

# AIとの新科学対話 ⑤

## 資料「コンピュータの歴史」

那須科学歴史館

館長 田澤勇夫

2023/08/13

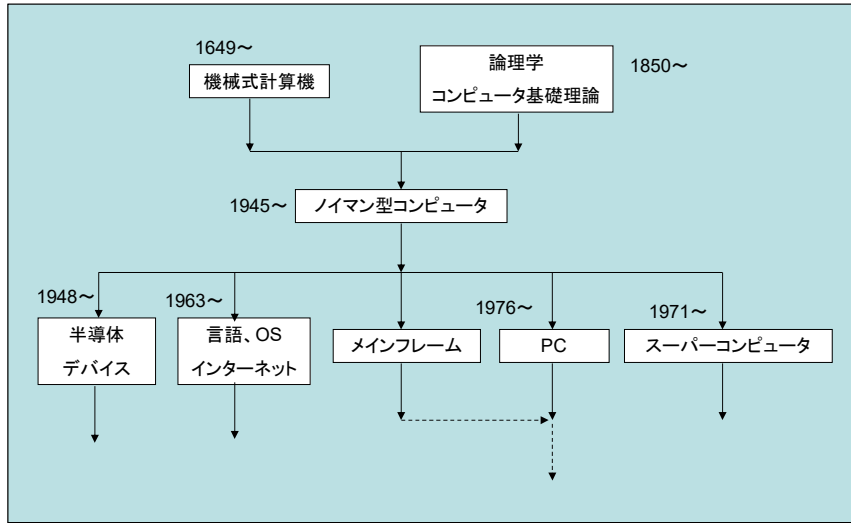
- ・ パスカルの機械式計算機からシャノンの定理までの歴史
- ・ 論理素子とブール代数の公理、記憶、頭脳の関係
- ・ ノイマン型コンピュータからスーパーコンピュータまでの歴史
- ・ AIの時代に突入
- ・ 量子コンピュータの歴史

### パスカルの機械式計算機からシャノンの定理までの歴史

#### コンピュータの年表(20世紀まで)

1649	歯車加減算機(パスカル)		
1674	歯車式乗除算機(ライプニッツ)		
1833	階差機関(バベジ)		
1834	解析機関(バベジ)		
1850頃	ブール代数(ブール)		
1936	チューリングマシン		
1937	リレーによる論理回路(シャノン)		
1945	ノイマン型コンピュータ(ノイマン)	1906三極真空管	
1946	ENIAC(真空管式)	1948 接合型トランジスタ	コンピュータ技術の確立
1959	オールトランジスタコンピュータ開発(IBM)	1959 IC	
1963	プログラム言語「BASIC」開発(スタートマス大学)		
1969	OS「UNIX」開発(ベル研究所)		
	インターネット接続試験(UCLA)	1970 LSI	
1971	電子メール開発(トムリンソン)	1K bits DRAM	
	スーパーコンピュータ「ILLIACIV」(イリノイ大学)	1971 4bits MC(4004)	PC・OS普及 スーパーコンピュータ
1972	プログラム言語「C」開発(ベル研究所)	1972 8 bits MC(8080)	
1974	OS「CP/M」開発(キルドール)		
1976	PC「APPLE I」(アップル)		
1980	OS「MS-DOS」発表(マイクロソフト)	1982 1M bits DRAM	
1985	OS「Windows1.0」発表(マイクロソフト)	1983 32 bits MC	
1990	WWWサーバー(CERN)		
1991	OS「LINUX」発表(トーバルズ)	1989 64 bits MC	ダウンサイジング化 インターネット普及
1997	地球シミュレータ計画発足(日本)	1995 1G bits DRAM	

## コンピュータ関連の科学・技術発展の流れ



## パスカル、ライプニッツの歯車式計算機(17世紀中頃)



B. Pascal,  
1623- 1662



歯車加減算機 ( 1649年 パスカル)

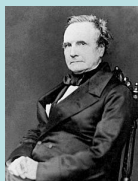


G. W. Leibniz,  
1646 - 1716



歯車式乗除算機 ( 1674年 ライプニッツ)

## バベジの階差機関/解析機関(1822/1834)



C. Babbage,  
1791~1871

バベジはイギリスの数学者。分析哲学者、計算機科学者でもあり、世界で初めて「プログラム可能」な計算機を考案。「コンピュータの父」と言われており、初期の機械式計算機を発明した。

階差機関とは関数の数表を機械(歯車)により作る計算機。

関数を多項式で近似し、更に 階差で示すことにより計算がより簡便に。※

※ 例えば、 $f(x) = x^3 + 4x^2 + x - 6$   
 $x=0 \ x=1 \ x=2 \ x=3 \ x=4 \ x=5$

$f(x)$	-6	0	20	60	126	224
階差①	6	20	40	66	98	
階差②		14	20	26	32	
階差③			6	6	6	6

$f(x) = 3f(x-1) - 3f(x-2) + f(x-3) + 6$   
 $f(3) = 3f(2) - 3f(1) + f(0) + 6$   
 計算 計算 計算  
 $f(4) = 3f(3) - 3f(2) + f(1) + 6$   
 計算済み 計算済み 計算済み

以下、同様にして計算済みを利用

階差機関を発展させた解析機関とは歯車の組み合わせで構成された機械的なコンピュータ。パンチカードを読みとる入力、演算結果を印刷する出力装置、演算装置、記憶装置からなり、今日のコンピュータとほとんど同じ構成。



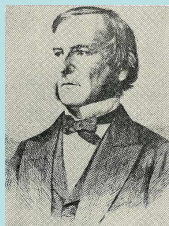
階差機関(1822年)



解析機関(1834年)

## ブール代数(19世紀中頃)

19世紀中旬、ブールは著作「論理の数学的分析」(演繹的推論の計算)により明らかにした代数論理数学の代表的な概念である。



Boole,  
1815-1864

任意の集合X, Y, Zに対して、次の法則(公理)が成り立つとき、それらをブール代数という。

- (1) 交換律 :  $X+Y=Y+X$   $X*Y=Y*X$
- (2) 分配律 :  $X+(Y*Z)=(X+Y)*(X+Z)$   $X*(Y+Z)=(X*Y)+(X*Z)$
- (3) 同一律 :  $X+0=X$   $X*1=X$
- (4) 補元律 :  $X+X'=1$   $X*X'=0$



