

最初は石ころだった 半導体の技術と歴史

那須科学歴史館

館長 田澤勇夫

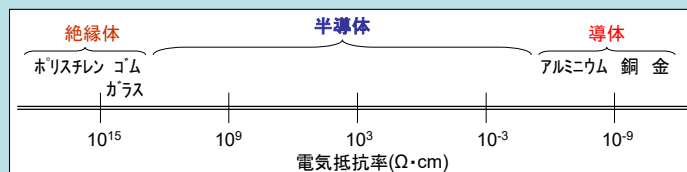
2024/06/22

1. 最初は石ころだった半導体の発見から、
点接触トランジスタの発見までの技術と歴史
2. ショックレーのPNP接合トランジスタの発明とその歴史的意義
3. IC,LSIの誕生とムーアの法則
4. 半導体がなければコンピュータはただの木偶坊？
5. インテルとMPU誕生の歴史

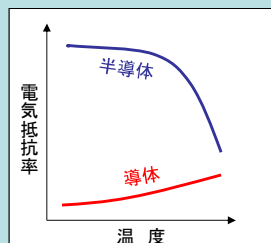
1. 最初は石ころだった半導体の発見から 点接触トランジスタの発見までの技術と歴史

1-1. 半導体とは

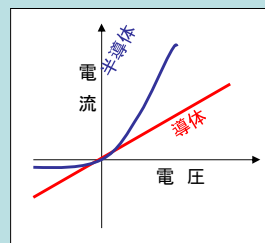
1. 電気抵抗率: 絶縁体と導体の中間



2. 非線形性の強い温度特性



3. 非オーム性(整流特性)



1-2. 半導体の研究開発の年表

1874	鉱石の整流作用の発見	
1906	鉱石検波器を發明(ダンウッドデー)	
1926	波動方程式(量子力学)の完成(シュレーディンガー)	
1928	エネルギー・バンドと金属の電気伝導の理論を發表(ブロッホ)	量子力学応用
1931	バンド理論により半導体の電気伝導の理論を發表(ウイルソン)	
1932	整流器の整流作用をトンネル効果で説明(ウイルソン)	
1934	内部高電界効果(ツェナー効果)を提唱(ツェナー)	
1938	ショットキーがショットキー・バリア(空乏層)の概念を發表	
1939	点接触ゲルマニウム・ダイオードの發明(ラッセル)	
1947	点接触トランジスタの發明(パーディーン、ブラッテン)	
1948	接合型トランジスタの發明(ショックレー)、試作の成功は1951年	
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) トランジスタ・コンピュータ誕生(ベル研)	
1955	SONYがトランジスタラジオを販売	
1959	ICの發明(キルビー) ICの特許化は1964年 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	1M bits DRAMの開発	
1983	32 bits MCの開発	
1989	64 bits MCの開発	
1993	青色LEDの發明	
1995	1G bits DRAMの開発	

1-3. 鉱石の整流作用の発見(1874年)

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發明につながる**ことが期待できるため、**鉱石検波器の發明から始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。**

※金属-半導体接触により生じるエネルギー障壁



鉱石検波器



黄鉄鉱(FeS_2)

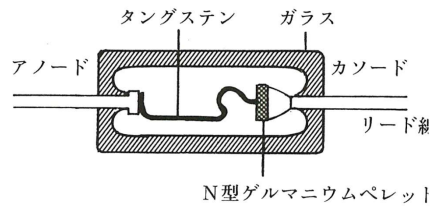


方鉛鉱(PbS)

1-4. 点接触ゲルマニウム・ダイオードの発明(1939年)

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。



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、
動作原理を説明することが必要不可欠であったが、
理論と実験結果が合わなかった。

1-5. 点接触トランジスタの発見(1947年)



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

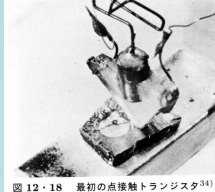
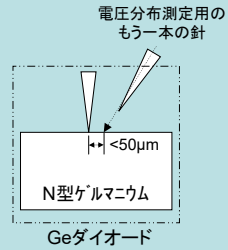
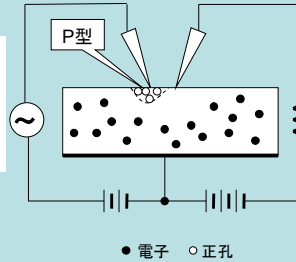


