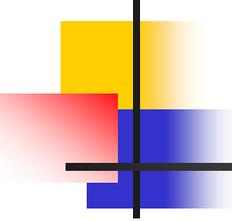


# 電子回路と計測制御技術

群馬大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻  
小林春夫

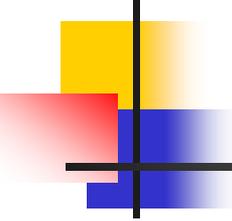
**連絡先:** 〒376-8515 群馬県桐生市天神町1丁目5番1号  
群馬大学工学部電気電子工学科  
電話 0277 (30) 1788 FAX: 0277 (30)1707  
e-mail: k\_haruo@el.gunma-u.ac.jp



# 発表内容

---

- アナログ電子回路と計測制御技術
- AD変換器
  - 計測制御機器のキーコンポーネント
  - 高性能化のためには計測制御技術が必要
- ADCでの計測制御・信号処理技術による高性能化
  - ① パイプラインADC
  - ② 逐次比較近似ADC
- まとめ



# 発表内容

---

- アナログ電子回路と計測制御技術
- AD変換器
  - 計測制御機器のキーコンポーネント
  - 高性能化のためには計測制御技術が必要
- ADCでの計測制御・信号処理技術による高性能化
  - ① パイプラインADC
  - ② 逐次比較近似ADC
- まとめ

# 計測制御機器とアナログ回路

計測器(電子計測器)

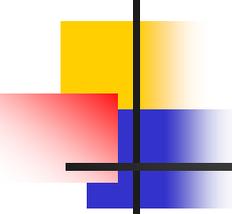
制御システム(ファクトリーオートメーション):

➡ アナログ回路は重要

例:



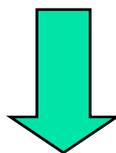
デジタルオシロスコープ内のAD変換器



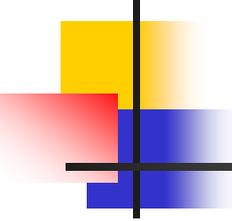
# アナログ電子回路に 計測制御技術が必要

---

微細半導体アナログIC, ミクストシグナルIC  
高性能化のために  
計測技術、制御技術の考え方がより重要

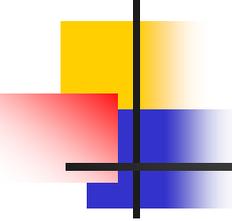


チップ内計測制御技術



# アナログ回路と計測工学

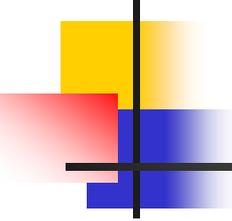
- ADC/DACのチップ内自己校正
  - ➡ 校正技術は以前から電子計測器で使用
- ADC/DACの非線形性、電源電圧、電流、温度、基板ノイズ、ジッタ・タイミングの“チップ内計測技術”がより重要。
- 計測した値に基づき、“チップ内制御・信号処理・校正”を行う。
- アナログ回路のテスト法・テスト容易化設計も重要。



# アナログ回路と制御工学

---

- 微細CMOSではバイアス回路が重要
  - バイアス電圧制御(regulation)
- 自動可変ゲインアンプ(AGC)
- アナログフィルタの自動調整
- 電源回路の制御
- 設計・解析手法:
  - ラプラス変換、ステップ応答、ボード線図、ナイキスト安定判別等の線形システム理論



# 発表内容

---

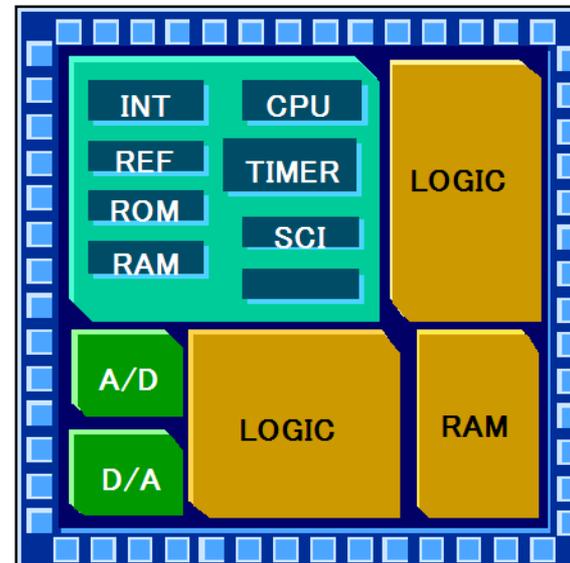
- アナログ電子回路と計測制御技術
- AD変換器
  - 計測制御機器のキーコンポーネント
  - 高性能化のためには計測制御技術が必要
- ADCでの計測制御・信号処理技術による高性能化
  - ① パイプラインADC
  - ② 逐次比較近似ADC
- まとめ

