

CONTENTS

はじめに.....3

Chapter 1

そもそも半導体とは何か

01 スマートフォンにも欠かせない「半導体」の存在.....12

02 「導体」と「絶縁体」とは.....14

03 原子と重要な役割を果たす価電子.....16

04 半導体の動作原理に関わる電子と正孔.....18

05 半導体を持つ2つの性質.....20

06 半導体は何から作られているのか.....22

07 P型半導体とN型半導体.....24

08 PN接合の基本であるダイオード.....26

09 2種類以上の元素を組み合わせた化合物半導体.....28

10 PN接合ダイオードとは.....30

11 半導体は大きく3つに分類される.....32

12 半導体はアナログとデジタルで上手に使い分ける.....34

COLUMN 1

半導体不足が世界経済に与える影響.....36

Chapter 2

半導体はどのようにして作られるのか（前工程）

01 回路設計およびパターン設計.....38

02 フォトマスク作成.....40

03 インゴットの切断.....42

04 ウェハのクリーニング.....44

05 写真の現像技術を利用したフォトリソグラフィ.....46

06 微細なパターンを形成するためのエッチング.....48

07 半導体として使用するための不純物添加.....50

08 平坦化と電極形成.....52

09 ウェハの検査.....54

COLUMN 2

異なる機能を組み合わせたチップレット.....56

Chapter 3

半導体はどのようにして作られるのか（後工程）

01 ウェハのダイシング.....58

02 チップのマウンティング.....60

03 ワイヤーボンディング.....62

04 モールド.....64

05 バーンイン試験（温度電圧試験）.....66

COLUMN 3

半導体製造におけるAI活用の事例紹介.....68

Chapter 4

ディスクリート半導体の代表「トランジスタ」

01	トランジスタの働き	70
02	エミッタ/コレクタ/ベース	72
03	トランジスタの種類	74
04	バイポーラトランジスタの動作原理	76
05	MOSFET の動作原理	78
06	IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) の動作原理	80
07	フォトトランジスタの動作原理	82
08	サイリスタの動作原理	84
09	ベース接地回路	86
10	コレクタ接地回路	88
11	エミッタ接地回路	90
12	ダーリントントランジスタ	92

COLUMN 4

トランジスタの開発者たち	94
--------------	----

Chapter 5

半導体で構成されるデジタル回路のしくみ

01	デジタルの世界ではデータを2進数で表す	96
02	論理素子の基本①—ANDゲート	98
03	論理素子の基本②—ORゲート	100
04	論理素子の基本③NOTゲートと3ステートバッファ	102

05	組み合わせ回路①—加算器	104
06	組み合わせ回路②—減算器	106
07	組み合わせ回路③—比較器回路	108
08	シフトレジスタ	110
09	フリップフロップ	112
10	複数の半導体を集積化したLSI	114

COLUMN 5

デジタル回路が音楽業界に与えた影響	116
-------------------	-----

Chapter 6

考える機能を担う「ロジックIC」のしくみ

01	考える機能を担うロジックIC	118
02	汎用ロジックIC(1)TTL、ECL	120
03	汎用ロジックIC(2)CMOS	122
04	汎用ロジックIC(3)BiCMOS	124
05	汎用ロジックIC(4)FPGA	126
06	汎用ロジックIC(5)DSP	128
07	特定用途のロジックIC ASSP、ASIC	130

COLUMN 6

ロジックICを選ぶためのデータシート	132
--------------------	-----

Chapter 7

記憶する機能を担う半導体メモリのしくみ

01	半導体メモリの概要	134
02	RAMとROMの違い	136
03	RAMの種類(1)SRAM	138
04	RAMの種類(2)DRAM	140
05	ROMの種類(1)マスクROM	142
06	ROMの種類(2)EPROM	144
07	ROMの種類(3)EEPROM	146
08	ROMの種類(4)フラッシュメモリ	148
09	ユニバーサルメモリ	150
10	新しいタイプの半導体メモリ MRAM / FeRAM / ReRAM	152

COLUMN 7

半導体メモリの進化	154
-----------	-----

Chapter 8

半導体センサー

01	半導体センサー	156
02	物体の加速度を測定する加速度センサー	158
03	温度を測定する温度センサー	160
04	圧力センサー	162
05	光センサー	164
06	磁気センサー	166

