

コード選択ヒストグラム法: 2トーン入力信号を用いたADC線形性テストの時間短縮

趙 宇杰、桑名 杏奈、加藤 健太郎、魏 江林、片山 翔吾、
中谷 隆之、畠山 一実、小林 春夫
佐藤 賢央、石田 嵩、岡本 智之、市川 保

群馬大学

ROHM Semiconductor



Outline

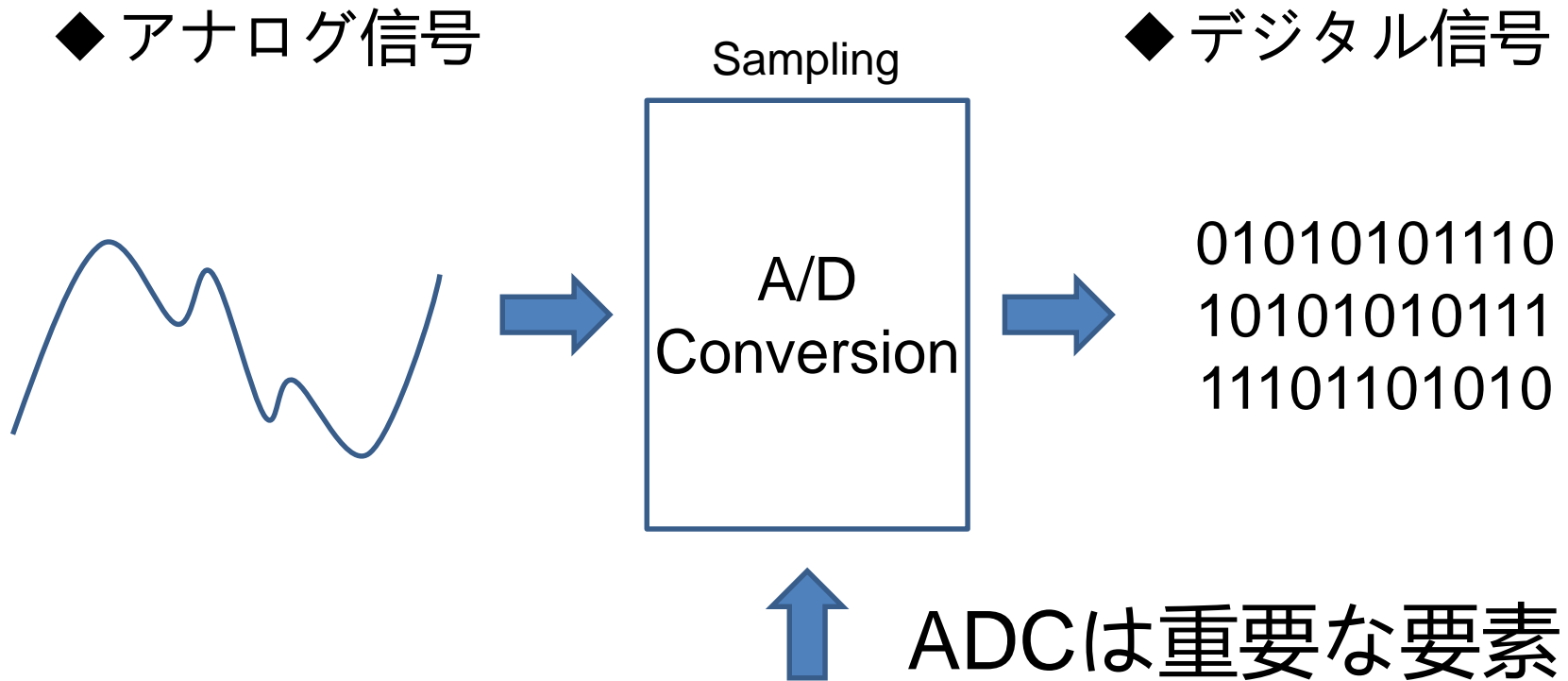
- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- 正弦波ヒストグラムと波形抜け
- 複数の正弦波を組み合わせ
- 2トーン入力信号シミュレーション
- 結論

Outline

- **研究背景と目的**
- ヒストグラム法によるADCテスト
- 正弦波ヒストグラムと波形抜け
- 複数の正弦波を組み合わせ
- 2トーン入力信号シミュレーション
- **結論**

研究背景

IoT時代が到来



高品質、低コストのADCテストが必要

研究目的

ADCの線形性テストには長い時間

- 低速サンプリング
- 高分解能



テストコスト → テスト時間に比例

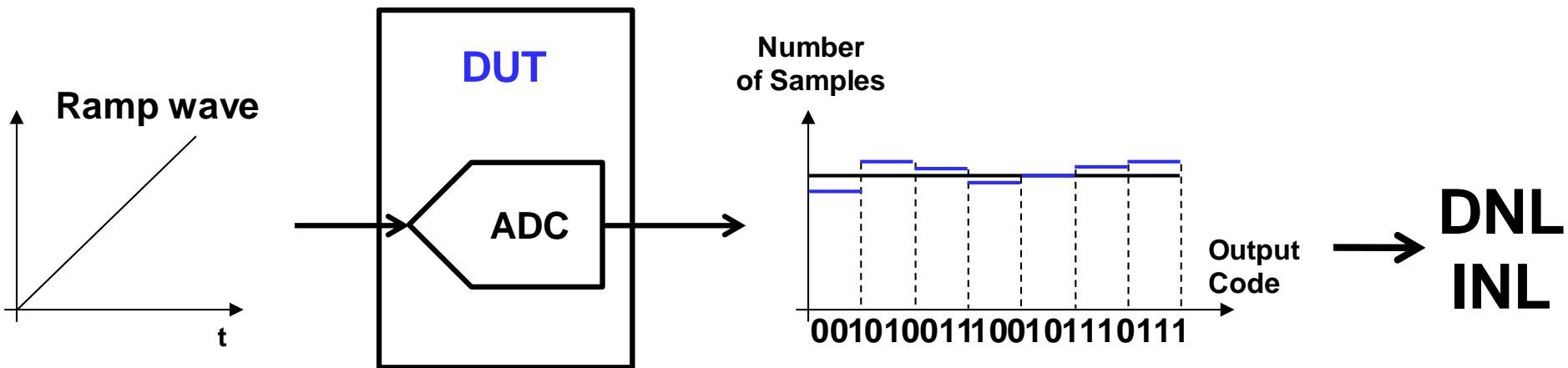
ヒストグラム法によるADC線形性試験で
入力信号とサンプリング信号の
「高効率な関係」を調査

Outline

- 研究背景と目的
- **ヒストグラム法によるADCテスト**
- 正弦波ヒストグラムと波形抜け
- 複数の正弦波を組み合わせ
- 2トーン入力信号シミュレーション
- 結論

ヒストグラム法でのADC線形性試験 1

■ヒストグラム法(ランプ波入力)

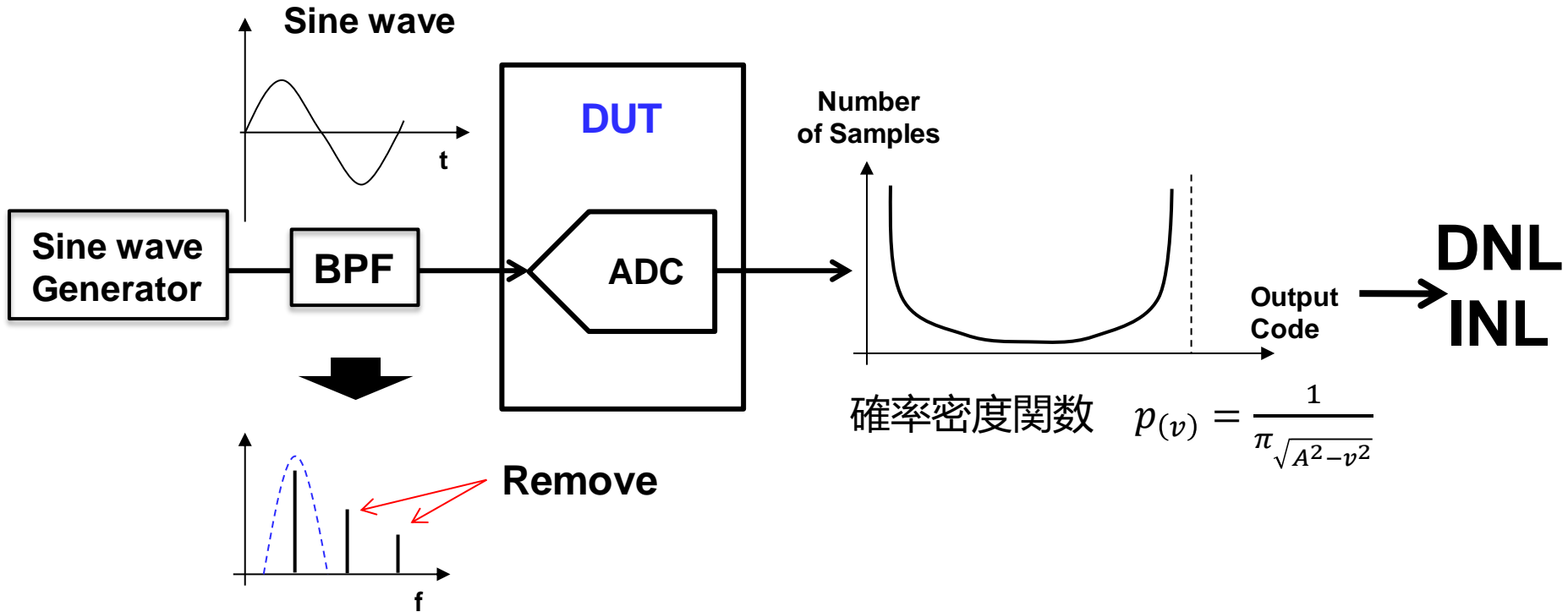


- ADCが完全に線形である場合
すべてのビンのADC出力ヒストグラムは等しい
- 線形性の高いランプ信号の生成は困難
(14bit 程度までのADCに適用)



