

# まえがき

携帯端末やカーエレクトロニクスにおける新機能を実現するための電子機器に用いられる電子材料の進展は目覚ましく、新規の要求に対応するため、日々進化している。したがって、おもに電子材料を扱った教科書は数年単位で内容が更新されている。

一方、電気材料を扱った教科書は、適用対象が送配電線や電動機/発電機の巻線などの確立された技術対応のためか、再版を重ねるだけで10年以上も内容が更新されないまま発行されているのが現状である。

しかしながら、日本は、東日本大震災という1000年に一度といわれる大災害に見舞われ、現在、エネルギー供給体制の一大変換に迫られている。これまで盲目的に導入されてきた原子力発電に頼るわけにはいかず、自然エネルギーを利用した太陽光発電などの導入や、それを支える蓄電池の高効率化が強く望まれている。元來電気工学という分野は、電気エネルギーを扱う分野である。にもかかわらず、電気材料の教科書が10年もの間更新されないというのは、大学で電気材料を教える教員の怠慢といわざるを得ない。筆者は、2011年から電気材料の講義を担当しているが、時代遅れの教科書を使用することに耐えられず、現状に合った教科書を作成するに至った。

電気工学の最大のテーマである創エネ、省エネ、蓄エネ用の電気材料に関しては、積極的に取り入れた。特に、一般的な電気材料の教科書ではあまり取り扱われない燃料電池および蓄電池に関しては、太陽電池とともに独立した章で扱った。

環境問題は、電気材料に限らず現在のすべての材料にとって、避けては通れないテーマである。鉛フリー化や代替フロンといった技術は、電気材料にとって必須である。それらを扱うのは当然であろう。また、電気電子機器には、レ

レアメタル/レアアースが多く使用されている。近年、レアメタル/レアアースの獲得に関しては、国際間で大問題となってきた。中国の囲い込みなどにどう対処するかが、日本の製造業の大きな課題である。逆に、このことを契機に代替材料を用いた機器の開発につながることもなった。今後の日本を支えていくエンジニアに、電気電子材料の現状を知らしめることも本書の重要な役割と考えている。

半導体材料に関しては、一般的な電気電子材料の教科書では、ダイオードやトランジスタなどの簡単な説明を記載しているものが多い。しかしながら、そのような内容は、半導体の専門書に詳しく解説されており、材料に関する教科書として適切な内容とは思われない。したがって本書では、すべての半導体デバイス製造の基本となる半導体ウェーハの製造法を詳細に説明する。

本書は、6章から構成されている。1章では、電気電子材料の基礎として、原子の構造と結合、その結果として構成される結晶とそのエネルギーバンド構造に関して解説する。2章から5章までは、電気電子材料を導電材料、半導体材料、誘電/絶縁材料、磁性材料に分類し、詳細に解説する。最後に、6章では、発電/蓄電用材料に関して解説する。環境問題からの要請やレアメタル/レアアースに関する話題は、関連する項目ごとに解説を加えた。なお、1章、2章、3章、6章は山本が4章、5章は小田が分担執筆した。

2013年7月

著 者

# 目 次

## 1. 電気電子材料の基礎

1.1 原子構造と結合 .....	1
1.1.1 材 料 の 分 類 .....	1
1.1.2 原 子 構 造 .....	2
1.1.3 原子内電子の殻構造 .....	3
1.1.4 元素の周期表 .....	5
1.1.5 原子/分子間の結合 .....	8
1.1.6 混 成 軌 道 .....	11
1.1.7 無機物と有機物 .....	13
1.1.8 物質の状態 (物質相) .....	13
1.2 結晶構造とエネルギーバンド .....	14
1.2.1 ブラベー格子 .....	14
1.2.2 ミ ラ ー 指 数 .....	17
1.2.3 エネルギーバンド .....	18
1.2.4 結 晶 欠 陥 .....	20
1.2.5 結晶構造とエネルギーバンド .....	23
1.3 電気電子材料の電気的性質と熱的性質の概要 .....	25
1.3.1 物質の導電率 .....	25
1.3.2 熱 電 効 果 .....	26

## 2. 導 電 材 料

2.1 導電材料の基礎 .....	30
-------------------	----

2.1.1	物質の導電現象	30
2.1.2	電気抵抗の温度依存性	31
2.1.3	金属の物質特性	32
2.1.4	不純物の影響	33
2.1.5	機械加工の影響	34
2.1.6	熱処理の影響	35
2.1.7	合金の導電率	36
2.1.8	超伝導	38
2.2	各種の電線	40
2.2.1	裸電線	40
2.2.2	巻線	42
2.2.3	絶縁電線	43
2.2.4	電力ケーブル	44
2.3	その他の導電材料	46
2.3.1	電気接点材料	46
2.3.2	抵抗材料	46
2.3.3	低融点導電材料	48
2.3.4	透明導電膜	49
2.3.5	超伝導材料	50

### 3. 半導体材料

3.1	半導体材料の基礎	53
3.1.1	半導体の特徴と分類	53
3.1.2	半導体の結晶構造	55
3.1.3	プロセス導入欠陥	58
3.1.4	接合の機能	59
3.1.5	光電変換	61
3.1.6	ルミネセンス	63
3.1.7	直接遷移と間接遷移	63
3.1.8	ホール効果	64
3.2	各種の半導体材料	66