**演繹的推論が計算可能**

例えば、3段論法

人間は哺乳類である。  
 哺乳類は動物である。  
 よって、人間は動物である。

も、ブール代数による演繹的推論により導くことができる。

## 論理の基本(公理)が変わると全てが変わる

次の公理によりブール代数が成立



- (1) 交換律:  $X+Y=Y+X$   $X*Y=Y*X$
- (2) 分配律:  $X+(Y*Z)=(X+Y)*(X+Z)$   
 $X*(Y+Z)=(X*Y)+(X*Z)$
- (3) 同一律:  $X+0=X$   $X*1=X$
- (4) 補元律:  $X+X'=1$   $X*X'=0$

もし、

$$X \times Y \neq Y \times X$$

量子論理が成立すると

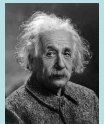
次の公理によりユークリッド幾何学が成立



- (1) 点と点を直線で結ぶ事ができる
- (2) 線分は両側に延長して直線にできる
- (3) 1点を中心にして任意の半径の円を描く事ができる
- (4) 全ての直角は等しい(角度である)
- (5) 「直線外の1点を通りこの直線に平行な直線はただ1つある」

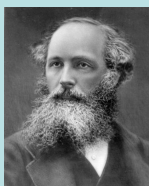


ロバチェフスキーはユークリッド幾何学の  
公理(5)を否定した幾何学を作る。



アインシュタインの一般相対性理論  
につながり、重力波の予言へ

## 電磁理論の公理の1つを変えただけで、電磁波が生まれてしまった



修正された電磁理論の4つの公理

$$\text{div}E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \text{rot}E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{ファラデーの法則})$$

$$\text{div}H = 0 \quad \text{rot}H = i + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{アンペアの法則の修正})$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 E = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 H = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad \therefore C = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

(電磁波の速度)=(光の速度)

光は電磁波である。

全く別の物理現象と思われていた電気・磁気と光が融合

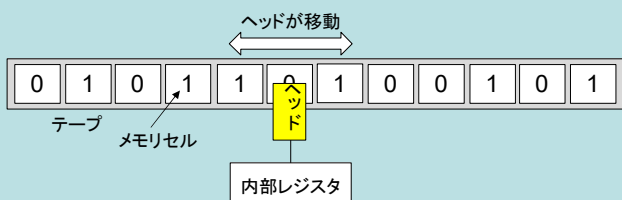
## チューリング・マシン(1936年)



A. M. Turing,  
1912-1954

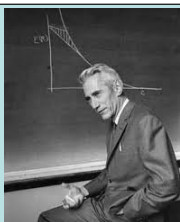
1936年、チューリングは論文「計算可能数についての決定問題への応用」で、計算を数学的モデル化するための仮想計算機としてチューリング・マシンを提唱した。

チューリング・マシンはデータを記憶するメモセルが連続したテープと、そのデータを読み込み内部の状態を変えるヘッド(オートマン)からなる。また、その内部状態を保持する内部レジスタを持つ。



チューリング・マシンの原理図

## デジタル回路設計の創始者:シャノン(1937年)



C. E. Shannon,  
1916-2001

1937年、シャノンは修士論文「継電器とスイッチ回路の記号論理的解析」において、電子回路でブール代数を扱うことができることを示した。

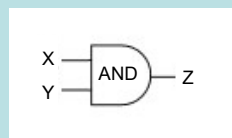
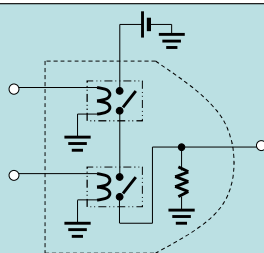
スイッチのON・OFFが記号論理の真・偽に対応することが出来る

X: 私は働いていない (0)  
Y: 私は男性である (0)  
Z: 私はキャリア・ウーマンでない(0)

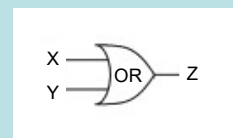
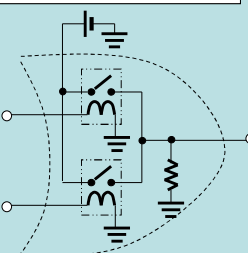
X: 私は働いている (1)  
Y: 私は男性である (0)  
Z: 私はキャリア・ウーマンでない(0)

X: 私は働いていない (0)  
Y: 私は女性である (1)  
Z: 私はキャリア・ウーマンでない(0)

X: 私は働いている (1)  
Y: 私は女性である (1)  
Z: 私はキャリア・ウーマン (1)



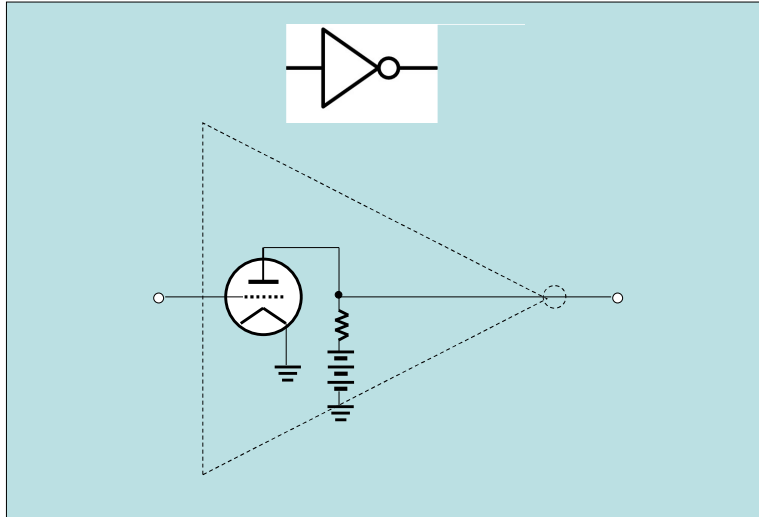
X	Y	Z
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1



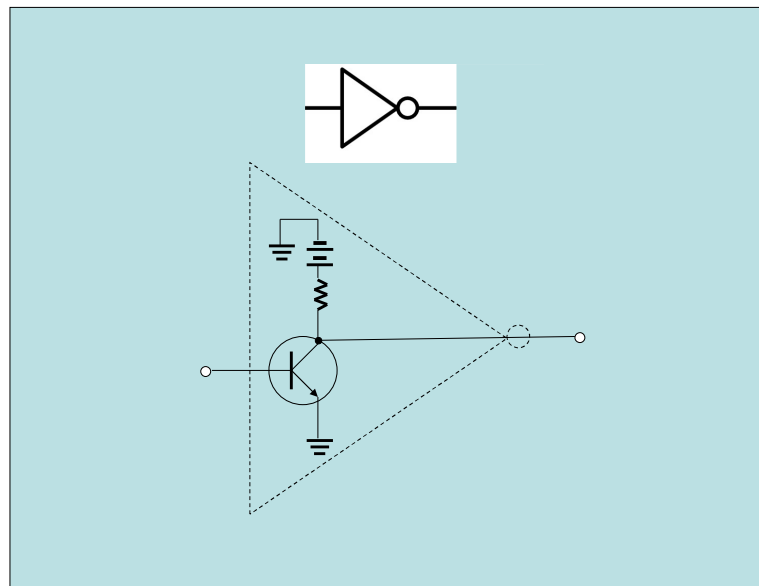
X	Y	Z
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