# デジタル技術をささえる AD/DA変換器

自然界の信号は  
アナログ

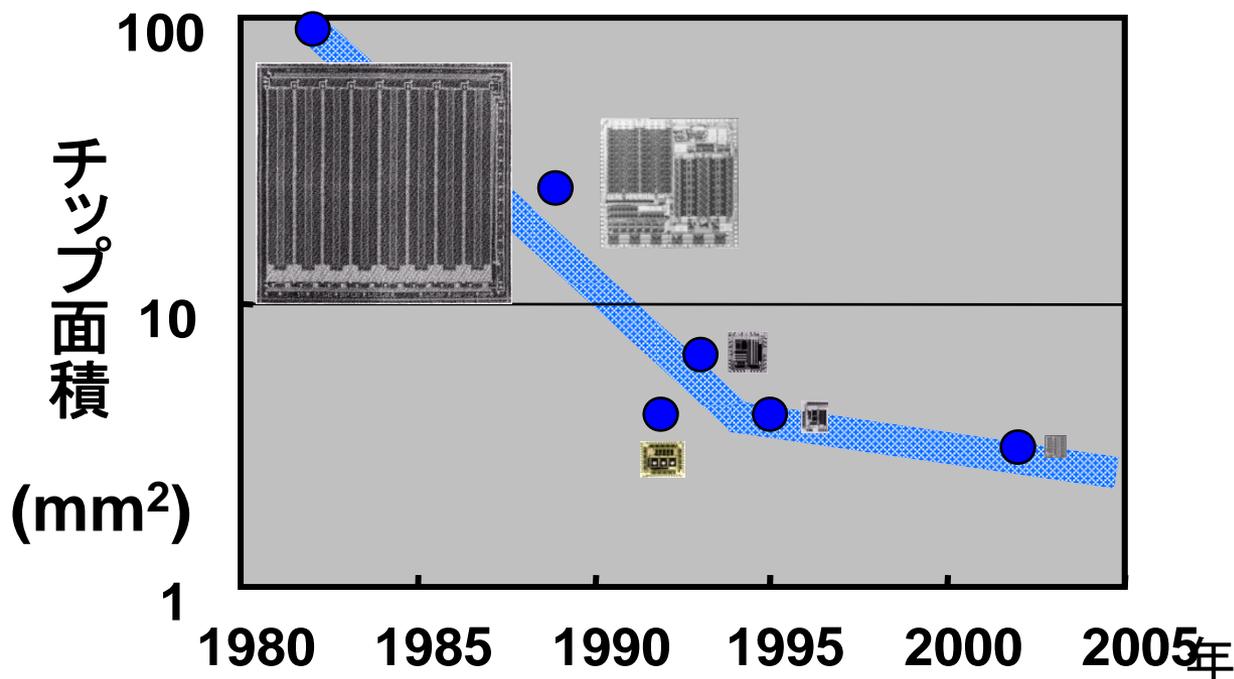


LSIでの信号処理は  
デジタル



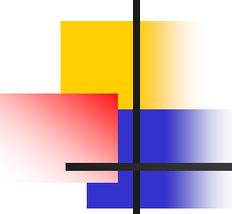
# AD変換器の熾烈な研究開発競争

半導体プロセス、アーキテクチャ、回路構成の進歩により  
性能向上スピードがデジタルLSI以上。



武蔵工大  
堀田先生  
作成資料

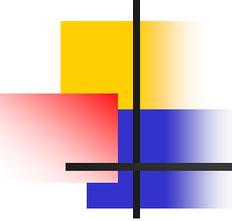
10ビットビデオ用AD変換器のチップ面積推移



# 発表内容

---

- アナログ電子回路と計測制御技術
- AD変換器
  - 計測制御機器のキーコンポーネント
  - 高性能化のためには計測制御技術が必要
- ADCでの計測制御・信号処理技術による高性能化
  - ① パイプラインADC
  - ② 逐次比較近似ADC
- まとめ



# パイプラインADCの背景

---

- **パイプラインADCの位置づけ**

CMOS ADCで高分解能、中高速で  
有力なアーキテクチャ。

産業界で広く用いられている。

- **ナノCMOSでの実現**

ミスマッチによる精度劣化、

オペアンプのゲインを得るのが難しい

高精度化が難しい

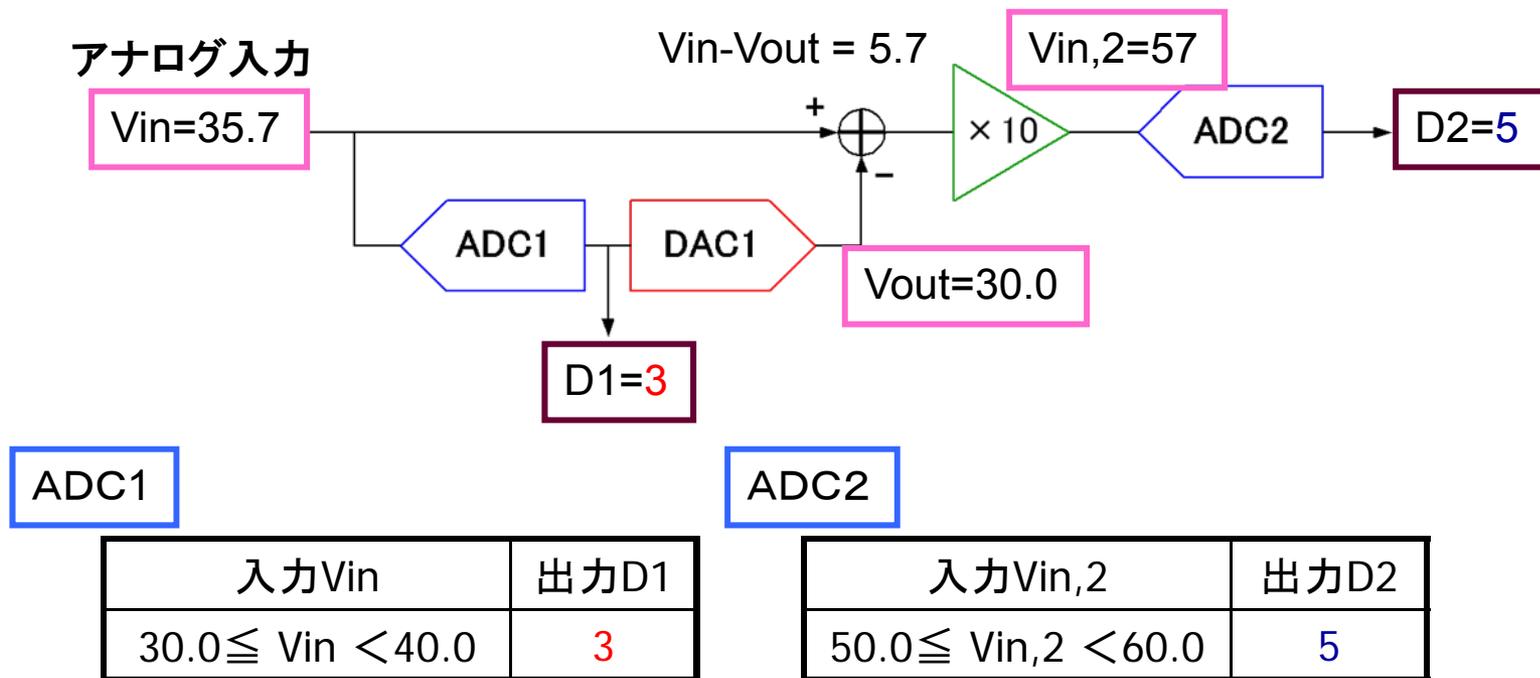
計測制御技術による

# パイプラインADCの高性能化

## 自己校正技術

- 内部回路(DA変換器、利得アンプ)の  
不正確さを計測して、  
その値をテーブルに記憶。  
デジタル演算で補正。
- 誤差計測回路は  
パイプラインADC自体を用いる。

