

東北大学 工学部 機械知能・航空工学科  
2015年度 5セメスター・クラスD

# 計算機工学

## 1. 序論

(教科書1.1節, 6.1節, 11章)

大学院情報科学研究科

鏡 慎吾

<http://www.ic.is.tohoku.ac.jp/~swk/lecture/>

# 目標

- 計算機(コンピュータ)の構成と動作原理を学ぶ
- 何のため?
  - ソフトウェアの動き方をきっちりと理解する
    - 理解せずに書いて動かした(動いたように見える)プログラムは、すぐに動かなくなる
    - 高速化のためには計算機の動作原理の理解が必須
  - ハードウェアの構成要素・構造を知る
    - 計算機を作る人
    - マイコン・FPGAなどでハードウェアを自作する人
    - 計算機を買う人
  - 計算機の動作や設計の背後にある「考え方」を学ぶ
    - 計算機以外にも応用可能な概念がたくさんある  
(例: 論理, 状態遷移)

## 例題 (おまけ)

ある人が狼, 羊, 牧草とともに旅をしていたところ, 川にさしかかった. 小さな舟を漕いで渡るしかない. 舟には, 漕ぎ手である人のほか, 狼, 羊, 牧草のいずれか高々1つしか乗せるスペースがない. ただし, 人がいないと狼は羊を食べてしまい, また羊は牧草を食べてしまう. 人, 狼, 羊, 牧草すべて無事に川を渡るにはどうすればよいか.

## 例題 (おまけ その2)

天国と地獄の分かれ道に門番が立っている. 門番は天国または地獄のどちらから派遣されているが, どちらかはわからない. 門番には「はい」または「いいえ」で答えることのできる質問を一つだけすることができる. ただし, 天国からきた門番は本当の答えを教えてくれるが, 地獄から来た門番は必ず嘘をつく. どのような質問をすればよいか.

# 予定

- 講義はスライドと板書で進める
- 評価は期末試験により行う
- 資料はウェブで閲覧・またはダウンロード

<http://www.ic.is.tohoku.ac.jp/~swk/lecture/>

- (1) 04/13
- (2) 04/20
- (3) 04/27
- (4) 05/11  
(05/03 祝日)
- (5) 05/25  
(05/18 休講)
- (6) 05/30 (土)
- (7) 06/01
- (8) 06/08
- (9) 06/15
- (10) 06/22
- (11) 06/29
- (12) 07/06
- (13) 07/13  
(07/20 祝日)
- (14) 07/27 期末試験  
(07/31 予備日)

# 教科書・参考書

## 教科書

- 鏡, 佐野, 滝沢, 岡谷, 小林: コンピュータ工学入門, コロナ社, 2015

付録・章末問題解答はウェブで配布:

<http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339024920/>



## 参考書

- パターンソン, ヘネシー: コンピュータの構成と設計 — ハードウェアとソフトウェアのインタフェース, 日経BP社, 2014



# いろいろな計算機

いわゆる  
スーパーコンピュータ



<http://journal.mycom.co.jp/articles/2008/11/25/sx-9/>

いわゆる  
パーソナルコンピュータ



<http://www.bunkai.jp/note/panasonic/cf-t2.html>

# いろいろな計算機

携帯電話  
（「スマートフォン」  
じゃなくても立派な  
コンピュータ）

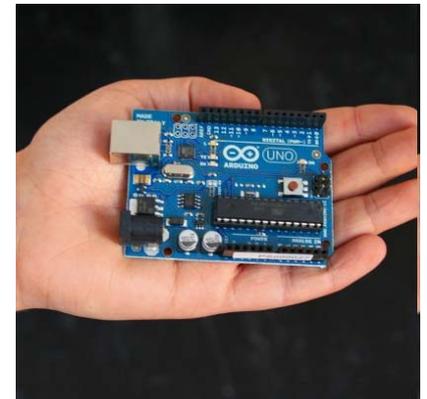


<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20100708/350067/>

いわゆるマイコン  
（マイクロコントローラ）



<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-00180/>



<http://www.arduino.cc/>

# いろいろな計算機

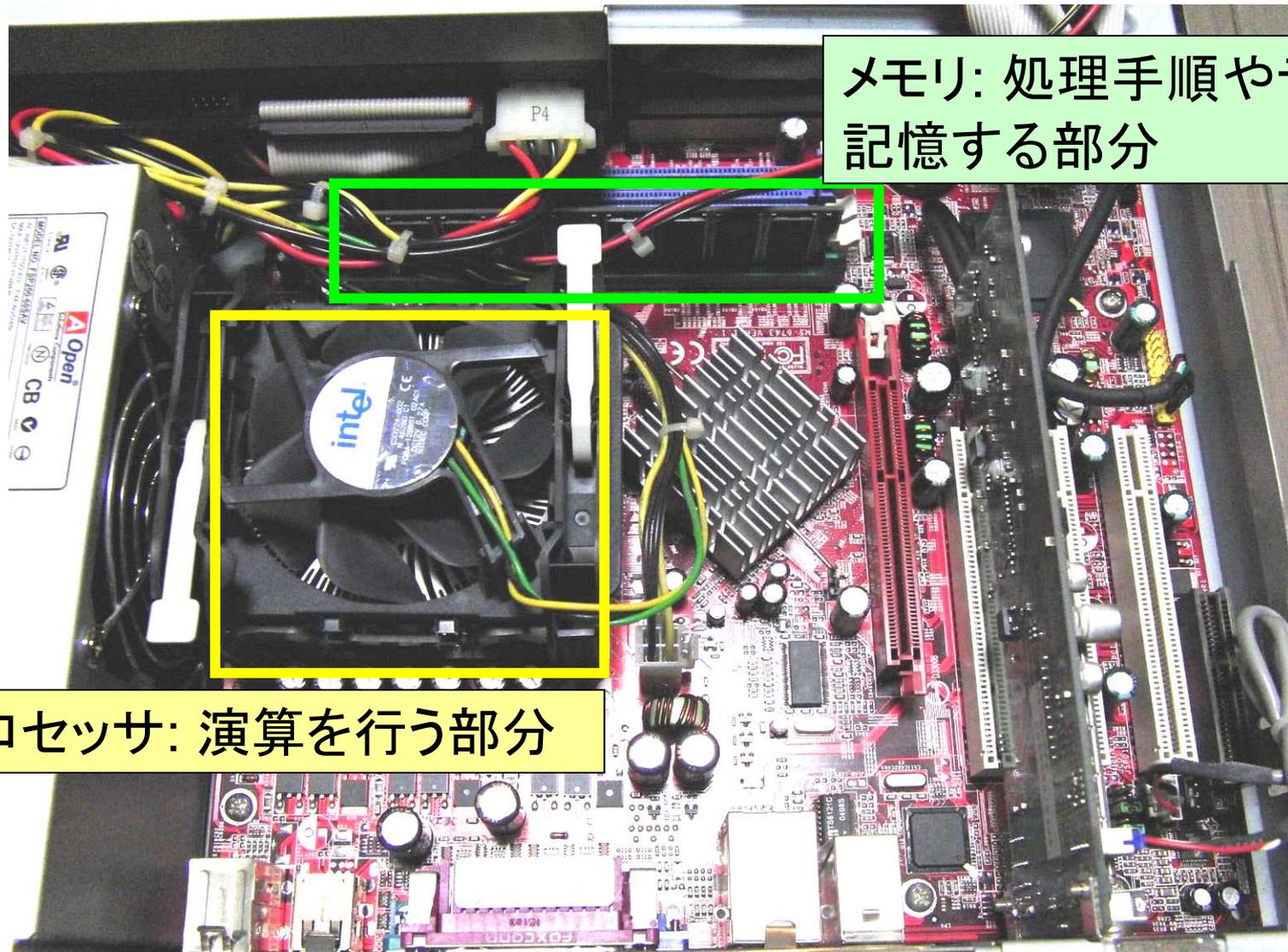
- スーパーコンピュータ, パーソナルコンピュータ, スマートフォンなどの「いかにもコンピュータ」なもの以外にも, 世の中にはコンピュータであふれている
- **自動車**
  - 1台に数十個から百個程度のプロセッサ, ...
- **家電**
  - テレビ, DVDプレイヤー, 炊飯器, ポット, エアコン, 掃除機, ...
- **通信機器**
  - ルータ, スイッチ, 無線LANステーション, ...
- **社会インフラ**
  - 銀行のオンラインシステム, 鉄道の運行システム, ...

# パーソナルコンピュータ(PC)の中身



OS※5	Windows 8 Pro 64ビット		
CPU	<b>インテル® Core™ i5-3340M vPro™ プロセッサ</b> (動作周波数 2.70GHz、ターボ・ブースト2.0利用時は最大3.40GHz)	<b>インテル® Core™ i7-3540M vPro™ プロセッサ</b> (動作周波数 3.0GHz、ターボ・ブースト2.0利用時は最大3.70GHz)	<b>インテル® Core™ i5-3340M vPro™ プロセッサ</b> (動作周波数 2.70GHz、ターボ・ブースト2.0利用時は最大3.40GHz)
メモリー※6	標準4GB(最大8GB)		
SSD/HDD※7	SSD 128GB	HDD 640GB	
質量※8	標準バッテリーパック(L)装着時:約 <b>1.36kg</b> 軽量バッテリーパック(S)装着時:約 <b>1.15kg</b>	標準バッテリーパック(L)装着時:約 <b>1.40kg</b> 軽量バッテリーパック(S)装着時:約 <b>1.19kg</b>	標準バッテリーパック(L)装着時:約 <b>1.34kg</b> 軽量バッテリーパック(S)装着時:約 <b>1.13kg</b>
駆動時間※9	標準バッテリーパック(L)装着時:約 <b>19時間</b> 軽量バッテリーパック(S)装着時:約 <b>9.5時間</b>	標準バッテリーパック(L)装着時:約 <b>17.5時間</b> 軽量バッテリーパック(S)装着時:約 <b>8.5時間</b>	標準バッテリーパック(L)装着時:約 <b>18時間</b> 軽量バッテリーパック(S)装着時:約 <b>9時間</b>
液晶サイズ	12.1型HD+(1600×900ドット)		

