

# アナログ/ミクストシグナルIC 試験用マルチトーン信号の検討

柴崎有祈子、浅見幸司、桑名杏奈、  
杜遠洋、八田朱美、久保和良、小林春夫

群馬大学 理工学府 電子情報部門  
小山高専

# OUTLINE

---

- 研究背景/目的
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - ランダム位相
- マルチトーン信号の応用例
- まとめ

# OUTLINE

- **研究背景/目的**
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - ランダム位相
- マルチトーン信号の応用例
- まとめ

# 研究背景/目的

背景

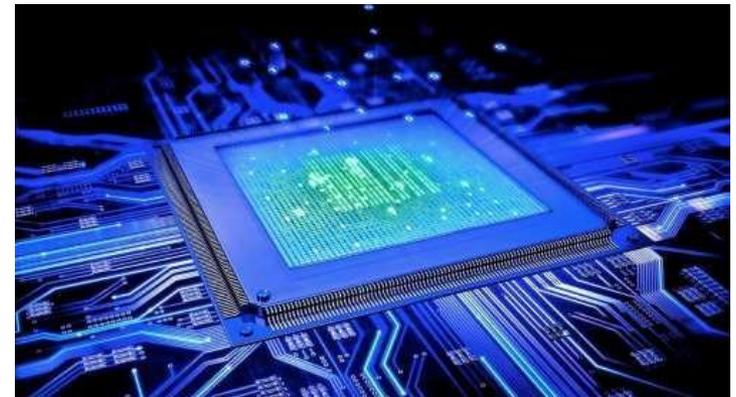
アナログ回路が大規模化 & 複雑化  
→ アナログテストにかかる時間が急激に増大

課題

テスト時間を削減

目的

マルチトーン信号を用いたテスト時間短縮かつ  
高精度なテスト手法の提案



成果

マルチトーン信号の性質を明確化

# OUTLINE

- 研究背景/目的
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - ランダム位相
- マルチトーン信号の応用例
- まとめ

# アナログ/ミクストシグナルICのテスト

デジタル回路

新しいテスト手法(ATPG/BIST/構造テスト)の開発によりテストコスト/時間を削減

アナログ回路

実用的な故障モデルや効率的なテスト手法が未開発のためテストコスト/時間が増大

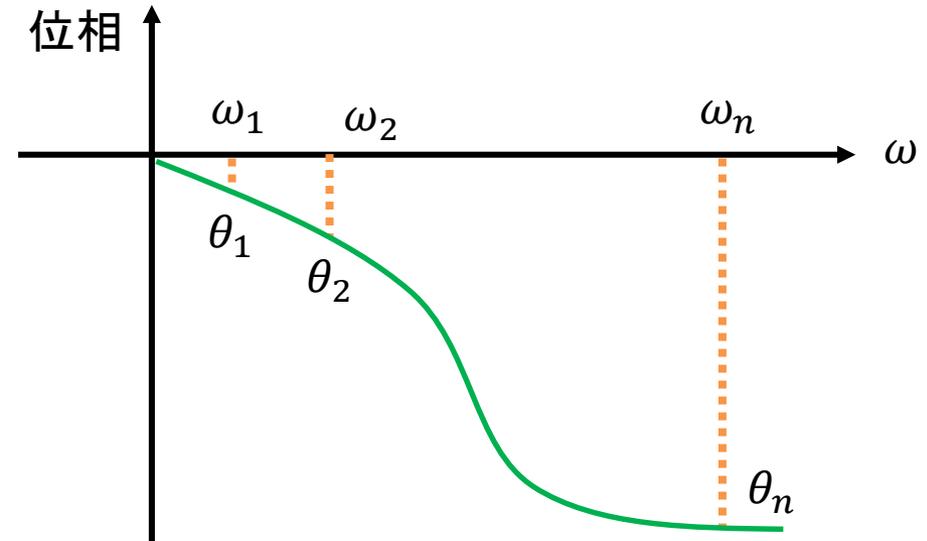
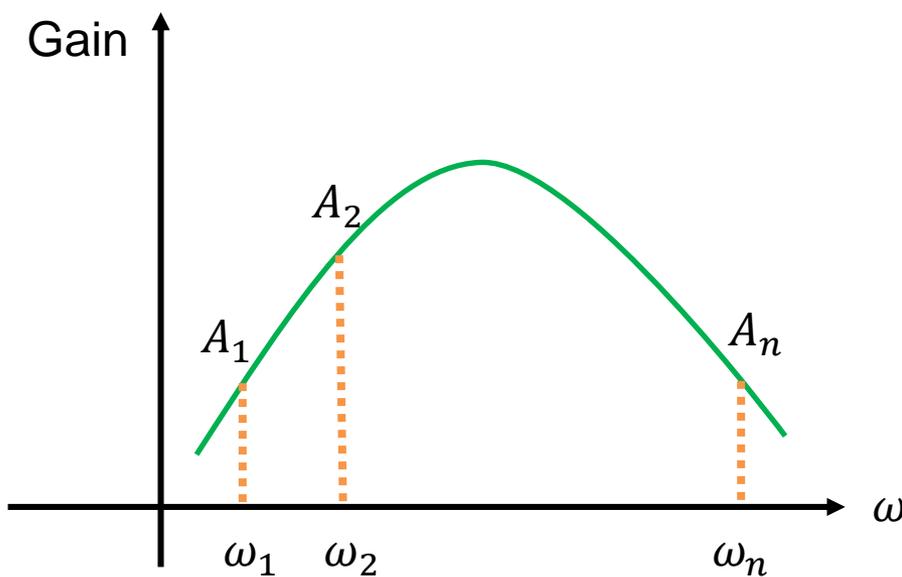
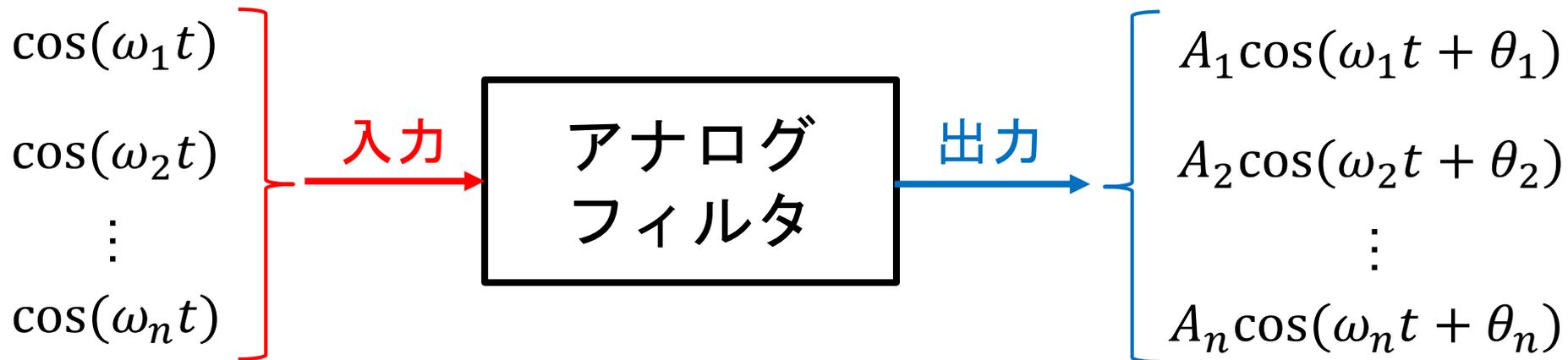


