MSMI:シリコンピクセル検出器Timepix3を用いた位置分解μSRイメージングの開発

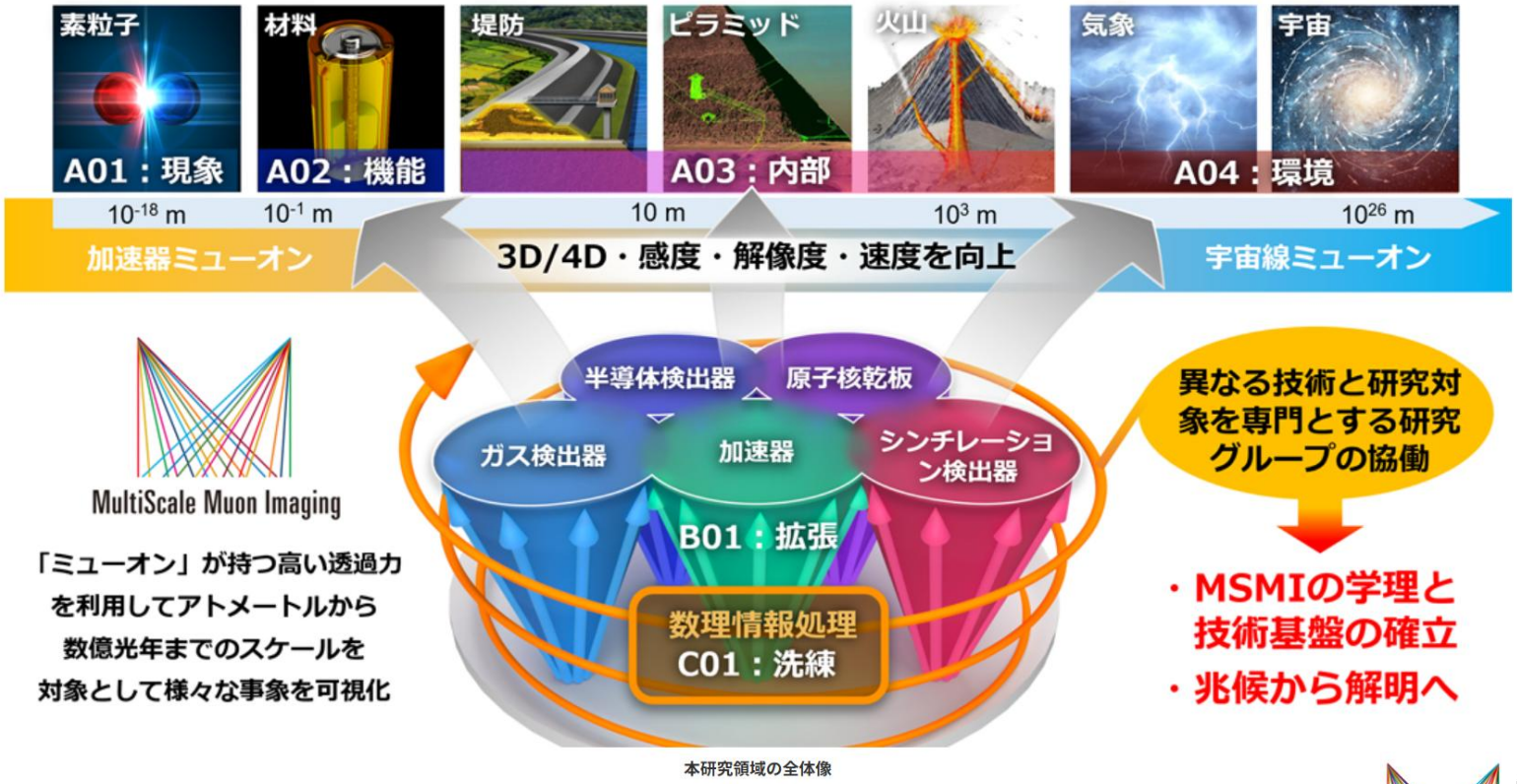
2026/11/19

新潟大学 高エネルギー物理学研究室

M1 村田隆起

MSMI: Multi Scale Muon Imaging

- 多彩なミューオン技術と情報科学を融合し，幅広いスケール事象の可視化を目的とした学術変革領域.
  - A01～A04で, 素粒子・材料・大型構造物・宇宙環境という異なるスケールを扱う.
  - B01・C01が加速器・情報解析などの技術基盤を担い, 各研究班と連携する.





領域代表

名古屋大学　森島邦博

https://msmi.jp/

MSMI マルチスケールミューオンイメージングで「視る」兆候から解明へ

A02:機能を『視る』

研究目的

- μSRの空間分解能を高め，多次元的なイメージング手法を実現する.
- 燃料電池などの材料・デバイス内部の状態を可視化する.



- **可視化対象：**
  材料・デバイスの内部構造・状態
- **対象スケール：μm~cm**
- **ミューオン源：**
  加速器ミューオンビーム
- **検出器：半導体検出器**

https://msmi.jp/

MSMI マルチスケールミューオンイメージングで「視る」
兆候から解明へ

μSR (muon spin rotation/relaxation/resonance)とは

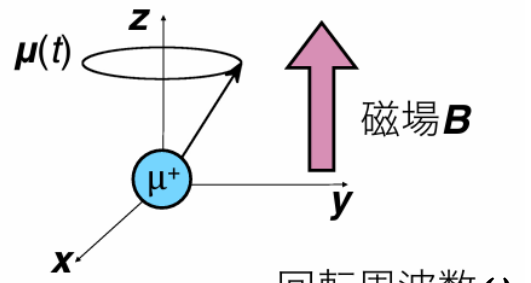
μSR…ミューオンスピン回転/緩和/共鳴法

- ミューオンビームを試料に入射し，スピン運動を観測することで，試料内部の磁場を調べる手法.

- 試料内で停止するミューオンのスピンは内部磁場を受けて**歳差運動**をする.
  - $g-2$:既知の磁場B →異常歳差運動周波数→g因子
  - μSR :既知のg因子+スピン歳差運動周波数→磁場B

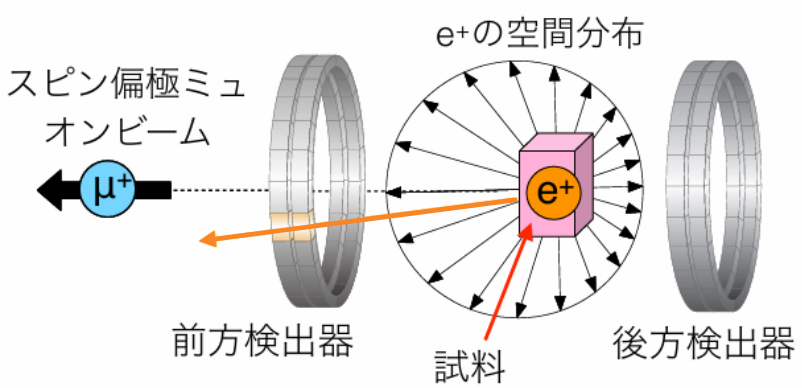
- 崩壊陽電子はスピン方向に多く放出される.

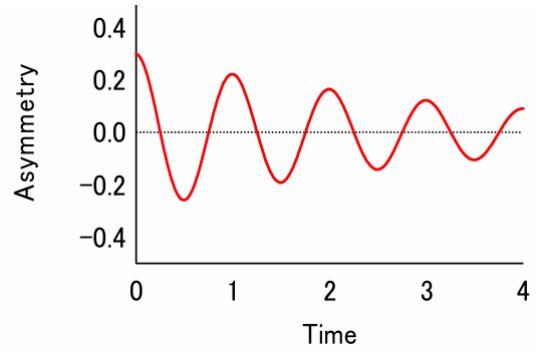
- **陽電子検出数の非対称度** $\boldsymbol{A=\frac{N_F-N_B}{N_F+N_B}}$ の時間発展からスピン運動を観測する.
  - 試料の前方・後方の陽電子検出数：N_F, N_B



回転周波数ω_s

$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt}=\gamma_\mu \boldsymbol{\mu}\times \boldsymbol{B} \quad =\gamma_\mu B$$

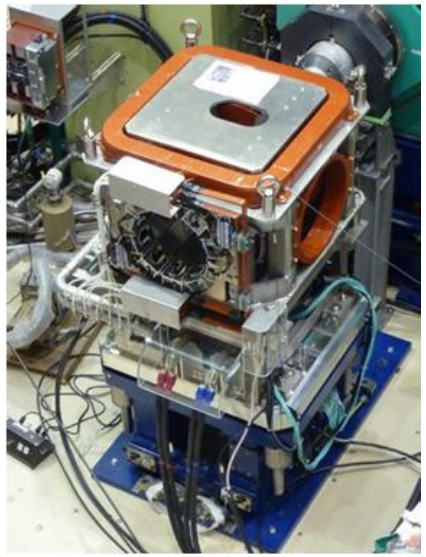




シリコンピクセル検出器を用いたμSR

これまでの課題

- **μSR検出器「KALLIOPE」@J-PARC MLF D1** エリア
  - **プラスチックシンチレータ(~$\mathcal{O}$(10mm))** の信号を **MPPC**で読み出す.
- 従来のμSR検出器の位置分解能では, 試料内の磁気的性質の空間分布を詳細に測定することは困難であった.

