

基礎電子情報理工学 I

電子工学と情報数理工学の融合(2)

魔方陣によるDA変換器の 単位セル選択アルゴリズム設計

小林春夫

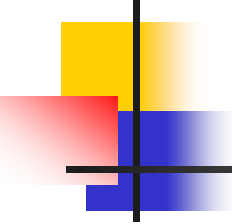
群馬大学大学院理工学府 電子情報部門

koba@gunma-u.ac.jp

下記から講義使用 pdfファイルをダウンロードしてください。

出席・講義感想、レポートもここから入力してください。

<https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/lecture/lecture.html>



レポート提出

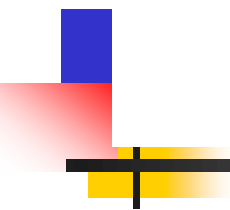
この講義の内容に関係したことを調べ
その内容について A4用紙2枚程度にまとめよ。
できるだけ手書きでなくコンピュータを用いよ。

レポートファイル名は 学籍番号(名前)魔方陣.pdf にしてください。
たとえば 学籍番号 T201D222 名前 群馬太郎 の場合
T201D222(群馬太郎)魔方陣.pdf

提出先(電子提出)、締め切りは下記参照

<https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/lecture/lecture.html>

2009年6月15日
2010年8月12日 rev
2011年4月26日 rev
2011年5月2日 rev
2017年8月14日 rev
2020年3月18日 rev
2020年8月4日 rev

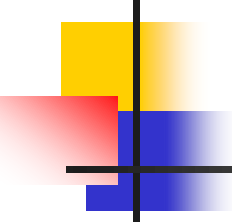


「工学」とは何かを考えよう

群馬大学大学院 理工学府

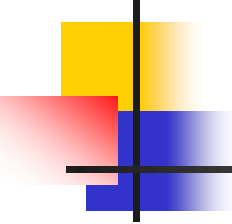
電子情報部門

小林春夫



「科学」と「技術」は似て非なるもの

- 「科学（理学、Science）」と「技術（工学、Technology）」は似ているが異なる。
- 「理学」が真理を追究するのを目的
- 「工学」は役に立つこと（「ものづくり」だけでなく「環境問題」等も含めて）を目的とした実学。
- 「工学」は社会性をもった学問。



科学のアプローチ

「美しいものは真理。真理は美しい。」

（数学者 藤原正彦先生）

「宇宙は神が数学の言葉で書いた聖書だ。

神が書いたのだから美しくないはずがない。」

（Isaac Newton）

「自然は美しい」という考え方

「原天地美達萬部物理」 莊子

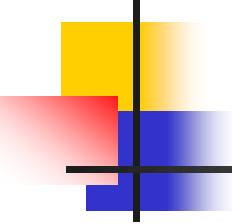
天地の美に基づきて、万物の理に達す

物理学者 湯川秀樹が好んだ言葉



「自然の書物は数学で書かれている」

ガリレオ・ガリレイ



宇宙 = 時空間

ニュートン：プリンキピア

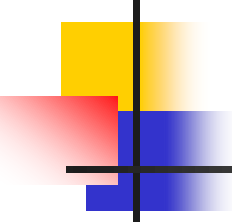
時間と空間は独立した別のもの

アインシュタイン：相対性理論

時間と空間は一体

「往古来今、之を宙と謂い、
四方上下、之を宇と謂う」（淮南子）

宇：時間 宙：空間 の意味



工学のアプローチ

机上の空論ではなく、実際に“**現場**”で
“**現物**”を観察し、“**現実**”を認識した上で
問題解決を図る。(三現主義)

「現場、そこに発想の原点がある。
facts こそが よりどころである。」

(東大名誉教授 北森俊行先生)

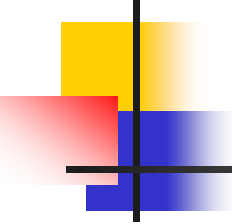
工学は

トレードオフの考え方が重要

Trade-Off ↔ 妥協

「時間が足りない、マンパワーが足りない、
予算が足りない、情報が足りない、.....」

全てが満ち足りているわけではない環境下で
(100%でなくても)かなりのことをやってしまう、
かなりのものを開発してしまうのが
エンジニアリング、工学的センス



技術者は総合力で勝負

- 技術力、基礎学力
- 問題発見能力、問題解決能力
- 語学力
- 雑学
- コミュニケーション能力
プレゼンテーション能力
- 人脈
- 体力



市場に対して敏感であれ

半導体メーカーのマネージャー

「良いものが売れるのではない。

売れるものが良いものである」

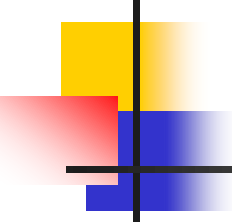
「製品ではなく商品を開発せよ」

半導体試験装置メーカーのマーケティング

「我々のお客さん(半導体メーカー)の

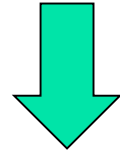
お客さん(セットメーカー、最終製品メーカー)

を見て次世代半導体試験装置を開発せよ」



社会の変化、時代の流れを見よ

「会社は変化するので、それに応じて
技術者も変わらなければならない。」



社会、時代が変わるので会社も変わる



どのように(How)作るかだけでなく
何(What)を作るかが重要

半導体メーカー マネージャー

「企画に経験ある優秀な人をもってくる」

中堅メーカー 経営者

「プロの製品企画者は

お客さんへのアンケート結果だけに基づいて
次の製品を企画するわけではない。

お客さんのまだ気が付いていない

新しいコンセプトのものを企画することが重要」

何を開発すべきか

「新製品は不況下でも売れる。

継続して新製品を開発してほしい。」

（メーカー営業関係者）

「お客さんの言うとおりのものを作るのは
Custom Made である。

Customer Oriented とは お客さんが口には
表現できないがその意を汲み取り
満足するものを作ることである。」

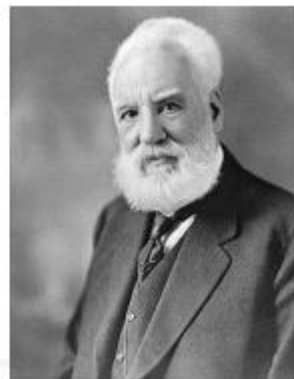
（ソニー 盛田昭夫氏）



盛田昭夫氏

アレクサンダー・グラハム・ベル

Alexander Graham Bell 1847-1922

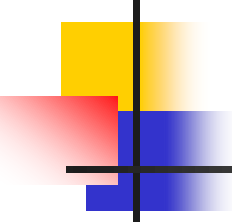


- スコットランド(エジンバラ) 生まれ
- 科学者、発明家、工学者
- 実用的電話の発明
- 光無線通信、水中翼船、航空工学等の分野で業績
- 1877年 ベル電話会社を設立

Steve Jobs, Apple社

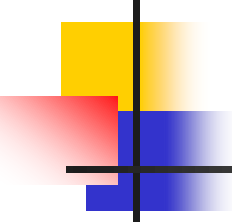


「ベルが電話を発明したとき、市場調査などしたか。」



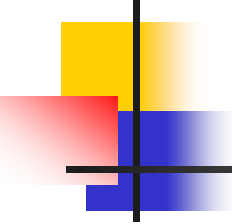
ブランドの重要性

「技術指向の計測器であっても
技術の良いものより
ブランドのあるもののほうが売れる。
会社のブランド力を上げる必要がある。」
(計測器メーカー経営者)



「スピード」と「コスト」も重要

- 「先んずれば人を制す」
（史記、漢楚の戦い）
- 台湾のエレクトロニクス分野の大学教授
「技術が面白いだけでなく
安く(cheaply) 作れることが重要」



「低コスト」「低価格」が世界を変えた

- かつては コンピュータは世界で数台
あるだけであった。
- エレクトロニクス・半導体の
技術進歩、**低コスト化**により、
現在は Ubiquitous Computer の時代
- **Ubiquitous**
ラテン語の宗教用語。
神はあまねく存在する の意味。

「工学部」「製造業」は 地方が向いている 側面あり

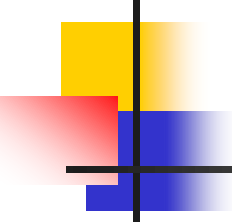
大都市、都会 → 第3次業（サービス業）

地方 → 第2次産業（製造業）
第1次産業（農林水産業）

都会では

工学部は貴族化（第3次産業化）する。

群馬は板東武者のふるさと



「技術」を最重要視する

マサチューセッツ工科大学(MIT)

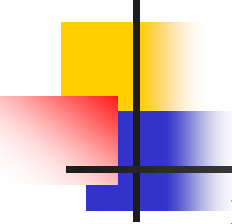
➡ 理工系で世界でトップ

(米 ボストンにはMITとHarvard大学)

「研究資金は比較的容易に集まる。

最も重要なのは新しい技術、アイデア。

教授達はノーベル賞級研究成果を上げるため
これらを求めて世界中を飛びまわっている。」



新しいアイデアを育てる

メーカーの特許関係者

「千三つの法則あり。

千個アイデアをだしてモノになるのは三つ。
どんどん新しいアイデアをだそう。」

ある大学教授

「大学で学生が新しいアイデアをだしたら、
従来法に比べての利点を厳しく問うな
欠点を厳しく指摘するな
新規性を厳しく問うな
スケジュールを厳しく管理するな」

(ただし 企業では「厳しく。。。」されること多し)¹⁹



発明、特許

特許制度

「発明を公開する代償として独占権を付与する制度」
中世 ベニス(イタリア)で生まれ イギリスで発展

- 発明者:

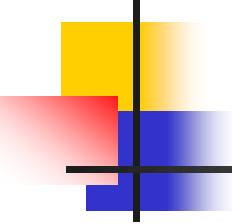
発明を公開する代わりに「報償」(独占権)を受ける

- 産業界: 公開された発明・技術をもとに産業が発展

→ 両方が利益を得る

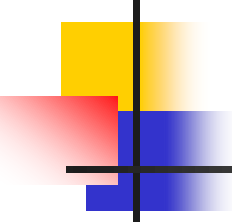
Doing things differently is easy.

But doing things better is hard ! (Thomas Edison)



テクノロジー開発はどうあるべきか

- マイクロプロセッサのインテル社:
No Science is in Intel.
- かつてのベル研究所:
基礎科学研究により多大な社会貢献
- 戦略的基礎研究
- 「工学」は「科学の応用」というのは
一側面にすぎない



工学は新しい社会を創造できる

「もの作り」だけではない。

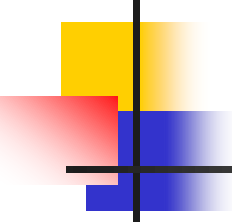
「新しい社会作り」ができる。

イノベーション:

新しい技術もとに、
社会的意義のある新たな価値を創造し、
社会的に大きな変化をもたらす変革。

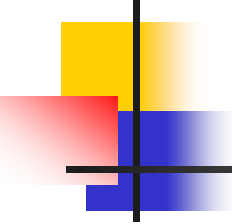
蒸気機関の発明: 馬車から鉄道へ

→ 社会を大きく変える



工学は創造である

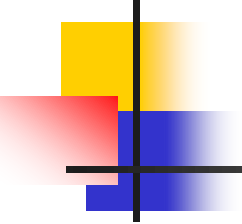
「私たちは自分たちの食べ物の
ほとんどを作ってはいません。
私たちは他人の作った服を着て、
他人のつくった言葉をしゃべり、
他人が創造した数学を使っています。
私たちは常に何かを受け取っています。
その人間の経験と知識の泉に
何かをお返しができるものを作るのは、
すばらしい気分です。」 (Steve Jobs, Apple社)



イノベーションを考える

「イノベーションは、研究開発費の額とは関係がない。大事な金は金ではない。
抱えている人材、いかに導いていくか、
どれだけ目標を理解しているかが重要だ。」
「イノベーションは誰がリーダーで、
誰が追従者かをはっきりとさせる。」

(Steve Jobs, Apple社)

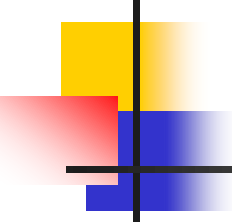


工学における考え方の研究

東大名誉教授 北森俊行先生

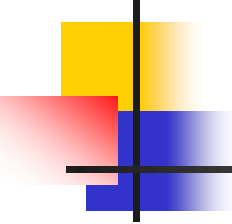
思考力・創造力の向上のために

- 数学の定理を教え、証明してみせるよりも、
定理を発見する気持ちを教える。
- 物理法則を教えるよりも、
物理法則を見つけ出そうという気持ちを教える。
- 出来上がった理論を教えるよりも、
理論を創る気持ちを教える。



工学は産業と密接にかかわる

- 産業界との共同研究による
技術導入、教育支援、資金援助
- 特許を取得しライセンス
- 自ら起業する



もう一步踏み込む

学生「講義内容が実際にどのように
役立つかを理解したい。」

教員「理科に関心を持たせる。
ものづくりの面白さを教える。」



その研究・技術で どんな産業が起こせるか、
産業界で活用してもらえるか、特許が取れるか。

「産業の匂い」を知る

UCLAからの起業

Prof. Henry Samueli

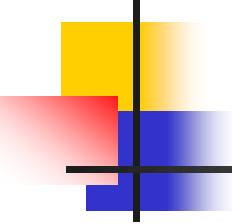
1987-89 UCLA留学当時のDSP分野

- MIT Prof. A. Oppenheim
DSPの神様
- Georgia Institute of Tech.
多数のDSP 研究者
- UCLA Prof. Samueli グループ
DSPアルゴリズムだけでなく それを
フルカスタムLSIで実現できる技術をもつ



Broadcom社が創設される

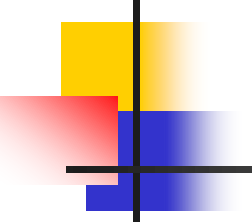




起業における大学教員の強み その「立場」にある

研究室の研究成果の有効性のみが
強調されているが、別の観点からは。。。

- 給与・地位が保障
- 大学教員として、人脈、情報網の活用
- 図書館等 大学のインフラを活用
- 学生との協力 等の
大学教員としての立場にある



産学連携のありかた

- 渋沢栄一氏の言葉から学ぶ -

「要するに 交際の要素は**至誠**である」

「相当なる**信用、智識、実験(経験)**等があれば
人の資力を運用して、事業はいくらでもできる」

「事業に対する時は **利に諭らず義に諭る**ことに
しておる。多数の人より資本を寄せ集むるには
事業より利益のあがるようにせねばならぬ。
利益を度外におくことを許さぬはもちろんである」

19世紀中ごろ

米カルフォルニアでのゴールドラッシュ California Gold Rush

- 発端は、1848年1月24日
アメリカン川での砂金の発見。
- これと前後して
カリフォルニアを始めとした
西部領土がメキシコから
アメリカに割譲。
- 文字通り新天地となったカリフォルニアには
金鉱脈目当ての山師や開拓者が殺到。

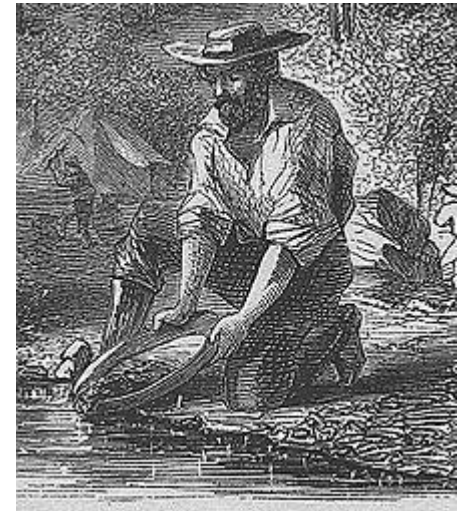


サンフランシスコ港を
埋める商船群
(1850年頃)

ゴールドラッシュでの

金採鉱技術の発展

- 当初、採掘者達が選鉱なべのような単純な技術で小川や川床の砂金を探した。
- 後に金採鉱のためのより洗練された技術が開発された。

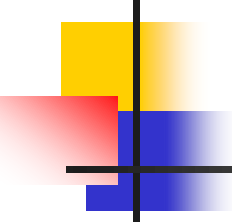


選鉱なべを使用しての
砂金とり

エレクトロニクスメーカーと 電子計測器メーカーの役割

- 小室貴紀先生 -

- エレクトロニクスメーカー
エレクトロニクス製品を開発し市場に提供
金の採掘を担当
- 電子計測器メーカー
エレクトロニクス製品を開発するためのツールを
開発し、エレクトロニクスメーカーに提供
金を採掘するための道具・技術を担当
(選鉱なべ、スコップ、金探鉱の技術)



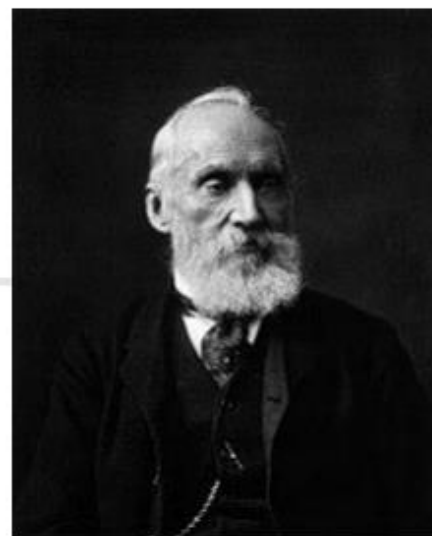
電子計測技術の面白さ

電子計測器は
「今日の技術で
明日の(高性能な)デバイスを計測する」
というジレンマが常に存在し
それを克服するための革新的技術が必要

電子計測技術のジレンマ

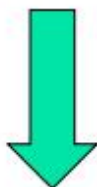
計測と科学

William Thomson と
Kelvin 卿は同一人物



1824-1907 英

There is no science without measurement.



There is no production without test.



先端技術と計測・アナログ技術

IoT: Internet of Things

たくさんのセンサ ➡ センサインターフェイスアナログ回路

AI: Artificial Intelligence

「ソフトウェア」の試験技術

5G: Fifth Generation

高速通信 ➡ Analog-Assisted Digital Technology
アナログ技術によりデジタルを高性能化

余談

米国で人気のスポーツ

「アメフト」「バスケットボール」「ベースボール」

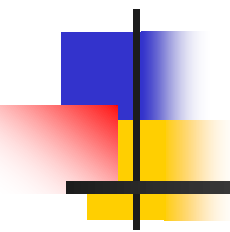
ゴールドラッシュで 特に1849年に採掘者達が急増したことから 彼らは"forty-niner" (49er) と呼ばれた。

サンフランシスコ地区の
プロ・アメリカンフットボール
チーム名

San Francisco Forty-niners



2012年1月18日



大学での教育を考える

「東洋の道徳、西洋の芸」
(佐久間象山)

群馬大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻
小林春夫

大学で身につけること

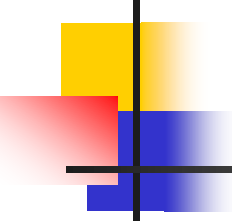
- 自分で習得する -

知識: 深い専門知識、広い一般教養

良識: 倫理、人格、品格、修養

見識: 先見性、創造力、ビジョン、
リーダーシップ、
夢、志、よい技術を見抜く力

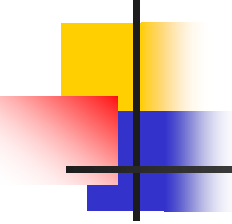
大学教員は学生に対し、
advisorの立場 (supervisor ではない)



良識、見識を磨くには 一つには...

渋沢栄一、松下幸之助、本田宗一郎
盛田昭夫、Peter F. Drucker, Steve Jobs
孫子、論語、歴史書 等
自分にあっているものを読む。

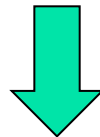
ピンとくるものは、
自分の年齢とともに変わってくる。



松下幸之助氏から学ぶ

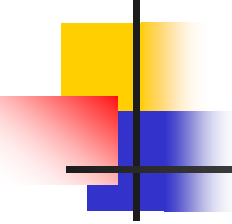
「コストが安いからという理由で
海外に進出したことはない。
その国の人のためになると思い
海外に出た。」

海外からの人を受け入れるのも同様であろう。



「義を先にして利を後にする者は栄える。」

(荀子)



本田宗一郎氏から学ぶ

製造業の原点

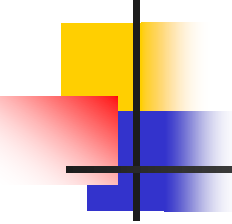
「人の役に立ちたい。

使って便利で楽しいものを提供したい。」

物造りの原点

「人の心を知ることは、

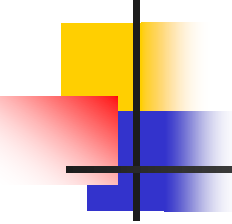
ものを造る根源である。」



渋沢栄一氏から学ぶ

「商業と道德とは、油と水のごとく
相和せぬように思うのはあやまりである。
いかに智識が発達し富が増進しても、
道德を欠いては、決して世の中に立って
大いに力を伸ばすことはできない。」

士魂商才



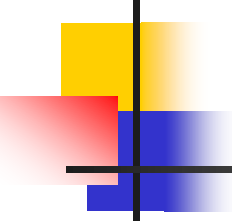
大学教育に2つの要素が必要

「東洋の道徳、西洋の芸」

（佐久間象山、江戸時代後期の思想家）

「西洋の芸」は議論されてきている。

今、必要求められているのは「東洋の道徳」。



西洋の芸

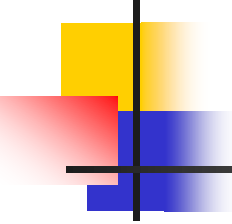
役に立つ**知識**を得る。

科学、工学、医学、経営学、語学、。。。

近年では

産学連携、インターンシップ、国際交流、
実践的教育、語学研修、技術経営。。。

職を得る、自立するために有用



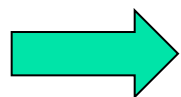
東洋の道徳

良識、見識

人間修養、帝王学。。

幕末、明治維新期の日本人、
英語ができなくても先端技術がなくても
海外の人たちの尊敬を集めた。

江戸時代までの教育



人間修養中心

「少にして学べば壮にして為すあり。
壮にして学べば老いて衰えず。
老いて学べば死して朽ちず。」

江戸後期の儒学者・佐藤一斎(1772～1859)
「言志晩録」第60条

現在の大学教育にこの要素取り入れる必要あり

松下村塾

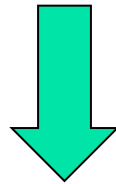
2011年11月 応用科学学会理事会・研修会で見学

先生 吉田松陰 20代

短期間(2年間程度)

地方 (山口県萩市)

部屋2つのみの小さな家



明治維新を成し遂げた人材を多数輩出



学問の心得、自警

足代弘訓(江戸時代後期の国学者)

人をあざむくために学問をしない。

人とあらそうために学問をしない。

人をそしるために学問をしない。

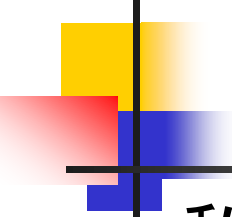
人の邪魔をするために学問しない。

自分を自慢をするために学問をしない。

名を売るために学問をしない。

利をむさぼるために学問をしない。

宇都宮高校の生徒の時代にはじめて聴く。自分を戒める。



社会人教育の現場から

私の新人教育の目的の一つに

「落ちこぼれを皆無とする」があります。この真意は
「落ちこぼれ→メンタル面の挫折」の防止です。

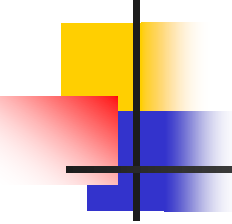
教育、実際はこの防止にかなりの力点をおいています。

三洋において“アナログ大学院”で

(メンタル面＋アナログ基礎)を1年教育した者からは、
メンタル面の挫折者は一人も出ていません。

“アナログ大学院”は非常に効果があります。

このあたりが理解できる私の後継者が必要です。



リーダーシップ、帝王学 史記に学ぶ

「将に将たり」 （漢の高祖 劉邦）

3人を使い切る。

韓信：「軍事」に優れる

張良：「謀」に優れる

蕭何：「政治」に優れる

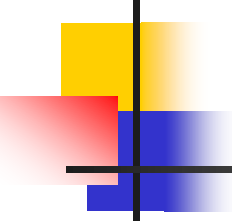
優れた人材を登用し能力を発揮させる



出処進退 史記に学ぶ

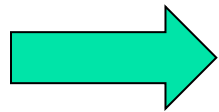
「臥薪嘗胆」その後。越が呉を征服。
功績があった**范蠡(はんれい)**は
「狡兔死して走狗烹られ、高鳥尽きて良弓 蔵る」
と、越を自ら去る。
その後、斉にて商売で大成功、千金を残し去る。
定陶にても商売に大成功。
老いてからは子に店を譲り、悠々自適の暮らし。

人の真価は出処進退で決まる



時代の切り替わりでは 必ずオープン化が行われる

オープン化



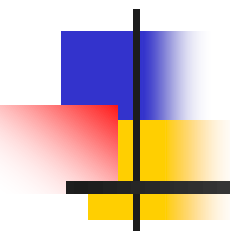
これまでの価値観を否定。
新時代を切り開く。

織田信長 楽市楽座

曹操 広く人材登用

吉田松陰 松下村塾 (当時の)身分に
かかわらずだれでも受け入れる

2017年10月22日



プレゼンテーション

群馬大学 理工学府 電子情報部門
小林春夫

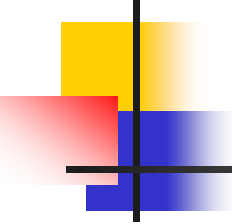
最も重要なことを最初に

ドラマ「刑事コロンボ」
最初に犯人の犯行を見せる。

ただし、今の学生のほとんどは
「刑事コロンボ」を知らない。

「古畑任三郎」のドラマも同じ。
これは知ってるかい？



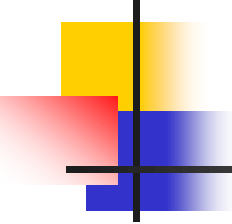


ドラッカーに学ぶ

「企業活動はマーケティングと
イノベーションである」(ドラッカー)

プレゼンテーションには 最初に
目的、目標(マーケティング)

工学の場合は、何に使うのか(応用)も
自分がなしたイノベーションは何かを
明確に示す。

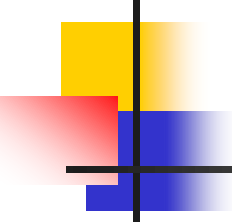


Before と After を明確に

このプレゼンする研究内容は

- 従来法と何が違うのか
- 従来法に比べてどの程度良くなったか

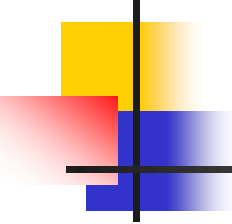
を明確に記述



提案技術の 問題点・適用限界を明記

「LSIテスト関係の国際会議への投稿論文には
提案技術の限界を明記することが必須である
(でないとは採択されずらい)」

群馬大学客員教授 アドバンテスト社
浅見幸司先生



限界を知ることが理解すること

問：ニュートン力学を最初に完全に理解したのは？

答：アインシュタイン

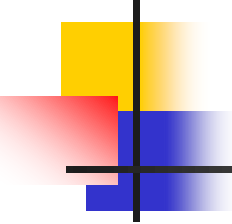
相対性理論を構築。

ニュートン力学前提の

「絶対時間」「絶対空間」概念の

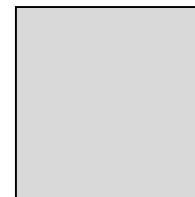
問題点・限界を明確にする。

(物理学者 ロジャー・ペンローズ)

