

LHC・ATLAS実験における 新しい電磁カロリメータ信号処理の研究開発(2)

東大理, 東大素セ^A

久島真悟, 嶺岸優司

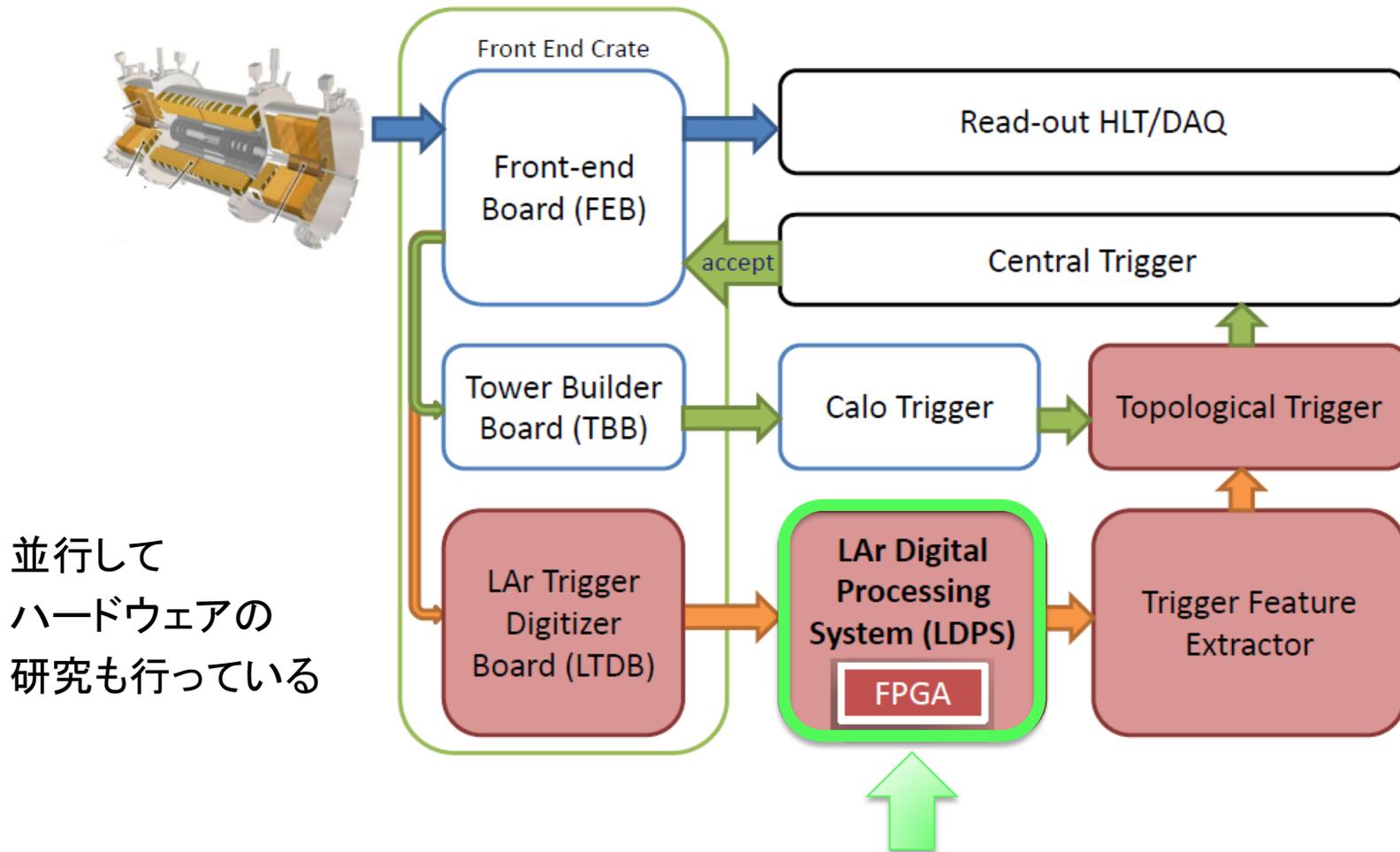
江成祐二^A, 金谷奈央子^A, 田中純一^A, 寺師弘二^A, 山中隆志^A, 山本真平^A

目次

- トリガーにおけるATLAS電磁カロリメータの信号
- 現行のエネルギー再構成手法とその問題点
- 新しいエネルギー再構成手法
- まとめ

目的

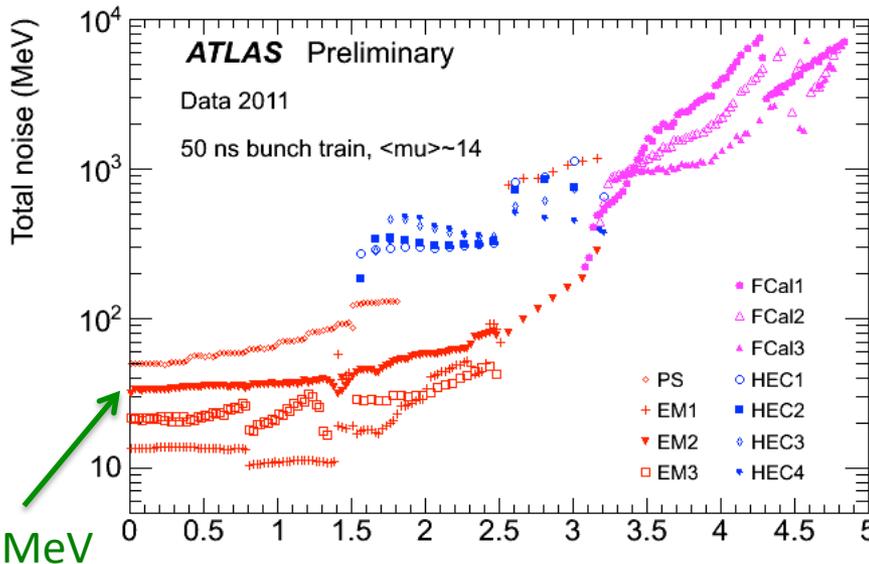
- LHC・ATLASで用いられている液体アルゴン(LAr)カロリメータから送られてくるデジタル信号をトリガーレベルで処理 → **filtering algorithm**



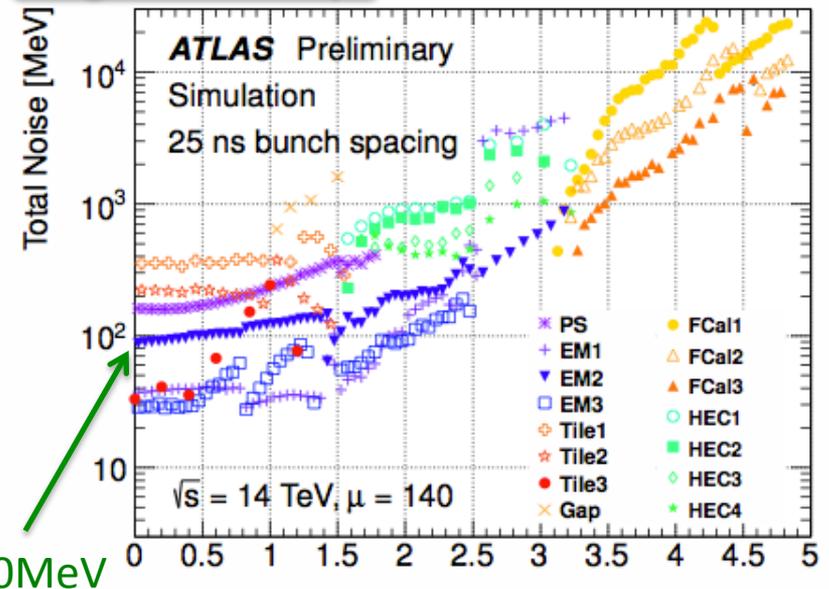
目的

- LHC・ATLASで用いられている液体アルゴン(LAr)カロリメータから送られてくるデジタル信号をトリガーレベルで処理 → **filtering algorithm**
- 14TeVでルミノシティ $L = 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ をもつHL-LHCに向けて、パイラアップの影響を抑えることができる**精度の良いfiltering algorithmの開発**が必要