図 12・18 最初の点接触トランジスタ³⁴⁾

ド・フォーレの真空管の増幅作用の発見の状況と酷似している。

バーディーンやショックレーなどは、針の周辺に正の電荷が生じることにより増幅作用が生じていると推定していたが、そのメカニズムは不明であった。

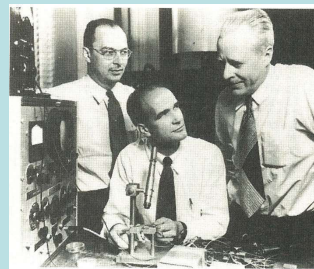
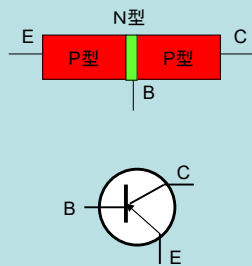


2. ショックレーのPNP接合トランジスタの発明とその歴史的意義

2-1. 接合型トランジスタの発明(1948年)

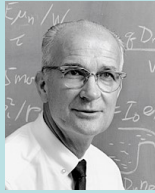
点接触型トランジスタは壊れやすく、鉱石検波器同様に動作が不安定であった。そこでショックレーは1948年に半導体(P型、N型)同士を接合した接合型トランジスタを発明した。

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、ブラッテン

2-2. 接合型トランジスタの発明に至るまでの経緯



W. Shockley,
1910 - 1989

1935年頃からベル研の上司ケリーとともにショックレーは、“真空管と同じ増幅作用を持つユニットを、真空管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、同じベル研究所のパ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に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。

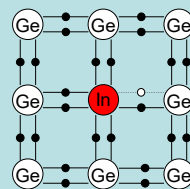
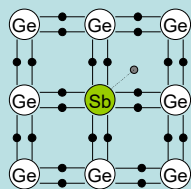


そこで、ショックレーは長年の研究成果を集約して、上記の問題を解決したPNP接合によるトランジスタを予言した。

2-3. P型、N型ゲルマニウムとは

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 ○ といひ、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。

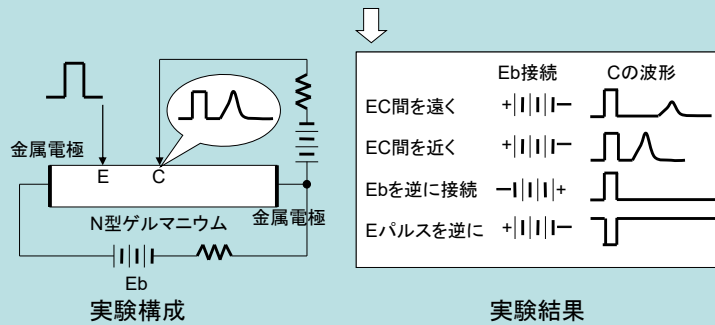
2-4. ショックレーの研究開発の手法

ショックレーの実験

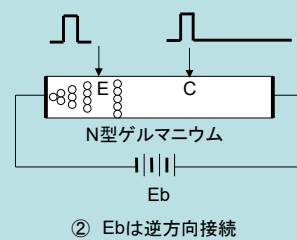
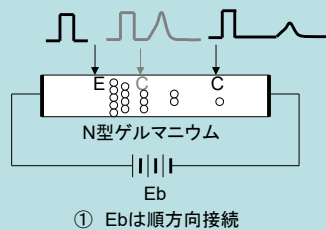
ショックレーらのベル研究所の研究者は**実験**による長年の研究から、“正の電荷をもつ粒子”(現在では正孔という)の存在がトランジスタの動作に重要な役割を担っていると**推定**していた。

