

基礎材料科学

工学博士 伊藤 公久
博士(工学) 平田 秋彦 [共著]
博士(工学) 山本 知之

コロナ社

まえがき

現在の科学文明は、さまざまな材料の開発と生産によって支えられている。理論的には飛躍的な性能が期待される工業製品も、実際には条件に見合う材料が存在しないために、実現できない場合が非常に多いのが現実である。材料科学は、実在する物質と向き合い、われわれの夢を実現するために不可欠な道具であり、必然的にさまざまな知識を要する総合学問でもある。しかし、材料科学の基礎とはなにかという問いかけは、初学者が材料科学という分野に既存科学の寄せ集めのような印象を抱いたときに発せられることが多い。この問いかけに答えるためには、まず材料科学がどのような学問であるかというアイデンティティーを明確にする必要があるだろう。

そこで本書では、材料科学を「マルチスケールにわたる物質の階層性を理解し、その特性を人々の生活に役立つもの（材料）に反映する学問」と定義することにした。

例えば、巨大なつり橋を構成している鉄鋼は、連続で均一なもののように見えるが、これを光学顕微鏡で見ると、多くの結晶から成り立っていることが観察できる。さらに電子顕微鏡を用いれば、一つの結晶では原子が規則正しく並んでいることも観察できる。現代科学は、すべての物質は原子からできているという認識を前提とした、原子論に立脚している。読者がこの観点に立ったとき、材料科学の基礎とは、1個の原子→原子の集合体である結晶→結晶の集合体としての材料、といったさまざまなスケール（マルチスケール）にわたって材料を理解するための知識体系であることが理解できるであろう。

本書では、原子サイズから宇宙のスケールまでの広い範囲にわたる物質の性質を理解するために、第1章：物質の構造（担当：平田）、第2章：材料熱力学、第3章：状態図と相転移、第4章：拡散現象（担当：伊藤）、第5章：材

料電子論（担当：山本）の全5章構成とした。章の番号は，その章の内容を理解するために必要な知識を通常の工学系のカリキュラムで履修する順に付けてあり，対象とするもののスケールの順ではないことにご注意いただきたい。

各章の最後には章末問題を設け，その略解を巻末に，詳解をコロナ社のWeb ページに掲載した[†]。本書の内容の理解と，実際の材料への応用方法の習得に活用していただきたい。

本書の執筆にあたっては，多くの方々のお世話になった。執筆者の一人である平田が学生時代からご指導を賜り，物理的なものを見方をご教示いただいた小山泰正先生（早稲田大学教授）に深く感謝申し上げます。また，弘津禎彦先生（大阪大学名誉教授）には非晶質構造や電子顕微鏡の基礎を平田にご教示いただいた。心より感謝の意を表する。

最後に，本書の執筆者全員に材料科学への数理物理的アプローチと問題意識の持ち方をご教示くださり，つねにわれわれを叱咤激励してくださった，故 北田韶彦先生（早稲田大学名誉教授）に心より御礼申し上げます。

2020年8月

執筆者代表 伊藤 公久

[†] 本書の書籍詳細ページ (<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339066524/>) を参照（コロナ社 Web ページから書名検索でもアクセス可能）

目 次

1. 物質の構造

1.1 結 晶 構 造	1
1.1.1 結晶の周期的構造	1
1.1.2 結 晶 点 群	3
1.1.3 ブラベー格子と晶系	5
1.1.4 空 間 群	8
1.1.5 代表的な結晶構造	10
1.2 回 折 結 晶 学	13
1.2.1 結晶構造の観測	13
1.2.2 実格子と逆格子	14
1.2.3 空間格子からの回折	16
1.2.4 単位胞中の原子配列からの回折	20
1.2.5 結晶の大きさの効果	24
1.3 材料組織と格子欠陥	27
1.3.1 結晶材料の組織	27
1.3.2 点 欠 陥	28
1.3.3 線 欠 陥	30
1.3.4 面 欠 陥	32
1.4 非結晶と準結晶	35
1.4.1 構造の乱れと非晶質	35
1.4.2 非晶質からの回折	37
1.4.3 非晶質の局所構造	41
1.4.4 準 結 晶	45
章 末 問 題	49

