

# 任意波形発生器を用いた 低歪み2トーン信号発生技術

○加藤啓介  
小林春夫

若林和行  
小林修

山田貴文  
新津葵一

群馬大学  
(株)半導体理工学研究センター(STARC)

# アウトライン

- 研究背景・目的
- 歪みの発生
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

# アウトライン

- 研究背景・目的
- 歪みの発生
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

# 研究背景

通信用デバイスの市場拡大

→ デバイステストが重要



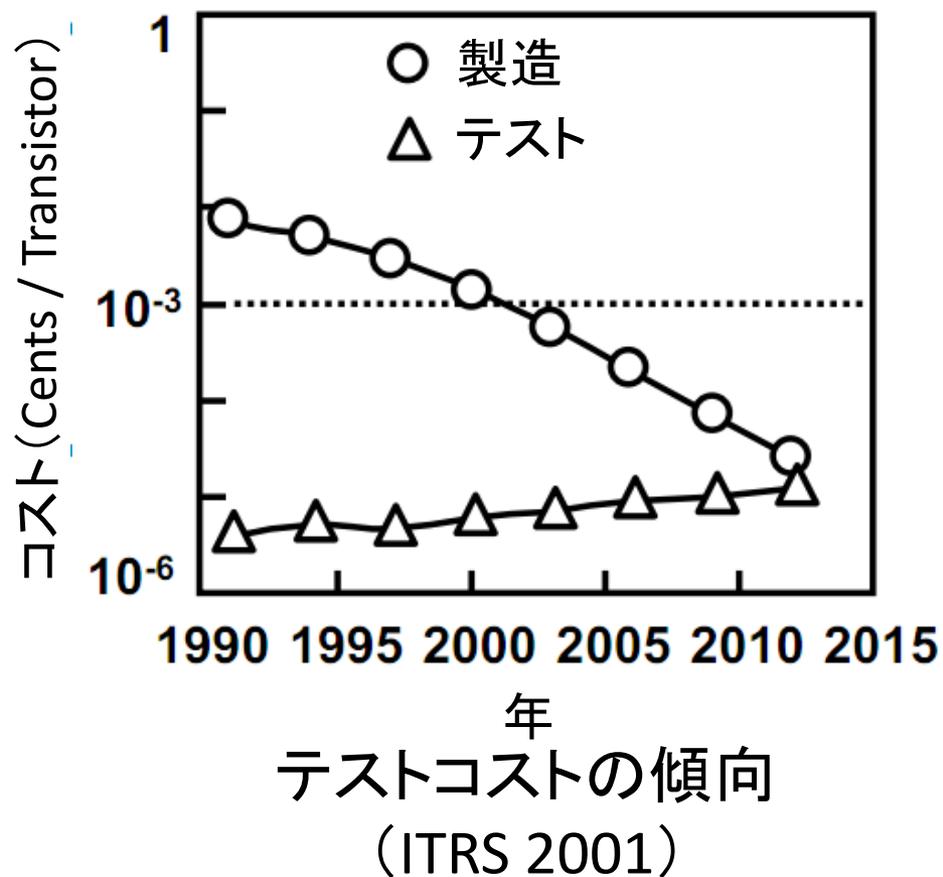
製造コスト → 減少

テストコスト → 増加

(トランジスタ当たり)



低コストテストが求められる



# 研究目的

低性能(低コスト)信号発生器で適正な品質の  
通信用デバイステストを実現

低性能信号発生器 → 歪み大

低歪みの2トーン信号を  
低コストAWGで生成



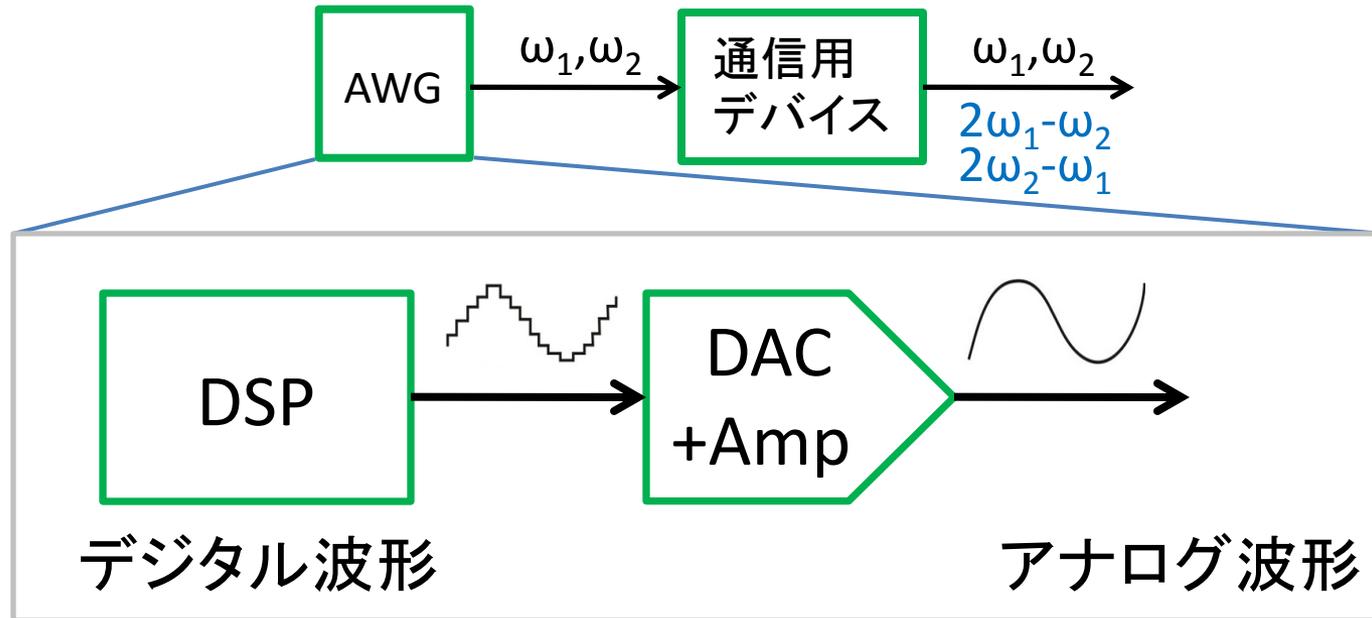
大量のテストに効果大



AWG (Arbitrary Waveform Generator: 任意波形発生器)

# AWGによるテスト信号発生

AWG (arbitrary waveform generator: 任意波形発生器)



