



# コンピュータアーキテクチャ 2024

## コンピュータの歴史 と チューリングマシン

堤 利幸



- 1. 計算の機械化**
- 2. 計算の自動化**
- 3. コンピュータの出現**
- 4. コンピュータの発展**

# 第3期のコンピュータ



## 電子素子を用いたコンピュータは素子技術により第1～5世代に分類される。

### 第1世代「真空管の時代」1950～1959

H/W

論理素子: 真空管, リレー

記憶素子: 磁気ドラム

S/W

アセンブリ言語, FORTRAN

・世界初のコンピュータ

ENIAC (1946)

・世界初のプログラム内蔵方式コンピュータ

EDSAC (1949)

・ノイマンの作ったプログラム内蔵方式コンピュータ

EDVAC (1950)

・世界初の商用コンピュータ

UNIVAC (1951)

### 第2世代「トランジスタの時代」1959～1964

H/W

論理素子: トランジスタ, ダイオード

記憶素子: 磁気コア

S/W

バッチ処理, TSS, COBOL

・トランジスタの発明: ベル研究所 (1948)

・IBM 7090 (1959)

### 第3世代「ICの時代」1964～1970

H/W

論理素子: IC

記憶素子: 磁気コア

S/W

オペレーティングシステム(OS), BASIC, Pascal, PL/I

・IBM/360 (1964): ICを全面的に採用

・DEC PDP-8(1965):世界初のミニコンピュータ

# 第3期のコンピュータ



## 第3.5世代「LSIの時代」1970～1980

H/W

論理素子: LSI

記憶素子: IC

S/W

仮想記憶, C言語, UNIX

- ・ IBM/370 (1970): LSIを全面的に採用, 仮想記憶の採用
- ・ Intel 4001(1971): 世界初のMPU
- ・ Xerox Alto (1974): ビットマップディスプレイ, マウスの採用
- ・ Apple I (1976): 世界初のPC

## 第4世代「VLSIの時代」1980～現在

H/W

論理素子, 記憶素子: VLSI (Very Large Scale Integration)  
→ ULSI (Ultra Large Scale Integration)

S/W

GUI, オブジェクト指向

- ・ インターネットの爆発的普及

## 現在, 将来のコンピュータ

- ・ 第5世代コンピュータ
  - ・ 非ノイマン型コンピュータ
  - ・ 推論機能

- ・ 分散化・並列化
  - ・ マルチコアCPU
- ・ 人工知能チップ
- ・ 量子コンピュータ
- ・ マルチメディア
- ・ 携帯端末 + 情報家電

# トランジスタの発明 1947年 ショックレイ, バーディーン, ブラッテン



1947年12月23日に発明された最初のトランジスタ(複製品)

トランジスタ (transistor) は増幅、またはスイッチ動作をする半導体素子

「変化する抵抗を通じての信号変換器 (transfer of a signal through a varistor または transit resistor)」からの造語である。