現状



High luminosity

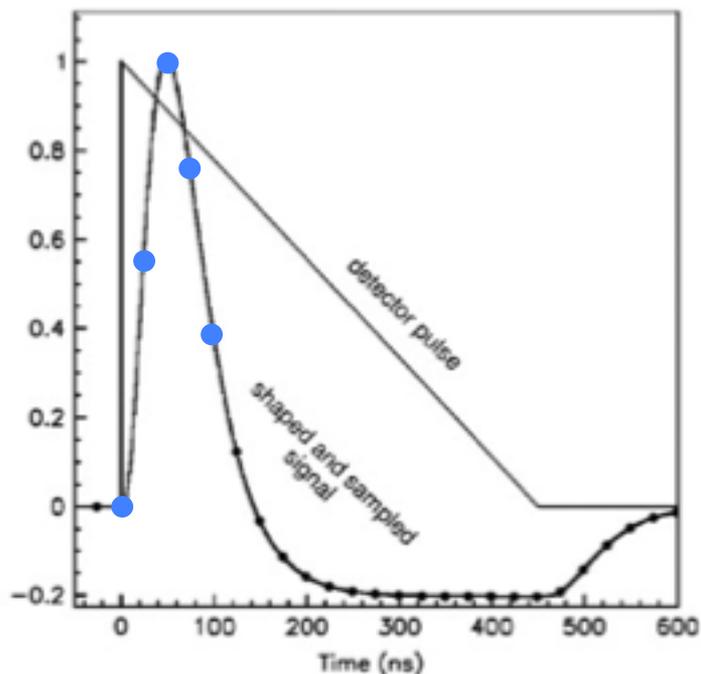


- preliminaryな研究としてROOTでシミュレーション
- 最終的にFPGAへの実装を目指す

LArカロリメータの信号読み出し

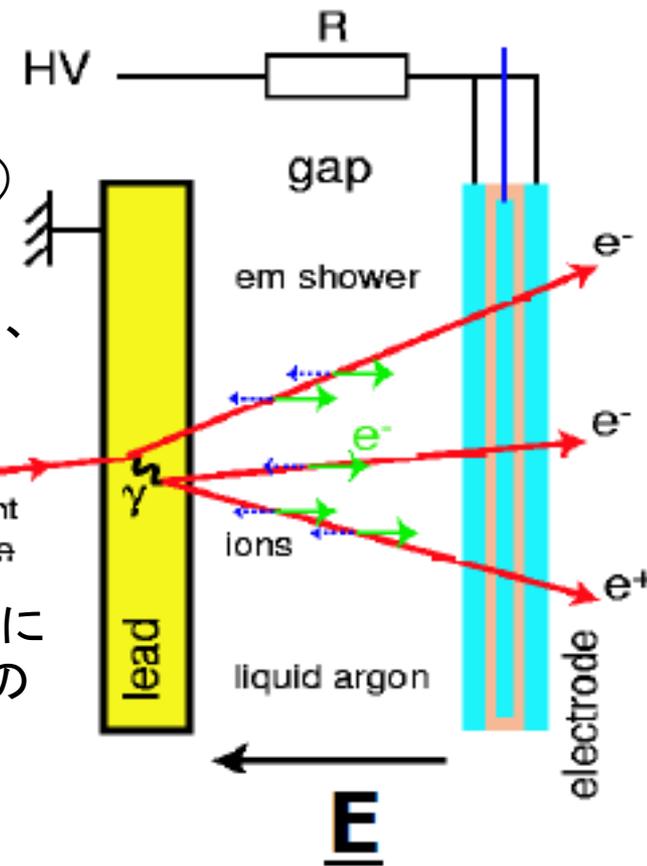
カロリメータに入射した粒子が電磁シャワーなどを起こして液体アルゴンがイオン化することにより、三角波の形をした信号が発生(電子のdrift time ~ 500 ns)

信号は増幅・成形され、25nsごとにサンプリングされた後、デジタル信号処理によってエネルギーに換算



信号のエネルギー計算に用いる点は、その信号の初めの5サンプリング目まで \rightarrow レイテンシ5

検出器で発生する信号は、セルごとにある決まった波形を持つ



Optimal Filtering

- 現行のfiltering
- 振幅 A と信号の入射時刻 τ は、信号のサンプリングをいくつか線形結合することによって復元できると仮定(現行では5サンプリングを使用)

$$A = \sum_{i=1}^5 a_i S_i$$

$$A\tau = \sum_{i=1}^5 b_i S_i$$

a_i , b_i : Optimal filtering coefficient (OFC)

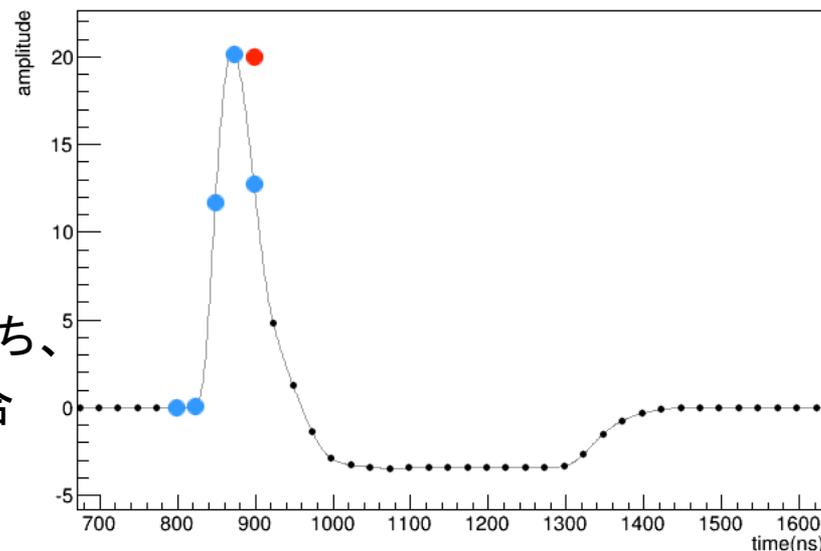
このとき、OFCは A と $A\tau$ の分散がそれぞれ最小になるように決定される

Amplitude:Time

入射信号: $S_i = Ag(t_i - \tau)$

Ex) 800nsに入射した振幅20の信号

25nsごとにサンプリングされた黒い点のうち、
初めの5サンプリング(青い点)を線形結合
させて、振幅(赤い点)を再構成



Quality cut

Filtering計算は各BCで行う(1BC = 25ns)

→ 入射した信号の振幅はその4BC後に計算される(赤い点)