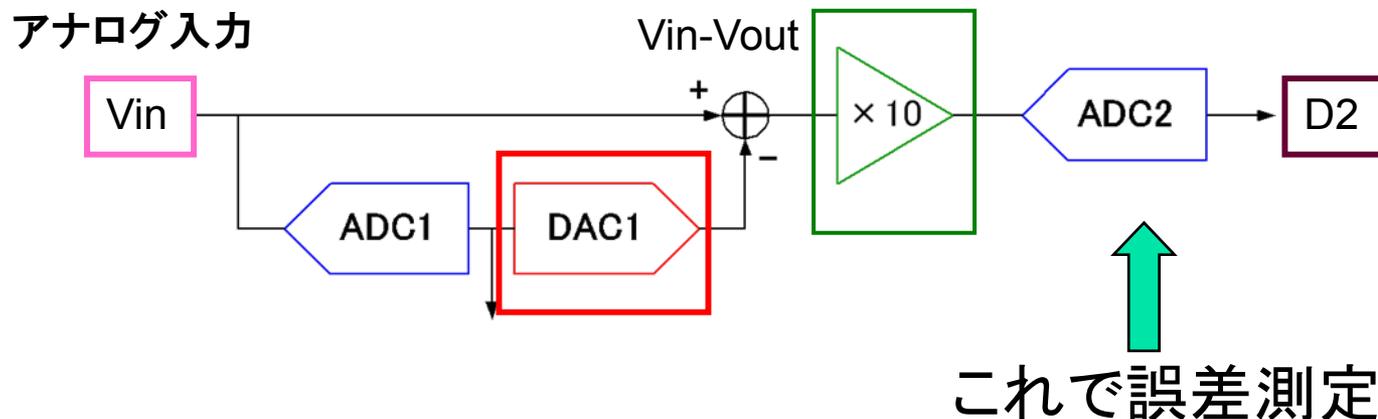
# パイプラインADCの構成と動作



出力  $D_{out} = 3 \times 10 + 5 = 35$

# パイプラインADC全体の 精度劣化要因

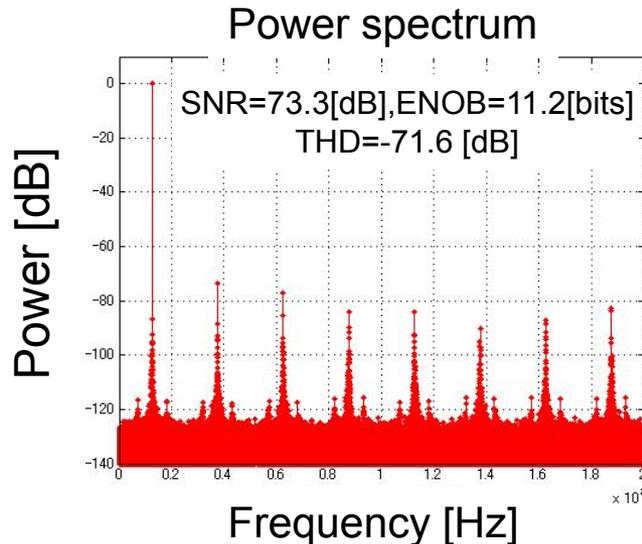
ADC1の非線形性の影響	問題	小
<u>DACの非線形性の影響</u>	問題	大
<u>段間アンプのゲイン誤差の影響</u>	問題	大



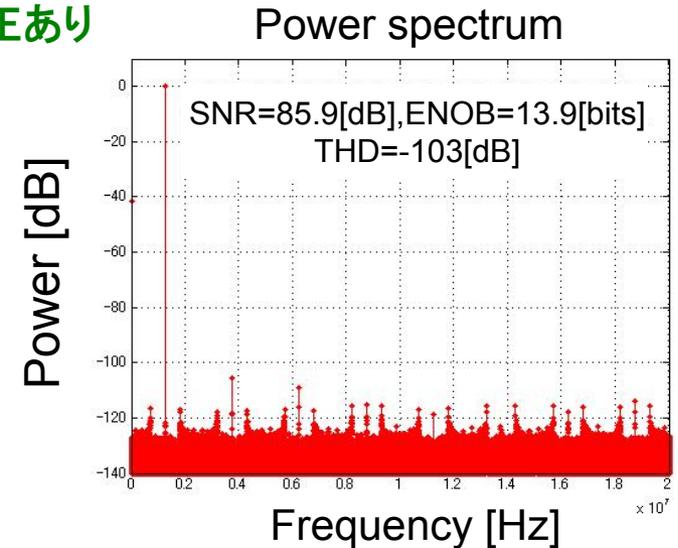
# 段間アンプのゲイン誤差の自己校正 (シミュレーション)

