国立情報学研究所
市民講座

コンピュータ は どうやって動くのか？

コンピュータ のしくみ　～スマホ から スパコン まで～

五島 正裕

DATE : 2016/08/25

概要

概要（コピペ）

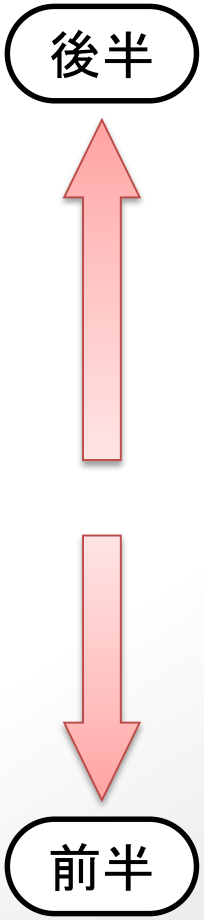
今やコンピュータは身の回りに溢れかえっています．ところがコンピュータは，ほぼ完全な「ブラック・ボックス」です．そのしくみをちゃんと理解して使っている人は，実は，情報のプロの中にもほとんどいません．

しくみをちゃんと理解するには，大学の情報系の学部でも2年はかかり，数時間の講義ではまったく不可能なことです．

そこでこの講義では，基礎から応用まで，以下のようなトピックをつまみ食いして，コンピュータはどうやって動いているのか，何となく分かったような気になることを目標とします．

大学・大学院 カリキュラム と 本日の内容

学年	講義名	本日の内容
大学院	アーキテクチャ 特論	スーパーコンピュータ
学部 3年	学生実験 コンピュータを作る	？
	コンピュータ（計算機） アーキテクチャ	
学部 2年	ディジタル回路 （論理回路）	二進数，加算器
	電子回路	トランジスタ，半導体



つまみ食い の ポイント

- 前半:
  - 0 と 1 で動くってどういうこと？
  - なぜ半導体で作るの？
- 後半:
  - コンピュータって，たとえて言えば？
  - x86 とか ARM アーキテクチャ って何？
  - スパコン，ポスト「京」のポイントは？

二進数

位取り（くらいどり）

- （大きな）数字をどのように（書き）表すか？
  - 各言語の伝統的な記数法
    - 千九百六十八
    - one thousand nine hundred sixty eight
  - 位取り記数法
    - 1968
- 位取り記数法のメリット
  - 数字を単純に並べて表す
    - 短い
    - 大きい位を表す単語を定義しなくてよい
      - （億・兆・京・…，million・billion・trillion・…）

n 進表現

十進表現

各桁は 0, 1, 2, 3, …, 8, 9 の十種類

千 + 九百 + 六十 + 八 ＝ 千九百六十八

1 9 6 8

一の位

十の位

百の位

千の位

二進表現

各桁は 0, 1 の二種類

八 ＋ 一 ＝ 九

1 0 0 1

一の位

二の位

四の位

八の位

二進数の加算

```
  0      0      1      1
+) 0   +) 1   +) 0   +) 1
---    ---    ---    ---
  0      1      1     1 0
```

桁上げ　部分和

```
    1      1 1    1 1    1 1
  0 1    0 1    1 1    1 1
+) 0 1 +) 1 1 +) 0 1 +) 1 1
-----  -----  -----  -----
  1 0    1 0 0  1 0 0  1 1 0
```

← 桁上げ

- 十進で 999 + 1
- 二進で 111 + 1
- で，桁上がりが走る感じを説明

加算器 の 真理値表

桁上げ　部分和

x	y	c_{out}	s
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

半加算器 (half adder)

十進数だと，百行！

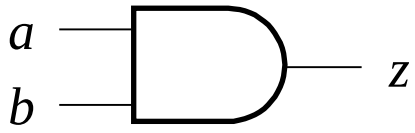
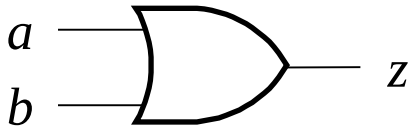
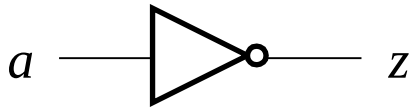
c_{in}	x	y	c_{out}	s
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

全加算器 (full adder)

十進数だと，千行！

論理ゲート

論理ゲート

	AND（論理積）	OR（論理和）	NOT（論理否定）
MIL 記号			

真理値表

a	b	z
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

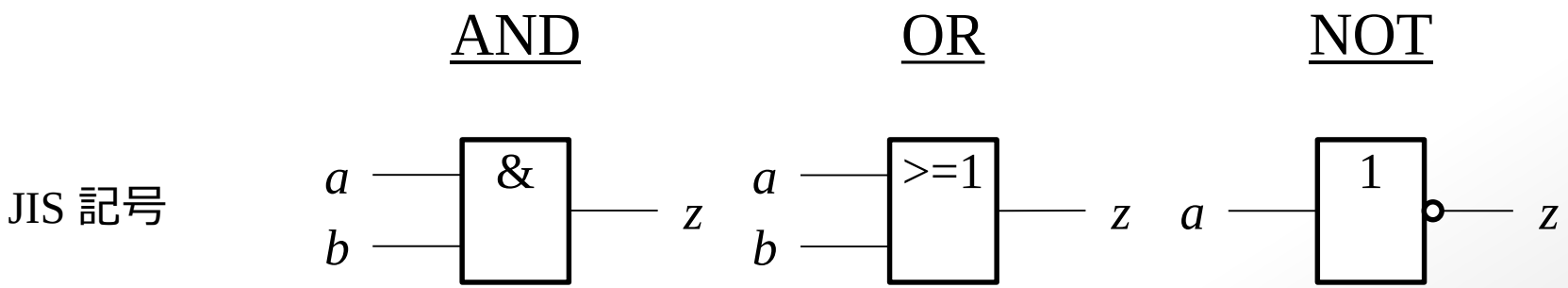
a	b	z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

a	z
0	1
1	0

この3種類で，あらゆるディジタル回路を作ることができる！

余談: MIL 記号

- MIL 記号
  - MIL : 米国軍用規格（Military Standard）
- JIS 記号
  - 美しくない，直感的に分かりにくい
  - 誰も使わない，知られていない

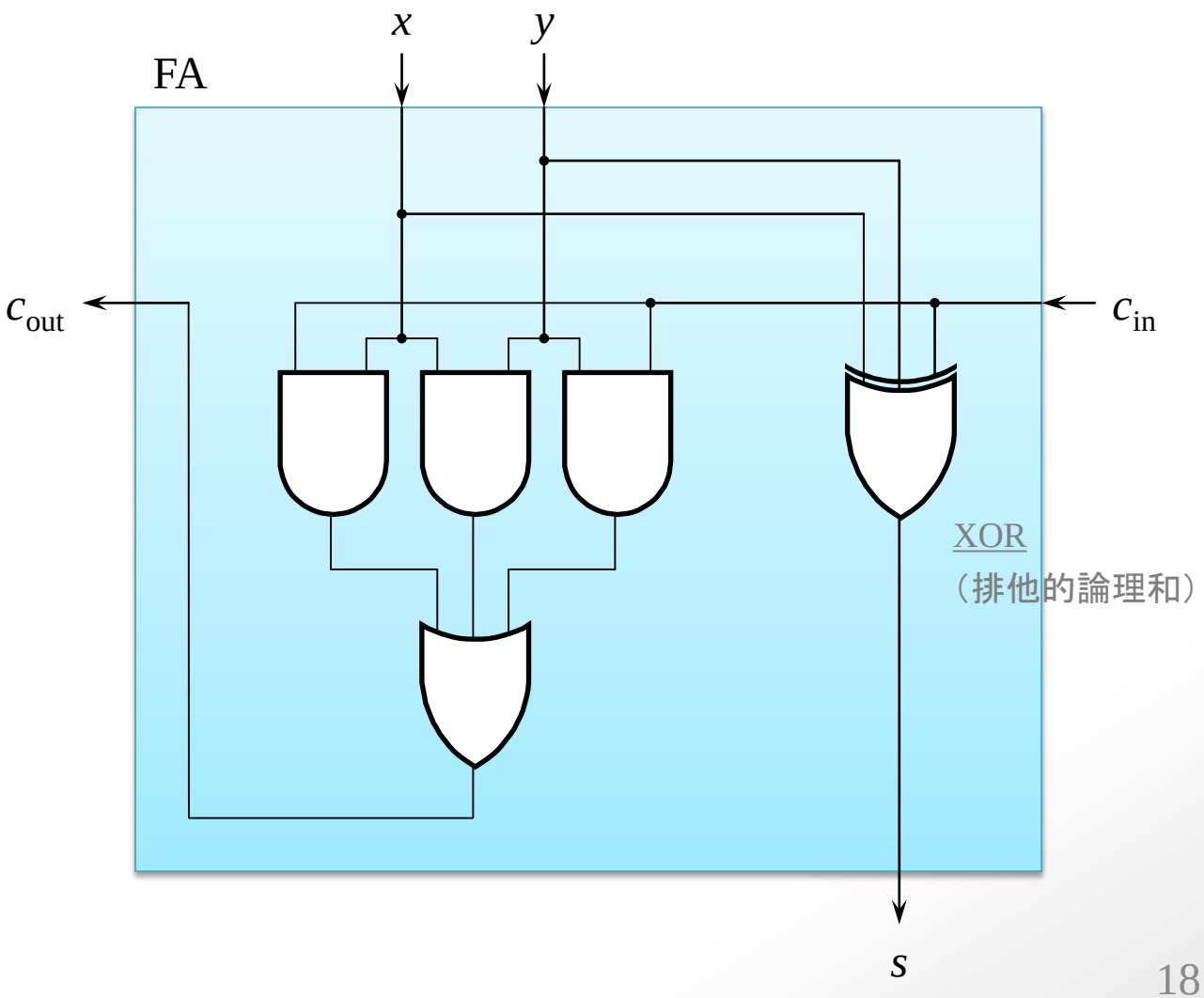


加算器

全加算器

1 の数	c_{in}	x	y	c_{out}	s
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1
2	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1
2	1	0	1	1	0
2	1	1	0	1	0
3	1	1	1	1	1

