CTA計画

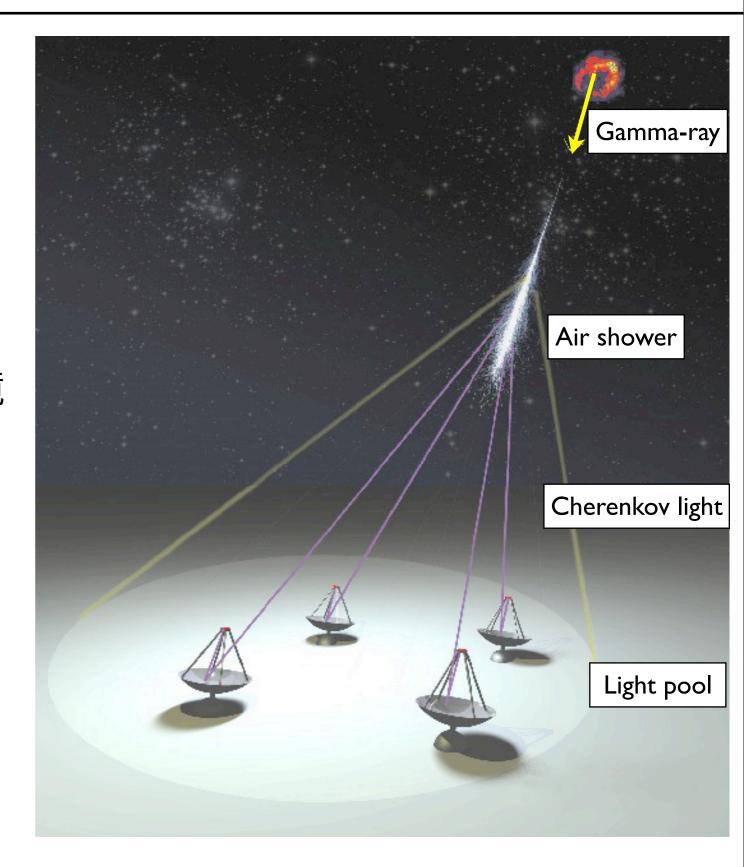
デュアルミラー望遠鏡用の波形記録集積回路 の性能評価

河島孝則^A、田島宏康^A、奥村曉^{A、B}、日高直哉^A、 J.Hinton^B、R.White^B、 S.Funk^C、L.Tibaldo^C、J.Vandenbroucke^D、G.Varner^E、 他 The CTA Consortium

名大 STE \overline{H}^A 、レスター大 B 、SLAC^C、 ウィスコンシン大 D 、 ハワイ大 E

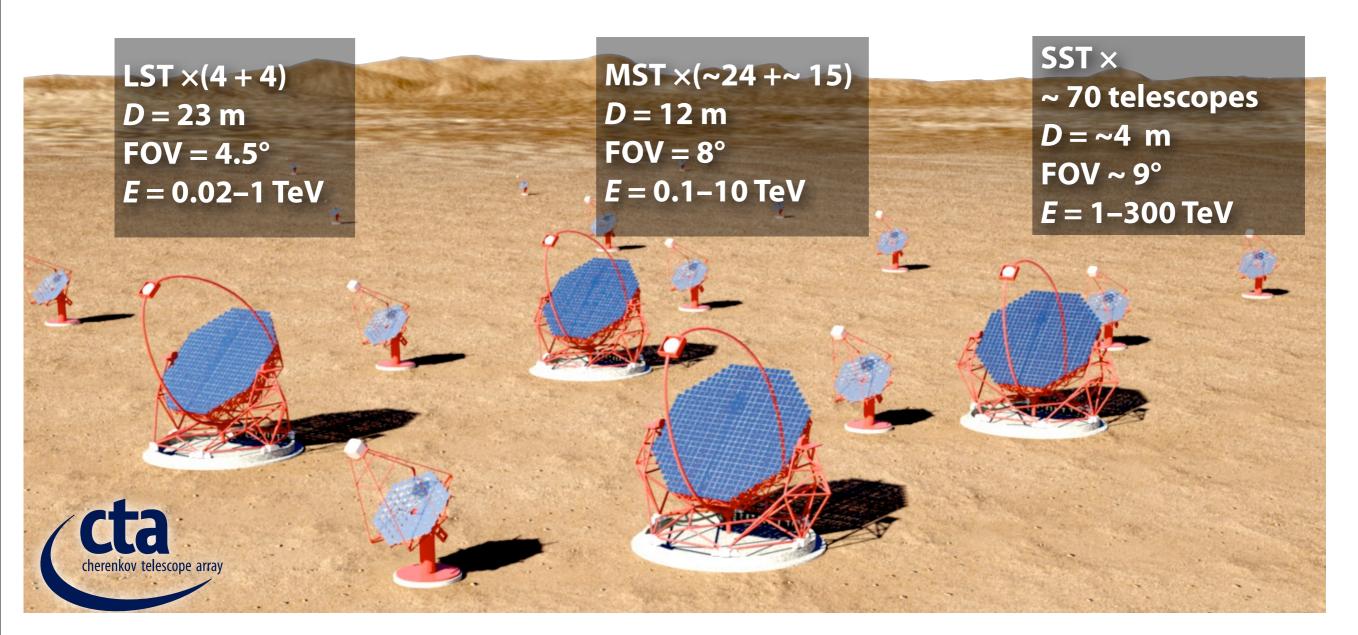
超高エネルギーガンマ線観測

- 数十 GeV から 数十 TeV 以上の 超高エネルギー(VHE)ガンマ線観 測
- VHE ガンマ線が大気シャワーを生じ、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



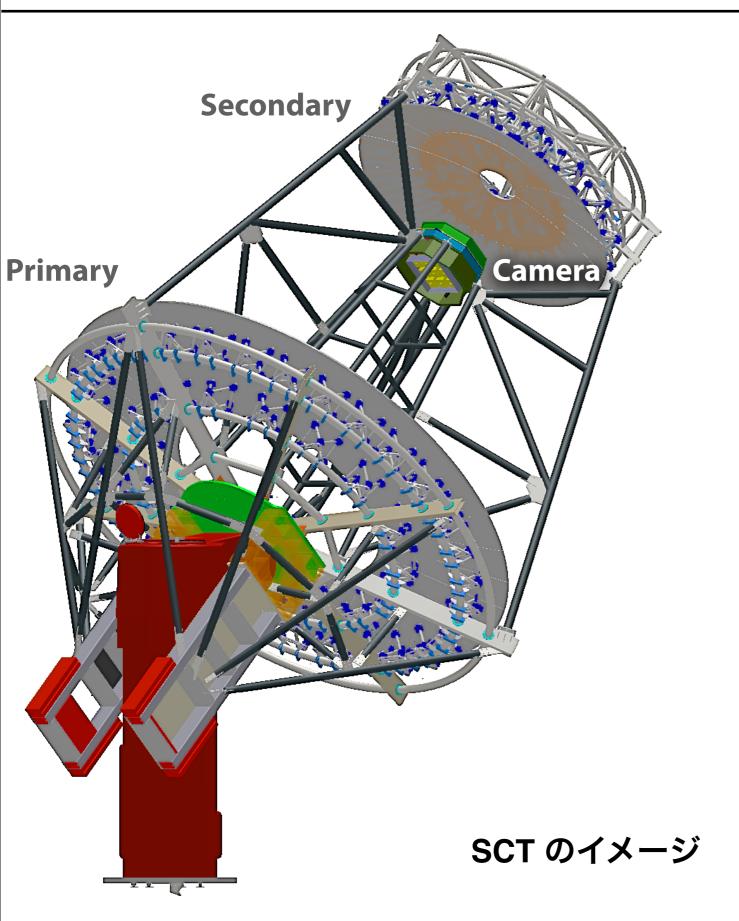
H. J. Völk and K. Bernlöhr. 2009

Cherenkov Telescope Array (CTA)