論理素子とブール代数の公理、記憶、頭脳の関係

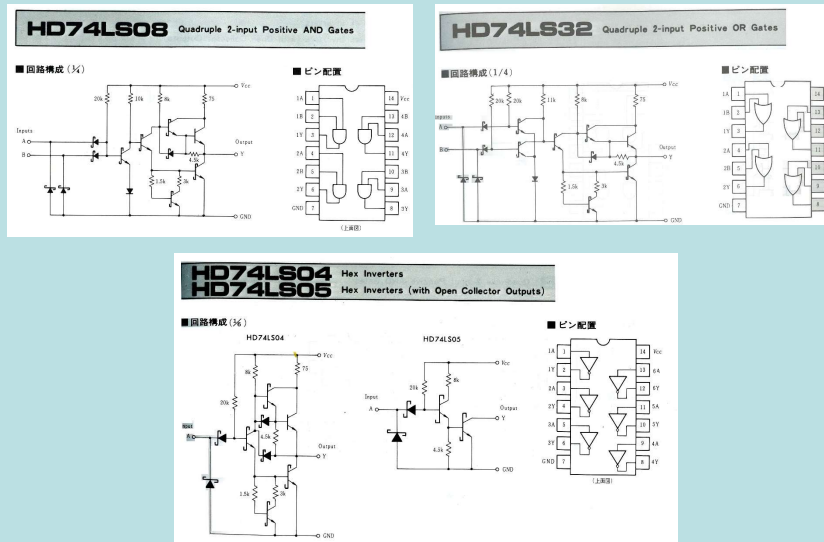
真空管で論理記号を作ると



トランジスタで論理記号を作ると

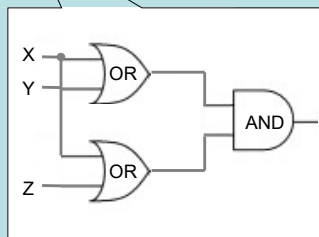
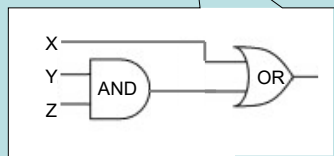