# パーソナルコンピュータ(PC)の中身



メモリ: 処理手順やデータを記憶する部分

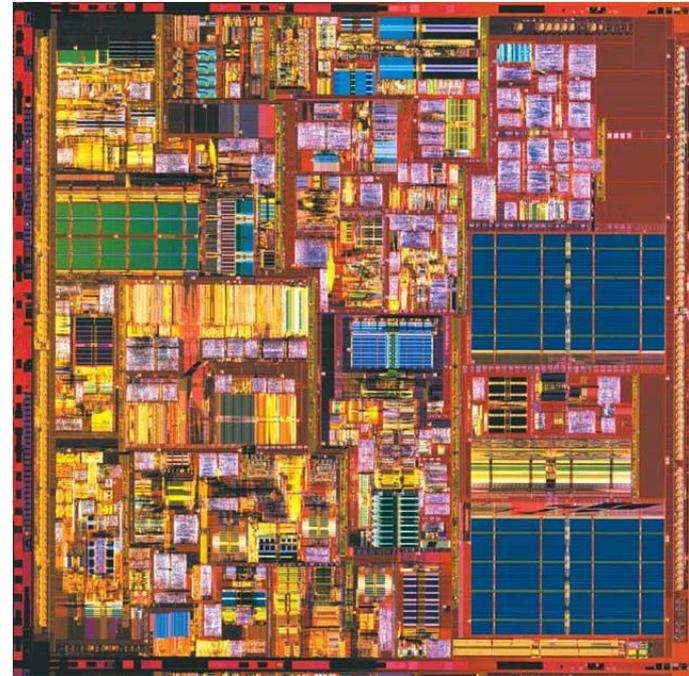
プロセッサ: 演算を行う部分

# プロセッサ

CPU (Central Processing Unit) または MPU (Microprocessor Unit)

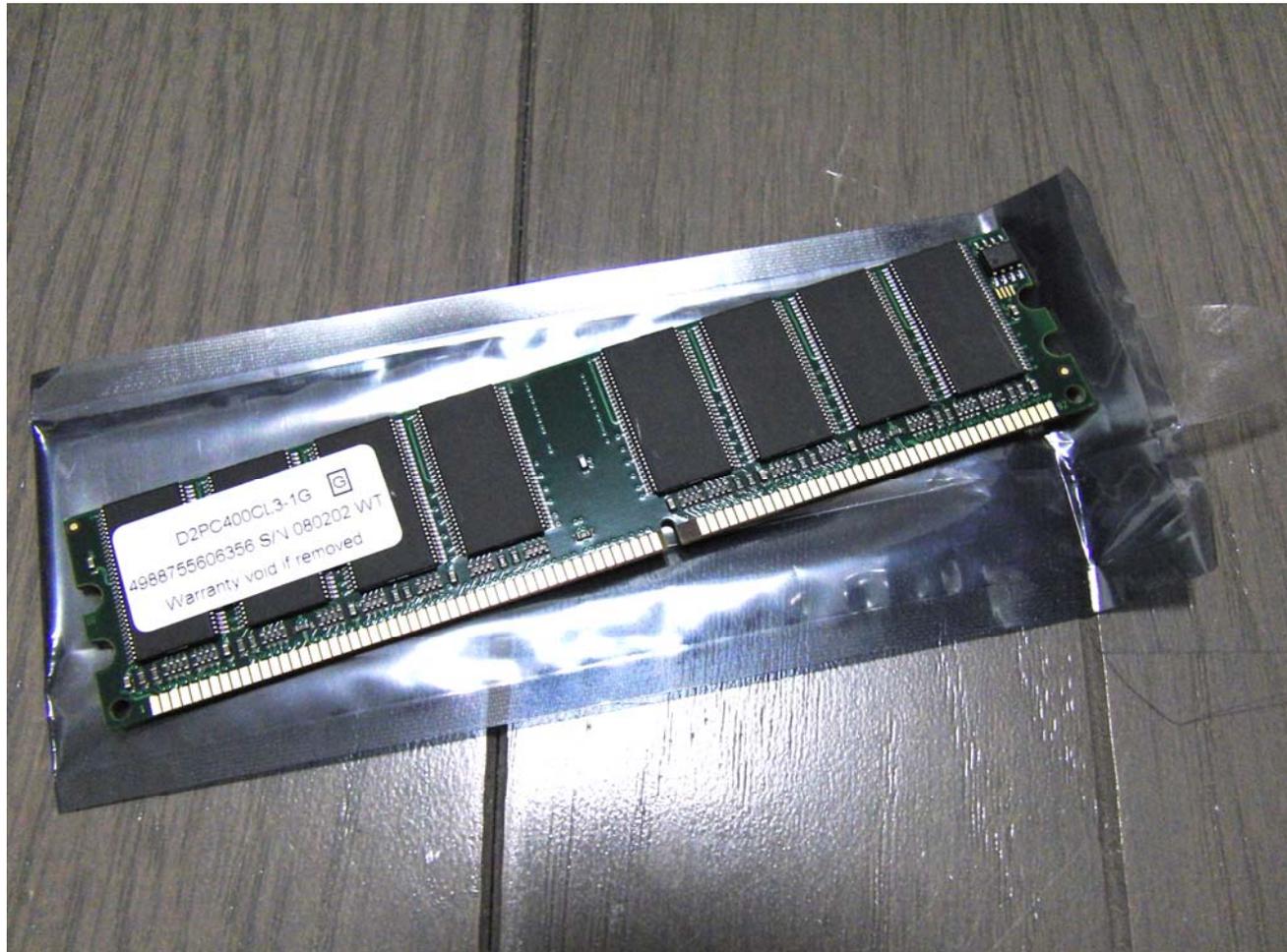


"Northwood" core Pentium 4 processor  
[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F:Pentium4\\_northwood.png](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F:Pentium4_northwood.png)

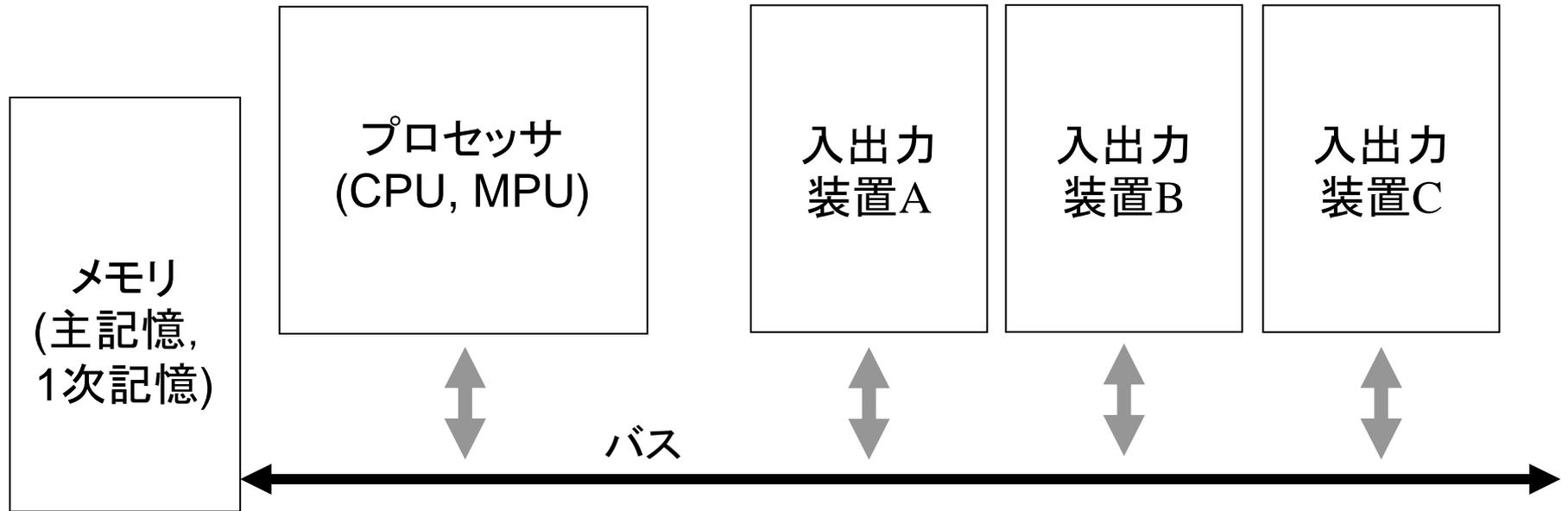


<http://journal.mycom.co.jp/articles/2005/02/22/p4/001.html>

# メモリ



# 計算機の基本構成



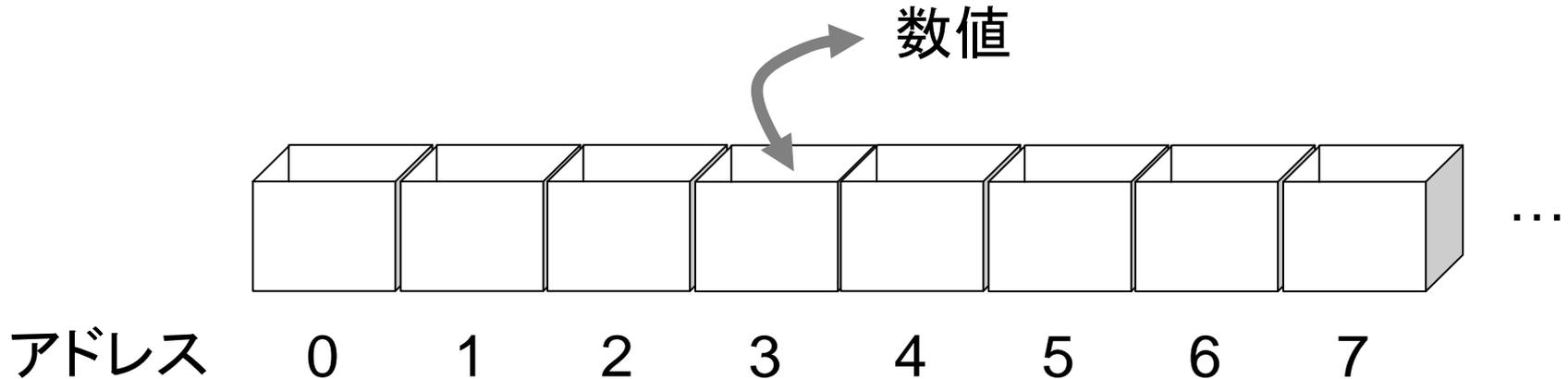
## 入出力装置 (Input/Output, I/O) の例

- 二次記憶 (外部記憶): ハードディスク, CD, DVD
- キーボード, マウス
- グラフィックス, ディスプレイ
- ネットワーク

# 計算機的基本的原理

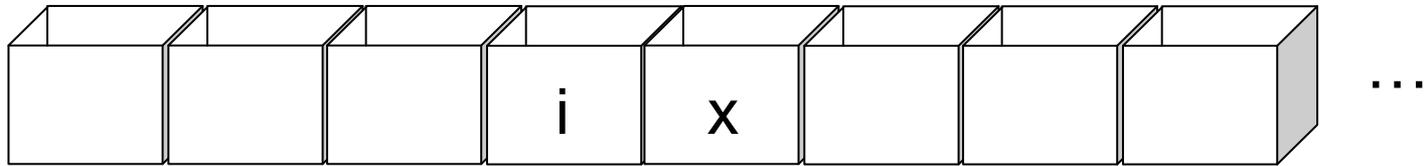
- 動作を指示する「命令」の列がメモリ内に並んでいる
- 計算の対象である「データ」もメモリ内に並んでいる
- プロセッサは、(原則として) **並んでいる順に命令を実行する**
- **命令実行によって、データが次々と書き換えられていく**