07	湿度センサー	168
08	半導体ガスセンサー	170

COLUMN 8

魚の鮮度を判定するセンシング技術	172
------------------	-----

Chapter 9

主な半導体素材と半導体製品、メーカー

01	半導体の世界売上ランキングと日本の現状	174
02	インテル	176
03	サムスン電子	178
04	エヌビディア	180
05	ブロードコム	182
06	クアルコム	184
07	ルネサスエレクトロニクス	186
08	ソニー	188
09	キオクシア	190

COLUMN 9

車載対応の半導体とは?	192
-------------	-----

Chapter 10

半導体のこれから

01	半導体不足はなぜ起きたか	194
02	半導体の市場規模と成長見通し	196

03	半導体製造装置の輸出規制	198
04	IoT と AI の技術進化で半導体が果たす役割	200
05	高密度集積回路の需要増加にともなう課題	202
06	次世代メモリ技術の発展と今後の展望	204
07	センサー技術の進化と拡大	206
08	半導体業界における環境問題への取り組み	208
09	半導体の信頼性について	210
10	半導体の微細化はどこまで続くのか？	212
11	国内の半導体産業強化	214
COLUMN 10		
	半導体の EOL がもたらす業界の変化	216
	半導体をより深く学ぶためのおすすめ書籍	217
	索引	218

スマートフォンにも欠かせない「半導体」の存在

半導体はスマートフォンやパソコンといった電子機器、自動車の分野において欠かせない存在です。半導体の重要性は今後も高まり、5GやIoT、人工知能などの技術革新の支えとなっていくことが予想されています。

電子機器には半導体が多く使われている

近年、さまざまな産業や日常生活において、半導体の需要がより高まっています。半導体は、電子機器の中にある回路基板上に搭載されており、電気信号を伝達／制御する重要な役割を果たしています。つまり、**半導体は電子機器の中核を担う部品であり、現代社会を支える基盤技術といえるでしょう。**

私たちの生活において、半導体が果たす役割は多岐にわたります。スマートフォンやパソコンなどのデジタル機器に欠かせない部品であり、機器の性能向上や省エネ化に大きく貢献しています。また、自動車業界においても半導体の重要性が高まっており、自動運転技術の進歩や車両の電動化にともない、車載システムの制御やセンサー技術に半導体が使用されています。

これらの事例からもわかるように、半導体は私たちの生活にとって欠かせない存在です。世界における半導体の出荷額は、2015年以降増加傾向にあり、2022年には12兆5493億円に達しました。ディスクリート半導体の出荷額がもっとも大きく、自動運転技術の向上にともない画像センサーの需要も増加しています。

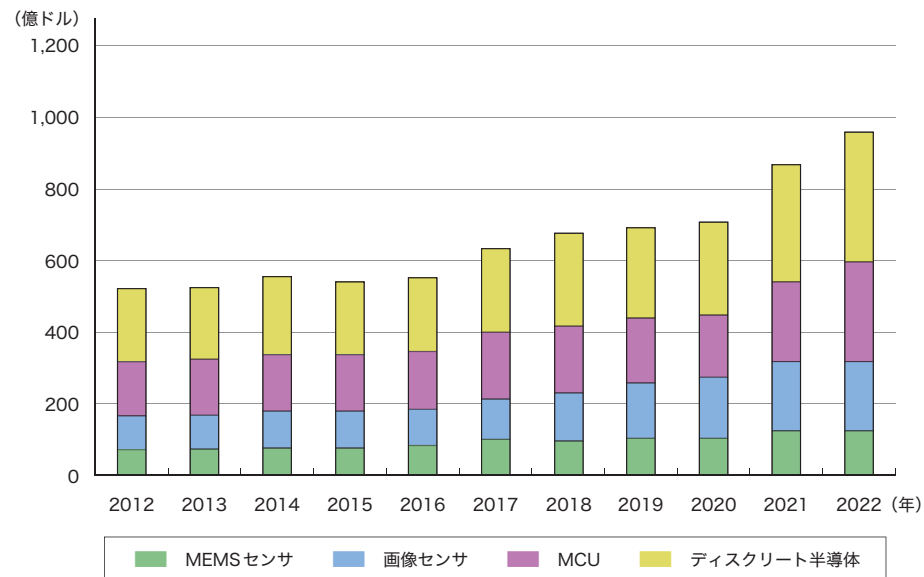
技術革新の支えとなる半導体

今後も半導体技術は進歩を続け、さまざまな分野での技術革新を支え、新たな価値やサービスを生み出していくでしょう。たとえば、近年の5G（第5世代移動通信システム）の普及により、大量のデータを高速でやり取りすることが可能となり、IoTデバイスのさらなる発展が期待されています。

