを検証する



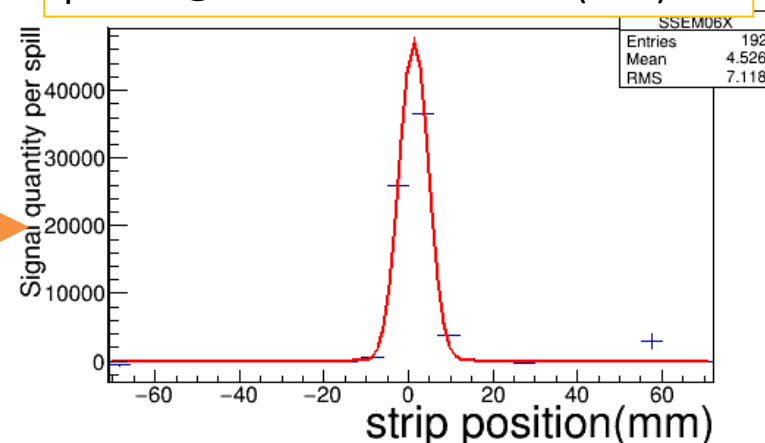
信号波形取得結果

①外部ADCボードからのデジタル波形信号

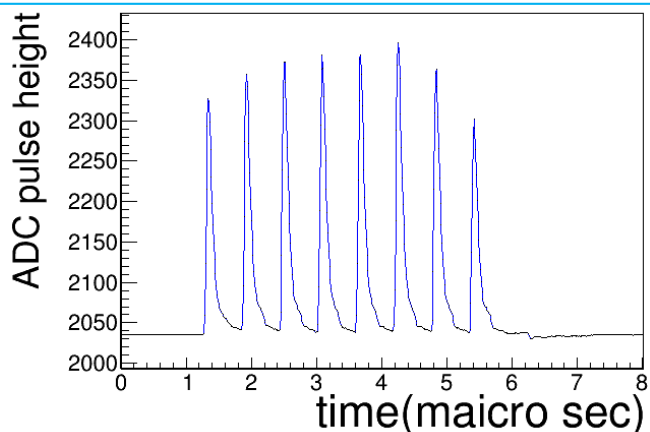


現在の
信号計算

profile① T2K official=1.322(mm)

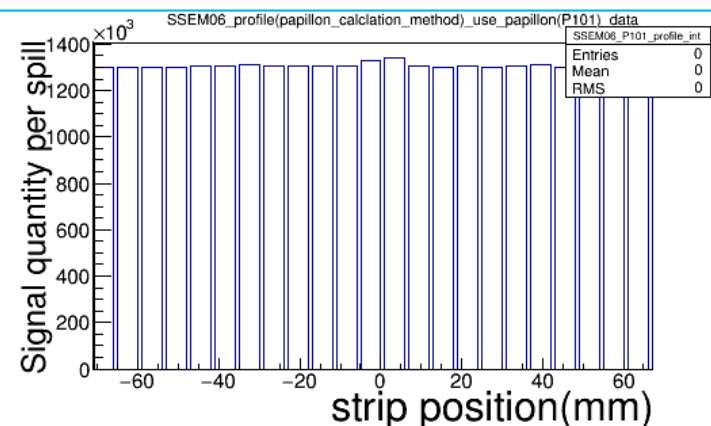


②PAPILLONからのデジタル波形信号



新しい
信号計算

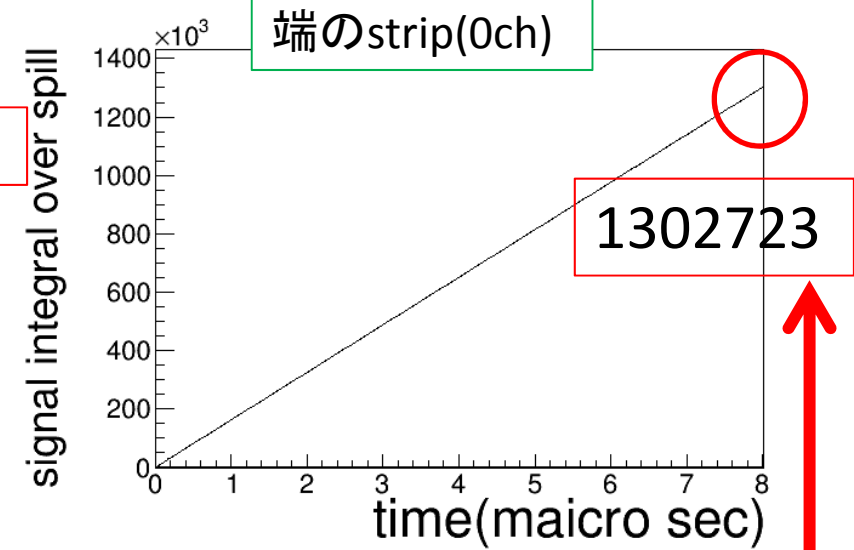
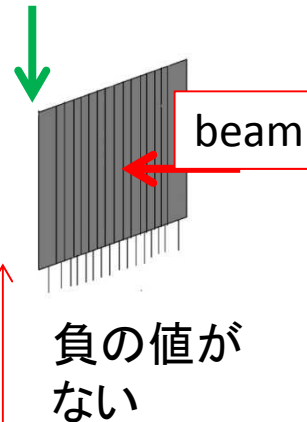
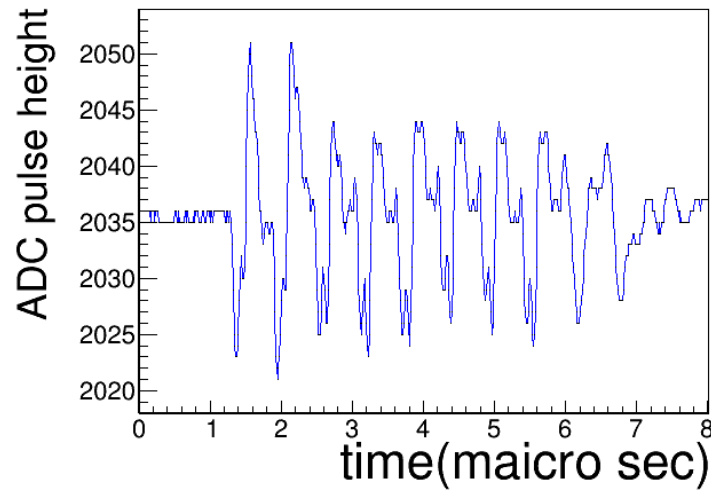
profile② PAPILLON offline=0.543(mm)



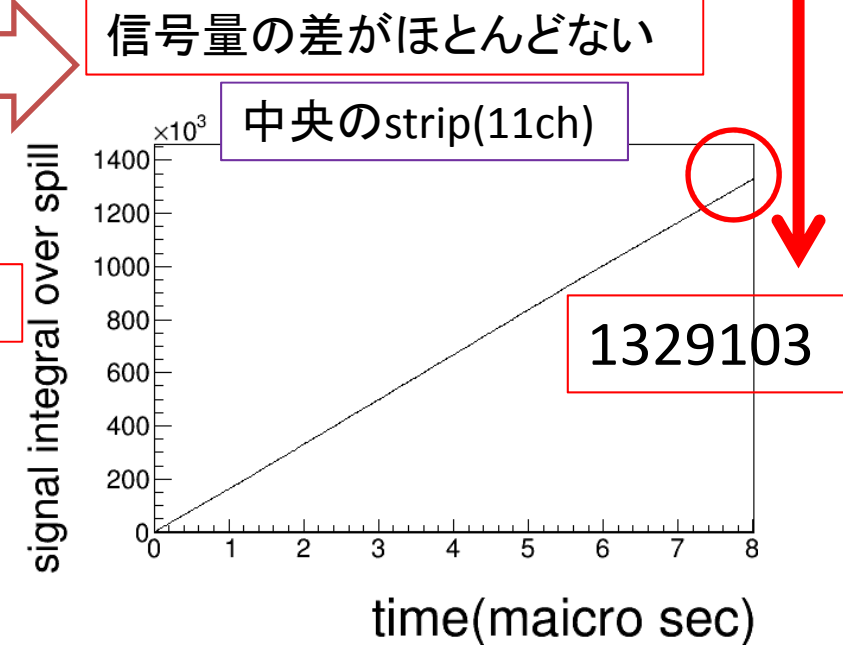
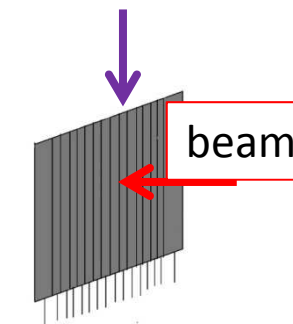
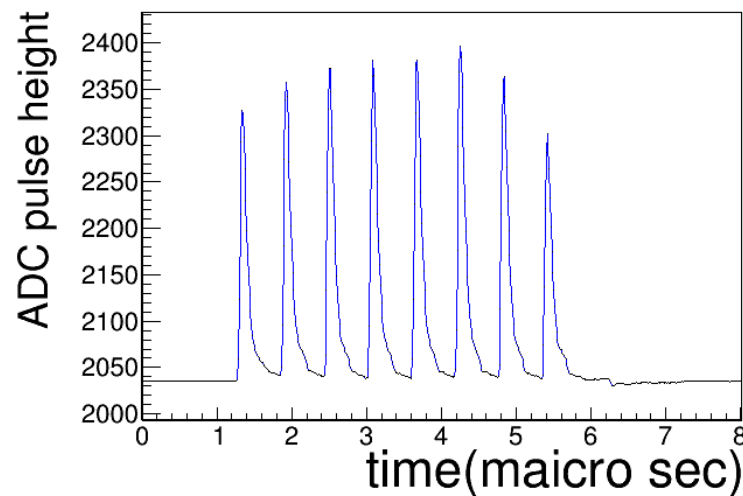
- **PAPILLONを用いてSSEMからの信号波形を読み込めていることを確認**
- 取得したデータ①②を用いてデータ解析を行った結果、新しい信号計算では、beam profileを再現できていないことが分かった。

各stripの信号量計算 PAPILLONデータ

端のstrip(0ch)



中央のstrip (11ch)



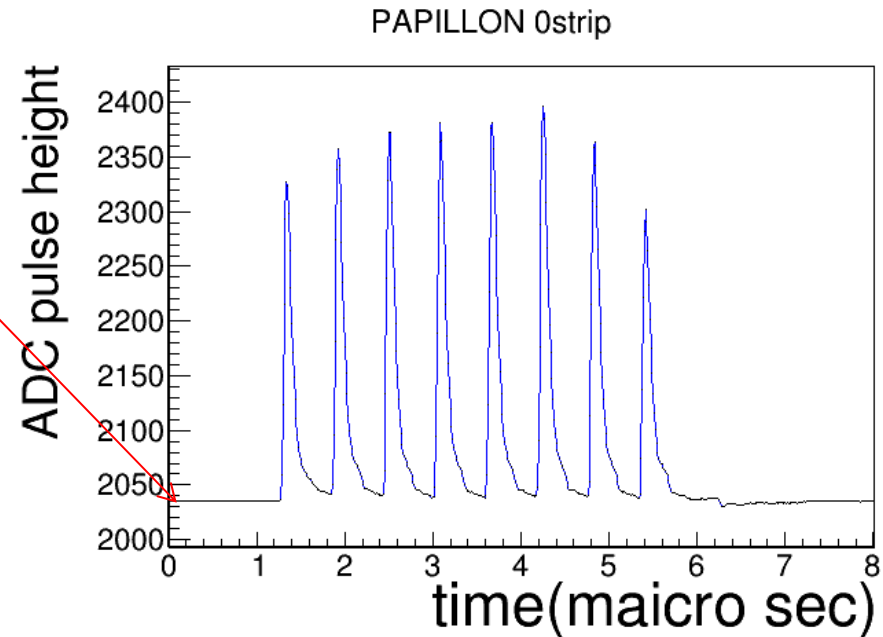
累積積分

信号量の差がほとんどない

ペデスタルの取り扱いについて

Papillonで各stripの1spill間の信号量計算を行なう際に、信号のペデスタル(=信号の基準レベル)を考慮する必要がある。

$$pedestal = \frac{\sum_{i=1}^{30} P_i}{30} \quad (\text{現在の手法})$$



firmwareでペデスタルを計算するのは、困難である。

⇒最初の信号をペデスタルと仮定し、1spill間の信号量を

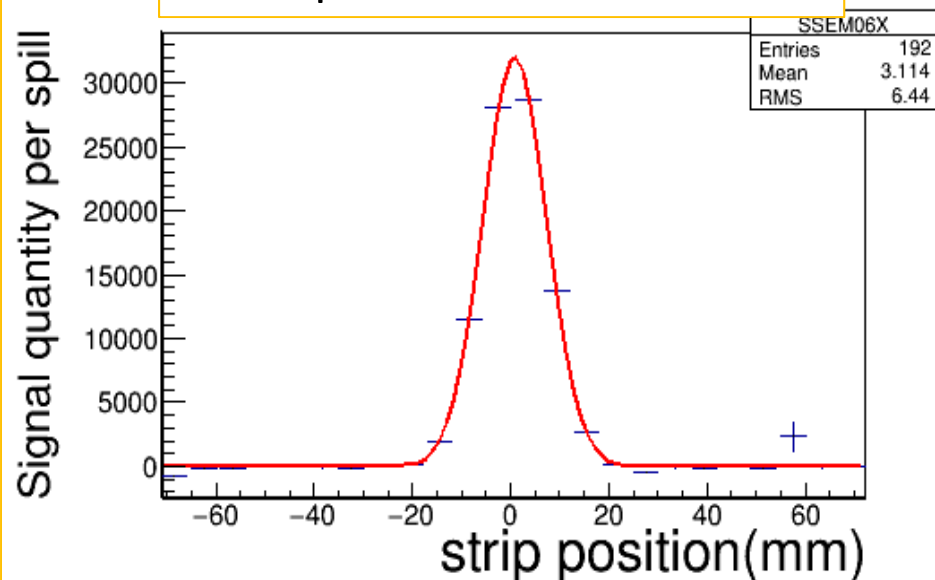
$$Q_{strip} \cong \sum_{i=1}^{640} (p_i - pedestal)$$

と計算するfirmwareを開発し、動作試験を行った。

ペDESTラルを考慮したfirmwareの検証(1)(2017/12/12)

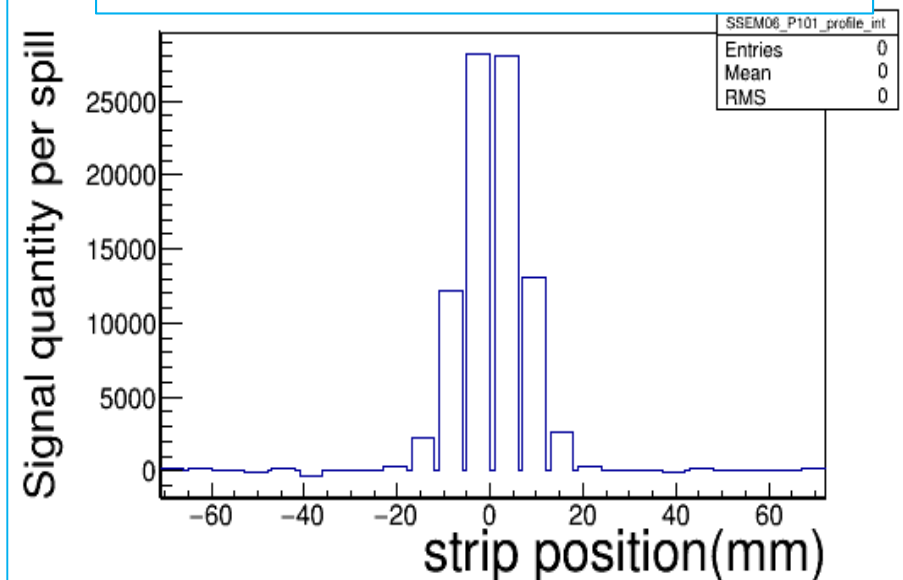
ビーム強度450kW,ビーム位置固定のT2KビームランにPAPILLONをインストールし、信号波形の取得及びデータ解析を行った。(run番号:run0770191)

Beam profile① T2K official



Beam position(fit)=0.86(mm)
RMS=6.44(mm)

Beam profile② PAPILLON offline

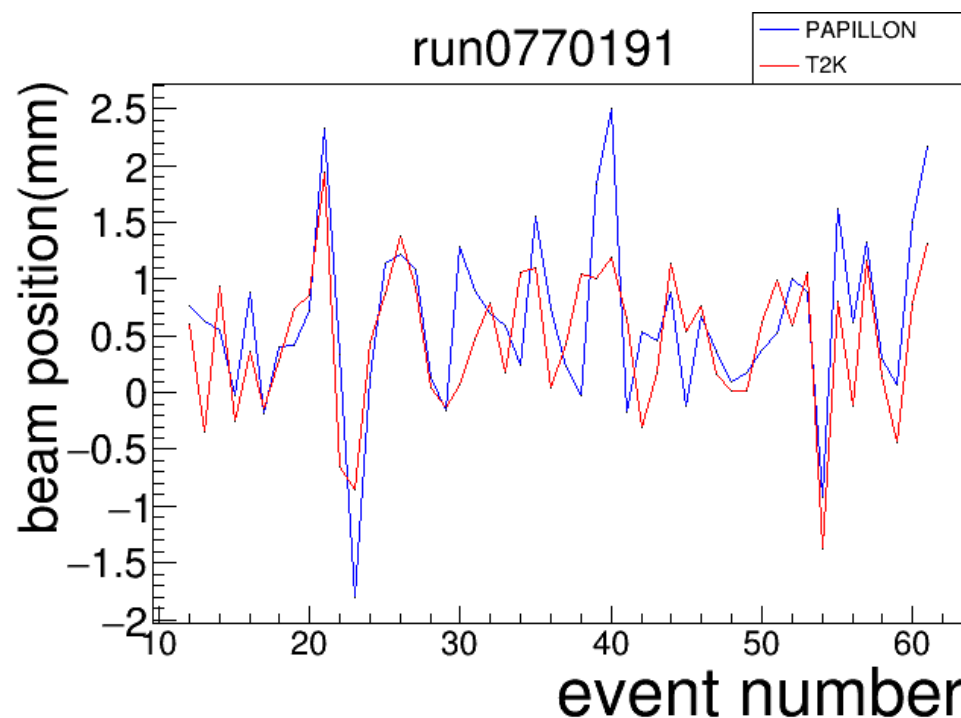


Beam position(重心平均)=1.00(mm)
RMS=4.70(mm)

⇒ペDESTラルを考慮して信号量を計算することで、新しい信号計算で beam profileを再現したことが確認できた。

ペDESTラルを考慮したfirmwareの検証(2)(2017/12/12)

イベントに対するビーム位置の変化を確認した。



赤線:現在の信号計算でのビーム位置
青線:PAPILLONで計算したビーム位置

- T2K officialのビーム位置計算結果とPAPILLONのビーム位置計算結果を比べると...

