

# CTA計画

## デュアルミラー望遠鏡用波形記録集積回路の トリガー性能の評価

河島孝則<sup>A</sup>、田島宏康<sup>A</sup>、奥村暁<sup>A、B</sup>、日高直哉<sup>A</sup>、J.Hinton<sup>B</sup>、R.White<sup>B</sup>、  
S.Funk<sup>C</sup>、L.Tibaldo<sup>C</sup>、J.Vandenbroucke<sup>D</sup>、G.Varner<sup>E</sup>、他 The CTA Consortium

名大 STE 研<sup>A</sup>、レスター大<sup>B</sup>、SLAC<sup>C</sup>、  
ウィスコンシン大<sup>D</sup>、ハワイ大<sup>E</sup>

# 超高エネルギーガンマ線観測

- 20 GeV から 100 TeV 以上の超高エネルギー(VHE)ガンマ線観測
- VHE ガンマ線が電磁シャワーを生じ、チェレンコフ光を放射
- チェレンコフ光を複数の望遠鏡でステレオ観測
  - シャワーイメージから到来方向を決定
  - 光量からエネルギーを決定



H. J. Völk and K. Bernlöhr. 2009

# Cherenkov Telescope Array (CTA)

LST

4 telescopes

$D = 23 \text{ m}$

$E \sim 0.02\text{--}5 \text{ TeV}$

MST

$\sim 20$  telescopes

$D = 10 \sim 12 \text{ m}$

$E \sim 0.1\text{--}10 \text{ TeV}$

SST

30 - 70 telescopes

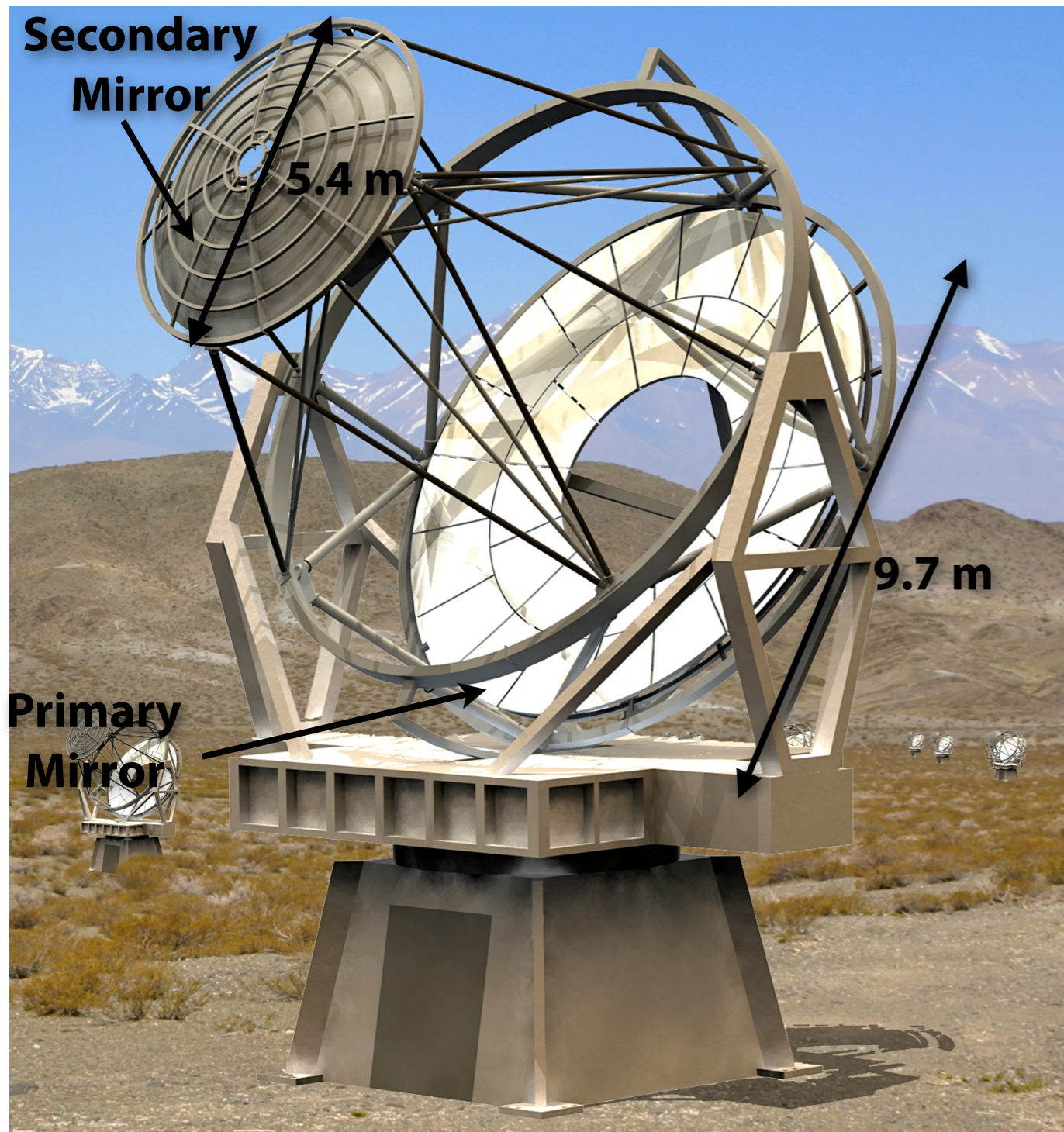
$D = 4 \sim 7 \text{ m}$

$E \sim 1\text{--}300 \text{ TeV}$



- Large, Medium, Small, Size Telescope (LST, MST, SST) の 3 種の口径の望遠鏡を 100 台規模で設置
- 現在稼働している望遠鏡と比較して 10 倍ほどの感度向上
- 20 GeV から 100 TeV の広い観測エネルギー帯域

