

# セグメント型DA変換器の 完全魔方陣レイアウト技術による線形性向上

群馬大学

工学部 電気電子工学科

情報通信システム第二研究室

○東野将史, 小林春夫



# Outline

- 研究背景
- 目的
- DA変換器の概要
- 魔方陣について
- 魔方陣を用いたアルゴリズム
- シミュレーション結果
- まとめ

# Outline

- 研究背景
- 目的
- DA変換器の概要
- 魔方陣について
- 魔方陣を用いたアルゴリズム
- シミュレーション結果
- まとめ

# 研究背景(1)

電子機器 {

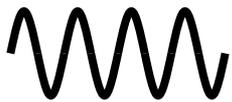
- 小型化
- 高速化

➡ デジタル回路が適している

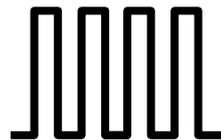


- ✓ 自然界の信号は、アナログ信号
- ✓ 信号処理が必要
- ✓ 高性能・信頼性

音声, 光



ADC

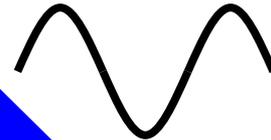


信号処理

system



音声, 光



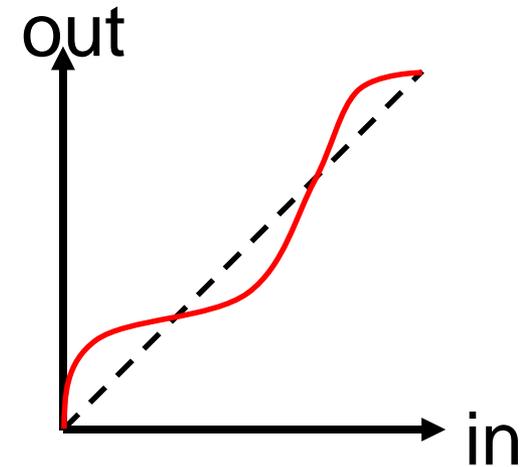
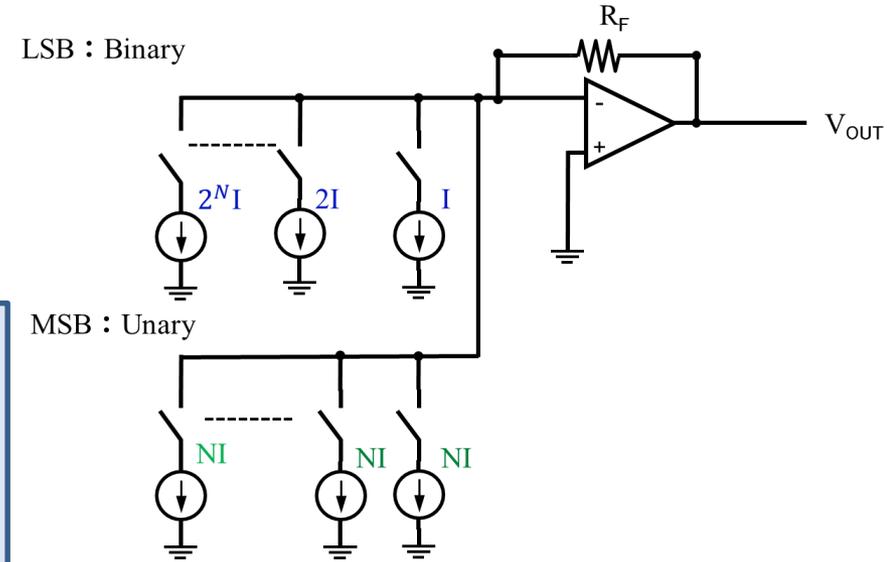
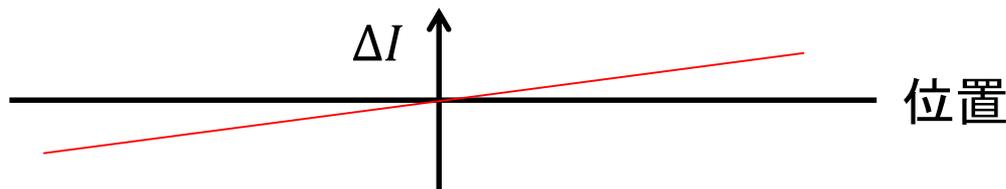
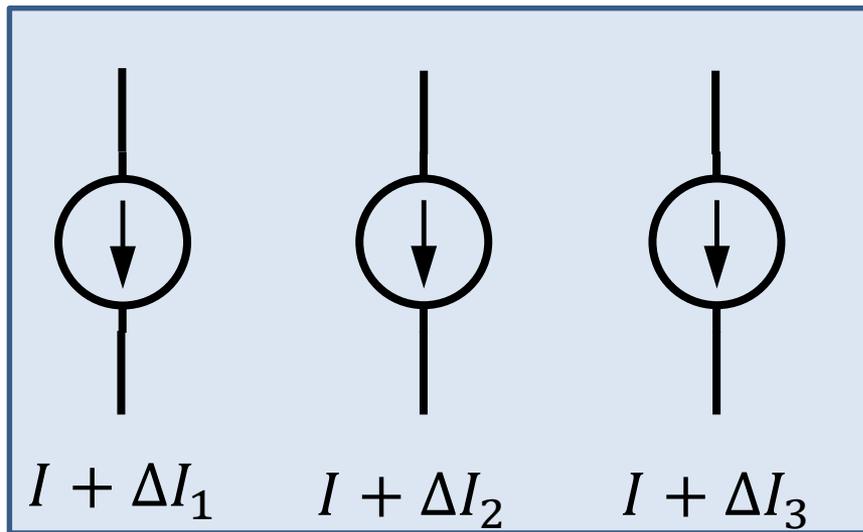
DAC



# 研究背景(2)

✓ プロセスによりシリコンウェハ上で、ばらつき存在

- 素子の特性ミスマッチ
- 信頼性低下



# Outline

- 研究背景
- 目的
- DA変換器の概要
- 魔方陣について
- 魔方陣を用いたアルゴリズム
- シミュレーション結果
- まとめ

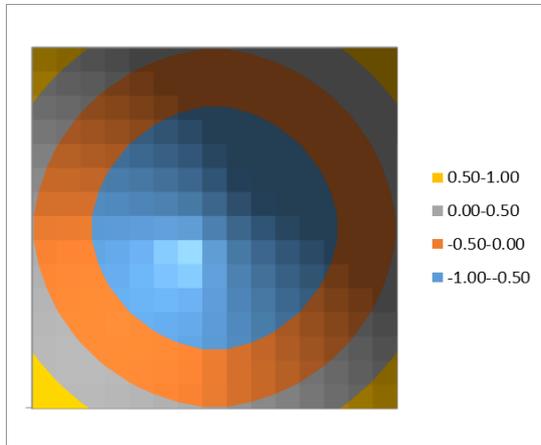
# 研究背景・目的(3)