3.2.1	半導体の物性値	66
3.2.2	バンドギャップ制御	68
3.3	半導体ウェーハ製造技術	70
3.3.1	CZ法による単結晶シリコン育成	70
3.3.2	FZ法による単結晶シリコン育成	72
3.3.3	化合物半導体単結晶育成	73
3.3.4	ウェーハ加工	75
3.3.5	エピタキシャル成長	77
3.3.6	MBE法/MOCVD法	78
3.3.7	ウェーハ貼合せ	79
3.3.8	デバイスプロセス用材料	80

## 4. 誘電/絶縁材料

4.1	誘電材料の基礎	83
4.1.1	誘電材料の巨視的性質	83
4.1.2	誘電分極	85
4.1.3	誘電分散と誘電吸収	90
4.1.4	誘電損	91
4.1.5	圧電性と焦電性	92
4.2	絶縁材料の基礎	93
4.2.1	絶縁材料の導電現象	93
4.2.2	気体の絶縁破壊機構	96
4.2.3	固体の絶縁破壊機構	100
4.2.4	液体の絶縁破壊機構	103
4.2.5	絶縁破壊に伴う劣化	104
4.3	各種の誘電/絶縁材料	109
4.3.1	誘電/絶縁材料に求められる性能	109
4.3.2	コンデンサ用材料	110
4.3.3	圧電・焦電材料	111
4.3.4	気体絶縁材料	112
4.3.5	液体絶縁材料	114

4.3.6	天然の固体絶縁材料	116
4.3.7	熱可塑性樹脂	117
4.3.8	熱硬化性樹脂	120
4.3.9	合成ゴム	121

## 5. 磁気材料

5.1	磁気材料の基礎	124
5.1.1	磁気材料の巨視的性質	124
5.1.2	磁性の根源	125
5.1.3	原子の磁気モーメント	126
5.1.4	磁性体の種類	127
5.1.5	磁区と磁化	130
5.1.6	強磁性体の磁化特性	135
5.2	各種の磁気材料	140
5.2.1	高透磁率材料	140
5.2.2	永久磁石材料	147
5.2.3	その他の磁気材料	154

## 6. 発電/蓄電用材料

6.1	太陽電池用材料	160
6.1.1	太陽電池の構造	160
6.1.2	太陽電池の動作原理	161
6.1.3	各種の太陽電池	164
6.1.4	太陽光スペクトルと太陽電池の変換効率	166
6.2	燃料電池用材料	167
6.2.1	燃料電池の動作原理	167
6.2.2	各種の燃料電池	168
6.2.3	燃料電池の用途	172
6.3	蓄電用材料	172

6.3.1	蓄電池の分類	172
6.3.2	蓄電池の動作原理	173
6.3.3	電気二重層キャパシタ	177
6.3.4	蓄電装置の比較	178
付	録	181
参	考	
文	献	183
索	引	184

## 1.1 原子構造と結合

### 1.1.1 材料の分類

人類が用いる材料はさまざまな方法で分類できる。分類法の例を表 1.1 に示す。原子配列により、単結晶、多結晶およびアモルファス（非晶質）に分類できる（1.2.5 項参照）。さらに、結晶を構成する原子/分子間の結合方式により、共有結合、イオン結合、金属結合、水素結合などに分類できる（1.1.5 項参照）。

表 1.1 材料の分類法の例

分類法	分類結果
原子配列	単結晶、多結晶、アモルファス（非晶質）
結合方式	共有結合、イオン結合、金属結合、水素結合
物質相	固相、液相、気相、超臨界状態、プラズマ状態
構成物質	無機物、有機物、複合物質、高分子
機能	構造材料、電気電子材料、磁気材料、光学材料
電磁的性質	導電体、半導体、絶縁体/誘電体、磁性体

物質は、存在する環境の温度や圧力によって状態が異なる。この状態により、固体、液体、気体および超臨界状態、プラズマ状態などに分類できる（1.1.8 項参照）。固体、液体および気体の状態（物質相）は、それぞれ**固相**、**液相**および**気相**と呼ばれる。さらに、構成物質によって、無機物、有機物およびそれらの複合物質、高分子に分類できる（1.1.7 項参照）。

材料の機能に注目すると、構造材料、電気電子材料、磁気材料、光学材料な



## 2 1. 電気電子材料の基礎

どに分類できる。さらに、電磁氣的性質に着目すると、導電体、半導体、絶縁体/誘電体および磁性体に分類できる。2章以降では、この電磁氣的性質による分類に従って解説する。

現在、人類は、エネルギー供給体制の一大変換に迫られている。その際の最重要課題となる発電/蓄電用材料に関しては、6章で解説する。

### 1.1.2 原子構造

**原子**は、プラスの電荷を持った原子核と、同数のマイナスの電荷を持った電子で構成されている。図 1.1 に、原子構造の例として、酸素原子の模式図を示す。プラスの電荷は原子の中心に集中し原子核を形成する。**原子核**は、プラスの電荷を持った粒子である**陽子**（**プロトン**）と、電氣的に中性な**中性子**（**ニュートロン**）で構成されている。電子は原子核の周りに分散して存在し、その軌道は殻構造を形成する。実際の原子の構造はこれほど単純ではないが、原子構造を直感的に考える場合には役に立つことが多い。