## 実際の(最も基本的な)デジタルICの回路

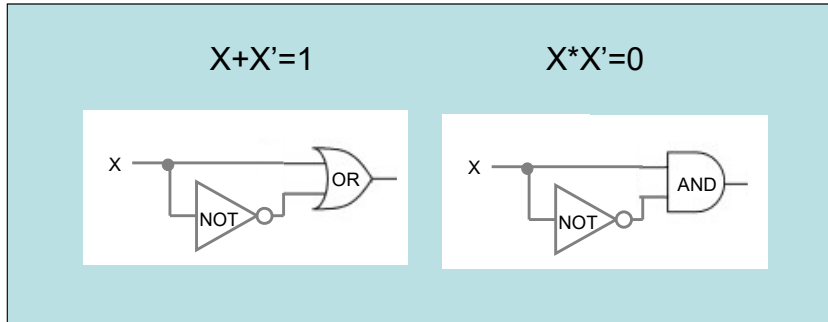


## 分配律を論理記号で表すと

$$X + (Y * Z) = (X + Y) * (X + Z)$$



### 相補律を論理記号で表すと



ブール代数の公理はスイッチのON/OFFで示すことができる。



演繹的推論はスイッチのON/OFFで示すことができる。



よって、人間の思考の多くをスイッチのON/OFFに置き換えることができる。

### Dラッチによるメモリ(論理から記憶が形成)

Dラッチ

1ビットメモリ

Dラッチの真理表

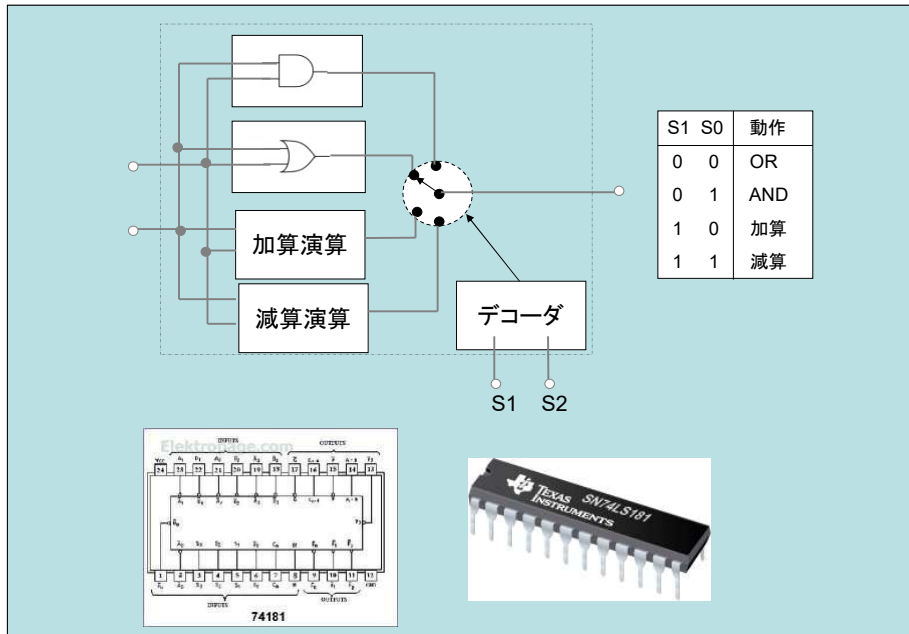
D	G	Q
0	0	記憶
1	0	記憶
0	1	0
1	1	1

(Write) R/Wが1の時、Dラッチに記憶されている情報がDOに出力される。

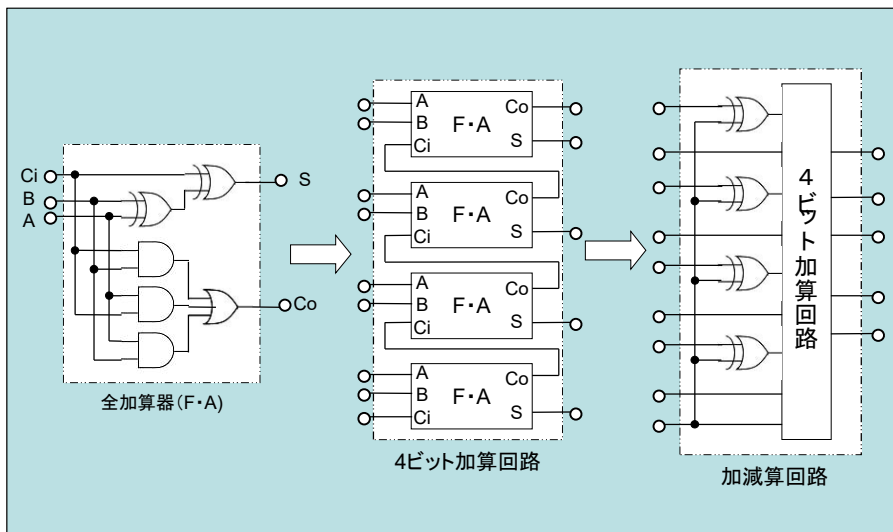
(Read) R/Wが0の時、Dから入力される情報がDラッチに記憶される。



## 論理素子により構成されるALU(論理から頭脳が形成)



## 加減算回路の階層構造



## ノイマン型コンピュータからスーパーコンピュータまでの歴史

### ノイマン型コンピュータ (1945年)

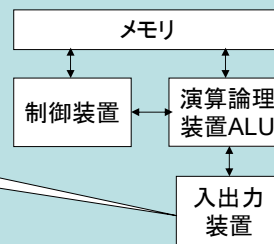
1945年、ノイマンは、「プログラム内蔵方式」EDVACをノイマンの名前で発表する。この情報が外部に漏れ、反発した開発主要メンバーが離脱しEDVAC開発は大きく遅れ、世界初の「プログラム内蔵方式」コンピュータの称号は1949年のEDSACに譲ることになる。EDVACは1951年になって完成する。



Neumann,  
1903 - 1957

- ・メモリはチューリング・マシンのテープに対応している。
- ・制御装置は制御部とヘッドにあたる。
- ・チューリング・マシンの計算可能性に対しALUが設けられる。

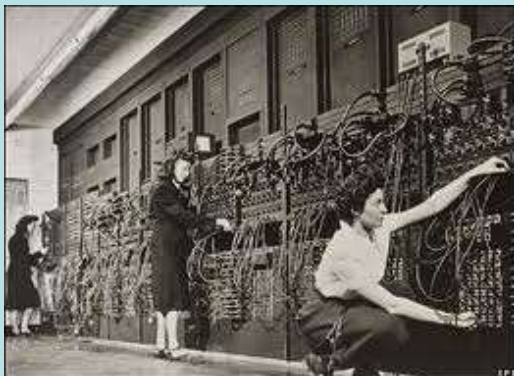
ノイマン型は入出力装置を追加しプログラムとデータを外部から入力し計算結果データを外部に出力する。



### 真空管による初期のコンピュータ ENIAC (1946年)

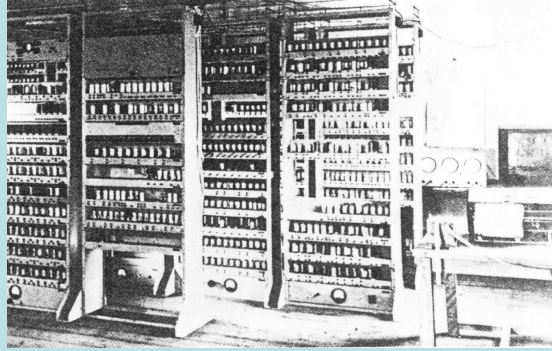
ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer、「電子式数値積分・計算機」)は、1946年に真空管2万個近くを使ってアメリカで開発された最初期の電子計算機(プログラムは人が配線をすることにより行われた)。

かつては世界初のコンピュータとされていたが、1939年に試作機が完成、稼働した「アタナソフ&ペリー・コンピュータ」を世界最初のコンピュータとする考え方が今では主流である。



## 最初の実用的プログラム内蔵式コンピュータ EDSAC(1949年)

1949年に作られたEDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator、「電子遅延記憶式自動計算機」)は、初期のイギリスのコンピュータ。  
世界初の実用的プログラム内蔵式電子計算機であるが、プログラム内蔵方式の世界初の稼働したマシンではない(Manchester Mark IのプロトタイプであるBabyの方が早い)。



## 最初のトランジスタ・コンピュータ TRADIC(1954年)

1954年にベル研究所で世界初のトランジスタコンピュータTRADICを発表。  
700~800個のトランジスタと10,000個のダイオードを使用。  
爆撃機に乗せることが出来るもので特殊用途に使用



