

セグメント型DA変換器の 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
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

Outline

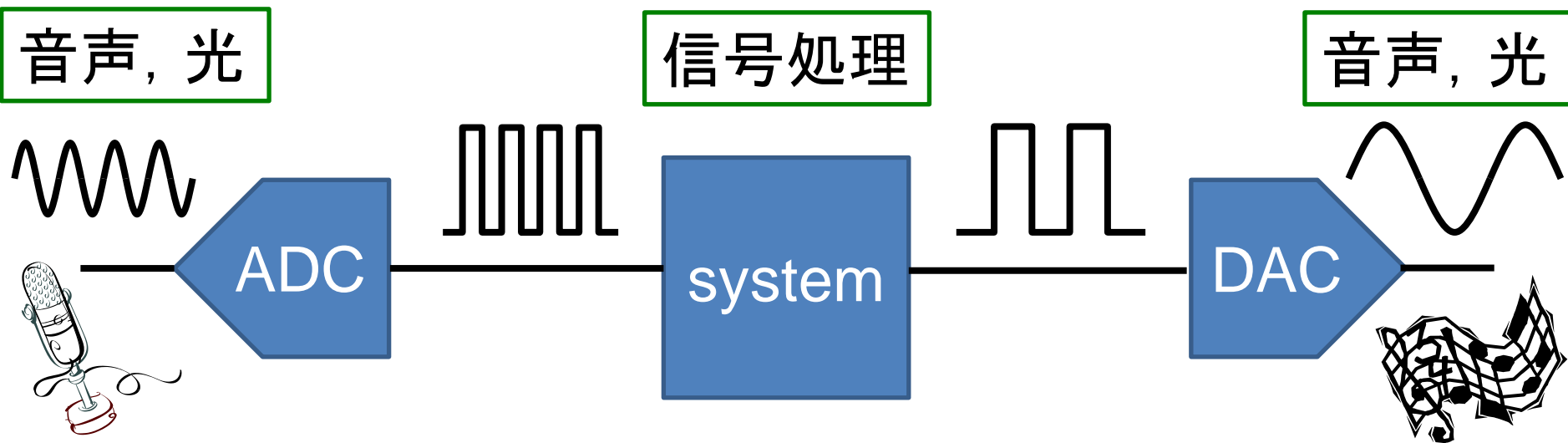
- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

研究背景・目的(1)

電子機器 {
• 小型化
• 高速化

➡ デジタル回路が適している

✓ しかし、自然界の信号はアナログ信号であるので
信号処理が必要



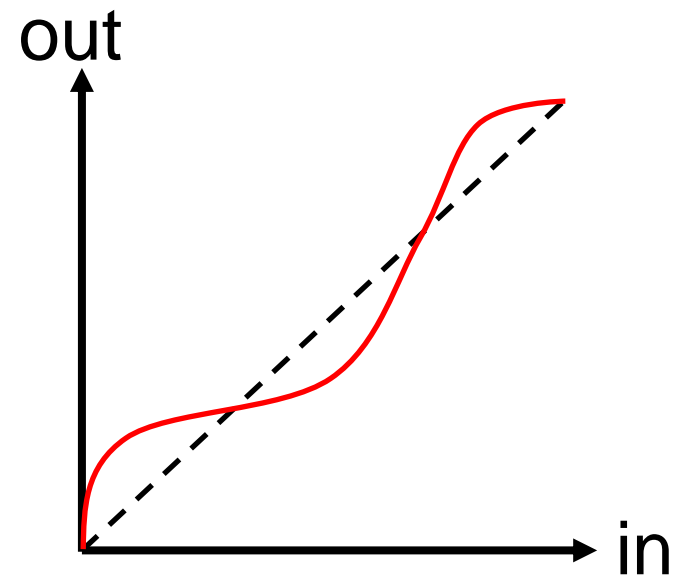
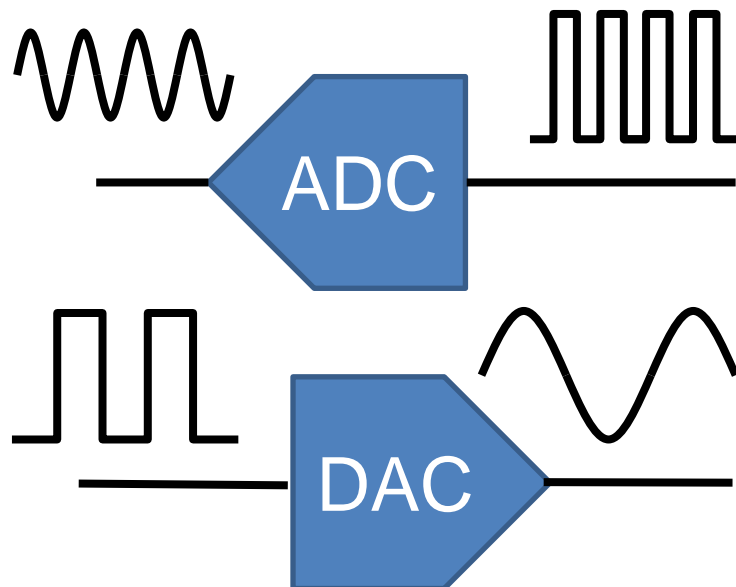
→ 高性能なAD及びDA変換器が求められている

研究背景・目的(2)

- ✓ 半導体素子を構成しているシリコンウェハ上では、ばらつきが存在

ex) MOSFET特性, 抵抗, 容量

{ 素子のミスマッチ
入出力信号の線形性劣化



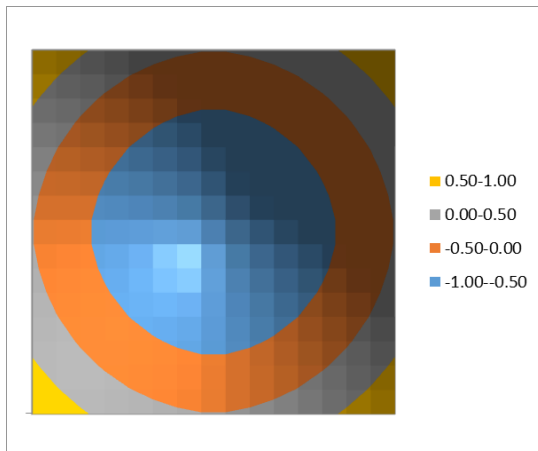
研究背景・目的(3)

◆ ばらつきの種類

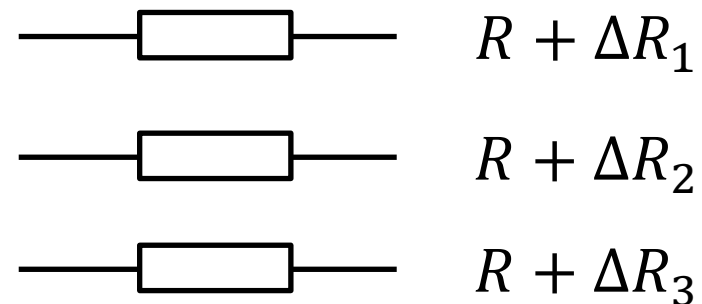
- ✓ システマティックなばらつき
- ✓ ランダムなばらつき

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

研究背景・目的(4)

◆ 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

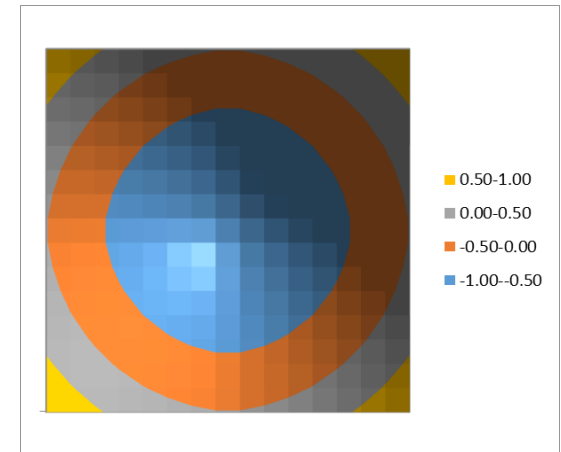
◆ システマティックなばらつき

- ✓ 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

- 従来方法

Random Walk, 配置

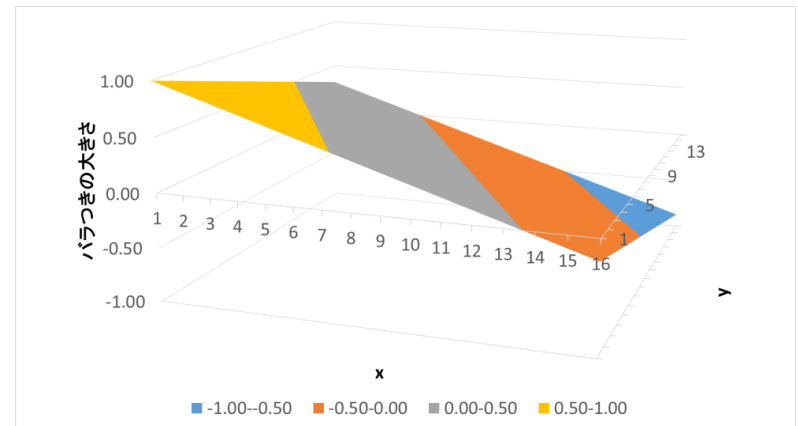


研究背景・目的(5)

◆ システムティックなバラつき

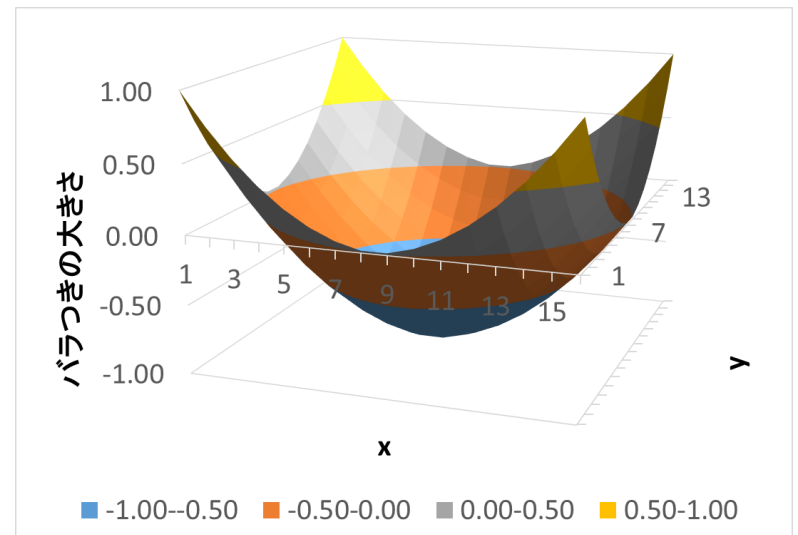
- ✓ 電圧降下
- ✓ 酸化膜の厚さ
- ✓ ドーピング

Linear
Error



- ✓ 機械的ストレス
- ✓ 温度分布
- ✓ ウエハ面内

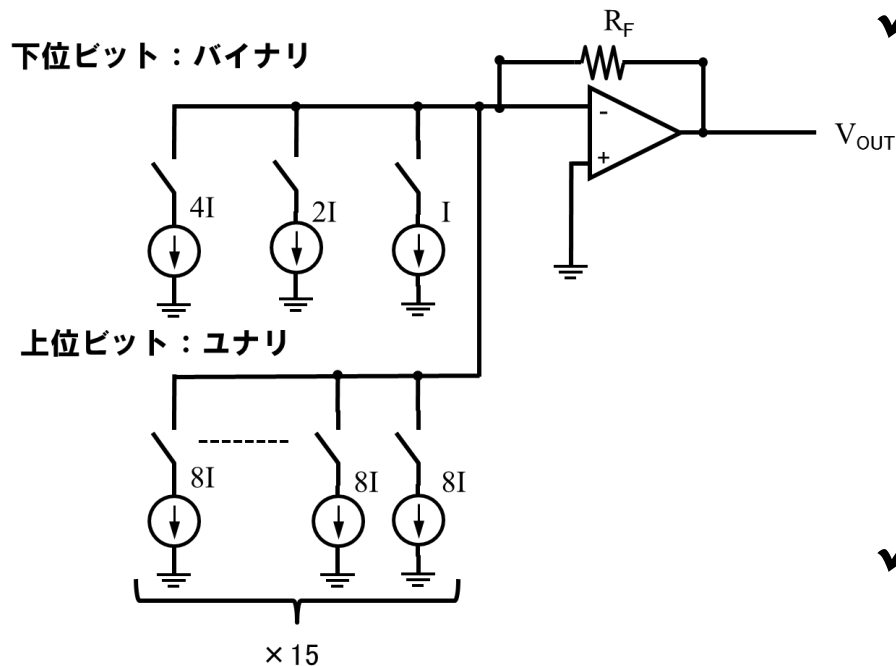
Quadratic
Error



Joint Error(両者の和)

研究背景・目的(6)

◆ 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

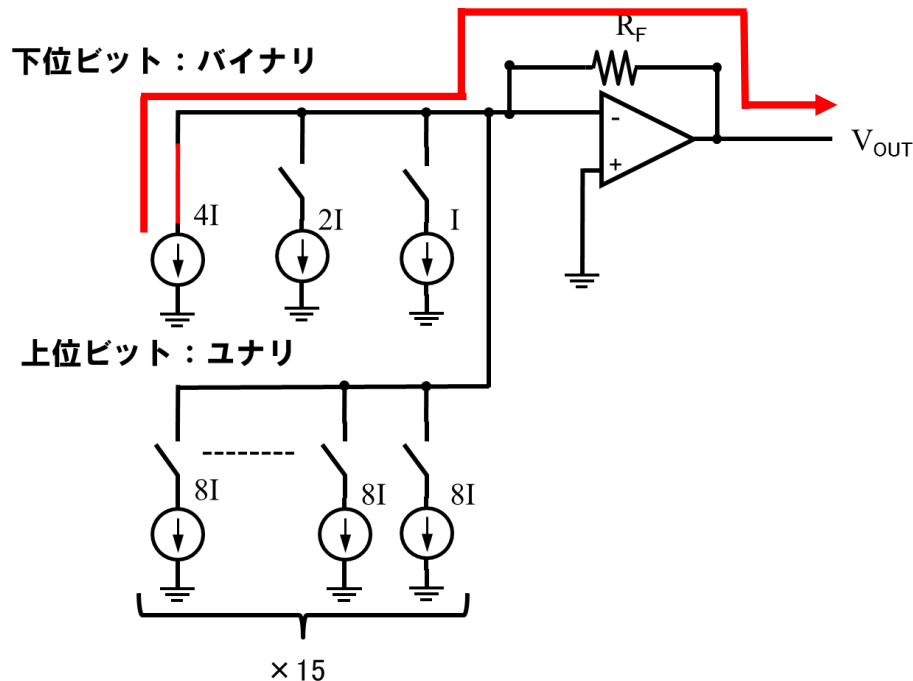
研究背景・目的(7)

