

# ヒストグラム法による 効率的なADCテスト条件

趙宇杰 桑名 杏奈 山本 修平 佐々木 優斗

小林 春夫 中谷 隆之 畠山 一実

群馬大学 理工学府 電子情報部門

佐藤 賢央 石田 嵩 岡本 智之 市川 保

ローム株式会社



群馬大学  
GUNMA UNIVERSITY

# Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

# Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

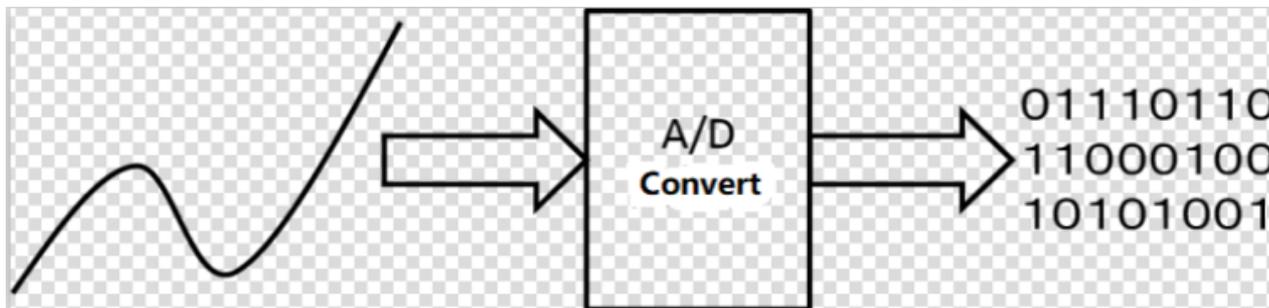
# 背景

- Digitalization の時代  
IoT (Internet of Things)
- Digitization はますます重要  
アナログ信号のデジタル信号への変換  
➡ AD変換器 (ADC)



◆ アナログ信号  
(音、光)

◆ デジタル信号  
(2進数)



高信頼性なシステムの要求  
⇒ 高品質・低コストなADC試験技術

# 研究目的

線形性はADCの重要性能指標

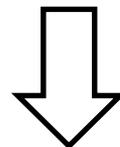


ADCの高品質低コスト線形性試験技術を開発

低速・高分解能ADCの試験

- 低速サンプリング
- 高解像度

そのままでは長い試験時間がかかる



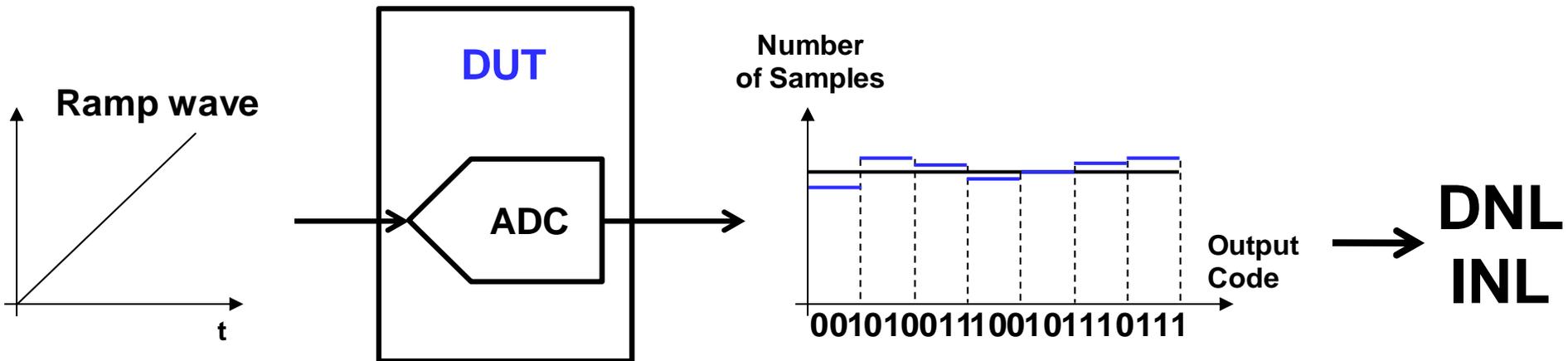
ヒストグラム法によるADC線形性試験で  
入力周波数とサンプリング周波数の  
「高効率な関係」を調べる

# Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

# ヒストグラム法でのADC直線性試験 1

## ■ヒストグラム法(ランプ波入力)

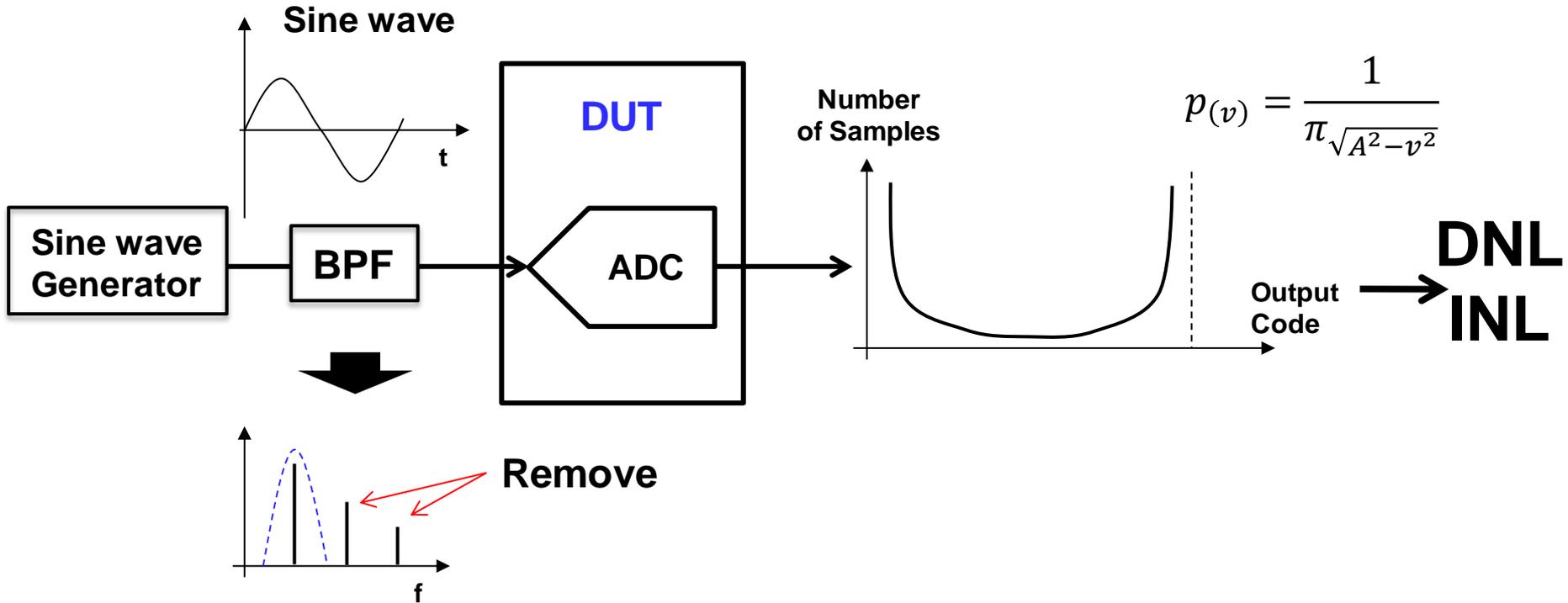


- ADCが完全に線形である場合  
すべてのビンのADC出力ヒストグラムは等しい
- 線形性の高いランプ信号の生成は困難  
(14bit 程度までのADCに適用)



# ヒストグラム法でのADC直線性試験 2

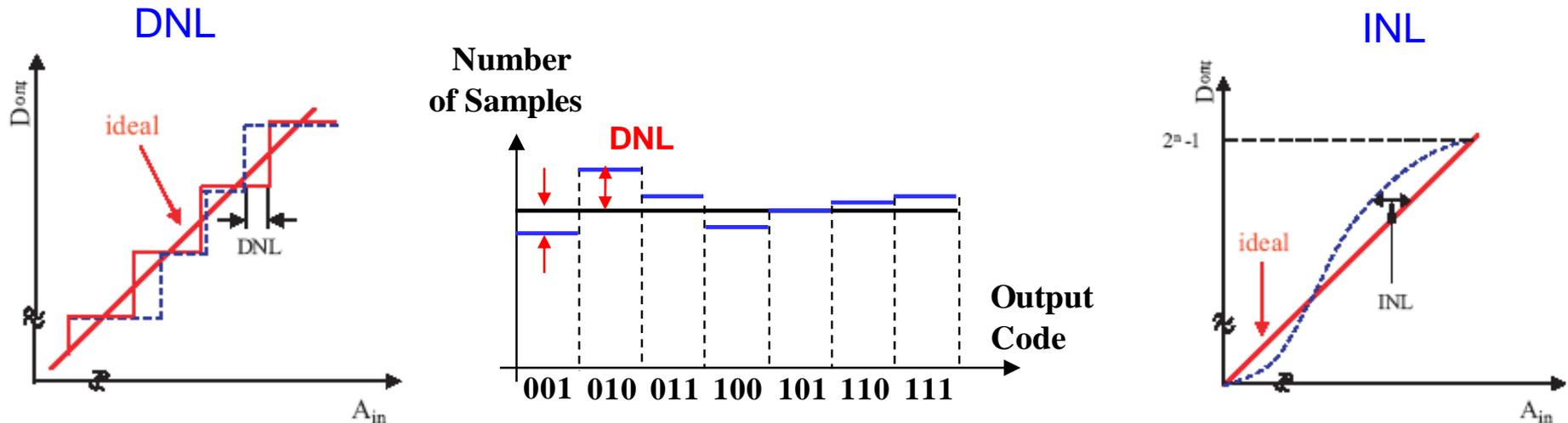
## ■ヒストグラム法(単一正弦波入力)



- アナログフィルター使用で低歪 正弦波を生成可能
- 出力コードの中央でサンプル数が少ない  
→ 多くの点数が必要(試験時間が長い)



# ADC 線形性 性能指標 (DNL, INL)



- **DNL:** Differential Non-Linearity 微分非線形性  
→ 実際のステップ幅と理想値の差
- **INL:** Integral Non-Linearity 積分非直線性  
→ 理想的な変換ラインからの偏差

$$INL(k) = \sum_{i=1}^k DNL(i)$$

# Outline

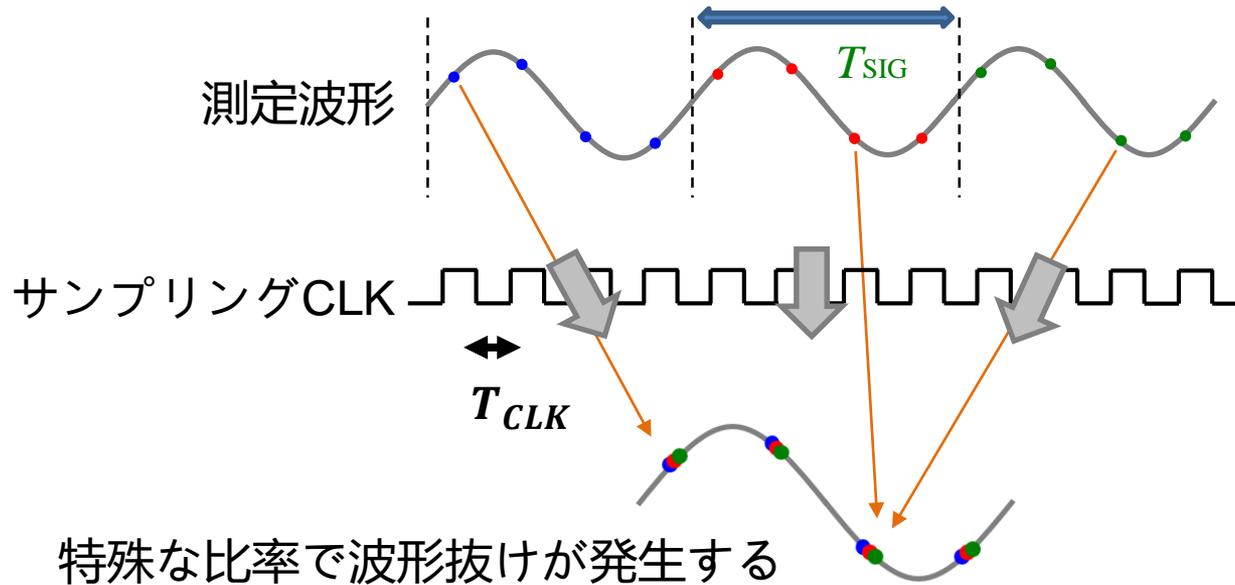
- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

# Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

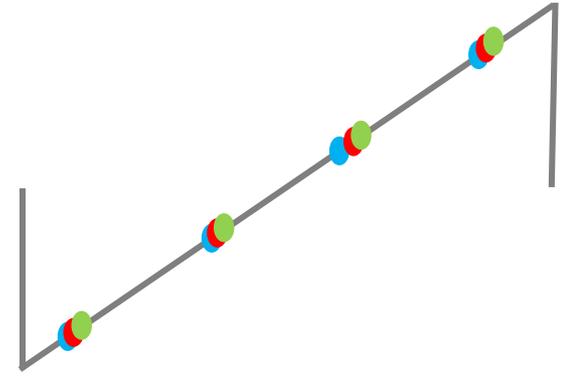
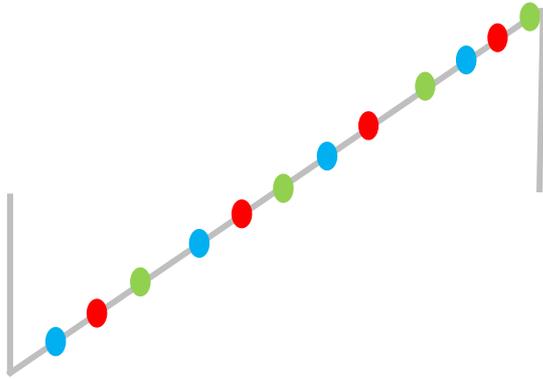
# 正弦波形取得での波形抜け