SoC内のアナログ/ミクストシグナルICテストの一例

総テストコストの70%

総テスト時間の45%

# アナログ回路テストの例



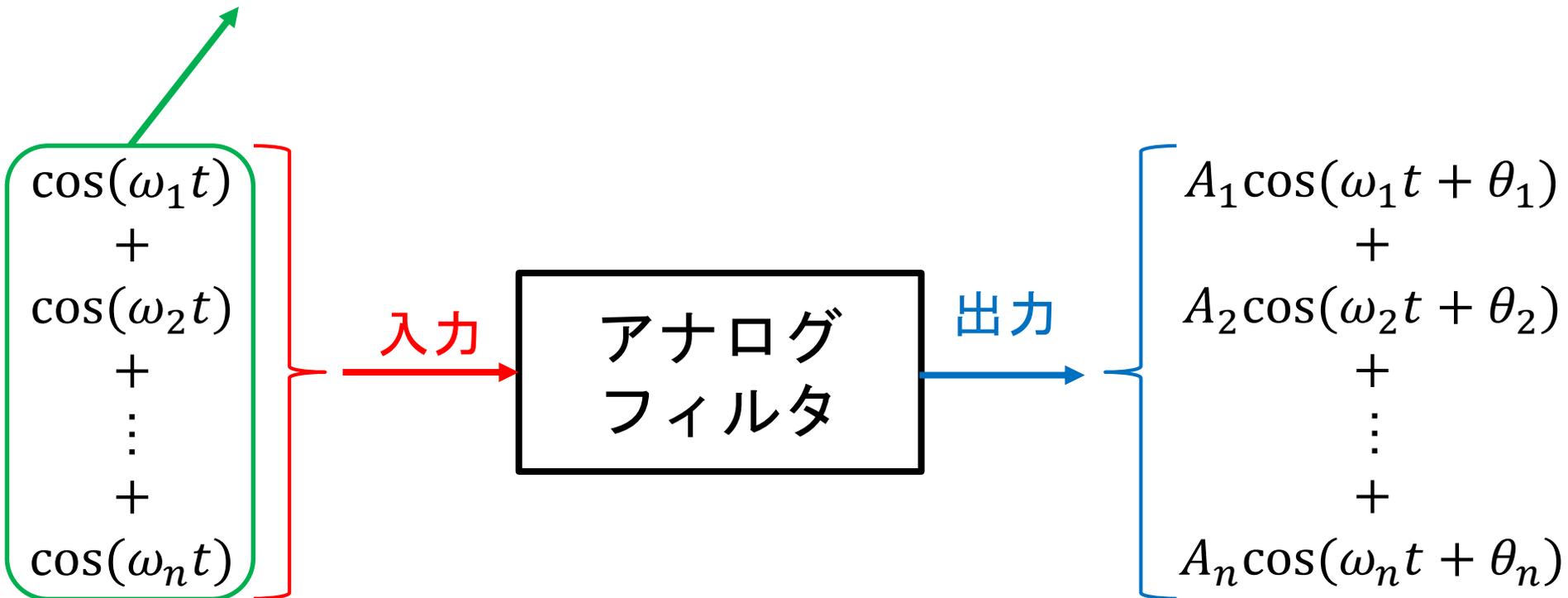
周波数をスイープさせてフィルタの特性を測定

# 今回のアプローチ

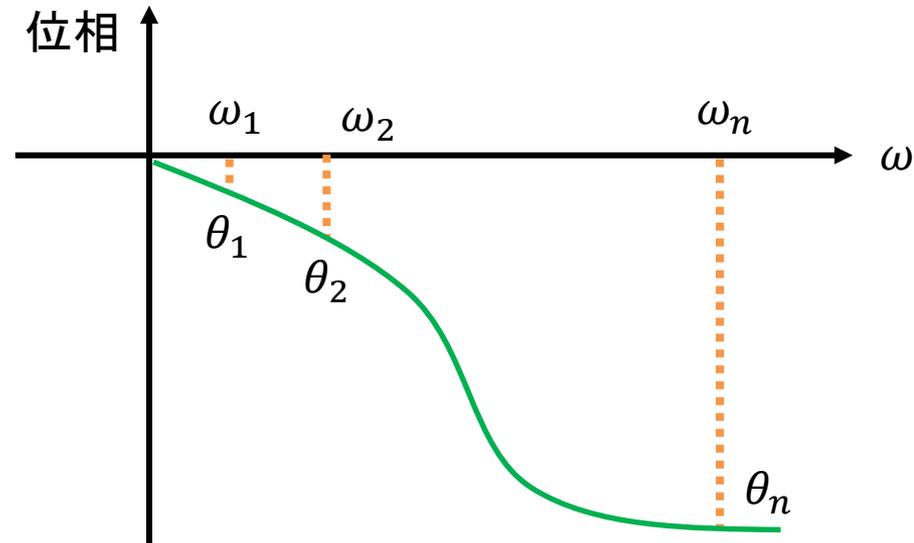
周波数をスweepさせる → テスト時間: **増**



マルチトーン信号を入力信号として使用 → テスト時間: **短縮**



# マルチトーン信号のメリット



周波数をスイープさせる場合

位相特性を測る場合



入力信号の位相をモニターする必要がある

マルチトーン信号の場合

入力信号の各周波数成分の位相関係は既知



入力信号の位相をモニターする必要がある

# 今回使用したアルゴリズム

$$s(t) = K[\cos(\omega_1 t + \theta_1) + \cos(\omega_2 t + \theta_2) + \dots + \cos(\omega_n t + \theta_n)]$$

被測定回路の入カレンジ :  $-1 \leq s(t) \leq 1$

→  $K$  : マルチトーン信号の最大振幅の逆数

位相( $\theta$ )を調節して最大振幅をできるだけ小さくする



$K$ :大 → SNRの向上



高精度なテスト信号生成が可能

# 例：N=10のとき

$$s(t) = K[\cos(\omega_1 t + \theta_1) + \cos(\omega_2 t + \theta_2) + \cdots + \cos(\omega_{10} t + \theta_{10})]$$

被測定回路の入力レンジ :  $-1 \leq s(t) \leq 1$

- |  |        |               |
|--|--------|---------------|
| ①位相 $\theta_1 = \theta_2 = \cdots = \theta_{10} = 0$ | —————→ | $K = 0.1[V]$  |
| ②ランダム位相  | —————→ | $K = 0.14[V]$ |
| ③アルゴリズム (Kitayoshi)                                  | —————→ | $K = 0.23[V]$ |