## MCを使った電卓の歴史(演繹的推論は計算可能)



1971年、最初のMC(4004)を用いた電卓141-PFを  
ビジコンが発売



1972年、2,800円の「カシオミニ」をカシオが発売。



1973年、液晶を表示装置に使った本格的な電卓、  
EL-805「エルシーメイト」をシャープが発売。



1976年、太陽電池を搭載した電卓  
「EL-8026」をシャープが発売。



1976年、世界初の分数計算、標準偏差つき  
関数電卓「fx-\*」をカシオが発売



機械式計算機



計算尺

## 最初のパーソナル・コンピュータ(1976年)

アップルコンピュータ社を興したスティーブ・ジョブズが1976年に  
作ったApple I が最初のパソコン。また、1977年にApple II を発売。



Apple I



Apple II

1985年に東芝が世界初の  
ノートパソコンT1100を販売。



T1100

## NECのパーソナル・コンピュータ(1979年～)



1976年、「TK-80」を販売。



1979年、「PC-8001」を販売。

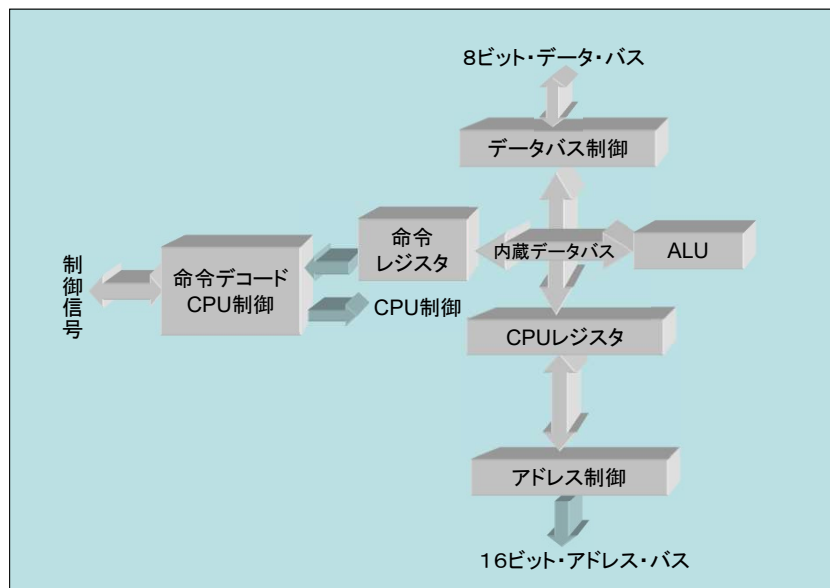


1985年、「PC-9800シリーズ」用にリリースされた一太郎は、日本語入力システムとして「ATOK4」を搭載。

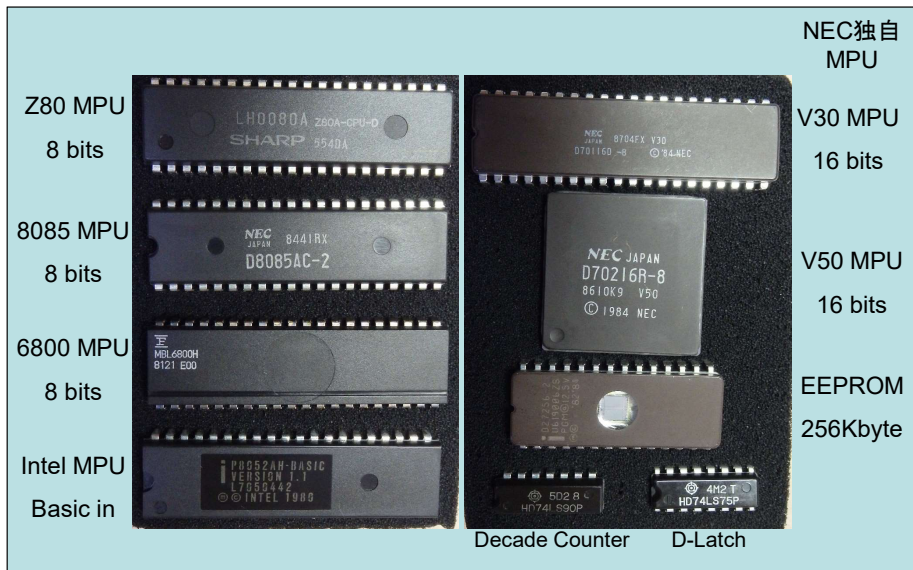
PC-9801VM

1990年に、日本IBMは「DOS/V」をリリース。

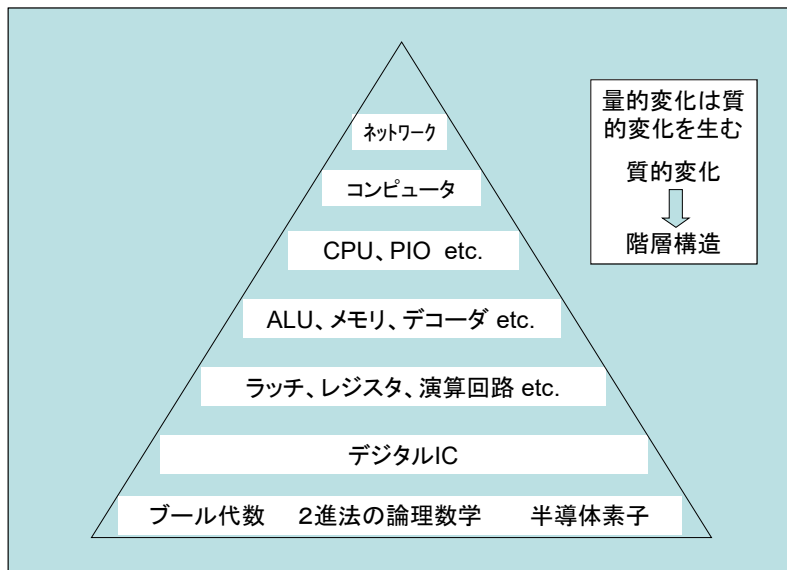
## Z80 CPUの構成



## MPUのサンプル

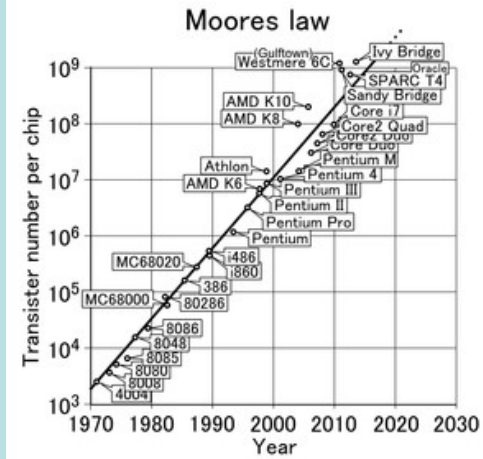


## コンピュータにおける階層構造



## ムーアの法則からハードが著しく発達し、ソフトの時代に

1971	4004(4bits)
1972	8008(8bits)
1974	8080 6800
1976	Z80
1978	8086(16bits)
1979	68000(32/16bits)
1982	80286
1984	68020(32bits)
1985	80386(32bits)
2003	PowerPC(64bits)
2004	Pentium4(64bits)