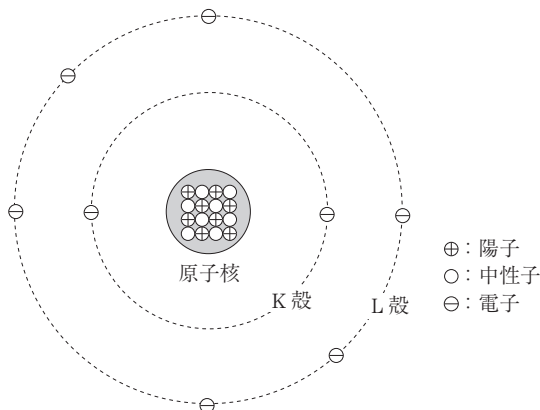


図 1.1 原子構造の例  
(酸素原子)

われわれの世界には**同位体**（**アイソトープ**）と呼ばれる、陽子の数が同じで中性子の数が数個異なる原子が存在する。原子のおもな性質は陽子の数で決まるため、このグループをまとめて**元素**と呼ぶ。したがって、同位体は、同じ元素のグループに属する異なる原子であると言い換えることができる。

### 1.1.3 原子内電子の殻構造

電子の軌道は内側から、K殻 ( $n=1$ ), L殻 ( $n=2$ ), M殻 ( $n=3$ ), N殻 ( $n=4$ ), …となり, それぞれの殻に入ることのできる電子の個数  $N$  には以下の制限がある。

$$N=2n^2 \quad (1.1)$$

ここで,  $n$  は**主量子数**と呼ばれる。

電子の軌道は, さらに, 方位量子数  $l$ , 磁気量子数  $m$  およびスピン量子数  $s$  で規定される。**方位量子数**  $l$  は, 電子の角運動を定め, 0 から  $n-1$  までの値を取り得る。このとき,  $l=0, 1, 2, 3, 4, \dots$  に相当する軌道をそれぞれ s, p, d, f, g, …で表す。量子力学的な計算から求まる s 軌道と p 軌道を, 図 1.2 に模式的に示す。量子力学では, 実際の電子の分布は確率で表されるため, 図に示した軌道は雲のようなものである。そのため, 電子の軌道は**電子雲**と呼ばれる。

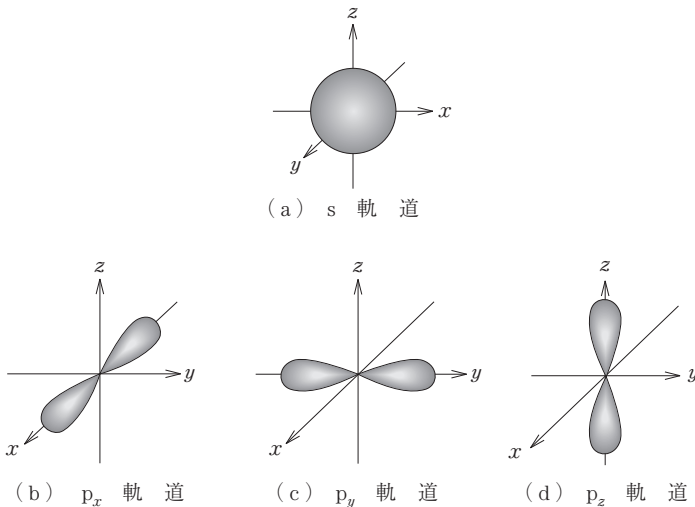


図 1.2 s 軌道と p 軌道

**磁気量子数**  $m$  は, 外部磁界に対して軌道面のなす角を定め, 0 から  $\pm l$  までの値を取り得る。**スピン量子数**  $s$  は, 電子の持つ磁気モーメントが軌道による

表 1.2 電子軌道（殻構造）と電子配列

周 期	原 子 番 号	殻 名	K	L	M			N				
		主量子数 ( $n$ )	1	2		3			4			
		方位量子数 ( $l$ )	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3
		エネルギー準位名	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f
		電子数	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14
		殻内総電子数 ( $2n^2$ )	2	8		18			32			
1	1	水 素	H	1								
	2	ヘリウム	He	2								
2	3	リチウム	Li	2	1							
	4	ベリリウム	Be	2	2							
	5	ホウ素	B	2	2	1						
	6	炭 素	C	2	2	2						
	7	窒 素	N	2	2	3						
	8	酸 素	O	2	2	4						
	9	フッ素	F	2	2	5						
	10	ネオン	Ne	2	2	6						
3	11	ナトリウム	Na	2	2	6	1					
	12	マグネシウム	Mg	2	2	6	2					
	13	アルミニウム	Al	2	2	6	2	1				
	14	シリコン (ケイ素)	Si	2	2	6	2	2				
	15	リ ン	P	2	2	6	2	3				
	16	硫 黄	S	2	2	6	2	4				
	17	塩 素	Cl	2	2	6	2	5				
	18	アルゴン	Ar	2	2	6	2	6				
4	19	カリウム	K	2	2	6	2	6	1			
	20	カルシウム	Ca	2	2	6	2	6	2			
	21	スカンジウム	Sc	2	2	6	2	6	1	2		
	22	チタン	Ti	2	2	6	2	6	2	2		
	23	バナジウム	V	2	2	6	2	6	3	2		
	24	クロム	Cr	2	2	6	2	6	4	2		
	25	マンガン	Mn	2	2	6	2	6	5	2		
	26	鉄	Fe	2	2	6	2	6	6	2		
	27	コバルト	Co	2	2	6	2	6	7	2		
	28	ニッケル	Ni	2	2	6	2	6	8	2		
	29	銅	Cu	2	2	6	2	6	9	2		
	30	亜 鉛	Zn	2	2	6	2	6	10	2		
	31	ガリウム	Ga	2	2	6	2	6	10	2	1	
	32	ゲルマニウム	Ge	2	2	6	2	6	10	2	2	
	33	ヒ 素	As	2	2	6	2	6	10	2	3	
	34	セレン	Se	2	2	6	2	6	10	2	4	
	35	臭 素	Br	2	2	6	2	6	10	2	5	
	36	クリプトン	Kr	2	2	6	2	6	10	2	6	