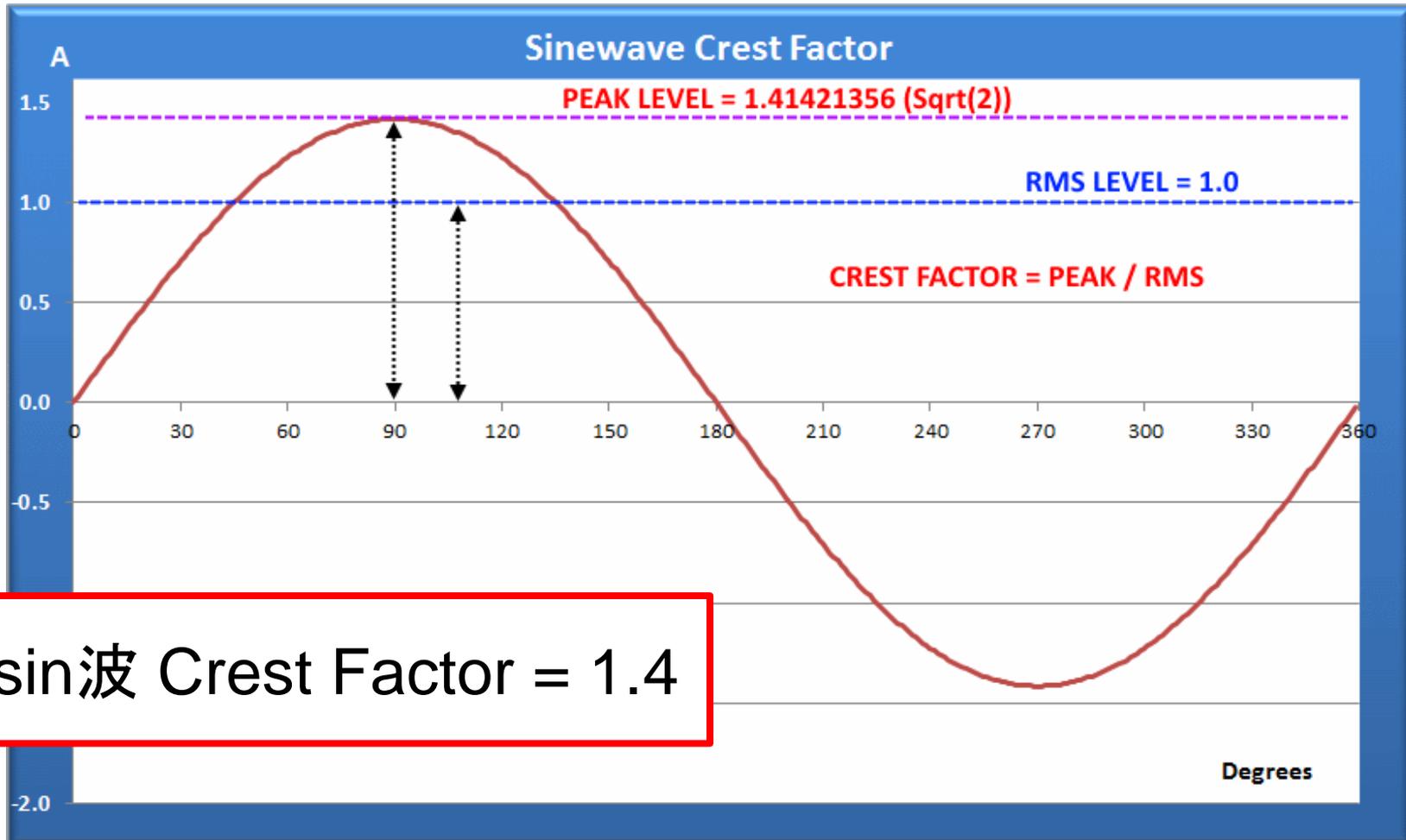
アルゴリズム (Kitayoshi) のときKが**最大**

—————→ 各周波数成分で大きな振幅を入力可

—————→ 各周波数成分で**大きなSNR**

# Crest Factor

## ピーク値とRMSの比

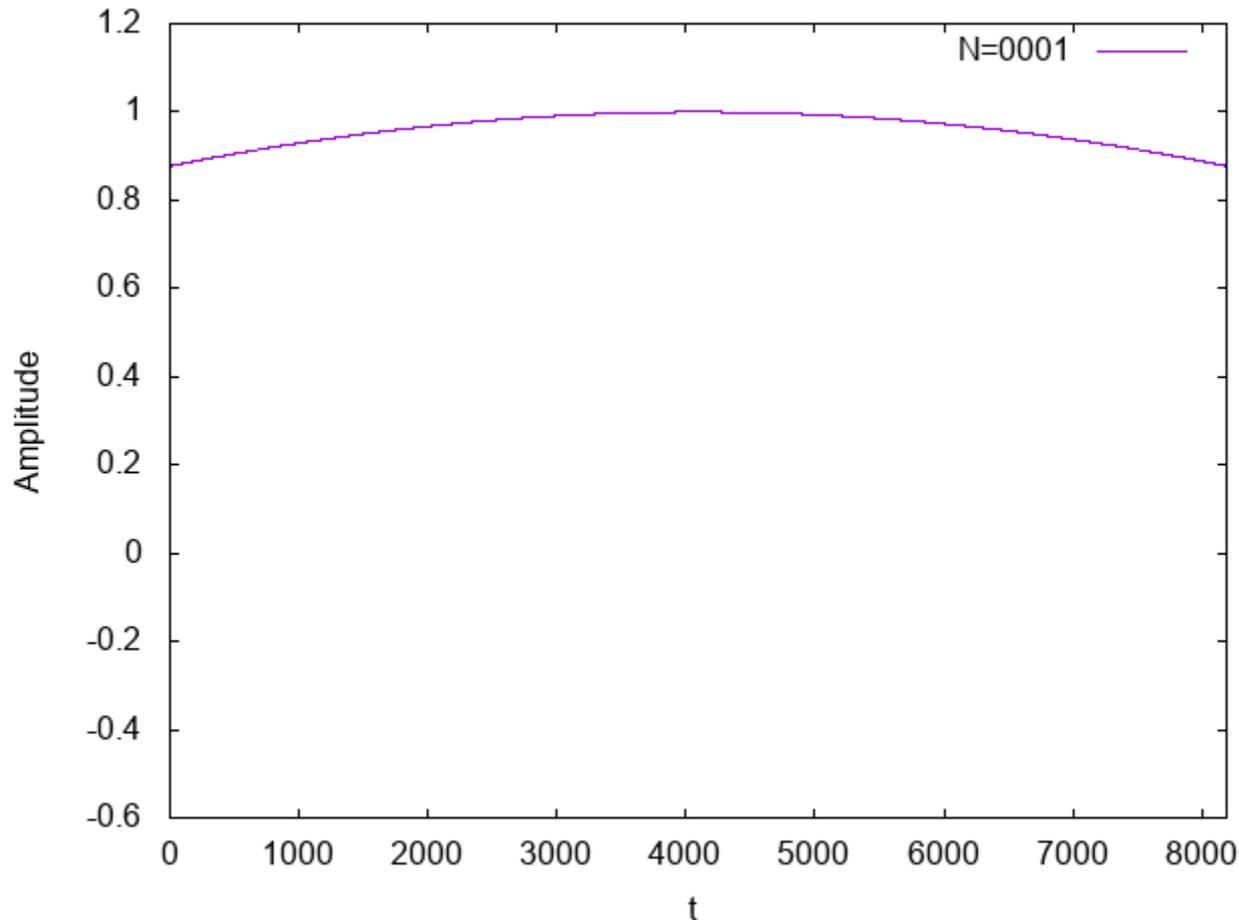


# OUTLINE

- 研究背景/目的
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - ランダム位相
- マルチトーン信号の応用例
- まとめ