IoT (Internet of Things)

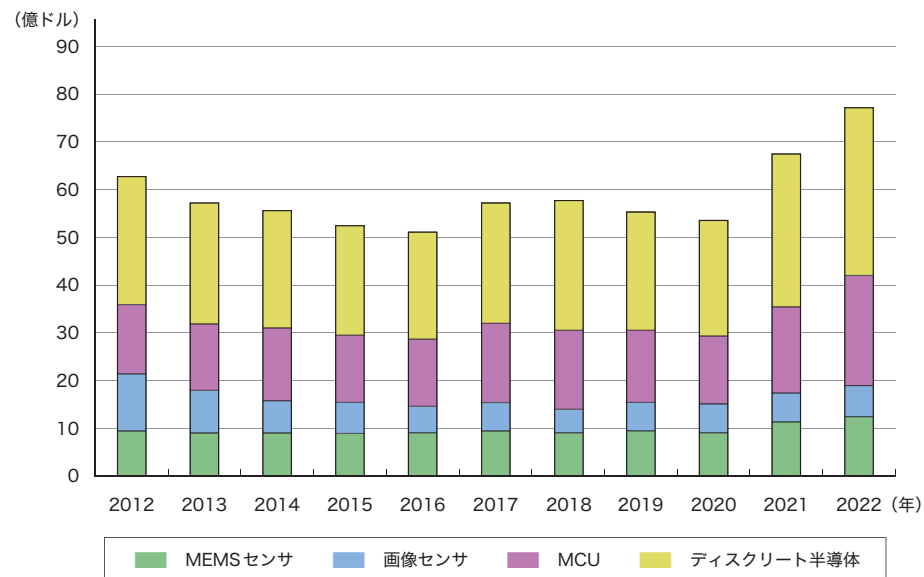
ネットに接続された機器同士が情報をやり取りをするシステム。スマートホームや工場で活用されている。

世界の半導体出荷額の推移



出所：総務省 令和5年版 情報通信白書より作成

日本の半導体出荷額の推移



出所：総務省 令和5年版 情報通信白書より作成

半導体を持つ2つの性質

半導体は絶縁体と導体の中間に位置する物質で、外的要因によって特性が大きく変動します。真性半導体は純粋な材料で構成され、不純物半導体は、ドーピングによって電気的特性が向上します。

半導体は外的要因によって特性が変動する

半導体は、絶縁体と導体の中間に位置する物質です。温度、光の照射の度合い、不純物の添加などによって特性が大きく変動します。たとえば、周囲温度が低いと半導体内部の電子がほとんど動かず、絶縁体のようなふるまいをします。また、半導体に光が照射されると、半導体の電気伝導性が増加して、導体に近い特性を示すようになります。

「真性半導体」と「不純物半導体」

半導体は大きく分けて「真性半導体」と「不純物半導体」の2つに分類できます。真性半導体には不純物が添加されておらず、純粋な半導体材料で構成されています。純度99.99999999%といった高い純度の半導体材料であり、電気を通しにくい物質です。真性半導体の代表例として、シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) といった単一元素からなる半導体が挙げられます。真性半導体そのものは電気伝導性が低いです。温度や光が加わることで電気が流れるようになります。

一方、真性半導体に、微量の不純物を添加したものが不純物半導体です。不純物を加えると電気的特性が変化し、導体に近い特性を示すようになります。これが「ドーピング」と呼ばれる技術です。ドーピングによって、半導体の電気伝導性が大幅に向上し、N型半導体やP型半導体など、さまざまな電気的特性を持つ半導体が生成されます。

不純物半導体は、その高い電気伝導性を生かし、トランジスタやダイオード、太陽電池などに広く利用されています。

シリコン (Si)

