

「エレクトロニクス科学史」

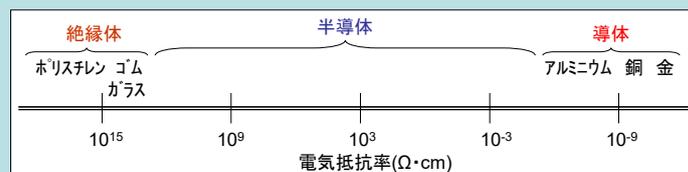
那須科学歴史館 館長 田澤勇夫

「半導体の歴史」

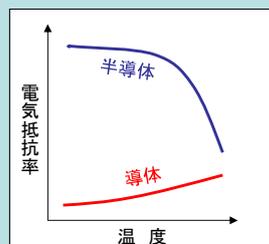
- ・ 半導体とは
- ・ 鉱石検波器からトランジスタの発明の開発史
- ・ ショックレーの研究開発の手法
- ・ 日本半導体産業の衰退
- ・ 現代社会におけるムーアの法則の意味

半導体とは

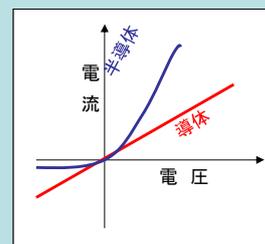
1. 電気抵抗率: 絶縁体と導体の中間



2. 非線形性の強い温度特性



3. 非オーム性(整流特性)



半導体関連の研究開発の年表

1906	鉱石検波器を発明(ダンウッド)
1939	点接触ゲルマニウム・ダイオードの発明(ラッセル)
1947	点接触トランジスタの発明(バーディーン、ブラッテン)
1948	接合型トランジスタの発明(ショックレー)
1952	ADCを用いたデジタル電圧計の開発(アメリカ)
1953	逐次比較方式ADCの開発(アメリカ)
1954	シリコントランジスタの開発(TI) トランジスタラジオの開発(TI)
1955	SONYがTr.Radioを販売
1959	ICの発明(キルビー) ICの特許化は1964 オールトランジスタコンピュータ開発(IBM)
1964	現在のオペアンプの原型(μ A702)の販売
1970	LSIの開発(TI) 1K bits DRAMの開発(Intel)
1971	4bits MC(4004)の開発(Intel)
1972	8 bits MC(8080)の開発(Intel)
1982	CDの発売(オーディオ用DAC) 1M bits DRAMの開発
1983	32 bits MCの開発
1989	64 bits MCの開発
1993	青色LEDの発明
1995	1G bits DRAMの開発

鉱石検波器からトランジスタの発明の開発史

最初の半導体: 鉱石検波器(1874)

1874年、ブラウンにより鉱石の整流作用が発見された。

半導体の性質を有する鉱石(黄鉄鉱、方鉛鉱など)に金属針を接触させ、ショットキー障壁を利用して整流作用を行う。

鉱石検波器はショットキー障壁の発見により、その動作の一端は解明された。しかし、ショットキー障壁の原理は未だ不明であり、安定したショットキー障壁の製造は難しく、製造においては現在に至るも未完成の部分がある。工業的に安定したショットキー障壁の製造が容易となれば、多くの半導体部品の飛躍的な能力の向上や、**新たな半導体素子の発明につながる**ことが期待できるため、**鉱石検波器の発明にはじまったその研究、開発は現在も半導体の最先端分野として進められている。**



鉱石検波器



黄鉄鉱(FeS_2)

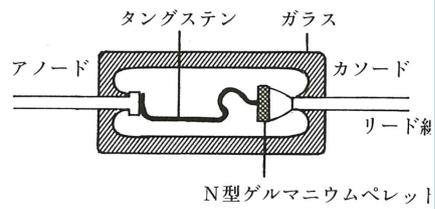
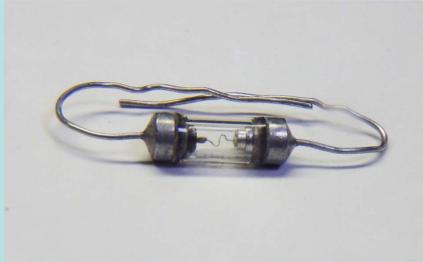


