

不易流行

アナログ集積回路での「基準信号」の重要性

群馬大学大学院 理工学府 電子情報部門

小林春夫

koba@gunma-u.ac.jp

発表内容

- **起**： 基準信号の重要性の気付き
- **承**： 研究事例
 - 基準電圧・電流源研究
 - 時間デジタイザ回路研究
- **転**： 不易流行
- **結**： まとめ

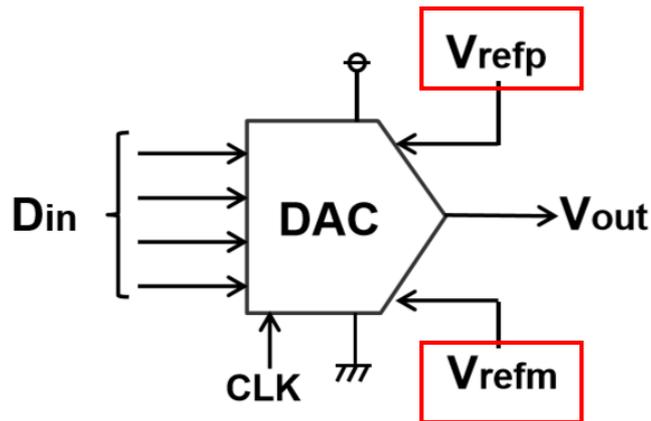
発表内容

- **起：** 基準信号の重要性の気付き
- 承： 研究事例
 - 基準電圧・電流源研究
 - 時間デジタイザ回路研究
- 転： 不易流行
- 結： まとめ

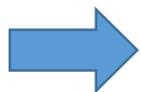
DA変換器とは

Digital-to-Analog Converter (DAC) :