ケイ素とも呼ばれる。元素番号14番。シリコン高分子材料としても多く使われている。

単一元素

1種類の元素のみから構成されている物質。リン、銅、金などが該当する。

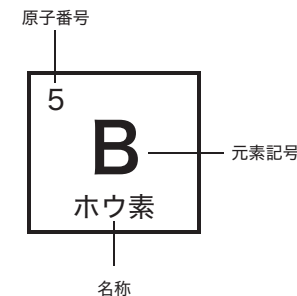
太陽電池

太陽エネルギーを電気的なエネルギーへ変換する機器。

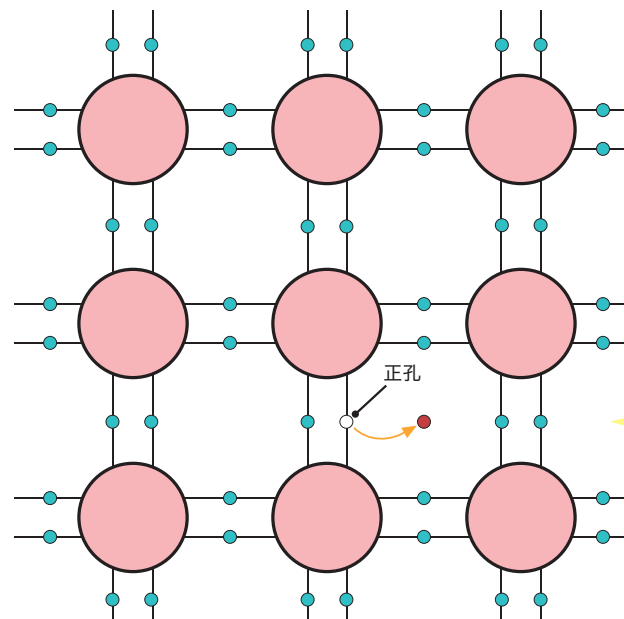
周期表 (抜粋)

II族 (12)	III族 (13)	IV族 (14)	V族 (15)	VI族 (16)
	5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素
	13 Al アルミニウム	14 Si シリコン	15 P リン	16 S 硫黄
30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン
48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn 錫	51 Sb アンチモン	52 Te テルル
80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマス	84 Po ポロニウム

「族」とは周期表における縦の列のことです。同じ族に属する元素は、似たような化学的性質を持ちます。また、II～VIの数字は価電子の数を示します。



真性半導体



外部からのエネルギーがないとき、電子は共有結合を構成しており、自由に動くことができない。光や温度が加わると価電子の一部が自由電子になる。

- ...電子
- ...原子核
- ...自由電子

シリコンインゴットを薄く切断するとウェハーとなる

インゴットの切断

半導体の材料となるシリコンインゴットは、自然界にある珪石が材料となっており、精密な工程を経て製造されます。純度の高いシリコンインゴットが切断されることで、ウェハーが完成します。

シリコンインゴットはどのように作られるのか？

シリコンインゴットとは、溶かしたシリコンを冷却させて固めた単結晶シリコンの塊のことです。

半導体の主な材料であるシリコンは、珪石 (SiO_2) から採取されます。この珪石を溶かすことで、純度の高い金属シリコンが作られ、そこから多結晶シリコンが作られます。多結晶シリコンとは、不規則に並んでいるシリコンのことです。

この多結晶シリコンを還元し、さらに純化することでようやく単結晶シリコンが生成されます。この単結晶シリコンは、シリコン原子が規則正しく並んでいるため、電子の移動がスムーズに行われ、半導体デバイスに適した材料になります。

チョクラルスキー法
シリコンインゴットを作るときに用いられる代表的な製造方法。多結晶シリコンを、ホウ酸やリンと一緒にルツボに入れ、融解させる。その後、融解したシリコンに種結晶シリコン棒を付けて、引き上げる。

チョクラルスキー法と呼ばれる製造方法にて作られたシリコンインゴット（単結晶シリコン）は長さが1mほど。直径が数百ミリメートルの円柱形をしているのが特徴です。

シリコンインゴットからウェハーへのプロセス

その後、シリコンインゴットは、必要に応じた長さへと切断されます。その後、ワイヤーソーやダイヤモンドブレードを使用して、薄いディスク状に切断されます。この切断されたディスクがシリコンウェハーと呼ばれるものです。このプロセスは非常に繊細であり、最高の精度が要求されます。