PAPILLONの計算結果とT2K officialの計算結果の動きに相関がある。(相関係数0.71)

検証で発覚した問題点

ビーム直前に動作確認のため、ダミーの信号を取得する。その信号でも、位置計算が行なわれる。(その場合は陽子ビームは来ない)



ダミーの信号にも関わらず、Interlock信号を誤発報してしまった。



SSEMから来る信号がノイズ波形なのか、陽子ビームの信号波形なのかを区別して、Interlock信号の誤発報を防ぐ必要がある。

イベント 番号	PAPILLON 計算結果 (mm)	Interlock
1	35.96	発報
2	-11.15	発報
3	64.84	発報
4	-137.72	発報
5	9.71	発報
6	13.74	発報
7	82.35	発報
8	28.72	発報
9	20.04	発報

↑陽子ビームが来ていない場合
のビーム位置計算結果

目次

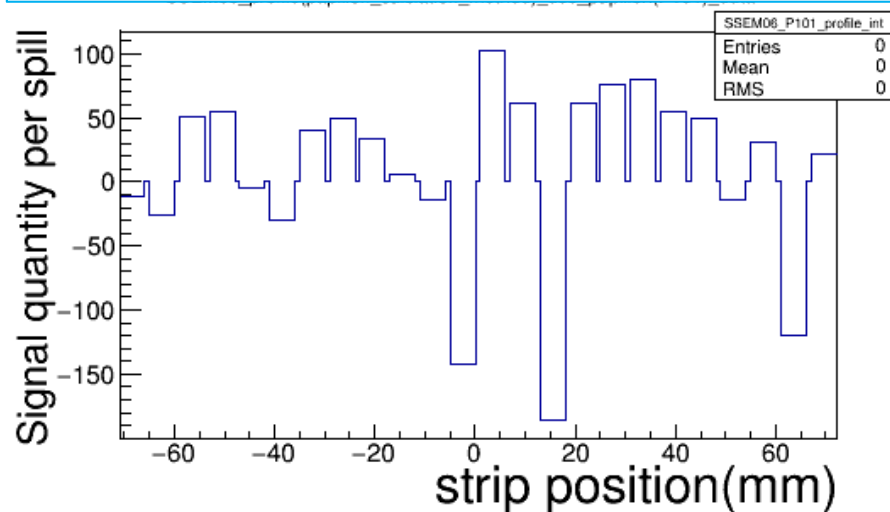
1. ニュートリノ振動について
2. T2K実験について
3. PAPILLON BOARDの動作試験報告
4. 動作試験をふまえたFirmwareの改良
5. まとめ

陽子ビーム位置検出回路⇒“PAPILLON”と命名。
→beam **P**osition **A**nd **P**rofile interLock m**O**dule
for **N**eutrino experiment



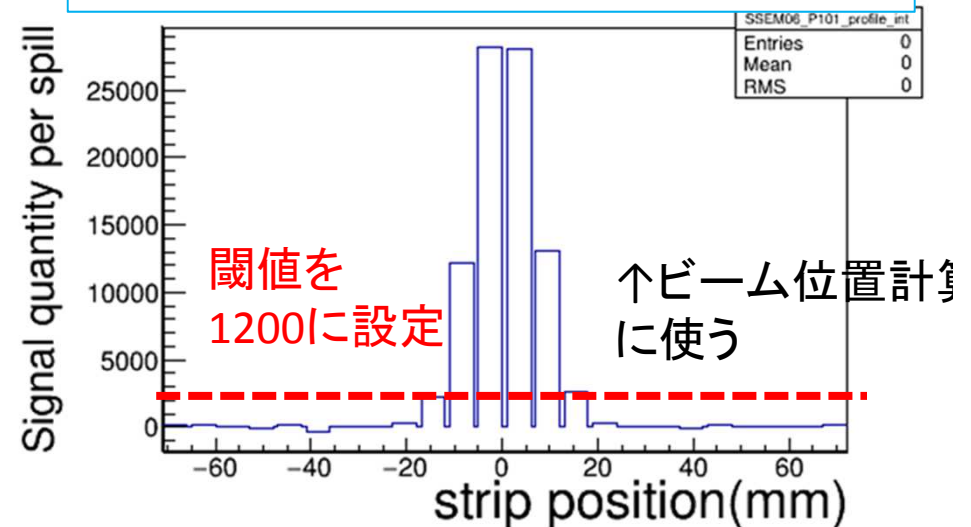
ノイズ波形の取り扱い

Beam profile
(2017/12/12 ダミー信号(陽子ビーム無))



Beam position=9.71mm

Beam profile
(2017/12/12 450kW 陽子ビーム有)



Beam position=0.42mm

- ダミー信号時は1spill間の信号量が小さい
- 確実にダミー信号を落とせるように閾値を設定し...

⇒閾値を超えたstripの信号量のみをビーム位置計算に使用する
ように位置計算firmwareを改良

改良したfirmwareの動作シミュレーション

改良したfirmwareの動作シミュレーションを行った。(2017/12/12のデータを使用)

陽子ビームの event番号	T2K実験の offline解析の ビーム位置 (mm)	改良したfirmwareの 動作シミュレーションの 計算結果(閾値有) (mm)	2017/12/12 firmwareのビーム位置 (閾値無) (mm)
5(陽子ビーム無)	解析しない	-1	9.71
20	0.86	0.92	0.42
30	0.07	0.01	-0.16
40	1.20	1.30	1.83
50	0.62	0.68	0.17
60	0.77	0.79	0.07

⇒Interlock信号の誤発報の防止と,現在の計算手法と±0.1mmの範囲で一致したことを確認した。

目次

1. ニュートリノ振動について
2. T2K実験について
3. PAPILLON BOARDの動作試験報告
4. 動作試験をふまえたFirmwareの改良
5. まとめ

陽子ビーム位置検出回路⇒“PAPILLON”と命名。
→beam **P**osition **A**nd **P**rofile interLock m**O**dule
for **N**eutrino experiment



まとめ

- ニュートリノでのCP対称性の破れの検証のため、T2K実験では、ニュートリノビームの高繰り返し化を計画している。
- 陽子ビームの位置をリアルタイムで検知し、位置がずれていた場合はInterlock信号を発報できるモジュール(PAPILLON)及びfirmwareの開発を行った。
- 動作試験を行い、モジュールに要求される機能の検証を行った。
 - 位置計算の処理速度は十分に要求を満たしていることが分かった。
 - 位置計算手法については、信号のペデスタルの問題と、ノイズ波形の取り扱いの問題が発覚したため、firmwareの改良を行った。
- 要求される機能を満たしていることが確認できたため、

2018年3月9日からのT2KビームランにPAPILLONボードをインストールする予定である。

BACK UP

開発スケジュール

		offline解析	回路開発		firmware開発		動作試験	
2015	Sep	1つの陽子ビームランを用いた解析						
	Oct							
	Nov							
	Dec							
2016	Jan							
	Feb							
	Mar							
	Apr							
	May		回路図製作 (ver.1)	ボードレイアウト製作 (ver.1)				
	Jun							
	Jul							
	Aug				ビーム位置計算 firmware開発			
	Sep							
	Oct	プロトタイプ(ver.1)製作						
	Nov	複数の陽子ビームランを用いた解析					ボード動作試験 (ver.1)	
	Dec							
2017	Jan							
	Feb						実ビーム試験(1)	
	Mar					実ビーム試験(1)のデータを用いた firmwareのデバック		
	Apr							
	May	回路図製作 (ver.2)	ボードレイアウト製作 (ver.2)					
	Jun							
	Jul							
	Aug	プロトタイプ(ver.2)製作		ver.2に向けた fimrwareの改良				
	Sep							
	Oct					ボード動作試験 (ver.2)		
	Nov					実ビーム試験(2)のデータを用いた firmwareのデバック		
	Dec					実ビーム試験(2)		

CP対称性の破れ

- Quark
 - CKM matrix(Cabibbo-Kobayashi-Masukawa)によって, CP対称性の破れを観測
 - 宇宙でのバリオンの非対称性
- Lepton
 - PMNS matrix(Pontecro-Maki-Nakagawa-Sakata)でCP対称性の破れが分かるのでは??



ニュートリノ振動測定でleptonでのCP violation を探ろう！

CP対称性の破れ

- C (charge conjugation transformation: 荷電共役変換)
 - 粒子を反粒子へ反転する
- P (parity conjugation transformation: 荷電共役変換)
 - 空間反転を行う

上記の変換を同時に行うことをCP変換といい、CP変換を行い物理的に変化する
とき、対称性が破れているという。

CP対称性の破れを探索することで、現在の宇宙における物質と反物質の非対称
性を説明することができると期待されている。

=ニュートリノ振動と反ニュートリノ振動の振動確率の差を探している。

T2K実験のビーム増強

	現在	目標
Beam power[MW]	0.42 (0.47)	1.3
# of proton per pulse	2.2×10^{14} (2.4×10^{14})	3.2×10^{14}
Rep.Time[sec]	2.48	1.16

Beam power

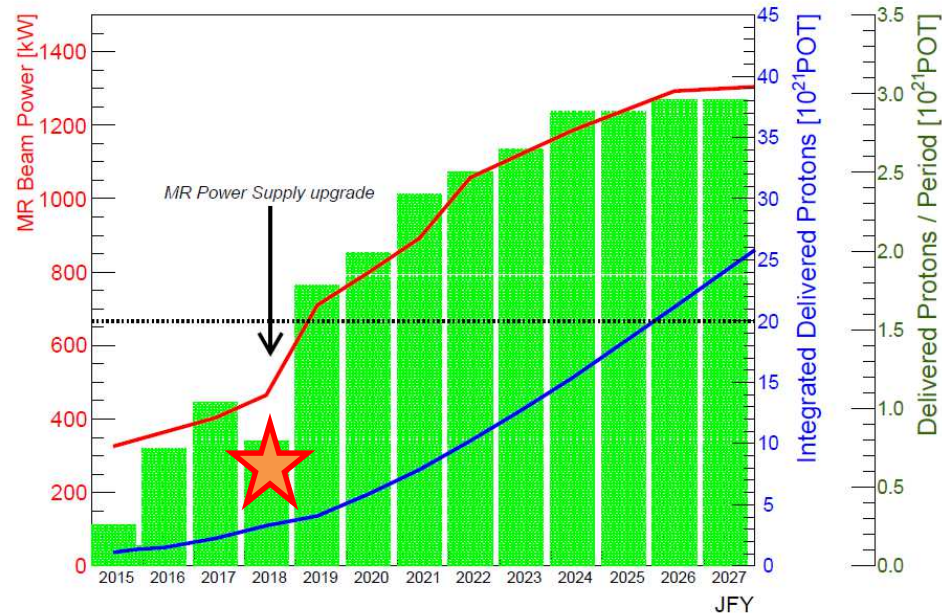
$\propto \# \text{ of proton per pulse} * 1/\text{Rep.Time}$

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

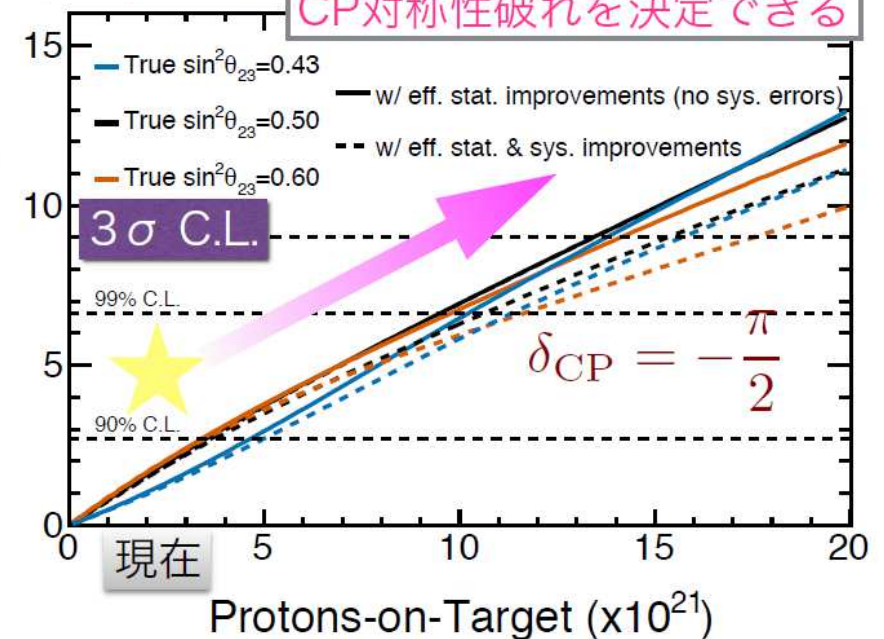
$$\text{Ppp} = \frac{3.2}{2.2} \sim 1.45$$

$$\text{Beam power} = \frac{1.3}{0.42} \sim 3.1$$

安全運転にPAPILLON
が役に立つ!



$\Delta \chi^2$ to exclude $\sin \delta_{CP}=0$

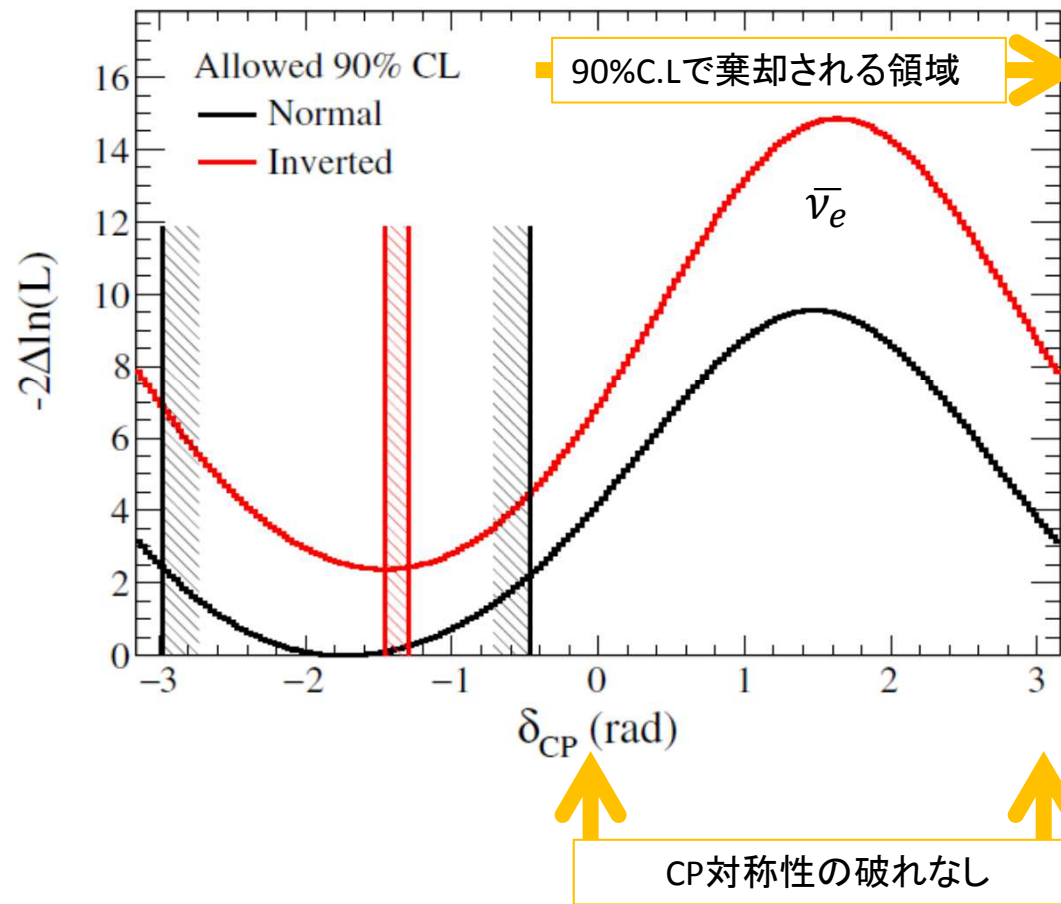


T2K実験の最新結果

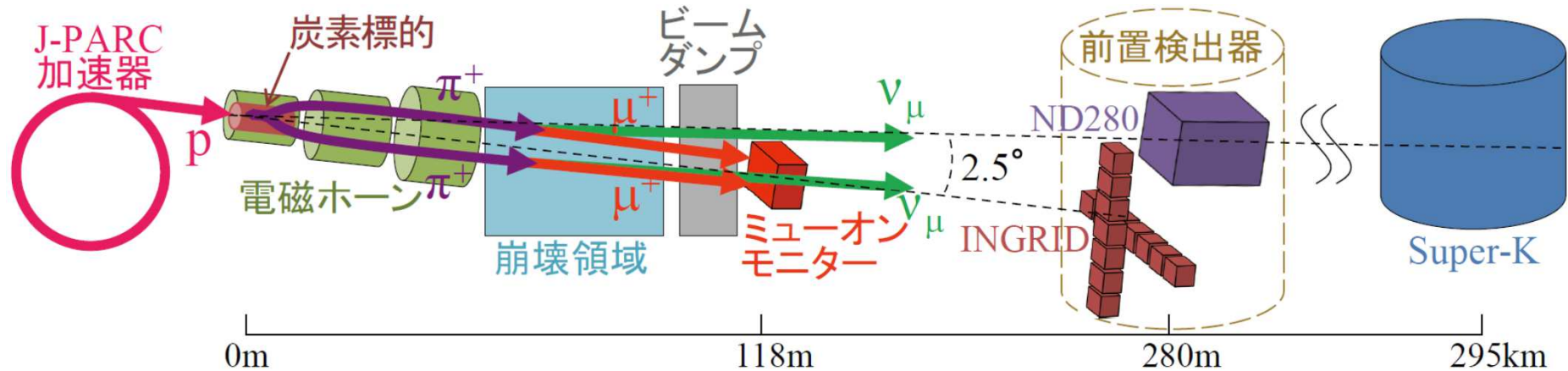
$$\delta_{CP} = [-2.95, -0.44](NH)$$

$$= [-1.47, -1.27](IH)$$

実験データとの整合性(対数尤度)
(→値が大きいほどデータと整合しないことを表す)