磁気モーメントと同方向であるか否かを示し、 $+1/2$ と $-1/2$ の値を取り得る(5.1.3項参照)。結果として、各電子軌道に入ることのできる電子の個数は、式(1.1)で計算できる。

電子は、同一のエネルギー状態には1個の電子しか存在できないというパウリの排他律に従い、エネルギーが低い状態から埋まっていく(エネルギーが低いほど安定)。その結果、36番元素のクリプトン(Kr)までは、表1.2に示す電子軌道(殻構造)に電子が存在する。電子のエネルギーは、方位量子数や磁気量子数によっても変化するため、単純に内側の殻から電子が埋まらず、電子が配列する軌道の入れ替わりが発生する。最初にそれが現れるのが、3d軌道と4s軌道である。そのため19番元素のカリウム(K)では、3d軌道ではなく、4s軌道に電子が存在する。

### 1.1.4 元素の周期表

元素の化学的な性質は、おもに最外殻の電子(これらを**価電子**と呼ぶ)の数で決まる。図1.3は、原子番号と価電子数の関係を示す。なお、最外殻が電子で満たされた状態の価電子数はゼロとしている。この図から、価電子数が周

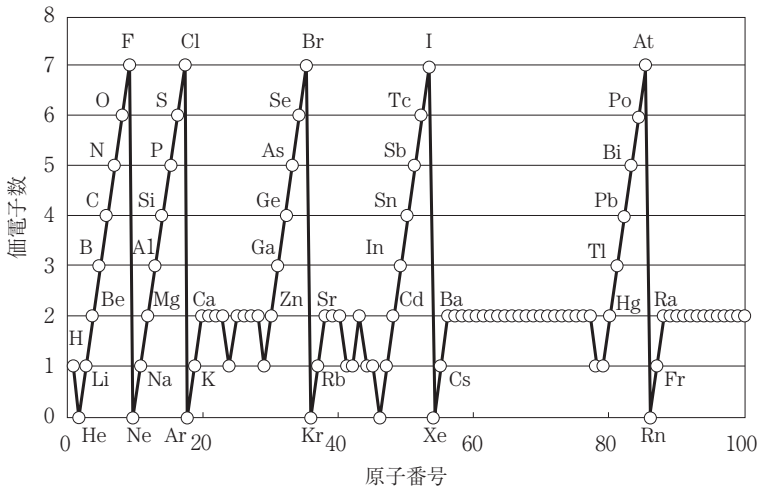


図1.3 原子番号と価電子数の関係

期的に変化する様子が見てとれる。その結果、元素を原子番号の順に並べると、似た性質のものが周期的に現れる。それを表にまとめたものが元素の**周期表**である。原子番号は原子核を構成する陽子の数に等しい。

表 1.3 に、現在おもに用いられている**長周期型周期表**を示す（詳しくは巻末の**付表 1**に掲載）。元素を原子番号順に並べると、18 元素を周期に性質の似た元素が並ぶ。1 族および 2 族と 13～18 族は**典型元素**，3～11 族は**遷移元素**と呼ばれる。遷移元素では、原子番号の増加によって変化するのはおもに d 軌道あるいは f 軌道の電子である。12 族は、典型元素に分類される場合と遷移元素に分類される場合がある。

表 1.3 長周期型周期表

族 \ 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	H																		He
2	Li	Be											B	C	N	O	F		Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I		Xe
6	Cs	Ba	ララン ノイド	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At		Rn
7	Fr	Ra																	

アルカリ土類金属    バナジウム族    鉄族    ホウ素族    ハロゲン  
 希土類    マンガン族    銅族    窒素族

アルカリ金属    チタン族    クロム族    白金族    亜鉛族    炭素族    酸素族    希ガス

1 族のリチウム (Li) からフランシウム (Fr) までは、最外殻には s 軌道に 1 個の電子が存在しており、**アルカリ金属**と呼ばれる。2 族のベリリウム (Be) からラジウム (Ra) までは、最外殻には s 軌道に 2 個の電子が存在しており、**アルカリ土類金属**と呼ばれる。

3 族のスカンジウム (Sc)、イットリウム (Y) とランタン (La) からルテチウム (Lu) までのランタノイドは**希土類**と呼ばれる。4 族は**チタン族**，5 族は**バナジウム族**，6 族は**クロム族**，7 族は**マンガン族**と呼ばれる。4 周期 8 族の鉄