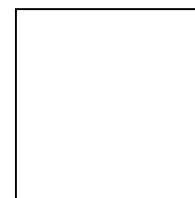


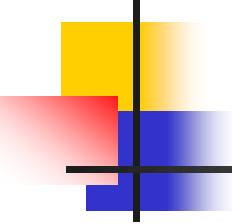
はっきり言う

曖昧な言い方
もったいぶった言い方
はダメ。



はっきり言い切る。
聴衆はその方が聞きやすい。





「長い文」より「短い句」

- プレゼン資料: キーワードを箇条書き

- 「電報」が日常の通信手段の時代

息子に帰省を促す

できるだけ早く帰省してください

ではなく

すぐ帰れ

「文字数 多 → 電報代 高」のため

「簡潔」は カッコいい！



1900年 英国 アーネスト・シャクルトン卿
南極探検隊員の募集の広告

「求む男子。至難の旅、わずかな報酬。
極寒。暗黒の長い日々。絶えざる危険。
生還の保証なし。
成功の暁には名誉と賞賛を得る。」
5000人が応募。

脱線

短い句で深い表現



「昨年のもままで結構 女房殿」

将棋プロ棋士 升田幸三名人

元旦に詠む



魔方陣をつかった電子回路

セグメント型デジタル・アナログ変換器 (Digital-to-Analog Converter: DAC) 魔方陣レイアウト技術による線形性向上

小林春夫

koba@gunma-u.ac.jp

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~kobaweb/>



アナログ信号

連続的な信号

例：自然界の信号（音声、電波）、アナログ時計
「坂道」

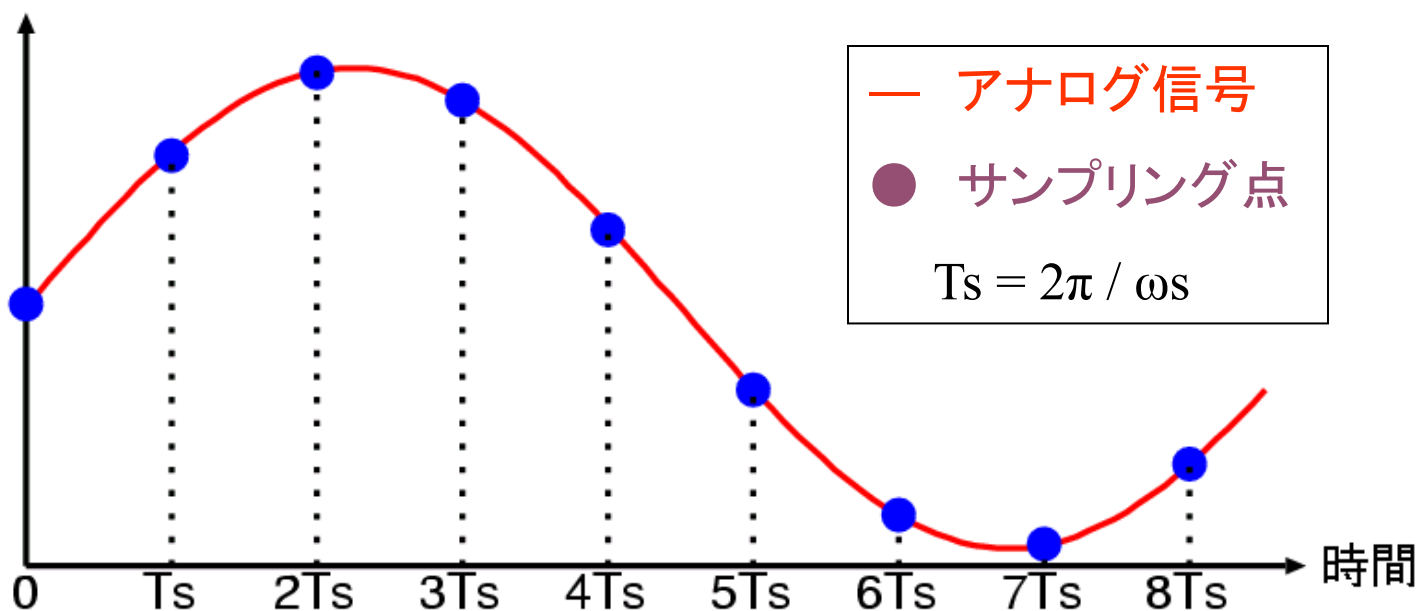
デジタル信号

離散的・数値で表現された信号

例：コンピュータ内での2進数で表現された信号
デジタル時計
「階段」

デジタル信号の特徴(1)

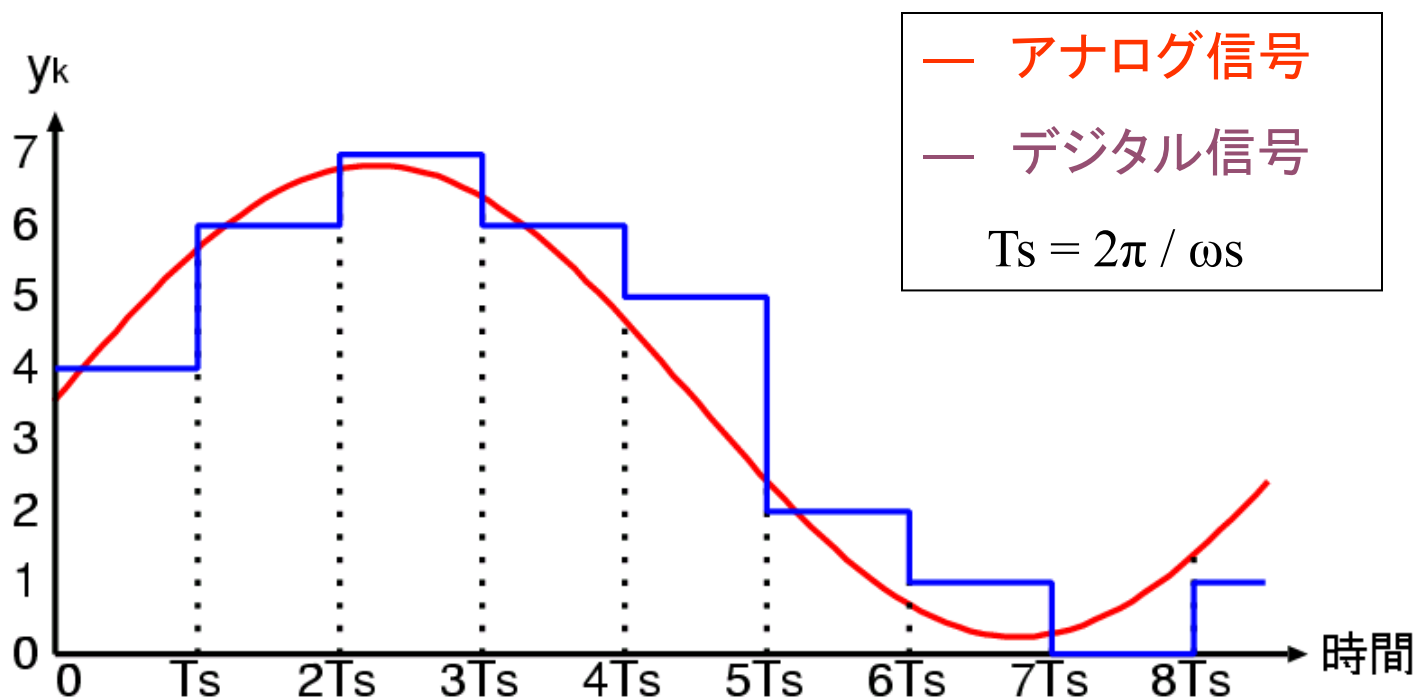
時間の量子化 (サンプリング)



一定時間間隔のデータを取り、間のデータは捨ててしまう。

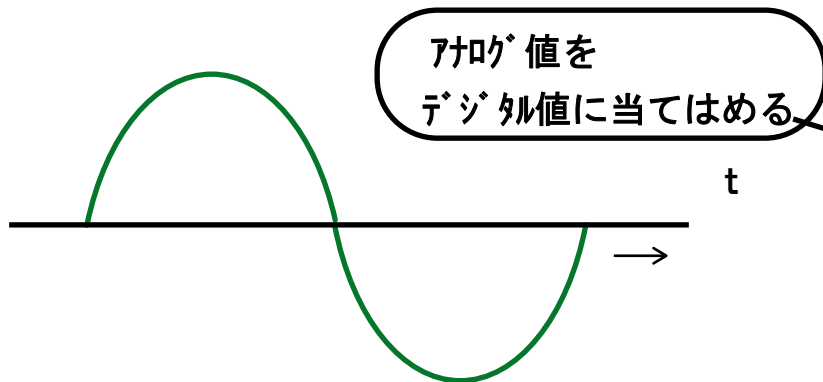
デジタル信号の特徴(2)

空間の量子化 (信号レベルの数値化)

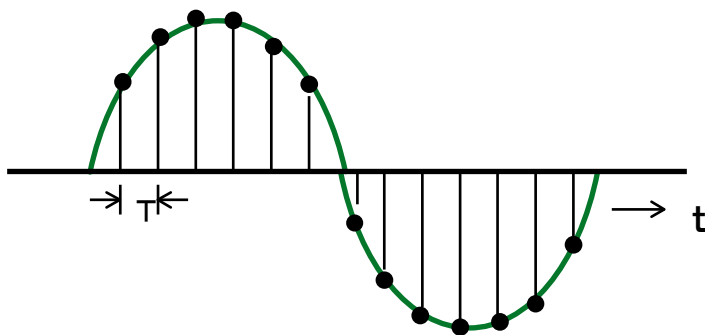


デジタル信号はアナログ信号レベルを
四捨五入(または切り捨て)

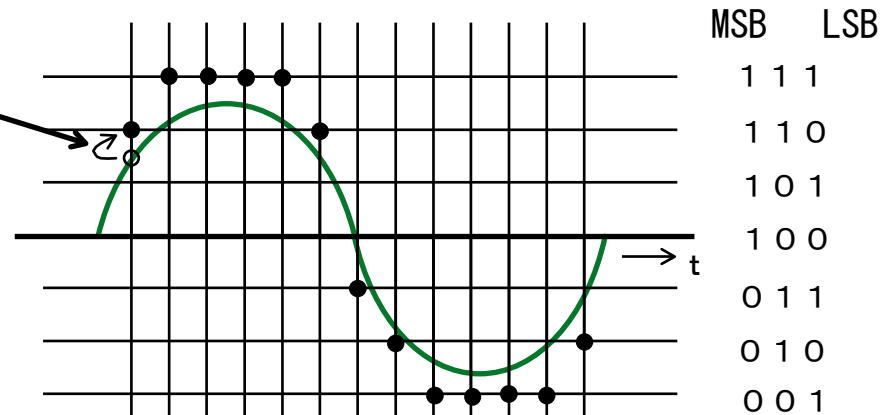
アナログ -> デジタル 変換波形



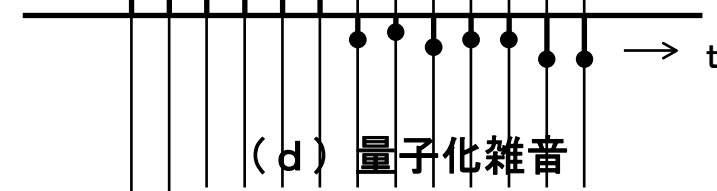
(a) アナログ入力



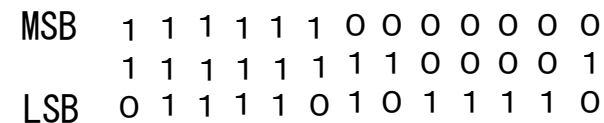
(b) 標本化



(c) 量子化



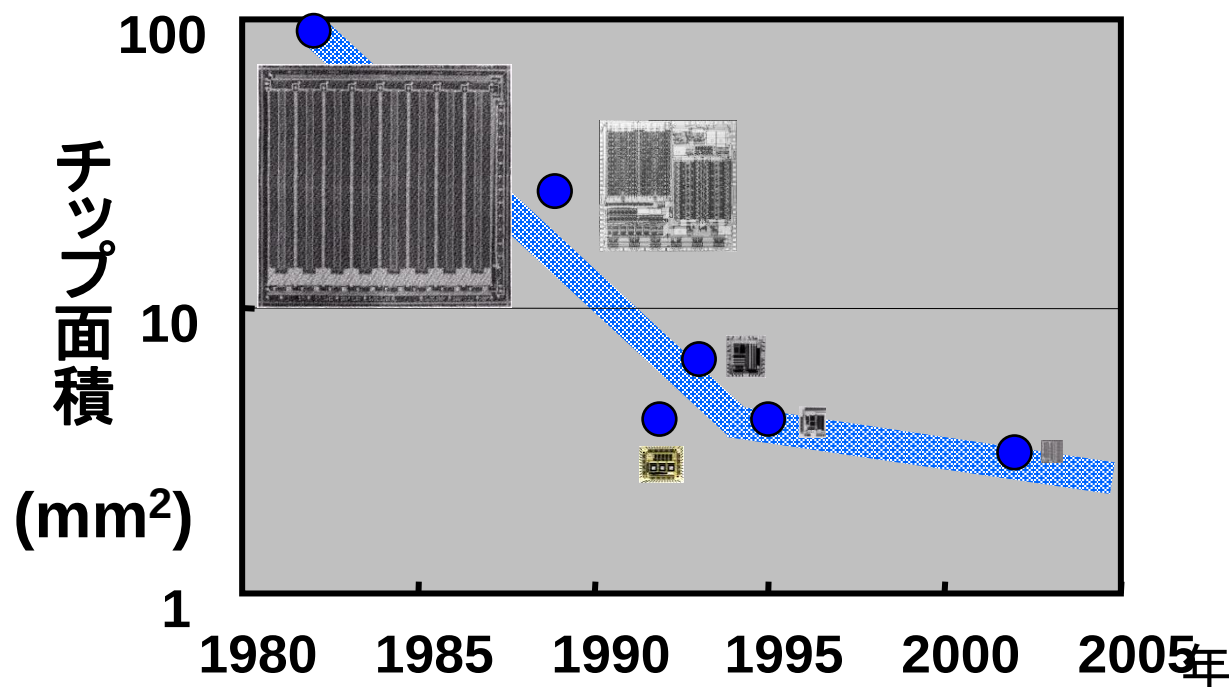
(d) 量子化雑音



(e) 符号化

AD変換器の熾烈な研究開発競争

半導体プロセス、アーキテクチャ、回路構成の進歩により
性能向上スピードがデジタルLSI以上。

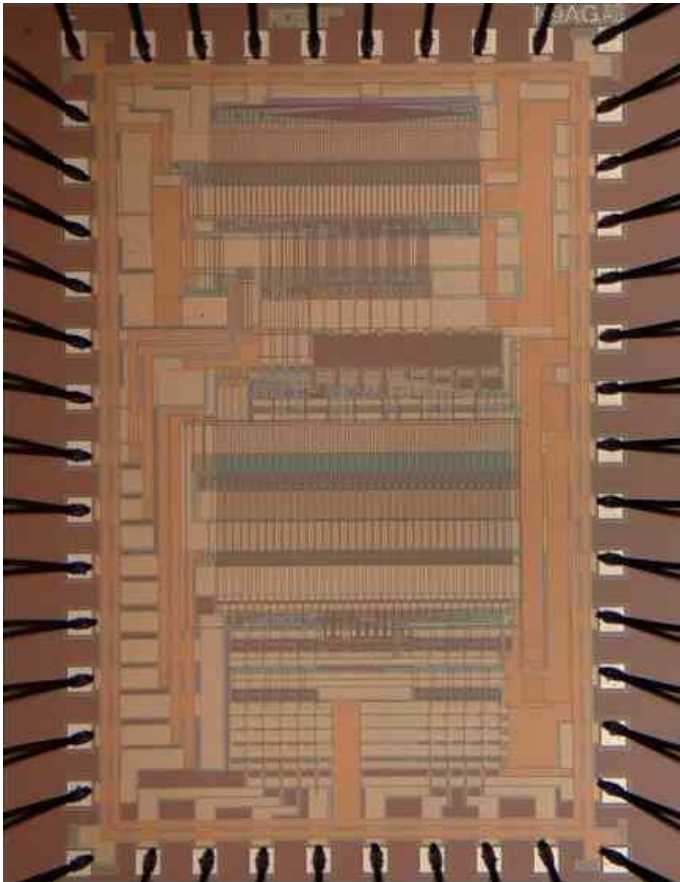


武蔵工大
堀田先生
作成資料

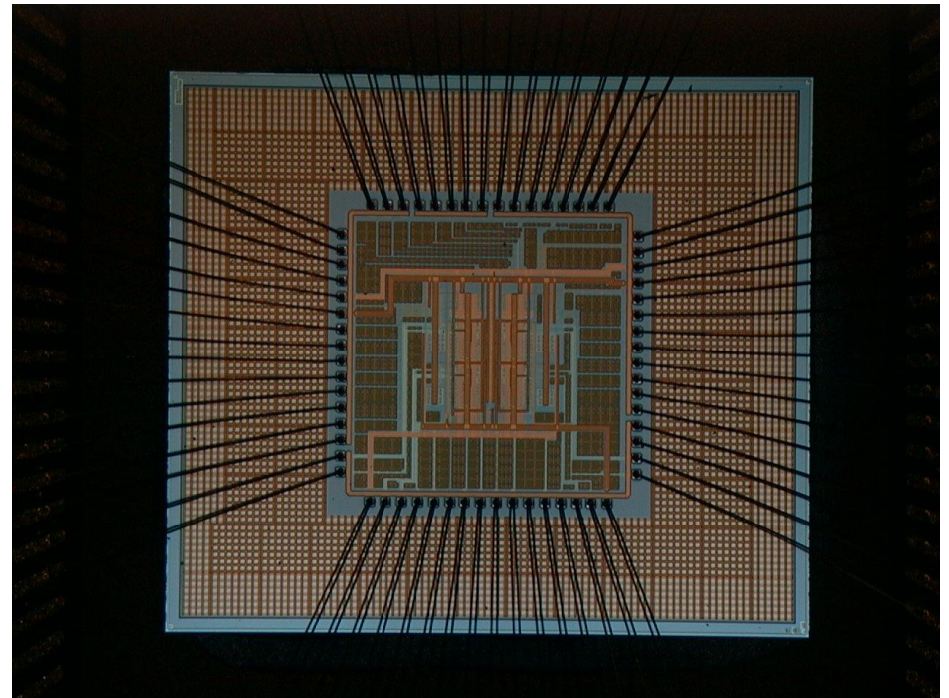
10ビットビデオ用AD変換器のチップ面積推移

群馬大と半導体メーカーの共同研究開発

CMOS A/D変換器

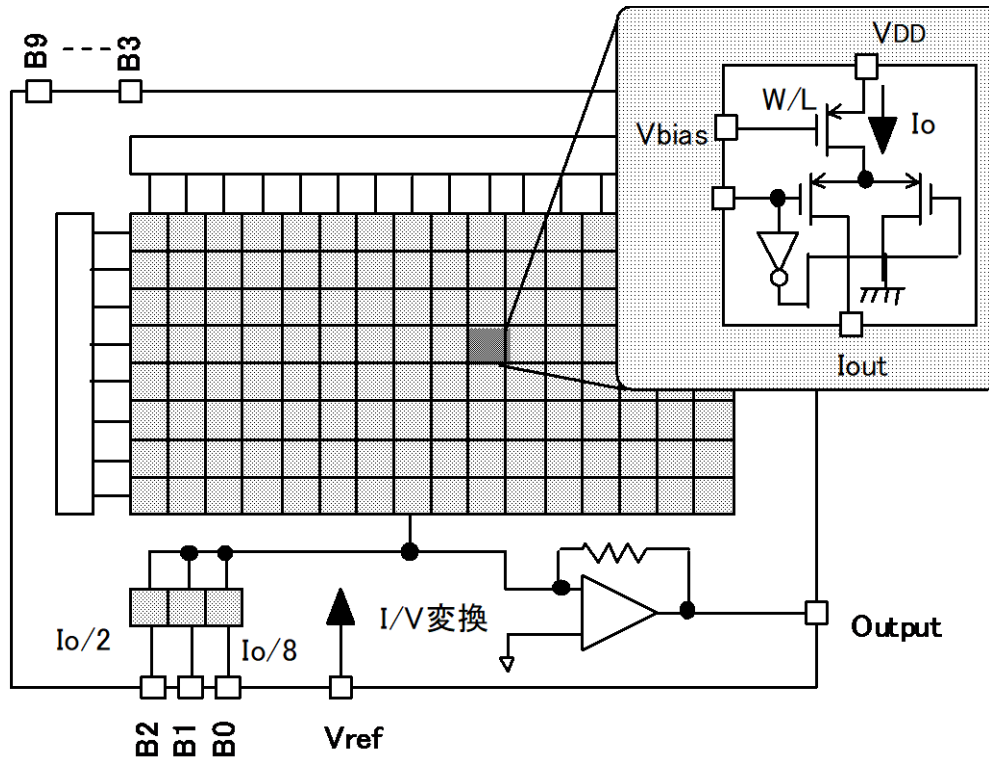


三洋電機との共同開発



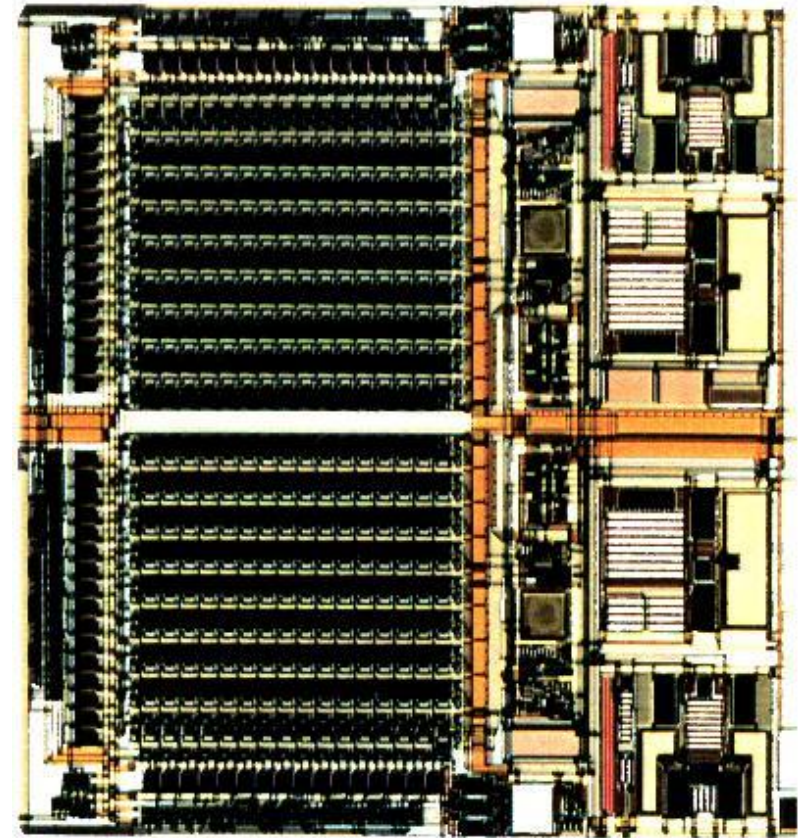
ルネサステクノロジ社との
共同開発

サーボ用10ビット電流型DA変換器



DA変換器の性能

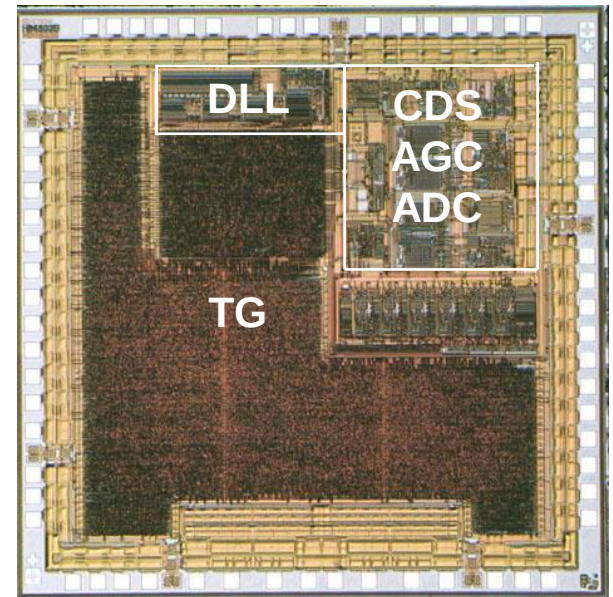
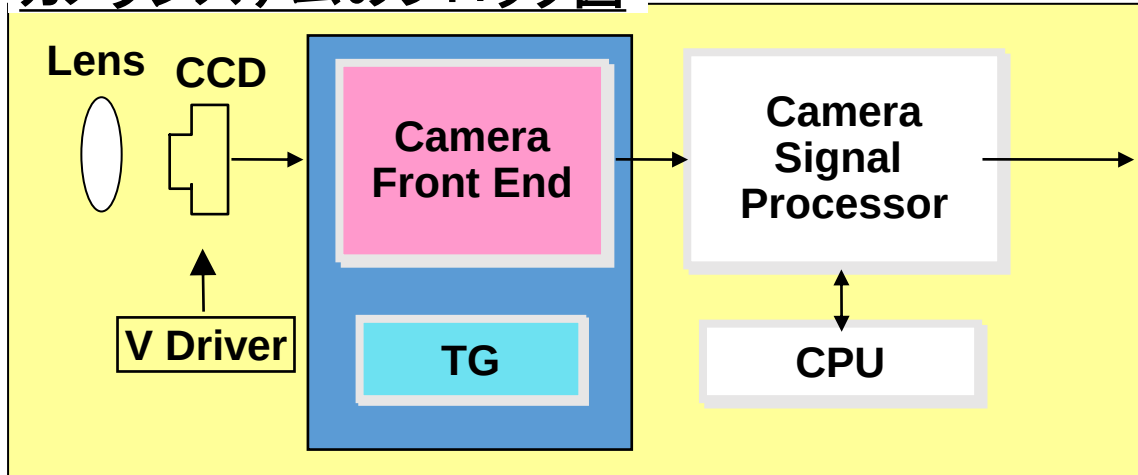
分解能	10 bit
積分直線性誤差	+0.11/-0.07 LSB
微分直線性誤差	+0.35/-0.47 LSB
	0.9 μ s (@5V)
消費電力	9.7 mW (@3V)
整定時間	21 mW (@5V)