## ◆ ばらつきの種類

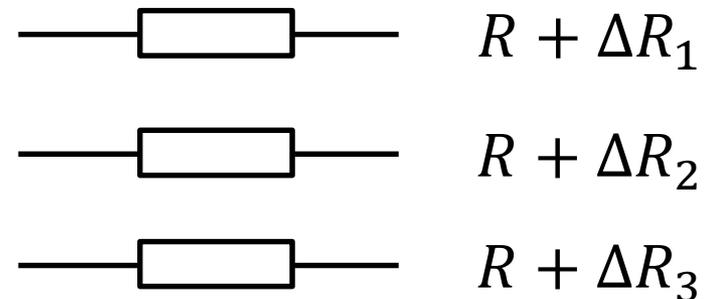
- ✓ システマティックなばらつき
- ✓ ランダムなばらつき

ex. ウェハ上で、

- システマティックな傾斜をもってばらつく
- 素子ごとにランダムにばらつく



システマティック



ランダム

# 目的(2)

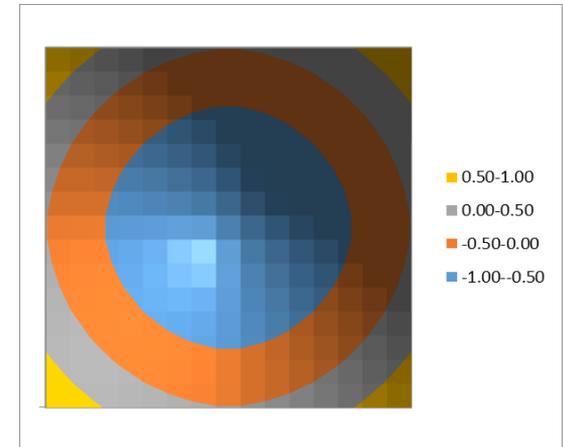
## ◆ ばらつきの種類

- ✓ システマティックなばらつき
- ✓ ランダムなばらつき

## ◆ システマティックなばらつき

- ✓ 電圧降下
- ✓ 酸化膜の厚さ
- ✓ ドーピング
- ✓ 機械的ストレス
- ✓ 温度分布
- ✓ ウエハ面内

レイアウトで改善

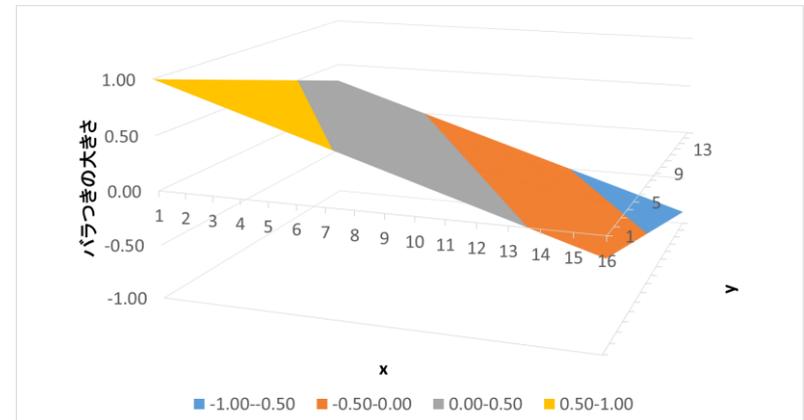


# 目的(3)

## ◆ システムティックなバラつき

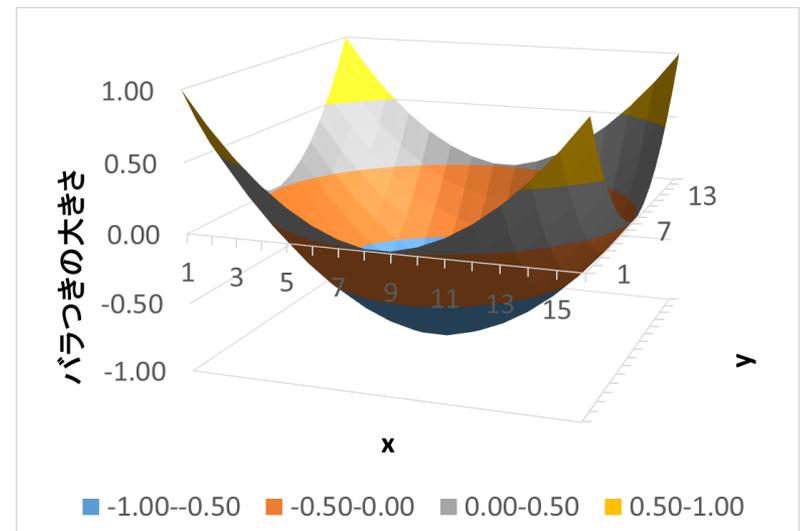
- ✓ 電圧降下
- ✓ 酸化膜の厚さ
- ✓ ドーピング

Linear  
Error



- ✓ 機械的ストレス
- ✓ 温度分布
- ✓ ウエハ面内

Quadratic  
Error



Joint Error(両者の和)

# 目的(4)

## ◆ システムティックなバラつき

### ✓ Linear Error

配線により改善

→ コモンセントロイド

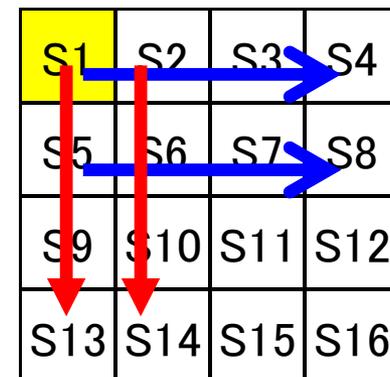
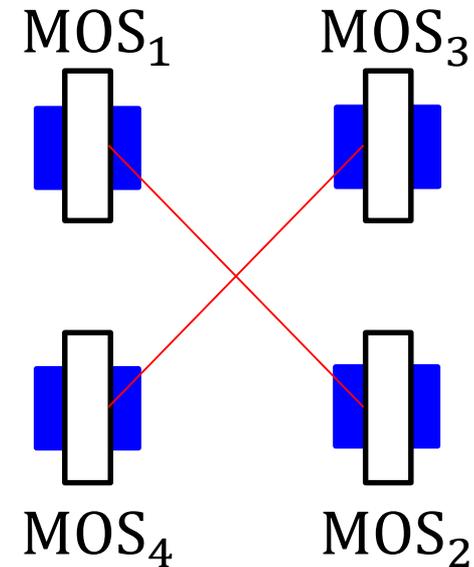
### ✓ Quadratic Error

スイッチング・アルゴリズム

→ **工夫が必要**

- 従来方法

Random Walk

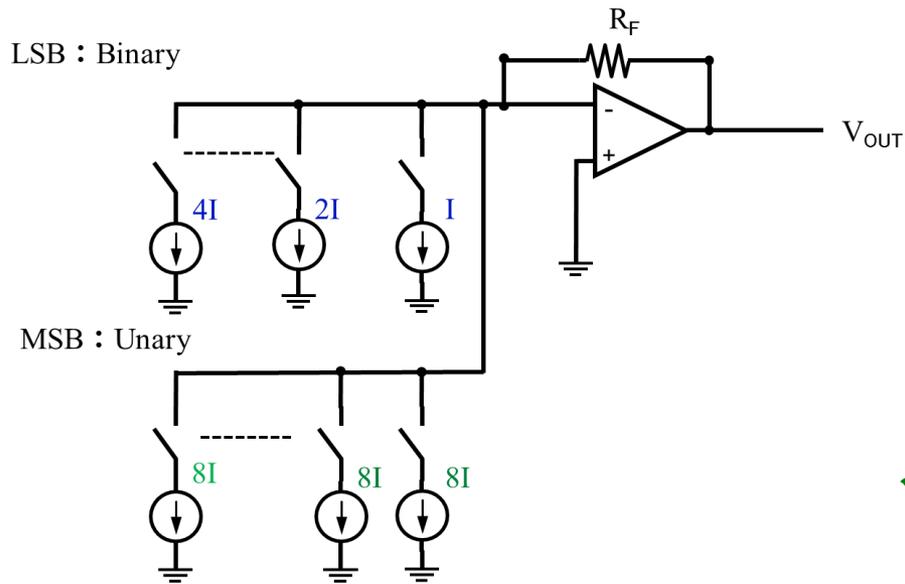


# Outline

- 研究背景
- 目的
- **DA変換器の概要**
- 魔方陣について
- 魔方陣を用いたアルゴリズム
- シミュレーション結果
- まとめ

# DA変換器の概要(1)

## ◆ DA変換器の構成



セグメント型DA変換器

### ✓ バイナリ型

- 小型化可能
- コードの切り替えでグリッチ発生
- ミスマッチの発生：大

### ✓ ユナリ型

- 小型化不可
- ミスマッチの影響：少
- グリッチの発生：少

# DA変換器の概要(2)

## ◆ DA変換器の構成

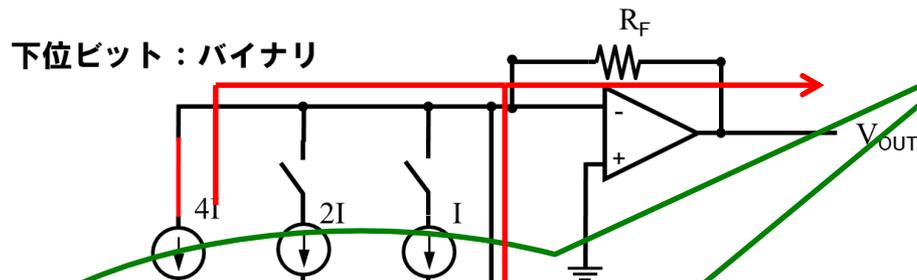
### ✓ 7bit DA変換器

(0001100)

