

# AIとの新科学対話 ④

## 資料「半導体の歴史」

那須科学歴史館

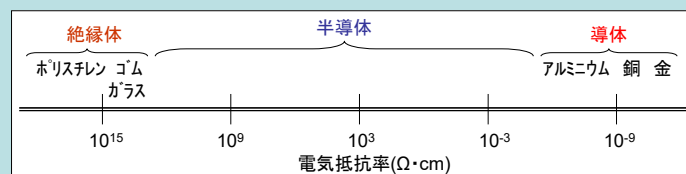
館長 田澤勇夫

2023/07/23

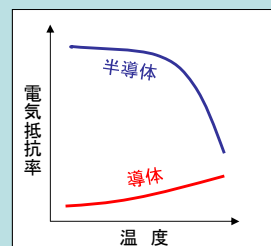
- ・ 半導体とは
- ・ 鉱石検波器からトランジスタの発明の開発史
- ・ ショックレーの研究開発の手法
- ・ 日本の半導体産業の衰退
- ・ ムアの法則

### 半導体とは

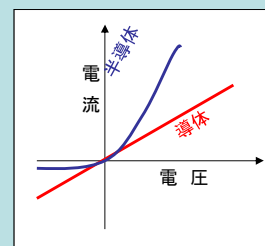
#### 1. 電気抵抗率: 絶縁体と導体の中間



#### 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	<b>接合型トランジスタの発明(ショックレー)</b>
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( $\mu A702$ )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( $FeS_2$ )

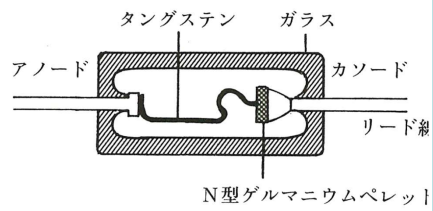
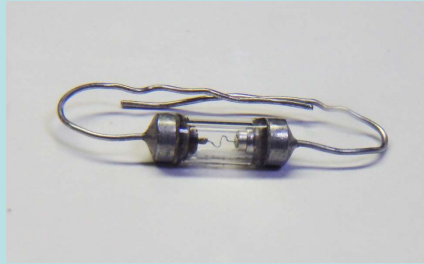


方鉛鉱( $PbS$ )

### 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。



### 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。

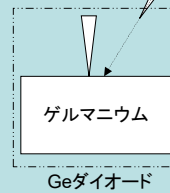
## 点接触トランジスタの発見(1947年)



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、間違えて電圧を印可した  
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



Geダイオード

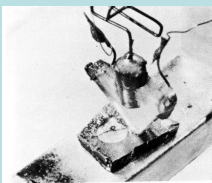
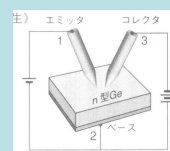


図 12・18 最初の点接触トランジスタ<sup>34)</sup>

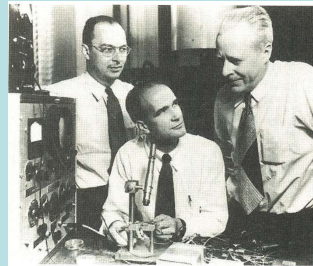
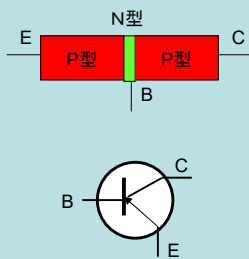
↓  
ド・フォーレの三極間の増幅作用と  
エルステッドの電流による磁気作用、  
そして、ヘルツによる電磁波の発見の  
状況と酷似している。



## 接合型トランジスタの発明(1948年)

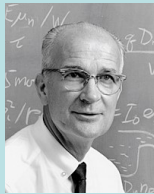
点接触型トランジスタは壊れやすく、鉱石検波器同様に動作が不安定であった。そこでショックレーは1948年に半導体(P型、N型)同士を接合した接合型トランジスタを発明した。

