

デジタル信号タイミング試験用BOSTの アナログFPGA実現の検討

○ 河内 智 平林 大樹 荒川 雄太 石井 正道 上森 聡史
佐藤 幸志 小林 春夫 志水 勲 高井 伸和 新津 葵一

群馬大学

光サイエンス

名古屋大学

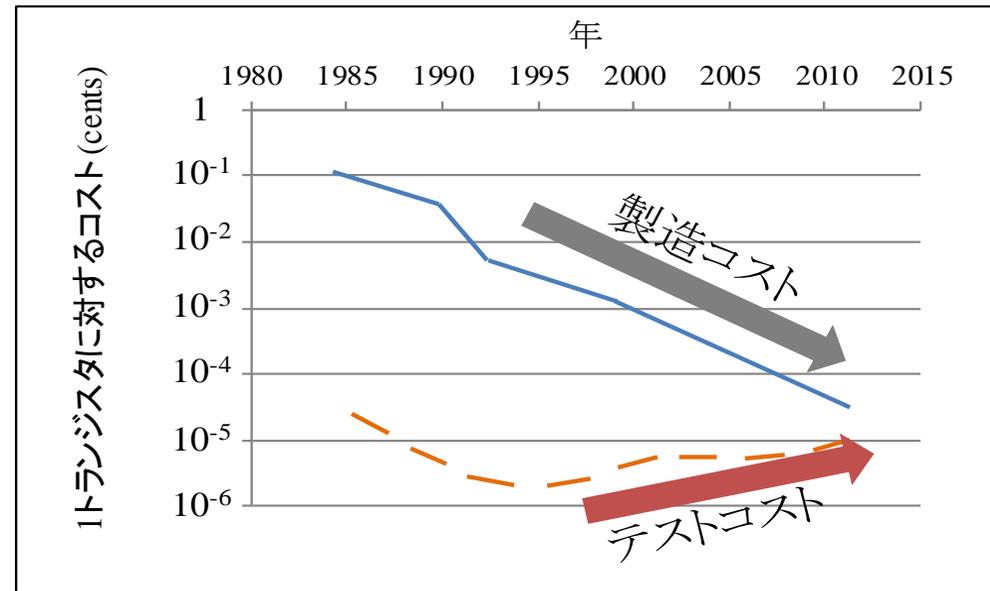
Supported by STARC

- 研究背景・目的
- ΣΔTDCの構成・動作
- PSoCでの設計と評価
- 自己校正手法
- まとめ・今後の課題

- **研究背景・目的**
- ΣΔTDCの構成・動作
- PSoCでの設計と評価
- 自己校正手法
- まとめ・今後の課題

研究背景

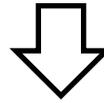
- 半導体製造コスト：減少
- テストコスト：増加
- 要求事項
 - 低コストテスト
 - 高テスト品質



高速デジタルインターフェース回路のテストに注目！

研究目的

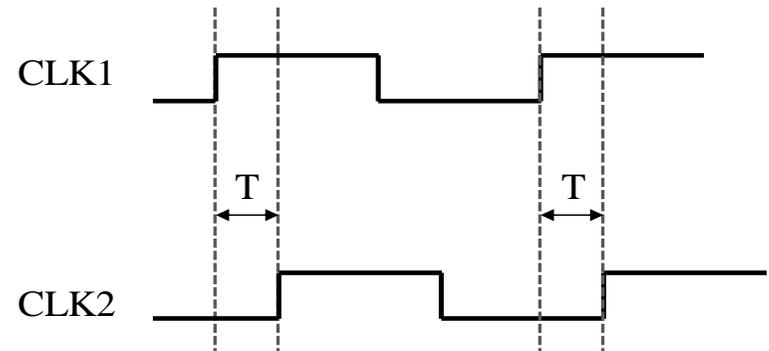
チップ外テスト容易化回路 (BOST : Built-Out Self Test) と廉価テスト



低コスト・高品質テスト

2つの繰返しクロック間の時間差テスト

- DDR(Double Data Rate)メモリのデータ - クロック間の時間差テスト等



$\Sigma\Delta$ TDCを利用したBOST

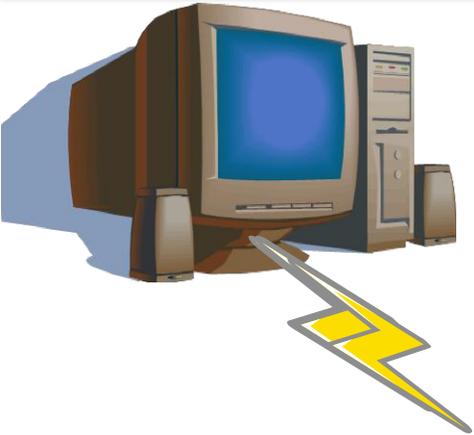
BOSTをPSoCで実現

PSoC : Programmable System-on-Chip
(アナログFPGA, サイプレス社)

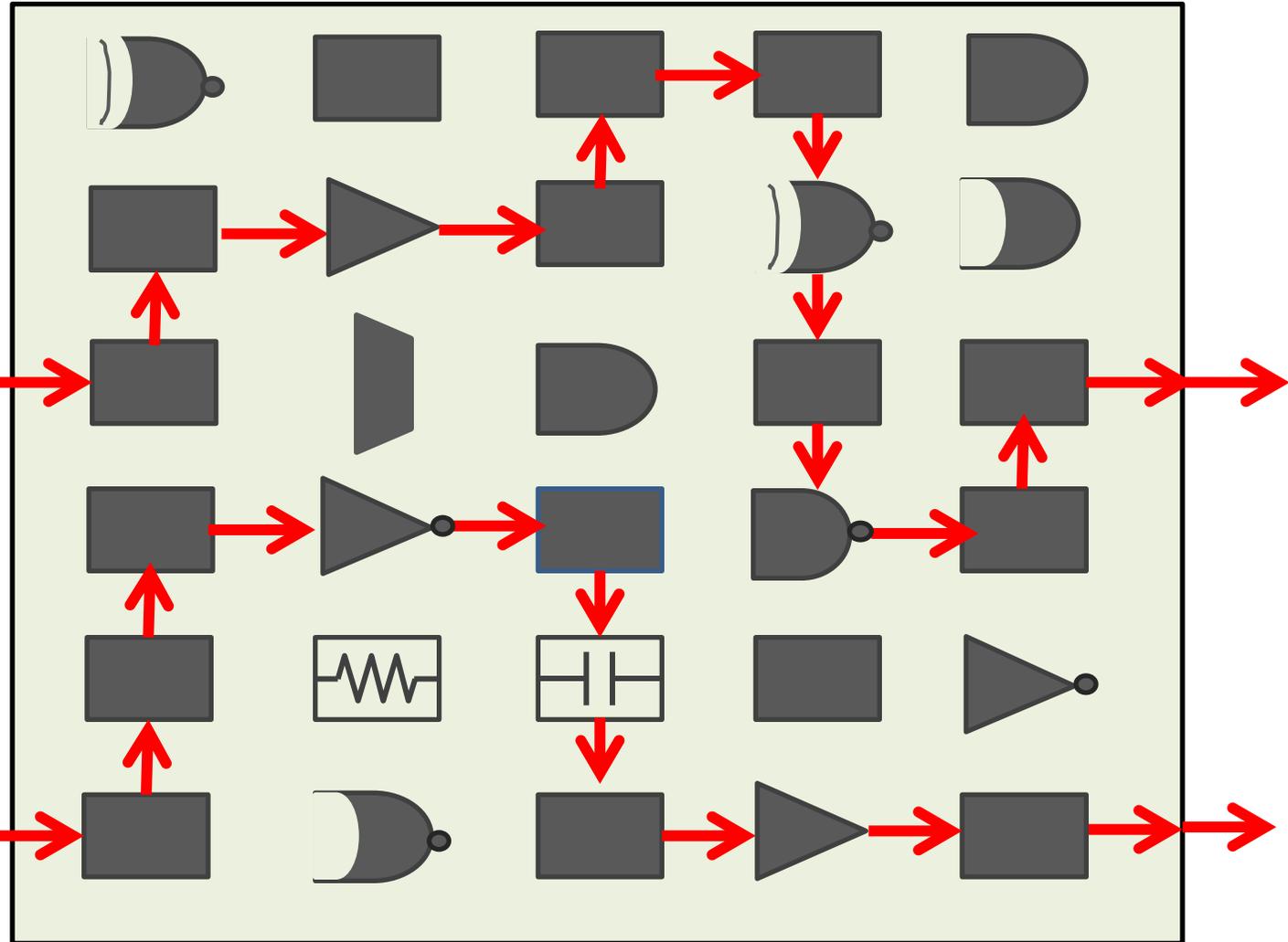


光陰
矢のごとし!

アナログFPGAとは？



FPGA: Field-Programmable Gate Array



アナログ・デジタル混載回路を自由に設計可能

PSoCで実現する利点

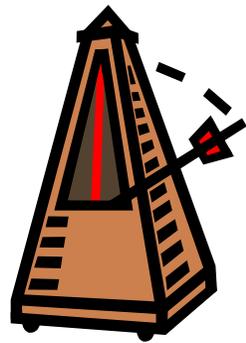
- 低コスト
- 開発期間が短い
- オンチップでデバッグ・修正が可能
- 試験結果を容易に出力可能

アウトライン

- 研究背景・目的
- **ΣΔTDCの構成・動作**
- PSoCでの設計と評価
- 自己校正手法
- まとめ・今後の課題

TDCとは

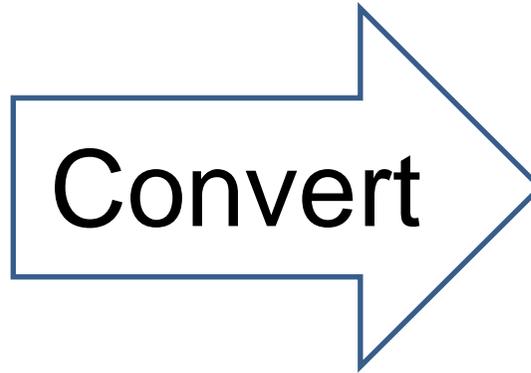
TDC : Time to Digital Converter



カチッ



カチッ



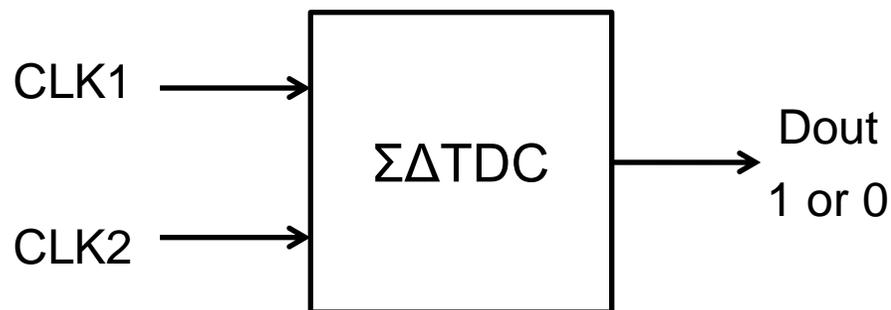
1011010...011

1 の数 \propto 時間差

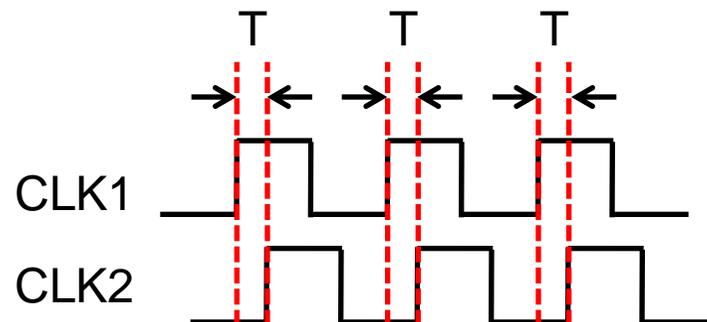
Time (時間差)

Digital

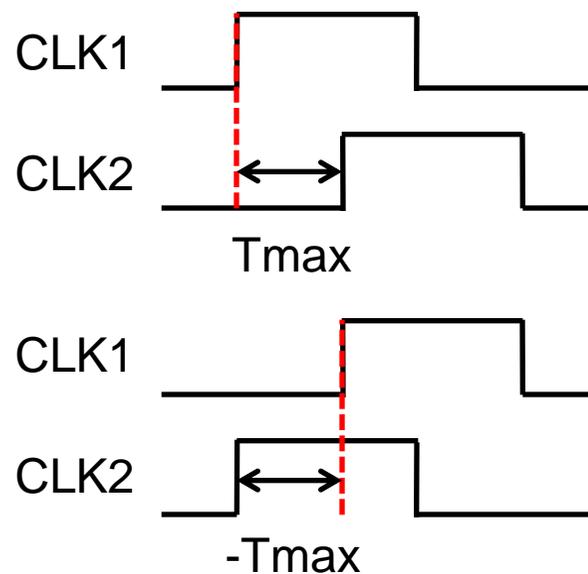
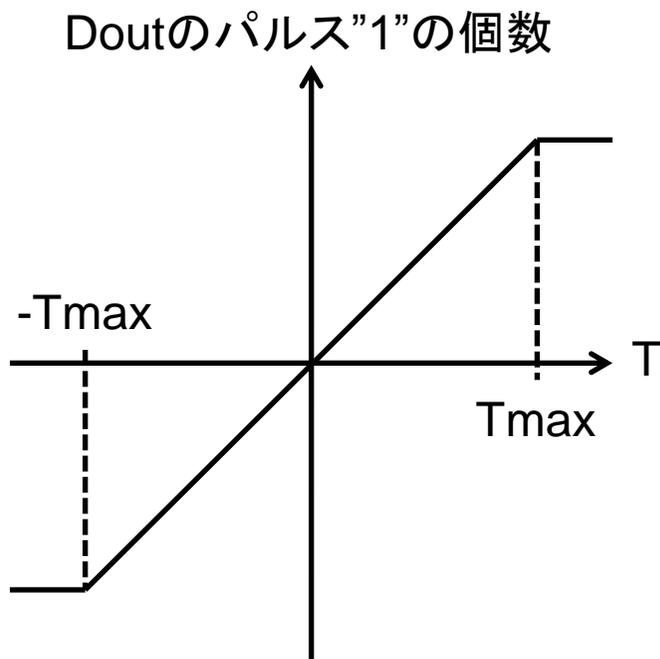
ΣΔTDCの原理