# メモリの概念



- 数値を格納する区画が並んだもの
- 番号(アドレス)でインデックスづけられている
- アドレスを指定して、数値を書き込んだり、読み出したりする
- 書き込むことと読み出すことをあわせて「アクセスする」という
- 同じ大きさの区画に、順番にアドレスがついていることが重要

# プログラムの動作



アドレス    0    1    2    3    4    5    6    7

```
1:  int i, x;
2:
3:  i = 5;
4:  x = 10;
5:  i = i + 1;
6:  if (i > 3) {
7:      x = x + i;
8:  } else {
9:      x = x - i;
10: }
```

mem[3] に 5 を保存  
mem[4] に 10 を保存  
mem[3] + 1 を mem[3] に保存  
mem[3] と 3 を比較  
比較結果が「>」でなければ L1 へ  
mem[4] + mem[3] を mem[4] に保存  
L2 へ  
L1: mem[4] - mem[3] を mem[4] に保存  
L2: 終了

# 数値の表現

「アドレス 3 に 5 を書き込む」:

3 や 5 などの数値はどのように表されるのか? → **2進数**

10 進数:

0, 1, 2, ... 9 の 10 個のシンボルを使って数を表す

1234 (decimal)

$$= 1 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 4 \times 10^0$$

同様に,

0, 1 の 2 個のシンボルを使って表したものを2進数と呼ぶ

1001 (binary)

$$= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

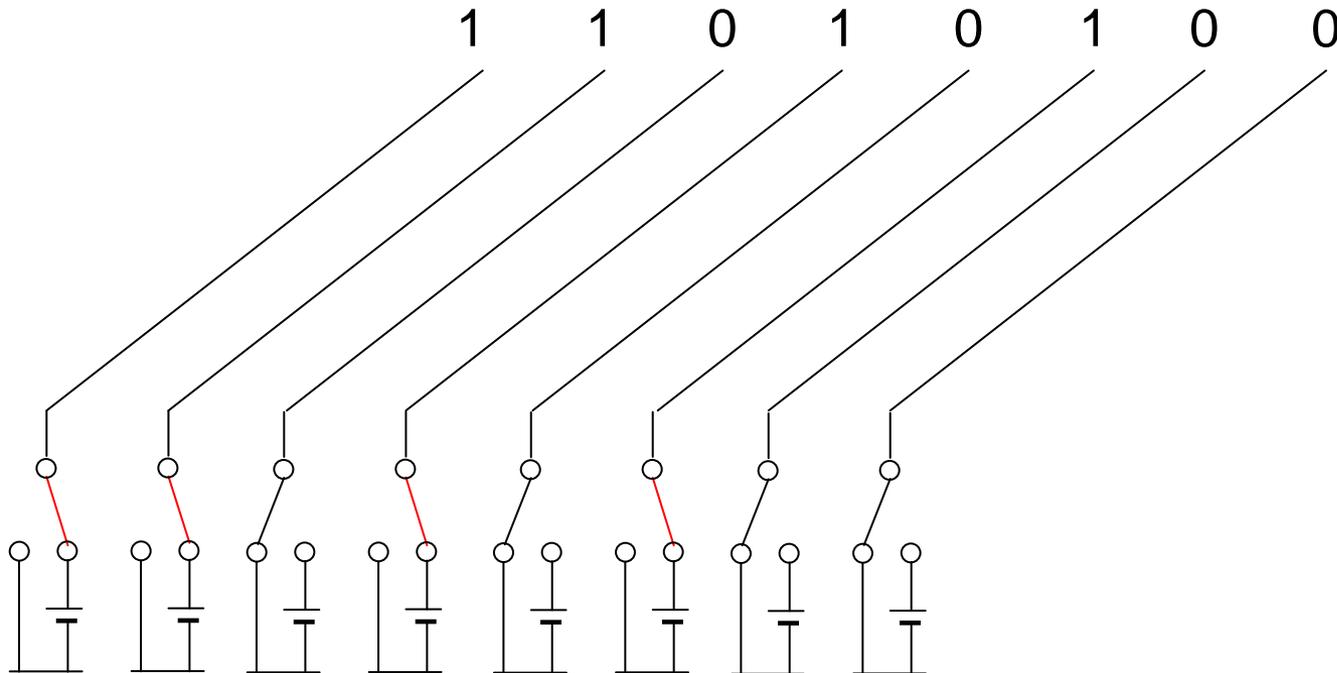
つまり計算機内の数値とは、0 と 1 が一定数並んだものである

# なぜ2進数を使うのか

- 電圧が高い = 1
- 電圧が低い = 0

という2種類の物理状態をシンボルとして扱う

素子・配線を複数並べて、必要なサイズのデータを表現する



# さまざまなデータの表現

音声: 数値が1次元に並んだもの

画像: 数値が2次元に並んだもの

文字列: 各文字に数値を割り当てて、それを並べたもの

... → すべて2進数

コード	文字										
32	空白	48	0	64	@	80	P	96	`	112	p
33	!	49	1	65	A	81	Q	97	a	113	q
34	"	50	2	66	B	82	R	98	b	114	r
35	#	51	3	67	C	83	S	99	c	115	s
36	\$	52	4	68	D	84	T	100	d	116	t
37	%	53	5	69	E	85	U	101	e	117	u
38	&	54	6	70	F	86	V	102	f	118	v
39	'	55	7	71	G	87	W	103	g	119	w
40	(	56	8	72	H	88	X	104	h	120	x
41	)	57	9	73	I	89	Y	105	i	121	y
42	*	58	:	74	J	90	Z	106	j	122	z
43	+	59	;	75	K	91	[	107	k	123	{
44	,	60	<	76	L	92	\	108	l	124	
45	-	61	=	77	M	93	]	109	m	125	}
46	.	62	>	78	N	94	^	110	n	126	~
47	/	63	?	79	O	95	_	111	o	127	DEL

# 計算の実現

「5 + 1 を計算して結果 6 を得る」

計算はどのように行うのか? → 論理関数

$z = f(x, y)$  は,  $x$  も  $y$  も  $z$  も 8 桁の2進数だとすると,

$$z_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_8, y_1, y_2, \dots, y_8)$$

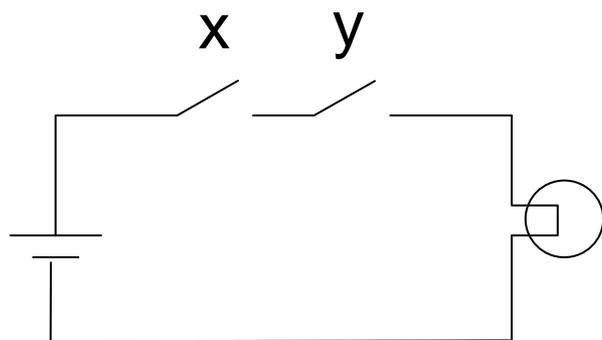
$$z_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_8, y_1, y_2, \dots, y_8)$$

⋮

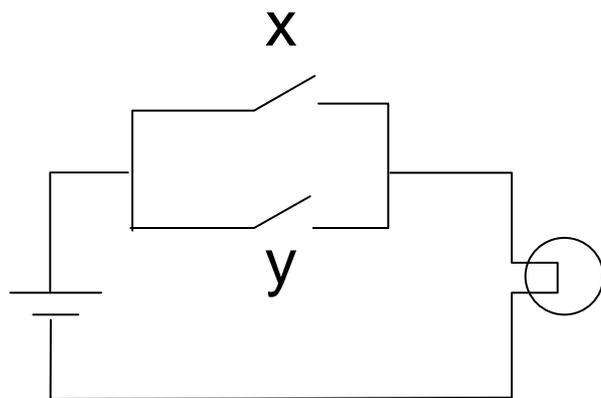
$$z_8 = f_8(x_1, x_2, \dots, x_8, y_1, y_2, \dots, y_8)$$

のような関数の組で表せる. ただし  $x_i, y_i, z_i \in \{0, 1\}$

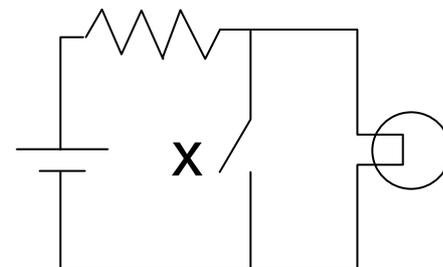
このような論理関数は必ず AND, OR, NOT の組合せで表せる



AND(x, y)



OR(x, y)



NOT(x)

AND, OR, NOT は、したがって、すべての演算（算術演算，論理演算，比較演算，...）はスイッチの組み合わせで実現できる

# プログラム

計算手順はどこからどのように与えられるのか?

→ プログラム

```
mem[3] に 5 を保存
mem[4] に 10 を保存
mem[3] + 1 を mem[3] に保存
mem[3] と 3 を比較
比較結果が「>」でなければ L1 へ
mem[4] + mem[3] を mem[4] に保存
L2 へ
L1: mem[4] - mem[3] を mem[4] に保存
L2: 終了
```

- プログラム  
= 命令がメモリに並んだもの
- プロセッサは、命令をアドレス順に読み出して実行する
- 実行順を変える命令もある

命令「t0 の内容に整数 14 を加算し, 結果を t1 に保存せよ」  
(t0 や t1 はプロセッサ内の記憶場所の名前)

00100001 00001001 00000000 00001110

addi \$t1, \$t0, 14

結局, 計算対象(データ)も, 計算手順(プログラム)も,  
メモリに 0 と 1 の羅列として保持されている  
(プログラム内蔵方式)

# プログラミング言語とコンパイラ

```
int i, x;  
i = 5; x = 10;  
i = i + 1;  
if (i > 3) {  
    x = x + i;  
} else {  
    x = x - i;  
}
```

ソースコード  
(C言語)

mem[3] に 5 を保存  
mem[4] に 10 を保存  
mem[3] + 1 を mem[3] に保存  
mem[3] と 3 を比較  
比較結果が「>」でなければ L1 へ  
mem[4] + mem[3] を mem[4] に保存  
L2 へ  
L1: mem[4] - mem[3] を mem[4] に保存  
L2: 終了

アセンブリコード  
(アセンブリ言語)

```
00101100  
11010110  
11011101  
10110110  
00101001  
10010011  
...
```

オブジェクトコード  
(実際にメモリに入る  
数字の列)

コンパイラ

アセンブラ

さまざまな言語

コンピュータの種類によってさまざま

# 計算機の構成方法の変遷

- スイッチをどのように実現するか
  - リレー, 真空管, トランジスタ (個別素子, IC, VLSI)
- 記憶素子をどのように実現するか
  - 原理上はスイッチで作れる(フリップフロップ). しかし高価
  - 他の手段: 水銀遅延線, 真空管, 磁気コア, 半導体メモリ
- 速く, 小さく, 壊れにくいデバイスの追求
- デバイスが変われば, それらの組み合わせ方も変わる

# 計算機の歴史

真空管 (1904)

トランジスタ (1947)

集積回路 (1958)

マイクロプロセッサ  
(1971)

磁気ドラムメモリ (1932)

陰極線管メモリ (1946?)