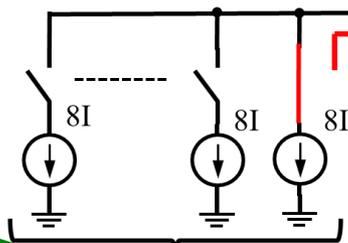


$$V_{out} = 12IR_F$$

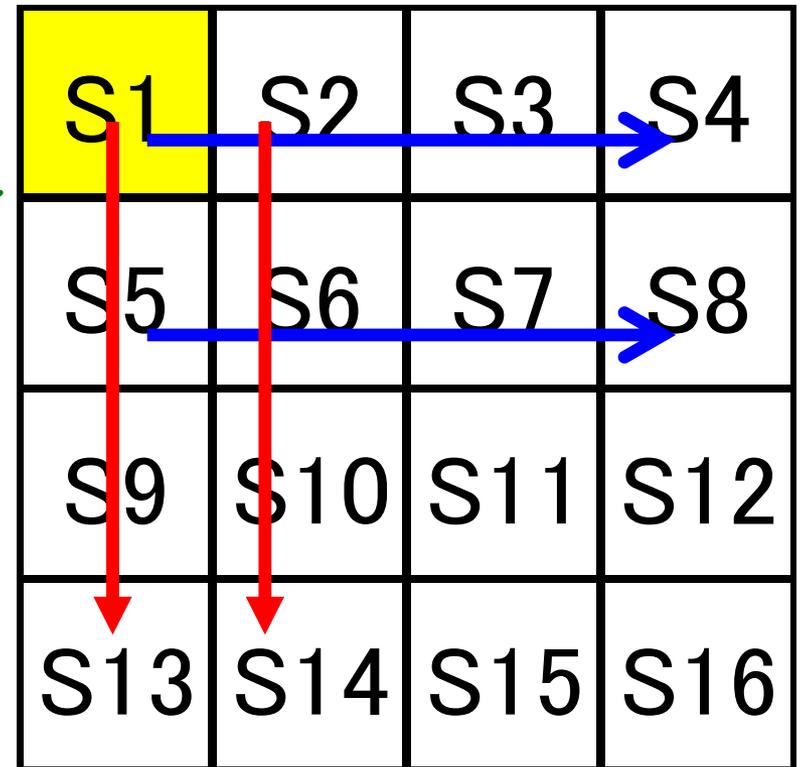
下位ビット：バイナリ



上位ビット：ユナリ



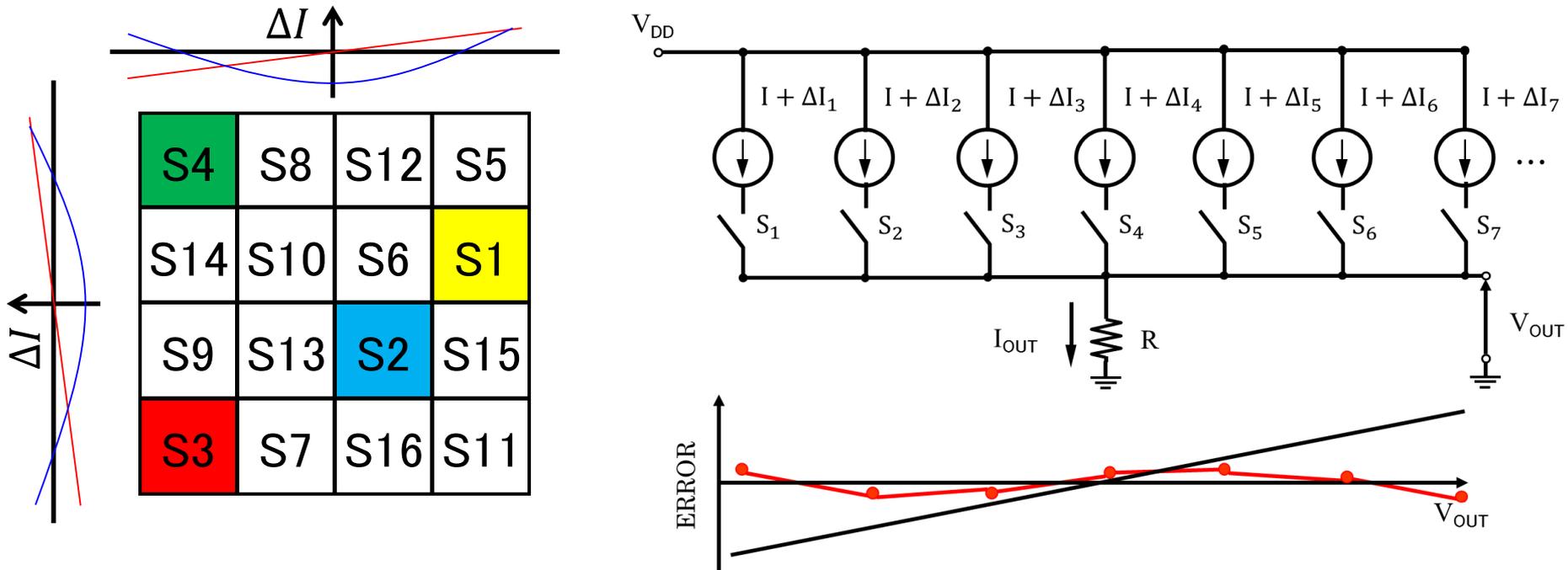
× 15



単位電流セル(ユナリ型)

# DA変換器の概要(3)

## ◆ DA変換器 - システムティック・ミスマッチとレイアウト



スイッチング順序を変える事によりエラーをキャンセル

→ Random Walk

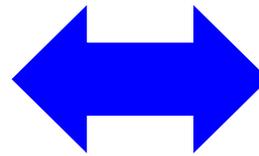
# DA変換器の概要(4)

考案

魔方陣によるレイアウト

|              |              |              |               |
|--------------|--------------|--------------|---------------|
| <del>4</del> | <del>9</del> | <del>7</del> | <del>14</del> |
| 16           | 5            | 11           | 2             |
| 13           | 8            | 10           | 3             |
| 1            | 12           | 6            | 15            |

魔方陣



|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| S1  | S2  | S3  | S4  |
| S5  | S6  | S7  | S8  |
| S9  | S10 | S11 | S12 |
| S13 | S14 | S15 | S16 |

単位電流セル(ユナリ型)

定和性の一致

→ バランスが良いのでは？

# Outline

- 研究背景
- 目的
- DA変換器の概要
- **魔方陣について**
- 魔方陣を用いたアルゴリズム
- シミュレーション結果
- まとめ

# 魔方陣の性質(1)

## ◆ 魔方陣の特徴

- ✓ 各行・列・対角線の和が一致(定和性)
- ✓ 様々な魔方陣の種類(ex完全魔方陣, 対称魔方陣)
- ✓ 回転・裏返し

### 完全魔方陣

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

### 対称魔方陣

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 10 | 5  | 3  | 16 |
| 15 | 4  | 6  | 9  |
| 8  | 11 | 13 | 2  |
| 1  | 14 | 12 | 7  |