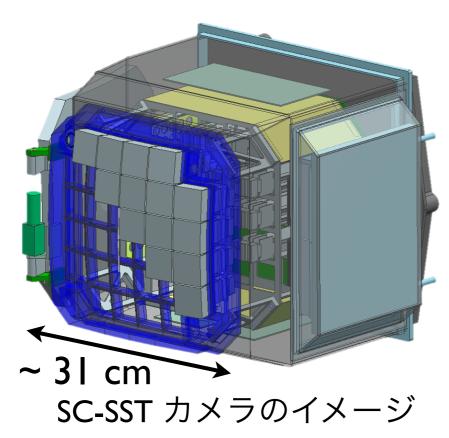
- Large, Medium, Small-Sized Telescope (LST, MST, SST) の 3 種の口径の望遠鏡を 100 台規模で、南北の両半球に設置
- 現在稼働している望遠鏡と比較して 10 倍ほどの感度向上
- ◆ 20 GeV から 100 TeV の広い観測エネルギー帯域

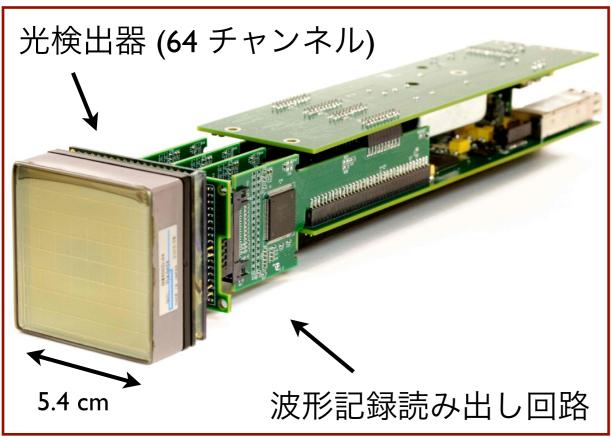
Schwarzschild-Couder Telescope

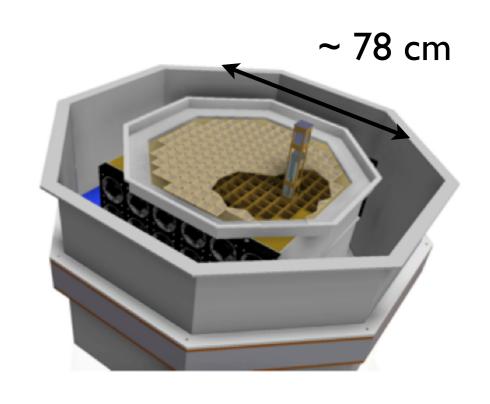


- ガンマ線望遠鏡では初めて副鏡を有する望遠鏡
- MST の拡張として SC-MST を、3種類ある SST のうち 2 種類として SC-SST を開発中
- 単鏡の望遠鏡より短焦点距離に なるため、焦点面カメラの小型化、費用の低減が可能
- → 数十台の規模で設置する予定
- の MST、SST において非常に重要