↓ そこで、ショックレーらは、

1mm*1mm角、長さ1cmのN型Ge結晶を用いた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。



ショックレーによる実験結果の解釈



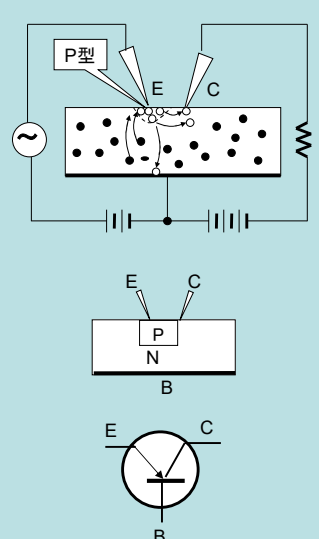
Eb接続が +|-|-|- の場合のみ山の波形人が存在し、C点をE点から遠ざけると山の波形が小さくなる。

↓
E点から正の電荷(正孔)が注入されると考えれば、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に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 V_{EC} によりコレクタC側に移動すると考えた。

↓

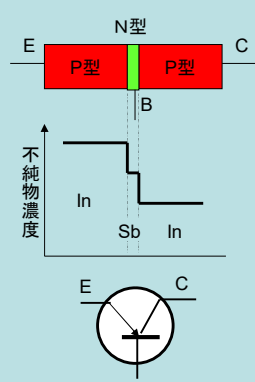
また、一部の正孔がエミッタEからベースBに流れることにより増幅作用が生まれると考えた。

↓

重要な事は、P型が形成され正孔が移動することにより増幅作用が生じる。

※ 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。

↓

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。(どのように思考したのか?)

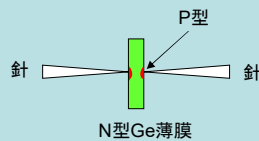
↓

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。

ショックレーは点接触トランジスタを乗り越えるため、数々の実験を行った。それらの中で接合型トランジスタのアイデアを導いた実験は、薄いN型Ge結晶板の両面に針を立てると、針周辺の表面にP型が形成され、増幅作用が得られるというものであった。



2-5. 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

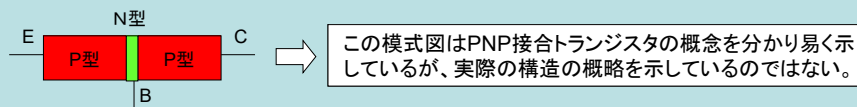


ファラディ、プランク、アインシュタインらとの共通性はあるが、
ショックレーは、科学者というより研究開発における技術者の模範。

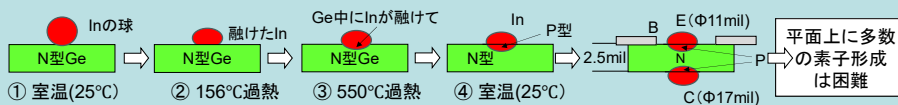


- しかし、次の事よりショックレーは問題の多い人柄であり、指導者としては不適格であった。
- ・ バーディーンとプラッテンに執念深い嫌がらせ
 - ・ ショックレー半導体研究所設立時、ベル研のだれも参加しなかった。
 - ・ 半導体研究所は何も成果を上げられず、ショックレーに嫌気をさした8人が独立し、フェアチャイルドを立ち上げた。
 - ・ 晩年、先天的能力の人種による差異を熱心に研究し、人種差別論者のレッテルをはられる。

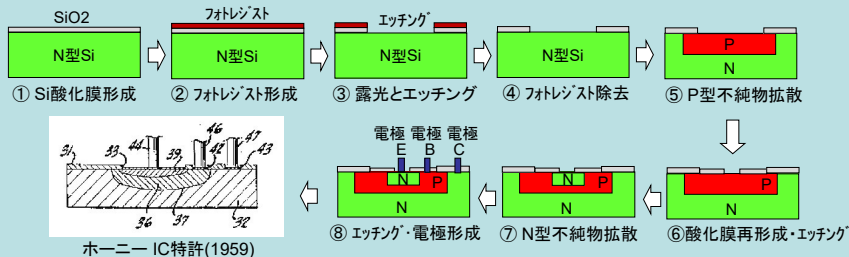
初期のトランジスタとICの製造工程と構造



・ 最初期（1950年代）のPNP・Geトランジスタの製造方法（合金拡散法）と構造（TI社資料に基づく）



・ 典型的なプレーナー型NPN・Siトランジスタ・ICの製造工程（TI社資料に基づく ※一部省略）
（IC特許は1958年、TI社キルビー、1959年、フェアチャイルド社ホーニー）