切断方法については、製品の要求される精度や切断する材料によって異なります。

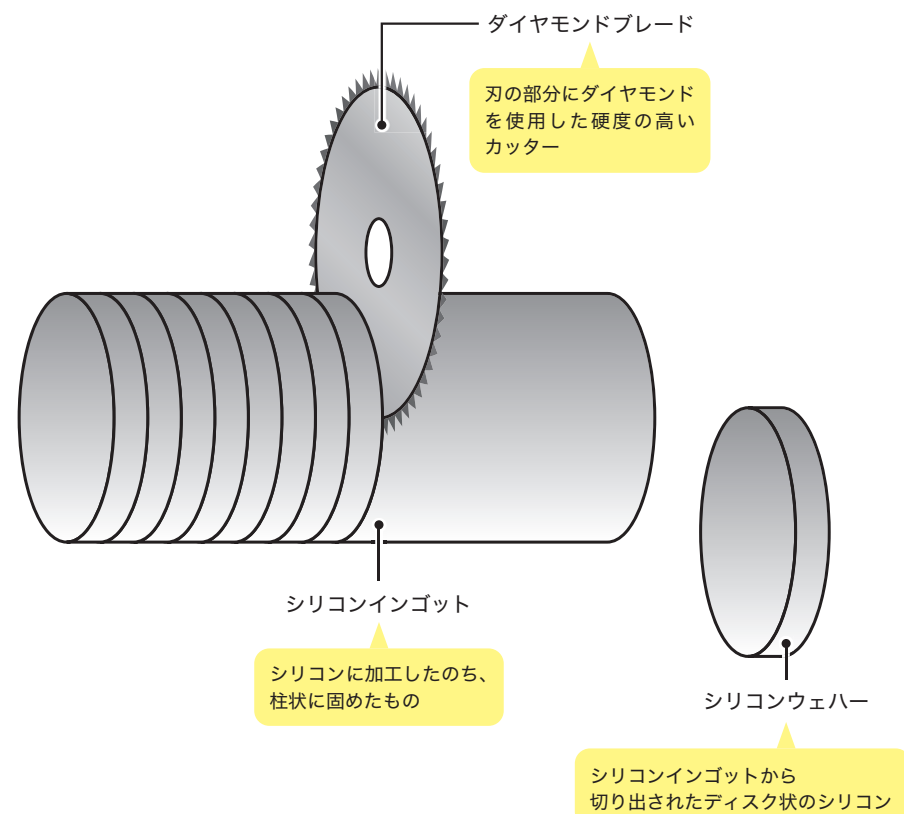
シリコンインゴットが半導体製造の上でもっとも使われる材料ですが、このほかにもゲルマニウムインゴットなどが使われることもあります。

シリコンはどのように作られるのか

半導体の主な材料であるシリコンは珪石から採取され、以下の流れで加工される



シリコンインゴットの切断



バーンイン試験（温度電圧試験）

バーンイン試験とは、半導体デバイスの信頼性を確保するため、初期段階の故障を検出する試験です。試験は大きく分けてスタティックバーンイン、ダイナミックバーンイン、モニターバーンインの3種類があります。

スタティックバーンインとダイナミックバーンイン

バスタブ曲線

製品の故障率が時間の経過によって、どのように変化するかを表したもの。名前の由来は、曲線の形がバスタブ（浴槽）に似ているため。

半導体デバイスの寿命や故障率は、**バスタブ曲線**によって表されます。故障率は初期段階で高く、時間とともに減少していきます。初期段階の故障の原因として、製造中の欠陥や設計上の問題が多くあります。この初期段階の故障を発見する試験が、**バーンイン試験**です。この試験を実施することにより、製品が顧客の手に渡る前に不具合を検出し、問題のある製品だけを除外できます。

バーンイン試験にはスタティックバーンイン、ダイナミックバーンイン、モニターバーンインの3種類があります。**スタティックバーンイン**では、デバイスを高温下に置き、一定の電圧を**印加**してその状態を一定の時間保持します。これは、デバイスが設計条件内で正常に動作することを確認する目的で行われ、潜在的な欠陥を早期に見つけ出すことも可能です。

