



NIIGATA
UNIVERSITY

令和5年11月23日
Flavor Physics Workshop 2023

J-PARC muon g-2/EDM実験のための 2枚のFPGAを搭載した フロントエンド基板の開発

岡村麗矢^B, 池野正弘^{E, M}, 上野一樹^{I, M}, 梅林恵祐^J, 岡崎佑太^{E, M}, 小川真治^{K, M}, 川越清以^J,
岸下徹一^{E, M}, 久米達哉^G, 高力孝^{E, M}, 齊藤直人^E, 佐々木修^{E, M}, 佐藤太希^H, 佐藤伸彦^G, 佐藤優太郎^{C, M},
庄子正剛^{E, M}, 末原大幹^{J, M}, 鈴木純一^E, 須田利美^A, 清野義敬^D, 千代浩司^{E, M}, 高富俊和^G, 田中真伸^{E, M},
東城順治^{J, M}, 西村昇一郎^{F, M}, 藤田陽一^{E, M}, 本多佑記^A, 本多良太郎^{E, M}, 水取雅登^J, 三部勉^{E, M}, 山岡広^E,
山中隆志^{L, M}, 矢村昂暉^B, 吉岡瑞樹^{K, M}, 他J-PARC muon g-2/EDMコラボレーション

東北大電子光^A, **新大自^B**, 新大理^C, 富山高専^D, KEK素核研^E, KEK物構研^F,
KEK機械工学セ^G, 東大理^H, 阪大理^I, 九大理^J, 九大RCAPP^K, 九大基^L, Open-It^M

J-PARC muon g-2/EDM実験について

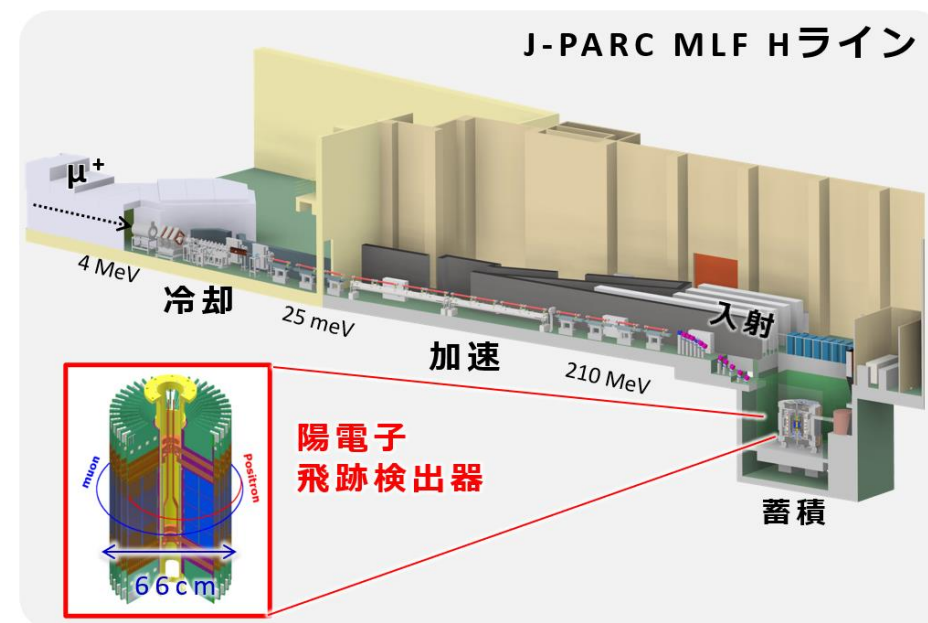
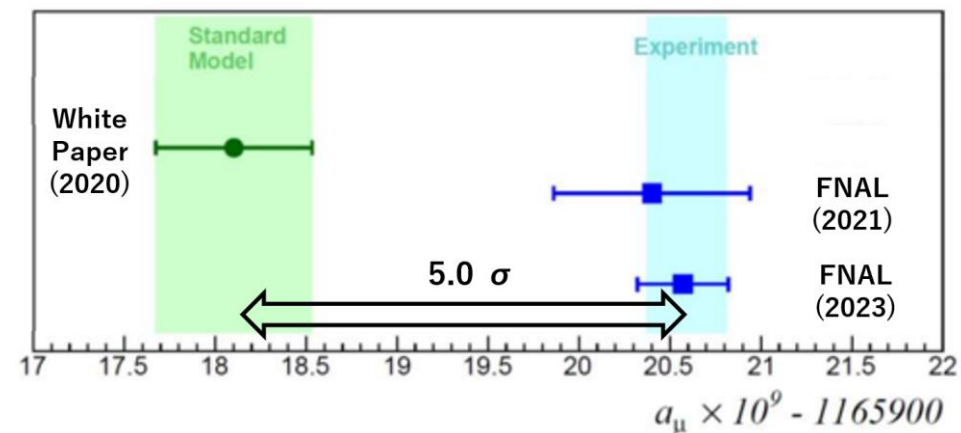
ミュオンg-2について

- FNALの実験で測定されたミュオンの異常磁気能率(**g-2**)の値は、理論予想値と5.0 σ ずれている。
 - 標準理論を超えた物理を示唆
- J-PARC muon g-2/EDM実験はミュオンの
 - **g-2**
 - 電気双極子能率 (**EDM**)

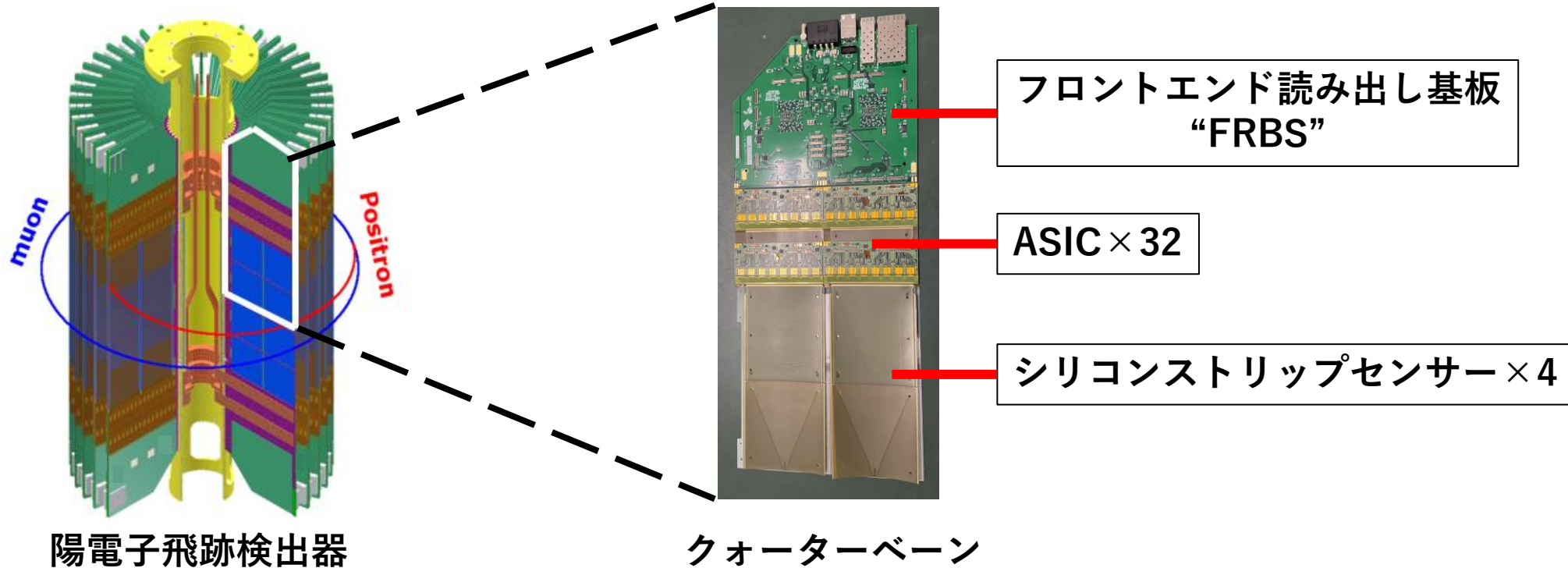
を先行実験とは異なる方法で測定。

J-PARC muon g-2/EDM実験の特徴

- エミッタンスの小さいミュオンビーム
- 三次元らせん入射
- 陽電子飛跡検出器による崩壊陽電子の飛跡の再構成



陽電子飛跡検出器



- センターポールに“ベーン”を放射状に配置。
- ベーンはさらに4つのクォーターベーンから構成され、検出器全体で160枚になる。
- クォーターベーンのフロントエンド読み出し基板を**FRBS**という。

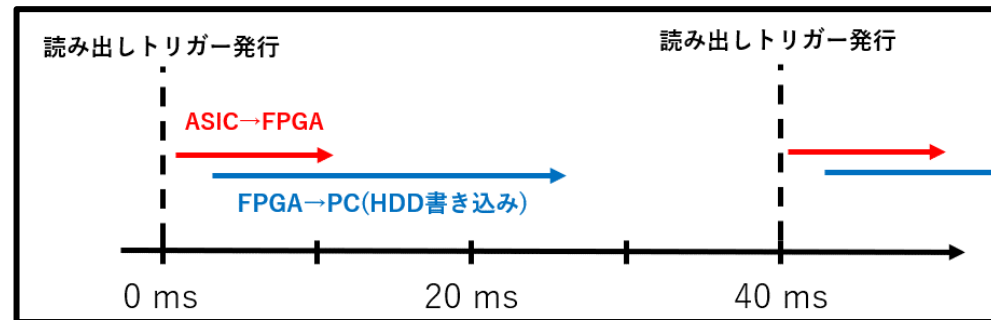
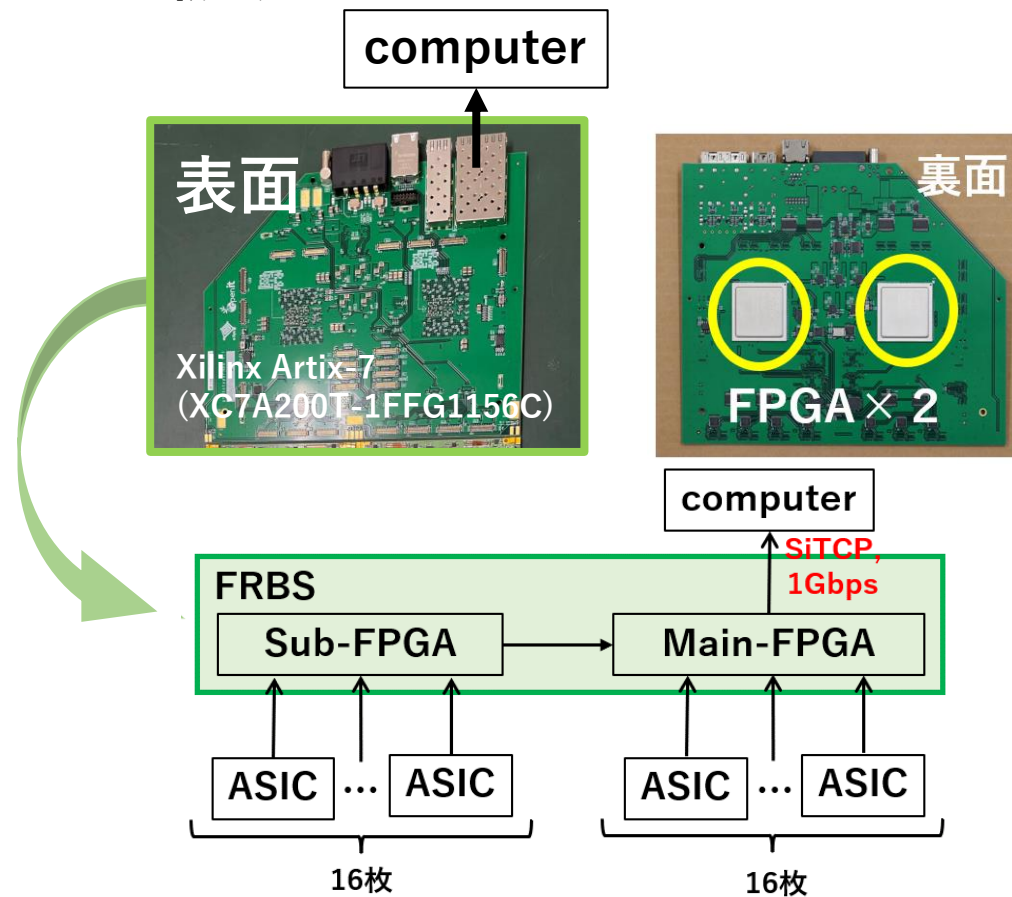
フロントエンド読み出し基板“FRBS”

FRBSについて

- 32枚のASICの信号を処理するためにFRBSには2つの**FPGA**を搭載
- 空間の制約上、FPGAからコンピュータへデータ転送するためのポートは1つ
 - Main-FPGAのみがコンピュータと接続
- Sub-FPGAで処理したデータはMain-FPGAを経由しコンピュータへ送信
- J-PARCのビームの繰り返しレート：25 Hz
 - トリガー間隔以内に読み出す必要がある。

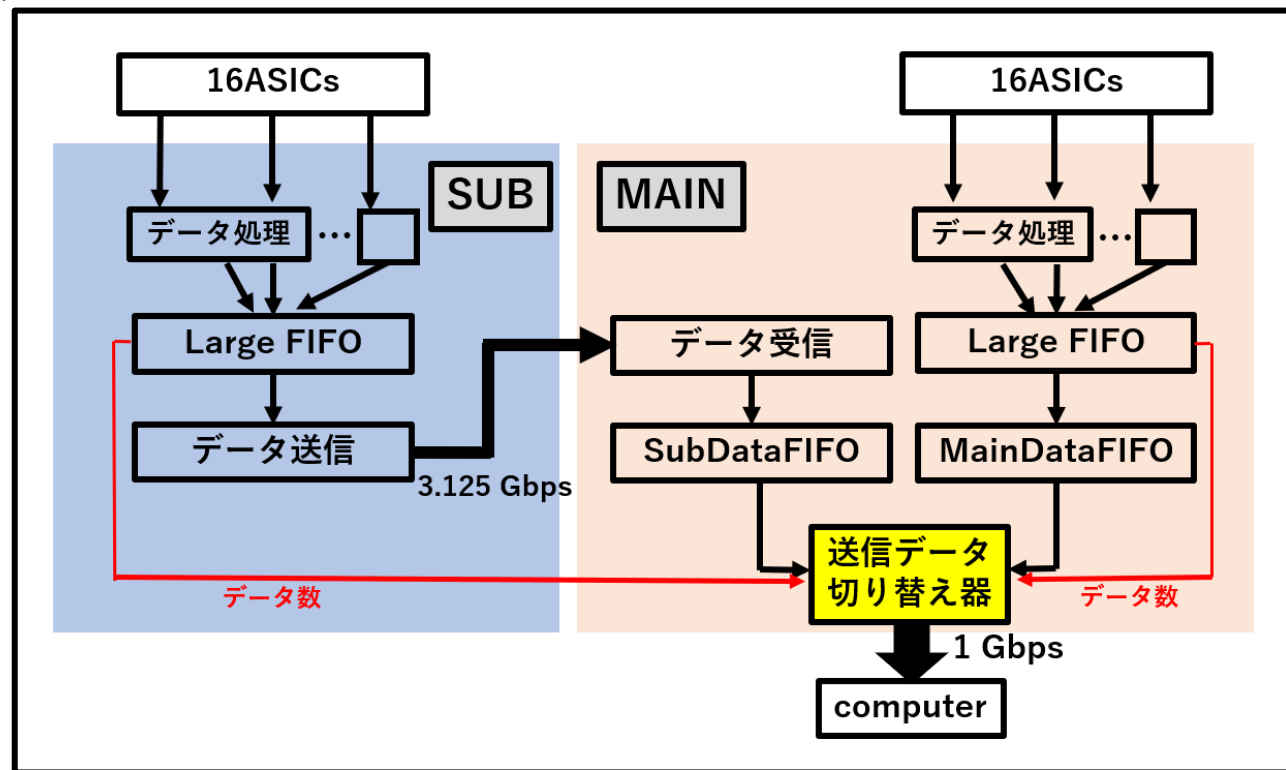
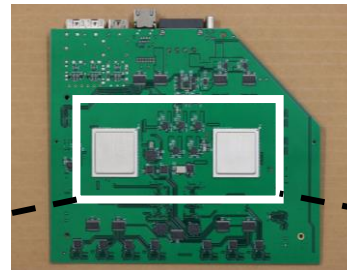
研究課題