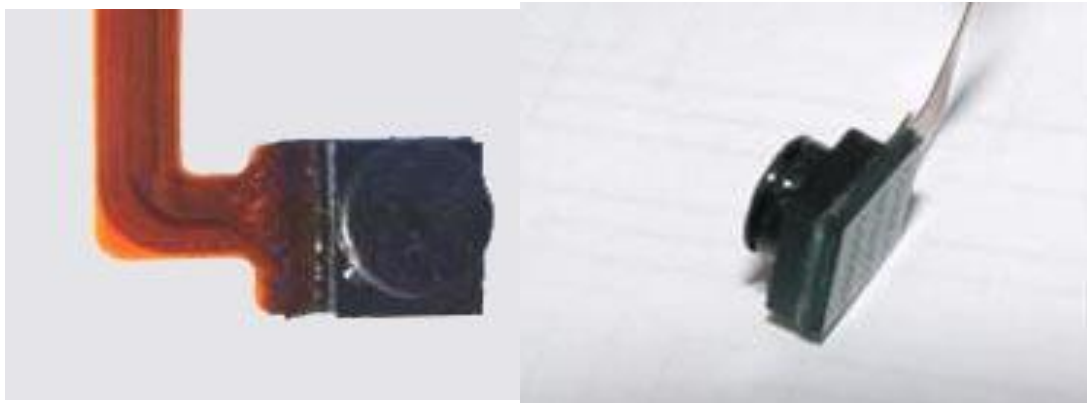
0.8 μ m CMOS 1.31 mm²

カメラフロントエンドLSI

カメラシステムのブロック図



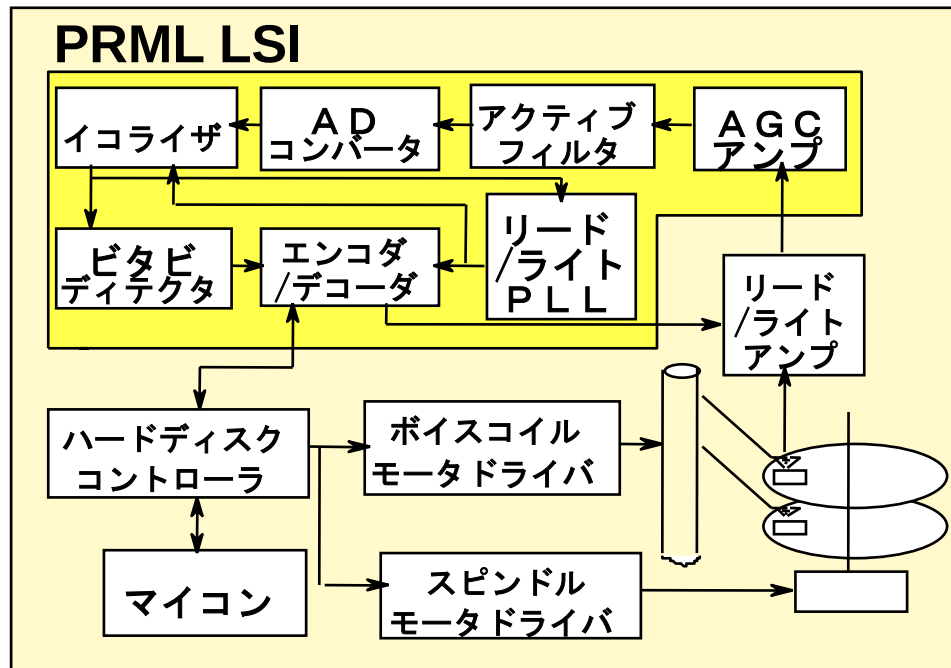
カメラフロントエンドLSI



携帯電話用カメラシステム

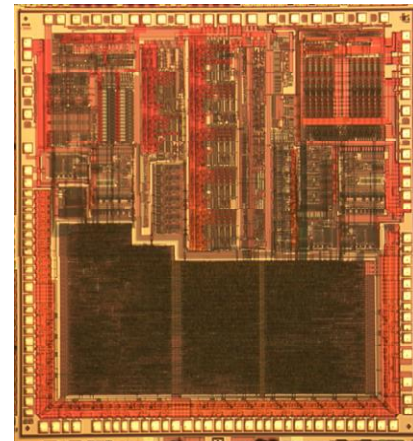
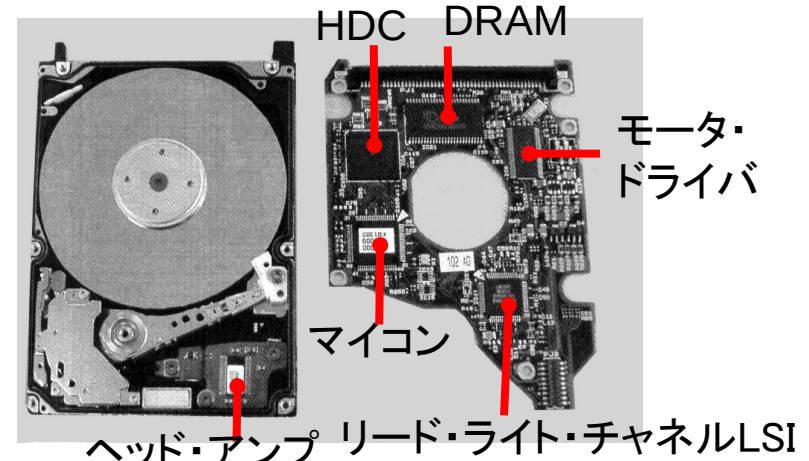
システムLSI内にAD/DA変換器が内蔵

HDD(ハードディスク・ドライブ)用信号処理LSI



HDDブロック図

システムLSI内にAD/DA変換器が内蔵
SoC (system-on-chip)



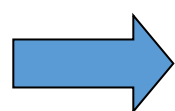
(200Msps, 0.35umCMOS)

HD153072(PRML)

計測制御機器とAD変換器

計測器(電子計測器)

制御システム(ファクトリーオートメーション):



アナログ回路は重要

例:



デジタルオシロスコープ内のAD変換器

デジタル信号処理システムと AD/DA変換回路

12



アナログ

デジタル

デジタル

アナログ

AD変換器: アナログ・デジタル変換回路

DA変換器: デジタル・アナログ変換回路

(重要) 自然界の信号は全てアナログ

ex. 音声、電波、電圧、電流、

アナログ回路が不要になることはない！！

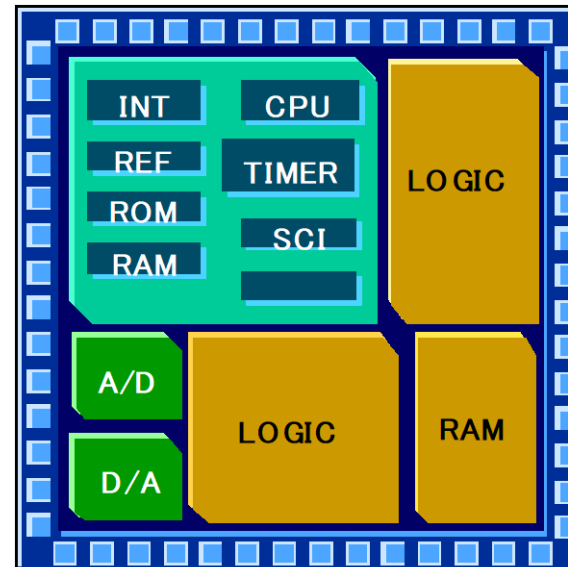
デジタル技術をささえる AD/DA変換器

13

自然界の信号は
アナログ



LSIでの信号処理は
デジタル

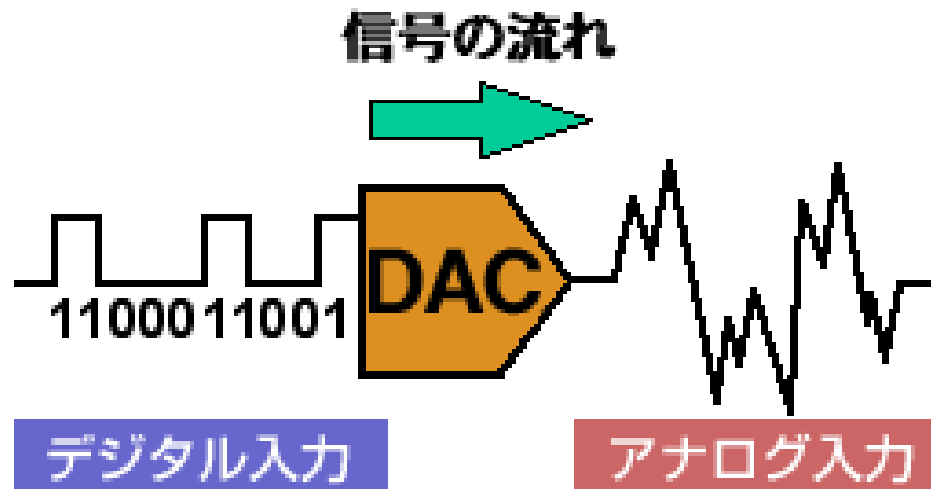


SOC:
System On a Chip

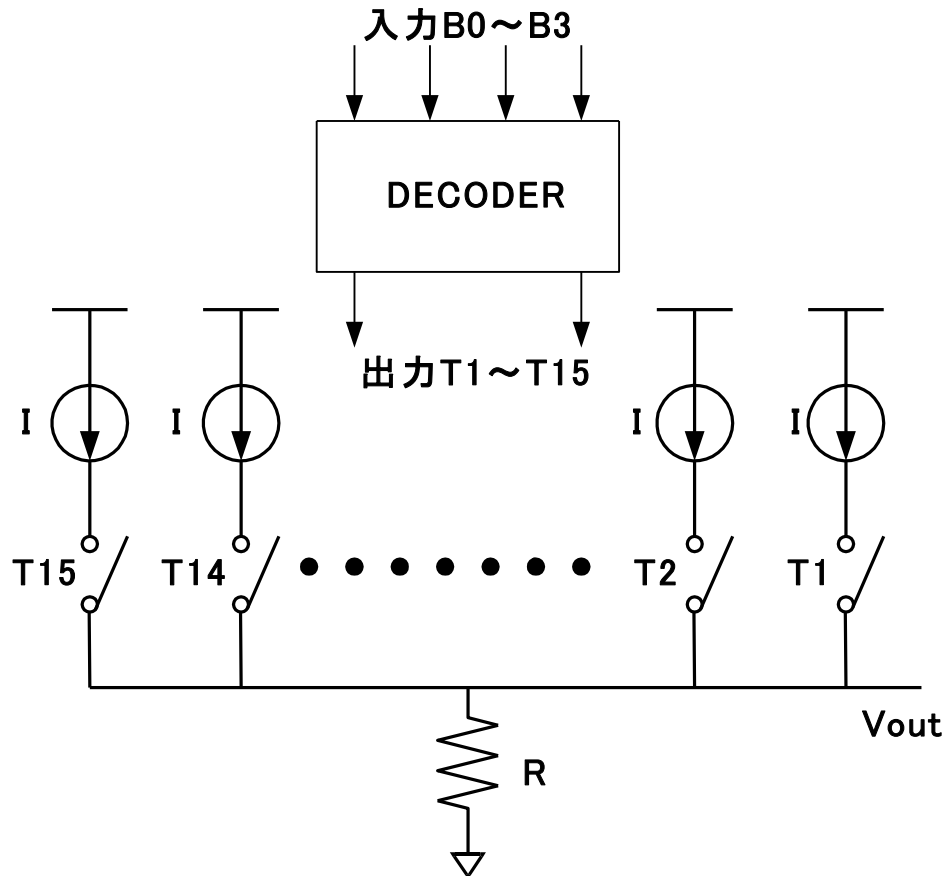
DA変換器

(Digital to Analog Converter)

離散的なデジタル値を連続的なアナログ信号に変換する回路



セグメント型DA変換器



4bitセグメント型DA変換器

● メリット

- ・グリッチが小さい
- ・入出力間の単調性ができる

確保

● デメリット

- ・回路規模が大きい
- ・サンプリング速度がやや低下する

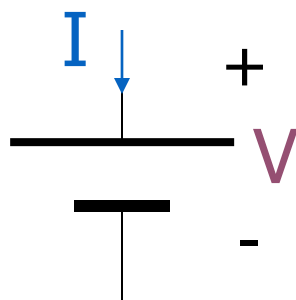
電圧源と電流源

電圧源： 流れる電流にかかわらず

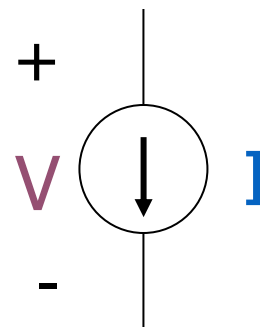
一定電圧 V を供給する。

電流源： 両端にかかる電圧にかかわらず

一定電流 I を供給する。

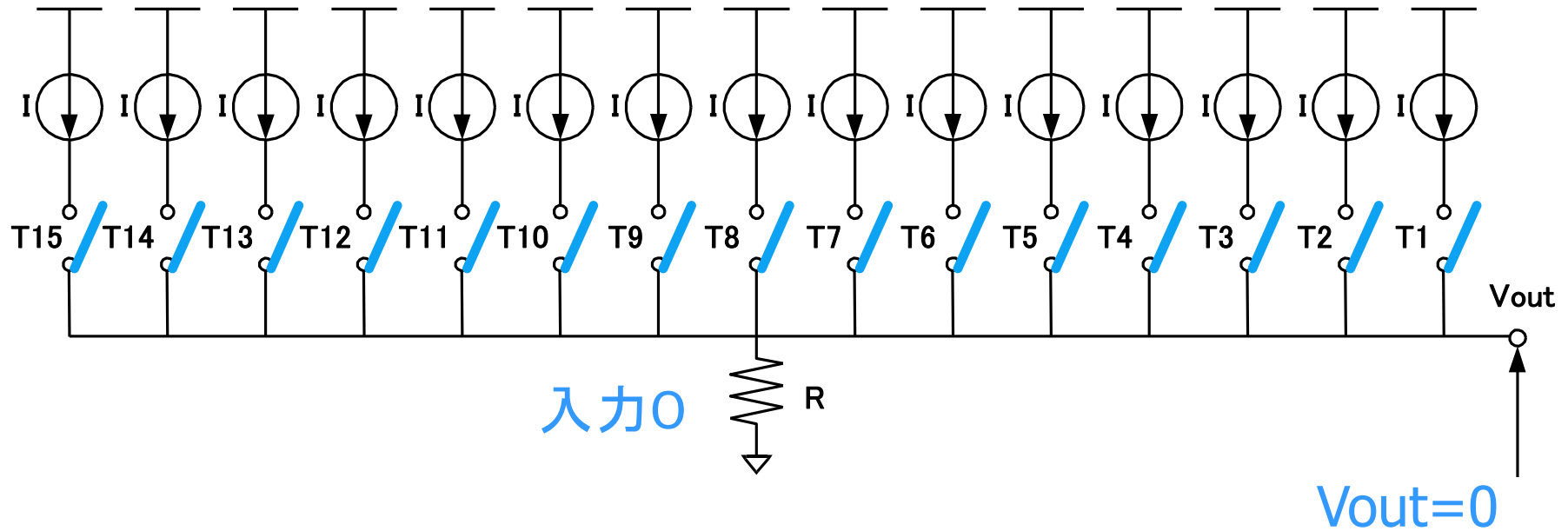


電圧源



電流源

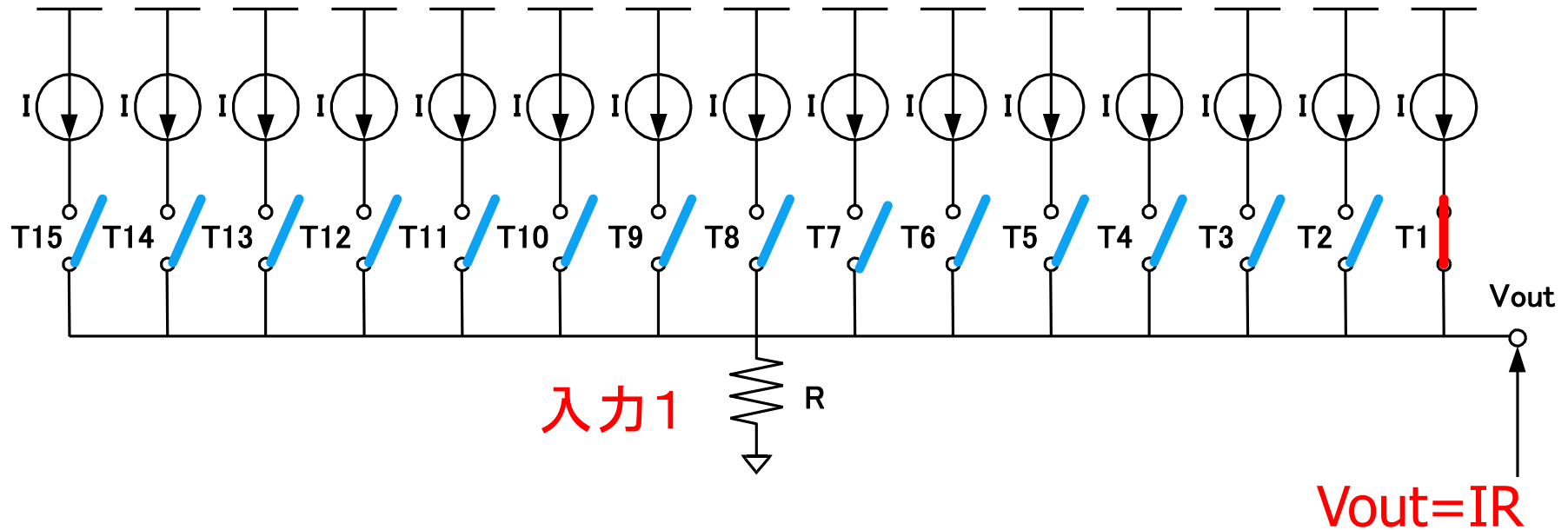
セグメント型DA変換器の動作



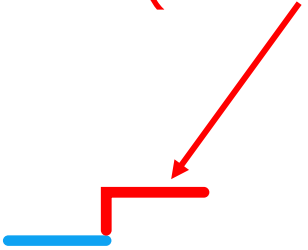
(0000000000000000)



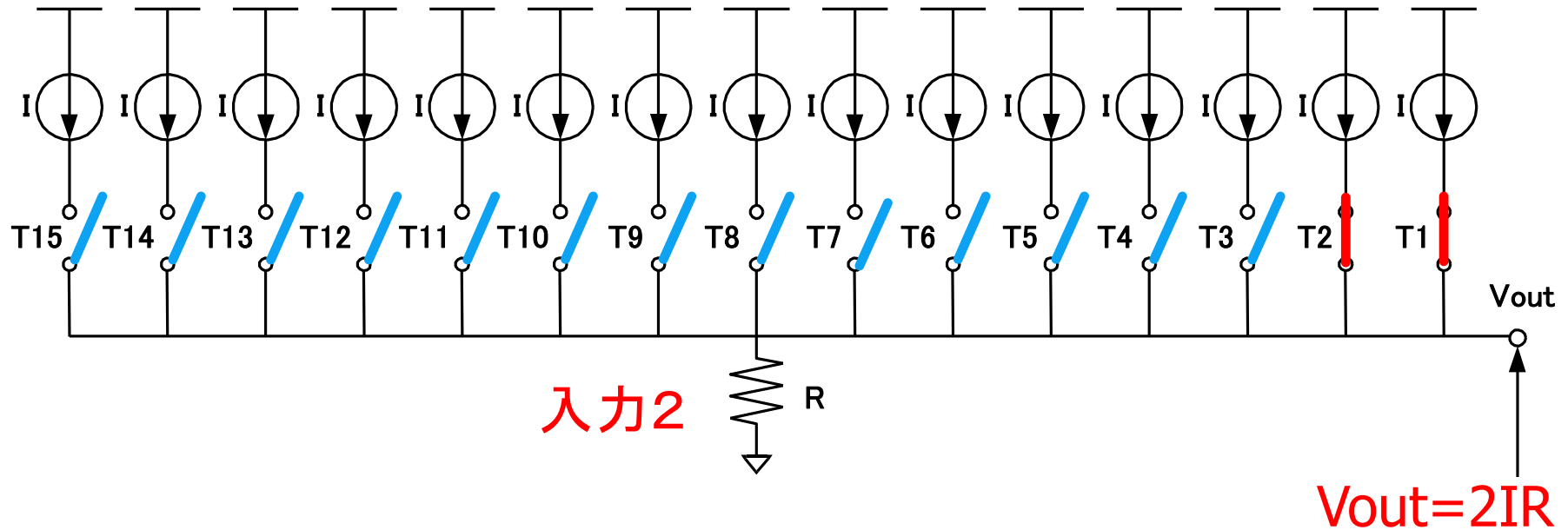
セグメント型DA変換器の動作



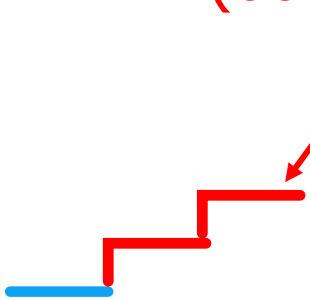
(0000000000000001)



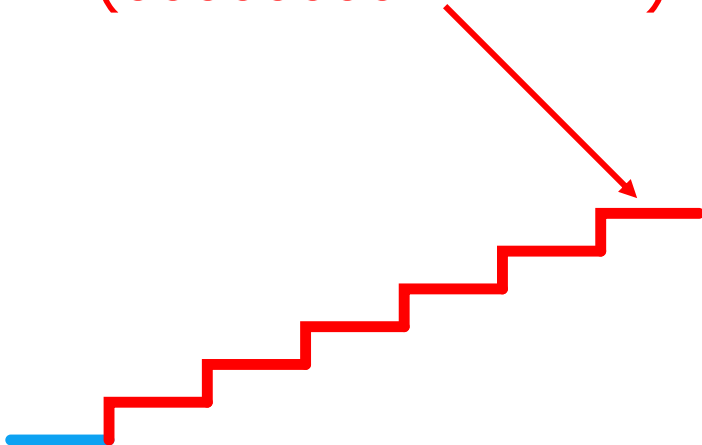
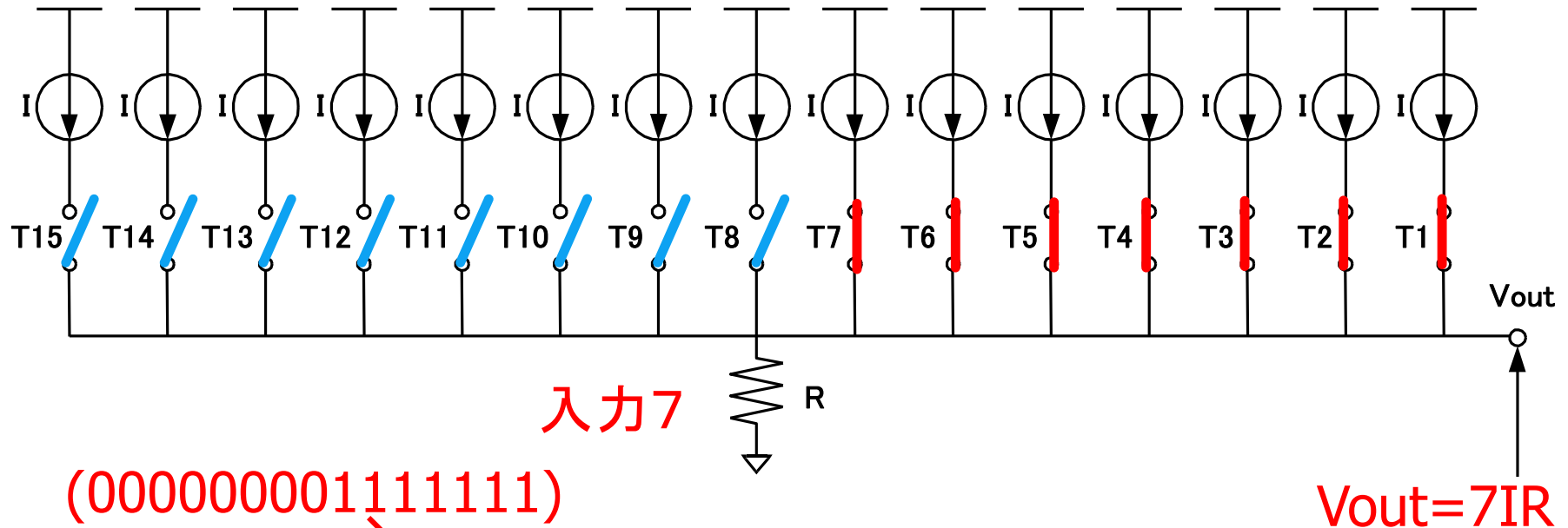
セグメント型DA変換器の動作



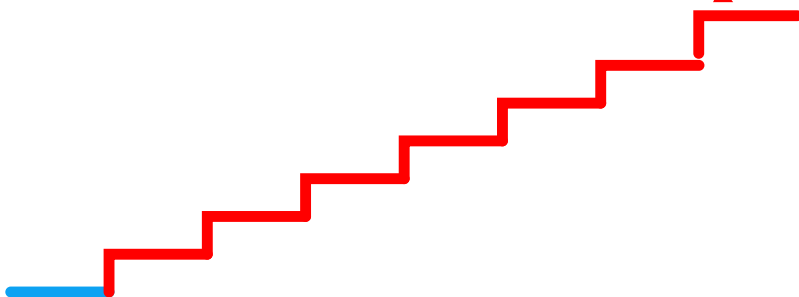
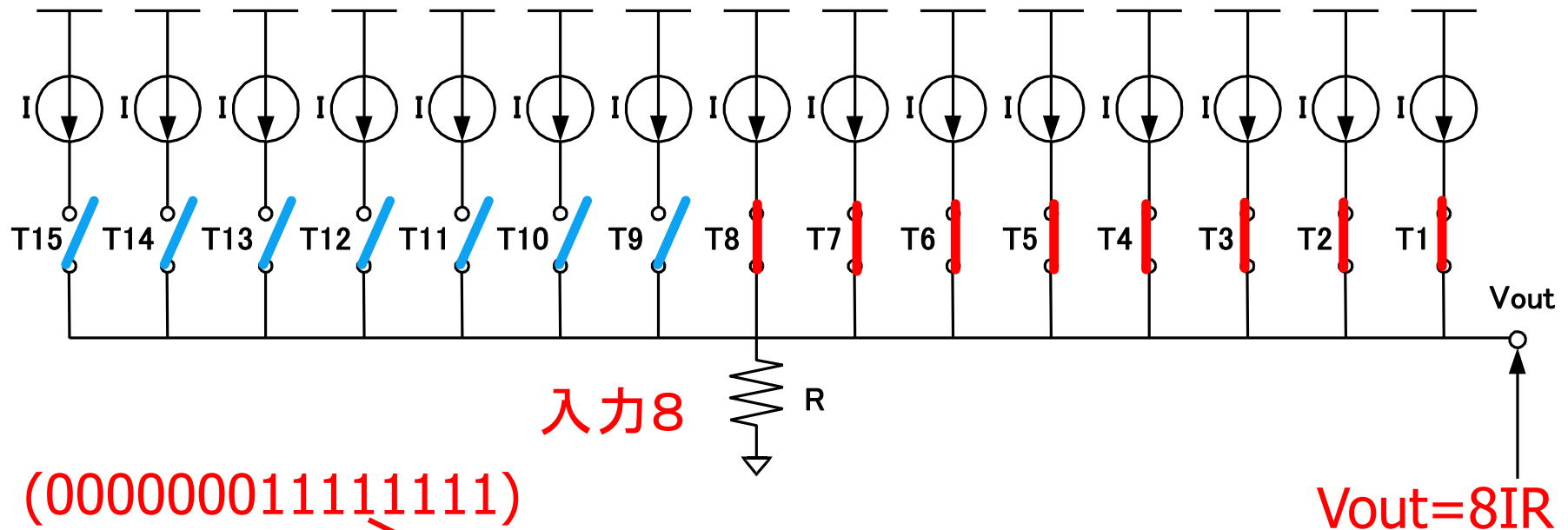
(00000000000000011)