システム全体に占めるソフトウェア開発の重要性が増大

## スーパーコンピュータ

1971年、イリノイ大学による ILLIAC IV が最初のスーパーコンピュータで、  
1976年、Cray社による商用機Cray1が販売された。

スーパーコンピュータは汎用プロセッサを並列に結合したスカラー並列型と  
ベクトル型プロセッサを並列結合したベクトル並列型がある。



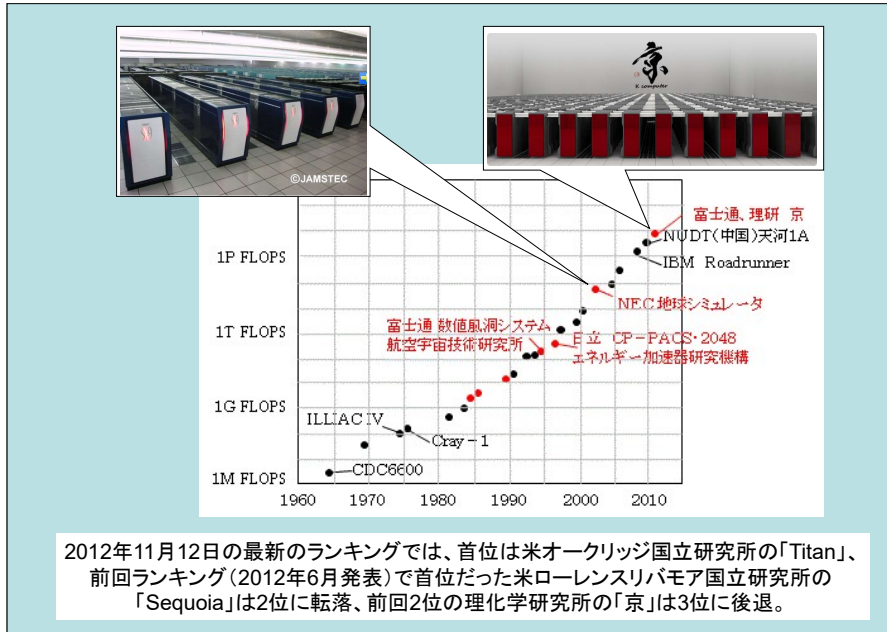
ILLIAC IV



Cray1

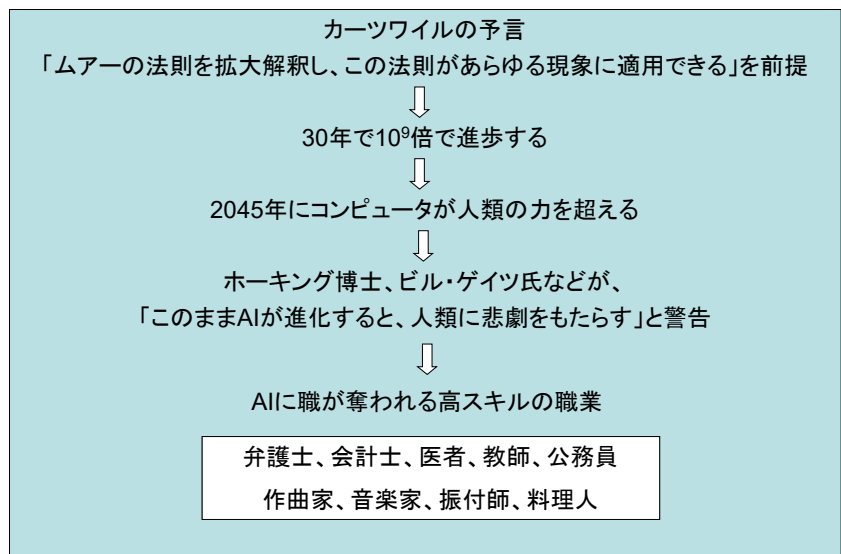


## スーパーコンピュータの性能向上



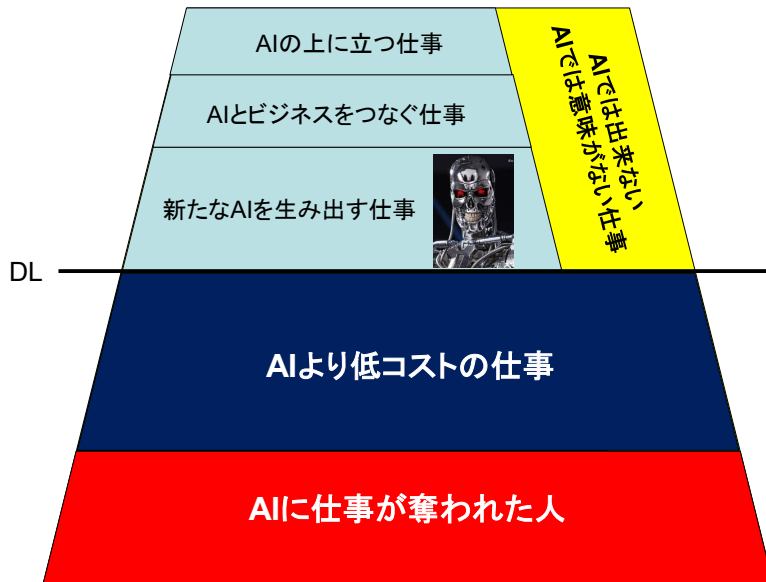
## AIの時代に突入

2045年問題(技術的特異点) ⇨ コンピュータが人類を超える日





## AI時代のお仕事の分類



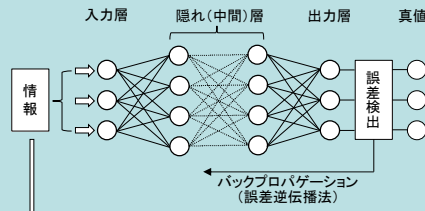
## 人工知能・ニューラルネット・ディープラーニングの発展

年代	特徴	技術・キーワード
1950年頃	第1次人工知能ブーム	ダートマス会議(1956)
1960年頃	ニューラルネットの登場	パーセプトロン(1958) ファジィ理論
1970年頃	技術的な難問の登場(冬の時代)	ニューラルネット[XOR]問題発生(1969) フレーム問題
1980年頃	第2次人工知能・ニューラルネットブーム	遺伝的アルゴリズム エキスパートシステム 誤差逆伝搬法の発見(1986)
1990年頃	ニューロ、ファジィなど 産業への活用	遺伝的プログラミング データマイニング チェスでAIがチャンピオンに勝利
2000年頃	人工知能が一般化される動きが始める	ロボットベットの登場 インターネットの普及 オートエンコーダー
2010年頃	第3次人工知能ブーム	ディープラーニング登場 ※ 囲碁でAIがプロ棋士に勝利



2000年代後半、ニューラルネットの学習に十分な大量データと、それを処理できる計算機が比較的容易に入手できるようになり処理能力が大幅に上昇し、2006年「高次元データの階層的な表現の学習」にディープラーニングという言葉を用いた。