焦点面カメラ





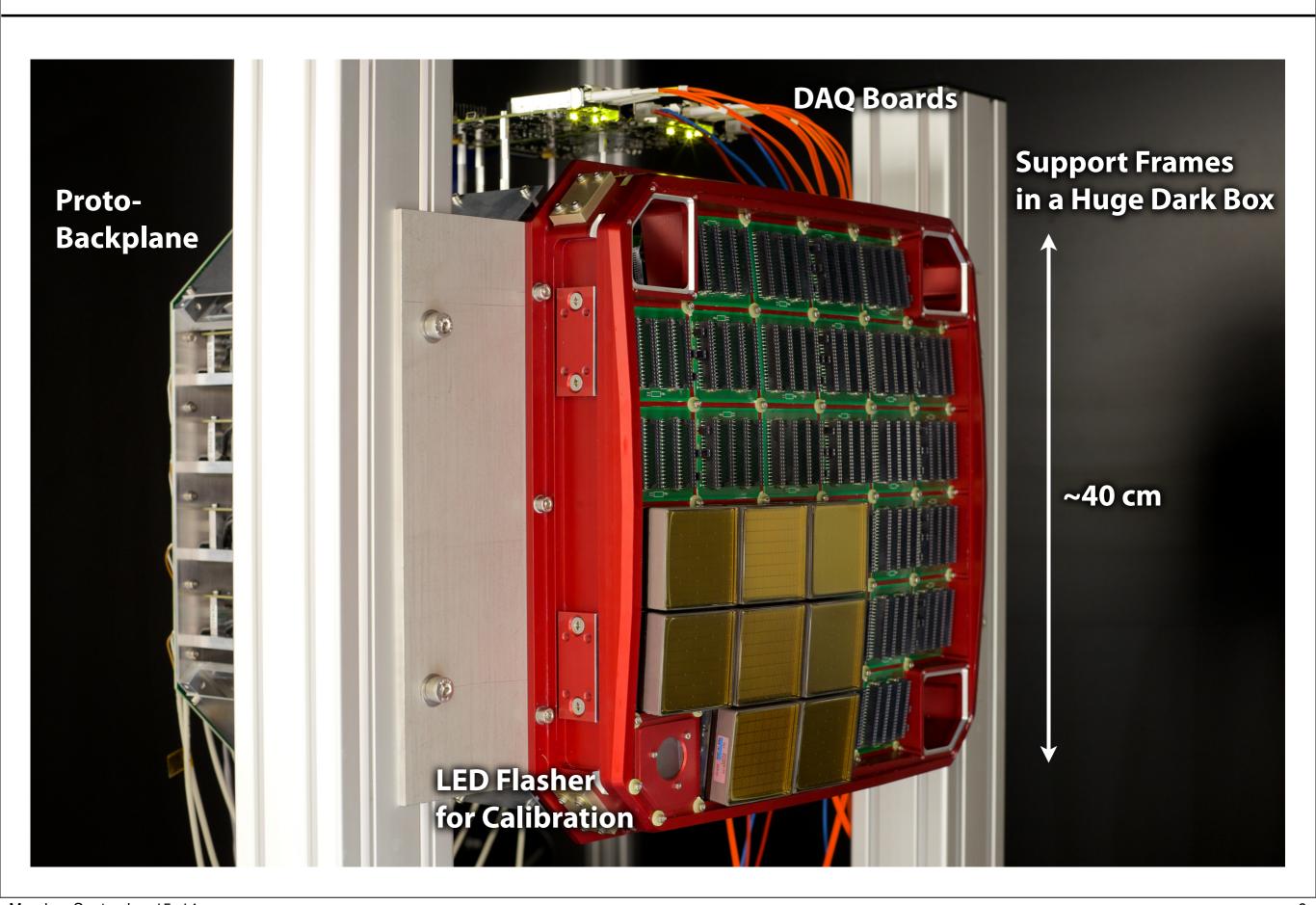


SC-MST カメラのイメージ

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

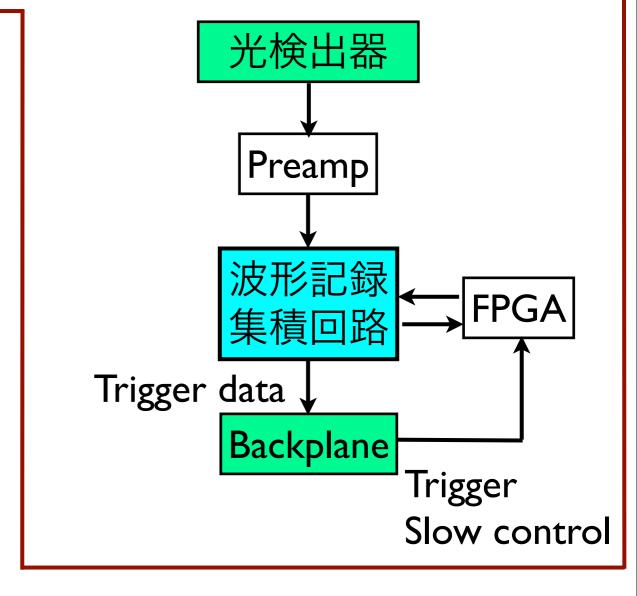
- ← カメラモジュールの試作機
 - モジュール構成→交換が容易
 - SC-SSTと SC-MST のモジュールはほぼ同様

焦点面カメラの試作機



波形記録集積回路への要求

- 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
- 多数の読み出しチャンネル: 16 ch
- 低消費電力: ~ 70 mW/ch
- 波形記録時間分解能: ~ I ns
- 波形記録時間: > 12 μs
- 読み出し時間: < 30 µs
- ダイナミックレンジ: I mV~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

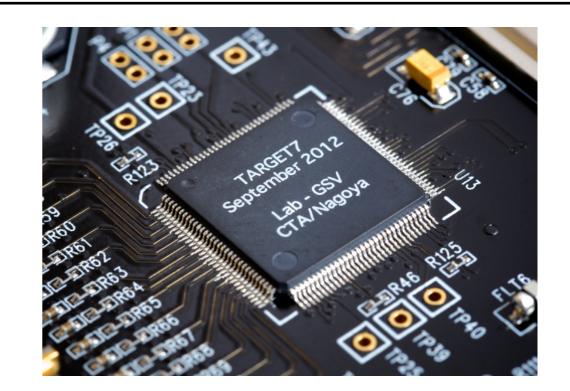
- 2008 年 3 月製作
- 周波数特性 が ~150 MHz

TARGET 5

- 2012 年 8 月製作
- 周波数特性 400 MHz、クロストーク < 1%
- トリガー閾値を低くできない (~25 mV, ~6 p.e.)
- サンプリング回路が原因のノイズがトリガー回路へ影響

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
- サンプリング回路の干渉を防ぐため、トリガー回路をメタルの層で覆うように設計



TARGET の開発履歴

TARGET 1

- 2008 年 3 月製作
- 周波数特性 が ~150 MHz

TARGET 5

- 2012 年 8 月製作
- 周波数特性 400 MHz、クロストーク < 1%
- トリガー閾値を低くできない (~25 mV, ~6 p.e.)
- サンプリング回路が原因のノイズがトリガー回路へ影響