引用・参考文献	50
---------	----

2. 材料熱力学

2.1 熱力学の諸法則	51
2.1.1 系と熱平衡状態	51
2.1.2 熱力学第0法則と温度の存在定理	52
2.1.3 状態方程式	53
2.1.4 熱力学第1法則	54
2.1.5 エンタルピーと比熱	56
2.1.6 膨張と圧縮	58
2.1.7 熱力学第2法則	59
2.1.8 カルノーサイクルと熱力学温度	60
2.1.9 クラウジウスの不等式	63
2.1.10 エントロピーとその性質	64
2.1.11 熱力学第3法則	66
2.1.12 統計力学的エントロピー	66
2.2 熱力学関数	67
2.2.1 エンタルピー・エントロピーの計算	67
2.2.2 ヘルムホルツエネルギーとギブスエネルギー	68
2.2.3 自発的変化の方向と熱力学的安定性	69
2.2.4 ルジャンドル変換	70
2.2.5 部分モル量	72
2.2.6 化学ポテンシャル	73
2.2.7 物質の移動と化学ポテンシャル	75
2.3 溶液・固溶体の熱力学	75
2.3.1 気体の化学ポテンシャルとフガシティー	75
2.3.2 活量	76
2.3.3 溶液・固溶体の化学ポテンシャル	77
2.3.4 ラウールの法則とヘンリーの法則	78
2.3.5 理想溶液と正則溶液	79
2.3.6 実在溶液	80

2.4 化学平衡	81
2.4.1 化学反応式と反応熱	81
2.4.2 反応のギブスエネルギー変化	82
2.4.3 平衡定数	83
2.4.4 ル・シャトリエーブラウンの原理	84
2.5 界面・表面の熱力学	85
2.5.1 ギブスの区分界面	85
2.5.2 表面張力	86
2.5.3 ヤングの式	87
2.5.4 ラプラスの式	89
2.5.5 ギブスの吸着等温式	90
章末問題	91
引用・参考文献	92

3. 状態図と相転移

3.1 状態図の熱力学	93
3.1.1 相平衡の条件	93
3.1.2 ギブスの相律とデュエムの定理	94
3.1.3 相変態とクラペイロンの式	95
3.1.4 純物質の状態図	96
3.2 2成分系状態図	99
3.2.1 溶液・溶体のギブスエネルギー線図	99
3.2.2 全率固溶型状態図	102
3.2.3 てこの法則	102
3.2.4 共晶型状態図	103
3.2.5 包晶型状態図	105
3.2.6 偏晶型状態図	107
3.2.7 化合物を含む状態図	107
3.3 3成分系状態図	109
3.3.1 組成の求め方	109
3.3.2 等温断面図と液相面投影図	110

3.3.3	アルケマイド原理	111
3.3.4	冷却にともなう共存相の変化の経路	112
3.4	化学ポテンシャル状態図	113
3.4.1	エリングラム図	113
3.4.2	化学ポテンシャル状態図の作図法	116
3.5	相 転 移	117
3.5.1	1 次 相 転 移	117
3.5.2	高 次 相 転 移	119
3.5.3	スピノーダル分解	120
章 末 問 題		122
引用・参考文献		124

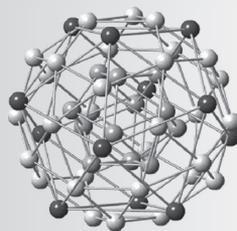
4. 拡散現象

4.1	フィックの法則	125
4.1.1	フィックの第1法則	126
4.1.2	フィックの第2法則	126
4.2	多成分系の拡散	129
4.2.1	カーケンドール効果	129
4.2.2	拡散係数の種類	130
4.2.3	ダーケンの式	133
4.2.4	多成分系における拡散方程式	135
4.2.5	上り坂拡散	136
4.3	固体内の拡散	139
4.3.1	拡散の物理モデル	139
4.3.2	拡散係数の温度依存性	140
章 末 問 題		142
引用・参考文献		142