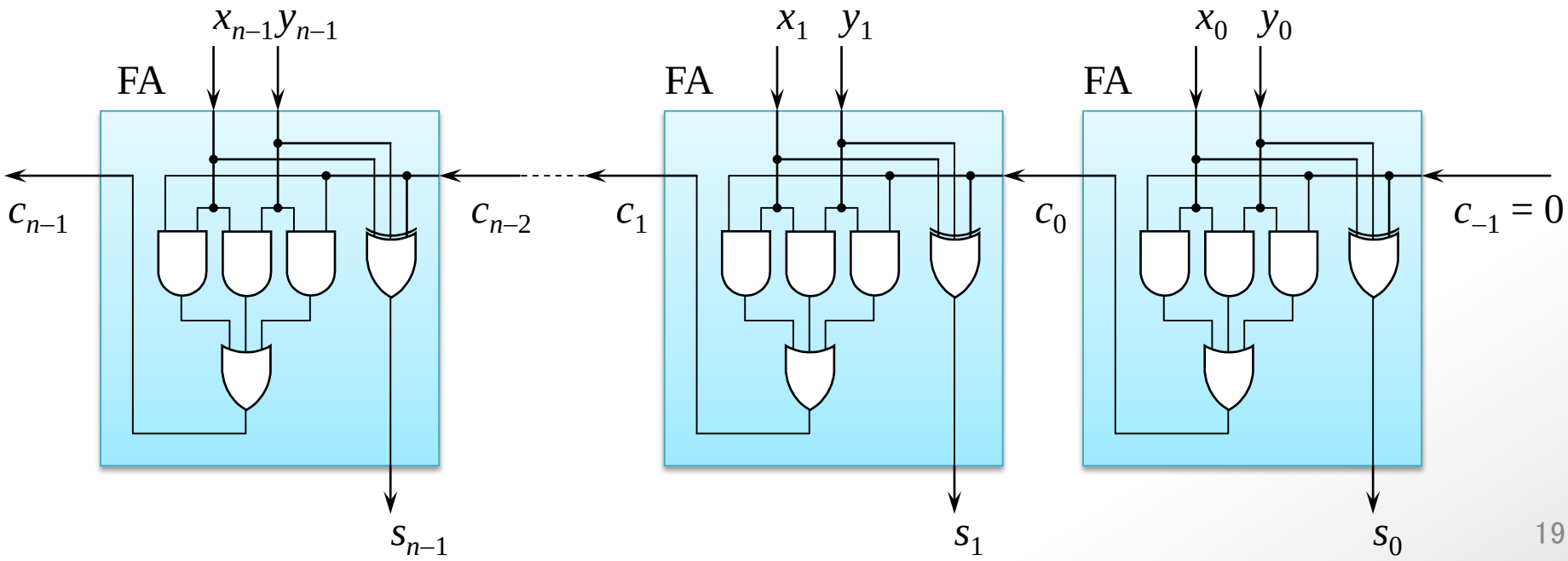
1 の数	c_{in}	x	y	c_{out}	s
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
2	0	1	1	1	0
2	1	0	1	1	0
2	1	1	0	1	0
3	1	1	1	1	1



桁上げ伝搬加算器 (ripple-carry adder)

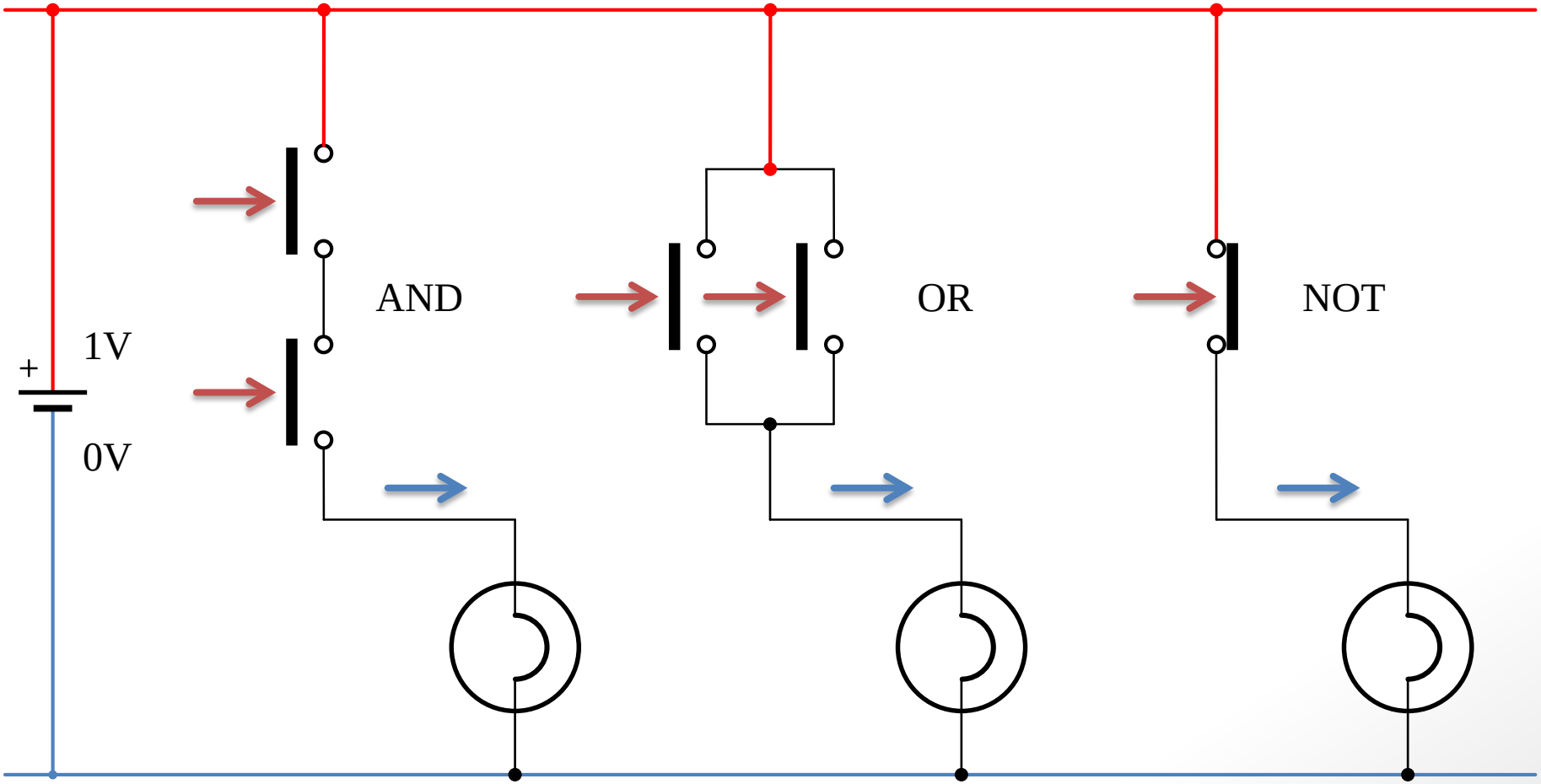
- n 個の全加算器を数珠つなぎ
  - 筆算と同じく，桁上げ (carry) が下位から伝播
- （実際には，もっと効率のよい方法がある）

$$
\begin{array}{rccccc}
 & c_{n-1} & c_{n-2} & \cdots & c_1 & c_0 \\
 & x_{n-1} & & \cdots & x_1 & x_0 \\
+) & y_{n-1} & & \cdots & y_1 & y_0 \\
\hline
 & s_{n-1} & & \cdots & s_1 & s_0
\end{array}
$$



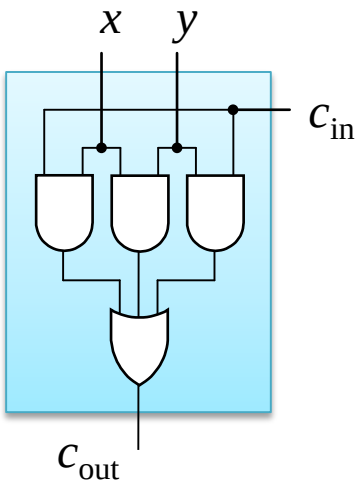
論理ゲート の 作り方

機械式 電気スイッチ



機械式 電気スイッチ の 多段接続性

- 入出力
  - 入力：スイッチを押す力（物理）
  - 出力：電球の光
  - 多段接続：不能
    - 「光では次のスイッチを押せない」
- 入力と出力が「同じ」である必要がある