(Fe), 9族のコバルト (Co) および 10族のニッケル (Ni) は**鉄族**と呼ばれる。5周期8族のルテニウム (Ru), 9族のロジウム (Rh) および 10族のパラジウム (Pd), 6周期8族のオスミウム (Os), 9族のイリジウム (Ir) および 10族の白金 (Pt) は**白金族**と呼ばれる。11族の銅 (Cu), 銀 (Ag) および金 (Au) は**銅族**と呼ばれる。

12族の亜鉛 (Zn), カドミウム (Cd) および水銀 (Hg) は, 最外殻には s 軌道に 2 個の電子が存在しており, **亜鉛族**と呼ばれる。

13族のホウ素 (B) からテルル (Tl) までは, 最外殻には s 軌道に 2 個, p 軌道に 1 個の計 3 個の電子が存在しており, **ホウ素族**と呼ばれる。14族の炭素 (C) からパラジウム (Pd) までは, 最外殻には s 軌道に 2 個, p 軌道に 2 個の計 4 個の電子が存在しており, **炭素族**と呼ばれる。15族の窒素 (N) からビスマス (Bi) までは, 最外殻には s 軌道に 2 個, p 軌道に 3 個の計 5 個の電子が存在しており, **窒素族**と呼ばれる。16族の酸素 (O) からポロニウム (Po) までは, 最外殻には s 軌道に 2 個, p 軌道に 4 個の計 6 個の電子が存在しており, **酸素族**と呼ばれる。17族のフッ素 (F) からアスタチン (At) までは, 最外殻には s 軌道に 2 個, p 軌道に 5 個の計 7 個の電子が存在しており, **ハロゲン**と呼ばれる。18族のヘリウム (He) からラドン (Rn) までは, 最外殻には s 軌道に 2 個, p 軌道に 6 個の計 8 個の電子が存在しており, **希ガス**と呼ばれる。

**表 1.4** は, 数十年前におもに用いられていた**短周期型周期表**である<sup>†</sup>。この周期表では, 族の番号はローマ数字で表される。I ~ VII 族の a は典型元素, b は遷移元素を示す。この周期表では, 亜鉛族は遷移元素として表されている。元素の族名には, 現在でもこの短周期型周期表の族名が使用されている。アルカリ金属は I 族元素, アルカリ土類金属および亜鉛族は II 族元素, ホウ素族は III 族元素, 炭素族は IV 族元素, 窒素族は V 族元素, 酸素族は VI 族元素, そしてハロゲンは VII 族元素と呼ばれる。なお, 長周期型周期表に従い, ホウ素族を 13 族, 炭素族を 14 族, 窒素族を 15 族, 酸素族を 16 族, ハロゲンを 17 族,

<sup>†</sup> 現在では, 1989 年に国際純正・応用化学連合 (IUPAC) により示された長周期型周期表 (表 1.3, 巻末の付表 1) が広く用いられている。

表 1.4 短周期型周期表

族 周期	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII	0	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b			
1	H															He	
2	Li		Be		B		C		N		O		F			Ne	
3	Na		Mg		Al		Si		P		S		Cl			Ar	
4	K		Ca			Sc		Ti		V		Cr		Mn	Fe	Co	Ni
		Cu		Zn	Ga		Ge		As		Se		Br				Kr
5	Rb		Sr			Y		Zr		Nb		Mo		Tc	Ru	Rh	Pd
		Ag		Cd	In		Sn		Sb		Te		I				Xe
6	Cs		Ba		ランタノイド			Hf		Ta		W		Re	Os	Ir	Pt
		Au		Hg	Tl		Pb		Bi		Po		At				Rn
7	Fr		Ra		アクチノイド												

希ガスを 18 族と呼ぶ場合もある。

### 1.1.5 原子/分子間の結合

原子/分子間の結合の種類と特徴を表 1.5 に示す。一般に、結晶を構成する原子間の距離が小さいほど、原子/分子間の結合エネルギーは大きくなる。原子間の距離は原子の結合半径が小さいほど小さい。

表 1.5 原子/分子間の結合の種類と特徴

種類	結合エネルギー (大きい順)	特徴	例
共有結合 結晶	1	硬い、化学的に安定、低温で 導電率が小さい	ダイヤモンド、シリコン、 ゲルマニウム、SiC
イオン結合 結晶	2	赤外領域に特性吸収、低温で 導電率が小さい	NaCl などの I - VII 族化合物、 MgO、CaO のような酸化物
金属結合 結晶	3	導電率・熱伝導率が大きい、 塑性を示す、容易に合金化	鉄や銅のような各種金属、 各種合金
水素結合を 持つ結晶	4	重合しやすい	氷、結晶水を含む化合物
分子結晶	5	柔らかい、融点・沸点が低い	酸素、窒素、アルゴン、メ タン、アンモニア