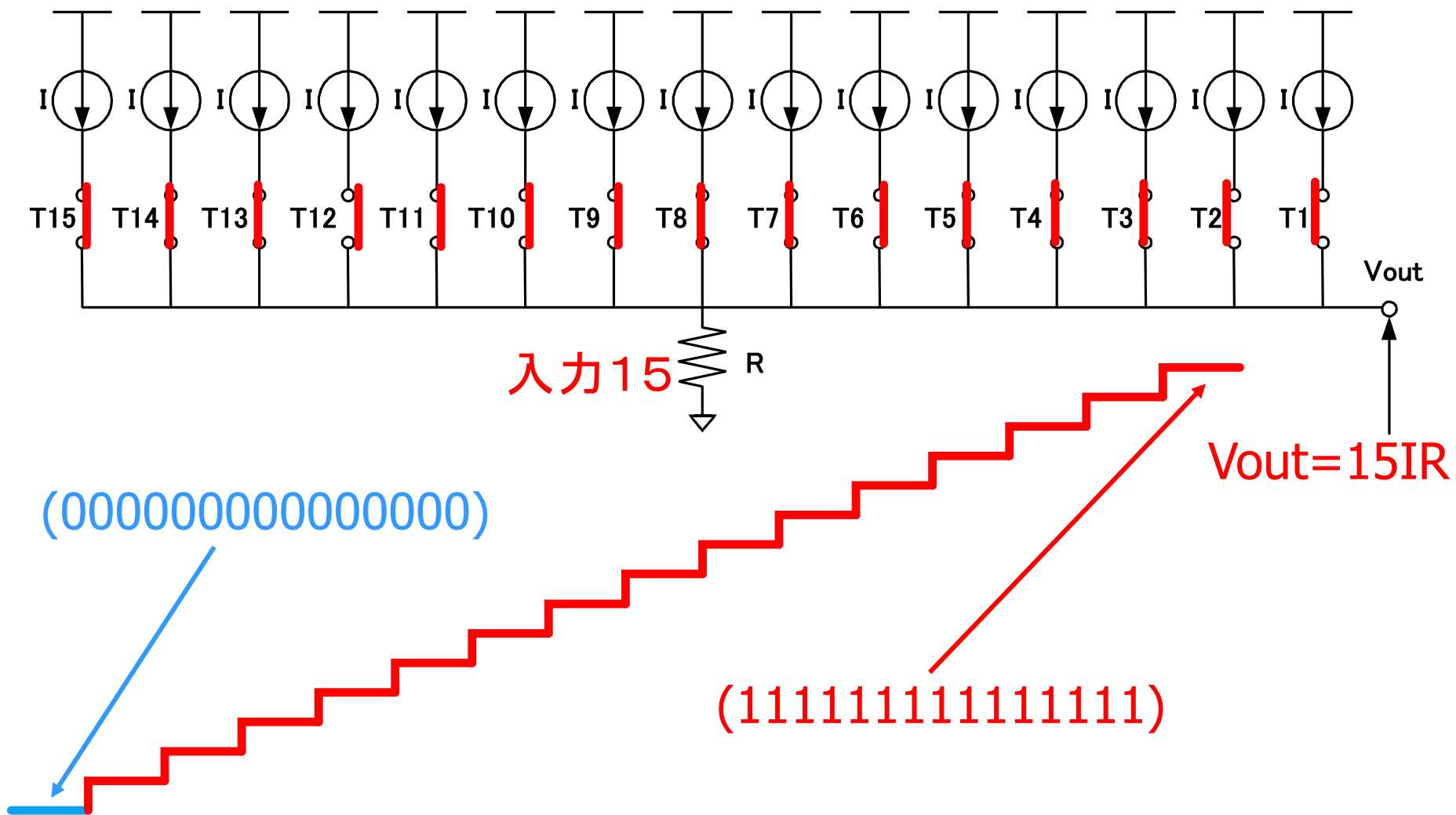
セグメント型DA変換器の動作



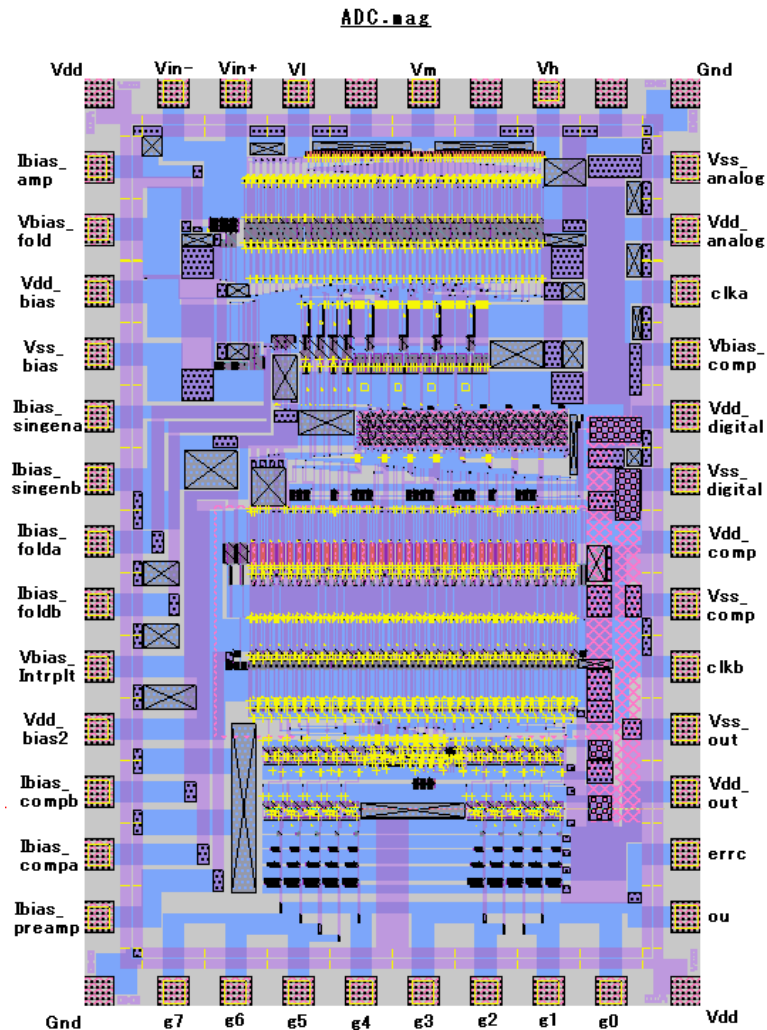
セグメント型DA変換器の動作



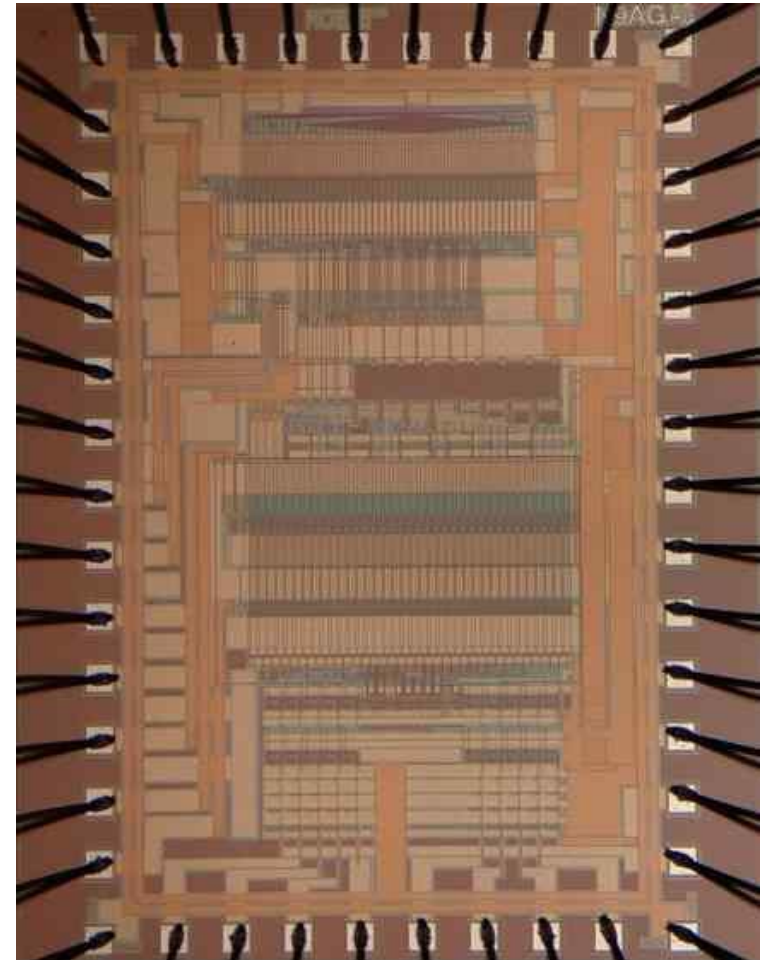
セグメント型DA変換器の動作



レイアウト設計(ICパターン設計)とIC



CMOSアナログICの
レイアウト設計



レイアウト設計データを
もとにファブリケーション
されたチップ

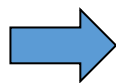
- 見た目が美しいのは 良いレイアウト

- 「美しいレイアウト」とは何か

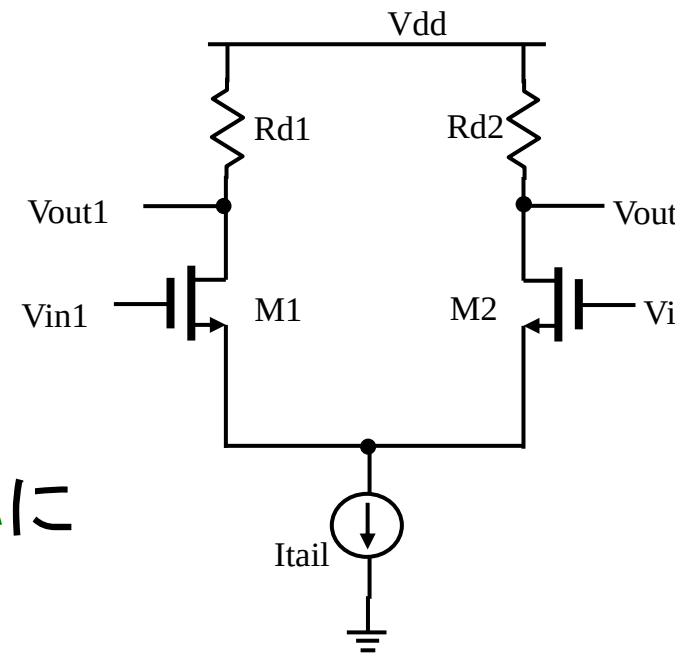
その一つとして

アナログ回路は差動回路が多用

回路が対称



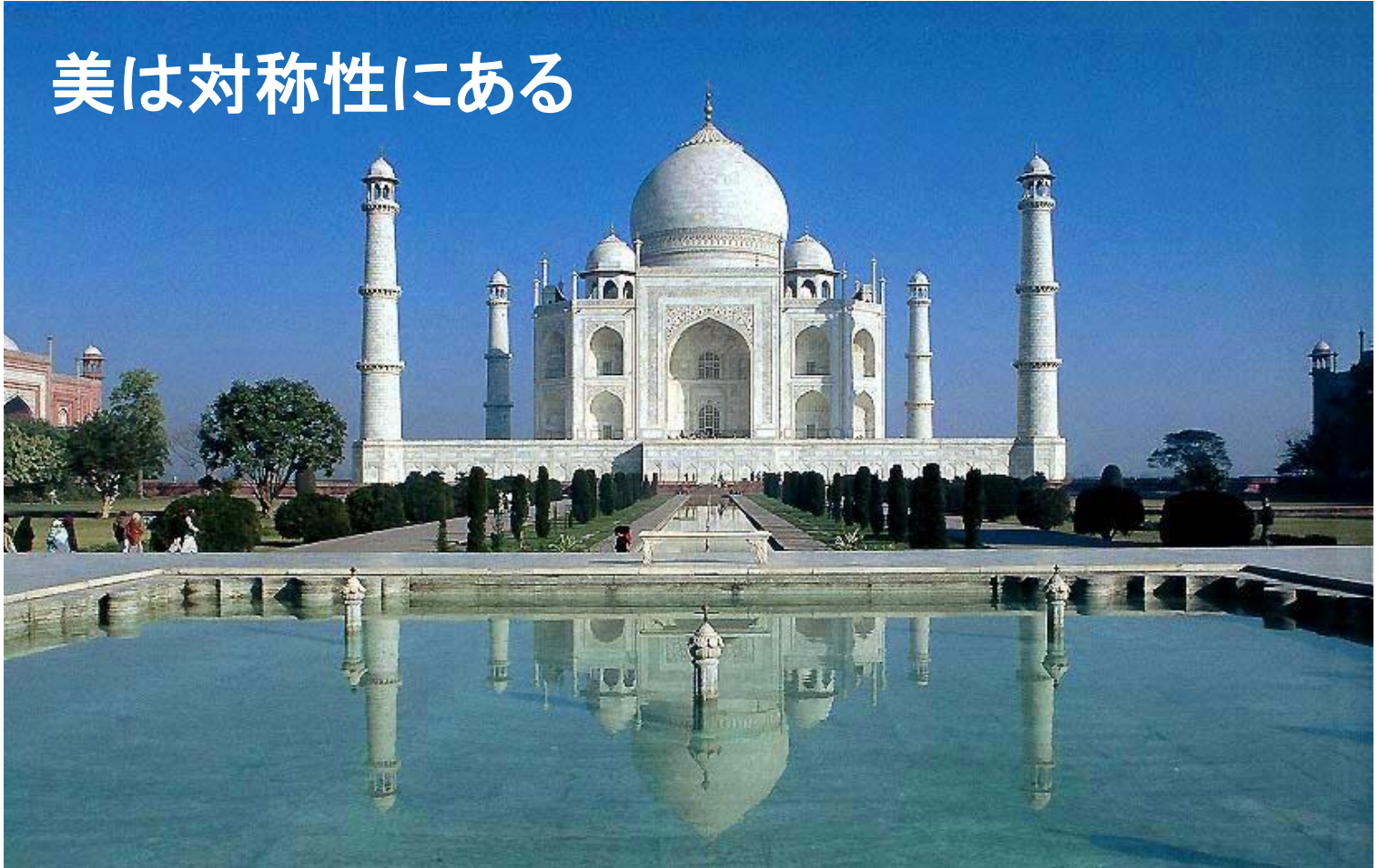
レイアウトも対称に



差動回路
左右対称

レイアウト設計者が求める美しさ

美は対称性にある



タージマハール

群馬大学 白石洋一先生 資料より

タージマハール

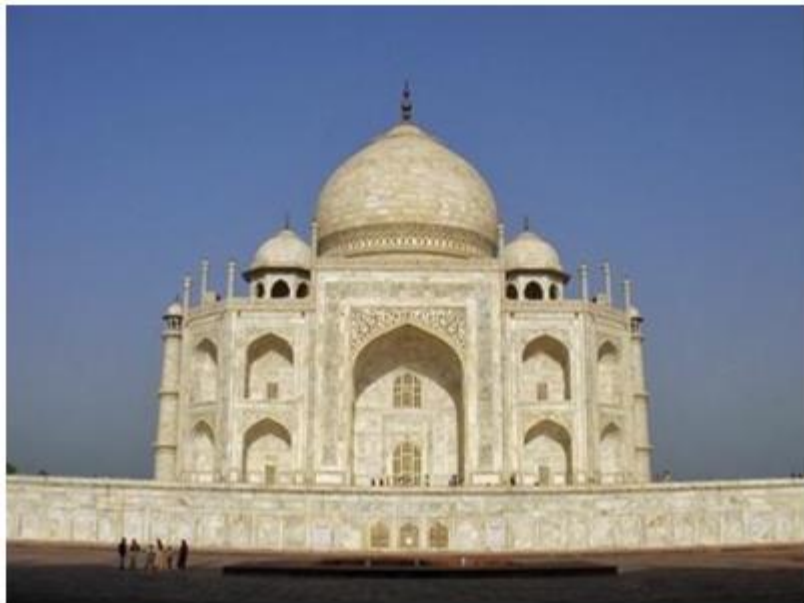


22年間かけて造営された
いとしい妻への記念碑

正確無比なシンメトリーが美しいパレス風の建物。
ムガル帝国5代皇帝シャー・ジャハーンが、
亡くなった王妃のために1632年から22年の歳月をかけて造営。

愛の代償は幽閉。シャー皇帝の予想外の末路
皇帝は晩年タージマハールの向かいに黒大理石の宮殿を
建てようとした。
第3皇子によって近くのアグラ城の塔に幽閉されてしまう。
理由はタージマハール建築での莫大な浪費。
皇帝は塔の中から7年間タージマハールを眺め、
その生涯を閉じた。

<http://www.ab-road.net/sekaiisan/tajimaharu/index.html>

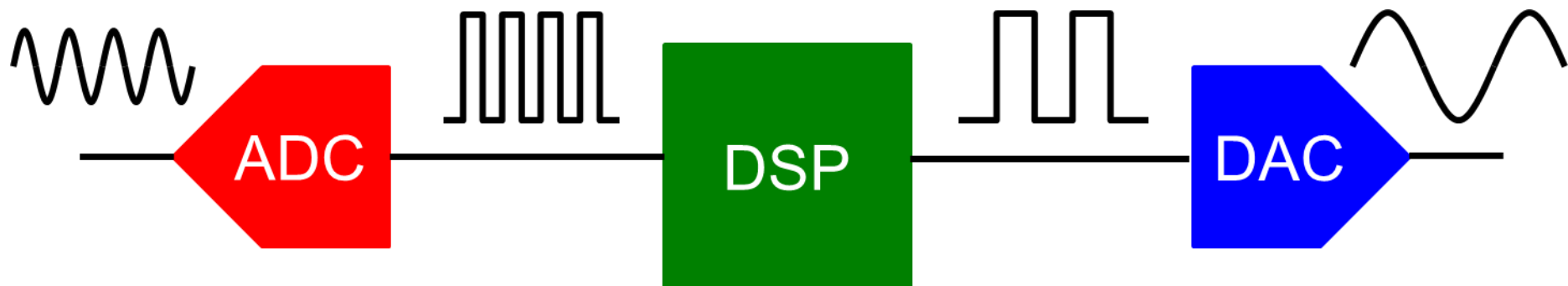


なぜ対称に作らなかったのか

UCLA Royce Hall 左右対称ではない



研究背景



高性能なDA変換器が求められている

研究目的

古典数学を用いた線形性向上アルゴリズムの考案

■ DA変換器の課題

DA変換器の入出力関係は、理想的に線形関係



単位回路間の特性ミスマッチにより、入出力関係が非線形



魔方陣を用いたレイアウトアルゴリズム

What is Magic Square(魔方陣)?

みなさん、“魔方陣”をご存知でしょうか。

“方” は四角形の意



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



<http://www.ir.isplca.co.jp>

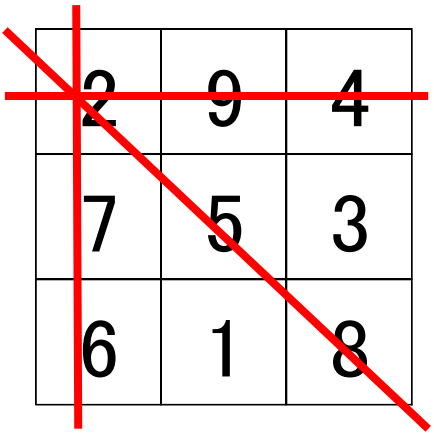
TIGER
タイガー魔法瓶



魔方陣について

Magic square : 魔方陣

定和性: 各行・列・対角線の和が一定



2	9	4
7	5	3
6	1	8

3次方陣

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

4次方陣

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

5次方陣

様々な魔方陣

完全魔方陣

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

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

対称魔方陣

サイの目方陣

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

様々な魔方陣(続き 1)

✓ 同心魔方陣

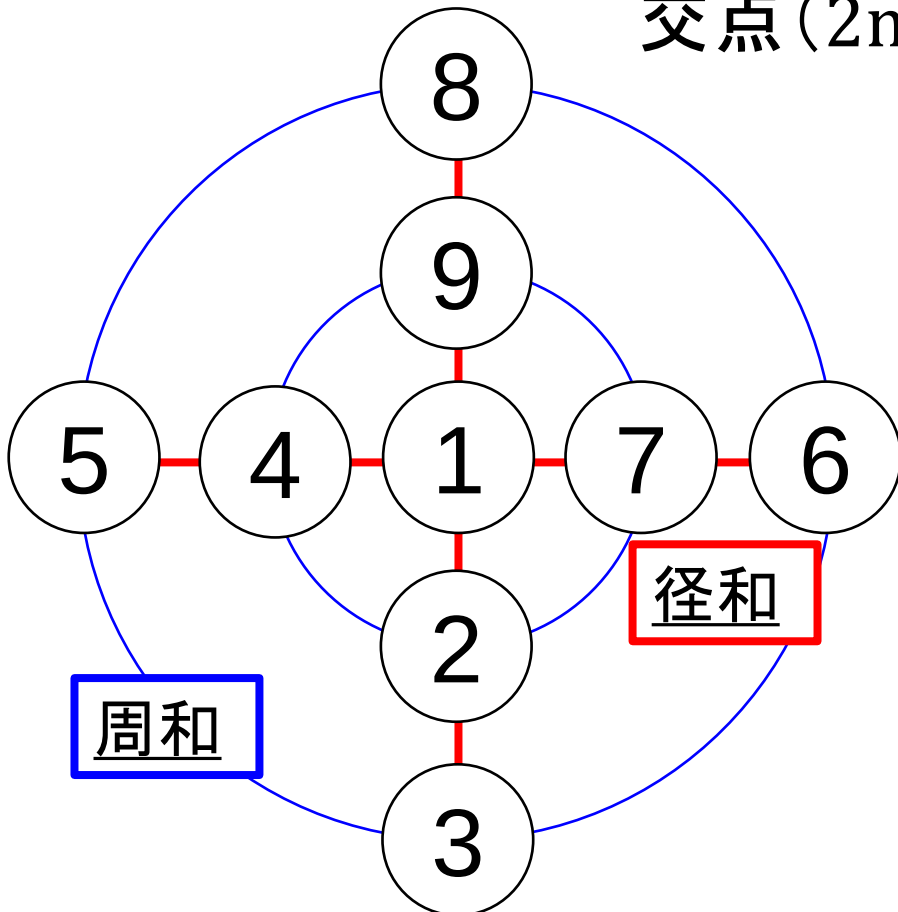
外側からひと側ずつ取り除いても、定和性を失わない

数字が対称な位置にある

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

様々な魔方阵(続き 2)

魔円陣：同心円と直径とを同じ個数だけ書き
交点 ($2n^2 + 1$ 個) に数字を置いたもの



n=5(左図)

- 径和: 直径上の $2n+1$ 個の和
- 周和: 円周上の $2n$ 個の数と
中心数の $2n+1$ 個の和

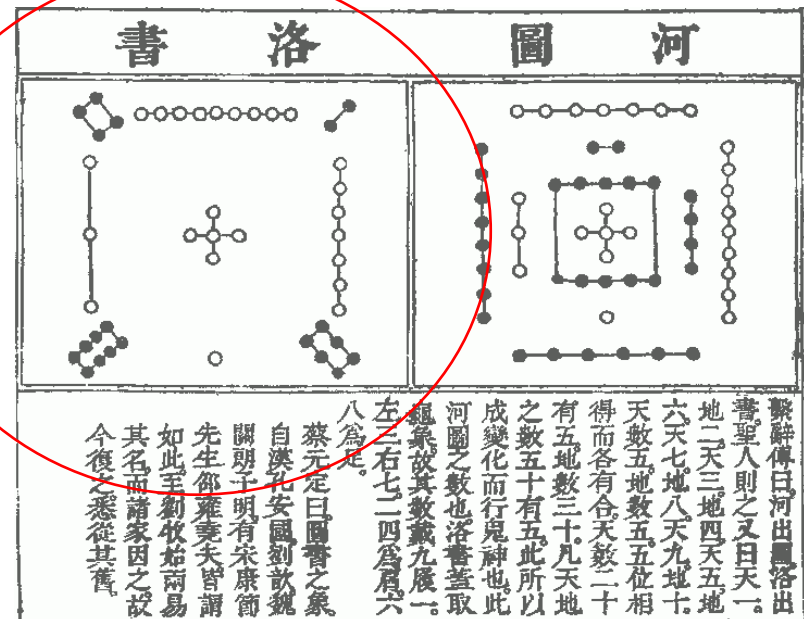
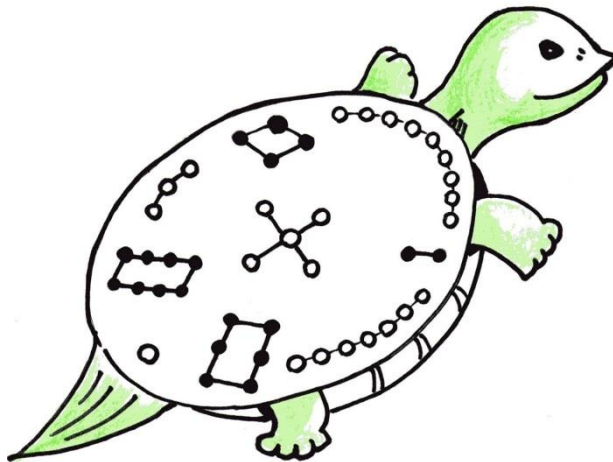
→ 径和と周和の一致