AWGブロック図

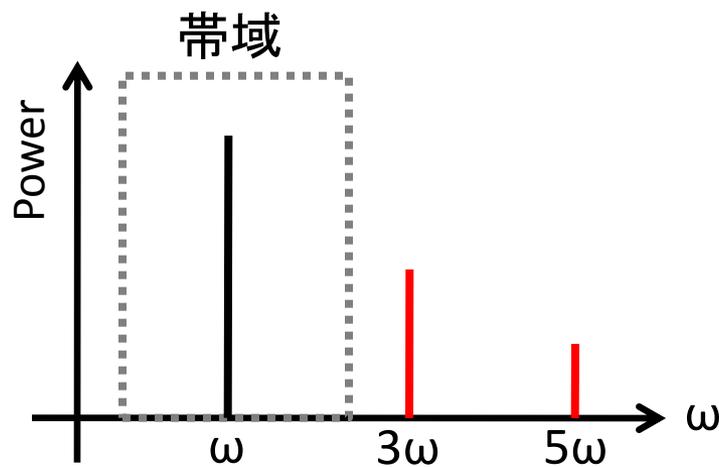
DSPで任意デジタル波形をDAC+Ampに入力  
➡ アナログ波形を出力

# 通信用デバイスのテスト

狭帯域・高周波信号を受信

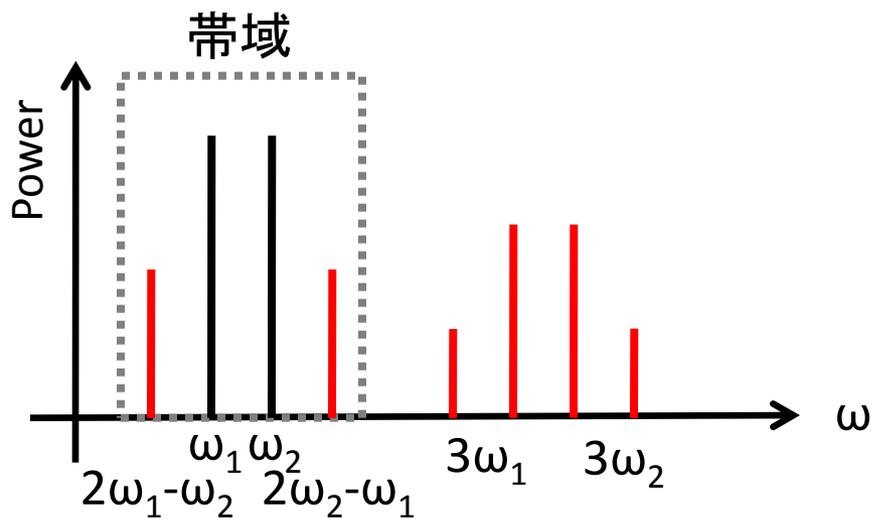
➡ AWGによる2トーン信号で線形性テスト

通信用デバイスに非線形性あり



1トーン信号

➡ 線形性のテスト不可

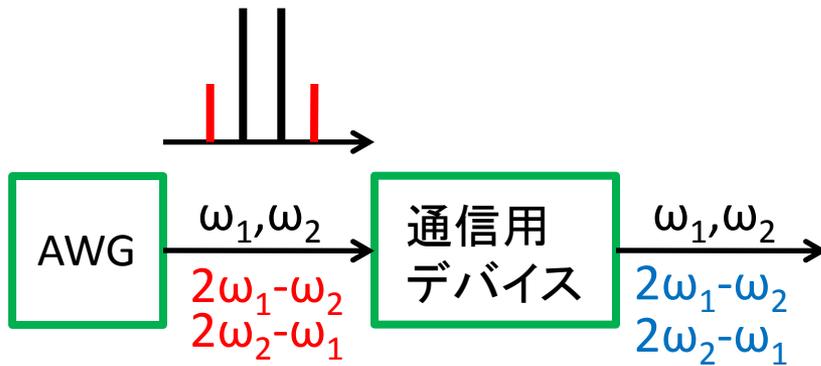


2トーン信号

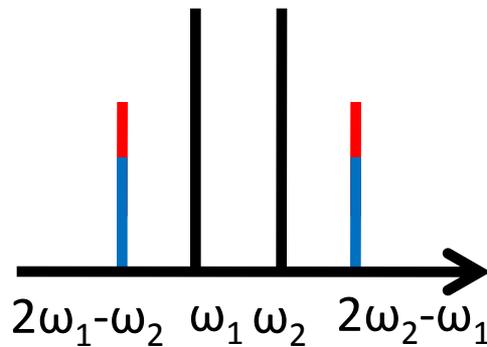
➡ 非線形性により  
帯域内に歪み発生

# テスト結果の判別

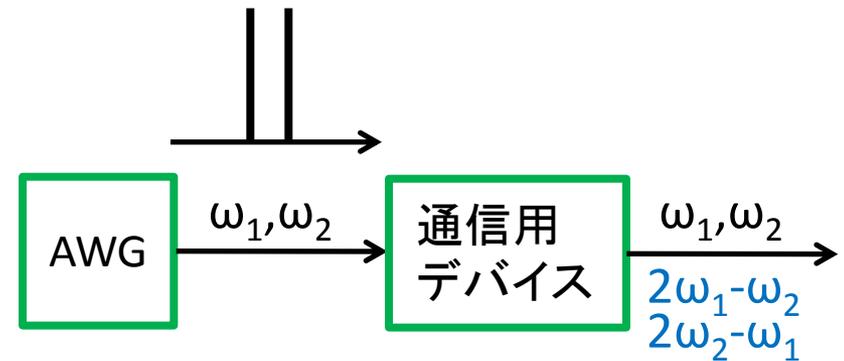
歪みのある信号発生



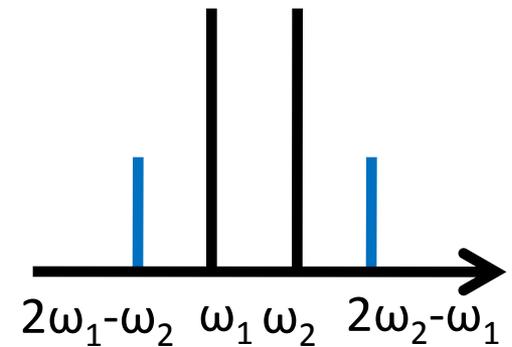
テスト結果  
判別不可



歪みのない信号発生



テスト結果  
判別可

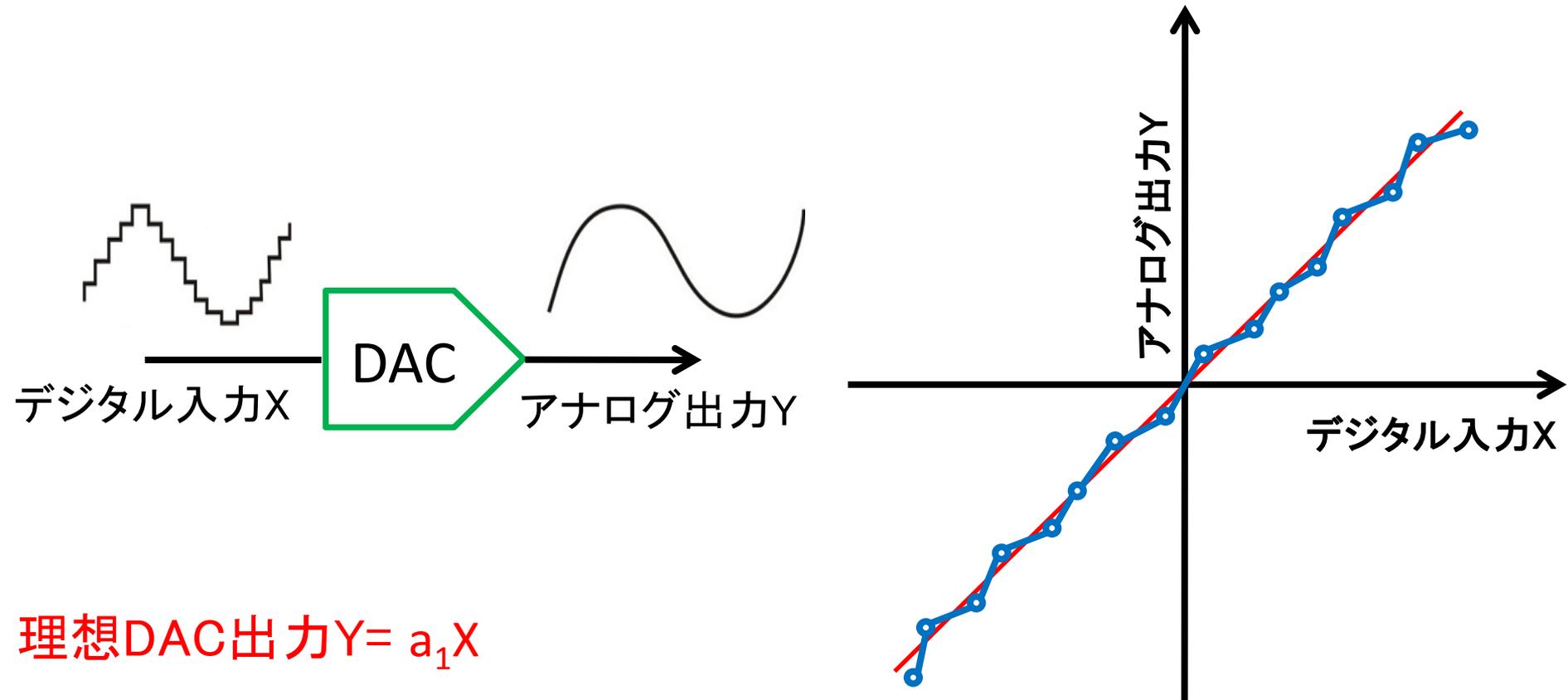


AWG (arbitrary waveform generator: 任意波形発生器)

# アウトライン

- 研究背景・目的
- **歪みの発生**
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

# DACの非線形性による歪みの発生



理想DAC出力  $Y = a_1 X$

現実DAC出力  $Y = a_0 + a_1 X + \boxed{a_2 X^2} + \boxed{a_3 X^3} + \boxed{a_4 X^4} \dots$