繰り返しクロックの時間差T



TがDoutのパルス"1"の個数に比例

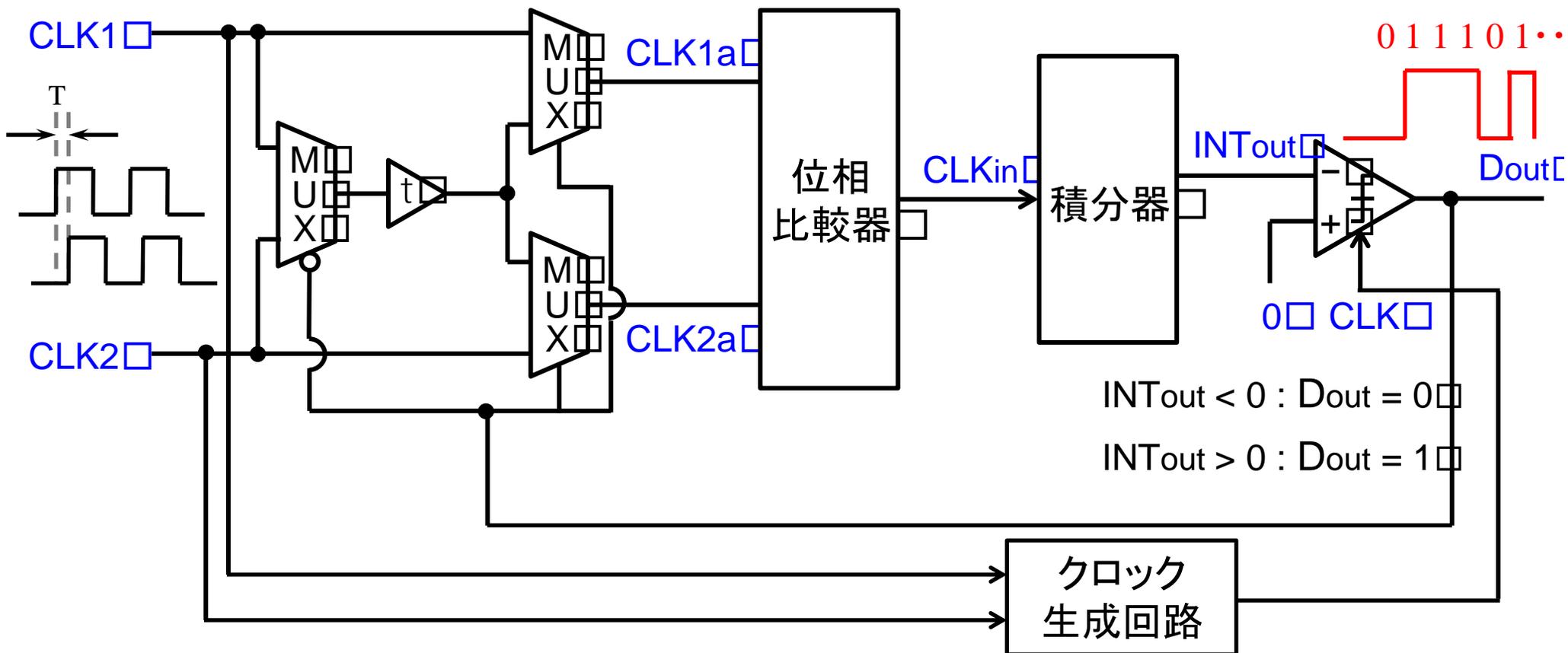


測定可能範囲 : $-T_{max} < T < T_{max}$ 10/39

$\Sigma\Delta$ TDCの特徴

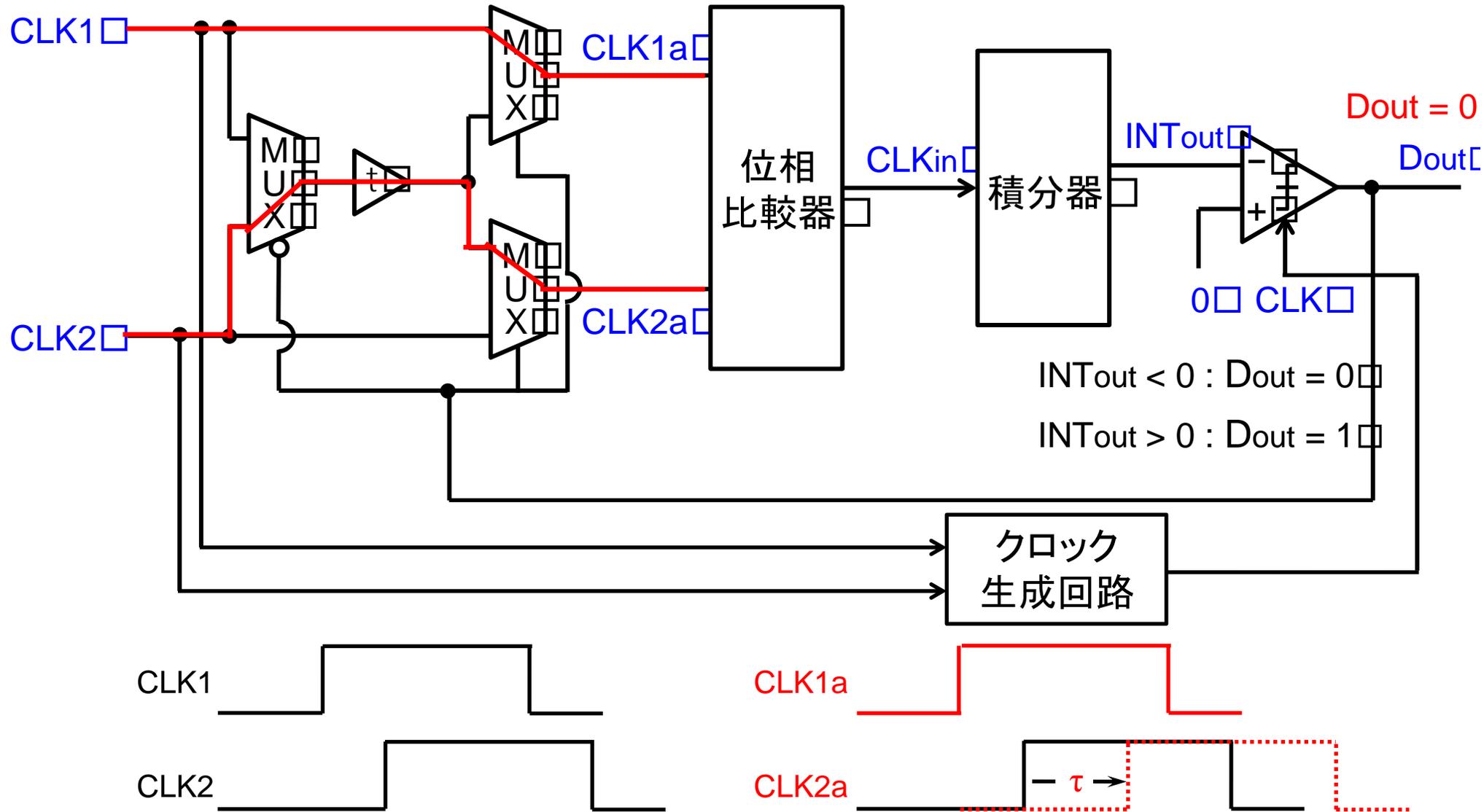
- 簡単な回路
- 高線形性
- 繰り返しクロック間タイミングテストに適用
- 測定時間:長 → 時間分解能:細

ΣΔTDCの構成



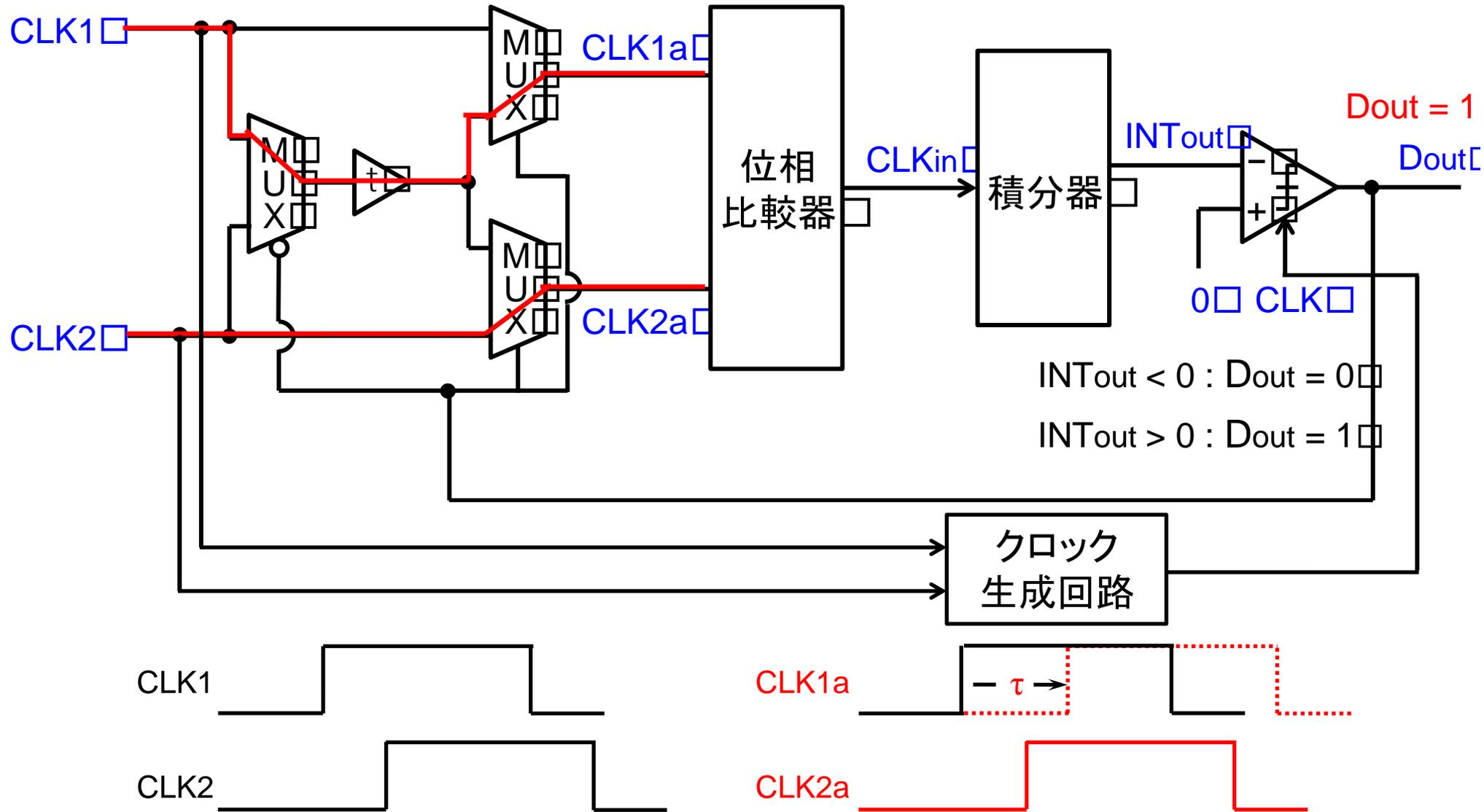
- T がDoutのパルス”1”の個数に比例
- 測定可能範囲 : $-T_{max} < T < T_{max} \Rightarrow -\tau < T < \tau$

ΣΔTDCの動作



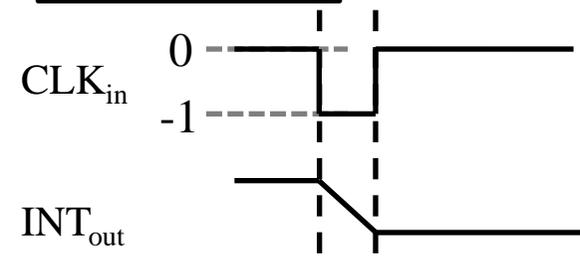
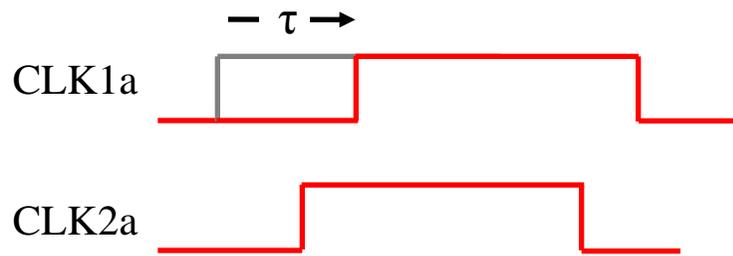
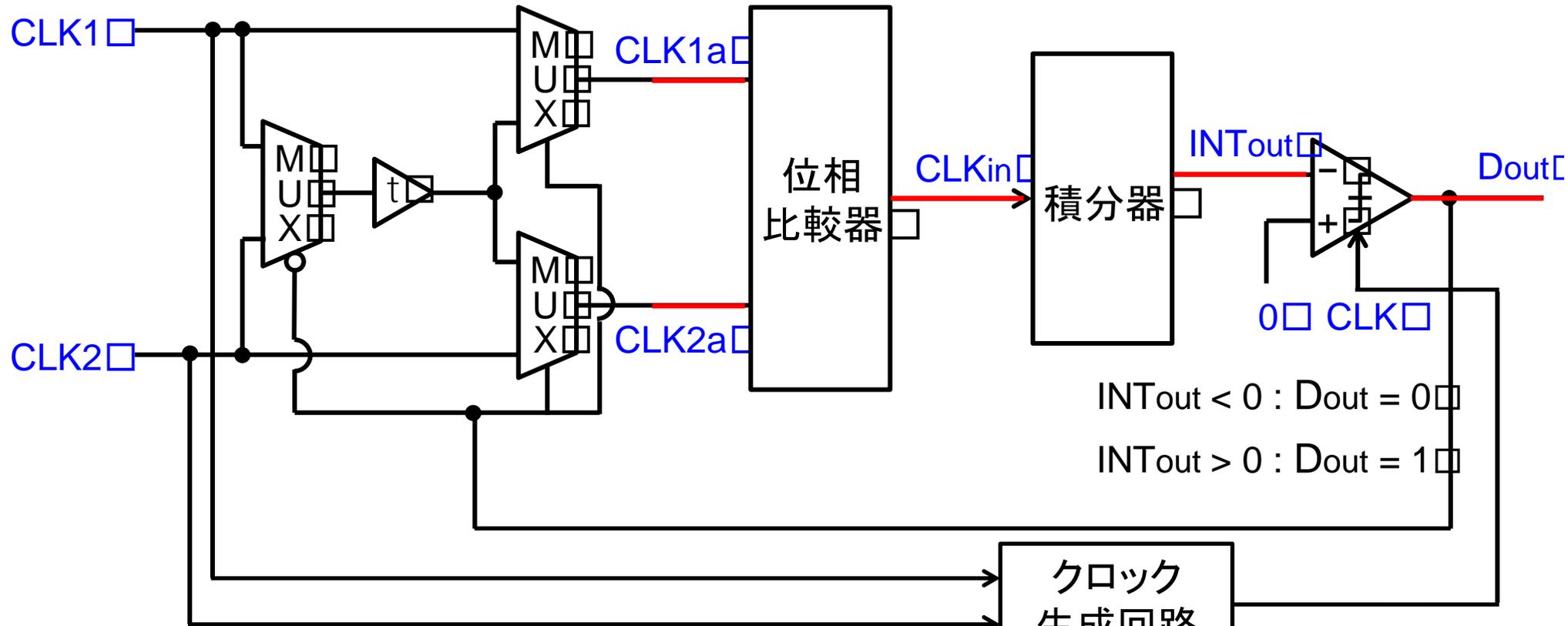
- CLK1とCLK2を入力
- 比較器出力により経路選択 → CLK1a, CLK2aを得る