水銀遅延管 (1947?)

磁気コアメモリ (1949)

半導体メモリ (DRAM)  
(1966)

機械式

電気機械式

電子式

(17~19c.)

Z1 (1938)

Z3 (1941)

Harvard Mk1  
(1944)

ABC (1942)

Colossus (1943)

ENIAC (1946)

SSEM (1948)

EDSAC (1949)

EDVAC (1951)

PDP-1 (1960)

System/360 (1964)

プログラム  
内蔵方式

計算機アーキテク  
チャの概念

# 計算機の歴史

真空管 (1904)

トランジスタ (1947)

集積回路 (1958)

マイクロプロセッサ  
(1971)

磁気ドラムメモリ (1932)

陰極線管メモリ (1946?)

水銀遅延管 (1947?)

磁気コアメモリ (1949)

半導体メモリ (DRAM)  
(1966)

機械式

電気機械式

電子式

(17~19c.)

Z1 (1938)

Z3 (1941)

Harvard Mk1  
(1944)

ABC (1942)

Colossus (1943)

ENIAC (1946)

SSEM (1948)

EDSAC (1949)

EDVAC (1951)

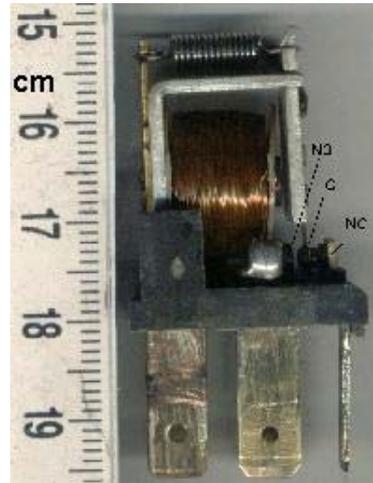
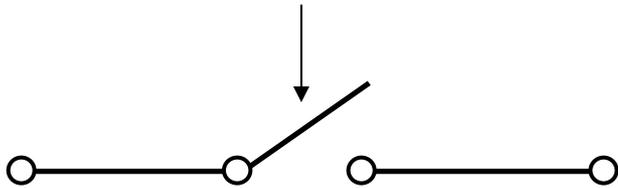
PDP-1 (1960)

System/360 (1964)

プログラム  
内蔵方式

計算機アーキテク  
チャの概念

# スイッチ回路の変遷



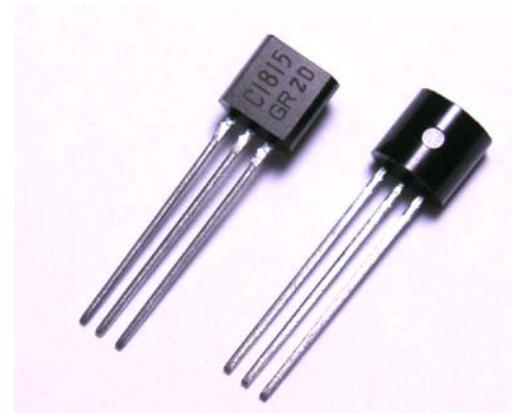
電磁リレー

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F:Relay.jpg>



真空管

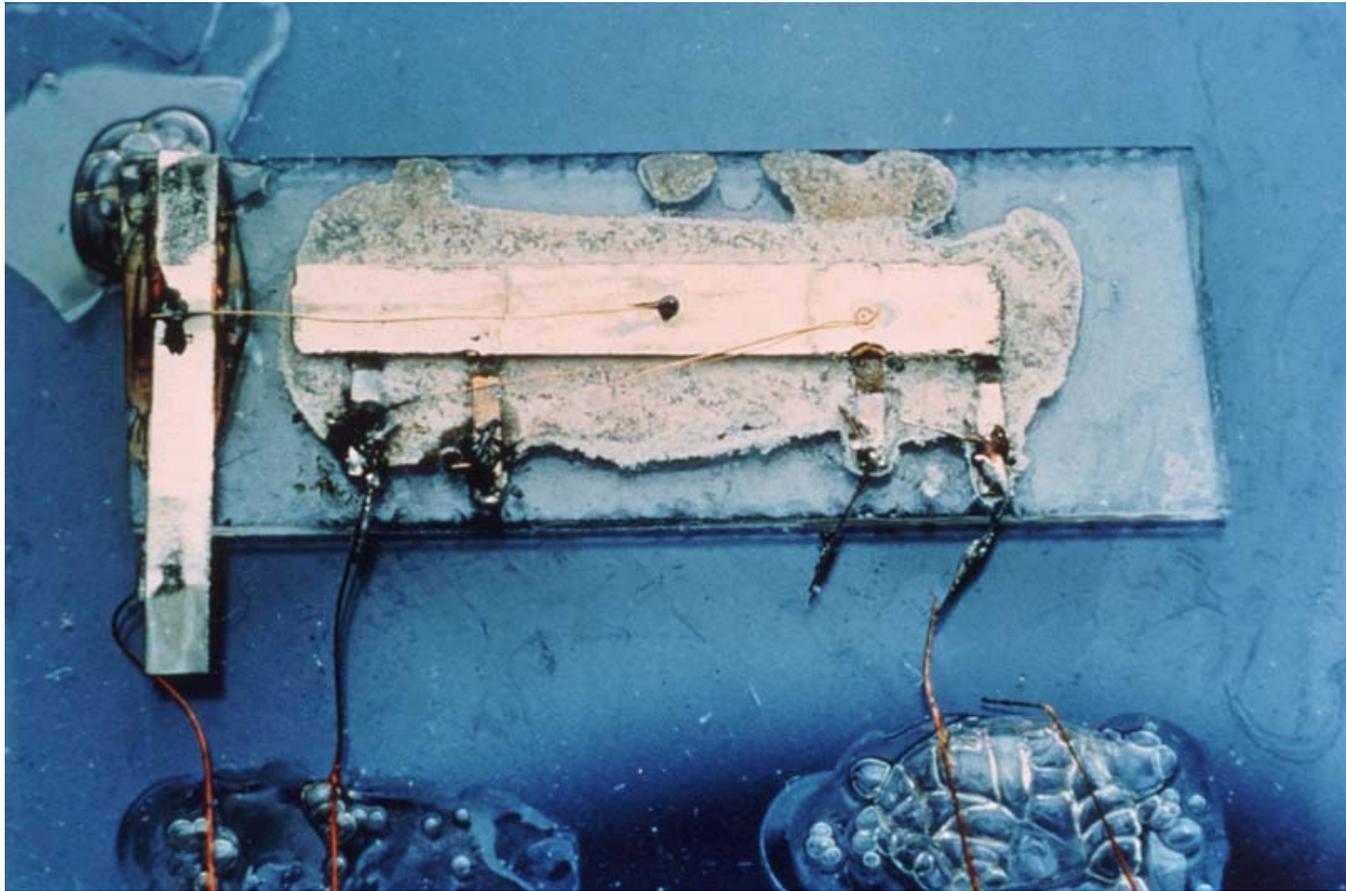
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA%E7%AE%A1>



トランジスタ

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%82%B9%E3%82%BF>

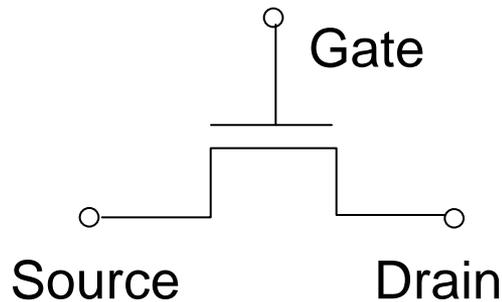
# 最初の集積回路 (Integrated Circuit)



<http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/downloadphotos.shtml>

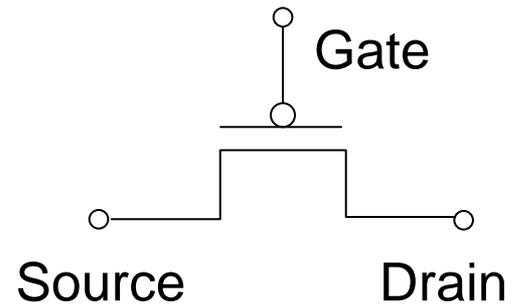
# MOS 型トランジスタ (Metal-Oxide-Semiconductor)