- FPGA間で通信して、2つのFPGAのデータをトリガー間隔以内にコンピュータへ送信する。



ファームウェアの概要

- ① ASICからのデジタル信号をデータフォーマットに従ってまとめる
 - ヒット時刻、チャンネル番号
- ② ギガビットトランシーバ (GTP) を使用してFPGA間でデータを送受信
 - 通信プロトコルは8b10b
 - 20 bit幅で3.125Gbpsの通信
 - FPGA間の通信が安定していることはIBERTで確認済み
- ③ 送信データの切り替え
 - メインとサブのデータ数を比較し、多い方を優先して送信する。



2つのFPGAの並列読み出し試験

試験目的

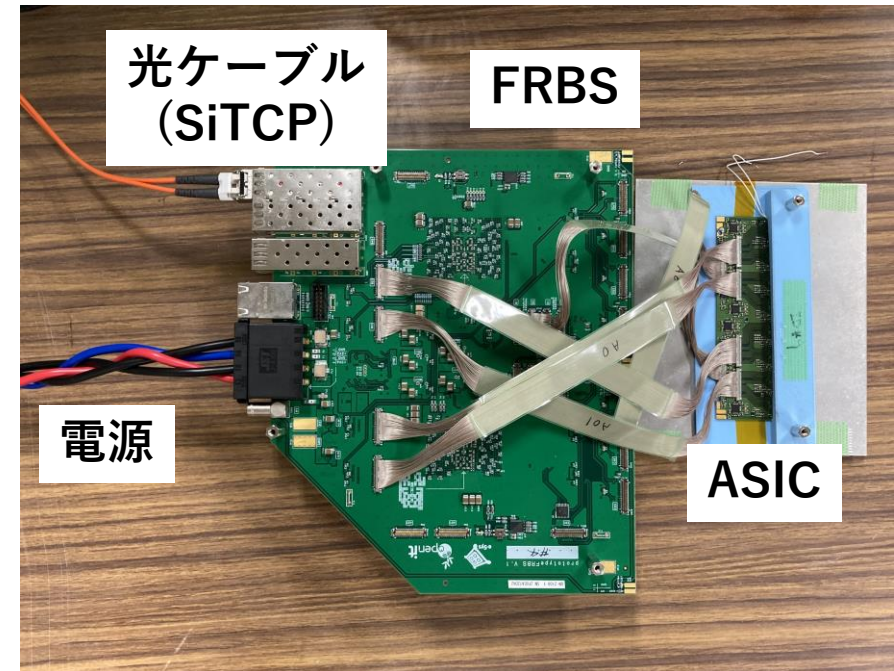
- 想定されるヒットレートを安定して読み出せるか

試験方法

- ① ASICに疑似データを書き込む
- ② FRBSからASICに読み出しトリガーを送り、ASICのデータを決められた時間読み出す
- ③ 読み出したヒット数から読み出しが成功したかを判定

読み出し成功の定義

- ASICに書き込んだ疑似データのヒット数と読み出したヒット数がすべてのイベントで一致していたら**“読み出し成功”**とした。

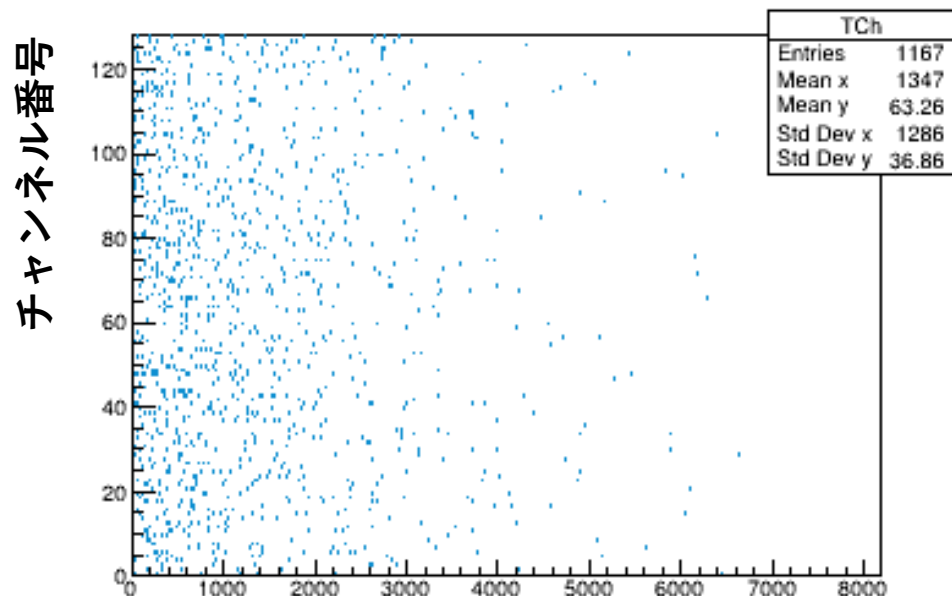


```
#Active ASIC : 7
start to readout from 1 boards during 600 sec.
event_number = 0 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 1 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 2 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 3 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 4 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 5 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 6 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 7 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 8 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 9 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 10 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 11 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 12 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 13 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 14 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 15 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 16 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
event_number = 17 : Hit_Main = 361044 : Hit_Sub = 359844 : Hit_all = 720888
```