◆ DA変換器の構成

✓ 7bit DA変換器

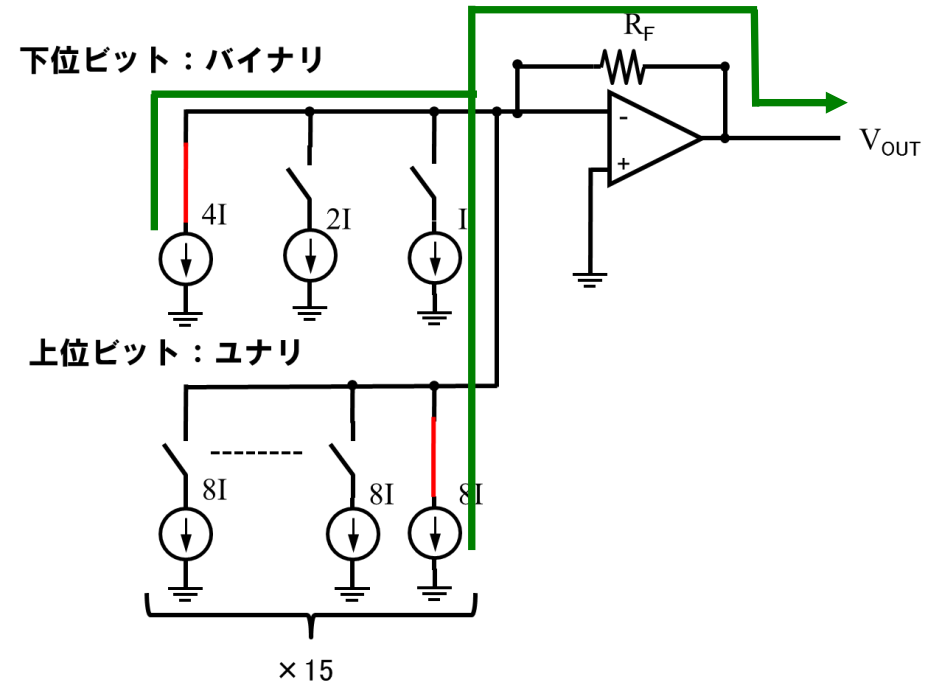
ex.1

(0000100) \rightarrow $V_{out} = 4IR_F$



ex.2

(0001100) \rightarrow $V_{out} = 12IR_F$



研究背景・目的(8)

◆ DA変換器の構成

✓ 7bit DA変換器

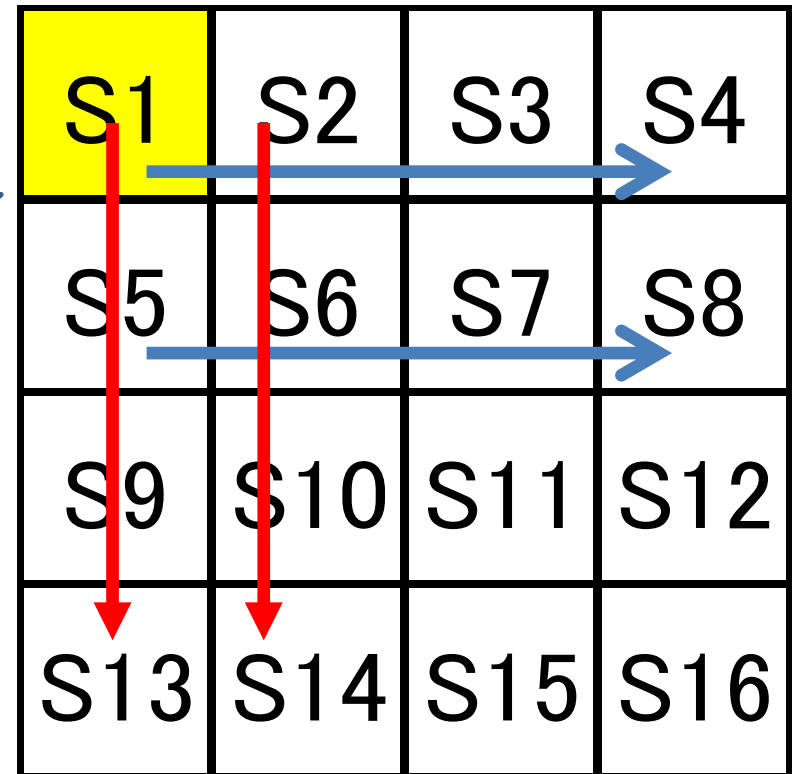
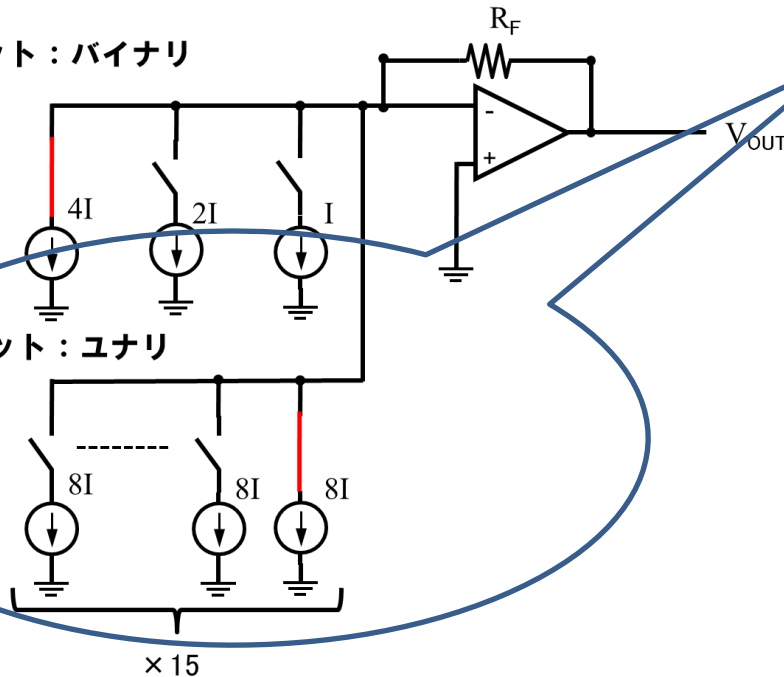
(0001100)



$$V_{out} = 12IR_F$$

下位ビット：バイナリ

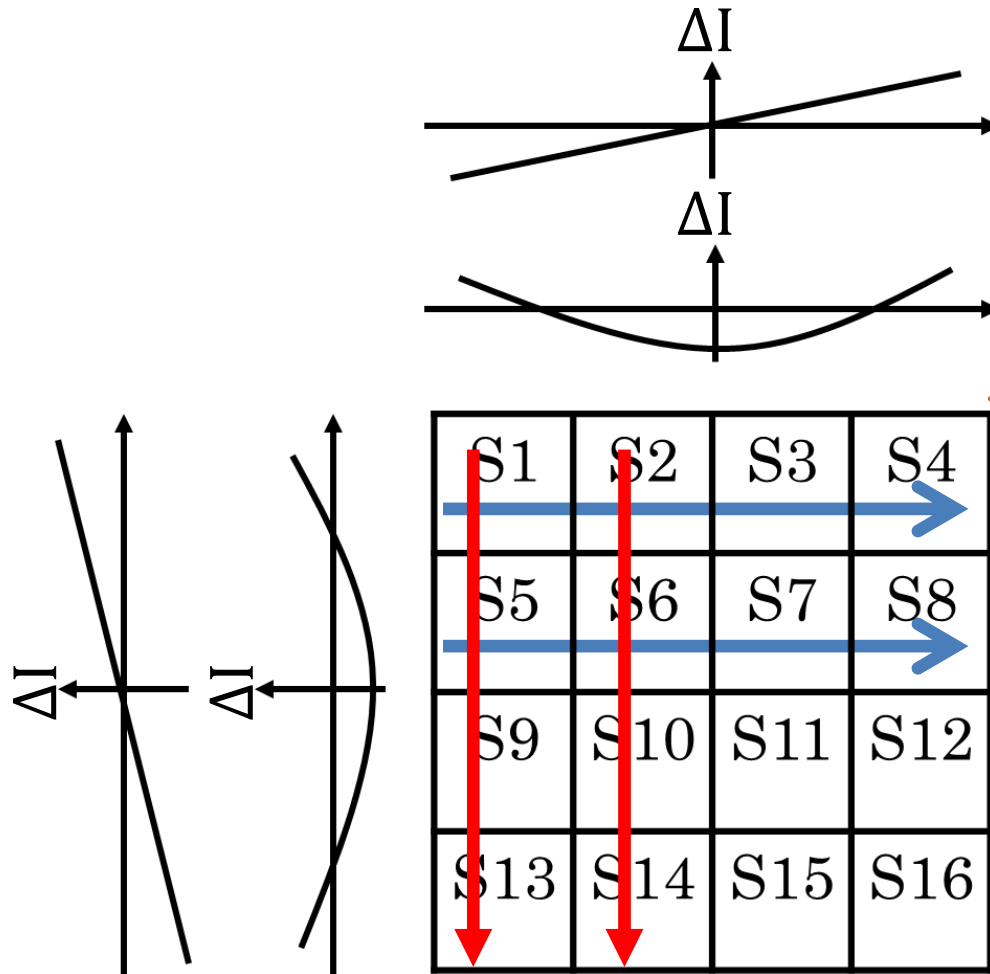
上位ビット：ユナリ



単位電流セル(ユナリ型)

研究背景・目的(9)

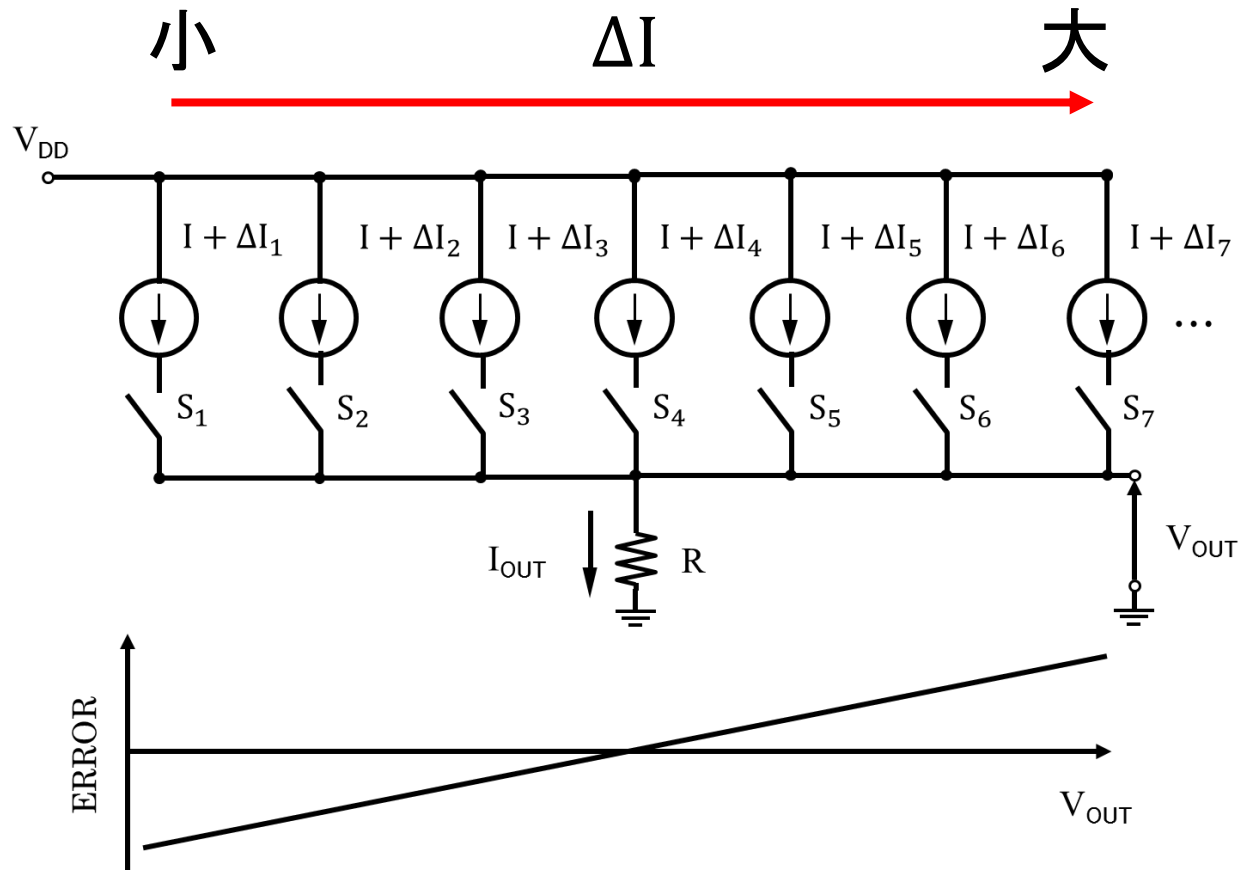
◆ DA変換器 - システムティック・ミスマッチとレイアウト



ミスマッチの傾斜が
そのまま出力信号へ

研究背景・目的(10)