# 位相0のときのマルチトーン信号

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos(2\pi nt/T)$$



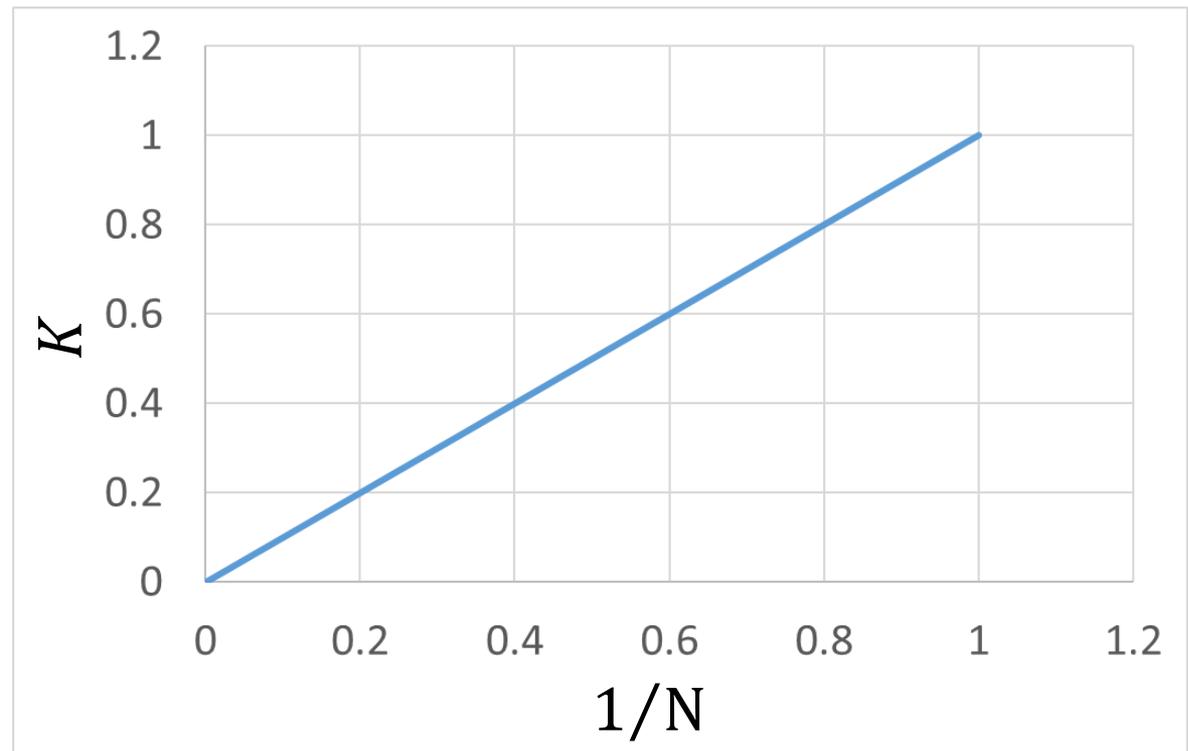
# 位相0 トーン数(N)とKの関係

$$s(t) = K \sum_{n=1}^N \cos(2\pi nt/T)$$

$N$ 個のsin波の和  
 $-1 \leq s(t) \leq 1$



$$K = \frac{1}{N}$$



# 精度の問題点

マルチトーン信号の最大振幅: **大**  
K: **小** → 各周波数成分の振幅: **小**



被測定回路のノイズ成分: 既定

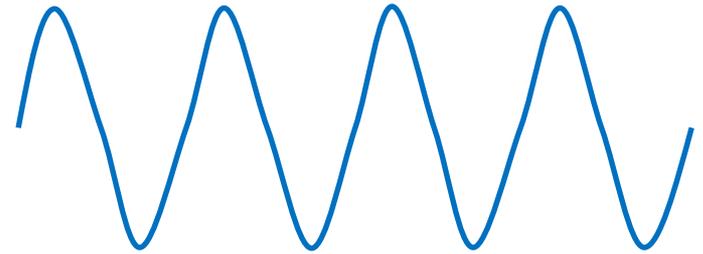


各周波数成分のSNRが悪くなる

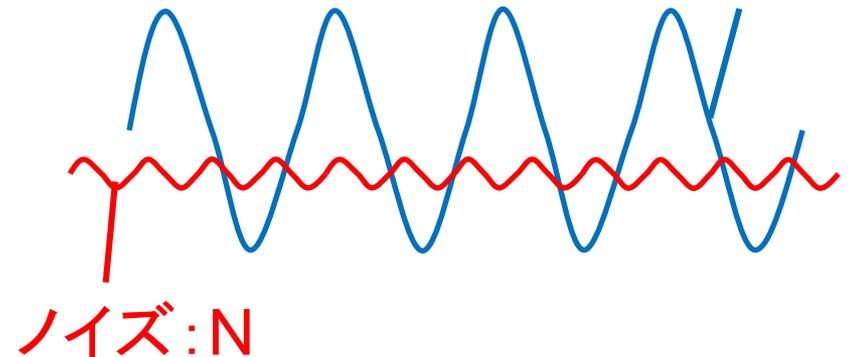


被測定回路の特性を**精度よく**  
測定できない

ある周波数成分:  $\omega_k$



信号: S



# OUTLINE

- 研究背景/目的
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - ランダム位相
- マルチトーン信号の応用例
- まとめ

# クレストファクタ低減アルゴリズム

基本式

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi nt}{T} + \phi_n\right)$$

Kitayoshi :  $\phi_k = \frac{\pi}{N} k(k+1)$

Newman :  $\phi_k = \frac{\pi}{N} (k+1)^2$

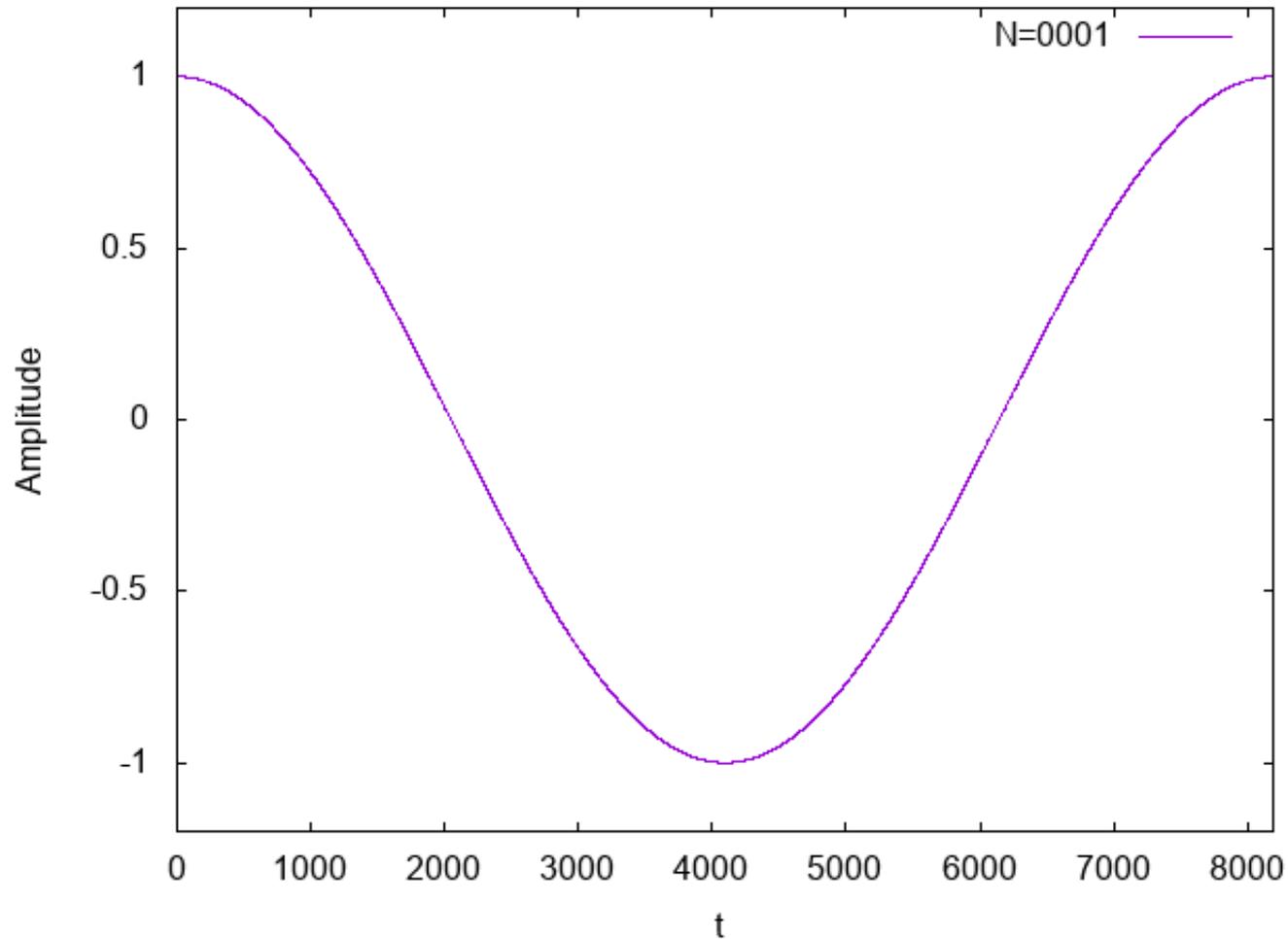
Schroeder :  $\phi_k = -\frac{\pi}{N} (k-1)k$