繰り返し波形を非同期でサンプリング → 1周期の波形

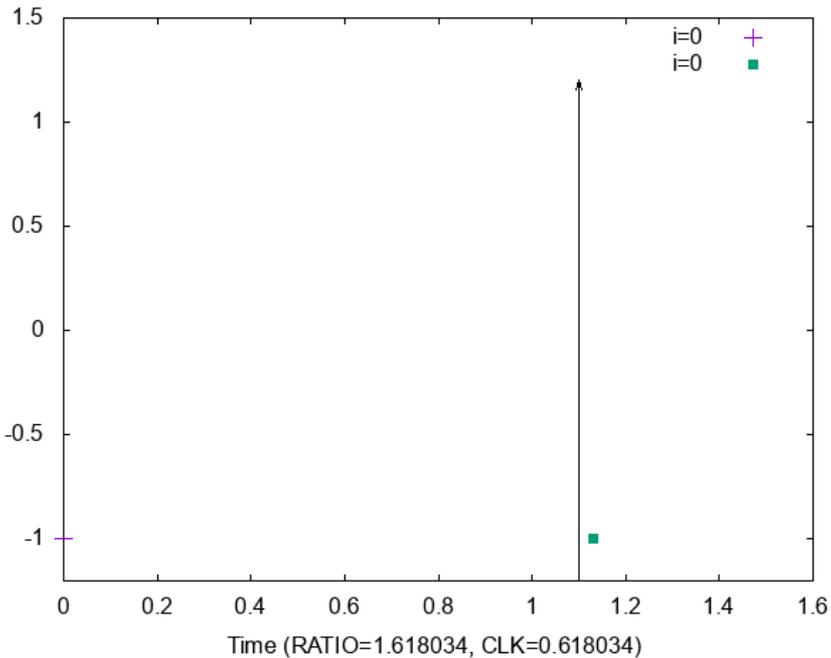


波形を再現するには大量のデータが必要です → テスト時間: 長い

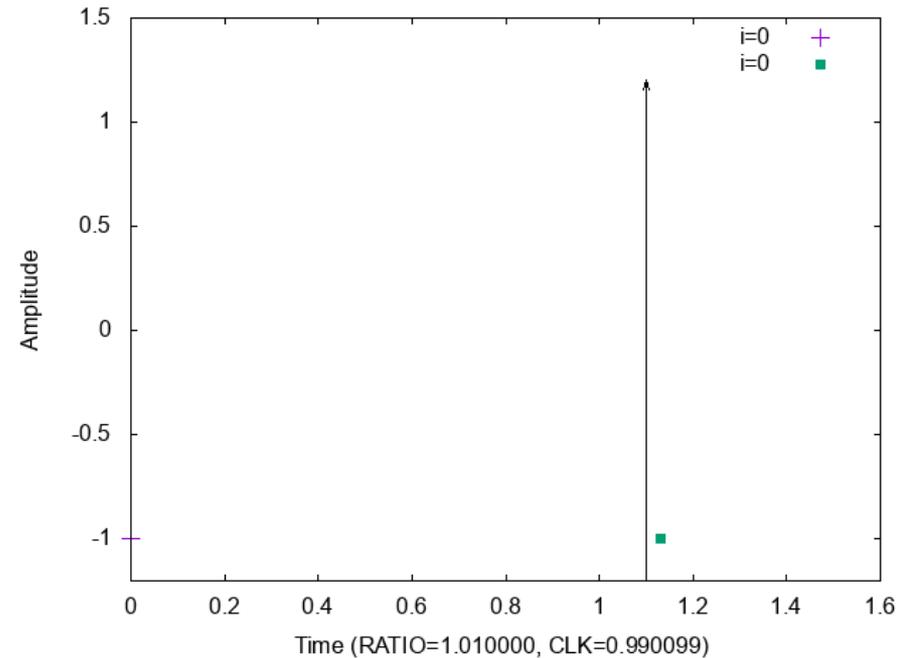
# ランプ波形取得での波形抜け



効率の良いサンプリング



波形抜け現象



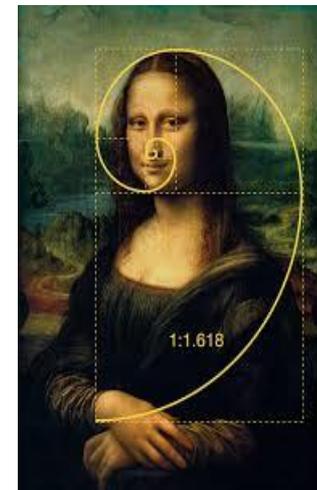
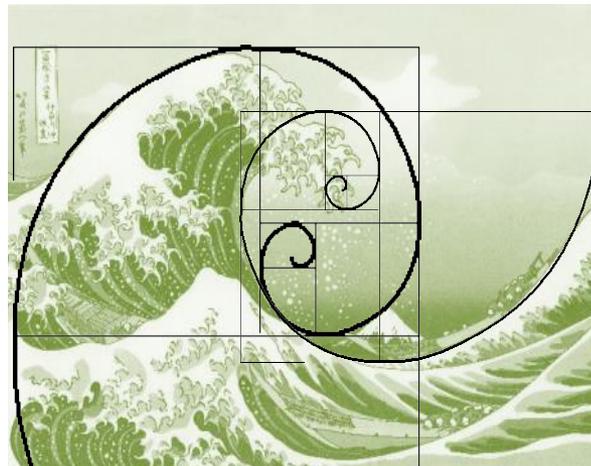
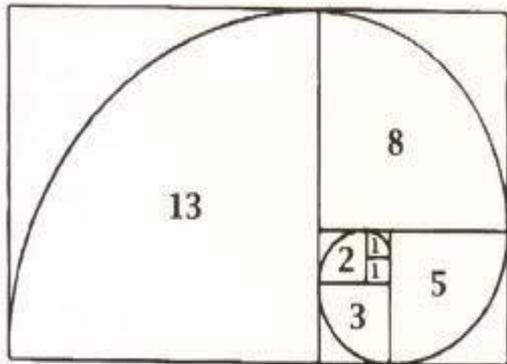
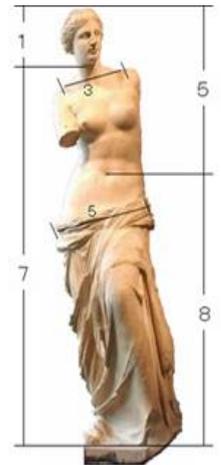
# Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - **黄金比サンプリング**
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

# 黄金比

黄金比:  $1.618033988749895 = \varphi$

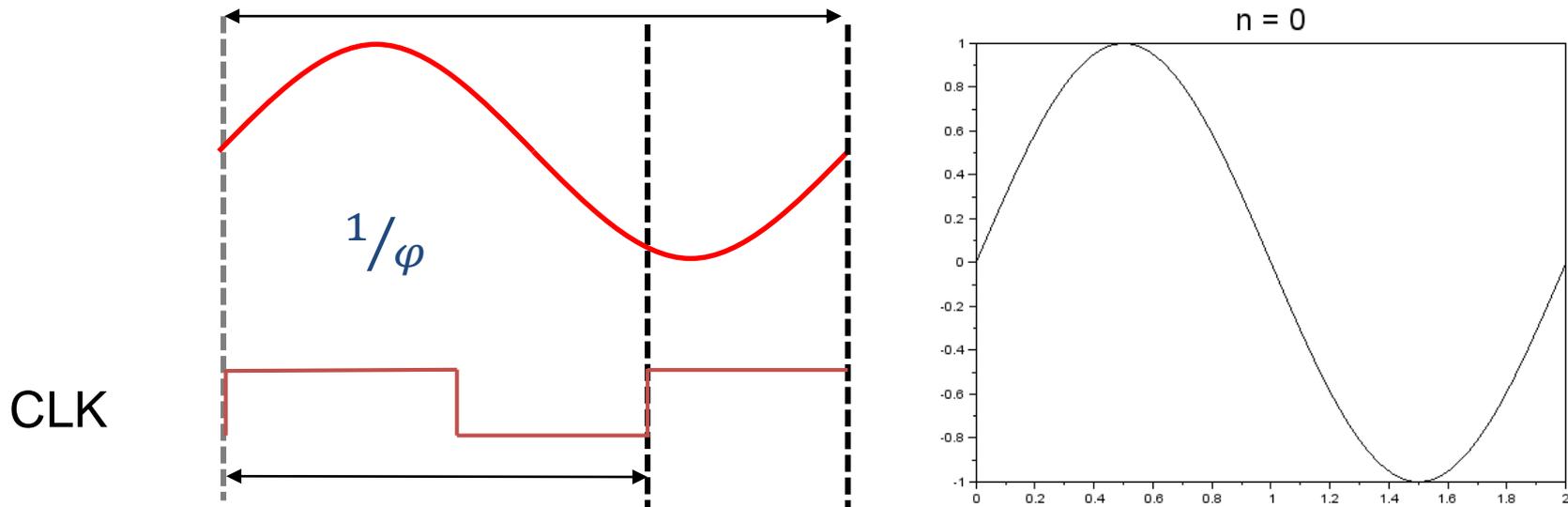
最も美しい比率



# 黄金比サンプリング

黄金比 $\varphi$        $f_{CLK} = \varphi \times f_{sig}$

$$\varphi = 1.6180339887\dots$$



最も波形取得効率の良いサンプリング条件

↓ 提案

Yuto Sasaki, Yujie Zhao, Anna Kuwana, Haruo Kobayashi,  
 "Highly Efficient Waveform Acquisition Condition in Equivalent-Time Sampling System",  
 27th IEEE Asian Test Symposium, Hefei, Anhui, China (Oct. 2018)

# 入力周波数とサンプリング周波数

ADC試験では

入力周波数  $f_{sig}$  とサンプリング周波数  $f_{CLK}$  を  
様々に変更したい。



$f_{CLK}$  ,  $f_{sig}$  の関係を

- 貴金属比
- 素数比



効率的ヒストグラム取得が  
期待できる

の場合を考える。

# Outline

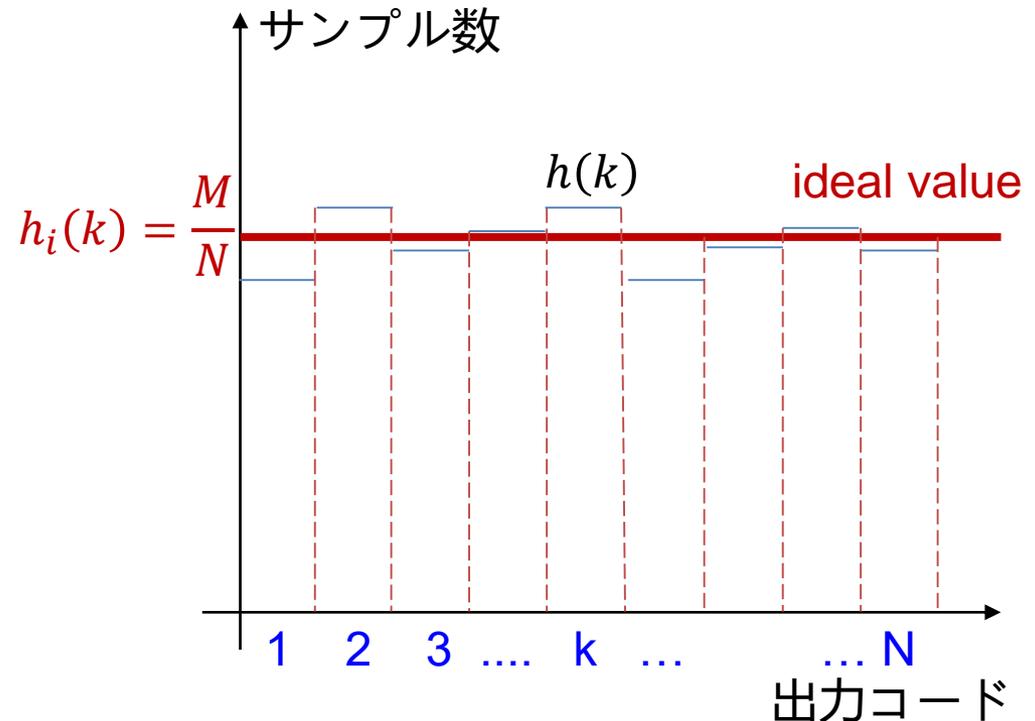
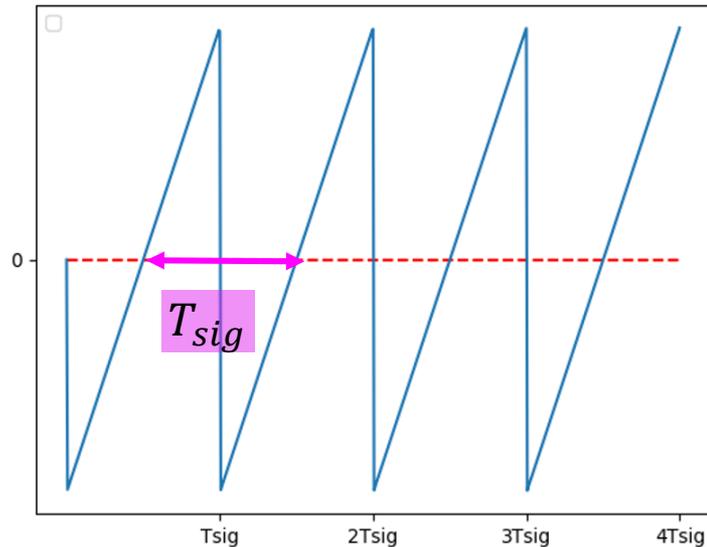
- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

# 貴金属比

黄金比の一般化  貴金属比

n			
0	1		
1	$\frac{1 + \sqrt{5}}{2}$	1.6180339887...	黄金比
2	$1 + \sqrt{2}$	2.4142135623...	白銀比
3	$\frac{3 + \sqrt{13}}{2}$	3.3027756377...	青銅比
4	$2 + \sqrt{5}$	4.2360679774...	
...		...	
n		$\frac{n + \sqrt{n^2 + 4}}{2}$	貴金属比の一般式

# のこぎり波入力時のヒストグラム



理想値  $h_i(k) = \frac{M}{N}, k = 1, 2, 3, \dots, N$       誤差  $e(k) = \frac{N \cdot h(k)}{M} - 1$

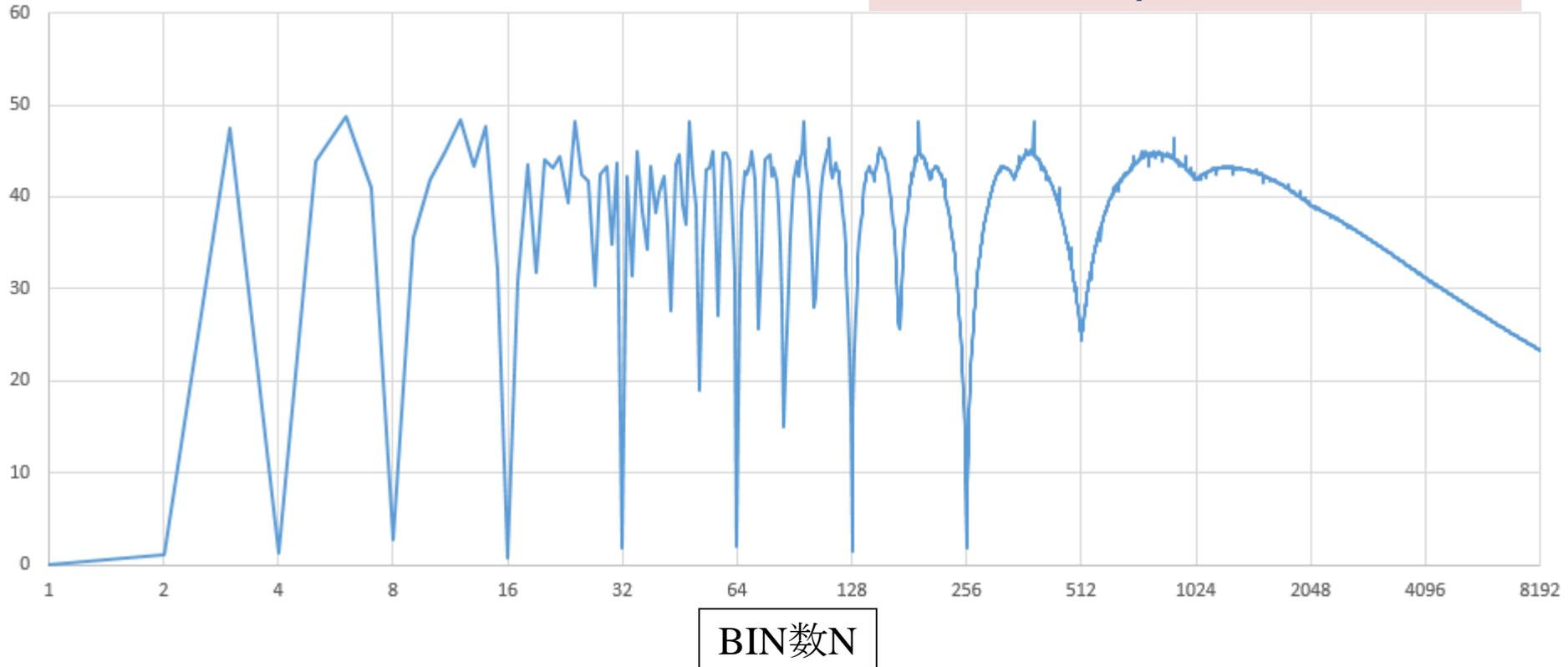
M: サンプル総数

N: ADC分解能 (ヒストグラムのbin数)

# RMSの計算

RMS

サンプリング点総数:  $M=65536$   
比率は黄金比 $\phi$

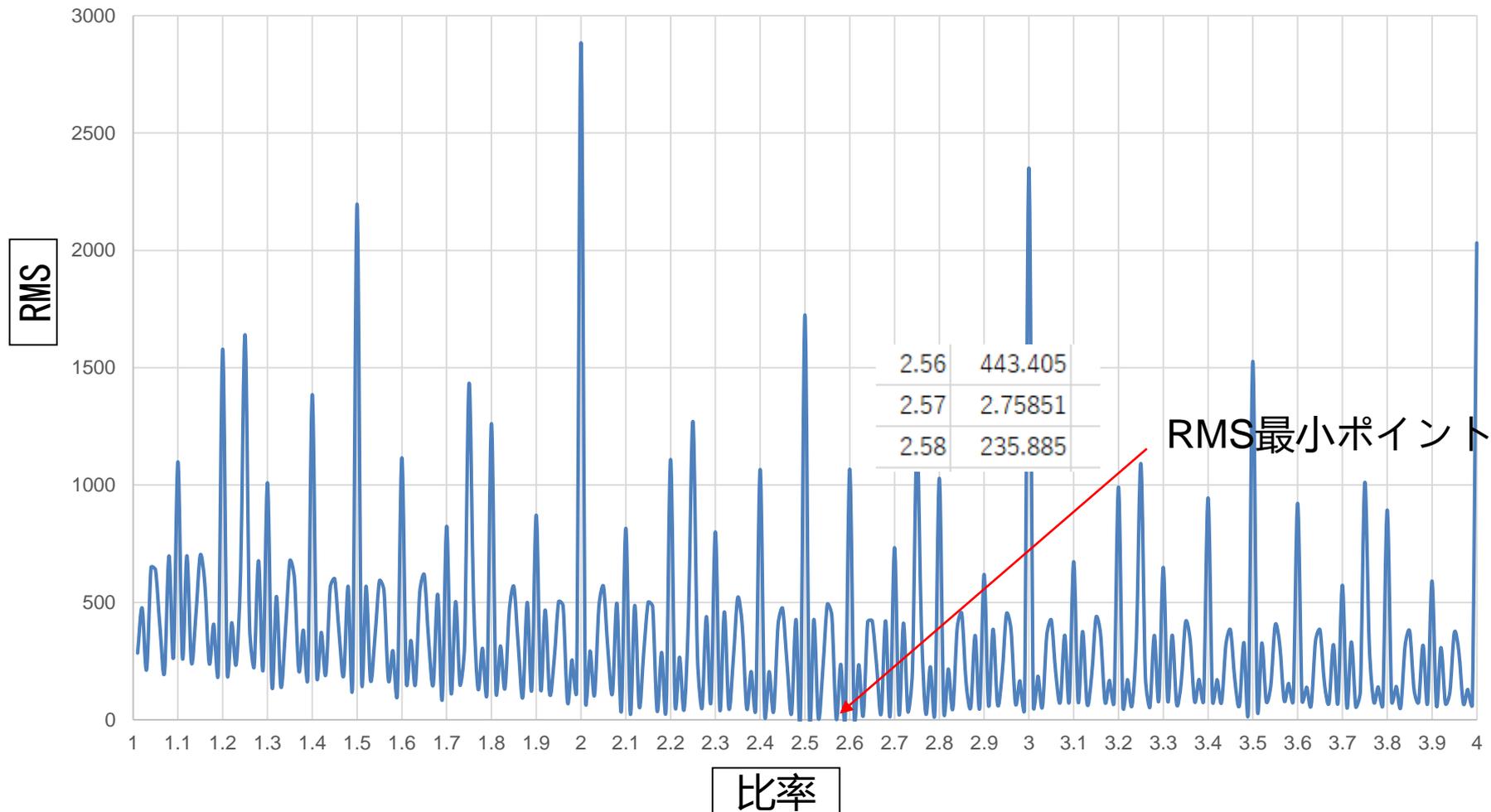


実際と理想的のヒストグラム間の  
誤差の二乗平均



$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (e(k))^2}{N}}$$

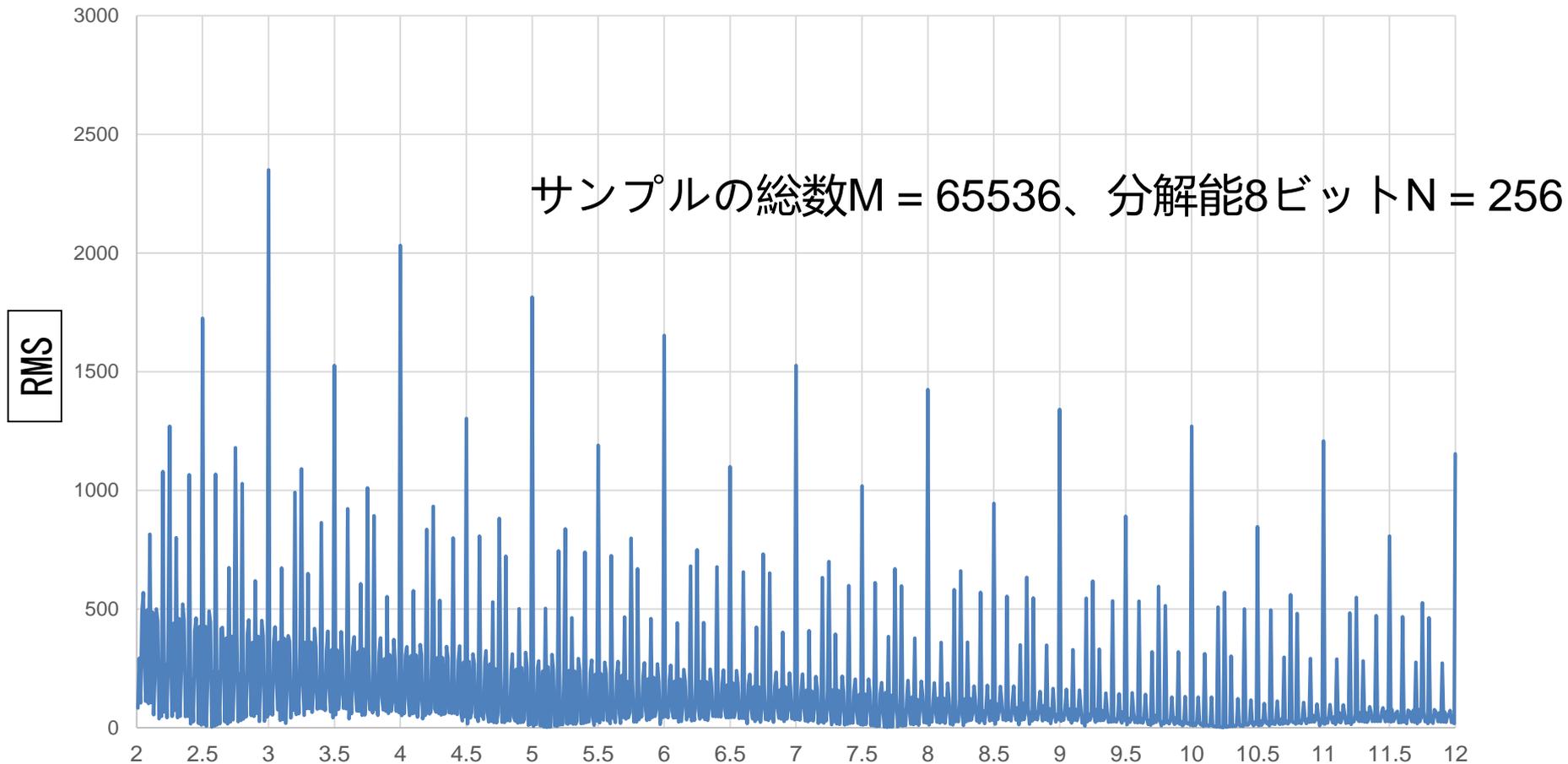
# $f_{CLK}/f_{sig}$ が範囲(1~4)内のRMS



サンプルの総数M = 65536、分解能8ビットN = 256

特定の範囲(1~4)内のRMSを計算して、適切な比率を見つける。

# $f_{CLK}/f_{sig}$ が範囲(2~12)内のRMS



ヒストグラムBIN数は256であるため、  
これらの数に近い比率を各範囲で  
より適切に分散できる、RMSは小さくなる

5.11	1.372156
5.13	2.052057
7.67	2.154211
7.69	0.800391
10.23	0.922801
10.24	0
10.27	1.942534

比率

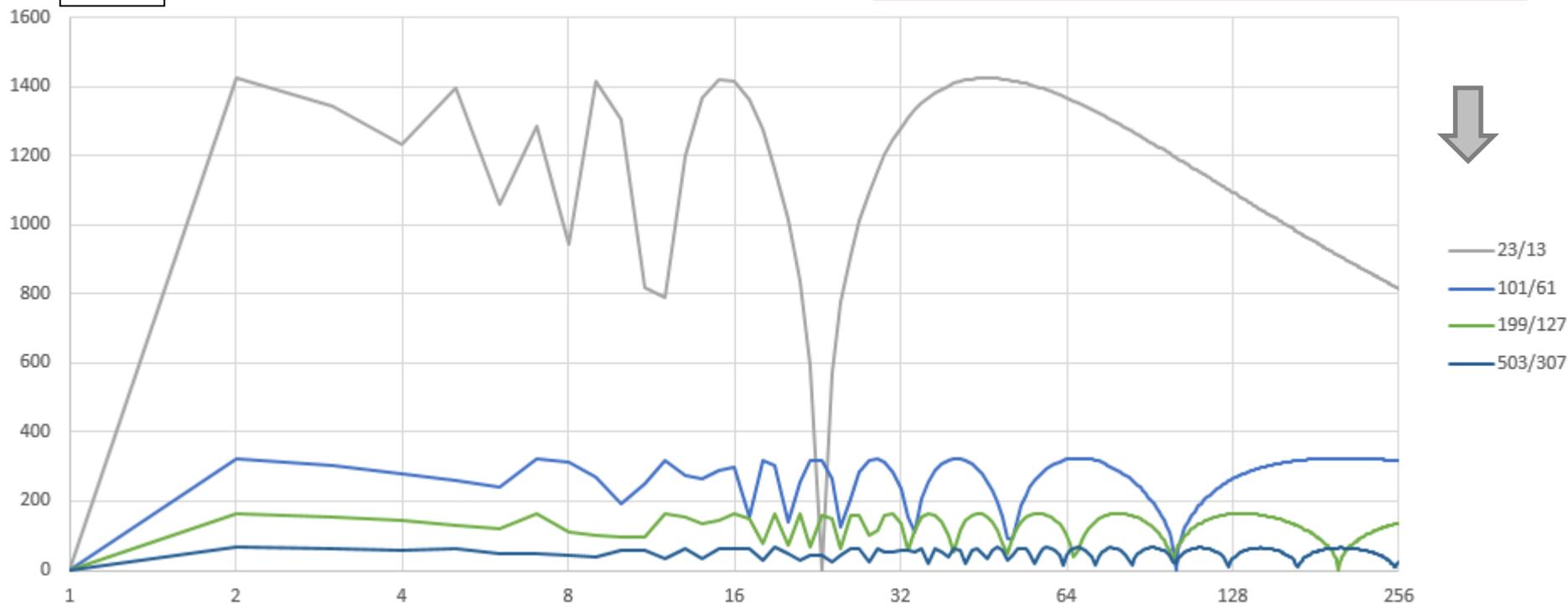
# Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- 結論

# 素数比サンプリングのRMS

RMS

サンプリング点総数: M=65536



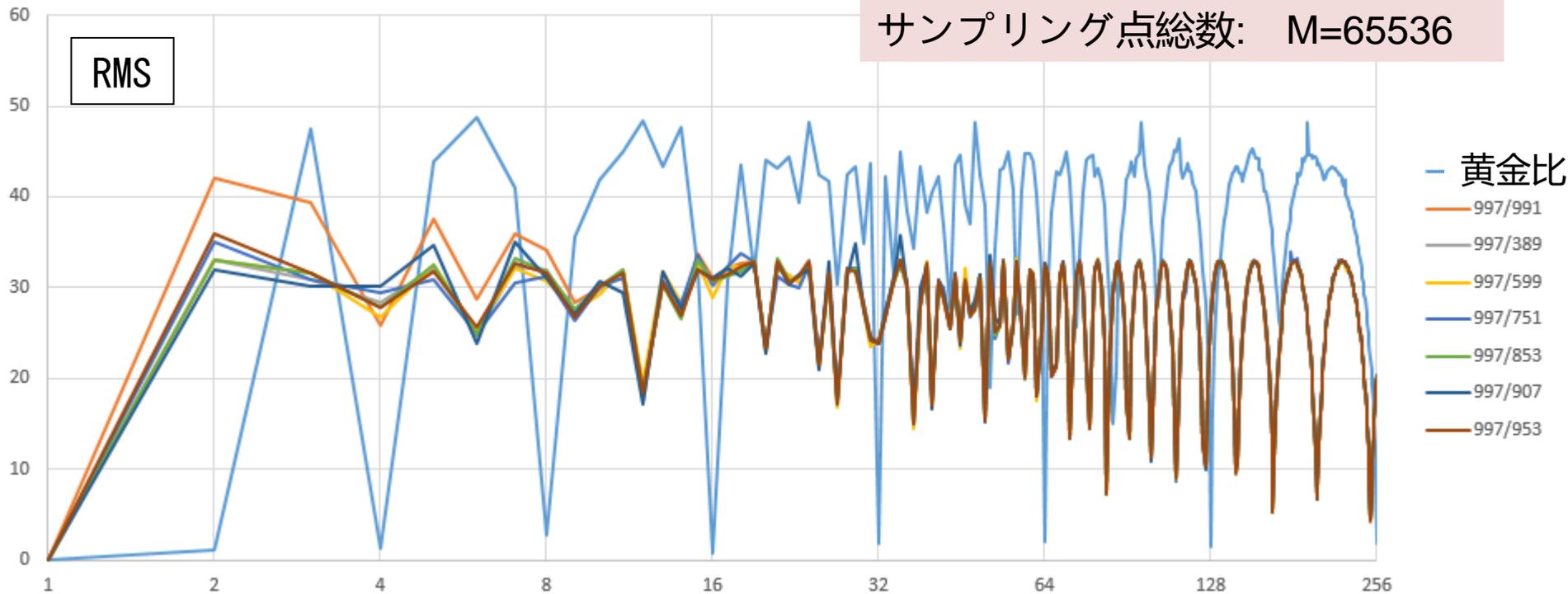
$$f_{CLK} = f_{sig} \times \mathbf{RATIO}$$

BIN数N

大きな2つ素数のRATIO ⇒ RMSが小

黄金比のほうがRMSが小さい

# 素数比のRMS



$f_{CLK}$  : 大きな素数997

$f_{SIG}$  : いくつかの素数 389, 599, 751, 853, 907, 953, 991

→ ほぼ同じ

BIN数N

黄金比: BIN数 64, 128, 256 でRMS が小さい

# Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- ADCヒストグラムテスト法での  
入力正弦波とサンプリング周波数関係
  - 正弦波ヒストグラムと波形抜け現象
  - 黄金比サンプリング
  - 貴金属比サンプリング
  - 素数比サンプリング
- **結論**

# 結論

## 黄金比サンプリング

効率：最高

サンプリング周波数：低



## 金属比サンプリング

効率：良い

サンプリング周波数：高

## 素数比サンプリング

効率：良くない

サンプリング周波数：高

大きな素数の比率でシミュレーションした  
比率変更するが、RMS値はほぼ同じ  
黄金比より、RMS値の変化が小。

## 今後の課題

- 黄金比のように  
特定位置でのサンプリングが効率的である条件を見出す

ご清聴ありがとうございました。

# Q&A

---

- シミュレーションの条件は？

プログラムの計算結果によるシミュレーションしました。

- プログラムの累積計算エラーの処理方法は？

まだ検証されていません。