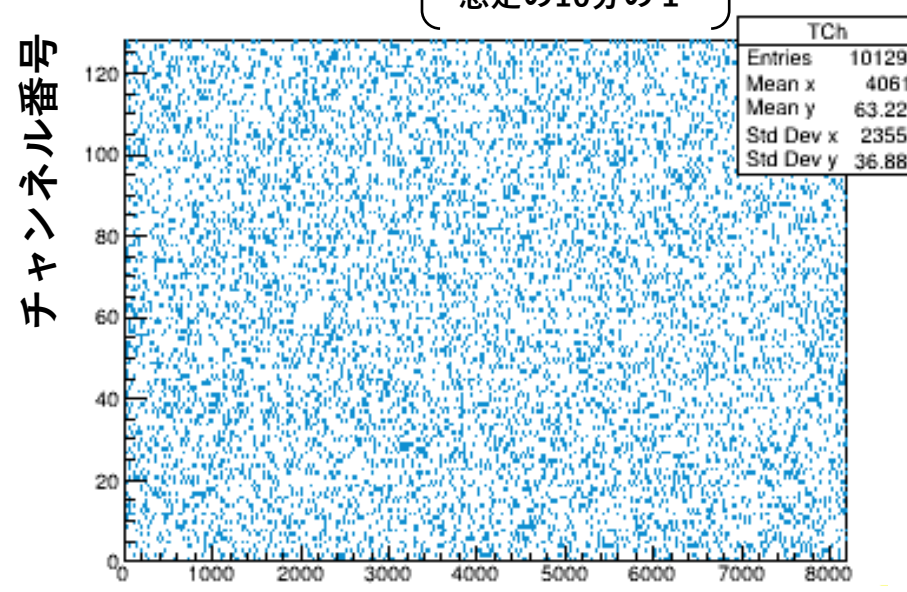
使用した疑似データ

- 指定したヒットレートになるような疑似データをASIC に書き込む。
- 2つの使用環境を想定して、2種類の時間分布のヒットデータで試験した。
 - ① **実験本番を想定**：指数関数による減衰分布
 - ▶ 想定されるヒット数：約38,000ヒット/FRBS
 - ② **しきい値スキャンを想定**：一様分布
 - ▶ 想定される最大ヒット数：約720,000ヒット/FRBS

減衰分布 (最大1.4 MHz/channel)



一様分布 (2.0 MHz/channel:
想定の10分の1)



読み出し結果

実験本番を想定した減衰分布の読み出し結果

読み出し時間：300秒

書き込んだヒット数	301,253	322,553
結果	成功	失敗

>> 想定されるヒット数(38,000)

- 想定されるヒット数を上回るヒット数で読み出し成功。
- 実験本番でも安定して読み出せる。

しきい値スキャンを想定した一様分布の読み出し結果

読み出し時間：300秒

書き込んだヒット数	431,089	466,922
結果	成功	失敗

< 想定される最大ヒット数
(720,000)

- 想定される最大ヒット数には届かなかった。

読み出し失敗の原因

- オーバーフローしているのはLarge FIFOの上流側のFIFO。
- 各ASICで並列に処理していたデータをLarge FIFOに集約する部分がボトルネックになっている。

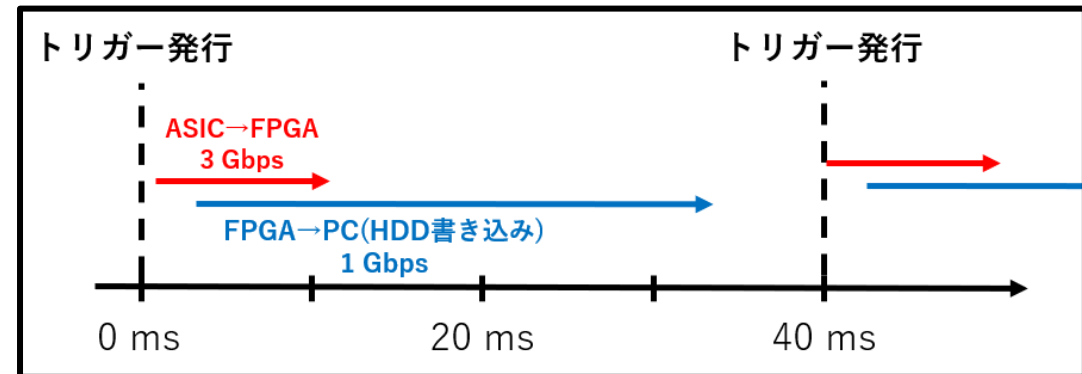
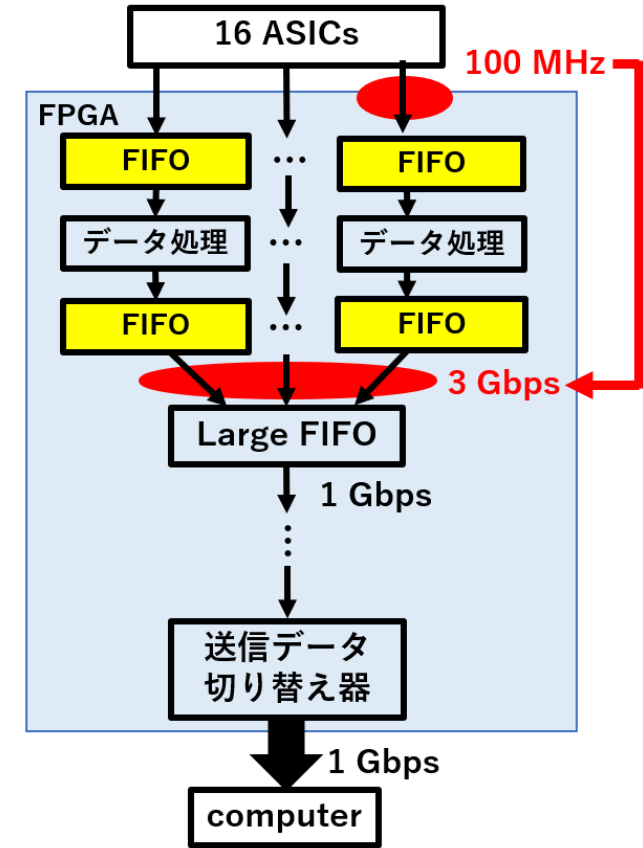
対策

- ① **FIFOの容量を増やす**
 - 現状、想定データの3.3%分しか保存できない。
- ② **ASICからFPGAへのデータ転送レートを抑える**

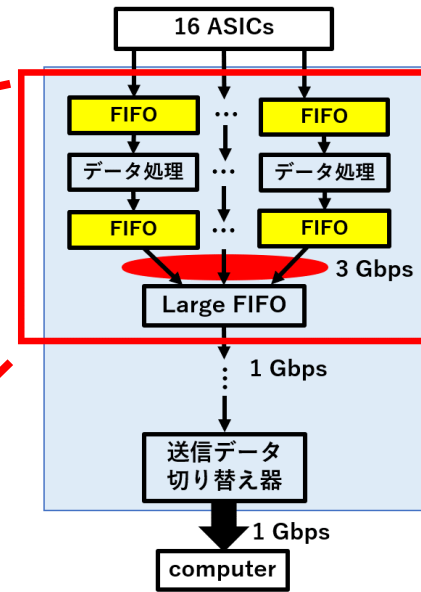
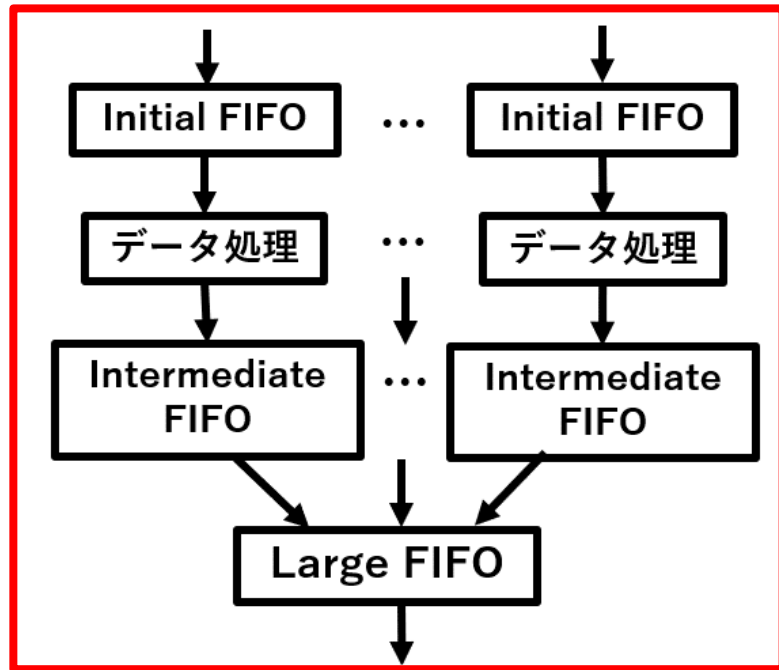
$$\text{Large FIFOに入るデータレート} = \frac{(\text{ヒット数}) \times (\text{1ヒット当たりのデータ量})}{\text{FPGAがASICのデータを読み出す時間}}$$

- ASICの読み出しクロック周波数を遅くして、ASICからFPGAへのデータ転送レートを調節する。

72万ヒット読み出す場合



① FIFOの改善




これまでは、Large FIFOの容量を大きく取っていたが、1 ASICあたりの実効的なFIFOの深さが一番深くなるように最適化した。
 BRAM使用率：メインFPGA90 %
 サブFPGA84 %

	修正前	修正後
Initial FIFO	256	1024
Intermediate FIFO	512	4096
Large FIFO	65536	16384
1ASICあたりの 実効的なFIFOの深さ (Intermediate + Large)	512+4096 = 4608	4096+1024 = 5120

① FIFOの改善結果

- Initial FIFOのみを修正して試験した。
 - 深さ256→深さ1024に変更

一様分布を300秒読み出した結果

<修正前>	書き込んだヒット数	431,089	466,922
	結果	成功	失敗
			
<修正後>	書き込んだヒット数	553,750	59万
	結果	成功	失敗

- 16 ASIC接続する場合は、Intermediate FIFOの修正も、容量が増えるので読み出せるヒット数も増えることが期待できる。

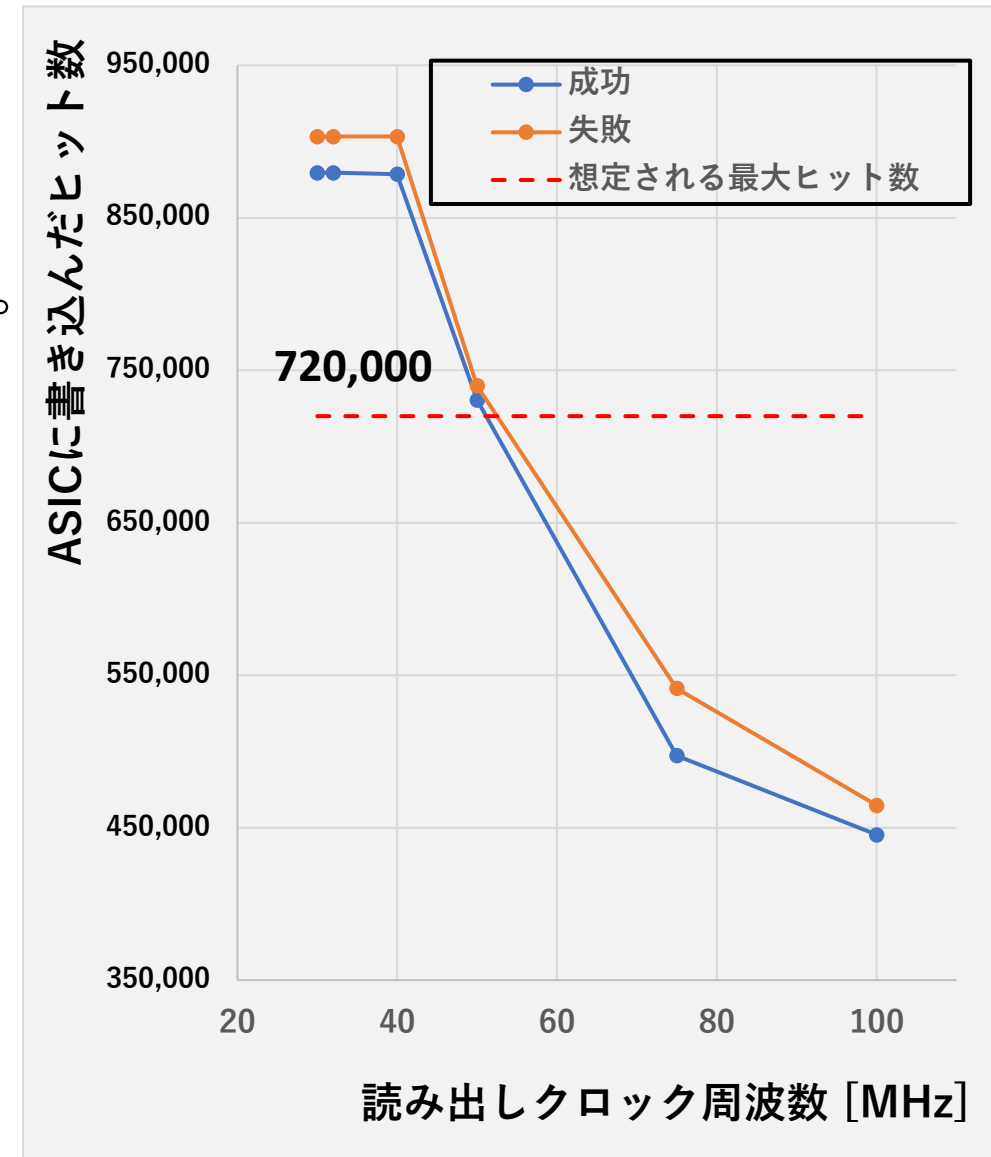
②読み出しクロック周波数の最適化(HDD書き込みなし)

試験方法

- FIFOを最適化したFWから、読み出しクロック周波数のみを段階的に変更していき、読み出しクロック周波数と読み出せるヒット数の関係を調べた。
- また、HDDへの書き込みがボトルネックになっていることが分かったので、この試験ではHDD書き込みを停止して試験した。

結果

- 40~100 MHzの間では、クロック周波数を下げるほど、読み出し数が増える傾向にある。
- **読み出しクロック周波数を40MHz以下にすることで、想定されるヒット数を読み出すことができた。**
- 読み出しクロック周波数が40 MHz の場合の、データ転送レート約0.88 Gbps。
 - 理論上限値(SiTCP 1Gbps) のボトルネックが見えていると思われる。

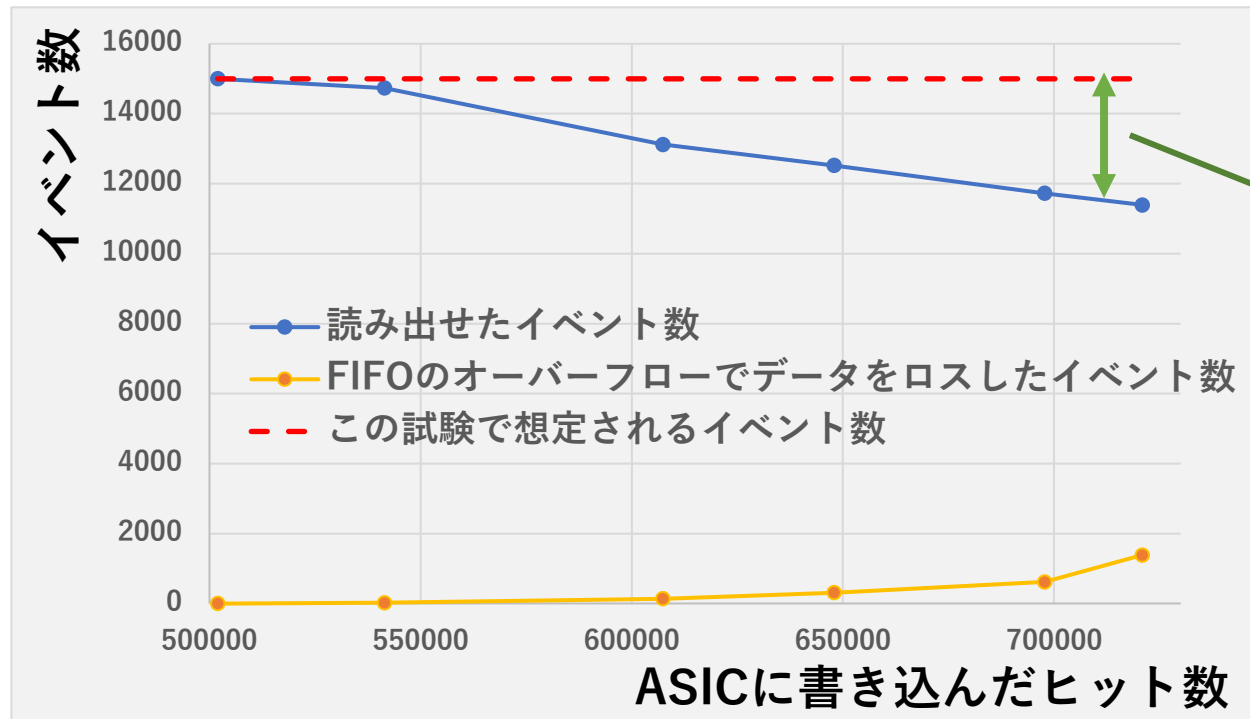


②読み出しクロック周波数の最適化(HDD書き込みあり)

- 実験本番ではHDD書き込みを行うため、HDD書き込みありの状態ですべての試験を行った。
- HDD書き込みありの試験ではHDD書き込み無しの状態で成績が良かった32~40 MHzの中で、読み出し時間が一番短い40 MHzのクロック周波数のFWを使用することにした。
 - ① トリガーレート25 Hzで何ヒットまで読み出せるか。
 - ② しきい値スキャンで想定される72万ヒットはトリガーレート何Hzで読み出せるか。

トリガーレート25 Hzで読み出せるヒット数

- 設計値通りのトリガーレート25 Hzでは、どのくらいのヒット数まで読み出せるのかを調べた。



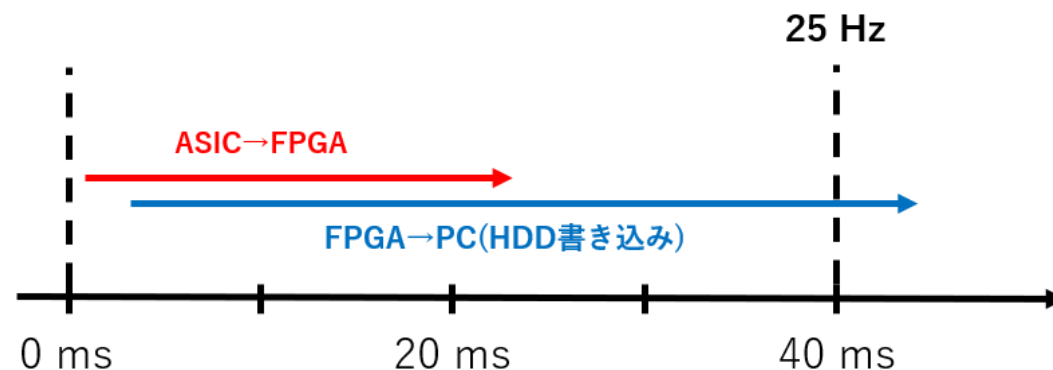
読み出しクロック周波数：40 MHz
読み出し時間：600秒

読み出しが25 Hzに間に
合わなかったイベント数

- 50 万ヒットまでは読み出すことができた。
- しきい値スキャンで想定される72 万ヒットは87.8 %の読み出し成功率となった。

72万ヒットを読み出せるトリガーレートの調査

- しきい値スキャンで想定される
72万ヒットは、トリガーレート25 Hzでは安定して、読み出せないことが分かった。
➤ 40 ms以内に読み出しが終わらないため
- 読み出し間隔を広くすることで解決する。



- **結論：15 Hzであれば想定される最大ヒット数72万ヒットを読み出すことができる。**

読み出しクロック周波数：40 MHz 読み出し時間：600秒

トリガーレート [Hz]	読み出したイベント数	読み出しに間に合わなかったイベント数
20	11348	374
15	9066	0
10	6092	0
5	2999	0

まとめ・今後

- J-PARC muon g-2/EDM 実験で使用する検出器のフロントエンド読み出し基板“FRBS”を開発している。
- FPGA間でデータを送受信し、2枚のFPGAのデータをコンピュータへ送信するFPGAファームウェアを開発。
- 疑似データのデータレートを変えながら読み出し試験を行った。
- **減衰分布の読み出し試験では実験本番で想定されるヒット数を読みだせることを確認。**
- 一様分布の読み出し試験ではしきい値スキャンで想定されるヒット数の読み出しが、できなかつたため、FWを改善した。
 - ▶ FIFO の配置を最適化し、ASIC→FPGAの読み出しクロック周波数を変更した。
- HDD書き込みを停止して試験した結果、読み出しクロック周波数は40 MHzが最適。
- FWを改善した状態でトリガーレートを15 Hzに変更すると、**しきい値スキャンで想定される最大ヒット数を読み出せることが確認できた。**
- 今後は、複数のHDDに書き込む試験を行う予定。
- また、磁場中にFRBSを入れて、実験本番に近い環境で動作試験を行う。

Back up

ミューオンg-2の測定方法

- 磁気双極子能率の係数をg因子と呼ぶ。
2からのずれを異常磁気能率 a_μ と定義する。

$$a_\mu \equiv \frac{g-2}{2}$$

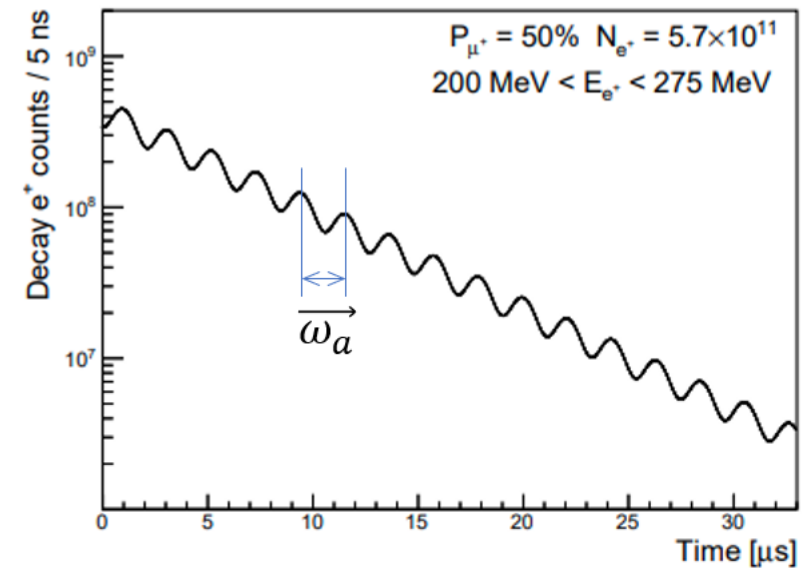
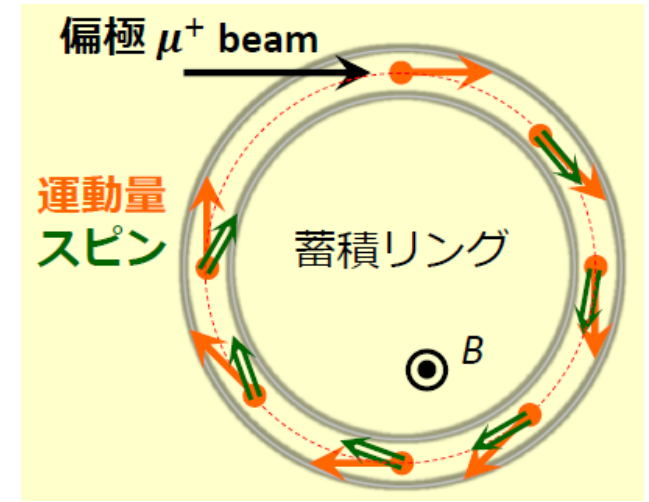
- g-2は異常歳差運動を用いて調べる。