- デジタル信号をアナログ信号に変換する回路

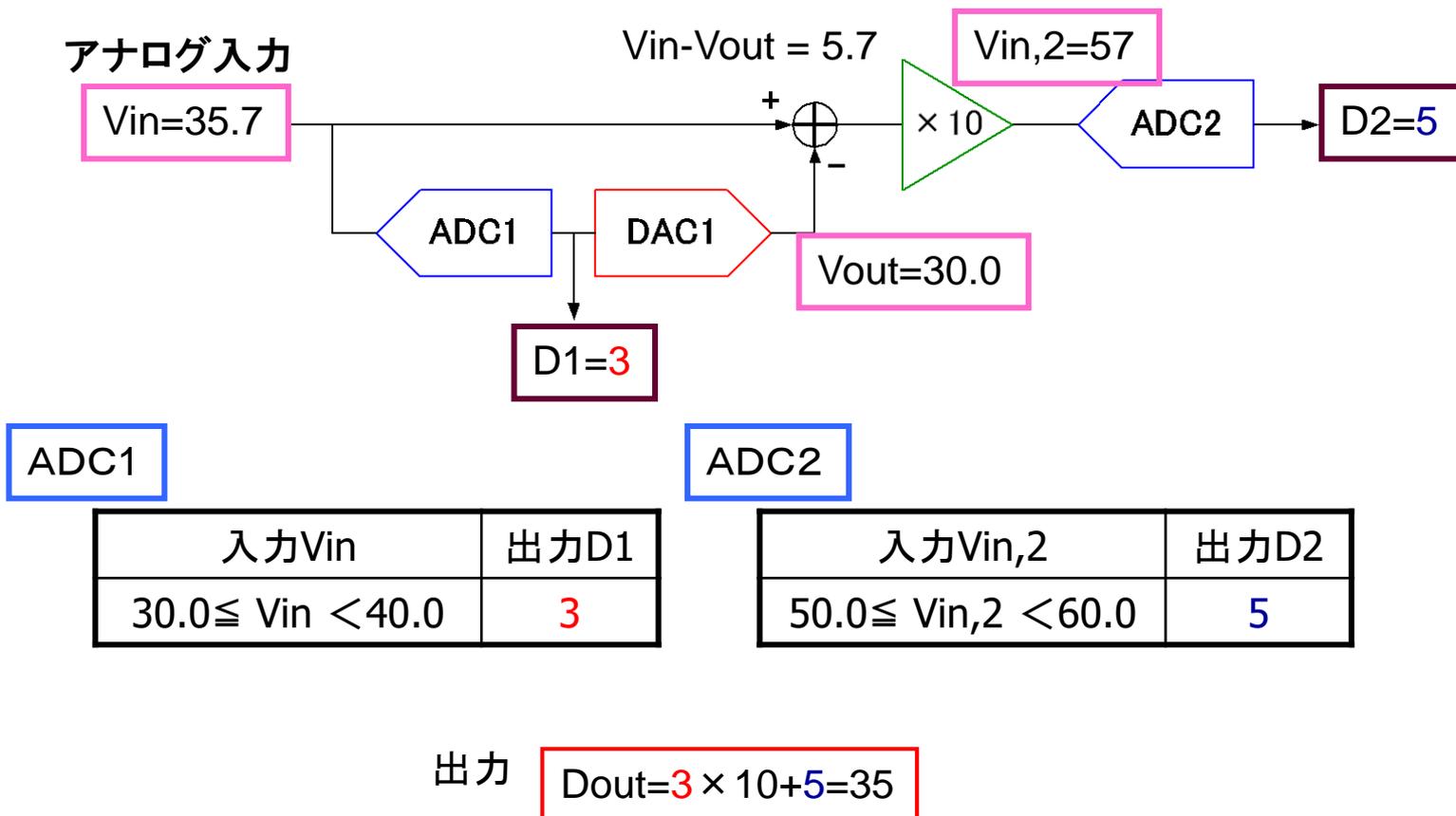


- **単位基準電圧** (または電流、電荷) の
入力デジタル値 (**整数値**) 倍を出力する回路

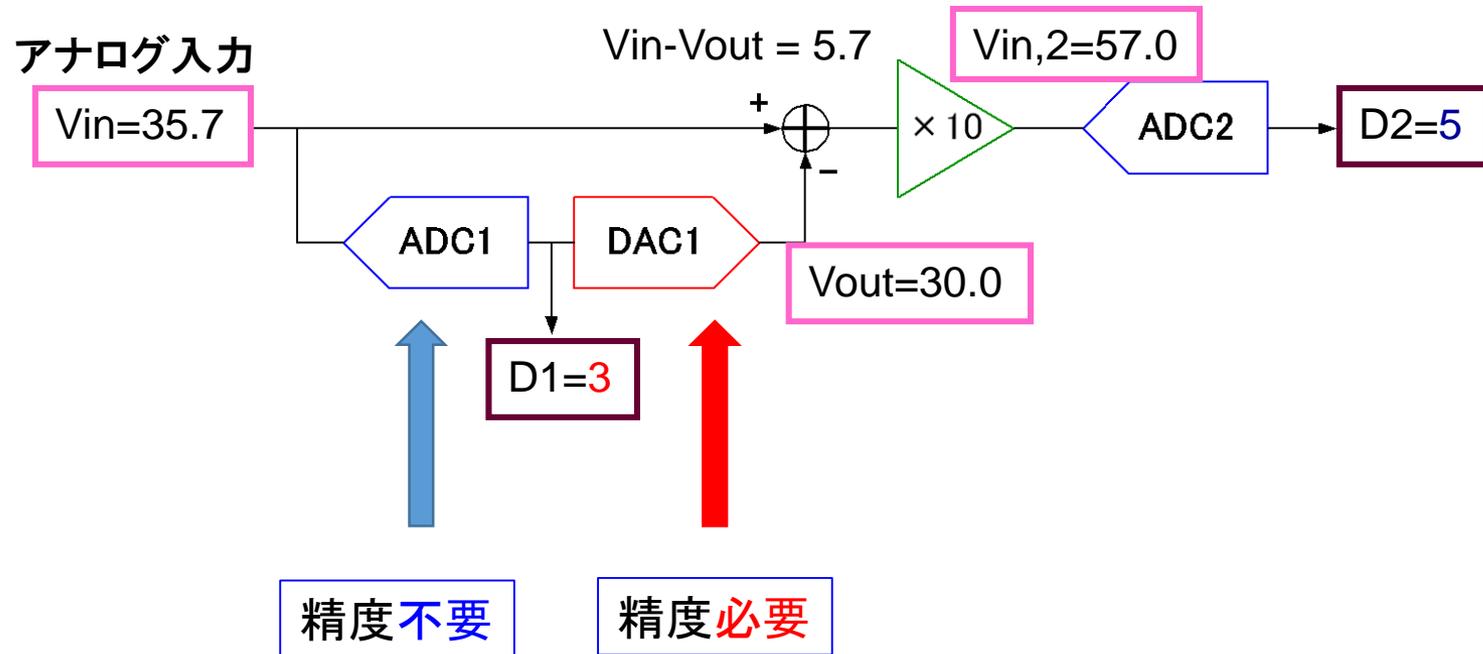


回路センスを感じる

パイプラインADCの構成と動作



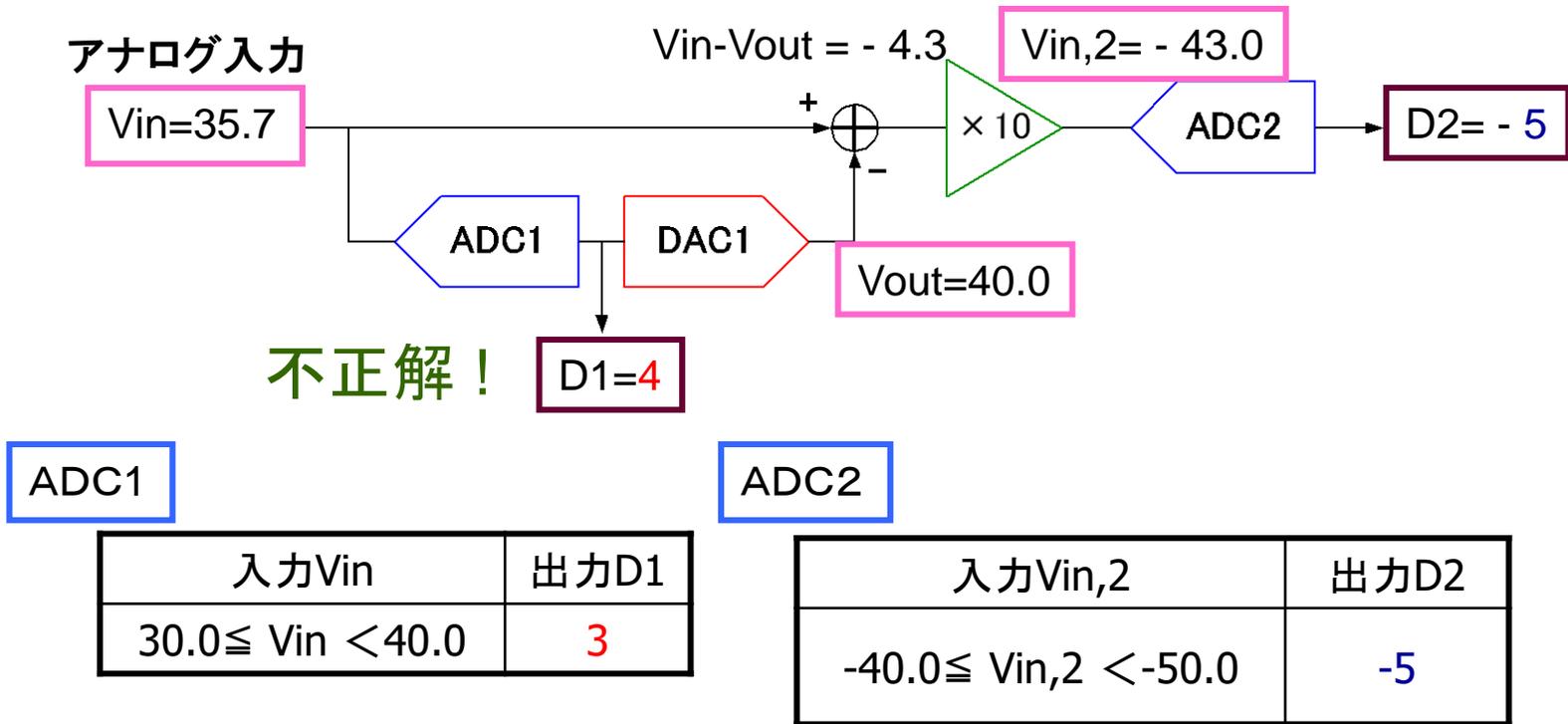
パイプラインADC の内部のADC/DAC



なぜ？

内部ADC1 で精度不要

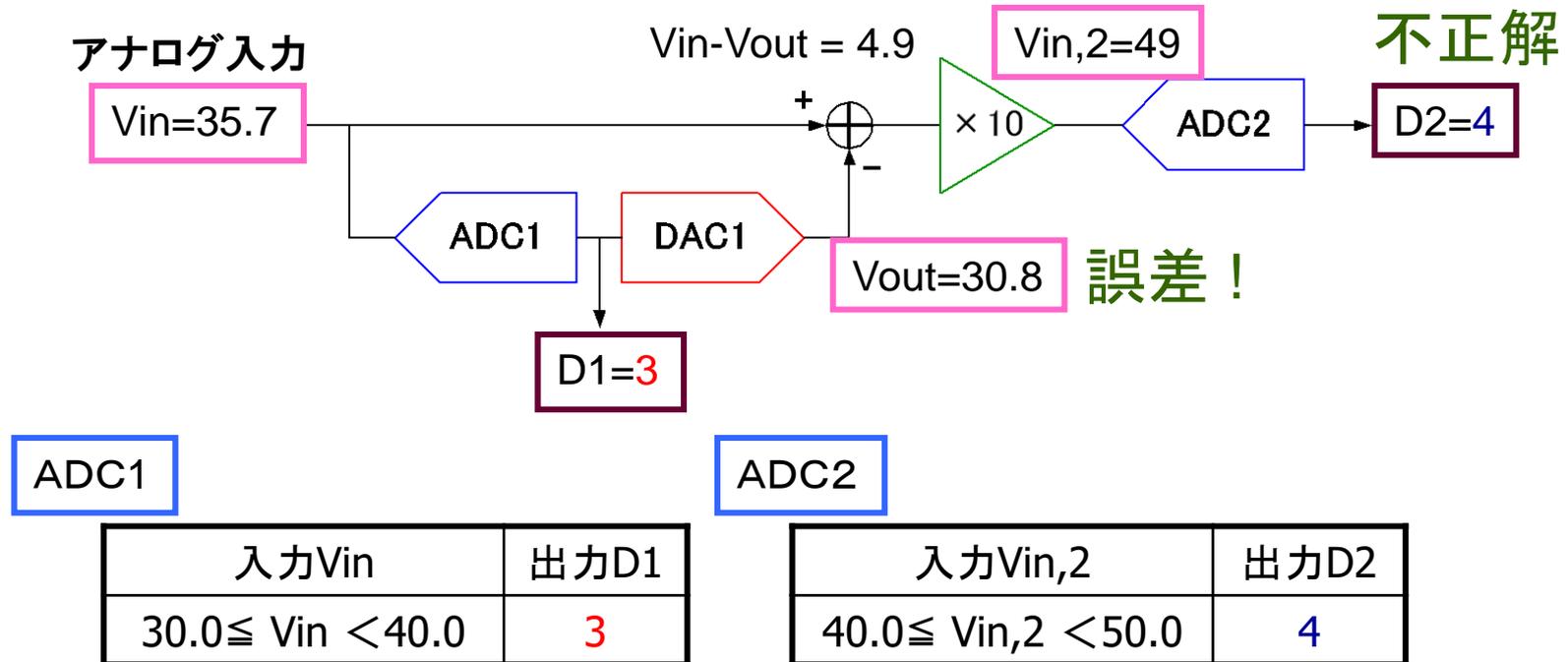
ADC2の入カレンジ冗長性で対応可能



出力 $D_{out} = 4 \times 10 - 5 = 35$

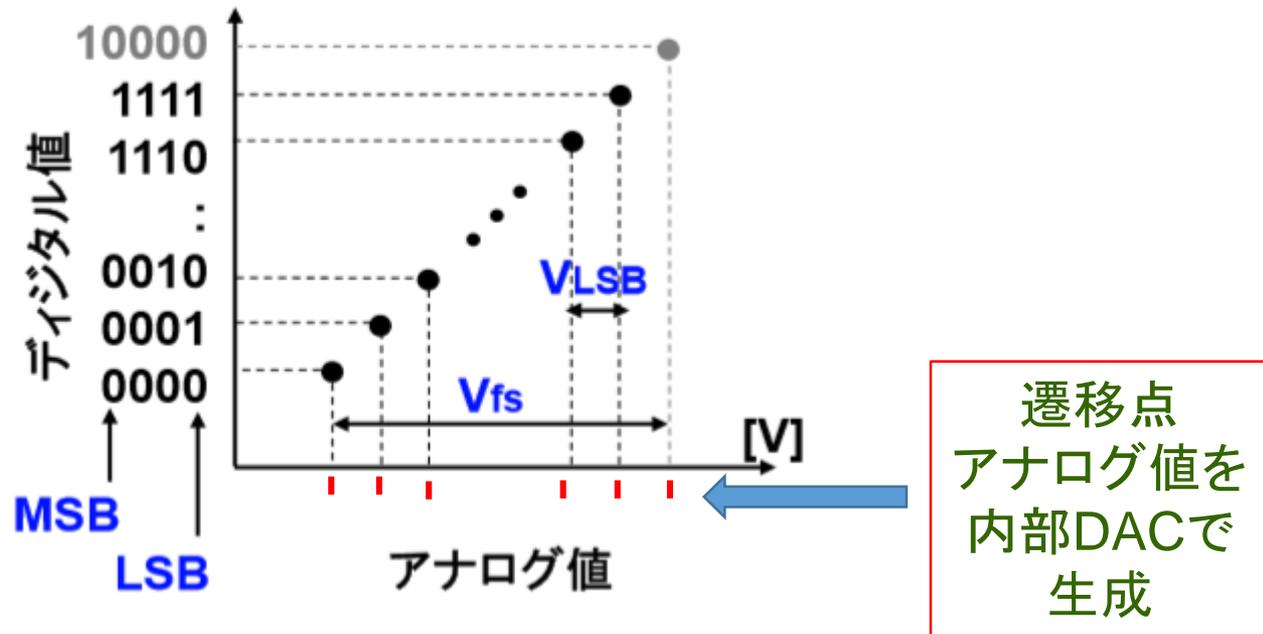
正解!

内部DAC1で精度必要



出力 $D_{out}=3 \times 10 + 4 = 34$ 不正解

ADCの線形性を考える



「ADC全体の線形性の基準は内部DACの線形性である」

(東京都市大名誉教授 堀田正生先生)

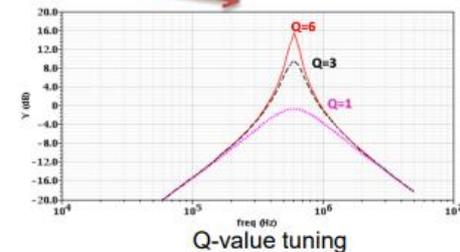
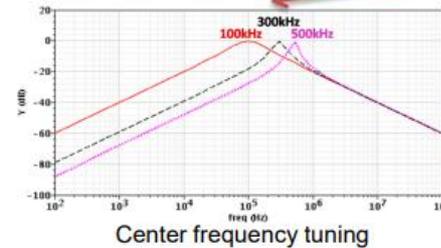
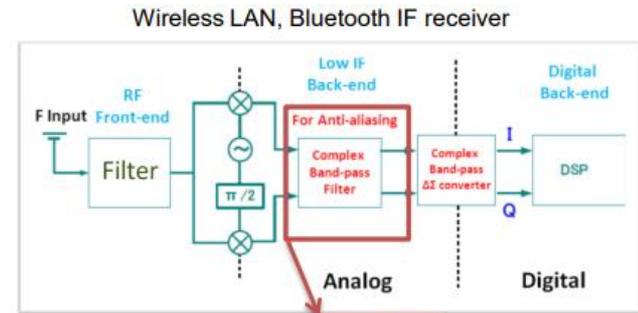
アナログフィルタ特性調整は基準周波数が必要

バンドパスフィルタ中心周波数の調整

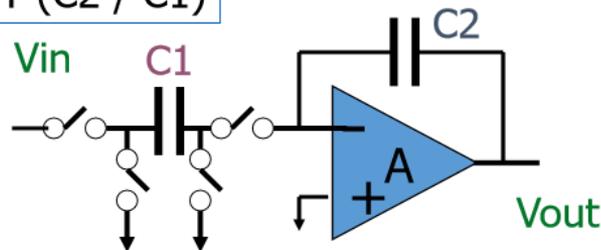


基準周波数(時間)が必要

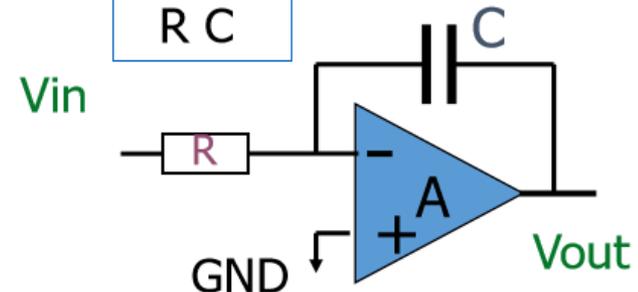
アナログフィルタ回路の
キーコンポーネント:
アナログ積分回路
時定数の調整必要



時定数
 $T (C2 / C1)$



時定数
 RC



発表内容

- **起**： 基準信号の重要性の気付き
- **承**： 研究事例
 - 基準電圧・電流源研究
 - 時間デジタイザ回路研究
- **転**： 不易流行
- **結**： まとめ