魔星陣, 立体魔方陣, etc,,,,,

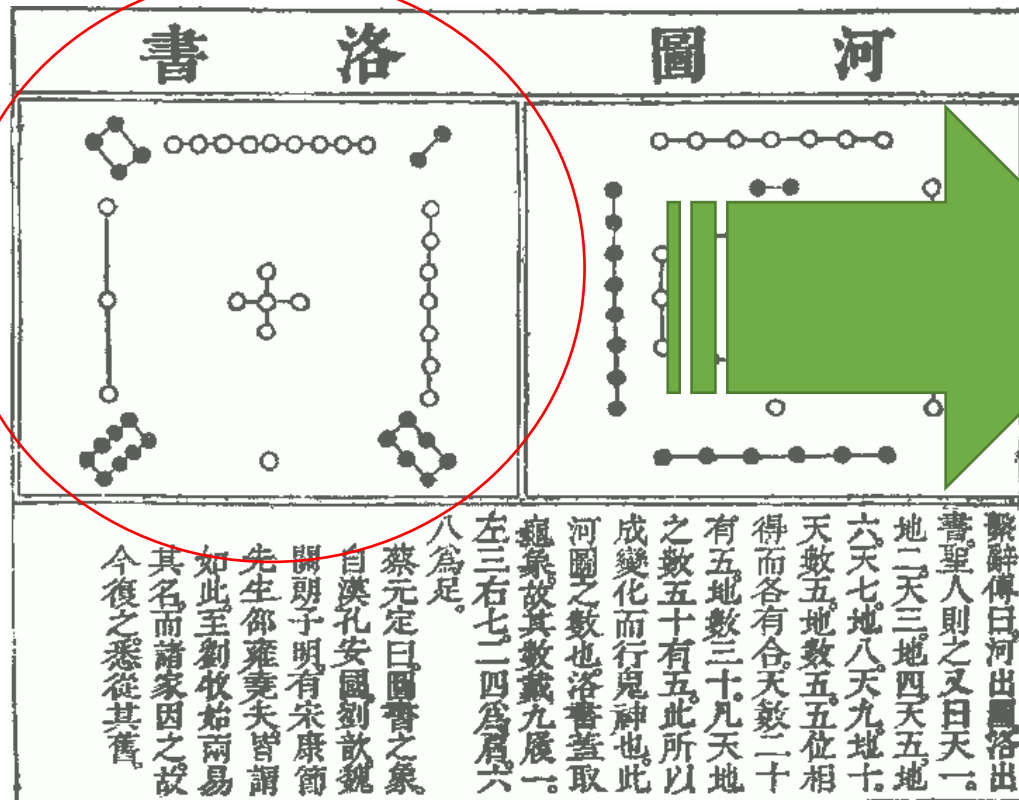
魔方陣の歴史（中国）

中国 紀元前

「夏(か)の禹王(うおう)が黄河の洪水を治めたとき、
洛水から出た神亀の背に洛書が記されていた」



魔方陣の歴史（中国）



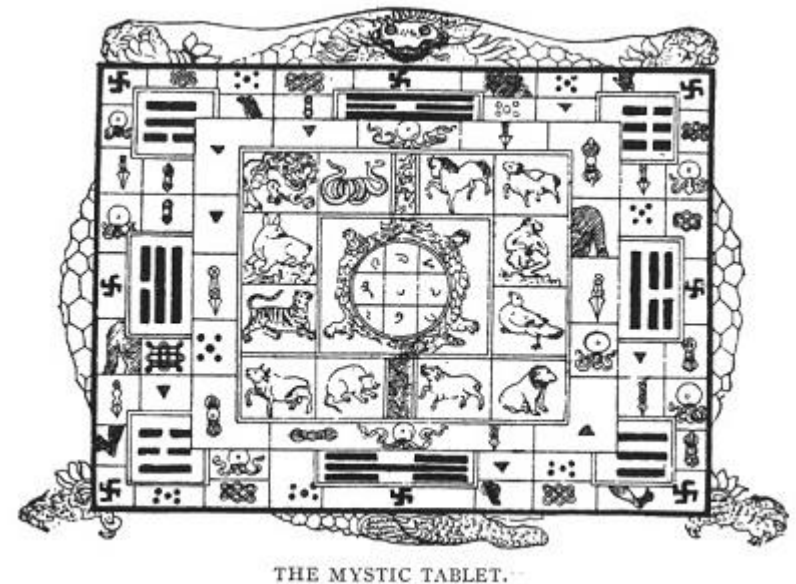
3次方陣

4	9	2
3	5	7
8	1	6

特殊な図であることから、
九星術の根本として占星家が使用

魔方陣の歴史（チベット、ネパール、ブータン）

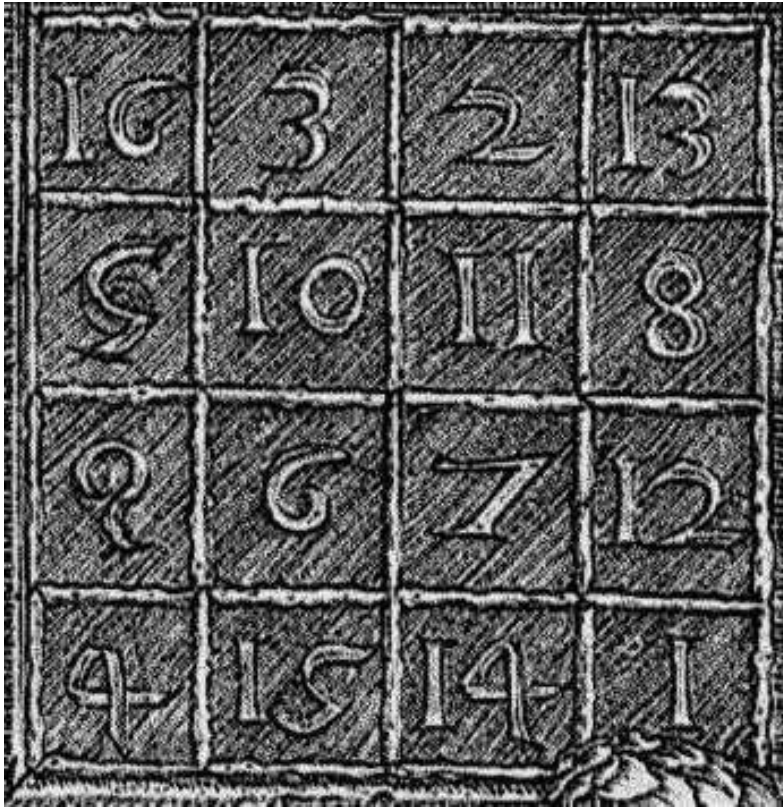
中央の3次方陣の周りに十二支の動物を配した
“生物の輪”を刻んだお守り



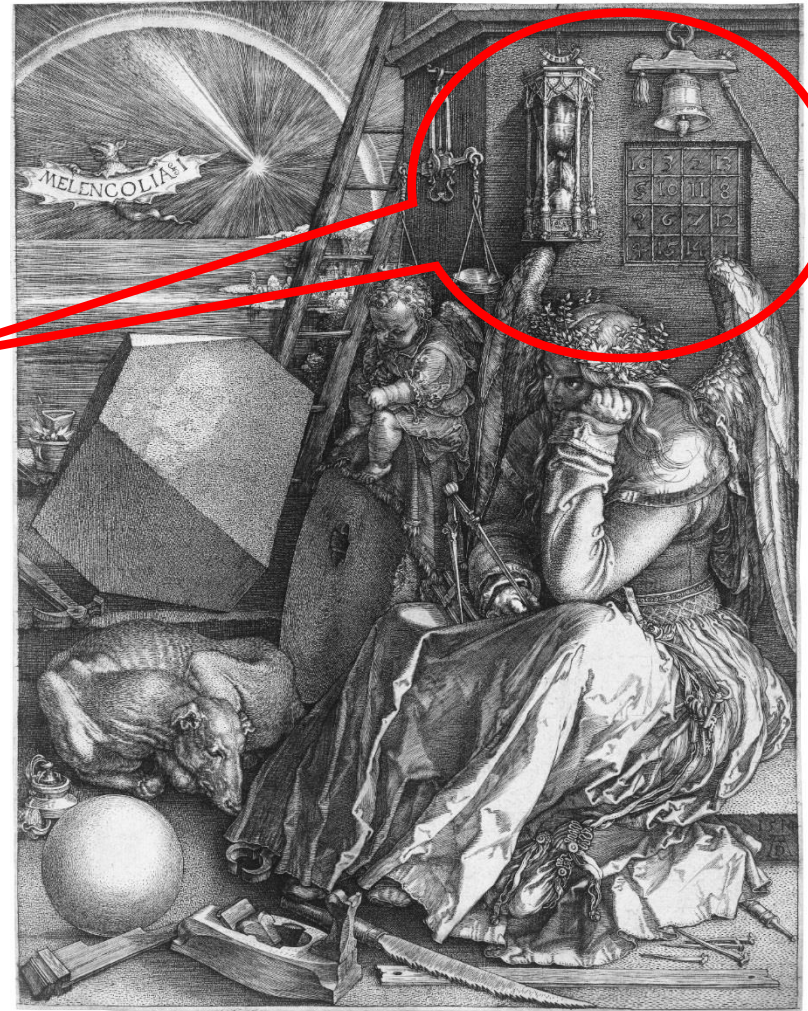
“ The mystic tablet “

魔方陣の歴史（西洋）

15世紀 西洋



魔方陣



独: Melencolia I (1514)
作: Albrecht Dürer

魔方陣の歴史（日本）

上毛かるた

「和算の大家 関孝和」

関 孝和

日本数学史上最高の英雄人物

- 江戸時代の数学者
- 群馬県藤岡市出身
- 円周率の近似値,
行列の概念を確立
- 魔方陣の研究「方陣之法」



魔方陣の歴史 (日本)

関孝和が考案した6次方陣

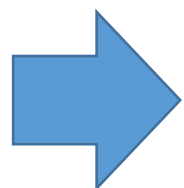
和が37となる2数を線で結ぶと模様が出現



4	3	35	36	28	5
6	14	19	15	26	31
30	24	17	21	12	7
29	25	16	20	13	8
10	11	22	18	23	27
32	34	2	1	9	33

魔方陣の歴史 (日本)

和が37となる2数を線で結ぶと美しい模様が出現



37の連結線

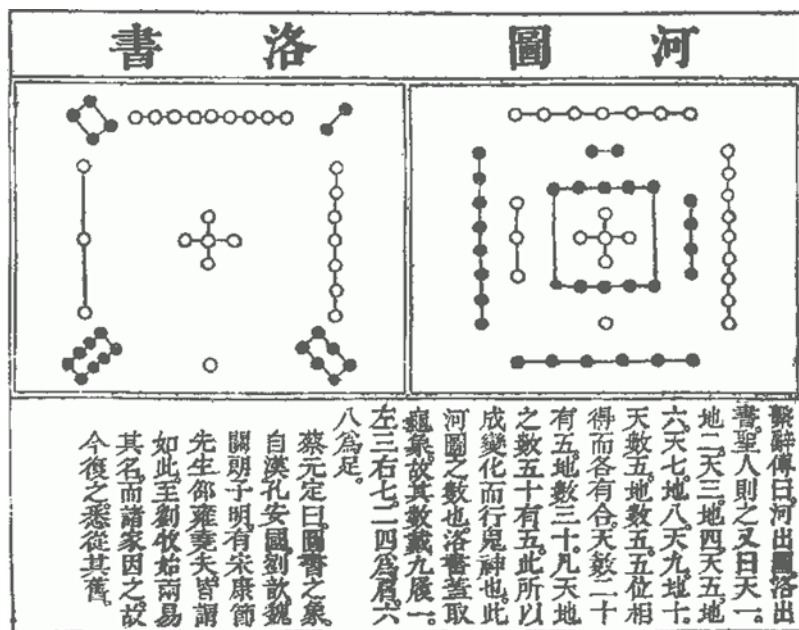
魔方陣の奥深さを
感じれる作品

4	3	35	36	28	5
6	14	19	15	26	31
30	24	17	21	12	7
29	25	16	20	13	8
10	11	22	18	23	27
32	34	2	1	9	33

Magic Square – 魔方陣 -

「人類最初の数論問題」

不思議な魔術ではなく、数の神秘が宿る



Magic Square – 魔方陣 -

「人類最初の数論問題」を工学へ応用
数の神秘の力より、イノベーション



魔方陣の「多様性」,「調和」,「奥深さ」,「美しさ」

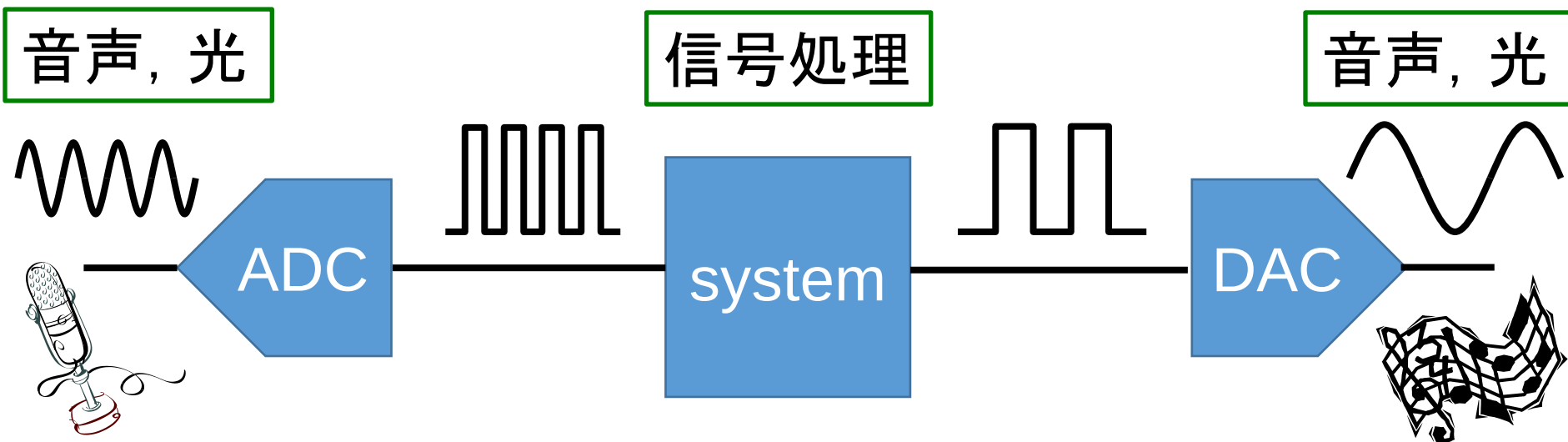
魔方陣レイアウト技術による
DA変換器の線形性向上

AD/DA変換器の重要性

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



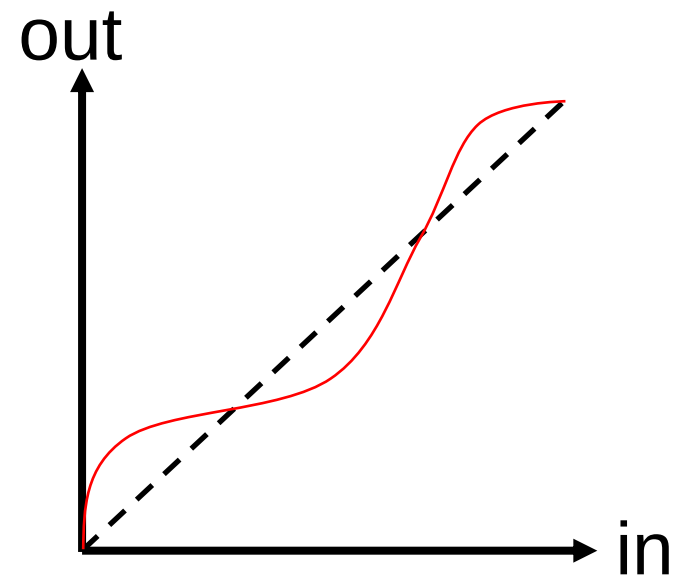
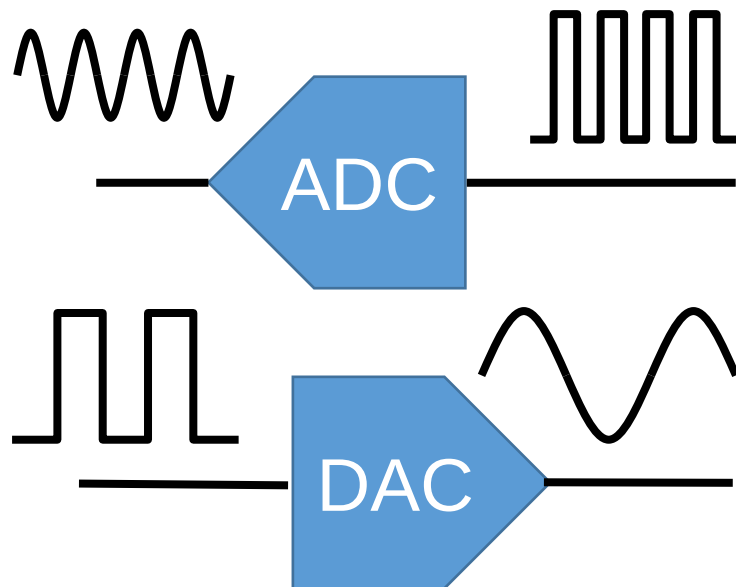
→ 高性能なAD及びDA変換器が求められている

素子ばらつきによる非線形性

- ✓ 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



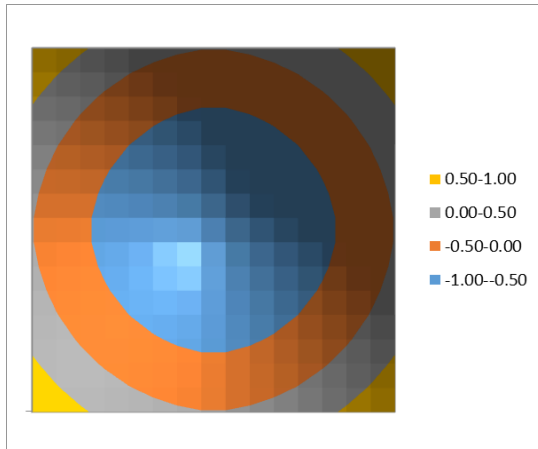
二種類の素子ばらつき

◆ ばらつきの種類

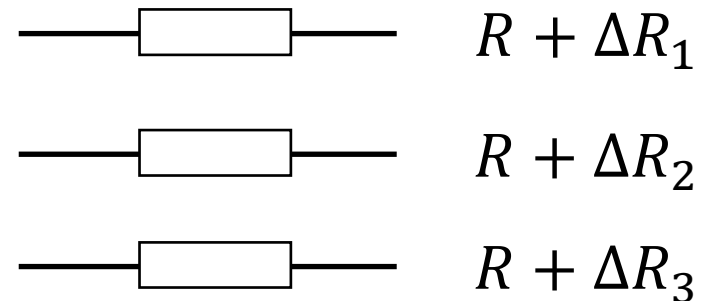
- ✓ システマティックなばらつき
- ✓ ランダムなばらつき

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

システムテックばらつき

◆ 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

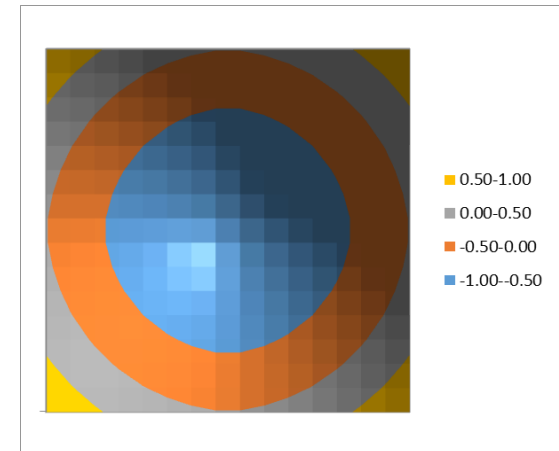
◆ システマティックなばらつき

- ✓ 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

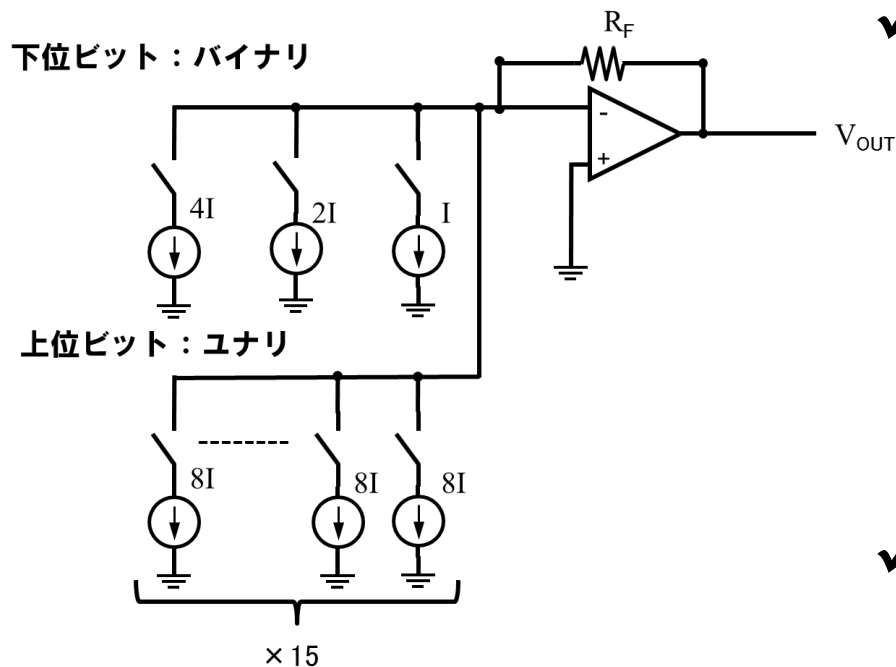
- 従来方法

Random Walk, 配置



DA変換器の構成

◆ 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変換器の動作

◆ DA変換器の構成

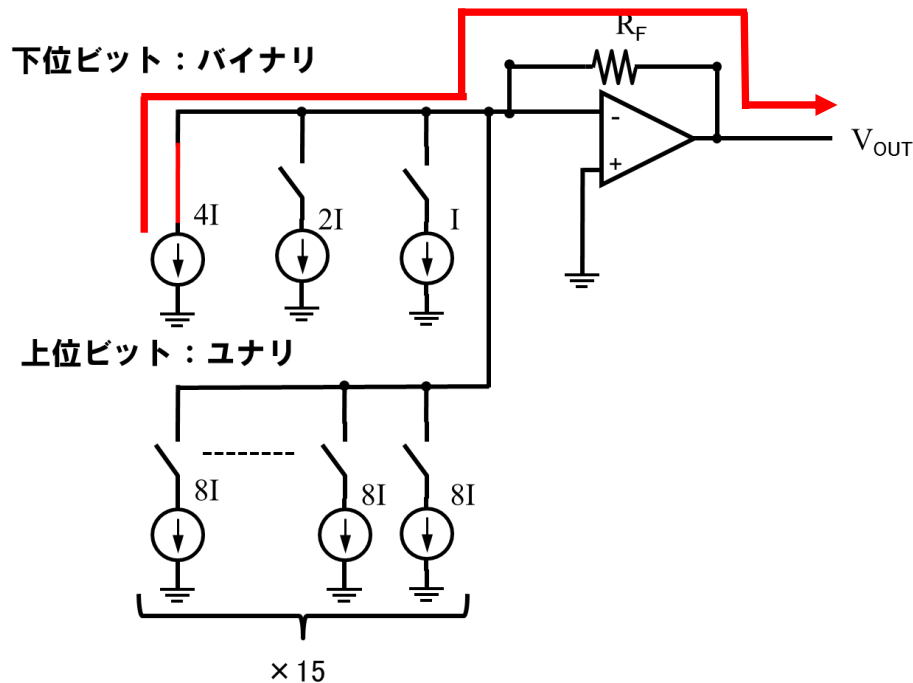
✓ 7bit DA変換器

ex.1

(0000100)



$$V_{out} = 4IR_F$$

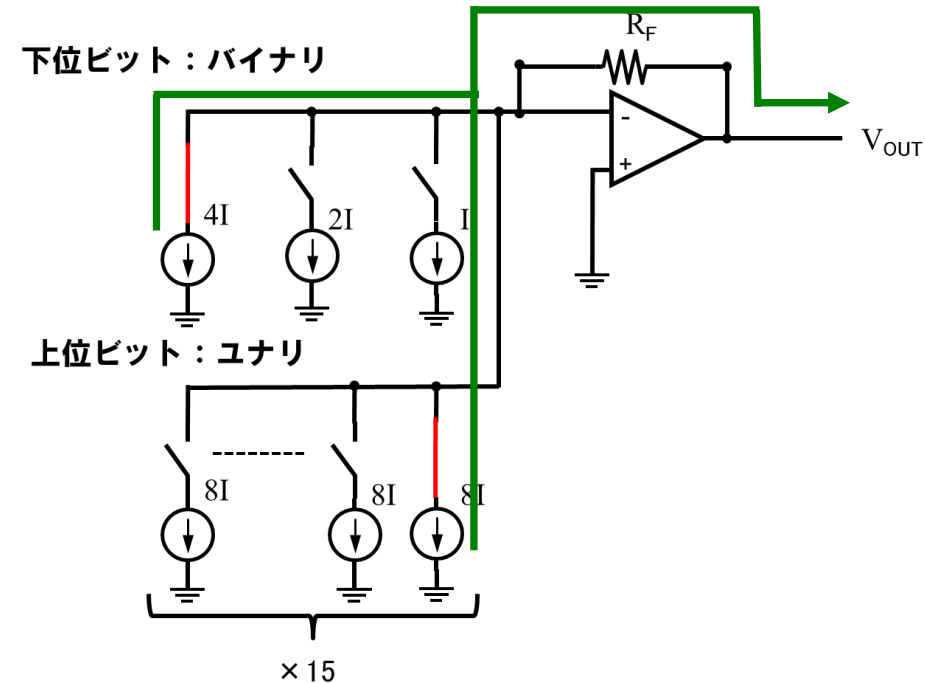


ex.2

(0001100)



$$V_{out} = 12IR_F$$



電流セル配列のレイアウト

◆ DA変換器の構成

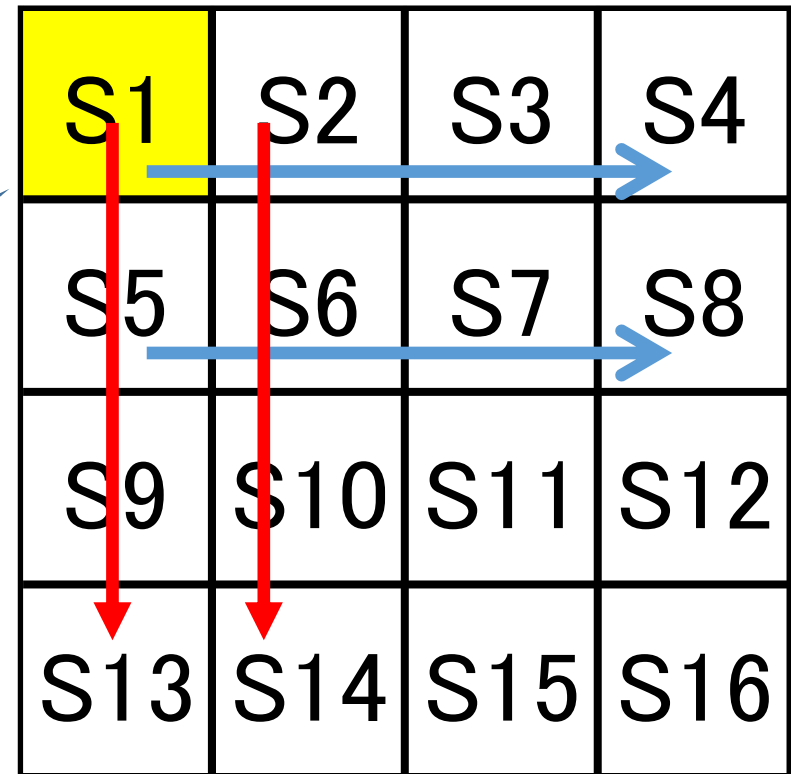
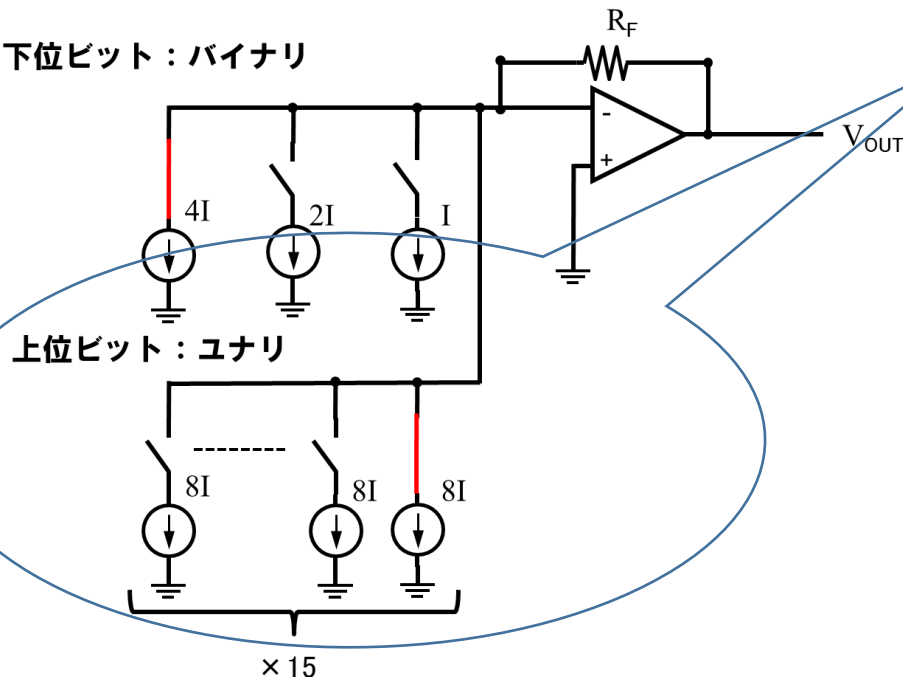
✓ 7bit DA変換器