ΣΔTDCの動作



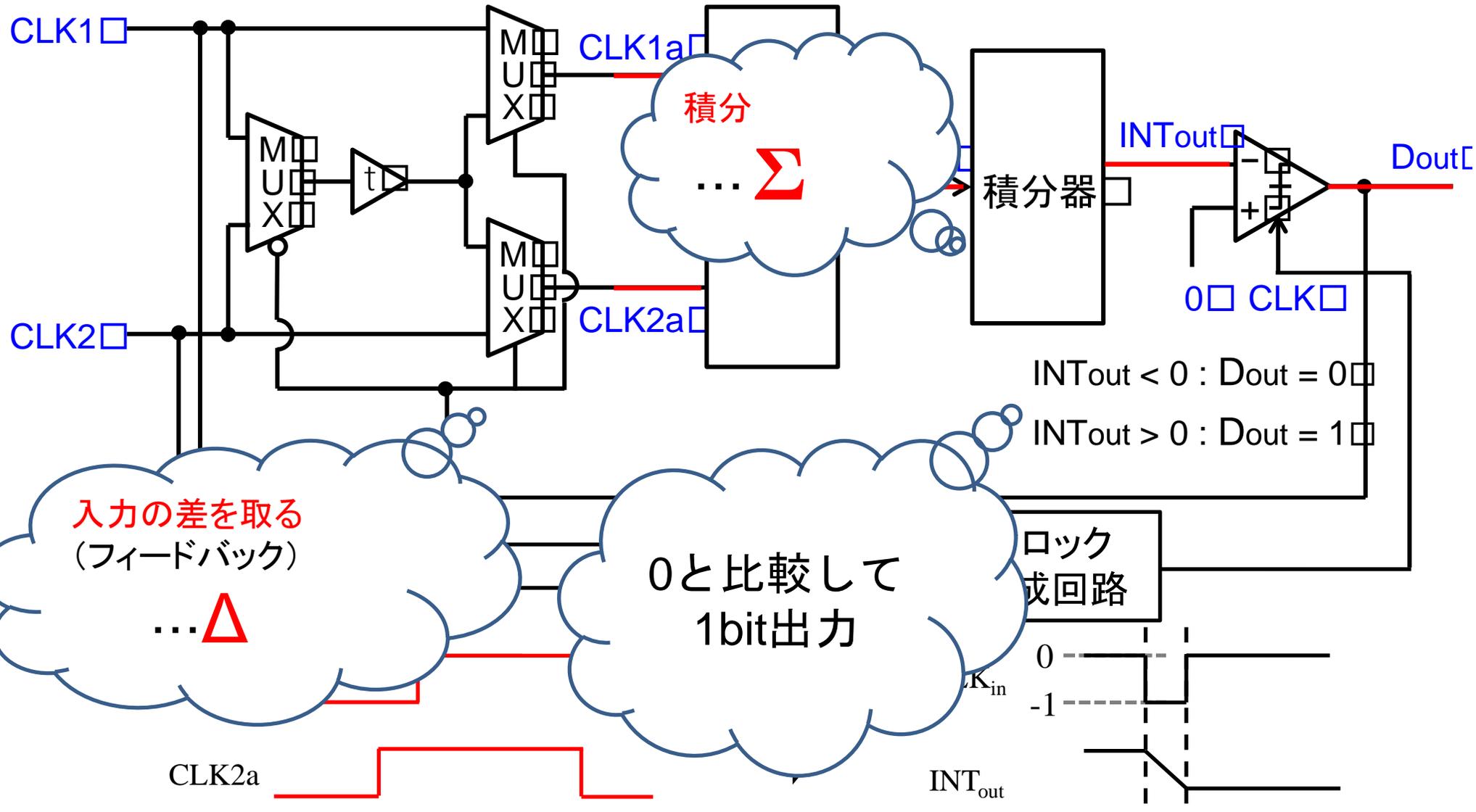
- CLK1とCLK2を入力
- 比較器出力により経路選択 → CLK1a, CLK2aを得る

ΣΔTDCの動作



- 位相差 CLK_{in} を出力
- 比較器で INT_{out} を 0 と比較し、出力 D_{out} を得る → 次のクロックでの経路を制御

ΣΔTDCの動作



入力の差を取る
(フィードバック)

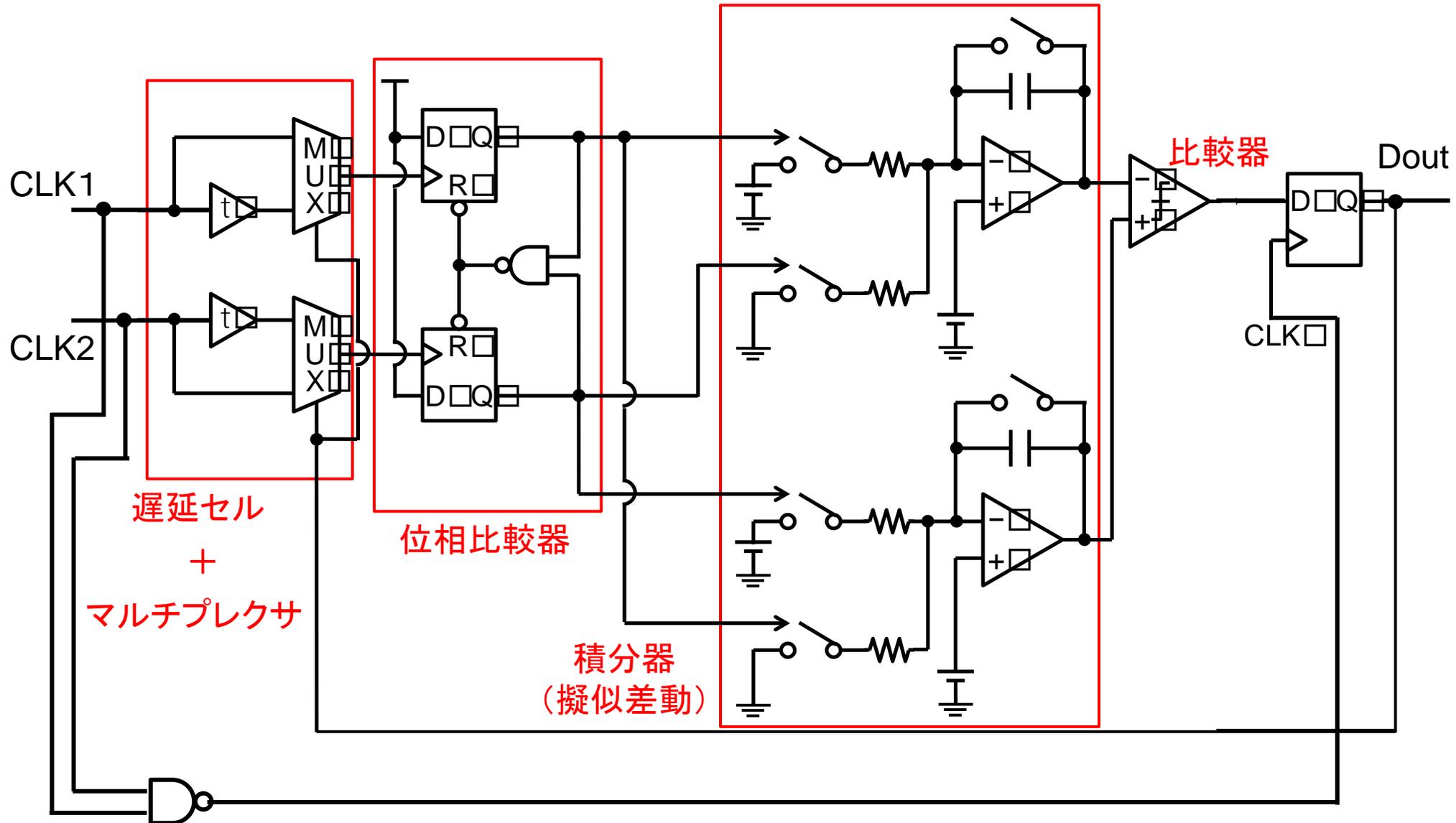
... Δ

0と比較して
1bit出力

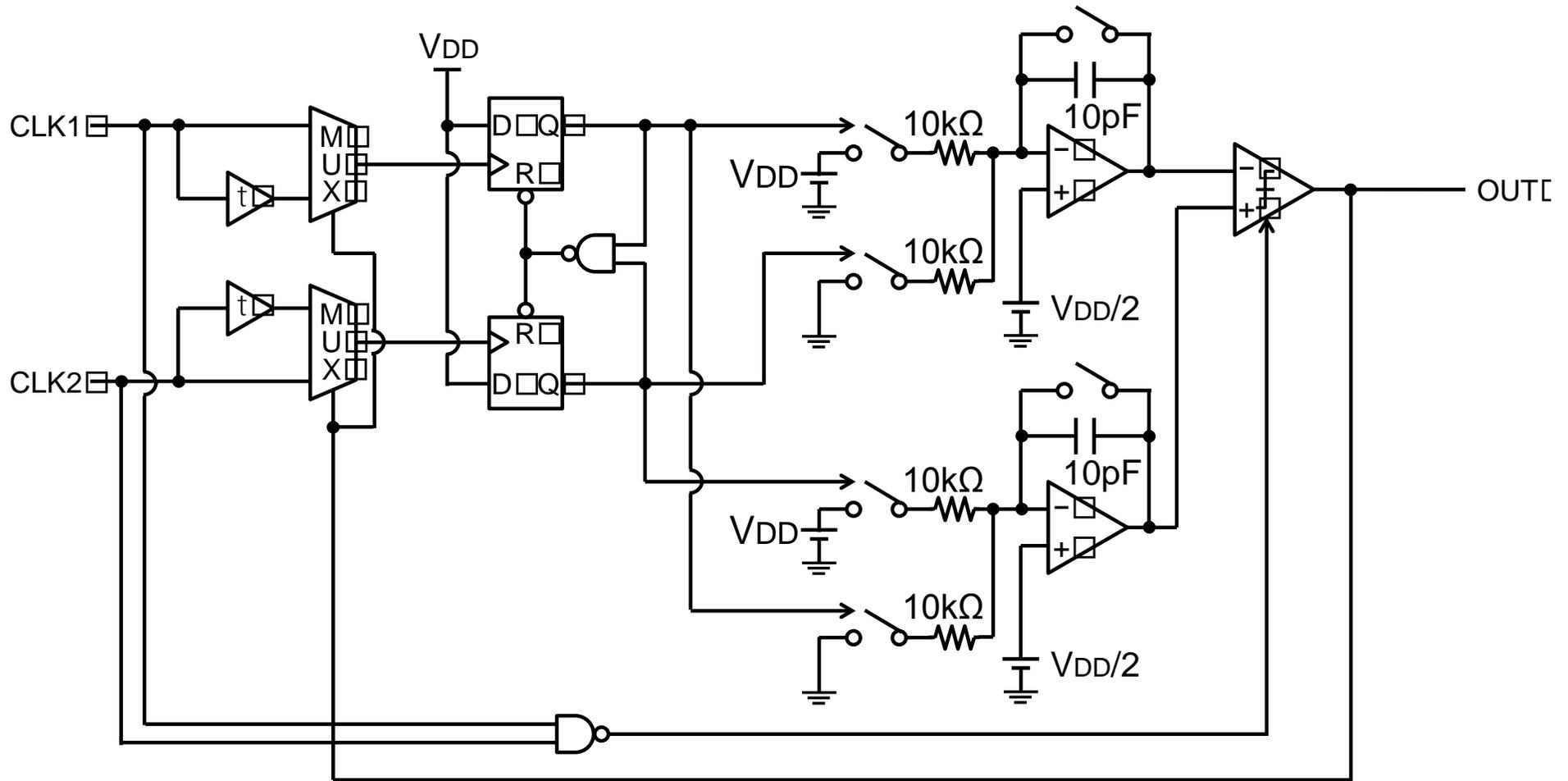
INTout < 0 : Dout = 0
INTout > 0 : Dout = 1

- 位相差 CLK_{in} を出力
- 比較器で INT_{out} を 0 と比較し、出力 D_{out} を得る → 次のクロックでの経路を制御

設計した $\Sigma\Delta$ TDC回路



シミュレーションによる動作の確認



シミュレーション条件

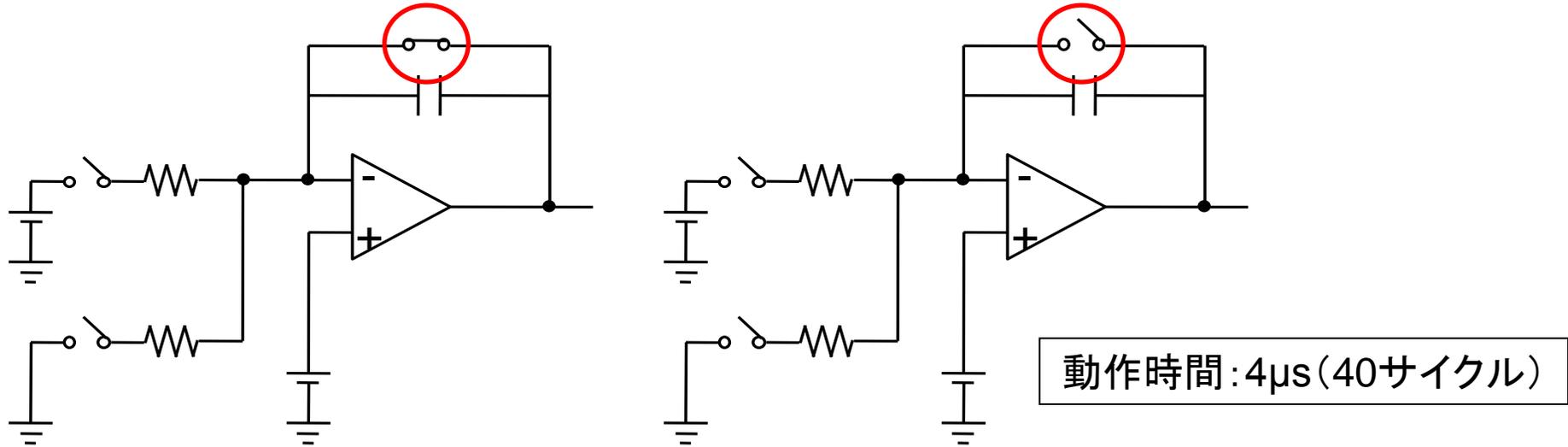
| 遅延 τ | 周波数 | 電源電圧 |
|-----------|-------|------|
| 1ns | 10MHz | 1.8V |

spectreで設計
(TSMC 0.18 μ m CMOSプロセス)

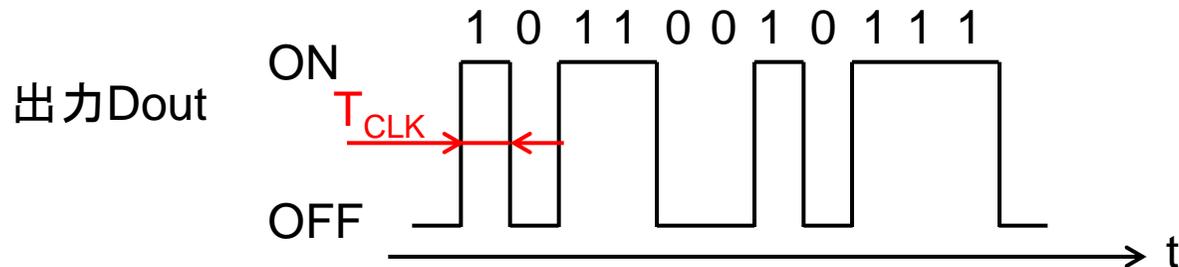
シミュレーションによる確認

初期条件

- キャパシタの両端を短絡し、キャパシタの電荷を放電

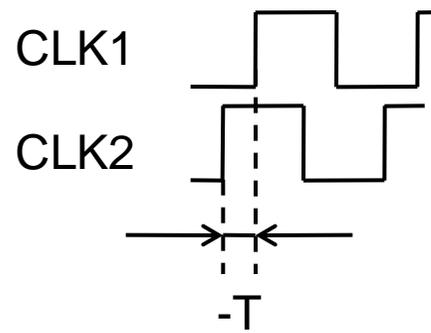
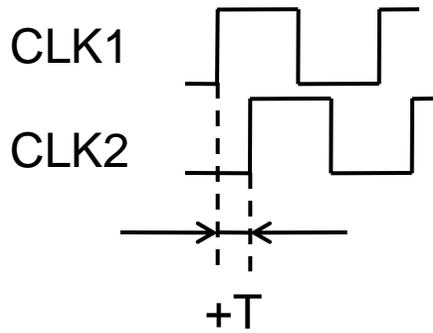


1のパルスの数え方



パルス数合計: 7

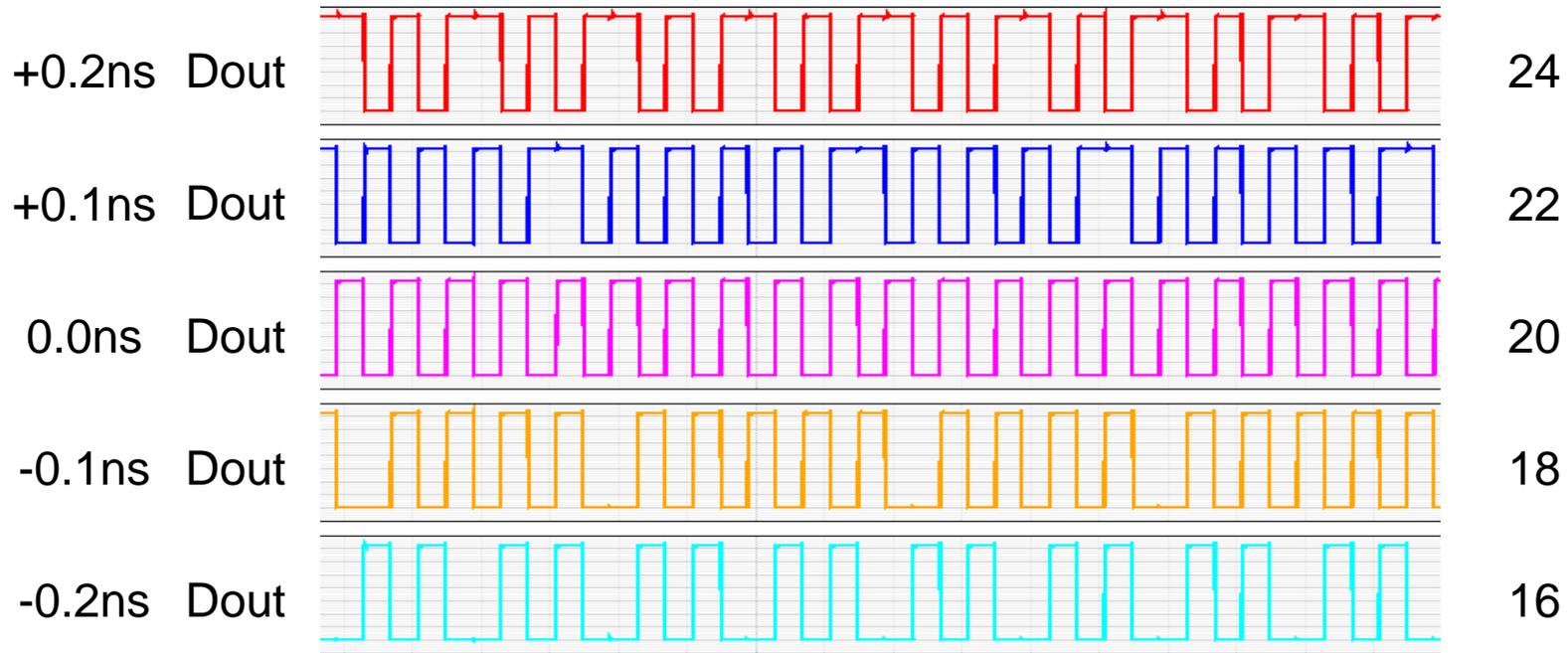
シミュレーション結果



動作 : 40サイクル

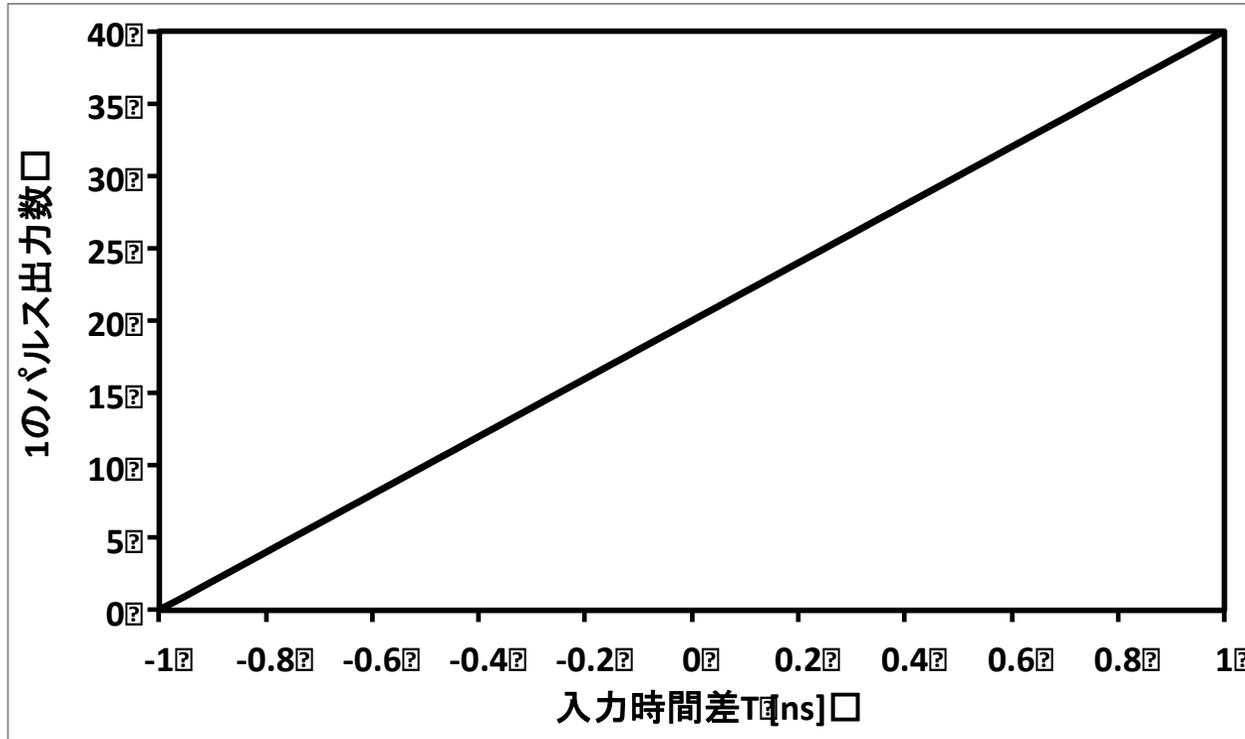
時間差T

1のパルス数



時間差に比例してパルス数に変化

シミュレーション結果まとめ

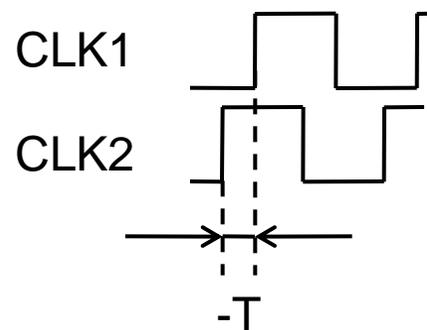
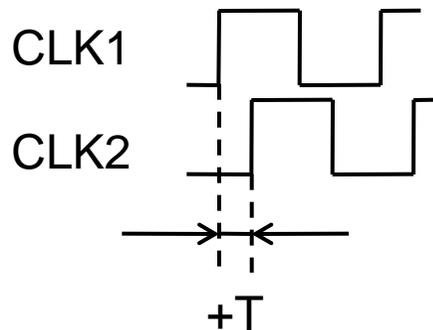


動作 : 40サイクル

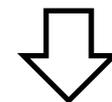
時間差が0.05ns変化すると
パルス数が1変化



分解能50ps
(τ は1ns)