# 索引

<b>【あ】</b>		<b>【え】</b>		化合物半導体	54
アイソトープ	2	永久双極子	87	化合物半導体系太陽電池	165
亜鉛族	7	液 晶	14	ガスドープ法	73
悪性 PRIDE	58	液 相	1	カソードルミネセンス	63
圧電効果	92	エサキダイオード	82	価電子	5
圧電体	93	エナメル線	42	カラー	29
アモノサーマル法	75	エネファーム	172	荷 量	29
アモルファス	24	エネギーバンド	19	カルコバイライト系太陽電池	166
アモルファスシリコン	165	エピタキシャルウェーハ	77	カルコバイライト系半導体	166
アルカリ金属	6	エレクトロルミネセンス	63	換算電界	94
アルカリ土類金属	6	延 性	9	間接遷移型	64
アルメル	47	<b>【お】</b>		完全反磁性	130
アルメル-クロメル熱電対	47	屋外用架橋ポリエチレン絶縁電線	43	管路気中送電線	46
		屋外用ビニル絶縁電線	43	緩和形分散	90
		屋外用ポリエチレン絶縁電線	43	<b>【き】</b>	
<b>【い】</b>		オームの法則	31	希ガス	7
イオン結合	9	<b>【か】</b>		幾何容量	84
イオン結晶	94	外因性積層欠陥	22	気 相	1
イオン交換膜	168	外因性点欠陥	21	軌道磁気モーメント	127
イオン分極	88	がいし	40	希土類	6
一次電池	172	開放電圧	162	気泡破壊理論	103
移動度	31	界 面	22, 59	基本並進ベクトル	15
異方性磁石	152	界面分極	89	逆効果	92
イレブナイン	70, 165	化学的汚染	59	キャパシタ	110
インゴット	71	化学ルミネセンス	63	キャリヤ	20
インバータサージ	123	可逆磁化率	137	キュニコ	150
		架空電線	119	キュニフェ	150
<b>【う】</b>		架空電車線	40	キュリー温度	128
ウィークボゾン	29	核磁気共鳴画像法	50	キュリーの法則	129
ウェーハ	75	カー効果	155	強磁性体	128
渦電流損	138	加工硬化	35	共晶体	37
埋込み拡散エピタキシャルウェーハ	78			共晶点	37
ウルツ鉛鋳構造	57			共振形分散	90



鏡面加工	76	銅心耐熱アルミ合金より線	41	磁気ひずみ	133
共有結合	9			磁気ひずみ定数	133
強誘電体	87	高透磁率材料	140	磁気浮上現象	38
許容帯	19	高分子	13	磁気浮上式鉄道	50
キルビー特許	82	高密度ポリエチレン	119	磁気モーメント	124, 125
禁制帯	19	硬ろう	48	磁気量子数	3
金属結合	9	固相	1	磁区	130
金属リチウム電池	175	固体高分子型燃料電池	169	シース	44
		固体酸化物型燃料電池	171	磁性	125
		コバルトクロム鋼	148	磁束密度	124
【く】		コバルトフェライト	151	質量	29
空間電荷分極	89	固溶体	36	自発磁化	128
空気極	168	コンスタンタン	47	自発分極	86
空孔	20			磁壁	133
クーバーペア	39			磁壁エネルギー	134
グルーオン	28	【さ】		弱荷	29
クロム鋼	148	サイズ効果	103	周期表	6
クロム族	6	最大エネルギー積	147	集合電子破壊	101
クロメル	47	材料の誘電率	84	自由電子	20
クーロンの法則	29	サージ電圧	123	重量エネルギー密度	178
【け】		鎖状高分子	117	重力	29, 52
ゲージ粒子	28	サマコバ磁石	153	重力子	29
結合力	9	酸化物半導体	55	主鎖	13
結晶欠陥	20	三重点	14	主量子数	3
結晶面の方向	18	酸素族	7	シュレディンガーの	
欠損	22	残留磁化	136	波動方程式	63
ゲッターリング	58	残留抵抗	38	昇華	74
原子核	2	【し】		昇華法	74
原子分極	88	磁化	124, 125	常磁性	128
元素	2	磁荷	29, 126	焦電効果	93
元素半導体	54	紫外線劣化	106	焦電性	93
【こ】		磁界の強さ	124	常誘電体	87
高圧架空送電線	40	磁化曲線	135	初期磁化曲線	137
高圧法	119	磁化困難方向	132	触媒	168
高温超伝導物質	51	磁化容易方向	132	ショットキー接触	58
高温プラズマ	14	磁化率	124	シリコン系太陽電池	165
光子	28	磁気異方性	132	自立基板	75
格子	14	磁気異方性エネルギー	132	シリンドラ炉	77
格子間原子	21	磁気異方性定数	132	真空の誘電率	84
格子定数	15, 56	色荷	29	真性キャリア密度	68
銅心アルミより線	41	磁気記録	156	真性破壊	101
		磁気光学効果	155	真電荷	86
		色素増感型太陽電池	164		