ヒストグラム法でのADC線形性試験 2

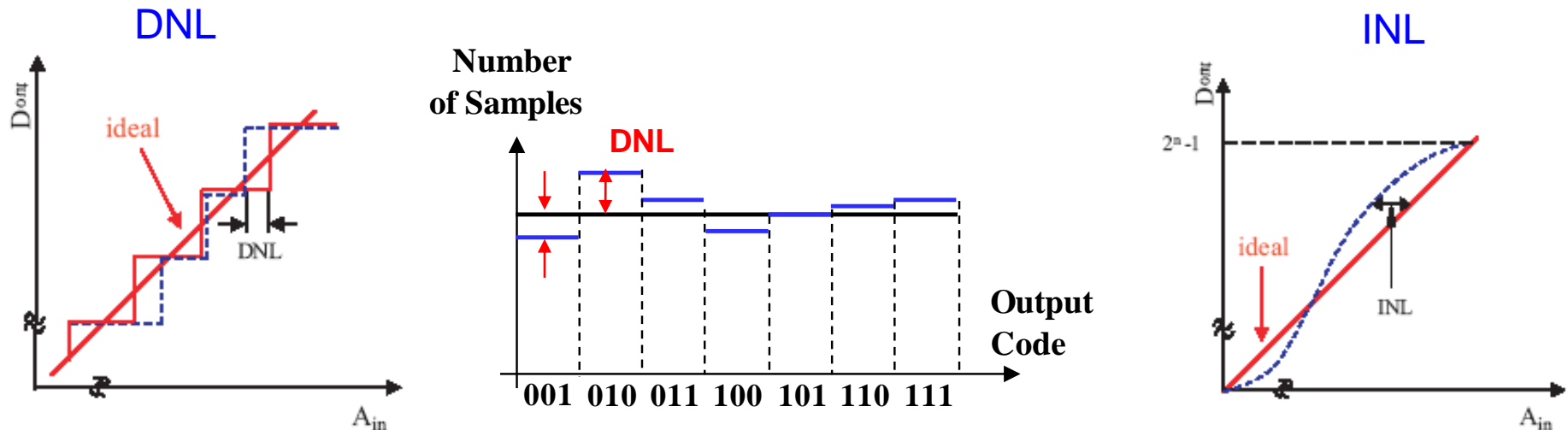
■ヒストグラム法(単一正弦波入力)



- 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)



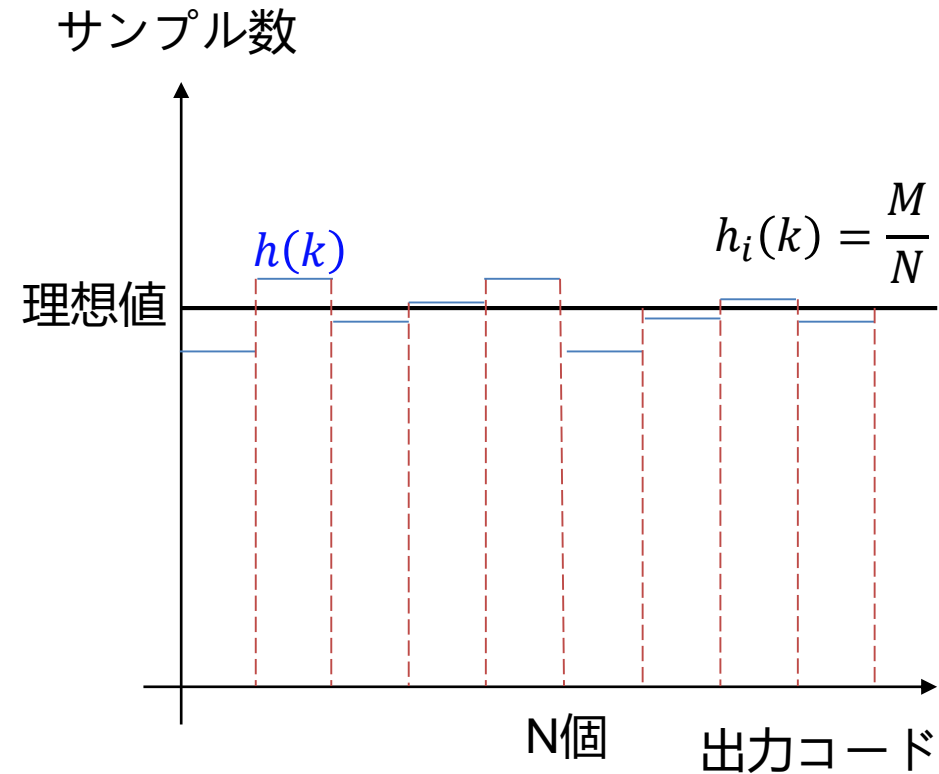
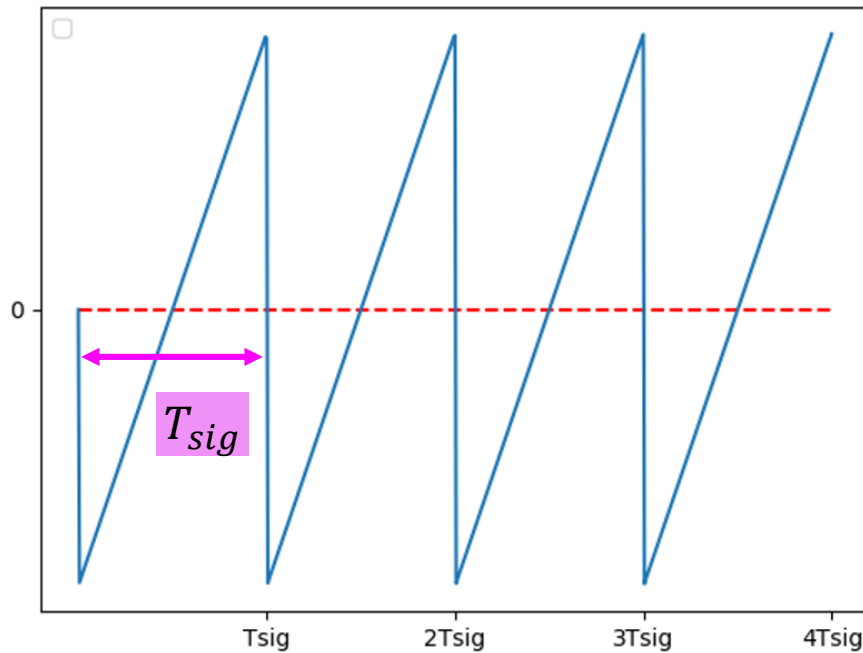
ADC 線形性 性能指標 (DNL, INL)



- **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 積分非線形性
→ 理想的な変換ラインからの偏差

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

のこぎり波のヒストグラム

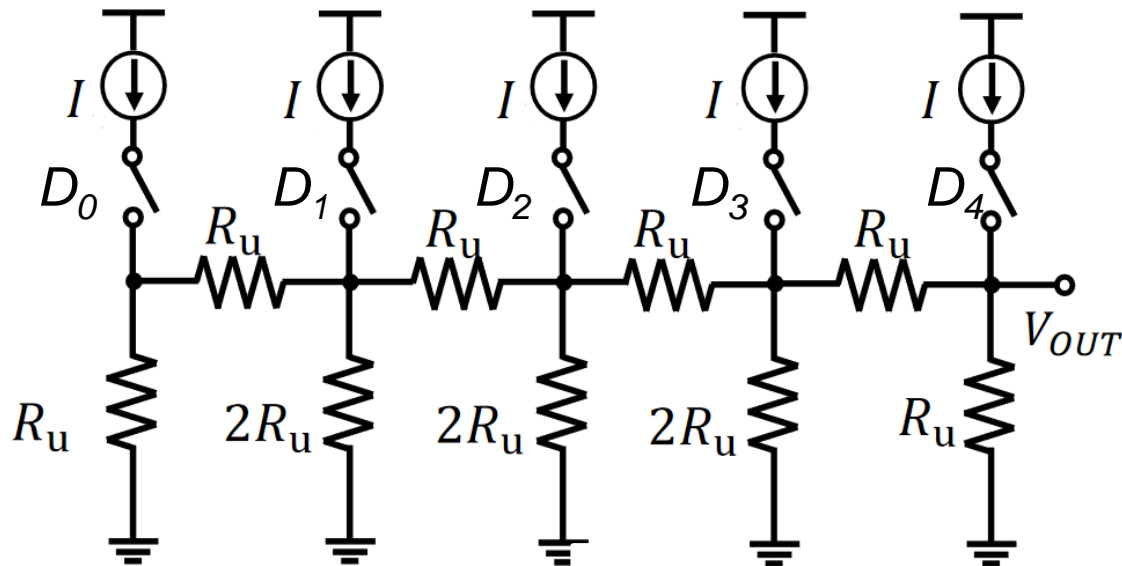


サンプル総数: M
ADC分解能: N .