## 単一正弦波入力の出カパワースペクトル

自己校正なし

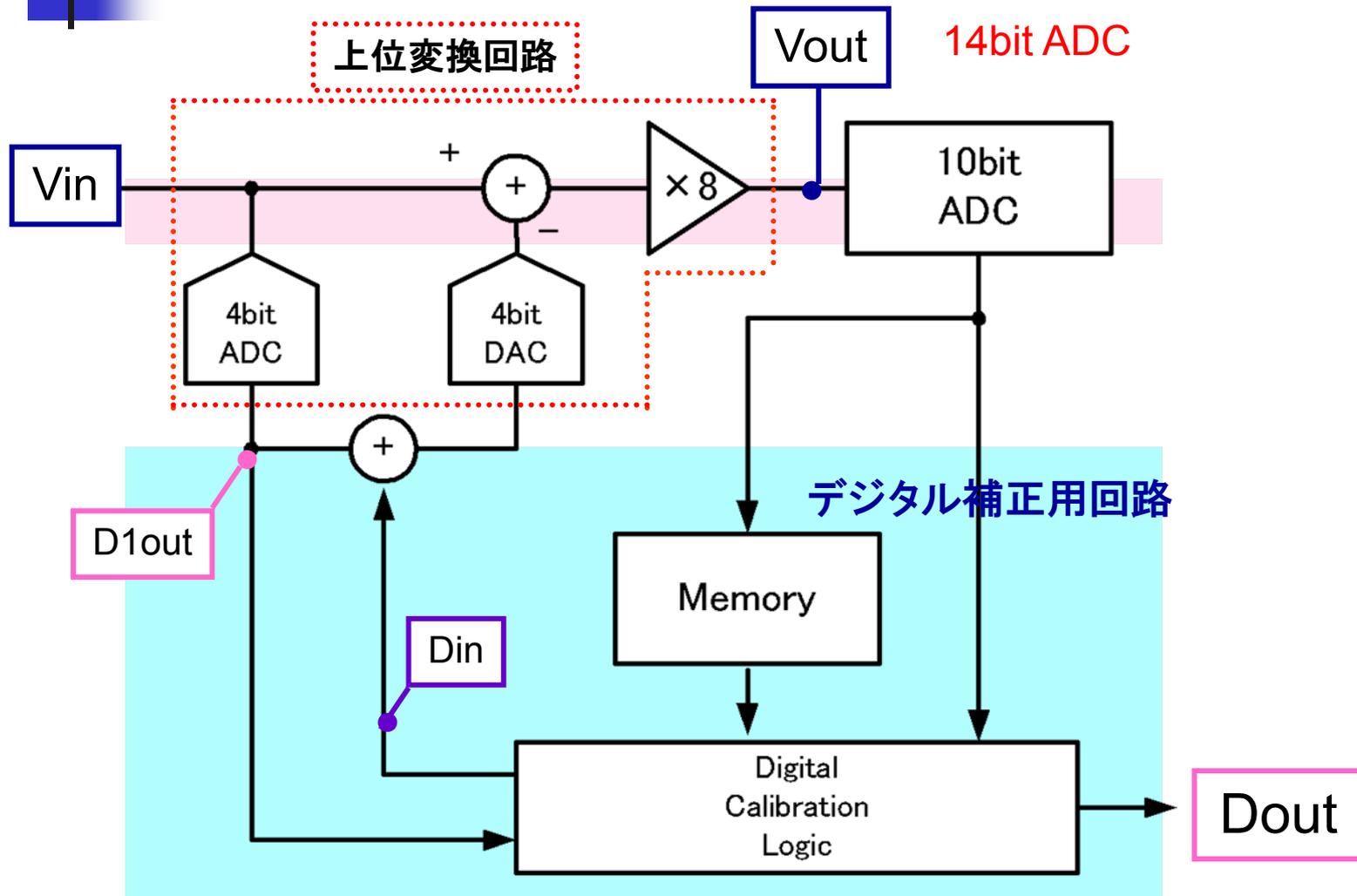


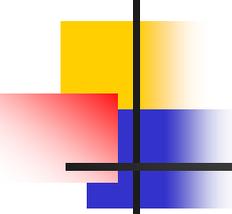
自己校正あり



SNDR 12.7dB (有効ビット2.7bits) 向上

# 自己校正回路を含んだ パイプラインADC全体回路





# ADC自己校正と計測制御技術

---

- フォアグラウンド自己校正

通常動作をストップして  
自己校正のための時間をもつ



計測技術

- バックグラウンド自己校正

通常動作はストップしない。  
自己校正はユーザからは全く見えない。



適応制御技術

# ADC自己校正技術の 理論的基礎は未解決

計測制御研究者  
の問題

ADC内部回路の誤差

→ ADC内回路自体を用いて測定

→ 測定自体に誤差  
測定内容も制限

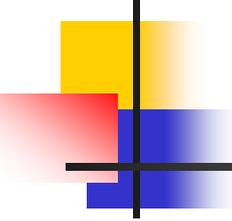
どの条件で、なぜ自己校正で精度がでるのか？

結果としてADC精度確保。

個別技術では解決。

一般論では未解決。

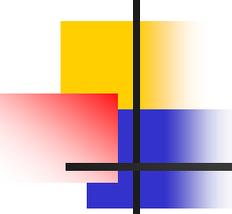
Abidi 先生 (UCLA)  
指摘



# 発表内容

---

- アナログ電子回路と計測制御技術
- AD変換器
  - 計測制御機器のキーコンポーネント
  - 高性能化のためには計測制御技術が必要
- ADCでの計測制御・信号処理技術による高性能化
  - ① パイプラインADC
  - ② 逐次比較近似ADC
- まとめ



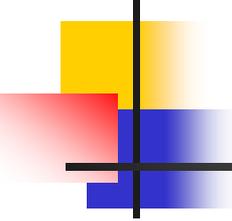
# 逐次比較近似AD変換器の背景

- 高分解能
- 中速
- 低消費電力
- 小型・小チップ面積

産業界で広く使用

- 車載用マイコンに混載
- ペンデジタイザ
- 工業用制御機器

- 大部分がデジタル回路で構成  
ナノCMOSでの実現に適す



計測制御技術による

# 逐次比較近似ADCの高性能化

---

デジタル誤差補正技術により

- 高信頼性化
- 高速化

冗長性をもち、回路の非理想要因を許容して正解を出力。

非理想要因は計測しない。

# 逐次比較近似ADCの構成と動作

アナログ入力

Analog input  $u$

コンパレータ  
天秤  
Comparator

S/H

サンプル  
ホールド回路

Analog output

天秤の原理で動作

天秤がコンパレータ  
分銅がDAC

SAR

SAR logic

Po1

Po2

Po3

Po4

Clock

SAR 論理回路

1

2

3

4

MSB

LSB

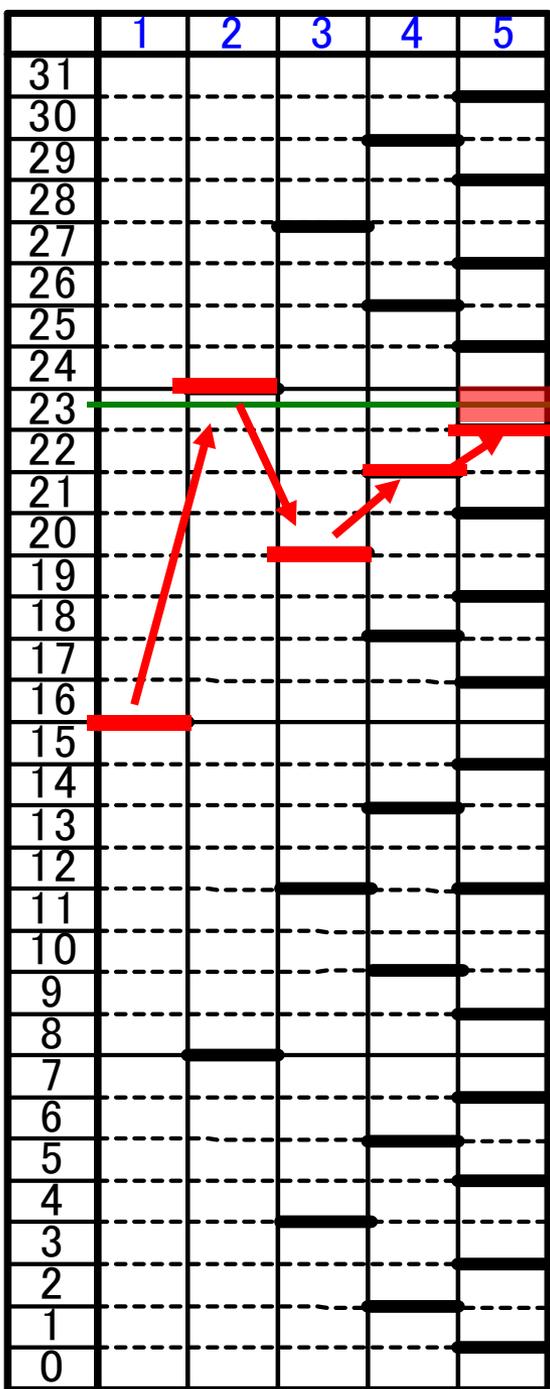
Digital output

DAC

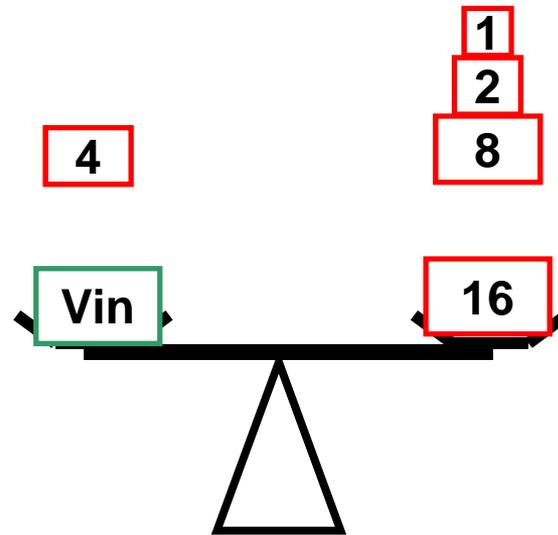
DA変換器  
分銅

デジタル出力

# 5ビット 逐次比較近似ADC 2進探索アルゴリズム動作



23.5 動作例: アナログ入力 23.5 のとき



$$\boxed{\text{Vin}} = \begin{matrix} \boxed{1} \\ \boxed{2} \\ \boxed{8} \\ \boxed{16} \end{matrix} - \boxed{4} = \boxed{23}$$

# 2進探索アルゴリズム コンパレータ誤判定時の動作



$V_{in}=23.5$  動作例: アナログ入力 23.5のとき

1ステップ目で誤判定したとき

誤差大

デジタル  
出力15

$V_{ref}(1)=16$

$V_{ref}(2)=8$

$V_{ref}(3)=12$

$V_{ref}(4)=14$

$V_{ref}(5)=15$

デジタル出力 15

# 非2進探索 冗長アルゴリズム

kステップ目の判定  $d(k) : +1$  or  $-1$

## 2進探索アルゴリズム

$$D_{out} = 2^4 + d(1)2^3 + d(2)2^2 + d(3)2^1 + d(4) + d(5)0.5 - 0.5$$

非2進アルゴリズム: 5ビット分解能を6ステップで実現。

## 従来の非2進探索アルゴリズム

$$D_{out} = 2^4 + d(1)\gamma^4 + d(2)\gamma^3 + d(3)\gamma^2 + d(4)\gamma^1 + d(5) + d(6)0.5 - 0.5$$

$$1 < \gamma < 2$$

アルゴリズムが一意的に決まる。  $\gamma = 2^{\frac{5}{6}}$

## 非2進探索アルゴリズムの一般化

$$D_{out} = 2^4 + d(1)p(2) + d(2)p(3) + d(3)p(4) + d(4)p(5) + d(5)p(6) + d(6)0.5 - 0.5$$