一方、**ダイナミックバーンイン**では、デバイスを実際に電氣的に動作させた上で試験が行われます。実際に市場での使われ方に近い方法で試験が行われる点が特徴です。

モニターバーンイン

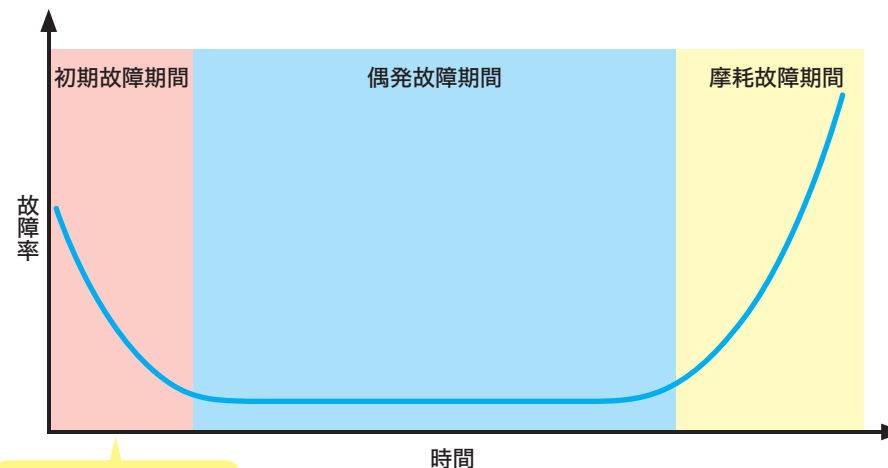
モニターバーンインでは、**ダイナミックバーンイン**の進行中に**デバイスのパラメータを観測**します。具体的には、入力信号に対する出力信号をモニタリングし、試験中に発生する可能性のある問題を迅速に検出して対処します。

これらの試験は、デバイスの性能と信頼性を保証し、不良品の早期検出に役立ちます。

印加

特定のポイント（端子）に電圧を加えること。それによって、デバイスやシステムの動作をさせたり、制御したりする。

バスタブ曲線（故障率曲線）



初期段階の故障をバーンイン試験で見つけ出す

バーンイン試験機



モニタードバーンインシステム（エスベック製）

提供：エスベック株式会社

デジタルの世界ではデータを2進数で表す

2進数は「0」と「1」の2つの数字によって情報を表現し、これをビットといます。ビットによる表現は文字や画像、音声といったあらゆる情報を効率的に扱うことを可能にします。

2進数は「0」と「1」の2つの数字で表現される

私たちの周りにある電子機器は10進数ではなく、すべて「0」と「1」、つまり2進数によって動いています。0と1、この2つの数字を使ったデジタルシステムの最小単位を「ビット」と呼びます。このビットを使うことにより、「ONまたはOFF」「真または偽」「1または0」を表現することが可能です。

ビットは「Binary (2つ)」と「digit (数)」を組み合わせた言葉で、まさしく0と1の2つの数だけで情報を表現します。

2進数で表現するメリット

たとえば、ASCIIコードでは、128種類の文字や記号を7ビットで表現します。拡張ASCIIコードなど用いると、8ビット（1バイト）で256種類の文字や記号が表現できます。

画像に関しても、1個1個の点（ピクセル）の色をビットの組み合わせで表現します。音声も同じで、音の高さや強さをビットで表現します。

このように、0と1だけで情報をやり取りする2進数は非常に便利です。デジタル信号はアナログ信号よりノイズに強い点もメリットです。

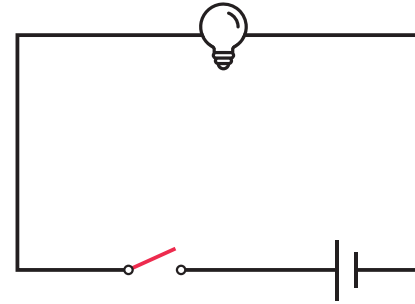
さらに、2進数によるデータの表現は、信頼性と効率性に優れています。

一度データが2進数に変換されてしまえば記録、処理、送信が容易となり、加えてデータの劣化を抑えられます。また、取り扱う数字が0と1だけなので、複雑な計算も必要とせず、高速に計算することが可能となります。

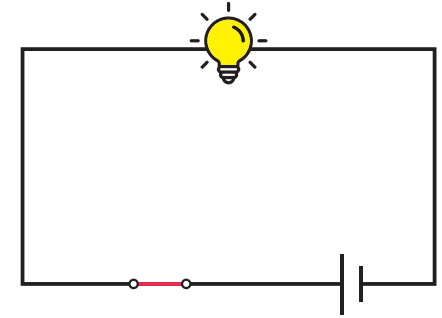
ASCII (アスキー)
コンピューターで文字や記号を表現するための標準的な文字コード。