◆ DA変換器 - システムティック・ミスマッチとレイアウト

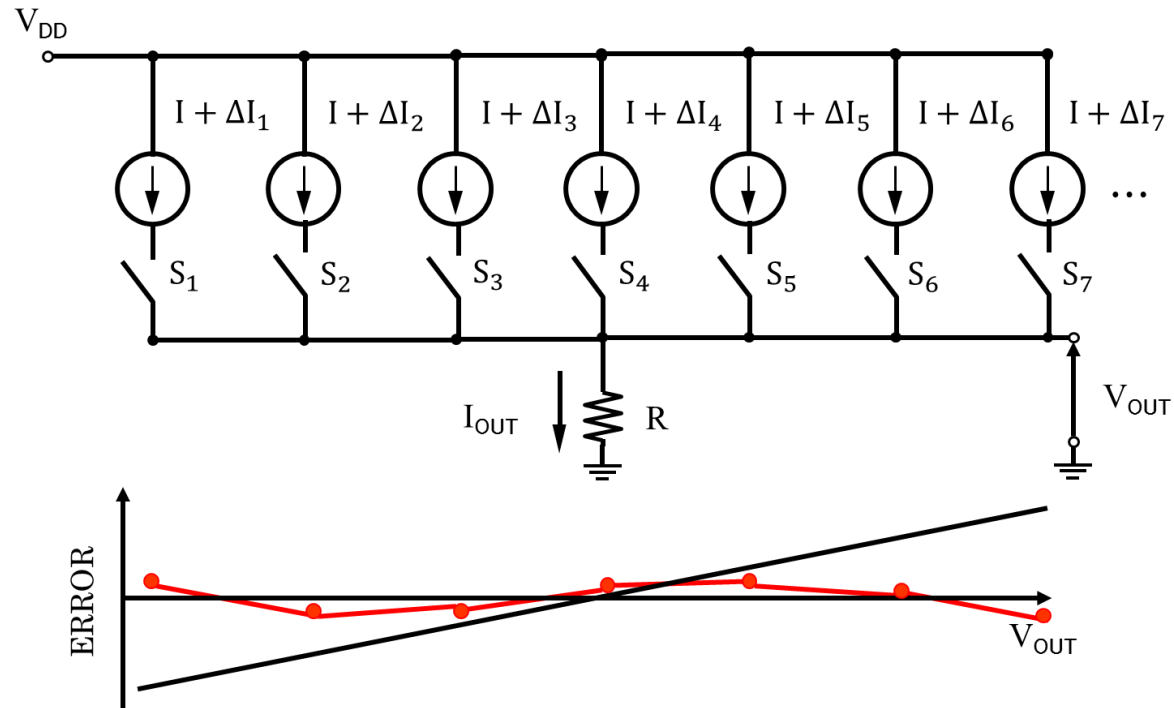


電流源のミスマッチにより入出力信号の線形性劣化が問題

研究背景・目的(11)

◆ DA変換器 - システムティック・ミスマッチとレイアウト

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



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

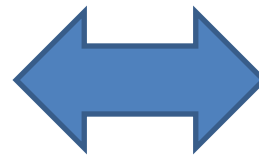
研究背景・目的(12)

考案

魔方陣によるレイアウト

4	9	7	14
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
- **魔方陣の性質**
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

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)
- ✓ 魔方陣の総数が分かっているのは5次まで

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

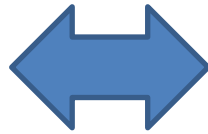
25	14	16	3	7
8	17	4	21	15
2	6	13	20	24
11	5	22	9	18
19	23	10	12	1

魔方陣の性質(3)

◆ 回転・裏返し

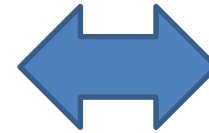
2	9	4
7	5	3
6	1	8

回転



4	3	8
9	5	1
2	7	6

回転



8	1	6
3	5	7
4	9	2



裏返し

4	9	2
3	5	7
8	1	6



8	3	4
1	5	9
6	7	2

裏返し



6	1	8
7	5	3
2	9	4

魔方陣の性質(4)

◆ 使用した魔方陣

- ✓ 同心魔方陣
- ✓ 対称魔方陣
- ✓ サイの目方陣

あるアルゴリズムを定めて、
入出力信号のINL(積分非直線性)を算出

比較

- 魔方陣
- 規則的
- Random Walk

Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- **同心魔方陣について**
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

同心魔方陣について

◆ 使用した魔方陣

✓ 同心魔方陣

外側からひと側ずつ取り除いても、定和性を失わない

数字が対称な位置にあるため、
ばらつきのキャンセルに有効？

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

Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- **対称魔方陣について**
- サイの目方陣について
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

対称魔方陣について

◆ 使用した魔方陣

✓ 対称魔方陣

中心に対して対称な位置にある2数の和が一定

$$2\text{数の和} = n^2 + 1$$

2×2の小方陣の和が一定

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

Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- **サイの目方陣について**
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

サイの目方陣について

◆ 使用した魔方陣

✓ サイの目方陣

数字の変わりに○印を用いたもの
○印は中心に対して対象な配置

2	9	4
7	5	3
6	1	8

	○		○	○	○		○	
			○	○	○	○		○
	○		○	○	○		○	
○	○	○	○		○			
	○			○		○	○	○
○	○	○	○		○			
○		○				○	○	○
○		○		○		○		○
○		○				○	○	○

Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- **各魔方陣のシミュレーション方法・結果**
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(1)

✓ システマティックなばらつき

- Linear Error

$$\varepsilon_l(x, y) = g_l * \cos \theta * x + g_l * \sin \theta * y$$

θ : 傾きの角度, g_l : 傾きの大きさ

- Quadratic Error

$$\varepsilon_q(x, y) = g_q * (x^2 + y^2) - a_0$$

g_q : 変化量, a_0 : 位置

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(2)

◆ 同心魔方陣

8次方陣を4つ組み合わせて8bitの単位電流源セルを表現

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

A1	B1
B2	A2

A:左図の魔方陣
B:45° 左回転

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(3)

◆ 同心魔方陣

- アルゴリズム

A1	B1
B2	A2

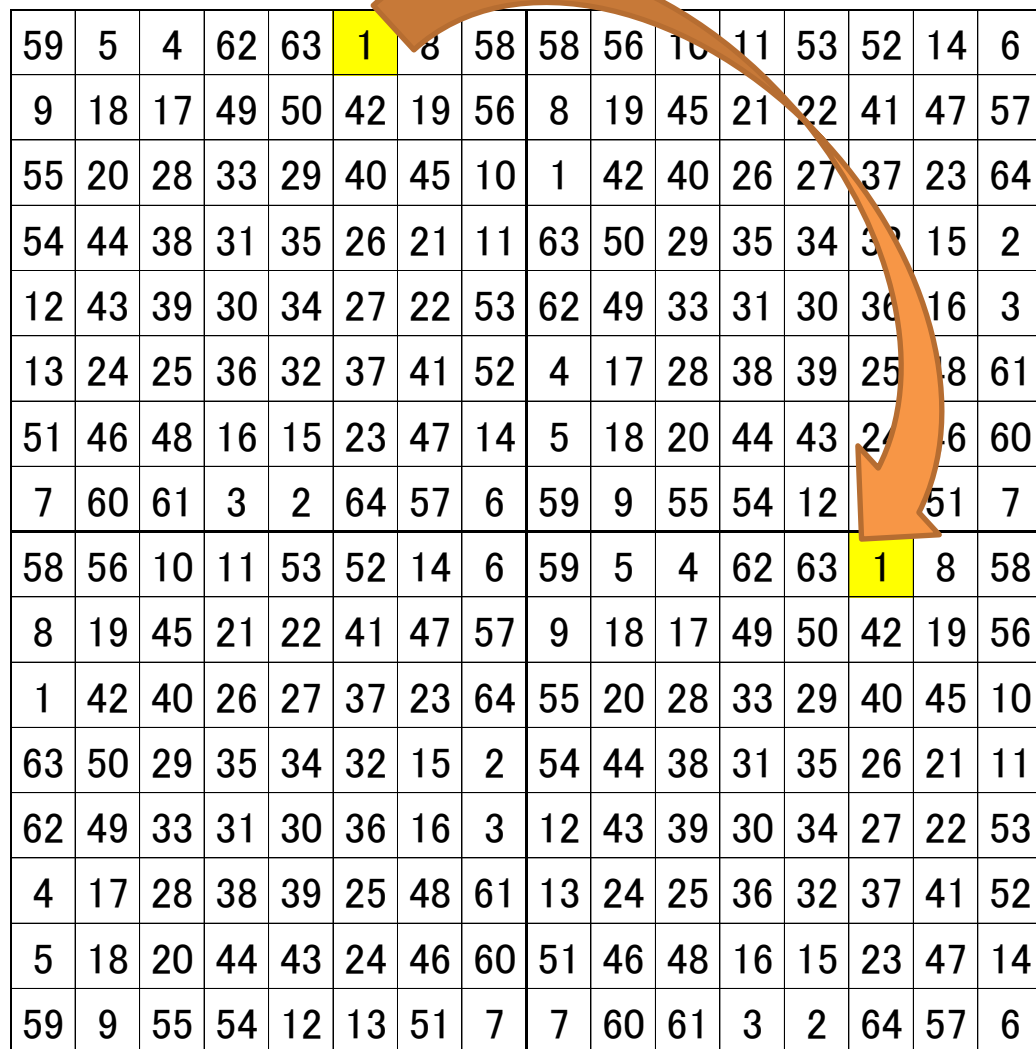
59	5	4	62	63	1	8	58	58	56	10	11	53	52	14	6
9	18	17	49	50	42	19	56	8	19	45	21	22	41	47	57
55	20	28	33	29	40	45	10	1	42	40	26	27	37	23	64
54	44	38	31	35	26	21	11	63	50	29	35	34	32	15	2
12	43	39	30	34	27	22	53	62	49	33	31	30	36	16	3
13	24	25	36	32	37	41	52	4	17	28	38	39	25	48	61
51	46	48	16	15	23	47	14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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(4)

◆ 同心魔方陣

- アルゴリズム

A1	B1
B2	A2



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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(5)

◆ 同心魔方陣

- アルゴリズム

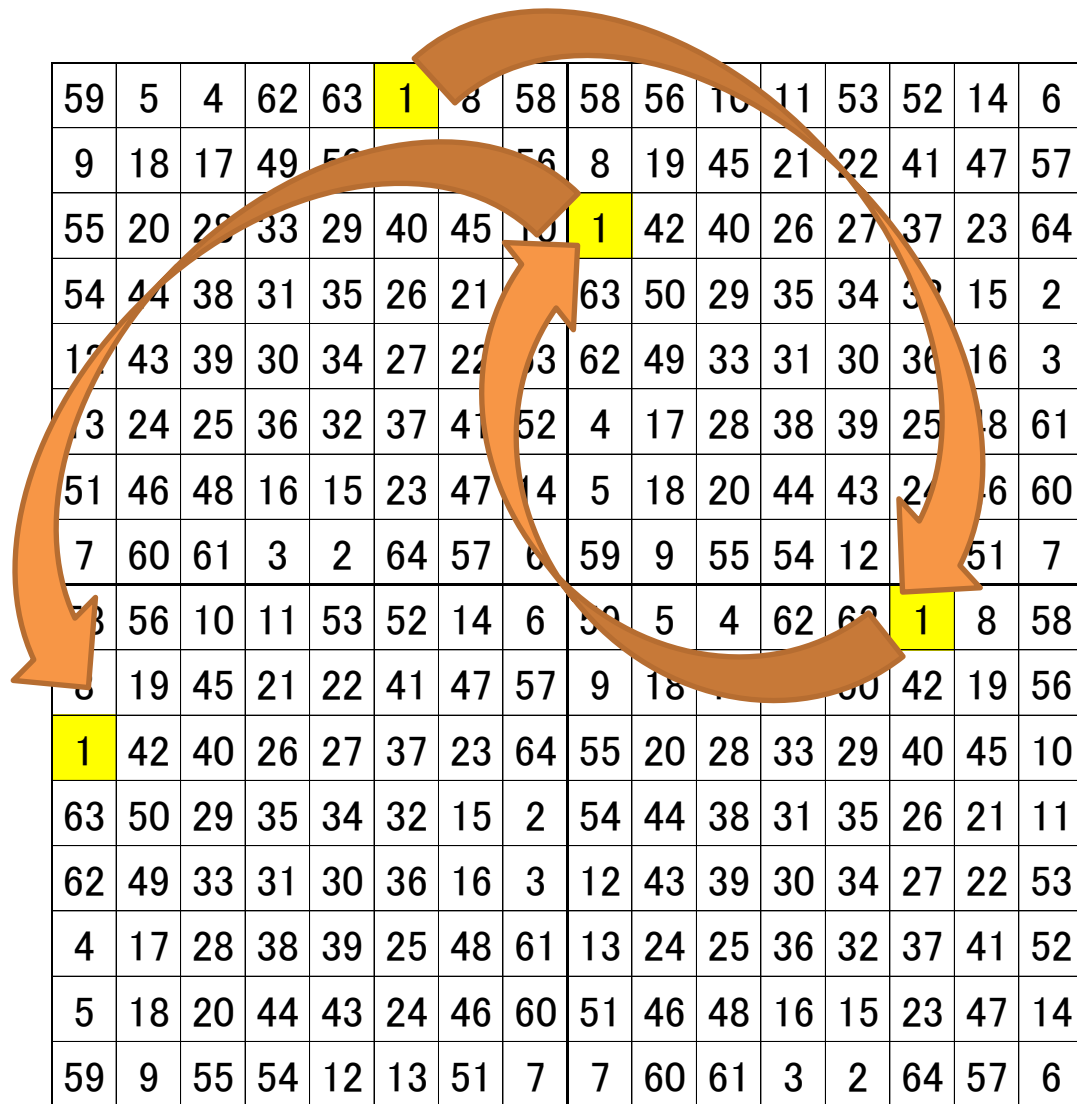
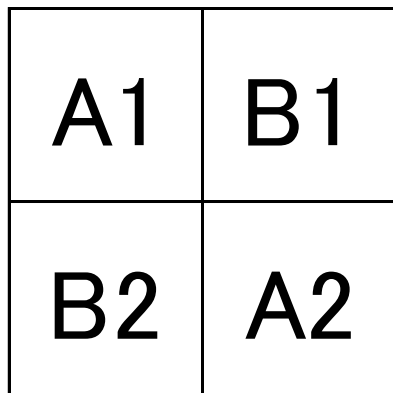
A1	B1
B2	A2