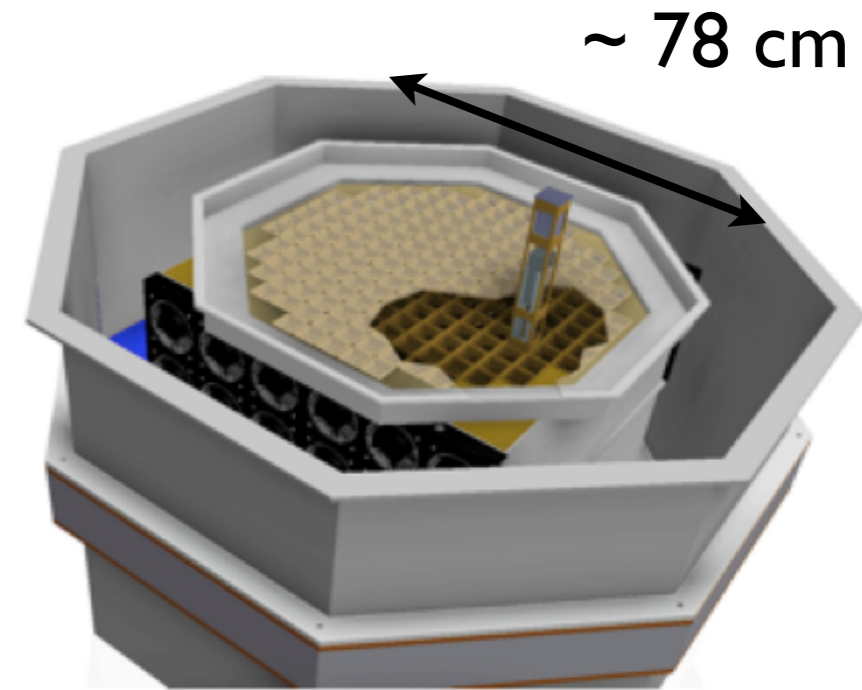
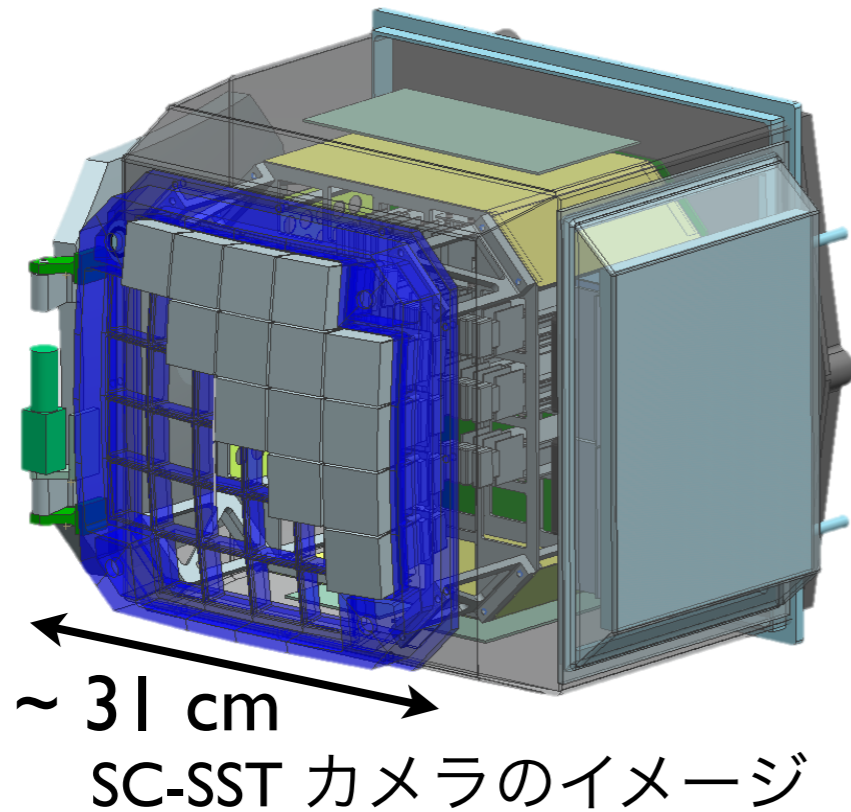
# Schwarzschild-Couder Telescope



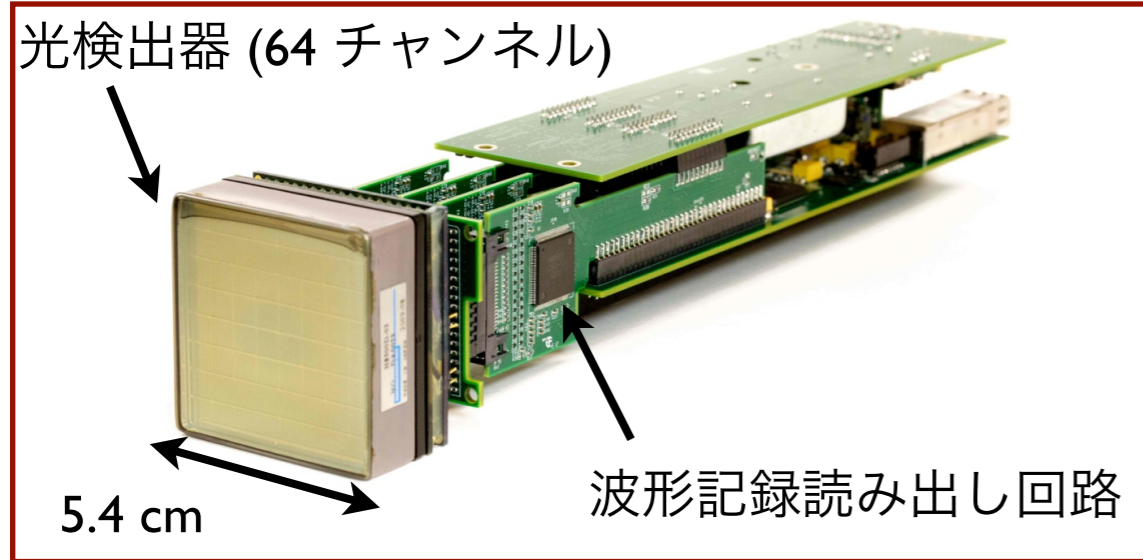
- ガンマ線望遠鏡では初めて副鏡を有する望遠鏡
- 単鏡の望遠鏡より広い視野角 ( $\sim 8^\circ$ )
- 短焦点距離  
→ 焦点面カメラの小型化、費用の低減が可能
- MST および SST のオプションとして開発中

SC-MST の完成予想図 Vassiliev+ (2007)