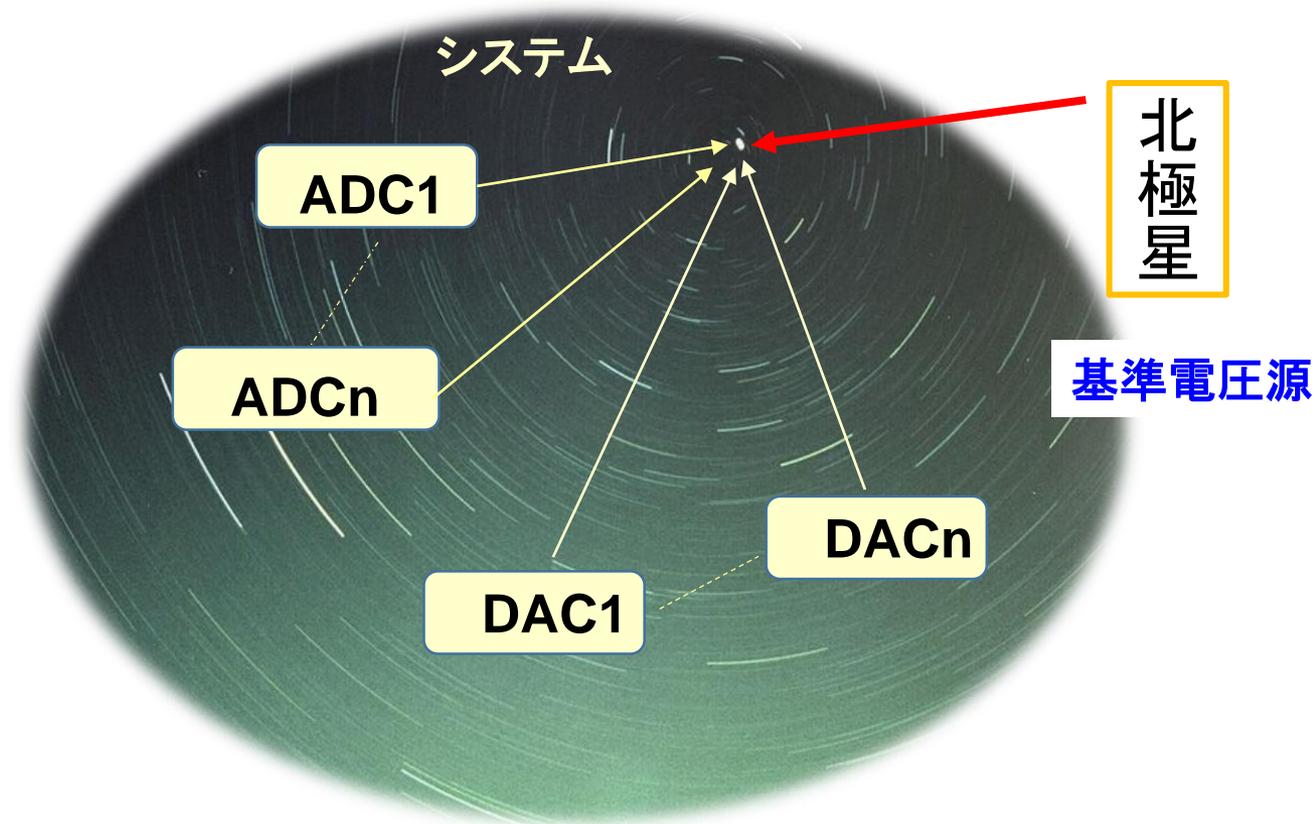
基準電圧源はシステムの北極星

システムの基準電圧源は、システム精度の基準となるもの。

システム内に複数の基準は設けない。

一つの基準にたいして、システム内の全てのアナログ部精度がトレースする様に設計。

基準電圧源は、システム精度における北極星



IC設計での温度特性の重要性

自動販売機メーカーの技術者

「**広い範囲の温度で電子回路の特性保証する必要あり。**
学会論文・発表で少しでも温度特性に言及していると
少しは信用する気になる。」

沖縄の炎天下

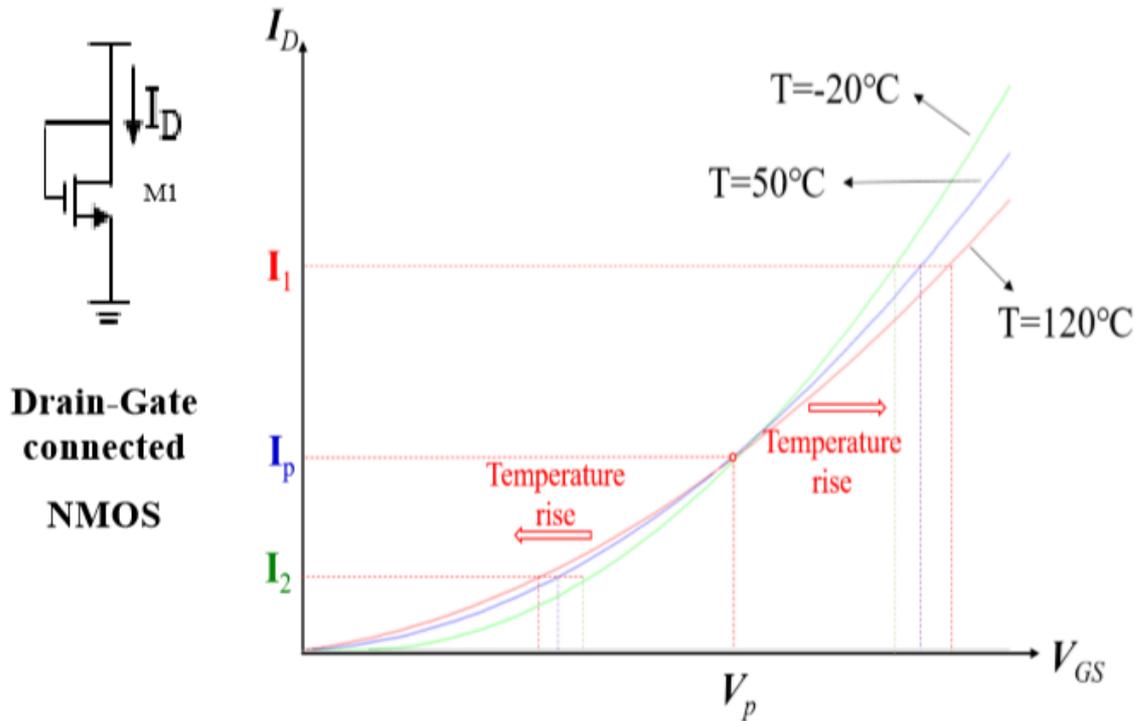


北海道の氷点下



- 「温度特性を調べてなければ信用できない」と指摘される
- **信頼性:** ICはジャンクション温度 10°C 上昇で寿命半分
- 車載用ICでも温度特性は重要

MOS 温度特性



I_D - V_{GS} characteristic of M1

温度が高くなる



MOS は寝起きが悪くなる

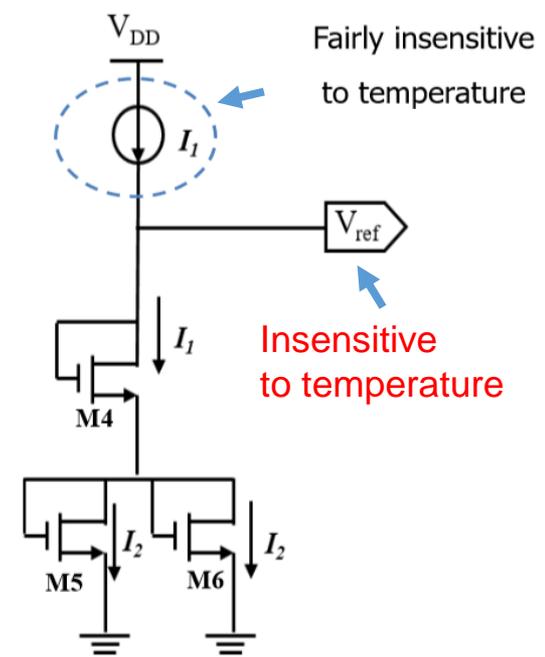
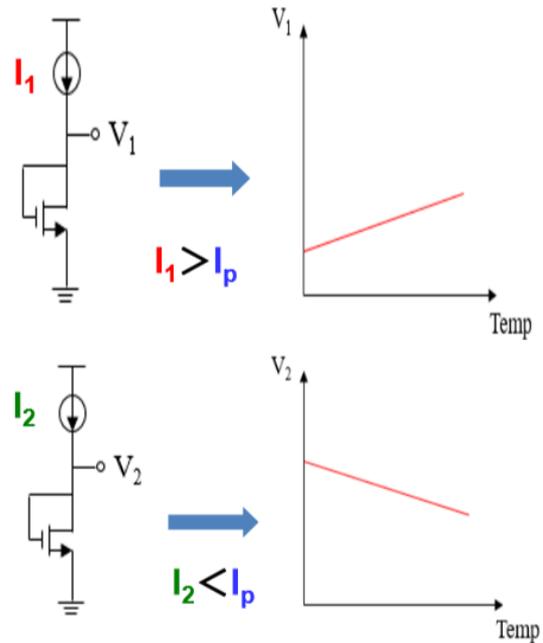
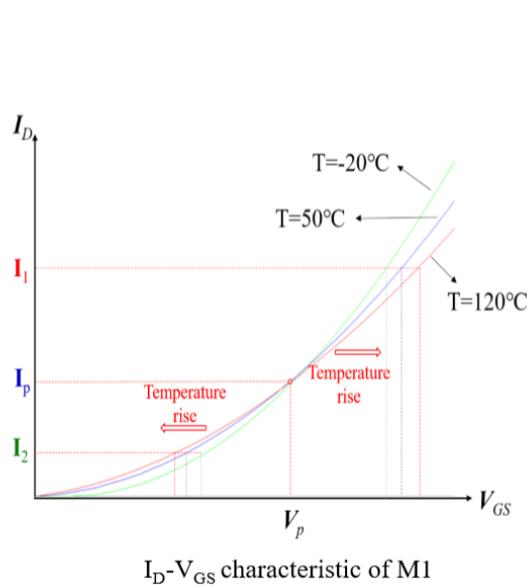
若者の生活習慣 !?

夜: なかなか寝ない (なかなか**オフ**しない)

朝: なかなか起きない (なかなか**オン**しない)

温度不感 基準電圧源

Drain-Gate connected NMOS



2019年6月のVLSI Circuit Symp で特殊デバイス使用をした発表有



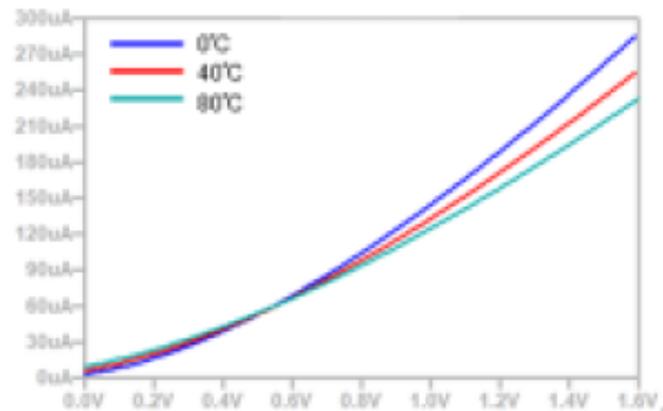
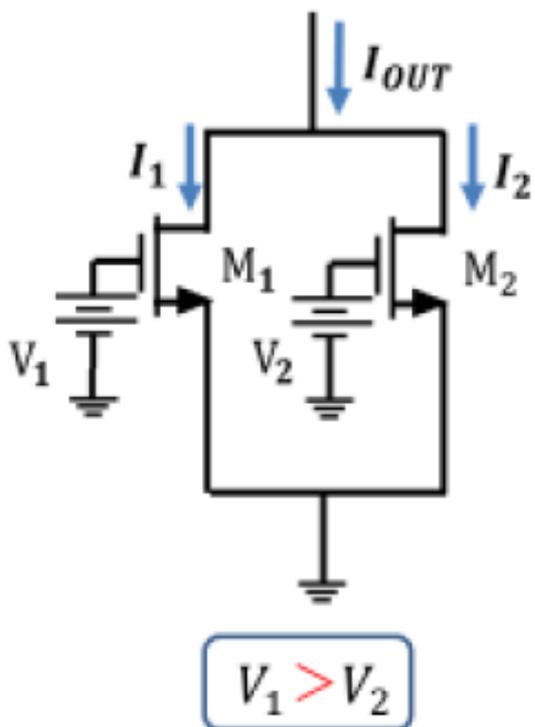
標準CMOS で 正と負の温度特性を実現できることを発見

[1] L. Sha, A. Kuwana, H. Kobayashi, "Reference Voltage Generation Circuit Insensitive to Temperature", Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS), Nikko, Japan (Aug. 2019)