# 魔方陣の性質(2)

## ◆ n次方陣の定和公式

n次方陣の各行・列・対角線の和をSとすると

$$S = \frac{n(n^2 + 1)}{2}$$

ex) 5次方陣の場合

n=5なので

$$S = \frac{5(5^2 + 1)}{2} = 65$$

右図と一致

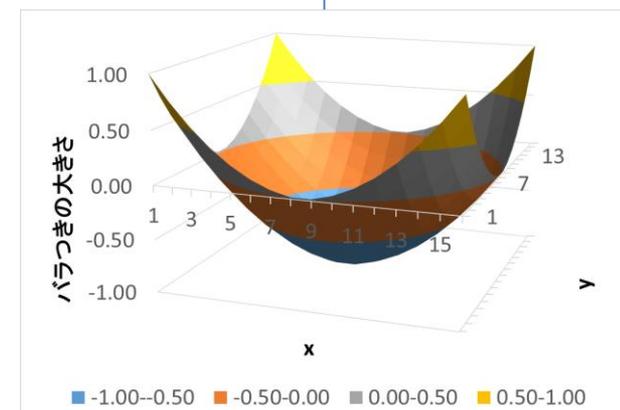
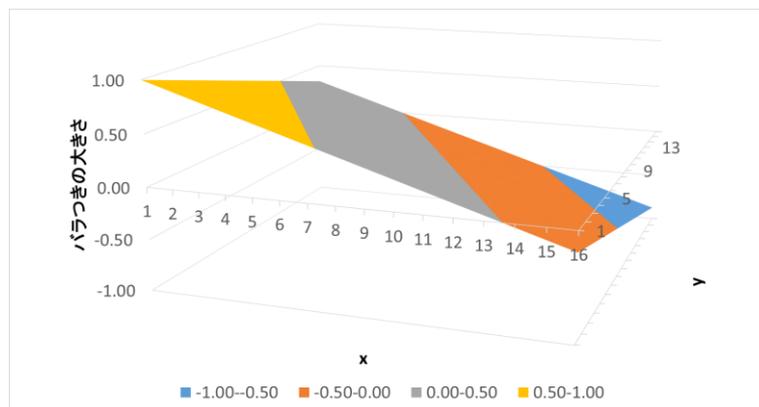
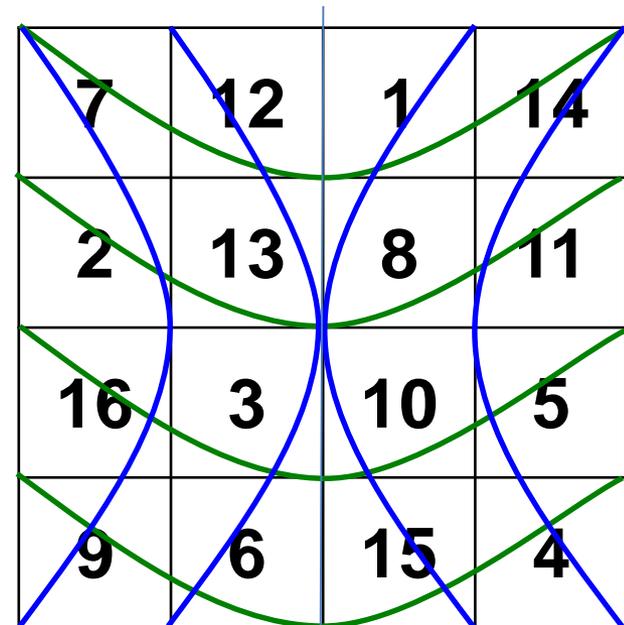
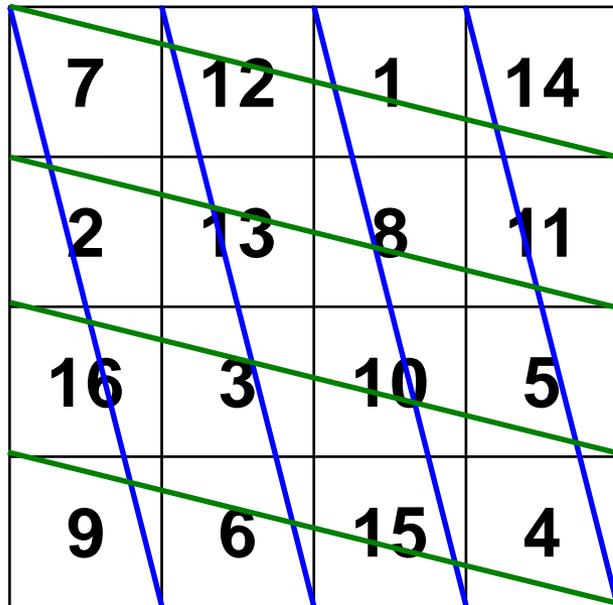
|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 25 | 14 | 16 | 3  | 7  |
| 8  | 17 | 4  | 21 | 15 |
| 2  | 6  | 13 | 20 | 24 |
| 11 | 5  | 22 | 9  | 18 |
| 19 | 23 | 10 | 12 | 1  |

# Outline

- 研究背景
- 目的
- DA変換器の概要
- 魔方陣について
- **魔方陣を用いたアルゴリズム**
- シミュレーション結果
- まとめ

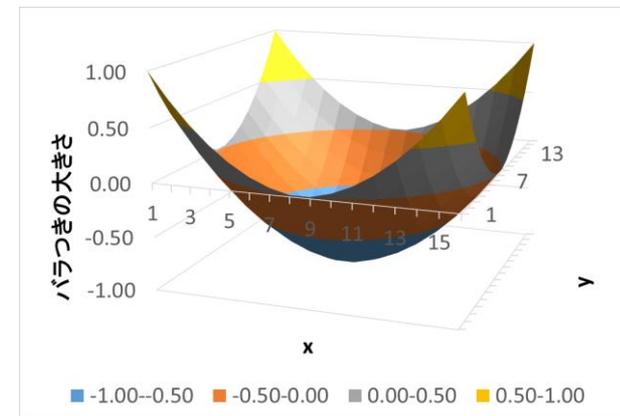
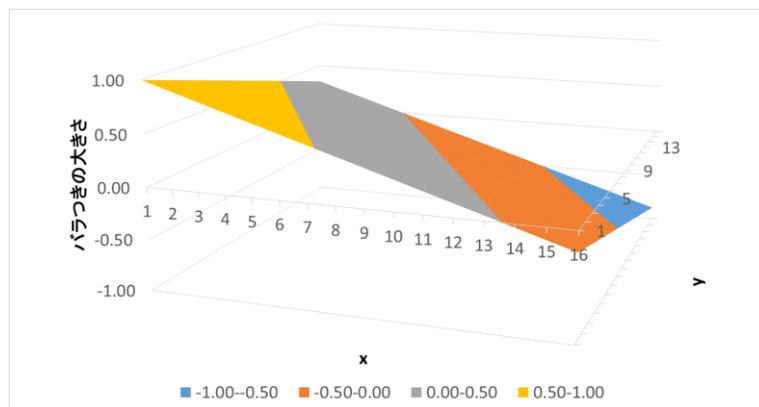
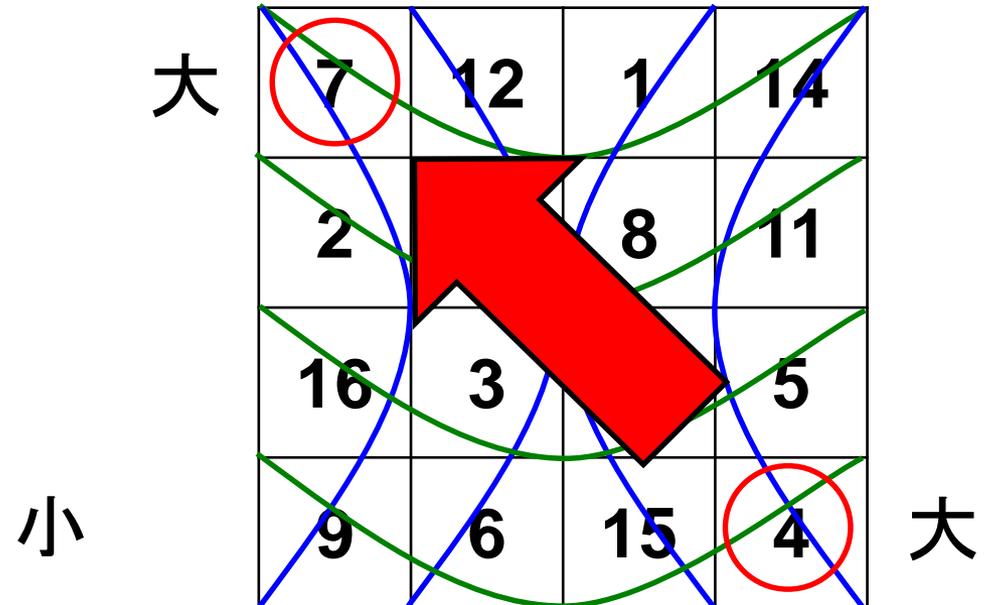
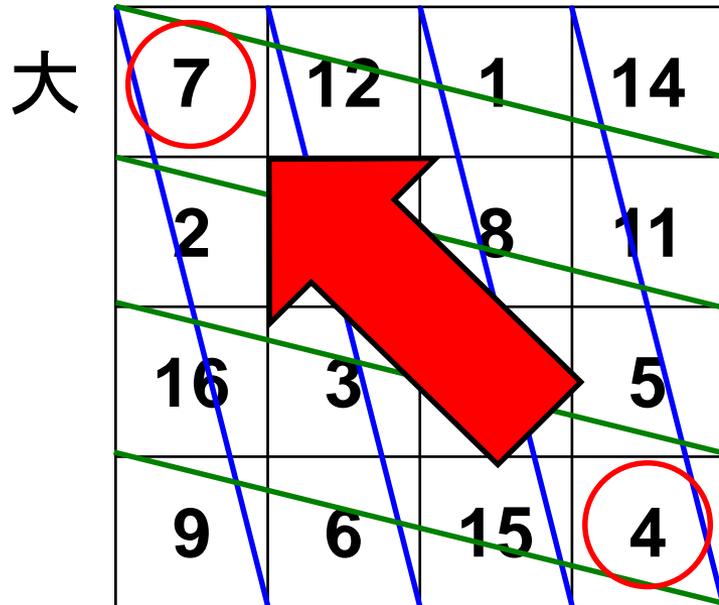
# 魔方陣を用いたアルゴリズム (1)