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

ADC内部のDAC

ADC内のDAC線形性 → ADC全体の線形性



R-2RラダーネットワークDAC

テスト中の逐次比較型ADC → 内部のバイナリ加重DAC

逐次比較型ADC10ビットの場合、大きなDNL ↓
512、256、768、128、384、640、896、...のデジタルコード

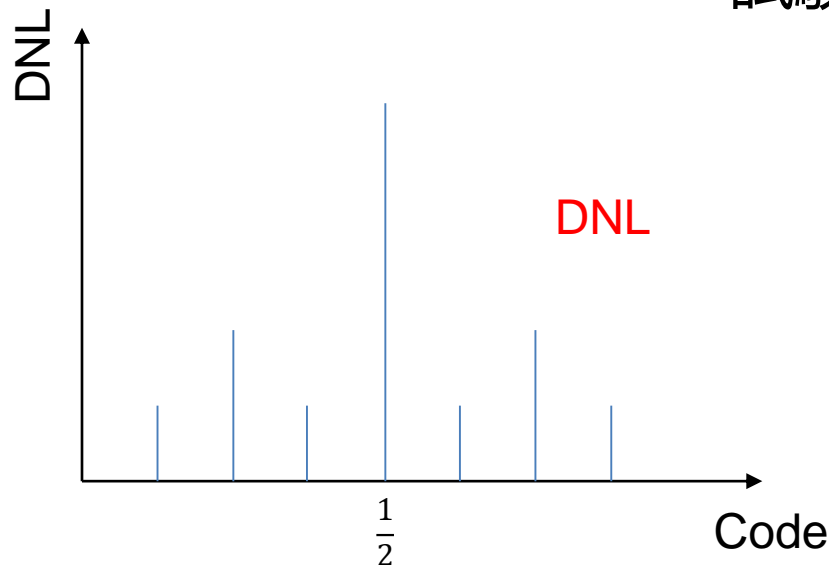
非線形性が発生しやすいADCコード

これらのコードのヒストグラムサンプル数を増やす
→DNLを高精度に測定

テスト中のADCデジタル出力のすべてのコード

非線形性が発生しやすい特定のコードに集中

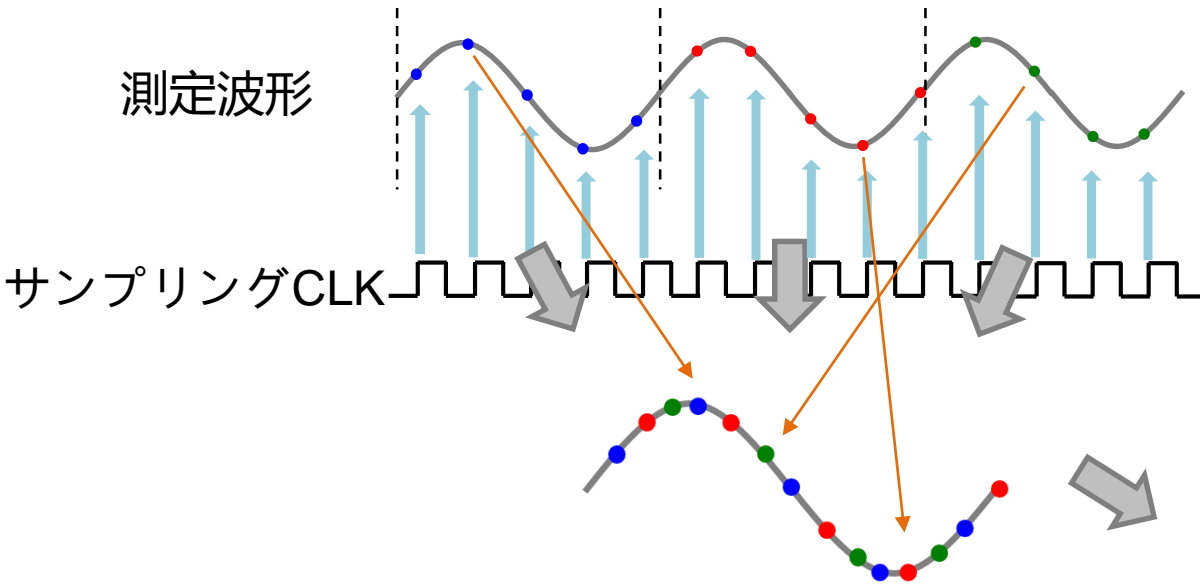
試験時間を短縮



Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- **正弦波ヒストグラムと波形抜け**
- 複数の正弦波を組み合わせ
- 2トーン入力信号シミュレーション
- **結論**

正弦波ヒストグラム法

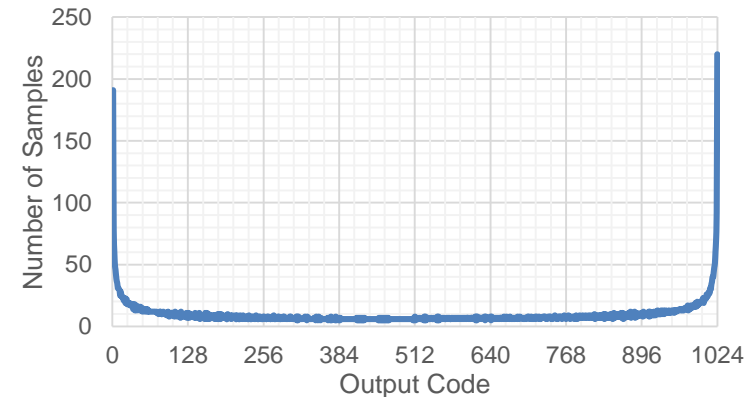


- サンプリングされたヒストグラム、PDFと比較
- ヒストグラムが取得
- DNL、INLが計算

PDF:

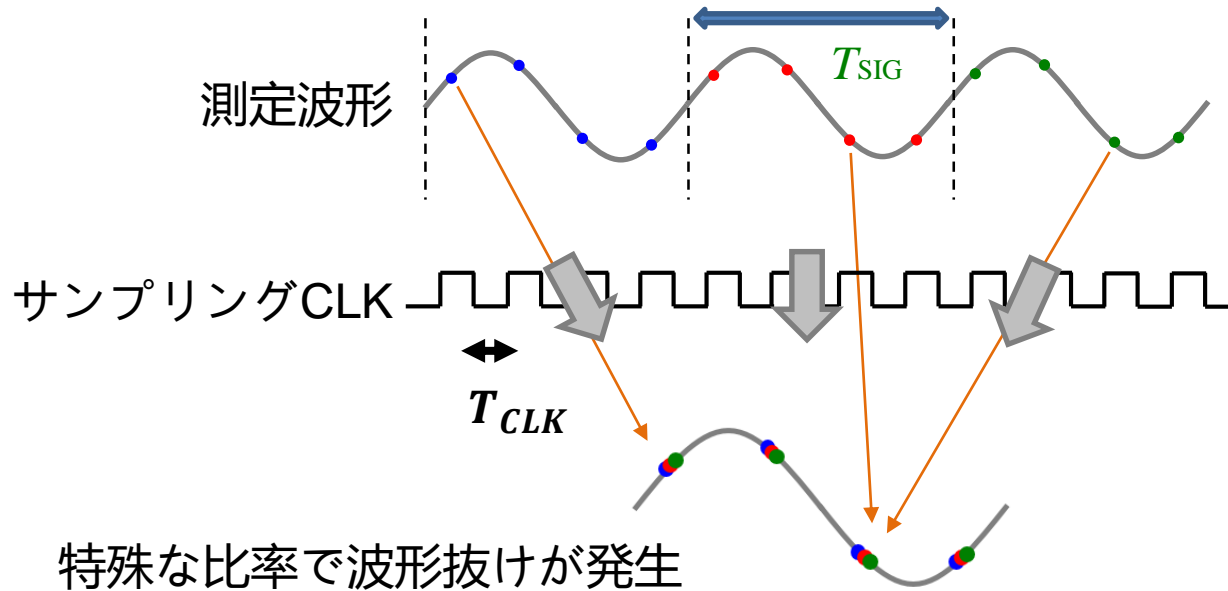
Probability Distribution Function

$$p(v) = \frac{1}{\pi\sqrt{A^2 - v^2}}$$



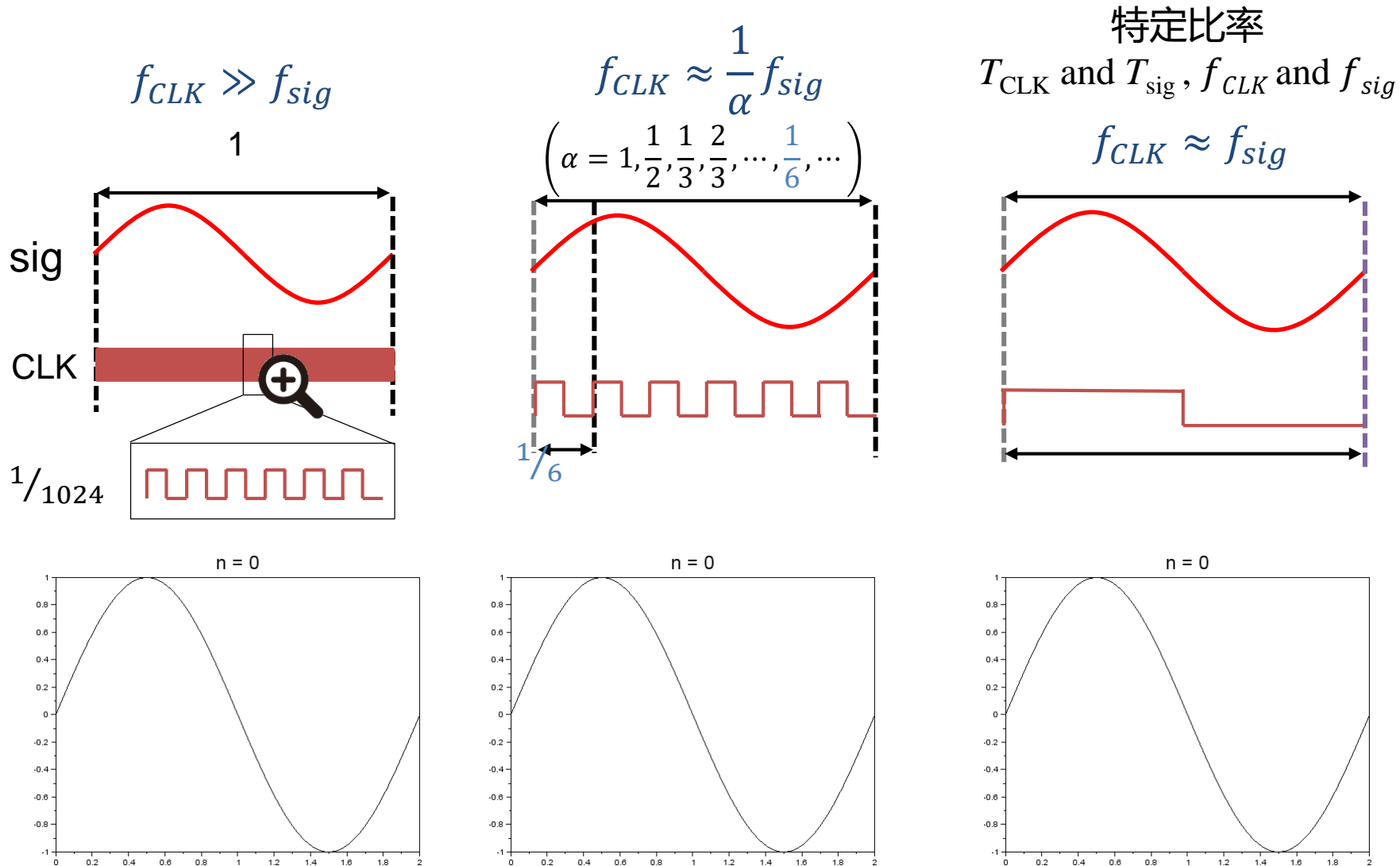
正弦波形取得での波形抜け

繰り返し波形を非同期でサンプリング → 1周期の波形

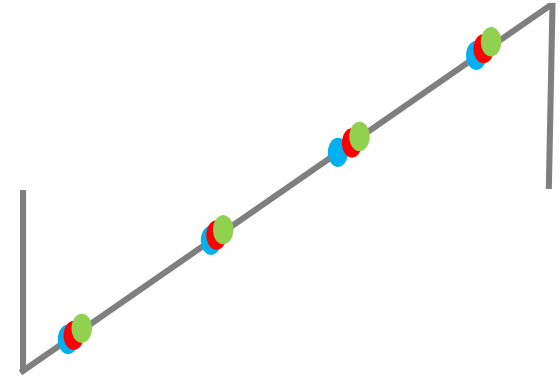
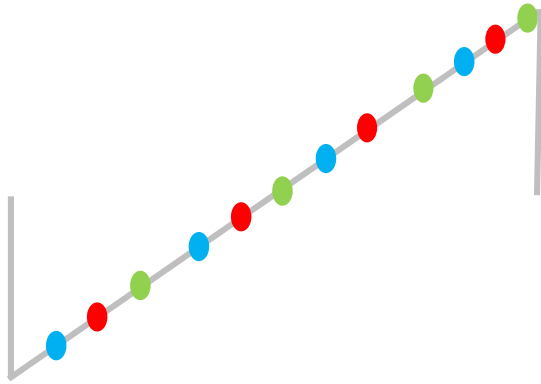


波形の再現には大量のデータが必要 → テスト時間: 長い

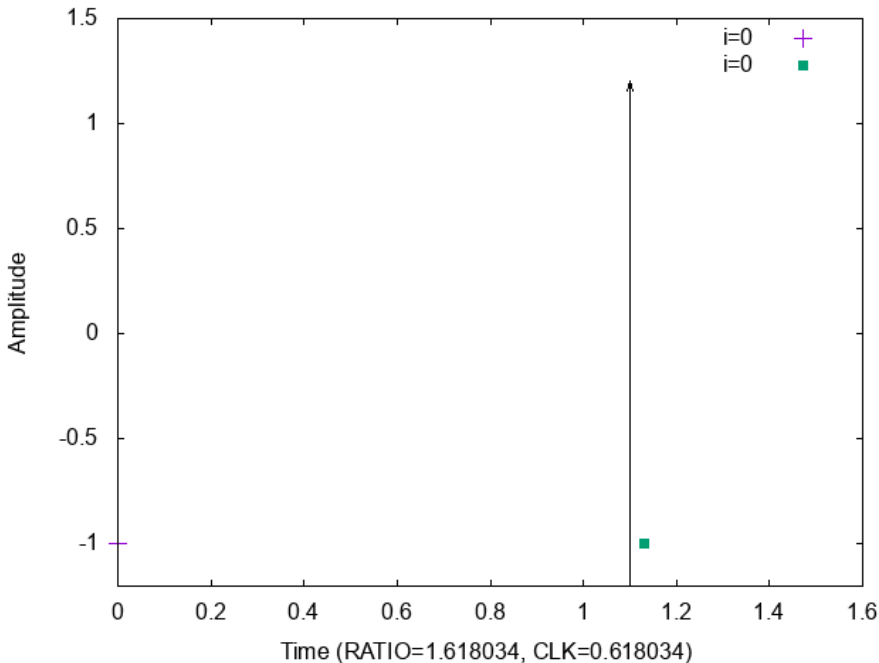
正弦波形取得での波形抜け



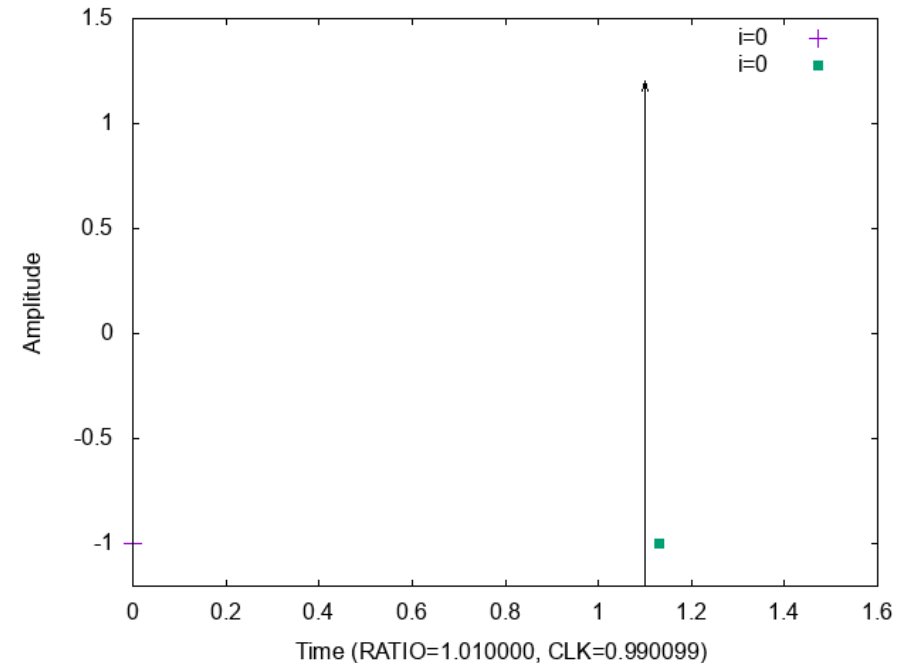
ランプ波形取得での波形抜け



効率の良いサンプリング



波形抜け現象

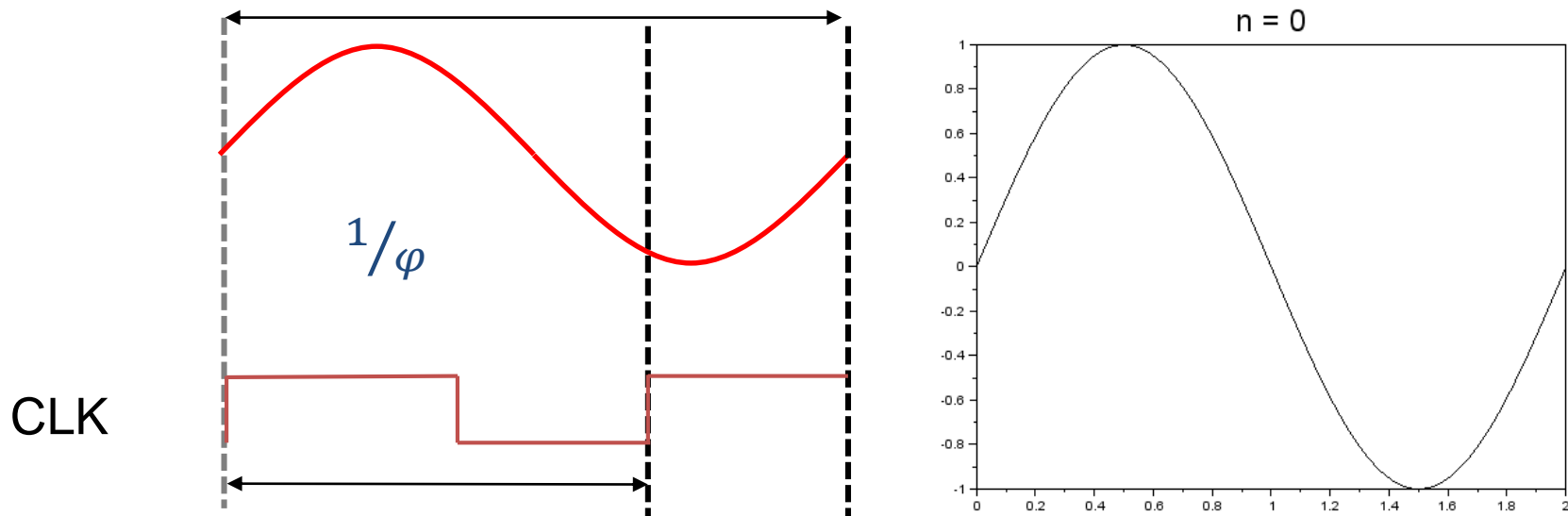


黄金比サンプリング

黄金比 φ

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

$$\varphi = 1.6180339887\dots$$



高い波形取得効率のため、サンプリング条件の提案



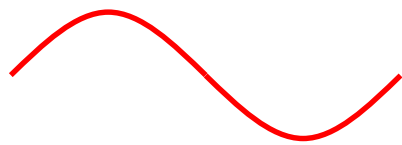
Yuto Sasaki, Yujie Zhao, Anna Kuwana and Haruo Kobayashi,
 "Highly Efficient Waveform Acquisition Condition in Equivalent-Time Sampling System"
 27th IEEE Asian Test Symposium, Hefei, Anhui, China (Oct. 2018)

Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- 正弦波ヒストグラムと波形抜け
- **複数の正弦波を組み合わせ**
- 2トーン入力信号シミュレーション
- 結論

先行研究

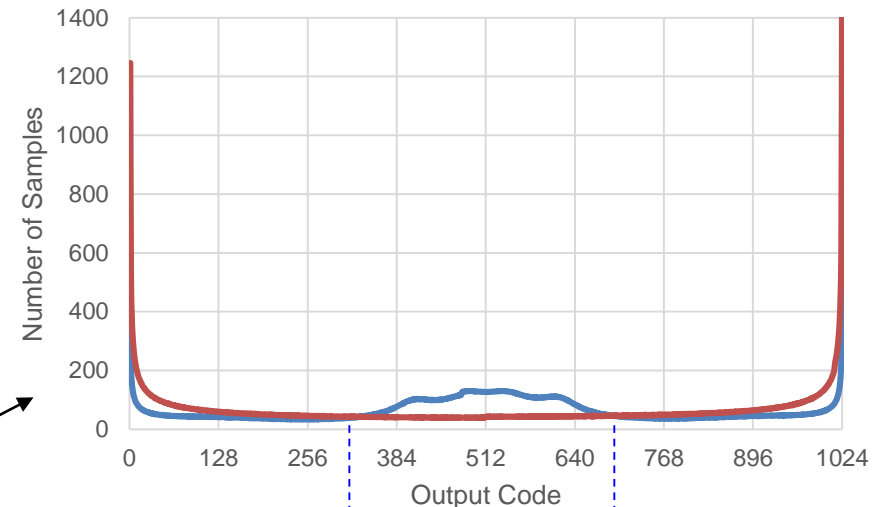
単一の正弦波 (赤)