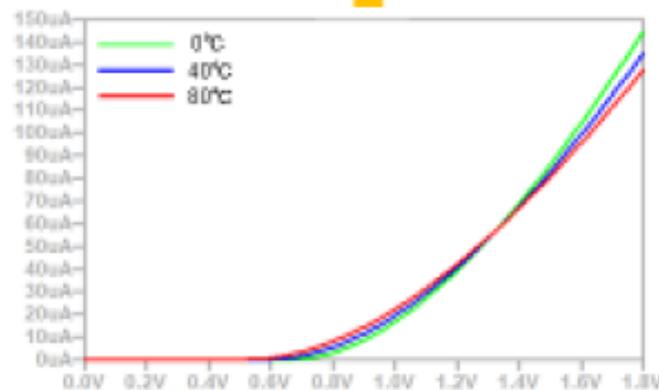
温度不感 基準電流源の基本アイデア

Concept of proposed circuit

Applied different bias voltages to the gates of the NMOSFETs



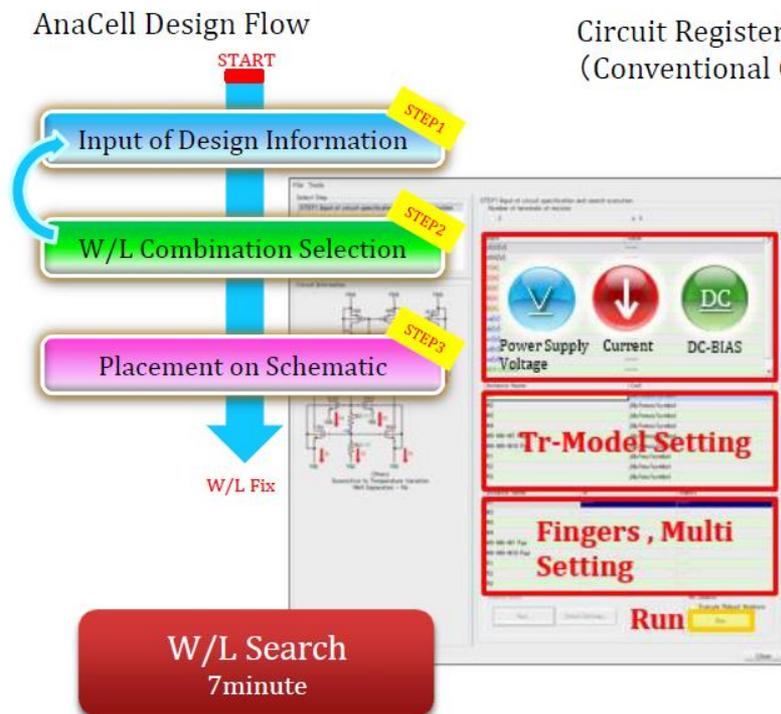
I_D - V_{GS} characteristic of M1



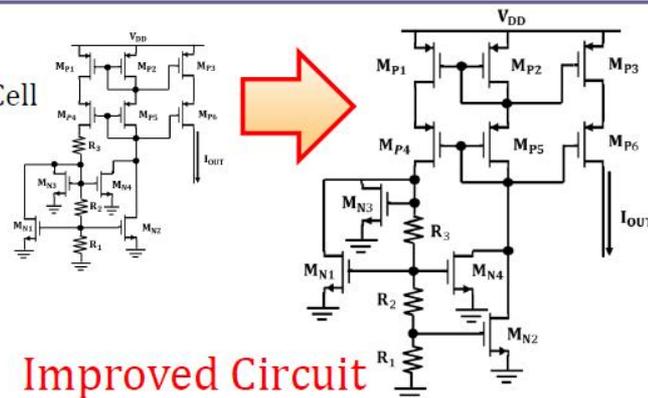
I_D - V_{GS} characteristic of M2

JEDAT社のAnaCell を用いた設計

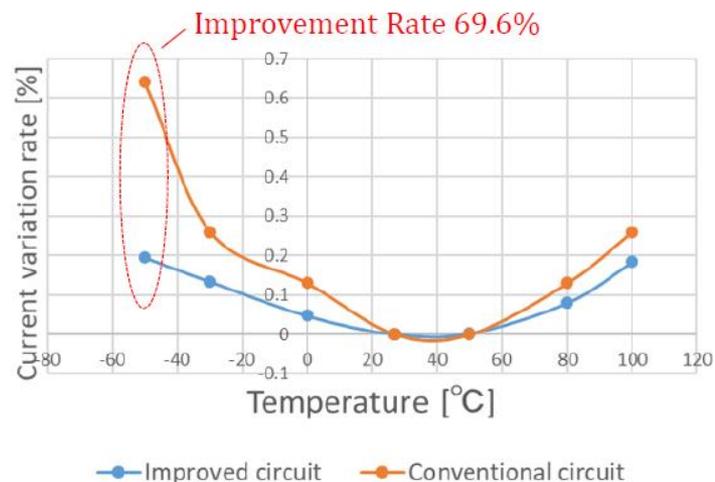
Experiments in TPSCO 65nm PDK



Circuit Registered to AnaCell
(Conventional Circuit)



Improved Circuit



A diagram of the circuit actually converted to AnaCell

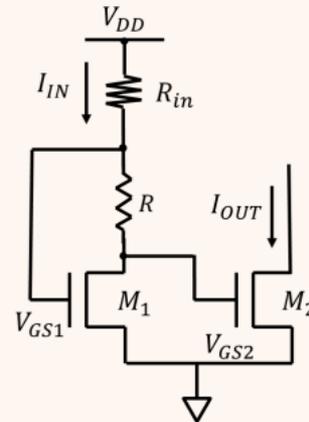
Copyright 2019 JEDAT Inc

- JEDAT/群馬大共著論文 2019年6月 Design Automation Conference で発表
- 安定性解析、スタートアップ回路も日光での国際会議で共同発表

電源電圧不感 改良永田電流源

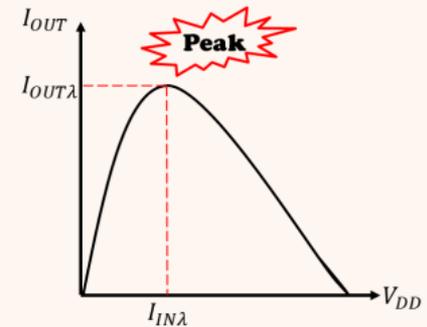
オリジナル 永田電流源

1960年代
日立製作所 永田穰氏
(パイポーラTr)



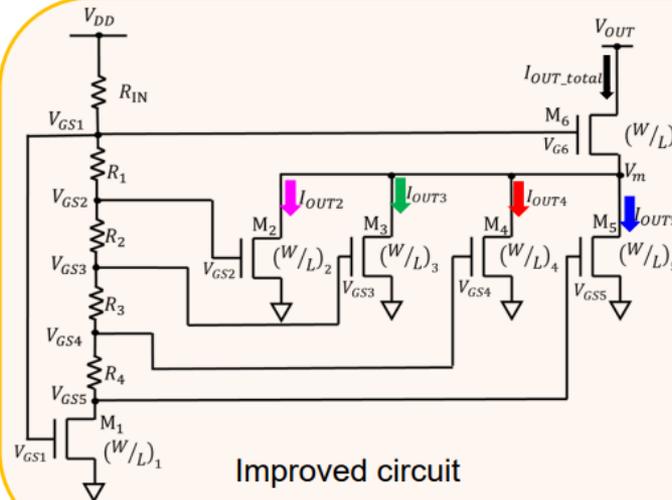
MOS Nagata
Current Mirror Circuit

ピーキング電流源

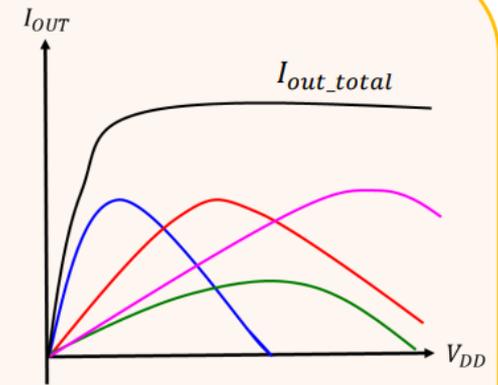


Peaking current
characteristics

改良 永田電流源



Improved circuit



Peaking current characteristics
of improved circuit

改良永田電流源 試作・測定

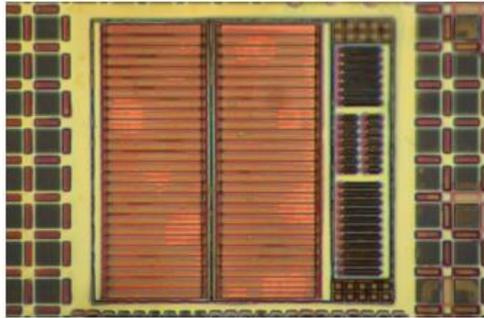
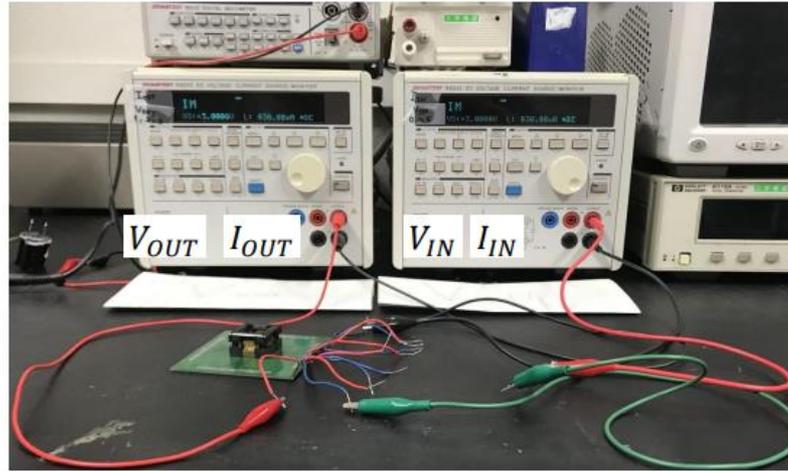
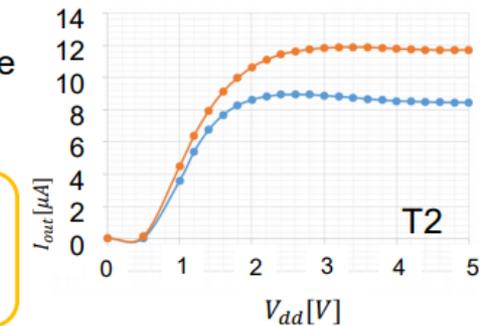
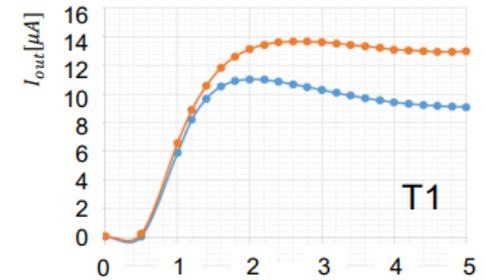


Photo of prototype chip



Measurement environment

- 電源電圧不感
- 温度変動に弱い

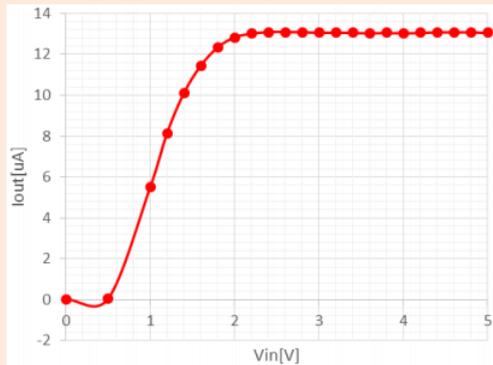


- Room temperature
- High temperature

Use a hair dryer

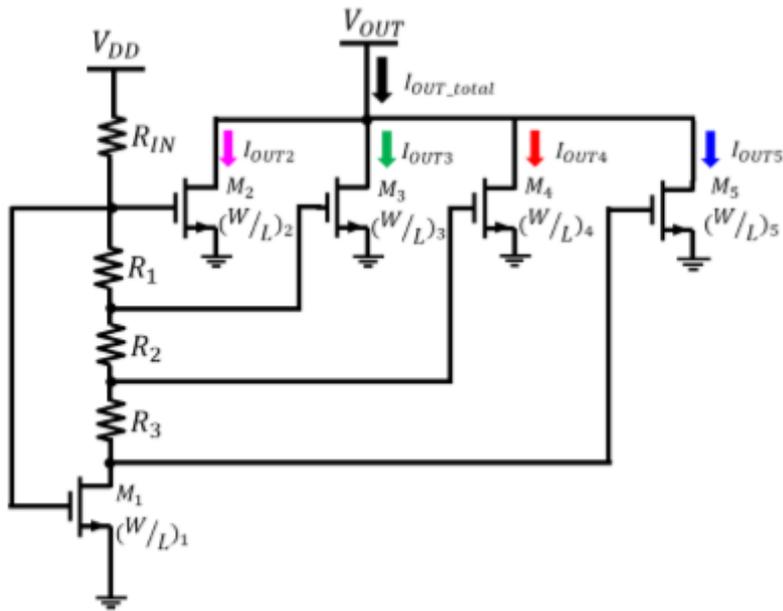


Measurement result

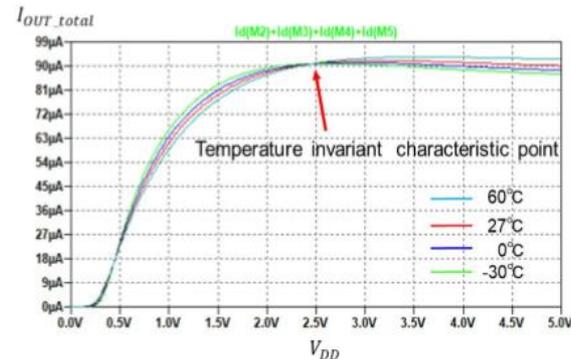


I_{OUT} in minimum variation

温度にも不感 さらなる改良永田電流源



Proposed circuit



SPICE simulation result

I_{OUT2} and I_{OUT3} have
Negative temperature characteristics



I_{OUT4} and I_{OUT5} have
Positive temperature characteristics



Cancel the temperature characteristics

深みのある回路技術へ

[2] T. Hosono, N. Kushita, Y. Shibasaki, T. Ida, M. Hirano, N. Tsukiji, A. Kuwana, H. Kobayashi, Y. Moroshima, H. Harakawa, T. Oikawa