**1947年12月** トランジスタが発明される。  
最初のトランジスタは接触型トランジスタ

**1948年6月** AT&Tベル研究所の  
ウォルター・ブラッテン,  
ジョン・バーディーン,  
ウィリアム・ショクレーらの  
グループによりその発明が報告される。  
(この功績により、1956年にノーベル物理学賞受賞)

## 2022年でトランジスタが発明されて75年

# ムーアの法則 Moore's Law



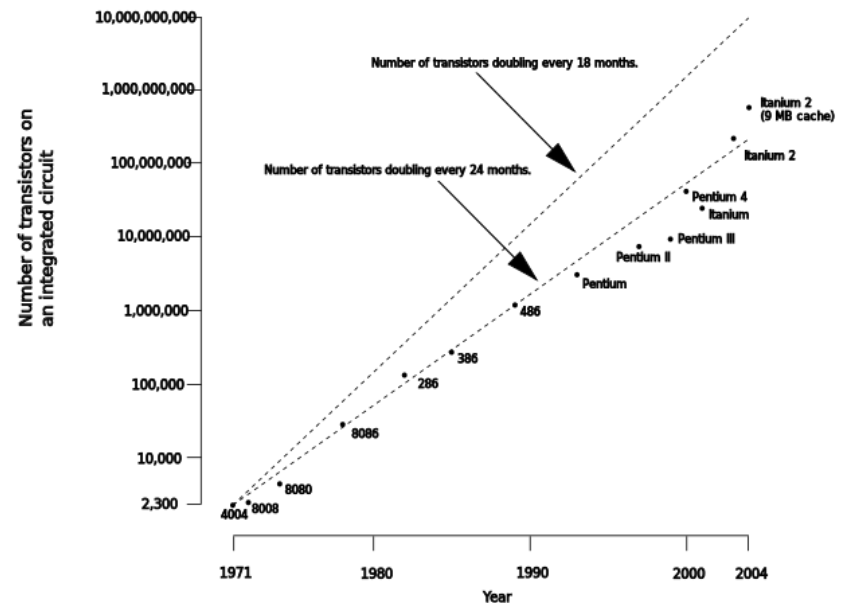
ムーアの法則とは、Intel社の創設者の1人であるゴードン・ムーアが発表した「半導体集積回路上のトランジスタは、18 (~24) カ月ごとに倍になる」という経験則のことである。2015年でムーアの法則が生まれて50年になる。

インテルの共同創業者となるゴードン・ムーアのその論文が載ったのは50年前、エレクトロニクス・マガジンの1965年4月19日号だった。半導体集積回路の性能予測に用いた経験則を別の人が定式化し「ムーアの法則」の名で広まった。

n年後の倍率 p は、 $p = 2^{n/1.5}$

2年後には2.52倍、5年後には10.08倍、7年後には25.4倍、10年後には101.6倍、15年後には1024.0倍、20年後には10 321.3倍ということになる。

Moore's Law



# 「富岳」がスパコン世界ランキングで1位に、世界初の同時4冠達成

2020年6月22日スーパーコンピューターの性能を競う世界ランキング「TOP500」で1位を獲得した



- 2011年11月の「京(けい)」以来の9年ぶりの世界1
- LINPACK性能は415.53ペタ(ペタは1000兆)フロップス(1秒当たりの浮動小数点演算回数)
- スパコン上で動く実アプリケーションに近い演算の性能を測る「HPCG」、ビッグデータ処理(大規模グラフ解析)に関する性能を測る「Graph500」、今回から加わったAI(人工知能)関連処理の性能を測る「HPL-AI」でそれぞれ1位だった。

# コンピュータの性能2023.11: スーパーコンピュータ



スパコン TOP500 Supercomputer Sites <http://www.top500.org/>  
スーパーコンピュータの性能ランキング「TOP500」は6カ月に1回(6月,11月)更新されている。

- Rmaxはベンチマークでの実測のFLOPS、
- RpeakはFLOPSの理論限界。Rmax/Rpeakが実行効率となる。

TOP500 List - November 2023.11

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703
2	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	4,742,808	585.34	1,059.33	24,687
3	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Microsoft Azure United States	1,123,200	561.20	846.84	
4	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899



- スーパーコンピュータ性能ランキングのTOP500は2023年11月14日、ランキング最新版(2023年11月版)を公開した。1位は米オークリッジ国立研究所とHPEの「Frontier」(1194.00PFLOPS〈ペタフロップス〉、毎秒119京4000兆回)で前回(2023年6月版)と同じ。
- 現時点でエクサフロップス級のスパコンはFrontierのみである。
- 理化学研究所と富士通の「富岳」(442.01PFLOPS、毎秒44京2010兆回)は4位で、前回の2位から下がった。システム構成とベンチマーク値は前回と同じで、HPCGとGraph500の両ベンチマークでは8期連続1位となった。





# 問題



コンピュータの変遷に関する次の記述中の( )に入れるべき適当な字句を解答群の中から選べ。

コンピュータの特徴は、大量のデータ処理と演算速度の高速性にあるといえる。特に、コンピュータの演算速度は、( a )、( b )の速度および( c )によって決まる。