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。

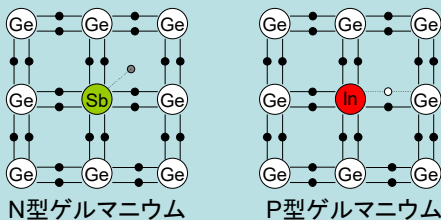


そこで、ショックレーは長年の研究成果を集約して、上記の問題を解決した**PNP接合によるトランジスタを予言**した。

## P型、N型ゲルマニウム

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

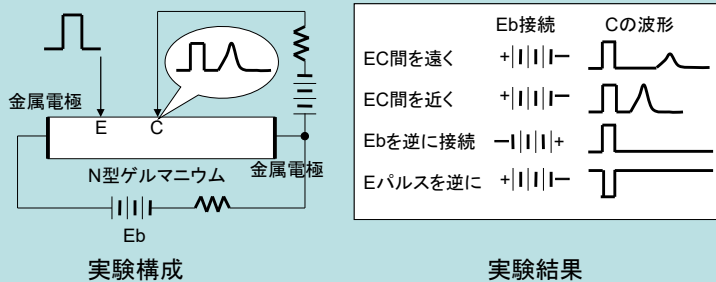
※注意: ショックレーがPNP接合Trを発明した時点では、この科学理論(モデル)は確立されていなかった。

## 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。



実験構成

実験結果

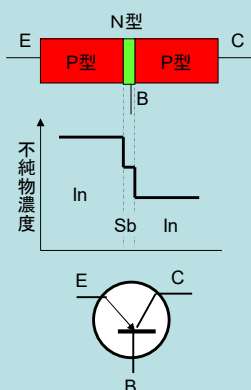
## ショックレーによる実験結果の解釈

Eb接続が +|||I- の場合のみ山の波形  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

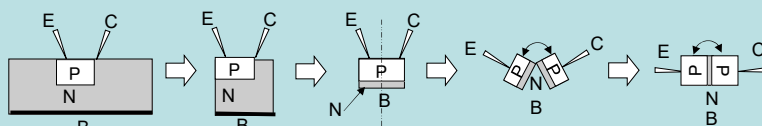


ショックレーは点接触により生じている不安定なP型半導体を積極的に形成することを考えた。

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。

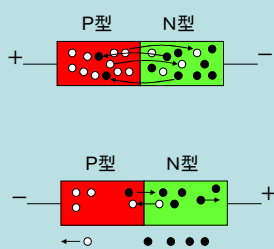
高純度なゲルマニウムにP型部分にはIn原子を加え、N型部分にはSb原子を加えた

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。



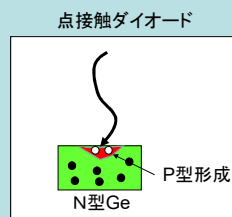
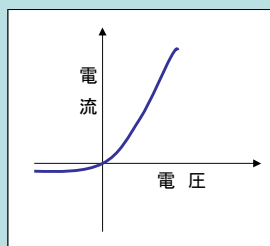
点接触トランジスタの構造から接合型の構造への思考過程の推定図

## 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型の中にも流れるため、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。





## 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

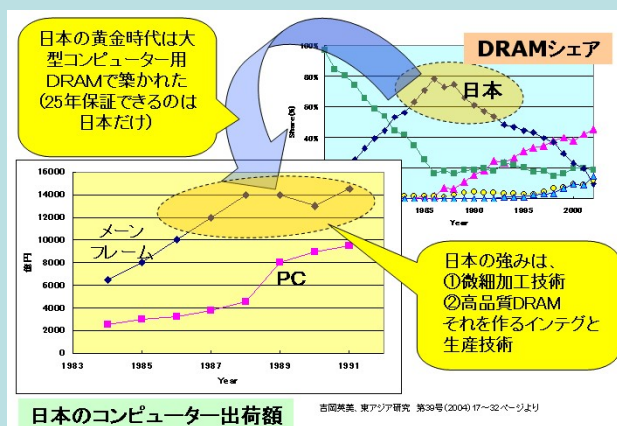


ファラディ、プランク、アインシュタインらとの共通性はあるが、ショックレーは、科学者というより研究開発における技術者の模範。

## 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



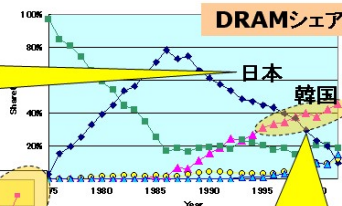
大型コンピュータ・ユーザの要望に対応

### 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。

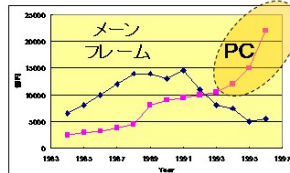
しかし、日本のDRAMの高品質より低コストが重要となる。

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

吉岡美英、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)