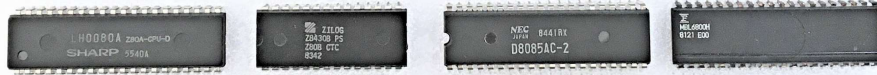


3. IC,LSIの誕生とムーアの法則

3-1. 半導体のサンプル:トランジスタ、IC、LSI



ゲトランジスタ Siトランジスタ 面実装 デジタルIC アナログIC 面実装IC

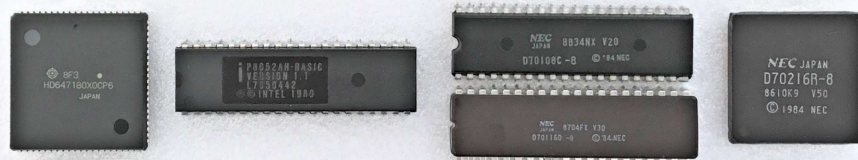


Sharp Z80
(8bits MC)

Zilog Z80
(8bits MC)

NEC 8085
(8bits MC)

Motolora 6800
(8bits MC)

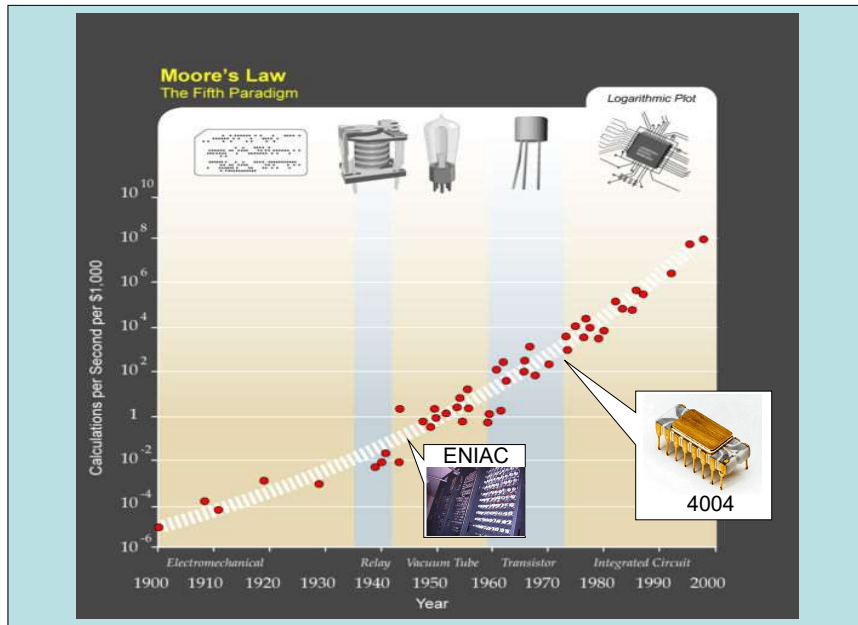


Hitachi HD647180
(8bits MC+ROM)

Intel 1980
(8bits MC+ASIC)

NEC V20, V30, V50
(16bits MC)

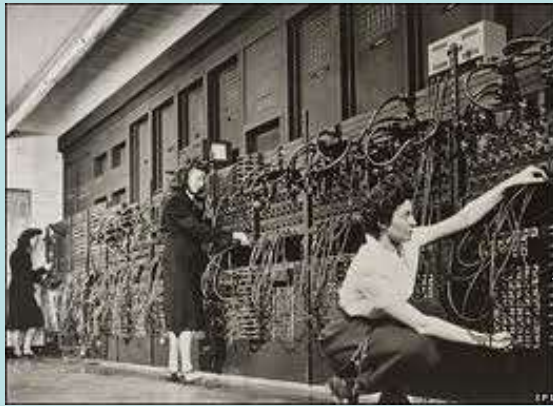
3-2. 半導体のムーアの法則の成立により現代社会が成立



3-3. 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&ベリー・コンピュータ」を世界初のコンピュータとする考え方が今では主流である。