測定時間の増加

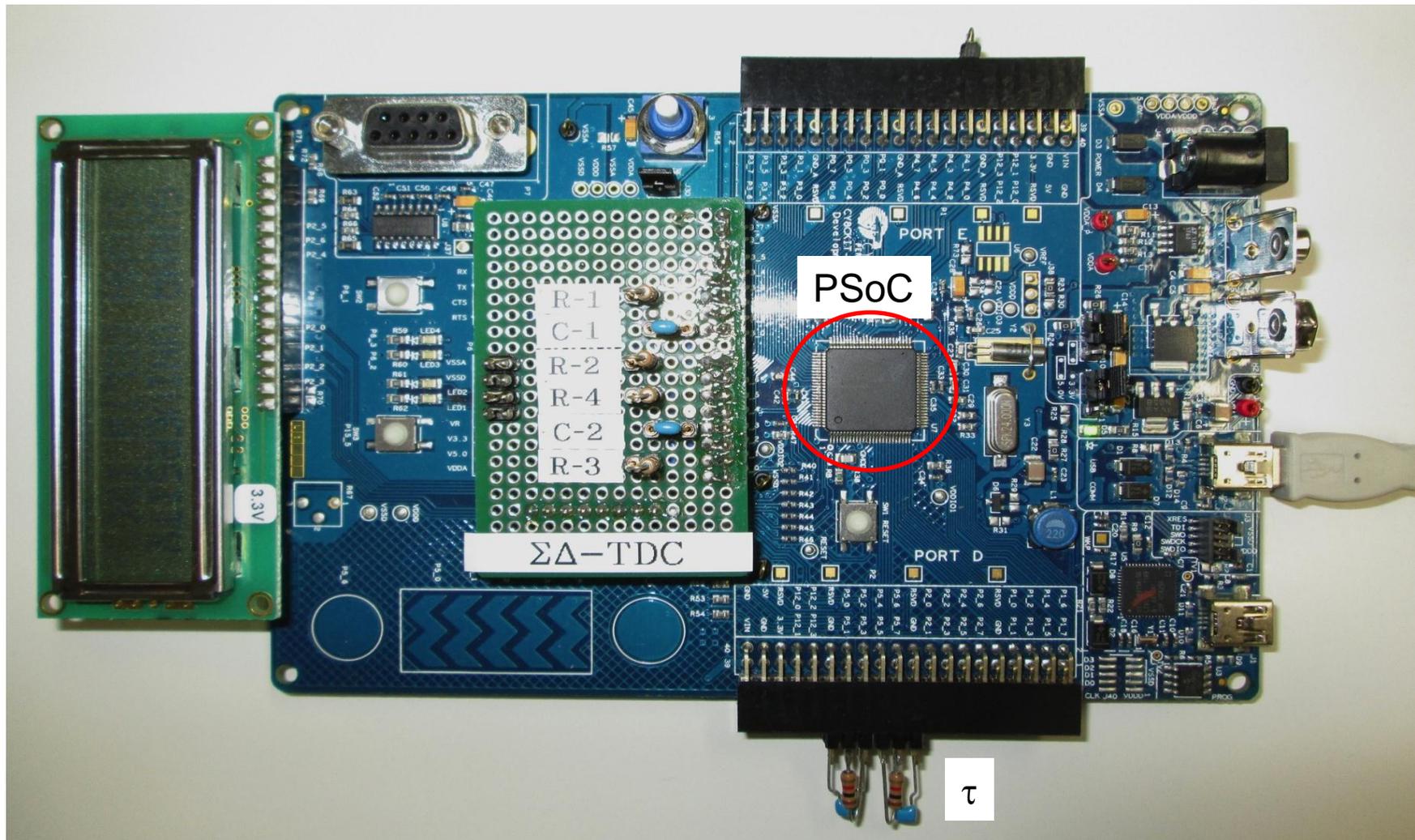


分解能の向上

アウトライン

- 研究背景・目的
- ΣΔTDCの構成・動作
- **PSoCでの設計と評価**
- 自己校正手法
- まとめ・今後の課題

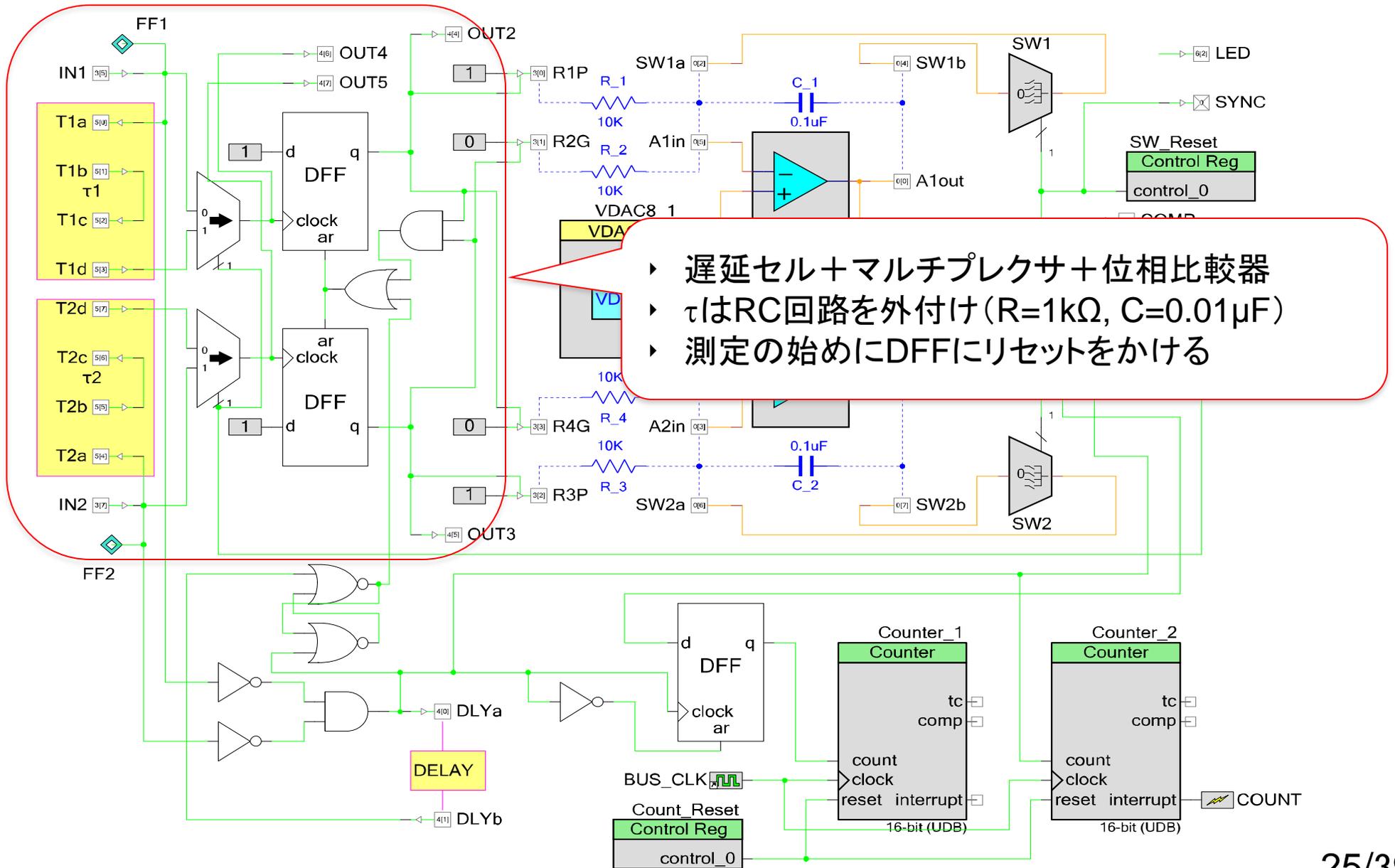
$\Sigma\Delta$ TDCを実装したPSoC



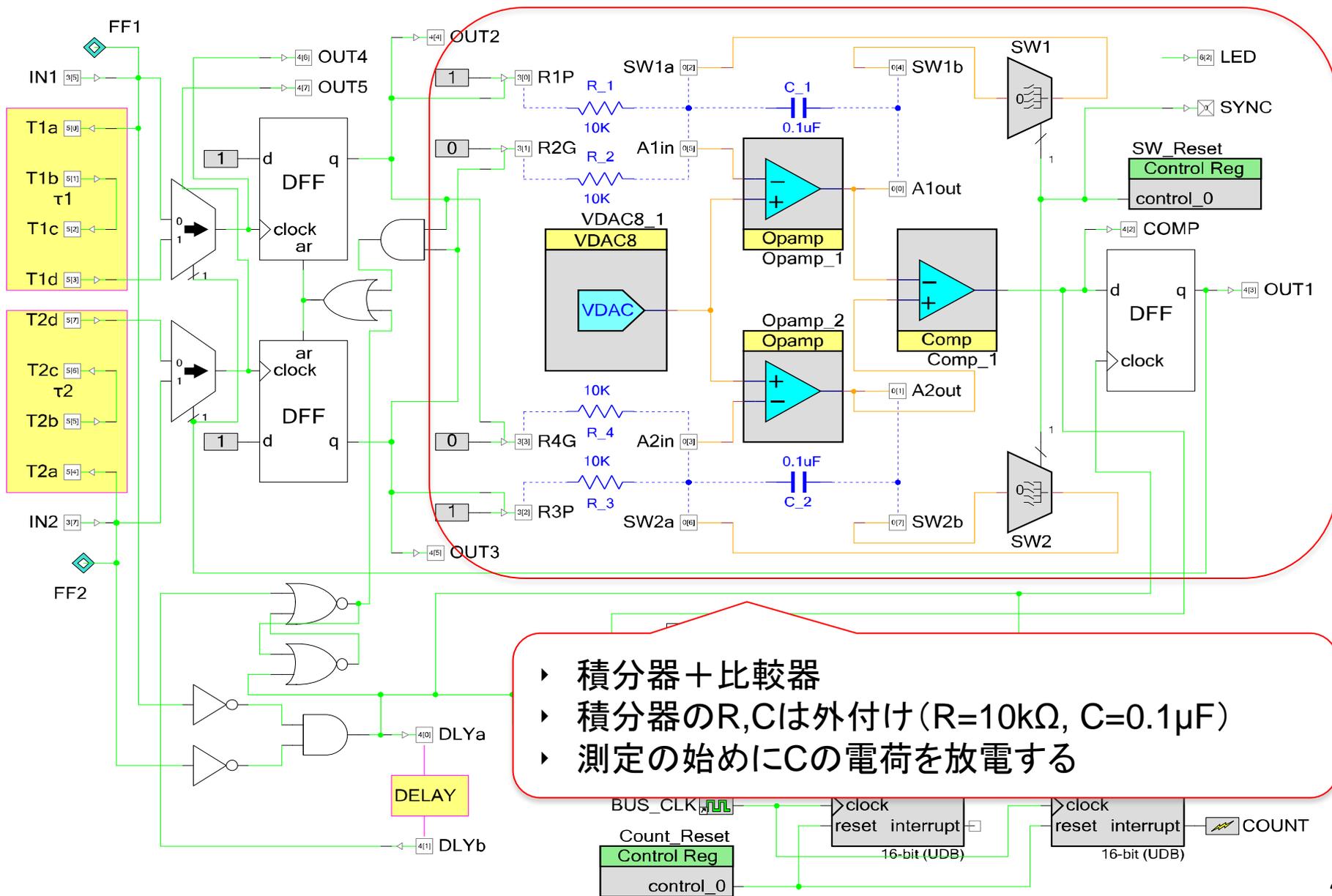
ΣΔTDC全体の写真

PSoC : アナログFPGA, サイプレス社

設計したΣΔTDC

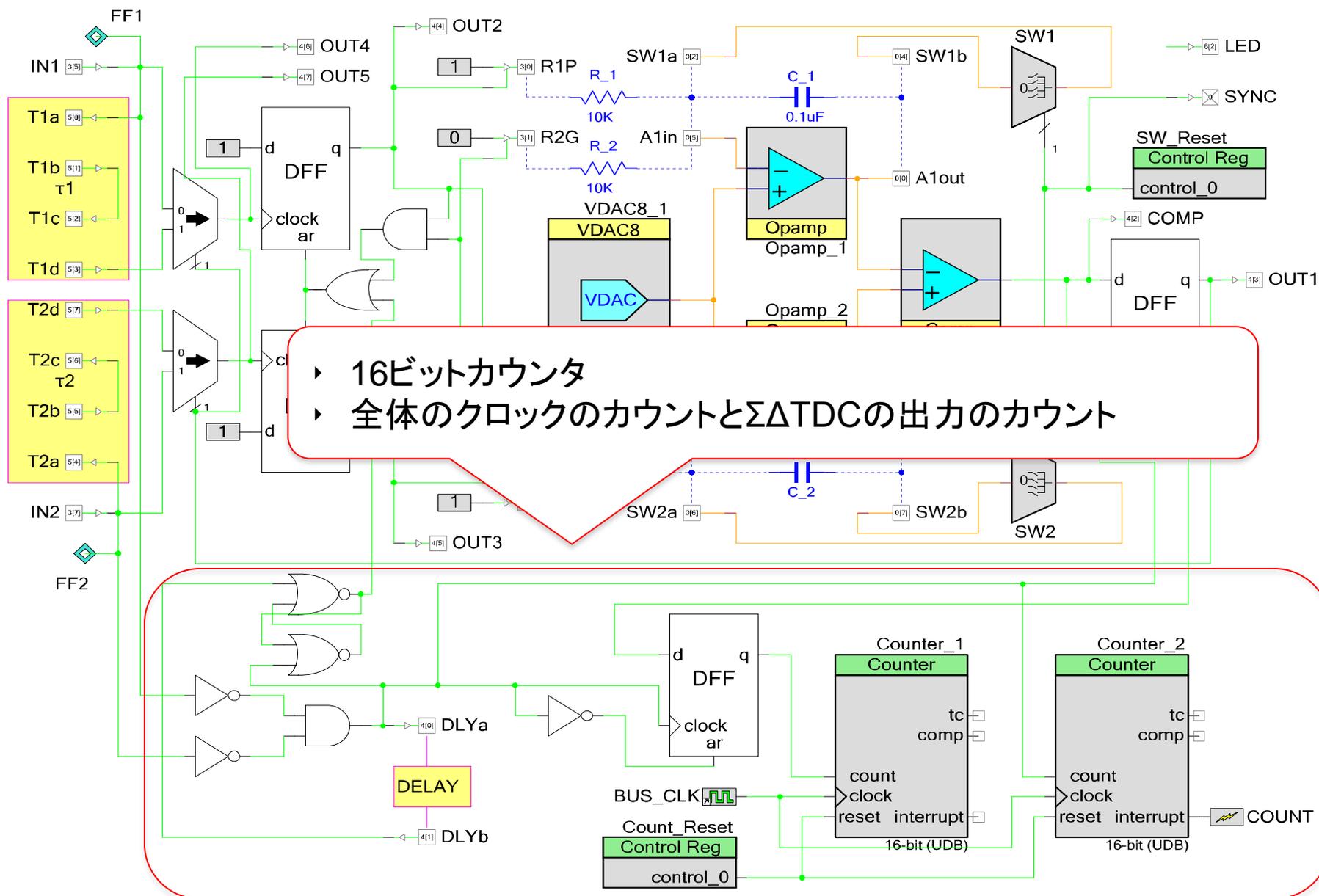


設計したΣΔTDC



- ▶ 積分器＋比較器
- ▶ 積分器のR,Cは外付け (R=10kΩ, C=0.1μF)
- ▶ 測定の始めにCの電荷を放電する

設計した $\Sigma\Delta$ TDC



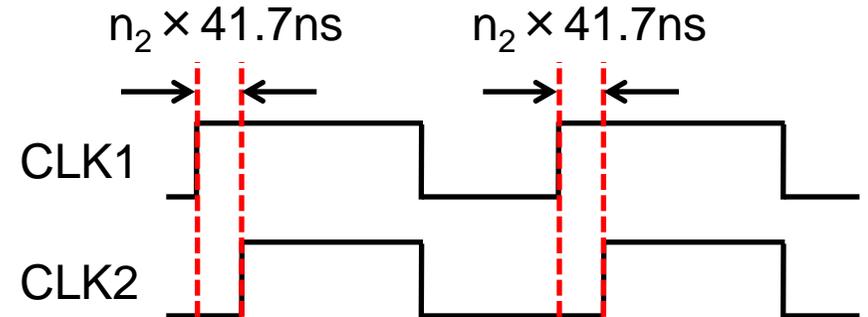
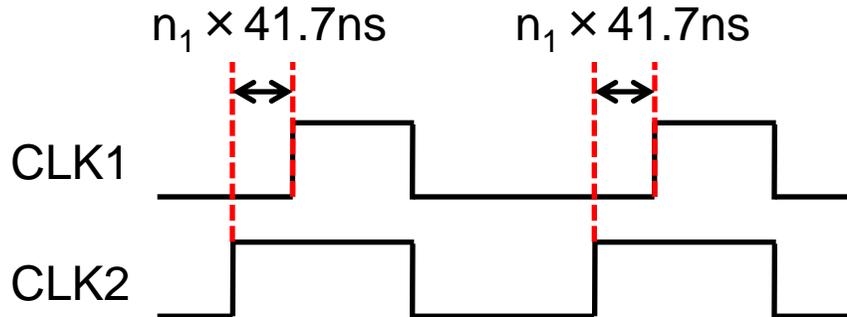
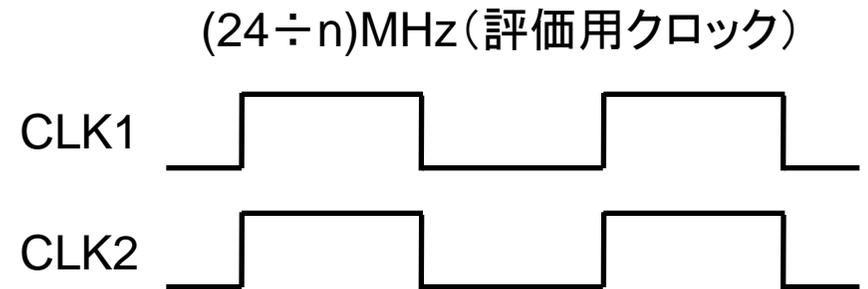
CLK1,CLK2の生成

PSoC内部で24MHzの基準クロックを生成

プログラムによる基準クロックの操作

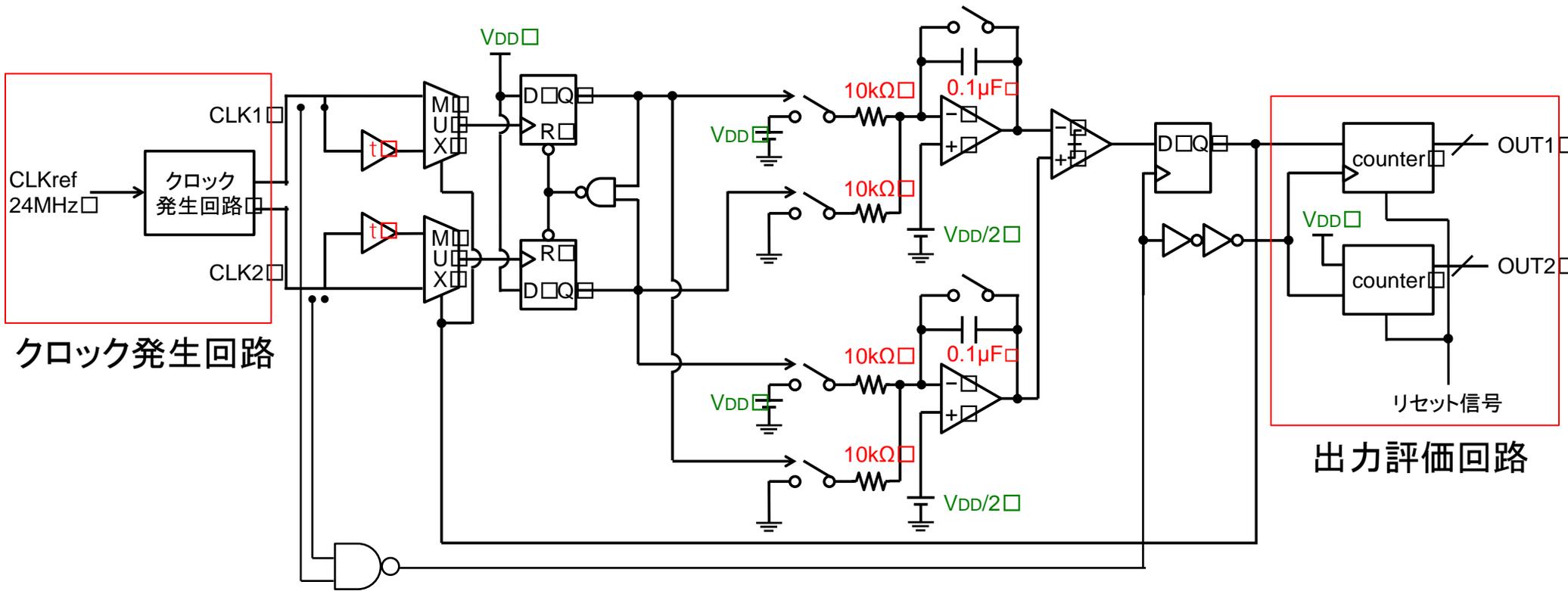
- ・ 基準クロック周波数を $\div n$ 分周
- ・ $n \times 41.7\text{ns}$ 倍の時間差