## NMOSトランジスタ



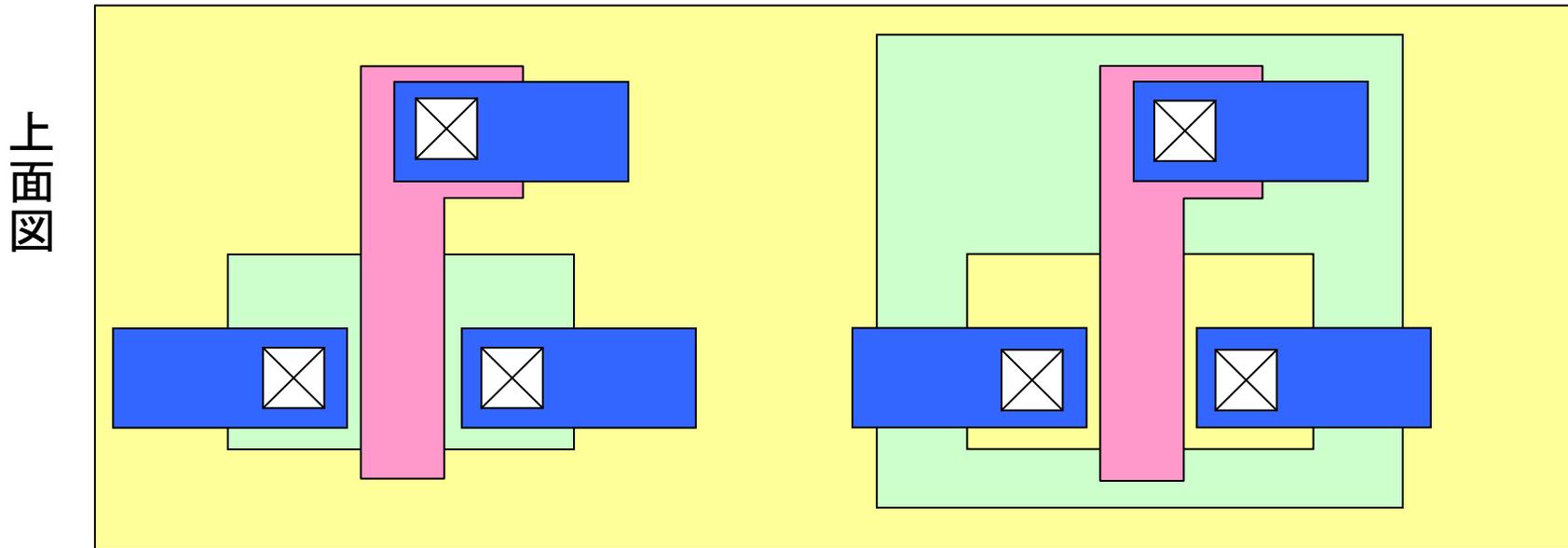
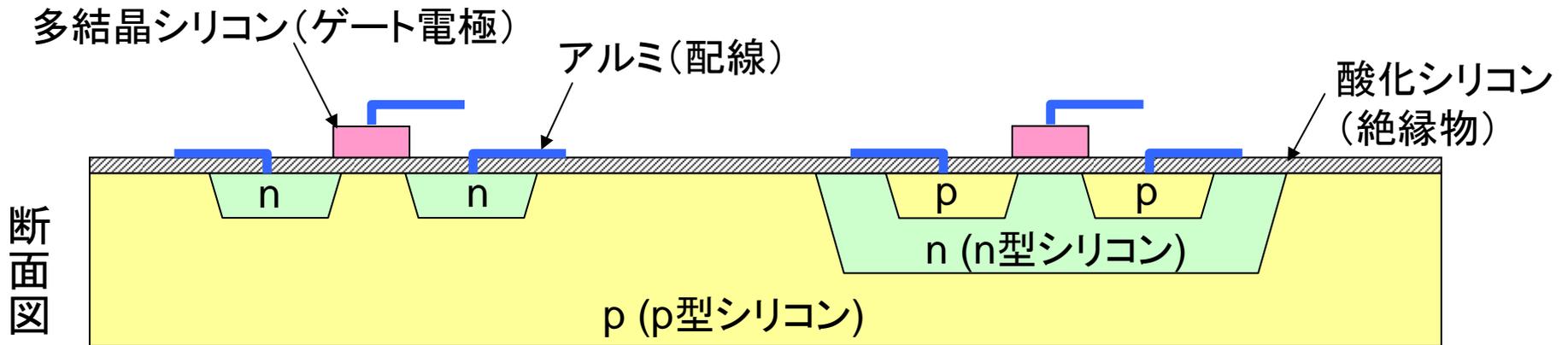
ゲートに電圧がかかっているとき (high, e.g. 3.3V), ソース-ドレイン間を電流が流れる

## PMOSトランジスタ



ゲートに電圧がかかっていないとき (low, 0V), ソース-ドレイン間を電流が流れる

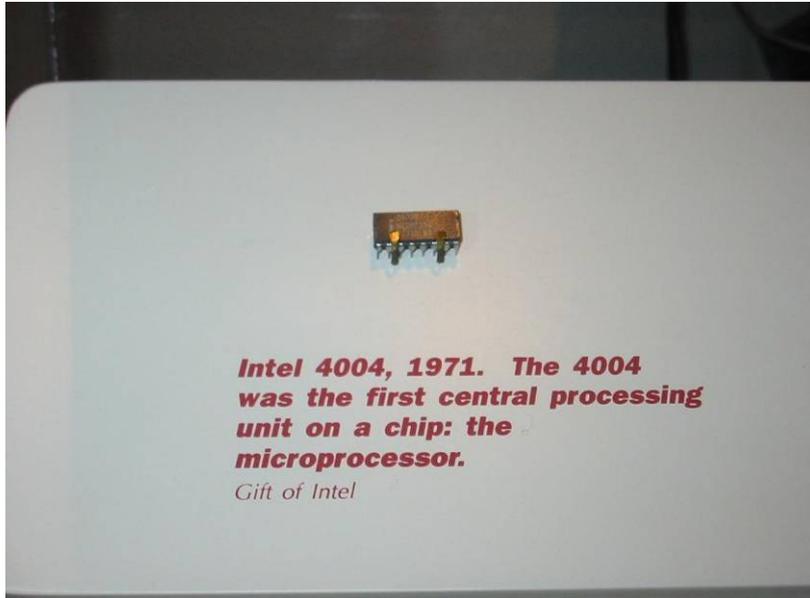
# トランジスタの構造 (模式図)



NMOS

PMOS

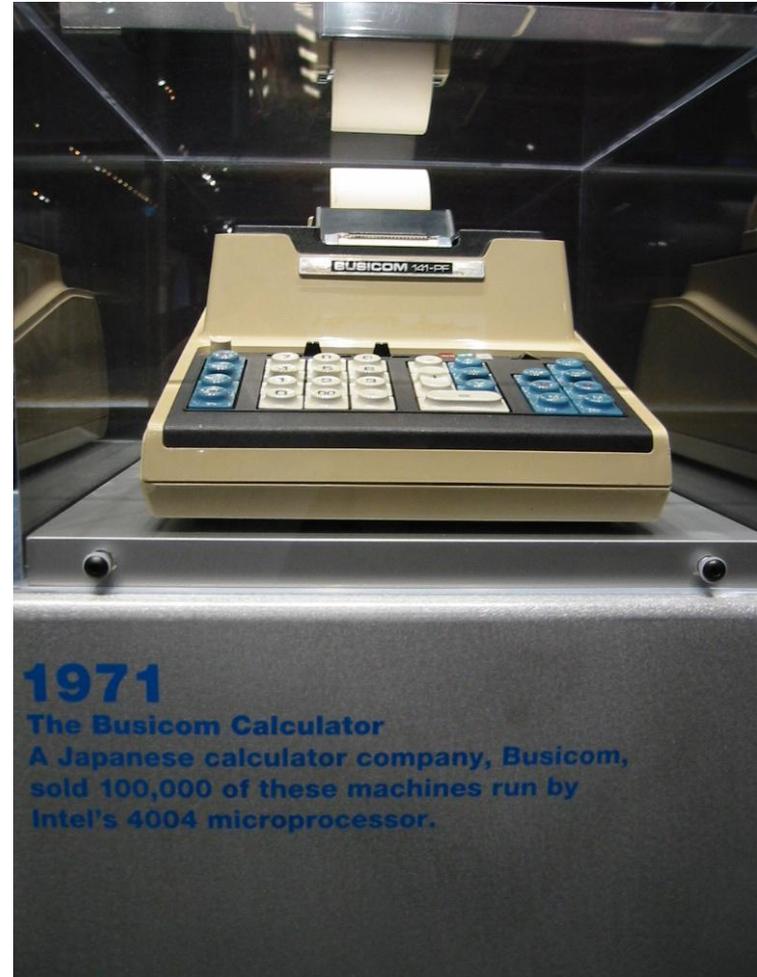
# Intel 4004



**Intel 4004, 1971. The 4004 was the first central processing unit on a chip: the microprocessor.**

*Gift of Intel*

(American History Museum)



**1971**

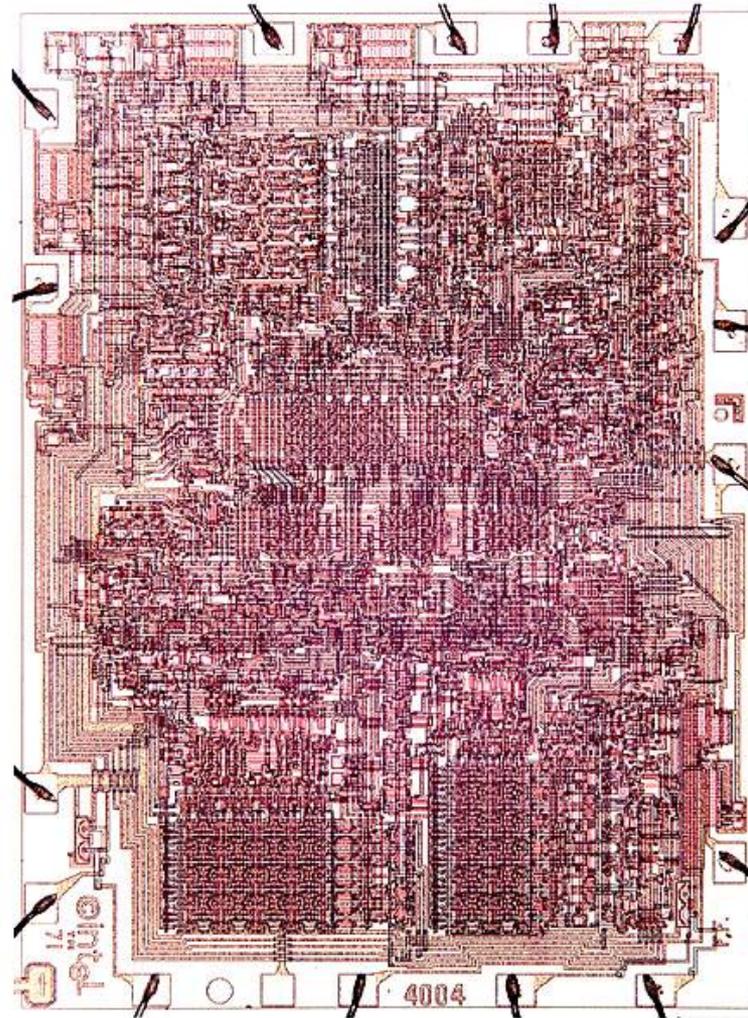
**The Busicom Calculator**

A Japanese calculator company, Busicom, sold 100,000 of these machines run by Intel's 4004 microprocessor.

Busicom 141-PF

(Intel Museum, Santa Clara)

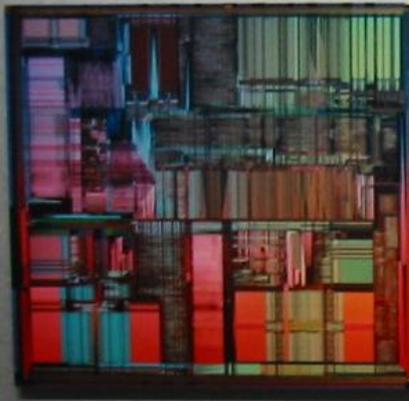
# Intel 4004



[http://news.com.com/1971+Intel+4004+processor/2009-1006\\_3-6038974-3.html](http://news.com.com/1971+Intel+4004+processor/2009-1006_3-6038974-3.html)

# Intel Pentium

sound, photographs, and video.