## ◆ システマティックなバラつき



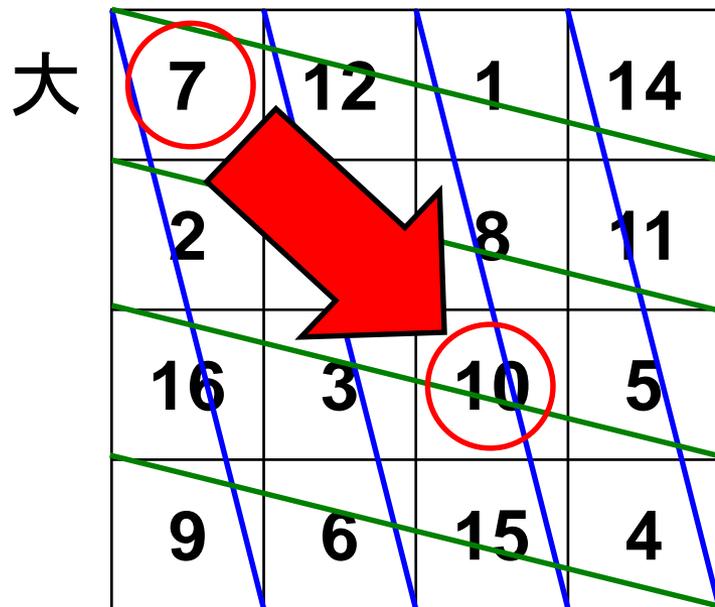
# 魔方陣を用いたアルゴリズム (2)

## ◆ システマティックなバラつき – 電流セル選択

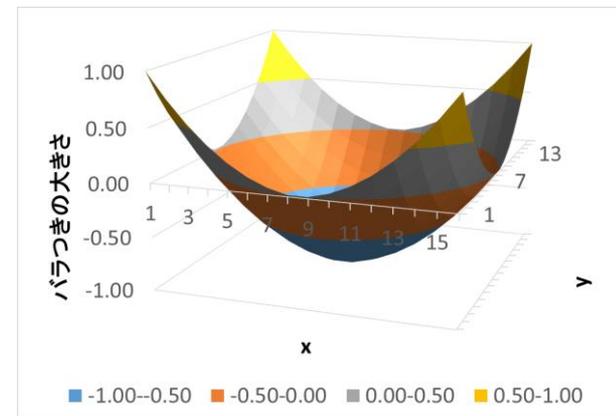
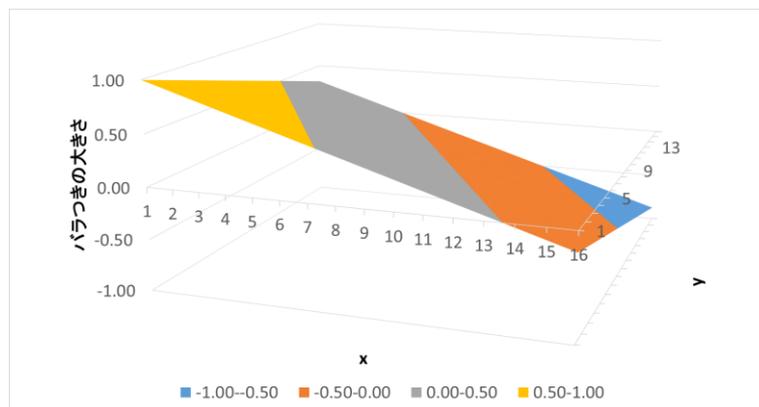
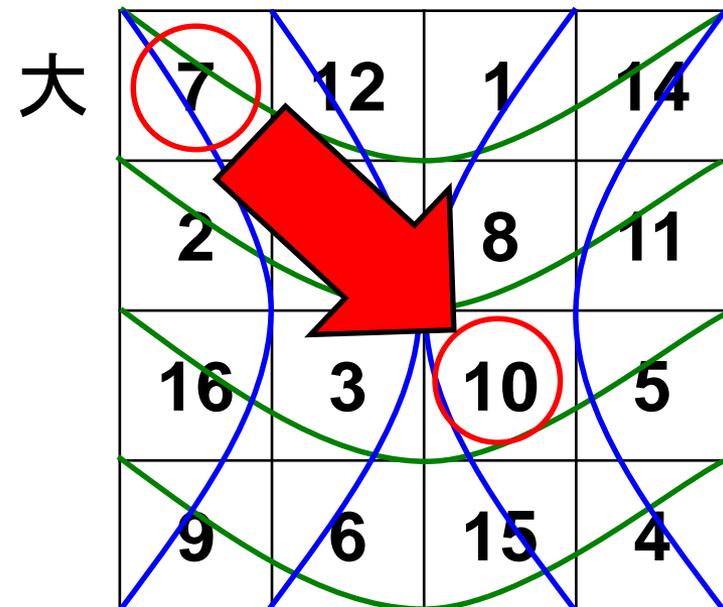


# 魔方陣を用いたアルゴリズム (3)

## ◆ システマティックなバラつき – 電流セル選択



中

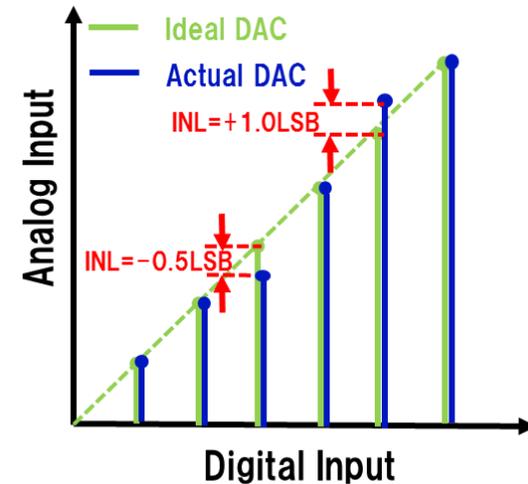


# 魔方陣を用いたアルゴリズム (4)

## ◆ 使用した魔方陣

✓ 完全魔方陣

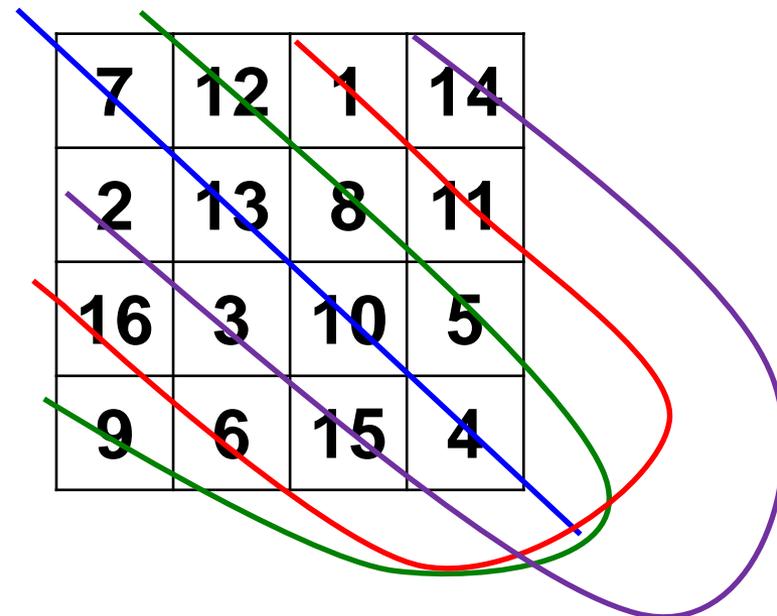
- 定和性 (対角線, 汎対角線) の利用
- 6bitユナリ型
- EPLによりINLを算出