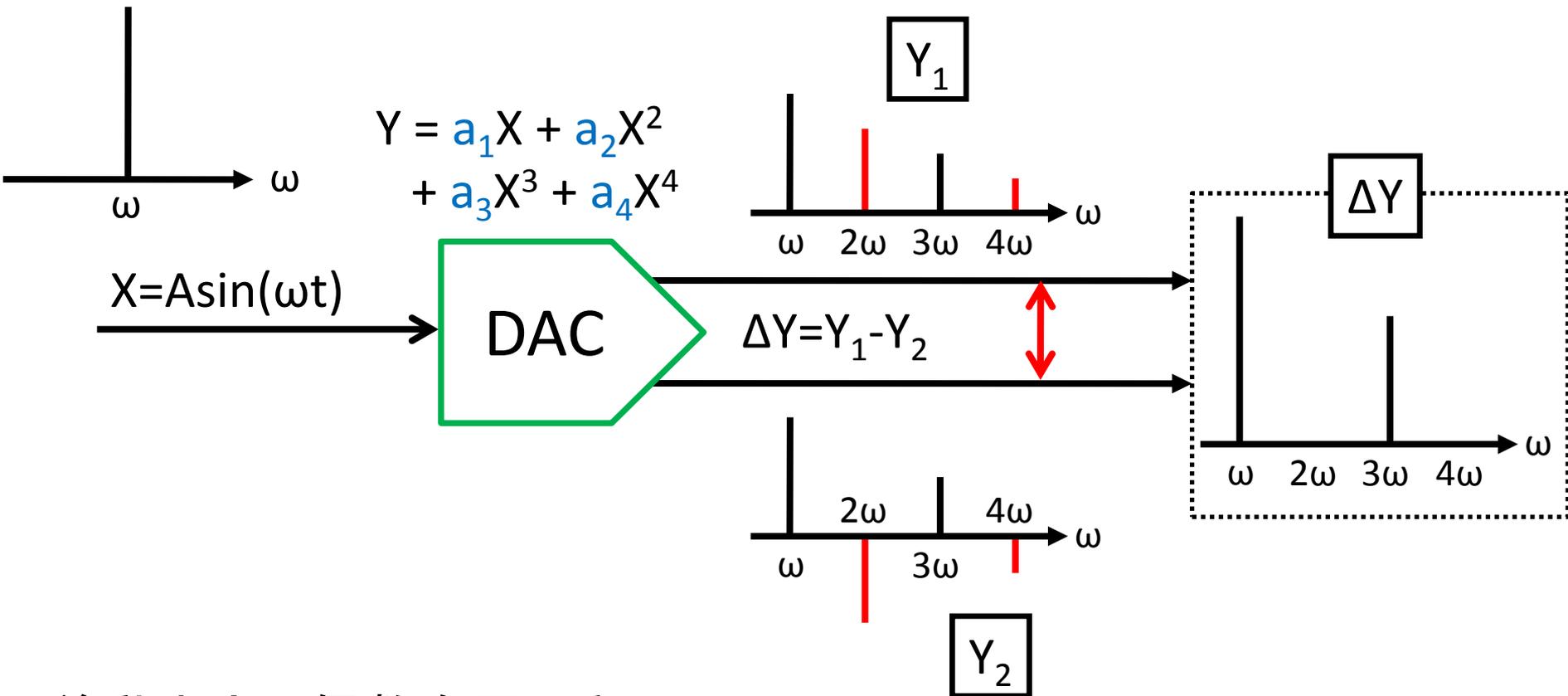
2次歪    3次歪    4次歪

素子のばらつきなどにより非線形



歪みが発生

# 差動構成による偶数次歪みの除去



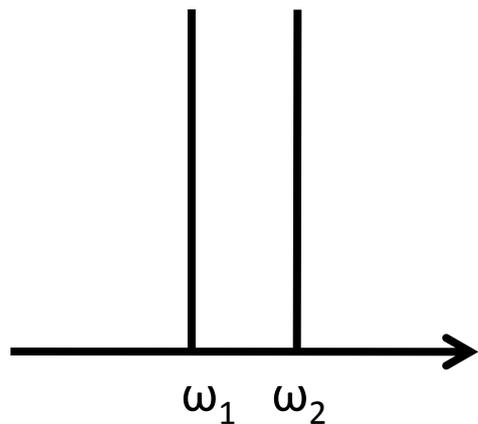
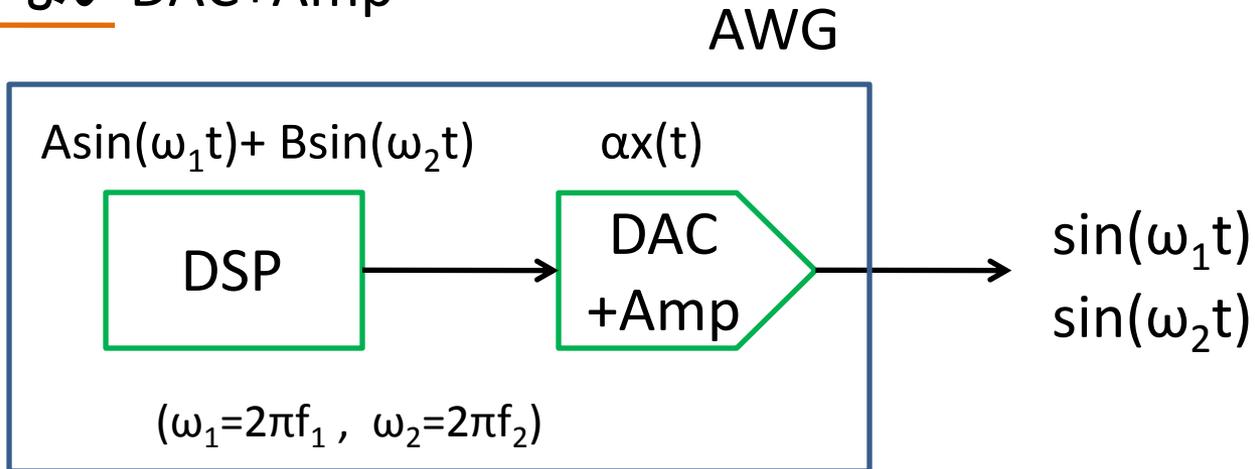
差動出力で偶数次歪みキャンセル



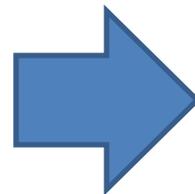
影響の大きい3次歪みを考慮

# 相互変調歪み

## 歪みのないDAC+Amp



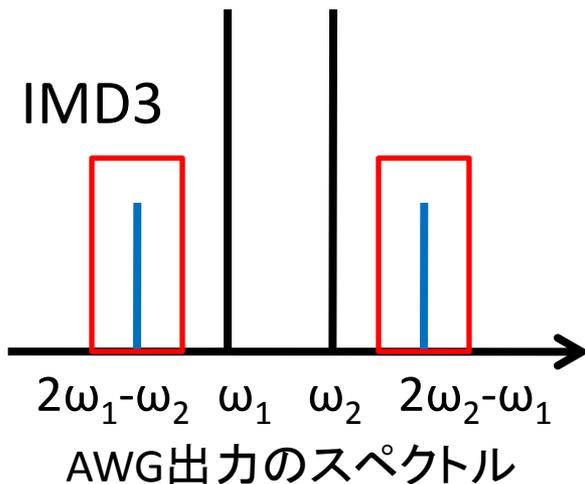
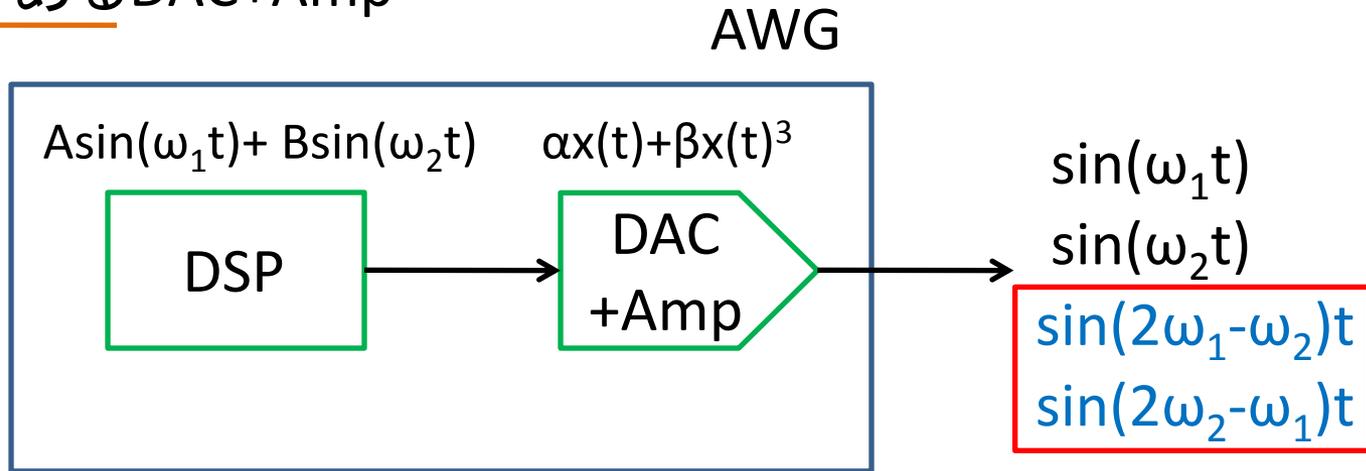
AWG出力のスペクトル



入力した周波数のみの  
スペクトルが出力

# 相互変調歪み

## 歪みのあるDAC+Amp



入力周波数の近傍に  
スペクトルが現れる

||

**相互変調歪み**

(IMD : Inter-modulation Distortion)

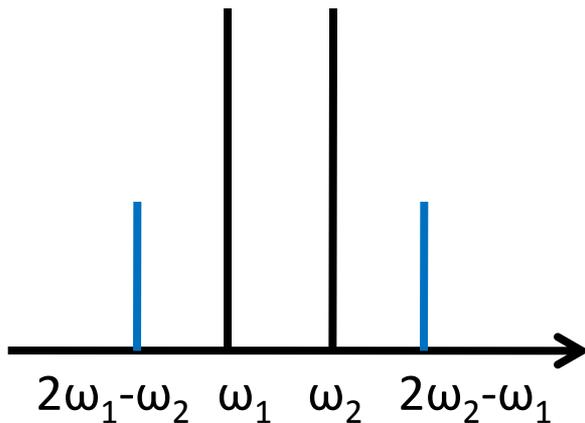
# 相互変調歪みの性質

$\omega_1, \omega_2$  が近い値



相互変調歪み → 入力周波数に近傍  
フィルタでの除去は困難

AWGでは問題となる



例

$$f_1 : 1.0\text{GHz} \quad f_2 : 1.1\text{GHz}$$

$$2f_1 - f_2 = 2 \cdot 1.0 - 1.1 = 0.9 \text{ [GHz]}$$

$$2f_2 - f_1 = 2 \cdot 1.1 - 1.0 = 1.2 \text{ [GHz]}$$

# アウトライン

- 研究背景・目的
- 歪みの発生
- **提案手法**
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

# 提案手法

- ・DSPで主信号に加え**3次高調波を入力**  
→ 入力周波数近くのIMD3を除去
- ・ $3\omega_1, 3\omega_2$ 等はフィルタで除去



所望の信号成分 $\omega_1, \omega_2$ を得る

$$A\sin(\omega_1 t) + B\sin(\omega_2 t)$$

$$+ C\sin(3\omega_1 t) + D\sin(3\omega_2 t)$$

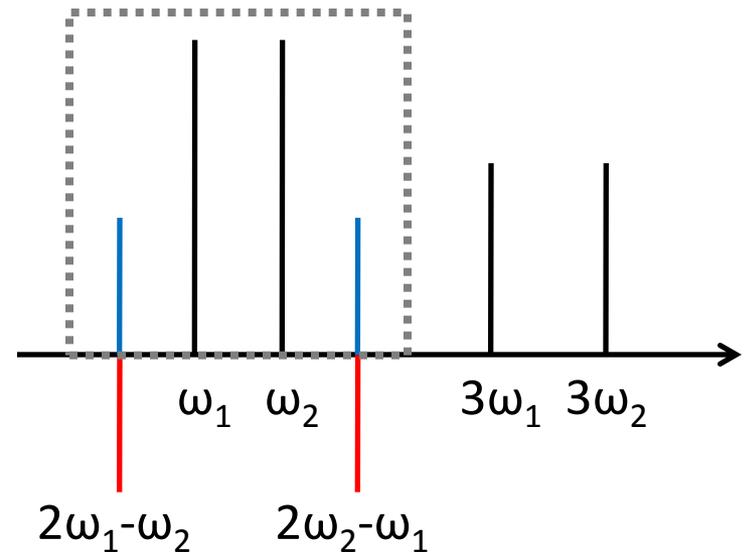


$$\alpha x(t) + \beta x(t)^3$$

DAC  
+Amp

$$\sin(\omega_1 t) \quad \text{---} \sin(2\omega_1 - \omega_2)t$$

$$\sin(\omega_2 t) \quad \text{---} \sin(2\omega_2 - \omega_1)t$$



# IMD3の除去方法

<3次高調波入力>

$$\begin{cases} y(t) = \alpha x(t) + \beta x(t)^3 & \text{[DAC+Amp]} \\ x(t) = A\sin(\omega_1 t) + B\sin(\omega_2 t) + C\sin(3\omega_1 t) + D\sin(3\omega_2 t) & \text{[入力信号]} \end{cases}$$



代入して  
 $\sin(2\omega_1 - \omega_2)t$  ,  $\sin(2\omega_2 - \omega_1)t$   
の項を抜き出す

$$\begin{cases} 3\beta/4 \cdot A^2 B \sin(2\omega_1 - \omega_2)t \\ -3\beta/2 \cdot A B C \sin(2\omega_1 - \omega_2)t \end{cases} \quad \begin{cases} 3\beta/4 \cdot A B^2 \sin(2\omega_2 - \omega_1)t \\ -3\beta/2 \cdot A B D \sin(2\omega_2 - \omega_1)t \end{cases}$$



打ち消す

$$\underline{C = A/2, D = B/2}$$

$\alpha, \beta$ に依存しない  
→ DAC+Ampの特性  
同定不要

# 周波数成分の変化

除去成分

入力成分

発生成分

$$\sin(2\omega_1 + \omega_2)t$$

$$\sin(\omega_1 + 2\omega_2)t$$

$$\sin(2\omega_1 - \omega_2)t$$

$$\sin(\omega_1 - 2\omega_2)t$$

$$\sin(3\omega_1 + 2\omega_2)t$$

$$\sin(2\omega_1 + 3\omega_2)t$$

$$\sin(3\omega_1 - 2\omega_2)t$$

$$\sin(2\omega_1 - 3\omega_2)t$$

$$\sin\omega_1 t$$

$$\sin\omega_2 t$$

$$\sin 3\omega_1 t$$

$$\sin 3\omega_2 t$$

$$\sin 5\omega_1 t$$

$$\sin 5\omega_2 t$$

$$\sin 9\omega_1 t$$

$$\sin 9\omega_2 t$$

$$\sin(6\omega_1 + \omega_2)t$$

$$\sin(6\omega_1 - \omega_2)t$$

$$\sin(\omega_1 + 6\omega_2)t$$

$$\sin(\omega_1 - 6\omega_2)t$$

$$\sin(\omega_1 + 4\omega_2)t$$

$$\sin(\omega_1 - 4\omega_2)t$$

$$\sin(4\omega_1 + \omega_2)t$$

$$\sin(4\omega_1 - \omega_2)t$$

$$\sin(4\omega_1 + 3\omega_2)t$$

$$\sin(3\omega_1 + 4\omega_2)t$$

$$\sin(4\omega_1 - 3\omega_2)t$$

$$\sin(3\omega_1 - 4\omega_2)t$$

帯域内

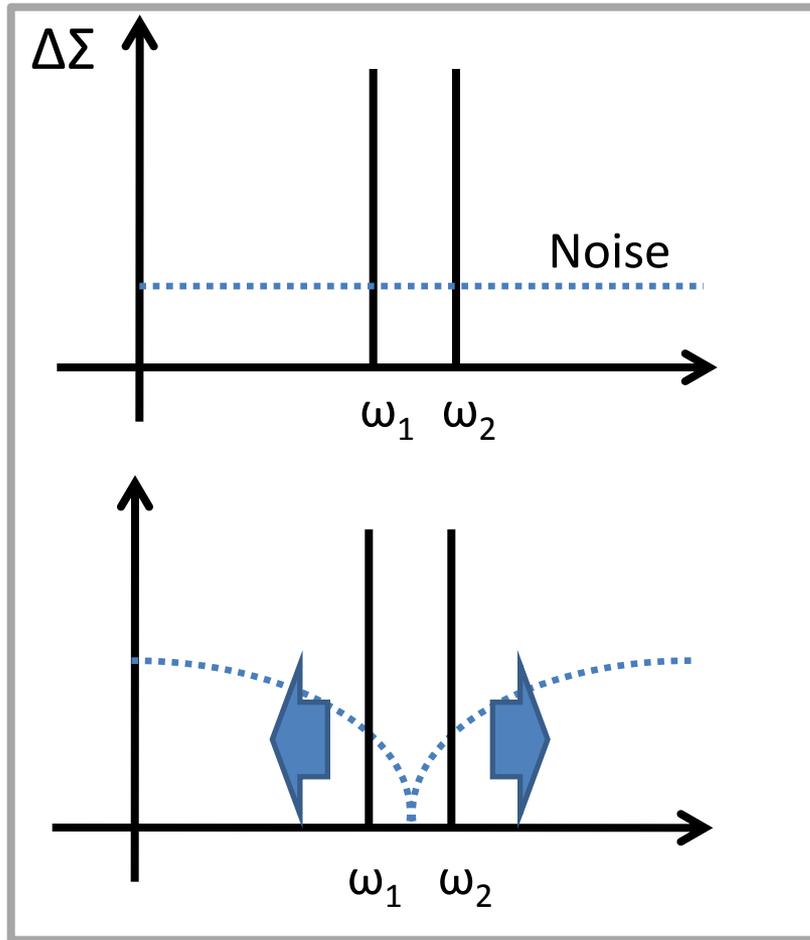
帯域外

3次高調波の影響

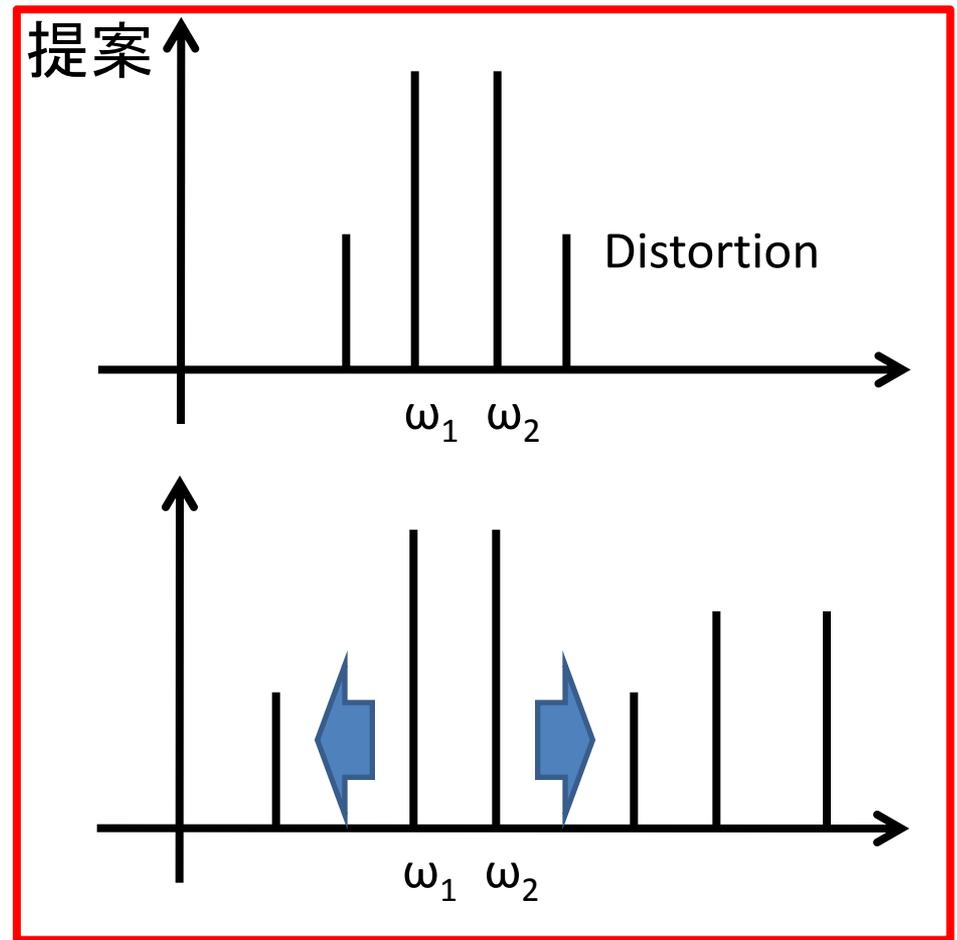
帯域内歪み**減少**

帯域外歪み**増加**

# Distortion Shaping (新概念)



Band-pass Noise Shaping



Band-pass Distortion Shaping

信号付近のノイズ・歪み → 帯域外

# アウトライン

- 研究背景・目的
- 歪みの発生
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

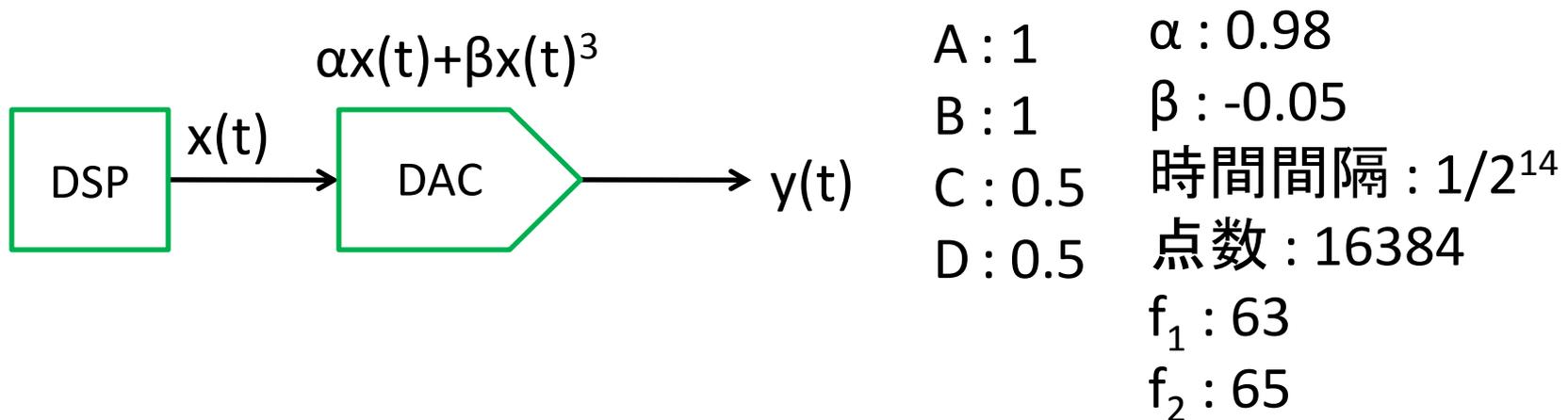
# シミュレーション条件

## 3次高調波入力

$$y(t) = \alpha x(t) + \beta x(t)^3$$

$$x_1(t) = A \sin(\omega_1 t) + B \sin(\omega_2 t) \quad (\text{従来手法})$$

$$x_2(t) = A \sin(\omega_1 t) + B \sin(\omega_2 t) + C \sin(3\omega_1 t) + D \sin(3\omega_2 t) \quad (\text{提案手法})$$