ピクセル
デジタル画像の最小単位。ピクセルが多いほど、画像は高解像度となる。

「0」「1」の2つで表現する2進数



スイッチがOFFなら豆電球に電流は流れない。つまり「0」の状態



スイッチがONなら豆電球に電流は流れ点灯する。つまり「1」の状態

私たちが普段扱っている10進数よりも2進数の方がコンピューターにとっては扱いやすいのです

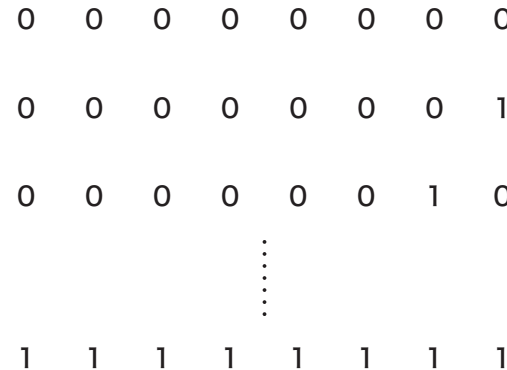


1バイトは256通りのデータを持つ



1ビット×8

8ビット=1バイト=2⁸ (256) 通りの組み合わせを通して数字やアルファベットを表現する



「00000000」から「11111111」まで全部で256通りの組み合わせ

ROMの種類 (4) フラッシュメモリ

フラッシュメモリは、電源がOFFしても情報を保持し、高速なアクセスが可能な不揮発性メモリです。NAND型とNOR型の2種類があり、デジタルデバイスから組み込みシステムまで広く活用されています。

フラッシュメモリの特長と利用例

フラッシュメモリはEEPROMの一種で、電源を切ってもデータを保持する不揮発性タイプの半導体メモリです。

電氣的にデータの読み書きや消去が可能で、その動作原理や利用方法には独自の特長があります。フラッシュメモリの最大のメリットは、ブロック単位での操作が可能な点です。これにより一度に大量のデータを効率よく消去し、書き込むことができます。

この特性によって、高速なデータアクセスと大容量データ保存が可能となり、デジタルカメラのメモリーカード、USBメモリ、スマートフォンやPCのストレージとして使われるSSD (Solid State Drive) などに広く利用されています。

SSD (Solid State Drive)

フラッシュメモリを主要な記憶媒体として使用するデータストレージデバイス。HDD (Hard Disk Drive) と比較してデータアクセス速度が高速。

フラッシュメモリのタイプはNAND型とNOR型

フラッシュメモリは、NAND型とNOR型の2つのタイプがあります。NAND型は、データの読み書きが高速で大容量のデータ保存に適しているため、主にストレージ用途に使用されます。

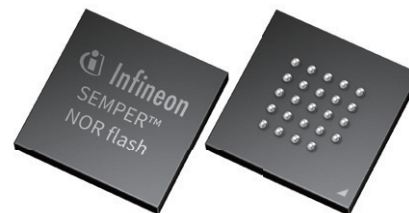
一方、NOR型は、読み取り速度が非常に速く、ファームウェアの保存や組み込みシステムのブートローダとしての利用されることが一般的です。

ブートローダ

コンピュータ起動時に最初に実行されるプログラムのこと。

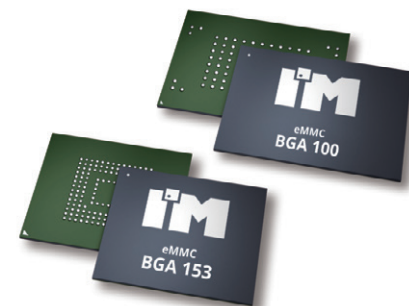
ただし、EEPROMと同様に書き込みと消去のサイクル回数には限りがあります。この限界を超えるとメモリセルが破損し、データが保存できなくなる可能性があります。また、長期間の保存には向かない場合もあるため、利用シーンや用途に合わせた選択が求められます。

フラッシュメモリの紹介 (一部)