5. 材料電子論

5.1 量子力学の導入	143
5.1.1 シュレーディンガー方程式 143	
5.1.2 井戸型ポテンシャル中の粒子 144	
5.2 原子軌道	147
5.2.1 原子軌道関数 147	
5.2.2 動径関数 149	
5.2.3 角関数 152	
5.2.4 原子内の電子占有 154	
5.2.5 多電子原子 156	
5.3 分子軌道	157
5.3.1 分子軌道法 157	
5.3.2 水素分子 158	
5.4 結晶中の電子	162
5.4.1 自由電子モデル 162	
5.4.2 状態密度 164	
5.5 具体的な物質の電子状態の見方	165
5.5.1 分子の電子状態の具体例 165	
5.5.2 結晶の電子状態の具体例 171	
章末問題	173
参考文献	174
付 録	175
章末問題の略解	182
索 引	185

1 物質の構造



材料の諸性質を理解するうえで、材料内部での構成原子の配列を知ることは重要である。多くの材料は原子が周期配列した結晶であり、結晶学による分類が可能であるが、一方で、周期性を持たない非晶質や結晶とは異なる秩序を持つ準結晶のような比較的新しい材料も存在する。本章では、これらの構造に関する記述法や測定法に関して概説する。

1.1 結晶構造

1.1.1 結晶の周期的構造

多くの材料の構造は、原子が周期的に配列した**結晶** (crystal) であることが知られている。ここで周期的という言葉は、ある結晶全体にわたり、構成するすべての原子の配列に対して繰り返し構造が保たれている状況を示している。結晶以外には非晶質や準結晶など、この意味での周期性を持たない物質があるが、これらについては1.4節で紹介する。結晶材料であっても、内部には多くの格子欠陥と呼ばれる不完全性が含まれるが(1.3節)、ここではそのようなものを含まない理想的な単結晶についてその対称性を論ずる。

結晶は周期構造であるため、ある**基本構造** (basis) が周期的に繰り返し配置された構造と捉えることができる。ここで空間格子という概念を導入すると、基本構造が持つ周期性を代表させることが可能である。言い換えれば、空間格子に対してつねに等価な位置に基本構造を置くことにより、**結晶構造** (crystal structure) が自動的に作られる。この様子を図1.1に示す。結晶の原子配列の対称性を詳しく調べる前に、結晶の枠組みである空間格子の対称性について調

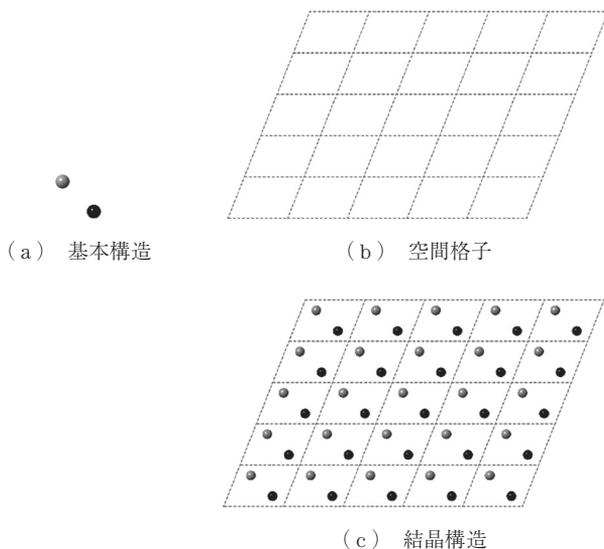


図 1.1 結晶構造の捉え方

べることは有用である。

空間格子は 3 次元の周期性を持ち、これを記述するには三つの基本周期ベクトル \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} を指定すればよい。ここで、 n_1 , n_2 , n_3 を整数として、これら三つの基本周期ベクトルを組み合わせることができるベクトルは