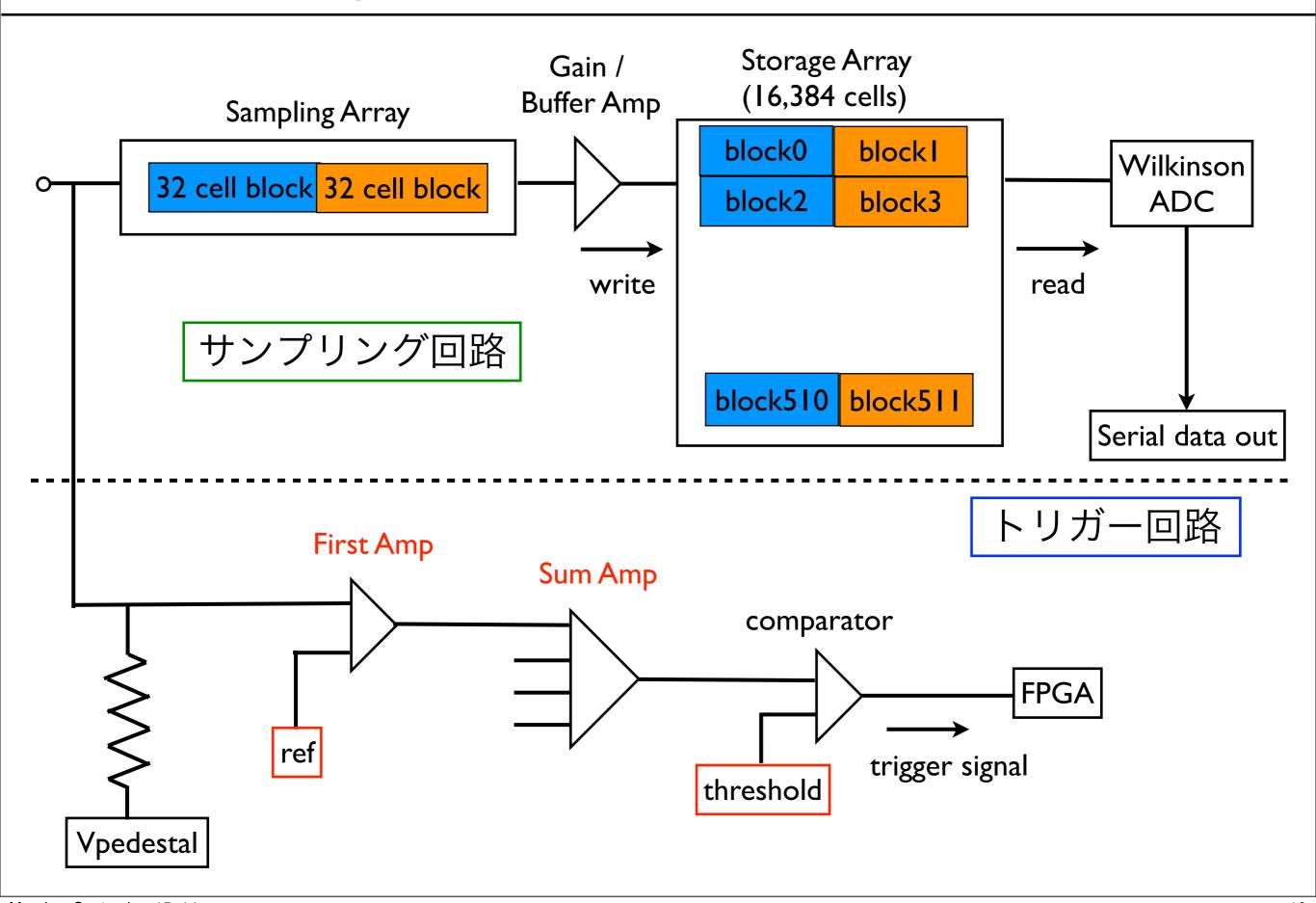
TARGET 7

トリガー性能を評価

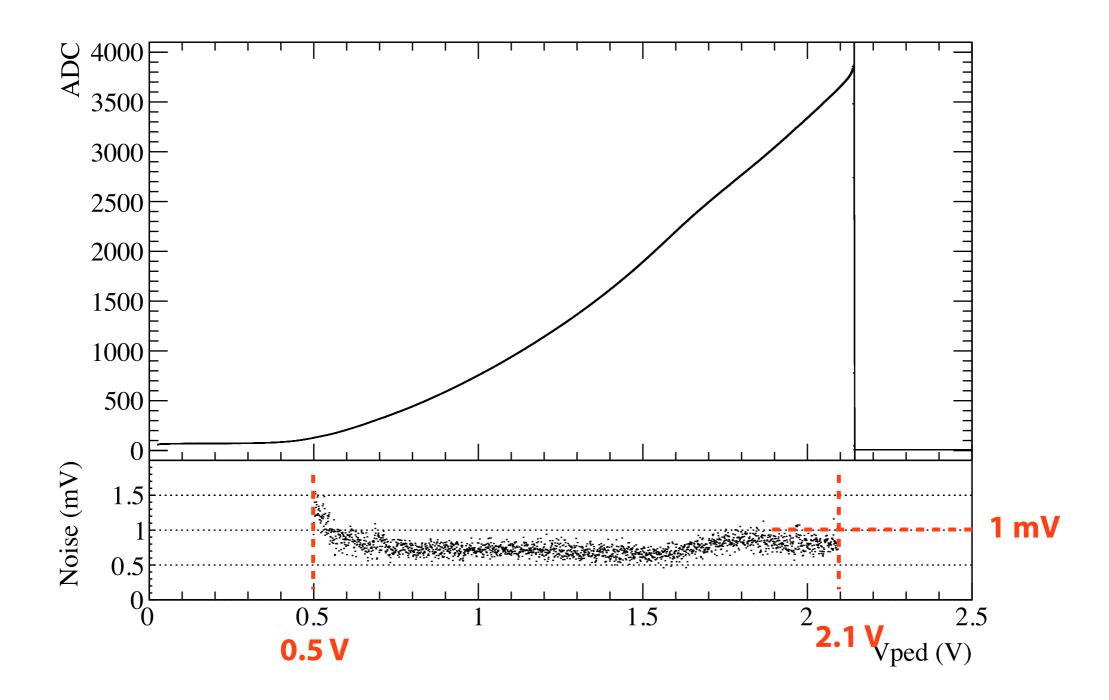
- 2013 年 12 月製作
- ダイナミックレンジを大きくし、リニアリティ、温度依存性を改良
- サンプリング回路の干渉を防ぐため、トリガー回路をメタルの層で覆う

ように設計

TARGET の模式図

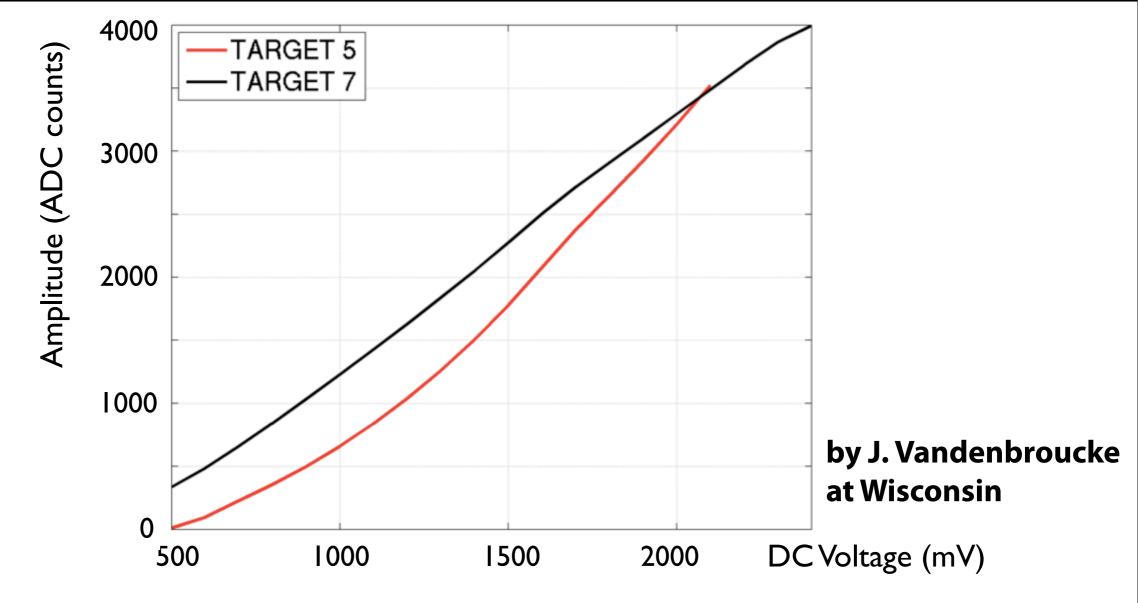


ダイナミックレンジ、リニアリティ (T5)



- リニアリティが悪く、キャリブレーションが難しい
- ダイナミックレンジ ~ I.6V は要求の I0 bit より小さい

ダイナミックレンジ、リニアリティの改良



	ダイナミックレンジ	積分非直線性
TARGET5	0.5 ~ 2.1 V	338 ADC counts
TARGET7	0.5 ~ 2.4V	77 ADC counts

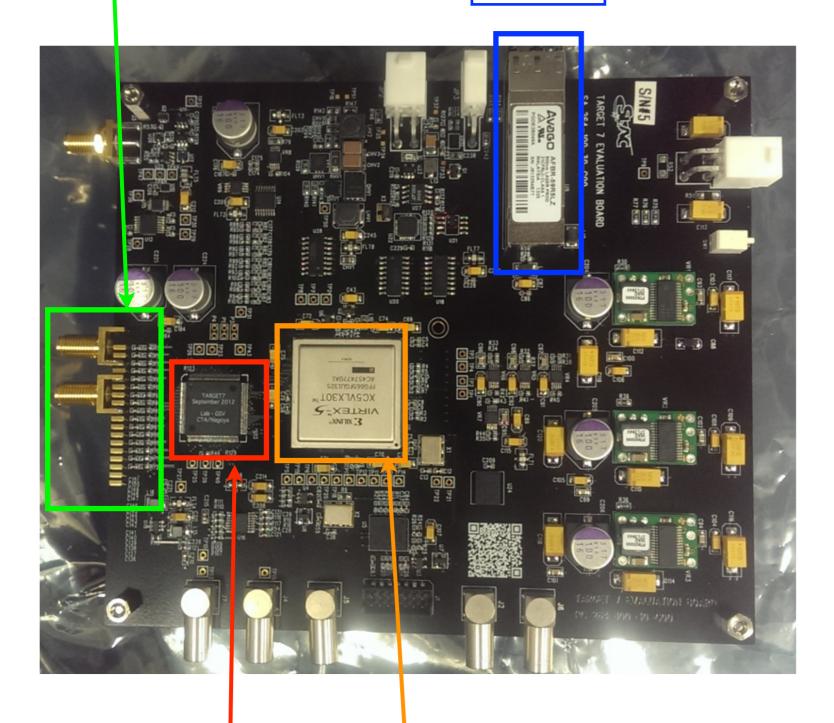
● TARGET 7 のサンプリング回路ではダイナミックレンジとリニアリテ

ィの改良に成功している

トリガー性能の測定方法

16-ch input

Fiber I/O

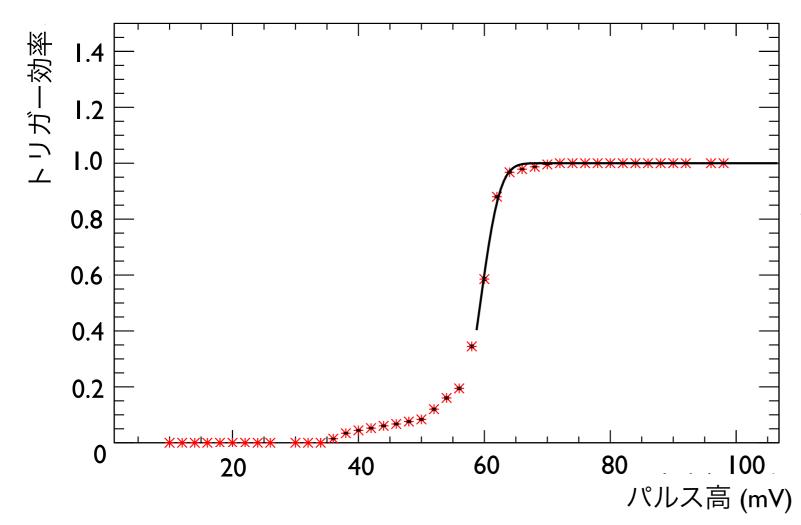


- 専用の評価ボードを使用
- ファンクション・ジェネ レータで発生したパルスを 入力

TARGET7

FPGA

トリガー性能の測定 (T5)



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

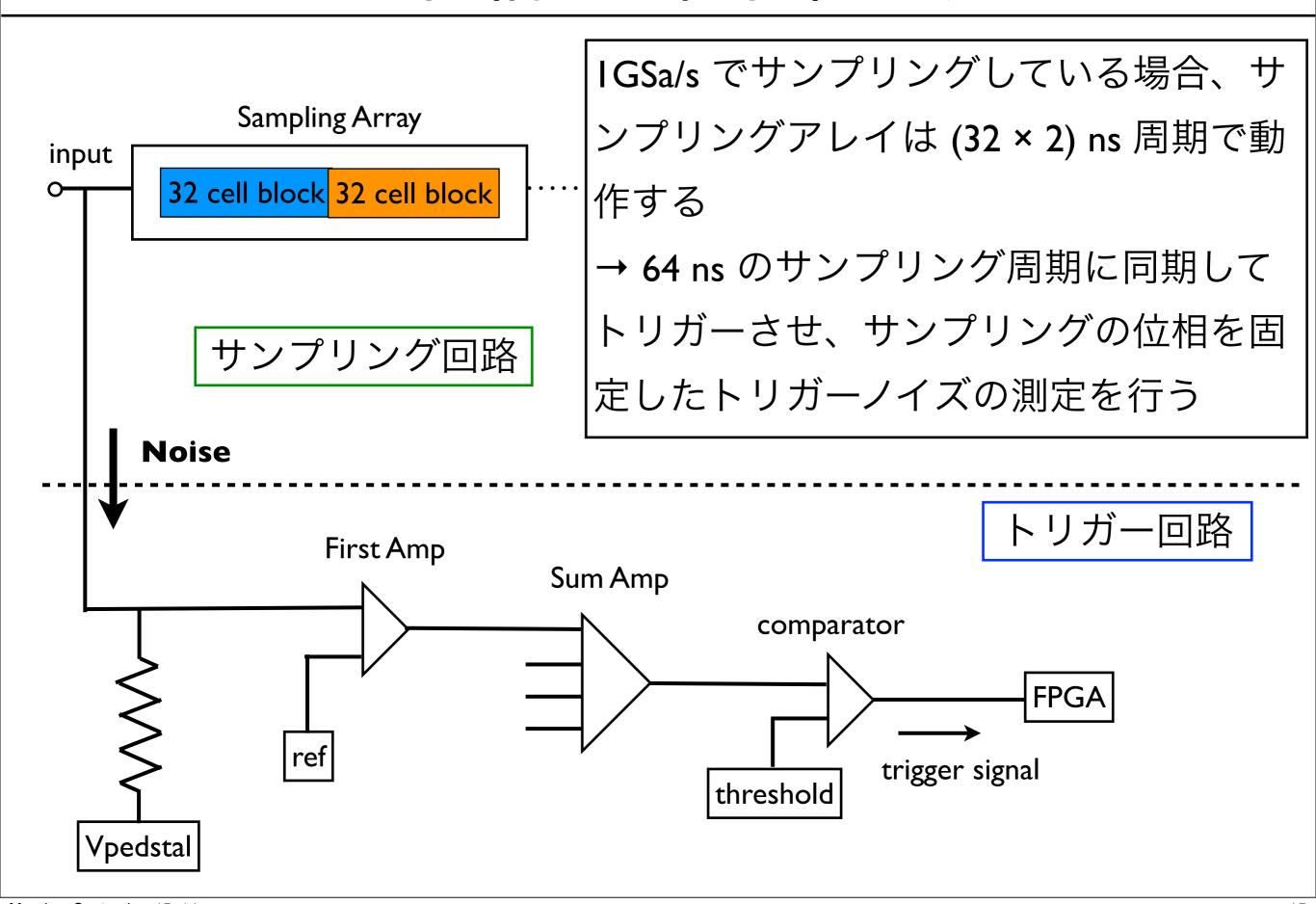
 μ : mean threshold

 σ : standard deviation (trigger noise)

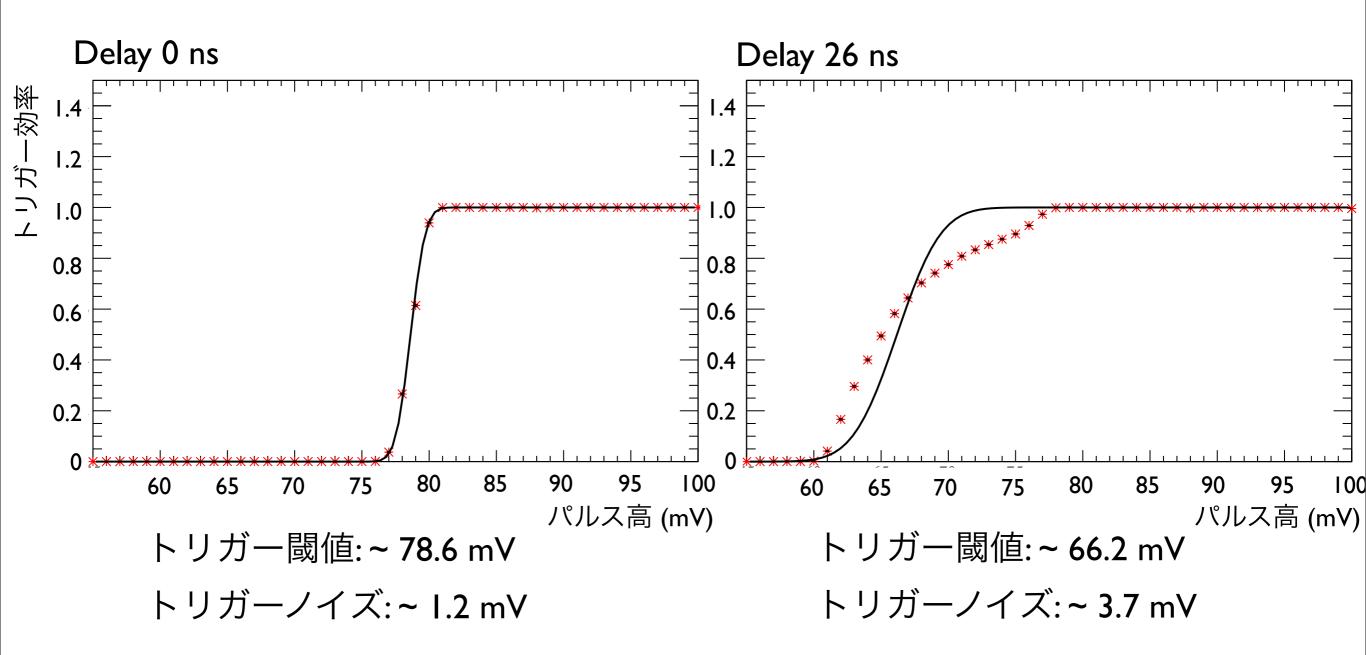
- 入力パルスのパルス高を変化させながらトリガー効率を測定
- 誤差関数を含めた関数 F (Gaussian の積分形)でフィッテイングを行う
- トリガー効率 が 0.5 となる点がトリガー閾値(μ)
- トリガーノイズ は Gaussian の σ に相当する
- トリガーノイズ:~3 mV (目標 ~I mV、I p.e.~4 mV)