T2K実験のニュートリノ検出器



1. J-PARCの加速器で陽子ビームを生成
2. 陽子ビームを炭素標的に当てて、ニュートリノビームを生成
3. ND280, INGRIDで振動前のニュートリノビームを観測
4. SKで振動後のニュートリノビームを観測
5. 3と4の結果を比べて、ニュートリノ振動を計測

T2K beam line

Off axis beam について

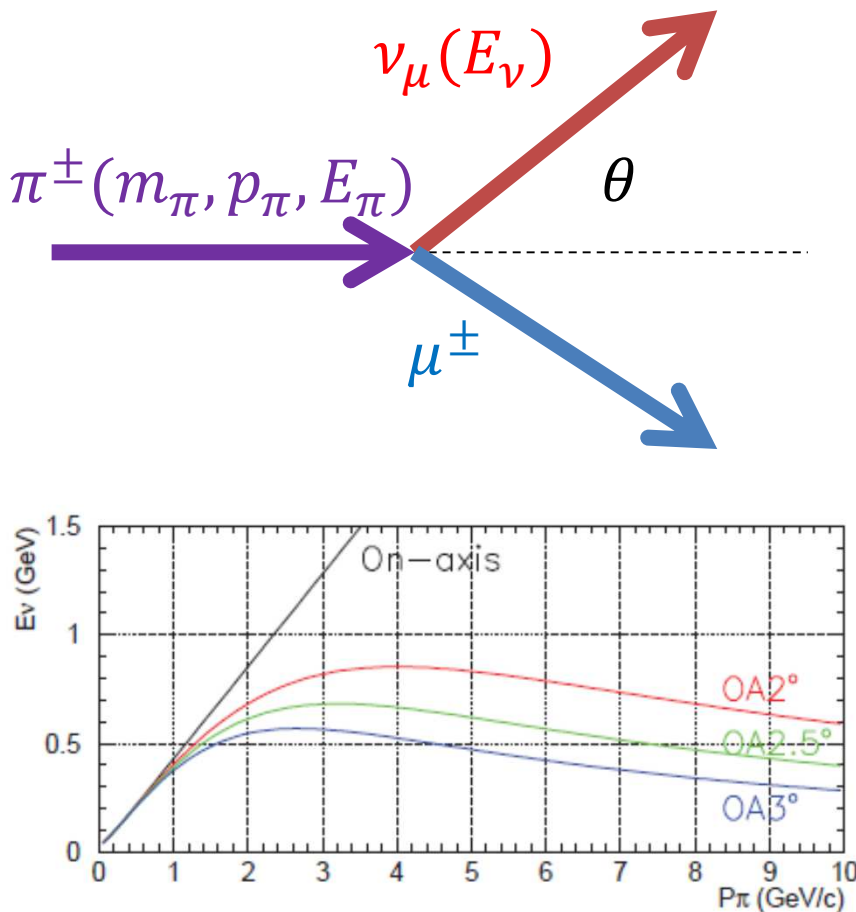
相対論的運動方程式を解くと

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos\theta)}$$

⇒ニュートリノビームの角度 θ が決まれば、エネルギーを決めることができる。

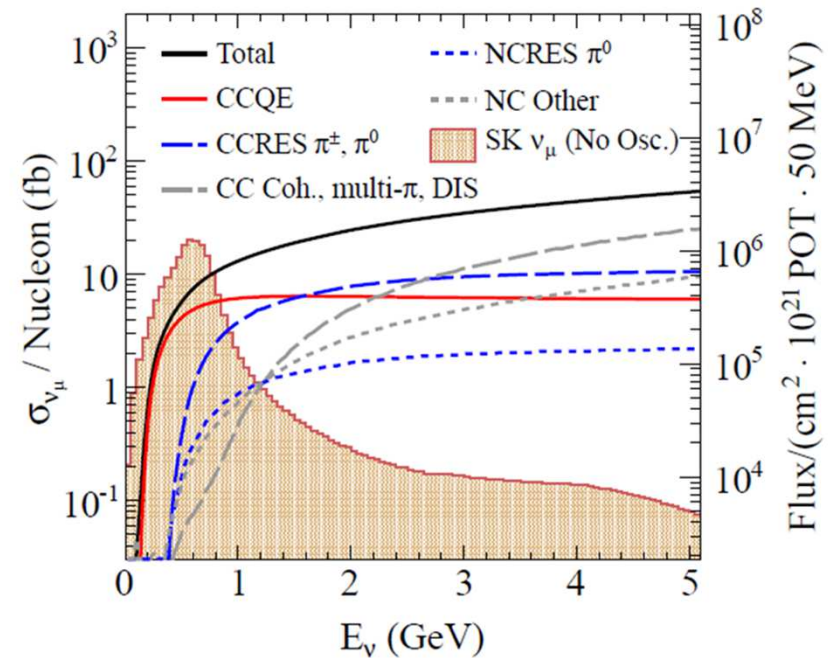
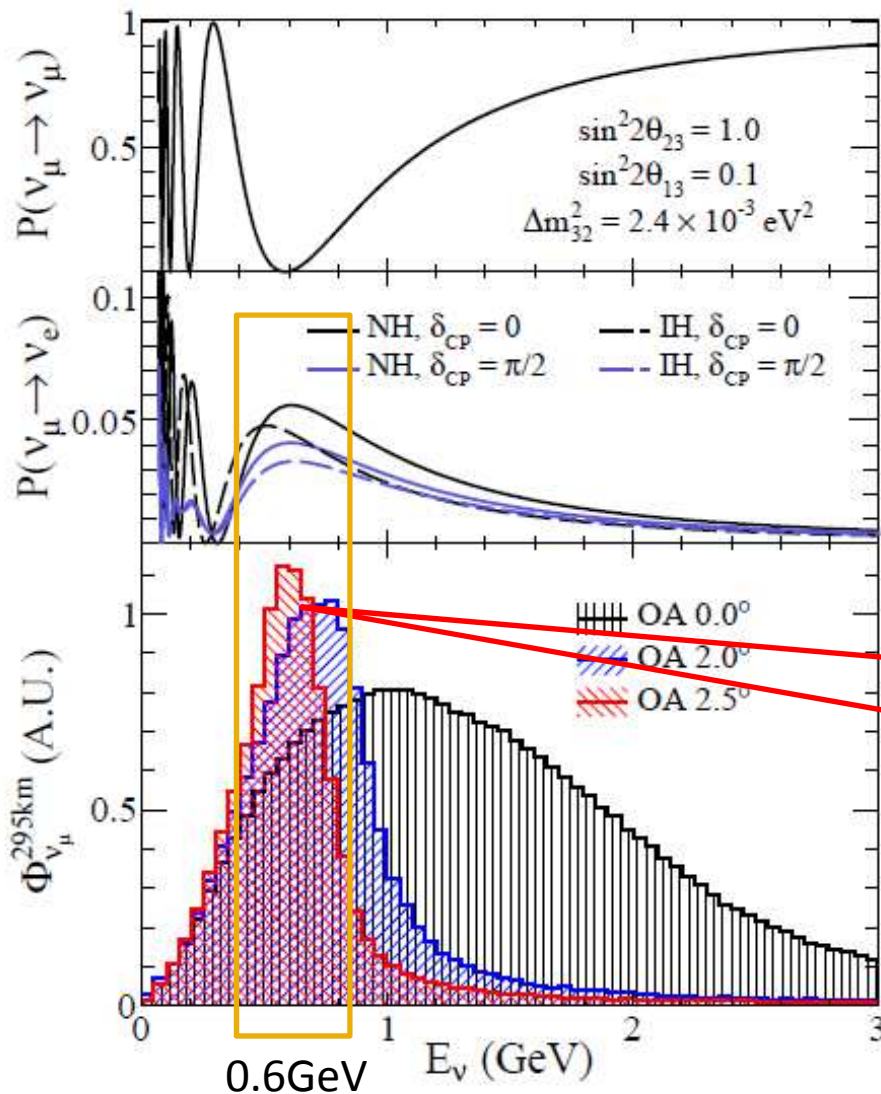
$\theta = 0^\circ$ p_π の依存大きい

$\theta = 2.5^\circ$ p_π の依存が小さい



⇒親粒子の運動量が広い範囲に分布していたとしても、親粒子の収束軸からずれた方向においては狭いエネルギーに集中したエネルギーを得ることができる

T2K beam line Off axis beam について



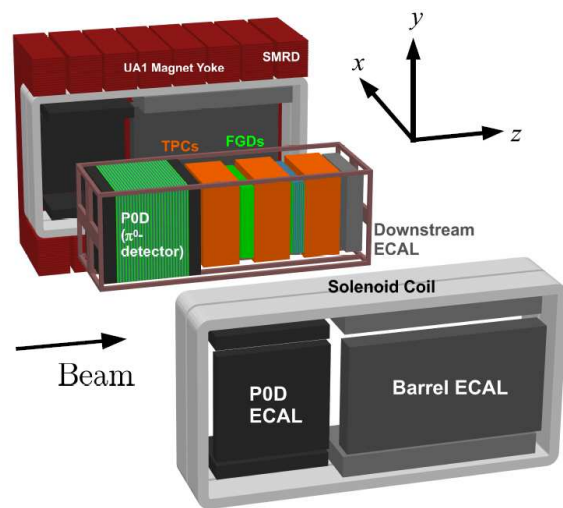
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \cong \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu}$$

ビーム中心から2.5° ずらすことで、ナローバンドなビームを実現できる

より効率的にニュートリノ振動が測定できる。

T2K beam line

前置検出器 ND280



ND280 (Off axis)

UA1 Magnet

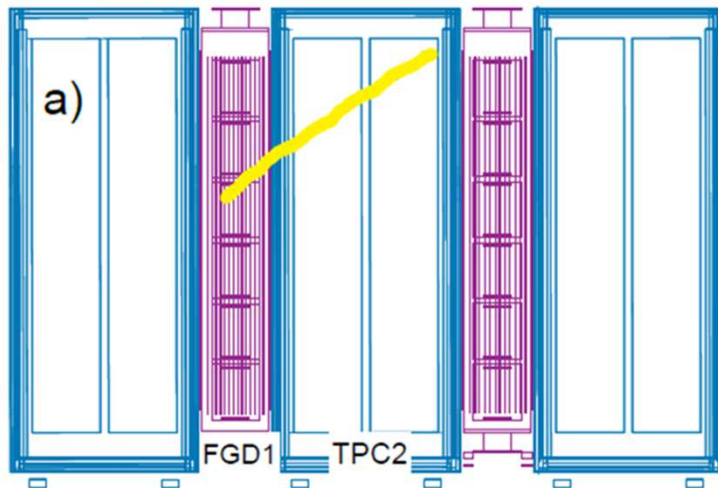
飛跡を曲げる

TPC(Time Projection Chamber)

飛跡から運動量を測定

FGD(Fine Grained Detector)

反応点付近の粒子の検出



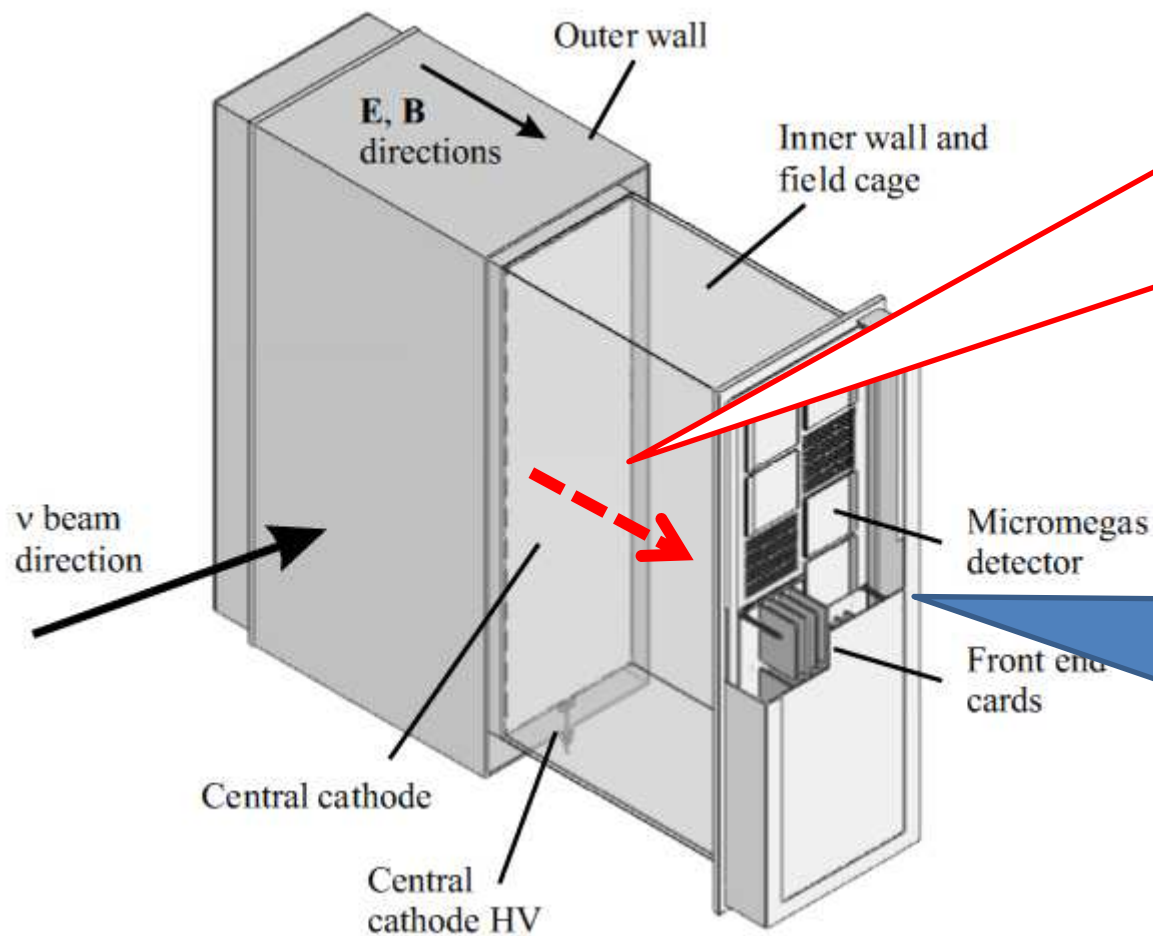
→SKと比べるため

flux, エネルギースペクトル, 反応

断面積の確認

ニュートリノ振動解析ND280

TPC



荷電粒子がガス中を通過すると、**電離電子**を生成。電離電子の到達時間を測定することで、垂直方向の飛跡を検出

信号読み取り面に電離電子が到達することで平面方向の飛跡を検出

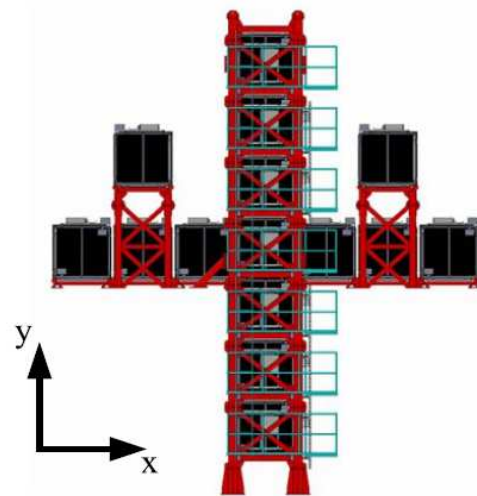
Inner box Ar gas
Outer box CO_2
が充填されている。

T2K beam line

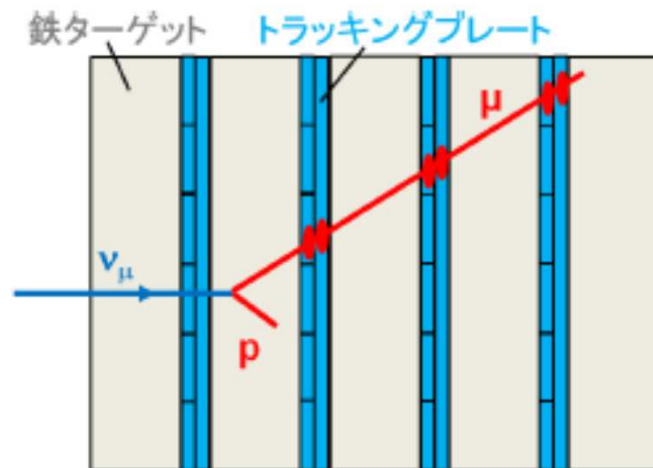
前置検出器 INGRID

INGRID

(On axis Interactive Neutrino GRID)