( a )の変遷をたどると、リレー、( d )、パラメトロンの実用化を経て、( e )が使われるようになった。( b )についても磁心記憶素子のほかに、磁気薄膜やワイヤを経て、( e )が使われるようになった。このような各素子の技術革新がコンピュータの演算速度を飛躍的に高度化している。トランジスタ数の分類でいえば、( f )、( g )、VLSI、ULSIが順に実用化されてきた。現在では、システムLSI(SoC)の開発が進められている。

[解答群]

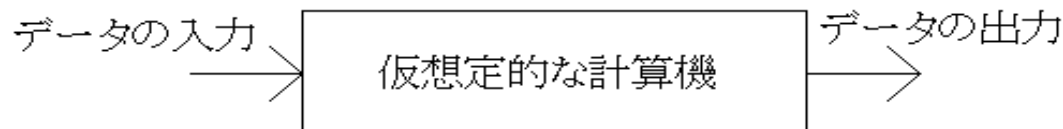
- |                   |                   |        |
|-------------------|-------------------|--------|
| ア IC              | イ PCS(パンチカードシステム) | ウ 論理素子 |
| エ トランジスタ          | オ トンネルダイオード       |        |
| カ アーキテクチャ(演算制御方式) | キ 入出力装置           | ク LSI  |
| ケ 記憶素子            | コ 真空管             |        |

# アラン・チューリング



1936年 英国の数学者 アラン・チューリング( Alan M. Turing ) 26歳 によって、  
考案された仮想的計算機。

A・M・チューリングは1936年に論文を発表し、その中で「計算する」という事を定義し、それを証明するための仮想的な計算機を作り上げました。

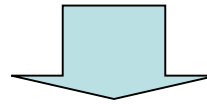


この計算機で計算を行い、この機械がデータを  
出力可能ならば 計算できる  
出力不可能ならば 計算できない  
この仮想的な計算機を「**チューリング機械**」と定義する

チューリング機械は、ある関数を計算するアルゴリズムが存在するか否かという形の問題を、数学的に厳密に議論する為に考案された機械で、アルゴリズムによって計算できる関数は全て原則的にはチューリング機械によって計算することができ、逆にチューリング機械で解けない問題にはアルゴリズムは存在しないと言える。  
つまり、**アルゴリズムの判定をする機械がチューリング機械**である。



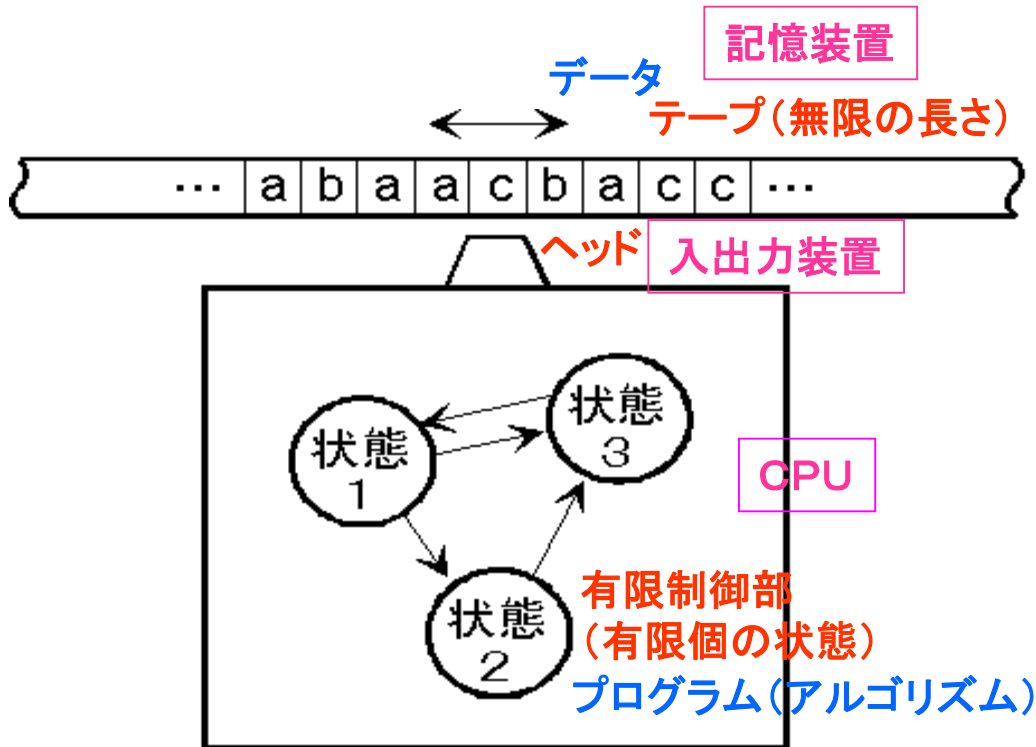
**現在のコンピュータの原理は英国の数学者チューリングによって考案されたチューリング・マシンに遡ることができる。**