# 焦点面カメラ



SC-MST カメラのイメージ

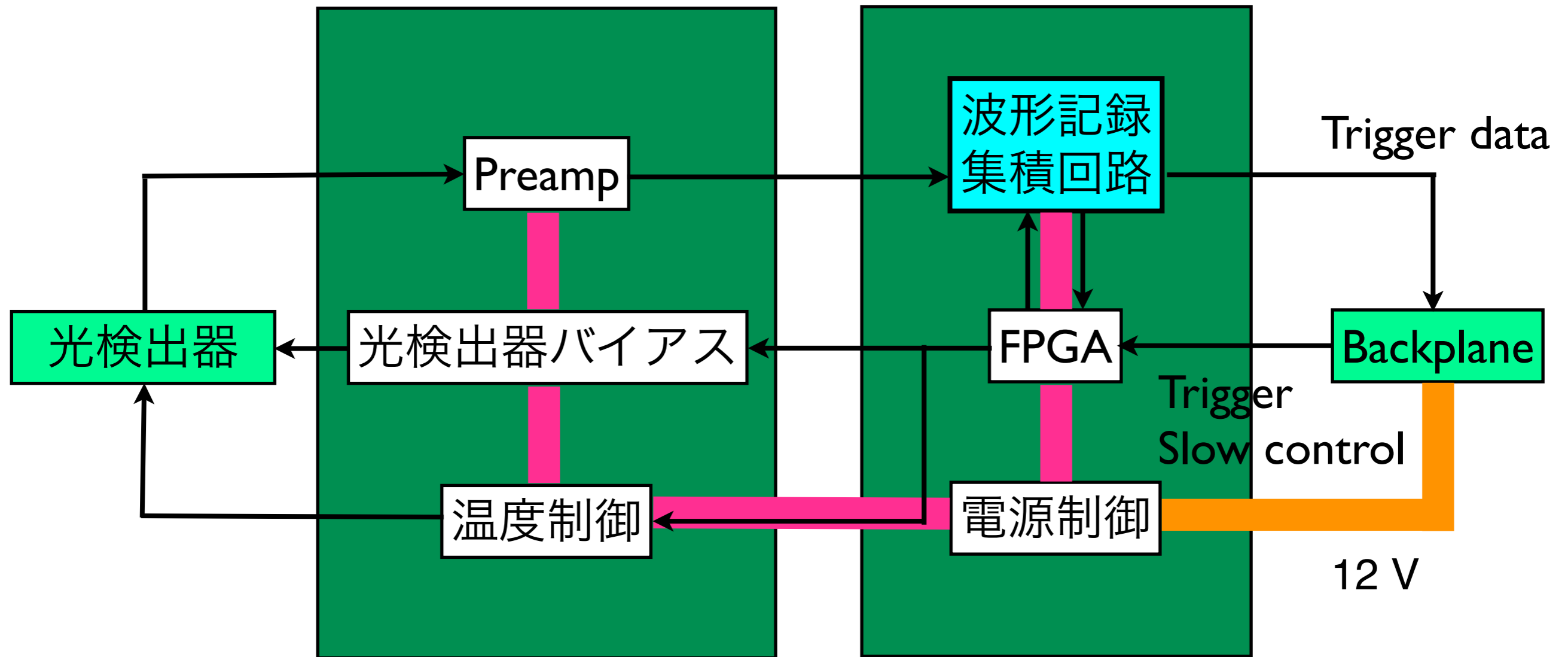


	モジュール数	チャンネル数	各画素の大きさ
SC-MST	221	~2000	0.06°
SC-SST	32	~11000	0.18°

←光検出器と波形記録読み出し回路などで構成したカメラモジュール

- モジュール構成 → 交換が容易
- SC-SSTと SC-MST でほぼ同様のモジュールを使用する

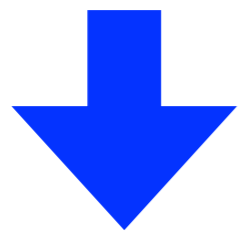
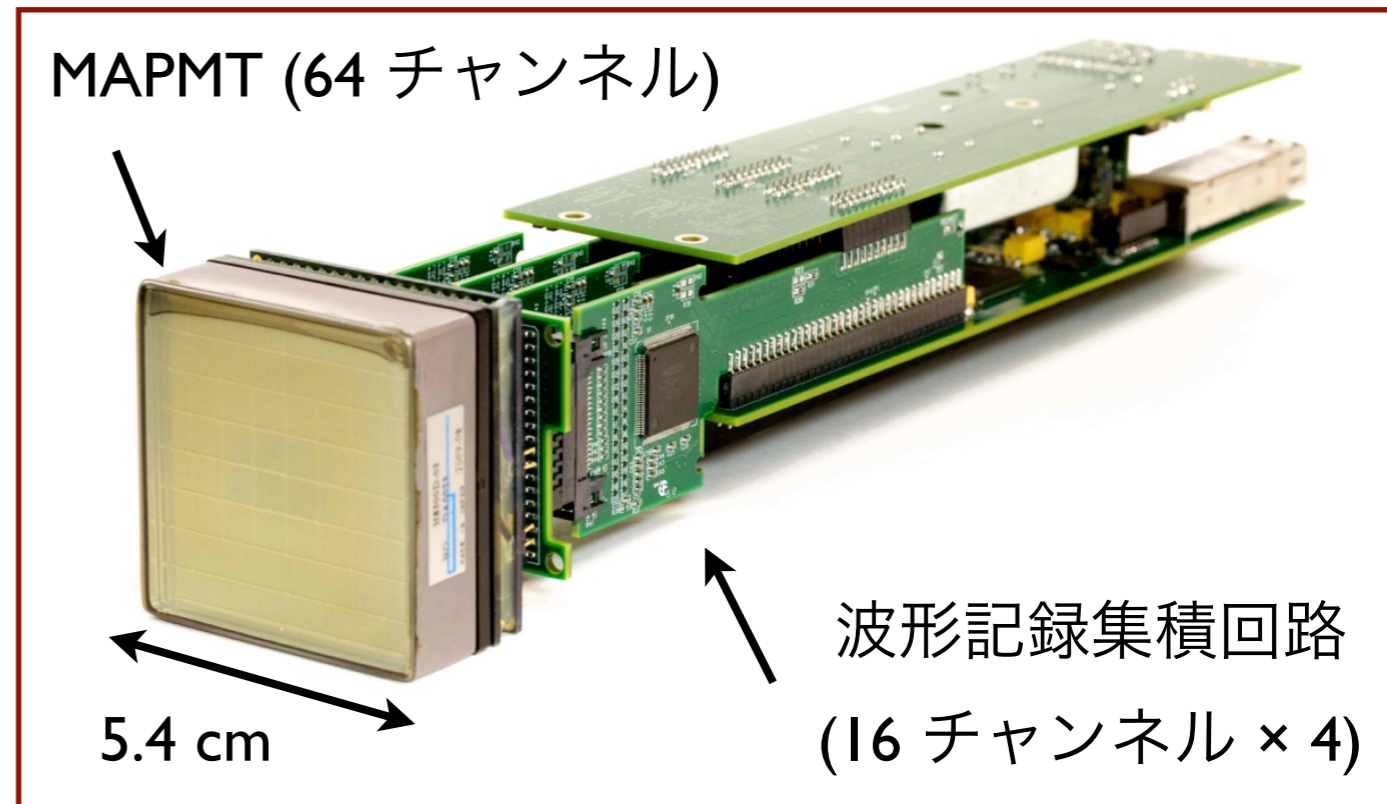
# カメラモジュールの構成



- 波形記録集積回路の役割  
→ 波形記録、デジタル変換、トリガー信号の生成
- 小型で低消費電力、安価な集積回路で上記の役割を達成する

# 波形記録集積回路への要求

- 多数の読み出しチャンネル: 16 ch
- 低消費電力:  $\sim 70$  mW/ch
- 波形記録時間分解能:  $\sim 1$  ns
- 波形記録時間:  $> 12$   $\mu$ s
- 読み出し時間:  $< 30$   $\mu$ s
- ダイナミックレンジ: 1 mV  $\sim$  2 V
- 周波数特性 (at 3 dB)  $> 380$  MHz



TeV Array Readout with GSa/s sampling and Event Trigger  
(TARGET) の開発

# TARGET の開発履歴

## TARGET 1

- 2008 年 3 月製作
- 周波数特性が  $\sim 150$  MHz

## TARGET 5

- 2012 年 8 月製作
- 周波数特性 400 MHz、クロストーク  $< 1\%$
- trigger threshold を低くできない ( $\sim 25$  mV,  $\sim 6$  p.e.)

## TARGET 7

- 2013 年 12 月製作
- ダイナミックレンジを大きくし、リニアリティ、温度依存性を改良
- trigger threshold を改善 ( $< 10$  mV, 2.5 p.e.)