Optimal filtering

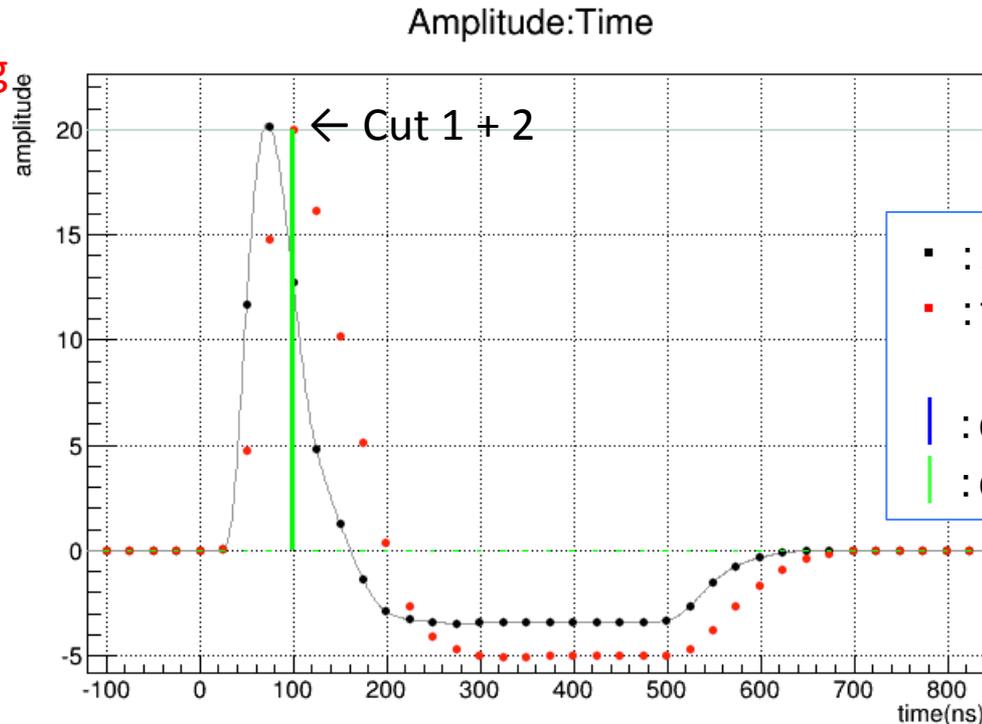
$$A = \sum_{i=1}^5 a_i S_i$$

Quality cut 1

$$|S_{i+3} - A| < \frac{S_{i+3}}{4}$$

Quality cut 2

$$|\tau| < 12.5\text{ns}$$

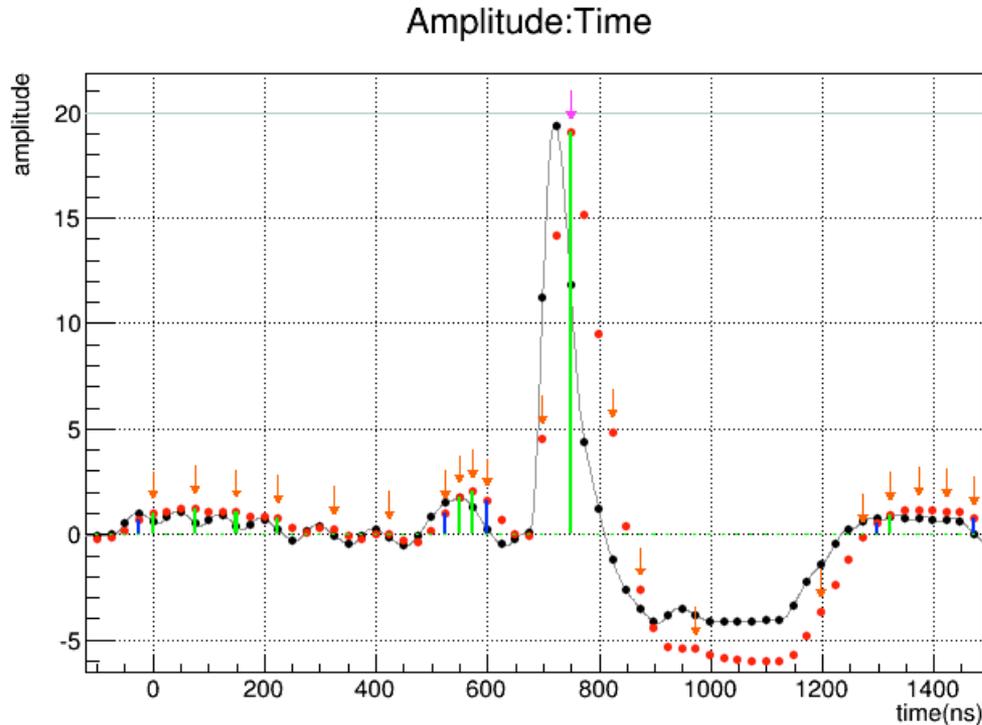


2つのquality cutにより、1つの信号は1つのエネルギー値を返す

High luminosity状況下での信号

実際の信号: 主な信号(電子)の他に、パイルアップによる小さな信号がいくつか付随

→ 大きな信号($A^{input} = 20$)の他に小さな信号($A^{input} = 1$)をランダムに混ぜる



$\mu=140, 0.025 \times 0.025 \rightarrow 0.2$
電子(Z由来): 約35GeV
パイルアップ: 1~3GeV

- : 25nsごとのサンプリング
- : filteringの出力(4BC前に入射した信号の振幅)
- | : quality cut 1通過
- | : quality cut 1 + 2通過
- ↓ : $A^{input} = 20$
- ↓ : $A^{input} = 1$

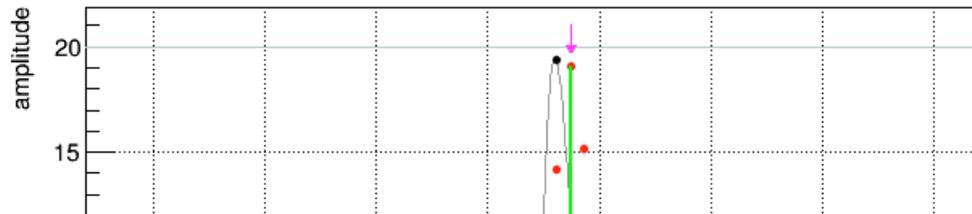
- 前後の信号によって、大きな信号に対するfiltering再構成の精度が落ちる
- 小さな信号の再構成の精度が悪く、quality cutをほとんど通過しない

High luminosity状況下での信号

実際の信号: 主な信号(電子)の他に、パイルアップによる小さな信号がいくつか付随

→ 大きな信号($A^{input} = 20$)の他に小さな信号($A^{input} = 1$)をランダムに混ぜる

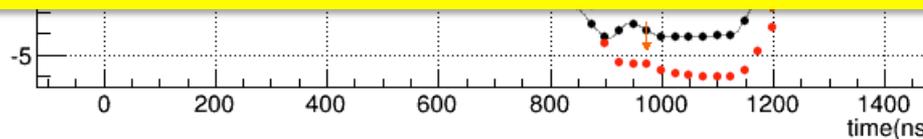
Amplitude:Time



$\mu=140, 0.025 \times 0.025 \rightarrow 0.2$
電子(Z由来): 約35GeV
パイルアップ: 1~3GeV

要求されること

- こうした状況下でも、正確にエネルギーを復元
- また、小さな信号もできるだけ多く復元



↓ : $A^{input} = 1$

- 前後の信号によって、大きな信号に対するfiltering再構成の精度が落ちる
- 小さな信号の再構成の精度が悪く、quality cutをほとんど通過しない

新しいfiltering

アイデア

- より多くのサンプリングを用いる(ただし、レイテンシはOFのときと同じ)
- サンプリングは過去に入射した信号の重ね合わせで表せるはず

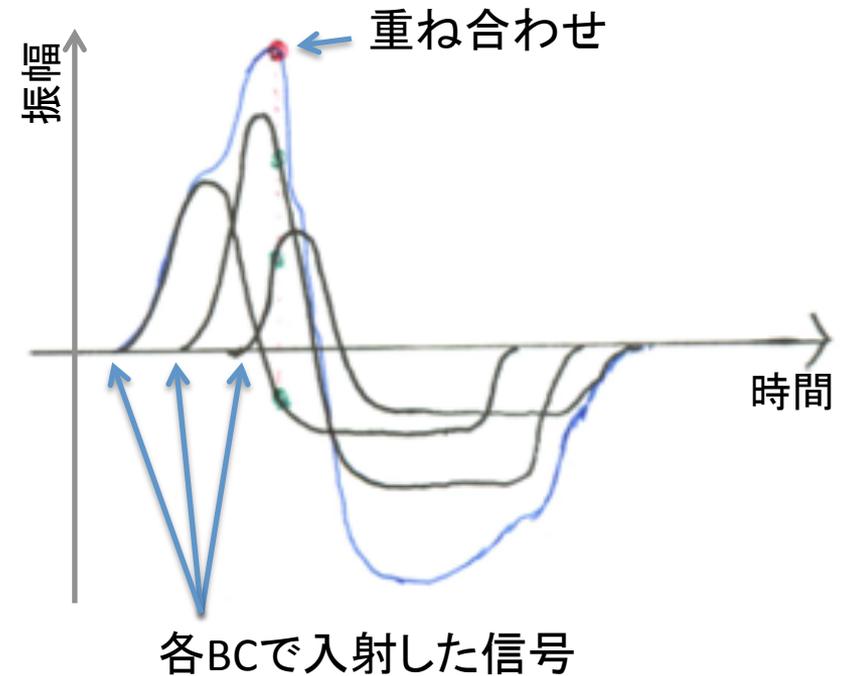
$$S_i = A_i g(t = 0\text{ns}) + A_{i-1} g(t = 25 * 1\text{ns}) + \dots + A_{i+1-N} g(t = 25 * (N - 1)\text{ns})$$

$$\text{行列表現: } \vec{S} = G\vec{A} \quad \rightarrow \quad \vec{A} = G^{-1}\vec{S}$$

G : 重み行列 (N 次の正方行列)