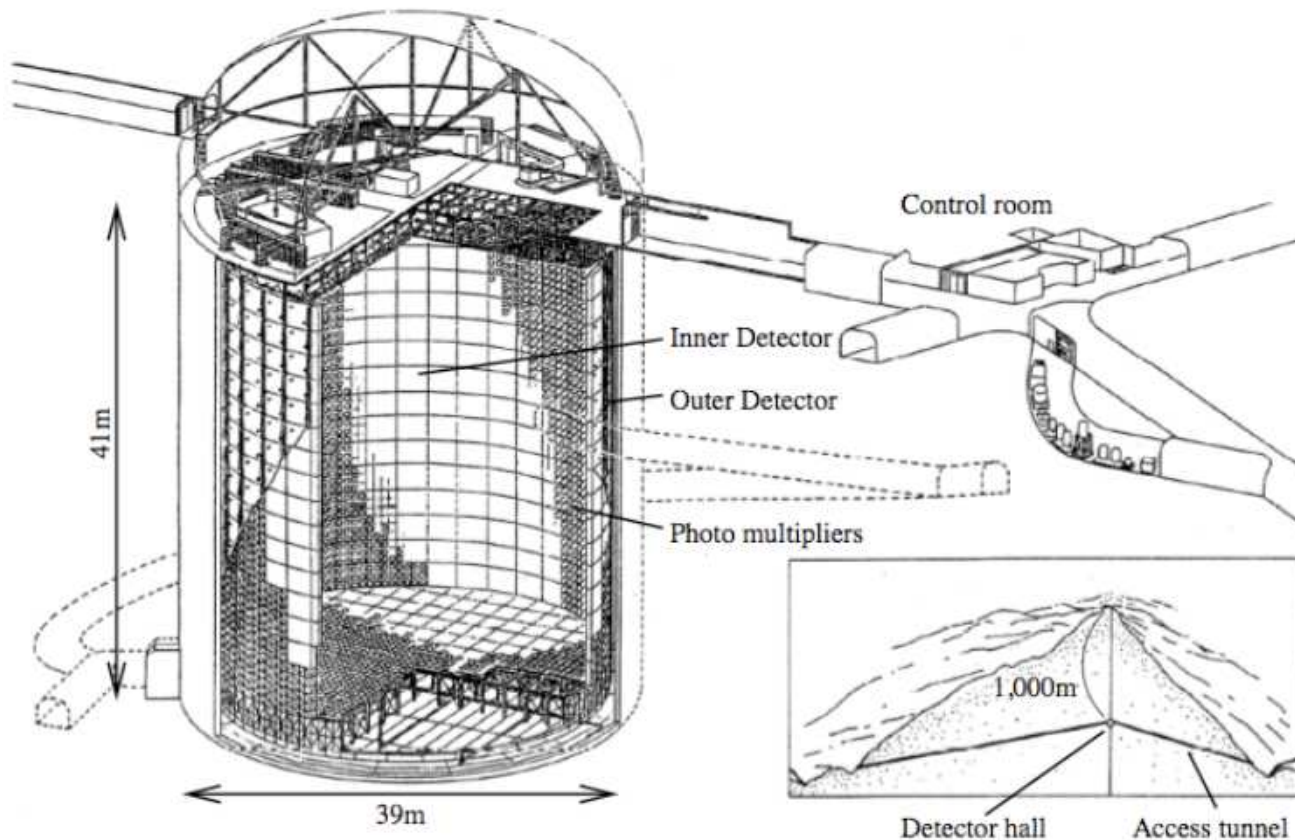


鉄9層(ニュートリノを反応させる)
+シンチレーター11層(ビームの場所の特定)
のサンドイッチ構造
→ビームの方向, 中心等を測定



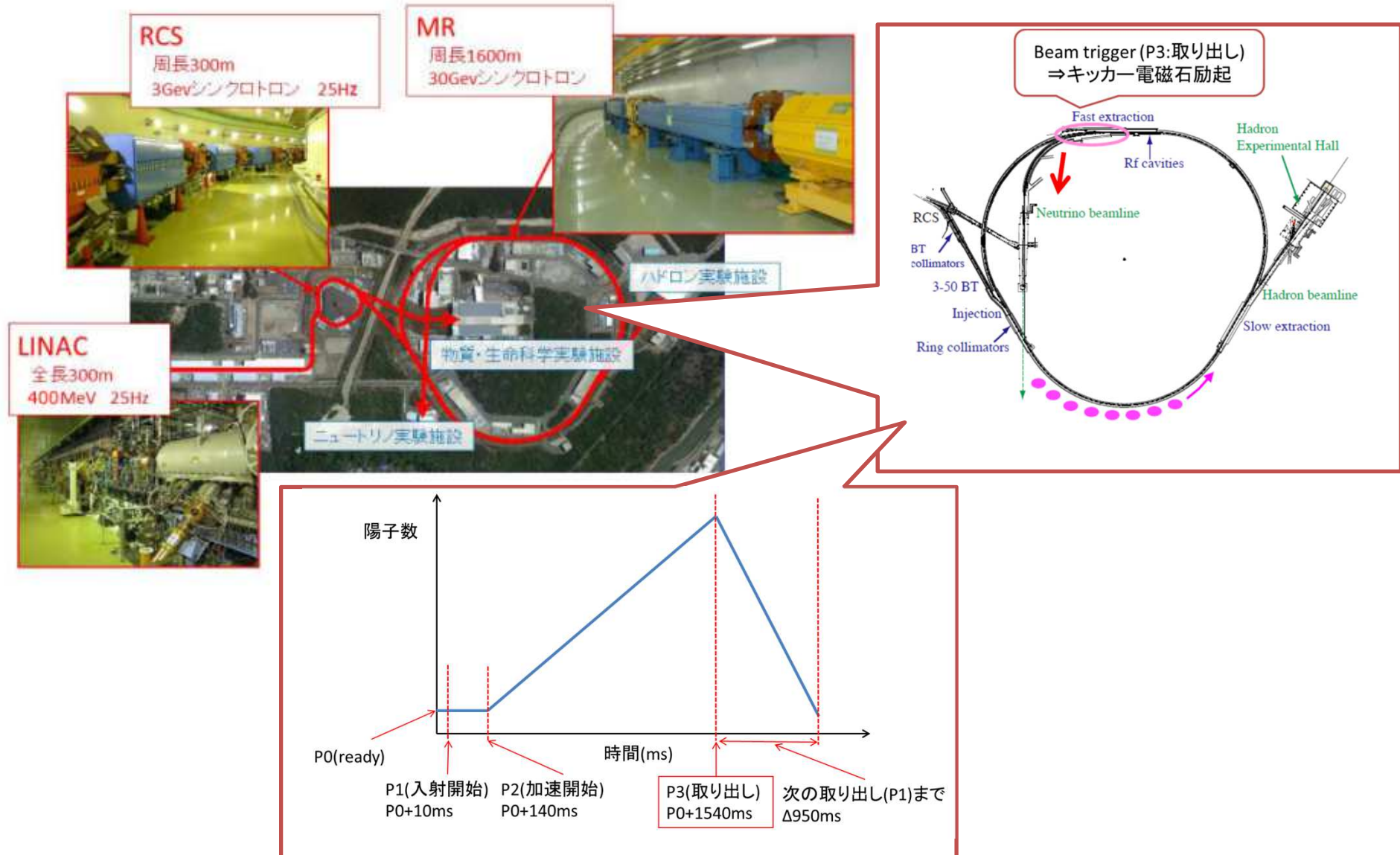
T2K beam line

後置検出器 SK(Super-Kamiokande)

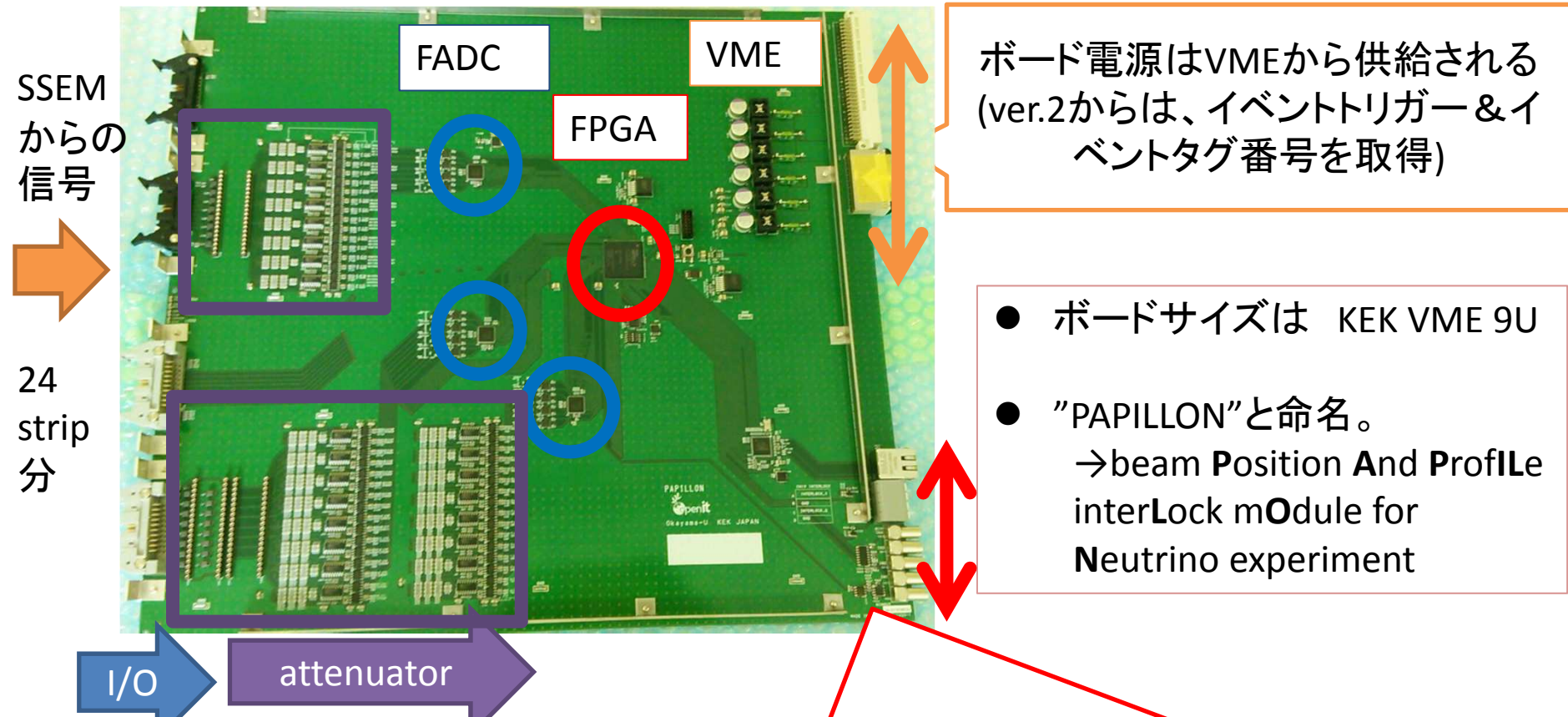


- 50ktの水チェレンコフ検出器
- Inner Detector(ID)+Outer Detector(OD)からなる。
- 有効質量Fiducial Volume(FV)は円柱状で質量22.5kt
- ニュートリノ相互作用による荷電粒子からのチェレンコフ光をPMTで検出

J-PARCの構造



回路の構造 ~基板の構造~



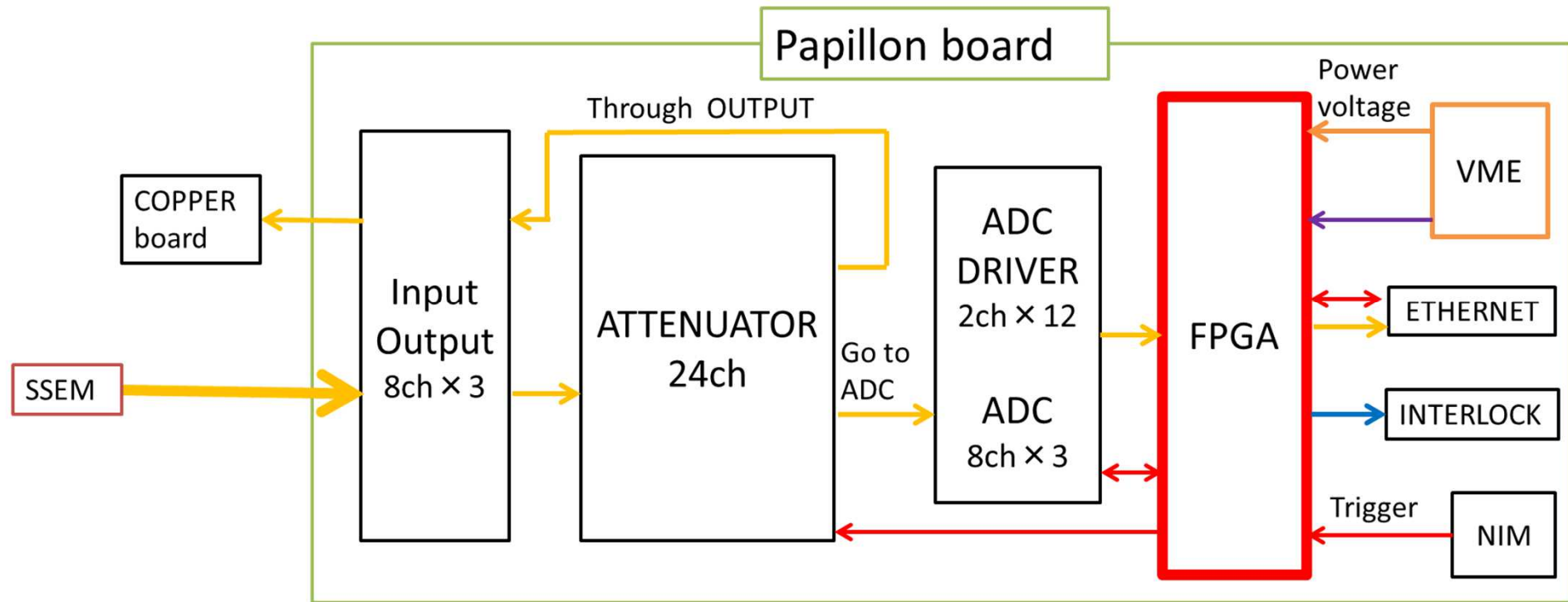
Ethernet: 計算機とのデータ通信及びボードの制御

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

回路の構造 ~基板の構造~



FPGAとは

FPGA(Field Programmable Gate Array)の略で,
PLD(Programmable Logic Device)の一種。

デジタル回路を簡単に集積化できるのが特徴。

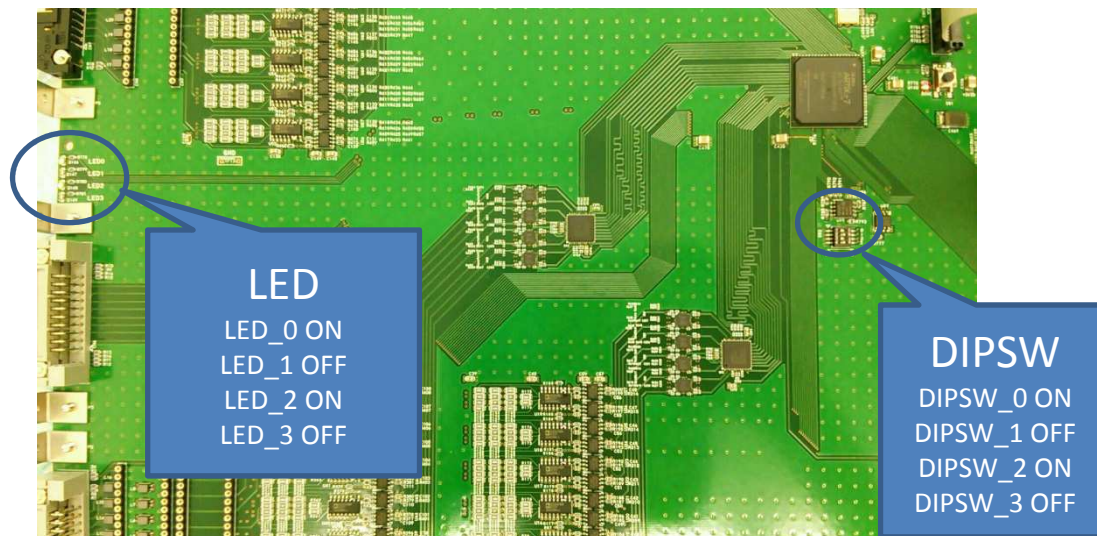
- 集積回路
 - デジタル回路のみ実装可能
 - 2×2cm程度の大きさ
- ユーザーが回路情報を書き込んで使用する
 - ソフトウェアのように使用できる
- デジタル信号処理に使われる

firmware

- 電子機器に組み込まれたハードウェアを制御するためのソフトウェアで, 集積回路(IC)に書き込んで, 機器に組み込む。
- 電子機器本体に所望の動作をさせる。

HDL(hardware description language)

- 集積回路を設計するためのコンピュータ言語
- 回路の設計, 構成を言語で記述する
- 処理を検証するシミュレーションができる。



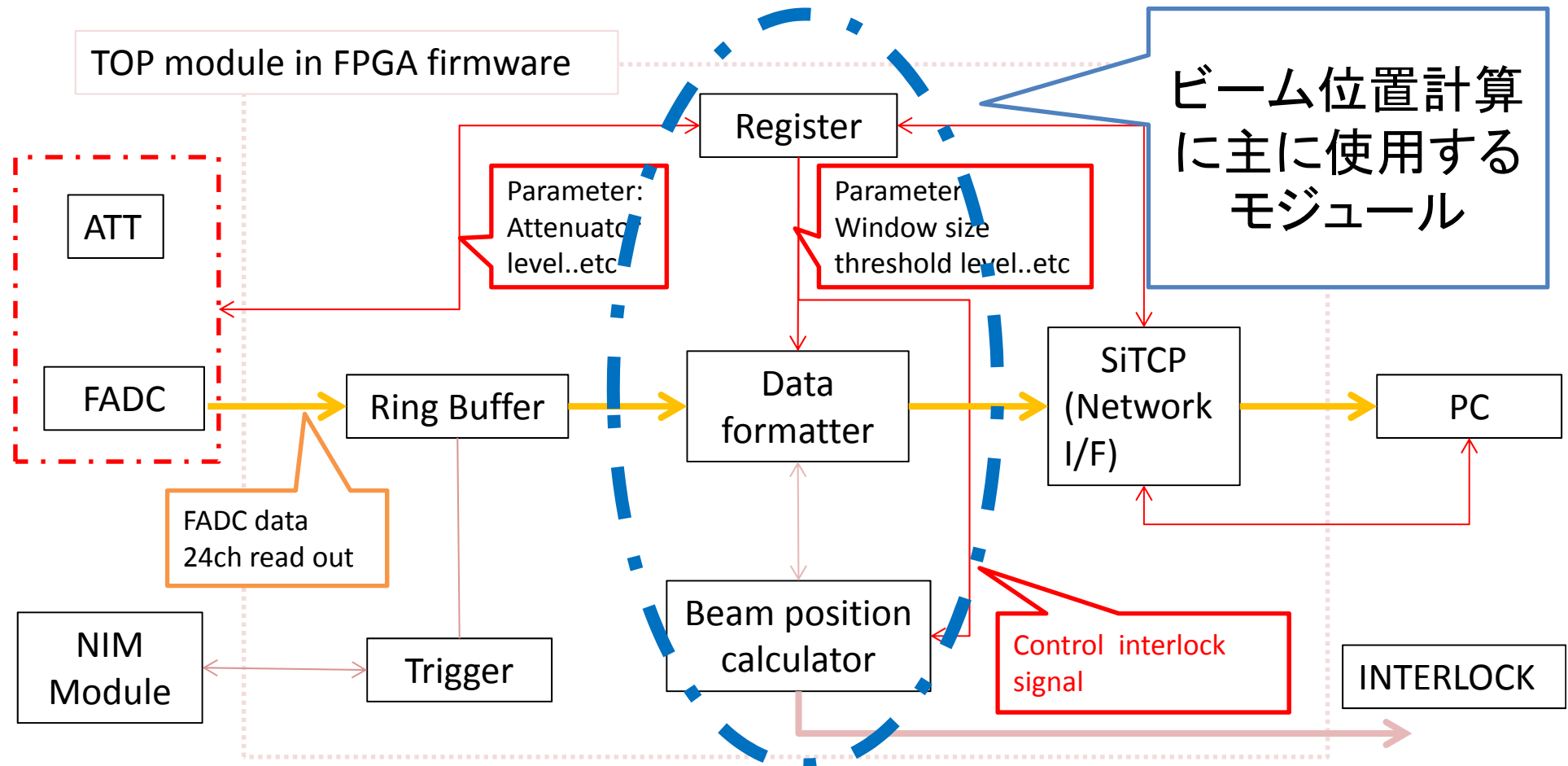
```
module LEDtest(  
  output LED_0,  
  output LED_1,  
  output LED_2,  
  output LED_3,  
  input DIPSW0,  
  input DIPSW1,  
  input DIPSW2,  
  input DIPSW3  
);  
  assign LED_0 = DIPSW0;  
  assign LED_1 = DIPSW1;  
  assign LED_2 = DIPSW2;  
  assign LED_3 = DIPSW3;  
endmodule
```