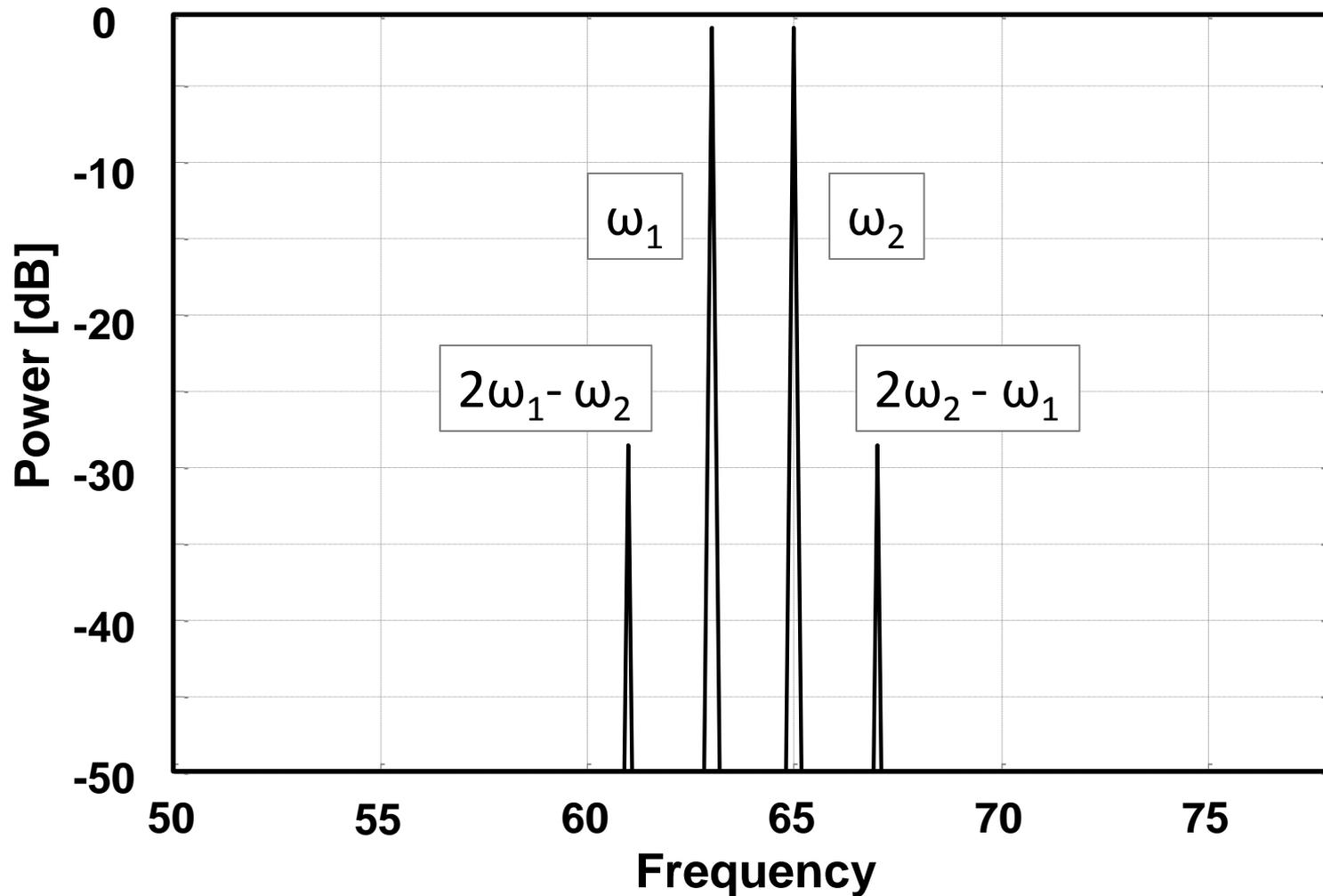


MATLABによりシミュレーションを行った

# 従来手法のスペクトル

$$y(t) = 0.98x(t) - 0.05x(t)^3$$

$$x_1(t) = \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)$$



$$2f_1 - f_2 = 61$$

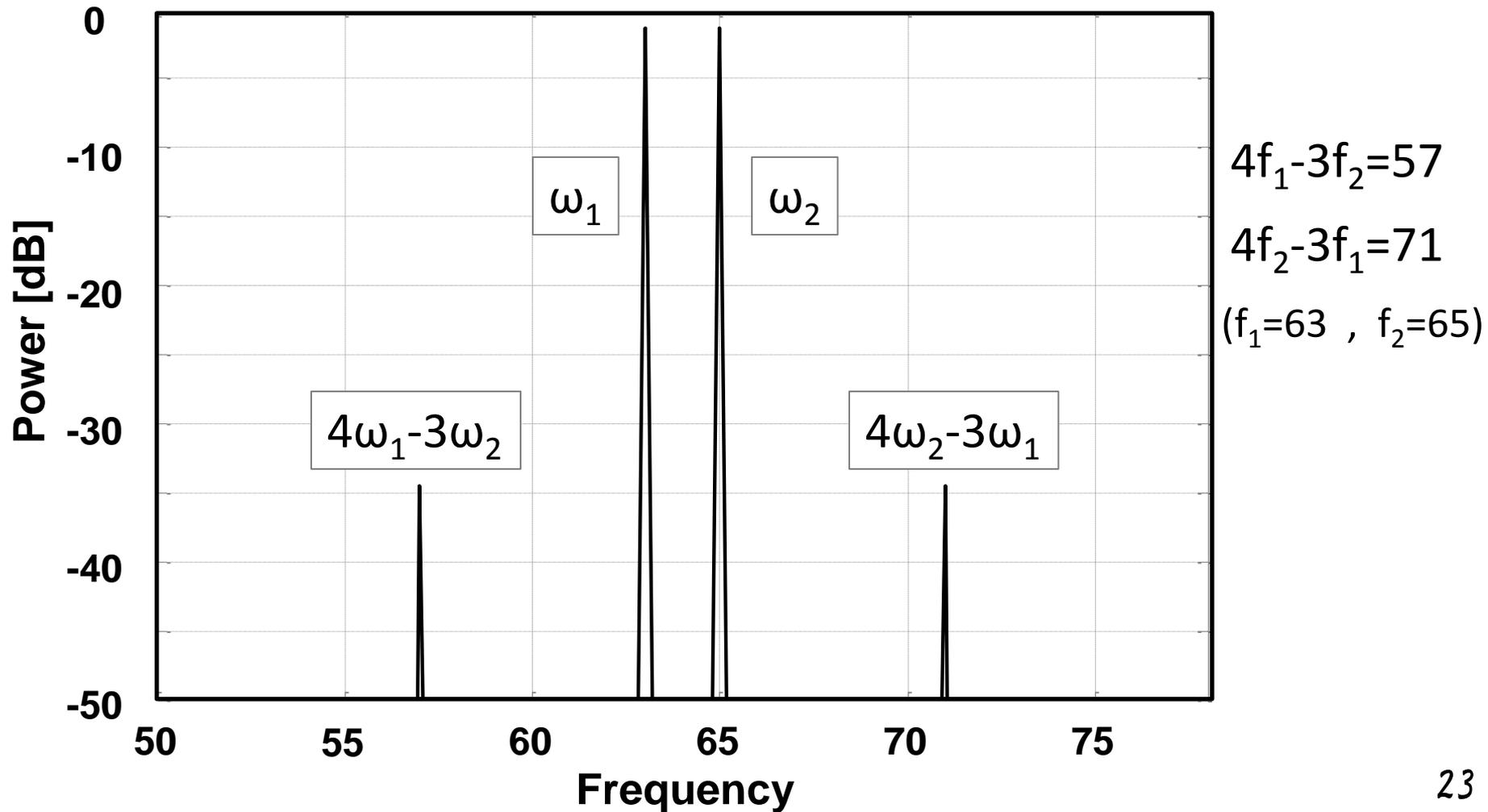
$$2f_2 - f_1 = 67$$

$$(f_1 = 63, f_2 = 65)$$

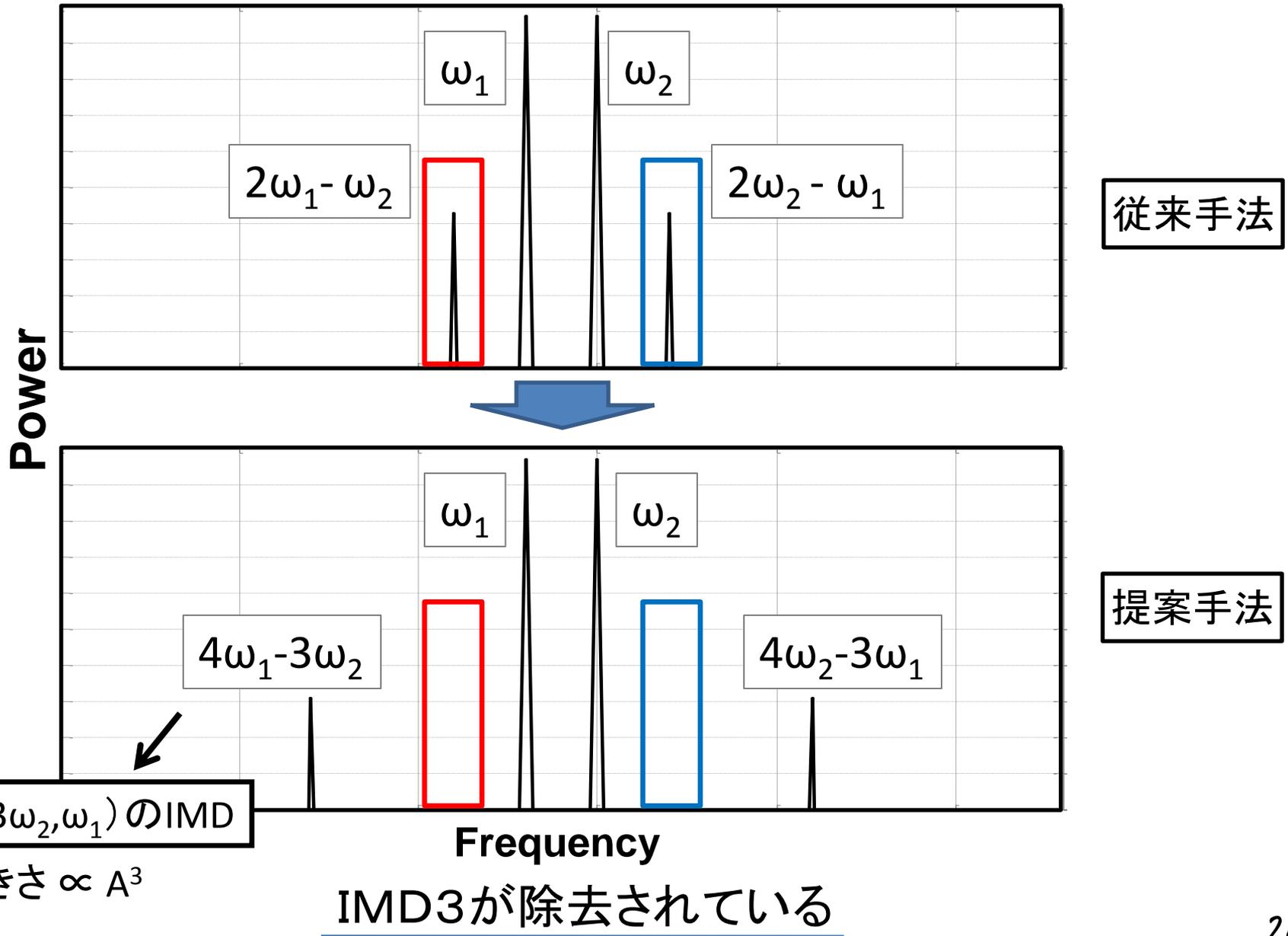
# 提案手法のスペクトル

$$y(t)=0.98x(t)-0.05x(t)^3$$

$$x_2(t)=\sin(\omega_1 t)+\sin(\omega_2 t)+0.5\sin(3\omega_1 t)+0.5\sin(3\omega_2 t)$$



# 従来手法と提案手法のスペクトル比較



# アウトライン

- 研究背景・目的
- 歪みの発生
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- **実験結果**
- まとめ