ここでは $N = 32$ とした

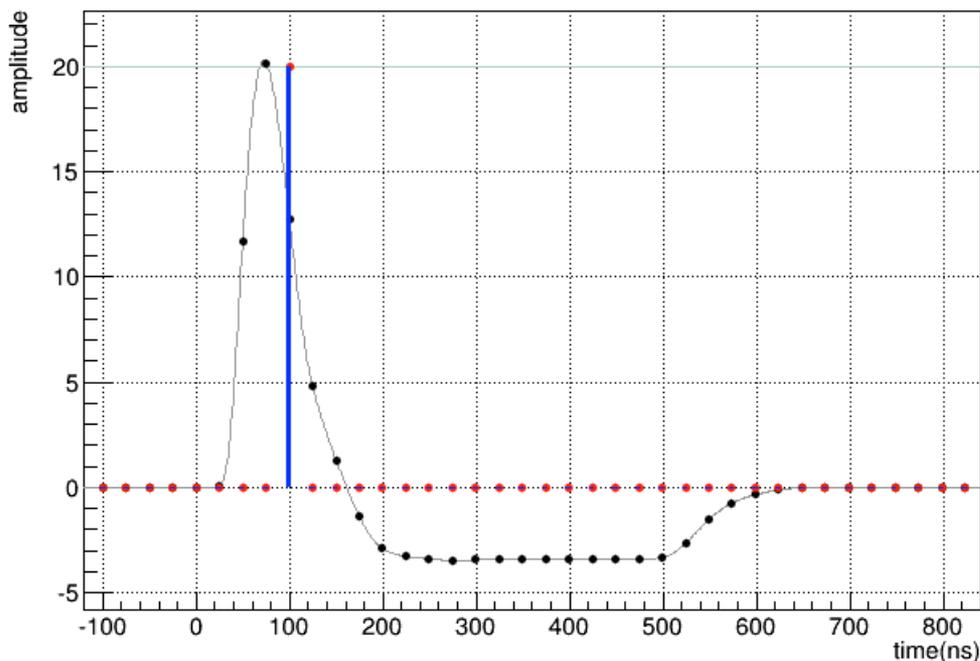
→ アップグレードにより、
使えるリソースの数が増える



新しいfilteringの出力

新しいfilteringを用いて $A^{input} = 20$ の振幅をもつ信号を再構成

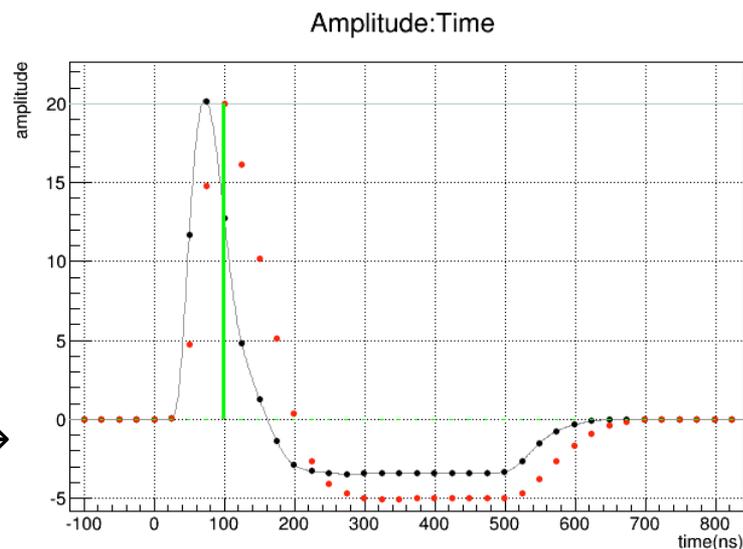
Amplitude:Time



- : 25nsごとのサンプリング
- : filteringの出力 (4BC前に入射した信号の振幅)
- | : $A > 0$ の制限を満たす

信号が入射していないところでは
きちんと0の値を返す

(参考) 現行のfiltering →

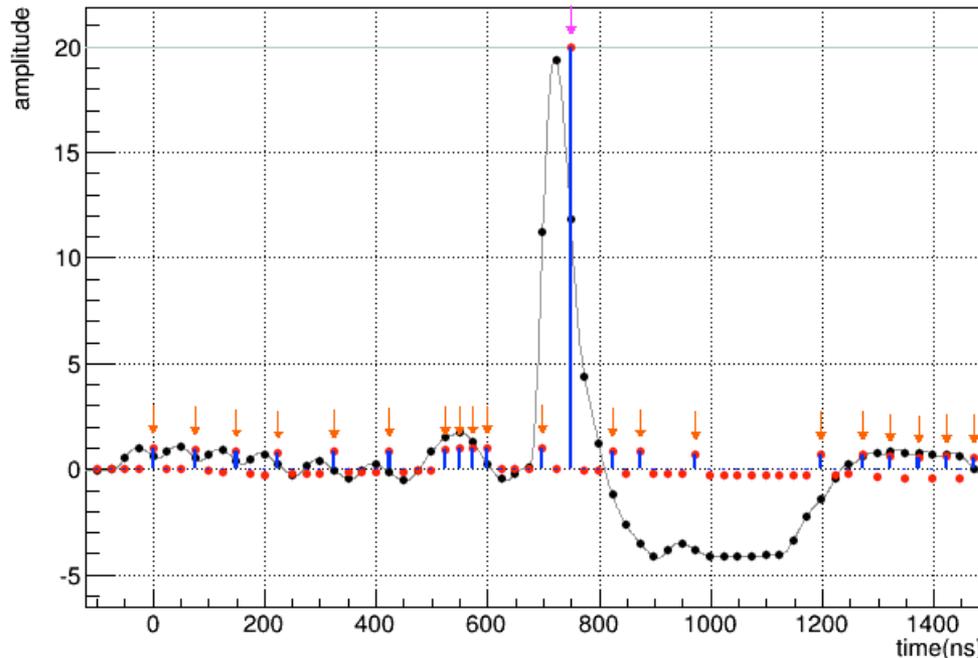


High luminosity状況下での信号

実際の信号: 主な信号(電子)の他に、パイルアップによる小さな信号がいくつか付随

→ 大きな信号($A^{input} = 20$)の他に小さな信号($A^{input} = 1$)をランダムに混ぜる

Amplitude:Time



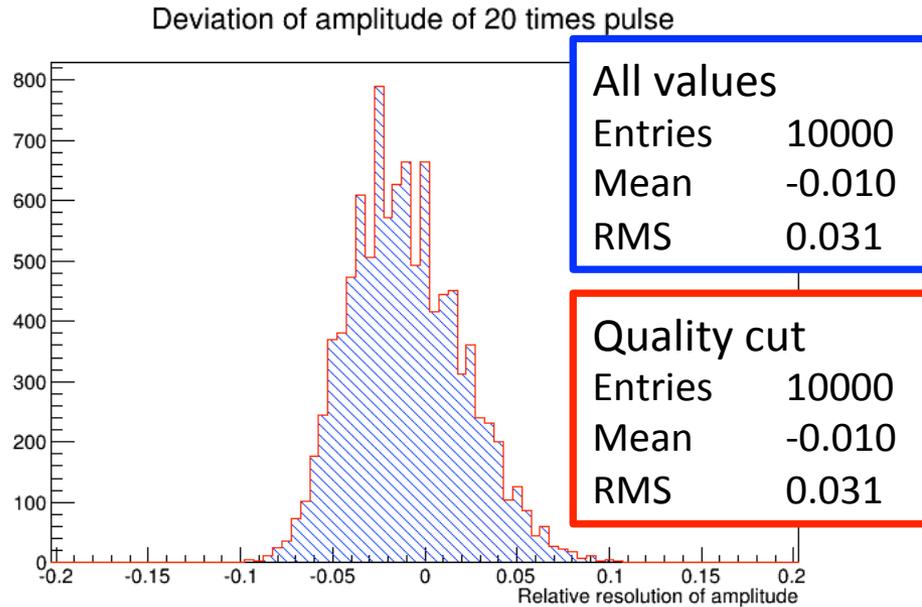
$\mu=140, 0.025 \times 0.025 \rightarrow 0.2$
電子(Z由来): 約35GeV
パイルアップ: 1~3GeV

- : 25nsごとのサンプリング
- : filteringの出力(4BC前に入射した信号の振幅)
- | : $A > 0$ の制限を満たす
- ↓ : $A^{input} = 20$
- ↓ : $A^{input} = 1$