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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(6)

◆ 同心魔方陣

- アルゴリズム



各魔方陣のシミュレーション方法・結果(7)

◆ 同心魔方陣

- アルゴリズム

A1	B1
B2	A2

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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(8)

◆ 同心魔方陣

- アルゴリズム

A1	B1
B2	A2

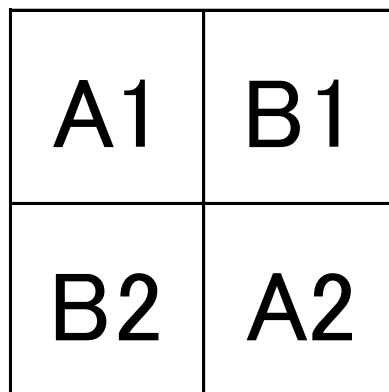
59	5	4	62	63	1	8	58	58	56	10	11	53	52	14	6
9	18	17	49	50	42	19	56	8	19	45	21	22	41	47	57
55	20	28	33	29	40	45	10	1	42	40	26	27	37	23	64
54	44	38	31	35	26	21	11	63	50	29	35	34	32	15	2
12	43	39	30	34	27	22	53	62	49	33	31	30	36	16	3
13	24	25	36	32	37	41	52	4	17	28	38	39	25	48	61
51	46	48	16	15	23	47	14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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(9)

◆ 同心魔方陣

• アルゴリズム

1. A1の1
2. A2の1
3. B1の1
4. B2の1
5. A1の2
- ⋮
255. B1の256
256. B2の256



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

中央と隅を取りつつ、擬似ランダムなスイッチングを再現

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(10)

◆ 同心魔方陣

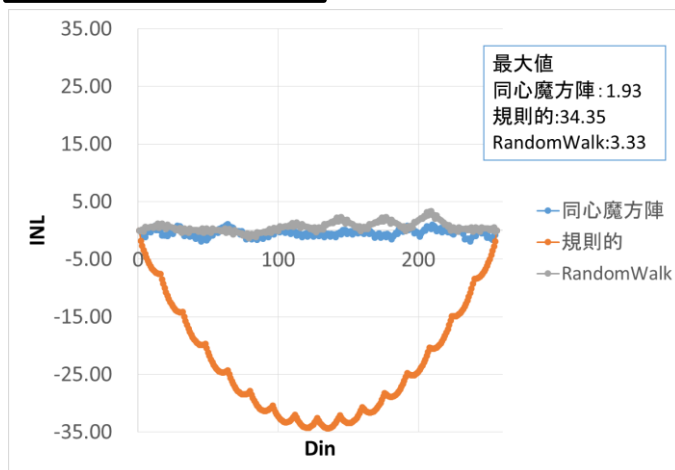
✓ Linear Error

$$\varepsilon_l(x, y) = g_l * \cos \theta * x + g_l * \sin \theta * y$$

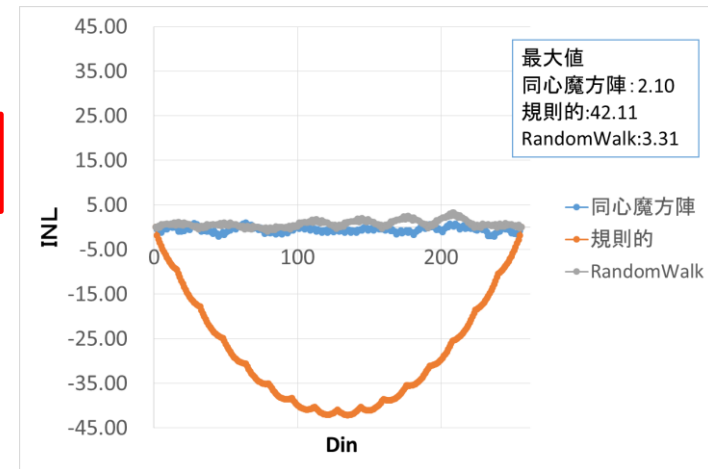
$$\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$$

$$g_l = 1$$

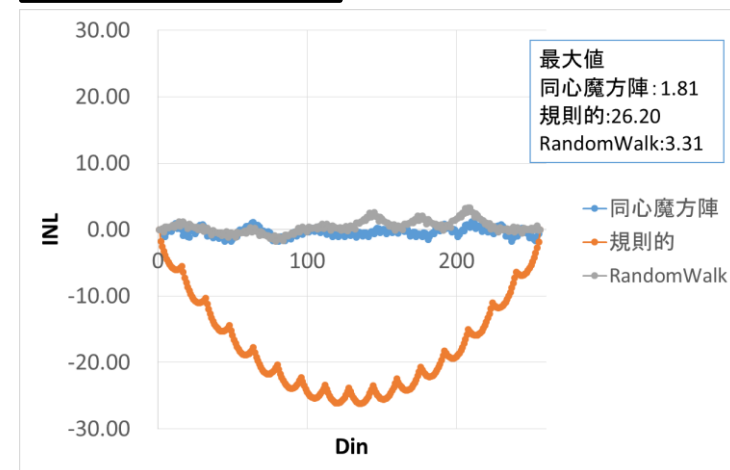
• $\theta = 45^\circ$



• $\theta = 30^\circ$



• $\theta = 60^\circ$



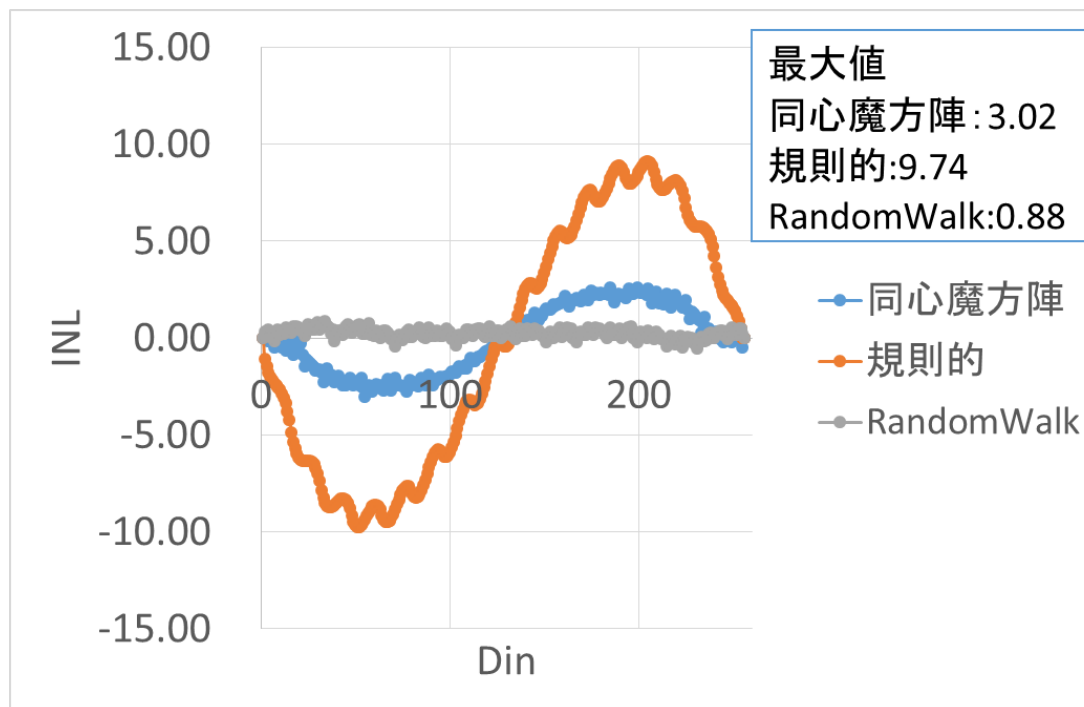
各魔方陣のシミュレーション方法・結果(11)^{38/69}

◆ 同心魔方陣

✓ Quadratic Error

$$\varepsilon_q(x, y) = g_q * (x^2 + y^2) - a_0$$

$$g_q = 1, a_0 = 0$$

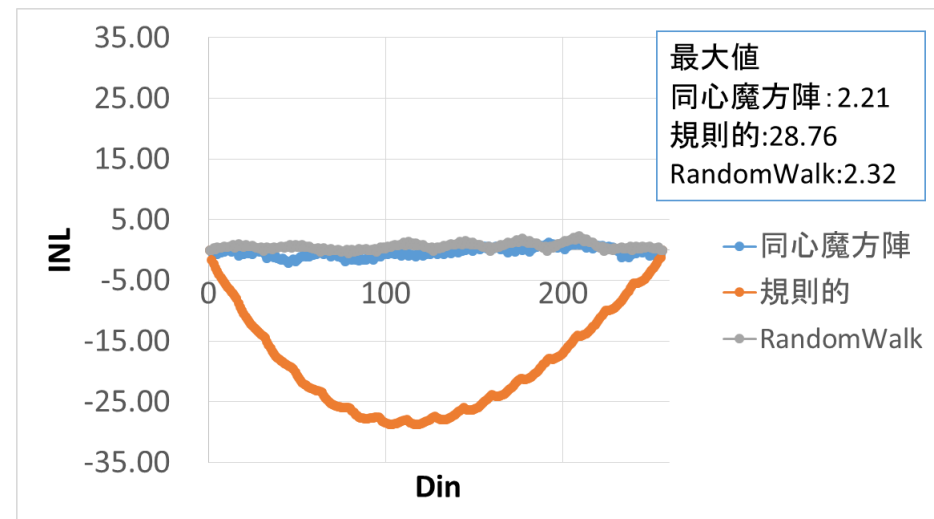
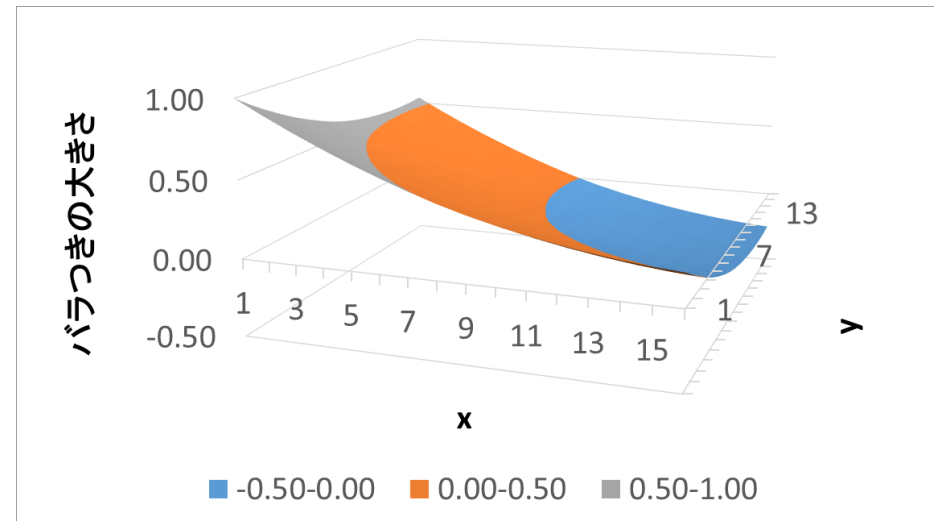


各魔方陣のシミュレーション方法・結果(12)

◆ 同心魔方陣

✓ Joint Error

一次 > 二次 の場合

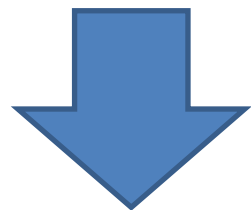


各魔方陣のシミュレーション方法・結果(13)

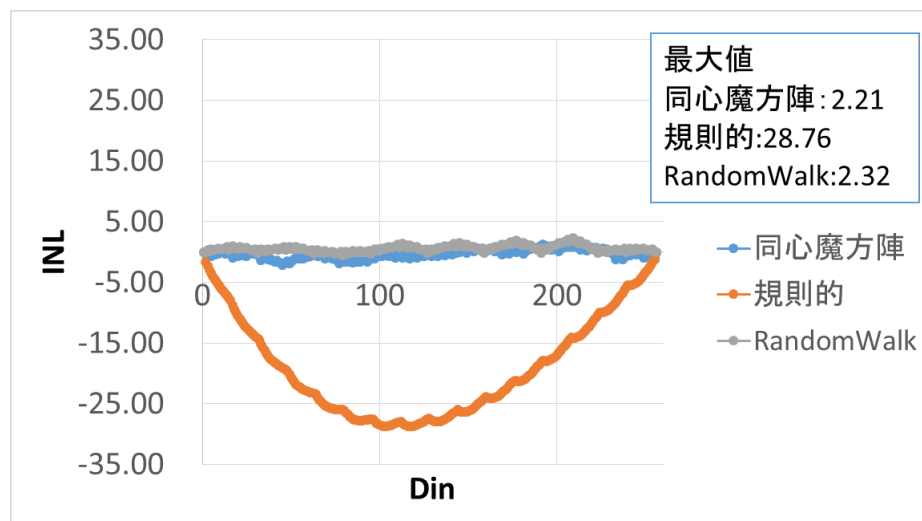
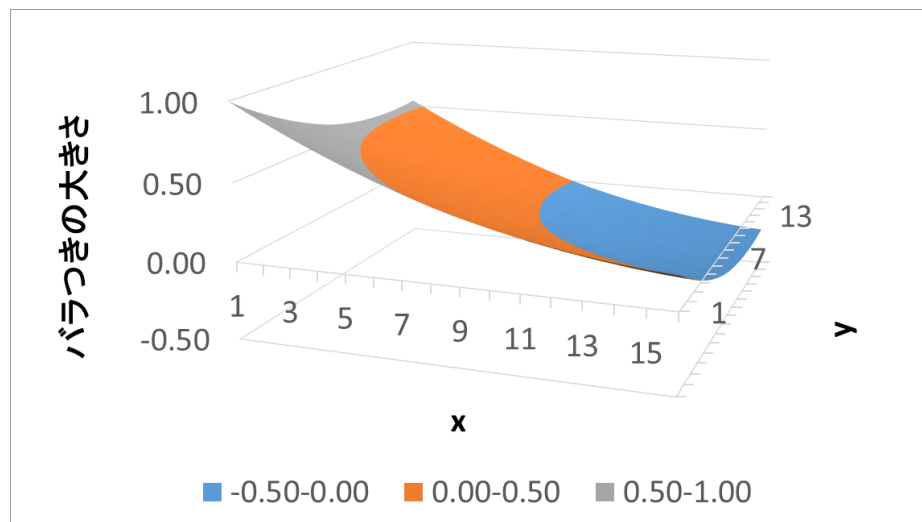
◆ 同心魔方陣