$$t = 0 \sim 8191$$

$$T = 1024$$

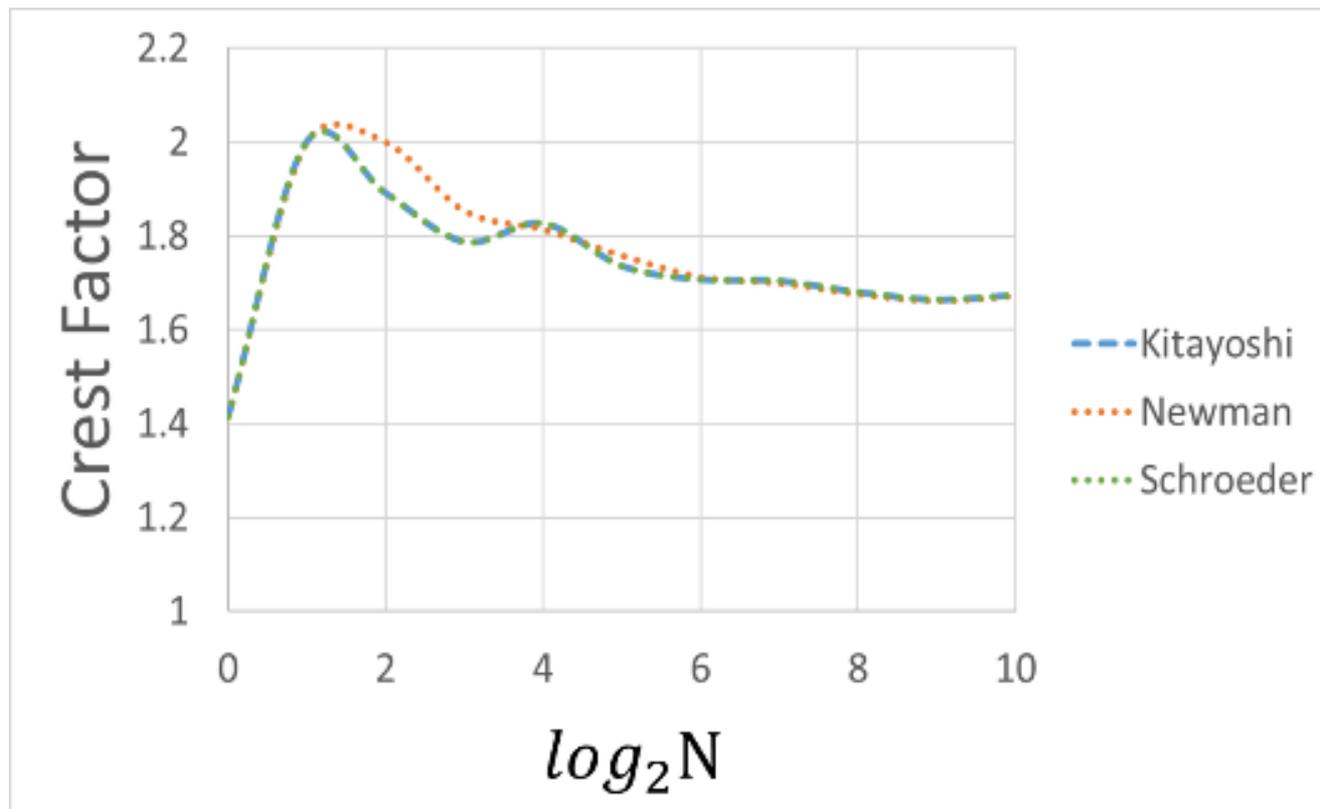
N : 2 の階乗

# Kitayoshi アルゴリズム



入力レンジ:  $-1 \sim +1$  としてシミュレーション

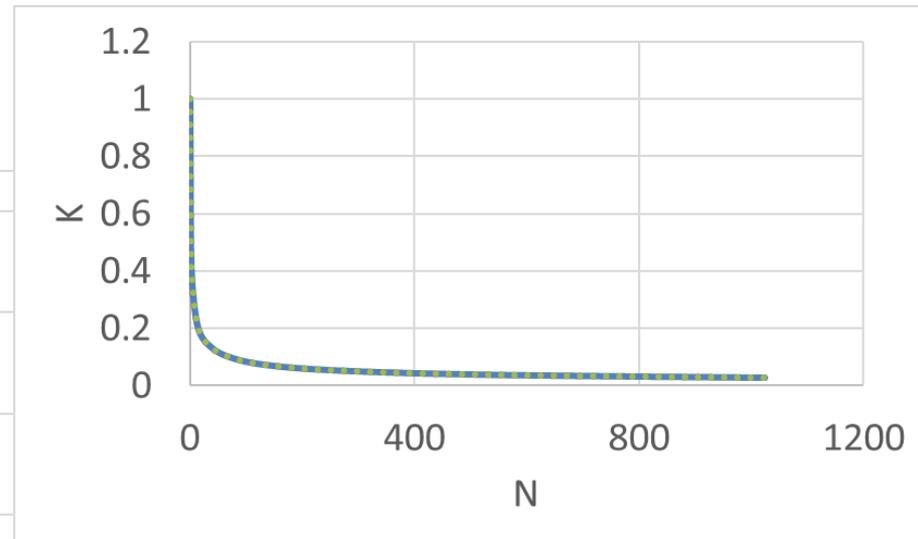
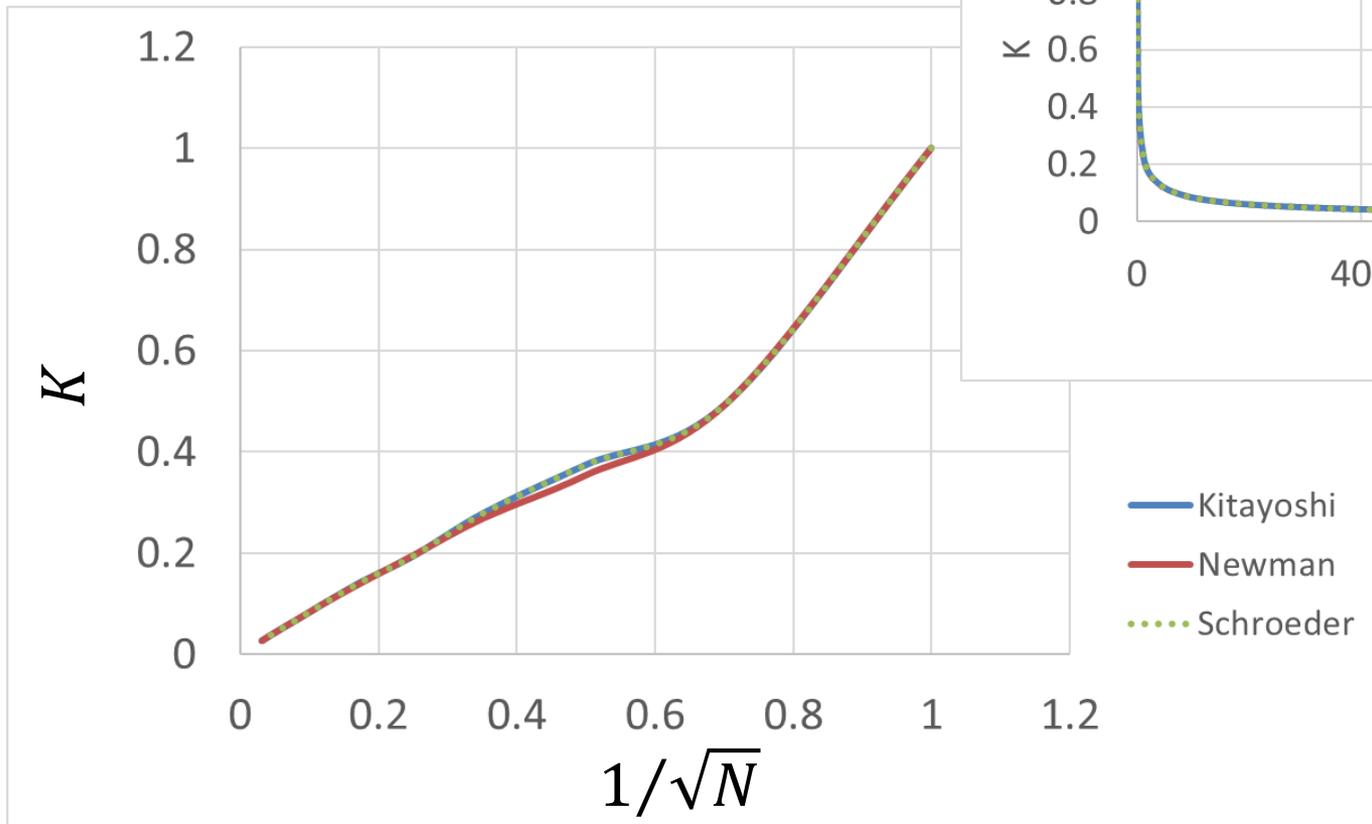
# トーン数 (N) とクレストファクタの関係



3つのアルゴリズム : ほとんど一致した  
(Kitayoshi & Schroeder : 完全に一致)

# トーン数(N)とKの関係

$$s(t) = K \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi nt}{T} + \phi_n\right)$$