方鉛鉱(PbS)

点接触ゲルマニウム・ダイオードの発明(1939)

鉱石検波器は動作が不安定であるという問題があったが、ウインクラー(ドイツ・鉱山学校の先生)がゲルマニウムとシリコンを使うと良い特性の鉱石検波器ができることを発表。

1939年、ラッセルによりゲルマニウムを使ったダイオードが発明されて、この問題が解決された。



検波器サンプル



ゲルマニウム・ダイオードが発明された裏事情 と理論解析の難しさ

戦争中に開発された電波探知機(レーダー)の周波数を高く
するほど位置確定の正確さが増すが、

↓
周波数を高くすると真空管の性能が追付かなくなってきた。
(三極管から五極管へ改良したが)

↓
高い周波数に対する性能は鉱石検波器が良いので、
特性が安定しているゲルマニウムに白羽の矢が飛んだ。

↓
しかし、安定した特性を出し、安定した製造のためには、
動作原理を解明することが必要不可欠であったが、
なかなか、理論と実験結果が合わなかった。

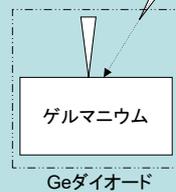
点接触トランジスタの発見(1947)



John Bardeen,
1908- 1991

バーディーンがゲルマニウム・ダイオード
の整流作用の実験を行っていた時、
もう一本の金属針を立てて電圧分布を
測っている際、間違っって電圧を印可した
ところ、メータの針が大きく振れたこと
により増幅作用を発見した。

電圧分布測定用
のもう一本の針

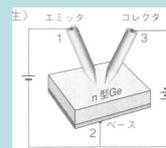


ゲルマニウム
Geダイオード



図 12・18 最初の点接触トランジスタ³⁴⁾

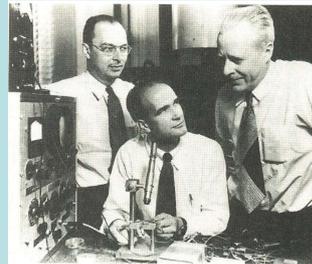
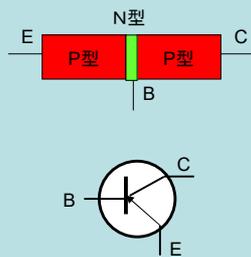
↓
エルステッドの電流による磁気作用と
ヘルツによる電磁波の発見の
状況と酷似している。



接合型トランジスタの発明(1948)

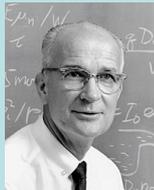
点接触型トランジスタは壊れやすく、鉱石検波器同様に動作が不安定であった。そこでショックレーは1948年に半導体(P型、N型)同士を接合した接合型トランジスタを発明した。

1956年、ショックレー、バーディーン、ブラッティンはPN接合の半導体理論の確立とトランジスタの発明により、ノーベル賞を受賞。



バーディーン、ショックレー、ブラッティン

ショックレーらのトランジスタ開発秘話



W. Shockley,
1910 - 1989

ショックレーは1935年頃から、“**真空管と同じ増幅作用を持つユニットを、真空を使わないで何かの結晶で実現できないか**”という野心を持ち続けていた。



しかし、1947年、同じベル研究所のバーディーンが偶然にも点接触トランジスタによる増幅作用を発見してしまった。このことはショックレーの心にショックを与えた。



ところが、点接触トランジスタは次の問題があった。

- ・ 機械的ショックに弱い。
- ・ 製造技術における電氣的フォーミング処理の再現性が悪い。
- ・ メカニズムの理論確立が困難。

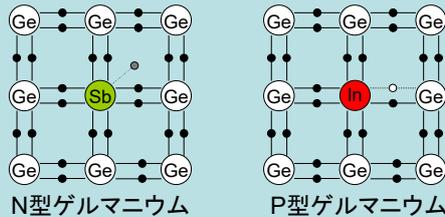


そこで、ショックレーは長年の研究成果を集約して、上記の問題を解決した**PNP接合によるトランジスタを予言**した。

P型、N型ゲルマニウムの概説

N型ではGeとSbの価電子の共有結合●において、Sbの余った価電子が自由電子●となり、電荷のキャリアーはマイナスとなる。Sbのような過剰の電子を与える不純物をドナーという。