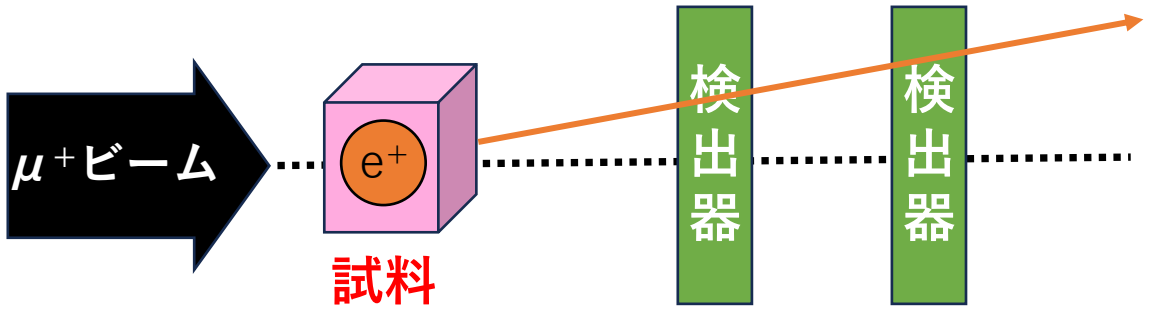


研究目的

- **高位置分解能**を有する**シリコンピクセル検出器**をμSRに導入し, **位置分解μSR**の実現を目指す.
  - 試料前後に**複数台**の検出器を配置.
  - 各層のヒット位置から崩壊陽電子の飛跡を求め, 試料まで外挿することで, ミューオン崩壊位置を**再構成**する.

＊ストリップ型の導入も進行中

シリコンピクセル検出器を用いたμSR



※後方検出器のみ表示

位置分解μSRが目指す機能の可視化

材料・デバイス内部の状態を非破壊で可視化

➢ 深さ分解1D＋平面分解2D＋μSRによる磁気(時間)情報

→3D+1イメージングの実現

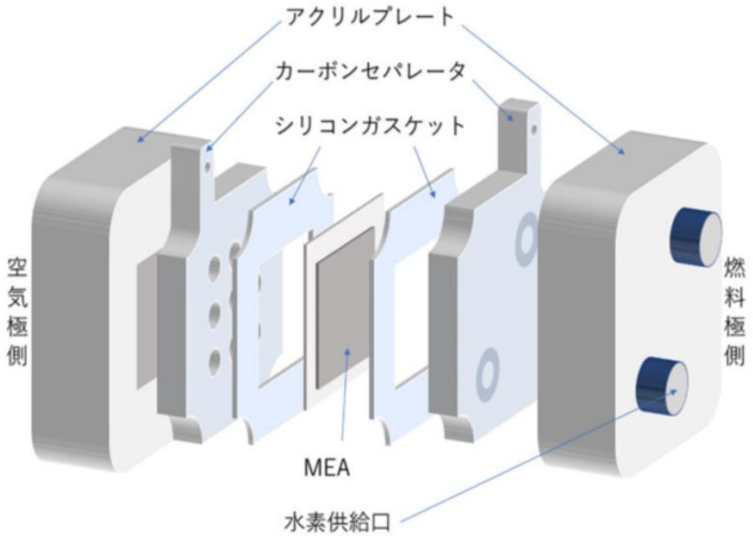
応用例：燃料電池

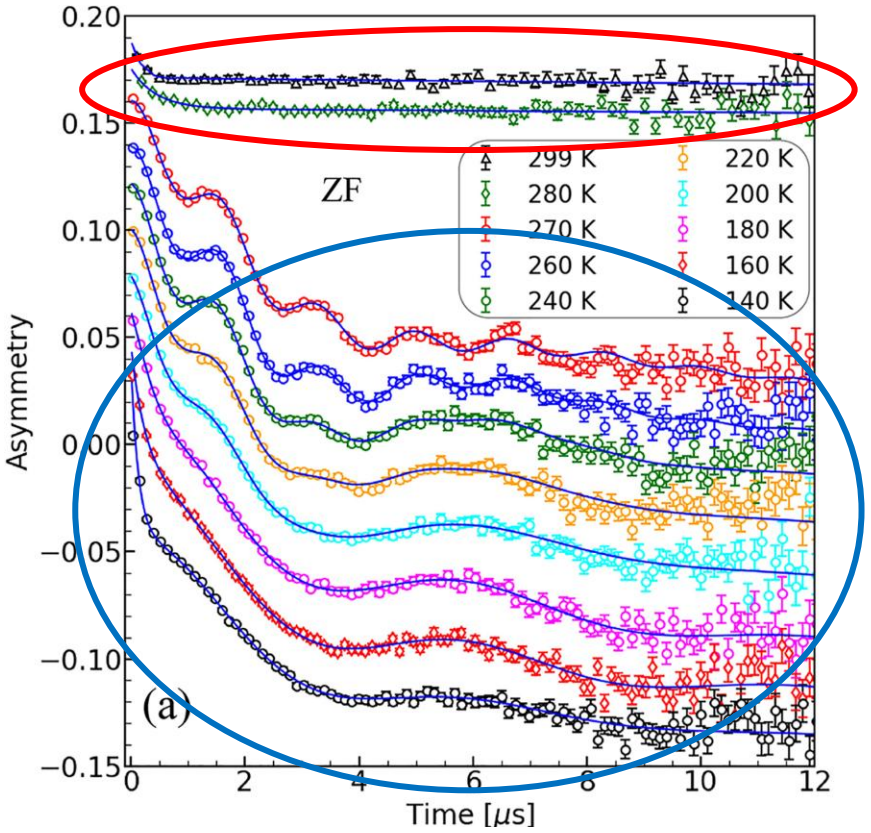
特徴：水素と酸素の反応からエネルギーを取り出す

課題：氷点下での生成水の凍結による**発電性能の低下**

目標：水と氷を識別し, 内部状態の**可視化**を目指す.

⇒運転制御・材料設計への貢献





水：時間変化が小さい

氷：特徴的な振動・緩和

https://cleantech.nagoya-cci.or.jp/2nd/details13.html

A. D. Pant et. al., https://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.110.104104

使用するシリコンピクセル検出器

Timepix3検出器：ADVAPIX TPX3

- CERNで開発された読み出しASIC:Timepix3を搭載した汎用シリコンピクセル検出器

ピクセルサイズ：55 μm×55 μm
Siセンサの厚み：300 μm
ピクセル数：256×256 pixels (有感領域14 mm×14 mm)
時間分解能：1.56 ns
最大読み出し速度：38M hits /s

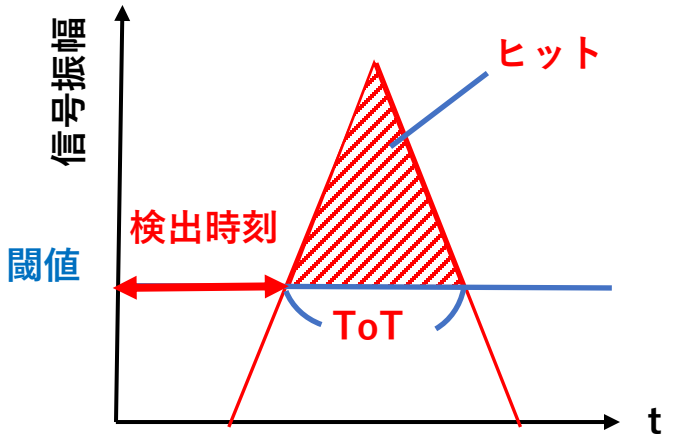


ADVAPIX TPX3

- **位置分解μSRイメージング**に必要な**位置・時間分解能**を有する.

- 露光時間の間，各ピクセルにヒットがあれば，逐次データを読み出し，**ヒット位置**と**時間情報(ToT, 検出時刻)**を同時に取得できる.

  - **ToT(Time over Threshold)**
    - ✓ 信号が閾値を超えている時間 …信号強度(電荷量)の指標

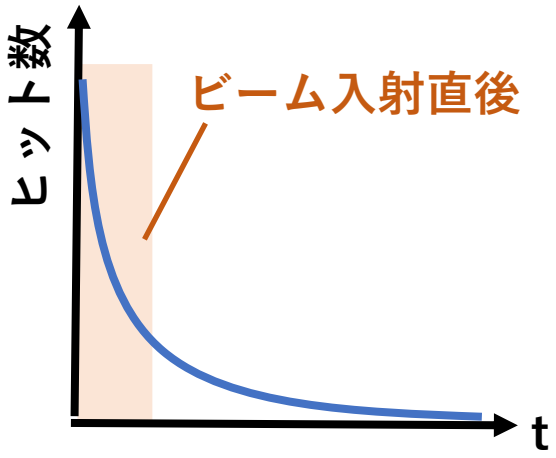


Timepix3のμSRへの導入に向けた開発

①パルスミューオンビームとの同期

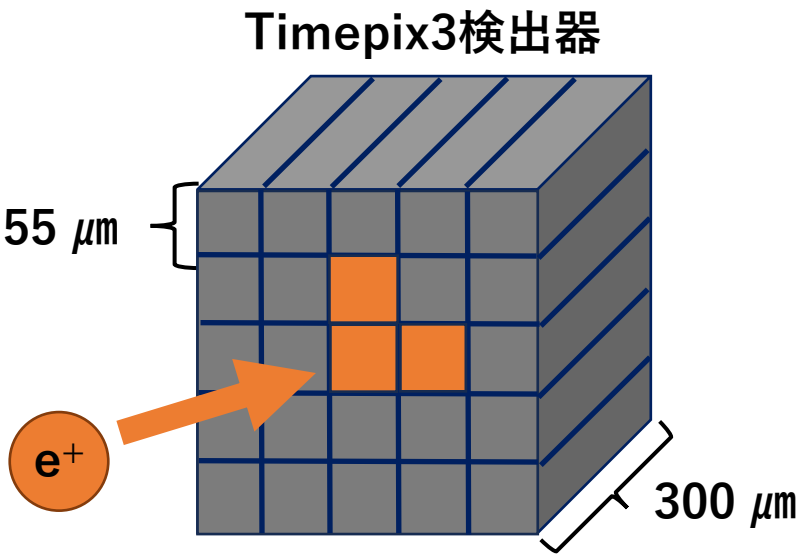
- J-PARCの25 Hzビームパルスに同期したデータ取得に成功した.
- ビーム入射時刻を基準に，崩壊陽電子の時間分布を測定できる.

検出器の性能評価と平行して，DAQ開発が進行中



②高レート環境での検出性能評価

- ビーム入射直後に崩壊陽電子が集中する.
- 検出器のヒットレート耐性・数え落としを実測評価.
- **クラスタリングによる再構成**
  - ✓ 1粒子由来の信号が複数ピクセルにまたがって記録される.
  - ✓ 位置・時刻が近接するヒットを統合する.



本講演では，主にクラスタリングの開発状況を報告する

ビームテスト@J-PARC

測定目的

- ビームと同期したヒットデータの取得
- 異なるビームレートの時間分布を用いた検出性能の評価

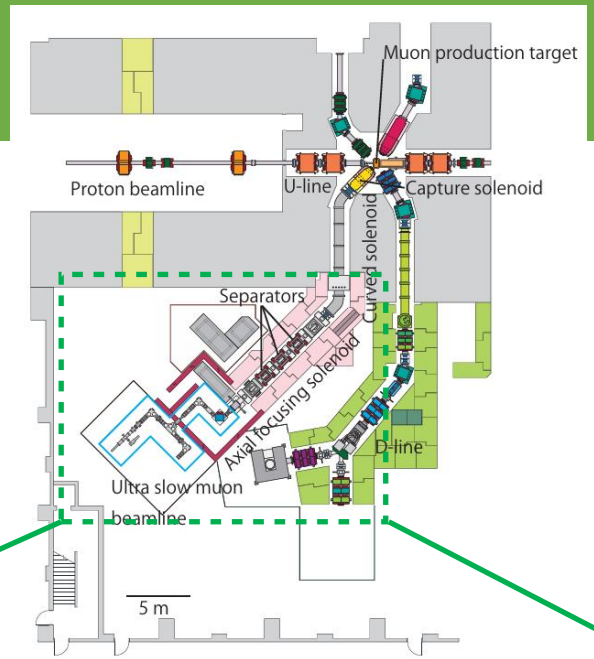
測定環境

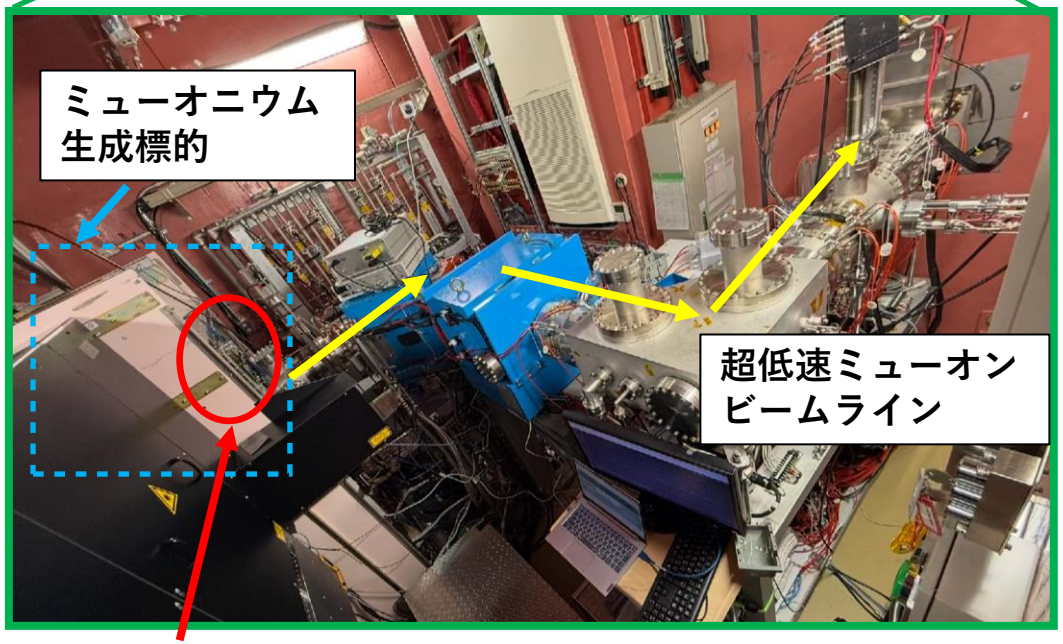
- MLF U-line(U1エリア)にTimepix3 検出器を1台設置
- ミューオニウム生成標的近傍の磁気シールド上に設置

※**ミューオニウム：** μ^+とe^-の束縛状態

測定方法

- MLFの25Hzビームトリガーを FPGA経由でTimepix3に伝送
- 収束ソレノイドの電流値を変更し，ビームレートを調整.





設置位置:高レート領域を選択

クラスタリング手法の開発

- U-lineでの取得データを元にクラスタリング手法を開発している.

- **クラスタリング処理手順**

1) ヒットを時刻順に並べる.

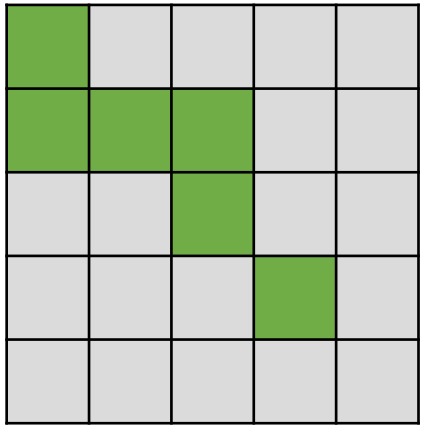
2) 未使用ヒットのうち，最も時間の早いヒットに着目する.

3) 周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
   - 位置条件：3×3ピクセル領域
   - 時間条件：時間差 10 ns以下

4) 追加したヒットの周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.

5) 追加するヒット点がなくなるまで, 手順4を繰り返す.

6) クラスタを保存し, 手順2 に戻る.
   - ToTで重み付けした平均位置
   - 平均時刻



クラスタリングの例
クラスタ候補のヒット

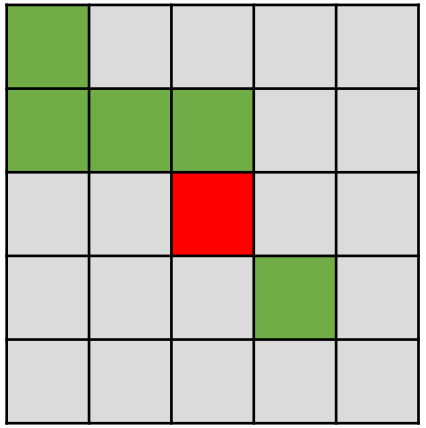
クラスタリング手法の開発

- U-lineでの取得データを元にクラスタリング手法を開発している.

- **クラスタリング処理手順**

1) ヒットを時刻順に並べる.
2) **未使用ヒットのうち，最も時間の早いヒットに着目する.**
3) 周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
   - 位置条件：3×3ピクセル領域
   - 時間条件：時間差 10 ns以下
4) 追加したヒットの周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
5) 追加するヒット点がなくなるまで, 手順4を繰り返す.
6) クラスタを保存し, 手順2 に戻る.

   - ToTで重み付けした平均位置
   - 平均時刻



クラスタリングの例
クラスタ候補のヒット
着目しているヒット

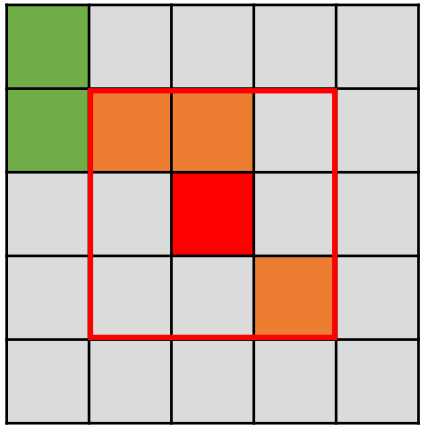
クラスタリング手法の開発

- U-lineでの取得データを元にクラスタリング手法を開発している.

- **クラスタリング処理手順**

1) ヒットを時刻順に並べる.
2) 未使用ヒットのうち，最も時間の早いヒットに着目する.
3) **周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.**
   - 位置条件：3×3ピクセル領域
   - 時間条件：時間差 10 ns以下
4) 追加したヒットの周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
5) 追加するヒット点がなくなるまで, 手順4を繰り返す.
6) クラスタを保存し, 手順2 に戻る.

   - ToTで重み付けした平均位置
   - 平均時刻



クラスタリングの例
クラスタ候補のヒット
着目しているヒット
統合されたヒット

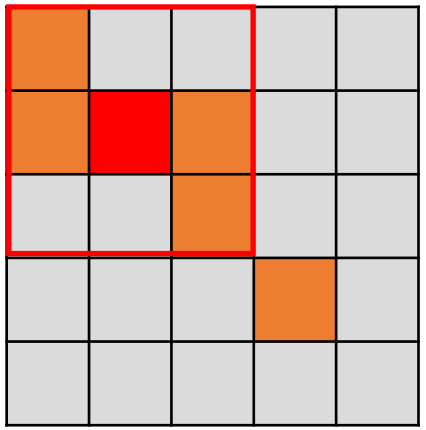
クラスタリング手法の開発

- U-lineでの取得データを元にクラスタリング手法を開発している.

- **クラスタリング処理手順**

1) ヒットを時刻順に並べる.
2) 未使用ヒットのうち，最も時間の早いヒットに着目する.
3) 周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
   - 位置条件：3×3ピクセル領域
   - 時間条件：時間差 10 ns以下
4) **追加したヒットの周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.**
5) 追加するヒット点がなくなるまで, 手順4を繰り返す.
6) クラスタを保存し, 手順2 に戻る.

   - ToTで重み付けした平均位置
   - 平均時刻



クラスタリングの例
クラスタ候補のヒット
着目しているヒット
統合されたヒット

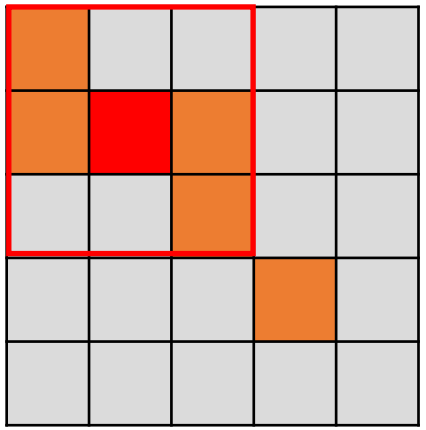
クラスタリング手法の開発

- U-lineでの取得データを元にクラスタリング手法を開発している.

- **クラスタリング処理手順**

1) ヒットを時刻順に並べる.
2) 未使用ヒットのうち，最も時間の早いヒットに着目する.
3) 周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
   - 位置条件：3×3ピクセル領域
   - 時間条件：時間差 10 ns以下
4) 追加したヒットの周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
5) **追加するヒット点がなくなるまで, 手順4を繰り返す.**
6) クラスタを保存し, 手順2 に戻る.

   - ToTで重み付けした平均位置
   - 平均時刻



クラスタリングの例

クラスタ候補のヒット

着目しているヒット

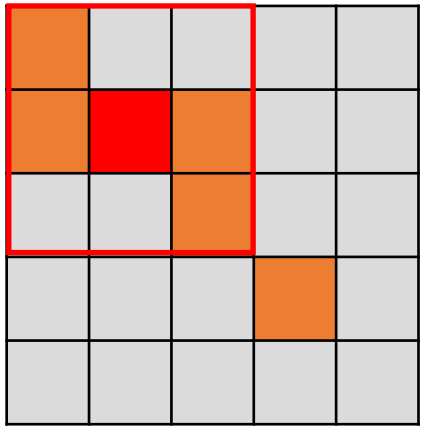
統合されたヒット

クラスタリング手法の開発

- U-lineでの取得データを元にクラスタリング手法を開発している.

- **クラスタリング処理手順**

1) ヒットを時刻順に並べる.
2) 未使用ヒットのうち，最も時間の早いヒットに着目する.
3) 周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
   - 位置条件：3×3ピクセル領域
   - 時間条件：時間差 10 ns以下
4) 追加したヒットの周囲を探索し，条件に合うヒットをクラスタに追加する.
5) 追加するヒット点がなくなるまで, 手順4を繰り返す.
6) **クラスタを保存し, 手順2 に戻る.**
   - ToTで重み付けした平均位置
   - 平均時刻

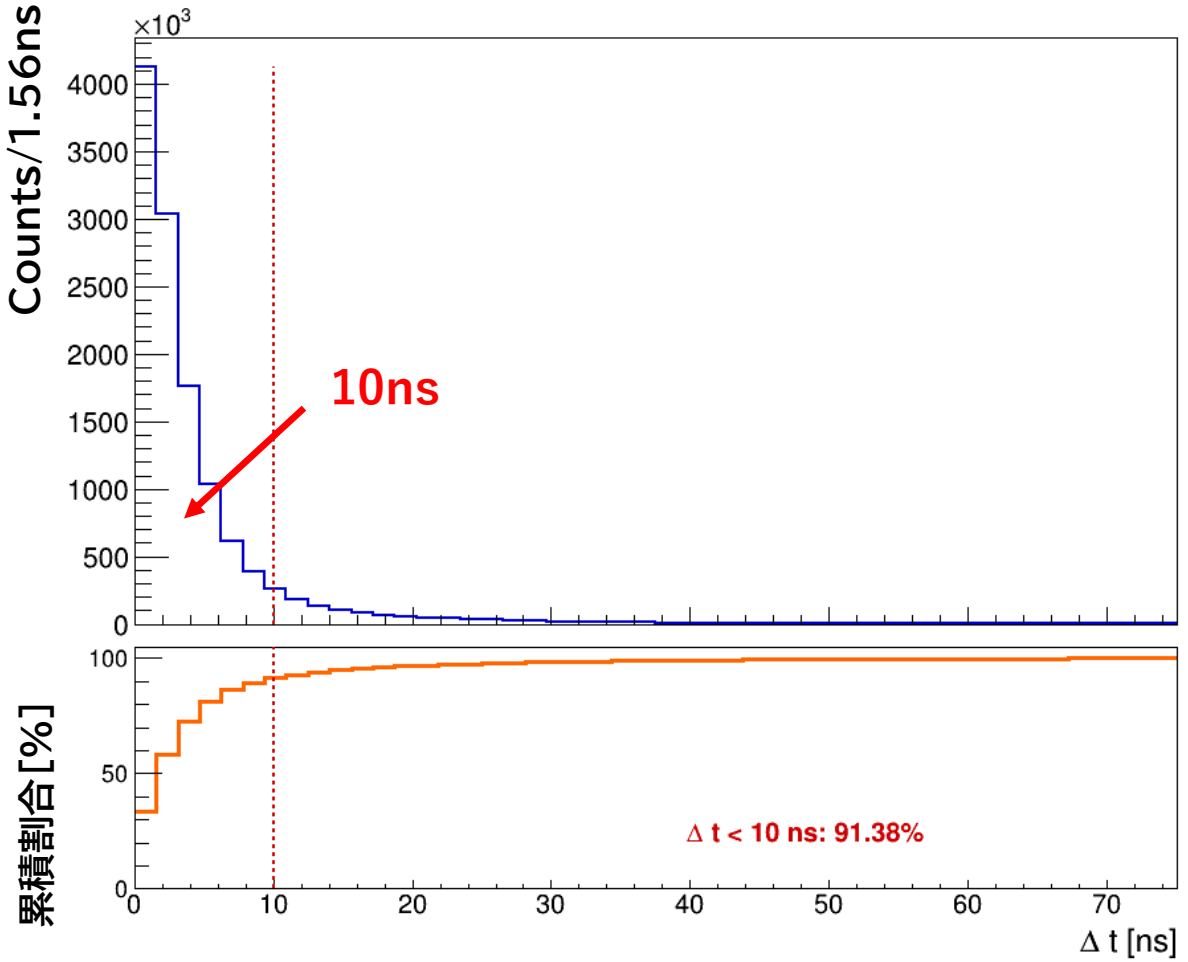


クラスタリングの例
クラスタ候補のヒット
着目しているヒット
統合されたヒット

クラスタリング条件の暫定的な検討

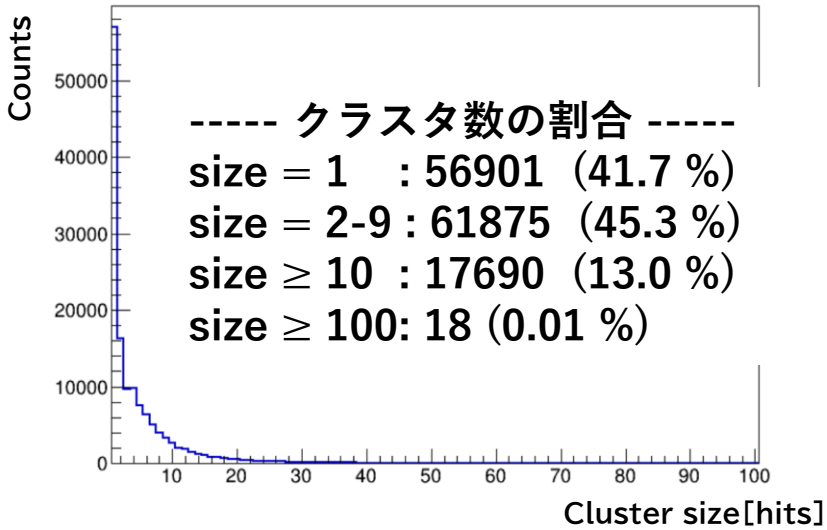
- 暫定条件の決定方法
  - **位置条件**：8近傍(3×3ピクセル領域)
  - あるヒットに対し，位置条件を満たす，最も時間が近い過去ヒットとペアを作り，時間差分布から**時間条件**Δtを検討した.

- 90%以上を満たす$\Delta t = 10\mathrm{ns}$を暫定採用

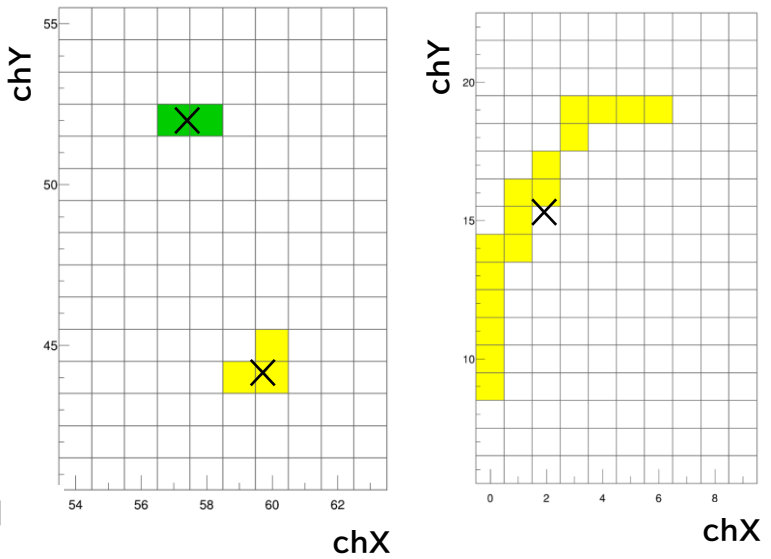


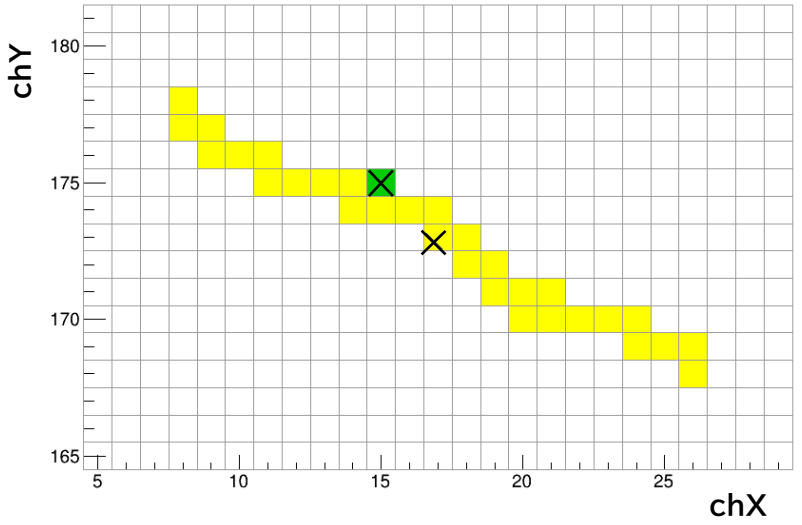
ヒットペアの時間差分布

暫定条件によるクラスタリング結果



1クラスタあたりのヒット分布

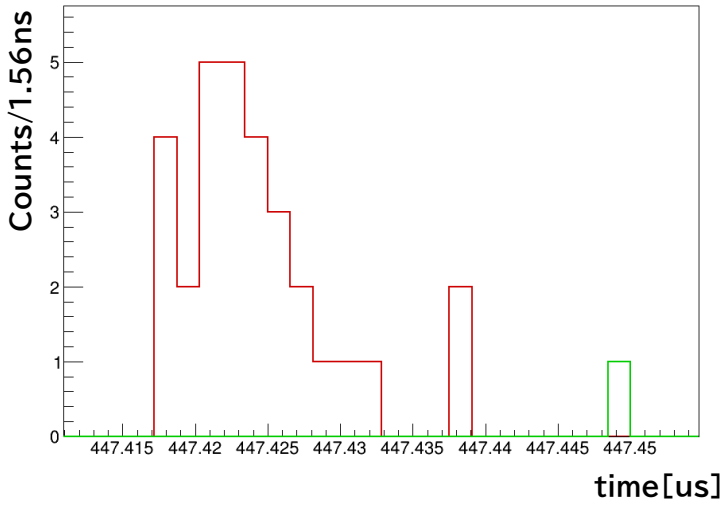




適切にクラスタリングされた例

- 多くのヒットはクラスタに統合されたが，不自然な統合・分離も確認された．
- タイムウォークの影響を確認する必要がある．
  - **タイムウォーク**…信号の大きさによって閾値を超える時刻が変化し，検出時刻にずれが生じる現象

⇒ToTが小さいヒットは検出時刻がずれ，クラスタリングの時間条件から外れる可能性がある．

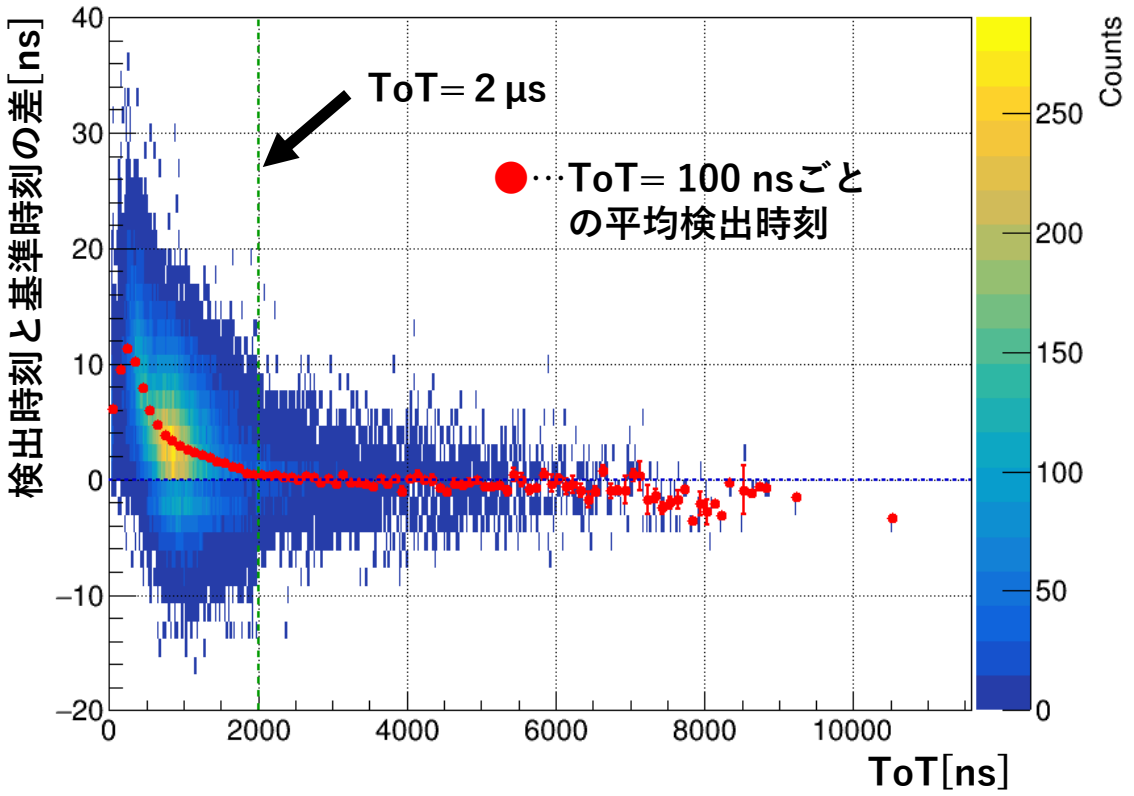


1つのクラスタが2つのクラスタとして認識された例

タイムウォークの影響

- サイズの大きいクラスタに対し，**ヒットの検出時刻とクラスタの基準時刻の差**をプロットした.
  - 基準時刻は各クラスタにおけるToT>2 μsのヒットの平均時刻から計算した.

- タイムウォークと整合する相関が確認され，検出時刻の補正が必要であるとわかった.



サイズ30~100のクラスタにおけるToTと検出時刻の相関

＊ToT＞ 2 μsのヒットを含まないクラスタは除外した

タイムウォーク補正関数の検討

- 平均時刻(TProfile)に対して，複数の関数でFitをして，χ^2/ndf の評価によって決定する.

- Timepix3の時間校正に関する先行研究を参考に，補正関数を検討した.

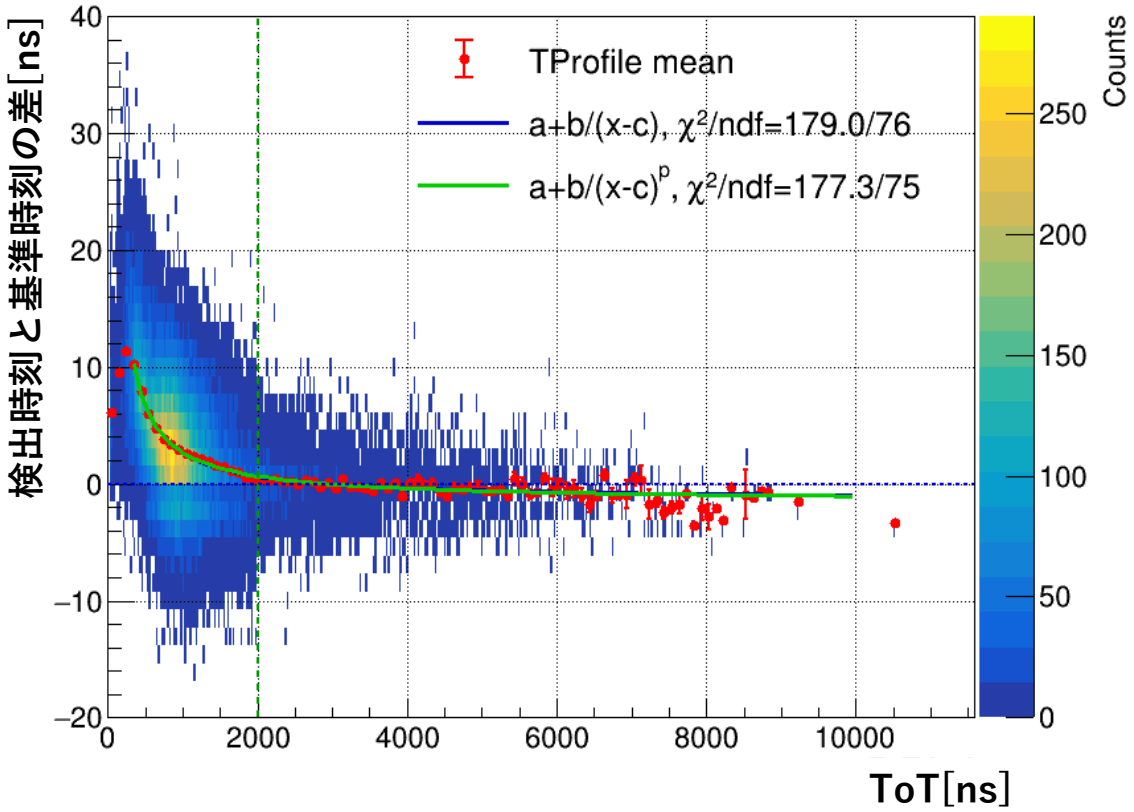
候補関数

$$f(x) = a + \frac{b}{x-c} \qquad \chi^2/\mathrm{ndf}\sim 2.36$$

$$f(x) = a + \frac{b}{(x-c)^p} \qquad \chi^2/\mathrm{ndf}\sim 2.36$$

- 2つの候補関数でFitを行ったが，χ^2/ndfに大きな差は見られなかった.

→シンプルな$f(x) = a + \frac{b}{x-c}$を採用する



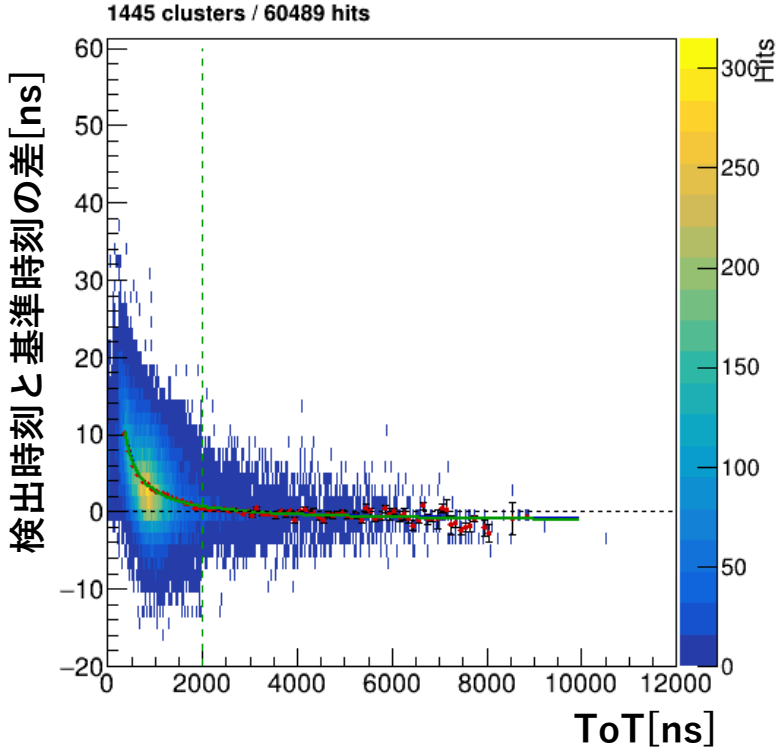
サイズ30~100のクラスタにおけるToTと検出時刻の相関

＊ToT＞２μsのヒットを含まないクラスタは除外した

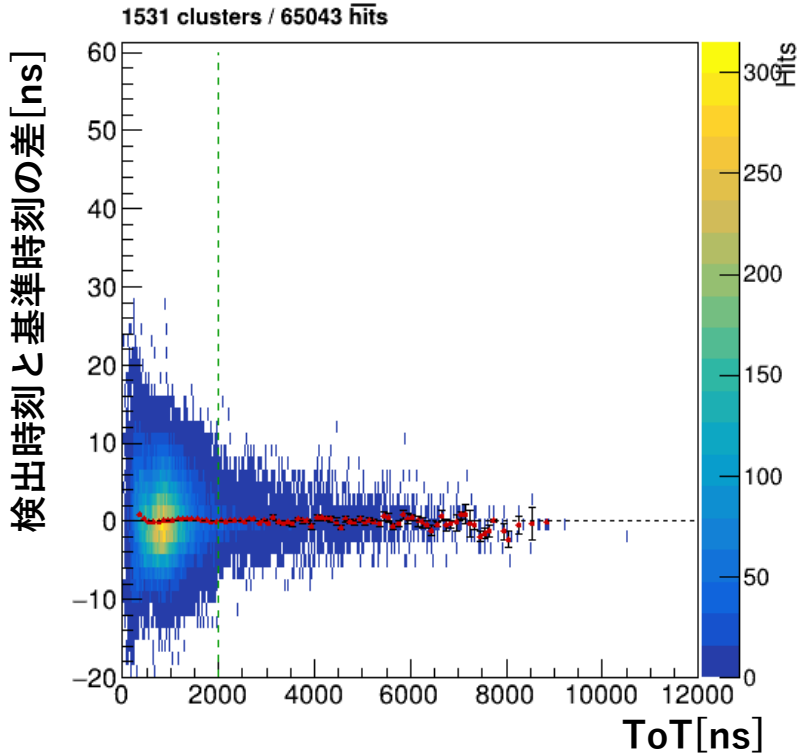
Y. Auad et al., *Ultramicroscopy* **257**, 113889 (2024).

タイムウォーク補正結果

➢Fit関数：$f(x) = a + \frac{b}{x-c}$を用いて，各ヒットの検出時刻を補正し，時間条件：$\Delta t = 10\ \mathrm{ns}$で，再びクラスタリングした．



タイムウォーク補正前



タイムウォーク補正・
再クラスタリング後

➢タイムウォーク補正によって，ToT依存性が低減された．

タイムウォーク補正後の時間条件の検討

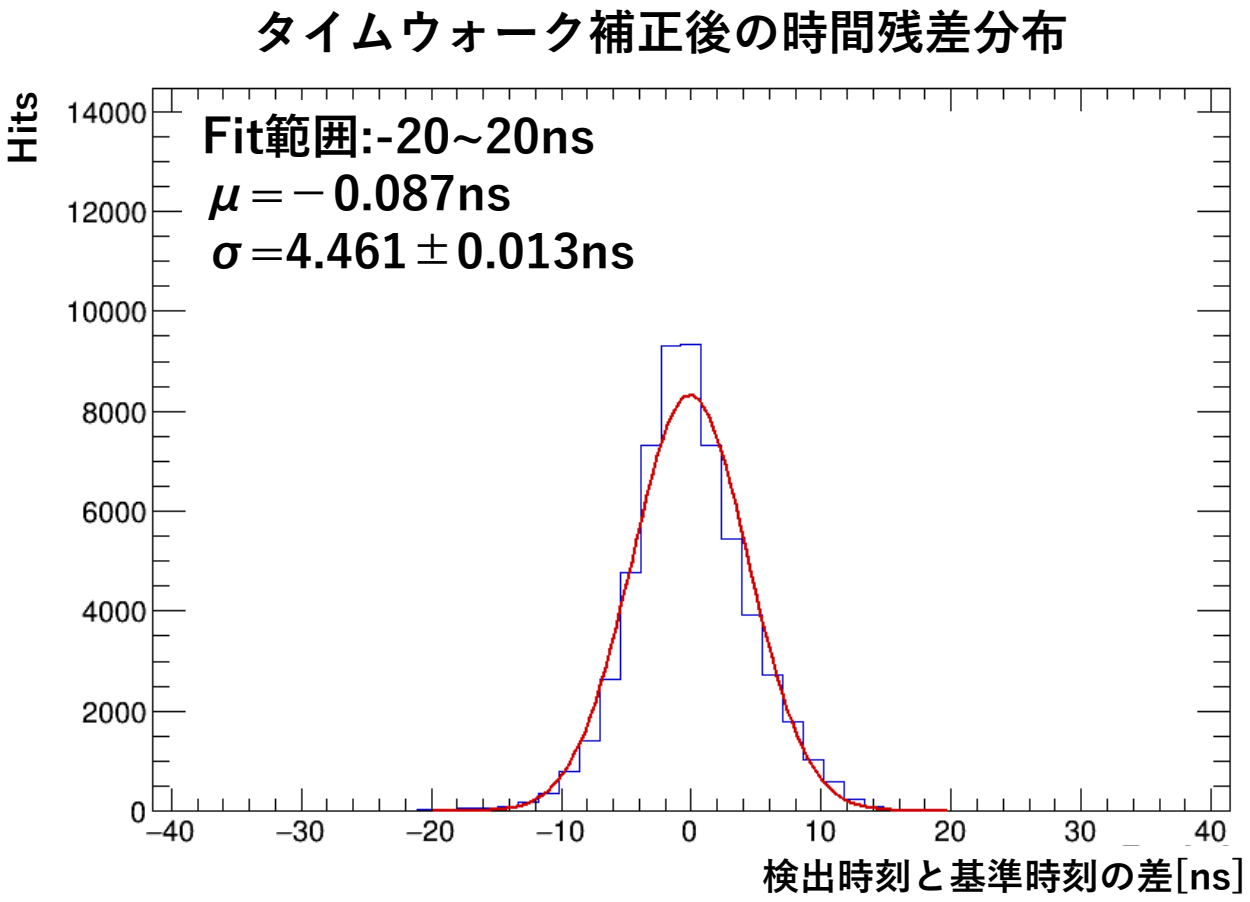
- 再クラスタリングしていない，タイムウォーク補正後の時間分布をGaussianでFitし，分布幅を目安にして，時間条件を決定する．

時間条件の設定

$$\Delta t = 3\sigma = 13.38\ \mathrm{ns}$$

※ 基準時刻の算出には，暫定的に ToT >2μs のヒットを用いた．

- 他のレートでも時間条件を求め，タイムウォーク補正・クラスタリングした結果を用いて，検出器の性能評価を行う．



寿命測定によるヒットレート耐性評価

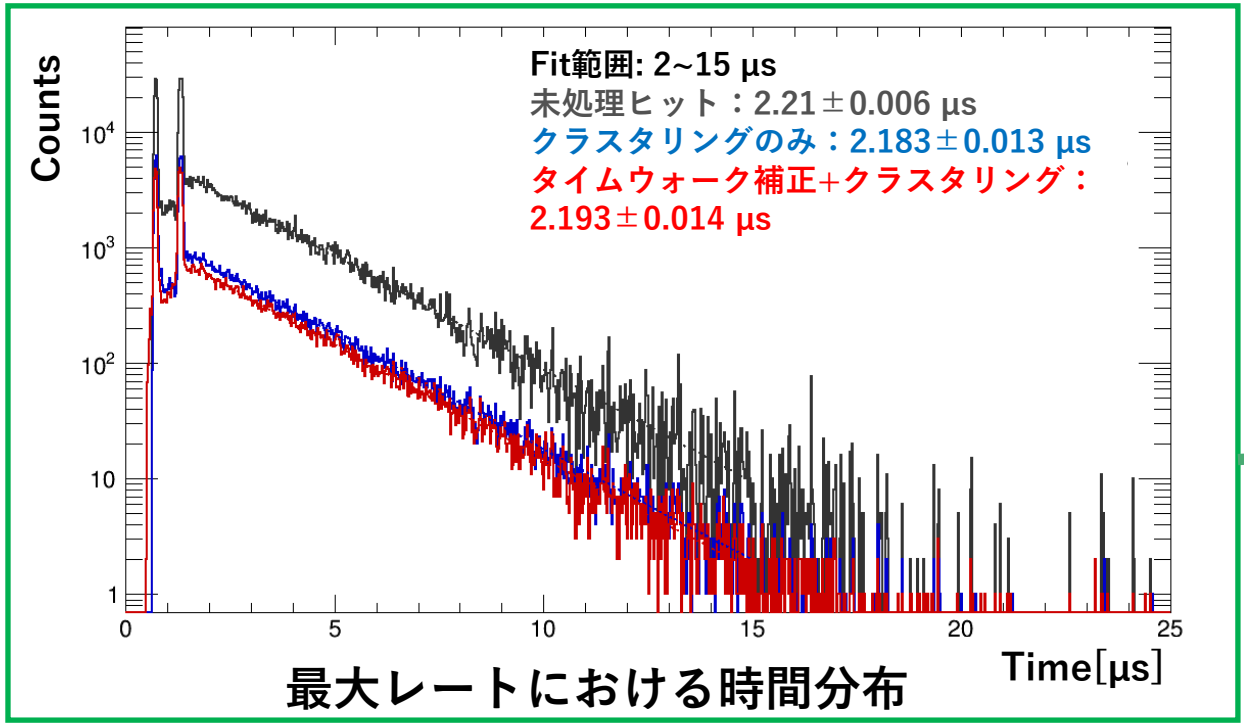
- 各ビームレートの時間分布に対して，Fitをしてミューオンの寿命を求めた.

陽電子検出数: $y(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + C$

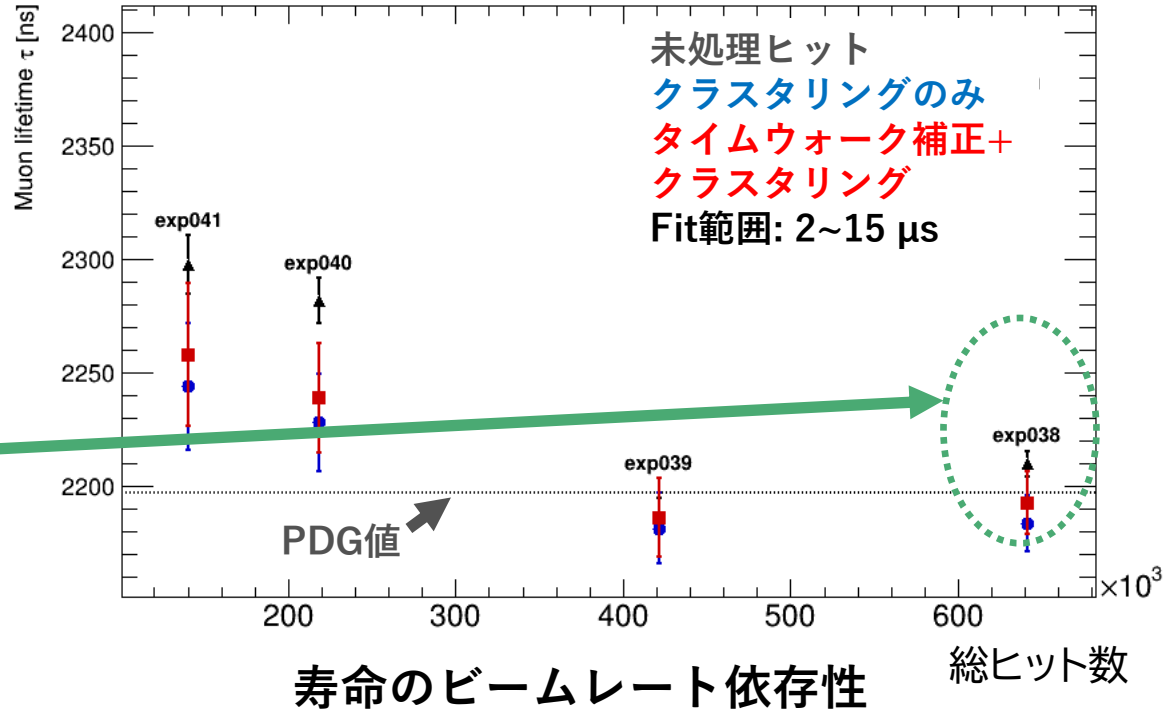
A:規格化定数　　τ:ミューオンの寿命

C: 時間依存しないBG成分

- クラスタリングにより，全レート条件で寿命が短くなった.
- タイムウォーク補正後は寿命が増加し，最大レート条件ではPDG値に近づいた.
- 測定条件間で寿命に差が見られ，明確なレート依存性は確認できなかった.



最大レートにおける時間分布



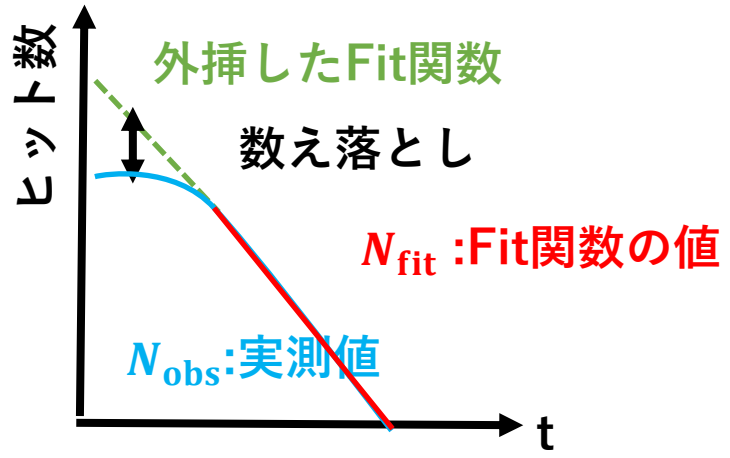
寿命のビームレート依存性

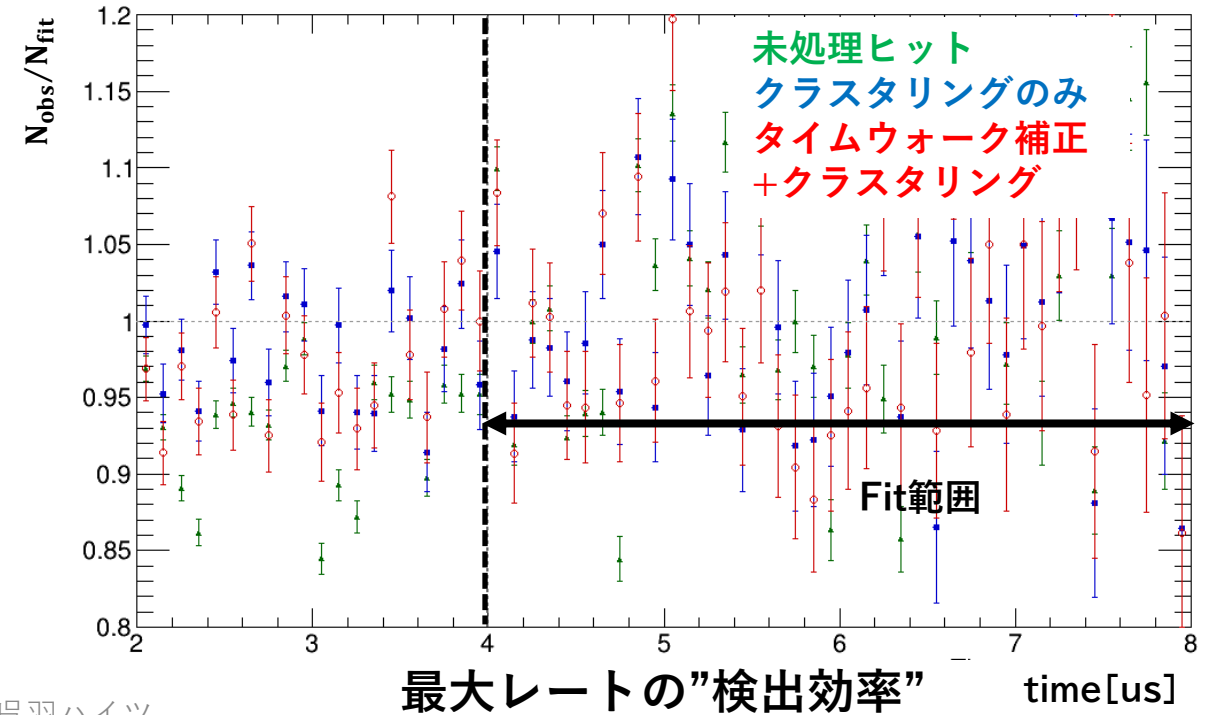
“検出効率”を用いた数え落としの評価

- ”検出効率”を定義して，ビーム入射直後に数え落としが生じているか評価した.