"Improved Nagata Current Mirror Insensitive to Temperature as well as Supply Voltage", Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS), Nikko, Japan (Aug. 2019)

発表内容

- 起： 基準信号の重要性の気付き
- 承： 研究事例
 - 基準電圧・電流源研究
 - 時間デジタイザ回路研究

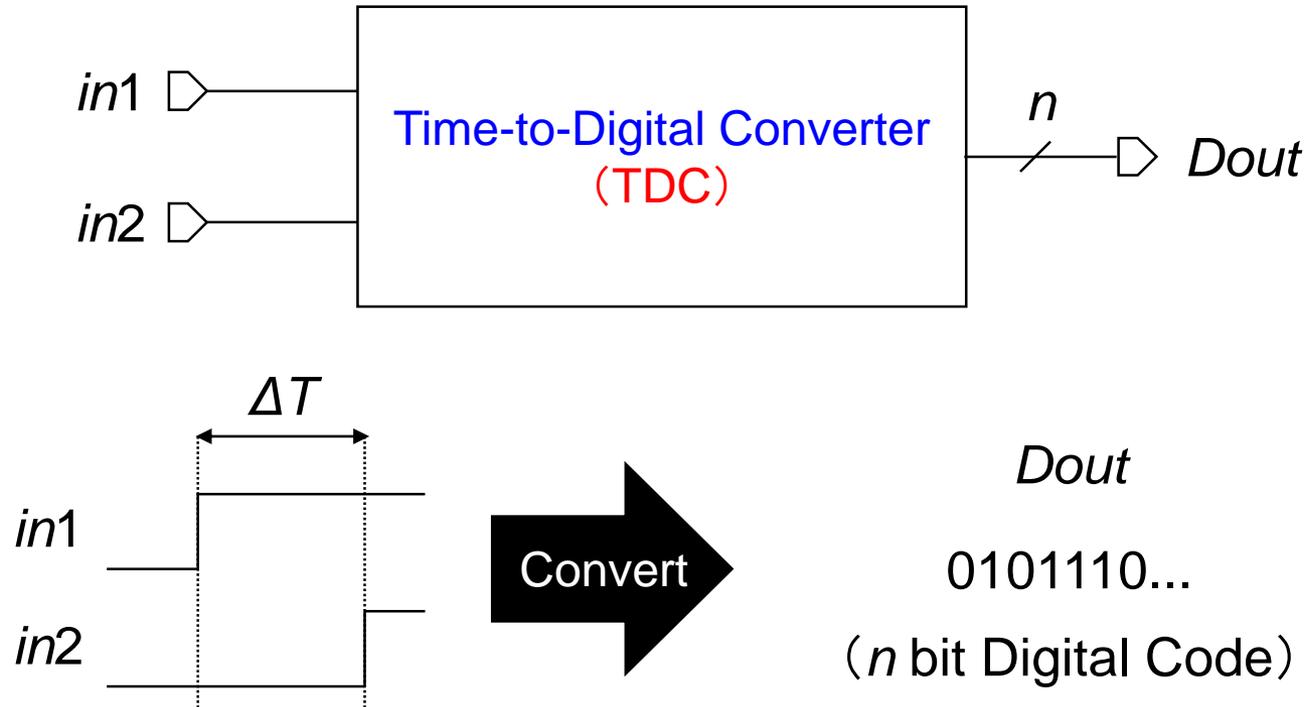
往古来今、之を**宙**と謂い
四方上下、之を**宇**と謂う。

淮南子

時間
空間



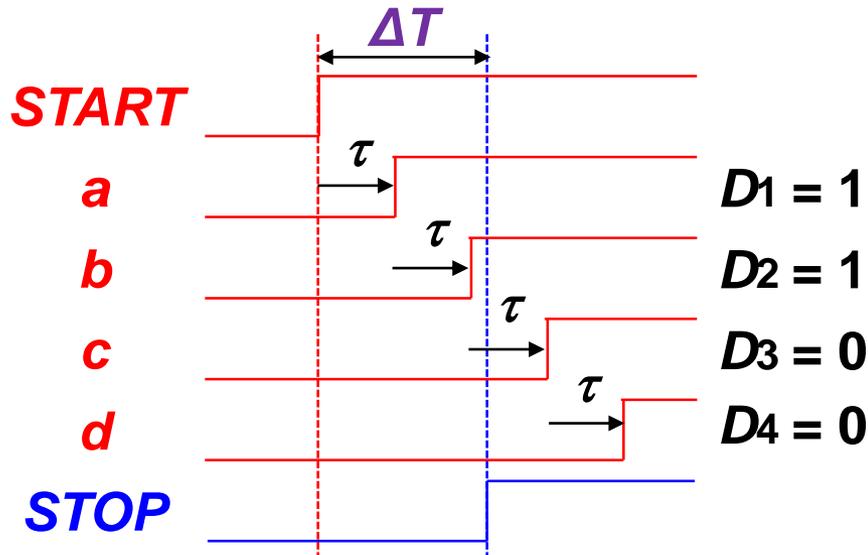
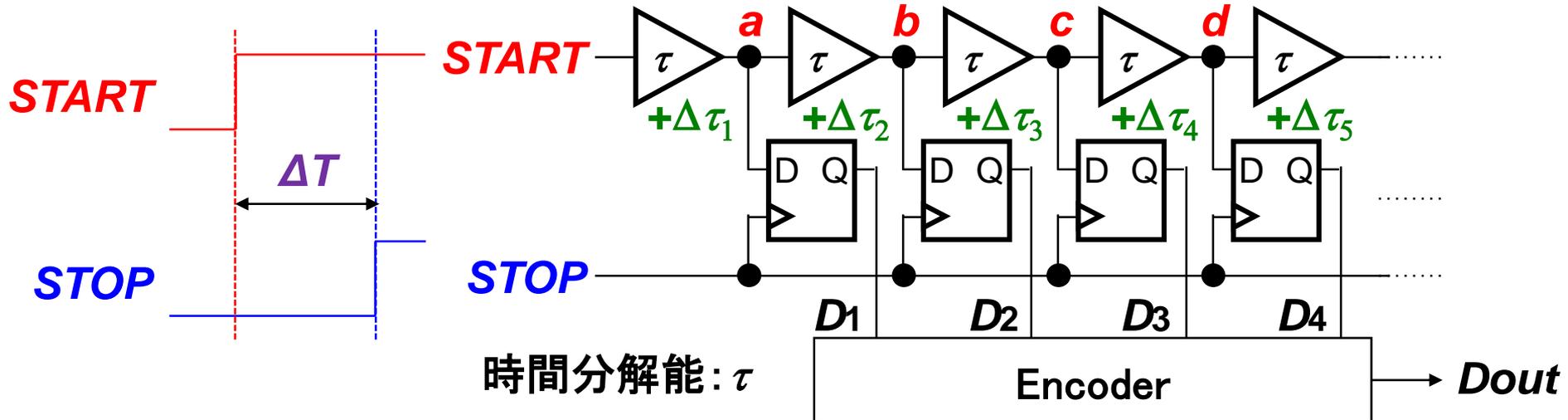
時間デジタイザ回路