正確な周波数・時間差のクロックを生成可能



評価用・自己校正用に使用可能

設計したPSoC $\Sigma\Delta$ TDC測定条件

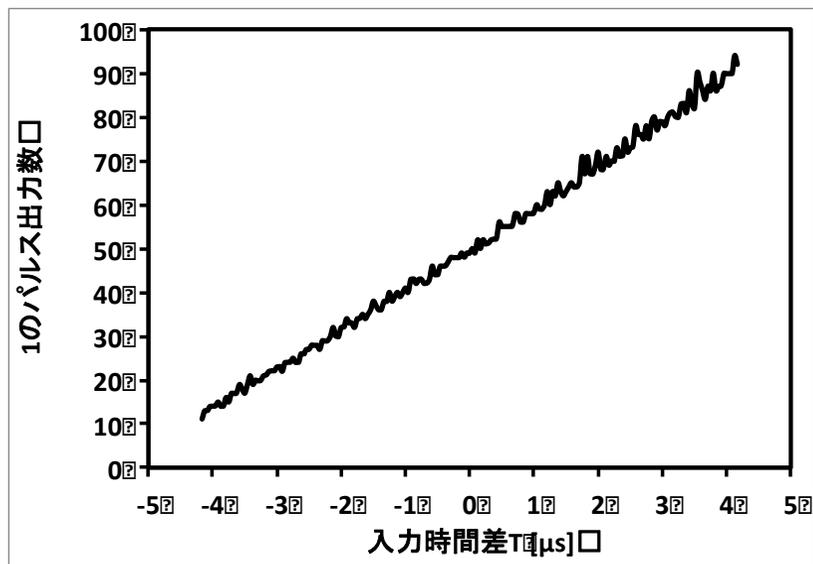


測定条件

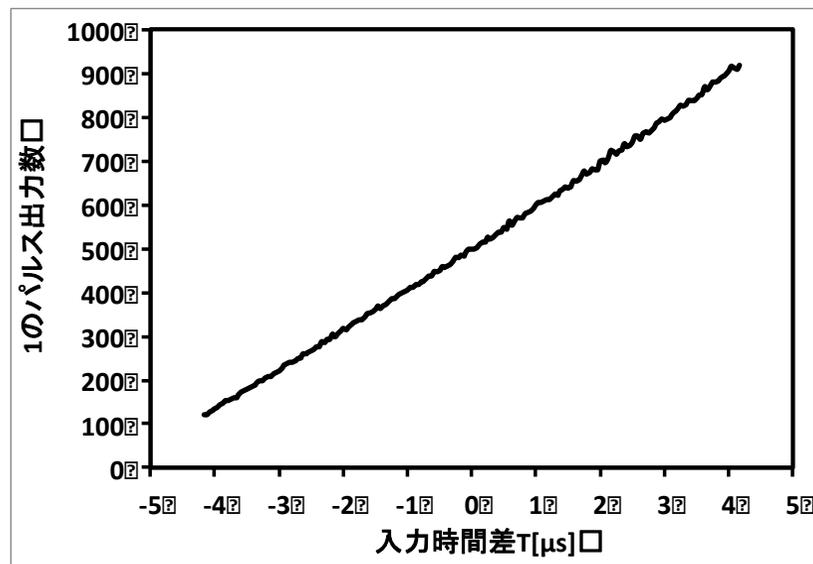
| | |
|---------------|---|
| 電源電圧 V_{DD} | 3.3V |
| 遅延素子 τ | 約 $5\mu\text{s}$ |
| 入力時間差 T | $-4.17\mu\text{s} < T < 4.17\mu\text{s}$ 41.7ns刻みで変化 |
| 入力周波数 | 20kHz |

PSoC $\Sigma\Delta$ TDC測定結果

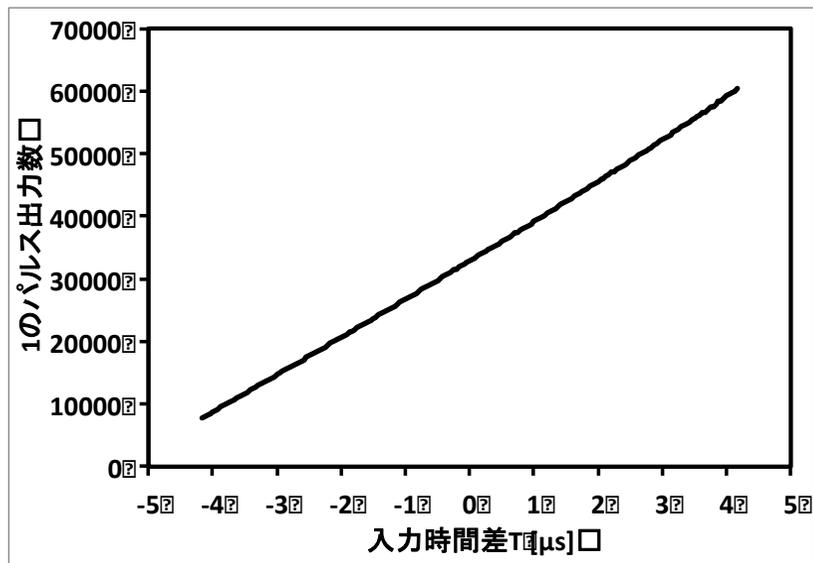
測定サイクル:100



測定サイクル:1000



測定サイクル:65535



時間差に比例して出力数が増加

出力数を増やすと線形性が改善されている



誤差を確認

誤差の計算方法

最小二乗法を用いて線形近似直線を求め、線形近似直線との誤差を計算

$$gain = \frac{N \times K_4 - K_1 \times K_2}{N \times K_3 - K_1^2}$$

$$offset = \frac{K_2}{N} - gain \times \frac{K_1}{N}$$

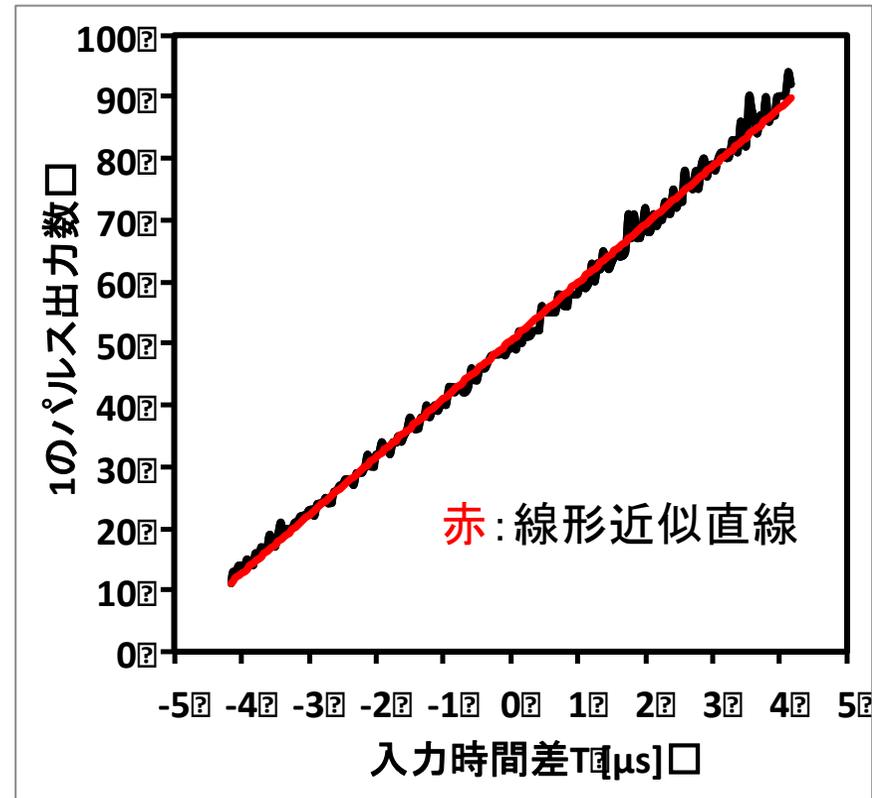
$$K_1 = \sum_{i=0}^{N-1} i \quad K_2 = \sum_{i=0}^{N-1} S(i)$$

$$K_3 = \sum_{i=0}^{N-1} i^2 \quad K_4 = \sum_{i=0}^{N-1} i \times S(i)$$

N: データ数(201)

i: 入力時間差

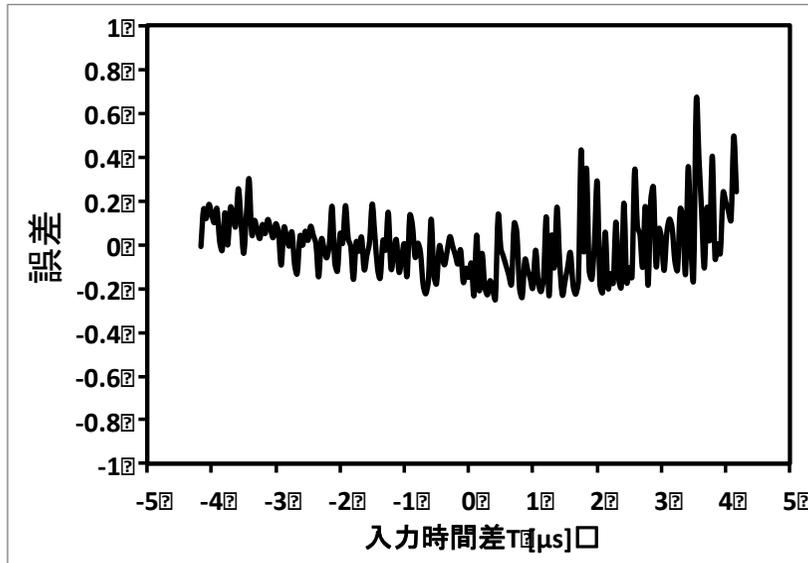
S(i): 出力数



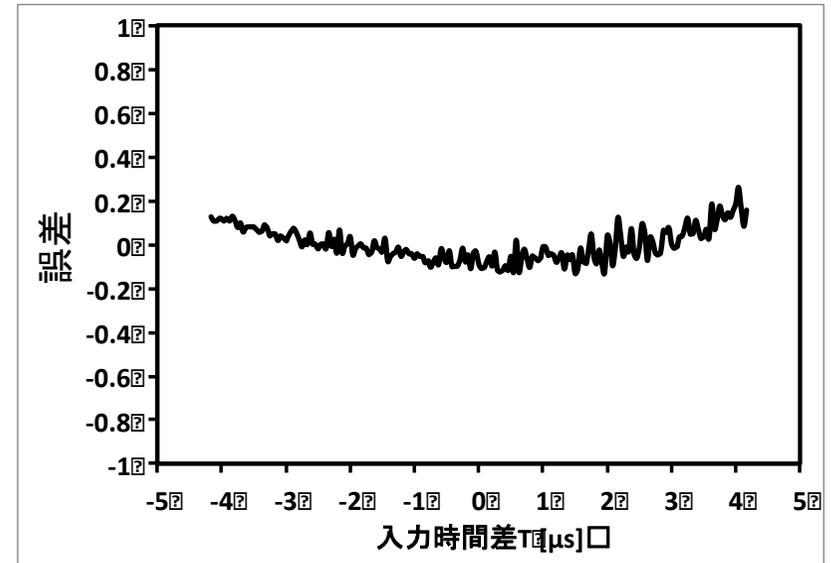
$$誤差 = \frac{S(i) - (gain \times i + offset)}{gain}$$