# チューリングマシン TM —コンピュータの原型—



## チューリングマシンの構成



チューリングマシンにできることは、

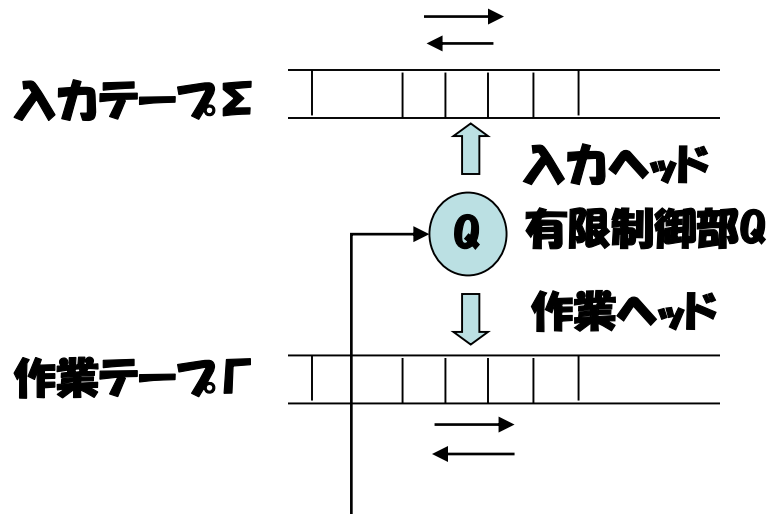
- ヘッドの位置にある記号を読み取ること
- ヘッドの位置に記号を書くこと
- ヘッドを右か左に一コマ移動すること
- マシンの状態を変えること

だけである。

# チューリングマシンの動作



**2倍する動作**      **1001(9) → 10010(18)**



$\Sigma = \textcircled{\text{左}} 1001 \textcircled{\text{右}}$

$\textcircled{\text{左}}$ : 左端マーク  
 $\textcircled{\text{右}}$ : 右端マーク  
 $B$ : フラック