# TARGET の開発履歴

## TARGET 1

- 2008 年 3 月製作
- 周波数特性が  $\sim 150$  MHz

## TARGET 5

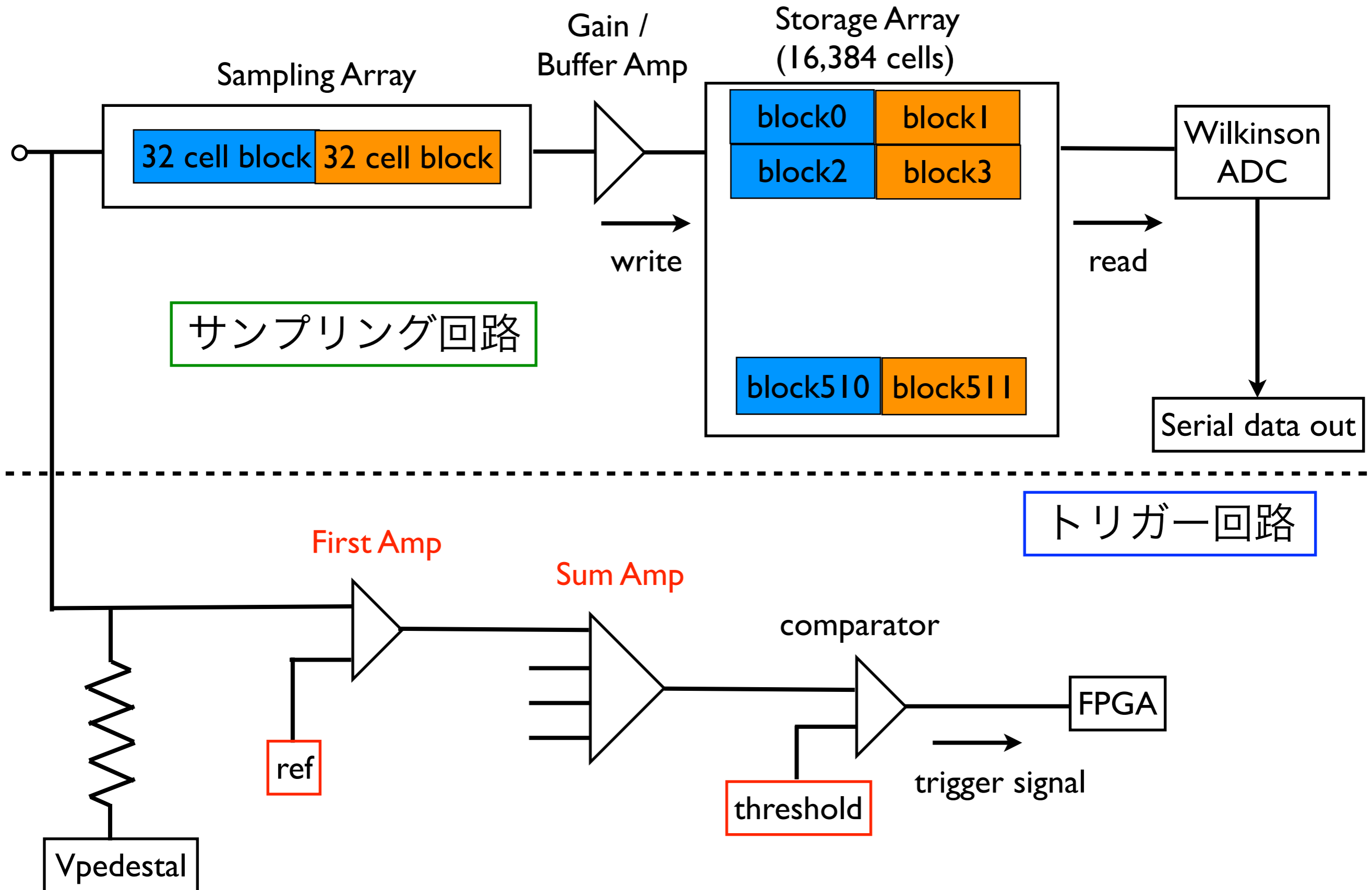
- 2012 年 8 月製作
- 周波数特性 400 MHz、クロストーク  $< 1\%$
- trigger threshold を低くできない ( $\sim 25$  mV,  $\sim 6$  p.e.)

トリガー性能を評価

## TARGET 7

- 2013 年 12 月製作
- ダイナミックレンジを大きくし、リニアリティ、温度依存性を改良
- trigger threshold を改善 ( $< 10$  mV, 2.5 p.e.)