← スピン運動

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \quad \leftarrow \text{サイクロトロン運動}$$

$$= -\frac{e}{m_\mu} a_\mu \vec{B}$$

- 異常歳差運動の周期とミューオンが感じた磁場を測定することでmuon g-2(a_μ)を決定する。
- $\vec{\omega}_a$ はwiggle plotから求められる。
- J-PARCの実験では、崩壊陽電子の飛跡を再構成してミューオンの崩壊時刻を求める。
 - 陽電子飛跡検出器を使用する。



J-PARC E34 simulation

1ch当たりの平均ヒット数

- ミューオン崩壊によるヒット数の減衰を考慮する。

$$N = \int_0^{40.96 \times 10^{-6}} 1.4 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right) dt$$

$$N \sim 1.4 \times 10^6 \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right) dt \quad \text{積分区間近似}$$

$$N = 1.4 \times 10^6 \left[(-\gamma\tau) \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right) \right]_0^{\infty}$$

$$N = 1.4 \times 10^6 \times \gamma\tau \{0 + 1\}$$

$$N = 1.4 \times 10^6 \times 3.010290522 \times 2.1969811 \times 10^{-6}$$

$$N = 9.258971935$$

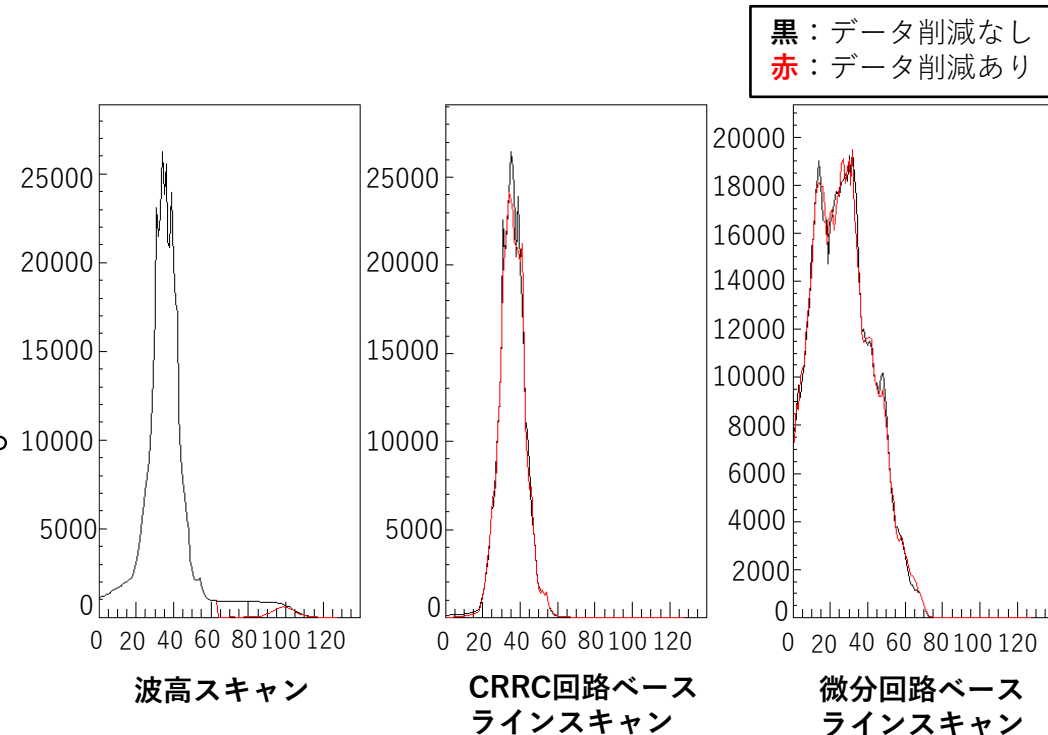
実験本番・しきい値スキャン時に予想されるヒット数

実験本番時に想定されるヒット数

- 実験本番時は、ASICの1 chあたりに約9.26回(最大ヒットレート1.4 MHz)のヒットがある。
- $9.26[\text{hit}/\text{ch}] \times 128[\text{ch}/\text{ASIC}] \times 32[\text{ASIC}/\text{FRBS}] = 37928 \approx 38000[\text{hit}/\text{FRBS}]$

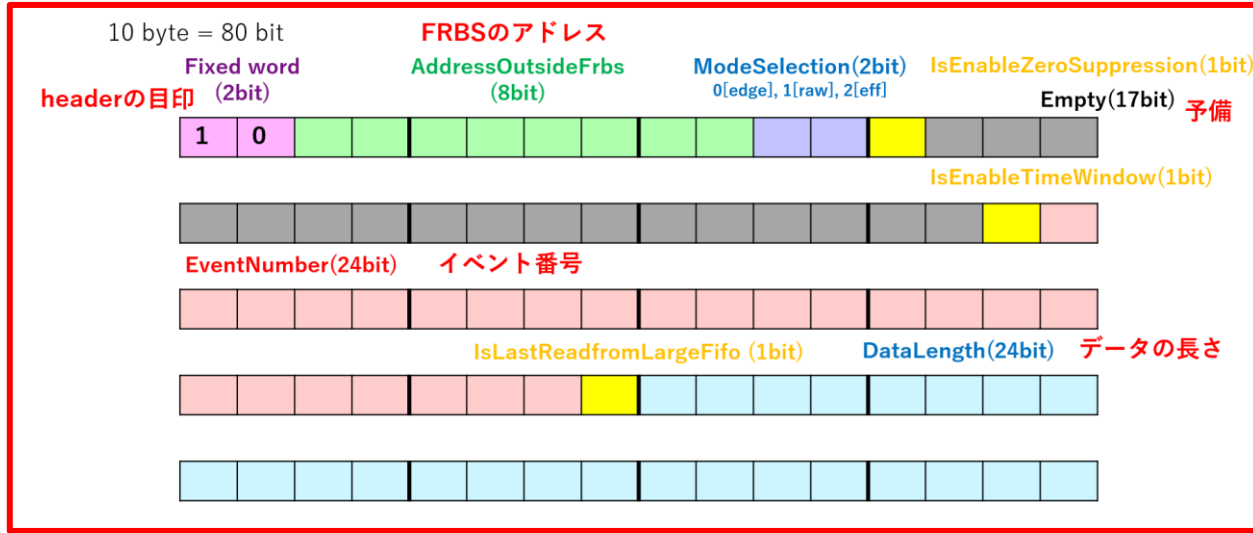
しきい値スキャンで想定されるヒット数

- 1ASICを使い、DACを変えながら以下を行った。
 - CRRC回路でのテストパルスの波高スキャン
 - CRRC回路のベースラインスキャン
 - 微分回路のベースラインスキャン
- 各スキャンでのDACと平均ヒット数でグラフを作成。
- 平均ヒット数はCRRCのベースラインスキャンで最大となった。
 - データ削減なし：26452 hit
 - データ削減あり：24108 hit
- 実験本番では最大ヒット数は $24108[\text{hit}/\text{ASIC}] \times 32[\text{ASIC}/\text{FRBS}] = 720704[\text{hit}/\text{FRBS}]$ 程になると予想される。