誤差計算結果

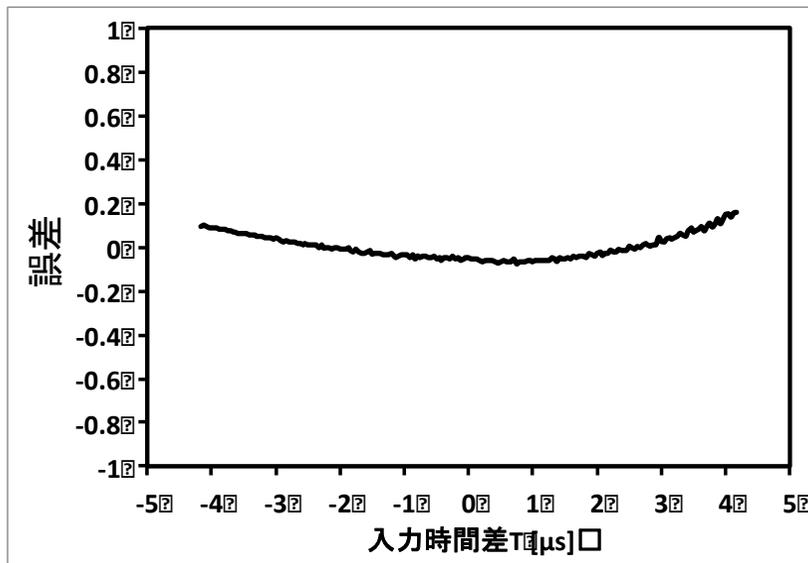
測定サイクル:100



測定サイクル:1000

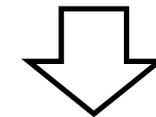


測定サイクル:65535



測定サイクルの増加による線形性の改善を確認

測定サイクルを65535にしても10%程度の誤差



自己校正による高精度化が必要

自己校正とは？

ヤジロベエ人形（通常：静止状態）

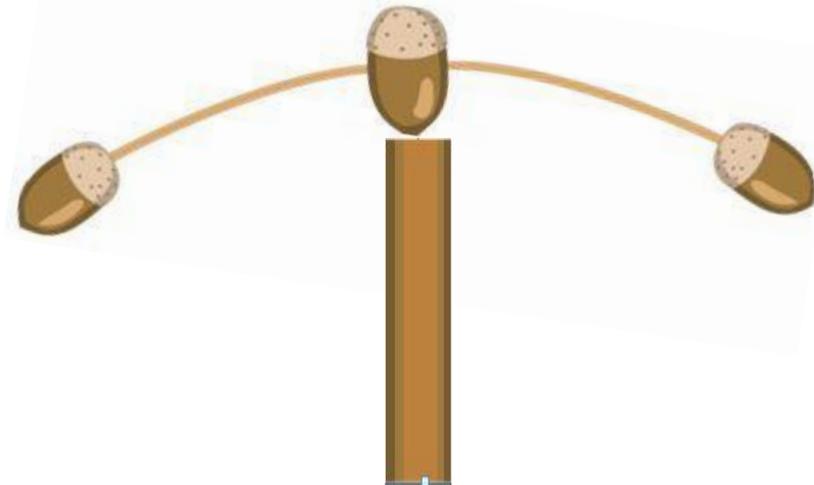
異常発生・・・左右に振れる

自己校正・・・自ら通常状態に

つまり

異常発生・・・誤差発生

自己校正・・・自ら誤差修正

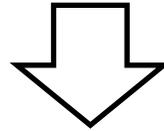


アウトライン

- 研究背景・目的
- $\Sigma\Delta$ TDCの構成・動作
- PSoCでの設計と評価
- **自己校正手法**
- まとめ・今後の課題

$\Sigma\Delta$ TDCの線形性自己校正

CLK1,CLK2の時間差を基準クロック周期の整数倍で可変



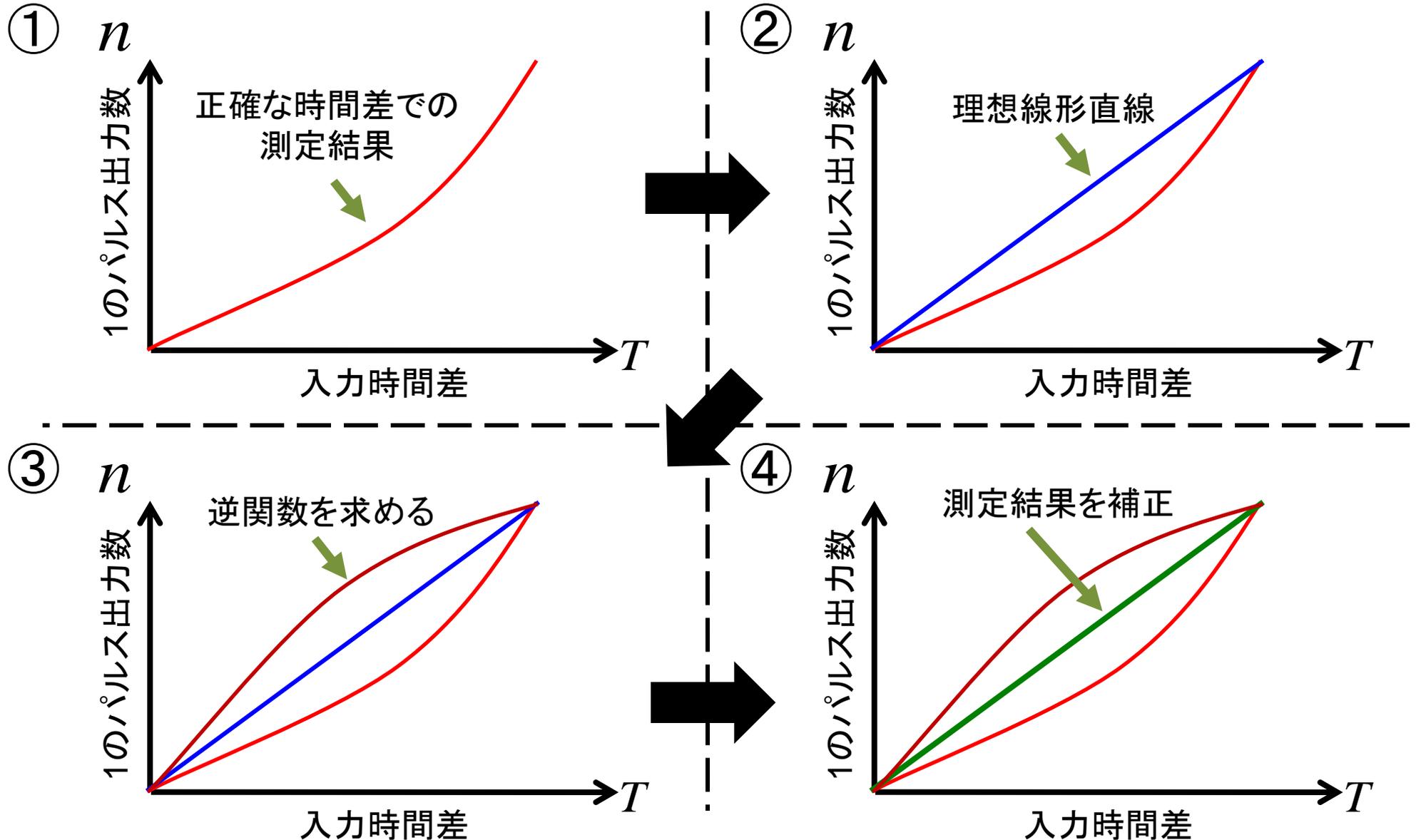
線形性の自己校正を正確に行える

自己校正のメリット

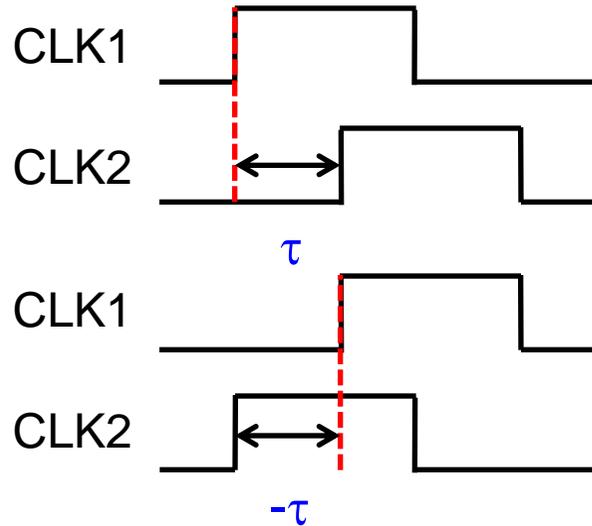
- ▶ 線形性の向上
- ▶ 測定時・テスト時の測定値の絶対値の保証

線形性自己校正手法を提案

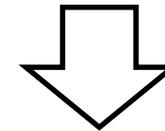
線形性自己校正



ΣΔTDCの入力範囲 τ の推定

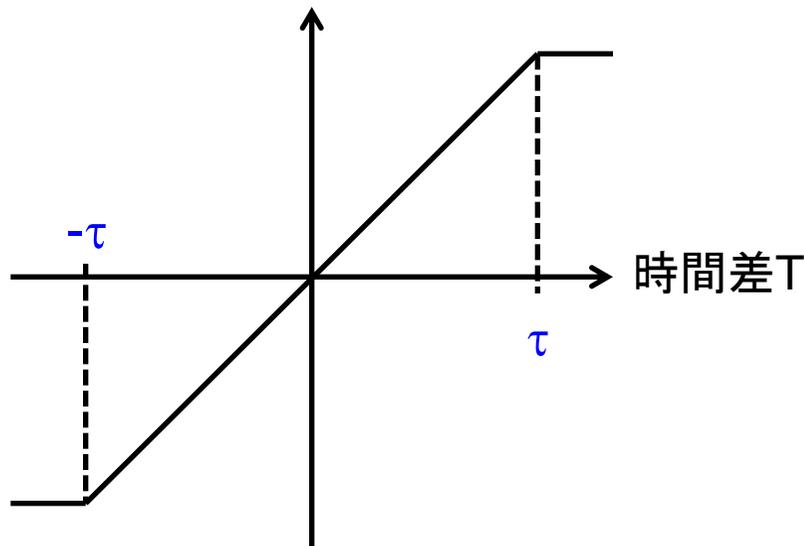


ΣΔTDCの測定可能範囲： $-\tau < T < \tau$

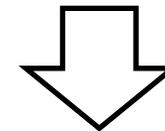


τ の変化はΣΔTDCの特性に影響を与える
分解能： $\tau/2N$ (Nは測定サイクル数)

Doutのパルス"1"の個数



入力クロックの時間差を
基準クロックの整数倍に変更可能



デジタル自己校正と共に τ は正確に推定可能

測定時の絶対値の保証

アウトライン

- 研究背景・目的
- ΣΔTDCの構成・動作
- PSoCでの設計と評価
- 自己校正手法
- **まとめ・今後の課題**

まとめ

- ▶ 繰り返しクロックのタイミング測定のBOSTを検討
- ▶ $\Sigma\Delta$ TDCのシミュレーションによる動作確認
- ▶ $\Sigma\Delta$ TDCのPSoCによる設計と測定評価
- ▶ 「高線形性」「測定の絶対値保証」のための自己校正手法の提案
- ▶ PSoCで実現することで、信号時間差を簡単に試験できる可能性を示した

今後の課題

- ▶ 測定速度の向上
- ▶ 実際のシステムへの適用検討

ご清聴ありがとうございました



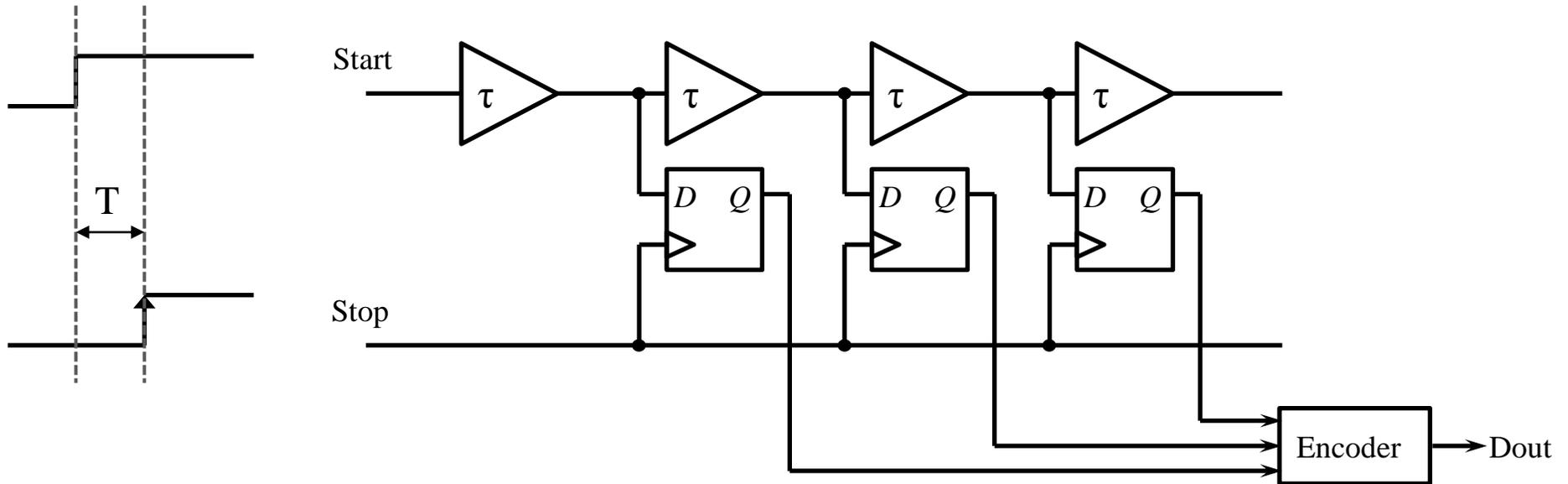
Kobayashi
Laboratory



Time makes GOLD !!

1. 依頼した回路図
2. 回路の細かい動作

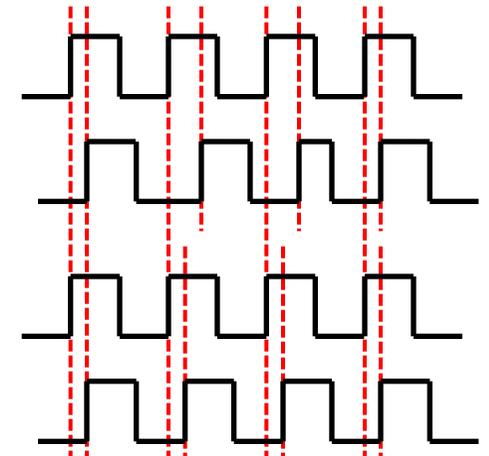
Flash型TDC回路



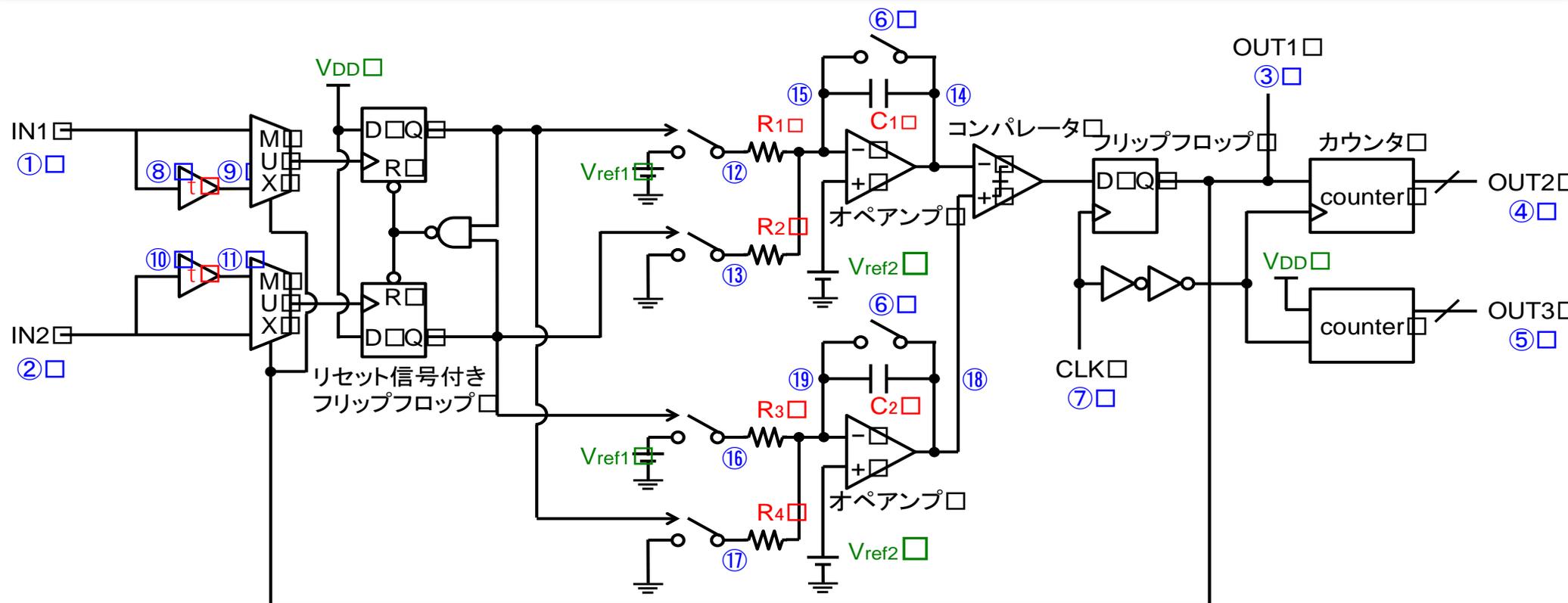
- 任意の信号でも1回の入力で計測可
- 回路規模：大
- 時間分解能： τ で決まる
- 繰返し信号の計測
 - 何回も入力 ⇒ 高精度で測定