$$K = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

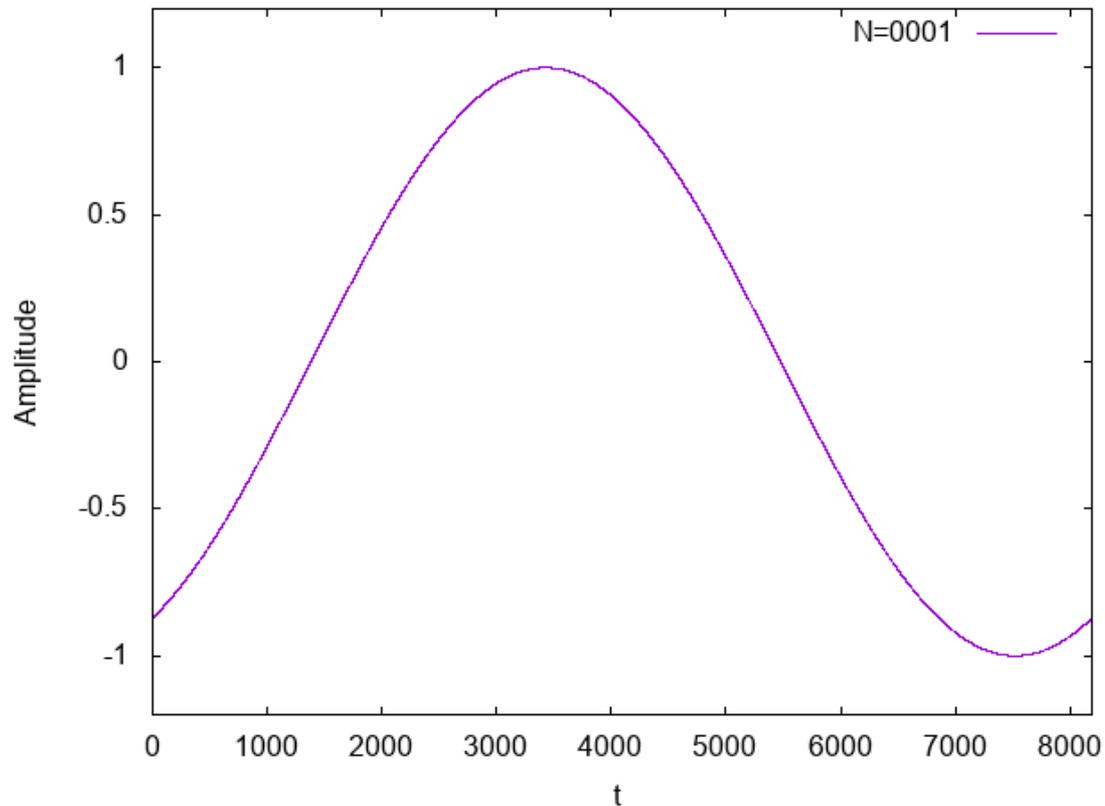
# OUTLINE

- 研究背景/目的
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - **ランダム位相**
- マルチトーン信号の応用例
- まとめ

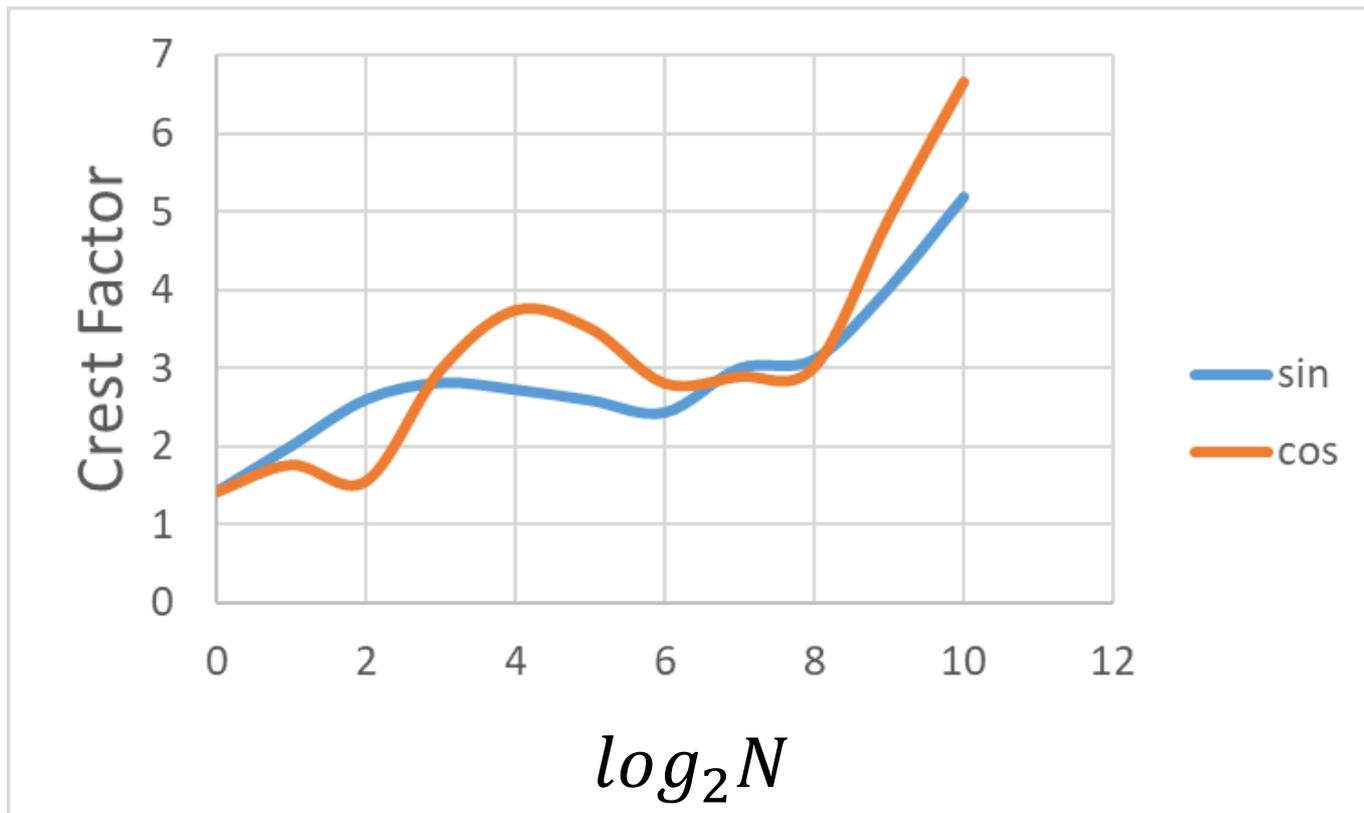
# 位相を一様乱数としたときの波形

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi nt}{T} + \phi_n\right) \rightarrow$$