# 実験装置

AWG

hp 33120A



- ・周波数範囲: 100uHz – 5.0MHz
- ・電圧範囲: 50mVpp – 10Vpp
- ・分解能: 12bit , 40MSa/s

スペクトラムアナライザ

hp ESA-L1500A



- ・周波数範囲: 9.0kHz – 1.5GHz

# 実験条件

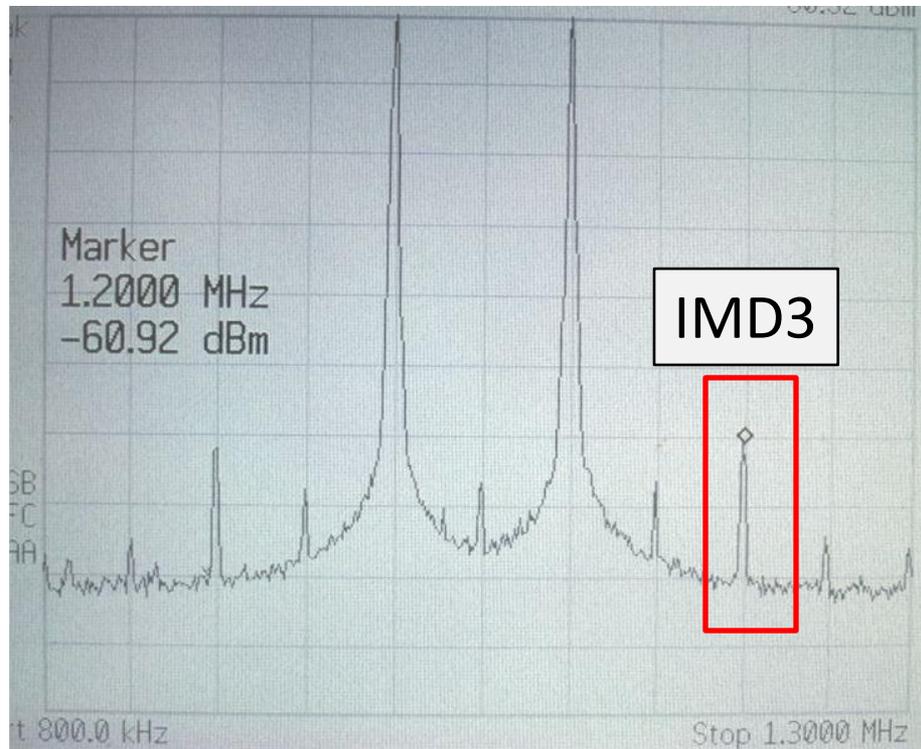


信号入力

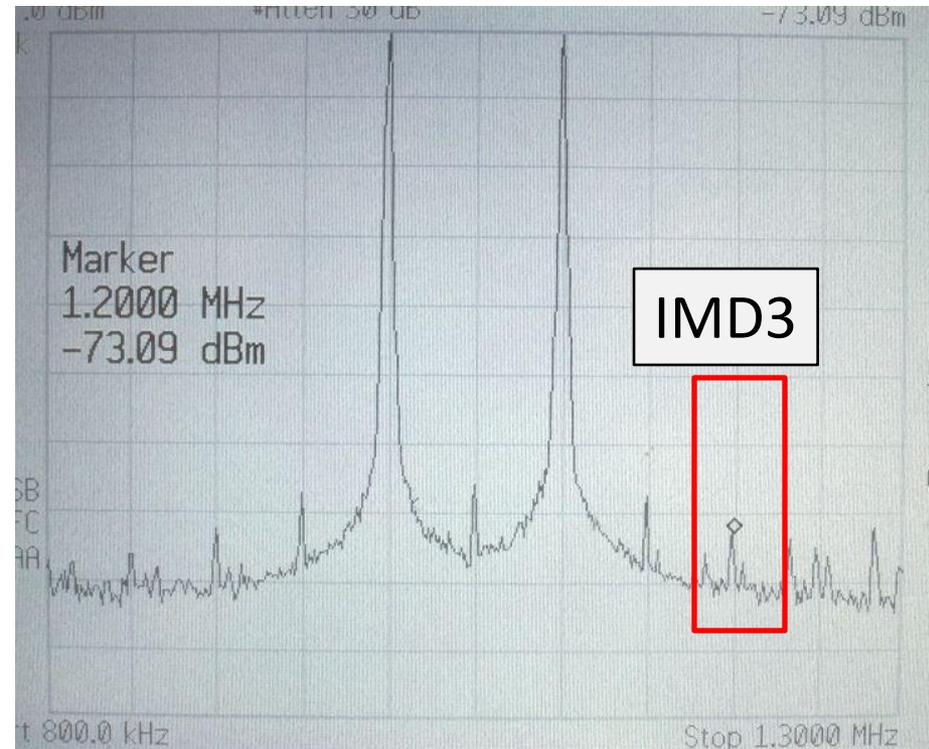


- ・入力周波数  
従来手法[MHz]: 1.0, 1.1  
提案手法[MHz]: 1.0, 1.1, 3.0, 3.3
- ・入力電圧[Vpp]: 0.3 – 1.2 0.1刻み  
: 1.3 – 2.3 0.1刻み
- ・減衰器(アッテネータ): 30dB
- ・分解能帯域幅(RBW): 1kHz
- ・ビデオフィルタ(VBW): 100kHz