韓国とコスト競争に敗れた



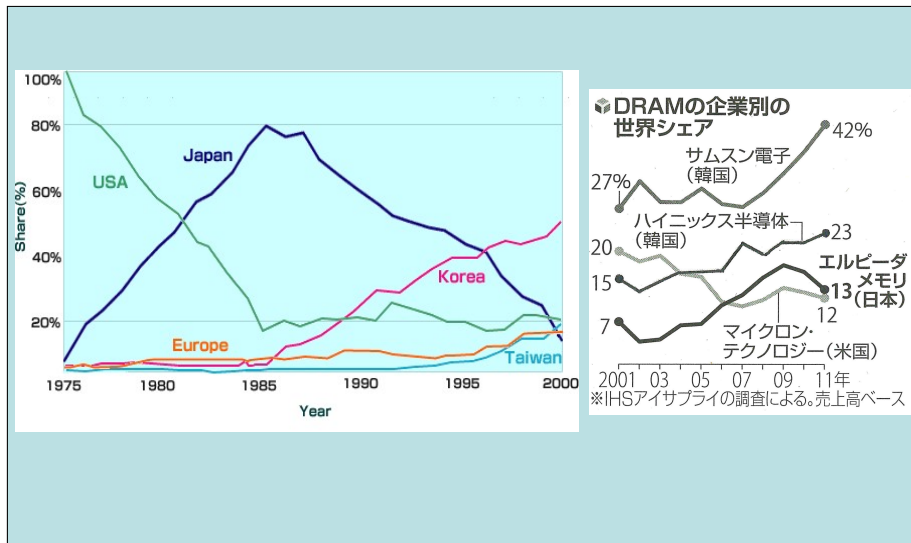
その原因は過剰品質構造？

国家戦略の欠如？

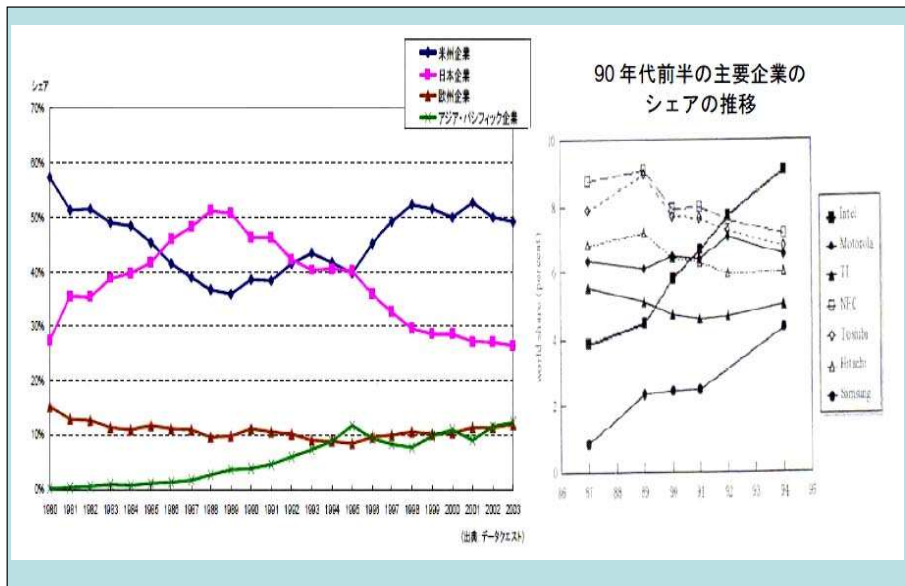


**最大の原因は、  
時代の流れに対応できないで、  
技術的を外し続けたことにある。**

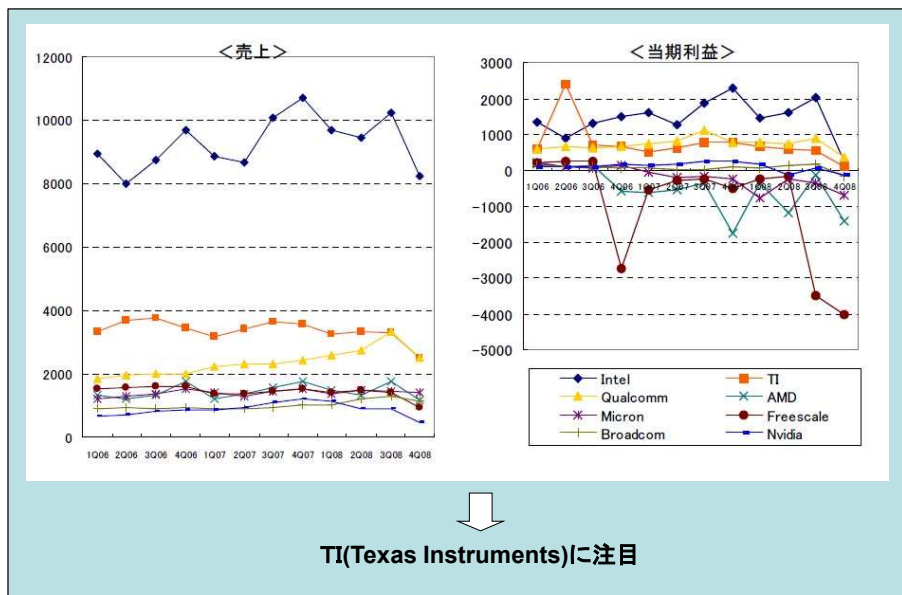
## DRAM分野のシェア推移



## 全ての半導体分野のシェア推移



## 米国の半導体企業の業績推移

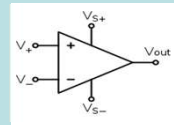
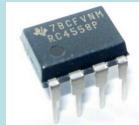


## アナログICを製造している米国企業は多い

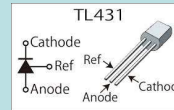
企業名	本社	設立	主要製品	売上
<a href="#">Intel Corporation</a>	Santa Clara, CA	1969年	CPU	33578
<a href="#">Texas Instruments</a>	Dallas, TX	1930年	Analog	12501
<a href="#">QUALCOMM</a>	San Diego, CA	1985年	CDMA, DSP	12501
<a href="#">Advanced Micro Devices</a>	Sunnyvale, CA	1969年	CPU	5908
<a href="#">Micron Technology</a>	Boise, ID	1978年	DRAM, Flash	5841
<a href="#">Freescale Semiconductor</a>	Austin, TX	2003年(MotorolaからSpinoff)	各種コントローラー	5226
<a href="#">Broadcom</a>	Irvine, CA	1991年	通信用	4658
<a href="#">NVIDIA</a>	Santa Clara, CA	1993年	GPU	3435
<a href="#">IBM Corporation</a>	Armonk, NY	1914年		非専業
<a href="#">Eastman Kodak</a>	Rochester, NY	1880年		非専業
<a href="#">LSI Corporation</a>	Milpitas, CA	1981年	Storage, Networking	2700
<a href="#">Analog Devices</a>	Norwood, MA	1965年	Analog, DSP	2582
<a href="#">ON Semiconductor</a>	Phoenix, AZ	1999年(MotorolaからSpinoff)	Analog, Mixed Signal	2200