✓ Joint Error

一次 > 二次 の場合



魔方陣の方が適している

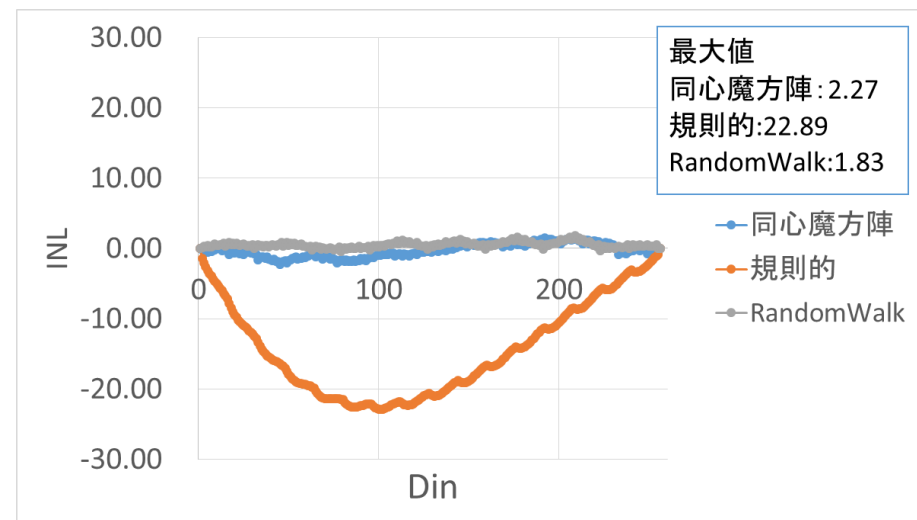
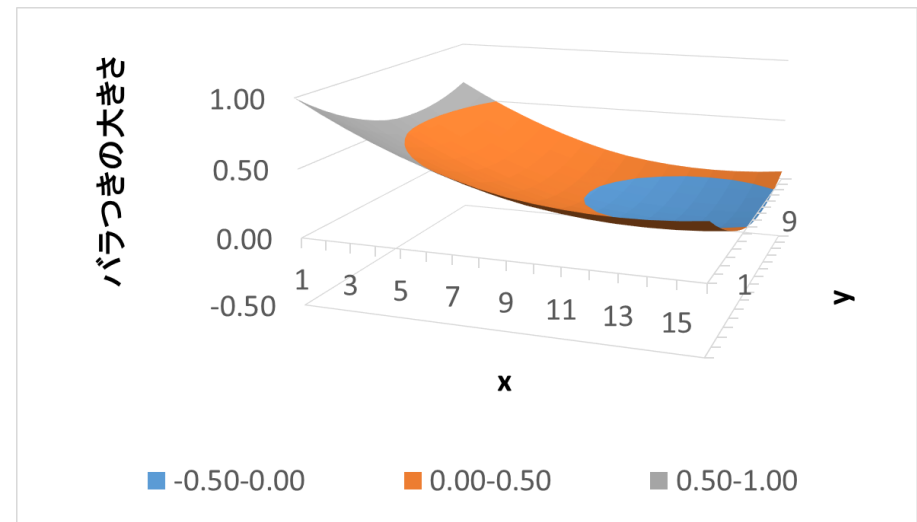


各魔方陣のシミュレーション方法・結果(14)^{41/69}

◆ 同心魔方陣

✓ Joint Error

一次 < 二次 の場合

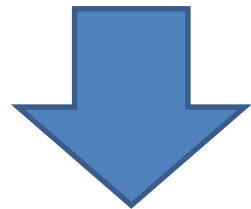


各魔方陣のシミュレーション方法・結果(15)

◆ 同心魔方陣

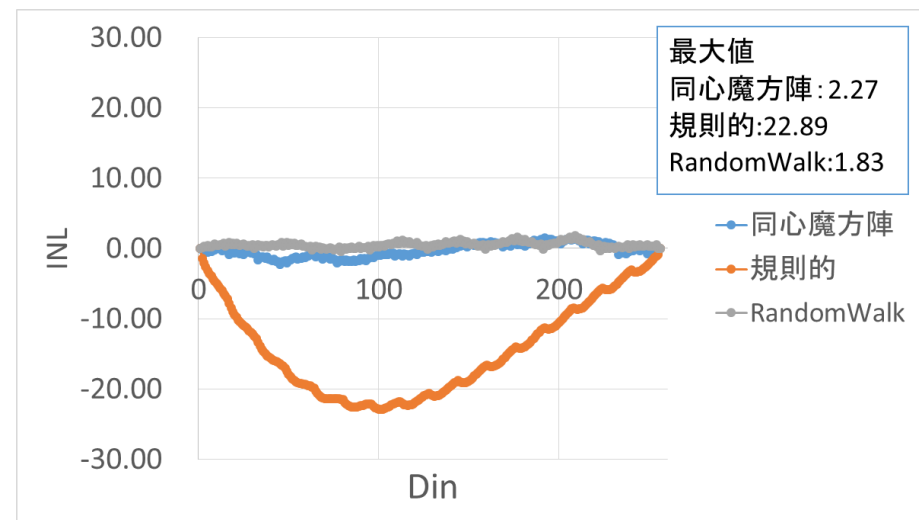
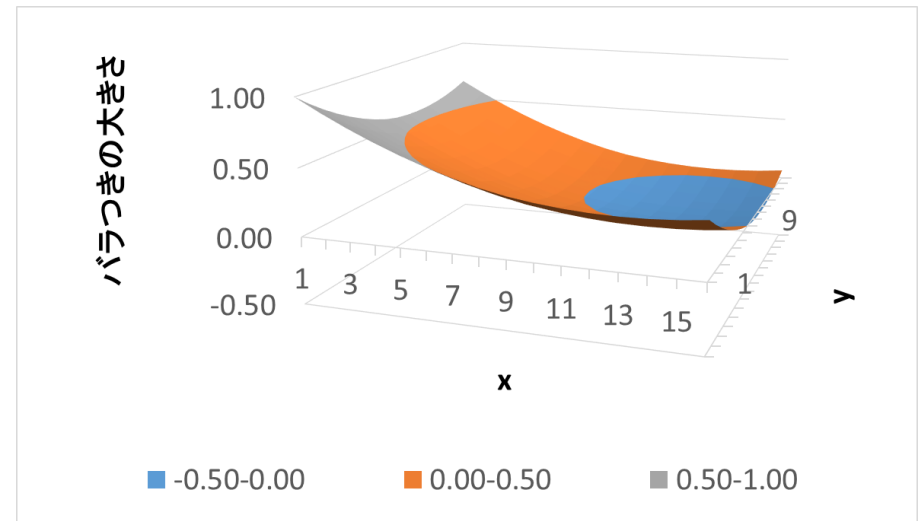
✓ Joint Error

一次 < 二次 の場合



Random Walkの方が
適している

魔方陣は一次のばらつき
に適している？



Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- **各魔方陣のシミュレーション方法・結果**
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- まとめ・課題

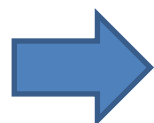
各魔方陣のシミュレーション方法・結果(16)^{44/69}

◆ 対称魔方陣

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

A	B
D	C

A:左図の魔方陣
B:45° 右回転
C:90° 右回転
D:180° 右回転

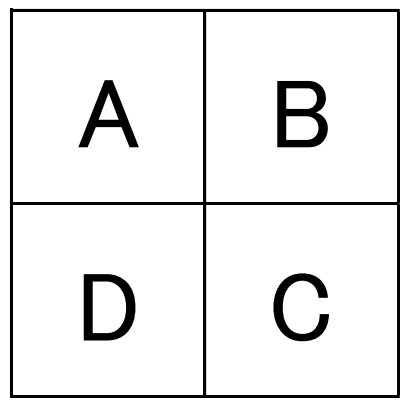


擬似乱性を高める

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(17)

◆ 対称魔方陣

- アルゴリズム

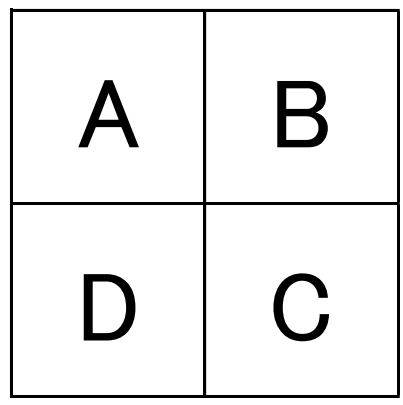


1	63	62	4	5	59	58	8	57	16	24	33	25	48	56	1
56	10	11	53	52	14	15	49	7	50	42	31	39	18	10	63
48	18	19	45	44	22	23	41	6	51	43	30	38	19	11	62
25	39	38	28	29	35	34	32	60	13	21	36	28	45	53	4
33	31	30	36	37	27	26	40	61	12	20	37	29	44	52	5
24	42	43	21	20	46	47	17	3	54	46	27	35	22	14	59
16	50	51	13	12	54	55	9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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(18)

◆ 対称魔方陣

- アルゴリズム



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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(19)

◆ 対称魔方陣

- アルゴリズム

A	B
D	C

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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(20)

◆ 対称魔方陣

- アルゴリズム

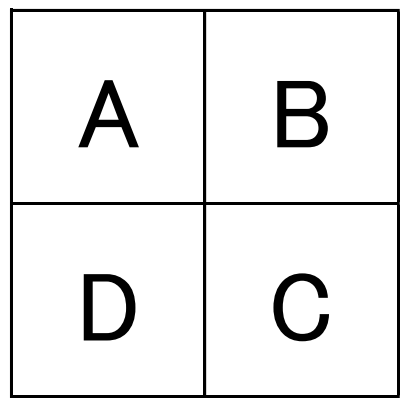
A	B
D	C

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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(21)