• 測定で得られるデータの曲線の形が歪んでいる

サンプリング位相への依存性の測定

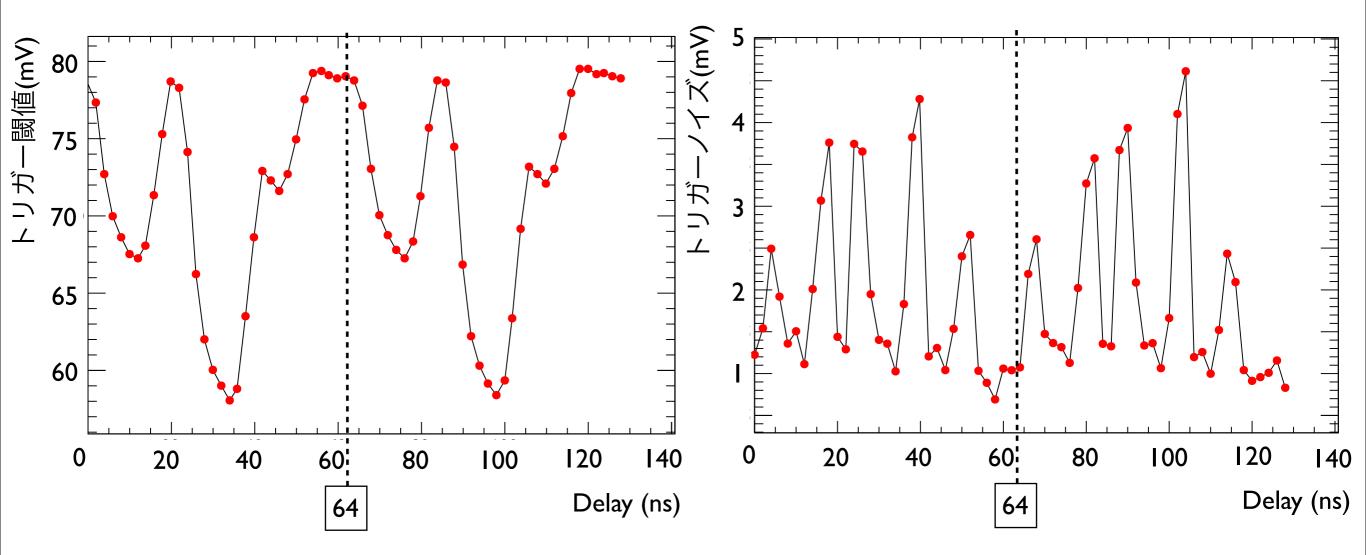


トリガー性能のサンプリング位相依存性(T5)



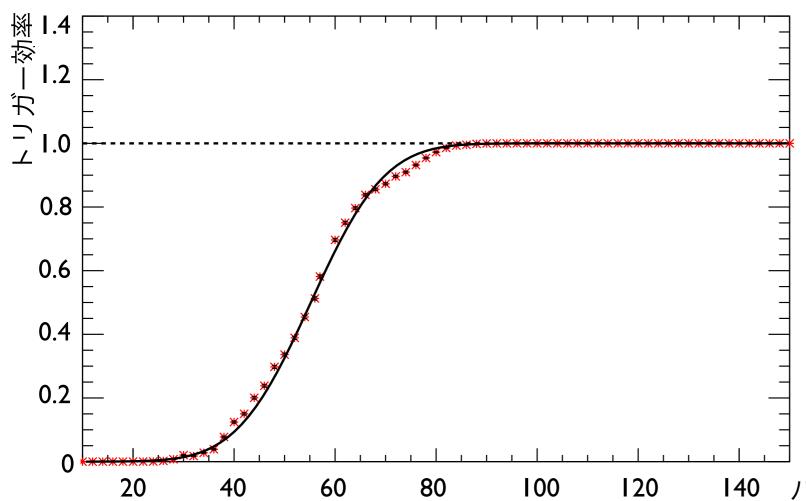
- サンプリングの位相によってトリガー閾値がずれ、トリガーノイズの大きさも変化する
- 位相によってはトリガーノイズは十分小さい

トリガー性能の周期性(T5)



- TARGET 5 のトリガー性能は 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
- 設計を改良した TARGET 7 において、サンプリング回路の干渉を防ぐことに成功したのかを測定によって確認する

トリガー性能の測定(T7)



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

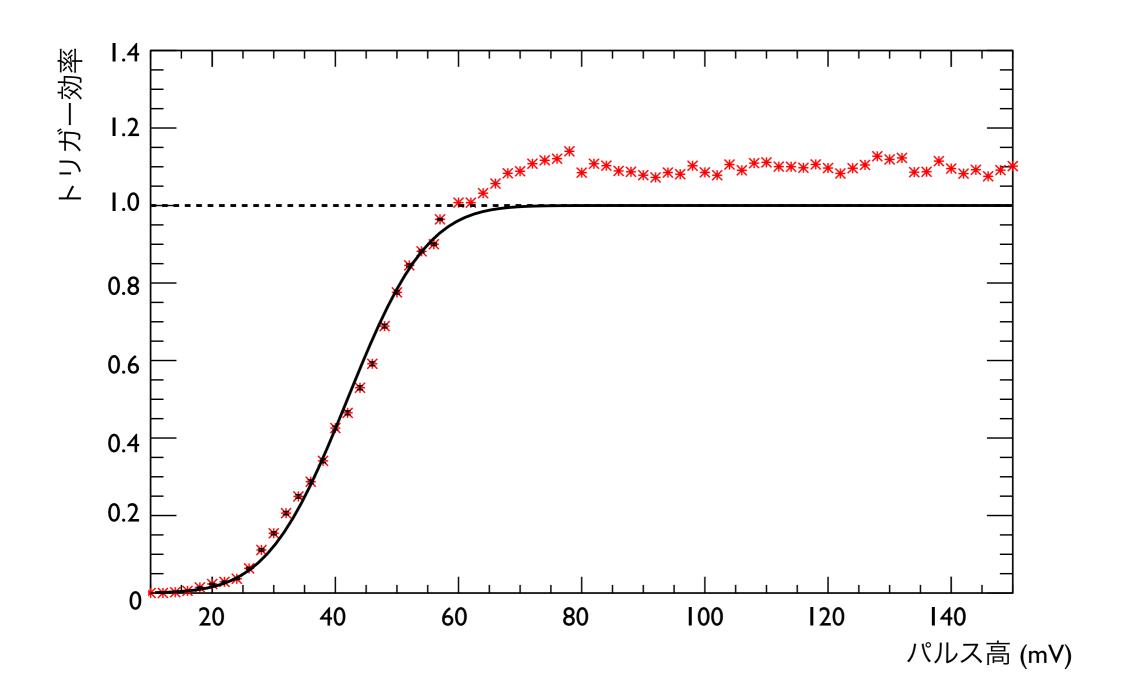
 μ : mean threshold

 σ : standard deviation (trigger noise)