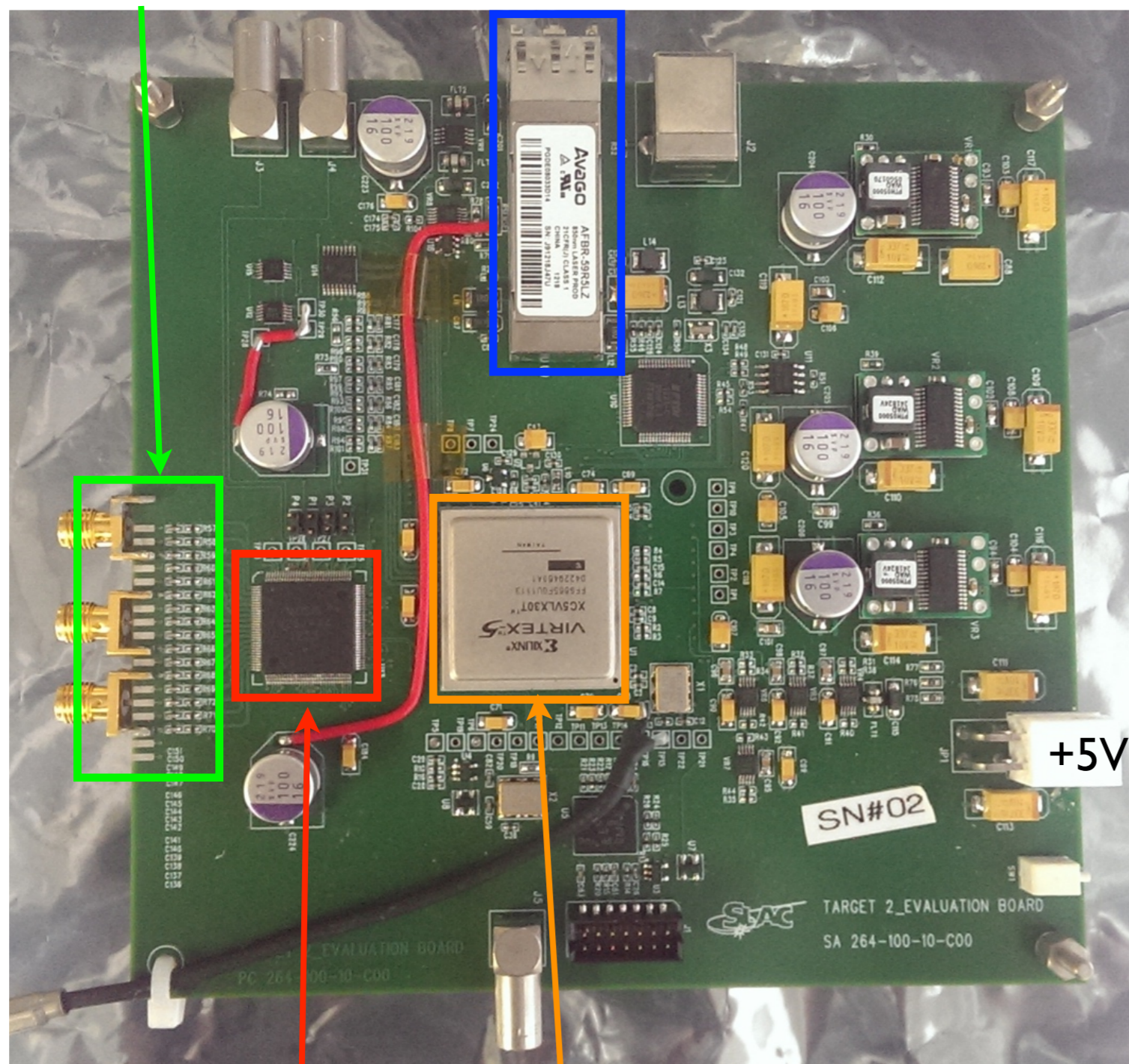
# TARGET 5 の模式図



# トリガー性能の測定方法

I6-ch input

Fiber I/O

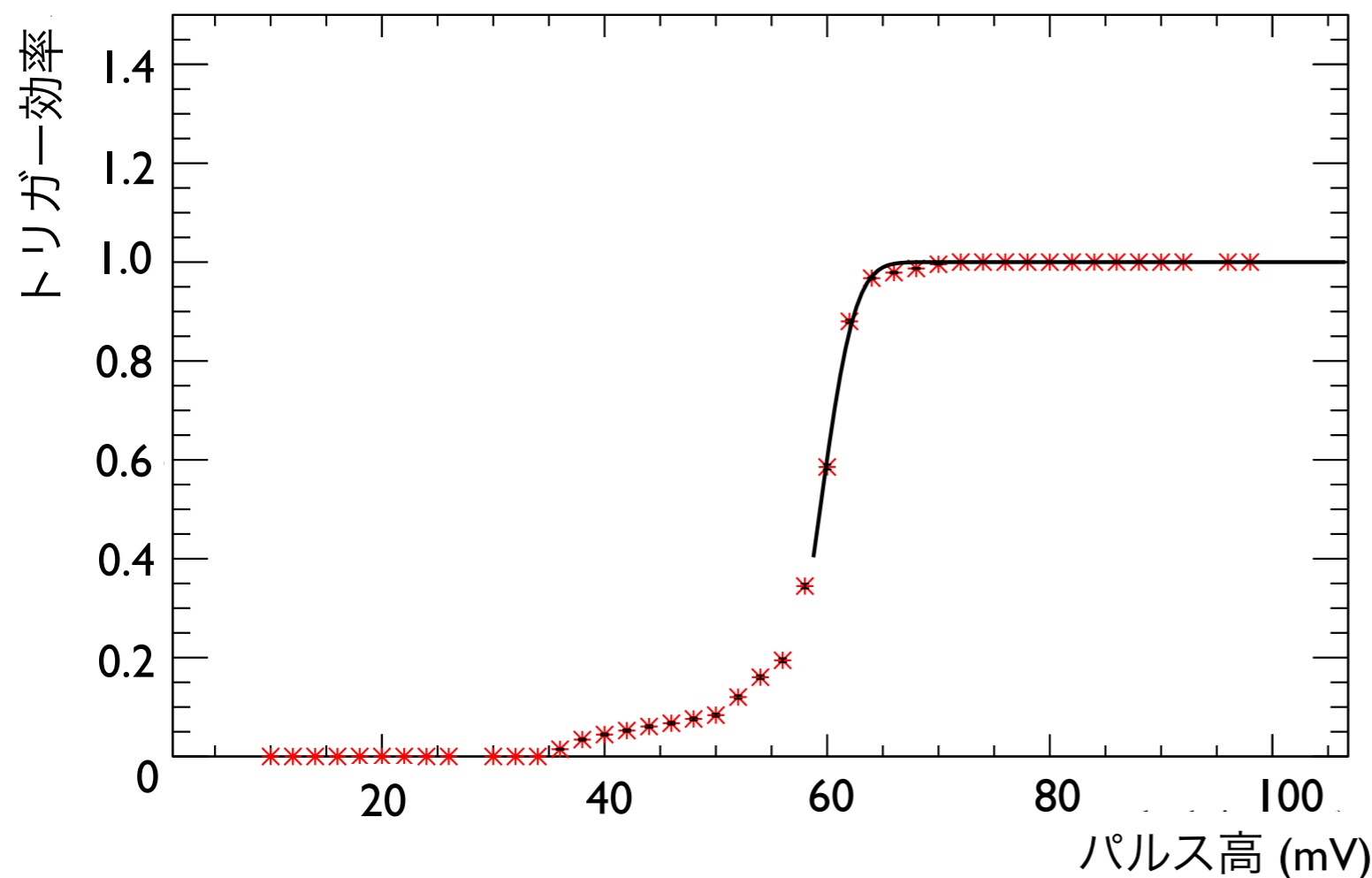


TARGET

FPGA

- 専用の評価ボードを使用
- ファンクション・ジェネレータで発生したパルスを入力

# トリガー性能の測定



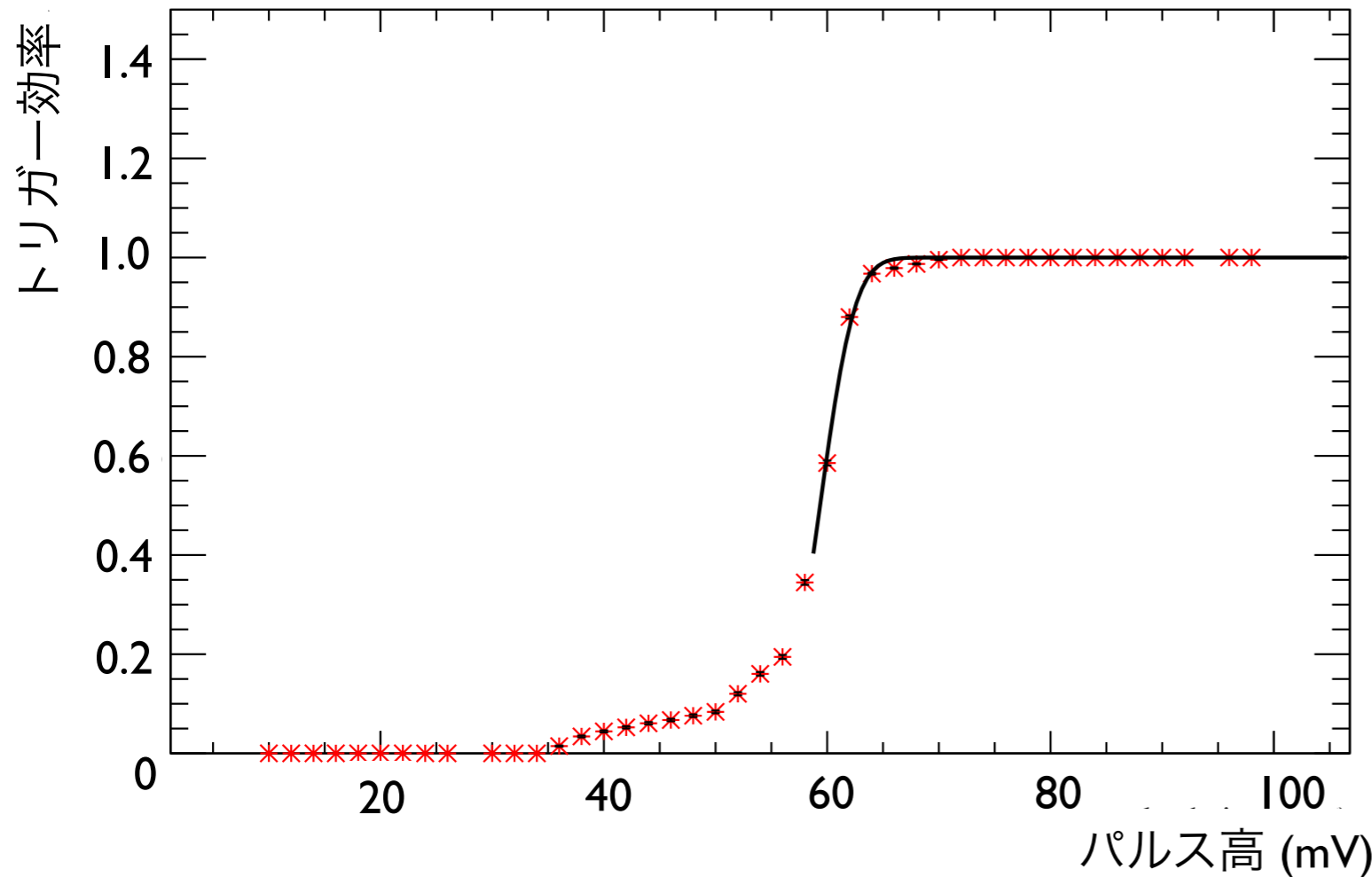
$$F = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]$$

$\mu$ : mean threshold

$\sigma$ : standard deviation (trigger noise)

- 入力パルスのパルス高を変化させながらトリガー効率を測定
- 誤差関数を含めた関数  $F$  (Gaussian の積分形) でフィッティングを行う
- トリガー効率が 0.5 となる点がトリガー閾値( $\mu$ )
- トリガーノイズは Gaussian の  $\sigma$  に相当する
- ref 電圧や各バイアスに対するノイズの依存性を測定、回路の最適化  
→ トリガーノイズ:  $\sim 3$  mV (目標  $\sim 1$  mV、1 p.e.  $\sim 4$  mV)
- 測定で得られる Sigmoid 曲線の形が歪んでいる原因を探す