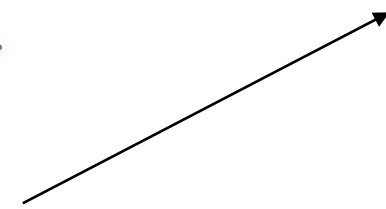
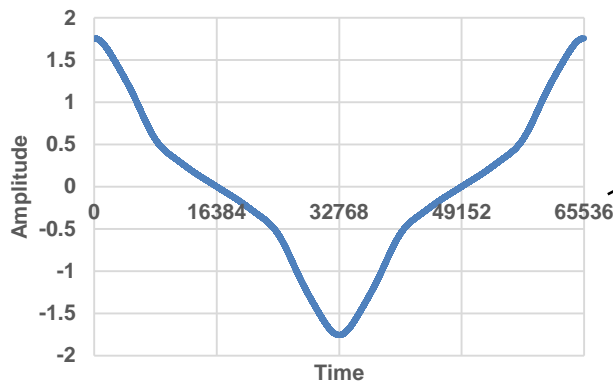
$$f(t) = \sin \omega t$$



histogram



複数の信号 (青)



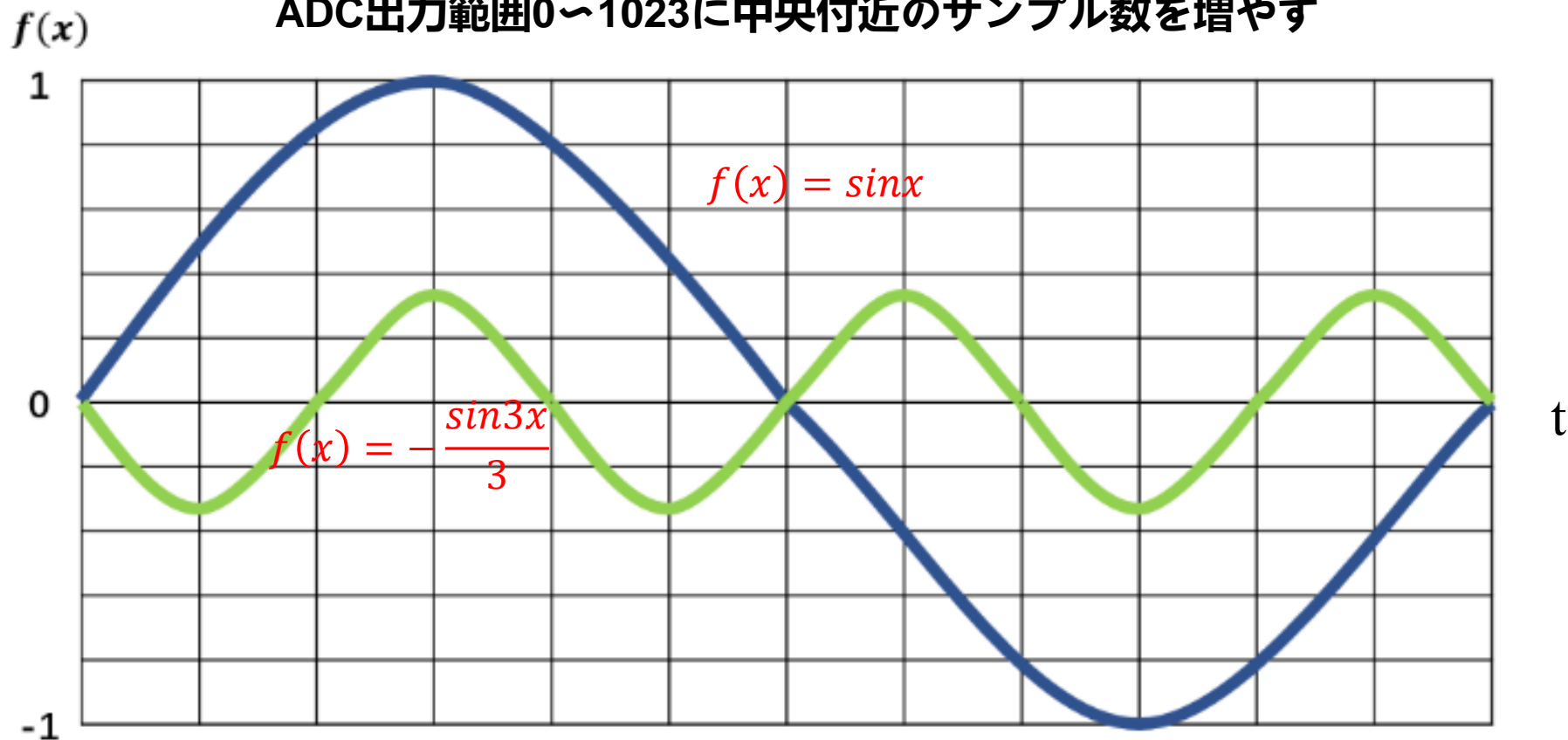
特定のコードに集中の
ヒストグラム

$$f(t) = A(W_1 + 2.6 \cdot W_2 + 1.8 \cdot W_3 + 1.4 \cdot W_6 + 1.2 \cdot W_7) + V_{OS}$$

$$W_m = \frac{\cos((2m-1)\omega t)}{(2m-1)^2} \quad A = 2.90[V] \quad V_{OS} = 4.0[V]$$