2つのデジタル信号間の時間差 ΔT をデジタル値に変換

出力のデジタル値より ΔT を測定可能

フラッシュ型 時間デジタイザの構成と動作



- ΔT の大きさに比例したデジタル値 D_{out} を出力

- 時間分解能 τ

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
新井康夫氏による発明

遅延素子 τ の製造ばらつき

「絶対(平均値)ばらつき」

→ 入力レンジに影響

調整には 外部から基準時間信号が必要

論より **証拠**

「相対ばらつき」

→ 非線形性

周りの遅延素子の遅延値と同じかを見る

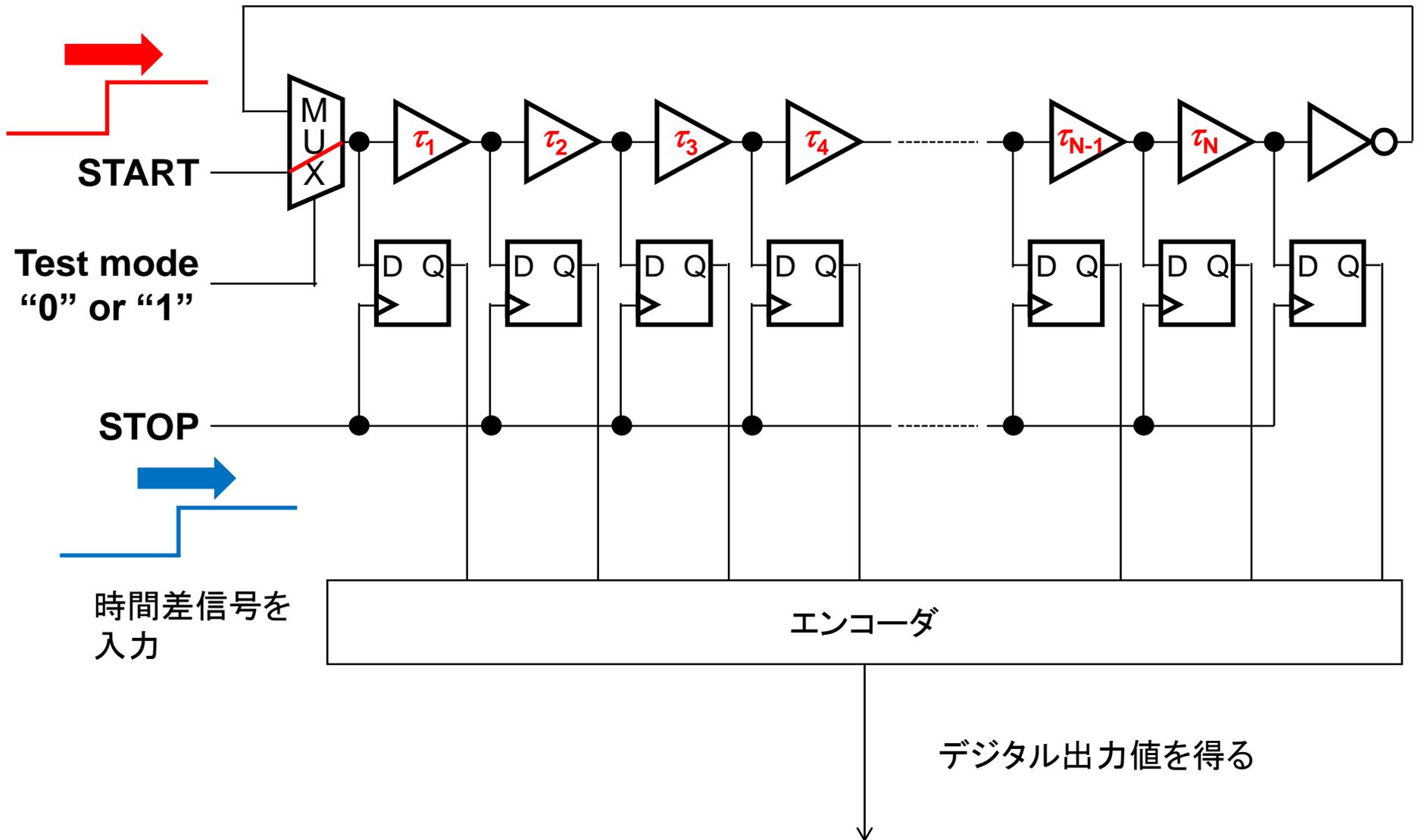
「自分の周り」が基準

外部から基準時間信号不要

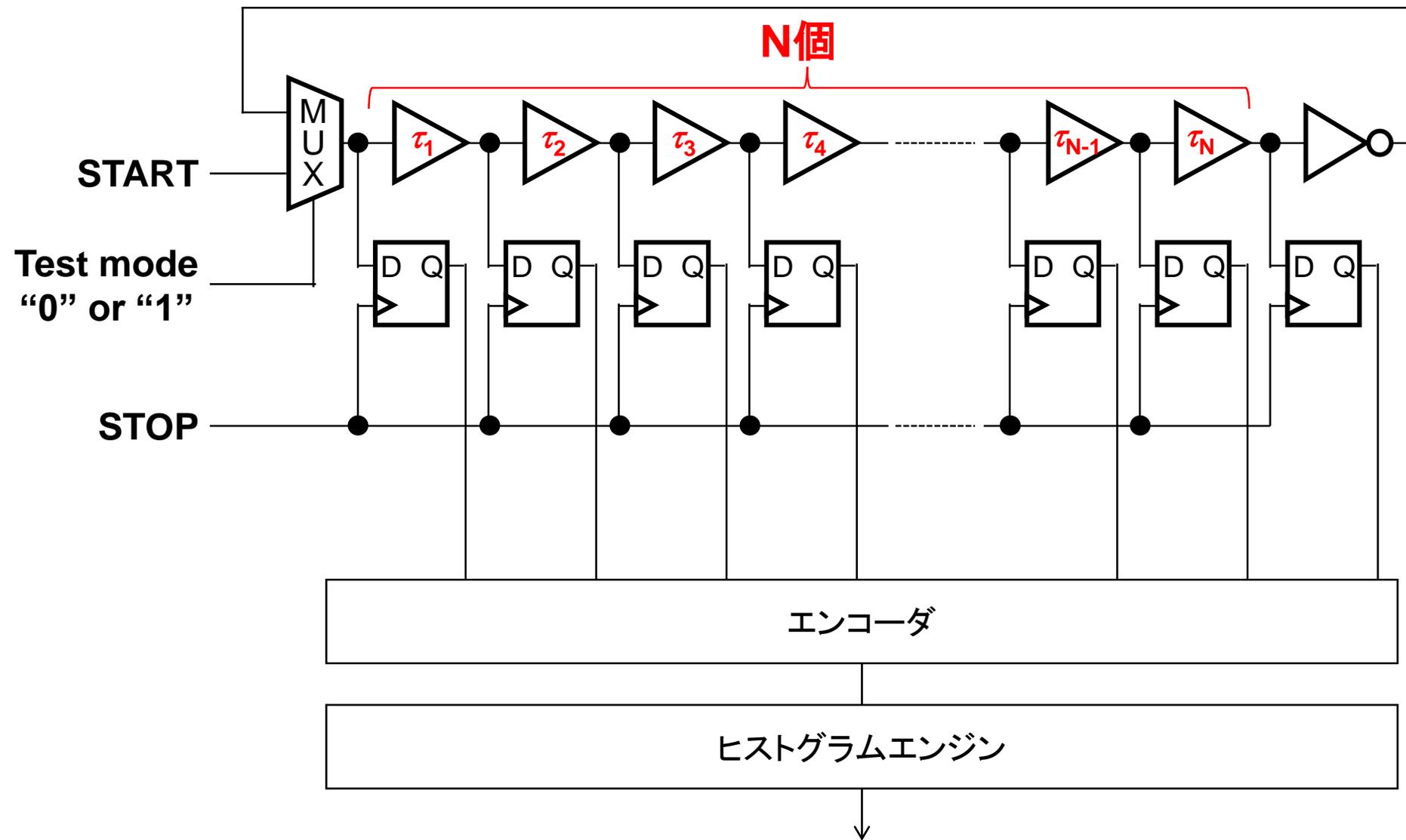
論より証拠

- 今回は「相対ばらつき」に着目

通常測定モード

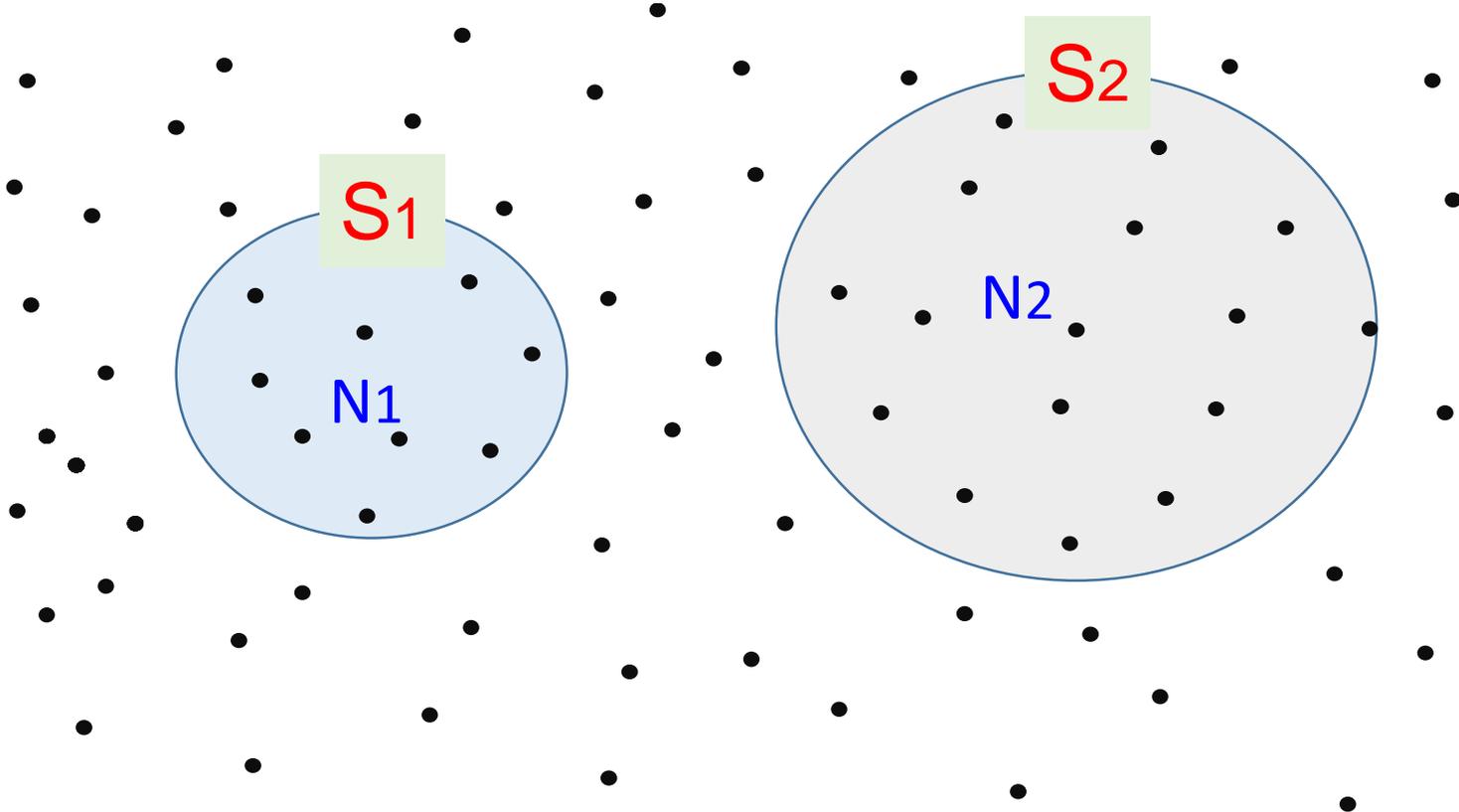


自己校正機能 時間デジタイザ



ヒストグラム法による測定

Random dots (Monte Carlo Method)