(0001100)



$$V_{out} = 12IR_F$$

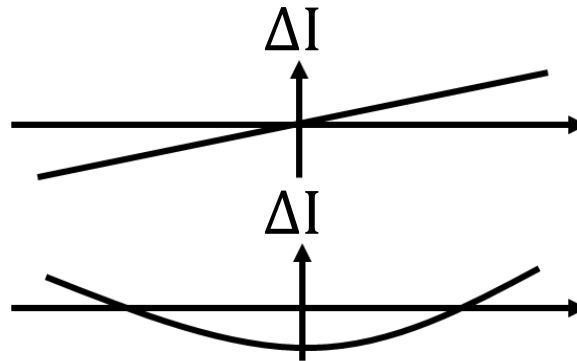
下位ビット：バイナリ



単位電流セル(ユナリ型)

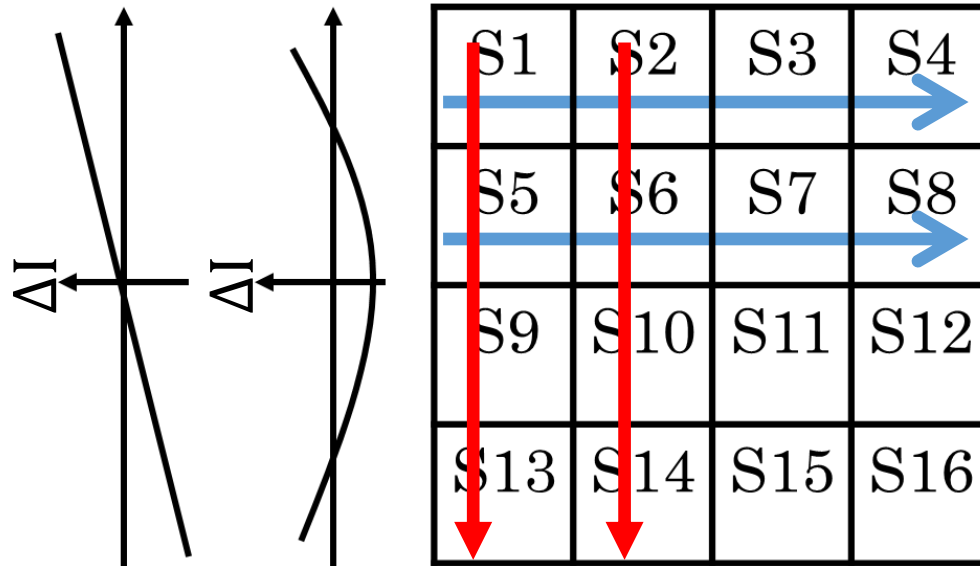
電流源配列のミスマッチ傾斜

◆ DA変換器 - システムティック・ミスマッチとレイアウト



1次の傾斜

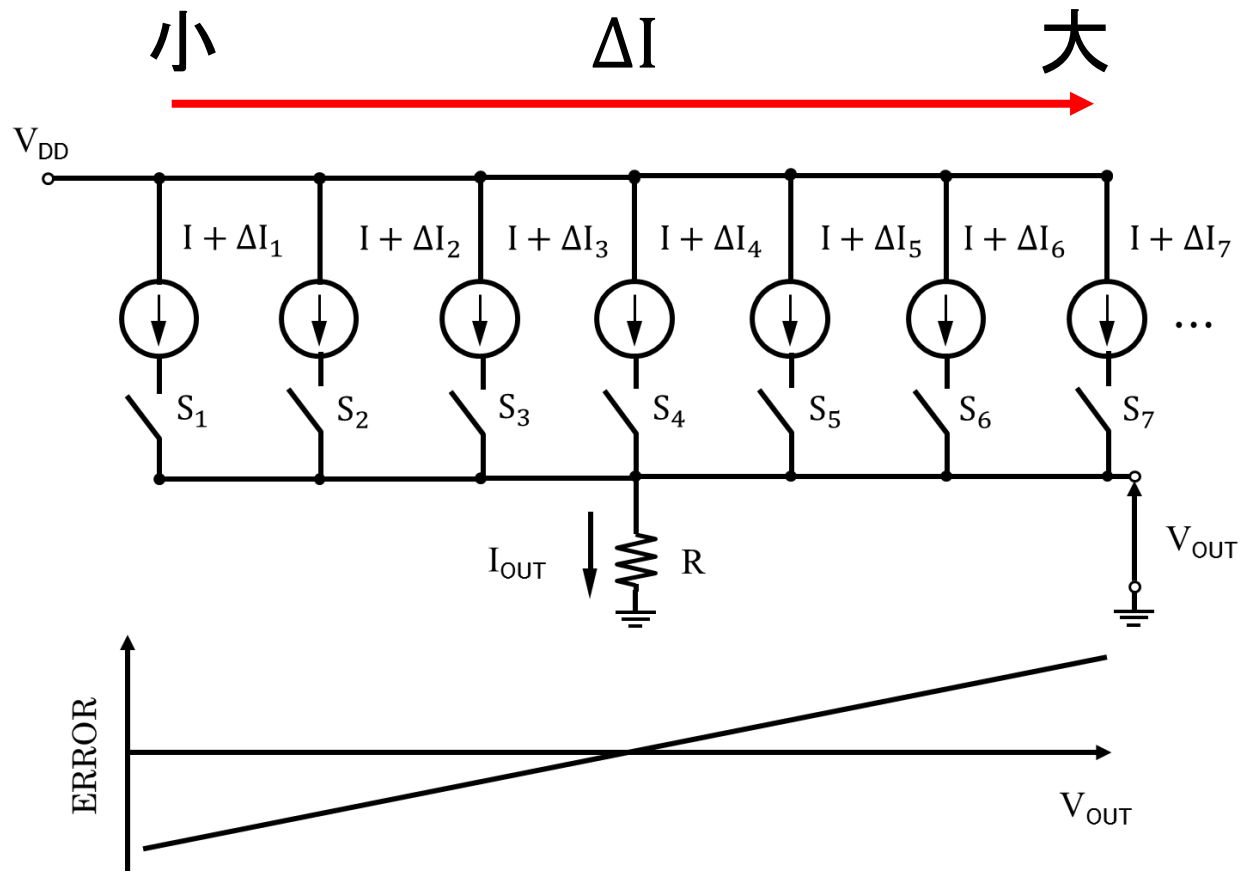
2次の傾斜



ミスマッチの傾斜が
そのまま出力信号へ

電流セル配列とDAC非線形性

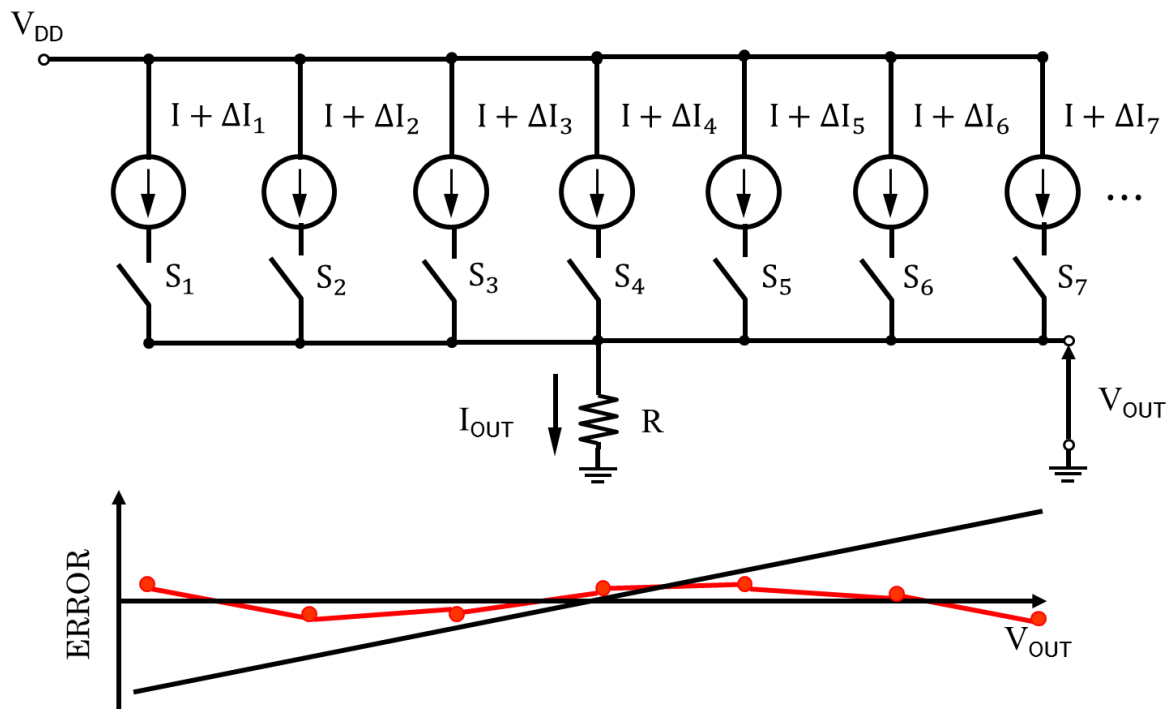
◆ DA変換器 - システムティック・ミスマッチとレイアウト



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

◆ DA変換器 - システマティック・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

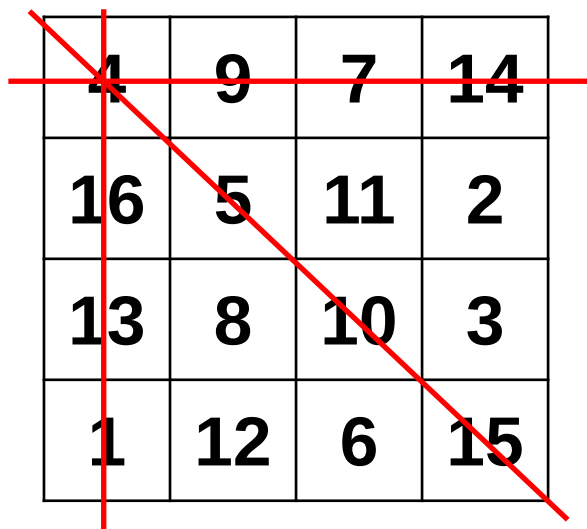
→ Random Walk

魔方陣による電流セル配列レイアウト

考案

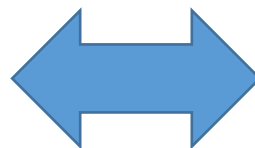
魔方陣によるレイアウト

定和性の一致



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

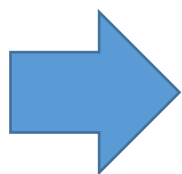
魔方陣



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)

魔方陣の「多様性」,「調和」,「奥深さ」,「美しさ」



DA変換器への応用

✓ システム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

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

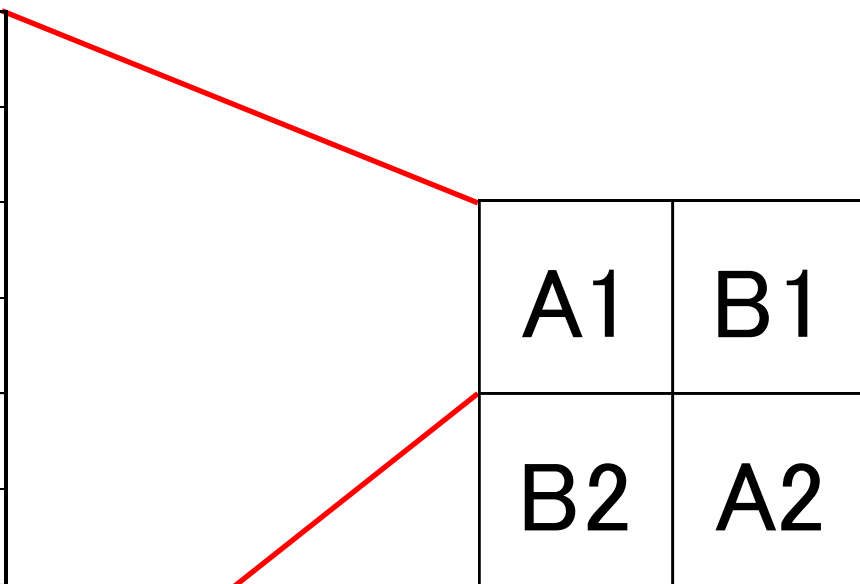
g_q : 変化量, a_0 : 位置

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

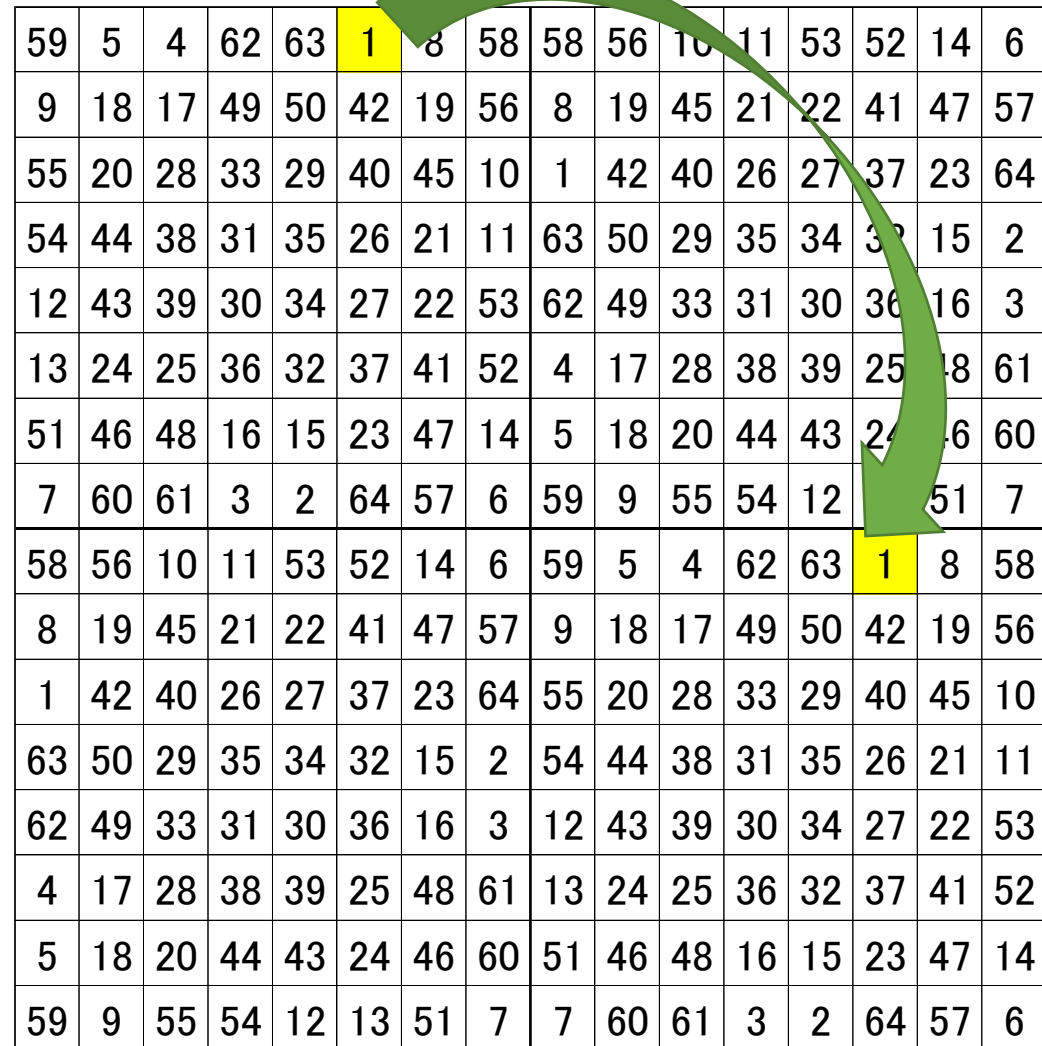
59	5	4	62	63	1	8	58	58	56	10	11	53	52	14	6
9	18	17	49	50	42	19	56	8	19	45	21	22	41	47	57
55	20	28	33	29	40	45	10	1	42	40	26	27	37	23	64
54	44	38	31	35	26	21	11	63	50	29	35	34	32	15	2
12	43	39	30	34	27	22	53	62	49	33	31	30	36	16	3
13	24	25	36	32	37	41	52	4	17	28	38	39	25	48	61
51	46	48	16	15	23	47	14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



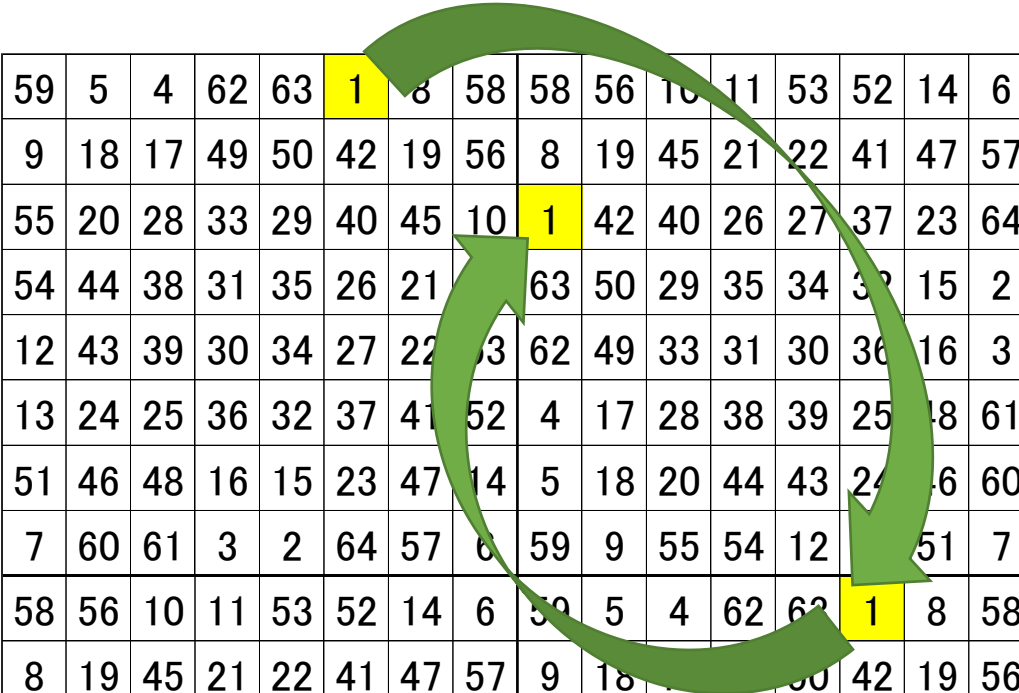
59	5	4	62	63	1	8	58	58	56	10	11	53	52	14	6
9	18	17	49	50	42	19	56	8	19	45	21	22	41	47	57
55	20	28	33	29	40	45	10	1	42	40	26	27	37	23	64
54	44	38	31	35	26	21	11	63	50	29	35	34	32	15	2
12	43	39	30	34	27	22	53	62	49	33	31	30	36	16	3
13	24	25	36	32	37	41	52	4	17	28	38	39	25	48	61
51	46	48	16	15	23	47	14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



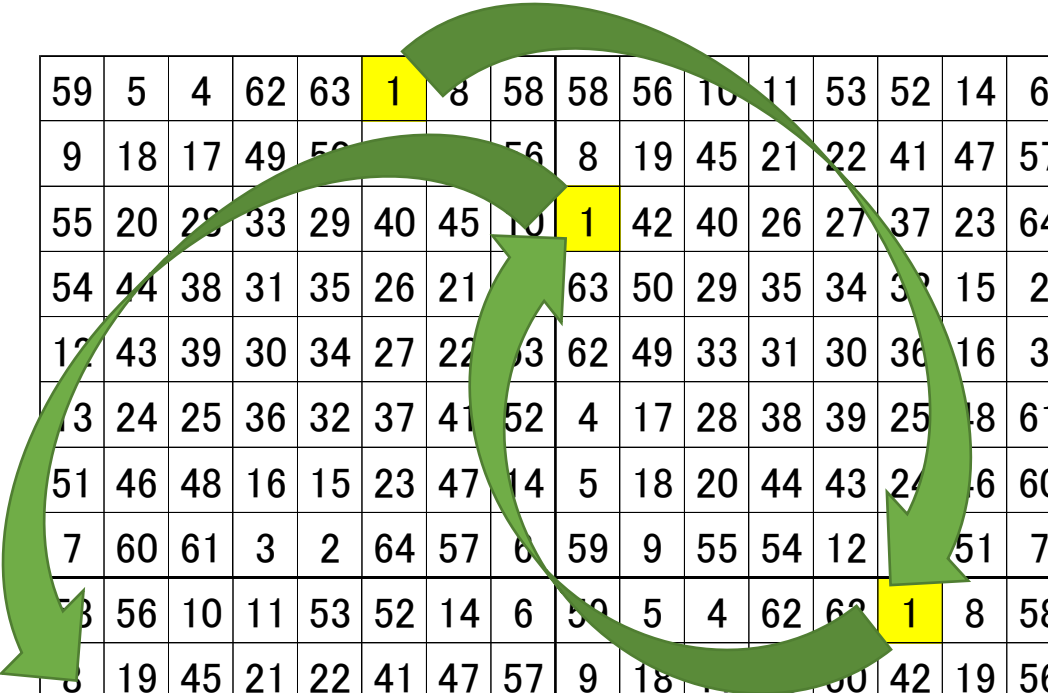
59	5	4	62	63	1	8	58	58	56	10	11	53	52	14	6
9	18	17	49	50	42	19	56	8	19	45	21	22	41	47	57
55	20	28	33	29	40	45	10	1	42	40	26	27	37	23	64
54	44	38	31	35	26	21	63	50	29	35	34	32	15	2	
12	43	39	30	34	27	22	63	62	49	33	31	30	36	16	3
13	24	25	36	32	37	41	52	4	17	28	38	39	25	48	61
51	46	48	16	15	23	47	14	5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

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			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	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		51	7
53	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(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	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	13	51	7
53	56	10	11	52	14	6	59	5	4	62	63	1	8	58	
9	18	17	49	50	56	8	19	45	21	22	41	47	57		
1	4	40	26	27	7	23	64	55	20	28	33	29	40	45	10
63	50	25	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(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

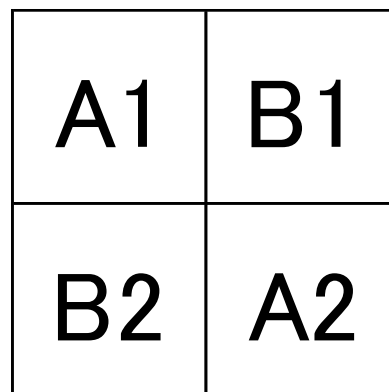
• アルゴリズム

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

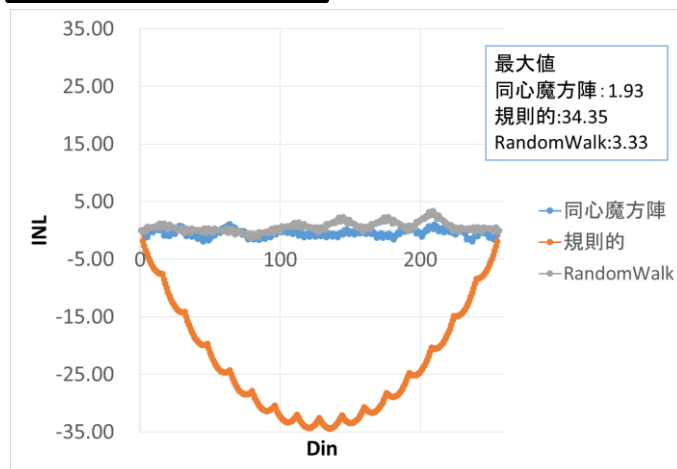
✓ Linear Error

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

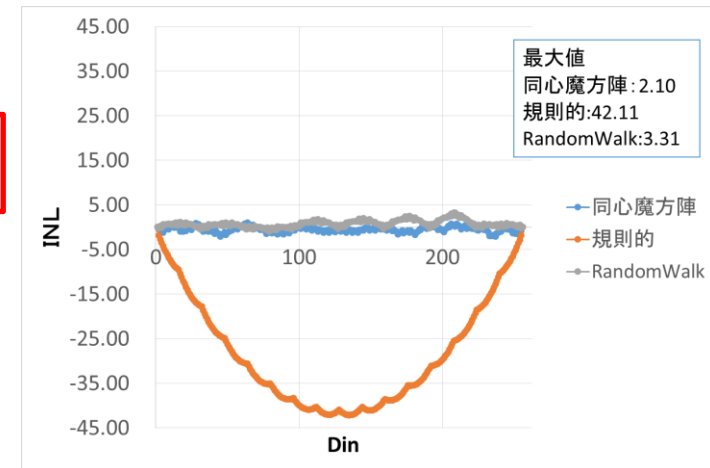
$$\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$$

$$g_l = 1$$

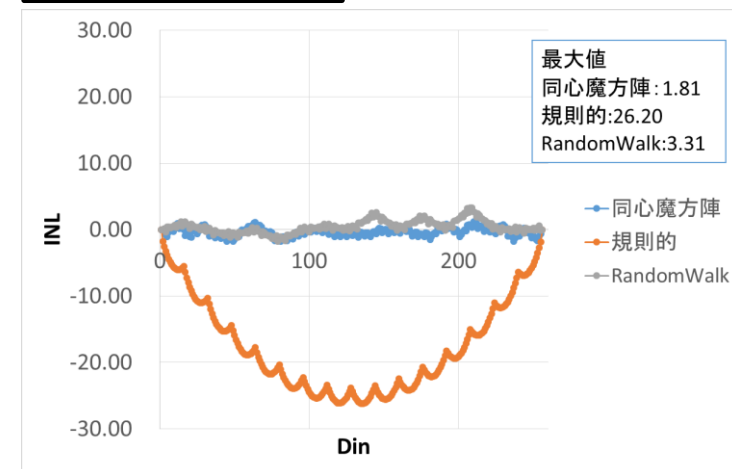
$$\theta = 45^\circ$$



$$\theta = 30^\circ$$



$$\theta = 60^\circ$$

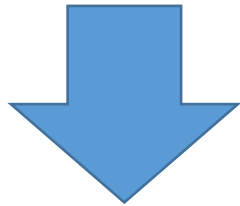


各魔方陣のシミュレーション方法・結果(11)

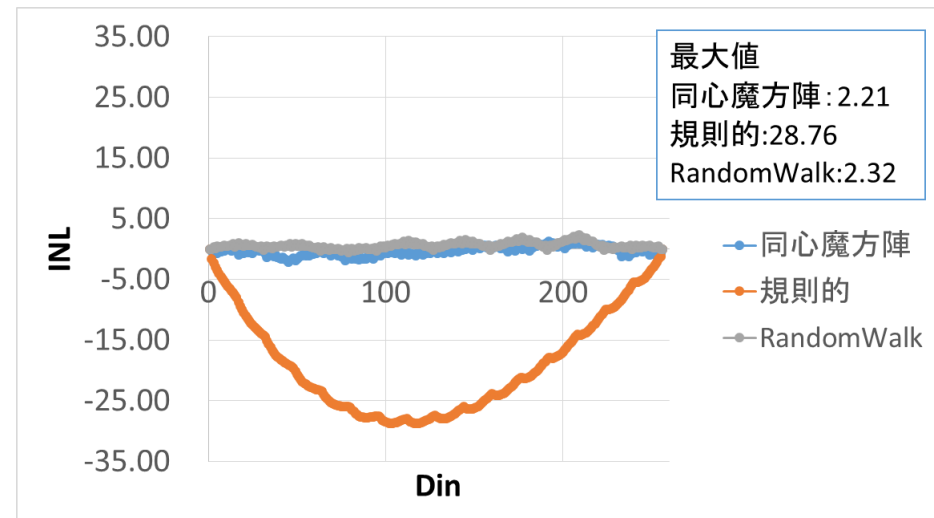
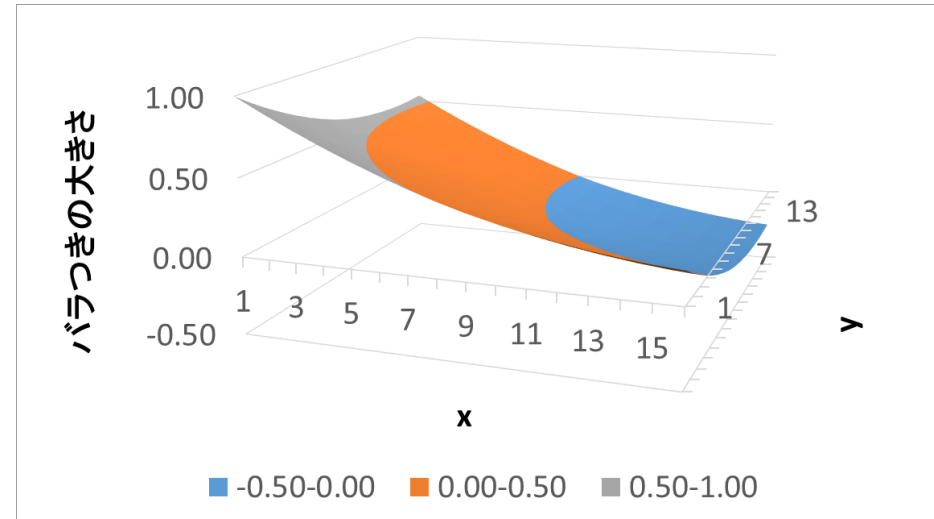
◆ 同心魔方陣