3-4. 最初のトランジスタ・コンピュータ TRADIC (1954)

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できるもので特殊用途に使用



素子数

Intel CPU 4004	2225	(1971年)
Intel CPU 8080	6000	(1972年)
Intel CPU 8086	29000	(1978年)
Intel CPU 80386	275000 (2.75×10^5)	(1985年)
iPhone 13 Pro	1.3×10^{10}	(2021年)

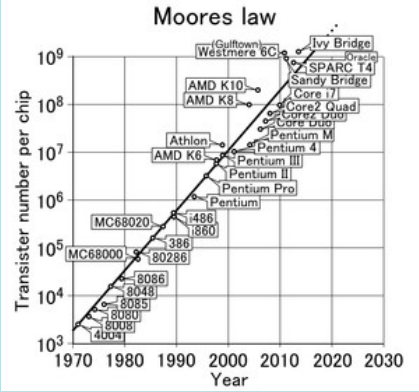
3-5. ムーアの法則からの脱却

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。
半導体の性能は指数関数的に向上

ムーアの法則は
半導体の微細加工技術の発展を根拠

2021年に微細化が原子レベルにまで
到達しムーアの法則は通用しなくなる
とムーア博士自身が予想。

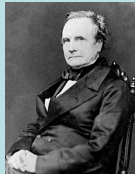
新たな付加価値？が必要



ENIAC 真空管数: 18000(1.8*10⁴)
iPhone 13 Pro 半導体数: 130億(1.3*10¹⁰)

4. 半導体がなければコンピュータはただの木偶坊？

4-1. コンピュータの父・バベジの階差機関/解析機関(1822/1834年)



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。



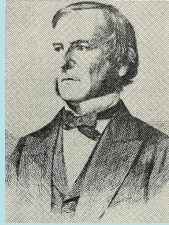
階差機関(1822年)



解析機関(1834年)

4-2. ブール代数(1800年代)

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 : $X+X'=1$ $X*X'=0$



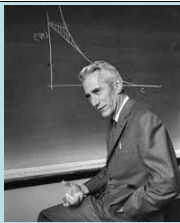
演繹的推論が計算可能

例えば、三段論法

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出来る。

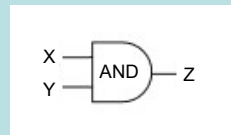
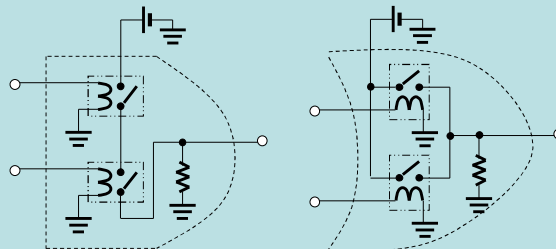
4-3. シヤノンによるデジタル電子回路設計(1937年)⇒電子式計算機



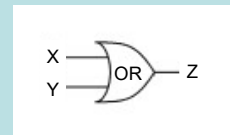
C. E. Shannon,
1916-2001

1937年、シヤノンは修士論文「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	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

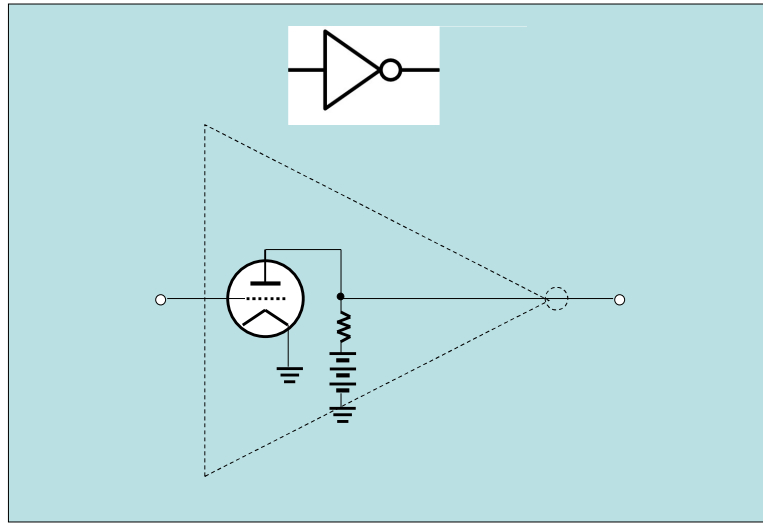
X: 私は働いていない (0)
Y: 私は男性である (0)
Z: 私はキャリア・ウーマンでない(0)