◆ 対称魔方陣

- アルゴリズム



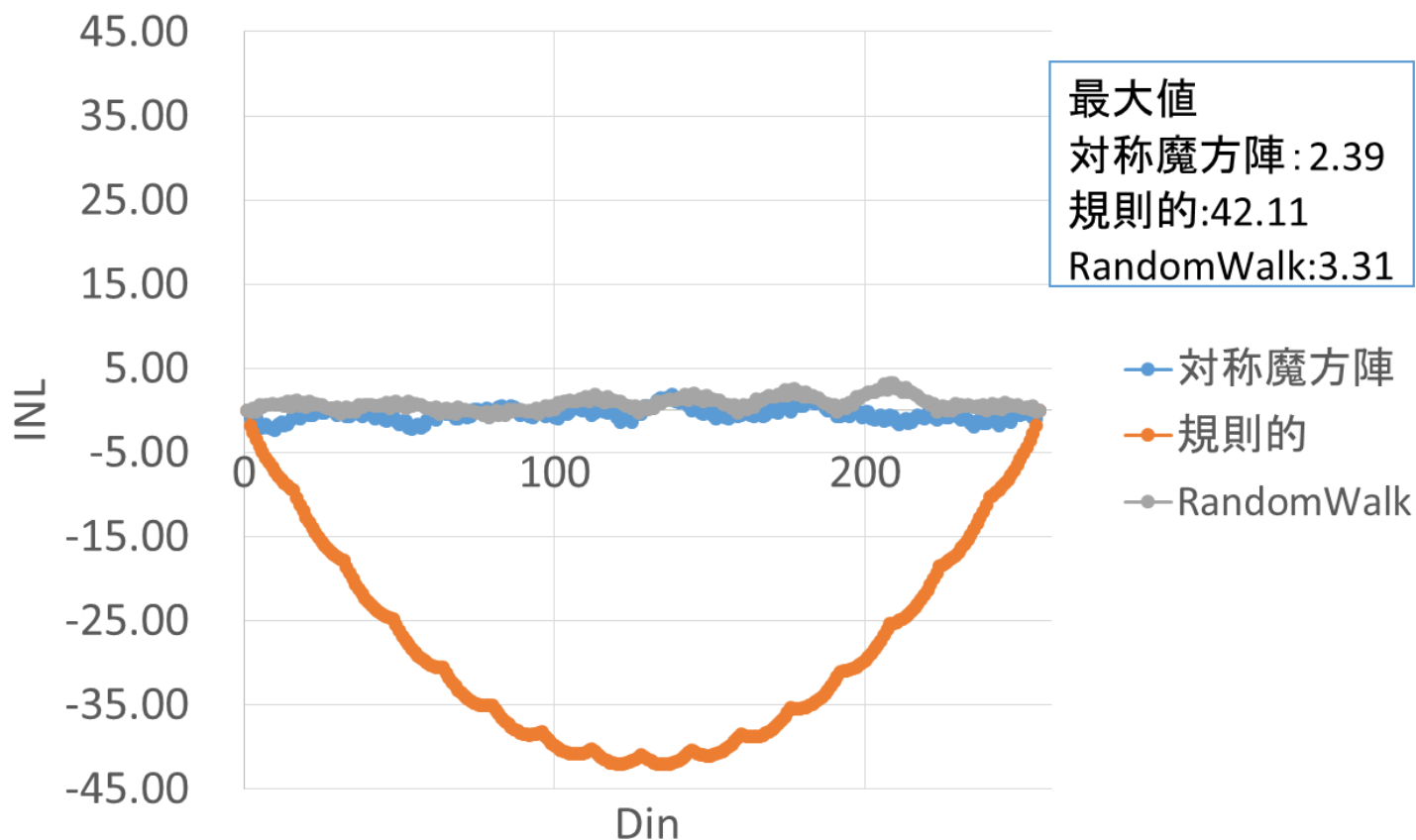
右回りにスイッチング

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

◆ 対称魔方陣

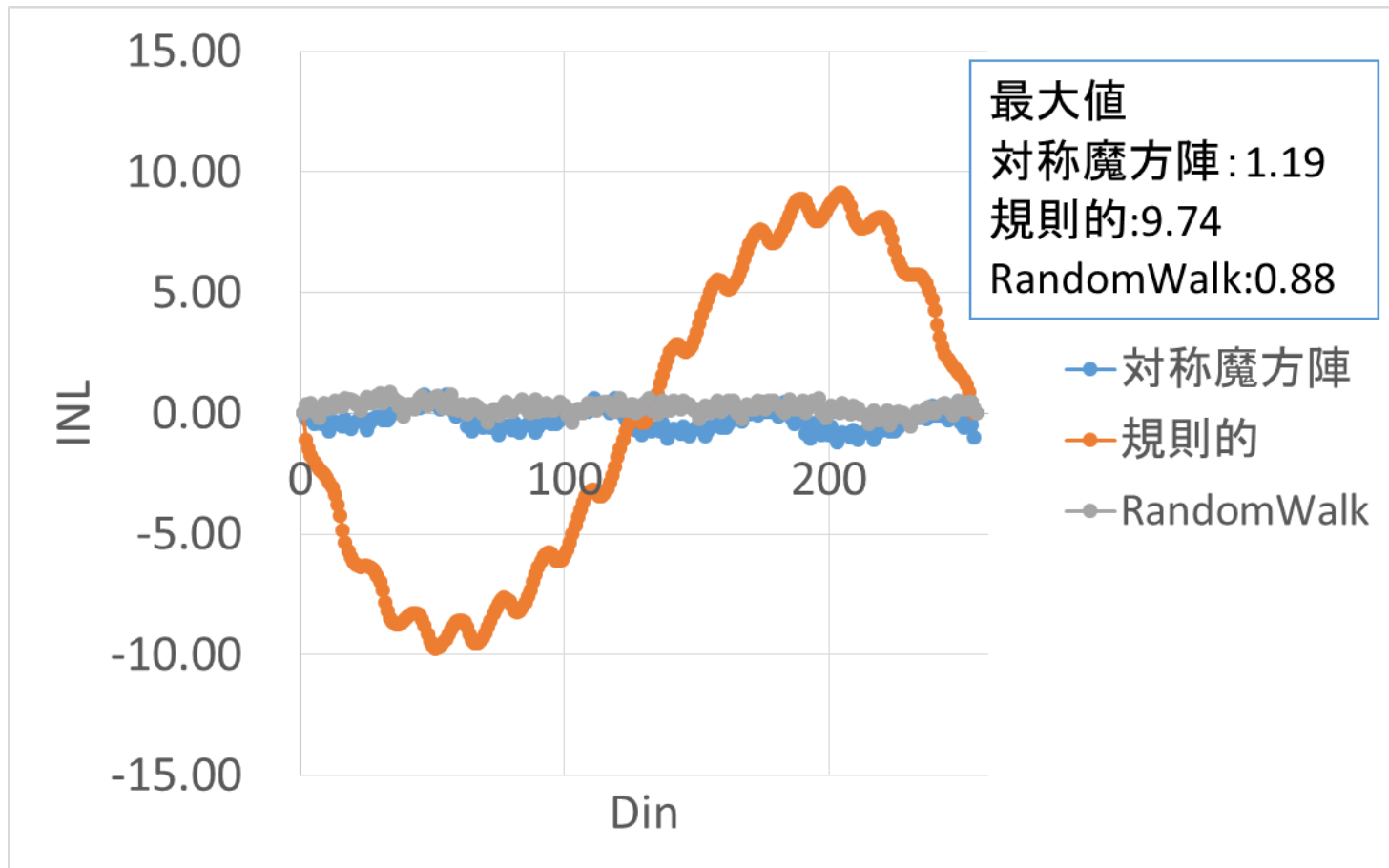
✓ Linear Error

$\theta = 30^\circ$



◆ 対称魔方陣

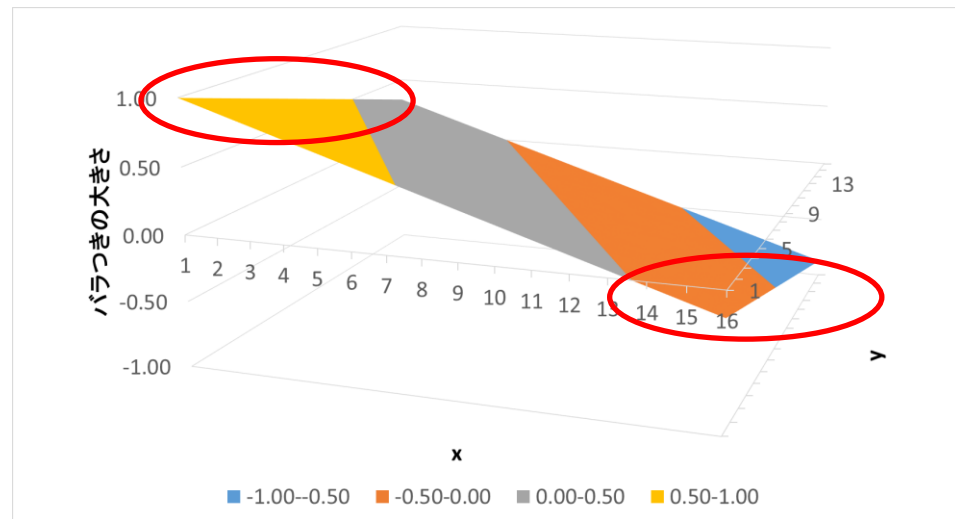
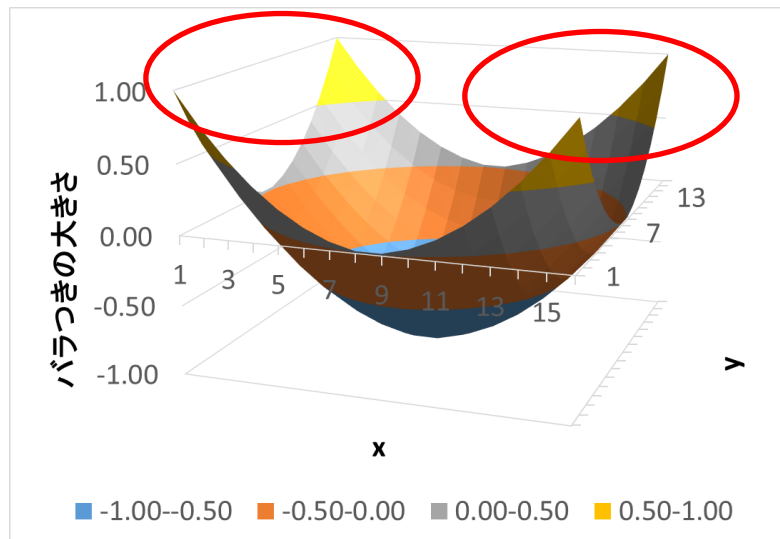
✓ Quadratic Error



Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- **各魔方陣のシミュレーション方法・結果**
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - **サイの目方陣**
- 考察
- まとめ・課題

◆ サイの目方陣



隅が最大値であるので、
隅を取り除けば線形性向上？

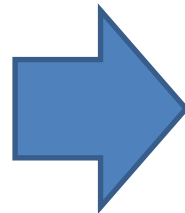
各魔方陣のシミュレーション方法・結果(25)

◆ サイの目方陣

✓ 5次サイの目方陣

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

行・列変換



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

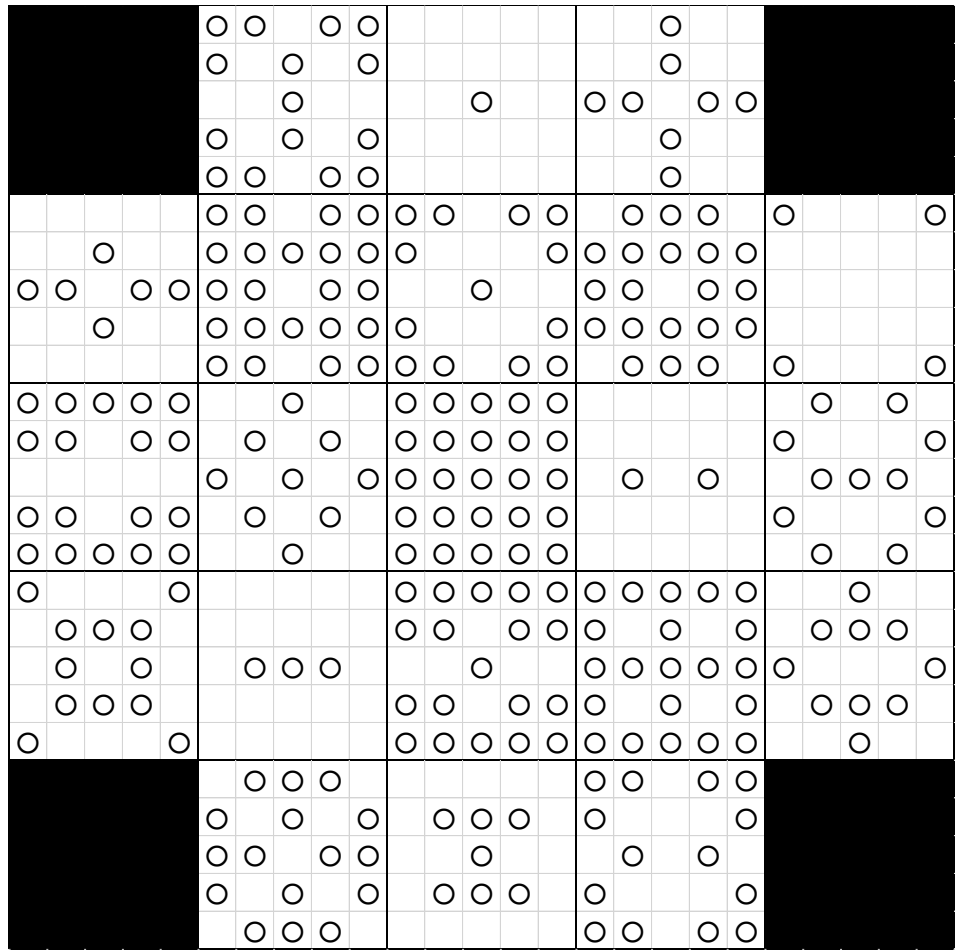
魔方陣の条件を緩和

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(26)

◆ サイの目方陣

✓ 5次サイの目方陣

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



各魔方陣のシミュレーション方法・結果(27)

◆ サイの目方陣

✓ アルゴリズム

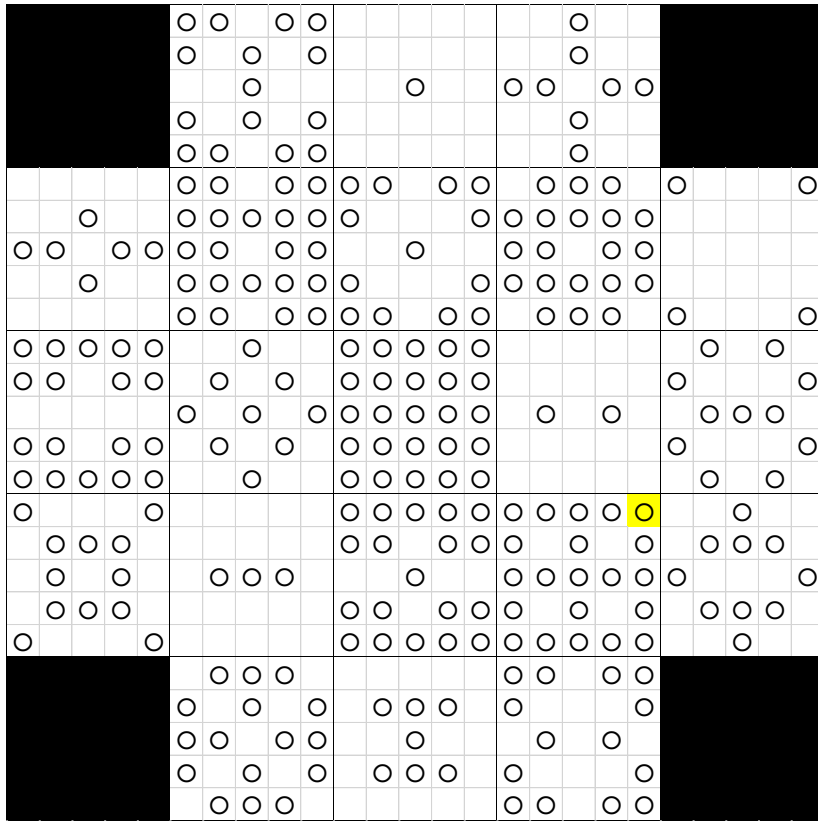
	B	T	E	
D	O	H	M	G
K	F	Q	J	N
I	R	S	A	U
	C	L	P	

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

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(28)^{57/69}

◆ サイの目方陣

✓ アルゴリズム

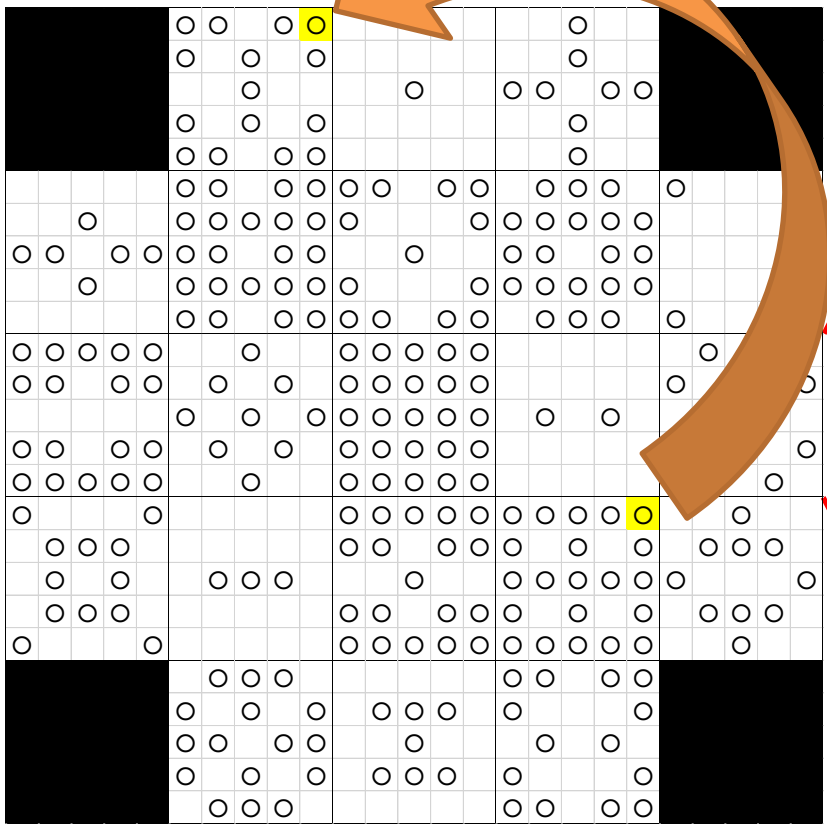


10	18	7	15	3
23	2	22	9	12
20	5	17	25	24
8	13	16	1	21
4	14	6	19	11

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(29)