$\Gamma = \textcircled{\text{左}} BBB \dots$

$\Gamma = \textcircled{\text{左}} 10010 BBB \dots$

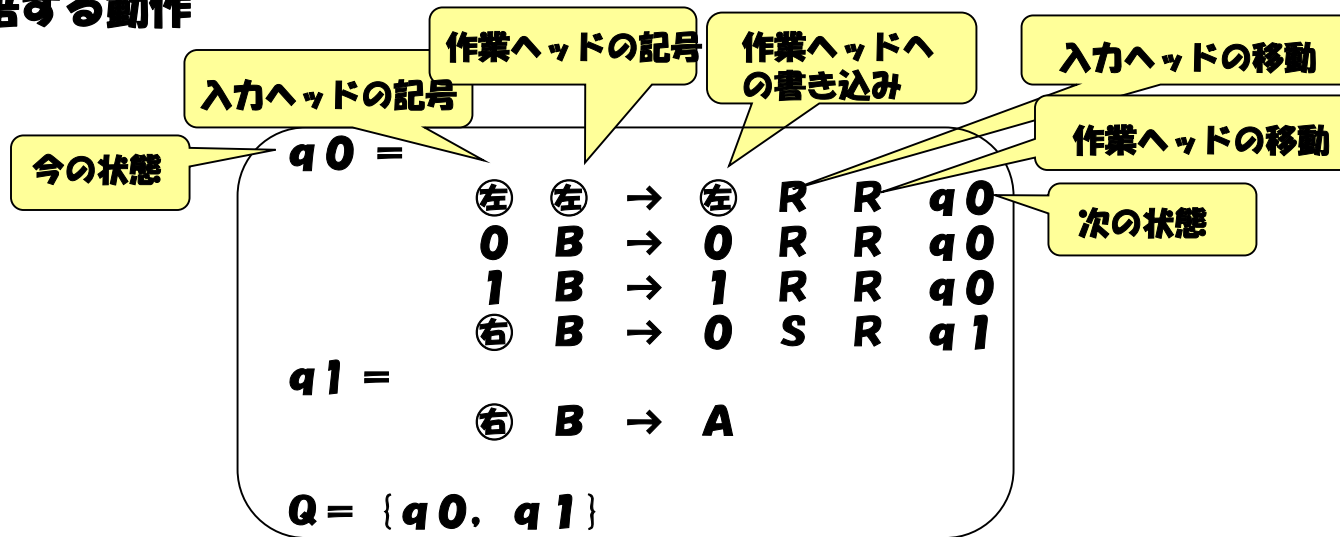
あらかじめ与えられた有限個のルール  
 $Q = \{q_0, q_1, \dots\}$  (**プログラム**) によって制御される。

$(q \in Q,$	$\sigma \in \Sigma,$	$\gamma \in \Gamma)$	$\rightarrow$	$(\gamma' \in \Gamma,$	$x \in \{R, L, S\},$	$y \in \{R, L, S\},$	$q' \in Q)$
現在の状態	入力ヘッド	作業ヘッド		作業ヘッド	入力ヘッド	作業ヘッド	次の状態
$\rightarrow A, N$							

# チューリングマシンの動作



## 2倍する動作



1001  $-(\times 2) \rightarrow$  10010

Step0.	$\Sigma = \textcircled{\text{左}} 1001 \textcircled{\text{右}}$	$\Gamma = \textcircled{\text{左}} BBBBBBBB \dots$
Step1.	$\Sigma = \textcircled{\text{左}} \underline{1}001 \textcircled{\text{右}}$	$\Gamma = \textcircled{\text{左}} \underline{B}BBBBBBB \dots$
Step2.	$\Sigma = \textcircled{\text{左}} 1\underline{0}01 \textcircled{\text{右}}$	$\Gamma = \textcircled{\text{左}} 1\underline{B}BBBBBB \dots$
Step3.	$\Sigma = \textcircled{\text{左}} 10\underline{0}1 \textcircled{\text{右}}$	$\Gamma = \textcircled{\text{左}} 10\underline{B}BBBBB \dots$
Step4.	$\Sigma = \textcircled{\text{左}} 100\underline{1} \textcircled{\text{右}}$	$\Gamma = \textcircled{\text{左}} 100\underline{B}BBBB \dots$
Step5.	$\Sigma = \textcircled{\text{左}} 1001 \textcircled{\text{右}}$	$\Gamma = \textcircled{\text{左}} 1001\underline{B}BB \dots$
Step6.	$\Sigma = \textcircled{\text{左}} 1001 \textcircled{\text{右}}$	$\Gamma = \textcircled{\text{左}} 10010\underline{B}B \dots$
Step7.	Accept	



問

チューリング・マシンを使って, 1を足す動作を実現するプログラムを示せ.  
ただし, 入力データは4桁の2進数で, すべて1になる場合を除く.

また, 入力データとして1001(10進で9)の場合を使って, ステップ毎の  
計算状況(テープ内容とヘッドの位置)を示せ.

# END



**Sculptures of Auguste Rodin**