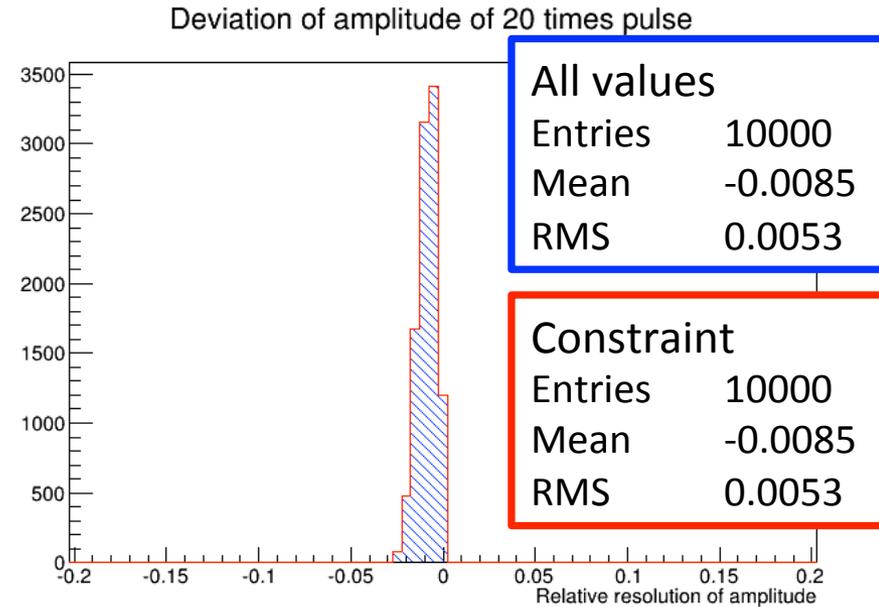
- 前後の信号による影響を受けにくい
- 小さな信号もたくさん拾えている

大きな信号の再構成

Optimal filtering



新しいfiltering



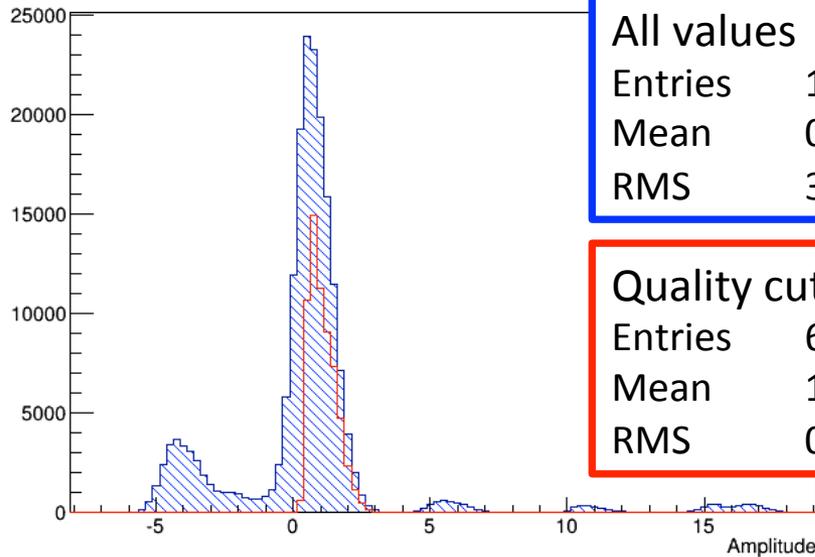
$$A^{input} = 20 \text{、横軸は} (A - A^{input}) / A^{input}$$

新しいfilteringの分解能は格段に良くなっている

小さな信号の再構成

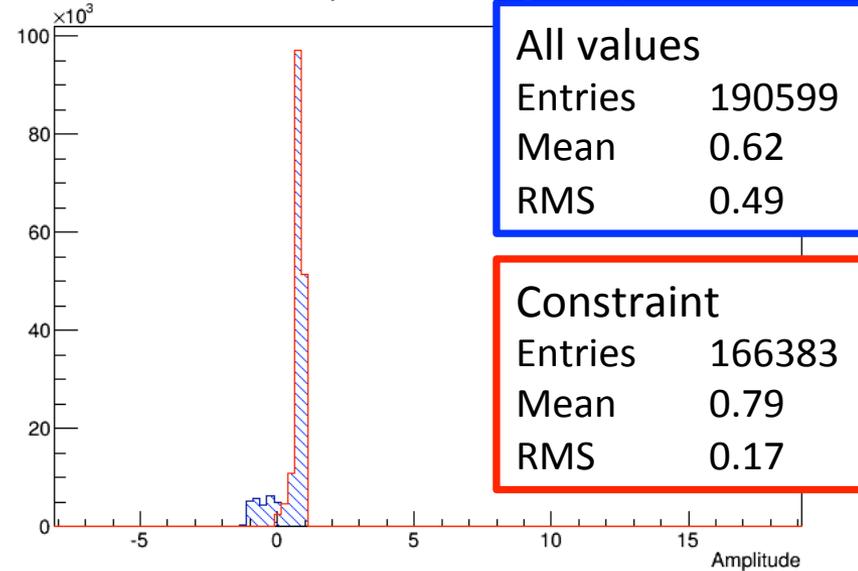
・Optimal filtering

Calculated amplitude of background pulse



・新しいfiltering

Calculated amplitude of background pulse



$A^{input} = 1$ 、横軸は振幅

Optimal filteringはquality cutによりほぼ正確な値を返すが、イベント数が大幅に減ってしまう ($\epsilon_{OF} = 0.33$, $\epsilon_{newF} = 0.87$)

ハードウェアベースの開発に向けて

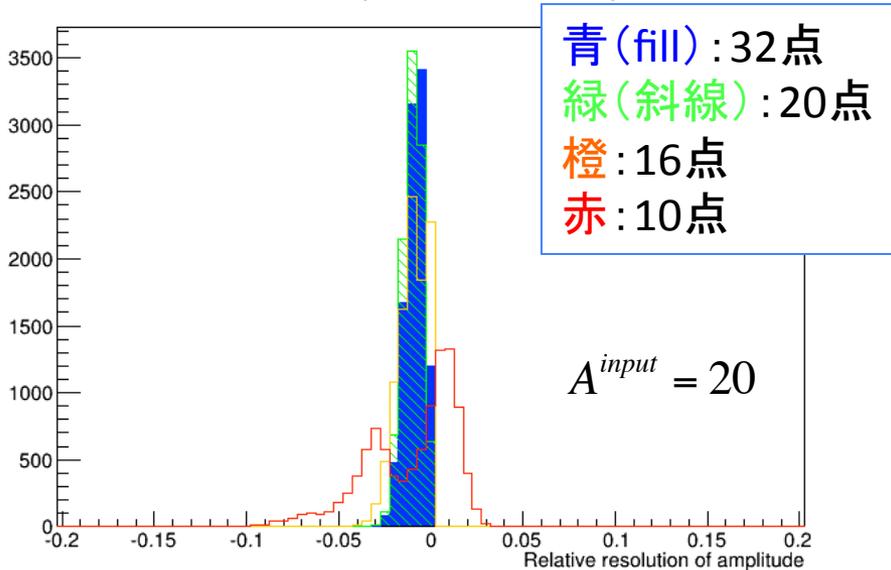
Filtering algorithmは実際にはFPGAに実装される

- 12bit ADC、40MHz
- 320チャンネル/FPGA

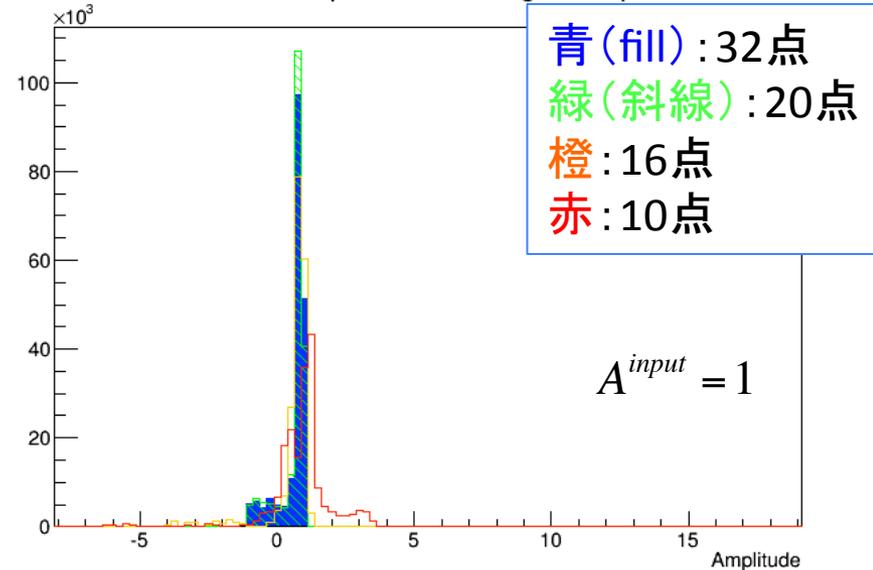
できるだけ使用するリソースを少なくしたい

→ 使うサンプリングの数によって新しいfilteringの性能はどう変わるか？

Deviation of amplitude of 20 times pulse



Calculated amplitude of background pulse



サンプリングの数を20まで減らしても性能に大きな違いはない

まとめと今後

ATLASの液体アルゴン電磁カロリメータの研究において

- パイルアップの多い状況下ではoptimal filteringのパフォーマンスが低下する
- 新しいfilteringを考案・検証し、
 - 分解能の向上
 - 信号識別効率の上昇