FPGAに必要な機能

- 各ビーム取出し毎に
 - モニターの信号波形をFPGAに読み込み(FADC dataの書き込み)
 - そのデータを使ってビーム位置と幅を計算(計算法はいくつか考える)
 - 位置と幅それぞれに対して, 閾値(現在 $>1.5\text{mm}$)と比較して閾値を超えていたらインターロック信号を出す
- レジスタ操作で閾値を決定
- レジスタ操作で強制的にインターロック信号を出せるように
- レジスタ操作でインターロック信号をクリアする
- Attenuatorの伝達係数の選択

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



Data formatterについて

1.ADCデータ書き出し
12bit*24ch =288bit

ADC CH0
ADC CH1
...
ADC CH22
ADC CH23

2データ格納
8bit*36

ADC CH0 8bit

3.データ読み出し
12bit*24ch*2

0000	ADC CH0 4bit
ADC CH0 8bit	
0000	ADC CH1 4bit
ADC CH1 8bit	
.....	

ROM2で格納したデータを読み、CH0から順にPCに書き出す

呼び出すデータ数が2の累乗でないため、データの呼び出しを工夫する必要がある。

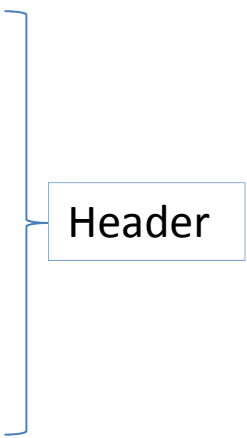
ROMの例

din	dout
[0]	[0]
	[1]
[1]	[2]
	[3]

Din	dout
00	0000
01	0010
10	0100
11	1000

2bitで4つのアドレス
=6bitで64個のアドレス
不必要なアドレスが存在する

31bit	23bit	16bit	8bit	0bit
Unused 0xFFFF5555				
Mode 0x01	Header ID(レジスタで設定可)default 0x012345			
Data length(Data部分のbyte長)				
Trigger count(陽子ビームのevent番号)				
0x0000		陽子ビーム位置(16bit)		
0x00	陽子ビーム幅(32bit)			
0x000000			Interlock(8bit)	
ADC CH0(16bit)		ADC CH1(16bit)		
ADC CH2(16bit)		ADC CH3(16bit)		
...		...		
ADC CH22(16bit)		ADC CH23(16bit)		
ADC CH0(16bit)		ADC CH1(16bit)		
ADC CH2(16bit)		ADC CH3(16bit)		
...		...		
ADC CH22(16bit)		ADC CH23(16bit)		
...		...		



Header

Data

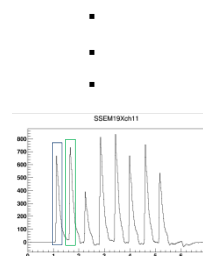
Address	Contents	defaults
0x00~0x03	FPGA projectのversion(4byte)	Projectを更新した日付
0x05	Processing mode number:特に使用しない(2bit)	1
0x06~0x07	Window size:1 eventのサンプル数	640(ADC CLOCK 80MHZの場合)
0x08	Delay:データディレイ数	0
0x0A~0x0C	Packet header ID(3byte)	012345
0x0D	Thinning ADC Data:データの間引き間隔(1byte)	1
0x10	ADC select:ADCのチップ選択(1byte)	0(ADC1)
0x1□	ADC register:ADCのレジスタ	
0x20~0x37	Attenuator level:可変アッテネータレベル 2bit × 24ch	0(1/1)
0x38~0x39	Threshold level:ビーム位置の閾値(2byte)	1.5mm(0x96)
0x3A~0x3B	Offset:ビーム位置のオフセット(2byte)	0.0mm(0x0)
0x3C	Interlock:interlockのリセット・強制発報(2bit)	0
0x40~0x6F	Strip position:SSEMのstripの位置(2byte × 24ch)	

Address	Contents	defaults
0x00~0x03	FPGA projectのversion(4byte)	Projectを更新した日付
0x05	Processing mode number:特に使用しない(2bit)	1
0x06~0x07	Window size:1 eventのサンプル数	640(ADC CLOCK 80MHZの場合)
0x08	Delay:データディレイ数	0
0x0A~0x0C	Packet header ID(3byte)	012345
0x0D	Thinning ADC Data:データの間引き間隔(1byte)	1
0x10	ADC select:ADCのチップ選択(1byte)	0(ADC1)
0x1□	ADC register:ADCのレジスタ	
0x20~0x37	ADC pedestal変更(1900+□)1byte × 24ch	0
0x38~0x3D	Attenuator level:可変アッテネータレベル 2bit × 24ch	0(1/1)
0x3E	Interlock:interlockのリセット・強制発報(2bit)	0
0x3F	Offset:ビーム位置のオフセット(1byte)	0.0mm(0x0)
0x40~0x6F	Strip position:SSEMのstripの位置(2byte × 24ch)	
0x7E~0x7F	Threshold level:ビーム位置の閾値(2byte)	1.5mm(0x96)

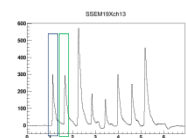
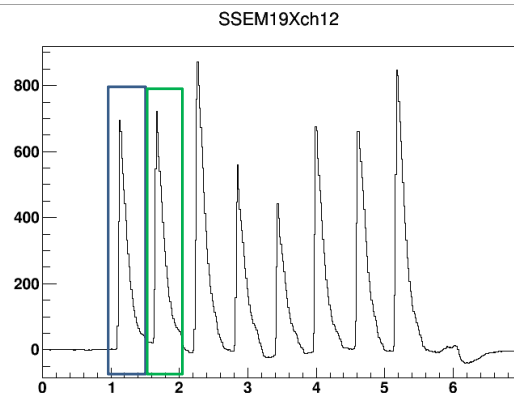
SSEMのbeam position の解析方法

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



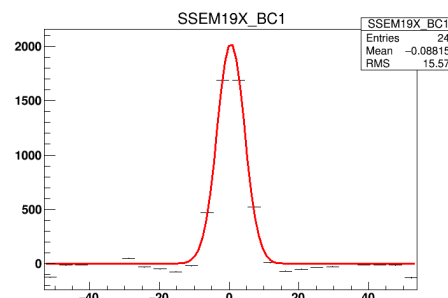
SSEM19Xch12



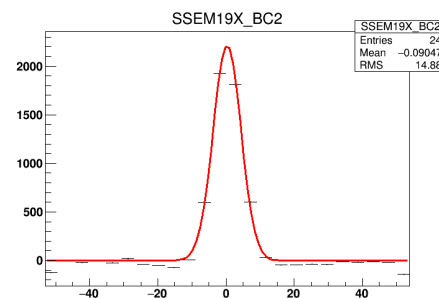
※他のstripも同様に

2.各バンチ毎のbeam profileを作る

BC1(=bunch1)

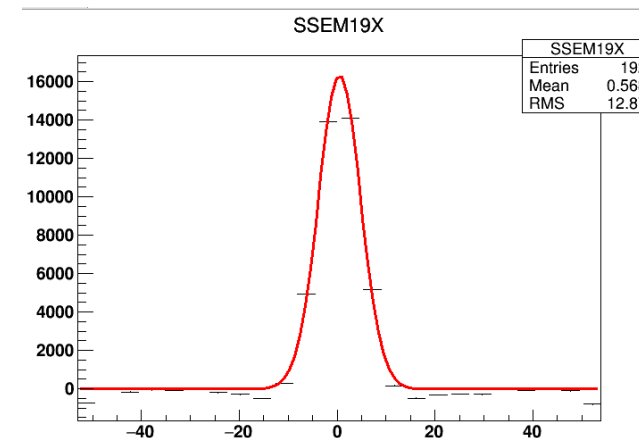


BC2(bunch2)



※同様に8bunch作る

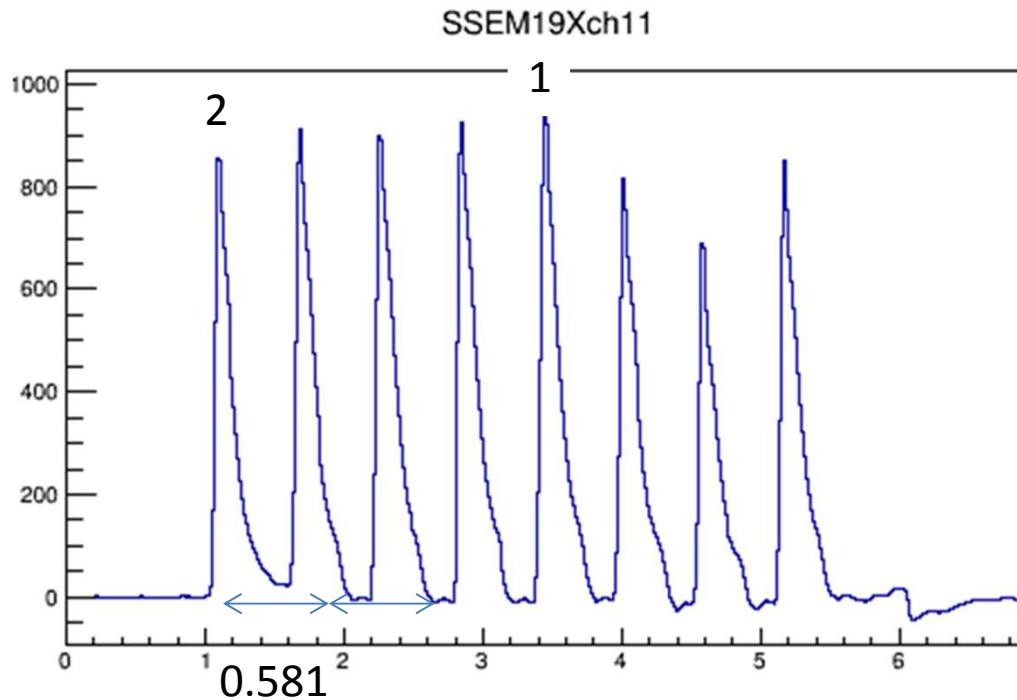
3.バンチ毎のbeam profileを足し合わせたbeam profileをつくる



4.そのbeam profileをfitしてbeam位置を算出



bunchのピークサーチの方法

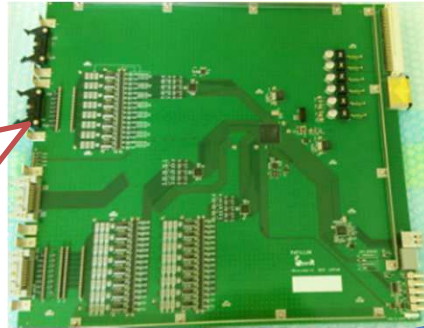


T2K official code study

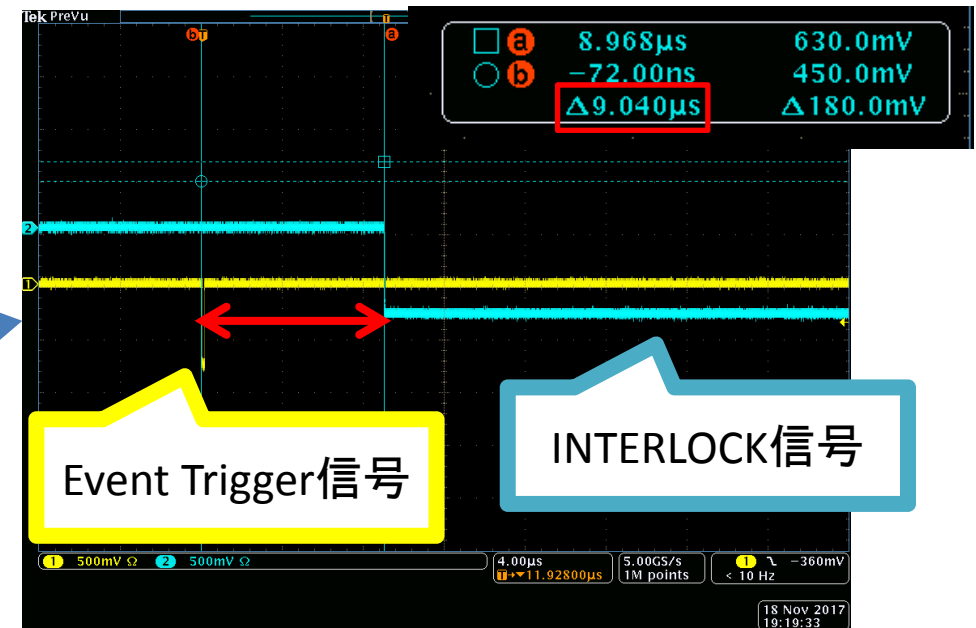
1. Spill間で波形のピークサーチを行う
2. 一番高いピーク位置を決定する
($>0.5 \times \text{highest peak}$)
3. 他のbunchのピーク位置を一定間隔 (0.581micro sec)で決定する
4. peak-5bin~peak+15bin (20 bin)間で積分する

INTERLOCK信号発報時間の確認

23chのみに
テスト信号
(1Vpp)を入れる



トリガー信号とインターロック信号
をオシロスコープで確認



- Interlock信号をNIM OUTから出力されるように設定する。
 - NIMからトリガー信号を入力し、データ取得開始。
 - 23chのみにテスト信号を入れて、位置計算開始。
 - トリガー信号とINTERLOCK信号との差を測定する。
- ⇒ 9.04μsであることが分かった。

⇒ 10ms以内でInterlockを出すのが目標だったため、要求を満たしていることを確認

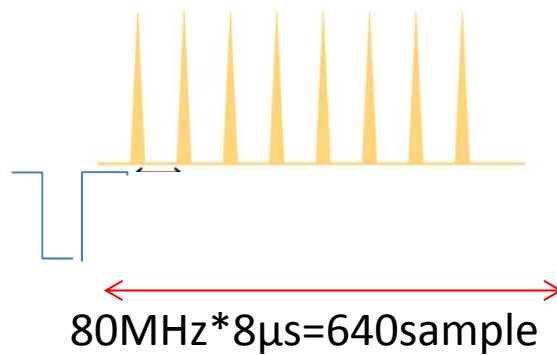
実験のセットアップ

Attenuator board for
SSEM

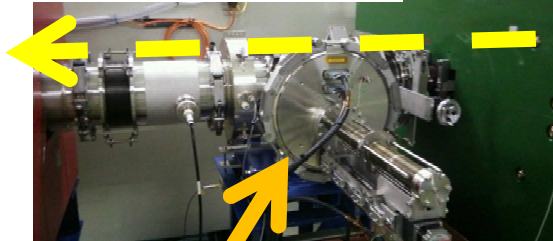
PAPILLON BOARD × 2

KEK VME 9U
±12V, ±5V, ±3.3V

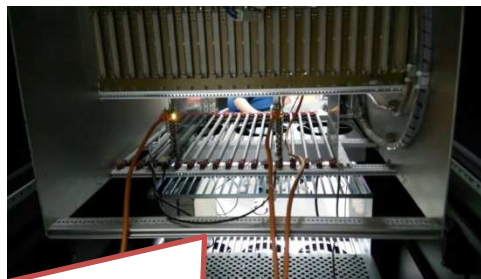
Digital delay generator



陽子ビーム



SSEM



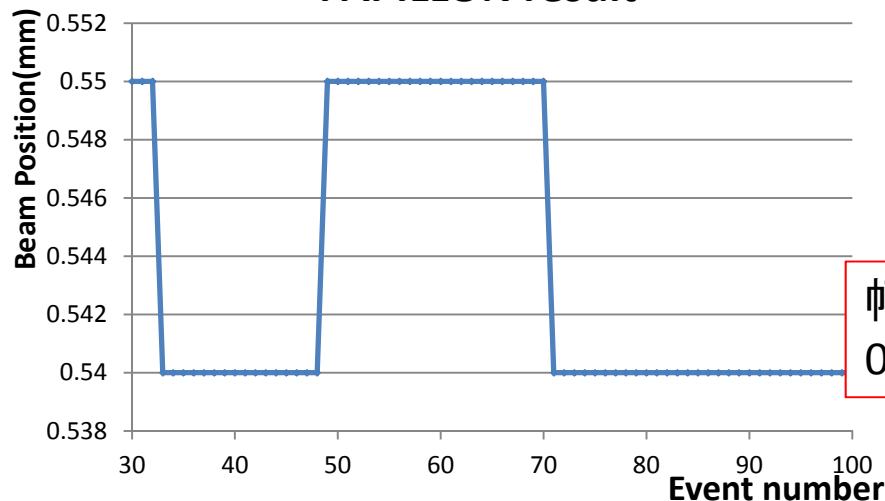
ラックの裏側から、LANケーブル・トリガー信号を挿入(SSEMからの信号データ・計算結果をT2K DAQへ転送)