P型ではInとの共有結合において価電子が1個不足する。これを正孔○といい、プラスの電荷を運ぶキャリアーとなる。正孔を作る不純物をアクセプタという。



Ge: 4価、In: 3価、Sb: 5価

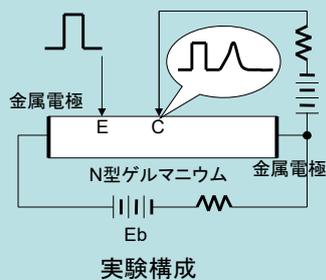
※注意: ショックレーがPNP接合Trを発明した時点では、この科学理論(モデル)は確立されていなかった。

ショックレーの研究開発の手法

ショックレーの実験

ショックレーらのベル研究所の研究者は**実験**による長年の研究から、“正の電荷をもつ粒子”(現在では正孔という)の存在がトランジスタの動作に重要な役割を担っていると**推定**していた。

そこで、ショックレーらは下記の実験を構成しE点にインパルス電圧を印可しC点の波形を観測した。



	Eb接続	Cの波形
EC間を遠く	+ -	
EC間を近く	+ -	
Ebを逆に接続	- +	
Eパルスを逆に	+ -	

実験結果

ショックレーによる実験結果の解釈

Eb接続が +|||I- の場合のみ山の波形 \curvearrowright が存在し、C点をE点から遠ざけると山の波形が小さくなる。
 ↓
 E点から正の電荷(正孔)が注入されと考えれば、正孔はC点方向に流れ、徐々に電荷の群がくずれ正孔の数が減ることになる。
 ↓
 しかし、Eb接続を逆にすると、E点から注入された正孔はC点方向には流れない。
 ↓
 N型ゲルマニウムの多数キャリアは電子であるが、正孔も少数キャリアとして存在すると考えた。
 (価電子帯の電子が熱エネルギーにより僅か伝導帯に励起される)

正孔が存在すると推定した場合の点接触トランジスタ動作原理の推定

N型ゲルマニウムのエミッタEの金属針が接触している周辺にP型が形成されていると考えた。
 ↓
 エミッタEに注入された正孔は電圧VBEによりコレクタC側に移動すると考えた。
 ↓
 また、一部の正孔がエミッタからベースに流れることにより増幅作用が生まれると考えた。
 ※ 現在でもこの動作原理が完全に証明されたわけではない。

ショックレーの大胆な提案

ショックレーは点接触により生じている不安定なP型半導体を積極的に形成することを考えた。

つまり、ベースBのN型をエミッタEとコレクタCのP型により挟むサンドイッチ構造を考えた。

高純度なゲルマニウムにP型部分にはIn原子を加え、N型部分にはSb原子を加えた

N型を厚くするとエミッタから注入された正孔はベースBを通り抜けてコレクタCに到達するのが難しくなるので、N型は非常に薄くする必要がある。

PN接合ダイオード

P型にプラス、N型にマイナスの電圧をかけると、P型に沢山ある正孔がN型の中に流れ、N型に沢山ある電子はP型の中に流れるため、大きな電流が流れる。

逆にP型にマイナス、N型にプラスの電圧をかけると、正孔はマイナス側に電子はプラス側に流れるが、外部からの正孔と電子の供給がないため、僅かな電流しか流れない。

点接触ダイオード

N型Ge

P型形成

ショックレーの成功のポイント

- ・ 真空管に代わって結晶で増幅作用を実現したいという強い思い、高い先見性。
- ・ 長年の実験という経験を通じた知見（ノウハウの集積）
- ・ 経験の蓄積をベースにした大胆な推論