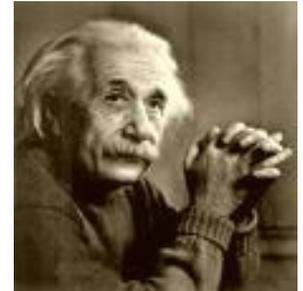


of dots ratio $\frac{N1}{N2}$ \longrightarrow Area ratio $\frac{S1}{S2}$

モンテカルロ法 = サイコロ遊び

「神は サイコロ遊びなどされない」

Albert Einstein 量子力学を批判



「アインシュタインよ、神が何をなさるかなど
注文をつけるべきではない」

Niels Henrik David Bohr

量子力学の育ての親



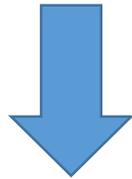
我々は神ではないので

サイコロ遊び(モンテカルロ法)を使用

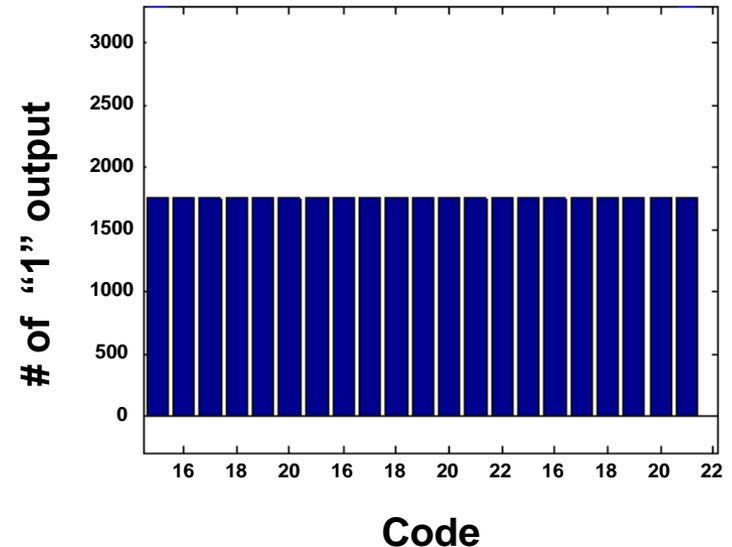
遅延ばらつきなし(理想状態)のヒストグラム

テストモード

2つの入力 START, STOPが
全く相関のないクロックの場合

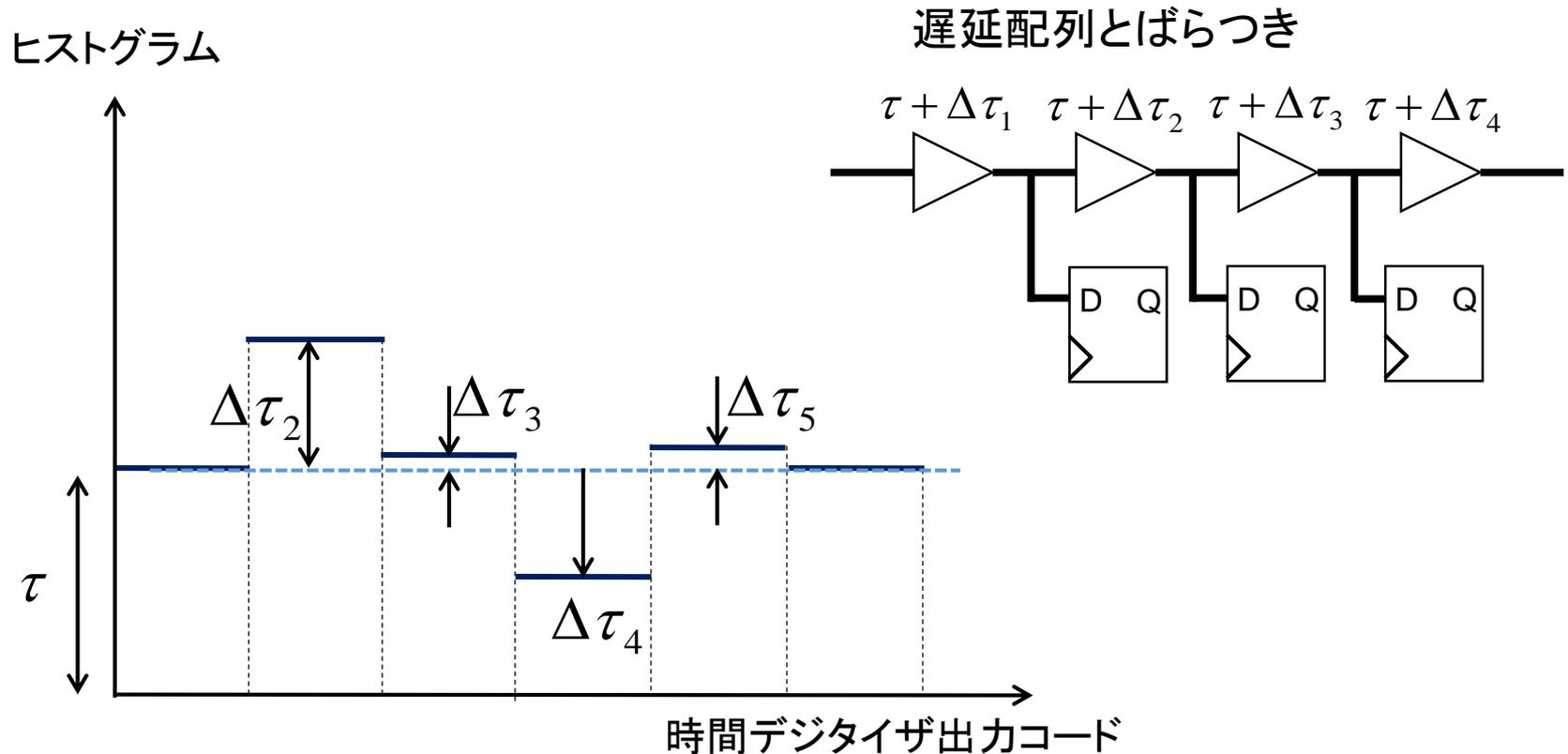


時間デジタイザで、
十分時間をかけて出力データをたくさんとると
全出力デジタルコードのヒストグラムは等しくなる



- モンテカルロ法的一种
- 時間信号なので容易に実現可能
電圧信号では実現大変

ヒストグラム法による遅延ばらつきの測定・補正



ヒストグラム値と遅延値は比例



時間デジタイザ回路の非線形を測定値に基づき
デジタル演算で補正

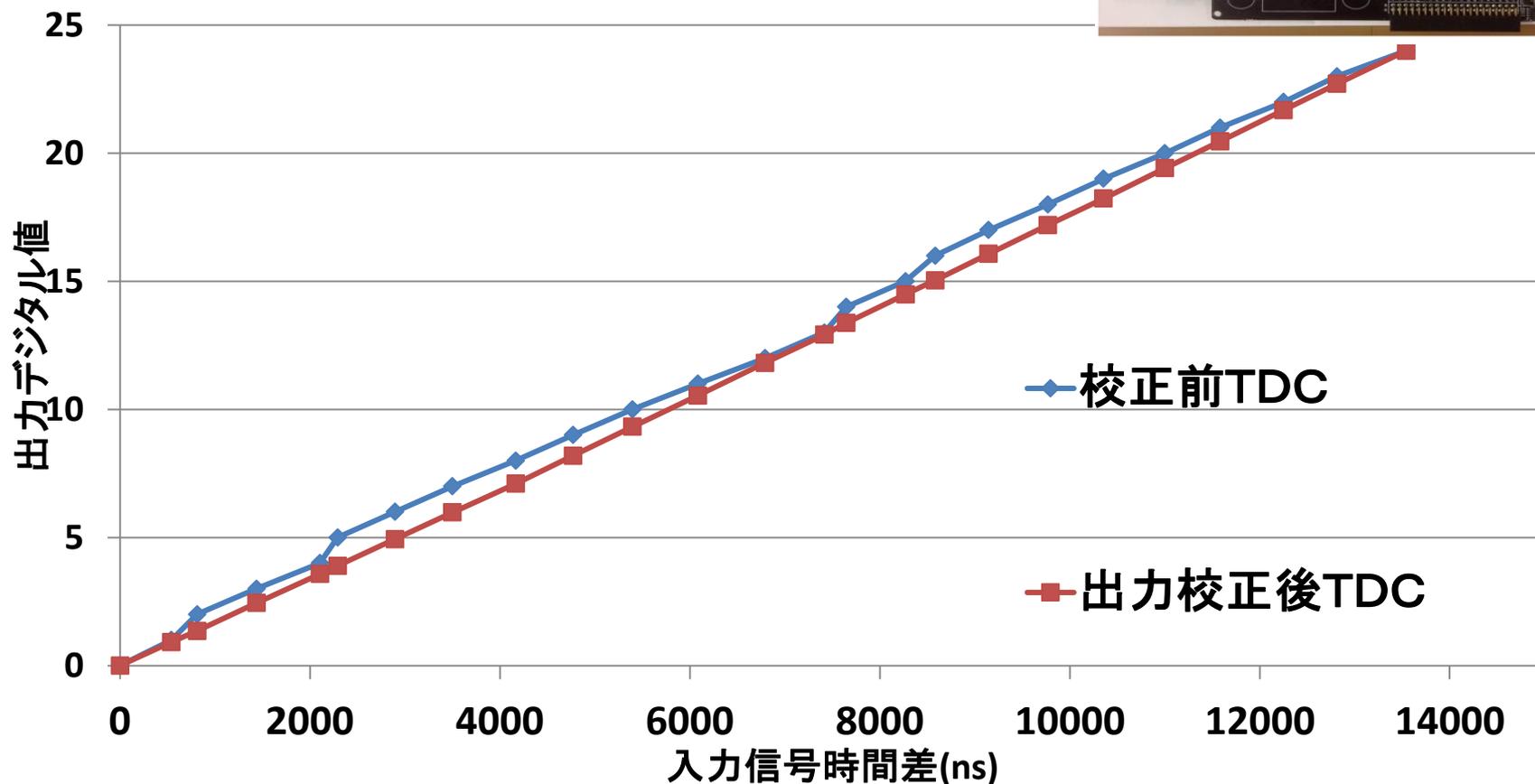
自己校正前後の時間デジタイザ入出力特性

アナログFPGAでの試作・測定

個別遅延素子用
可変容量配列



PSoCTDC出力特性

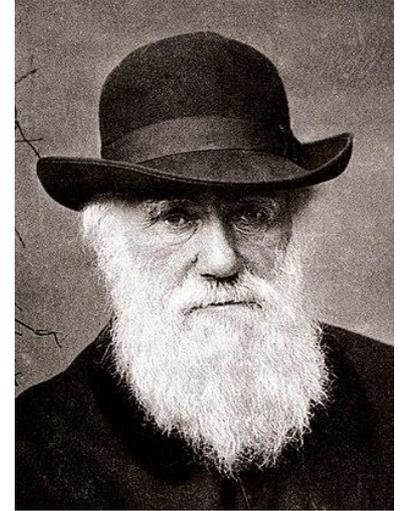


発表内容

- 起： 基準信号の重要性の気付き
- 承： 研究事例
 - 基準電圧・電流源研究
 - 時間デジタイザ回路研究
- **転： 不易流行**
- 結： まとめ

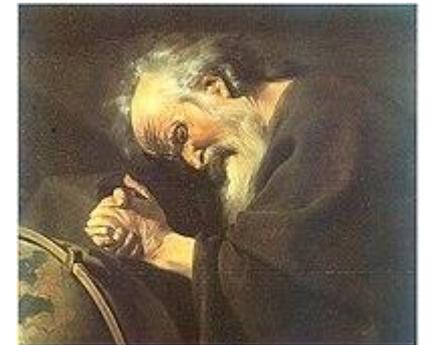
変わる、変わらなければならない

- 生き残る者。
強い者ではない、賢い者でもない。
変化できる者だけが生き残る。
(チャールズ・ダービン 進化論)



日本で首相の国会演説でも引用

- 万物は流転する。
(ギリシャ哲学者 ヘラクレイトス)



日本の古典にも

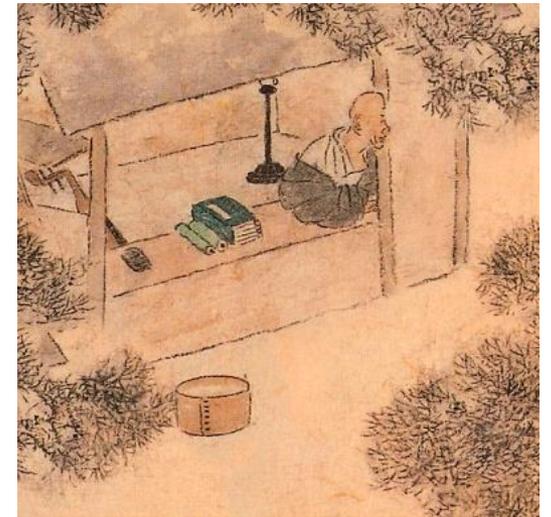
- 祇園精舎の鐘の音、諸行無常の響きあり。

(平家物語)



- ゆく河の流れは絶えずして、
しかももとの水にあらず。
淀みに浮かぶうたかたは、
かつ消えかつ結びて、
久しくとどまりたるためしなし。

(鴨長明 方丈記)



が、何か足りない

応用科学学会講演会での 北森俊行先生(東大名誉教授)のご指摘

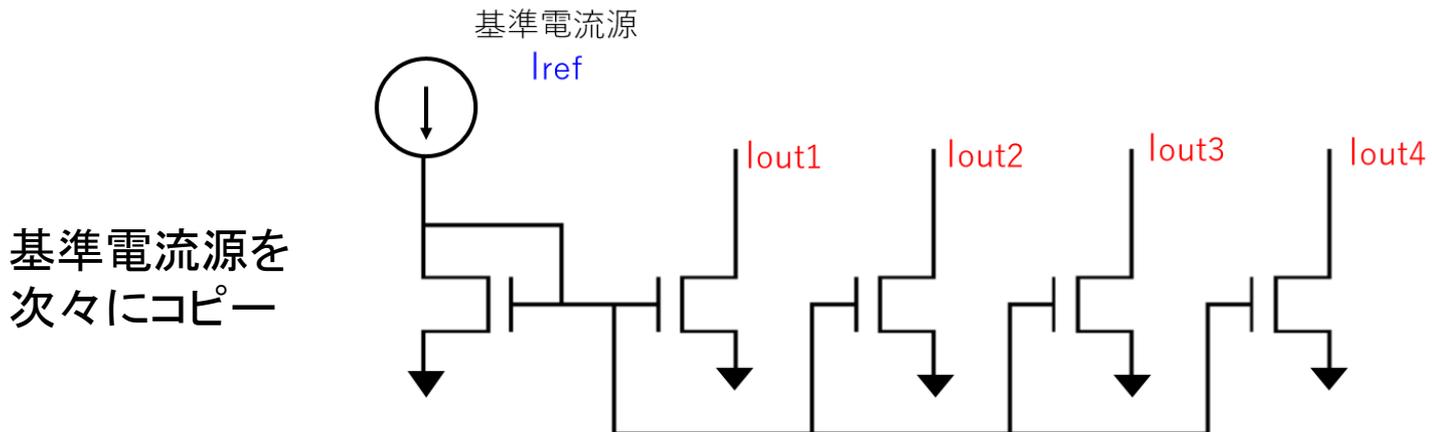


↑ 北森先生

- 時を経ても、条件が変わっても
「変わらないもの」を見つけると本質が分かる。
- 「常に変わっている」ということが
本質であることもあるかもしれないが。。。

変わらないもの

- 航海：北極星
- 数学：写像での不動点 $f(x_0)=x_0$ 不動点 x_0
- 物理学：不変量を見つけるとわかる。
エネルギー保存則、質量保存則
- 計測標準：ジョセフソン電圧標準、セシウム周波数標準
- アナログ集積回路内：基準電圧源、基準電流源
(チップ間、電源電圧変動、温度変動に依存せず一定)

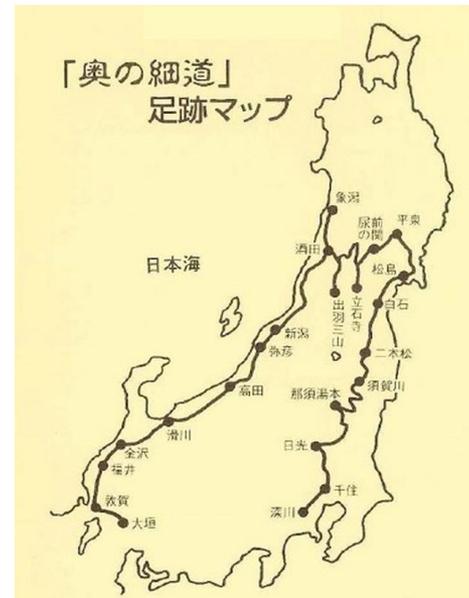


不易流行 (松尾芭蕉)

- **不易**: 変わらないもの、変えてはいけないもの
- **流行**: 時代に応じて変わらなければならないもの
- 「不易を知らざれば基立ちがたく、
流行を知らざれば風新たならず」



芭蕉と曾良



奥の細道

芭蕉 都市伝説

● 芭蕉は幕府隠密だった!?

- 徳川家(日光)礼賛の傾向
- 三重県伊賀市出身
- 奥の細道は各藩の様子を探るため?
旅費は幕府から?