## ニューラルネット、ディープラーニング、大規模言語モデル



### 大規模言語モデル(LLM: Large Language Models)

書籍、ネットなどの情報に基づくテキストデータセットを用いて学習し、ディープラーニングにより訓練される。

### トランスフォーマー(Transformer)

トランスフォーマーはLLMから必要な情報を引き出す際、文章や単語だけではなく、文脈や意味も考慮して最適な回答や生成物を提供。

### 注意(Attention)

ニューラルネットの入力、出力から必要な情報を選択する機能であり、Attentionにより効率的に単語を学習できる。

## 論理的推論

**演繹的推論**：普遍的理論(公理)に基づき論理展開により各理論・法則を導き出す。

↓  
コンピュータ、計算科学

**帰納的推論**：個々の事例や具体的な実験事実から一般的な理論・法則を導き出す。

↓  
ファラデー電磁誘導、マックスウェル理論、アインシュタインの特殊相対性理論

**類推**：個々の事象同士の間で成立する類似性に基づき一般的な理論・法則を導き出す。

↓  
2極化する製品群

**仮説形成**：実証・経験的事実の集積に基づいて、それらの事実を合理的に説明できる理論・法則を仮説する。

↓  
ショックレーのPNP接合

↓  
コンピュータの演繹的推論能力は人間を凌駕し、AIの持つ帰納的推論、類推、仮説形成能力はどうか？

## コンピュータ・チェス/将棋/囲碁と人間の戦いの歴史



1949年: クロード・シャノンが論文「チェスをするコンピュータのプログラミング」を発表  
 1996年: IBMの「ディープ・ブルー」とカール・カスパロフ(世界チャンピオン)の対戦でカスパロフの3勝1敗2引き分けで、人間側の勝利。  
 1997年: 「ディープ・ブルー」とカール・カスパロフの再戦で、コンピュータの勝利。  
 2002年: 「ディープ・ブリッツ」とウラジミール・クラムニコフ(世界2位)の対戦で、両者引き分け。  
 2003年: 「ディープ・ジュニア」とカスパロフ(世界1位)の対戦で、両者引き分け。  
 2006年: 「ディープ・ブリッツ」とウラジミール・クラムニコフ(世界3位)の対戦で、コンピュータの勝利



2005年: アマ県代表クラスに到達。  
 2005年: 「TACOS」と橋本五段の対戦で、人間側の勝利  
 2007年: 「Bonanza」と渡辺竜王の対戦で、人間側の勝利  
 2012年: 「ボンクラーズ」と米長永世棋聖の対戦で、コンピュータ側の勝利  
 2013年: 「習甦」と阿部四段の対戦で、人間側の勝利  
 2013年: 「ponanza」と佐藤 四段の対戦で、コンピュータ側の勝利  
 2013年: 「ツツカナ」と船江五段の対戦で、コンピュータ側の勝利  
 2013年: 「Puella α」と塚田九段の対戦で、両者引き分け  
 2013年: 「GPS将棋」と三浦八段の対戦で、コンピュータ側の勝利



1969年: アメリカのZobristによる19路盤で動作するプログラム作成  
 1984年: 初めてのコンピュータ囲碁大会USENIXが開催  
 1990年代: アマチュアの級位者上級並みの棋力に到達  
 2000年代: 「モンテカルロ木探索」を実装した囲碁プログラム「Crazy Stone」が登場  
 2007年: 「Crazy Stone」はプロ棋士・青葉かおり四段に勝利  
 2011年: 「Zen」と鄭銘璉九段に勝利  
 2016年: 「アルファ碁」が韓国の李世石九段に勝利  
 「Zen」が小林光一名誉棋聖に勝利

## 量子コンピュータの歴史

- 1980年 ポール・ベニオフが量子チューリングマシンが理論上可能であることを示す。
- 1982年 ファイマンが量子力学を使ったコンピュータを提案。
- 1985年 ドイツチュが量子コンピュータの計算モデル(量子チューリングマシン)を提唱。
- 1992年 ドイツチュとジョサが量子コンピュータ・アルゴリズムを考案。
- 1993年 ウメーシュ・ヴァジラニとイーサン・バーンシュタインが万能量子チューリングマシンのアルゴリズムを考案。
- 1994年 ビーター・ショアが“ショアのアルゴリズム”(因数分解手順)を考案。
- 1996年 ロブ・グローバーが“グローバーのアルゴリズム”(データ検索)を考案。
- 2011年 D-Wave社(カナダ)が世界初の商用量子コンピュータD-Wave Oneを発表。
- 2014年 グーグルがジョン・マーティン(UCSB)と連携し量子コンピュータの独自開発を開始。
- 2017年 IBMが汎用量子コンピュータシステムIBM Q向け16量子ビット・プロセッサを開発。
- 2017年 中国の科学研究チームが光量子コンピューターの開発に成功。
- 2019年 IBMが商用量子コンピューター(名称:IBM Q System One)を開発。
- 2019年10月23日、グーグルは世界最高速のスーパーコンピューターが1万年かかる計算問題を量子コンピューター(54量子ビット)は3分20秒で解くことに成功したと発表

## 量子コンピュータ D-Wave

**本体の外観**

消費電力は15キロワット。電力消費のほとんどは、冷凍機によるものだ

**超伝導回路で量子ビットを実現**

ニオブ (Nb) を材料とする超伝導回路に、量子ビットが512個と、量子ビット間の相互作用を定める「プログラマブル・マグネティックメモリー」を9万6000個実装してある

1個の量子ビットが3次元イジングモデルにおける1個のスピンとなる

量子ビット

電流

インダクタンス

磁束量子

ジョセフソン接合

電流

電流が左回りに流れると上向き、右回りに流れると下向きの磁束量子が生じる

**希釈冷凍機**

超伝導回路は限りなく絶対零度に近い「20ミルクエルビン」で稼働するため、ヘリウムを使って冷却する「希釈冷凍機」に納める

**D-Waveの本体**

ケルビン) 温度の単位。絶対零度(摂氏マイナス273.15度)をゼロとする

**磁束量子パラメトロン(QFP)**  
磁束量子の磁場を増幅する

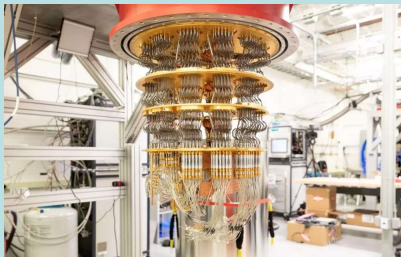
**超伝導量子干渉計(dc SQUID)**  
磁束量子の磁場を計測する

## グーグルが量子コンピュータで超計算に成功と発表(2019/10/23)

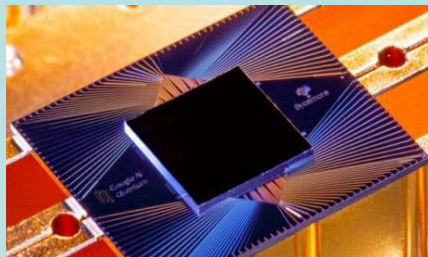
世界最高速のスーパーコンピュータが1万年かかる計算を量子コンピューターは3分20秒で解くことに成功して量子超越性を世界で初めて実証したと発表