【す】	【そ】	【ち】
水素結合 10	増感色素 164	蓄電池用材料 180
水素脆性 34	双極子分極 88	チタン酸ジルコン酸鉛 111
ストリーション 78	双極子モーメント 86	チタン族 6
スピネルフェライト 146	相 図 13, 36	窒素族 7
スピン磁気モーメント 126	相転移 52	中性子 2
スピン量子数 3	束縛電荷 86	中性子照射法 73
スペクトル密度 166	塑性変形 34	鑄造磁石 149
スマートカット法 80	ソーラーグレード 165	中・低圧法 119
スライシング 75	ソリッド抵抗 48	超格子 60
スレータ・ポーリング曲線 140		長周期型周期表 6, 181
	【た】	超伝導 38
	第一種超伝導体 40	超伝導電磁石 50
	帯・準位間発光 63	超伝導量子干渉計 50
	体心格子 15	超流動 40
	体積エネルギー密度 178	超臨界アンモニア 14, 75
	体積欠陥 20, 22	超臨界状態 75
	第二種超伝導体 40	超臨界水 14
	ダイヤモンド構造 56	超臨界二酸化炭素 14
	太陽電池 160	超臨界流体 14
	太陽電池パネル 160	直接遷移型 64
	太陽電池用材料 180	
	多結晶 23	【つ】
	多結晶シリコン 70, 165	ツェナー破壊 101
	ダッシュネッキング 71	強い力 28, 52
	種結晶 71	
	タンゲステン 46	【て】
	タンゲステン鋼 148	低温プラズマ 14
	単結晶 23	抵抗材料 46
	単結晶シリコン 70, 165	抵抗率 31
	短周期型周期表 7	底心格子 15
	単純格子 15	定置型発電 172
	弾性変形 34	低密度ポリエチレン 119
	単 線 40	テクスチャー構造 161
	炭素鋼 148	鉄-コンスタンタン熱電対 47
	炭素族 7	鉄 族 7
	炭素抵抗 48	鉄 損 139
	炭素被膜抵抗 48	転 位 21, 59
	タンタル酸リチウム 111	電 荷 29
	タンデル 91	電界質 168
	タンデルタ 91	電界放出破壊 101
	短絡電流 161	
【せ】		
正 極 168		
正 孔 20		
正効果 92		
静磁エネルギー 131		
石英をつぼ 71		
析出物 23, 59		
積層欠陥 22		
積層セラミックコンデンサ 110		
絶縁耐力 96		
絶縁電線 43		
絶縁破壊 96		
絶縁破壊電圧 96		
絶縁破壊電界 67, 96		
絶縁破壊電界強度 96		
絶縁破壊の強さ 96		
絶縁劣化 104		
接点材料 46		
セパレータ 168		
ゼーバック係数 26		
ゼーバック効果 26		
せん亜鉛鋳構造 57		
繊維強化プラスチック 121		
遷移元素 6		
線欠陥 20, 21		
線膨張率 32		

電気感受率	84	内周刃	75	発光ダイオード	62
電気・機械的破壊	101	ナス電池	173	発光中心	58
電気双極子	85	ナトリウム硫黄電池	176	パッシェンの法則	99
電氣的負性気体	113	鉛蓄電池	175	ハードフェライト	152
電気トリマー	108	鉛フリーはんだ	48	バナジウム族	6
電気二重層キャパシタ	177	軟質磁性材料	140	パーマロイ	143, 154
電気分解反応	167	軟ろう	48	バルクハウゼン効果	135
典型元素	6			バルクハウゼンジャンプ	135
点欠陥	20	<b>【に】</b>		ハロゲン	7
電子移動度	66	ニオブ酸リチウム	111	反強磁性	129
電磁気力	28, 52	ニクロム	47	半合成紙	117
電子雲	3	二次電池	172	反磁性	130
電子的破壊	100	ニッカド電池	172	はんだ	48
電子雪崩	97	ニッケルカドミウム電池		パンタグラフ	41
電子雪崩破壊	101		173	バンドギャップ	20
電子分極	87	ニッケル水素電池	174	バンド端発光	63
電子飽和速度	67	ニュートロン	2	バンド伝導	95
展 性	9			万有引力の法則	29
電束密度	84	<b>【ね】</b>			
伝導キャリア	20	ネオジム磁石	153	<b>【ひ】</b>	
電力ケーブル	44	熱可塑性	117	ピエゾ効果	92
		熱可塑性樹脂	118	比磁化率	137
<b>【と】</b>		熱硬化性	120	ヒステリシス曲線	136
同位体	2	熱硬化性樹脂	120	ヒステリシス損	138
銅 - コンスタンタン熱電対		熱的破壊	100	ヒッグス粒子	29
	47	熱伝導度	67	比透磁率	124, 137
透磁率	124	熱劣化	105	火花開始電圧	99
銅 族	7	ネール温度	128	微分磁化率	137
銅 損	139	燃料極	168	比誘電率	84
導電性プラスチック	82	燃料電池	168	表 面	22, 59
導電率	31	燃料電池車	172		
ドーパント不純物	58	燃料電池用材料	180	<b>【ふ】</b>	
等方性磁石	152			ファンデルワールス結晶	10
透明電極	160	<b>【は】</b>		ファンデルワールス力	10
透明導電膜	49	配向分極	89	フィルファクター	160
トムソン係数	27	排 熱	172	フェライト	128, 146
トムソン効果	27	パウリの排他律	5	フェリ磁性体	128
トラッキング劣化	106	バーガーズベクトル	22	フェロ磁性体	128
トンネルダイオード	82	刃状転位	21	フォトダイオード	61
		裸硬鋼より線	41	フォトルミネセンス	63
<b>【な】</b>		裸電線	40	フォノン	64
内因性積層欠陥	22	白 金	168	負 極	168
内因性点欠陥	20	白金族	7	複合絶縁巻線	42