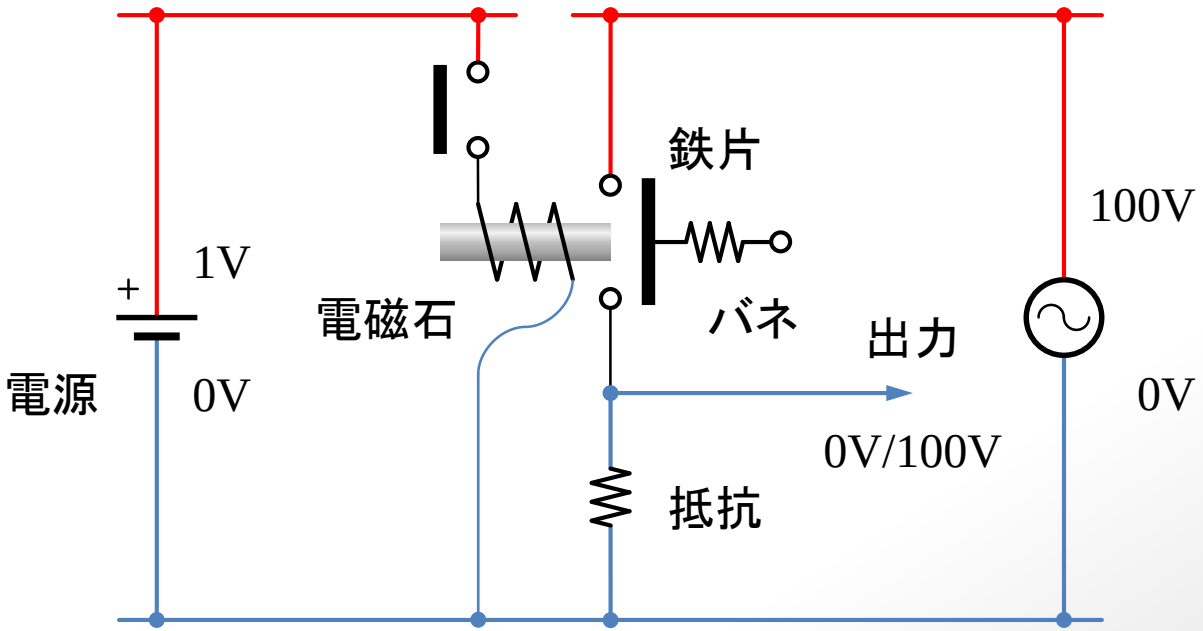


リレー

オムロン，パワー汎用リレー【LY2-AC100/110V】

http://www.marutsu.co.jp/pc/i/3186/

- リレー（継電器）：電磁式 電気 スイッチ
  - テレビの電源をリモコンで入れると「パチッ」
  - 普通は，低電圧 → 高電圧

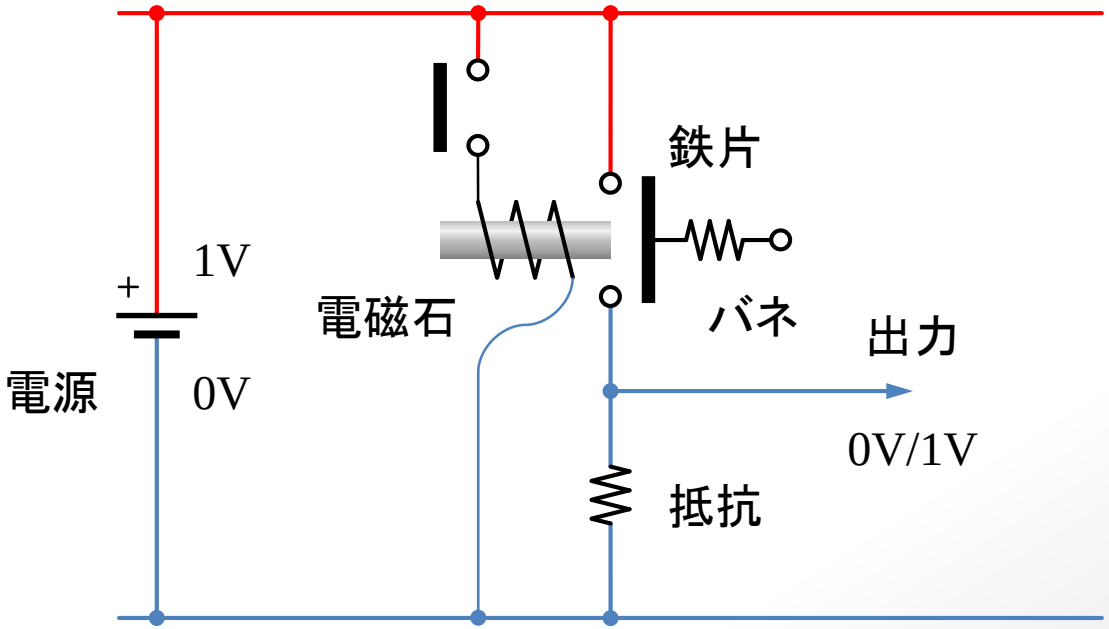


リレー

オムロン，パワー汎用リレー【LY2-AC100/110V】

http://www.marutsu.co.jp/pc/i/3186/

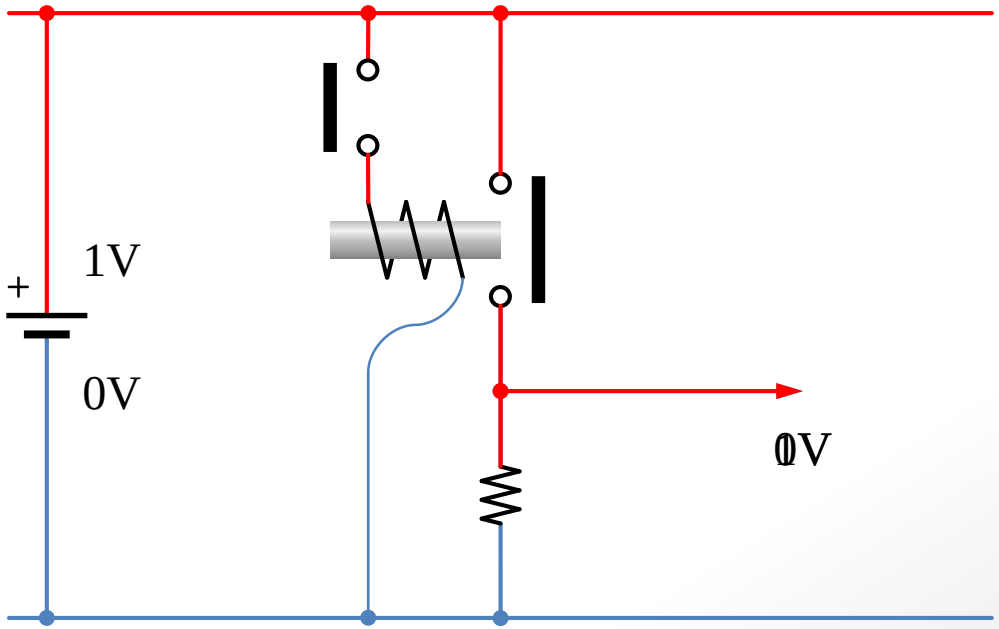
- リレー（継電器）：電磁式 電気 スイッチ
  - テレビの電源をリモコンで入れると「パチッ」
  - コンピュータとして使うなら，単一電圧で



リレー の 動作

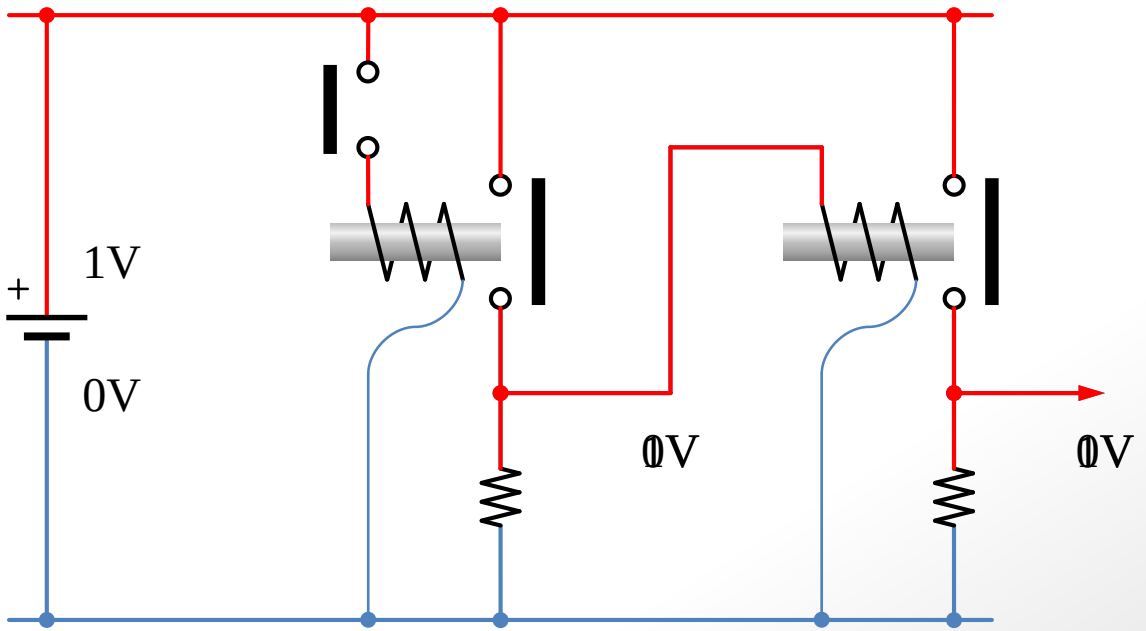
- スイッチ: OFF ⇒ 出力: 0V
  スイッチ: ON ⇒ 出力: 1V