全ての暗号がわずかな時間で解かれる可能性

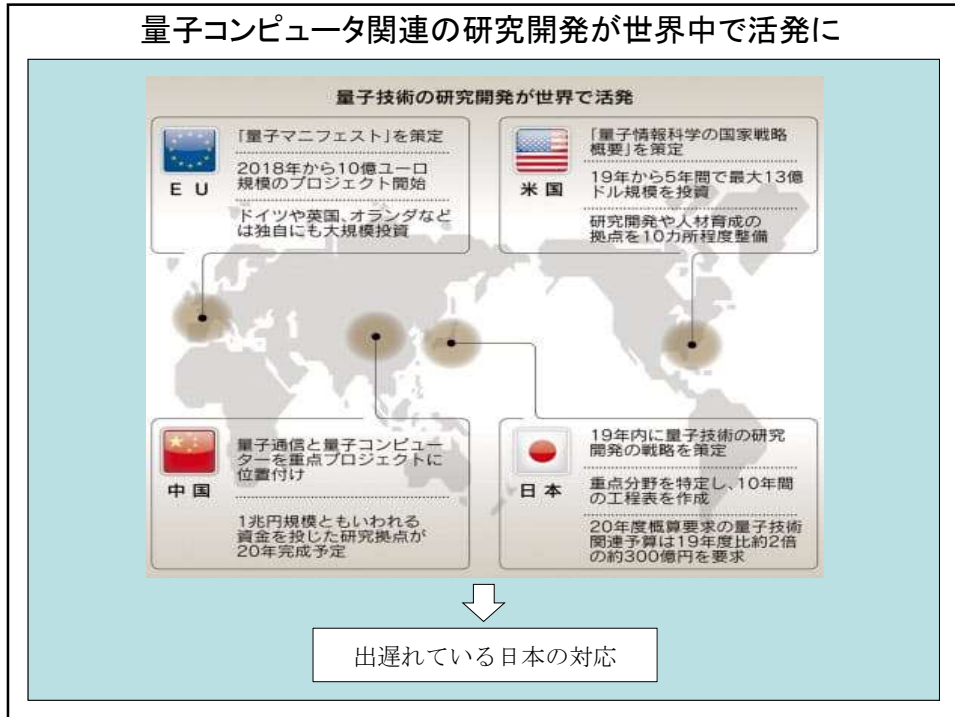


Googleの量子コンピュータ



量子チップ

## 量子コンピュータ関連の研究開発が世界中で活発に



## 量子ビット・量子ゲート

### 量子ビット

1量子ビット(キュービット)とは

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad \because \alpha^2 + \beta^2 = 1$$

$|0\rangle$ とは通常の論理ビット0( $[0]$ )の状態  
量子ビットでは $\alpha=1, \beta=0$ の状態

$|1\rangle$ とは通常の論理ビット1( $[1]$ )の状態  
量子ビットでは $\alpha=0, \beta=1$ の状態

量子ビットは **$|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせ**の状態であり、いろいろな $\alpha, \beta$ の値を取り得る。  
(但し、確率的な意味で)

### 量子ゲート

量子ゲートとは通常のコンピュータの論理ゲートに相当し、量子ビットの操作を行う。

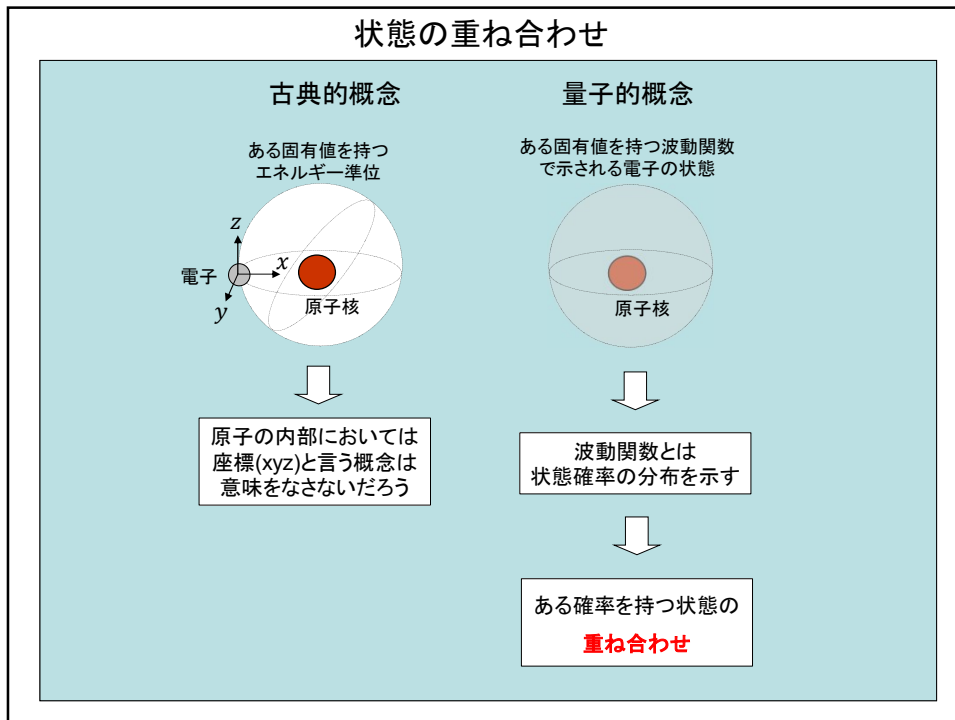
例えば排他的論理和ゲート(XOR)について同じ2ビットの量子ビットからなる制御ノットゲートを考えると

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

となり、一見、XORと同じ論理地表に思えるが、ここで重要なことは、 $|\Psi_A\rangle, |\Psi_B\rangle$ はその表以外に、**重ね合わせの値を取る**ということである。

$ \Psi_A\rangle$	$ \Psi_B\rangle$	$ \Psi_Y\rangle$
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$

## 状態の重ね合わせ



## 電子による干渉縞形成、量子計算