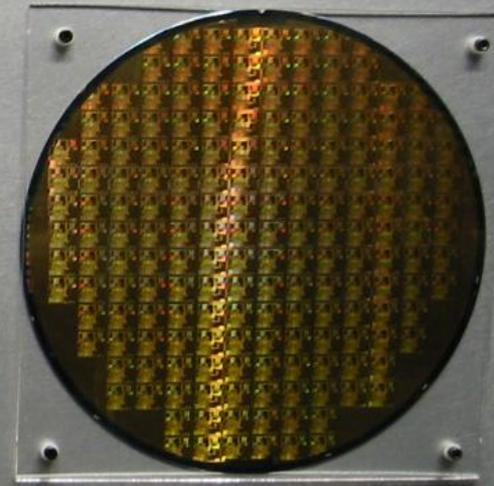
**1993**

## The Pentium® Brand Is Born

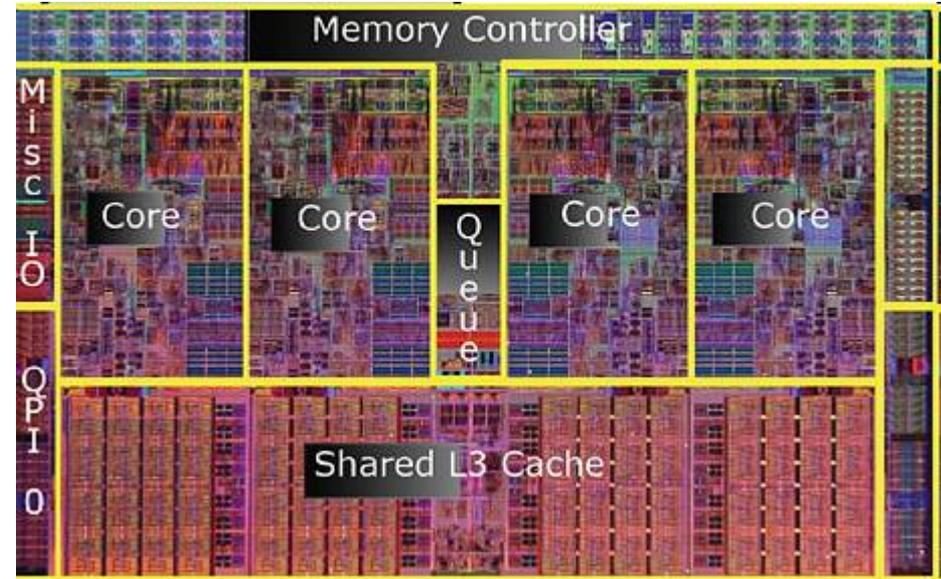
With 3.1 million transistors, the Pentium® processor brought faster performance, better graphics, and real-time speech and video to personal computers. Because it was fully compatible with earlier Intel microprocessors, the chip's expected name was Intel586. However, Intel cannot prevent imitators from using similar numbers to name their products, so the company decided to use a name it could protect with a trademark. "Pente" means five—a reminder that the chip was Intel's fifth-generation microprocessor.



Each Pentium chip from this 8-inch wafer is capable of executing more than 100 million instructions per second.



# Intel Core i7



[http://ja.wikipedia.org/wiki/Intel\\_Core\\_i7](http://ja.wikipedia.org/wiki/Intel_Core_i7)

<http://www.atmarkit.co.jp/fsys/zunouhoudan/102zunou/corei7.html>

# 計算機の歴史

真空管 (1904)

トランジスタ (1947)

集積回路 (1958)

マイクロプロセッサ  
(1971)

磁気ドラムメモリ (1932)

陰極線管メモリ (1946?)

水銀遅延管 (1947?)

磁気コアメモリ (1949)

半導体メモリ (DRAM)  
(1966)

機械式

電気機械式

電子式

(17~19c.)

Z1 (1938)

Z3 (1941)

Harvard Mk1  
(1944)

ABC (1942)

Colossus (1943)

ENIAC (1946)

SSEM (1948)

EDSAC (1949)

EDVAC (1951)

PDP-1 (1960)

System/360 (1964)

プログラム  
内蔵方式

計算機アーキテク  
チャの概念

# 記憶素子の変遷



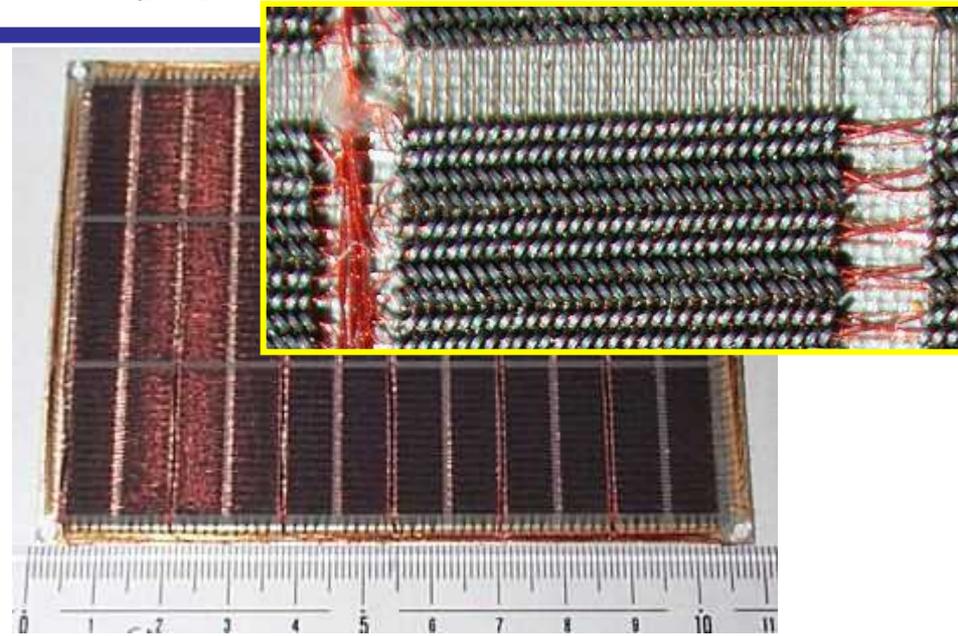
水銀遅延管

[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F:Mercury\\_memory.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F:Mercury_memory.jpg)



陰極線管  
(Williams-Kilburn管)

鏡 慎吾 (東北大学): 計算機工学 2015 (1)



磁気コアメモリ

<http://www.st.rim.or.jp/~nkomatsu/premicro/coremem.html>



半導体メモリ

# 計算機の歴史

真空管 (1904)

トランジスタ (1947)

集積回路 (1958)

マイクロプロセッサ  
(1971)

磁気ドラムメモリ (1932)

陰極線管メモリ (1946?)

水銀遅延管 (1947?)

磁気コアメモリ (1949)

半導体メモリ (DRAM)  
(1966)

機械式

電気機械式

電子式

(17~19c.)

Z1 (1938)

Z3 (1941)

Harvard Mk1  
(1944)

ABC (1942)

Colossus (1943)

ENIAC (1946)

SSEM (1948)

EDSAC (1949)

EDVAC (1951)

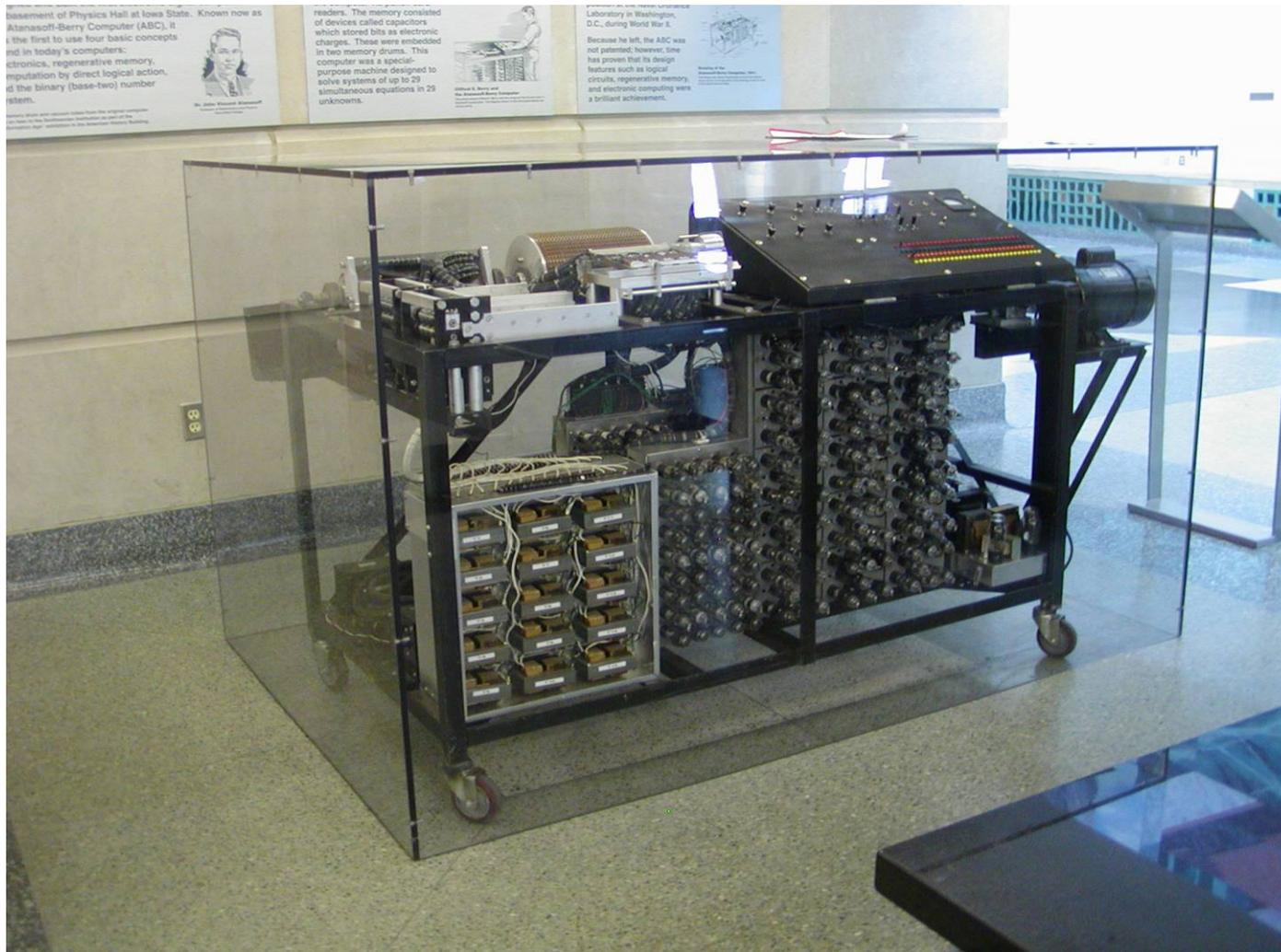
PDP-1 (1960)