# トリガー性能の測定



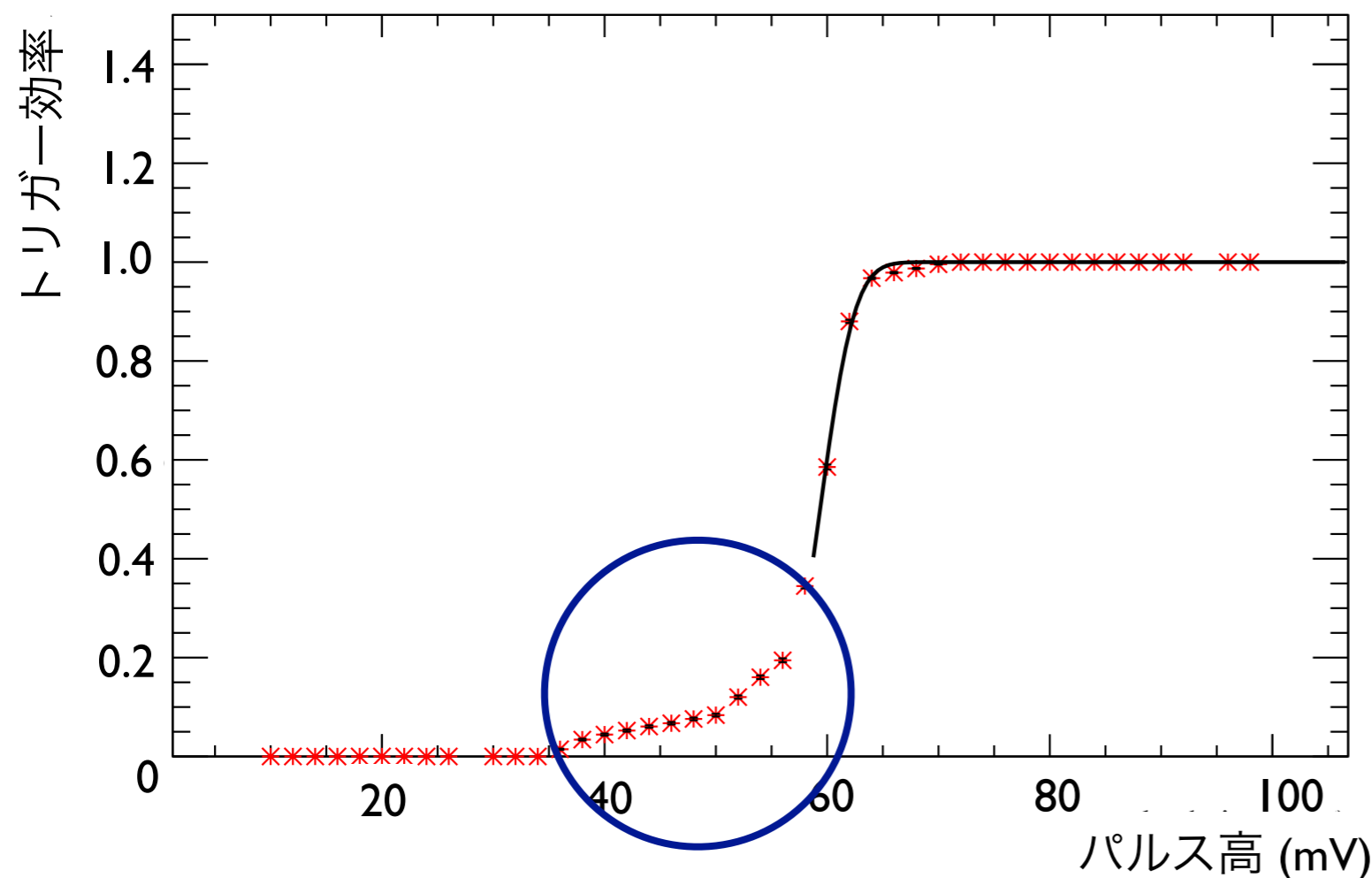
$$F = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]$$

$\mu$ : mean threshold

$\sigma$ : standard deviation (trigger noise)

- 入力パルスのパルス高を変化させながらトリガー効率を測定
- 誤差関数を含めた関数  $F$  (Gaussian の積分形) でフィッティングを行う
- トリガー効率が 0.5 となる点がトリガー閾値( $\mu$ )
- トリガーノイズは Gaussian の  $\sigma$  に相当する
- ref 電圧や各バイアスに対するノイズの依存性を測定、回路の最適化  
→ トリガーノイズ:  $\sim 3$  mV (目標  $\sim 1$  mV、1 p.e.  $\sim 4$  mV)
- 測定で得られる Sigmoid 曲線の形が歪んでいる原因を探す

# トリガー性能の測定



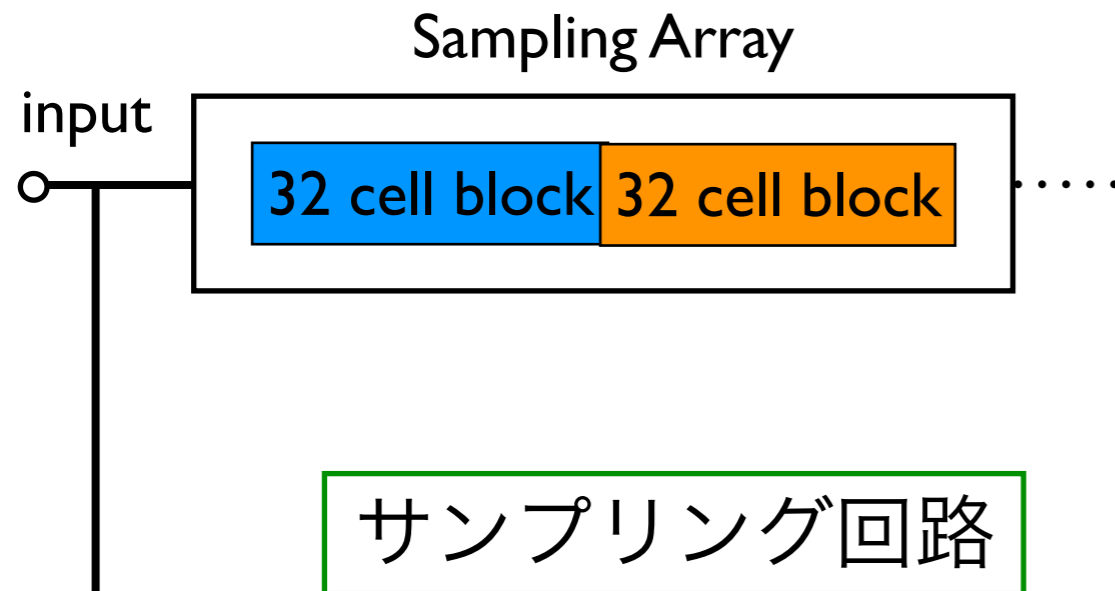
$$F = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]$$

$\mu$ : mean threshold

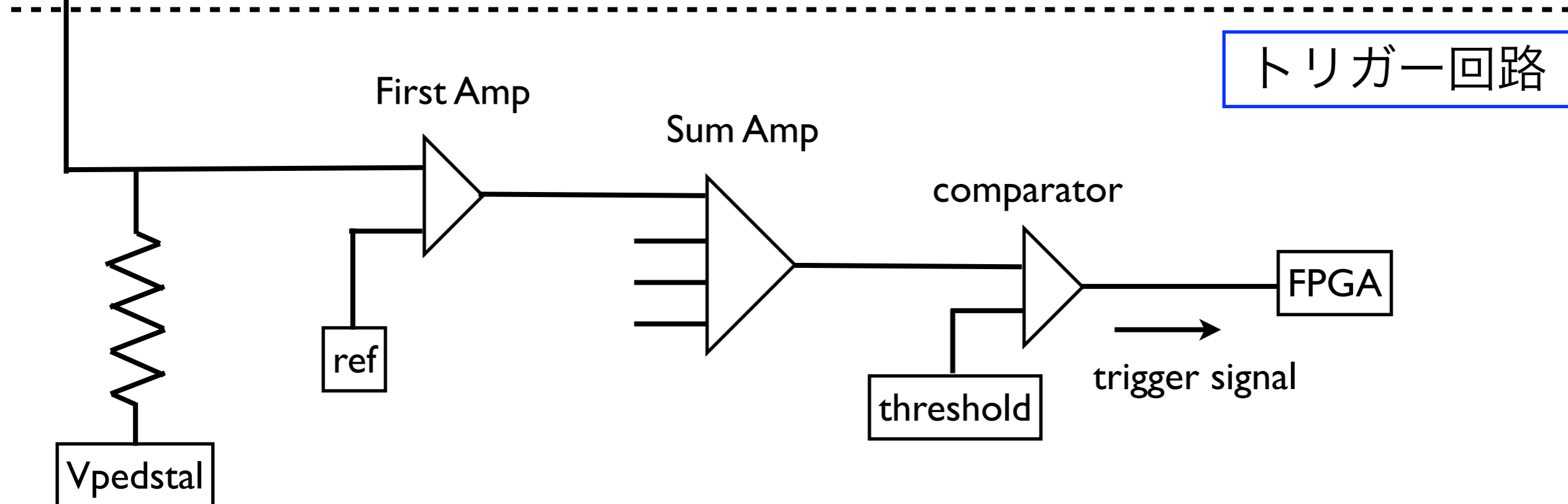
$\sigma$ : standard deviation (trigger noise)

- 入力パルスのパルス高を変化させながらトリガー効率を測定
- 誤差関数を含めた関数 F (Gaussian の積分形) でフィッティングを行う
- トリガー効率が 0.5 となる点がトリガー閾値( $\mu$ )
- トリガーノイズは Gaussian の  $\sigma$  に相当する
- ref 電圧や各バイアスに対するノイズの依存性を測定、回路の最適化  
→トリガーノイズ: ~ 3 mV (目標 ~1 mV、1 p.e. ~ 4 mV)
- 測定で得られる Sigmoid 曲線の形が歪んでいる原因を探す

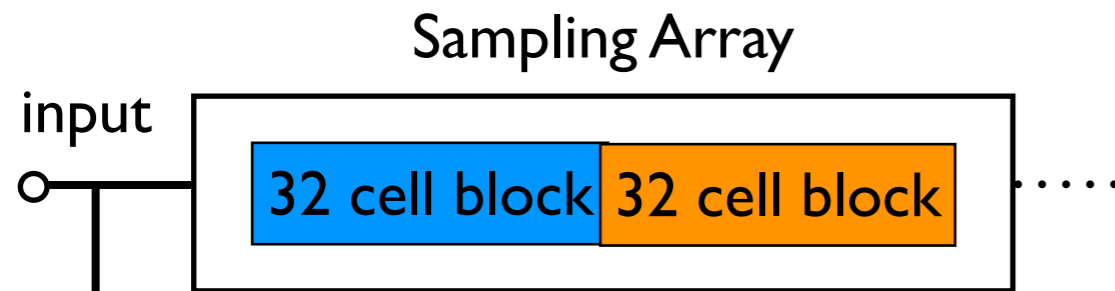
# 歪みの原因の予想、測定方法



IGSa/s でサンプリングしている場合、サンプリングアレイは  $(32 \times 2)$  ns 周期で動作する  
→ サンプリングに同期してノイズが発生している可能性がある



# 歪みの原因の予想、測定方法



サンプリング回路

64 ns のサンプリング周期に同期してトリガーさせ、サンプリングの位相を固定したトリガーノイズの測定を行う

First Amp

Sum Amp

comparator

トリガー回路

ref

threshold

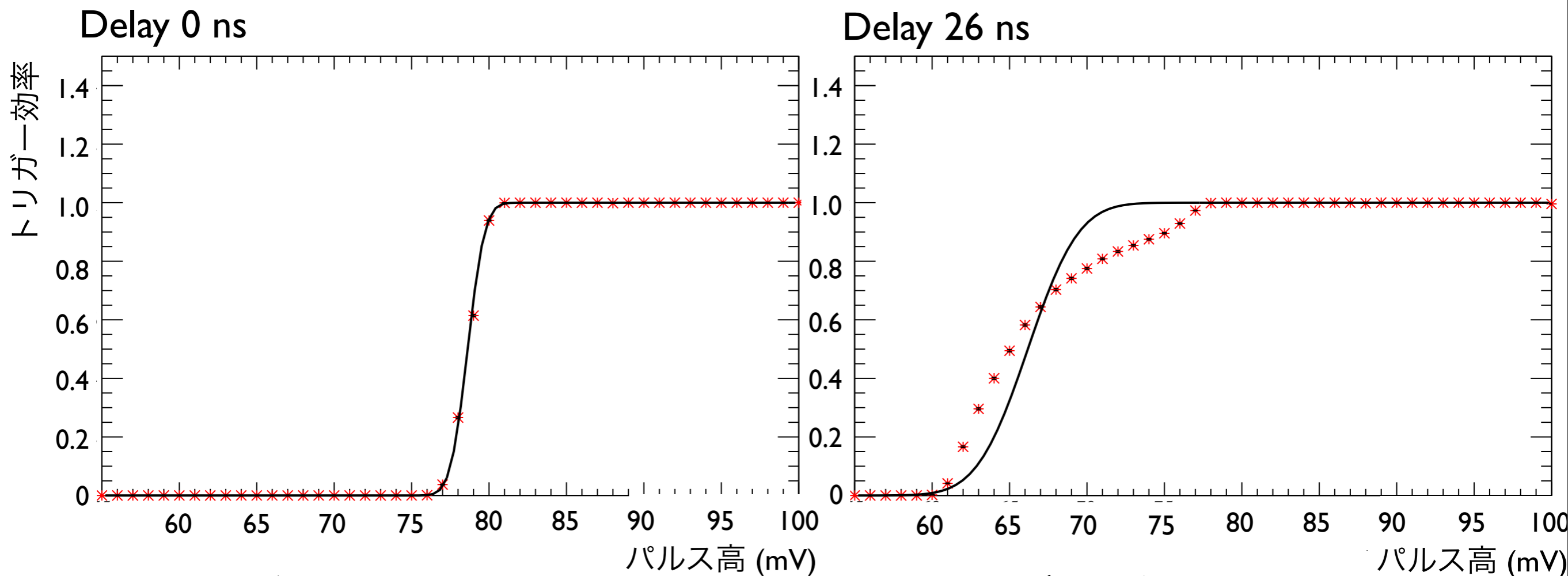
trigger signal

FPGA

Vpedstal



# サンプリング位相によるトリガー性能の差



トリガー閾値: ~ 78.6 mV

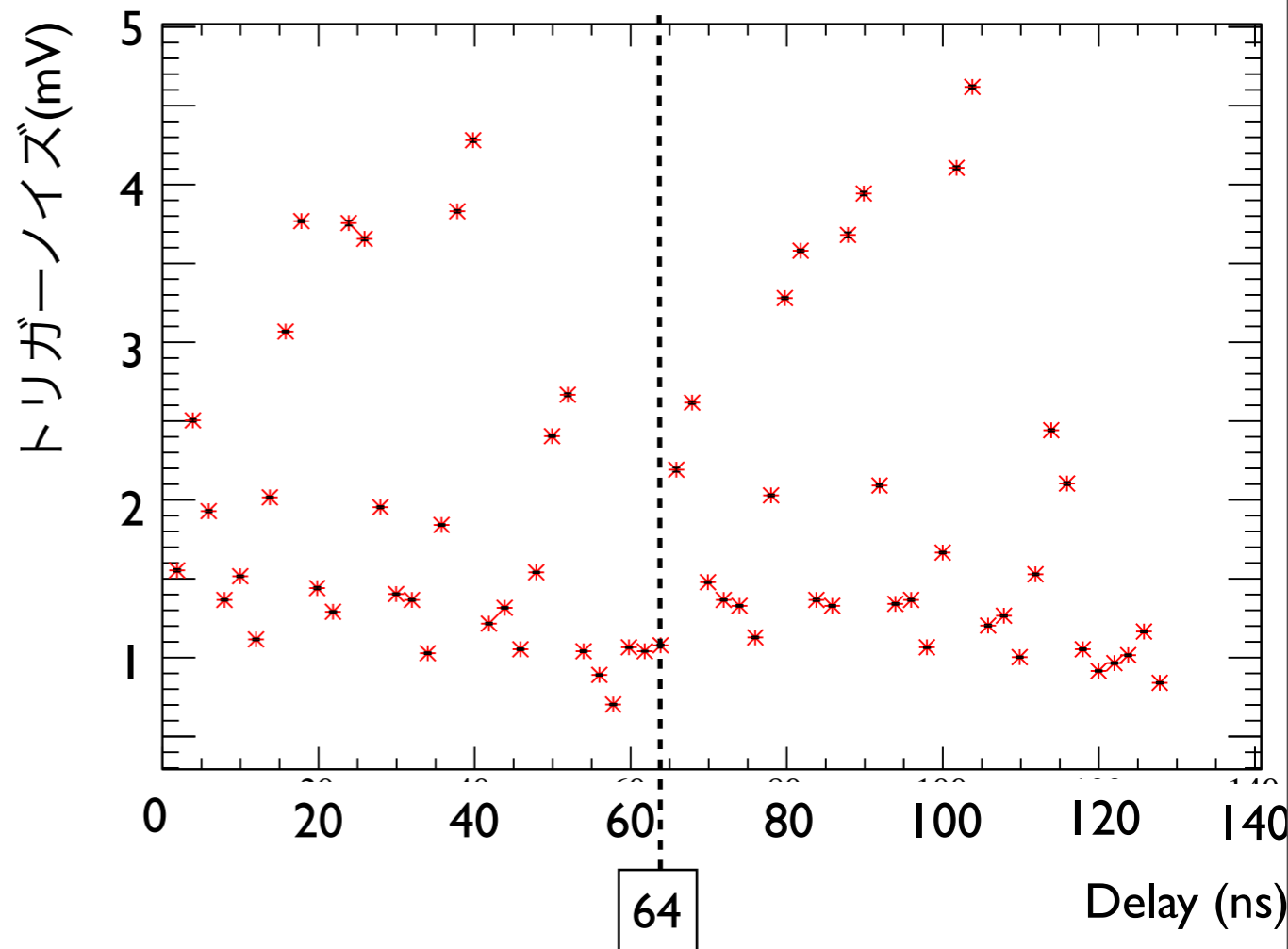
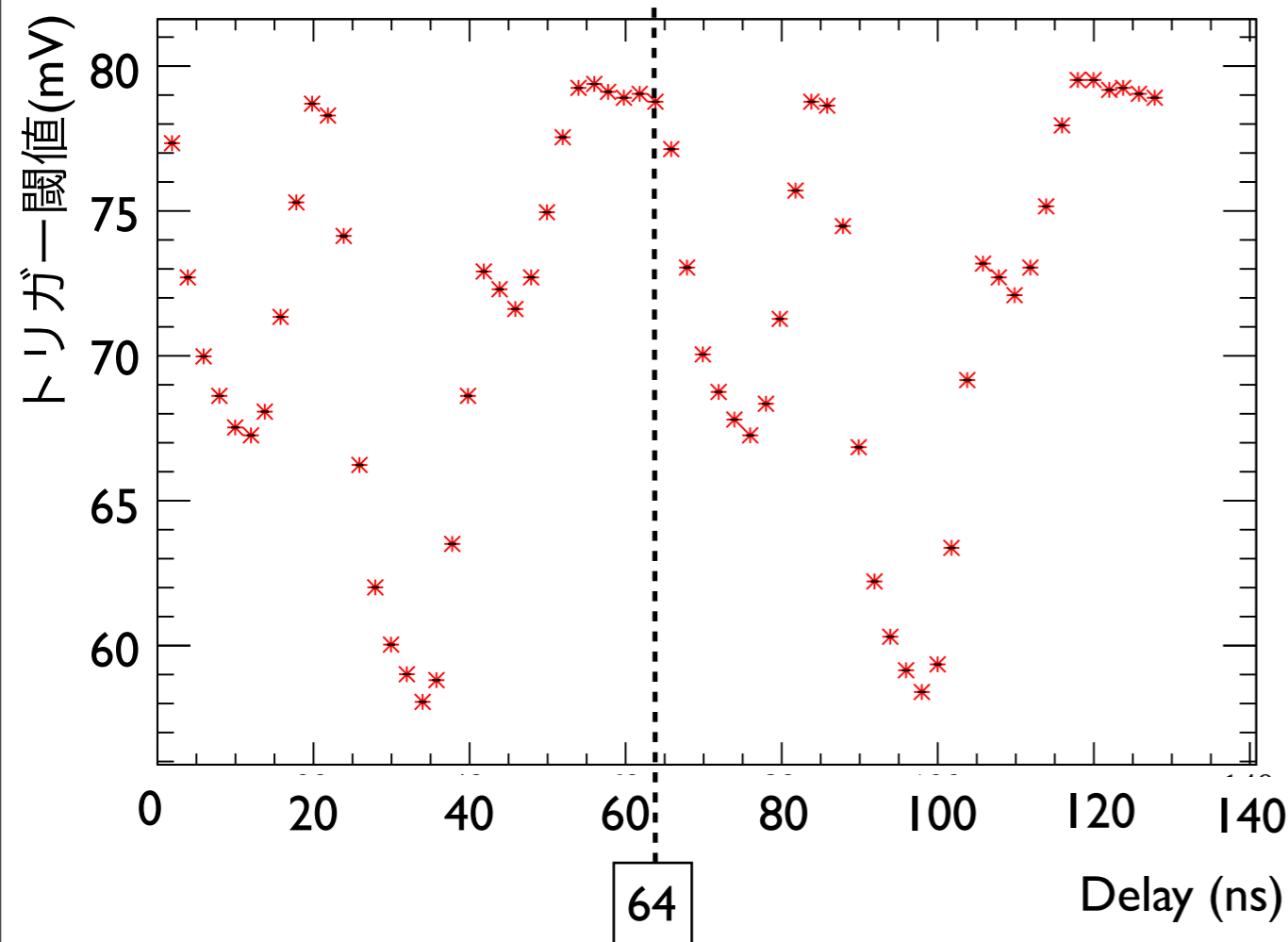
トリガーノイズ: ~ 1.2 mV

トリガー閾値: ~ 66.2 mV

トリガーノイズ: ~ 3.7 mV

- サンプリングの位相によってトリガー閾値がずれ、トリガーノイズの大きさも変化する
- 位相によってはトリガーノイズは十分小さい

# トリガー性能の周期性



- トリガー性能は 64 ns の周期で変化している
  - サンプリングアレイ の動作がトリガーノイズに影響している
- 位相を固定しない場合の Sigmoid 曲線は、これらの重ね合わせと考えられる

# まとめ、今後

- TARGET 5 のトリガー性能を測定
- 回路の設定を最適化することにより、トリガーノイズは 3 mV 程にすることが可能 (1 p.e. ~ 4 mV)
- サンプリングアレイの動作がトリガー性能に影響しているという予想が正しいことを確認
- TARGET 7 では、トリガー回路の層をメタルで覆い、サンプリング回路の干渉を防ぐよう設計
- TARGET 7 でトリガー性能が改善されているか、測定を行う
  - 現在、測定のセットアップ中