$p(k)$ を自由に決める。  $p(k)$ :分銅の重さ

# 非2進探索アルゴリズムの デジタル誤差補正原理

入力5のとき

2進探索

判定出力 : 101

$$Dout = 4 + 2 - 1 + 0.5 - 0.5 = 5$$

非2進探索

2通り

判定出力 : 1101

$$Dout = 4 + 1 + 1 - 1 + 0.5 - 0.5 = 5$$

判定出力 : 0111

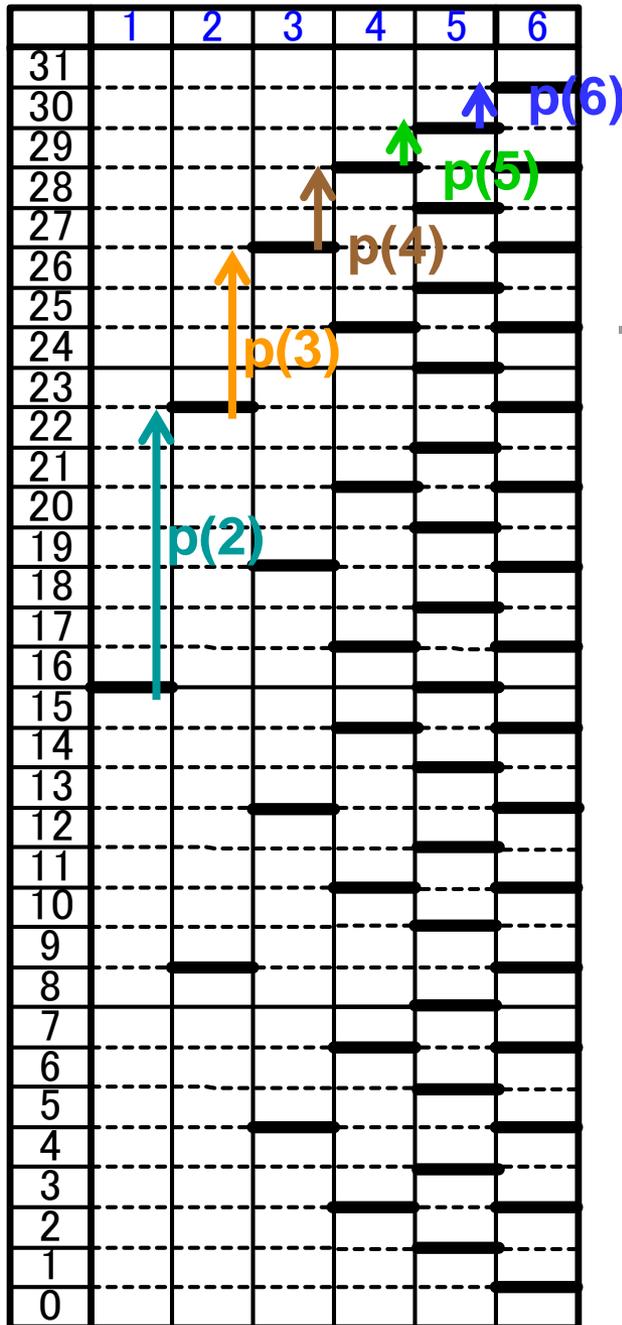
$$Dout = 4 - 1 + 1 + 1 + 0.5 - 0.5 = 5$$

1ステップ目で判定誤りをしてでも補正できる

# 非2進探索アルゴリズム

5ビット分解能(32レベル)

6ステップ (k=1,...,6)の場合



$$p(2)=7$$

$$p(3)=4$$

$$p(4)=2$$

$$p(5)=1$$

$$p(6)=1$$

と設計する。

分銅の重さに対応

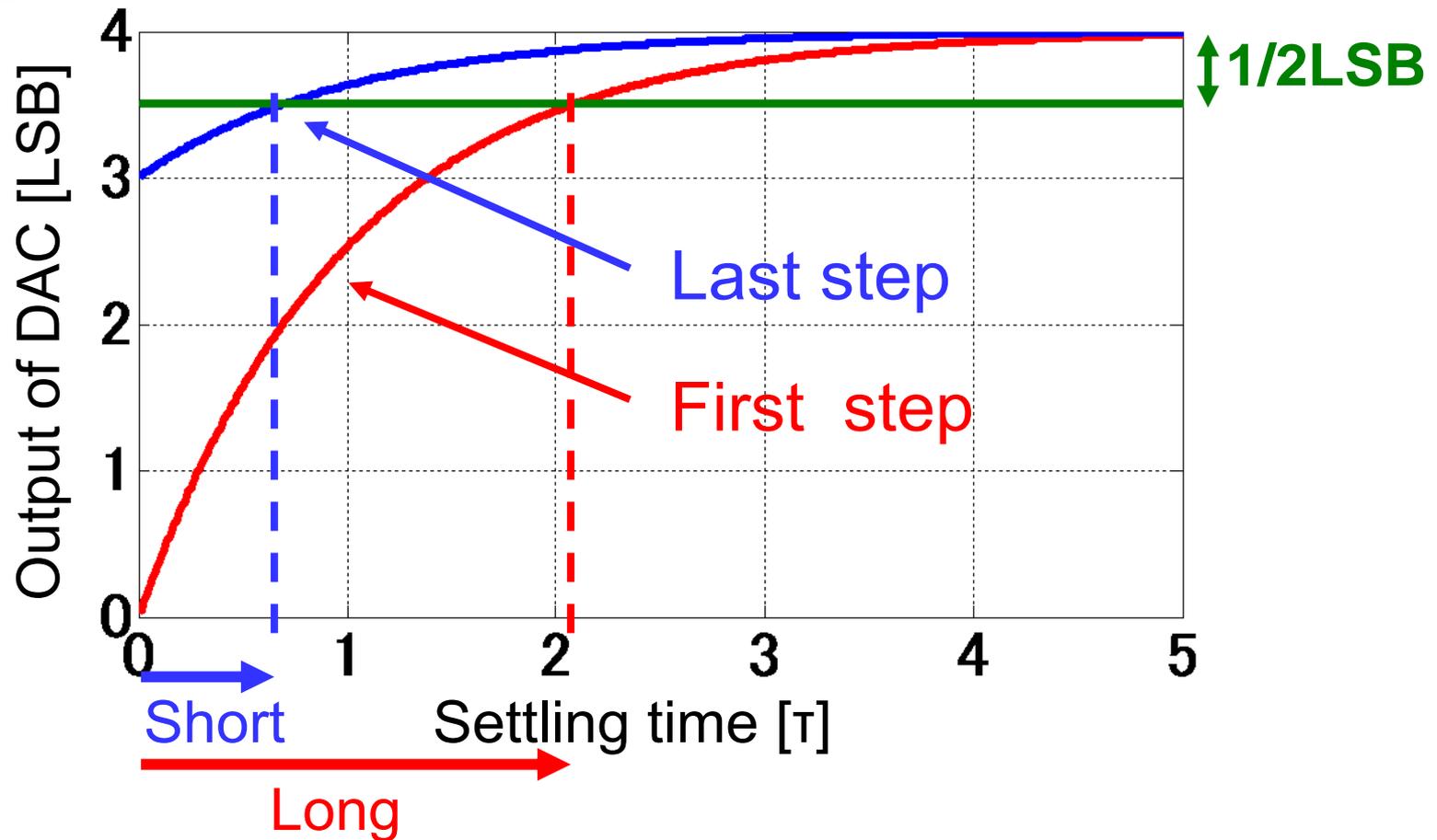
$$2^{5-1} = 1 + p(2) + p(3) + p(4) + p(5) + p(6)$$