# 実験結果 (1.2Vpp時)

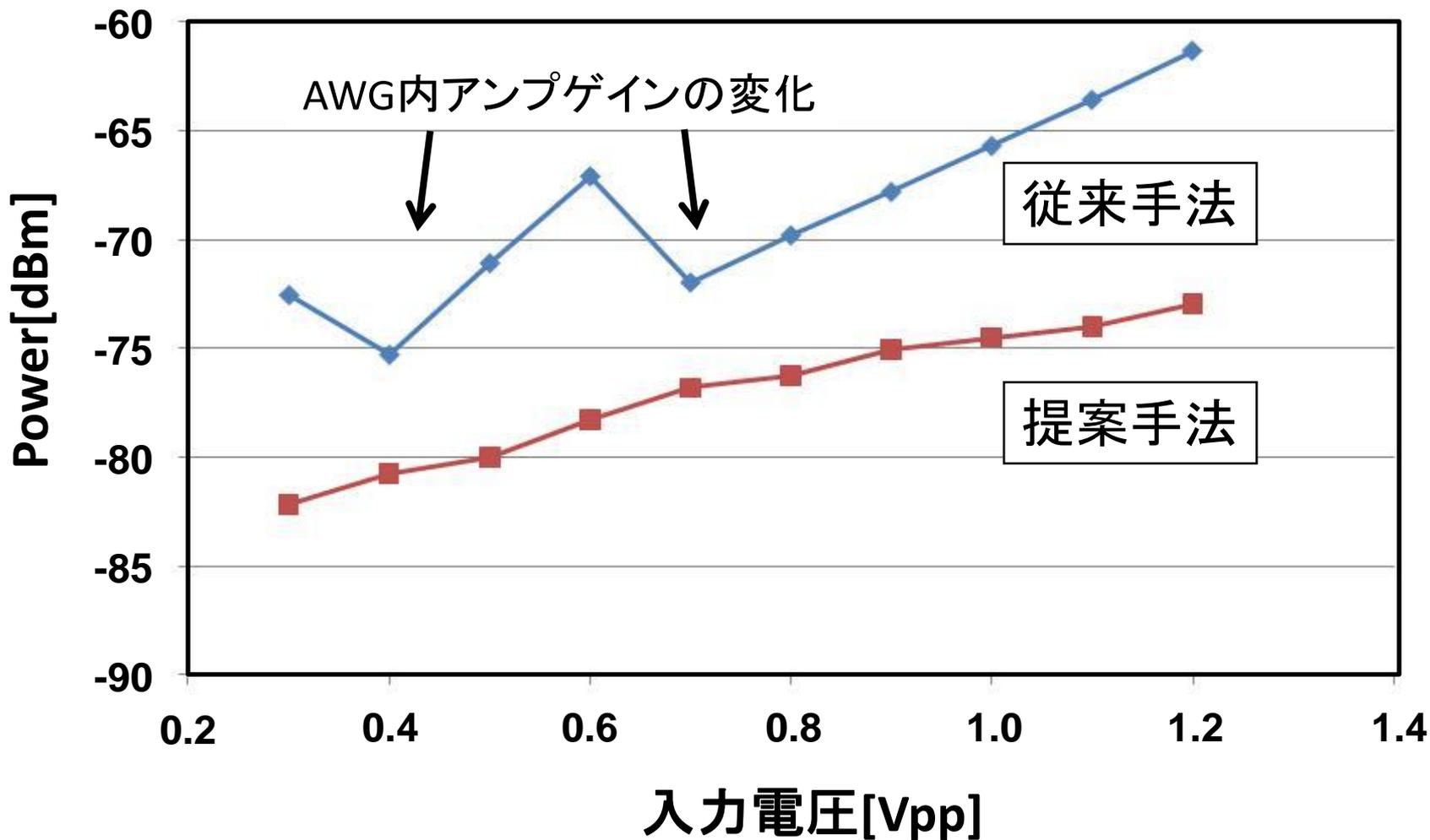


従来手法



提案手法

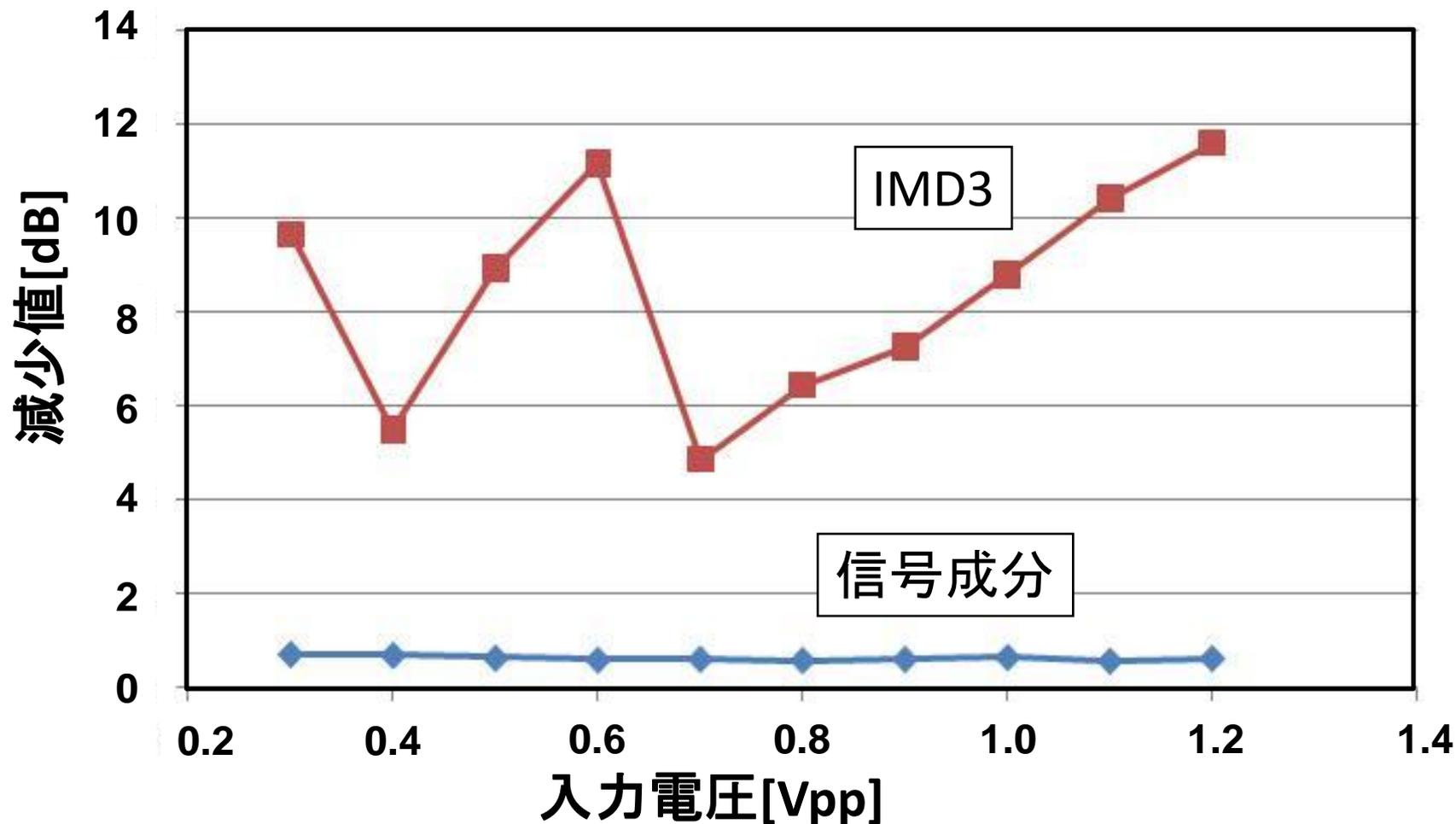
# 従来手法と提案手法とのIMD3比較



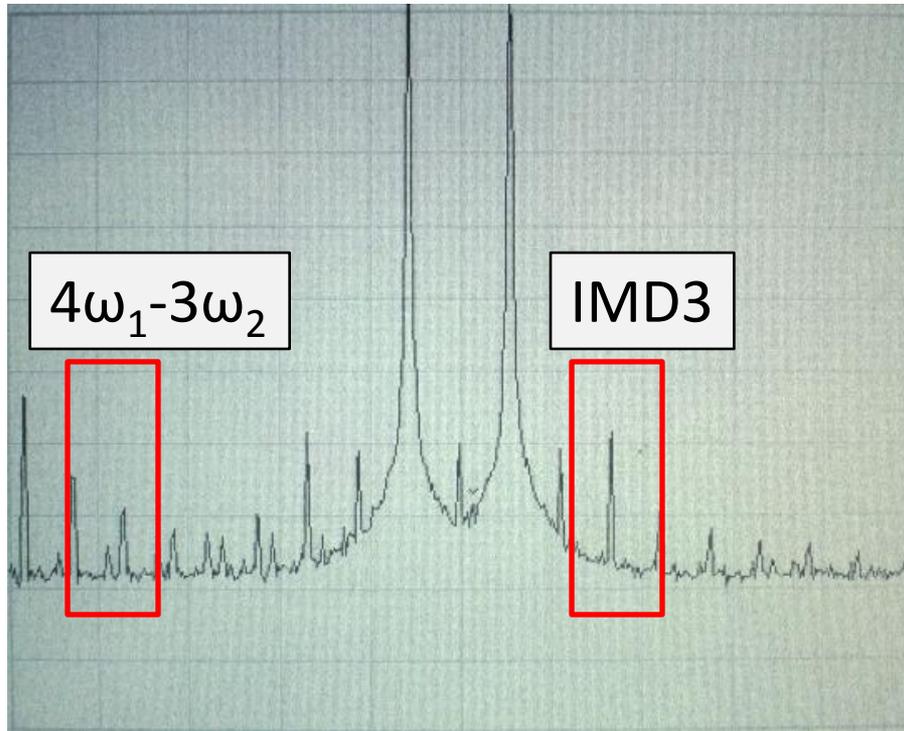
# 提案手法によるIMD3の減少値

入力信号の平均減少値 0.63dB

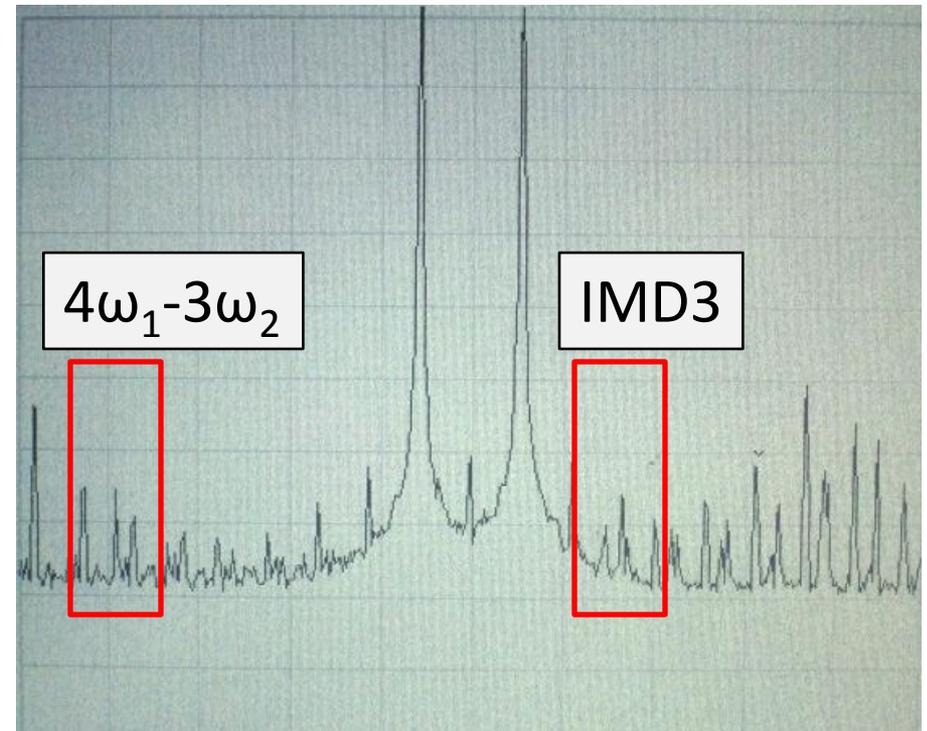
IMD3の平均減少値 8.47dB



# 実験結果 (2.3Vpp時)

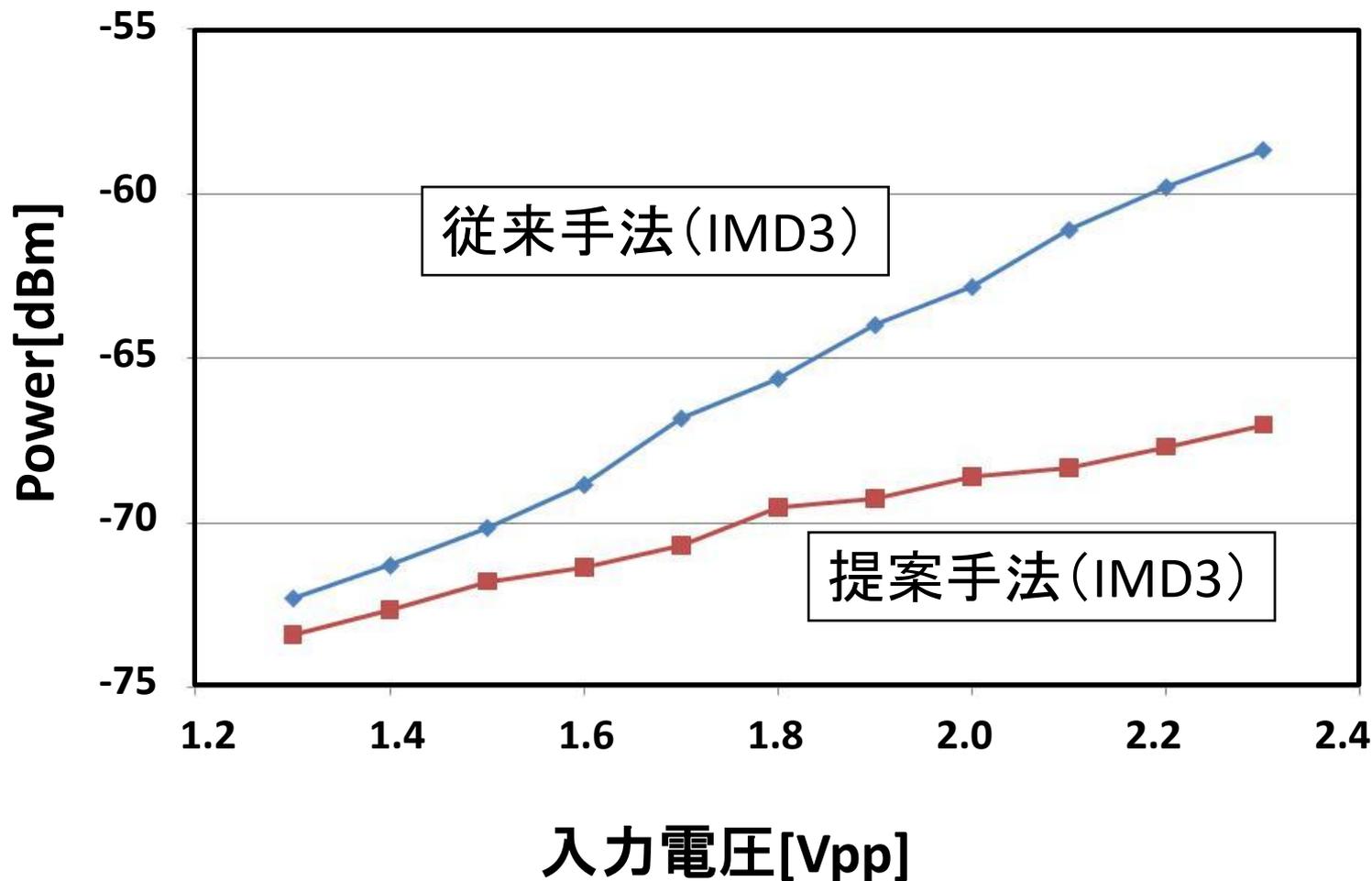


従来手法

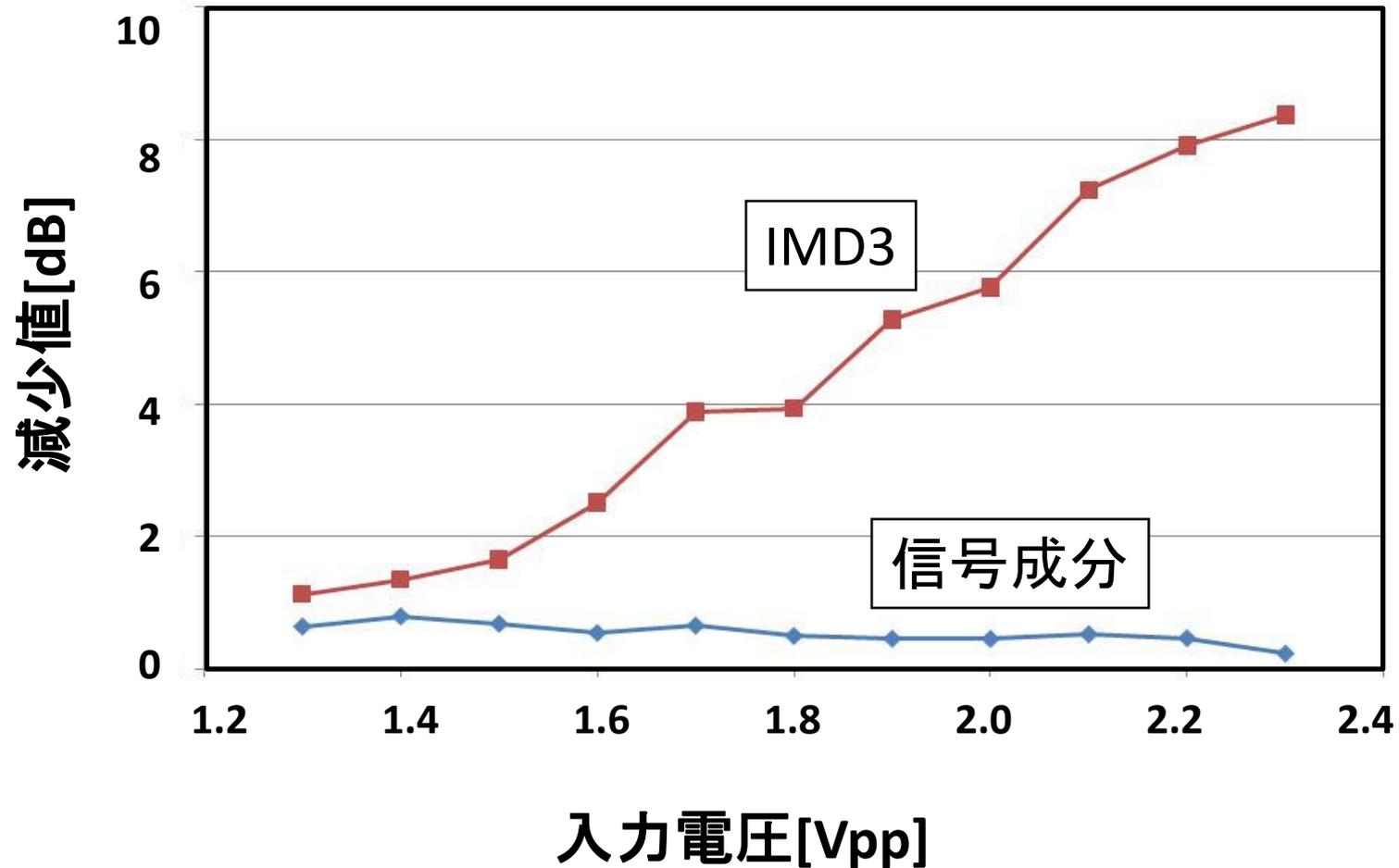


提案手法

# 従来手法と提案手法とのIMD3比較

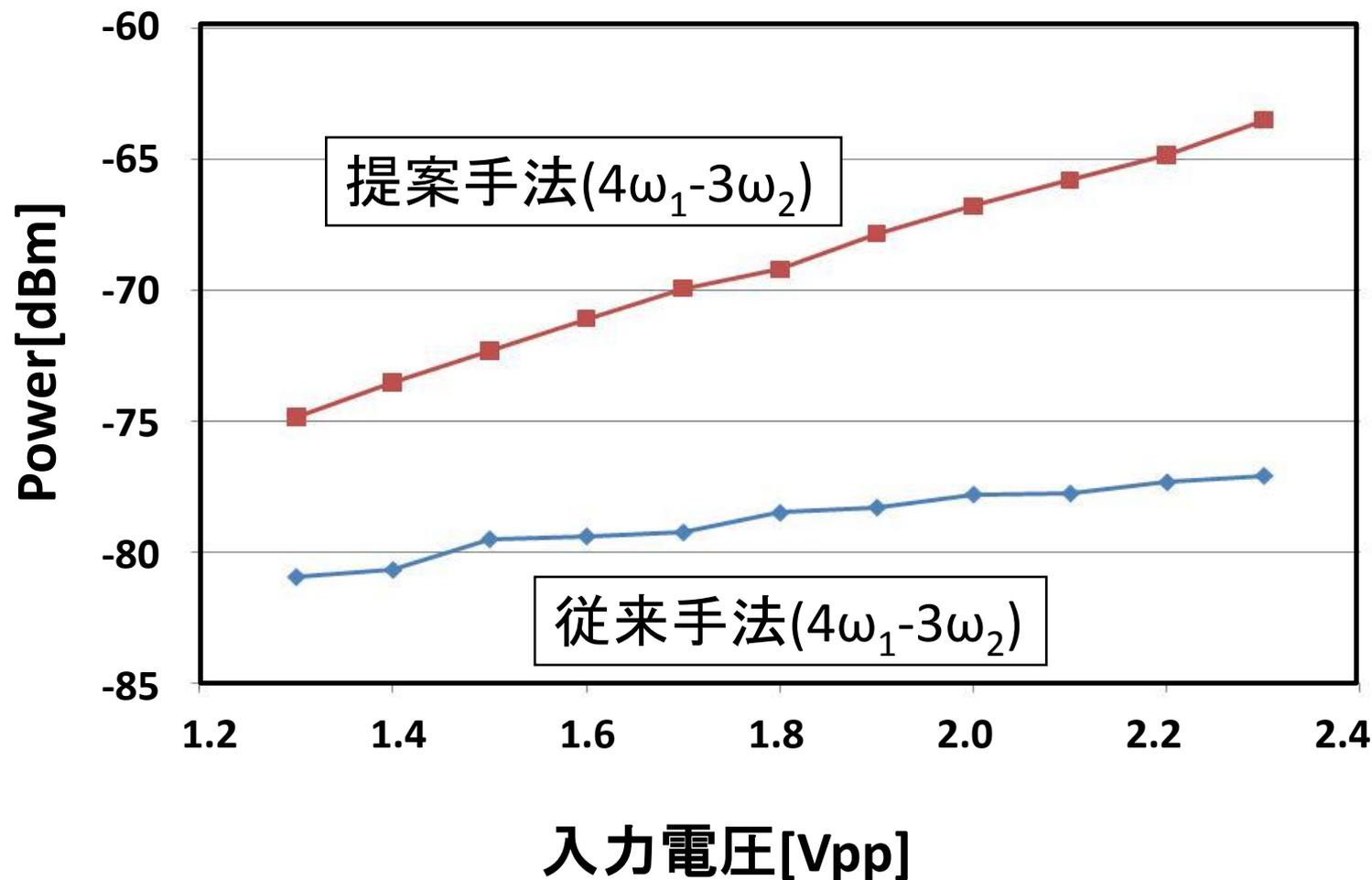


# 提案手法によるIMD3の減少値



# 従来手法と提案手法との $4\omega_1-3\omega_2$ 比較

3次高調波入力による影響



# アウトライン

- 研究背景・目的
- 歪みの発生
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- **まとめ**

# まとめ

## 低テストコスト実現のために

### ○低歪み信号発生アルゴリズムの提案

- ・DSPで3次高調波入力  