※INL : 積分非直線性

比較

- 魔方陣
- 規則的
- Random Walk



# Outline

- 研究背景
- 目的
- DA変換器の概要
- 魔方陣について
- 魔方陣を用いたアルゴリズム
- **シミュレーション結果**
- まとめ

# シミュレーション結果(15)

## ◆ 6bitユニナリ型DAC

✓ 6次完全魔方陣

(a)

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 63 | 38 | 28 | 5  | 59 | 34 | 32 |
| 48 | 18 | 11 | 53 | 44 | 22 | 15 | 49 |
| 27 | 37 | 64 | 2  | 31 | 33 | 60 | 6  |
| 54 | 12 | 17 | 47 | 50 | 16 | 21 | 43 |
| 9  | 55 | 46 | 20 | 13 | 51 | 42 | 24 |
| 40 | 26 | 3  | 61 | 36 | 30 | 7  | 57 |
| 19 | 45 | 56 | 10 | 23 | 41 | 52 | 14 |
| 62 | 4  | 25 | 39 | 58 | 8  | 29 | 35 |

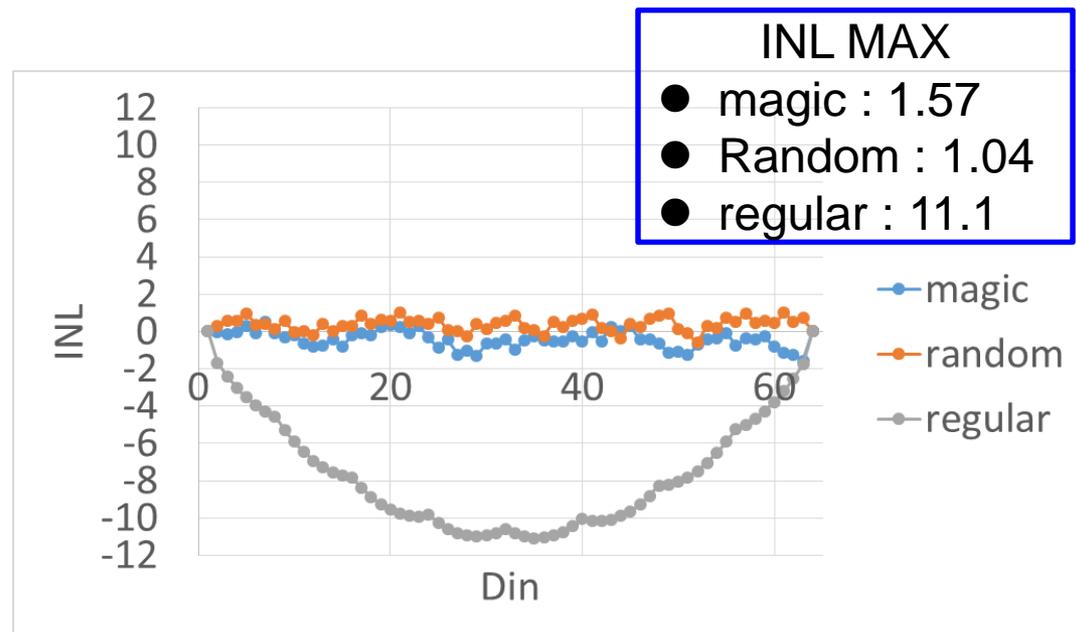
# シミュレーション結果(16)

## ◆ 6bitユナリ型DAC

✓ Linear error  $\theta = 30^\circ$

(a)

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 63 | 38 | 28 | 5  | 59 | 34 | 32 |
| 48 | 18 | 11 | 53 | 44 | 22 | 15 | 49 |
| 27 | 37 | 64 | 2  | 31 | 33 | 60 | 6  |
| 54 | 12 | 17 | 47 | 50 | 16 | 21 | 43 |
| 9  | 55 | 46 | 20 | 13 | 51 | 42 | 24 |
| 40 | 26 | 3  | 61 | 36 | 30 | 7  | 57 |
| 19 | 45 | 56 | 10 | 23 | 41 | 52 | 14 |
| 62 | 4  | 25 | 39 | 58 | 8  | 29 | 35 |



# シミュレーション結果(18)

## ◆ 6bitユナリ型DAC

✓ Linear error  $\theta = 30^\circ$

(a)

| INL MAX   |        |
|-----------|--------|
| ● magic   | : 1.57 |
| ● Random  | : 1.04 |
| ● regular | : 11.1 |

Magic



Random



$\theta = 45^\circ, 60^\circ$ でも同様の結果が得られた

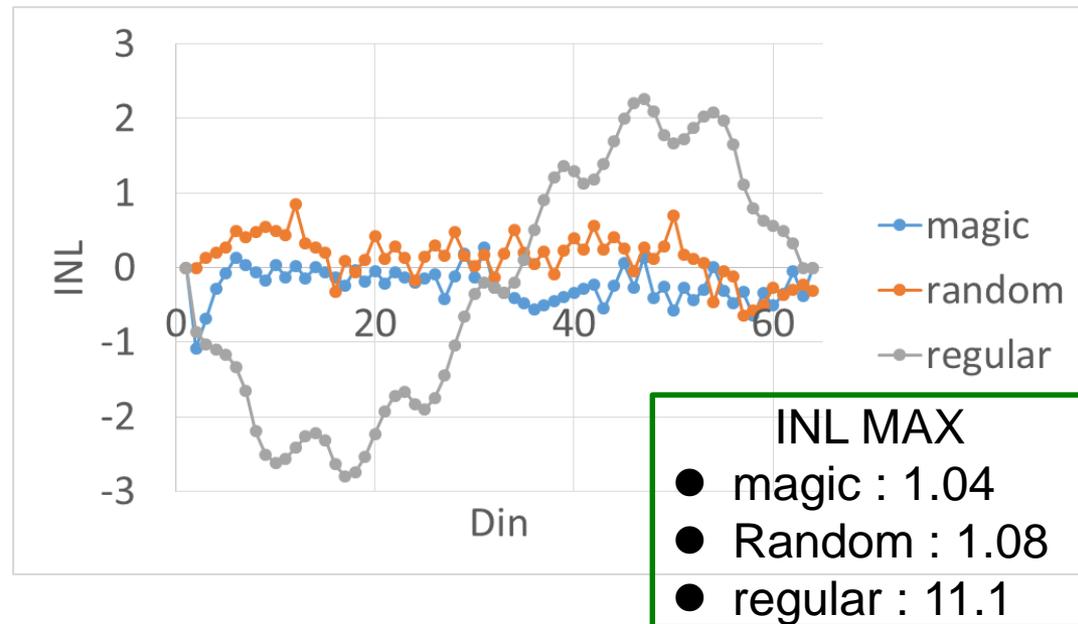
# シミュレーション結果(16)

## ◆ 6bitユナリ型DAC

✓ Quadratic error

(a)

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 63 | 38 | 28 | 5  | 59 | 34 | 32 |
| 48 | 18 | 11 | 53 | 44 | 22 | 15 | 49 |
| 27 | 37 | 64 | 2  | 31 | 33 | 60 | 6  |
| 54 | 12 | 17 | 47 | 50 | 16 | 21 | 43 |
| 9  | 55 | 46 | 20 | 13 | 51 | 42 | 24 |
| 40 | 26 | 3  | 61 | 36 | 30 | 7  | 57 |
| 19 | 45 | 56 | 10 | 23 | 41 | 52 | 14 |
| 62 | 4  | 25 | 39 | 58 | 8  | 29 | 35 |



# シミュレーション結果(18)

## ◆ 6bitユナリ型DAC

✓ Quadratic error

(a)

| INL MAX   |        |
|-----------|--------|
| ● magic   | : 1.04 |
| ● Random  | : 1.08 |
| ● regular | : 11.1 |

Magic



Random



二次のエラーをキャンセル可能

→ スイッチング・アルゴリズムに適している

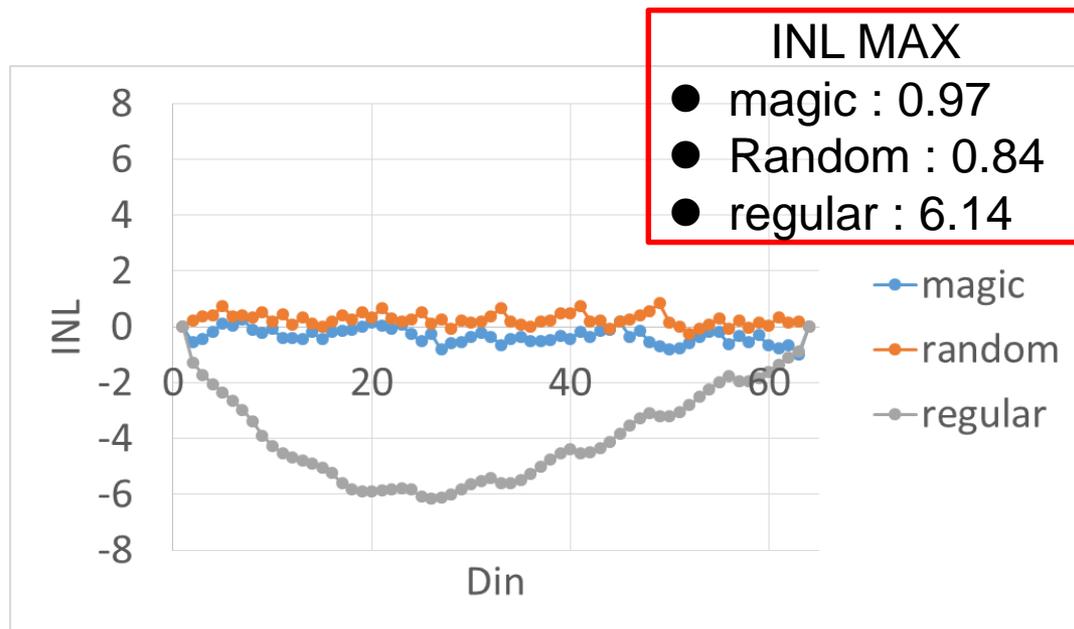
# シミュレーション結果(16)

## ◆ 6bitユナリ型DAC

✓ Joint error

(a)

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 63 | 38 | 28 | 5  | 59 | 34 | 32 |
| 48 | 18 | 11 | 53 | 44 | 22 | 15 | 49 |
| 27 | 37 | 64 | 2  | 31 | 33 | 60 | 6  |
| 54 | 12 | 17 | 47 | 50 | 16 | 21 | 43 |
| 9  | 55 | 46 | 20 | 13 | 51 | 42 | 24 |
| 40 | 26 | 3  | 61 | 36 | 30 | 7  | 57 |
| 19 | 45 | 56 | 10 | 23 | 41 | 52 | 14 |
| 62 | 4  | 25 | 39 | 58 | 8  | 29 | 35 |



# シミュレーション結果(18)

## ◆ 6bitユナリ型DAC

✓ Joint error

(a)

| INL MAX   |        |
|-----------|--------|
| ● magic   | : 0.97 |
| ● Random  | : 0.84 |
| ● regular | : 6.14 |

Magic



Random



二次の重みを大きくすると、魔方陣が有効

# Outline

- 研究背景
- 目的
- DA変換器の概要
- 魔方陣について
- 魔方陣を用いたアルゴリズム
- シミュレーション結果
- **まとめ**

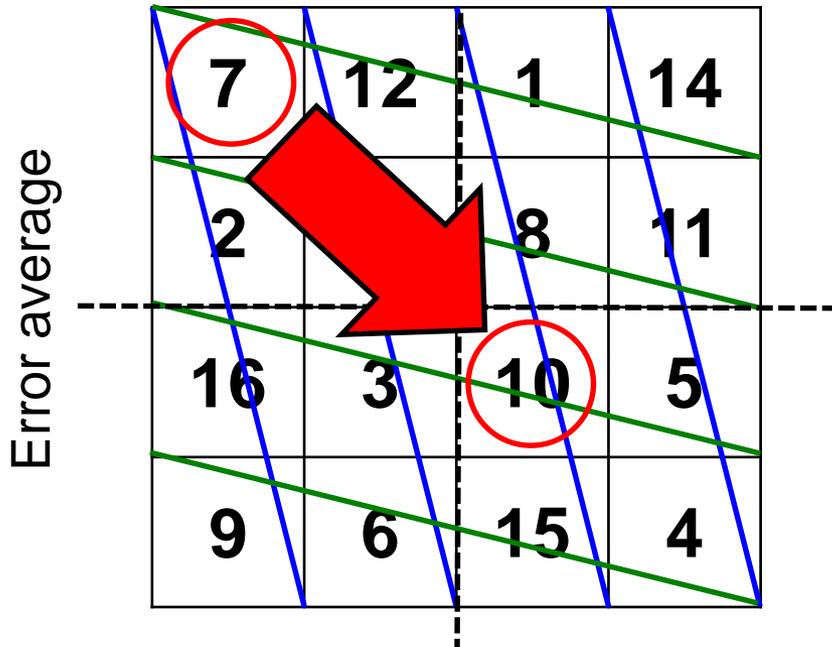
# まとめ

- 定和性を利用することにより  
魔方陣レイアウトは、2次のエラーに有効
- 一次においてRandom Walkの方が有効なためjoint errorはRandom Walkの優勢
- joint errorで二次の重みを大きくすると  
魔方陣が有効
- システムティックなばらつきのキャンセルに適している可能性