“検出効率” $\epsilon = \dfrac{N_{\mathrm{obs}}}{N_{\mathrm{fit}}}$

- 測定レートはTimepix3のピクセル数 $(\sim 6.5\times10^{4})$より十分小さく，数え落としはないと予想される.
  - 最大レート条件の平均レート 約1200 hits/pulse
- クラスタリング後では明確な数え落としは見られなかった.
- クラスタリングにより，Pull分布幅が 4.49 ± 0.57 → 1.38 ± 0.09 に減少した.
- タイムウォーク補正後も 1.35 ± 0.09 となり，統計誤差評価の改善が確認された.





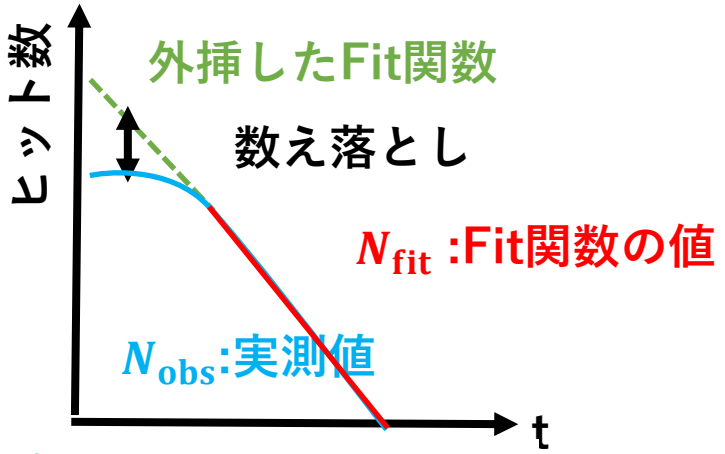
最大レートの”検出効率”

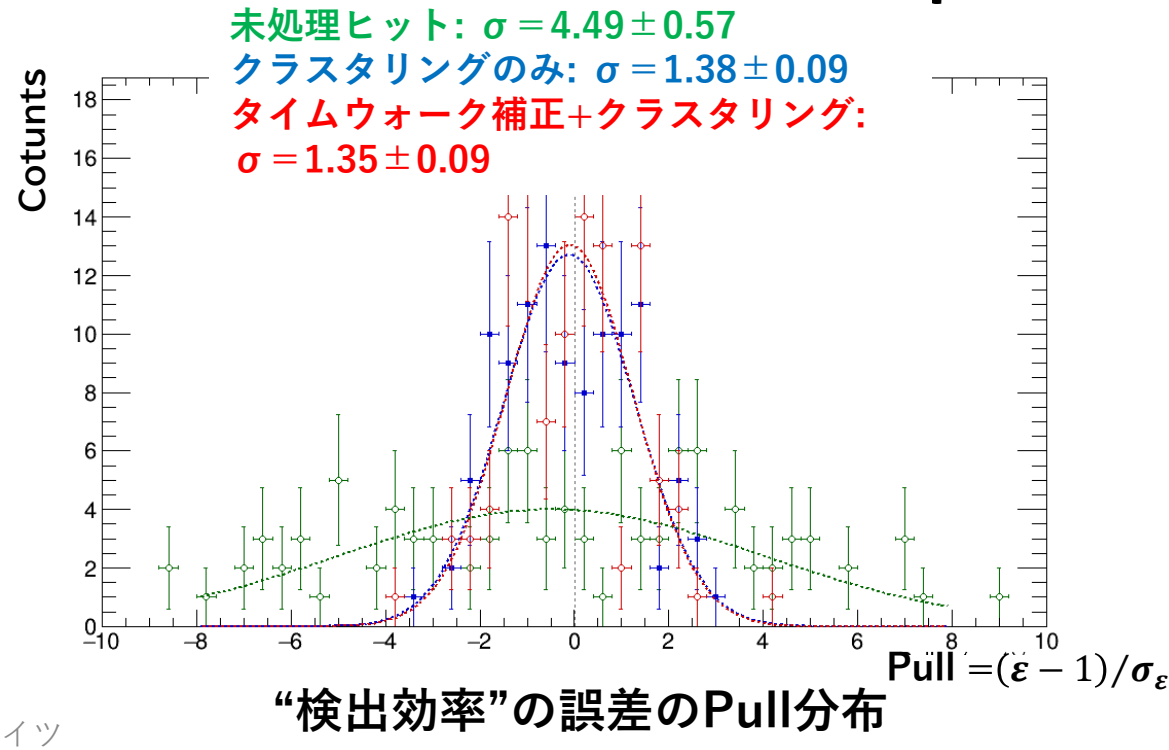
“検出効率”を用いた数え落としの評価

- ”検出効率”を定義して，ビーム入射直後に数え落としが生じているか評価した.

“検出効率” $\epsilon = \dfrac{N_{\mathrm{obs}}}{N_{\mathrm{fit}}}$

- 測定レートはTimepix3のピクセル数 $(\sim 6.5\times10^{4})$より十分小さく，数え落としはないと予想される.
  - 最大レート条件の平均レート 約1200 hits/pulse
- クラスタリング後では明確な数え落としは見られなかった.
- クラスタリングにより，Pull分布幅が 4.49 ± 0.57 → 1.38 ± 0.09 に減少した.
- タイムウォーク補正後も 1.35 ± 0.09 となり，統計誤差評価の改善が確認された.





“検出効率”の誤差のPull分布

まとめと今後の展望

まとめ

- **MSMI： Multi Scale Muon Imaging**
  - 多彩なミューオン技術と情報科学を融合し，幅広いスケールの現象の可視化を目指す学術変革領域
- **高位置分解能**を有する**シリコンピクセル検出器Timepix3**をμSRに導入し，位置分解μSRイメージングの実現を目指す.
- J-PARC MLF U1エリアにて，1台のTimepix3検出器のビームテストを実施した.
  - 取得データに基づくクラスタリングを実装し，タイムウォーク補正をした.
  - クラスタリングにより，統計誤差評価の妥当性が改善された.
    - ✓ Pull分布幅：4.49 ± 0.57 → 1.35 ± 0.09
  - 寿命のレート依存性・ビーム入射直後の数え落としは明確には見えなかった.

今後の展望

- クラスタの基準時刻のためのToT閾値を選定する.
- 寿命測定・数え落とし評価を更新し，より高レートでの検出性能を検証する.
- 次回のビームテストに向けた準備を進める.

MLF ビームトリガーと同期した崩壊陽電子測定

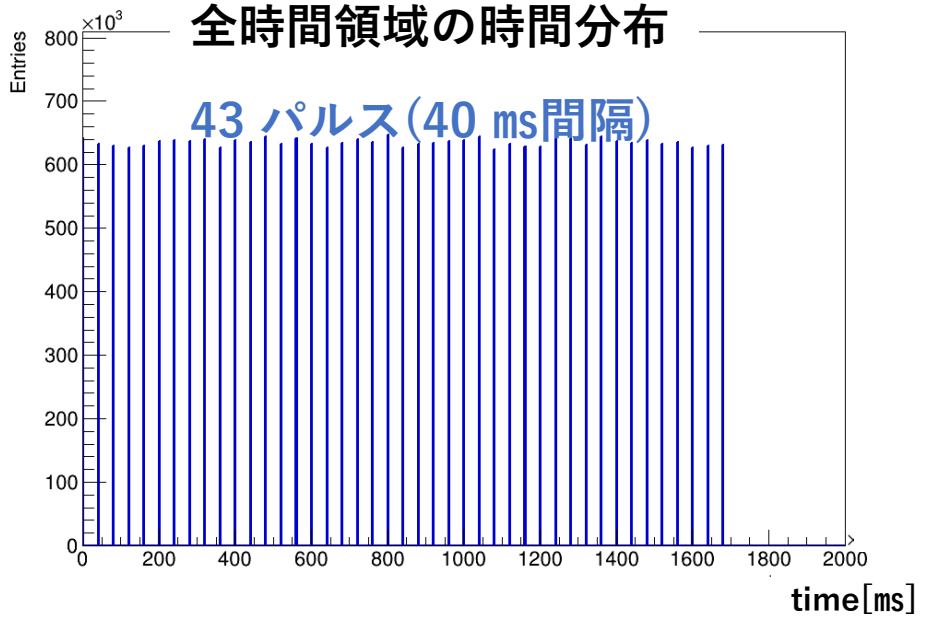
①MLF ビームトリガーと同期した崩壊陽電子測定.

- 測定時間：1.7s
  - ✓ 測定周期を40 ms以下に設定したかったが,
    1.7 sに制限されてしまった.

➢ **測定結果**

- 1.7 s の間に40 ms間隔で測定できている.

⇒**MLFビームトリガーと同期した測定に成功！**



補正関数の検討

Timepix3の時間校正についての論文

“Time calibration studies for the Timepix3 hybrid pixel detector in electron microscopy“

Time Walk はASIC回路のアナログ部における**立ち上がり時間** τ_{rise}に起因する

ピクセルに付与されたエネルギー Eに対応する三角形の幾何学的関係を比較すると、予想される時間差は

$$\Delta T = \tau_{\mathrm{rise}} \frac{Th}{E}$$

より一般化すると、 $\Delta T(x,y,E) = \frac{a(x,y)}{E-b(x,y)} + c(x,y)$

Eはピクセルに付与されたエネルギー(信号振幅)
論文では電子ビーム(20–100 keV)を用いたエネルギー較正を行っている.
EとToTには線形相関が確認されている.