System/360 (1964)

プログラム  
内蔵方式

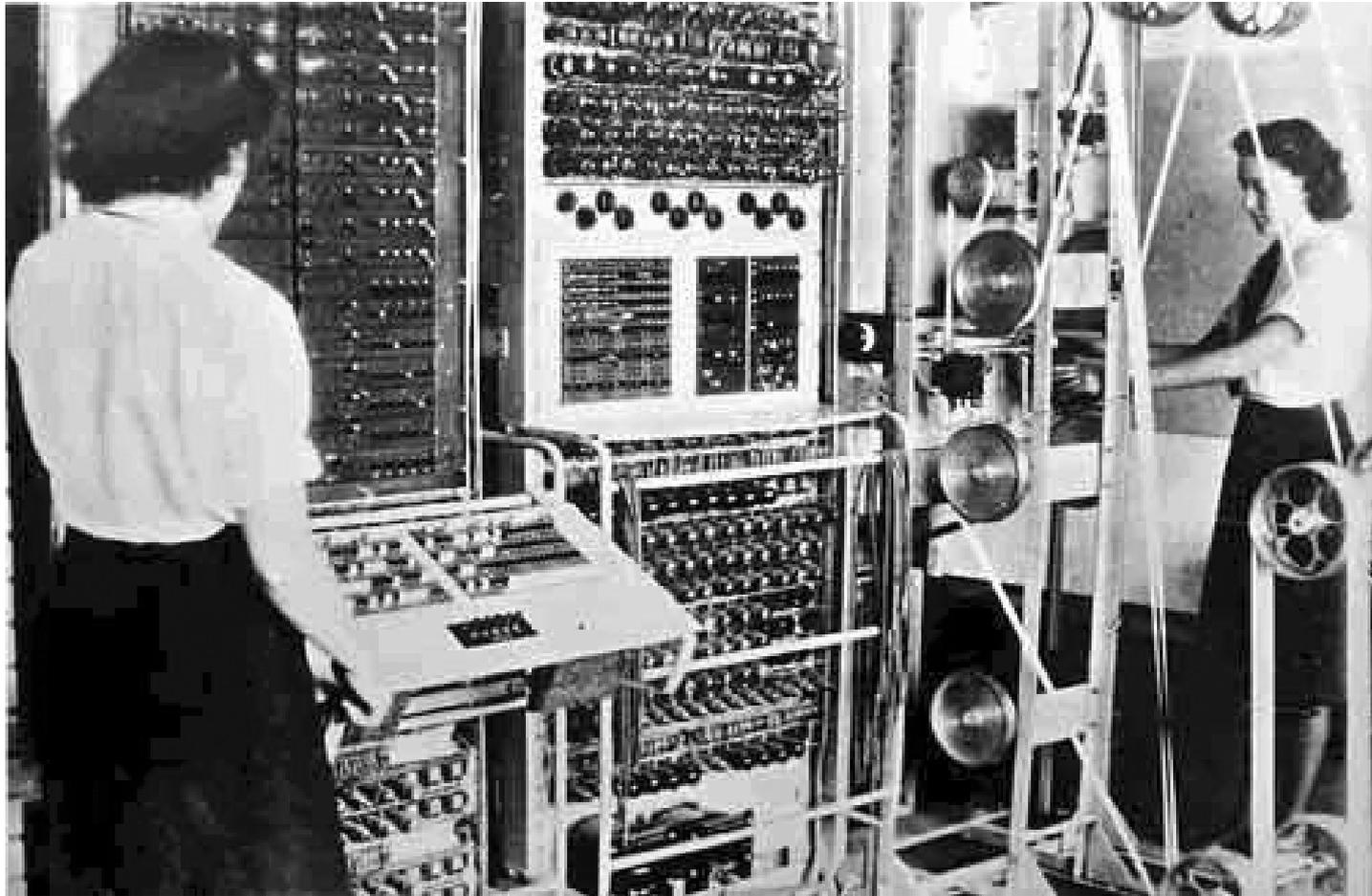
計算機アーキテク  
チャの概念

# ABC



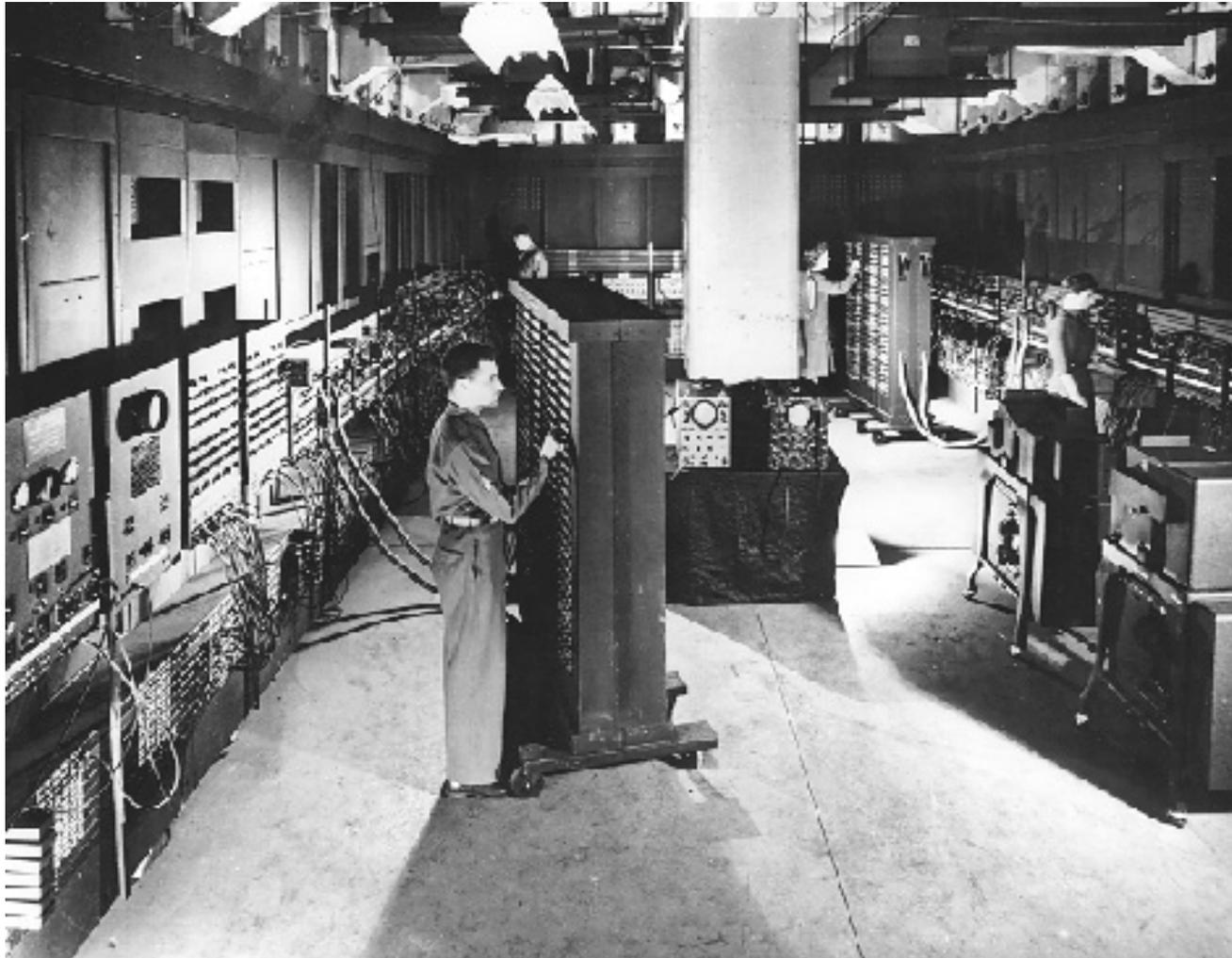
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atanasoff-Berry\\_Computer.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atanasoff-Berry_Computer.jpg)

# Colossus



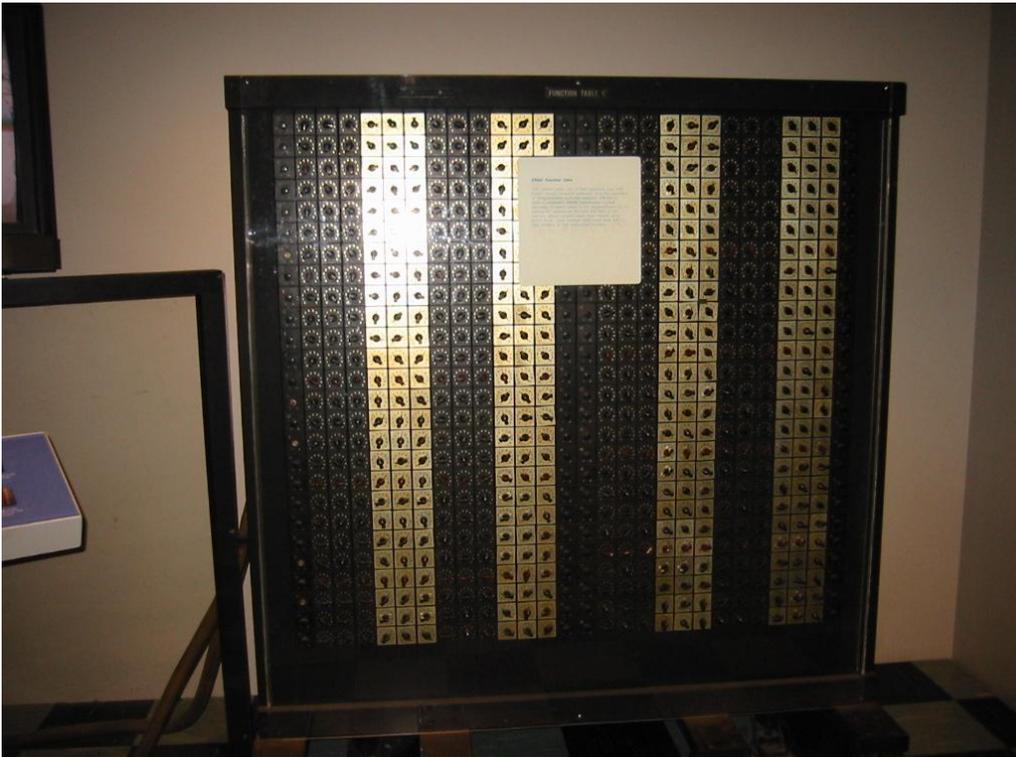
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colossus.jpg>

# ENIAC



<http://www.library.upenn.edu/exhibits/rbm/mauchly/jwm0-1.html>

# ENIAC



(American History Museum)

このパネルにケーブルを挿してプログラミングした  
つまりまだプログラム内蔵型ではなかった

# 計算機の歴史

真空管 (1904)

トランジスタ (1947)

集積回路 (1958)

マイクロプロセッサ  
(1971)

磁気ドラムメモリ (1932)

陰極線管メモリ (1946?)