パルス高 (mV)

- 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)でフィッテイングを行う
- トリガー効率 が 0.5 となる点がトリガー閾値(μ)
- トリガーノイズ は Gaussian の σ に相当する

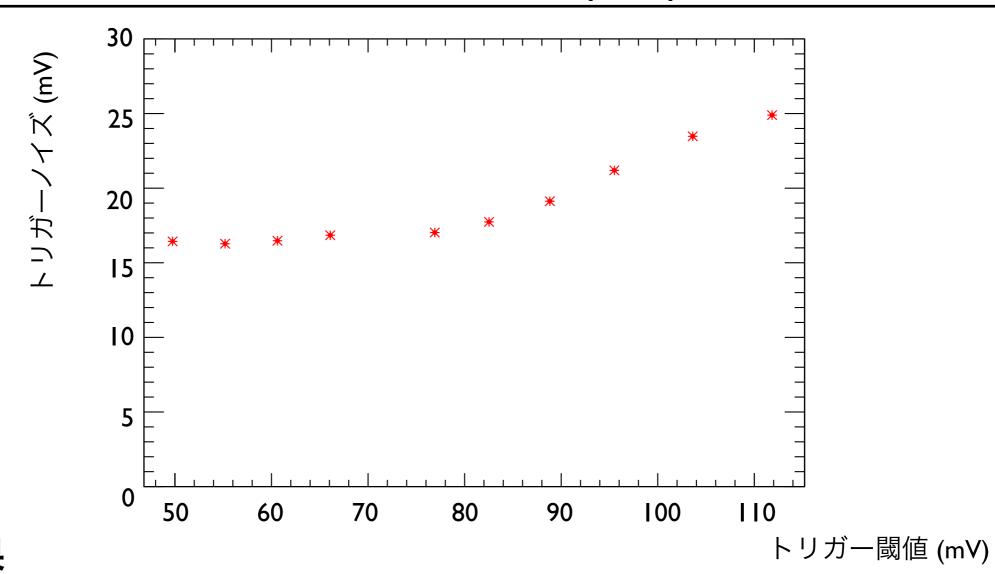
トリガー閾値の限界



- 最小閾値はコンパレータの設定値を変えて測定する
- コンパレータの設定を小さくし過ぎると、ノイズをトリガーし始める

→ 最小閾値の決定

トリガー性能の測定結果 (T7)



測定結果

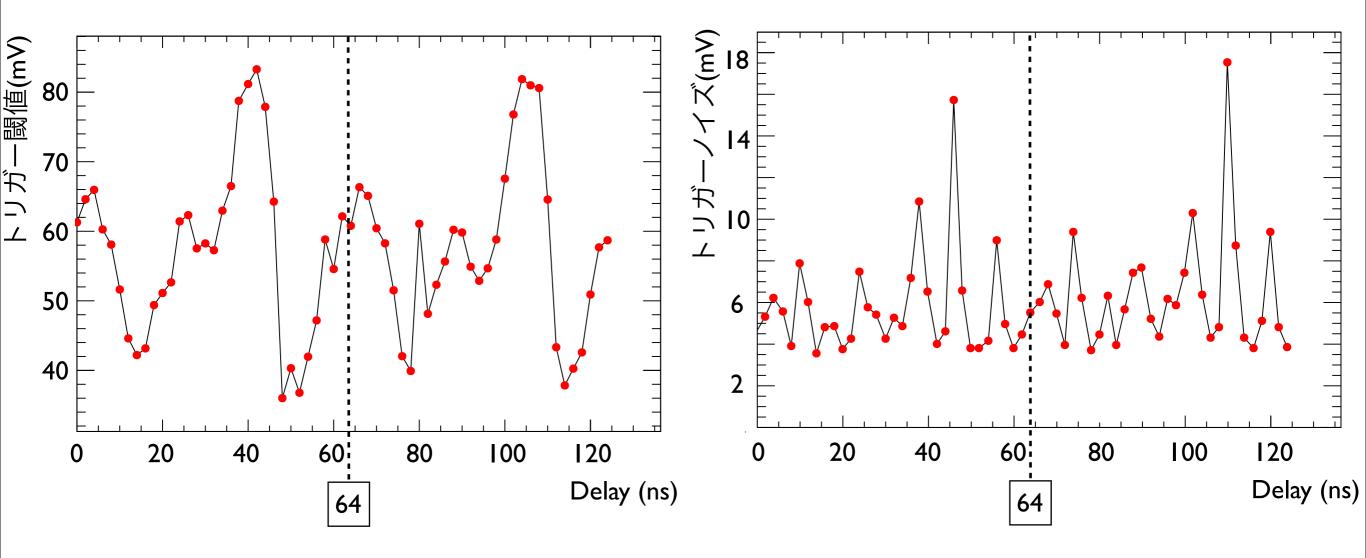
最小トリガー閾値 (μ) ~ 50 mV、トリガーノイズ (σ) ~ 16 mV

(目標はそれぞれ μ < I0 mV、σ < I mV、I p.e. ~ 4 mV)

目標性能より悪い

→ TARGET 7 において、サンプリング回路がトリガー回路に干渉しているか確認する

トリガー性能のサンプリング性能依存性(T7)

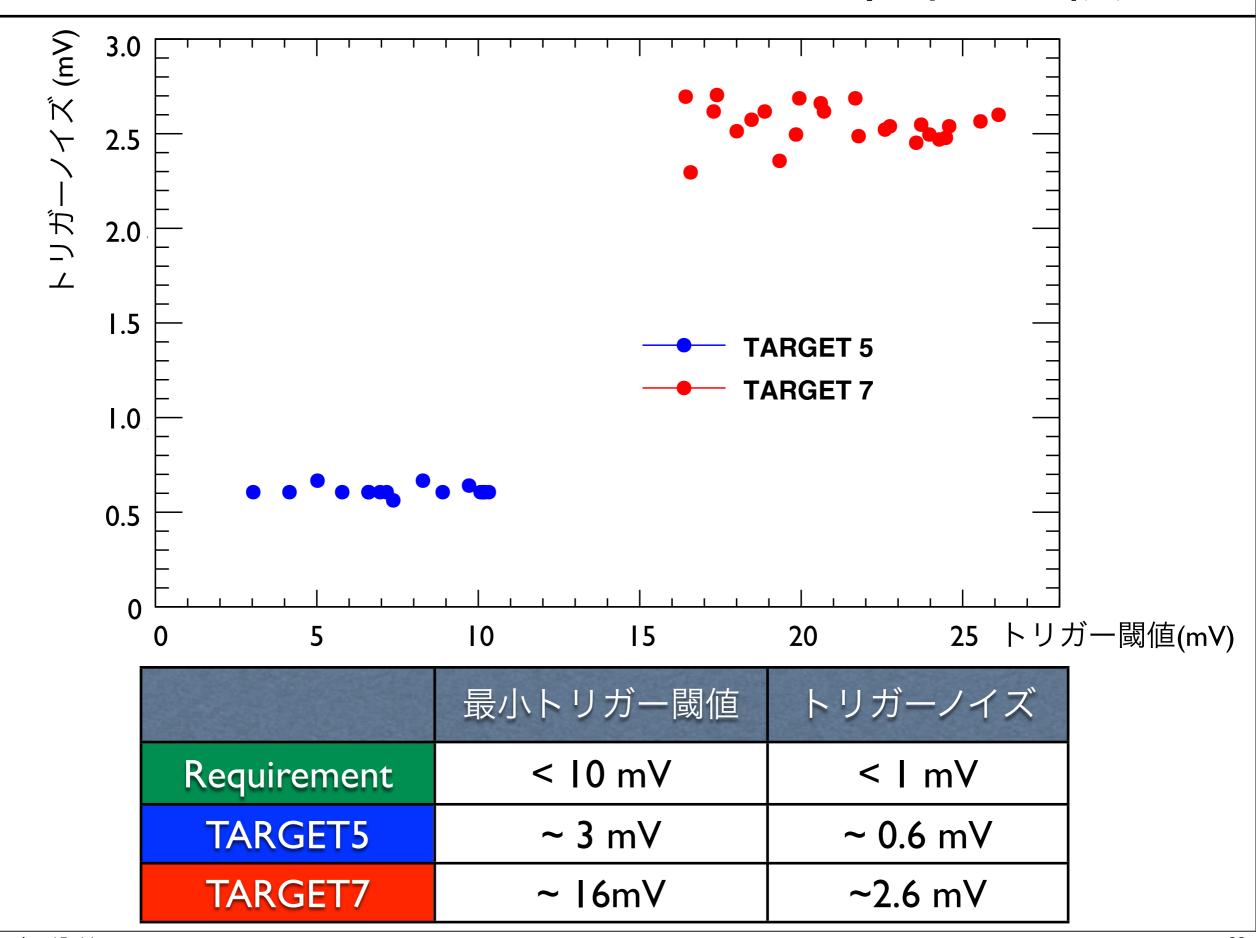


- ●トリガー性能は 64 ns 周期で変化している
- ●トリガー閾値は 40 mV、トリガーノイズは 15 mV 程度変化する
- TARGET 7 の設計ではサンプリング回路の干渉を防ぐことはできなかった

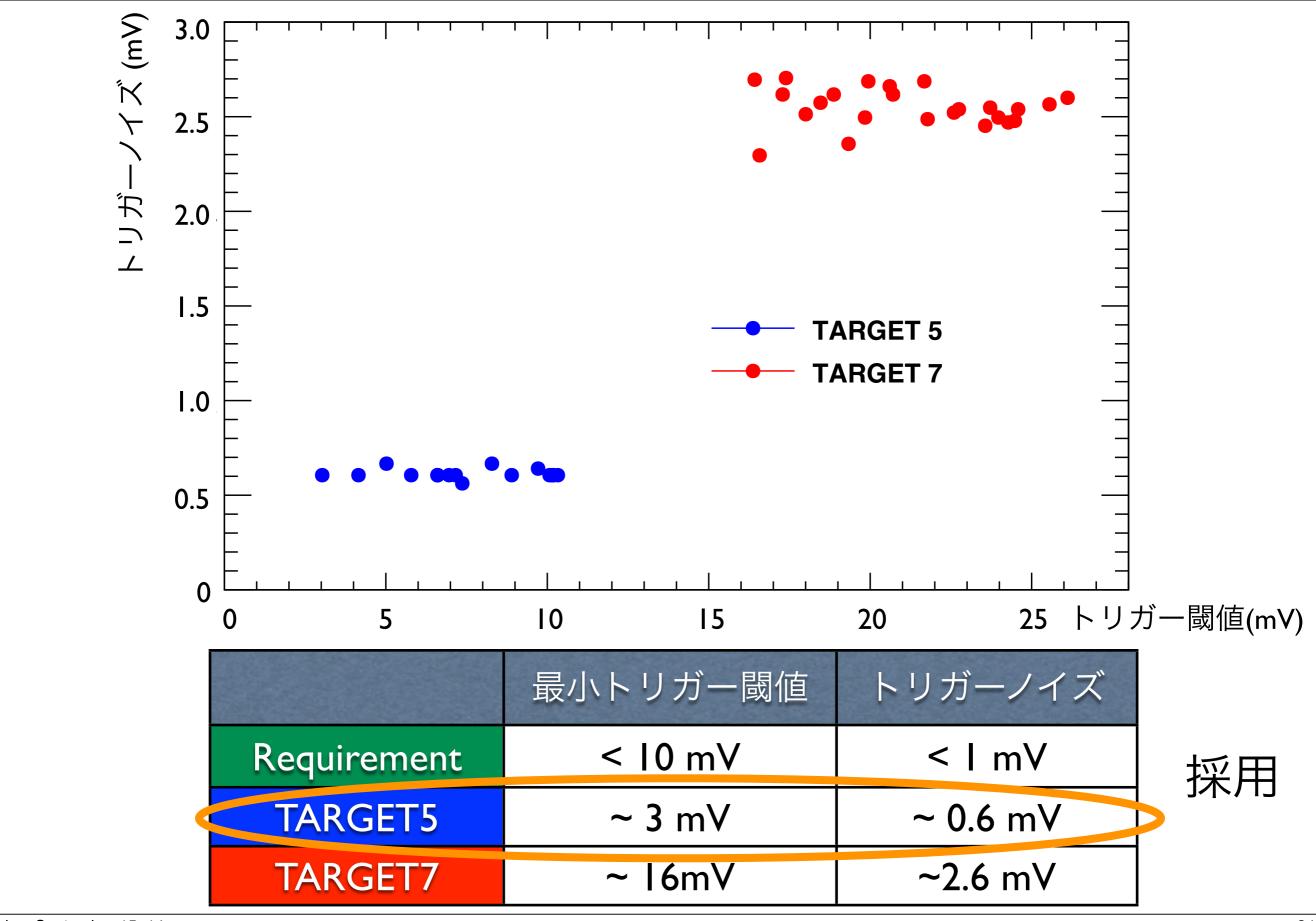
新たなASIC の開発に向けて

- TARGET 7 のように、トリガー回路をメタルで覆う手法ではサンプリング回路の干渉を防ぐことができなかった
 - → サンプリング回路とは独立した新たなトリガー用集積回路を開発 する
- TARGET をベースにしたトリガー用集積回路を作るため、サンプリング機能をオフにし、サンプリングノイズに影響されていない状態の TARGET のトリガー性能を測定する
- TARGET 5 と TARGET 7 で性能を比較し、要求を満たしていれば採用する (TARGET 5 と TARGET 7 ではアンプの構造が少し違う)

サンプリングオフ時のトリガー性能比較



サンプリングオフ時のトリガー性能比較



まとめ、今後

- TARGET 7 のトリガー性能を測定した
- 最小トリガー閾値 55 mV、トリガーノイズ 16 mV
- サンプリング回路がトリガー回路に干渉している
 - →トリガー用集積回路を独立に開発する
- TARGET 5 と TARGET 7 でサンプリング機能をオフにしたときのトリガー性能を測定し、トリガー用集積回路の構造として TARGET 5 のものを採用
 - 最小トリガー閾値~3 mV (目標: < 10 mV)
 - トリガーノイズ~0.6 mV (目標: < I mV)
- 年内にトリガー用集積回路を製造予定、その後に試験