→ IMD3を除去
- ・DAC+Ampの歪み係数に依存しない  
→ 同定不要

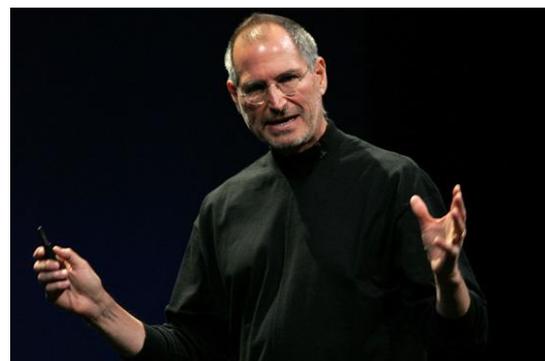
**新概念: Distortion Shaping**

### ○効果を確認

- ・シミュレーションで効果確認
  - ・実機測定で効果確認
- IMD3減少

提案アルゴリズムを  
 $\Sigma\Delta$ 変調のNoise-Shaping に関連づける。

「創造力とは、いろいろなものをつなぐ力だ」  
(Steve Jobs, Apple社)



## <質疑>

神奈川工大 小室先生

Q: DACとAmpの係数 $\alpha$ 、 $\beta$ に周波数依存性はあるか？

C: 実際は存在する。入力周波数が高周波になることで係数が変化する。  
また、5次7次の影響も大きくなる。

これは2次効果であり、DACはその影響はないがAmpで現れる。

しかし、それを考慮しても歪みは消えるだろう。

熊本高専 寺田先生

Q: 信号振幅の係数CとDはどのように決定しているのか？

A: 計算で求めたように、所望の周波数成分の大きさの半分としている。

今回は、所望の周波数成分の大きさを1としているので、 $C \cdot D$ は0.5としている。

日立 寺田さん

Q: 2.3V時の測定で見られる高周波側の歪みはなにが原因か？

A: 片方だけ出ているのでよく分かってないが、高周波の折り返しなどだと思われる。

C: もしくは、位相ノイズなどかも。それも考察して消えるようにできれば、なお良い。