$\phi_n$ はニューメニカルレシピ・イン・シーの  
ガウス乱数をもとにC言語で生成

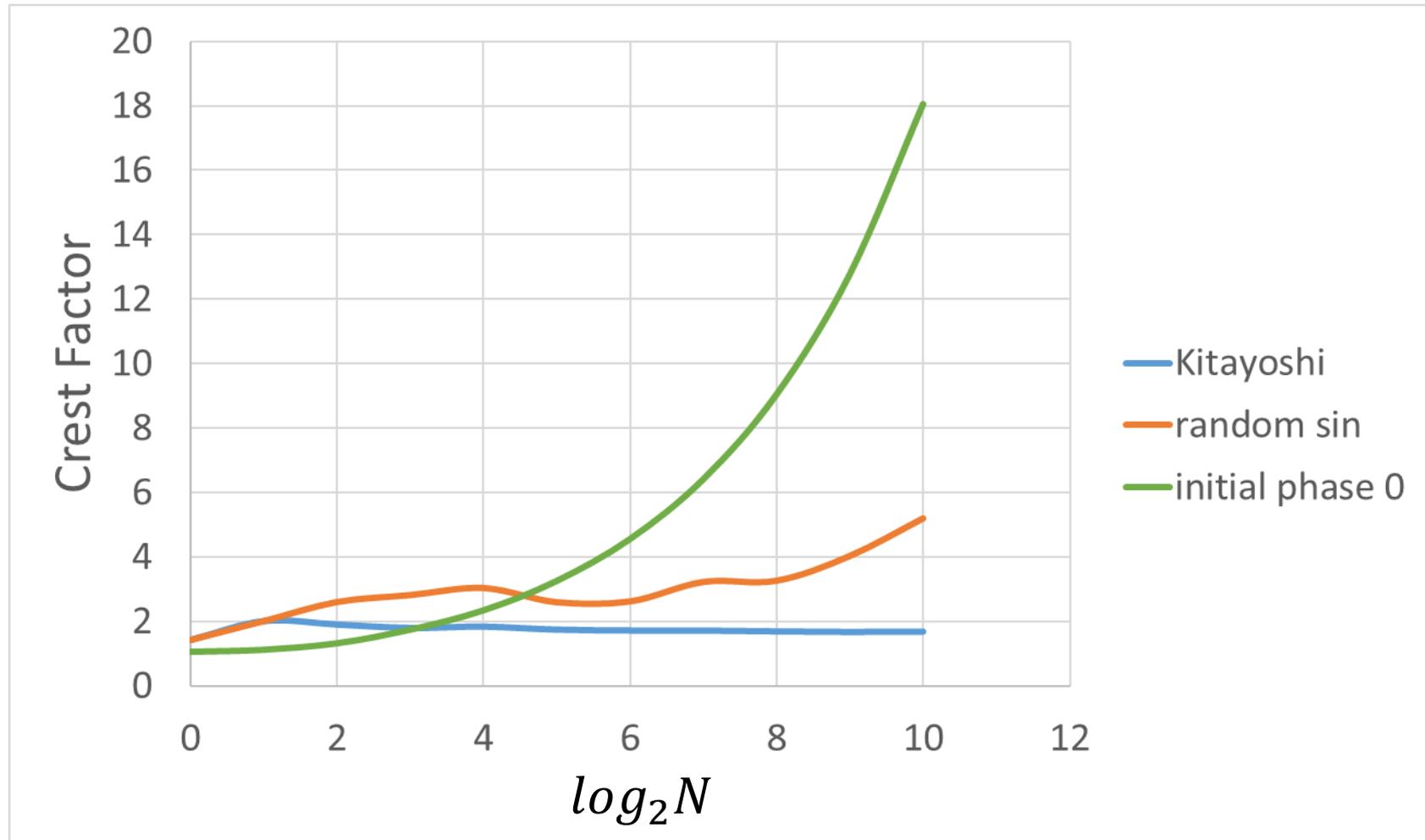


# トーン数(N)とクレストファクタの関係



Nが増加するにつれてクレストファクタも増加する

# クレストファクタの比較



# OUTLINE

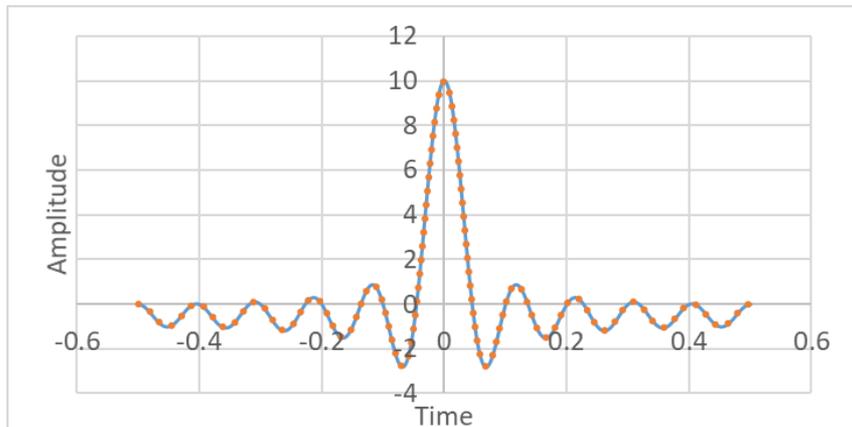
- 研究背景/目的
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - ランダム位相
- **マルチトーン信号の応用例**
- まとめ

# 解析式

$$\sum_{n=1}^N e^{j2\pi nt/T} = \frac{\sin(\pi Nt/T)}{\sin(\pi t/T)} e^{j\pi(N+1)t/T}$$

実部

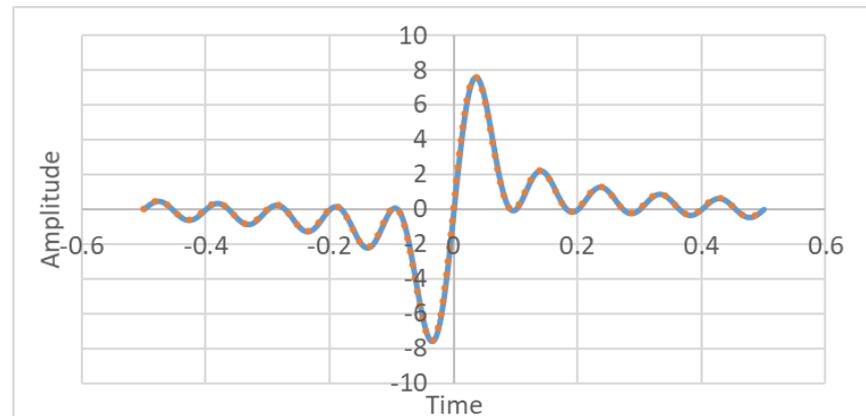
$$\frac{\sin(\pi Nt/T)}{\sin(\pi t/T)} \cos(\pi(N+1)t) = \sum_{n=1}^N \cos(2\pi nt/T)$$



— real part    ..... sum of cosine waves

虚部

$$\frac{\sin(\pi Nt/T)}{\sin(\pi t/T)} \sin(\pi(N+1)t) = \sum_{n=1}^N \sin(2\pi nt/T)$$



— imaginary part    ..... sum of sine waves

# 複素インパルス信号

$N \rightarrow \infty$  のとき

実部

$$\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^N \cos(2\pi n t / T) \rightarrow \frac{1}{2} \delta(t)$$

虚部

$$\sum_{n=1}^N \sin(2\pi n t / T) \rightarrow \frac{1}{2\pi t / T}$$



$$\int_0^{\infty} \cos(2\pi f t) df = \frac{1}{2} \delta(t) \quad \rightarrow \quad \int_0^{\infty} e^{j2\pi f t} df = \frac{1}{2} \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right)$$

$$\int_0^{\infty} \sin(2\pi f t) df = \frac{1}{2} \frac{1}{\pi t} \quad \xrightarrow{j} \quad \int_0^{\infty} \cos(2\pi f t) df = \frac{1}{2} \delta(t)$$

The diagram shows the Hilbert transform process. The real part integral  $\int_0^{\infty} \cos(2\pi f t) df = \frac{1}{2} \delta(t)$  is added to the imaginary part integral  $\int_0^{\infty} \sin(2\pi f t) df = \frac{1}{2} \frac{1}{\pi t}$  multiplied by  $j$ . The result is  $\int_0^{\infty} e^{j2\pi f t} df = \frac{1}{2} \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right)$ .

ヒルベルト変換

# OUTLINE

- 研究背景/目的
- アナログ/ミクストシグナルICのテスト
- マルチトーン信号
  - 位相0
  - クレストファクタ低減アルゴリズム
  - ランダム位相
- マルチトーン信号の応用例
- まとめ

# 結論

$$\text{位相0} \rightarrow K = \frac{1}{N}$$

$$\text{アルゴリズム} \rightarrow K \approx \frac{1}{\sqrt{N}}$$

$$\text{一様乱数} \rightarrow K \approx \frac{1}{N^{0.64}}$$

N個の周波数成分の和

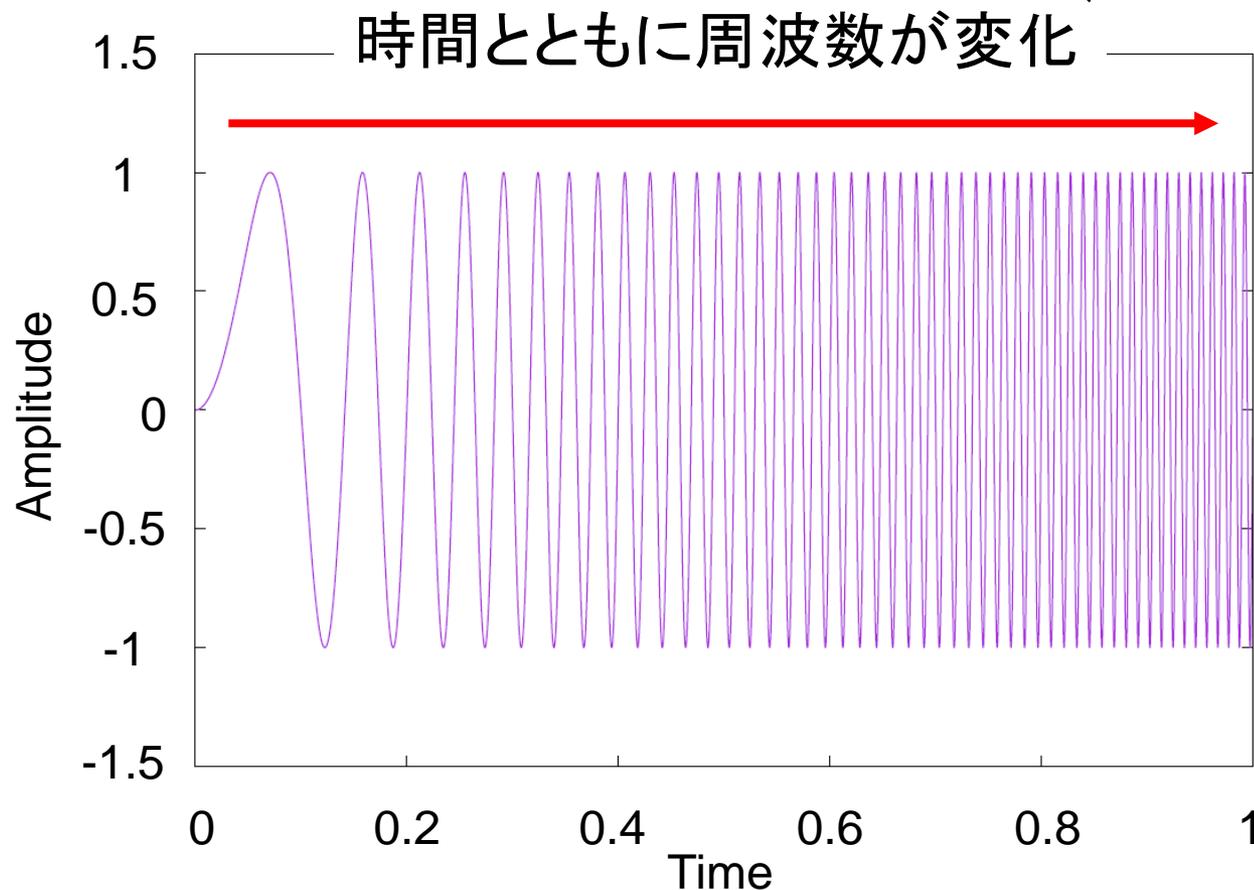
- 普通の信号:  $N$ 倍
- ランダムノイズ:  $\sqrt{N}$ 倍