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)

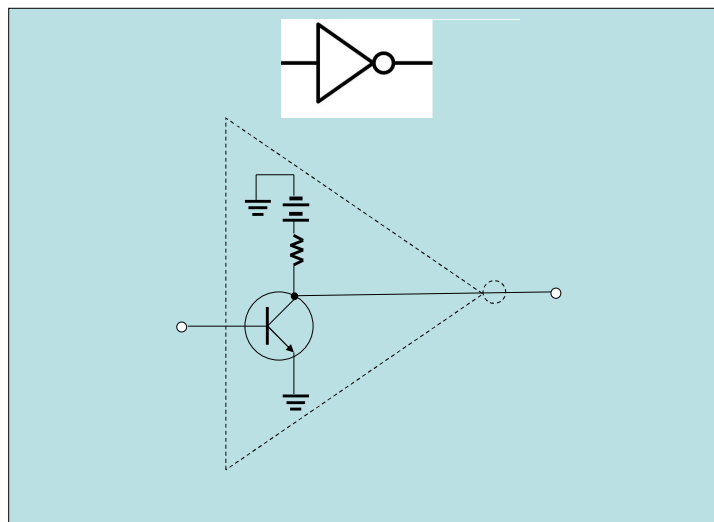
X: 私は働いていない (0)
Y: 私は女性である (1)
Z: 私はキャリア・ウーマンでない(0)

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)

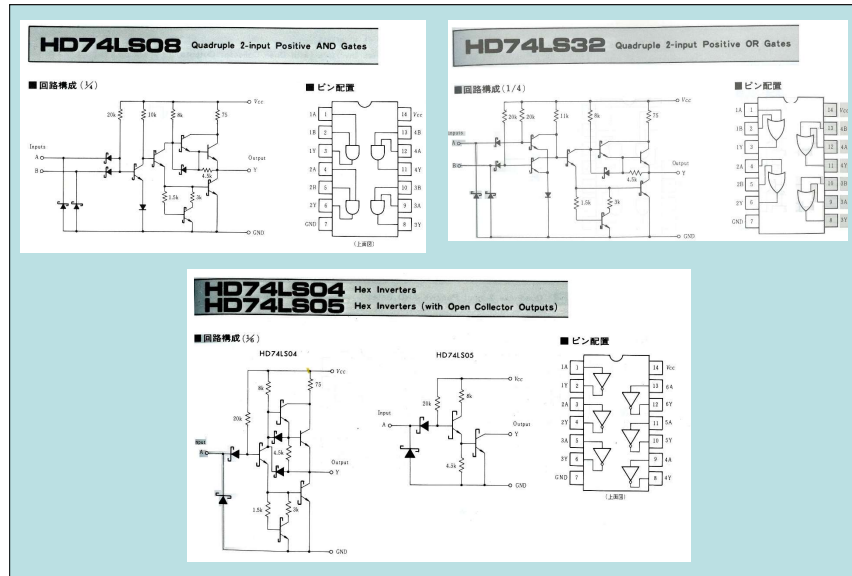
真空管で論理記号を作ると



トランジスタで論理記号を作ると

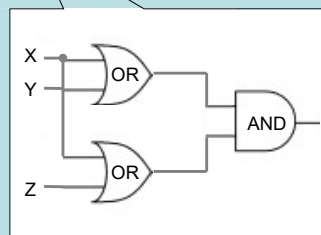
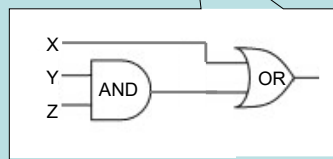