任意信号：Tが変化する

繰返し信号：Tが一定



回路構成



V_{DD} , V_{ref1} : 3.3V V_{ref2} : 1.65V

マルチプレクサ (MUX): 2つ, V_{DD} で動作

リセット信号付きフリップフロップ: 3つ, V_{DD} で動作

オペアンプ: 2つ, V_{DD} で動作

コンパレータ: 1つ, V_{DD} で動作

カウンタ: 2つ, V_{DD} で動作

①, ②: 入力端子

③, ④, ⑤: 出力端子

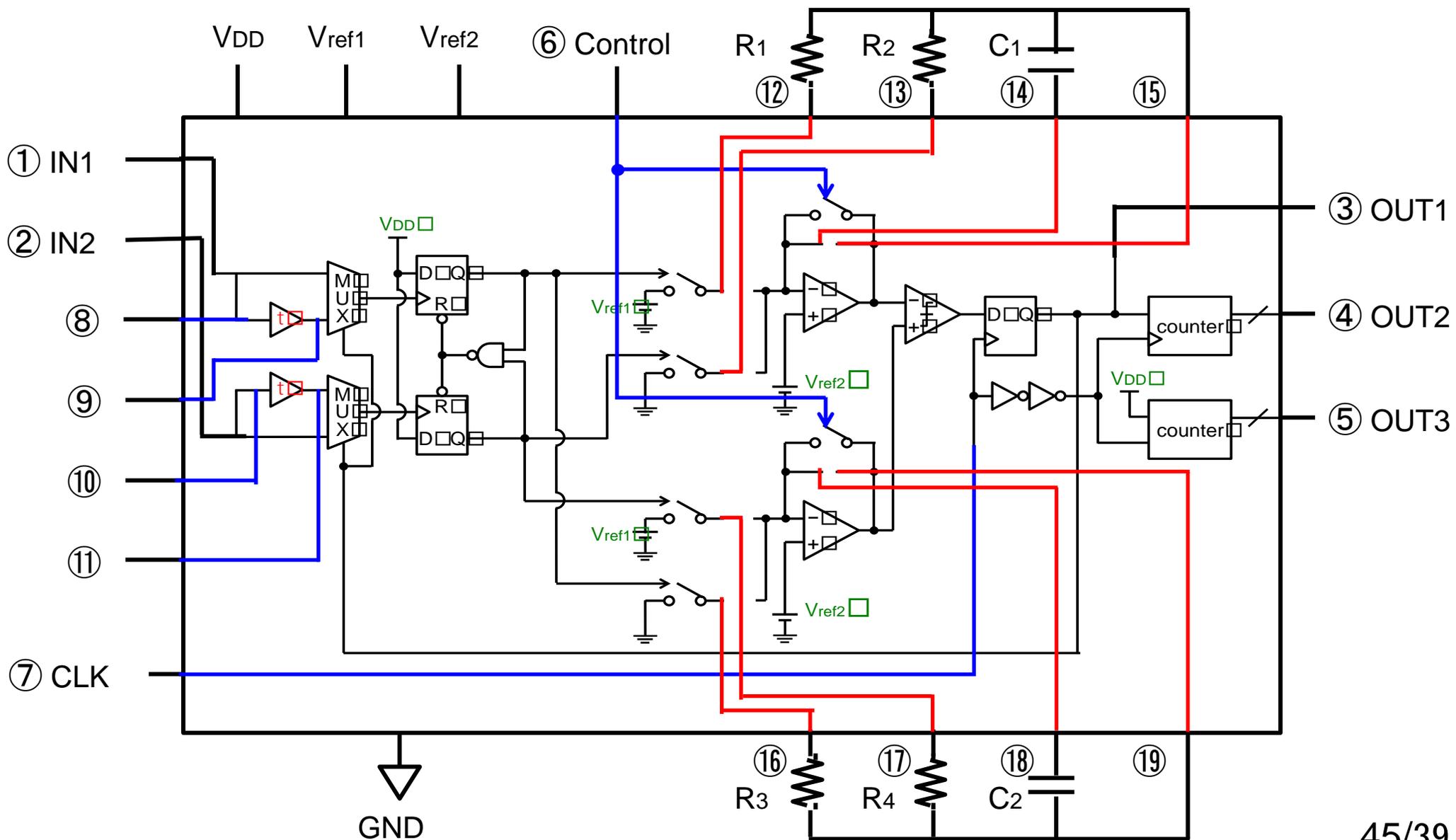
⑥: 制御端子

⑦: 出力同期クロック用端子

⑧~⑪: T の外部での確認用端子

⑫~⑰: R, Cの外付け用端子 44/39

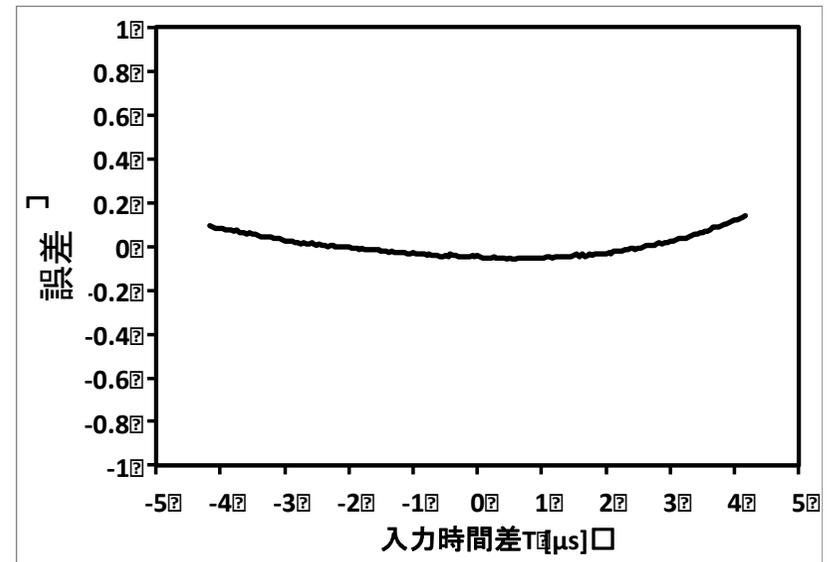
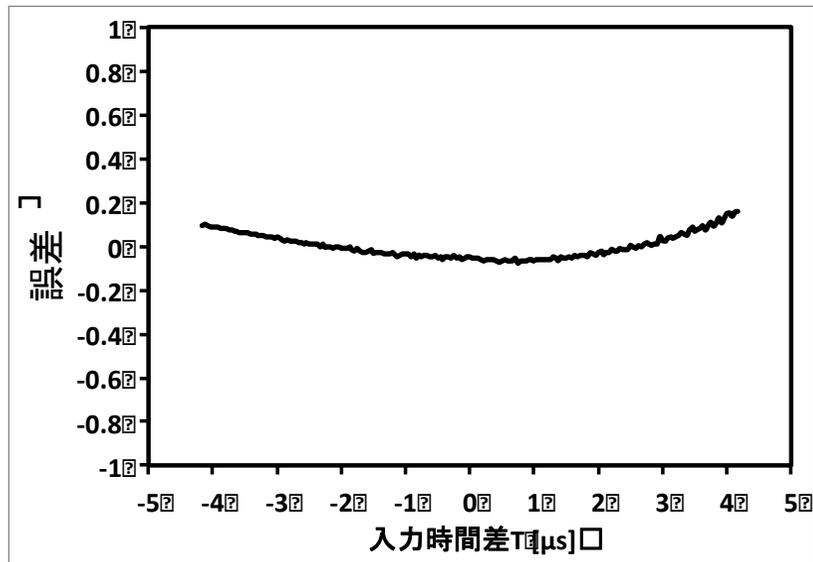
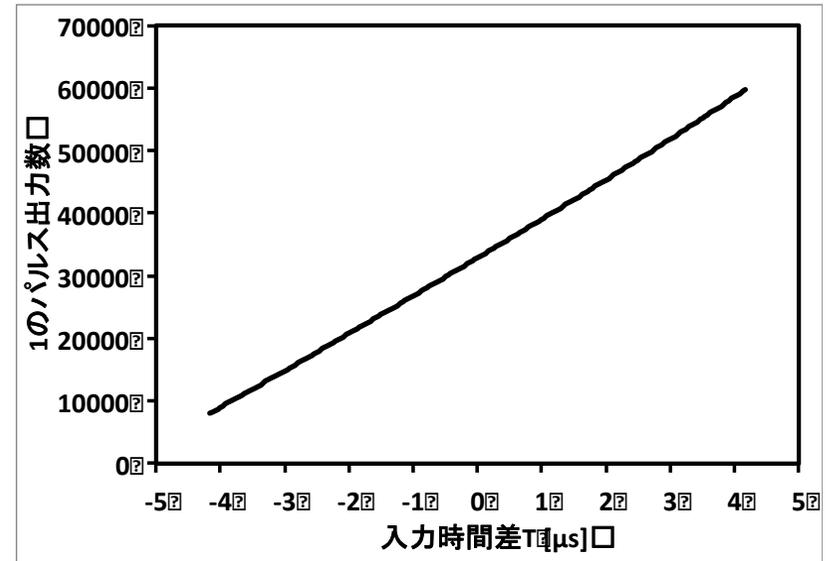
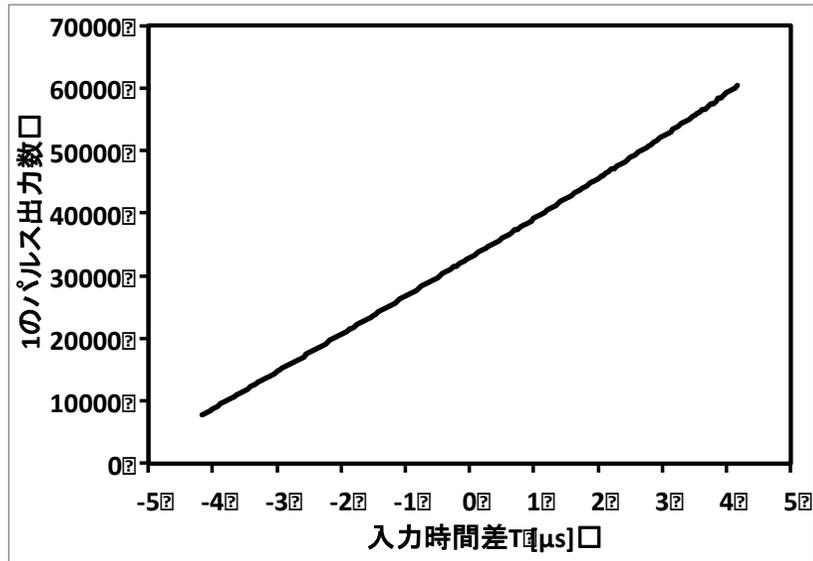
全体の回路図



電源の説明

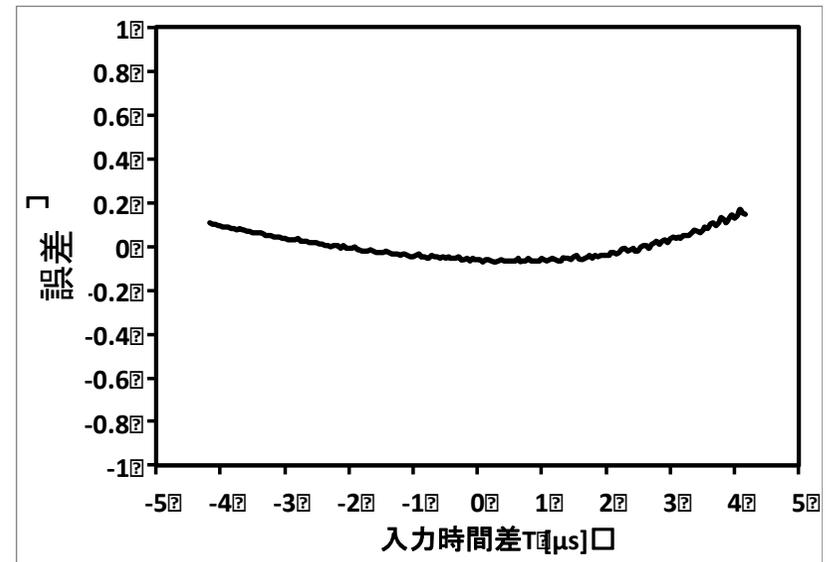
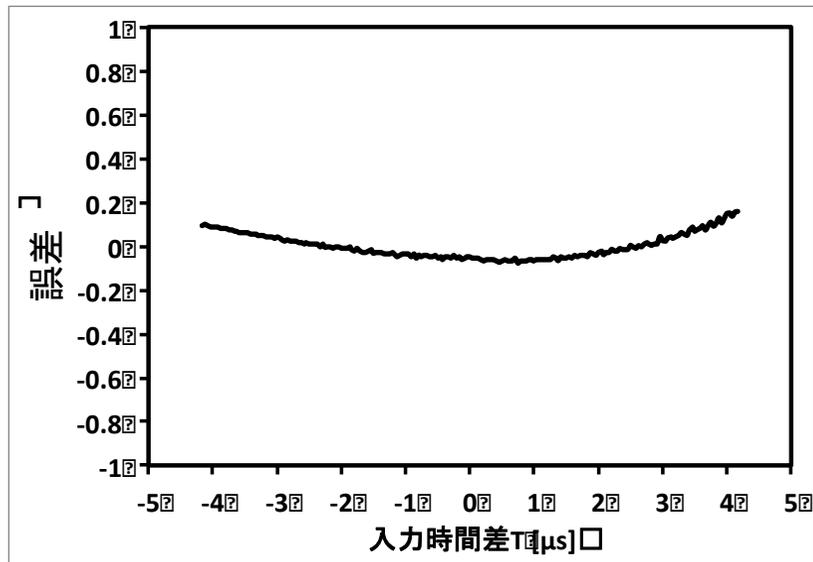
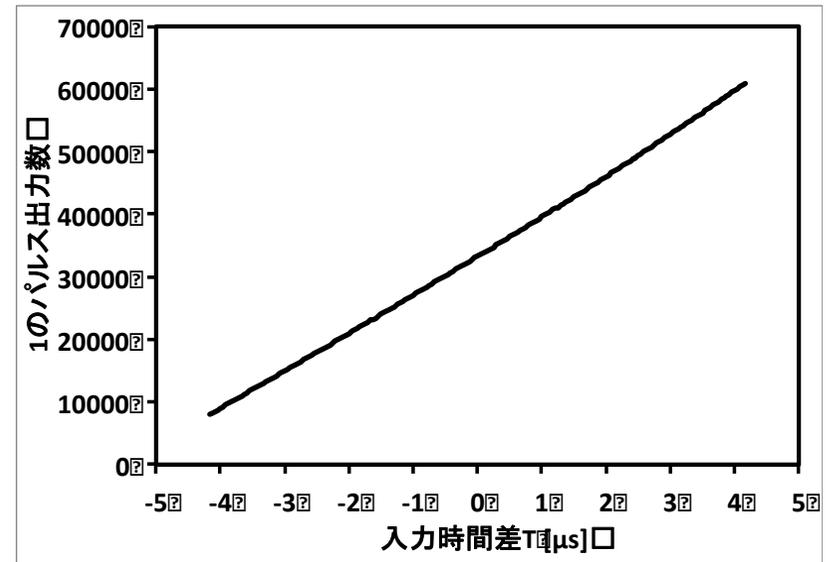
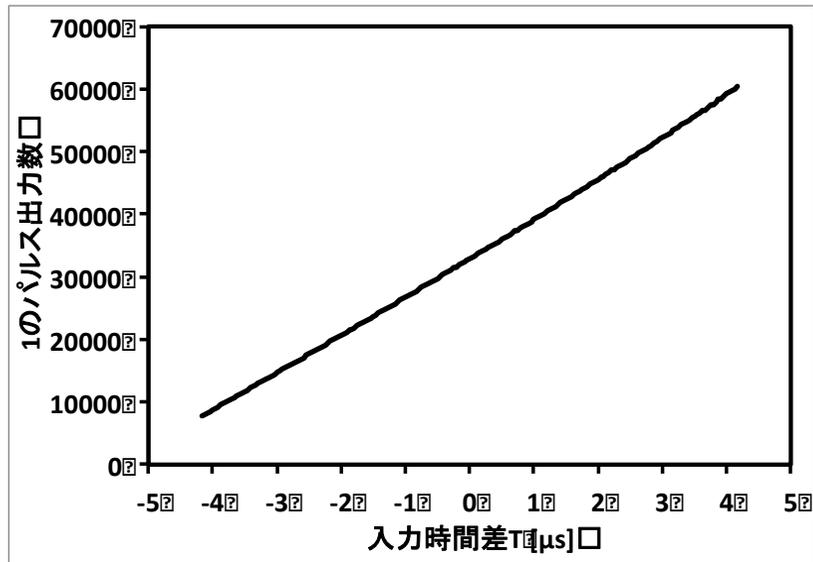
| | |
|-------|---|
| VDD | MUX, Flip-Flop, NAND オペアンプ, コンパレータ, インバータ, カウンタ電源, 3.3V |
| Vref1 | オペアンプ入力基準電源1, 3.3V |
| Vref2 | オペアンプ入力基準電源2, 1.65V |
| GND | グラウンド |

τ を入れ替えた場合



τ を入れ替えても同様の結果が得られる

積分器を入れ替えた場合



積分器を入れ替えても同様の結果が得られる

思ったこと

- 誤差のズレは積分器の飽和による影響？
 - 入力時間差が大きいほど出力結果がずれやすい
 - RとCの値の最適化
- 出力点数を増やすことで誤差は気にならなくなる
- PSoCの内部クロックのジッタは意外と大きい
 - 内部クロックの周波数が24MHzのとき
Accuracy: $\pm 0.25\%$, Tolerance: $\pm 5\%$

- 実際に動いたと実感するまでどれくらいの期間がかかったか？
- 積分器の V_{DD} は正確になるようにした方が良い
- 積分器が疑似差動であるため、OPアンプやRCの素子値のずれによって性能限界が決まってしまうため、正確にしなければならない
- INLを求めた際の1LSBはいくらか？
- DNLは無いのか？

質問@FTC研究会

- 動作周波数と τ は関係あるのか？
 - なぜ周波数を速くしたいのか？
- τ の大きさは大体の値が分かれば良いのか？
- PSoC1でやっているのか？
- ばらつきにはどれくらい強いのか？
 - 自己校正は考えているのか？
- τ や位相比較器の基本的な動作がわからない。
 - τ は微小な時間差を広げるという解釈で良いか？