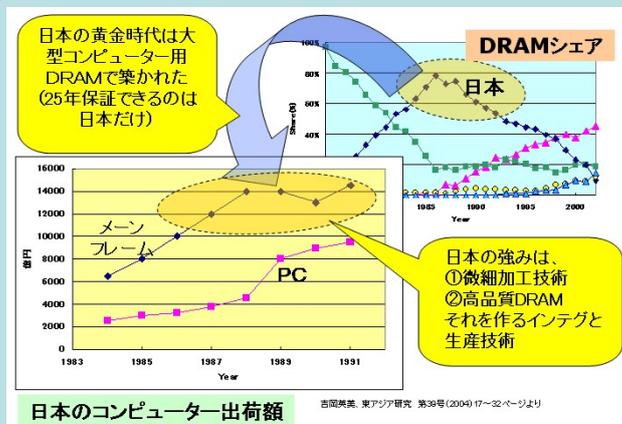


ファラディ、プランク、アインシュタインらとの共通性はあるが、ショックレーは、科学者というより研究開発における技術者の模範。

日本半導体産業の衰退

エルピーダ破綻(2012年2月27日)－歴史的背景(1)

1970年代、日本の電機メーカーがDRAMに注力し、1980年中旬にシェア世界一となる。



エルピーダ破綻－歴史的背景(2)

- ・「微細加工技術」の極限性能を追究



半導体メーカーと半導体製造装置メーカーの共同開発

- ・「高性能・高品質」の量産のための極限性能を追究



生産各工程の極限性能の追究
(微小ゴミの低減、要素技術精度向上)



25年保証の高品質DRAMの生産



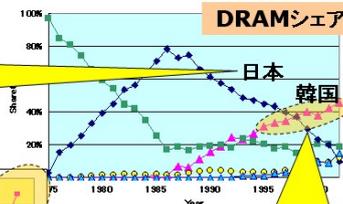
大型コンピュータ・ユーザの要望に対応

エルピーダ破綻－歴史的背景(3)

1990年代に入ると大型コンピュータの出荷額が低下し、PCの出荷額が急激に増加し、新たなDRAM需要を引き起こした。

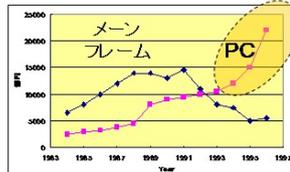
しかし、日本のDRAMの高品質より低コストが重要となる。

日本は、25年保証の高品質DRAMを作り続けた



韓国は(3年保証の)PC用DRAMを安価に大量生産した。

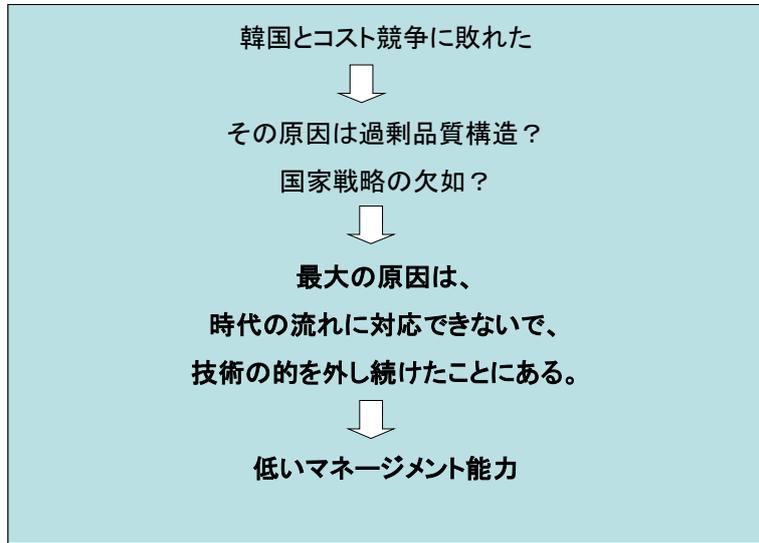
日本はコスト競争力で敗北した



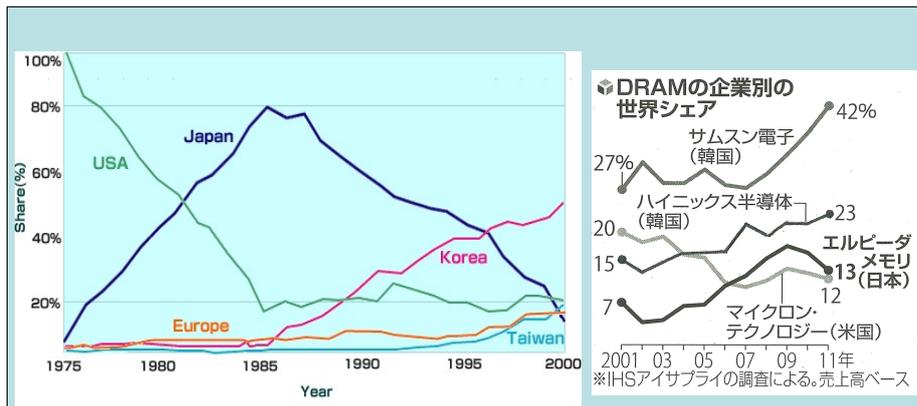
日本のコンピューター出荷額

吉岡美美、東アジア研究 第39号(2004)17～32ページより

エルピーダ破綻－歴史的背景(4)

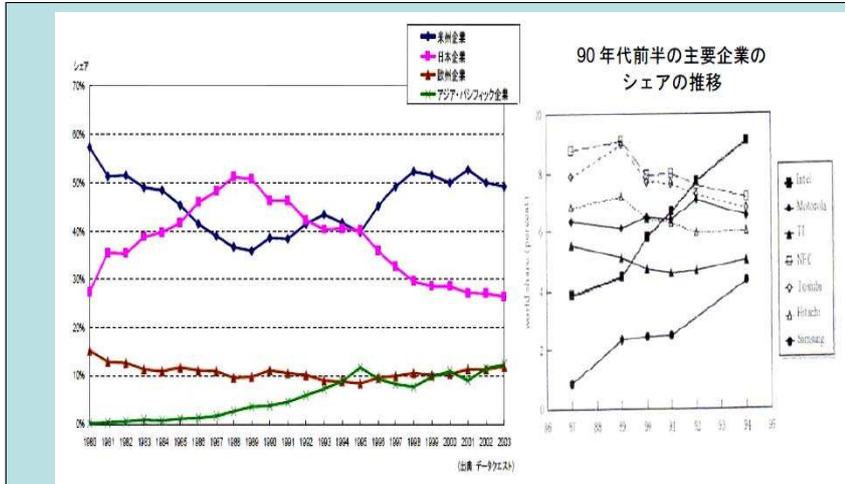


DRAM分野のシェア推移



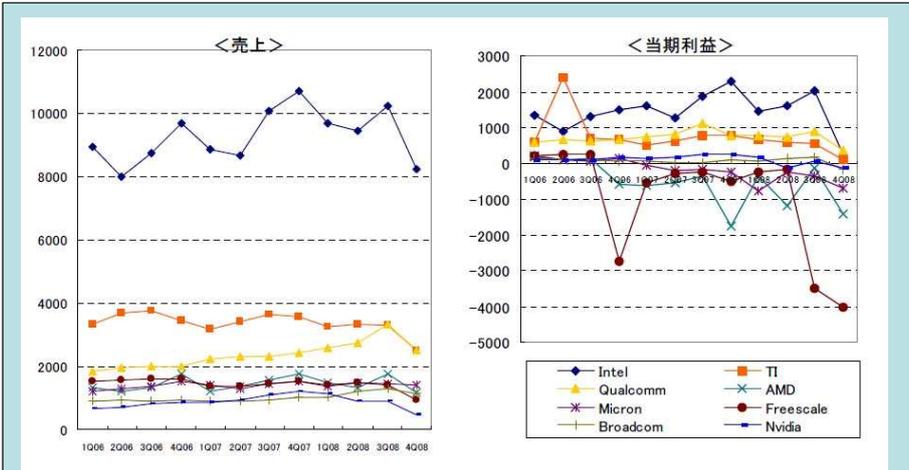
DRAMに限れば、日本の衰退と逆比例し韓国が成長したが、アメリカも減衰したままの状態