複数の正弦波の組み合わせ

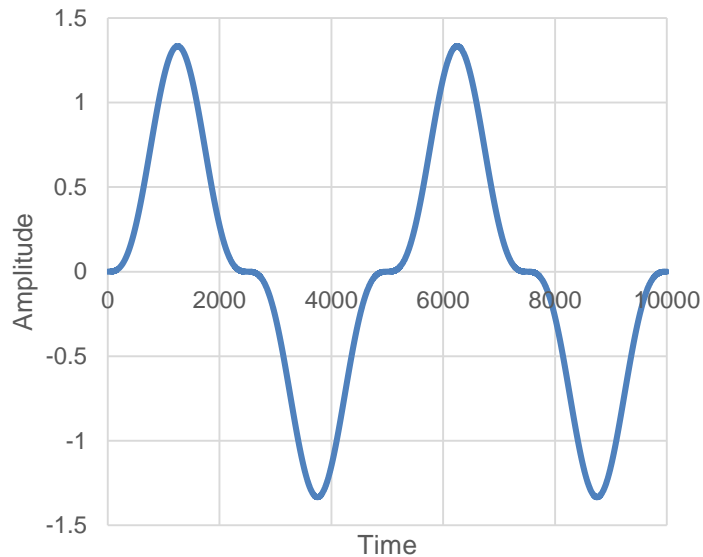
ADC出力範囲0～1023に中央付近のサンプル数を増やす



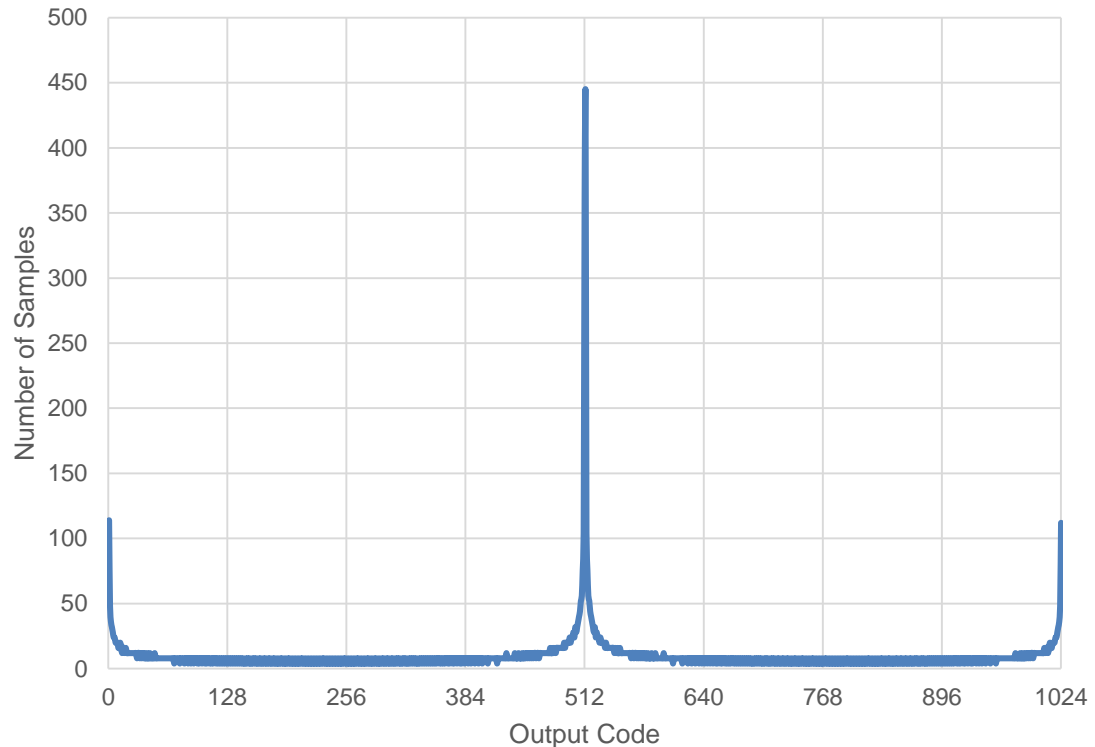
入力信号の傾きが小さい→ヒストグラムのサンプルが多い

正弦波を組み合わせることにより、
入力信号対応位置の傾きを減らす

2トーン正弦波の結果

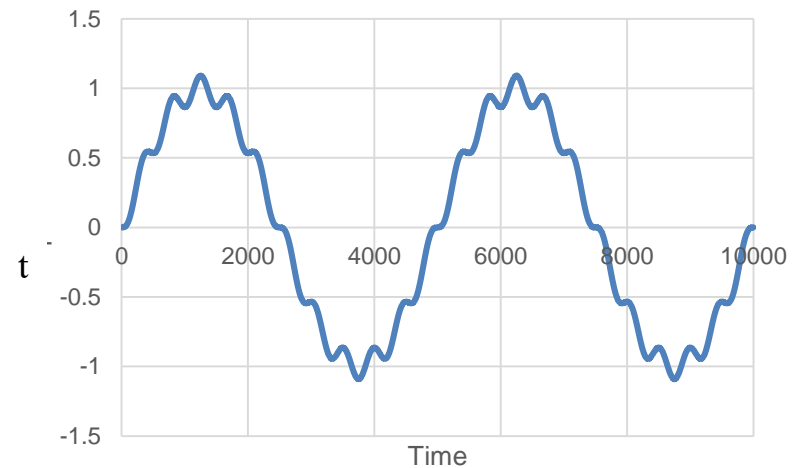
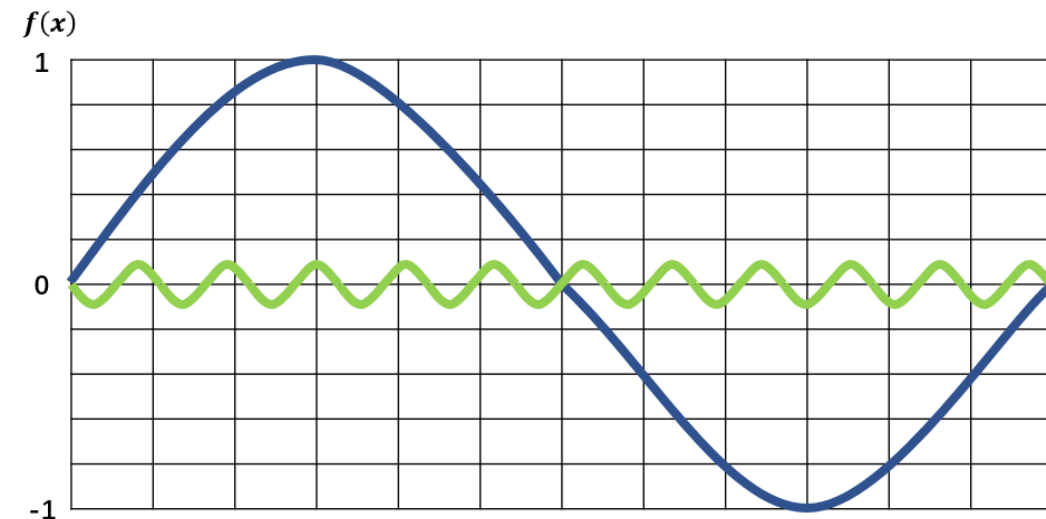


$$f(x) = \sin x - \frac{\sin 3x}{3}$$



中央付近のサンプル数（デジタル出力512）増加

他のコードの結果

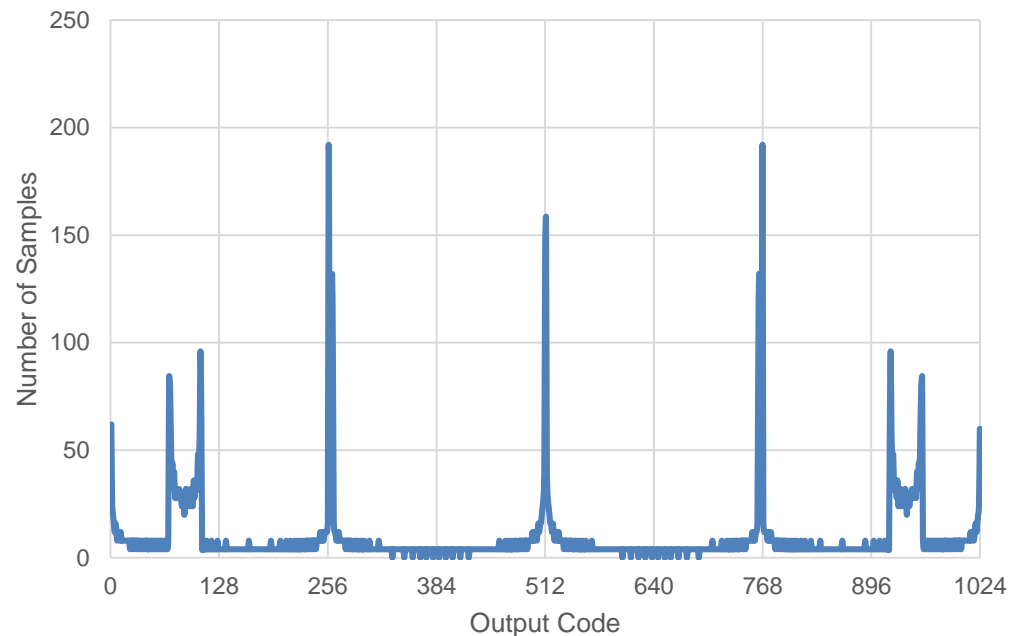


出力範囲0 ~ 1023の256と768を
増やすことを検討

$$\arcsin \frac{1}{2} = \frac{\pi}{6} \quad (2\pi \text{ の } \frac{1}{12})$$

11を使用

$$f(x) = \sin x - \frac{\sin 11x}{11}$$

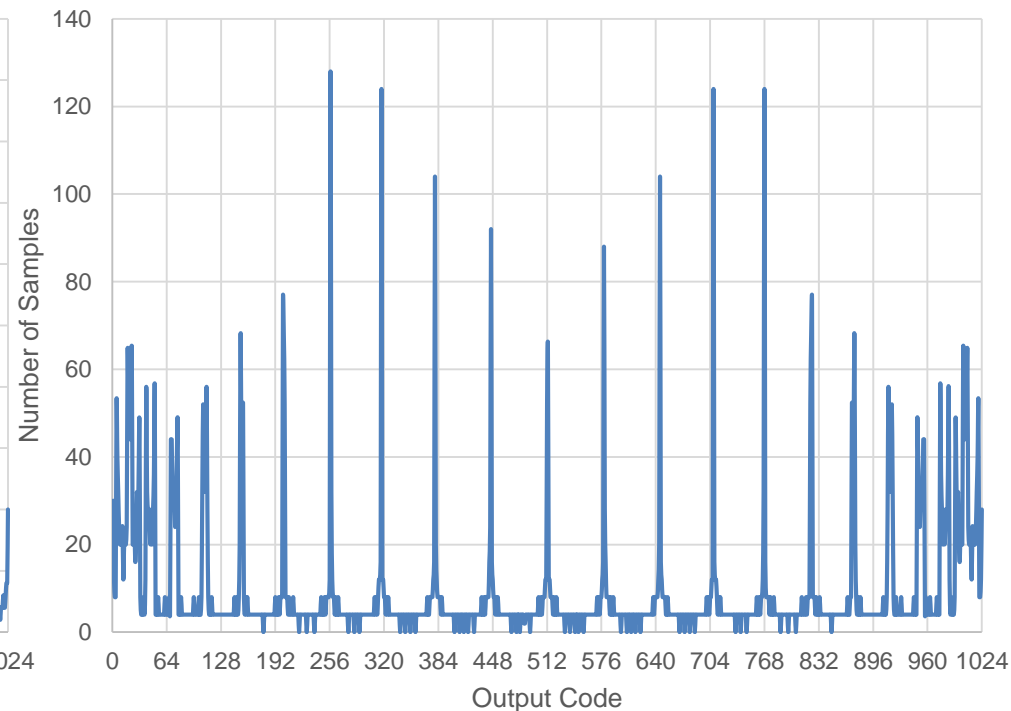
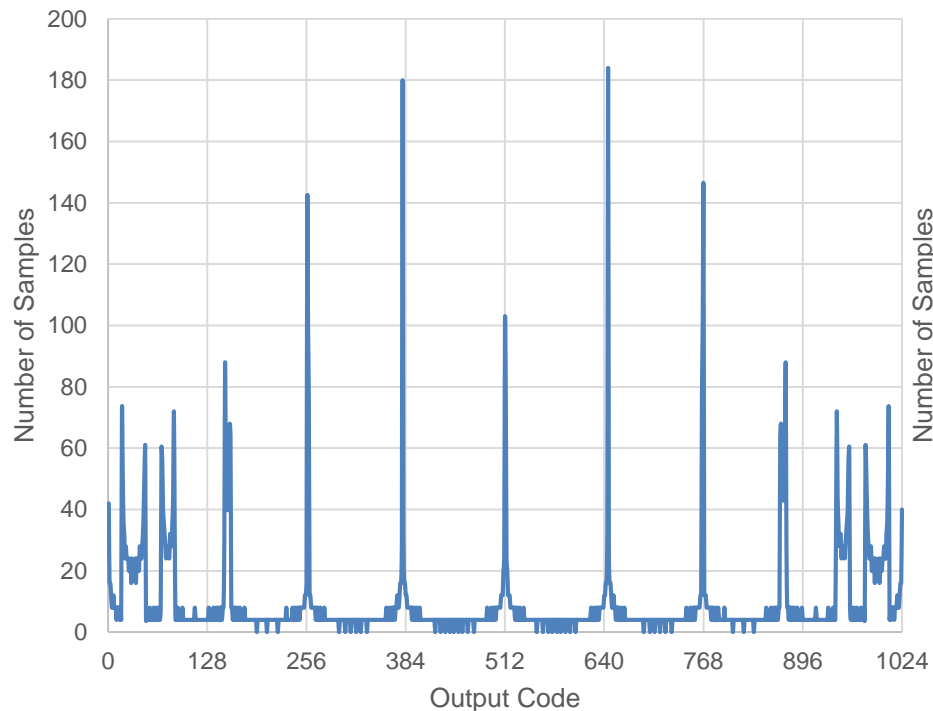


より多くのコードの結果

同じやり方で

$$f(x) = \sin x - \frac{\sin 23x}{23}$$

$$f(x) = \sin x - \frac{\sin 49x}{49}$$



デジタル出力コード周辺のサンプル数が増加

$$f(x) = \sin(\omega_1 x) - \frac{\sin(\omega_2 x)}{k}$$

Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- 正弦波ヒストグラムと波形抜け
- 複数の正弦波を組み合わせ
- **2トーン入力信号シミュレーション**
- 結論

2トーン入力信号構成

$$f(x) = \sin(\omega_1 x) - \frac{\sin(\omega_2 x)}{k}$$

ADC線形性ヒストグラムテストの一般的な2トーン入力信号



次の波形をシミュレーション、ADCヒストグラムを取得

$$g_{3,3}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(3t)}{3}$$

$$g_{3,3.5}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(3t)}{3.5}$$

$$g_{3,4}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(3t)}{4}$$

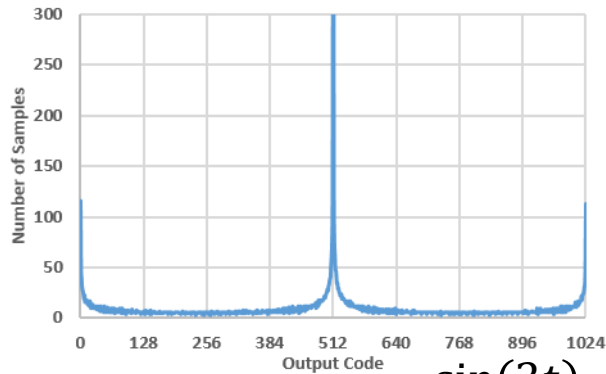
$$g_{11,11}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(11t)}{11}$$

$$g_{11,11.5}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(11t)}{11.5}$$

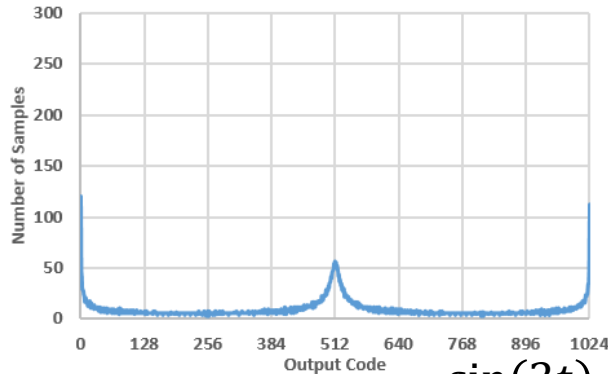
$$g_{11,12}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(11t)}{12}$$

信号発生にAWG（任意波形発生器）を使用

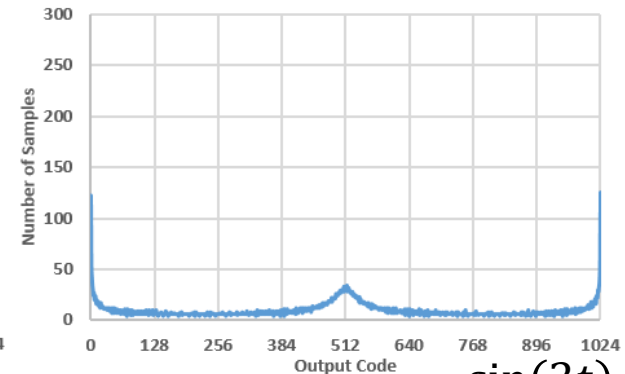
シンプルな構成の結果



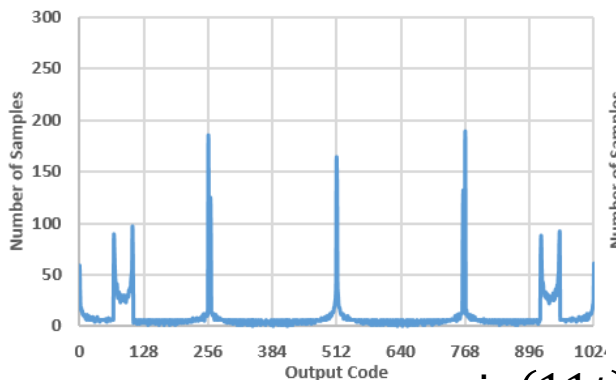
$$g_{3,3}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(3t)}{3}$$



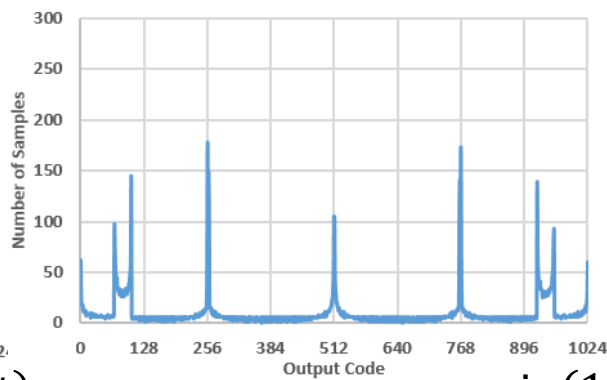
$$g_{3,3.5}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(3t)}{3.5}$$



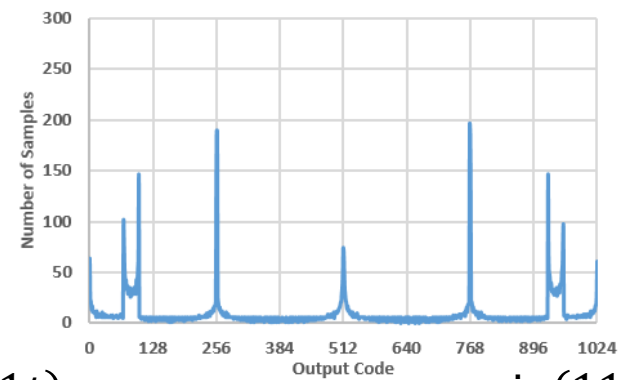
$$g_{3,4}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(3t)}{4}$$



$$g_{11,11}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(11t)}{11}$$



$$g_{11,11.5}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(11t)}{11.5}$$

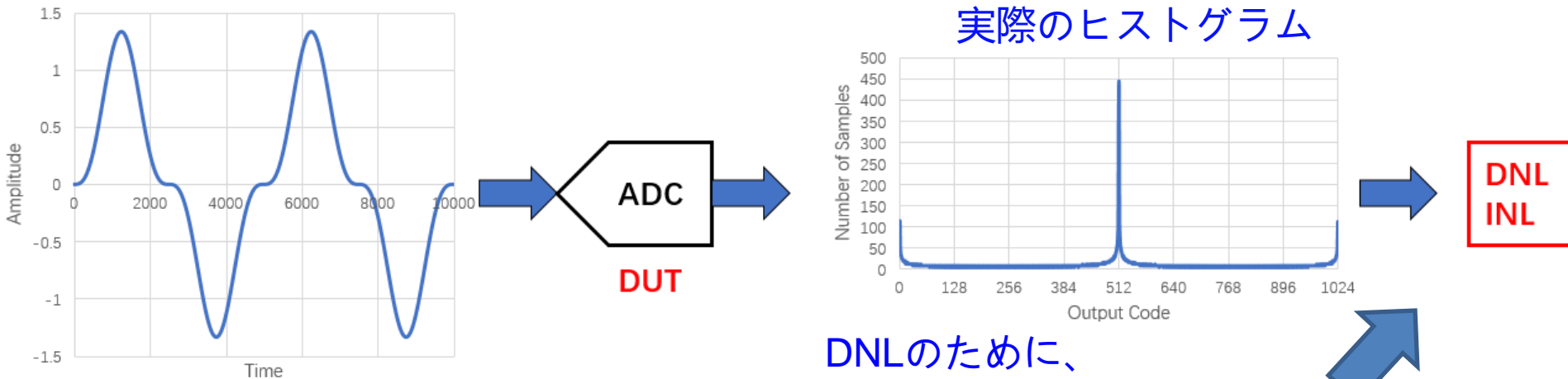


$$g_{11,12}(t) = \sin(t) - \frac{\sin(11t)}{12}$$

$$f(x) = \sin(\omega_1 x) - \frac{\sin(\omega_2 x)}{k}$$

kが増加→ヒストグラムのピークが分散

2トーン入力信号の問題



DNL
INL

DNLのために、
理想的なヒストグラムを
計算にはPDFが必要

提案された信号 → 逆関数なし

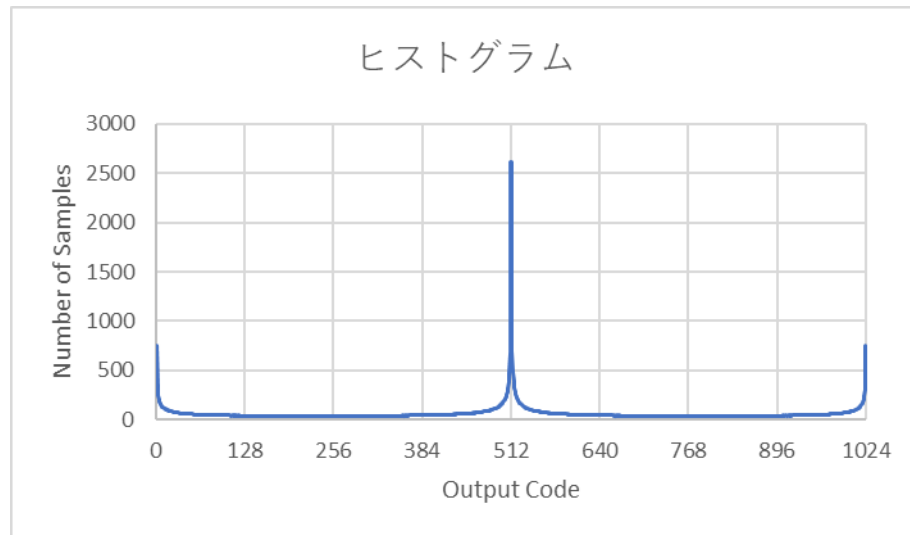
確率密度関数 (PDF) の理論的導出は難しい

ヒストグラム法にはPDFが必要

または、シミュレーションで得られたPDF (近似) を使用

2トーン入力信号シミュレーション

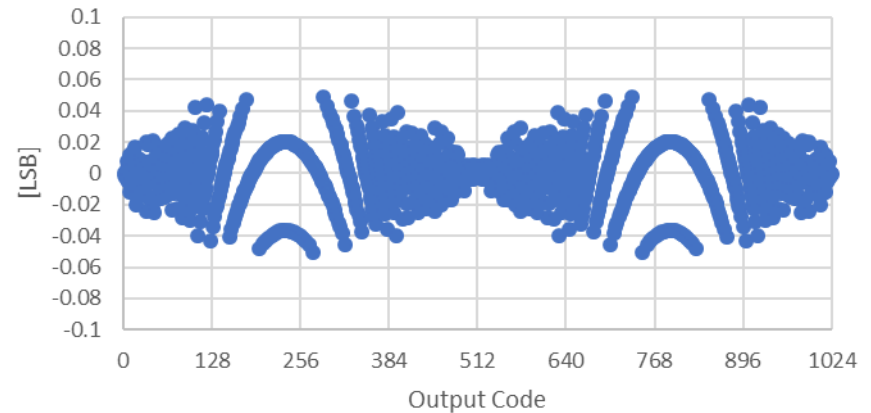
$f(x) = \sin x - \frac{\sin 3x}{3}$ をシミュレーション



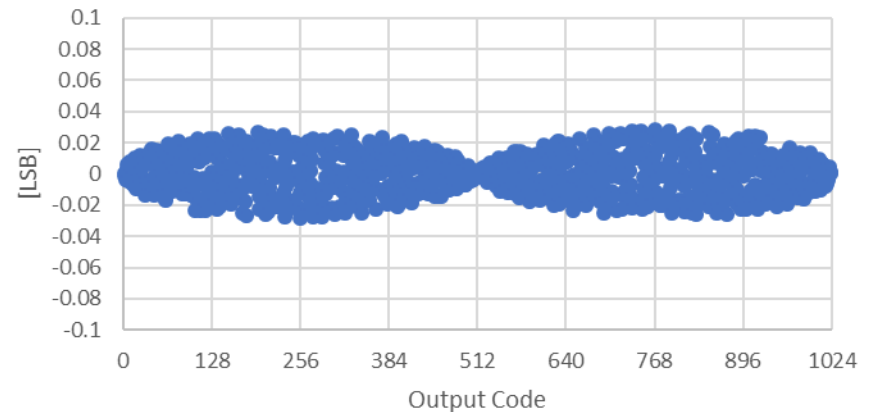
PDF (近似) を使用
理想ADCの状況で、
測定誤差のみの結果を計算

サンプル総数: M=65536

DNL

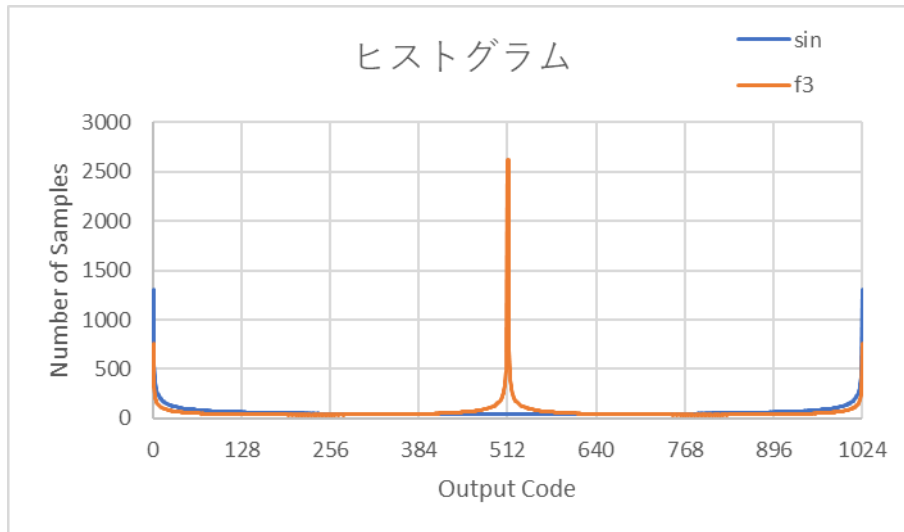


INL



単一正弦波との比較

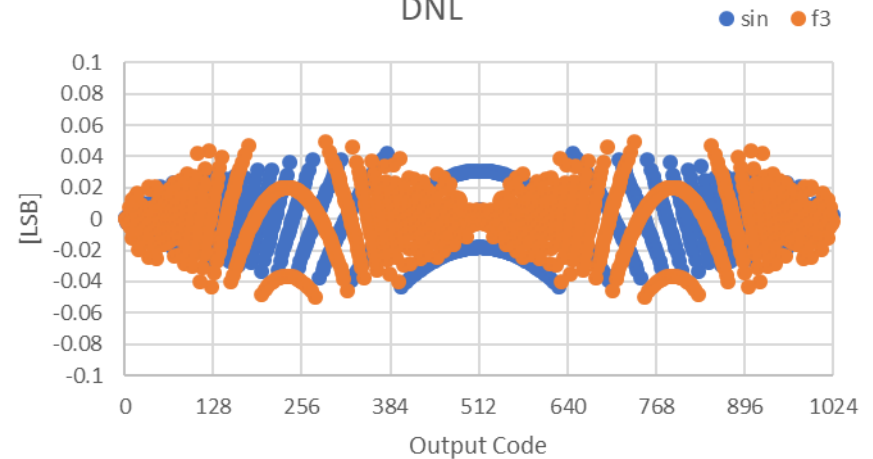
単一正弦波（青）と2トーン信号（赤）



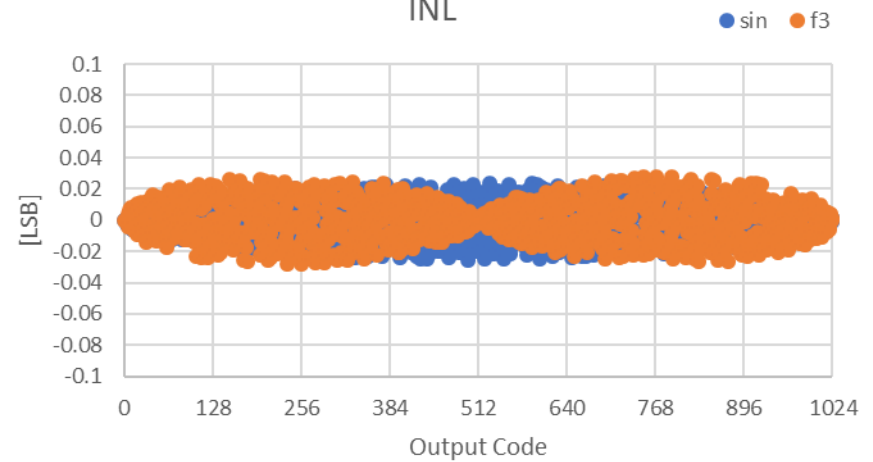
同じ条件で、単一正弦波のDNL、INLの計算結果（青）と比較すれば、2トーン信号（赤）結果の中央部のサンプル数が多い中央部のDNL、INL結果は良い

サンプル総数: M=65536

DNL

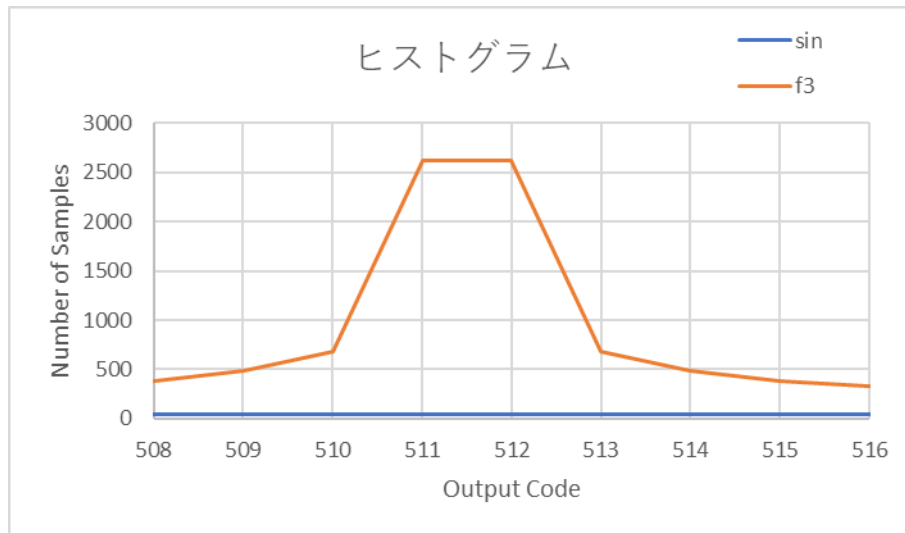


INL



中央部の拡大

サンプル総数: M=65536



| コード | Sin | 2 トーン |
|-----|-----|-------|
| 508 | 40 | 386 |
| 509 | 42 | 482 |
| 510 | 40 | 684 |
| 511 | 41 | 2616 |
| 512 | 41 | 2614 |
| 513 | 40 | 684 |
| 514 | 42 | 482 |
| 515 | 40 | 386 |
| 516 | 40 | 326 |

中央部のサンプル数が増やす、
中央部の割合が大きい

つまり、中央部のサンプル数が同じであれば、
2トーン信号に必要なサンプル総数は少ない

Outline

- 研究背景と目的
- ヒストグラム法によるADCテスト
- 正弦波ヒストグラムと波形抜け
- 複数の正弦波を組み合わせ
- 2トーン入力信号シミュレーション
- **結論**

Conclusion

- 2トーン信号による特定のコードに集中を合わせたADC出力ヒストグラムを検討。
- 短時間のADC線形性テストのための簡単な合成方法を使用。
- シミュレーション結果は、提案されたコード選択ヒストグラム法を検証。
- 提案された方法問題の対処。



今後:

入力周波数とサンプリング周波数の比率を調査して、
金属比（黄金比、白銀比など）、素数比など、
効率的な波形サンプリングのために
広がるサンプリングポイントを制御。

ご清聴ありがとうございました。

Q&A

- 1.研究の目的は、集中位置を決定する波形を構築することですか？
逐次比較型ADCのように、ADCヒストグラム法を使うとき、中央部などの部分コードは非線形性が発生しやすい。単一正弦波出力コードの中心付近ではサンプル数が少ないので、この状況を改善するため、波形を提案します。
- 2.他のタイプのADCも使用できますか？
ADC異なる原理によれば、非線形性が発生しやすい位置は異なり、より多くの異なる波形を構成する必要があります。
- 3.評価を10ビットADCでされておられますが、分解能が異なってくると入力する、Two-Tone 信号も異なってくるのではないですか
Two-Tone 信号が異なってくるのではありません。同じTwo-Tone信号の確率密度は変わらないので、ヒストグラム分布も変わりません。10ビット中央部に集中する信号は12ビットの場合も中央部に集中します。