ビーム位置とfirmware位置計算との相関の確認

実験内容(run番号:run0770055)

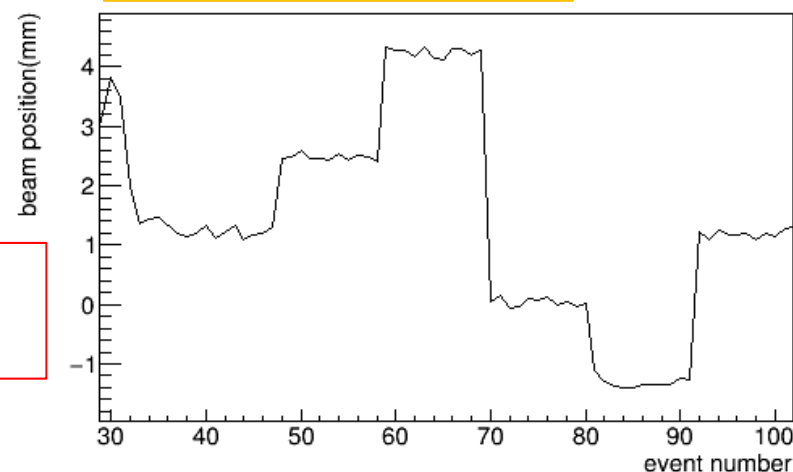
- ビーム強度
 - 40kW (固定)
- ビーム位置
 - Nominal position(event 37~47)
 - Horizontal +1mm(event 48~58)
 - Horizontal +1.5mm(event 59~69)
 - Horizontal -1mm(event 70~80)
 - Horizontal -2mm (event 81~91)

PAPILLON result



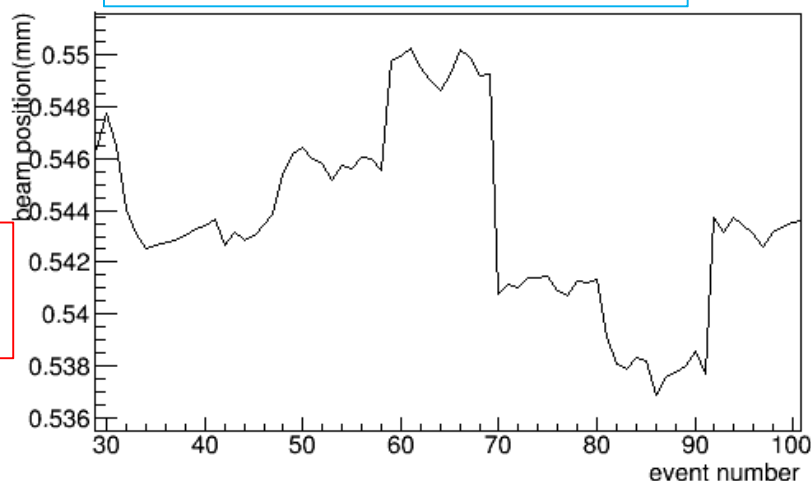
幅
0.018mm

Analysis① T2K official



幅
7mm

Analysis② PAPILLON offline

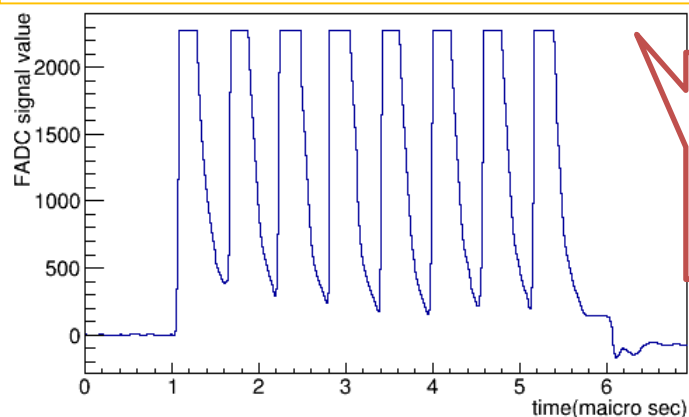


⇒位置の変化に相関はあるが、位置計算の感度が足りない

ビーム強度とfirmware位置計算との関係の検証

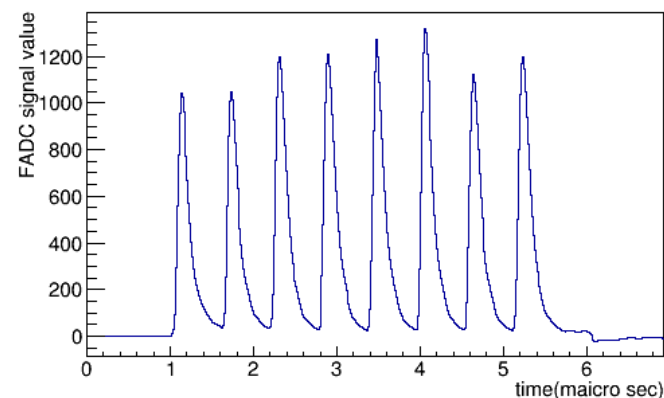
ビーム強度を450kWにして、信号波形の取得を行った。(run番号:run077005)

①COPPERボードからのデジタル波形信号

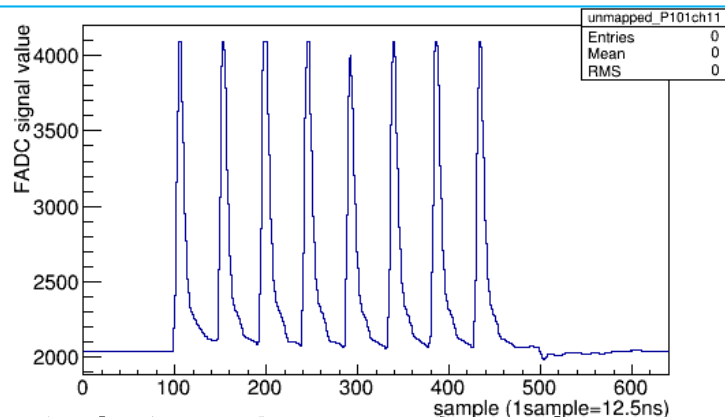


Saturationを
起こしている

①COPPERボードからのデジタル波形信号

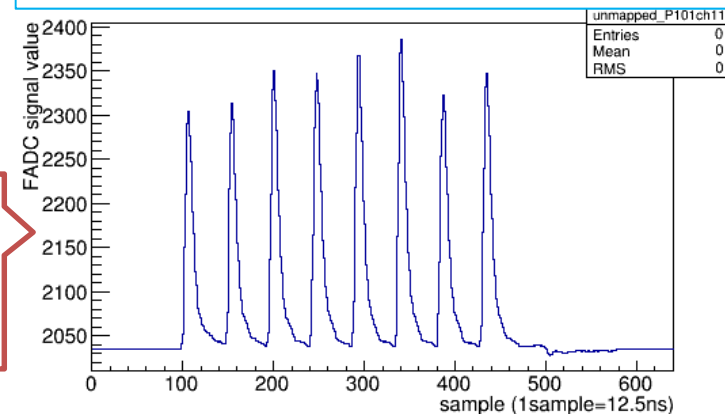


②PAPILLONからのデジタル波形信号



1/8に
減衰

②PAPILLONからのデジタル波形信号



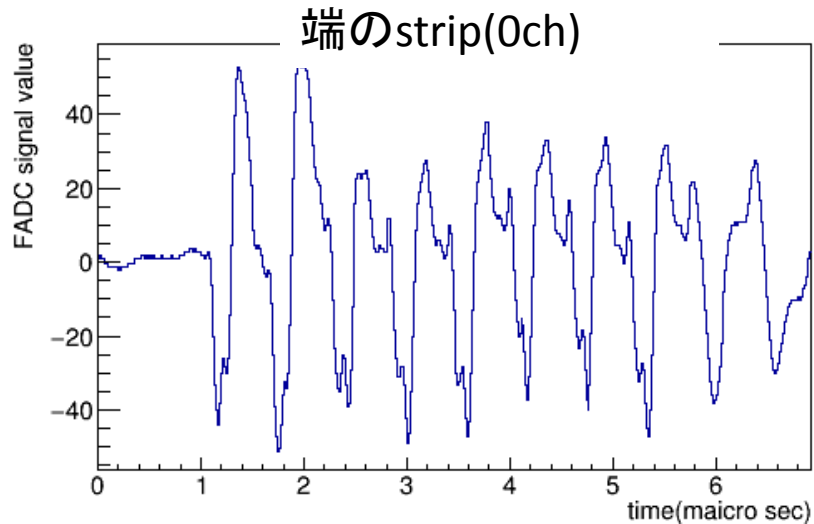
40kW時と
信号レベルが
変わらない

強度を大きくしても可変アッテネータで信号レベルを減衰させる必要がある。

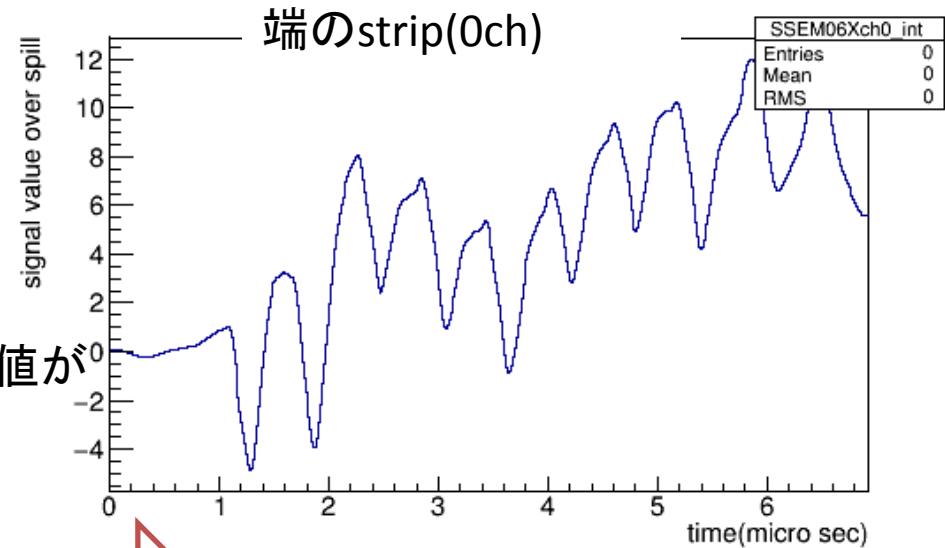
⇒ビーム強度はfirmwareの位置計算に影響を及ぼさない

陽子ビームのrun番号	強度	目的
run0770054	40kW→14kW(2bunch)	setupの確認
run0770055	40kW(8bunch)	ビーム位置とfirmware の計算位置との相関の 確認
run0770059	450kW→260kW(8bunch)	ビーム強度とfirmware の計算位置との関係の 検証
run0770060	450kW(8bunch)	T2K beam lineのbeam tuning(動作試験のデ バック用のデータ取得)
run0770061	450kW(8bunch)	
run0770062	450kW(8bunch)	T2K beam lineの陽子 ビームの軌道の確認 (動作試験のデバック用 のデータ取得)

各stripの信号量計算 COPPERデータ

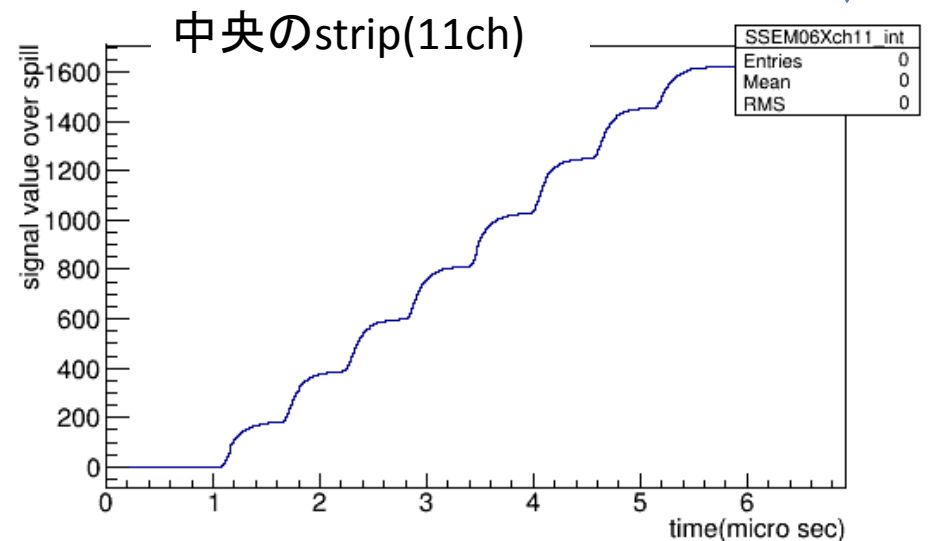
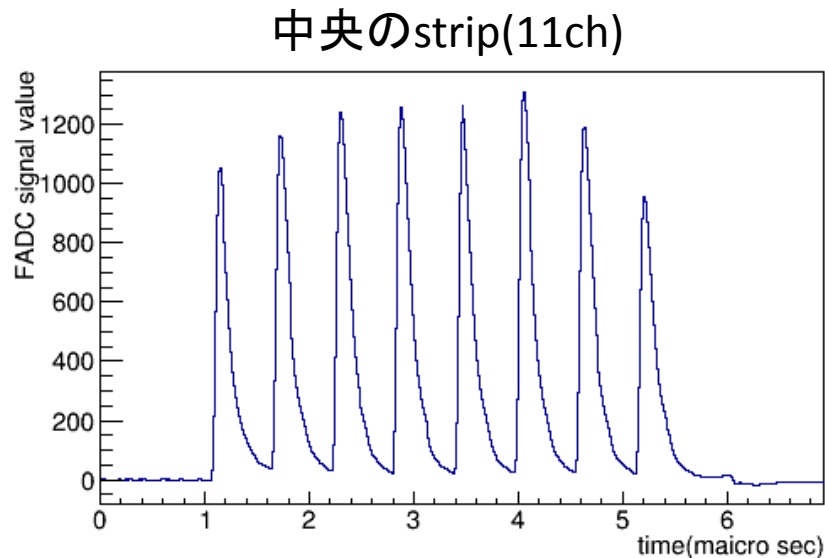