全ての半導体分野のシェア推移



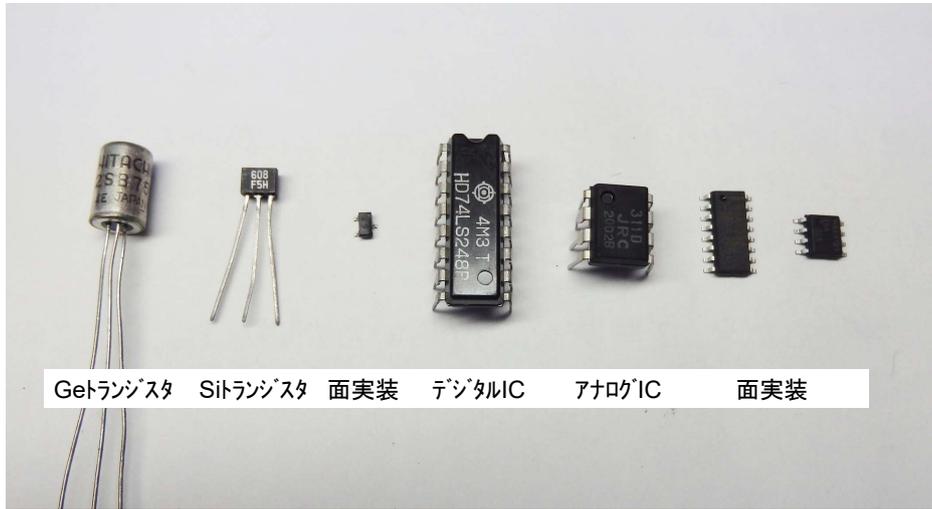
しかし、半導体全体ではアメリカはV字回復している。

米国の半導体企業の業績推移



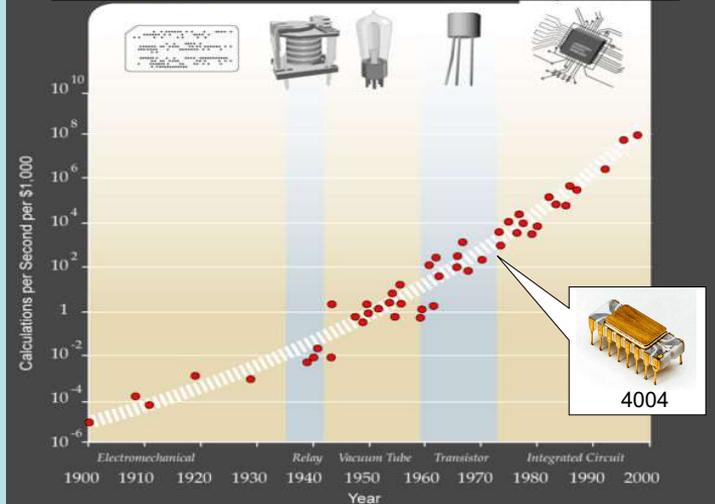
売り上げではIntelがダントツであるが、利益ではTIなどとあまり変わらない。

半導体のサンプル



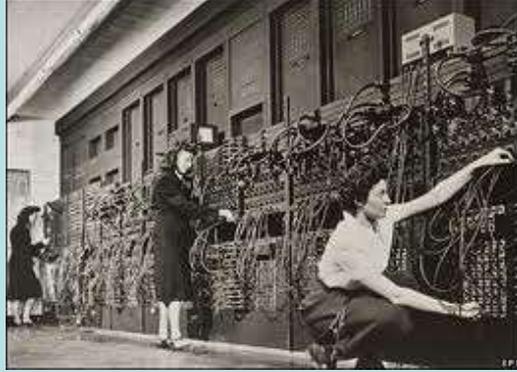
現代社会におけるムーアの法則の意味

インテルのMoore博士が1965年に経験則として提唱
「半導体の集積密度は18~24ヶ月で倍増する」という法則。



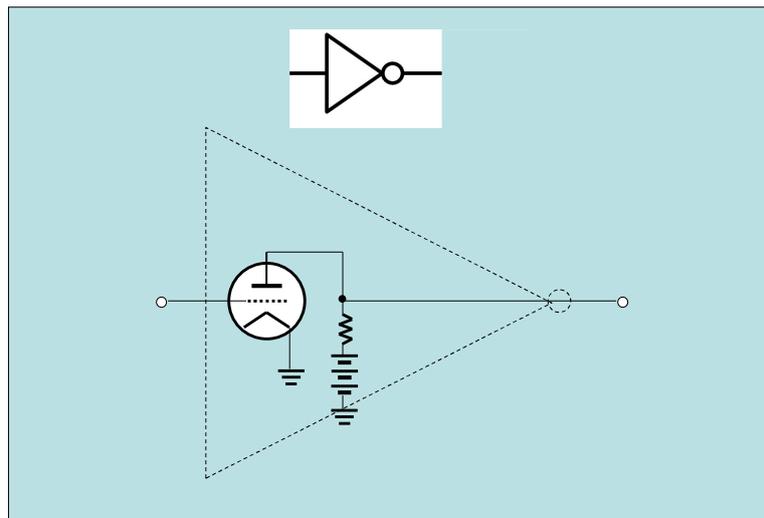
真空管による初期のコンピュータ ENIAC (1946年)

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。

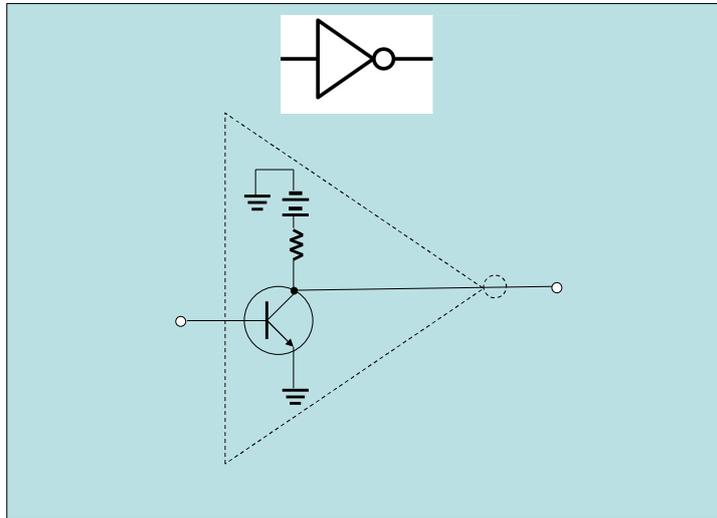


真空管を論理素子とした1946年頃のコンピュータに比べ
半導体を論理素子とした現代のコンピュータの性能は 10^{10} 倍

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



ブール代数(19世紀中頃)

19世紀中頃、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 : $X+X'=1$ $X*X'=0$



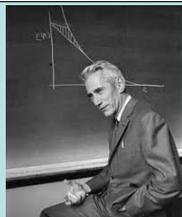
演繹的推論が計算可能