● 日光での回路とシステム分野の初の国際会議 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems

2019年8月 栃木県日光市にて開催
群馬大学がホスト役



究極の不易「物理量」

SI 単位系 (International System of Units)

メートル m , キログラム kg , 秒 s , アンペア A ,
ケルビン K , モル mol , カンデラ cd

対応する物理量

長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物質質量、光度

定義(2018年に変更決議、2019年5月から実施)

セシウム133原子振動数 $\Delta\nu_{Cs}$ 9192631770 Hz

真空における光速度 c 299792458 m/s

プランク定数 h $6.62607015 \times 10^{-34}$ J s

電気素量 e $1.602176634 \times 10^{-19}$ C

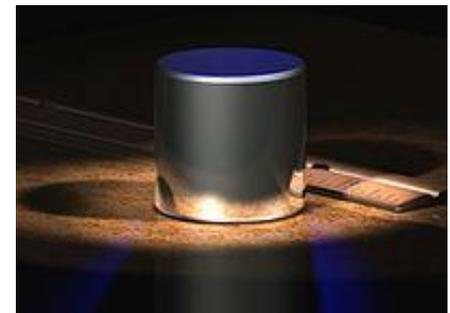
ボルツマン定数 k 1.380649×10^{-23} J/K

アボガドロ定数 N_A $6.02214076 \times 10^{23}$ mol⁻¹

周波数 540×10^{12} Hz 単色光の発光効率 K_{cd} 683 lm/W



メートル原器は
1960年に廃止



キログラム原器は
2019年に廃止

工学センスの重要性

円周率の工学設計での使用桁数

$\pi = 3.14159\ 26535\ 89793\ 23846\ 26433\ 83279\ 50288\ \dots$

小惑星探査機「はやぶさ」 16桁

指輪の制作工房 3桁

砲丸の工場 10桁

陸上競技場のトラック 5桁

タイヤメーカー 企業秘密

モノづくりにおいて精度が重要

(桜井進氏)

逆に言えば、現状そのアプリケーションではそれ以上の精度不要

発表内容

- 起： 基準信号の重要性の気付き
- 承： 研究事例
 - 基準電圧・電流源研究
 - 時間デジタイザ回路研究
- 転： 不易流行
- **結**： まとめ

ものづくりと基準

- 「ものづくり」は「ばらつき」との戦い



「基準」がしっかりしていると「ばらつき」を抑制できる

- アナログ/ミクストシグナル回路での
(自動)調整技術、(自己)校正技術



「基準」を明確にする

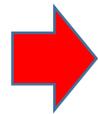
まとめ

- アナログ集積回路設計で基準信号に目を向ける



アナログ集積回路設計への視野が広がる

- 温度不感の基準電圧源・電流源の研究紹介



まだまだ純粋アナログ回路研究開発の余地あり

- 時間デジタイザ回路の線形性化の研究紹介

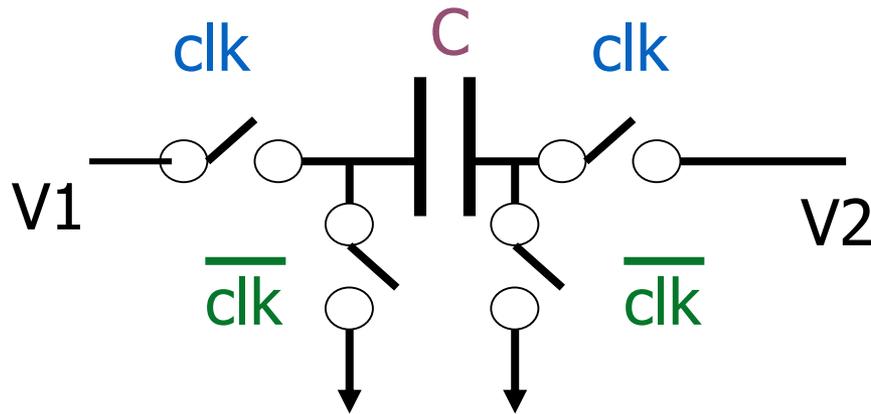
Regression to origin:

新しい時代のテクノロジー, EDA, アプリケーション下での
アナログ回路研究

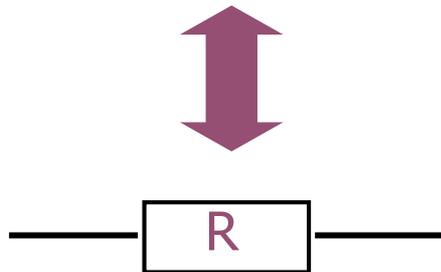
古人の跡を求めず、古人の求めたるところを求めよ

(松尾芭蕉)

付録： スイッチトキャパシタ回路

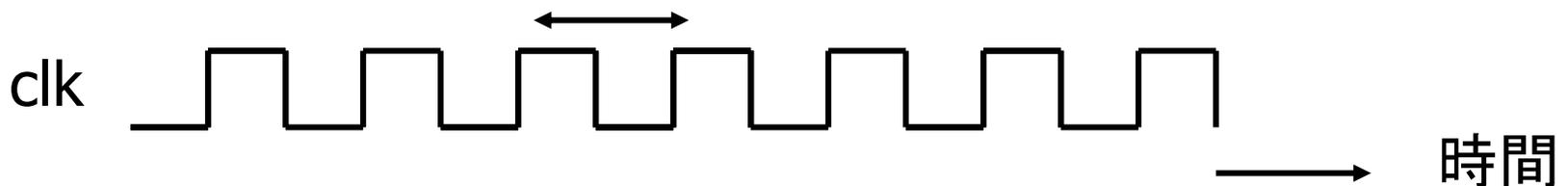


- 容量 C とスイッチで等価的に抵抗 R を実現
- MOSスイッチ使用
- 米国カルフォルニア大学の大学院生が考案
- 多くの製品に使用。



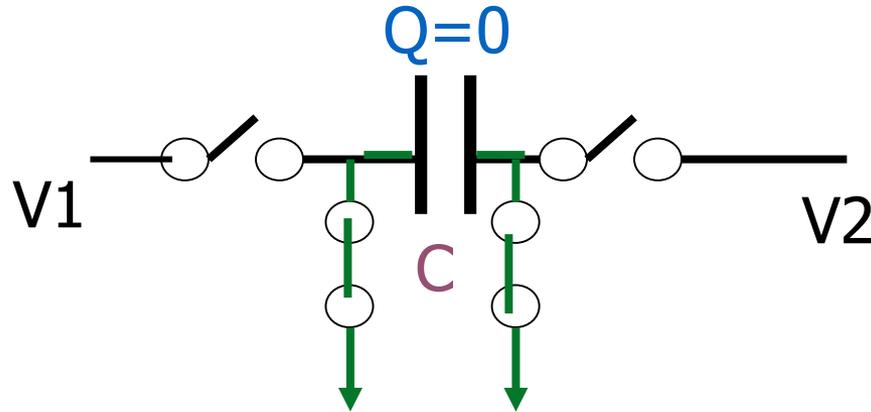
$$R = T / C$$

T : clk 周期

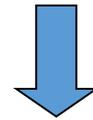


スイッチド・キャパシタ回路の動作原理

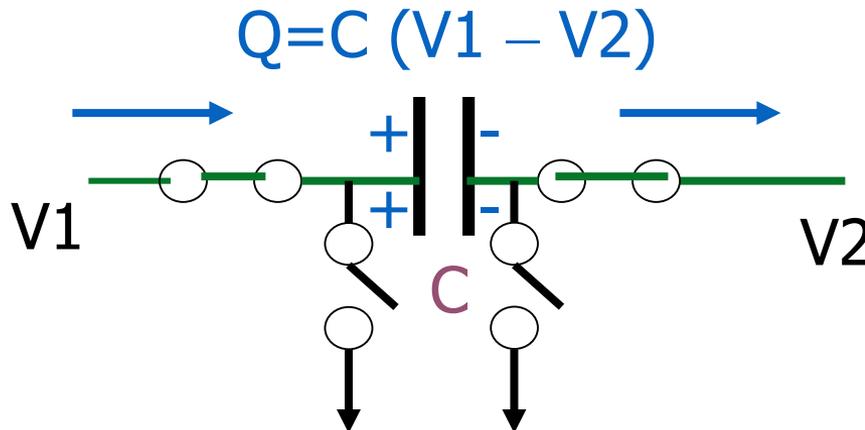
clk=low
のとき



時間Tに電荷
 $Q=C(V1 - V2)$
が流れる。



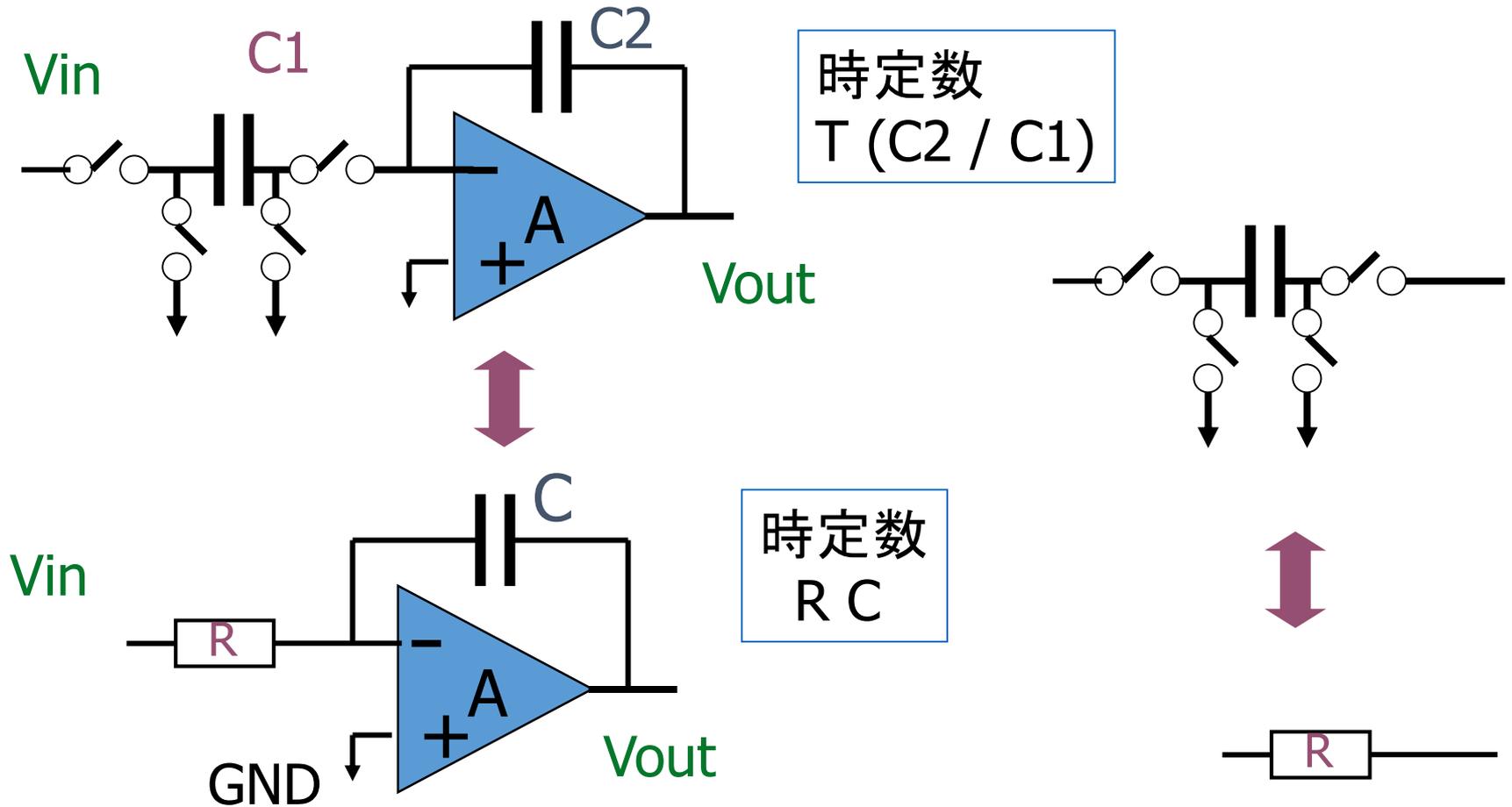
clk=high
のとき



$$I = \frac{C}{T}(V1 - V2)$$
$$= \frac{1}{R}(V1 - V2)$$

$$\therefore R = \frac{T}{C}$$

スイッチドキャパシタ積分回路



謝 辞

有益なコメントをいただきました

小山高専教授 久保和良先生

群馬大学協力研究員 中谷隆之先生

に感謝いたします。