✓ Joint Error

一次 > 二次 の場合

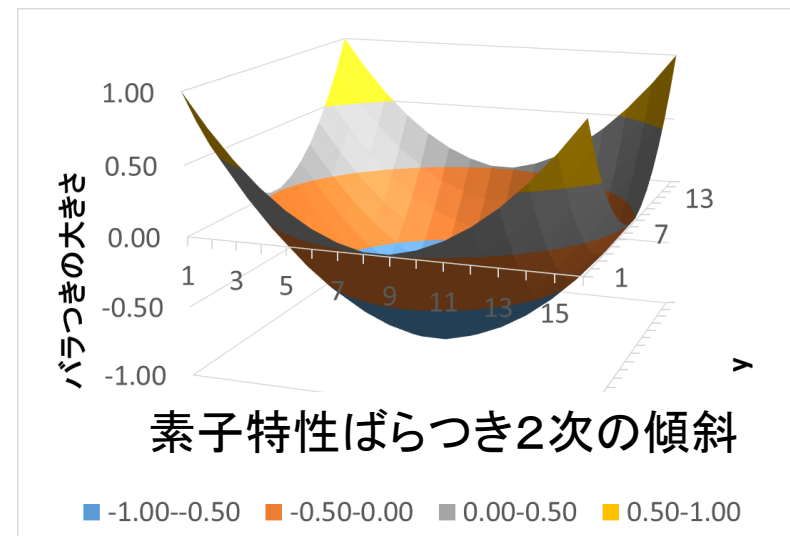
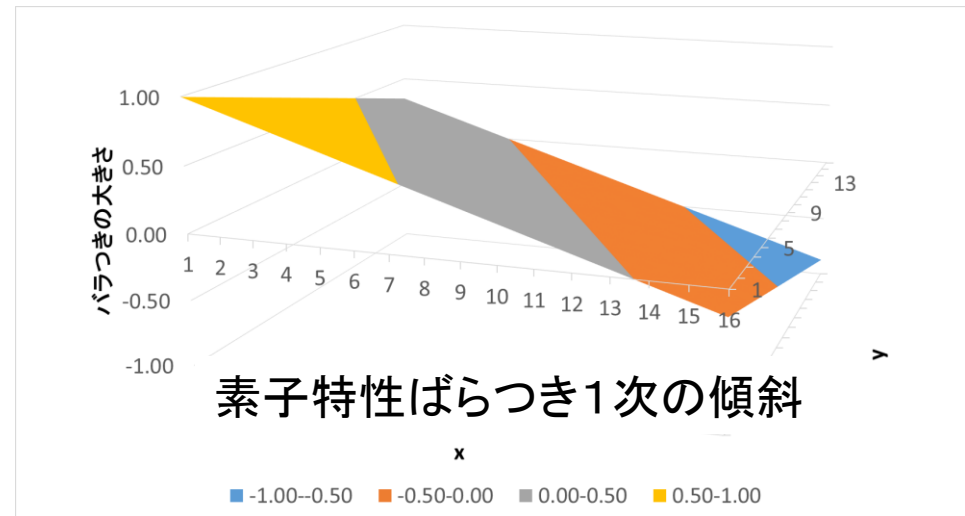


魔方陣の方が適している



魔方陣DA変換器レイアウト まとめ

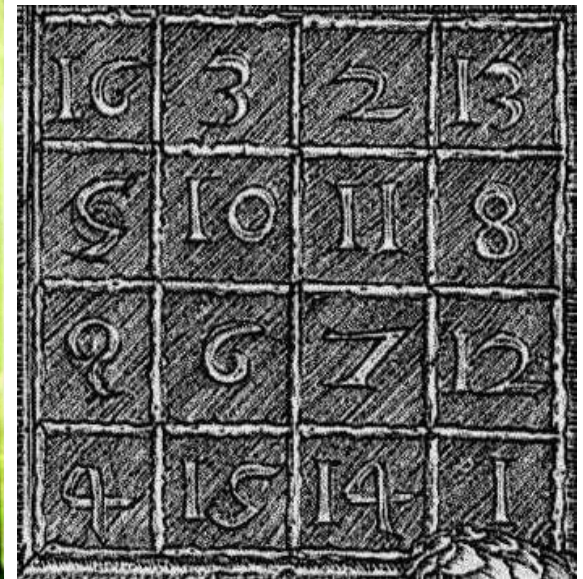
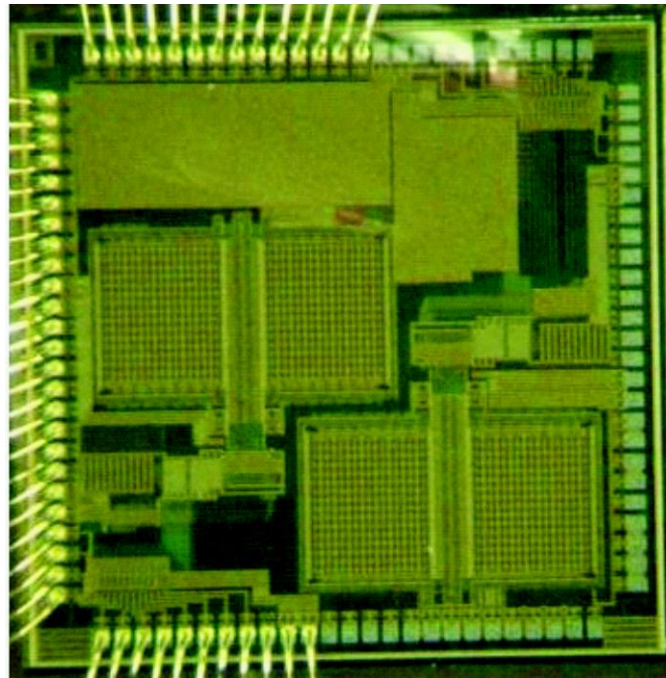
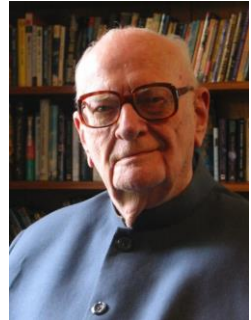
- 魔方陣レイアウトは
素子ばらつき1次の傾斜
キャンセルにより有効
- 他の2次元技術
(画像技術等)にも展開



まとめ

Any sufficiently advanced technology is
indistinguishable from **magic**.

(科学小説作家 Arthur C. Clarke の第3法則)



Magic (手品) と Magic Square (魔方陣) をかけています

- $n \times n$ array filled with n different symbols
- Each symbols occurring exactly once in each row and column



Example:

A	B	C
C	A	B
B	C	A

3×3 Latin square

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

4×4 Latin square

Leonhard Euler(1707-1783)
Swiss mathematician, physicist

レオンハルト・オイラー

Leonhard Euler 1707-1783



スイス生まれの数学者・物理学者、天文学者。
ロシアのサンクト・ペテルブルクや
ドイツのベルリンで活躍。

18 世紀最高の数学者。
ガリレオ・ガリレイ、アイザック・ニュートン、
アルベルト・アインシュタインとも比較される。

物理学者ファインマン： オイラーの公式を
「宝石」かつ「数学においてもっとも特筆すべき公式」と評価。

オイラーを読め、オイラーを読め、オイラーは我々すべての師だ！
(ラプラス)

オイラーの公式

- オイラーの公式

$$\exp(j\theta) = \cos(\theta) + j\sin(\theta) \quad \textcircled{1}$$

$$\exp(-j\theta) = \cos(\theta) - j\sin(\theta) \quad \textcircled{2}$$

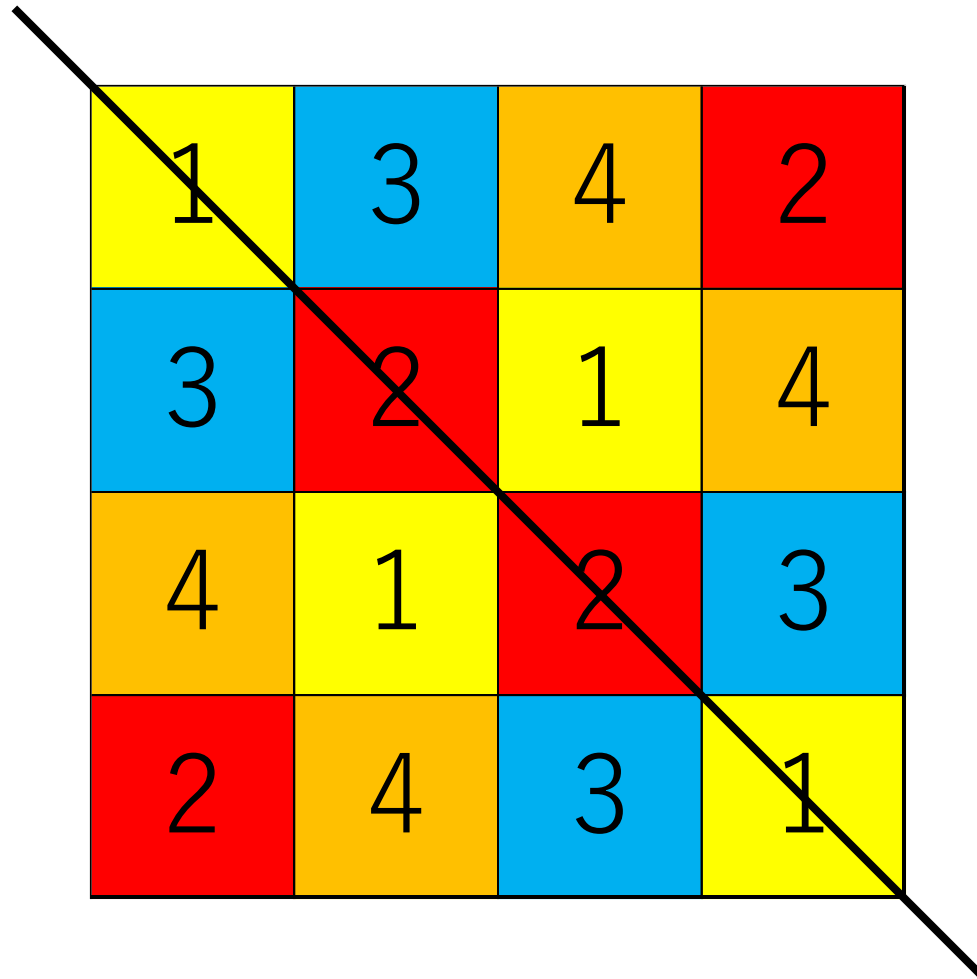
- 「数学で最も美しい公式」

$$\exp(j\pi) = -1$$

オイラーの公式①で $\theta = \pi$ の場合

小川洋子 「博士の愛した公式」 日本的小説

Common Centroid Layout



左右対称のレイアウト(重心を一致させる)

Latin Square layout

(1) 1,1	1,2	1,3	1,4
2,1	2,2	(3) 2,3	2,4
3,1	3,2	3,3	3,4 (4)
4,1	(2) 4,2	4,3	4,4

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

Latin Square layout

1,1	(2) 1,2	1,3	1,4
2,1	2,2	2,3	(4) 2,4
3,1	3,2	3,3	3,4
(1) 4,1	4,2	4,3	4,4

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

Latin Square layout

1,1	1,2	1,3	1,4
2,1	2,2	2,3	2,4
3,1	3,2	3,3	3,4
4,1	4,2	4,3	4,4

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

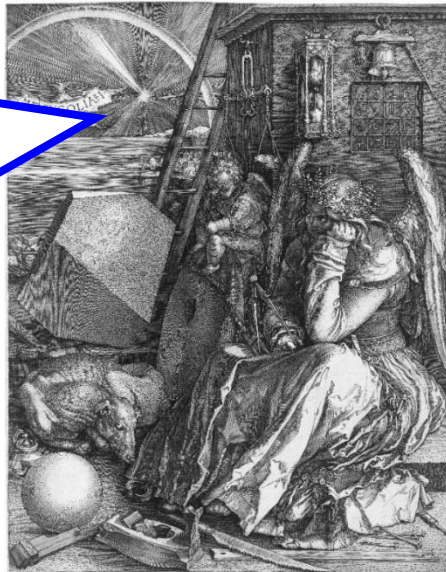
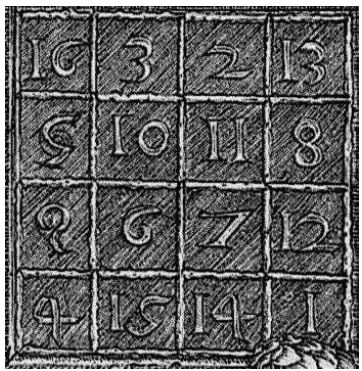


Latin Square も重心が一致してる
(他の配列も同様)

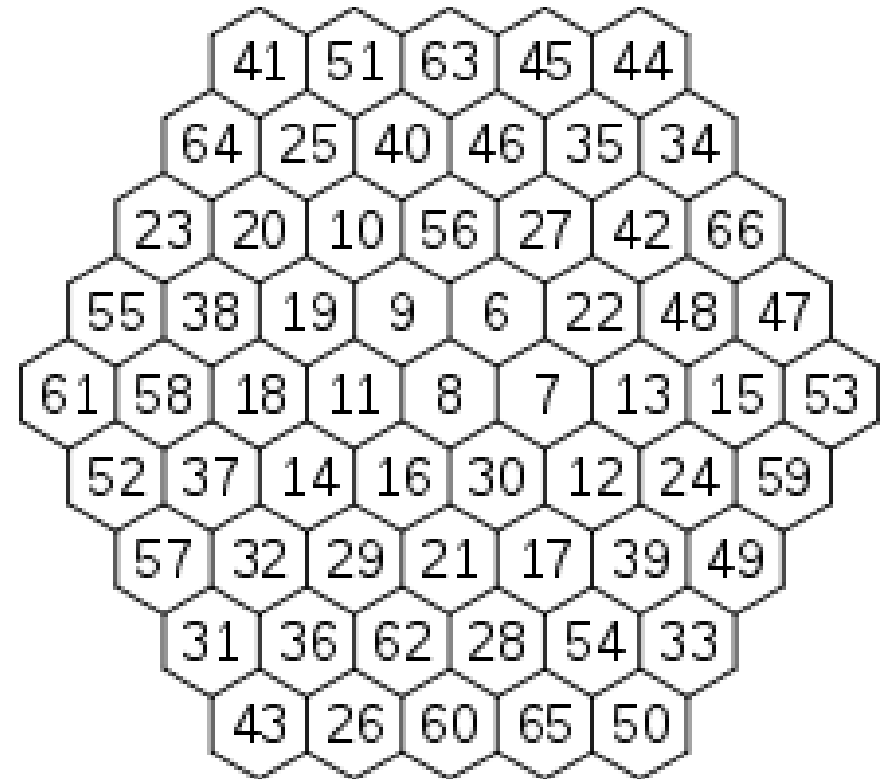
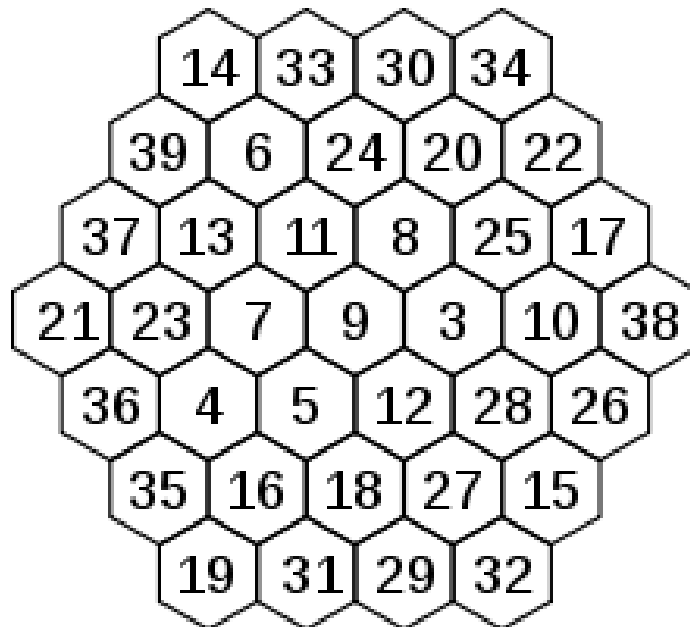
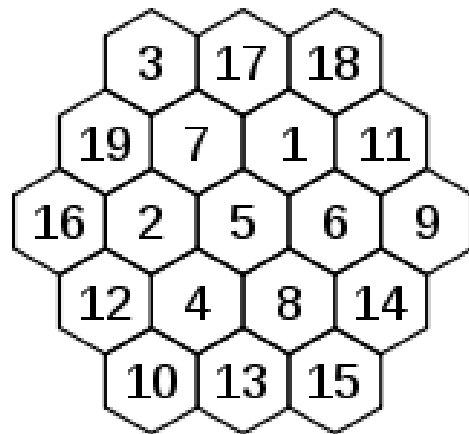
Final Statement

温故知新

Classical mathematics can contribute modern technology.



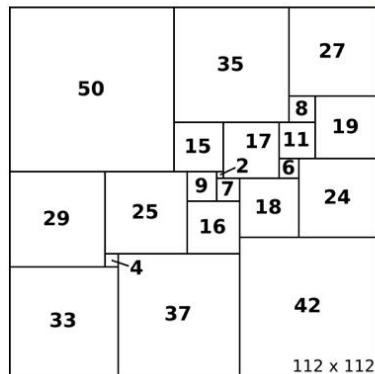
様々な魔方陣(続き 3) 魔六陣



正方形分割方陣

阿部楽方「正方形分割224魔方陣」(1991年)

正方形分割正方形

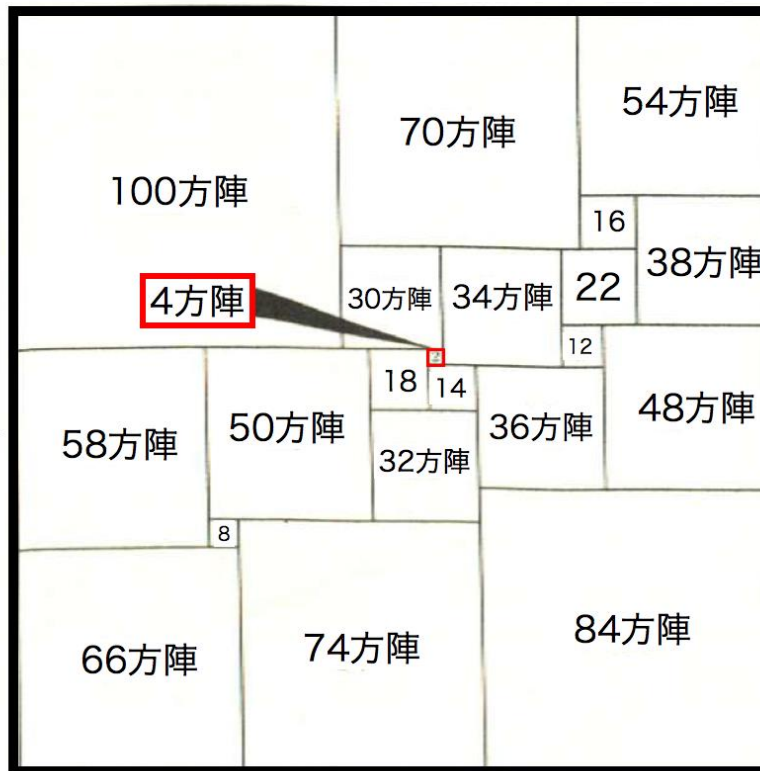


デゥイベスチジン

1978年

最小解

21個の1辺112



最小の正方形部分 (4方陣)

40388	40387	40386	40385	40418	10271
15186	15347	15354	34824	34829	10272
34987	34826	34827	15349	15352	10273
15191	15353	15348	34830	34823	10274
34960	34828	34825	15351	15350	39967
34983	15355	15363	34818	34819	34820

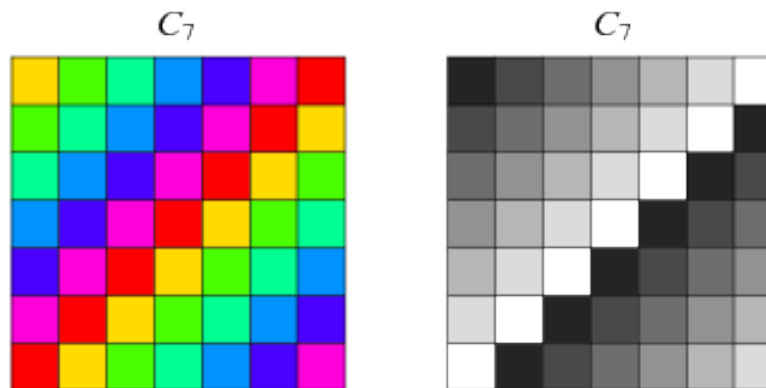
$$\begin{aligned}
 &15347+15354+34824+34829 \\
 &=34826+34827+15349+15352 \\
 &=15353+15348+34830+34823 \\
 &=34828+34825+15351+15350 \\
 &=100354
 \end{aligned}$$

全体が224方陣 1 から50176 ($=224 \times 224$) までの数字 定和 5619824

<http://ssfactory.sblo.jp/article/176431760.html>

ラテン方陣の他分野との関連

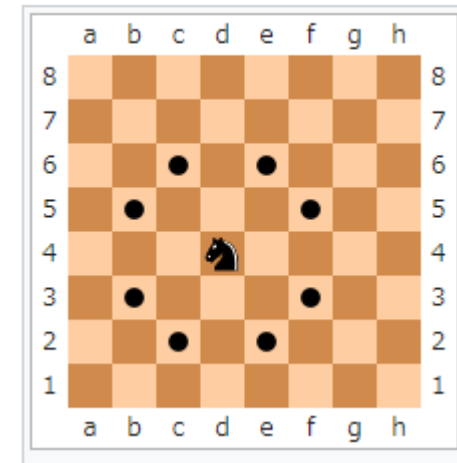
- ラテン方陣は
田口メソッドの直交表にも関係あるようだ。
- 巡回群
フェルマー最終定理証明にも関係しているようだ。



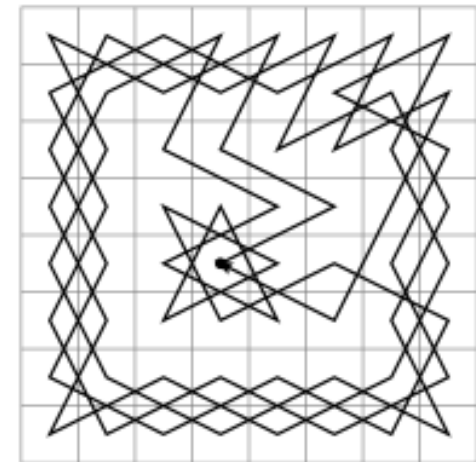
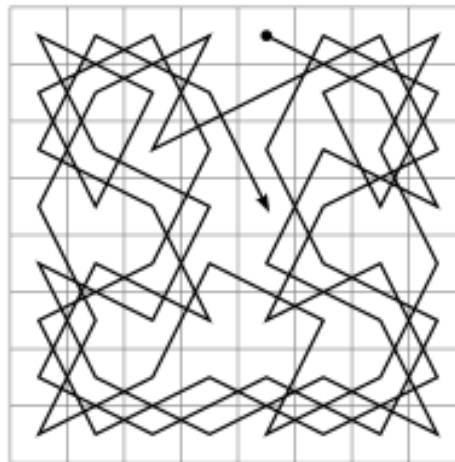
ナイト・ツアー (Knight Tour)

チェスを使った数学的パズルの一種。
「騎士の巡歴(じゅんれき)」 「桂馬拾い」
チェスボード上のナイトを移動させ、
64マス全てを一回ずつ通過

ナイトの基本的な動き



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



オイラーのナイトツアー
魔方陣にもなっている

ユナリ型 DA 変換器線形性向上のための 電流源並び替え魔方陣アルゴリズム

東野 将史* Shaiful Nizam Bin Mohyar 小林 春夫（群馬大学）

Unary DAC Linearity Improvement Algorithm with Unit Cell Sorting Based on Magic Square Properties

Masashi Higashino*, Shaiful Nizam Bin Mohyar, Haruo Kobayashi (Gunma University)

This paper proposes a switching algorithm using magic square properties to improve the linearity of a unary DAC by canceling random mismatch effects among unit current (or capacitor) cells. Simulation results and discussions are given for DAC linearity comparison when the proposed magic square and conventional algorithms are used.

キーワード：魔方陣，DA 変換回路，線形性，ミスマッチ
(Magic Square, DAC, Linearity, Mismatch)

1. はじめに

電子機器は高速化，小型化が求められており，ディジタル回路はそれらに適している。ディジタル化の進展に伴い，多くの電子機器にはディジタルアナログ変換器（Digital-to-Analog Converter：DAC, DA 変換器）が搭載されている。身の回りの信号（音声，画像，光など）はアナログ信号である。それらをディジタル信号処理するにあたり，AD 変換器及び DA 変換器が必要不可欠であり，高性能なものが求められている。しかし，半導体素子を構成しているシリコンウェハ上では，MOSFET 特性，R, C 値等に素子固有にランダムおよびシステマティックなばらつき。これにより，入出力信号は線形関係にあるはずが，素子のミスマッチにより線形性が劣化してしまう問題がある。

そこで本論文では，古典数学の一つである魔方陣（Magic Square）[1]を用いた電流源並び替えアルゴリズム [4][5]を考案し，ユナリ型 DA 変換器の線形性向上を検討した。通常ユナリ型 DA 変換器は，ディジタル入力されたバイナリ・コードを温度計コードに変換し，その数に応じた電流源セルを ON にしてアナログ値を得るものである。しかし，入力値に応じて単調にセルを ON にすると，電流源のミスマッチがそのまま出力されて線形性劣化を引き起こす [2][3]。そこで，魔方陣を用いて単位電流セル（または単位容量セル）を並び替えて，ランダムなミスマッチをキャンセルする方法を考案した。魔方陣の特性である「定和性」を用いることにより，一回の補正で高い線形性を得ることを実現した。これらのシミュレーション結果と考察を示す。

なお先に筆者らは電流源のシステマティックなばらつき

の影響を，それらのレイアウトを魔方陣の性質を用いてキャンセルする方式を提案したが [2][3]，この論文内容はランダムなばらつきの影響を電流源セルの選択順序を工夫することで低減するという，別のアルゴリズムである。

2. セグメント型 DA 変換器の構成と動作

DA 変換器は，バイナリ (Binary) 型とユナリ (Unary) 型があり，両者を組み合わせたものがセグメント型である（上位ビットをユナリ，下位ビットをバイナリ型で構成する）。バイナリ型とは，2 進数の要素を加算するものである。ユナリ型は，2 進数データを一旦デコードし，数値に変換してから単位要素をその個数分加算するものである。

〈2.1〉 バイナリ型 DA 変換器

電流源バイナリ型 DA 変換器を図 1 に示す。バイナリ型 DA 変換器は，N ビットのディジタル入力の各ビットを最上位ビット MSB (Most Significant Bit) から順に D_1, D_2, D_N とすると，出力が電流の場合は，出力電流 I_o は以下の式で表される。

$$V_{out} = R_L I \left(\frac{D_1}{2} + \frac{D_2}{2^2} + \dots + \frac{D_N}{2^N} \right) \quad (1)$$

つまり，2 進重み付けされた電流源もしくは電荷を用意し，この重み付けされた電流源もしくは電荷を，入力ディジタル信号の各ビットで加算するものである。

バイナリ型は素子数が最小であるため，小型化が可能である。しかし，バイナリ型 DA 変換器はコードの切り替えの際にグリッチが発生してしまう。また MSB に相当する素

子感度が高く素子のミスマッチがあると大きな誤差となってしまう。入出力特性の単調性も保証されない。

<2.2> ユナリ型 DA 変換器

電流源ユナリ型 DA 変換器を図 2 に示す。ユナリ型 DA 変換器は、最小単位の電流源を $2^N - 1$ 個用意し、ディジタル値に応じて加算することで DA 変換を実現する。

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_{2^N-1} \quad (2)$$

$$V_{out} = nIR_L \quad (3)$$

デコーダにより、2 進データをサーモメータ・コードにデコードし、そのディジタルデータに応じた単位要素分の電流源を ON にすることで、アナログ信号に直すものである。

ユナリ型は、素子のミスマッチがあっても、バイナリ型と比べて出力信号への影響が少ない。グリッチも小さく単調性も原理的に保証される。素子数が多くなってしまうのが欠点である。高線形性の DA 変換器を実現しようとする単位セル (図 2 の単位電流 I) 間の相対ミスマッチが問題になり、ここではこの影響を軽減する電流源並び替えのアルゴリズムについて論じる。

<2.3> セグメント型 DA 変換器

電流源セグメント型 DA 変換器を図 3 に示す。DA 多くの DA 変換器では、バイナリ型とユナリ型を組み合わせたものが用いられている。上位ビットには素子感度の低いユナリ型を用い、下位ビットでは、素子数の少ないバイナリ型が用いられる。これにより、高精度な DA 変換器を適正な回路規模・消費電力で実現できる。

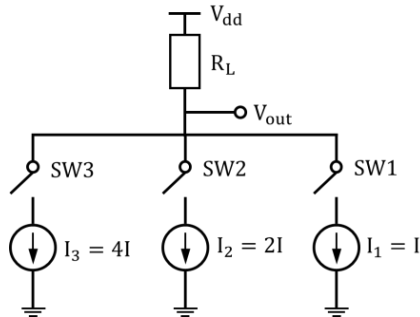


図 1 バイナリ型 DA 変換器

Fig. 1. Binary DAC circuit

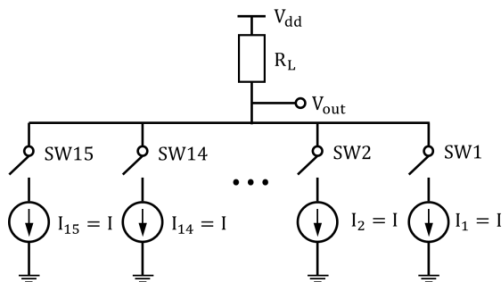


図 2 ユナリ型 DA 変換器

Fig. 2. Unary DAC circuit

3. DA 変換器の非線形性

回路を構成している素子は IC チップ上で特性の製造ばらつきが生じる。ここではそのランダムばらつきに注目する。これにより、DA 変換器の入力信号と出力信号は、理想的には完全に線形関係であるが、非線形になってしまう。電流源間のランダムなミスマッチによる DAC 非線形性への影響の詳細を示す。

<3.1> ランダムばらつき

単位電流源セルを構成している MOSFET のミスマッチは、しきい値電圧 ΔV_{th} または素子パラメータ $\Delta\beta$ によって生じる。理想的な電流源の値 I_d は以下の式で表される。

$$I_d = \frac{\beta}{2} (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (4)$$

β は以下の式で表される。

$$\beta = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \quad (5)$$

しかし、実際の電流源では僅かにミスマッチが生じる。ミスマッチは以下の式で求められる。

$$\frac{\Delta I_d}{I_d} = \frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{2\Delta V_{th}}{V_{gs} - V_{th}} \quad (6)$$

電流値が小さい場合には、以下の式で簡略化される。

$$\frac{\Delta I_d}{I_d} = \frac{2}{V_{gs} - V_{th}} \frac{\Delta V_{th} t_{ox}}{\sqrt{WL}} \quad (7)$$

電流値が大きい場合には、以下の式で表される。

$$\frac{\Delta I_d}{I_d} = \frac{\Delta\beta}{\beta} \frac{1}{\sqrt{WL}} \quad (8)$$

(6), (7) 式より、電流源のミスマッチは MOSFET のサイズ $\sqrt{WL}$ に依存することが分かる。

ミスマッチの軽減は、トレード・オフの関係にある。その一つは、MOSFET のプロセスにおいて、電流源のミスマッチはゲート酸化膜を薄くすると軽減される。が、薄い参加膜厚のプロセスでは電源電圧を低減しなければならず、大きなバイアス電流を必要としたときに信号雑音比 (S/N 比) が劣化する。もう一つは、しきい値電圧のミスマッチとデバイスサイズの関係である。ゲートサイズ (WL) を大きくすることにより、オフセット電圧を軽減できるが、チップ面積・寄生容量が大きくなり、大きなバイアス電流が必要となる。ここでは、小さなデバイスサイズによる電流源ミスマッチの影響を製造後に軽減する手法を考える。

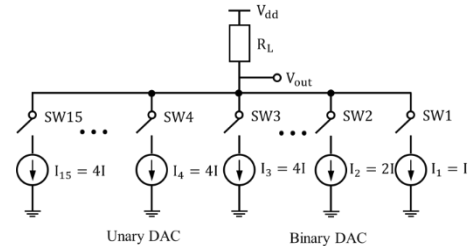


図 3 セグメント型 DA 変換器

Fig. 3. Segmented DAC circuit

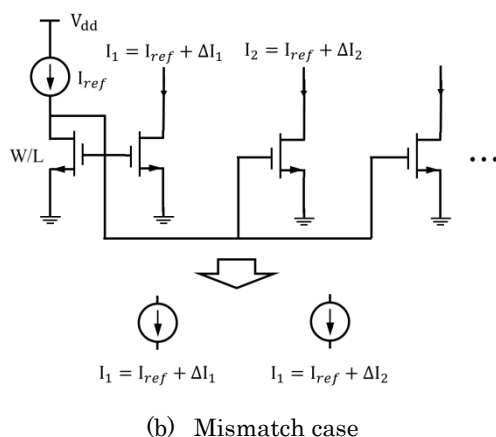
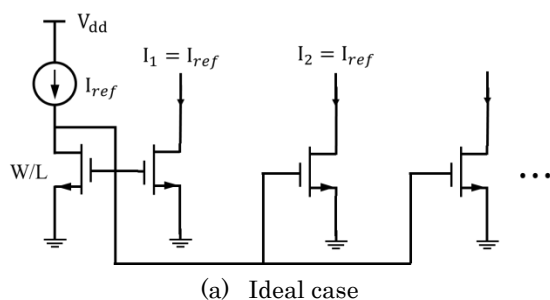


図 4 電流源のマッチング

Fig.4. Matching of current sources

4. 魔方陣について

魔方陣には、各行・列・対角成分の要素の和が全て一定である性質をもつ。この性質から、ユニナリ型 DA 変換器の単位セルの配列のバランスがよいことが期待できるので、DA 変換器での電流源並び替えアルゴリズムへの適用を検討した。魔方陣の性質について説明する[1]。

〈4・1〉 魔方陣の性質

魔方陣とは、1 から始まる連続した異なる自然数を $n \times n$ 基盤の目状に並べ、各行、列及び対角線上の数の和が全て等しいもの(定和性)である。各行、列、対角線上に含まれる数が n 個であることから、一般 $n \times n$ である魔方陣を n 次の魔方陣あるいは n 次方陣と呼ぶ。 n 次方陣の各行、列、対角線要素の定和 S は、以下の式で表される。

$$S = \frac{n^2(n^2+1)}{2} \quad (9)$$

図 7 に示す魔方陣は、各行・列・対角成分の要素の和が全て一致していることが確認できる。

定和性を用いて、電流源ユニナリ型 DA 変換器の電流源並び替えのアルゴリズムを考案した。これにより、プロセスにより生じるミスマッチの影響の軽減が期待できる。

2	9	4
7	5	3
6	1	8

図 5 魔方陣での定和性の一致

Fig. 5. Equivalent constant sum characteristics.

5. 魔方陣を用いた電流源並び替えアルゴリズム

この節では、魔方陣を用いたユニナリ型 DA 変換器の電流源並び替えアルゴリズムによる非線形性補正を説明する。

通常のユニナリ型 DA 変換器は、デコーダにより 2 進データに変換し、サーモメータ・コードに従ってアナログ値を出力する。しかし単調性によりミスマッチがそのまま出力へ影響してしまう。そこで魔方陣を用いた電流源並び替えアルゴリズムにより、一回の電流源並び替えにより DA 変換器の電流源によるミスマッチ軽減し、非線形性を改善する。最適なスイッチングアルゴリズムにより、高調波成分を低減し SFDR の向上を可能とする。

〈5・1〉 提案アルゴリズム

例として 4bit のユニナリ型 DA 変換器を用いて、以下に提案アルゴリズムを説明する(図 6)。

- ① 各電流源はランダムなばらつきを持つとする。
- ② 電流源の大きさを測定回路より各電流源セルの大小関係を測定し、大きさ順に分類する(図 6(a))。(電流値の正確な測定は不要で、大小関係だけでよい。)
- ③ 電流源の値の順番と魔方陣の升目を対応させる。例えば、一番小さな値を持つ電流源は魔方陣の 1 のセルに対応し、2 番目に小さな値を持つ電流源は魔方陣の 2 セルへ、 n 番目の大きさの電流源は、魔方陣の n のセルに対応させる(図 6(b))。
- ④ 魔方陣に対応した電流源セルを定和性に従い、デジタル入力に対応した電流源セルを ON にしてアナログ値を出力する。

魔方陣の特性である定和性は、常に升目の和が一定であることである。定和性に従って電流源を並び替えることにより、ミスマッチのバランス良いキャンセルが期待できる。魔方陣の升目に着目する。図 6(b) の 4 次方陣の 1 行目を見ると、隣り合う 2 数の和は 16 ($=1+15$) と 18 ($=14+4$) であり、ほぼ等しい事が分かる。他の行または列においても同様である。定和性による電流源並び替えは、大小のミスマッチを持つ電流源を交互にスイッチングするアルゴリズムになり、ミスマッチをキャンセルする。図 7 に従来方法であるサーモメータ・コードによるデコーダと、提案する魔方陣によるルックアップテーブル(Look-up table : LUT)によるデコーダを示す。

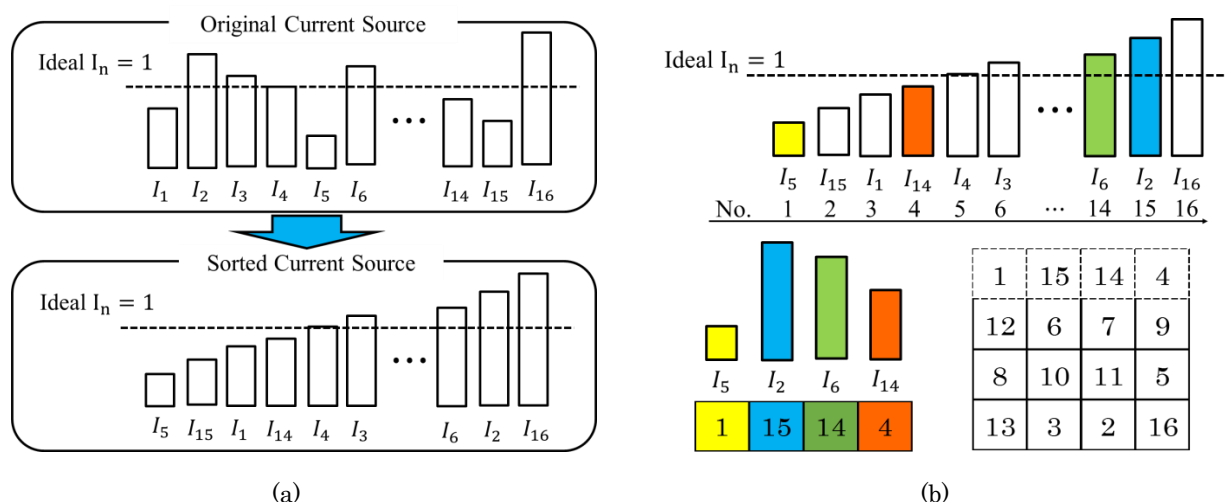


図6 魔方陣による電流源並び替えアルゴリズム

Fig.6. Sorting algorithm based on magic square

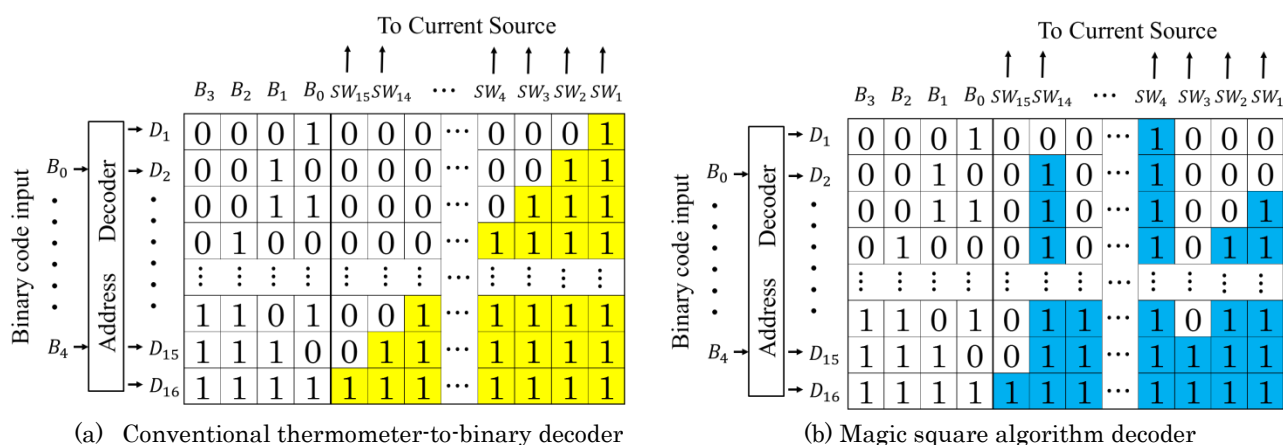


図8 LUTを用いたデコーダ

Fig.8. LUT-based decoder

〈5・2〉補正アルゴリズム

電流源セル間の大小関係を測定し、並び替えるアルゴリズムを示す(図9)。

- ① デジタル補正回路を制御する CPU で、テストコードを入力する。
- ② 電流測定回路により、各電流源セルの値を測定する。
- ③ 全ての測定値をメモリに保存する。
- ④ 保存した測定値は、デジタル補正回路に送る。
- ⑤ 電流源の値の大きさ順に、魔方陣のセル番号を対応させる。魔方陣によるスイッチング順序をメモリに保存する。

尚、ここでの「電流源並び替え」は、デコーダにより各電流源選択の選択順番を変更することである。

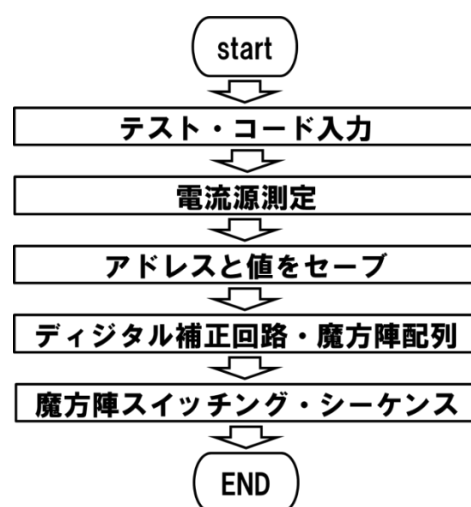


図9 DAC 非線形補正アルゴリズム

Fig.9. DAC nonlinearity calibration algorithm

6. シミュレーション結果

8bit ユナリ型 DA 変換器の DC 線形性解析及びパワースペクトル解析のシミュレーションを行った。DC 線形性解析では従来のサーモメータ・コードによるものと、魔方陣を用いた電流源並び替えの非積分直線性誤差(INL)と非微分直線性誤差(DNL)の比較を行った。パワースペクトル解析では、基本波と最大スプリアスパワーの比である SFDR を求めた。今回使用した魔方陣を図 10 に示す。魔方陣は、Matlab シミュレーションにより算出した。

電流源のミスマッチの条件を以下の様に設定した。

- ① ΔI の総和が 0 になるような $-1 \sim +1$ の間で乱数
- ② ΔI が $-1 \sim +1$ の間の乱数

以上の条件で、各セルにミスマッチ ΔI を割り当てた。①のシミュレーション結果を図 11～14 に、②のシミュレーション結果を図 15～18 に示す。

〈6・1〉 DC 線形性特性評価

DC 線形性特性の評価について考える。

INL は、出力伝達特性と線形近似直線との類型誤差を示す指標である。図 10 の INL 評価より、魔方陣を用いた電流源並び替えを行うことで 5.69LSB 減少している。

DNL は、隣接コード間 DA 変換器出力電圧差の線形近似直線から求めた量子化ステップサイズに対する均一性を表す指標である。DNL では量子化ステップサイズ V_{LSB} の決定方法が、DNL の結果に影響する。図 11 の DNL は、両者とも同等の値であった。

INL と DNL の解析結果より、魔方陣を用いた電流源並び替えを適用することにより、線形性が改善されたことが分かる。特に D_{in} の中心値付近 ($D_{in}=122$ 付近) では、INL 及び DNL がほぼ 0 であることが分かる。これより、出力を中心値付近で利用する DA 変換器では高い線形性が得られること期待できる。

〈6・2〉 パワースペクトル特性評価

パワースペクトル解析では、SFDR による評価を行った。SFDR 評価は、高速フーリエ変換(FFT)により得られたスペクトラムの基本波と最大スプリアスの比で表される。図 12 にサーモメータ・コードで DA 変換を行った時の結果を示す。この時の SFDR は 14.8dB であった。魔方陣を用いた電流源並び替えを行った時の SFDR は、22.0dB であった。これより、魔方陣アルゴリズムを適用により SFDR の 7.5dB 向上が確認できた。

図 15-18 に電流源ミスマッチの他のパターンを与えたときのシミュレーション結果を示す。提案アルゴリズムで線形性, SFDR が向上していることが確認できる。

256	2	3	253	252	6	7	249	248	10	11	245	244	14	15	241
17	239	238	20	21	235	234	24	25	231	230	28	29	227	226	32
33	223	222	36	37	219	218	40	41	215	214	44	45	211	210	48
208	50	51	205	204	54	55	201	200	58	59	197	196	62	63	193
192	66	67	189	188	70	71	185	184	74	75	181	180	78	79	177
81	175	174	84	85	171	170	88	89	167	166	92	93	163	162	96
97	159	158	100	101	155	154	104	105	151	150	108	109	147	146	112
144	114	115	141	140	118	119	137	136	122	123	133	132	126	127	129
128	130	131	125	124	134	135	121	120	138	139	117	116	142	143	113
145	111	110	148	149	107	106	152	153	103	102	156	157	99	98	160
161	95	94	164	165	91	90	168	169	87	86	172	173	83	82	176
80	178	179	77	76	182	183	73	72	186	187	69	68	190	191	65
64	194	195	61	60	198	199	57	56	202	203	53	52	206	207	49
209	47	46	212	213	43	42	216	217	39	38	220	221	35	34	224
225	31	30	228	229	27	26	232	233	23	22	236	237	19	18	240
16	242	243	13	12	246	247	9	8	250	251	5	4	254	255	1

図 10 シミュレーションでユナリ型に使用した魔方陣

Fig.10. Simulated unary DAC by magic square

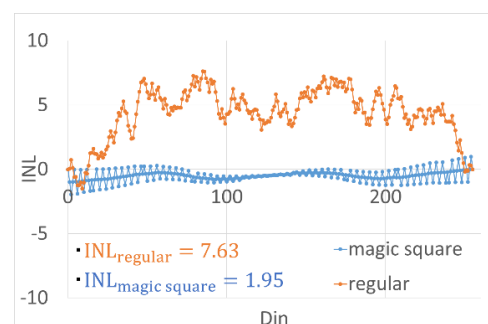


図 11 シミュレーションによる DA 変換器の INL 評価

Fig.11. Simulated DAC INL (case 1)

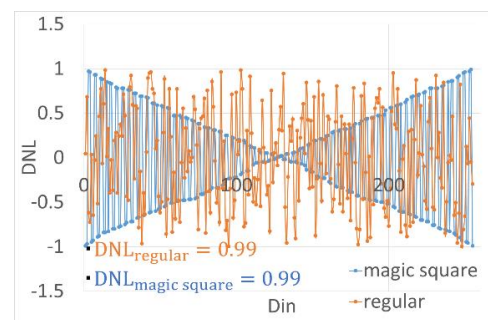


図 12 シミュレーションによる DA 変換器の DNL 評価

Fig.12. Simulated DAC DNL (case 1)

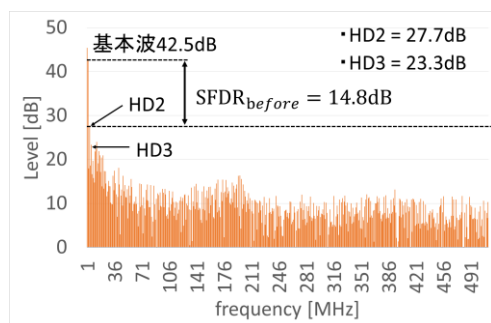


図 13 提案アルゴリズムを適用していないとき
DA 変換器出力スペクトル

Fig.13. Simulated DAC output power spectrum
without the proposed algorithm (case 1)

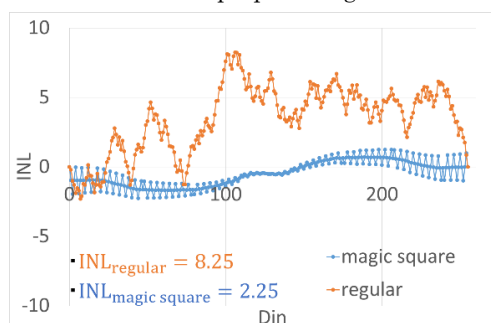


図 15 シミュレーションによる DA 変換器の INL 評価
Fig.15. Simulated DAC INL (case 2)

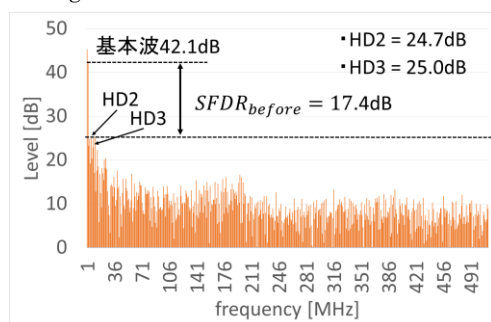


図 17 提案アルゴリズムを適用していないとき
DA 変換器出力スペクトル

Fig.17. Simulated DAC output power spectrum
without the proposed algorithm (case 2)

7. まとめ

本研究では、古典数学の一つである魔方陣を用いて、DA 変換器を構成するユニットセル電流源間のミスマッチの影響をキャンセルする電流源並び替えアルゴリズムを検討した。従来方法であるサーモメータ・コードによるデコードを行うと、単調性により電流源のミスマッチが入出力にそのまま影響してしまい、線形性劣化を引き起こしてしまう。そこで、魔方陣による電流源並び替えにより線形性を改善することをシミュレーションで確認した。また、パワースペクトル解析では SFDR 評価を行った。魔方陣アルゴリズムにより、高調波成分を軽減することを確認した。

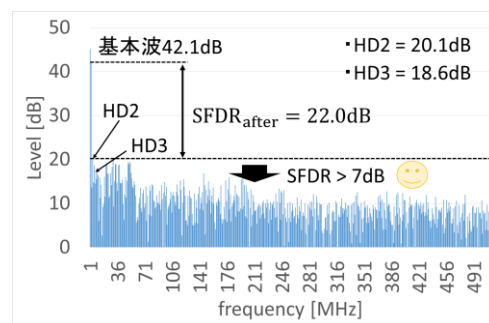


図 14 提案アルゴリズムを適用したときの
DA 変換器出力スペクトル

Fig.14. Simulated DAC output power spectrum
with the proposed algorithm (case 1)

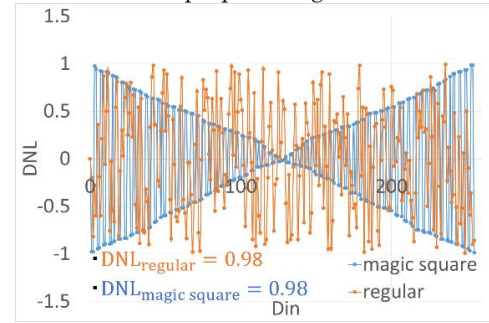


図 16 シミュレーションによる DA 変換器の DNL 評価
Fig.16. Simulated DAC DNL (case 2)

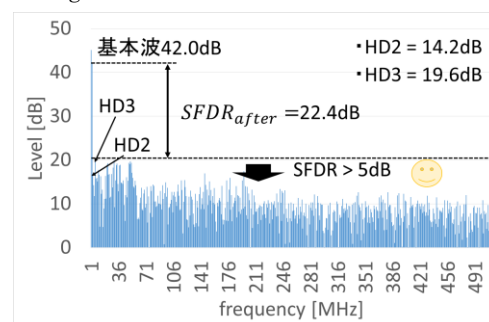


図 18 提案アルゴリズムを適用したときの
DA 変換器出力スペクトル

Fig.18. Simulated DAC output power spectrum
with the proposed algorithm (case 2)

文 献

- (1) 大森清美「魔方陣の世界」, 日本評論社 (2013 年 8 月).
- (2) 東野将史, 小林春夫, “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”電気学会電子回路研究会, 秋田(2014 年 10 月)
- (3) 東野将史, 小林春夫, “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” 第 5 回電気学会 東京支部 栃木・群馬支所合同研究発表会, 宇都宮(2015 年 3 月)
- (4) Shaiful Nizam Mohyar, Masahiro Murakami, Atsushi Motozawa Haruo Kobayashi, Osamu Kobayashi, Tatsuji Matsuura “SFDR Improvement Algorithms for Current-Steering DACs”, Key Engineering Materials, pp.101-108 (2015).
- (5) Shaiful Nizam Mohyar, Haruo Kobayashi, “Digital Calibration Algorithm for Half-Unary Current-Steering DAC for Linearity Improvement”, 11th International SoC Design Conference, Jeju, Korea (Nov. 2014)