負の値がある

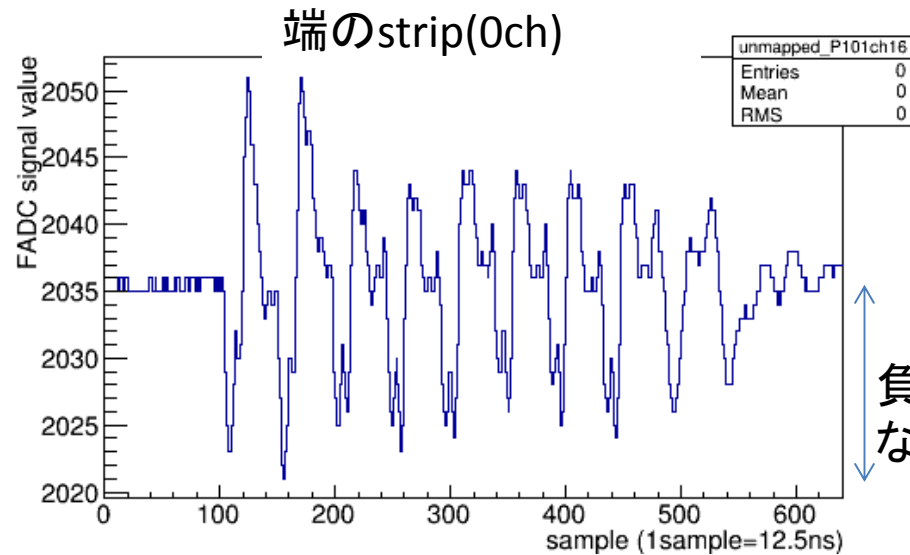


累積積分

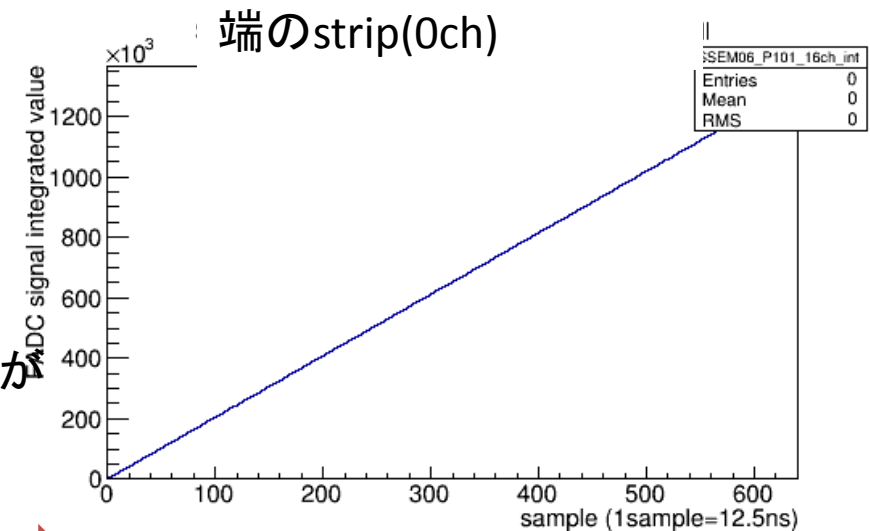
信号量の差 大きい



各stripの信号量計算 PAPILLONデータ

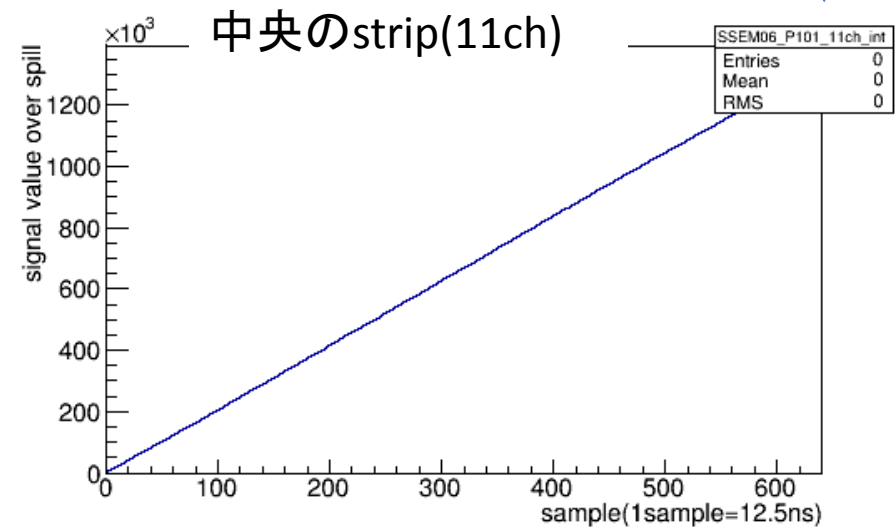
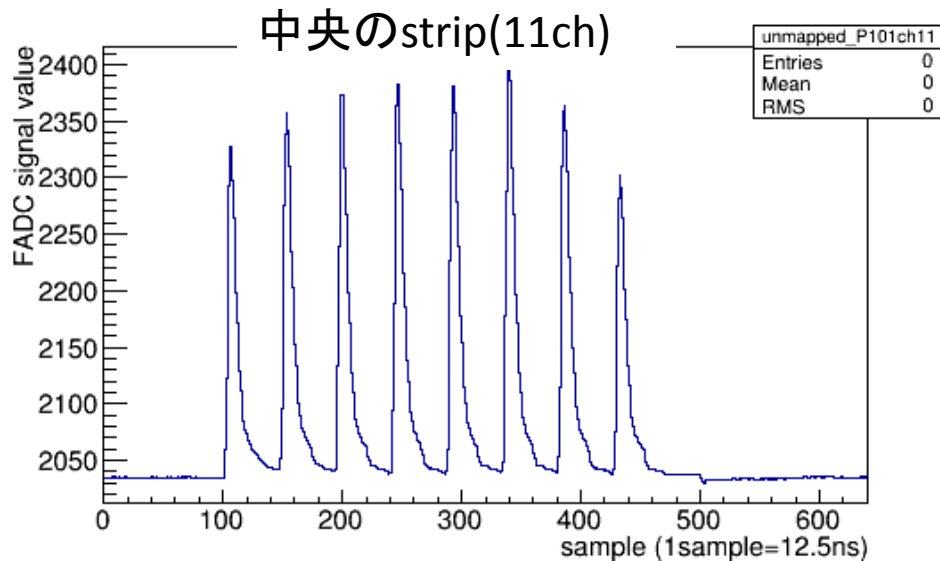


負の値がない



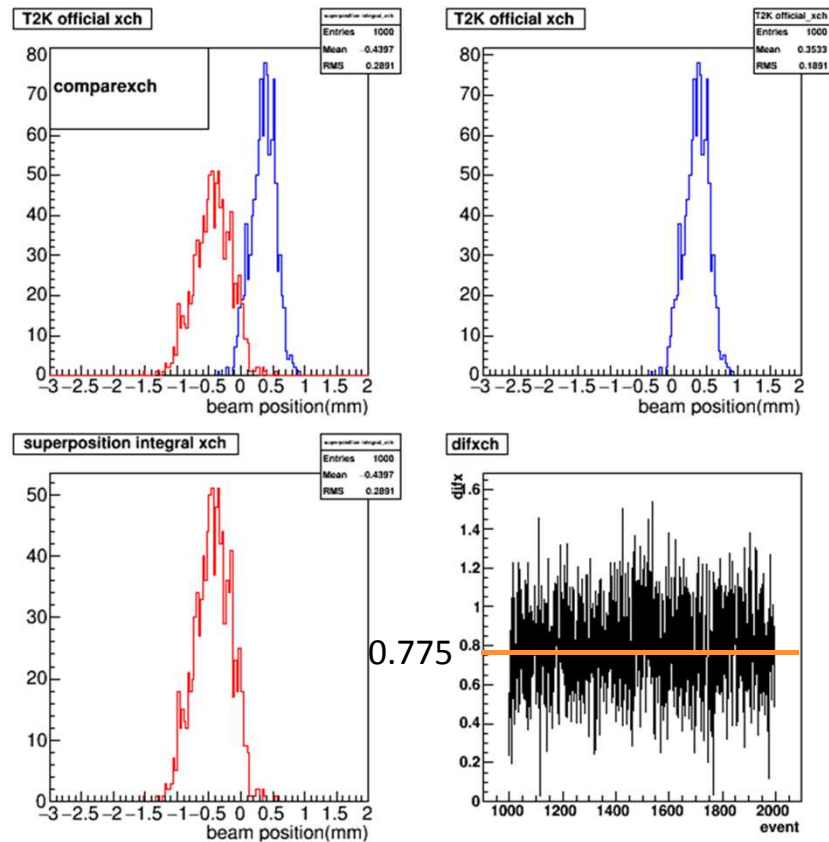
累積積分

信号量の差がほとんどない

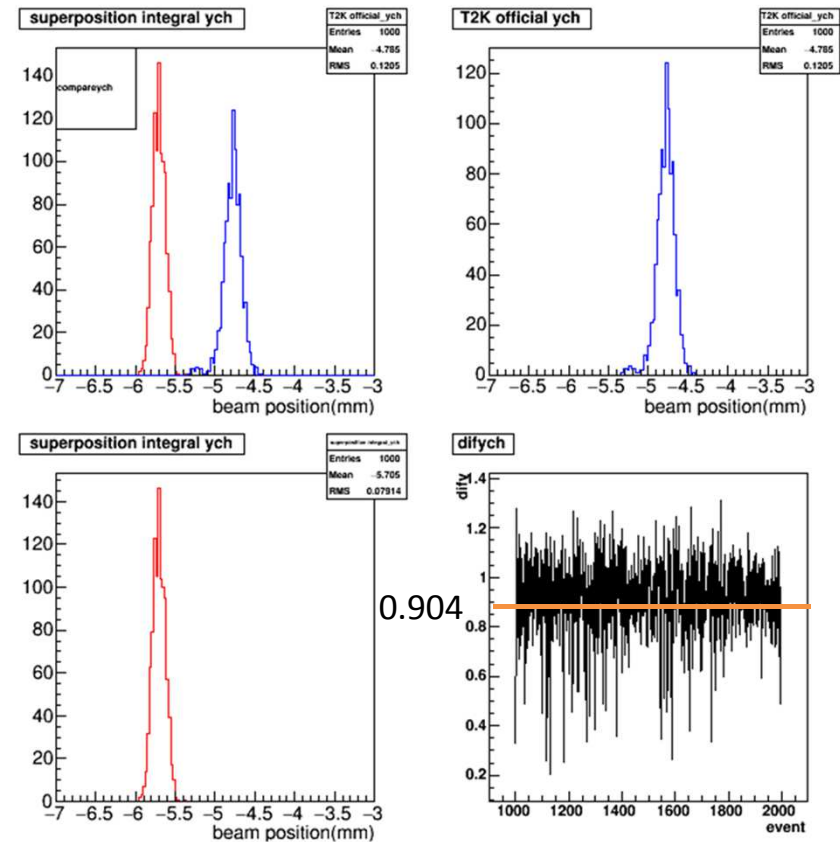


Run630083(May,30 2015 335kW physics run) のビーム位置解析結果

Horizontal SSEM19

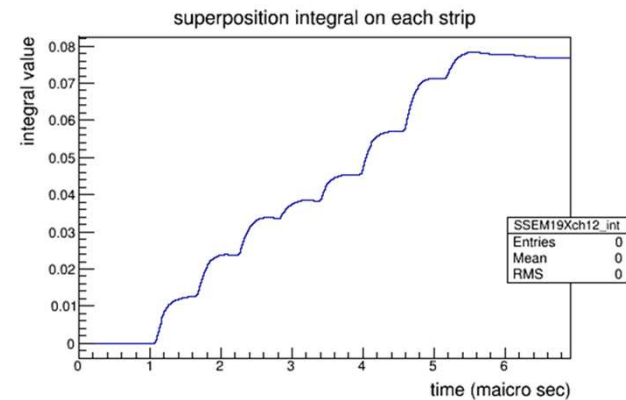
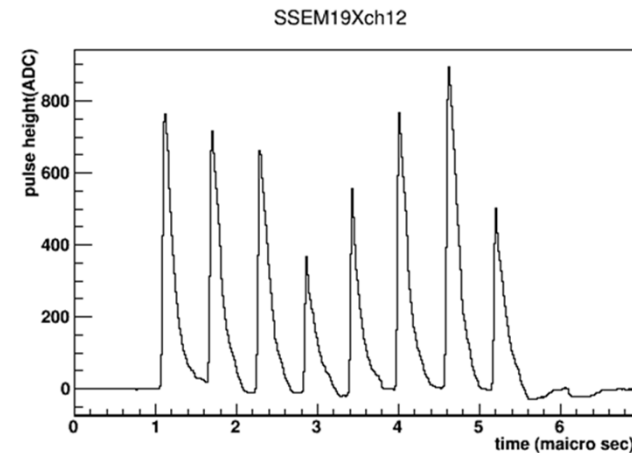


VerticalSSEM19

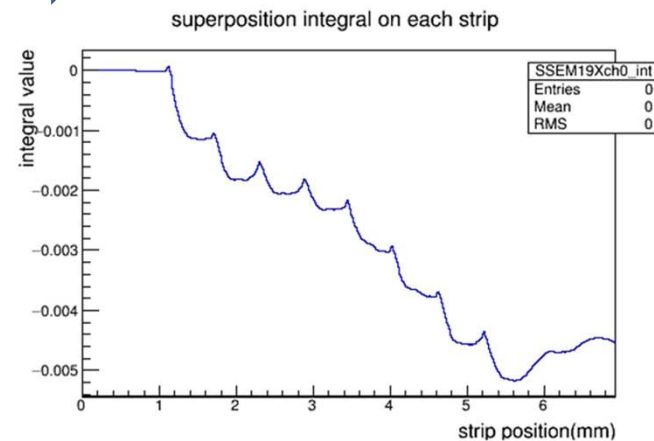
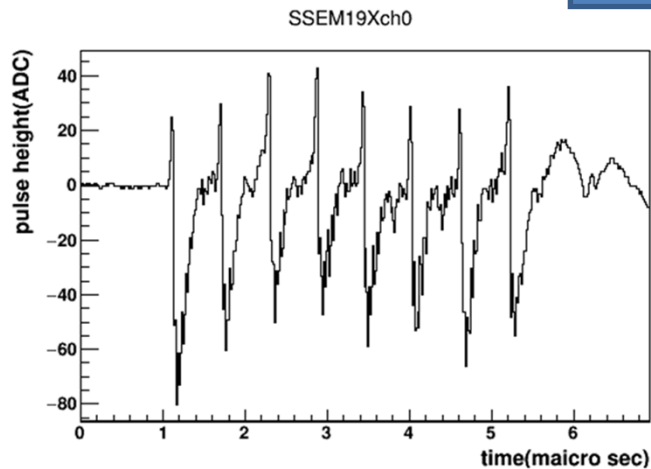


赤: papillonのビーム位置計算手法 青:T2K official のビーム位置計算手法
Orange: 2つの手法間のビーム位置の差の平均

アンダーシュートについての考察



integration

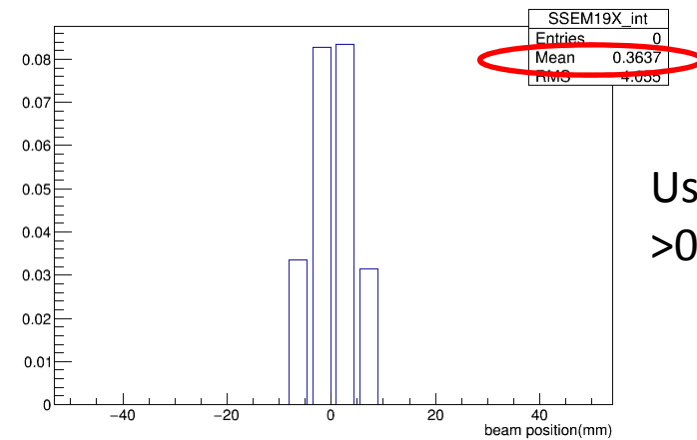
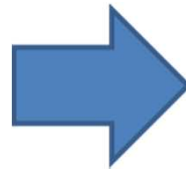
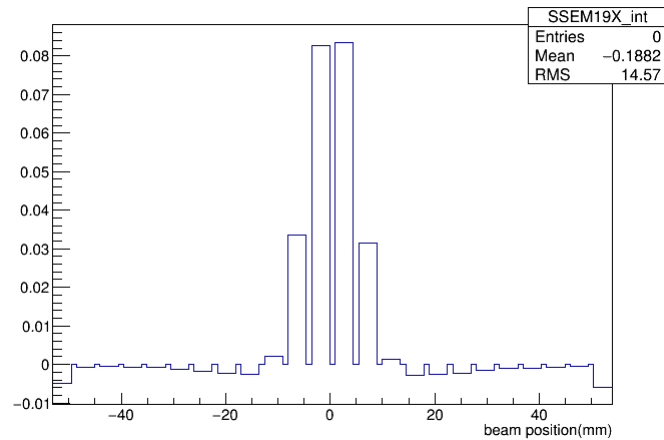


信号の形はstripの位置に依存している

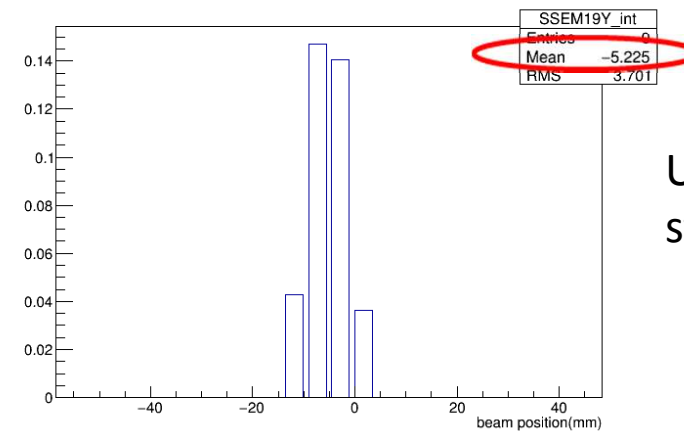
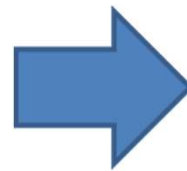
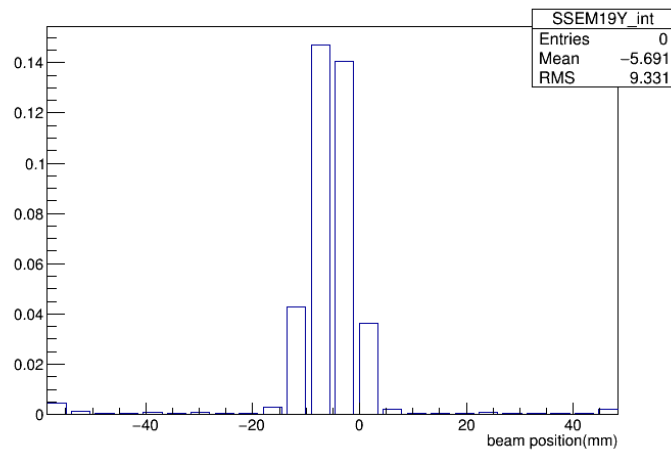
端のstripの信号波形はノイズを含んでいる。

⇒ノイズを累積積分することによって、ビーム位置計算に影響を及ぼしている??