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。

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、シャロンは修士論文「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)

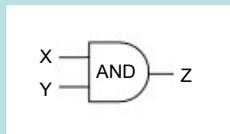
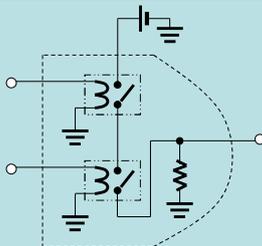
Y: 私は女性である (1)

Z: 私はキャリア・ウーマンでない(0)

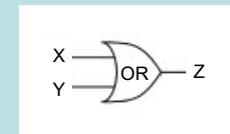
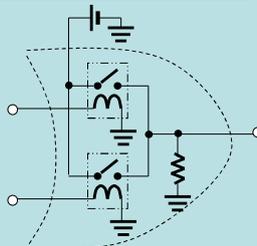
X: 私は働いている (1)

Y: 私は女性である (1)

Z: 私はキャリア・ウーマン (1)



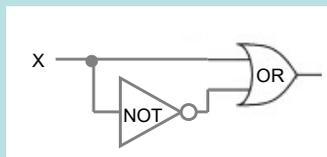
X	Y	Z
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1



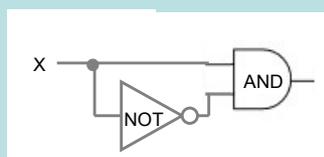
X	Y	Z
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

相補律をデジタル記号で表すと

$$X + X' = 1$$



$$X * X' = 0$$



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。



スイッチのON/OFF切替の高速化(ムーアの法則)により現代社会の基盤が形成