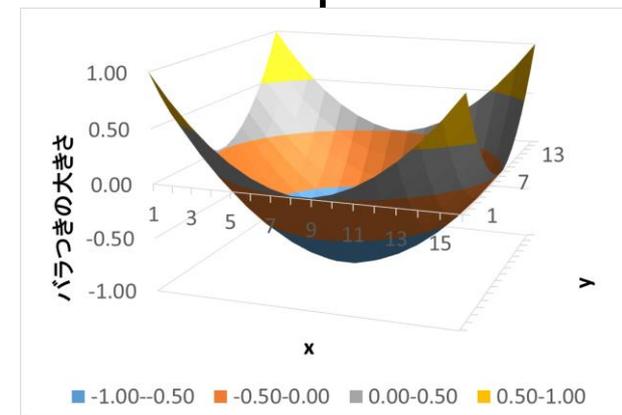
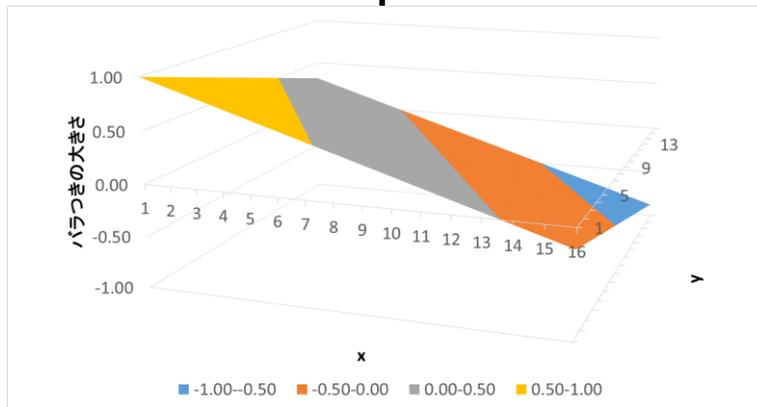
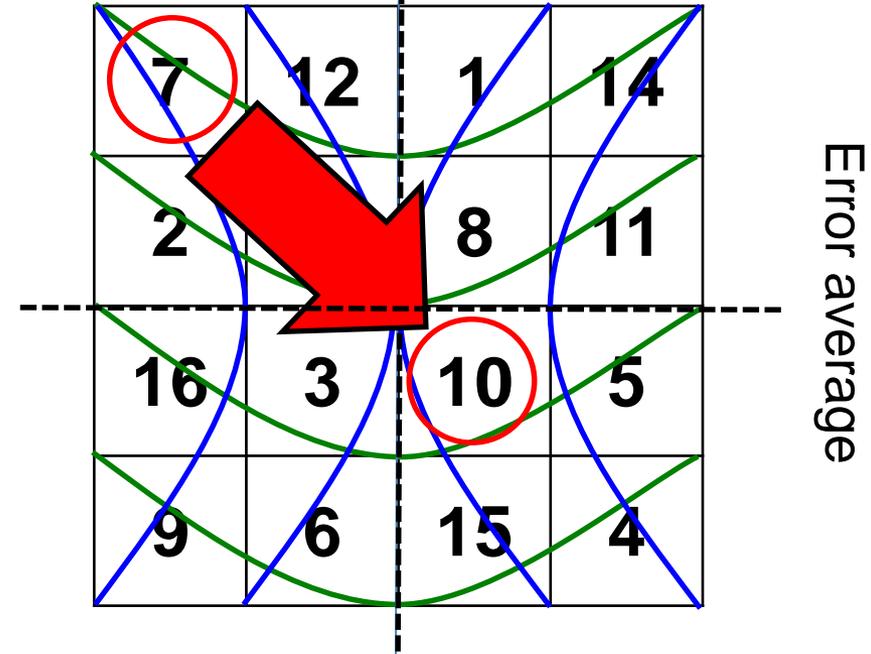


# 魔方陣を用いたアルゴリズム (1)

Error average



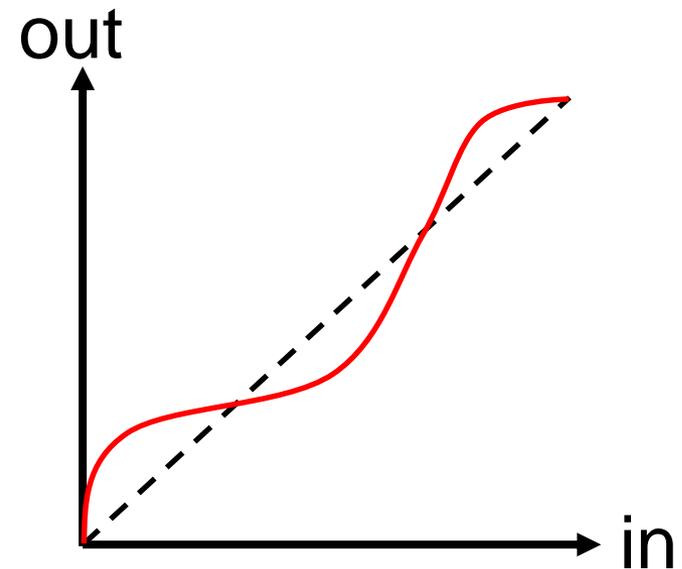
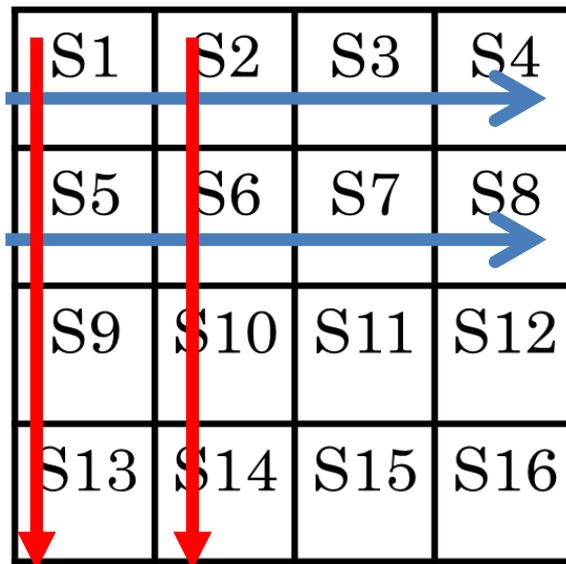
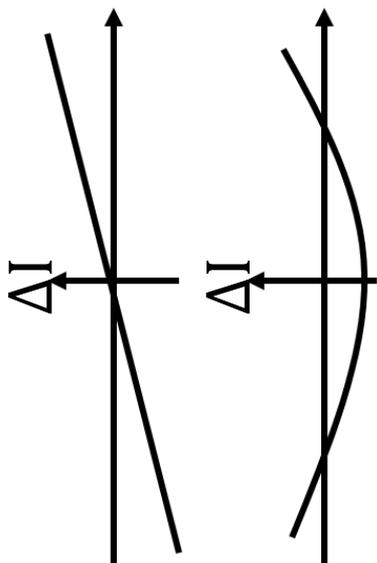
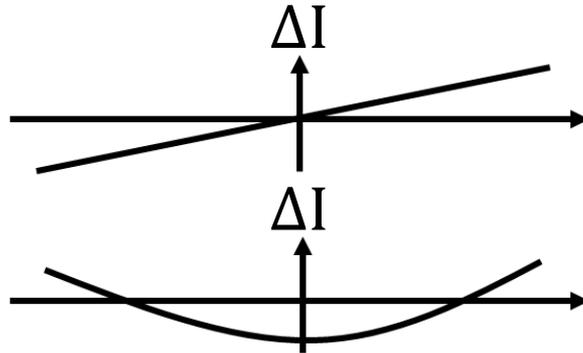
Error average



- 二次のキャンセルは難しい。コモンセントロイドで一次はキャンセルできる
- 特性ミスマッチを詳しく。製造ばらつきや、システムティックにばらつく現象を詳しく。

# DA変換器の概要(3)

## ◆ DA変換器 - システムティック・ミスマッチとレイアウト



# 魔方陣を用いたアルゴリズム (5)

## ◆ システマティックなバラつき – 電流セル選択

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

- ✓ 対角線・汎対角線を利用
- ✓ 数字の順にスイッチング

# 魔方陣を用いたアルゴリズム (6)

## ◆ システマティックなバラつき – 電流セル選択

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

# 魔方陣を用いたアルゴリズム (7)

## ◆ システマティックなバラつき – 電流セル選択

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

# 魔方陣を用いたアルゴリズム (8)

## ◆ システマティックなバラつき – 電流セル選択

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 7  | 12 | 1  | 14 |
| 2  | 13 | 8  | 11 |
| 16 | 3  | 10 | 5  |
| 9  | 6  | 15 | 4  |

|          |           |          |          |
|----------|-----------|----------|----------|
| 7        | <b>12</b> | 1        | 14       |
| 2        | 13        | <b>8</b> | 11       |
| 16       | 3         | 10       | <b>5</b> |
| <b>9</b> | 6         | 15       | 4        |

|          |           |          |          |
|----------|-----------|----------|----------|
| 7        | <b>12</b> | 1        | 14       |
| 2        | 13        | <b>8</b> | 11       |
| 16       | 3         | 10       | <b>5</b> |
| <b>9</b> | 6         | 15       | 4        |

バラつきを有効にキャンセル

# 質疑応答

- Random Walk以外のアルゴリズムはあるのか  
→Random Walkが主流。参考文献では、ウェハの角が一番重みが大きくなるので、角を取った設計もある。
- Siウェハ上で一次・二次の傾斜は資料のように綺麗にでないと考えられるが、どうなのか  
→参考文献上では、資料のような傾斜になっていたもので、そちらを参考にして行った。実際は、ランダムにばらつく要素もあると考えられるので、今後は傾斜に乱数を足すなどとして、解析を行っていきたい
- 実際の回路で、一次と二次の重みはどちらのほうが大きいのか  
→文献には記載されていなかったもので、分からない。