Undershoot



Use only strips
>0.01

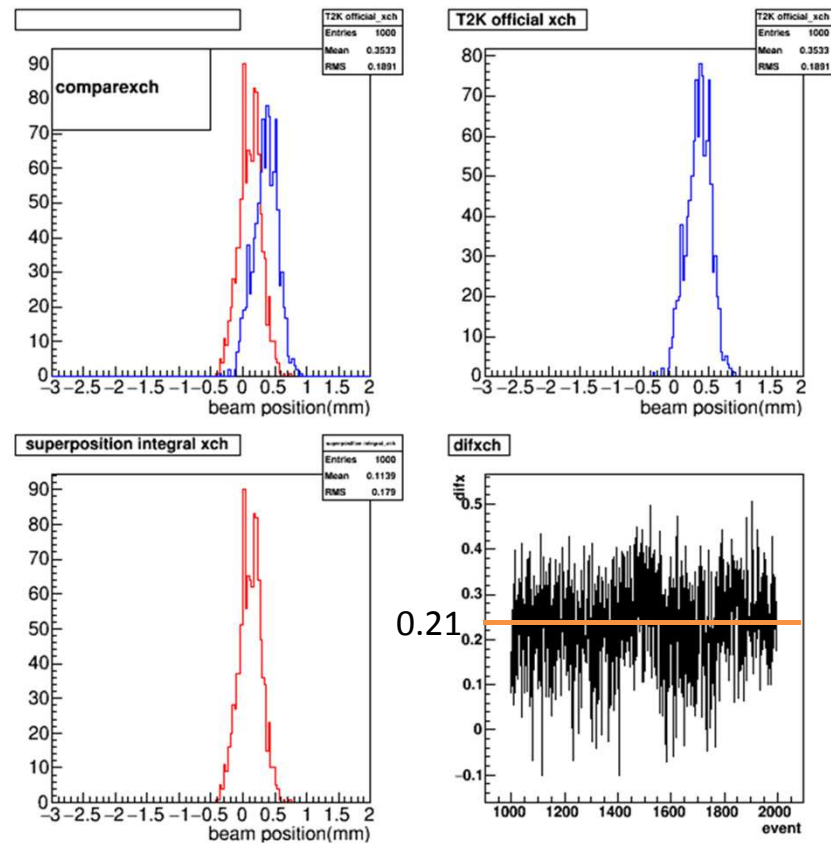


Use only
strips >0.01

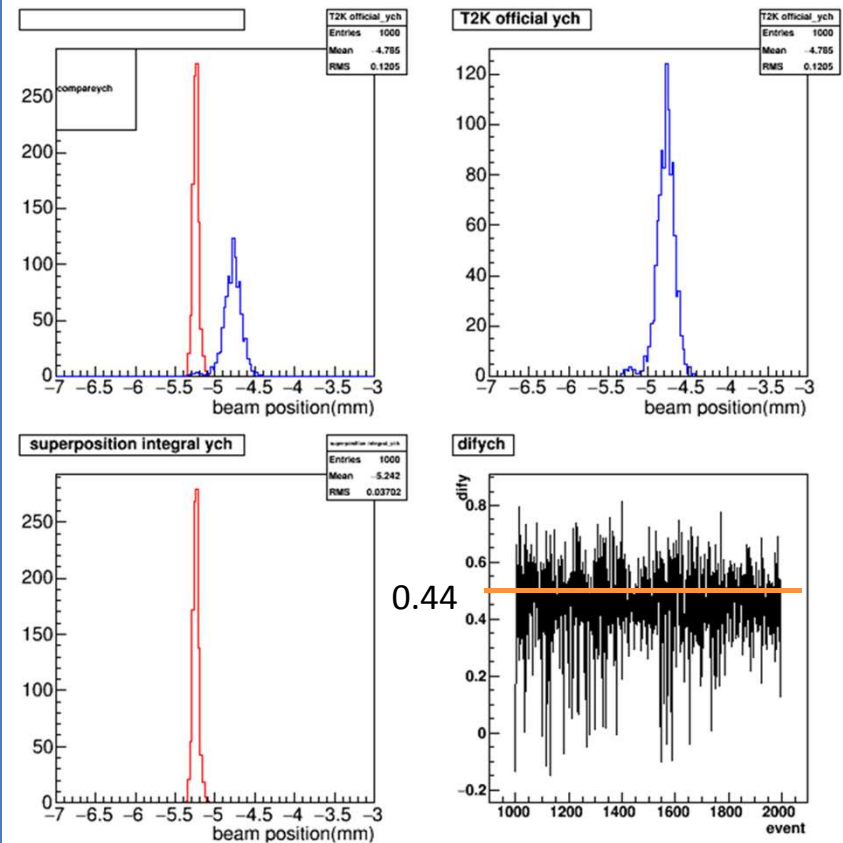
⇒ノイズを累積積分することによって、ビーム位置計算に影響を及ぼしている??
⇒端のstripをbeam profileから排除して、ビーム位置計算を行なう

アンダーシュートを起こしているstripの ビーム位置計算結果を排除した結果

Horizontal SSEM19

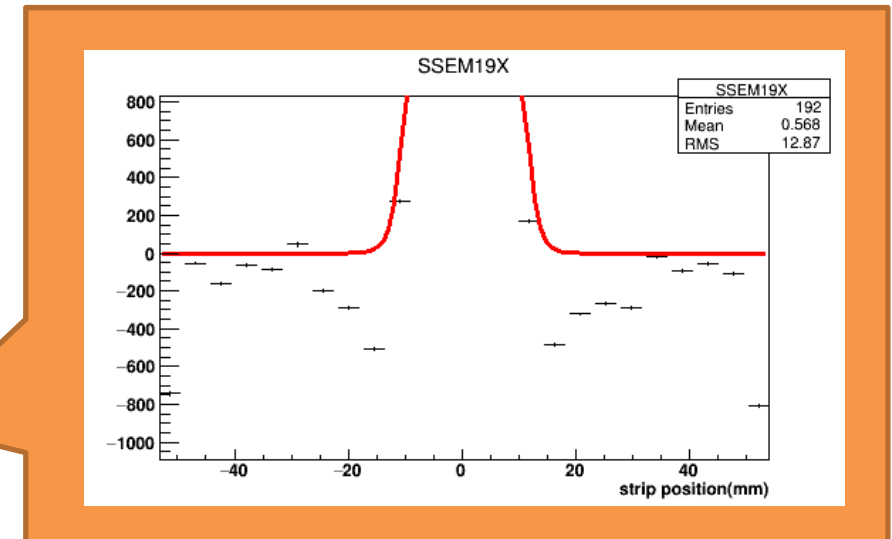
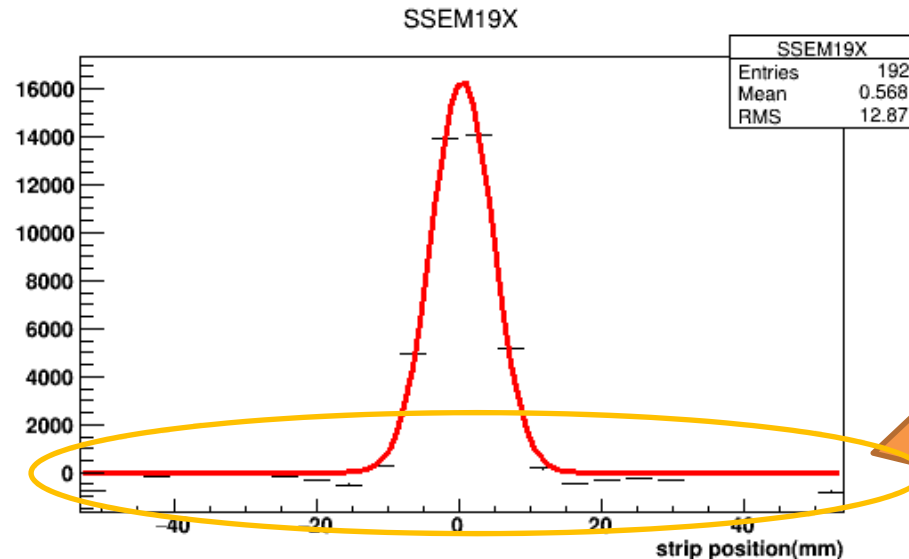


Vertical SSEM19



赤: papillonのビーム位置計算手法 青:T2K official のビーム位置計算手法
Orange: 2つの手法間のビーム位置の差の平均

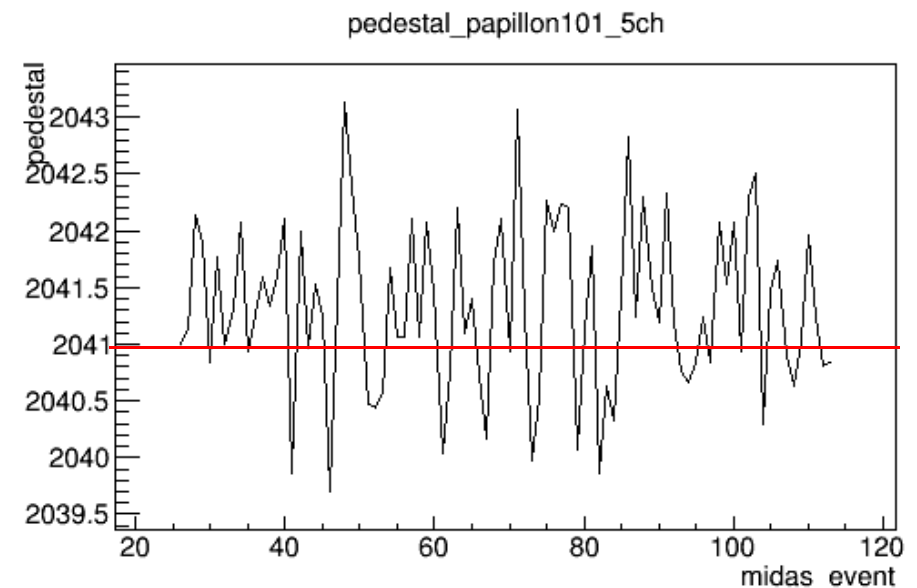
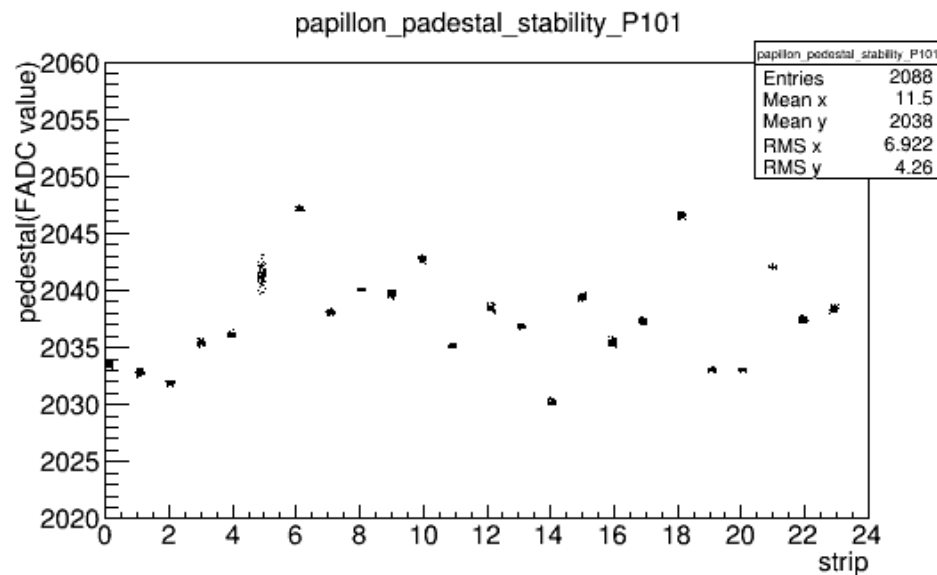
T2K officialの端のstripの信号量の扱い



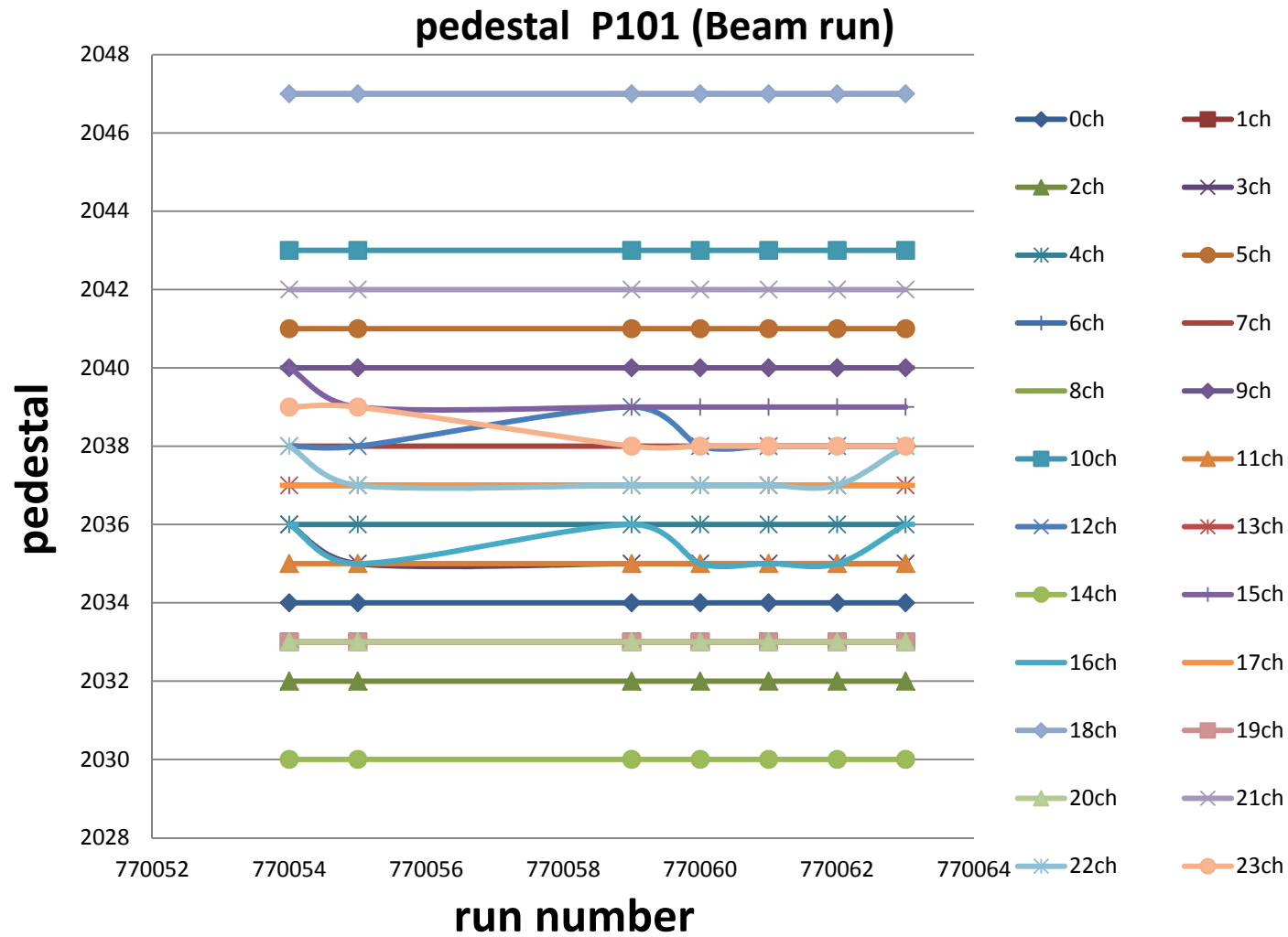
- T2Kの現在のビーム位置解析は、beam profile をガウスフィット(またはダブルガウスフィット)をして、中心値をビーム位置としている。
- しかし、fit結果を見ると端のstripの信号量は考慮されていないことが分かる。

1陽子ビームラン中のペDESTAL値の安定性

- 2017/11/20のビームランのデータを用いて、ペDESTAL値の安定性の検証を行った。



変化が一番大きい5番目のstripのペDESTAL値で変化の幅が4
⇒1陽子ビームランでペDESTAL値が安定していることが確認できた



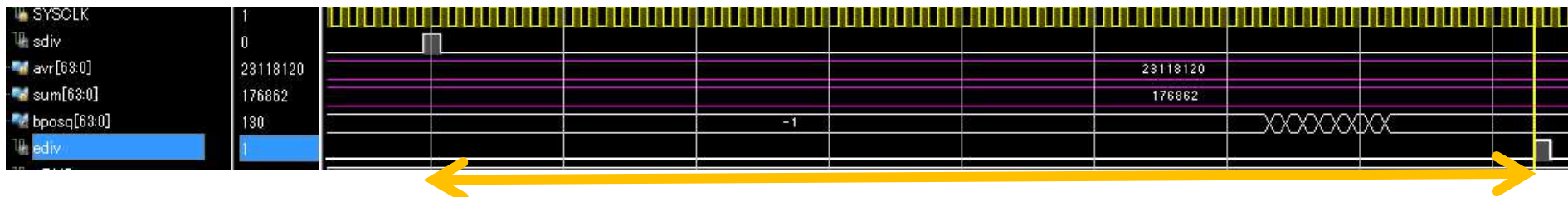
Firmware中でペDESTALを計算しようとする...

Papillonで各stripの1spill間の信号量(= Q_{strip})計算を行なう際に、信号のペDESTAL(=信号の基準レベル)を考慮する必要がある。

$$pedestal = \frac{\sum_{i=1}^{30} P_i}{30}$$

$$Q_{strip} \cong \sum_{i=1}^{640} (p_i - pedestal)$$

Firmwareで割り算をするためには、提供されている“割り算器”を使用する必要がある。



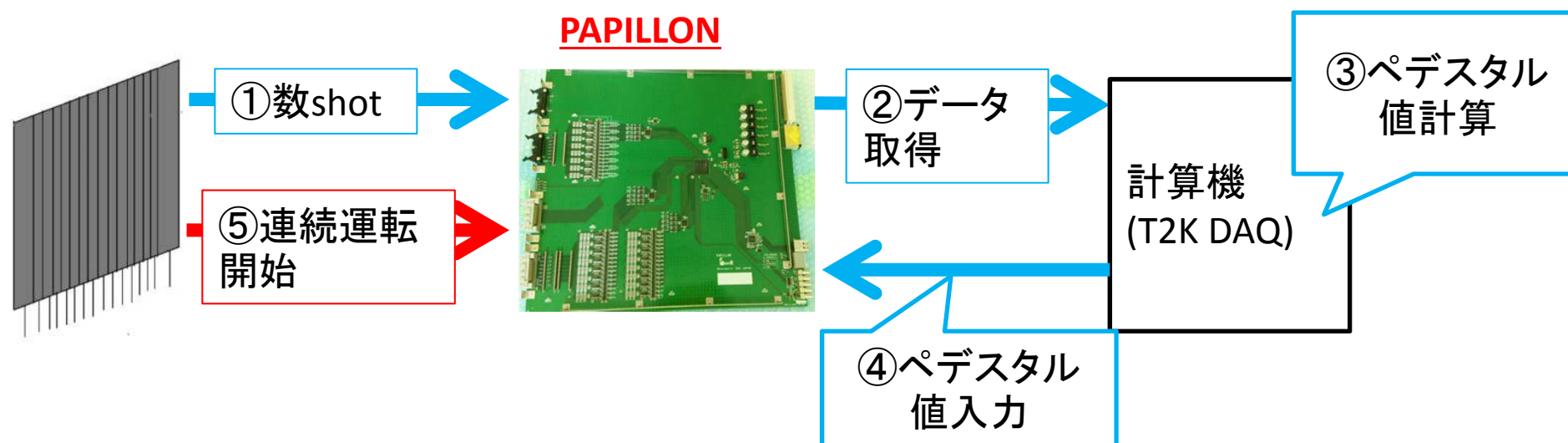
割り算器は計算が始まって終わるまでに時間がかかる(シミュレーションでは418.75ns)

24stripのペDESTALを並行して計算することを考えると、全てのstripのペDESTALの計算が同時に終わる必要がある。

⇒タイミングがずれると、その後の信号計算が正しく行われないため、この方法は危険である。

(改良2)ペDESTAL値の計算方法

- 正確にペDESTAL値を計算し、ビーム位置計算精度を向上させる
- Offlineで計算した各stripのペDESTAL値を外部PCから入力出来るfirmwareを開発した。



動作試験で取得したデータを用いて、各stripのペDESTALの安定性を調査した結果、陽子ビームの強度や位置に関わらず、ペDESTALが安定していることが分かった。

⇒T2K実験の週に1回のメンテナンス日を利用すれば、実現可能である