が実現できた

	A=20 (電子)		A=1 (パイルアップ)	
	RMS	ID efficiency	RMS	ID efficiency
現行のfiltering	0.031	100%	0.48	33%
新しいfiltering	0.005	100%	0.17	87%

さらなる発展として

- 予期しない波形(高エネルギーオブジェクトなど)を復元する際の影響
- ハードウェアベースのアルゴリズムに焼き直し、テストする
- Algorithmを実装するボードの作成(進行中)

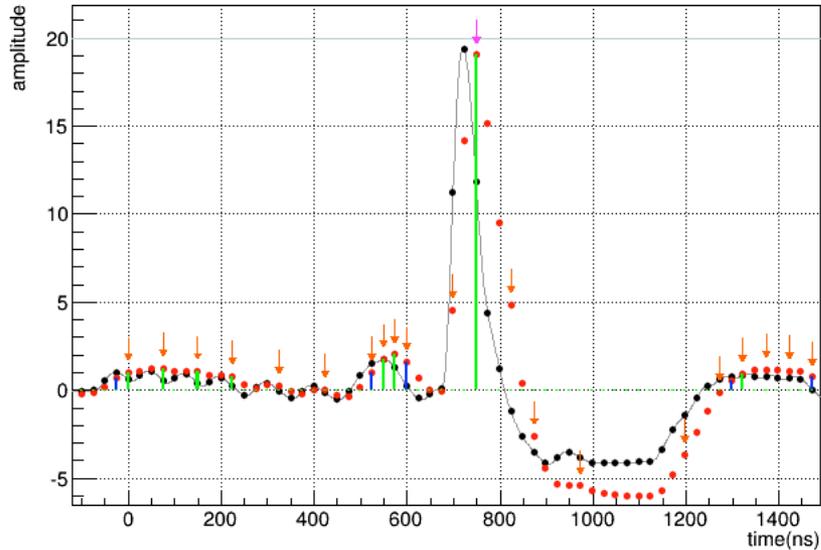
などといった研究を行う

Back up

2つのfilteringの比較

Optimal filtering

Amplitude:Time

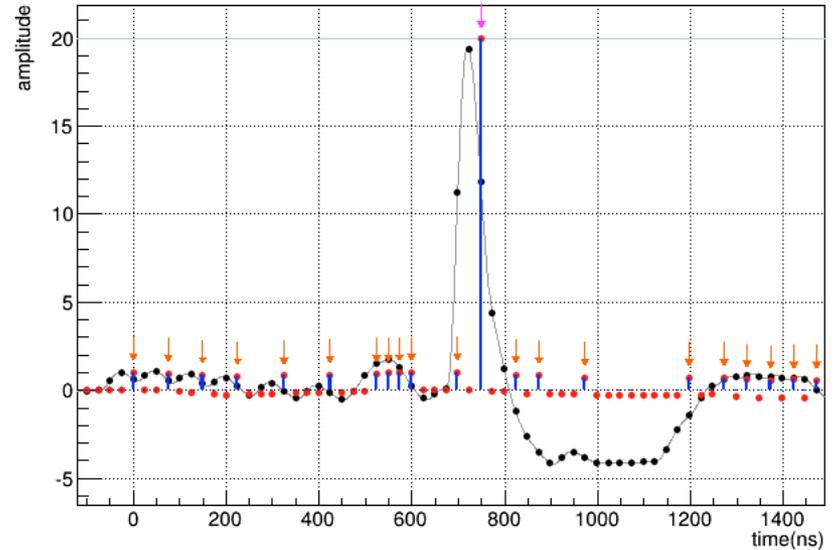


- : 25nsごとのサンプリング
- : filteringの出力 (4BC前に入射した信号の振幅)
- | : quality cut 1通過
- | : quality cut 1 + 2通過

\downarrow : $A^{input} = 20$
 \downarrow : $A^{input} = 1$

新しいfiltering

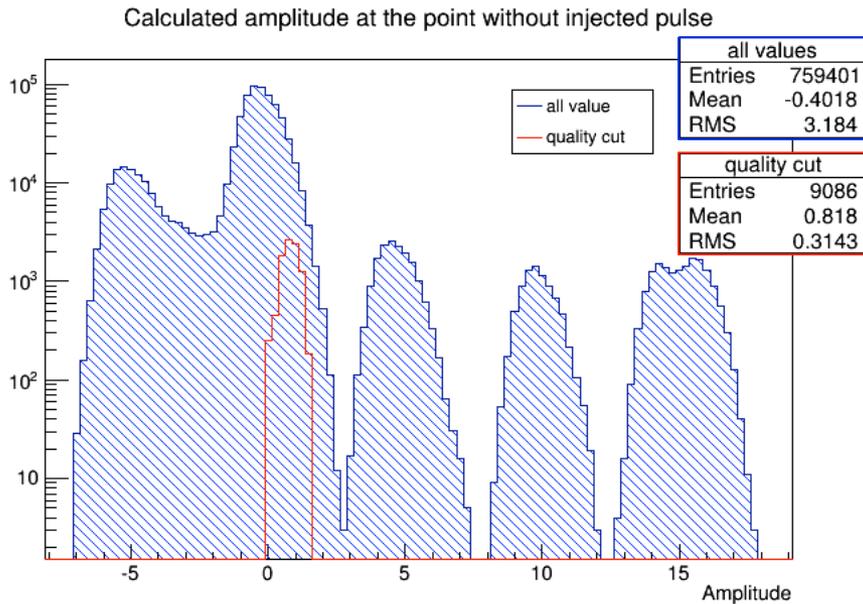
Amplitude:Time



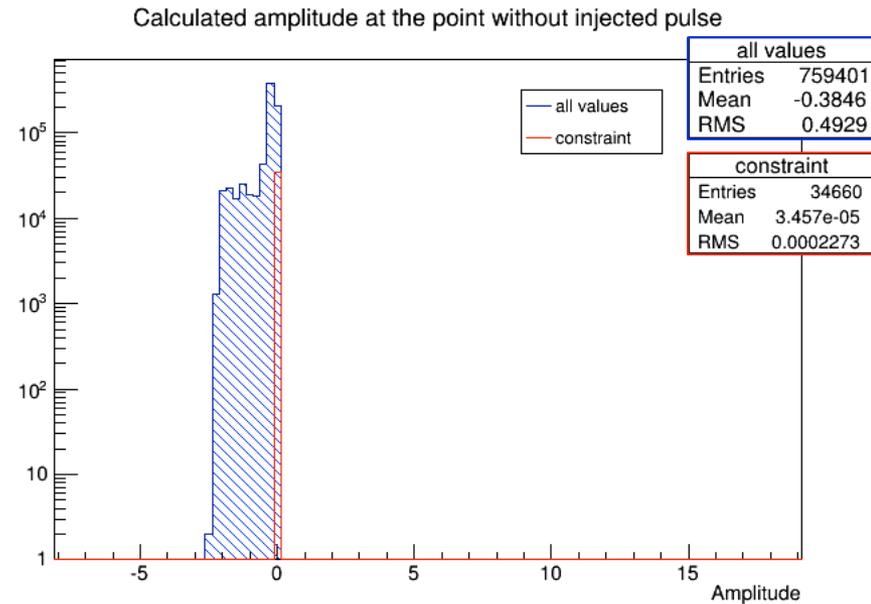
- : 25nsごとのサンプリング
- : filteringの出力 (4BC前に入射した信号の振幅)
- | : $A > 0$ の制限を満たす