- 二値: 0.5V とかは出てこない
  - 「0/1 で動く」



リレー の 動作

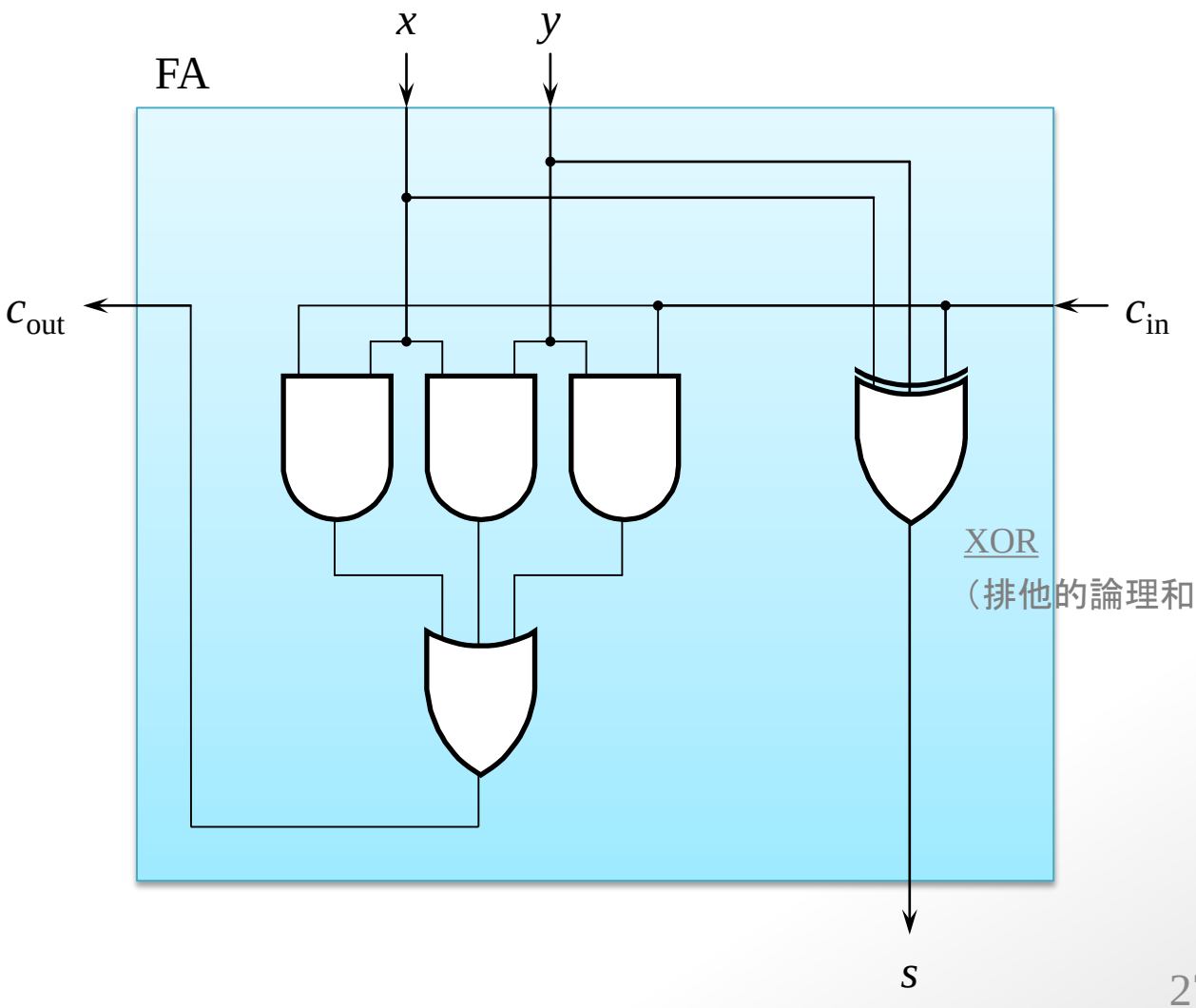
- 連鎖的に動く
  - スイッチ ON/OFF ⇒ 次のスイッチ ON/OFF ⇒ …
  - ドミノ倒し？



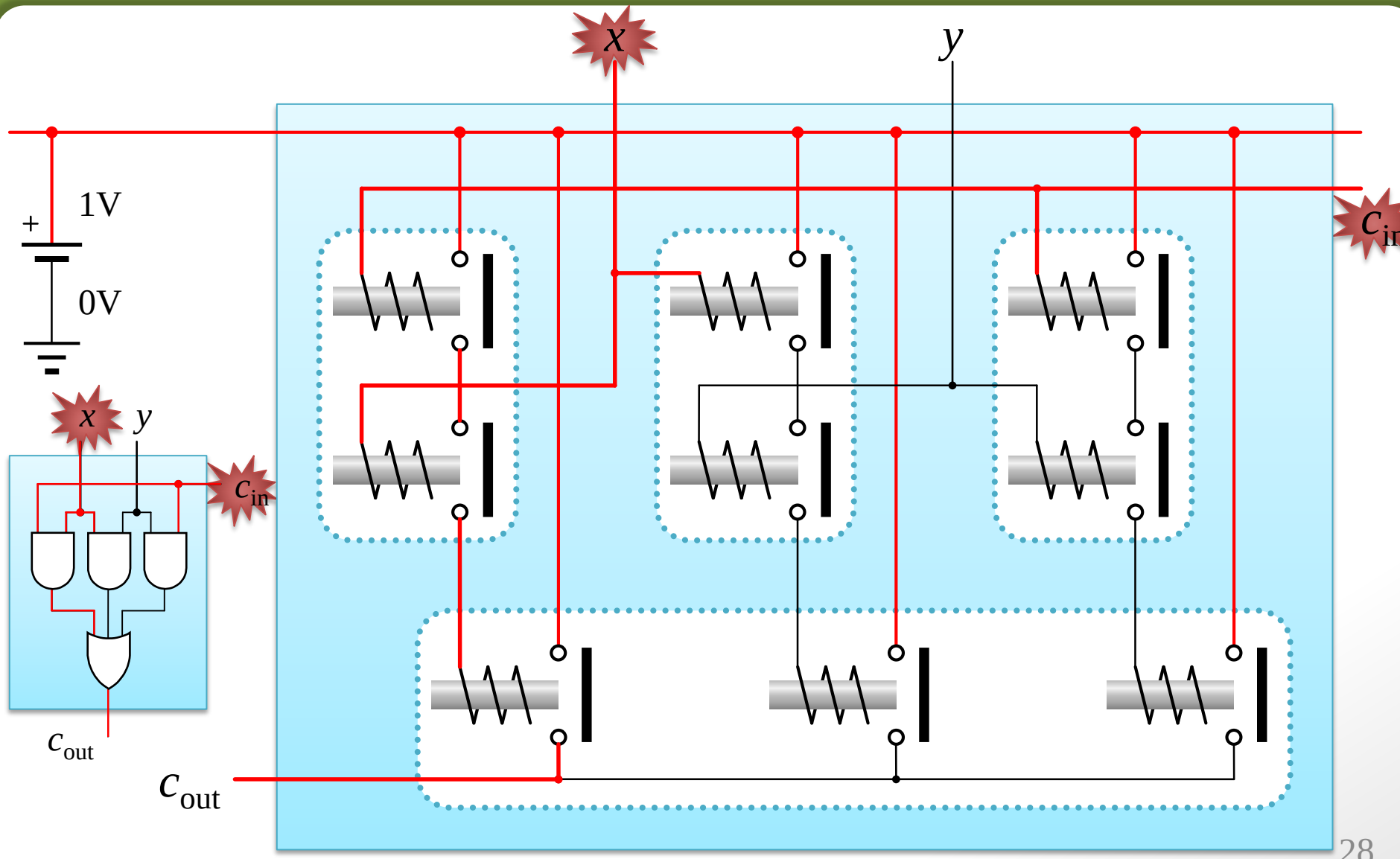
全加算器(再掲)

1 の数	c_{in}	x	y	c_{out}	s
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1
2	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1
2	1	0	1	1	0
2	1	1	0	1	0
3	1	1	1	1	1

1 の数	c_{in}	x	y	c_{out}	s
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
2	0	1	1	1	0
2	1	0	1	1	0
2	1	1	0	1	0
3	1	1	1	1	1