水銀遅延管 (1947?)

磁気コアメモリ (1949)

半導体メモリ (DRAM)  
(1966)

機械式

電気機械式

電子式

(17~19c.)

Z1 (1938)

Z3 (1941)

Harvard Mk1  
(1944)

ABC (1942)

Colossus (1943)

ENIAC (1946)

SSEM (1948)

EDSAC (1949)

EDVAC (1951)

PDP-1 (1960)

System/360 (1964)

プログラム  
内蔵方式

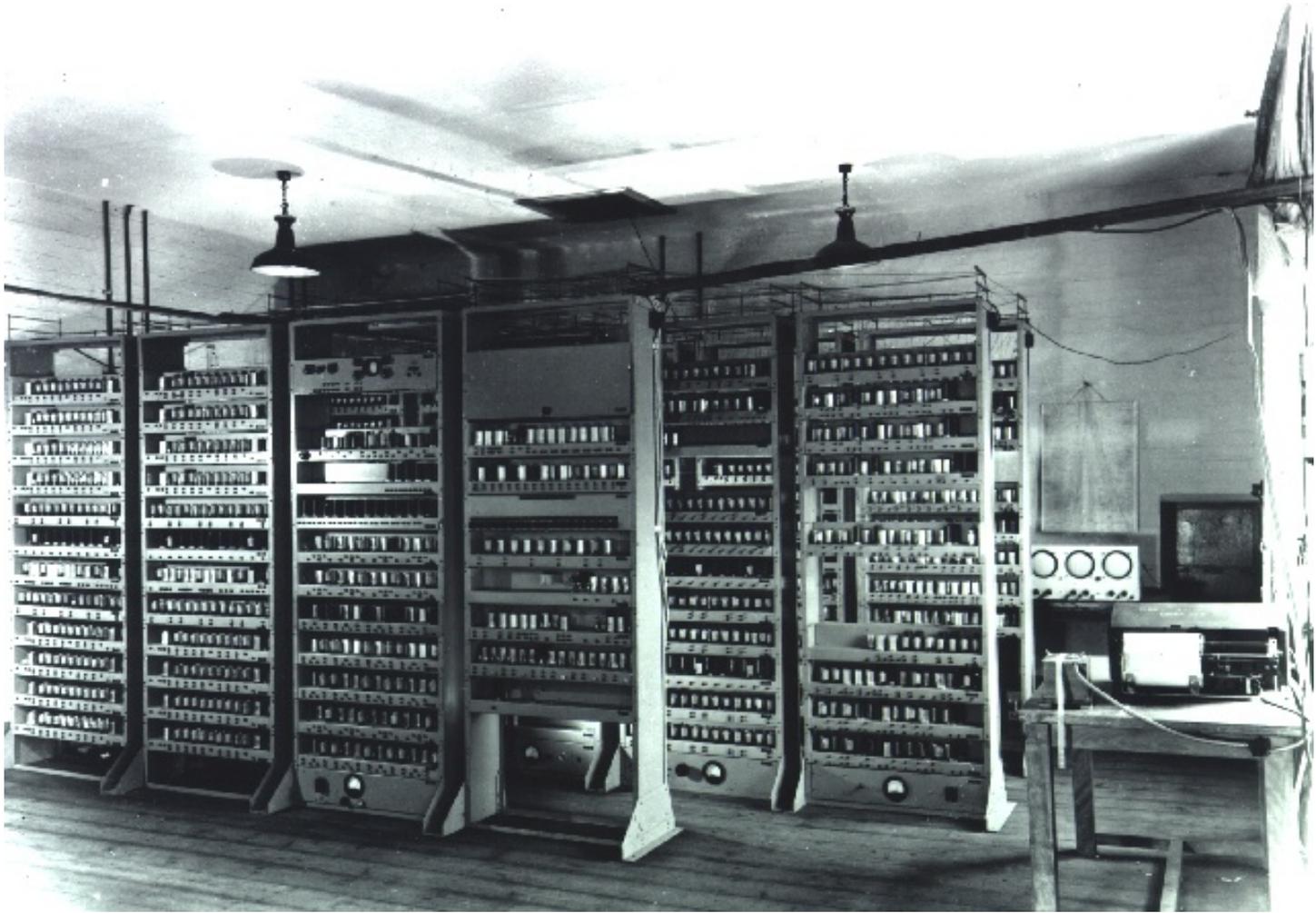
計算機アーキテク  
チャの概念

# EDVAC



<http://ftp.arl.mil/ftp/historic-computers/>

# EDSAC



[http://www.cl.cam.ac.uk/relics/archive\\_photos.html](http://www.cl.cam.ac.uk/relics/archive_photos.html)

# 計算機の歴史

真空管 (1904)

トランジスタ (1947)

集積回路 (1958)

マイクロプロセッサ  
(1971)

磁気ドラムメモリ (1932)

陰極線管メモリ (1946?)

水銀遅延管 (1947?)

磁気コアメモリ (1949)

半導体メモリ (DRAM)  
(1966)

機械式

電気機械式

電子式

(17~19c.)

Z1 (1938)

Z3 (1941)

Harvard Mk1  
(1944)

ABC (1942)

Colossus (1943)

ENIAC (1946)

SSEM (1948)

EDSAC (1949)

EDVAC (1951)

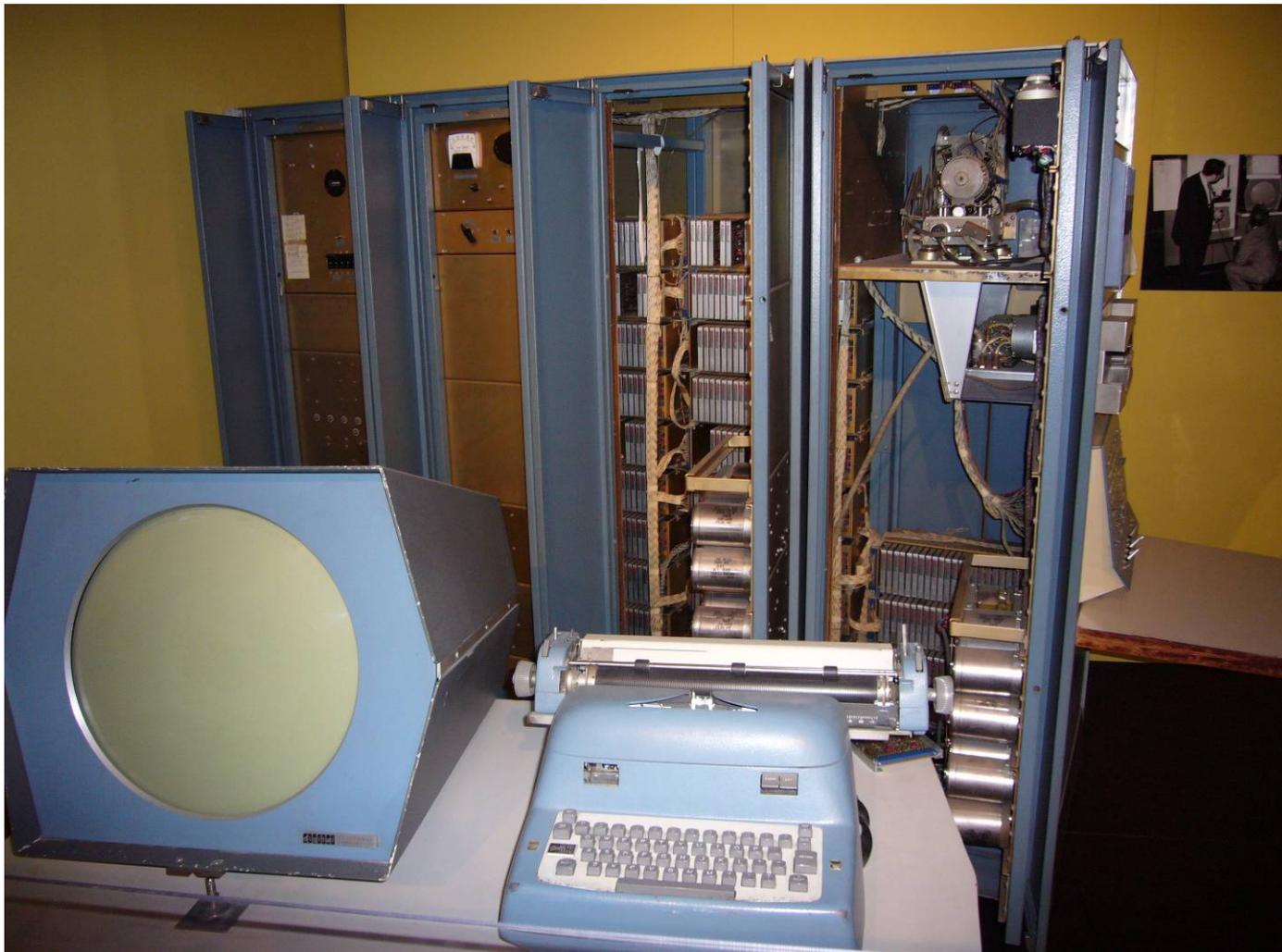
PDP-1 (1960)

System/360 (1964)

プログラム  
内蔵方式

計算機アーキテク  
チャの概念

# DEC PDP-1



<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PDP-1.jpg>

# IBM System/360



[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Bundesarchiv\\_B\\_145\\_Bild-F038812-0014%2C\\_Wolfsburg%2C\\_VW\\_Autowerk.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Bundesarchiv_B_145_Bild-F038812-0014%2C_Wolfsburg%2C_VW_Autowerk.jpg)

「コンピュータアーキテクチャ」という概念をおそらく最初に明確に導入した商用計算機. オペレーティングシステム(OS)を最初に導入した商用計算機でもある

# Apple Macintosh, Sun 1, IBM PC



(American History Museum)

# 講義内容

- イン트로ダクション
- 算術演算 (2進数)
- 論理演算 (AND, OR, NOT)
- 計算機の動作
- ブール代数
- 組合せ論理回路
- 順序回路
- メモリ
- 入出力・OS
- コンパイラ
- 浮動小数点演算
- ネットワーク