信号が入射していない点での再構成

・Optimal filtering



・新しいfiltering



横軸は振幅

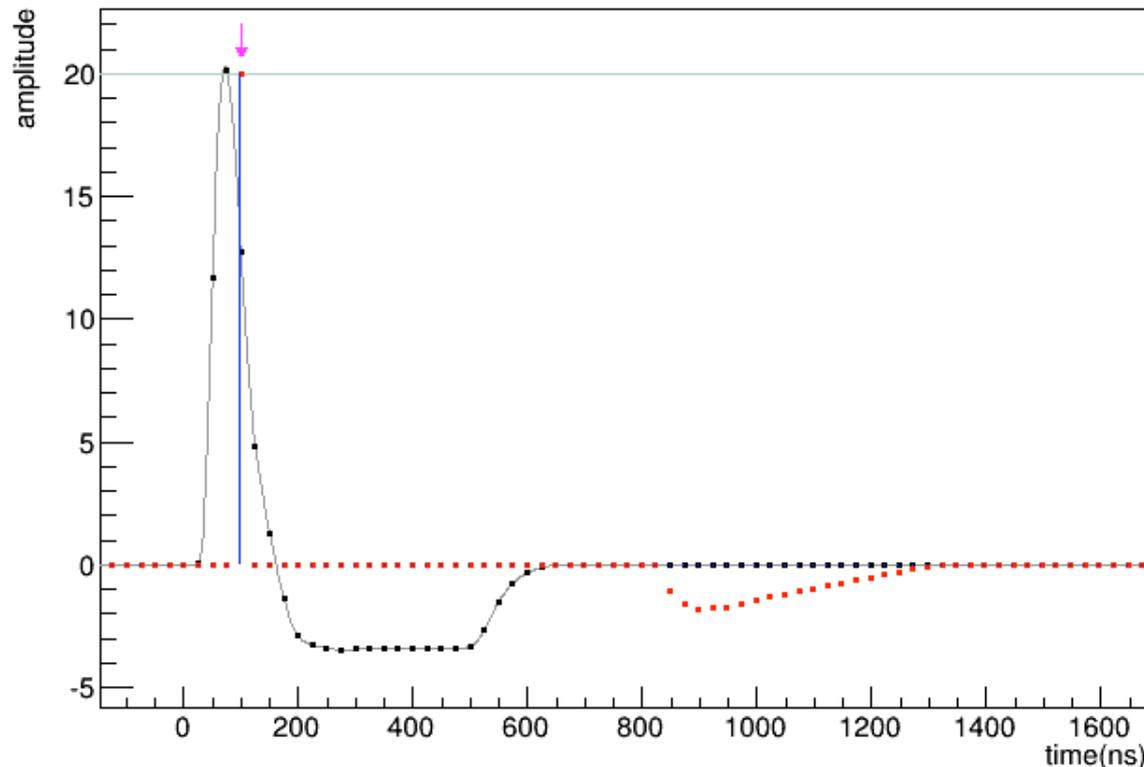
新しいfilteringの方が制限を通過するイベントは多いが、そのすべてがほぼ0であるので問題ない

負の振幅領域

入射した信号が、行列を組んでいる領域外へ出てしまったとき、サンプリングを重ね合わせるときにその信号の寄与を考慮しないにもかかわらず、重ね合わされたサンプリングにはその信号のオーバーシュートの部分が強く影響している

→ つじつまあわせのために負の振幅領域が生まれてしまう

Amplitude:Time

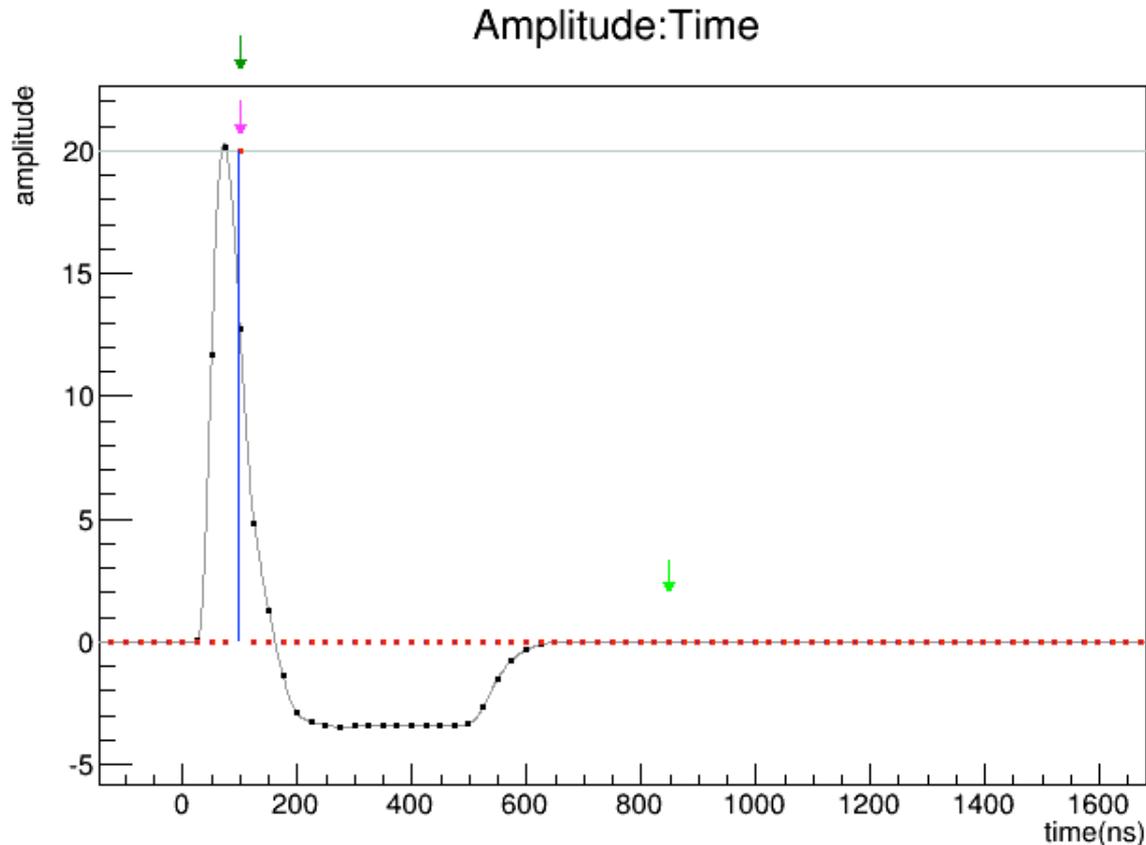


対応策

負の振幅領域に入ったことを認識したら、その補正を加えるようなアルゴリズムを組んでおく

↓: 負の振幅領域を認識した箇所

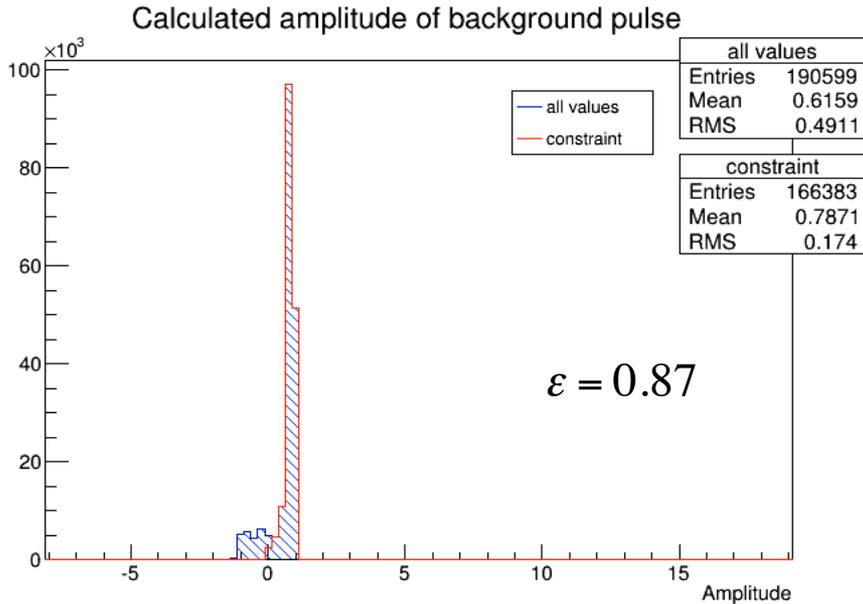
↓: 負の振幅領域のもととなった信号の振幅が表示されている位置



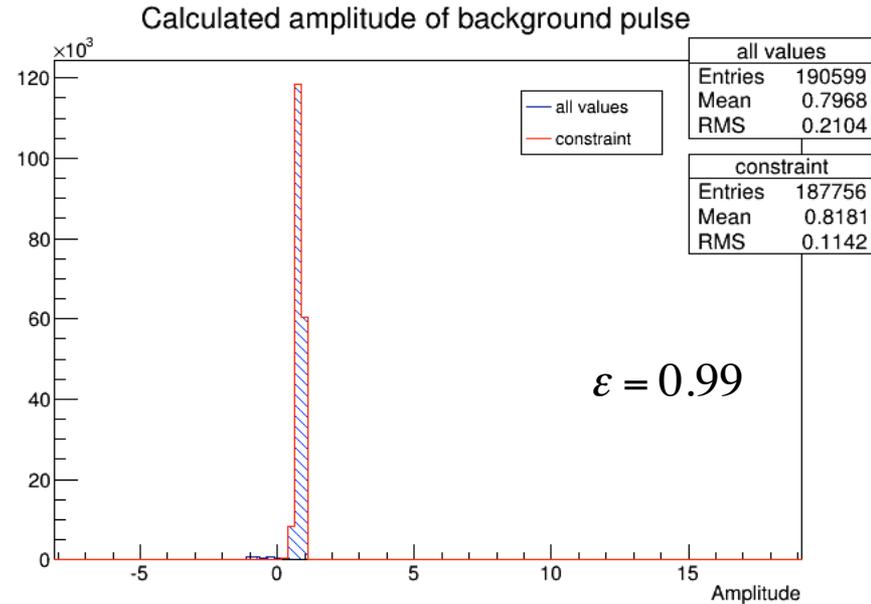
対応策の結果

小さな信号のエネルギー再構成について

・補正なし



・補正あり

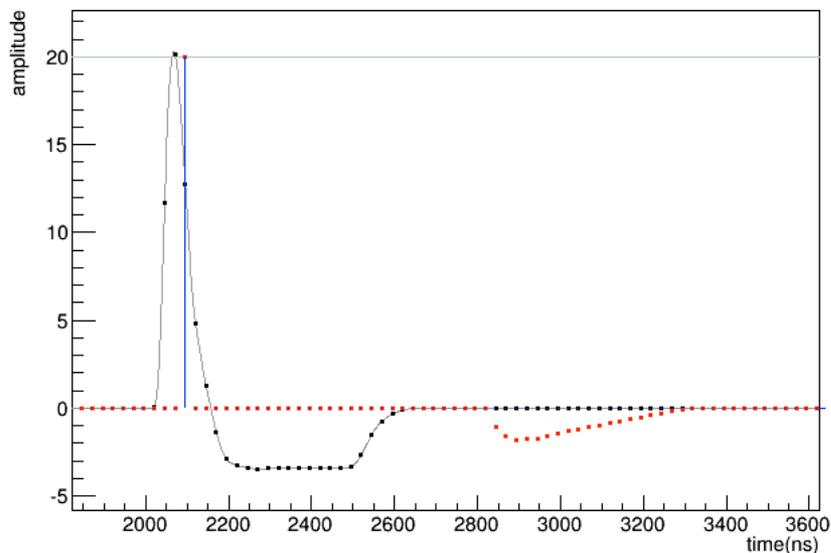


小さな信号が引き起こす負の振幅領域は補正していないので、まだ若干負の振幅は残っているが、平均値・認識効率ともかなり改善される

波形のサンプリング数依存1

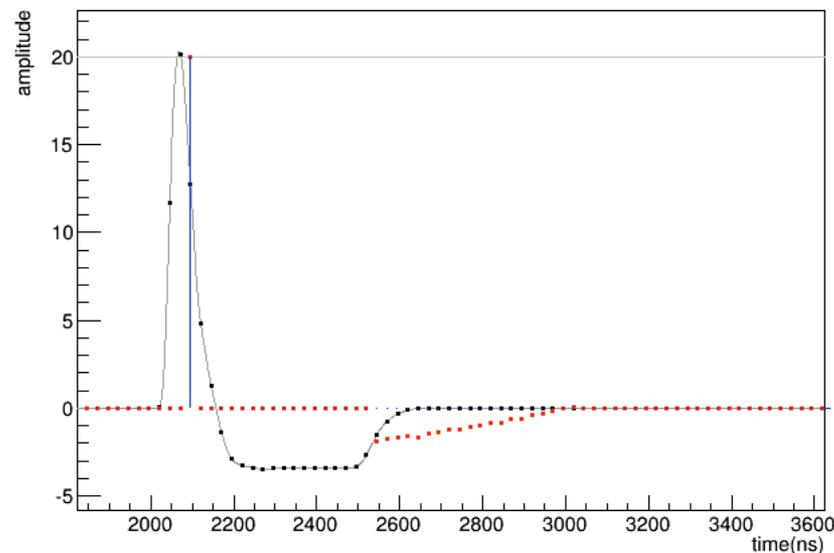
・サンプリング数 32

Amplitude:Time



・サンプリング数 20

Amplitude:Time

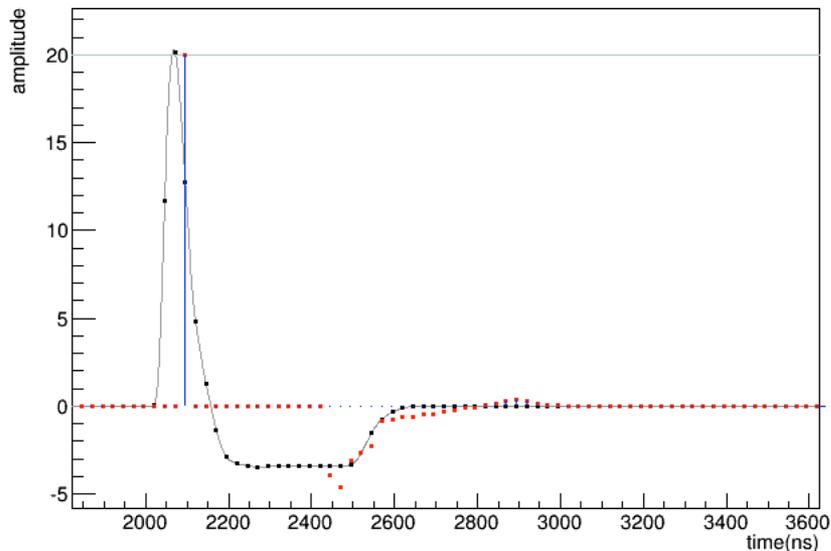


サンプリング数を減らすと、負の振幅領域が手前にずれ、やや深くなる

波形のサンプリング数依存2

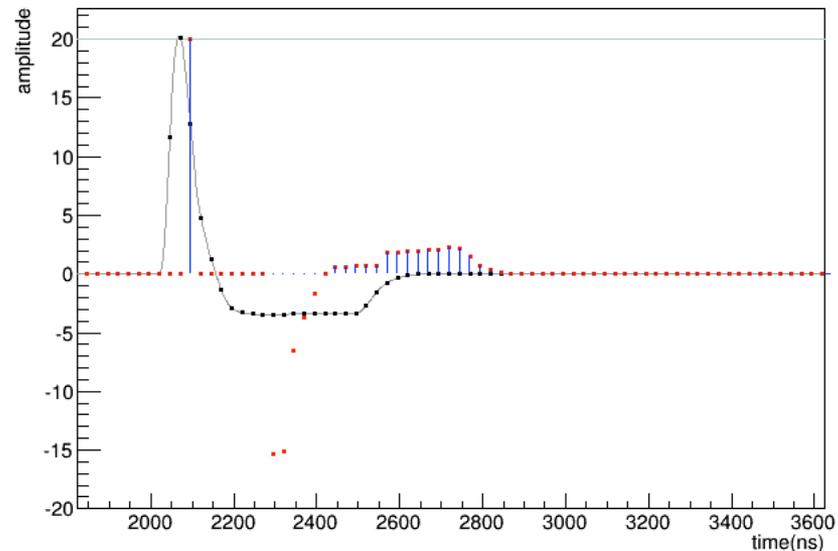
・サンプリング数 16

Amplitude:Time



・サンプリング数 10

Amplitude:Time



サンプリング数を減らしすぎると、正のfake amplitudeが生まれてしまう
また、不正確な振幅を返す領域が長くなる