リレー式 桁上げ 計算器

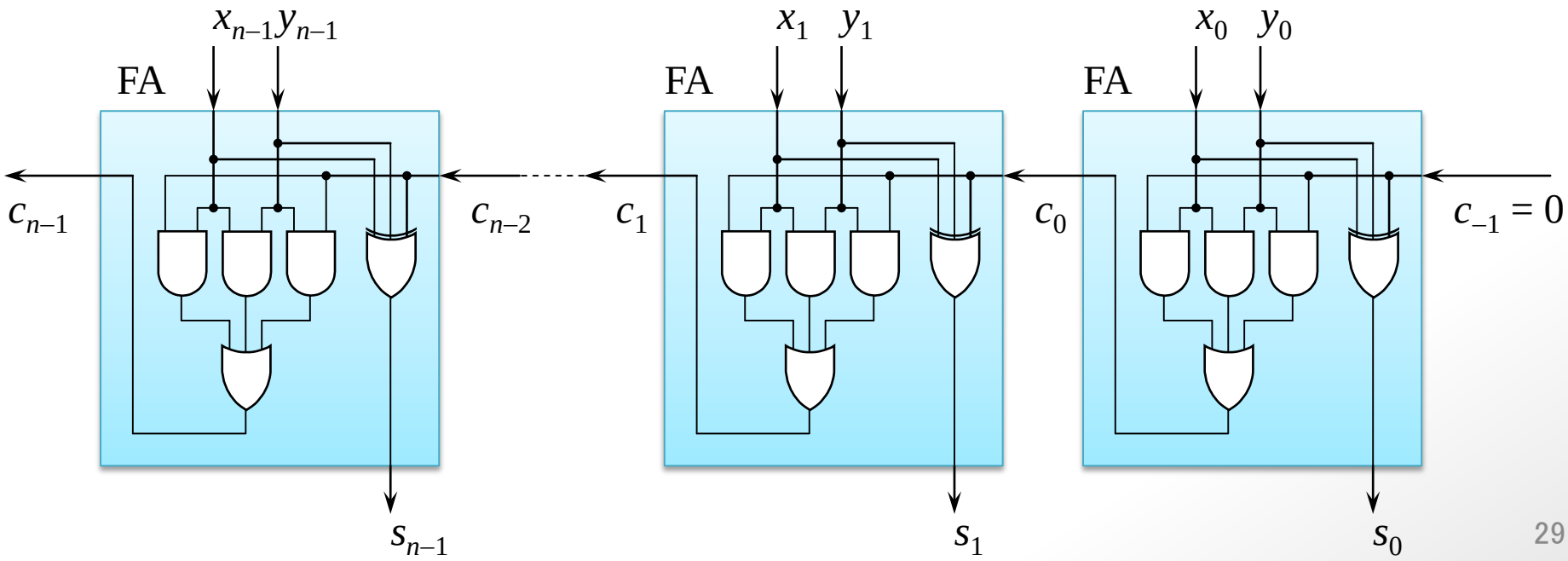


※ 電磁石のマイナス側は省略

桁上げ伝搬加算器 (ripple-carry adder)（再掲）

- n 個の全加算器を数珠つなぎ
  - 筆算と同じく，桁上げ (carry) が下位から伝播
- （実際には，もっと効率のよい方法がある）

$$
\begin{array}{rccccc}
 & c_{n-1} & c_{n-2} & \cdots & c_1 & c_0 \\
 & x_{n-1} & & \cdots & x_1 & x_0 \\
+) & y_{n-1} & & \cdots & y_1 & y_0 \\
\hline
 & s_{n-1} & & \cdots & s_1 & s_0
\end{array}
$$



リレー式 論理ゲート の 多段接続性

- 入出力
  - 入力：電圧 (0V/1V)
  - 出力：電圧 (0V/1V)
  - 「同じ」⇒ 多段接続 可能
    - スイッチ ON/OFF ⇒ 次のスイッチ ON/OFF ⇒ …
    - ドミノ倒し？
- 速度
  - 遅い（コンピュータに用いるには）
    - 目に見えるくらい 大きい 鉄片 が，
    - 目に見えるくらい 長い距離を 動いて，

    スイッチングするから

余談: リレー式計算機

- 富士通 FACOM128B（1959年製）
  - CPU に 約 5000個 の リレー
  - 第一回 情報処理技術遺産 認定

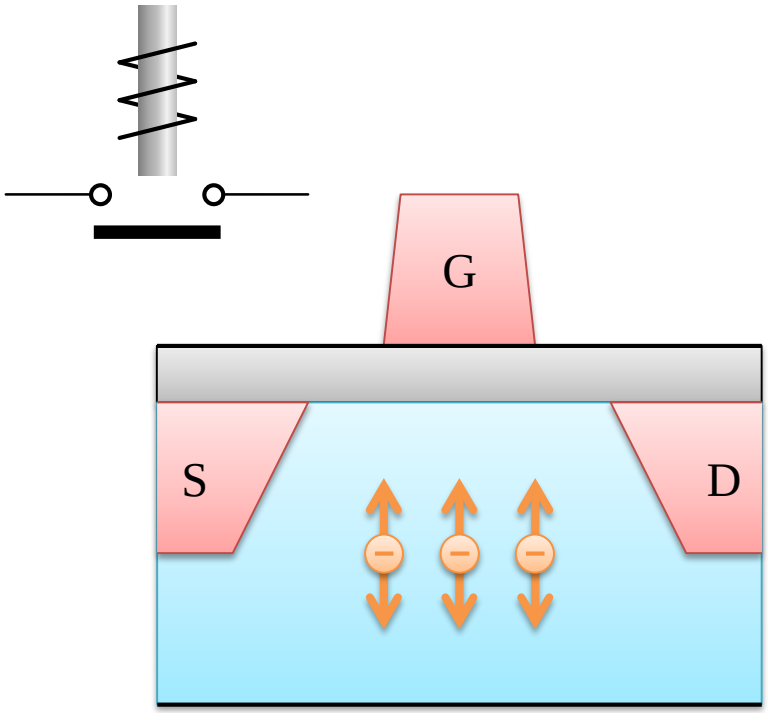
富士通テクノロジーホールに展示されている FACOM138A

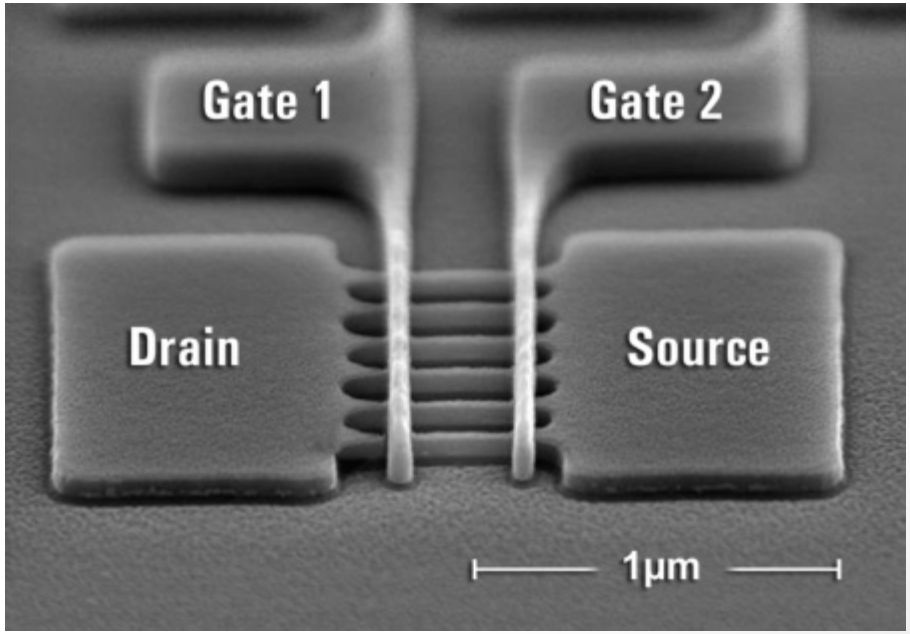
- 富士通 リレー式計算機 技術継承プロジェクト
  http://www.fujitsu.com/jp/about/plus/museum/relay/

トランジスタ と 半導体

トランジスタ

- FET (Field-Effect Transistor, 電界効果トランジスタ)
  - 電界で電子を動かしてスイッチング
  - 「電子式 電気スイッチ」





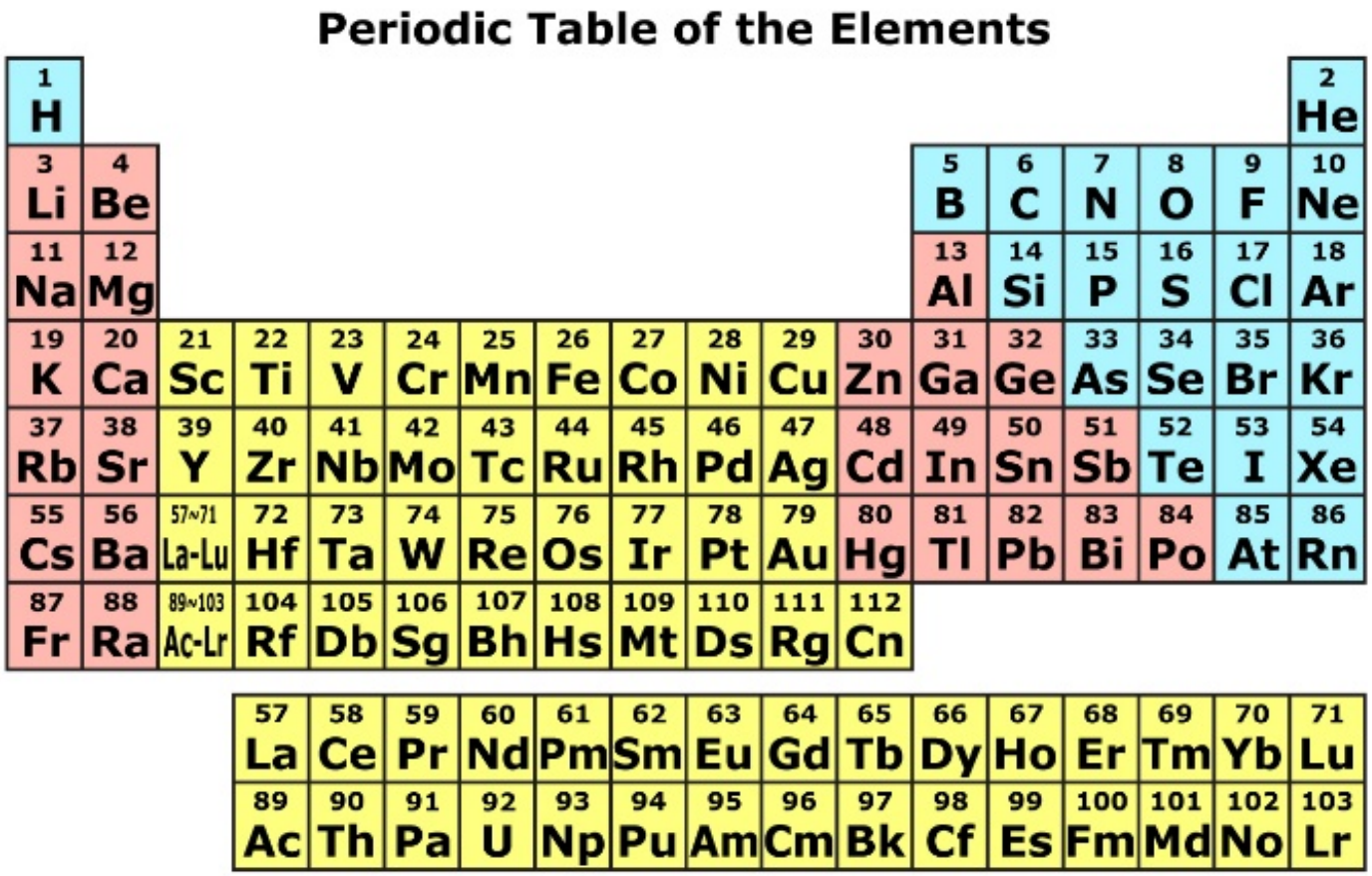
http://www.infineon.com/cms/jp/about-infineon/press/press-releases/2006/213673.html

半導体

	抵抗率 (Ωm)	On/Off 制御
導体	10^{-8}〜10^{-7}	Off にならない
半導体	10^{3}	On (10^{-6}) ⇔ Off (10^{6})
不導体（絶縁体）	10^{6}〜10^{17}	On にならない

- 半導体の例:
  - シリコン, ゲルマニウム (Ge), ダイヤモンド？
  - ガリウム ヒ素 (GaAs), 窒化ガリウム (GaN), InP
  - SiC, SiGe
  - ZnO, IGZO（In, G, Zn, O）

周期表で言うと…



http://chem.chu.jp/topic/periodic.jpg

余談：シリコン

- シリコン（silicon，ケイ素，珪素），$_{14}Si$
  - 地球の主要な構成元素で，地殻中には酸素に次いで多い
    - 鉱物（石）の主要な構成元素
- シリカ，SiO_2，二酸化ケイ素
  - 石英，クォーツ（結晶）
    - グラスファイバー
  - シリカゲル，乾燥剤
- シリコーン (silicone)
  - シリコーン（ゴム），etc.
  - シリコンを含む化合物で，シリコン（単体）とは異なる

半導体トランジスタ の 多段接続性

- 入出力
  - 入力：電圧 (low/high)
  - 出力：電圧 (low/high)
  - 「同じ」⇒ 多段接続 可能
    - ドミノ倒しのように
- 速度：
  - 速い
    - 原子は動かず，
    - 電子が動いて

    スイッチングするから

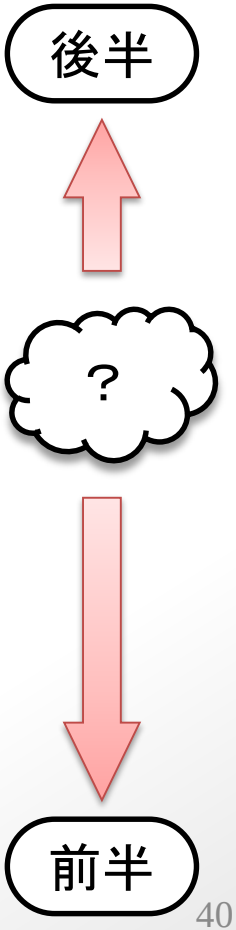
半導体トランジスタ の メリット

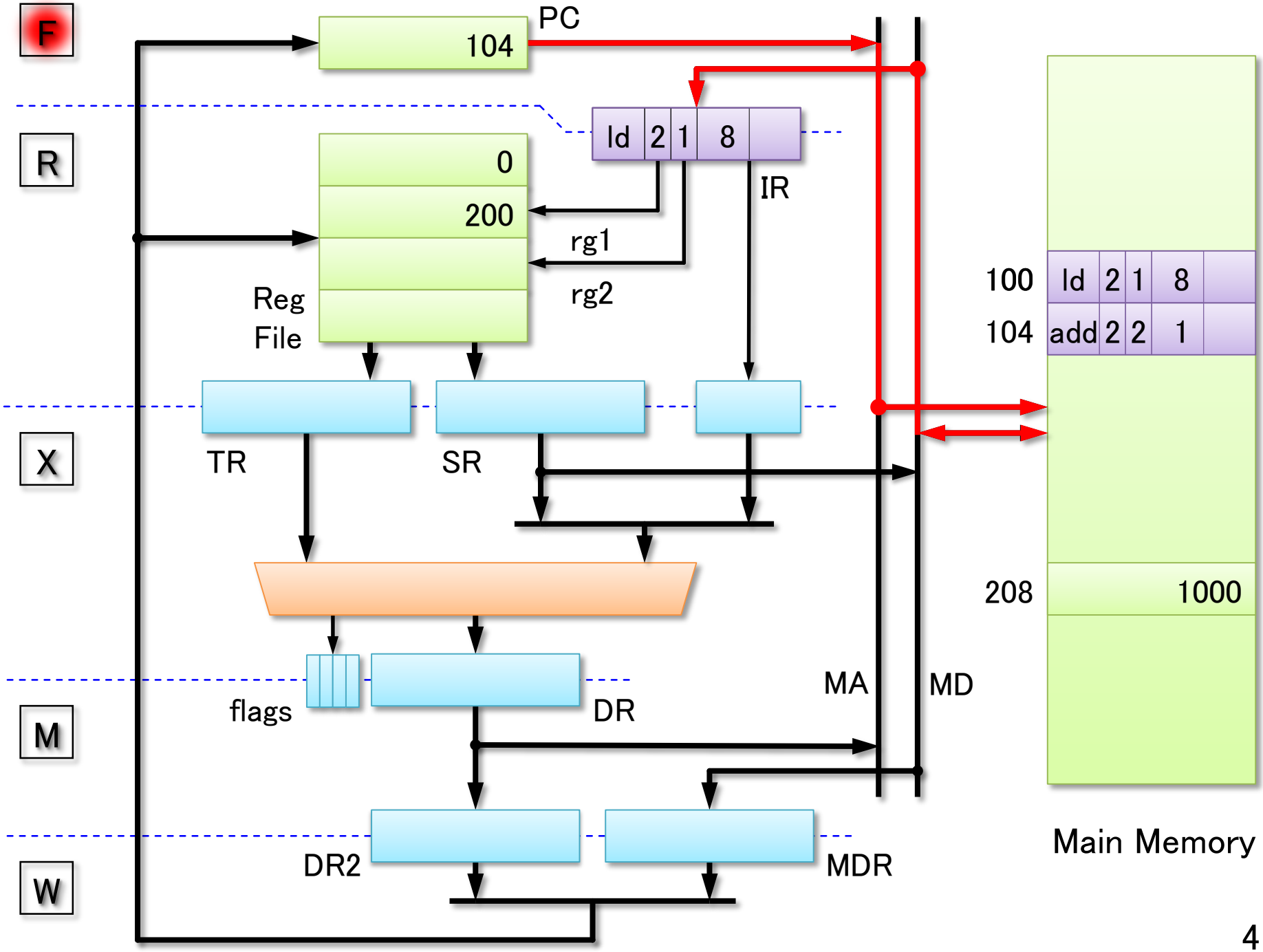
- スイッチングが高速
  - 原子は動かず，電子が動いてスイッチングするから
    - 電子：容易に制御可能な最小の物質
- 微細化，高集積化が可能
  - フォト・リソグラフィー：
    - 写真の技術
  - ムーアの法則：
    - 「半導体の集積密度は18～24ヶ月で倍増する」
  - 現在の最小加工寸法：14nm
- （現在のところ）最適な論理ゲート

コンピュータ の しくみ？

大学のカリキュラム と 本日の内容

学年	講義名	本日の内容
大学院	コンピュータ アーキテクチャ 特論	スーパーコンピュータ
学部 3年	学生実験	（コンピュータの基本的なしくみ）， 命令セット・アーキテクチャ
	コンピュータ アーキテクチャ	
学部 2年	ディジタル回路 （論理回路）	二進数，加算器
	電子回路	トランジスタ，半導体



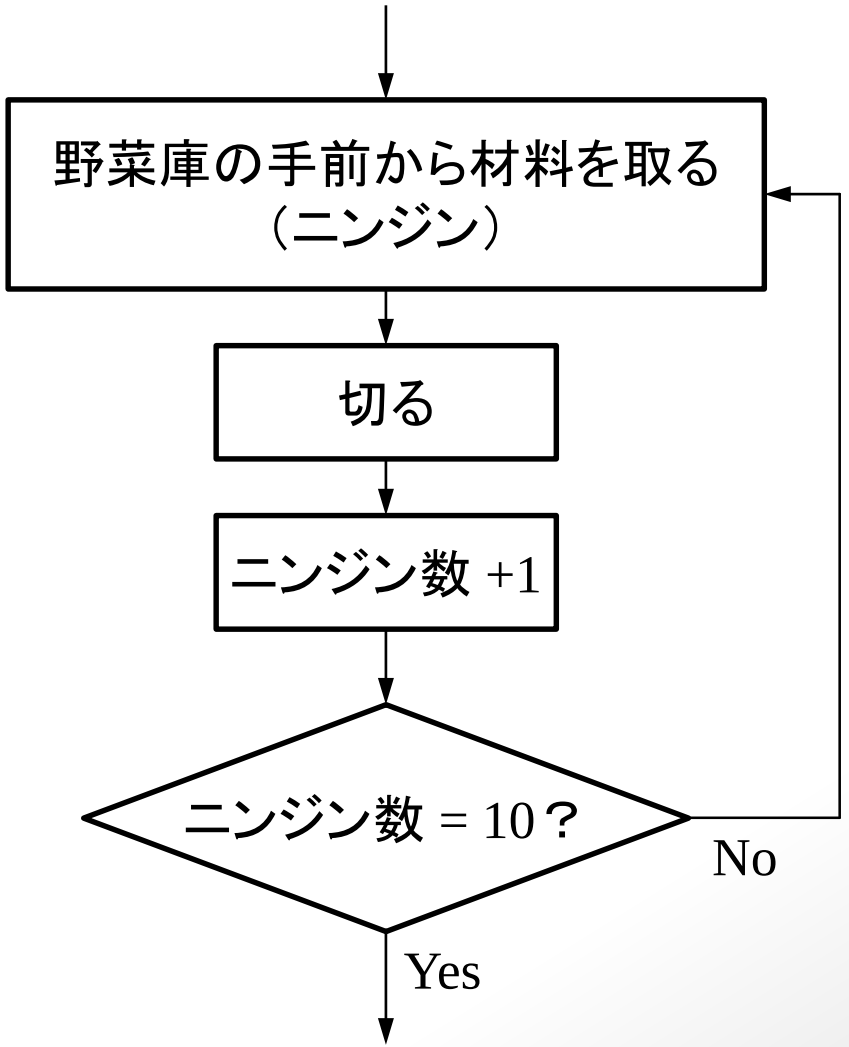

F
R
X
M
W
PC
104
ld 2 1 8
IR
0
200
rg1
rg2
Reg
File
TR
SR
flags
DR
MA
MD
DR2
MDR
100 ld 2 1 8
104 add 2 2 1
208 1000
Main Memory