<a href="#">National Semiconductor</a>	Santa Clara, CA	1959年	Analog, Mixed Signal	1890
<a href="#">Xilinx</a>	San Jose, CA	1984年	Programmable Logic	1800
<a href="#">Spansion LLC</a>	Sunnyvale, CA	1993年 (富士通 & AMD)	Flash Memory	1627
<a href="#">Fairchild Semiconductor</a>	South Portland, ME, San Jose, CA	1957年	Power Analog	1574
<a href="#">Altera</a>	San Jose, CA	1983年	FPGA	1370
<a href="#">International Rectifier</a>	El Segundo, CA	1947年	半波整流器	1000
<a href="#">Cypress</a>	San Jose, CA	1982年	Mixed Signal	766
<a href="#">Integrated Device Technology</a>	San Jose, CA	1980年	Mixed Signal	781
<a href="#">Intersil</a>	Milpitas, CA	1999年 (IBHarris)	Analog	770
<a href="#">PMC-Sierra</a>	Santa Clara, CA	1983年	Networking用。	525
<a href="#">Actel Corporation</a>	Mountain View, CA	1985年	FPGA	218
<a href="#">Rambus</a>	Los Altos, CA	1990年	Memory Interface	142
<a href="#">QuickLogic</a>	Sunnyvale, CA	1988年	携帯機器用	31
<a href="#">Jazz Semiconductor</a>	Newport Beach, CA	2002年	Mixed Signal	非公開
<a href="#">QP Semiconductor</a>	Santa Clara, CA	1985年	軍・航空機用。	非公開
<a href="#">HRL Laboratories, LLC</a>	Malibu, CA	GM系の研究所		非公開
<a href="#">Lansdale Semiconductor</a>	Tempe, AZ	1964年	Aftermarket	非公開
<a href="#">Rochester Electronics</a>	Newburyport, MA	1981年	Aftermarket	非公開