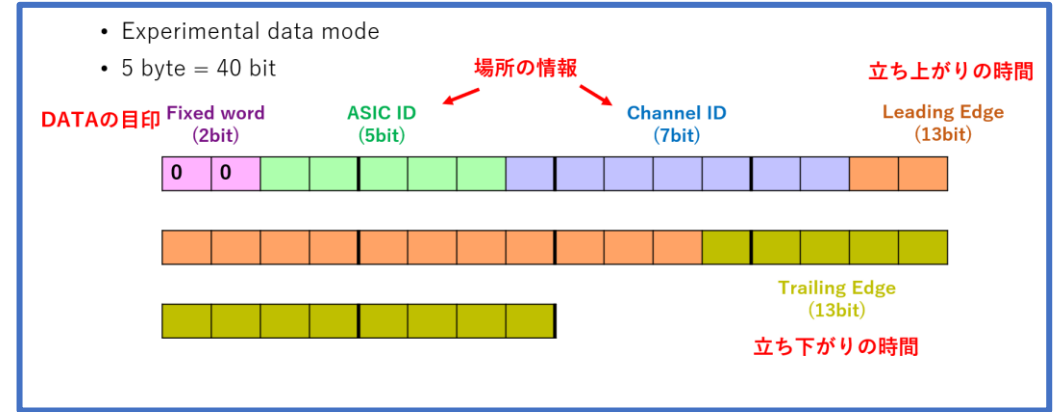


データフォーマット

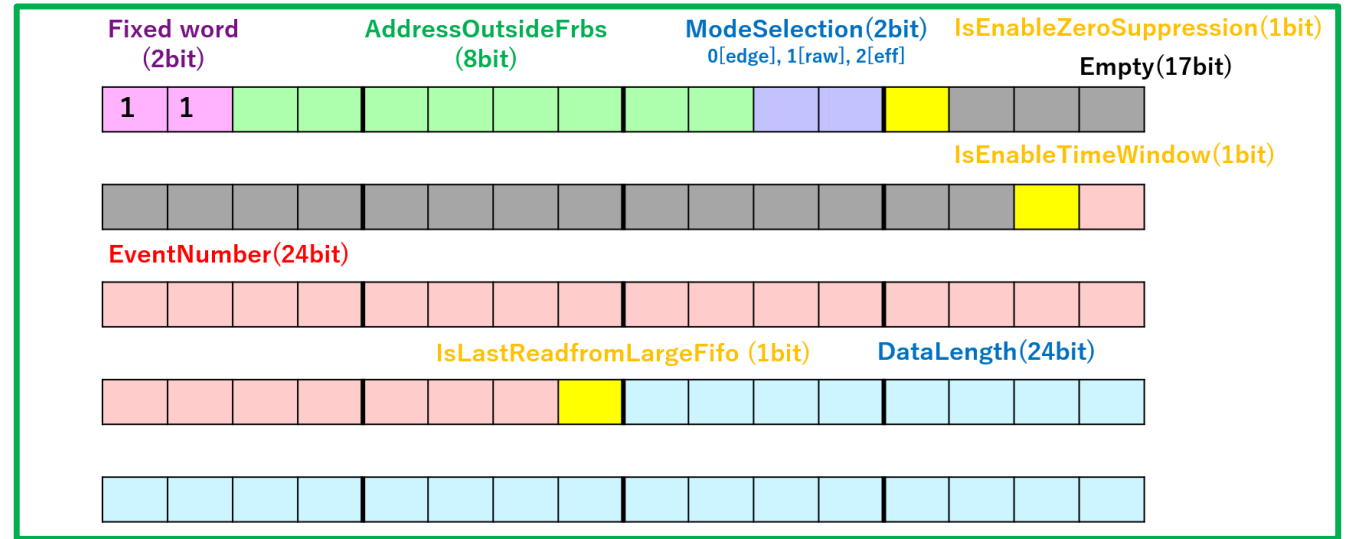
HEADER



DATA



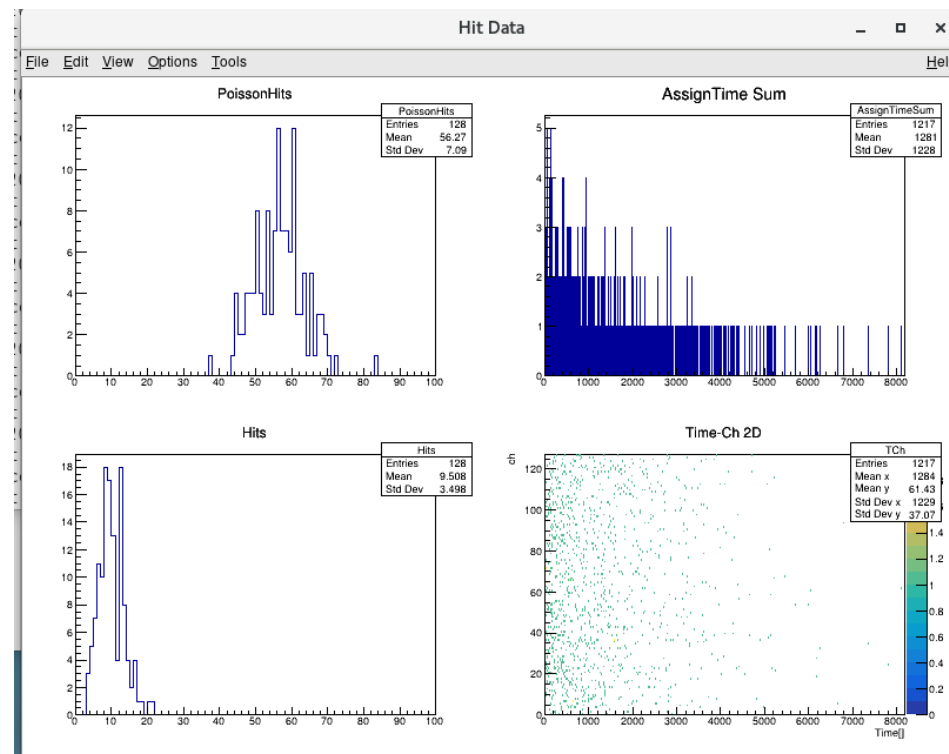
FOOTER



センサーで、陽電子がヒットした時間と場所の情報を紐づけるために
HEADER、DATA、FOOTER
というフォーマットでデータを送信する。

データ生成プログラム動作内容

- ① **ポアソン分布**でヒットを示す乱数を生成して、その分だけ0~8191の間に割り振る。
 - ▶ 小さな確立で起こる事象が一定の時間内に発生するときの分布
 - ▶ 今回は、 40.96μ 秒の間に1.4MHzでヒットを割り振った
- ② ヒットが指数関数で減らなければいけないので、時間に伴って減少する指数関数と乱数を割り振った時間ごとで比較する。
- ③ 乱数のほうが低ければヒットとしてヒストグラムに詰める。



クロック周波数の変更によるFIFOの深さの見積もり