コンピュータは，たとえて言うなら…

- レストラン ⇔ 食堂 ⇔ 食品工場，ただし…
  - 料理人：他のジャンルのプロだが，このジャンルはまったく経験なし
    - レシピを見ながらでないと，料理ができない！
- レシピ：プログラム

レシピ：プログラム

- レシピ：プログラム
  - 料理人の分かる「言葉」で
  - こと細かに（フローチャート）
    - 「ニンジンを10本切る」は NG



コード例

```
/* absolute diff, |a - b| */
int absdiff (int a, int b)
{
    if (a > b) {
THEN:   a -= b;
    } else {
ELSE:   b -= a;
        a = b;
    }
EXIT:   return a;
}
```

翻訳

```
absdiff:  LD      4, bp, ax    # ax = *(bp + 4)
          LD      8, bp, bx    # bx = *(bp + 8)
          CMP     bx, ax       # ax - bx
          BLT     ELSE         # LT : less than
THEN:     SUB     bx, ax       # ax -= bx
          B       EXIT
ELSE:     SUB     ax, bx       # bx -= ax
          MOV     bx, ax       # ax = bx
EXIT:     ST      ax, 0, bp    # *(bp + 0) = ax
          RET
```

高級言語プログラム（C 言語）

アセンブリ言語プログラム

命令セット・アーキテクチャ

- レシピ（プログラム）は，料理人の分かる「言葉」で
  - 命令セット・アーキテクチャ：「言葉」の文法
    - x86 (IA-32, IA-64)
      - Windows パソコン，Mac，サーバ（Intel 社，AMD 社）
    - ARM
      - スマホ，タブレット（各社）
    - POWER
      - サーバ（IBM 社）
    - V850
      - 車載等（ルネサス社）
    - etc., etc.

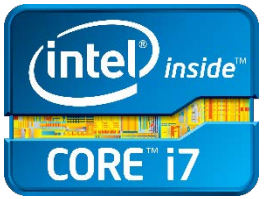
命令セット・アーキテクチャ

- 他の「言葉」で書かれたレシピ
  - そんなに違うわけではない
    - 人間なら何となく分かる程度の違いだが，
    - コンピュータにはさっぱり分からない！
  - 「（バイナリ）互換性がない」
- 逆に，「言葉」が同じなら，会社が違っても大丈夫
  - 「（バイナリ）互換性がある」
    - Intel 社の x86 プロセッサ と AMD 社の x86 プロセッサ
    - 各社の Android スマホ（ほぼ ARM）

余談：x86

- 世界最初のマイクロプロセッサ
  - 40年に渡る拡張の歴史
- 特長：
  - 最も普及している？（現在）
  - 最も古い（マイクロプロセッサとして）
  - 最も複雑（田舎の民宿）

年	名前	bit
1971	4004	4bit
1972	8008	8bit
	8086	16bit
	80286	
	80386	32bit
	80486	
	Pentium	
2004	Pentium 4	64bit
2006	Core	
	⋮	
2016	Core i (Gen. 6)	



余談：ARM

- ARM 社
  - イギリス，ケンブリッジ
  - ファブレス（工場を持たない，最終製品を販売しない）
    - ARM アーキテクチャの使用許諾 ⇒ ライセンス収入
    - ARM アーキテクチャに基づくプロセッサの設計の販売
      - 顧客は，設計を買ってきて，自社で焼くか，ファウンドリ（工場）で焼いてもらう
  - スマホ（iPhone，Android，Windows Phone）用プロセッサで絶大なシェア（たぶん 100%）
  - 先日，日本のソフトバンク社に 3兆円で買収された

高速化

高速化

- レストラン ⇔ 食堂 ⇔ 食品工場 を高速化するには…
  - 「低レイテンシ」: 注文された料理を早く出す
  - 「高スループット」: 一定時間内に料理をたくさん出す
- 2つの方向:
  - レストラン ⇒ 低レイテンシ
    - 「要領のよい」料理人を雇う
      - ただし,「要領のよい」料理人は人件費が高い
  - 食品工場 ⇒ 高スループット
    - 料理人を大勢雇う
      - ただし, 個々の料理が早く出て来る訳ではない

「要領がよい」とは？

- スーパスカラ (superscalar)
  - 八面十六臂：同時に異なる種類の 8個の処理を行う
    - ニンジンを切りながら，ソテーしながら，…
    - 低レイテンシ：一つの料理を速く作れる

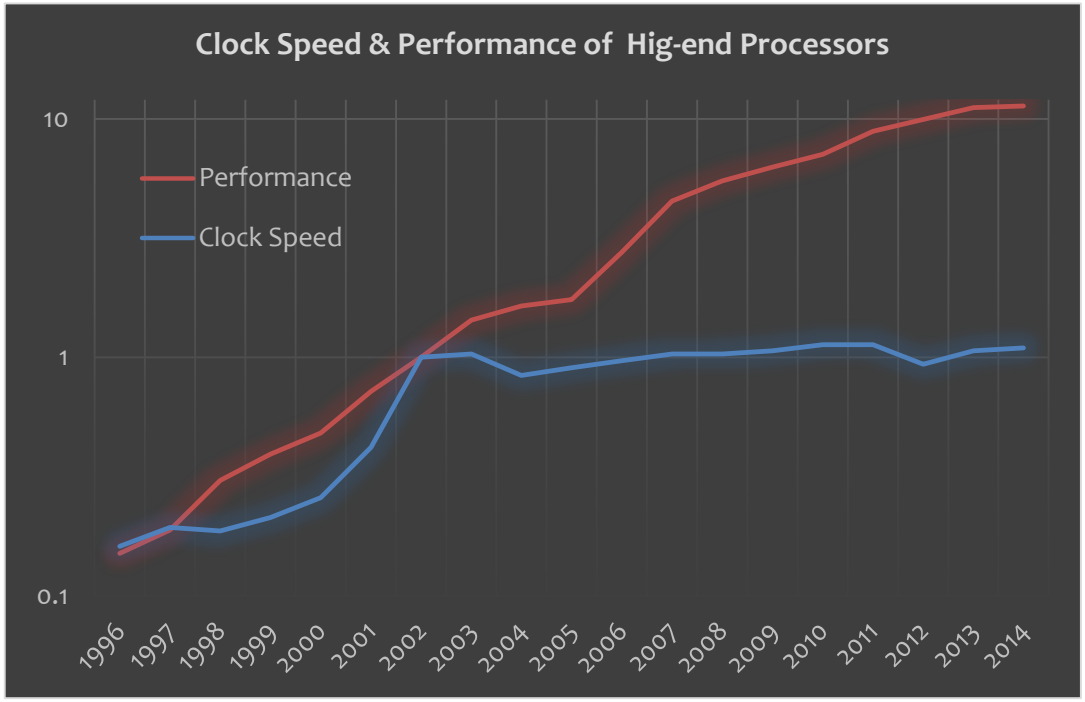
国宝 阿修羅像 734年

<撮影:金井杜道 © 興福寺> http://www.kohfukuji.com/property/photo/

「待ち」と 投機

- 八面十六臂でも，8倍高速化は難しい
  - いろいろな「待ち」が生じてしまう
    - ソテーしようと思ったら，材料が切れてない
    - お湯が沸いてない
    - 材料が冷蔵庫にない → 近所のコンビニにもない → 遠くのスーパーに
- 投機 (speculation)
  - レシピを先読みして，予めやっておく ⇒ 3分クッキング
    - お湯は沸かしておく
    - スーパーに行ったら，ついでに買っておく
    - 「予め用意しておいたものがこちらです。」

プロセッサの性能



- 2002年から，効率（要領のよさ）が10倍！
  - 2002年で，クロックの速度向上は停止
  - それでも性能は，10倍！

スパコン

高速化（再掲）

- レストラン ⇔ 食堂 ⇔ 食品工場 を高速化するには…
  - 「低レイテンシ」:　　注文された料理を早く出す
  - 「高スループット」:　一定時間内に料理をたくさん出す
- 2つの方向:
  - レストラン ⇒ 低レイテンシ
    - 「要領のよい」料理人を雇う
      - ただし，「要領のよい」料理人はコスト（給料）が高い
  - 食品工場 ⇒ 高スループット
    - 料理人を大勢雇う
      - ただし，個々の料理が早く出て来る訳ではない

食品工場 ⇒「高スループット」その1

- スーパーコンピューティング，ハイパフォーマンス コンピューティング
  - 科学技術計算，大規模シミュレーション，ビッグデータ解析，人工知能？，etc.
  - 整数 と 浮動小数点数 なら，後者が多い
    - FLOPS (Floating-point Operations Per Second)
      新聞・テレビで，「1秒間に〇〇億回計算する能力がある」
  - データ並列処理
    - 異なるデータに対して，同じ処理を「同時に」大量に

浮動小数点数

- 浮動小数点数 (floating-point number)
  - 「すごく大きい/小さい小数を効率よく表す方法」
  - 科学技術計算の大部分は，これの積和

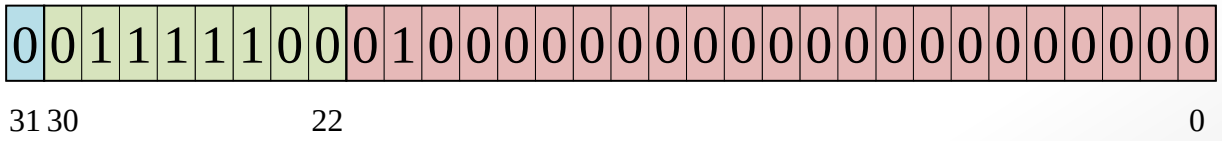
十進表現

$$1234000000000 \Rightarrow +1.234\times10^{12}$$

$$-0.000000005678 \Rightarrow -5.678\times10^{-9}$$

IEEE 754 単精度 浮動小数点フォーマット (32bit)

$$1.01\times2^{1111100-十五}$$



ポスト「京」の重点課題

http://www.aics.riken.jp/jp/post-k/target

食品工場 ⇒「高スループット」その2

- グラフィクス
  - 多数のポリゴンの描画
    - ポリゴン → ピクセル などの座標変換
    - 浮動小数点演算
- GPU と GPGPU
  - GPU (Graphics Processing Unit) ⇔ CPU (Central Processing Unit)
    - 最近では，「CPU」は GPU と対比する場合以外，あまり言わない
  - General-Purpose GPU，汎用 GPU
    - GPU をベースに，より一般的なデータ並列処理ができるように

n 面 *m* 臂 (1/2)

- (ワイド)スーパスカラ (Superscalar)
  - 八面十六臂: 同時に異なる種類の 8個の処理を行う
    - ニンジンを切りながら, ソテーしながら, …
    - 低レイテンシ: 一つの料理を速く作れる
- メニーコア (many-core)
  - 一面二臂(普通の人) × 8人:
    - レシピ: プログラムを, 8人用に書き直させれば…(並列化)
    - 8人の連携が難しく, 八面十六臂のようにはいかない

n 面 *m* 臂 (2/2)

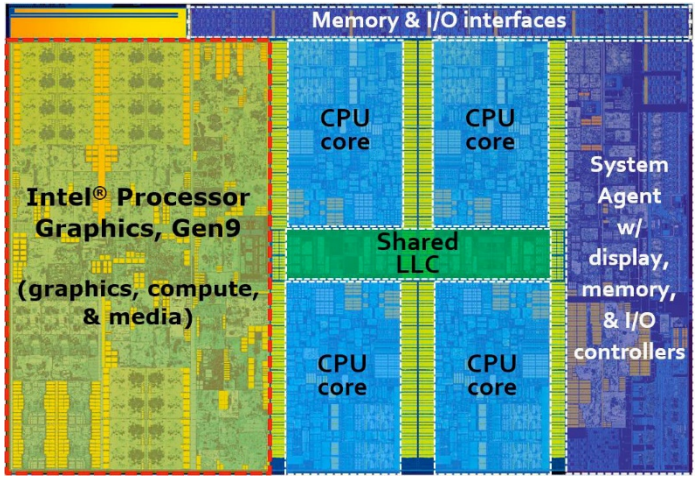
- SIMD（Single-Instruction/Multiple-Data stream,「シムディー」）
  - 一面十六臂：同時に同じ種類の 8個の処理を行う
    - ニンジンを同時に8本切る
    - 高スループット：一定時間内に，同じ料理を 8倍作れる
- GPGPU
  - SIMD と似ているけど，より柔軟

n 面十六臂

- コスト（人件費）:
  - （一面二臂）×８ ＞ 八面十六臂 ≫ 一面十六臂
    - 臂（腕）に比べて面（あたま）は高い
    - 異論はある

実際は，組み合わせて

用途	コア		×	コア数	GPU
	メイン	SIMD ユニット			
高いスマホ用	（三面　六臂	＋ 一面　四臂）	×	4 コア	あり
安いパソコン，ノート用	（四面　八臂	＋ 一面　八臂）	×	2 コア	あり
高いパソコン用	（八面十六臂	＋ 一面十六臂）	×	4 コア	あり
高いサーバ用	（八面十六臂	＋ 一面十六臂）	×	20 コア	なし



Intel "Skylake" Die Layout Detailed

https://www.techpowerup.com/215333/intel-skylake-die-layout-detailed/

- 浮動小数点：
  - メイン だと，二面四臂分くらい
  - SIMD ユニット の方で稼ぐ

スパコン の アプローチ

- コアをすごくたくさん（数十万～1千万個）並べる
  - 最近では，（資金と）電力がネック
- 大/中/小コア×コア数：
  - ↑「少数精鋭」
    - （八面十六臂 ＋ 一面十六臂） × 少な目 … 次世代クラスタ
    - （？面？？臂 ＋ 一面？？臂） × 中くらい … 京，ポスト「京」
    - （二面　四臂 ＋ 一面十六臂） × 多め … アメリカの次世代スパコン
    - GPGPU × 多め … アメリカ，中国
    - （一面　二臂　　） × 超多め … 中国？，Pezy？
  - ↓「人海戦術」
- 比較指標：
  - 電力効率：最大性能 (FLOPS) ÷ 消費電力 …「人海戦術」の方がよい
  - プログラマビリティ，「プログラムが簡単に書けるか？」 …「少数精鋭」の方がよい

Top 500（2016年 7月）と Graph 500（2016年6月）

Rank	国	System	Core	Cores	R_{max} (PFlop/s)	R_{peak} (PFlop/s)	Power (MW)
1	中国	神威 太湖之光	神威 26010	10,649,600	93.0	125.4	15.4
2	中国	天河 2	Intel Xeon Phi	3,120,000	33.9	54.9	17.8
3	米	タイタン	NVIDIA K20x	560,640	17.6	27.1	8.2
4	米	セコイア	IBM BlueGene/Q	1,572,864	17.2	20.1	7.9
5	日本	京	富士通 SPARC64	705,024	10.5	11.3	12.7

Rank	国	System	Core	GTEPS
1	日本	京	富士通 SPARC64	38,621
2	中国	神威 太湖之光	神威 26010	23,756
3	米	セコイア	IBM BlueGene/Q	16,599
4	米	ミラ	IBM BlueGene/Q	14,328
5	独	JUQUEEN	IBM BlueGene/Q	5,848

今日のまとめ

つまみ食い の ポイント

- 前半:
  - 0 と 1 で動くってどういうこと？
    - スイッチだから，on/off
  - なぜ半導体で作るの？
    - 速いスイッチが作れるから
      - 導体だと，off にならないので，物理的に切断する必要がある
      - 半導体だと，電子が動いて on/off

つまみ食い の ポイント

- 後半:
  - コンピュータって，たとえて言えば？
    - レシピを見ながら料理する料理人
  - x86 とか ARM アーキテクチャ って何？
    - 料理人の「言葉」
  - スパコン，ポスト「京」のポイントは？
    - 電力効率（人海戦術）とプログラマビリティ（少数精鋭）の バランス

おわりに (1/4)

- 「ブラックボックス」であること自体は，悪いことではない
  - 自動車のしくみは分かってなくても，運転できる
  - 飛行機のしくみは分かってなくても，海外旅行はできる
  - コンピュータのしくみは分かってなくても，ポケモン GO はできる
    - しくみが分かったところで，〇〇デポにはだまされる？

おわりに (2/4)

- 抽象化，階層化
  - 各階層の研究・開発に注力できる
    - 特に，情報の分野は，階層化を大事にしてきた
  - プレイヤーが参入しやすい ⇒ エコシステム，コミュニティ
    - Linux，Android
- むしろ，日本の（電機）メーカは，自前主義がヒドすぎる
  - 階層をまたぐ最適化が好き？

おわりに (3/4)

- ただし，コンピュータに限っては？
  - 「コンピュータをどう使うのかが重要であって，
    コンピュータ自体は買ってくればいい」
  - 「選択と集中」，「アジアの成長を取り込む」，「金融立国・観光立国」
  - 「2位じゃダメなんでしょうか？」
  - 「最もきちんと説明されてこなかったのがスパコンだ」
- 結果…
  - 日本の DRAM（メモリ）メーカはなくなった
  - 最先端の半導体工場はなくなった
    - ポスト「京」のプロセッサの製造は，台湾

おわりに (4/4)

- 一旦 技術を失うと，復活はたいへん
  - MRJ，Honda Jet,「心神」(ATD-X)
- 言いたいこと:
  - コンピュータをどう使うのかも重要だけど，
    コンピュータをどう作るのかも重要だと思ってくださいよw
  - コンピュータ（プロセッサ）も，国産にこだわってくださいよw
  - コンピュータだけ国産じゃなくていいと思うのは，
    分かってないからじゃないんですか？w

参考文献

- ドンピシャの本は知らない
- 大学向け教科書:
  - 前半:
    - 五島 正裕: ディジタル回路, 数理工学社 (2007).
  - 後半:
    - Randal E. Bryant, David R. O'Hallaron: Computer Systems: A Programmer's Perspective (2016)
      コンピュータ・システム ―― プログラマの視点から，丸善出版（翻訳中）