実際の(最も基本的な)デジタルICの回路

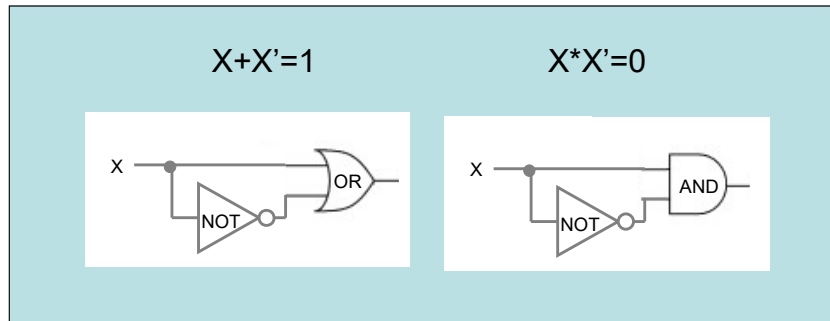


分配律をデジタル記号で表すと

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



相補律をデジタル記号で表すと



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。

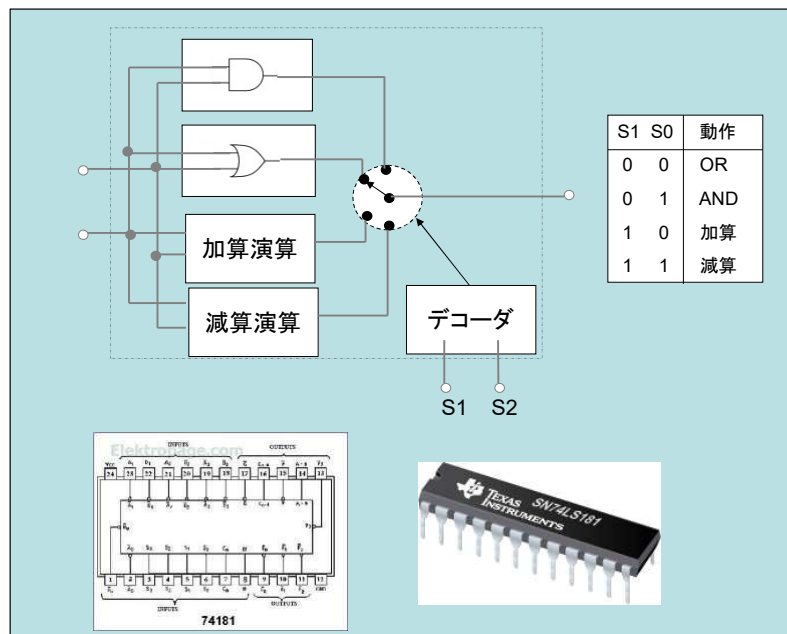


演繹的推論はスイッチのON/OFFで示すことができる。

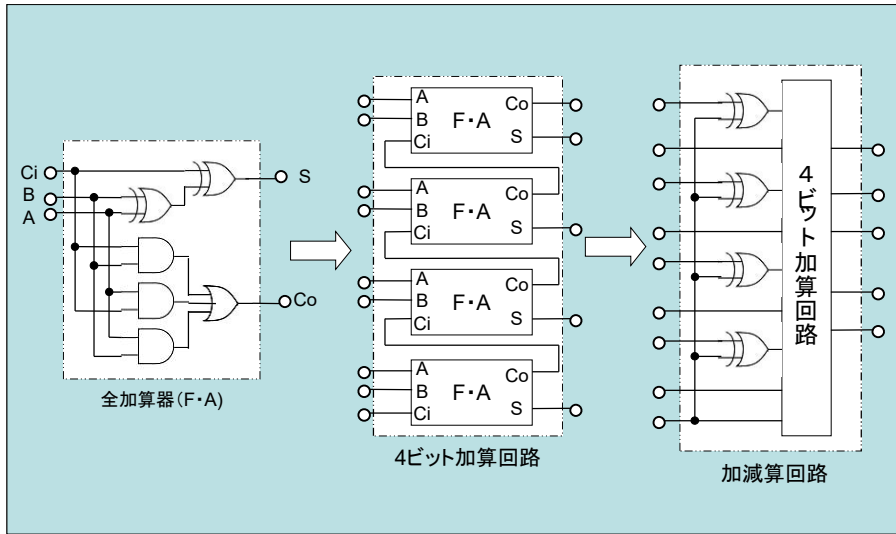


よって、人間の思考の多くをスイッチのON/OFFに置き換えることができる。