複素誘電率	85	ポリフッ化ビニリデン	111	誘電損	91
不純物ドーピング	20	ホール移動度	66	誘電損角	91
フックの法則	34	ホール効果	64	誘電体	87
物質相	1	ホール定数	66	誘電分極	86
物質粒子	28			誘電分散	90
沸 点	10				
物理的汚染	59				
部分放電	107	<b>【ま】</b>		<b>【よ】</b>	
部分放電劣化	107	マイスナー効果	38	陽 子	2
プラズマ	14	枚葉炉	77	熔融炭酸塩型燃料電池	171
ブラベ格子	15	巻 線	42	横巻線	42
ブル・フレンケル効果	95	マグネットワイヤ	42	より線	40
ブルーレイディスク	62	マルチワイヤソー	75	弱い力	28, 52
プロセス導入欠陥	58	マンガニン	46		
プロトン	2	マンガン族	6		
分極電荷	83			<b>【ら】</b>	
分極率	87	<b>【み】</b>		ライフタイム制御	58
分散関係	64	未結合手	24	ラゴンプロット	179
分子結晶	10	水トリー劣化	108	らせん転位	22
分子線エピタキシー法	78	ミニバッチ炉	77	ラッピング	75
		ミラー指数	18		
<b>【へ】</b>				<b>【り】</b>	
ベクトル	15	<b>【む】</b>		リチウムイオン電池	175
ベークライト	121	無機高分子	13	リッツ線	43
ヘテロ接合	60, 78	無機物	13	量子効率	167
ベルジャー炉	77			良性 PRIDE	58
ベルチェ係数	27	<b>【め】</b>		両面受光型	161
ベルチェ効果	26	面欠陥	20, 22	臨界圧力	14
偏析現象	72	面心格子	15	臨界温度	14, 38, 51
				臨界磁界	39
<b>【ほ】</b>		<b>【や】</b>		臨界電流密度	39
ポーア磁子	127	焼入れ	36	リン酸型燃料電池	170
ポイド	22, 107	焼なまし	36		
方位電子数	3	ヤング率	103	<b>【る】</b>	
放射線劣化	106			ルミネセンス	63
ホウ素族	7	<b>【ゆ】</b>		<b>【れ】</b>	
放 電	97	有機金属	79	レアアース	153, 182
飽和磁化	135	有機金属 CVD 法	79	レアメタル	49, 182
飽和磁束密度	146	誘起電気分極	86	レドックスフロー電池	177
保磁力	136	有機物	13		
ホモ接合	60	有機物系太陽電池	166	<b>【わ】</b>	
ポリッシング	76	融 点	10	ワイドギャップ半導体	68
		誘電吸収	90		
		誘電正接	91		

<b>【アラビア数字】</b>	FRP	121	OF ケーブル	45
180°磁壁	FZ 法	72	OW	43
2H 構造	<b>【G】</b>		<b>【P】</b>	
3C 構造	GaAs 系太陽電池	165	PAFC	168
600V ビニル絶縁電線	GIL	46	PEFC	168
90°磁壁	<b>【H】</b>		PET	120
<b>【ローマ数字】</b>	HDPE	119	pn 接合	58
II - VI 族化合物半導体	HVPE 法	75	POF ケーブル	46
55, 166	<b>【I】</b>		PRIDE	58
III - V 族化合物半導体	IGBT	53, 123	PVDF	111
54, 165	ITO	49	PZT	111
IV 族元素半導体	IV	44	<b>【S】</b>	
IV - IV 族化合物半導体	<b>【K】</b>		SF	22
<b>【A】</b>	KS 鋼	148	SOFC	169
ACSR	<b>【L】</b>		SOI ウェーハ	79
AM	LDPE	119	SOI 層	79
<b>【B】</b>	LEC 法	73	sp 混成軌道	11
BOX 層	<b>【M】</b>		sp <sup>2</sup> 混成軌道	11
<b>【C】</b>	MBE 装置	79	sp <sup>3</sup> 混成軌道	11, 55
CD	MBE 法	78	SQUID	50
CdTe/CdS 系太陽電池	MCFC	169	<b>【T】</b>	
CMP	MCZ 法	71	TACSR	41
COP	MOCVD 装置	79	<b>【V】</b>	
CVD 法	MOCVD 法	79	VVF	44
CV ケーブル	MOS 接合	58	VVF ケーブル	44
CZ 法	MRI	50	<b>【ギリシャ文字】</b>	
<b>【D】</b>	<b>【N】</b>		σ 結合	11
D-A ベア発光	NAS 電池	173, 176	π 結合	11
DVD	Na フラックス法	75		
<b>【E】</b>	NTD 法	73		
EDLC	<b>【O】</b>			
<b>【F】</b>	OC	43		
FC	OE	43		

— 著者略歴 —

**山本 秀和** (やまもと ひでかず)  
1979年 北海道大学工学部電気工学科  
卒業  
1984年 北海道大学大学院工学研究科  
博士後期課程修了  
(電気工学専攻)  
工学博士  
1984年 三菱電機株式会社勤務  
2010年 千葉工業大学教授  
現在に至る

**小田 昭紀** (おだ あきのり)  
1994年 秋田大学鉱山学部電気工学科  
卒業  
2001年 北海道大学大学院工学研究科  
博士後期課程修了  
(電子情報工学専攻)  
博士(工学)  
2001年 名古屋工業大学助手  
2007年 名古屋工業大学助教  
2011年 千葉工業大学准教授  
現在に至る

## 現代電気電子材料

Modern Electrical and Electronic Materials

© Hidekazu Yamamoto, Akinori Oda 2013

2013年9月13日 初版第1刷発行



検印省略

著者 山本 秀和  
小田 昭紀  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.  
Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00853-1 (新宅) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします