

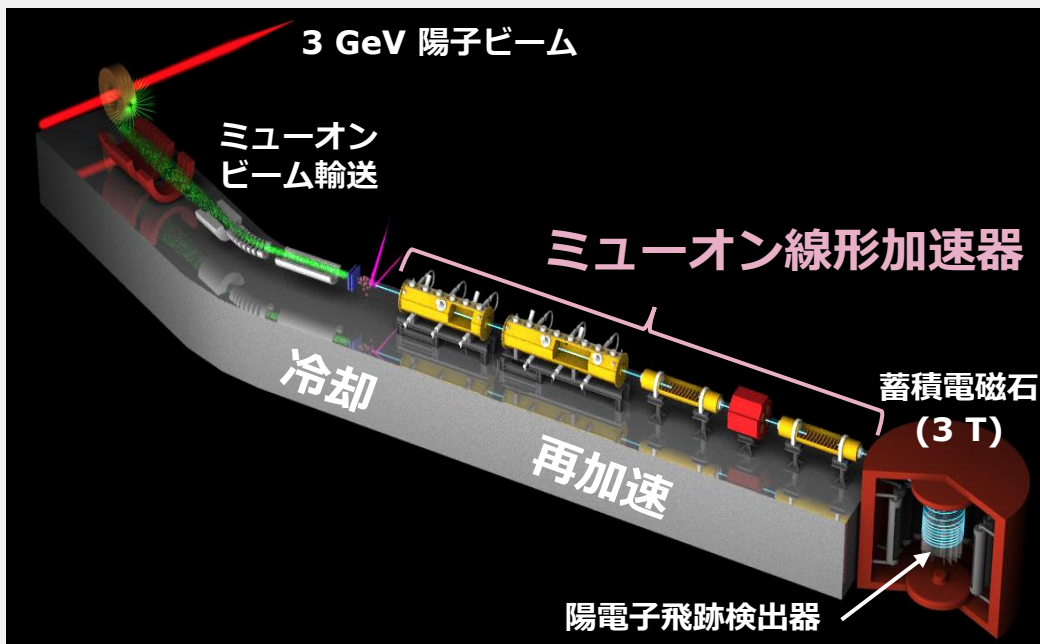
J-PARC muon $g - 2$ /EDM 実験:
波形デジタイザを用いた
読み出し系改善による高時間分解能
バンチ幅モニタの性能向上

鷺見一路^A、飯嶋徹^{A,B,C}、居波賢二^A、大谷将士^C、
近藤恭弘^{D,E}、齊藤直人^F、須江祐貴^A、竹内佑甫^G、
中沢雄河^E、三部勉^C、安田浩昌^H、四塚麻衣^A、
他 J-PARC muon $g - 2$ /EDM コラボレーション

名大理^A、名大KMI^B、KEK^C、JAEA^D、茨大理工^E、
J-PARCセンター^F、九大理^G、東大理^H

ミュオンスピン歳差運動の精密測定により新物理探索を行う。

[J-PARC muon $g - 2$ /EDM 実験の概念図]



スピン歳差運動ベクトル

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta$$

$$= -\frac{e}{m_\mu} \left(\frac{g_\mu - 2}{2} \right) \vec{B} - 2cd_\mu (\vec{\beta} \times \vec{B})$$

異常磁気能率の寄与 電気双極子能率の寄与

異常磁気能率測定精度：

0.1 ppm

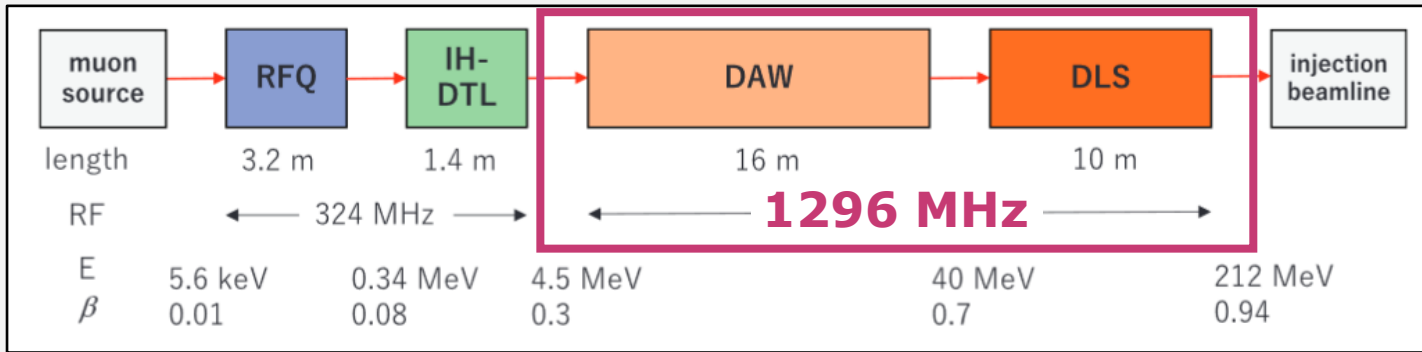
電気双極子能率探索感度：

$10^{-21} e \cdot \text{cm}$

- 歳差運動の測定精度向上のため、
世界初のミュオン高周波線形加速で生成した
低エミッタンスビームを用いる。

- ビームの広がりを抑制するため、速度に応じて4種類の加速空洞を用いる。
 - 異なる加速空洞間でのビームマッチングが重要であり、
縦方向のビーム形状をバンチ幅モニタで測定する必要がある。

[ミュオン線形加速器の構成要素・パラメータ]



- **中-高速部**では、**加速勾配を大きくするため周波数を4倍に上げる**。
 - 加速範囲が低速部より小さくなり、
より高精度のバンチ幅測定に基づくマッチングが必要になる。

目標分解能（目安）： $\sigma \sim 10$ ps (RF周期の1%程度)

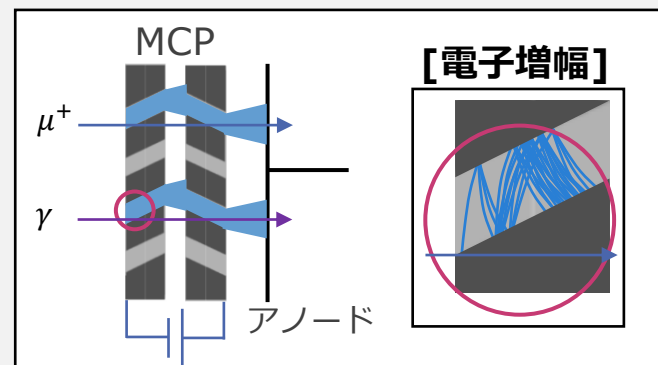
検出部にマイクロチャンネルプレート(MCP)を用いたモニタを開発中。

➤ バンチ幅モニタの原理

- ① MCP表面で二次電子を生成
- ② 電子をMCP内で増幅
- ③ 信号を波高で弁別
- ④ デジタル信号の時間を取得

読み出し系

[バンチ幅モニタ検出部の概念図]



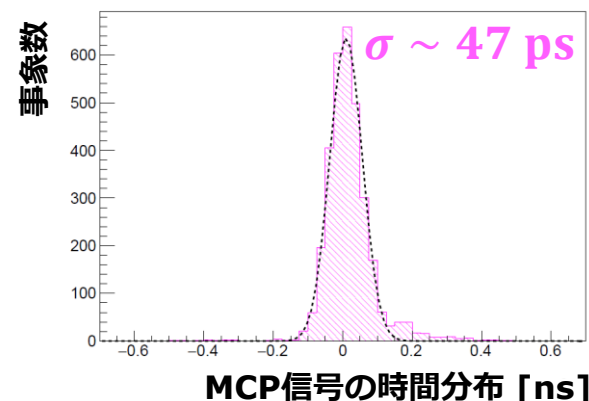
➤ 現状

パルスレーザーを用いて時間分解能を評価し、 $\sigma \sim 47 \text{ ps}$ を達成。

- 内訳 (第76回年次大会 12pX1-8 四塚)

- ・読み出し系 : $\sigma \sim 32 \text{ ps}$ (測定値)
- ・パルスレーザー : $\sigma \sim 24 \text{ ps}$ (評価値)
- ・MCP : $\sigma \sim 25 \text{ ps}$ (推定値)

パルスレーザーによる分解能評価結果



(2020年秋季大会 17aSD-1 四塚)

本研究の目的：最大の要因である読み出し系の時間分解能改善

読み出し系改善の概要

- 現在の読み出し系はディスクリミネータ+TDC(CAEN V1290A)を使用。
TDCのLSBは25 psだが電氣的ノイズにより分解能が制限される。
- 目標分解能達成のためには**0(1) psの読み出し系**が必要である。

⇒ **波形デジタイザ**を用いた波形解析

入力のアナログ波形を時間で細かく分け、

コンデンサで電圧を記憶し、

後段のADCで各コンデンサの値を変換する。

Domino Ring Sampler 4 (DRS4) ASIC:

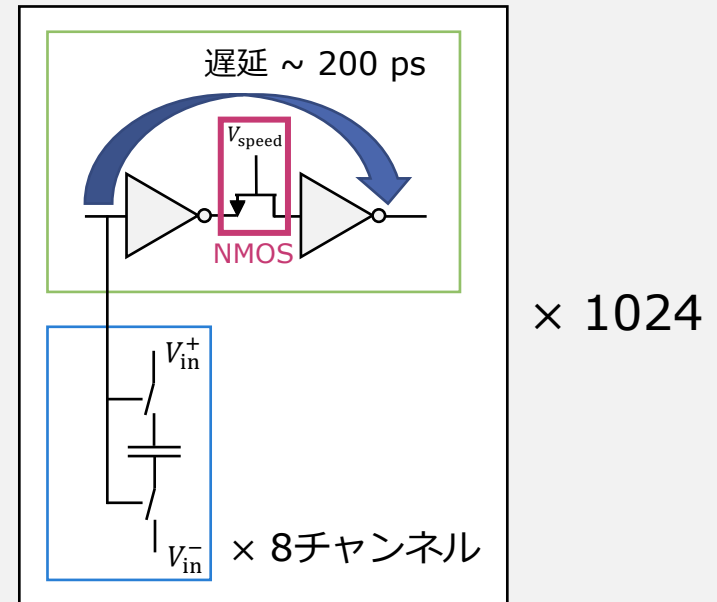
PAUL SCHERRER INSTITUT



作製のSwitched Capacitor Array

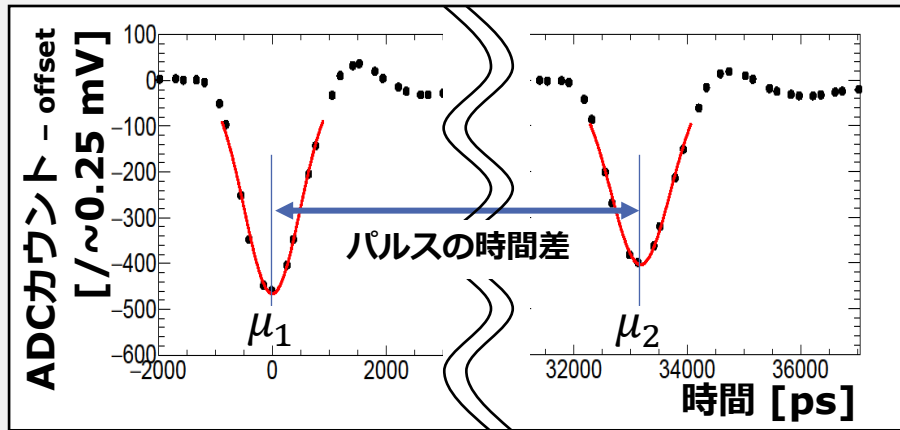
- NMOSによる**200 ps**のサンプリング間隔
- 各チャンネル**1024個**のコンデンサ

[DRS4内サンプリングセルのイメージ図]



高速サンプリング + 複数サンプル波形フィッティングによる電氣的ノイズの影響削減 ⇒ 時間分解能の向上

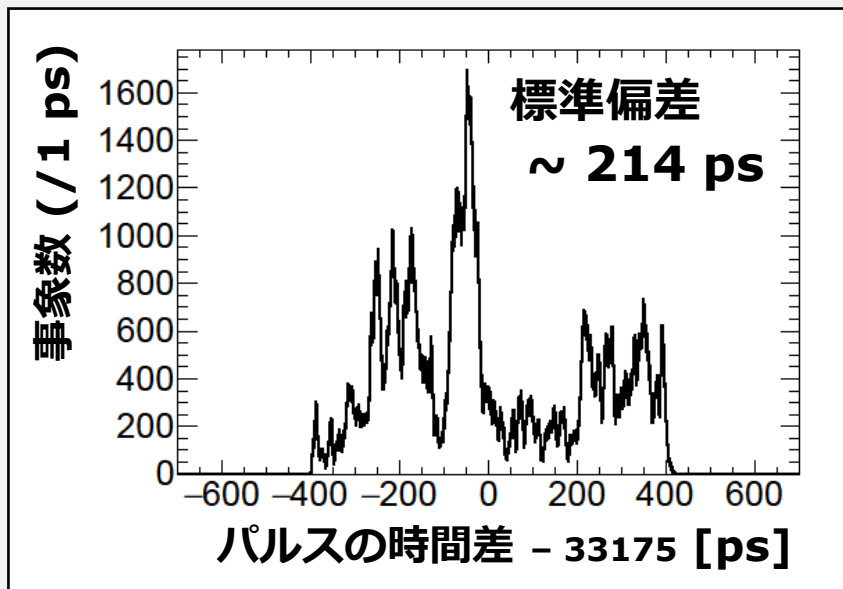
- DRS4を搭載した波形デジタイザ(CAEN V1742)を使用し、
2つのテストパルスの時間差測定で分解能を評価した。



$$f_i(x) = N_i \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) + \text{offset}_i$$

範囲: $\{\mu_i - 900, \mu_i + 900\}$

でフィッティングし、
そのピーク位置(μ_1, μ_2)を用いて
パルスの時間差を求める。



- 時間差のばらつきが大きい
 - 複数のピークが見えている
- **DRS4の特性によるもの**と判断。

時間差ばらつきの原因

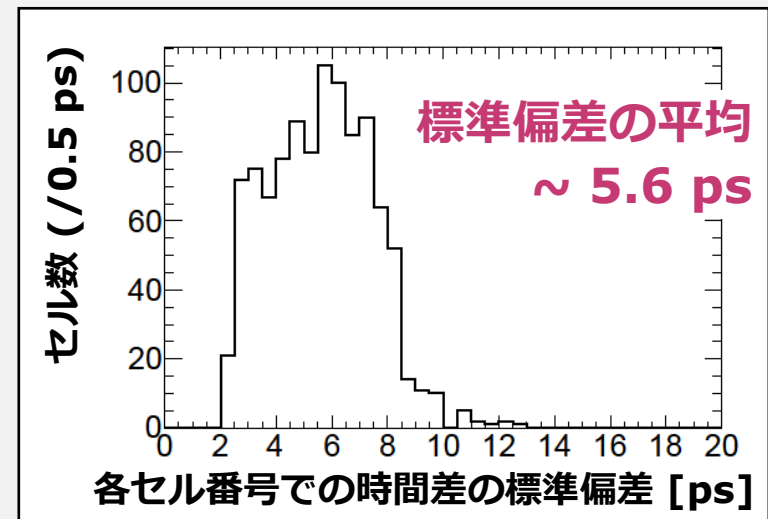
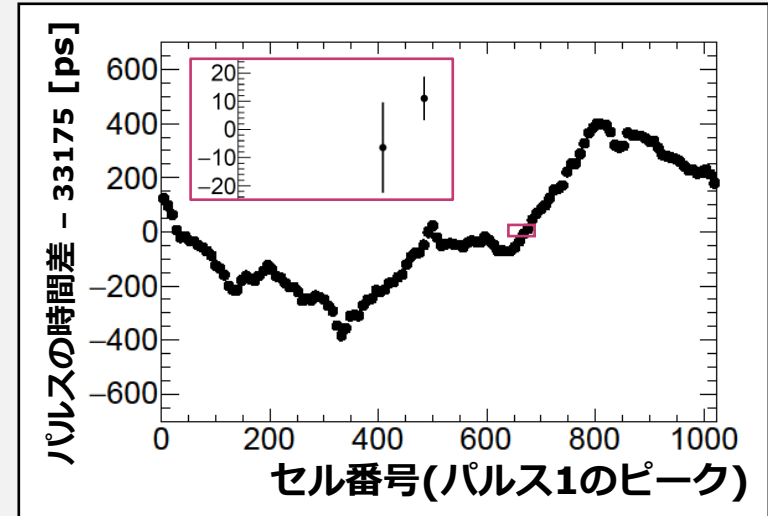
DRS4の特性

1. トリガ発行のタイミング次第で各パルスがどのセルに記録されるかが変化する。
2. 各セルの時間幅に200 psからのずれが存在する。

各セルの時間幅のずれに起因する時間差のずれがあることを確認した。

各点の標準偏差から各セル番号での時間差のばらつきが非常に小さいことも確かめられた。

各セルの時間幅を補正することにより
数psの分解能を見込める。

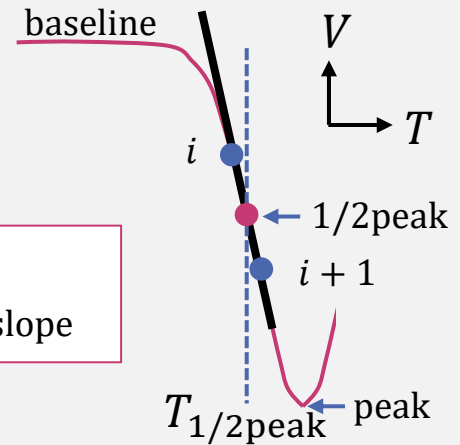


➤ パルスの時間情報取得

ピークの半分付近の2点を通る直線から
電圧がピークの半分になる時間($T_{1/2\text{peak}}$)を計算する。

$$V(T) = \text{slope} \times T + \text{offset}$$

$$\Rightarrow T_{1/2\text{peak}} = (0.5 \times V(T_{\text{peak}}) - \text{offset}) / \text{slope}$$

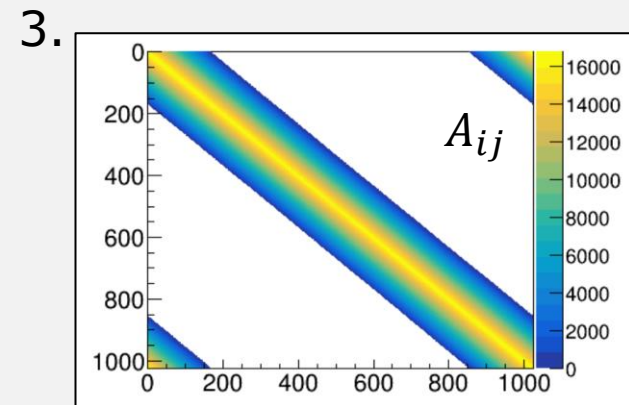
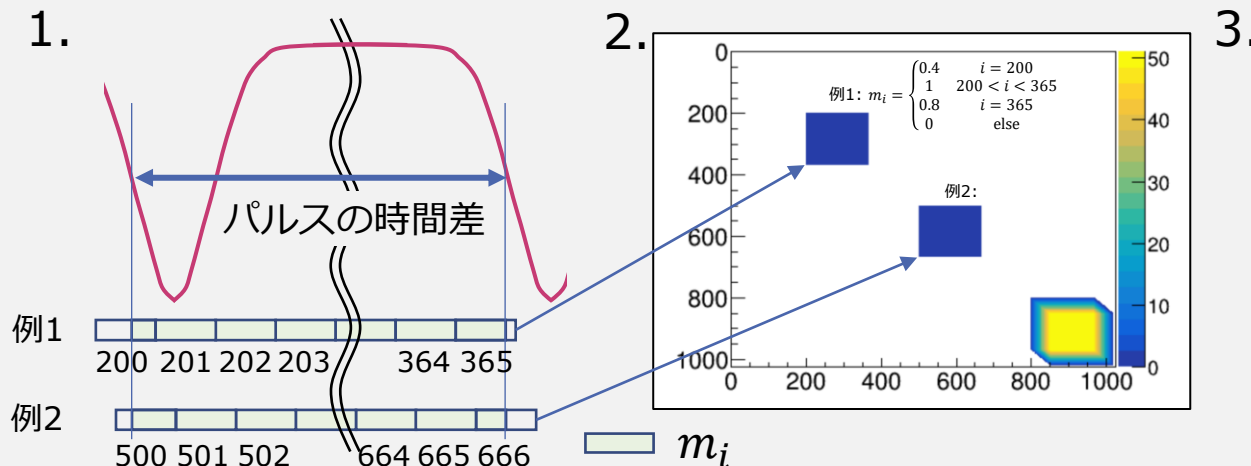


➤ 行列計算

1. パルスの時間差とセルの重なりを m_i ($0 \leq m_i \leq 1$)と表す。
2. サイズ1024の対称行列 A , 配列 b の各要素に加える。
3. 一定の事象数まで足し上げ、逆行列を計算し、各セルの時間幅を得る。

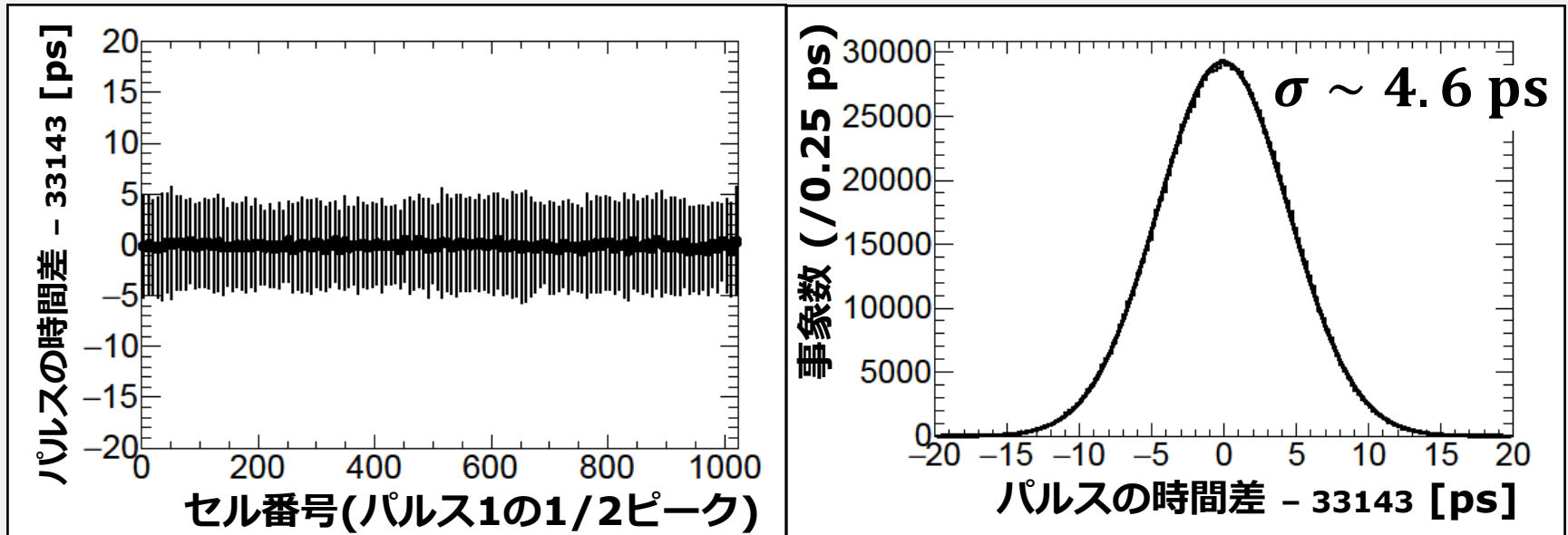
$$A_{ij} += m_i m_j, b_i += m_i$$

$$t_i = \text{Scalefactor} \times A_{ij}^{-1} b_j$$



時間幅補正後の時間分解能評価

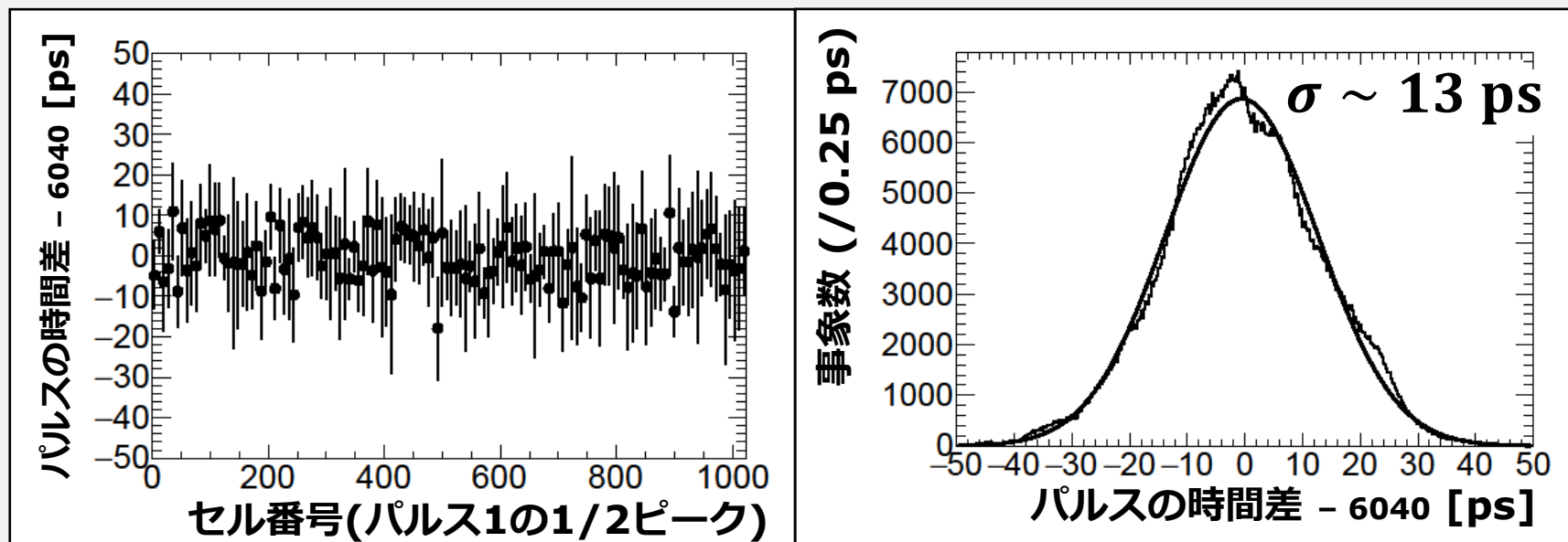
- 各セルの時間幅を求め、波形フィッティング（直線(2点)）を再度行い、2つのパルスの時間差で分解能を評価した。



- 各セル番号の平均値はほぼ等しくなっている。

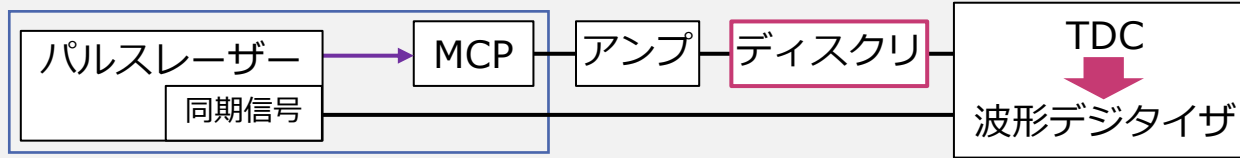
波形デジタルライザ+フィッティングで高時間分解能を実現可能

- 各セルの時間幅を求める際に使用したデータと異なるデータに補正された時間幅を適用し、波形フィッティング（直線(2点)）で2つのパルスの時間差の精度を評価した場合、**分解能が悪化する**。
→ 精度の高い補正には至っていない。今後原因を探っていく。



- 各セル番号の平均値のばらつき増加。

【バンチ幅モニタの読み出し系】



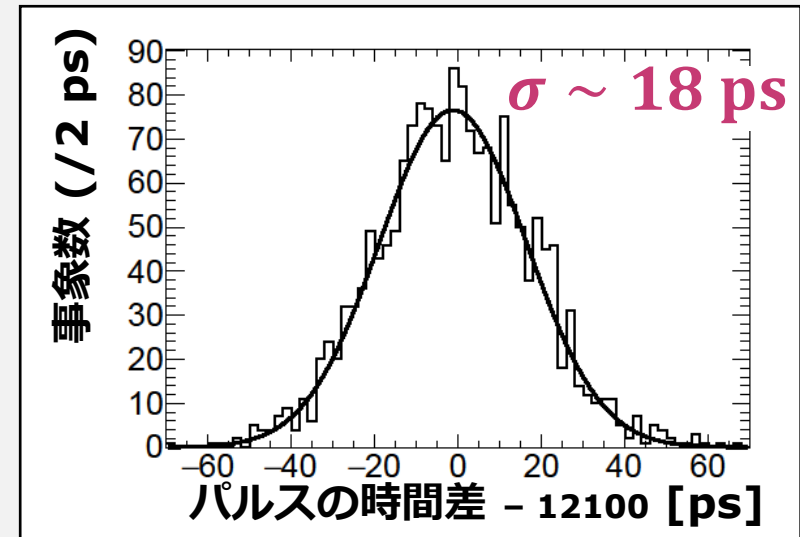
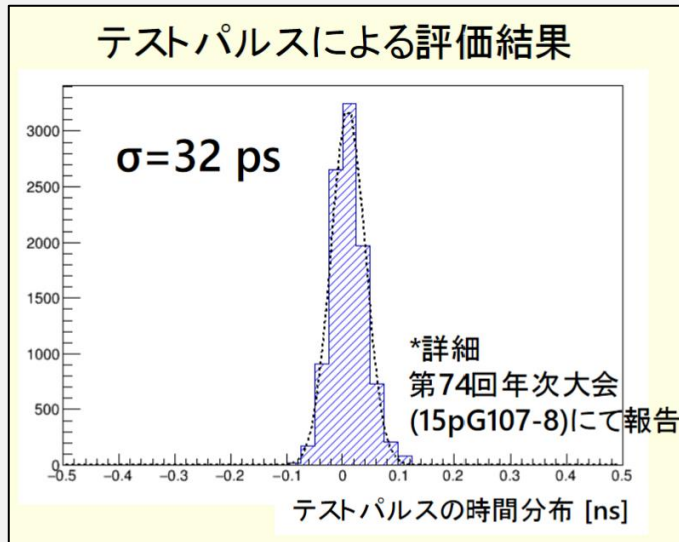
先行研究からの変更点
- TDC → 波形デジタイザ
- アナログ信号読み出し

読み出し系の評価時はテストパルスに置き換える。

➤ テストパルスを用いて回路全体の時間分解能を評価した。

ディスクリミネータ+TDCによる読み出し
(先行研究)

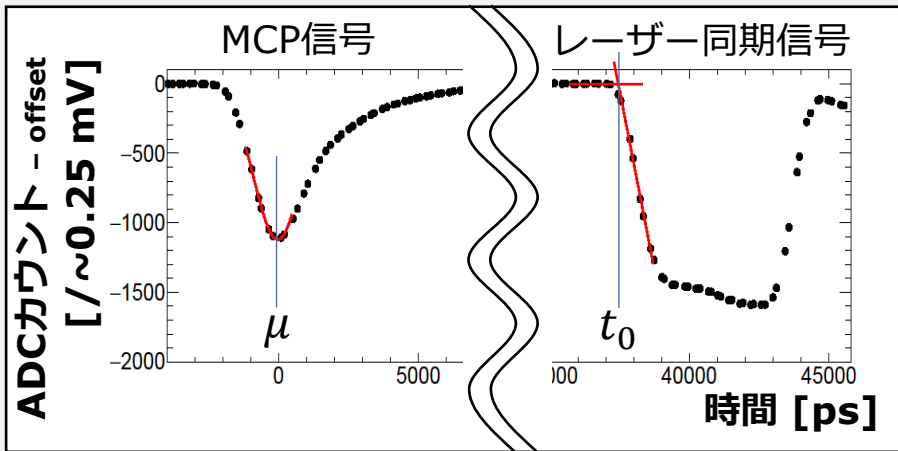
波形デジタイザによる読み出し



※ 時間幅補正の不定性で数ps変化し得る。

先行研究の読み出し系より高い時間分解能を達成した。

- MCP信号とレーザー同期信号を入力し、読み出し系変更後のバンチ幅モニタの時間分解能を評価した。



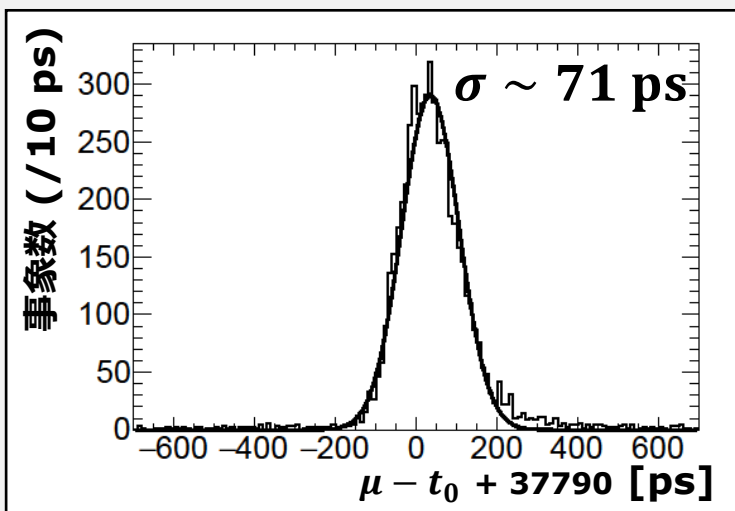
フィッティング関数

$$f_1(x) = N \times \text{gauss}(\mu, \sigma) + \text{offset}_1$$

範囲: $\{\mu_1 - 1200, \mu_1 + 480\}$

$$f_2(x) = a(x - t_0) + \text{offset}_2$$

範囲: $\{t_0, t_0 + 1200\}$



バンチ幅モニタの分解能は $\sigma \sim 71$ psで
先行研究の性能からの向上には至っていない。
($\sigma \sim 47$ ps)

- ・ 波形とフィット関数の形状との不一致
 - ・ 時間幅補正の精度不足
- が悪い要因として考えられる。

➤ 結論

- ミューオン $g - 2$ /EDM精密測定実験の線形加速器中-高速部では、より高時間分解能のバンチ幅モニタが必要である。
→ 200 ps間隔波形デジタイザによる読み出し系の改善を試みた。
- 各セルの時間幅のばらつきを補正し、波形デジタイザで $\sigma \sim 4.6 \text{ ps}$ の時間分解能を達成できることを示した。
- バンチ幅モニタの読み出し系(アナログ信号)の時間分解能を $\sigma \sim 18 \text{ ps}$ と評価し、先行研究の $\sigma \sim 32 \text{ ps}$ からの改善を示した。

➤ 展望

時間幅補正及び波形フィッティングを改善し、読み出し系の時間分解能 $\sigma = O(1) \text{ ps}$ の達成を目指す。
さらに、検出部にも改良を加え、バンチ幅モニタの分解能 $\sigma \sim 10 \text{ ps}$ の達成を目指す。