3つの Crest Factor 低減アルゴリズムは  
同等かつほとんど最適なランダム化が可能である

# 今後の課題

正弦波の線形チャープ:  $x(t) = \sin\left[2\pi\left(f_0 + \frac{kt}{2}\right)t\right]$



Crest  
Factor

1.43

マルチトーン信号とチャープ信号の比較

# Q&A

Q: マルチトーン信号を入力すると測定時間が長くなるのか？

A: 例えば10トーンをスイープさせる場合と比較すると  
10トーンのマルチトーン信号を入力した場合、  
単純に考えると時間は1/10になると考える。

Q: マルチトーン信号のデメリットは？

A: ①非線形歪の有る系に入れると、相互変調歪を発生する  
②周波数の局在性のため、時間軸上の一周期を  
きっちり取り込む必要がある

Q: 高周波では減衰が起こるが、低周波では起こらない。  
両者を測定可能なのか？

A: 十分にサンプリングレートを考慮する。  
また、逆特性で補正を行う。

# Q&A

Q: 広帯域で測定できるのか？

A: 歪みが致命的でなければ可能。

広帯域での測定にはクレストファクタ低減が不可欠である。

Q: DC～GHz帯まで測定できるのか？

A: 目標の帯域を決めて、それに沿ったマルチトーン信号を生成する必要がある。

Q: 従来の点数を100とすると、今回の提案の点数は？

A: 精度については未検討。

# Q&A

Q: テスト時間は短縮されるのか？

A: 周波数をスイープさせる手法に比べて、  
1波形分の入力ですむのでテスト時間は短縮できる。

Q: 実際のシステムLSIに適用する際の難しさはどんなところか？

A: システムLSIの中身をどれだけいじれるかという部分。  
D/Aコンバータを使用している。

Q: デジタルで出力できるのか？

A: FFTを外で行ったあと、デジタル出力にできる。

Q: 実際にLSIに適用する予定はあるのか？

A: 現在はそこまで考慮できていない。

# 浅見幸司先生(群馬大客員教授)コメント 1

## (1) プレゼンについて

- ・ P.6, デジタル回路の新しいテスト手法の所、ATPGはテスト手法とはちょっと違うと思いました。
- ・ P.7-8, スライドは問題ありませんが、  
「今まではシングルトーンを使っていて、今回の新しい提案がマルチトーン」という説明は、間違いです。マルチトーンを使ったテストの歴史は古く、20年以上前から使われています。  
(シングルトーンに対して、マルチトーン試験は速いことを説明するためのスライドと思っていました。)
- ・ P.18, 「2の階乗」→「2のべき乗」
- ・ P.27, ちなみに、複素正弦波の場合は、クレストファクタよりも PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) の方がよいと思いますので、今後、計算してみてください。
- ・ P.34, 4番目のQ&Aありましたっけ？  
マルチトーンを使ったテストの歴史は古く、すでに使われていますが、SoCに組み込めるか、という質問には、  
→デバイス内にDACがあれば、可能。  
△Σを組込んで、使用方法もある、  
と説明した記憶があります。(参考: Gordon Robert氏のBISTの本)  
(SoCへの組み込みは(我々では無く)デバイス設計者の仕事、  
くらいのことは言ったかもしれませんが。)

# 浅見幸司先生(群馬大客員教授)コメント 2

(2) Q&Aについて、

- ・ 使用できる帯域は無限に広いわけではないのでは？アナログ特性に限界があるのでは？
  - デバイスによって、テストが必要な帯域は決まっているので、マルチトーンは帯域制限して使用する。
  - 例えば、無線通信5Gの28GHz帯でも、ベースバンド帯域は数百MHzなのでその範囲のマルチトーンでよい。(無限に広い帯域幅の信号が必要なわけではないことを、ご理解いただいた。)
- ・ DACなどの特性が、信号に影響しないか。
  - DACのゼロ次ホールド特性などは、あらかじめ補正可能。
- ・ デメリットは何か？最低信号周波数分の周期は必要なのでは？
  - 最低信号周波数分の周期は必要だが、それはシングルトーンでも同様。
  - むしろ、最低信号周波数分の周期に、高い周波数の成分も入っているのがメリット。
  - デメリットとしては、非線形特性があると、相互変調歪になる。
  - この影響を最小にするために、クレストファクタを最小化する。

# 浅見幸司先生(群馬大客員教授)コメント 3

PAPRIは、特にOFDM系の変調でよく議論されます。  
クレストファクタと違うのは、振幅では無く、電力で比を取る部分であり、  
ピークパワー／平均パワーで定義されます。 ([dB]で表現されることが多いです。)

今、手元にあるものでは、

- ・ 野嶋俊雄、山尾泰編著「モバイル通信の無線回路技術」電子情報通信学会編
- ・ Seung Hee Han, Jae Hong Lee, “An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission”,  
IEEE Wireless Communications, Volume: 12, Issue: 2, pp.56-65, April 2005.

ネットで探しましたら、下記もありました。

[http://www.mobile.ecei.tohoku.ac.jp/paper/pdf/rcs\\_2009/15\\_rcs\\_2009\\_kazuki.pdf](http://www.mobile.ecei.tohoku.ac.jp/paper/pdf/rcs_2009/15_rcs_2009_kazuki.pdf)

[http://www.mcrge.ee.titech.ac.jp/previous/seminar/060622\\_nomura\\_p.pdf](http://www.mcrge.ee.titech.ac.jp/previous/seminar/060622_nomura_p.pdf)

# 石田雅裕先生(群馬大客員教授)コメント

石田です。発表の記録をお送りいただきありがとうございます。

質疑応答に関する詳細なコメントは浅見さんがしてくれていますので、私は全体的な印象をコメントします。

今回の発表内容は、目的とまとめにあるように「マルチトーン信号の性質を明確化する」ことだと理解しています。一方、発表では「マルチトーン信号をもちいたときの試験時間短縮と試験精度」に注目されてしまったため、Q&Aの前半のような議論になったと思います。

これは、聴講者が「試験時間短縮と試験精度」と「マルチトーン信号の性質の明確化」の関係をうまく結び付けられなかったためです。

「マルチトーン信号を使うと、複数の周波数を同時に評価できるので、試験時間を短縮できる」こと、「最大振幅が制限されている場合、クレストファクターが大きいと、各周波数の信号振幅を大きくできて、試験精度が向上する」ことをもう少し強く印象付けられれば良かったのかなと考えます。

とはいえ、あまり分かりやすく発表すると、Q&Aが盛り上がらなくてそれはそれでさみしいのですが…

何はともあれ、Q&Aで議論がたくさんできたことは、聴講者が発表に興味をもってくれたということですので、今回の発表は成功だったと思います。