インフィニオン・テクノロジーズ社製
NORフラッシュメモリ

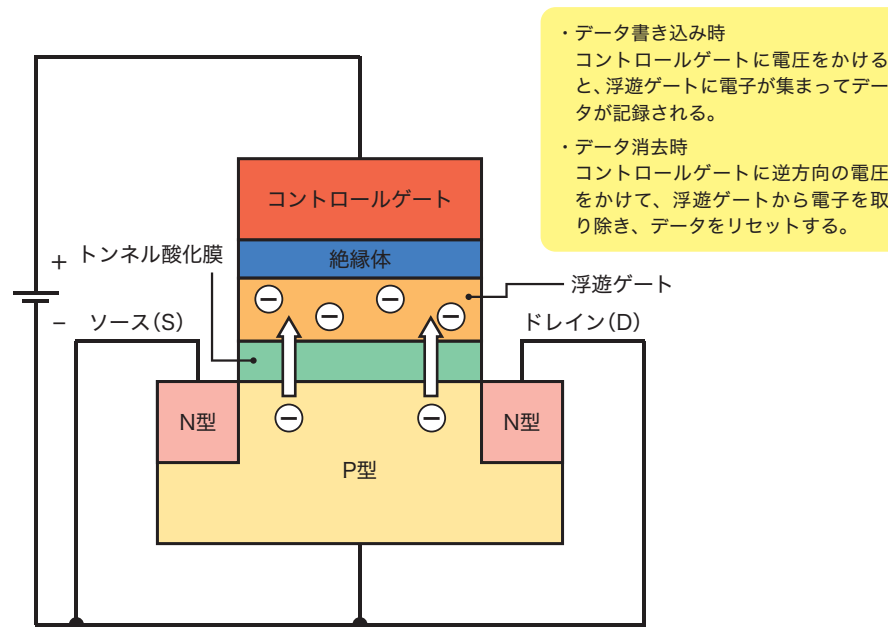
出所：インフィニオン・テクノロジーズ社ホームページ



インテリジェントメモリ社製
NANDフラッシュメモリ
eMMCファミリー

出所：インテリジェントメモリ社ホームページ

フラッシュメモリの動作原理 (データ書き込み時、消去時)



インテル

インテルは、世界初の商用マイクロプロセッサを開発し、コンピューター産業の進展に貢献してきました。マイクロプロセッサ市場をリードするインテルは、高性能CPUとOptaneメモリで広く知られています。

CPU市場でトップシェアを誇るインテル

インテル (Intel Corporation) は、CPUの分野でトップシェアを誇る半導体メーカーで、マイクロプロセッサや不揮発性メモリ製品で広く知られています。1968年にカリフォルニア州でゴードン・ムーアとロバート・ノイスによって設立されたインテルは、初期から技術革新の先駆者でした。

1971年には、世界初の商用マイクロプロセッサ「4004」を発表し、以降コンピューター産業の進展に貢献してきました。

インテルの製品はPCやサーバー、**データセンター**といった幅広い分野で使用されており、**とくにマイクロプロセッサの分野では長年にわたって市場をリードしてきました。**

同社の「Core」シリーズや「Xeon」シリーズは、高い処理能力と省電力性で多くのユーザーから高い評価を受けています。

インテルの最先端メモリ「Optane」

近年では不揮発性メモリ技術の開発にも注力しており、とくにOptaneは大きな注目を集めています。**Optaneは、データの読み書き速度が非常に高速であり、従来のSSDよりも応答速度が速いという特徴があります。**

この技術によって、データセンターや高性能コンピューティングアプリケーションにおいて、データの処理速度の大幅向上が期待されています。

技術革新に加えて、**インテルは教育や研究開発への支援にも積極的に取り組んでいます。**また、環境問題に対しても意識が高く、エネルギー効率の高い製品の開発や持続可能な製造プロセスの実現に向けて取り組んでいます。

データセンター

通信やストレージシステムが集中して配置される場所。規模なデータの保存や処理が行われる。

▶ PC向けiGPU(CPU内部にGPU機能を搭載)の市場シェア(2024年第1四半期)

● x86 CPU全体のシェア

	2023年第1四半期	2023年第4四半期	2024年第1四半期
インテル	85%	82%	82%
AMD	15%	18%	18%
iGPUの出荷台数	4300万台	6200万台	5600万台

出所：JPR (Jon Peddie Research)



iGPUのシェアはインテルが大半を占めていることがわかります。

▶ インテルの主力製品一覧

製品名	インテルCoreプロセッサ	インテルXeonプロセッサ
		
用途	PC用	高度なコンピューティングニーズ・サーバー向け
概要	複数のコアを持ち、マルチタスク処理や高度な計算処理に優れる	データ集約型のアプリケーションや大規模なデータベース管理に適している
製品名	インテルArc Pro A60シリーズ	
		
用途	グラフィックスサポートなど	
概要	本格的なゲーマーやプロのコンテンツクリエイター向けの製品	

提供：Intel Corporation