## アナログIC

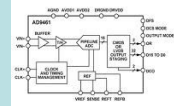
オペアンプ



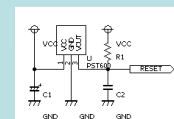
基準電圧IC



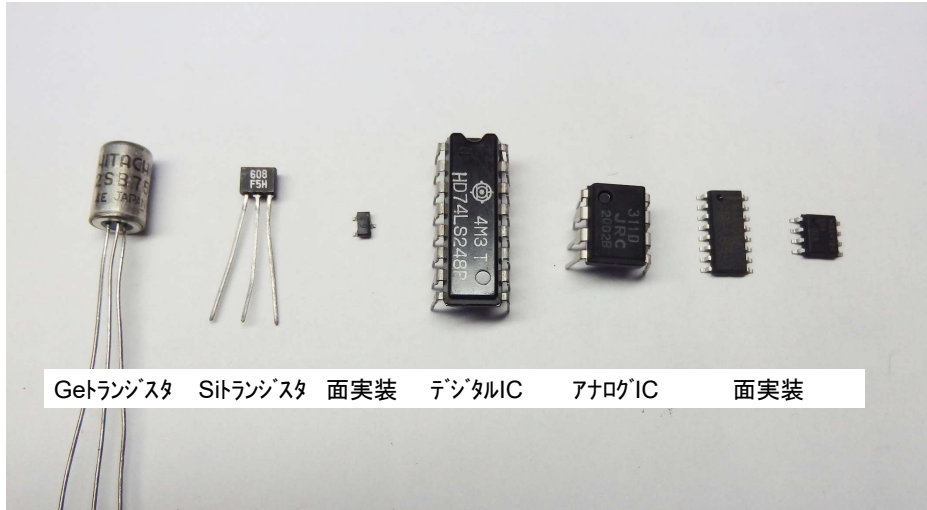
AD変換



電源IC

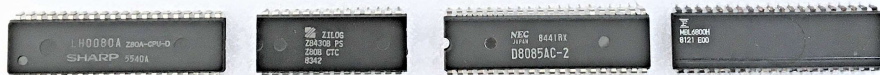


## 半導体のサンプル(1)トランジスタ・IC



Ge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

## 半導体のサンプル(2) LSI

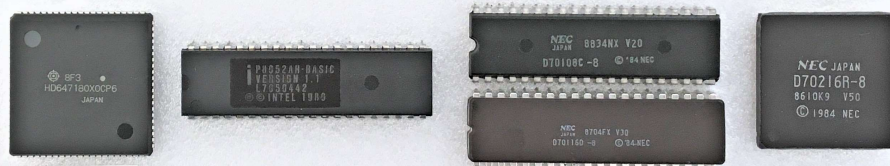


Sharp Z80  
(8bits MC)

Zilog Z80  
(8bits MC)

NEC 8085  
(8bits MC)

Motolora 6800  
(8bits MC)

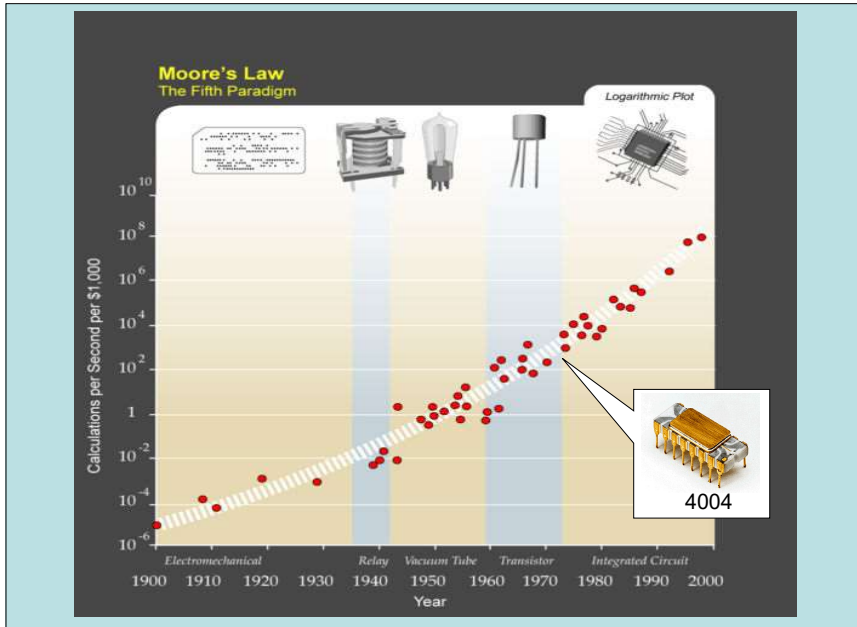


Hitachi HD647180  
(8bits MC+ROM)

Intel 1980  
(8bits MC+ASIC)

NEC V20, V30, V50  
(16bits MC)

## 半導体のムーアの法則の成立により現代社会が成立



## 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