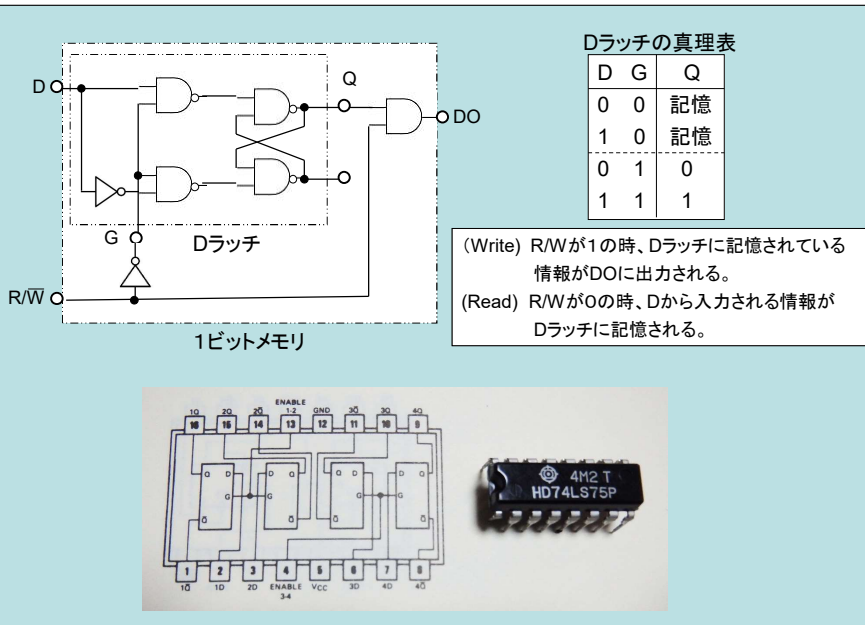
デジタル素子により構成されるALU



加減算回路の階層構造

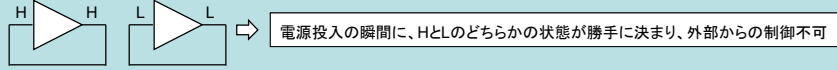


Dラッチによるメモリ

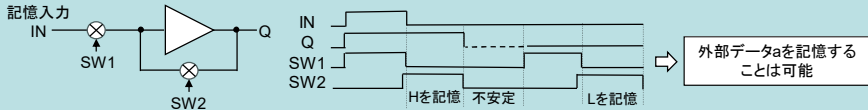


論理と記憶

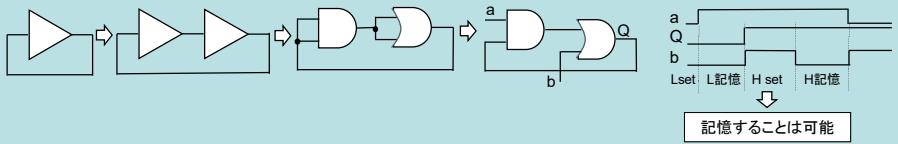
・最も簡単な論理素子Bufferによる2つの安定状態の生成



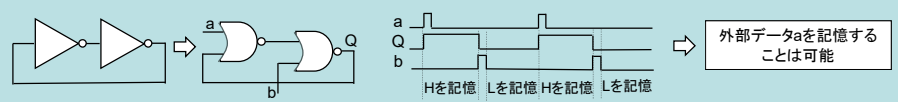
・論理素子Bufferとスイッチによる記憶機能の生成



・回路変形による外部入力・制御の追加



・NOTによる2つの安定状態とNORによる記憶の生成



5. インテルとMPU誕生の歴史