◆ サイの目方陣

✓ アルゴリズム

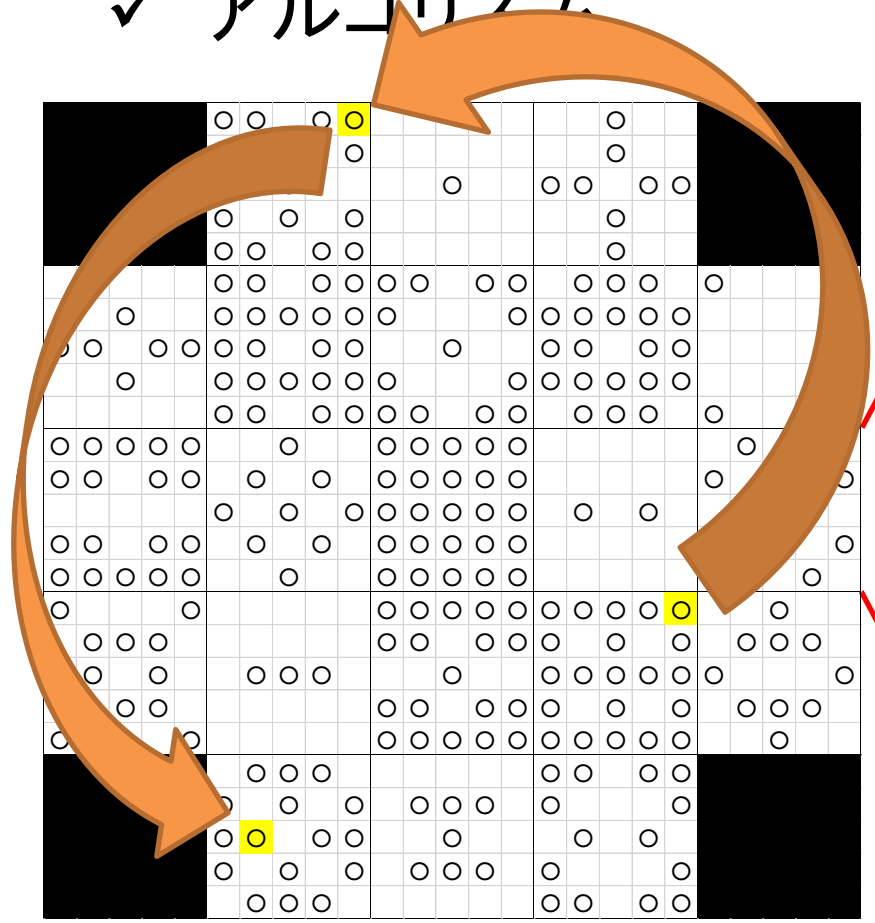


10	18	7	15	3
23	2	22	9	12
20	5	17	25	24
8	13	16	1	21
4	14	6	19	11

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(30)

◆ サイの目方陣

✓ アルゴリズム

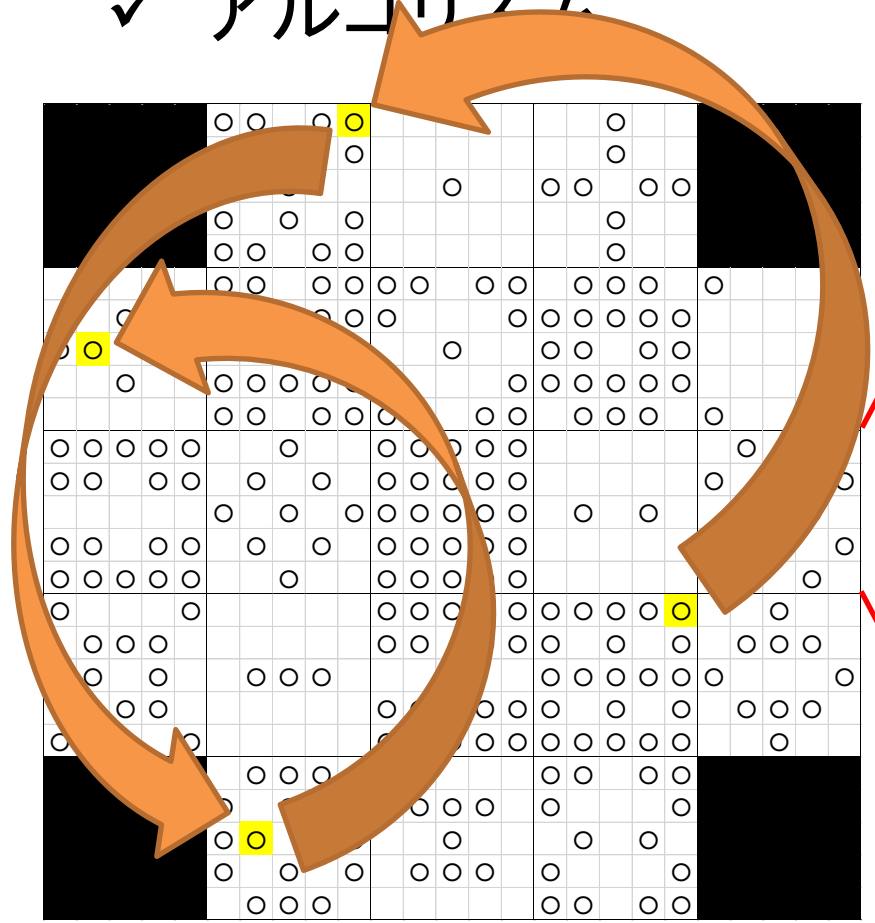


10	18	7	15	3
23	2	22	9	12
20	5	17	25	24
8	13	16	1	21
4	14	6	19	11

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(31)

◆ サイの目方陣

✓ アルゴリズム



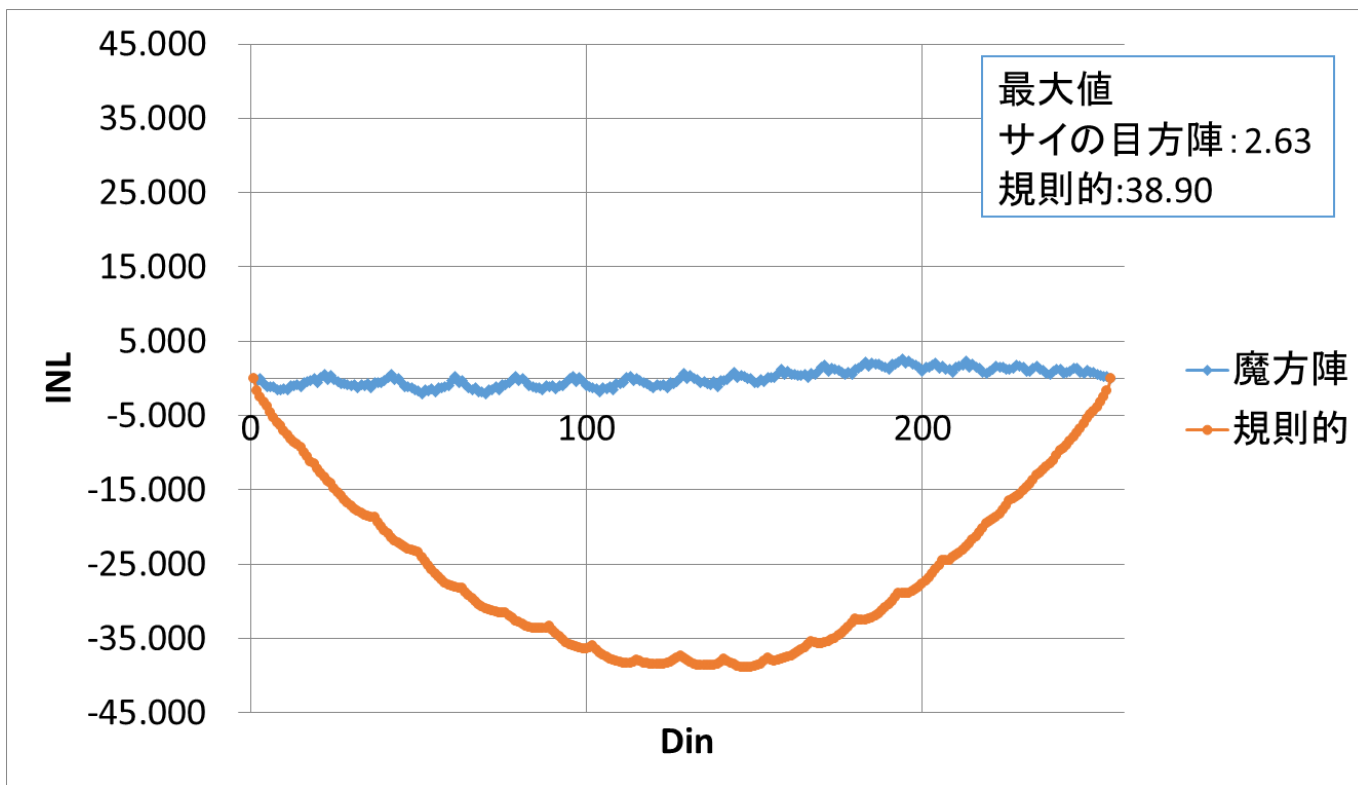
10	18	7	15	3
23	2	22	9	12
20	5	17	25	24
8	13	16	1	21
4	14	6	19	11

各魔方陣のシミュレーション方法・結果(32)^{61/69}

◆ サイの目方陣

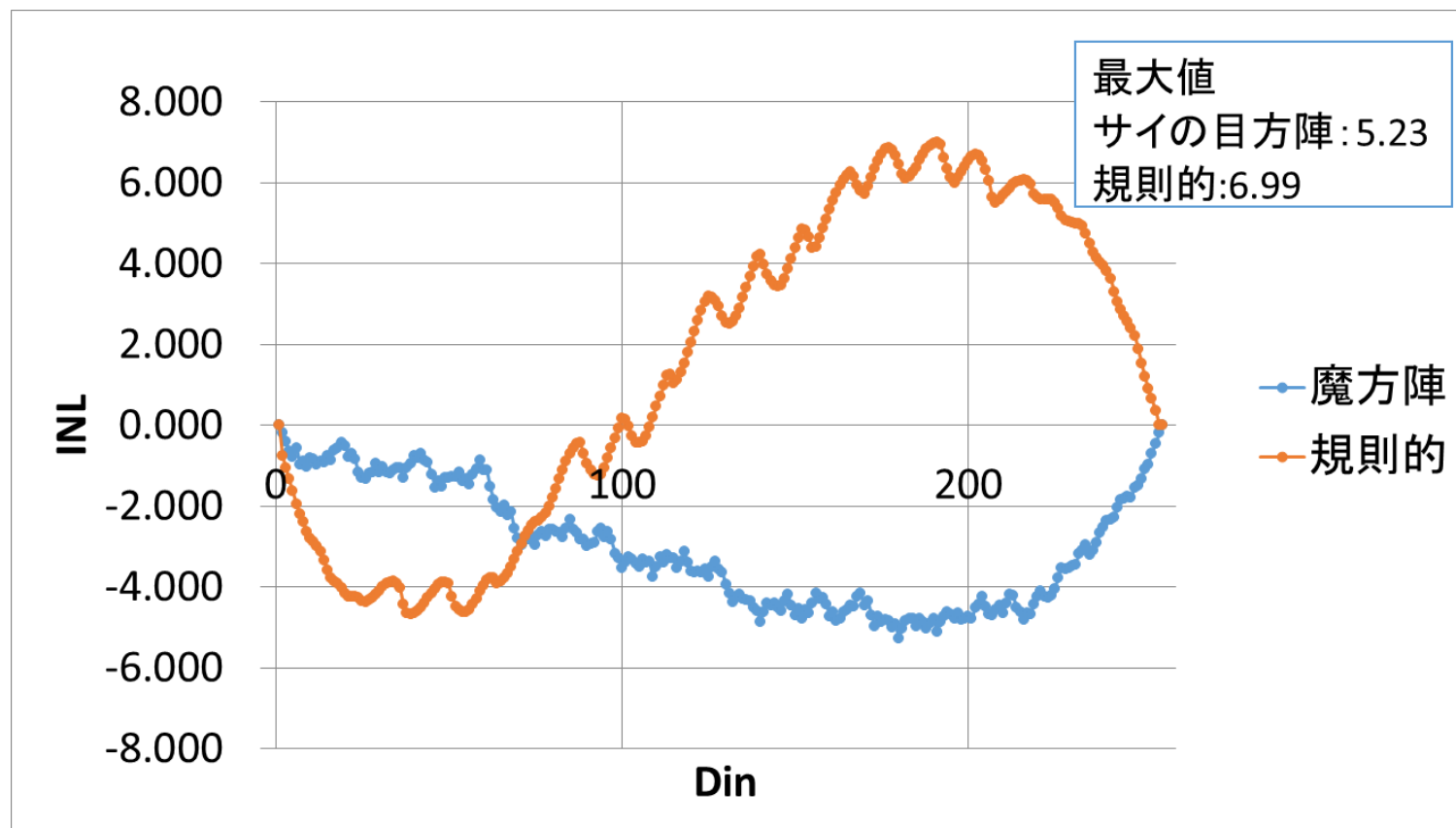
✓ Linear Error

$$\theta = 30^\circ$$



◆ サイの目方陣

✓ Quadratic Error



各魔方陣のシミュレーション方法・結果(34)

◆ まとめ

✓ Linear Error $\theta = 30^\circ$

□ 同心魔方陣

魔方陣 : 2.10
規則的 : 42.11
RandomWalk : 3.31

□ サイの目方陣

魔方陣 : 2.63
規則的 : 38.90
RandomWalk : —

□ 対称魔方陣

魔方陣 : 2.39
規則的 : 42.11
RandomWalk : 3.31

同心魔方陣



RamdomWalk



各魔方陣のシミュレーション方法・結果(35)

◆ まとめ

✓ Quadratic Error

□ 同心魔方陣

魔方陣 : 3.02
規則的 : 9.74
RandomWalk : 0.88

□ サイの目方陣

魔方陣 : 5.23
規則的 : 6.99
RandomWalk : —

□ 対称魔方陣

魔方陣 : 1.19
規則的 : 9.74
RandomWalk : 0.88

RandomWalk 

対称魔方陣 

Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- **考察**
- まとめ・課題

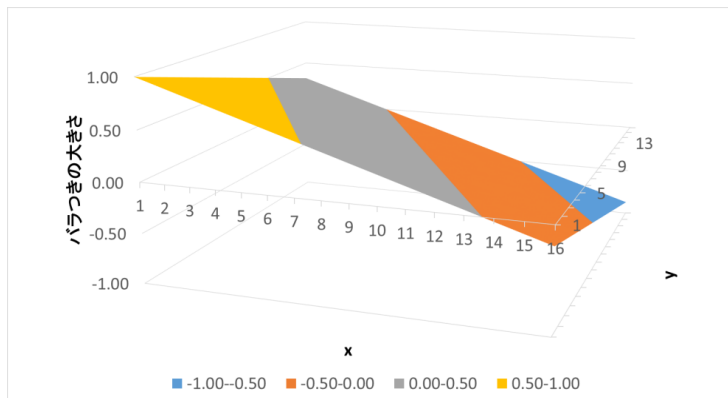
考察(1)

✓ Linear Error

隅と中央をランダムに
スイッチング



ミスマッチ軽減



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

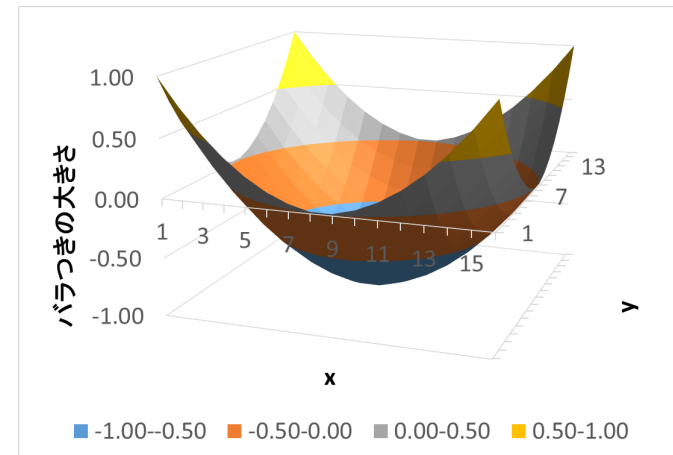
考察(2)

✓ Quadratic Error

ランダムにスイッチング



規則的に行うよりも、
ランダムに行った方が2次エラーには有効



		○		○	○	○		○	
				○	○	○	○		○
		○		○		○		○	
○	○	○	○		○				
	○			○		○	○	○	
○	○	○	○		○				
○		○				○	○	○	
○		○		○		○		○	
○		○				○	○	○	

サイの目方陣の空白の部分を利用することにより、2次をキャンセルできるのではないか？

Outline

- 研究背景・目的
- 魔方陣の性質
- 同心魔方陣について
- 対称魔方陣について
- サイの目方陣について
- 各魔方陣のシミュレーション方法・結果
 - 同心魔方陣
 - 対称魔方陣
 - サイの目方陣
- 考察
- **まとめ・課題**

まとめ・課題

- 各種魔方陣によるアルゴリズムを考案
- 魔方陣は一次のミスマッチに有効
- RandomWalkは二次のミスマッチに有効
- サイの目方陣を用いたアルゴリズムを再検討
- 論文調査を進め理論を固める

補足

魔方陣について(2)

◆ n次方陣の作り方

ex)5次方陣

- ✓ 10進法による1~25までの数を5進数(0~4)で表す

1→01

2→02

3→03

4→04

5→10

⋮

25→100

1を引く



1→00

2→01

3→02

4→03

5→04

⋮

25→44

魔方陣について(3)

◆ n次方陣の作り方

ex)5次方陣

00~44の数字を使って方陣を作製

- ✓ 第2桁, 第1桁を分離して補助方陣を作る
- ✓ 定和性に従う
- ✓ 数字が重ならないように注意

魔方陣について(4)

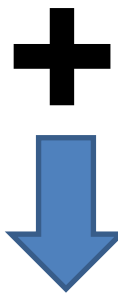
◆ n次方陣の作り方

ex)5次方陣

4	2	3	0	1
1	3	0	4	2
0	1	2	3	4
2	0	4	1	3
3	4	1	2	0

第2桁補助方陣

重ね合わせ



44	23	30	2	11
12	31	3	40	24
1	10	22	34	43
20	4	41	13	32
33	42	14	21	0

4	3	0	2	1
2	1	3	0	4
1	0	2	4	3
0	4	1	3	2
3	2	4	1	0

第1桁補助方陣

魔方陣について(5)

◆ n次方陣の作り方

ex)5次方陣

- ✓ 10進数に戻し、全要素に1を足す
- ✓ 5次方陣の完成

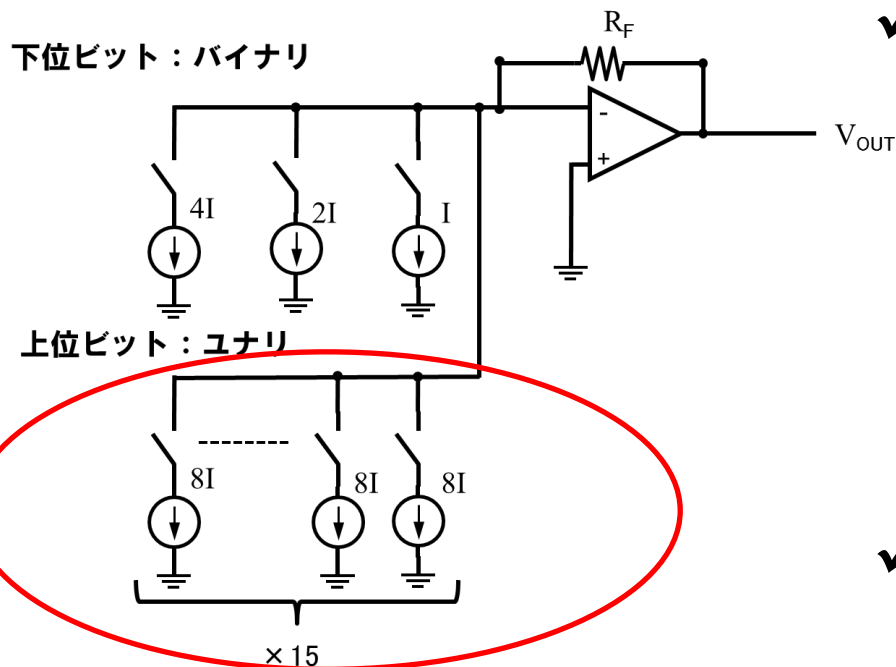
25	14	16	3	7
8	17	4	21	15
2	6	13	20	24
11	5	22	9	18
19	23	10	12	1

補助方陣の数の配置次第で
様々な方陣を作れる

定和65

研究背景・目的(8)

◆ 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

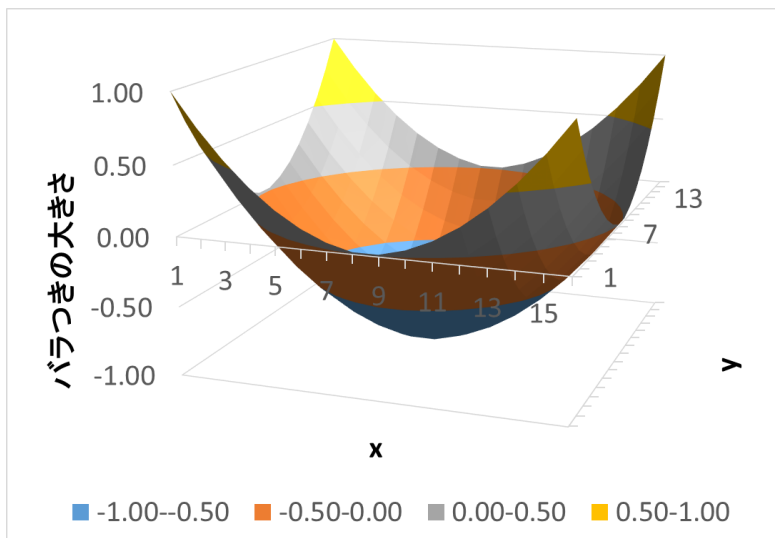
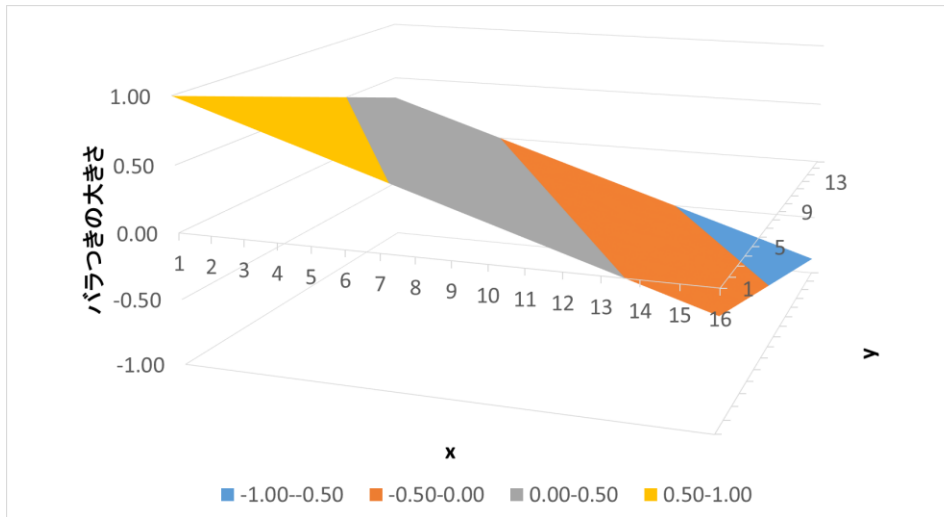
✓ ユナリ型

- 小型化不可
- ミスマッチの影響：少
- グリッチの発生：少

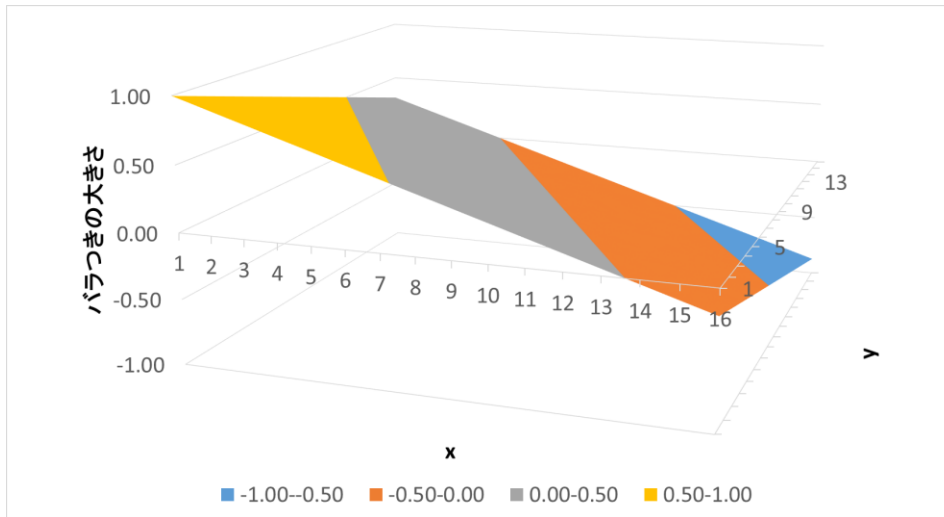
→ 電流セル(容量)配置のレイアウトでミスマッチ軽減

シミュレーション方法・結果(2)

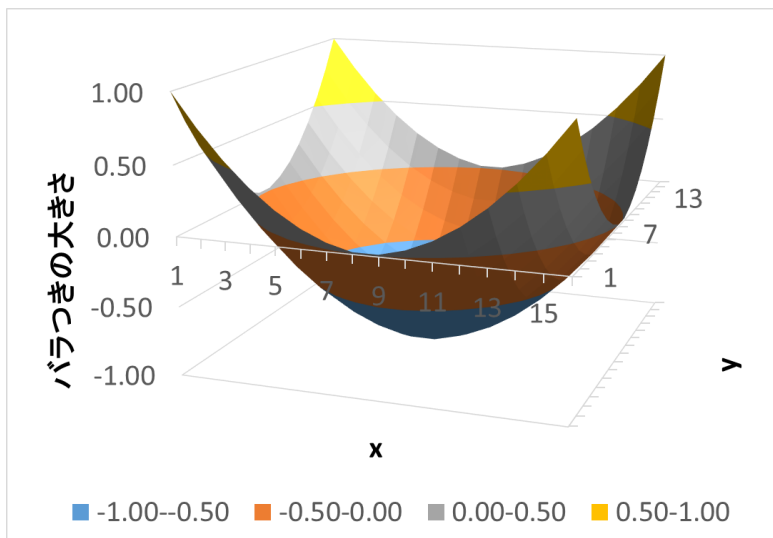
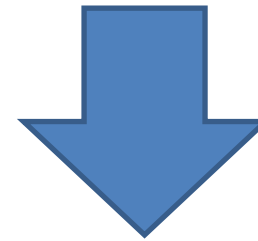
最大値と最小値を交互



シミュレーション方法・結果(3)



最大値と最小値を交互



外と中央を交互にスイッチング？