$$2^4 = 1 + 7 + 4 + 2 + 1 + 1 = 16$$

$$2^{N-1} = 1 + \sum_{i=2}^M p(i)$$

を満たしている

# 参照電圧発生用の 内部DA変換器の整定時間



# 非2進探索アルゴリズムによる AD変換 高速化 (原理説明)

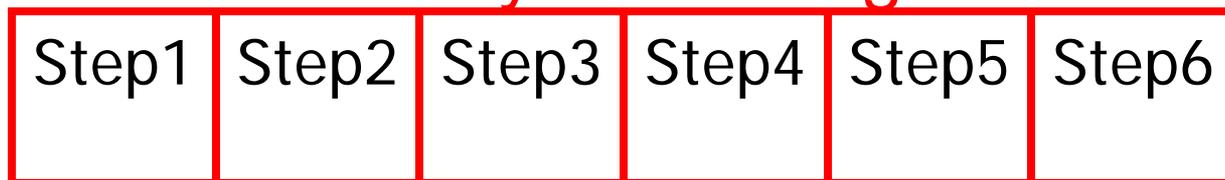
## Binary search algorithm



Exact DAC settling → Long  
time

A/D conversion time

## Non-binary search algorithm



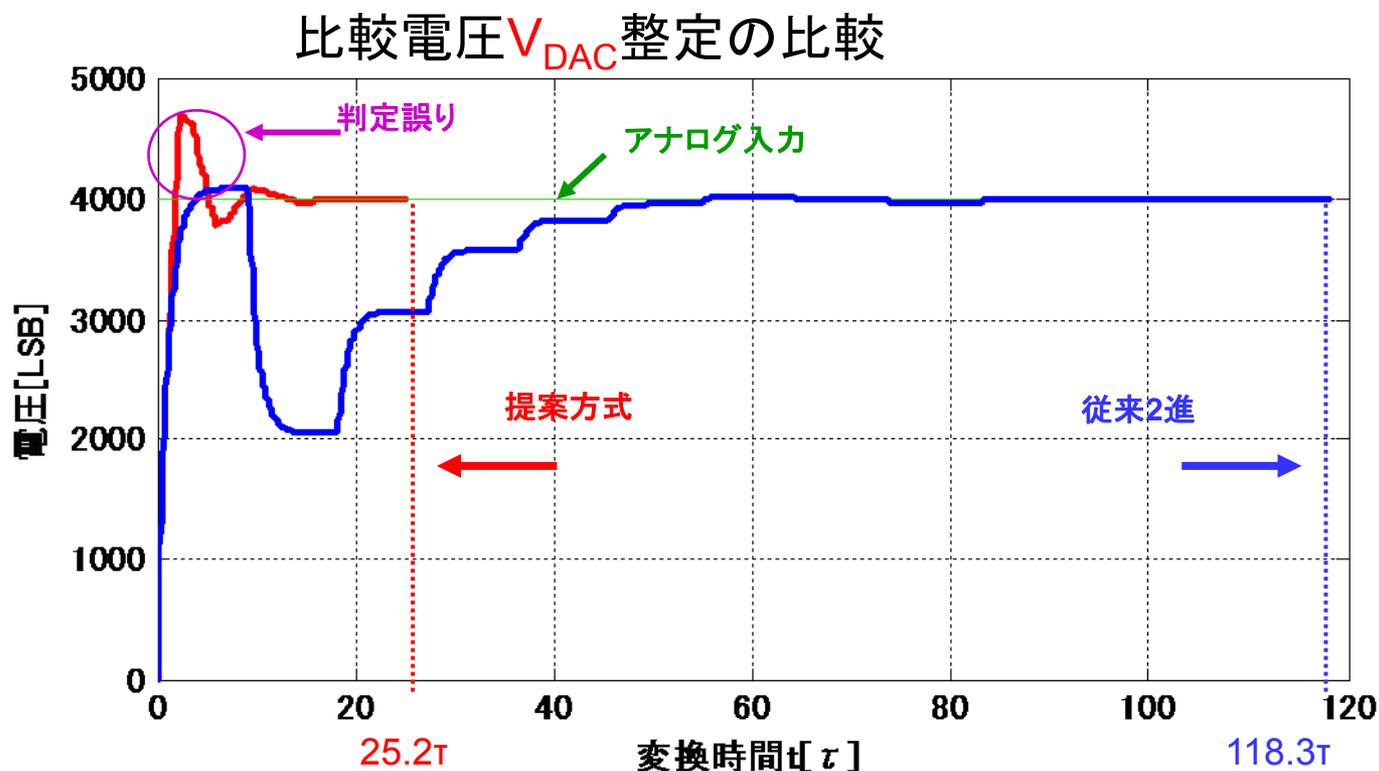
Correct incomplete settling error.

Incomplete DAC settling → Short

# 非2進探索アルゴリズムによる AD変換 高速化 (シミュレーション確認)

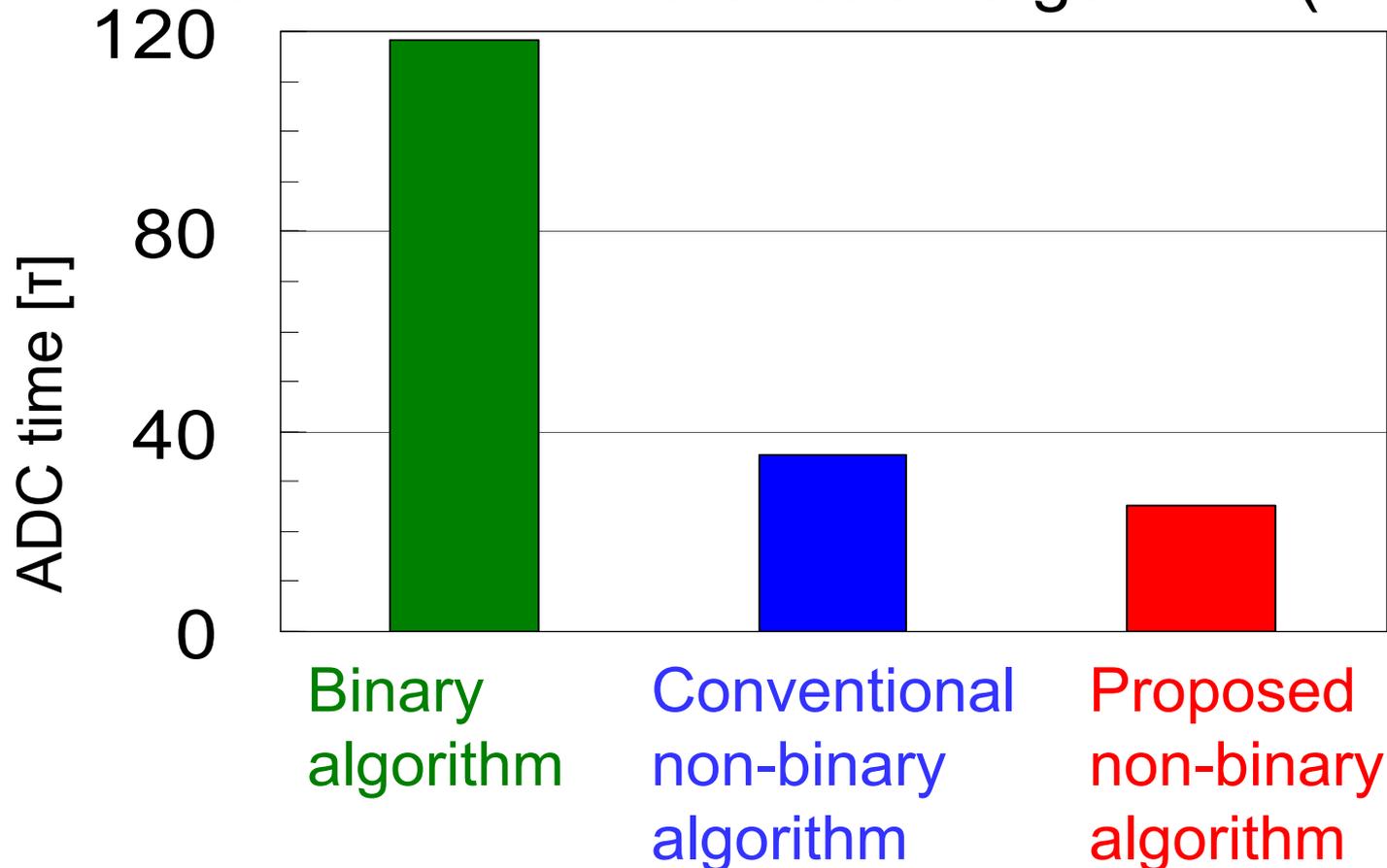
従来2進: 14ビット14ステップ 1サイクル9.1 $\tau$

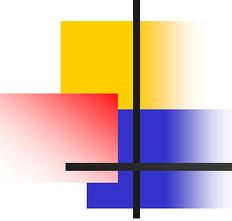
提案非2進: 14ビット22ステップ 1サイクル1.2 $\tau$



# AD変換スピードの比較

Conversion time of each algorithm (14-bit)

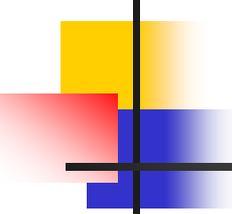




# 逐次比較ADCへの期待

---

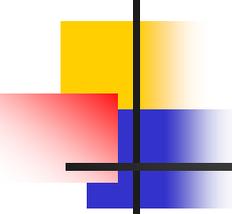
- 昔からの方式
  - 産業界で広く使用
  - 微細CMOS実現での研究活発
  - 冗長アルゴリズム(信号処理技術)
    - ➡ デジタル回路部だけの設計変更で
      - 高信頼性化
      - 高速化
- が可能。



# 発表内容

---

- アナログ電子回路と計測制御技術
- AD変換器
  - 計測制御機器のキーコンポーネント
  - 高性能化のためには計測制御技術が必要
- ADCでの計測制御・信号処理技術による高性能化
  - ③ パイプラインADC
  - ② 逐次比較近似ADC
- まとめ



# まとめ

---

キーコンポーネント

- アナログ電子回路  計測制御  
高性能化技術

- ADC高性能化の最先端

自己校正(高精度化)



計測制御技術

誤差補正(高速化)



信号処理技術