$$\mathbf{t}_n = n_1 \mathbf{a} + n_2 \mathbf{b} + n_3 \mathbf{c} \quad (1.1)$$

と表すことができ、基本並進ベクトルと呼ばれる。実際の結晶では n_1 , n_2 ,

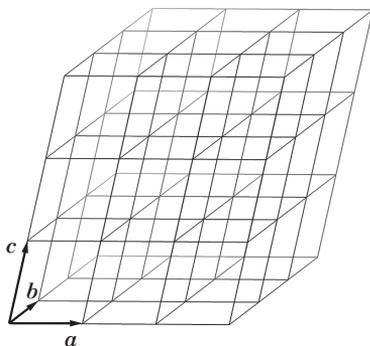


図 1.2 基本並進ベクトルにより作られる空間格子

n_3 の値は 10^8 程度と非常に大きいことに注意したい。図 1.2 に示すようにこの基本並進ベクトルは 3 次元の空間格子を形成する。

このような基本並進ベクトルで記述される平行移動によって、結晶が不変に保たれる対称性を**並進対称性** (translational symmetry) と呼ぶ。最低限この並進対称性があれば結晶であるといえるため、結晶を特徴づける最も重要な対称性といえることができる。

1.1.2 結 晶 点 群

これまで結晶自身を平行移動によって不変に保つ**対称操作** (symmetry operation) である並進操作について述べた。ここでは例えば、**回転対称性** (rotational symmetry) に関係した、ある軸に関して結晶を回転させ、それによって結晶を不変に保つような対称操作について考える。

結晶に限らず分子などがある一点のまわりで不変に保たれるような対称操作の集まりのことを**点群** (point group) と呼ぶ。点群の対称操作には、恒等操作 (E)、回転操作 (C_n)、反転操作 (I)、鏡映操作 (σ)、回反操作 (IC_n) などが含まれる。まず、恒等操作 (E) とはなにもしない操作のことである。回転操作 (C_n) とはある回転軸に関する角度 $2\pi/n$ の回転であり、その回転軸を n 回軸という。また、反転操作 (I) は原点 O (対称中心) に関して座標 x, y, z を $-x, -y, -z$ に変換する操作であり、鏡映操作 (σ) はある点を平面 (鏡映面) に関して対称な位置に移す操作である。そして、回反操作 (IC_n) は角度 $2\pi/n$ の回転後に反転操作を行うものである。ここで、括弧内に用いられた記号はシェーンフリース記号と呼ばれるものである。また、点群の対称操作を行ううえで基準となる点 (対称中心)、軸 (回転軸)、面 (鏡映面) などは**対称要素** (symmetry element) と呼ばれる。図 1.3 は面心立方構造 (1.1.5 項を参照) における 3 回回転操作であり、図 (a) での矢印の方向に 3 回軸がある。図 (b) は 3 回軸方向から見た図であるが、白、灰色、黒の原子はそれぞれ 3 回軸に垂直な同一平面内にあるもので、結晶全体が $120^\circ (=2\pi/3)$, $240^\circ (=4\pi/3)$ の回転操作で不変に保たれることが理解できる。図 1.4 は反転操作の

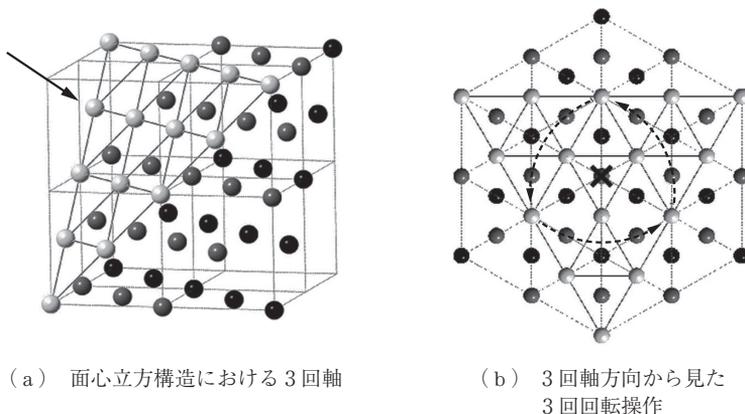


図1.3 回転操作 (C_3) の例

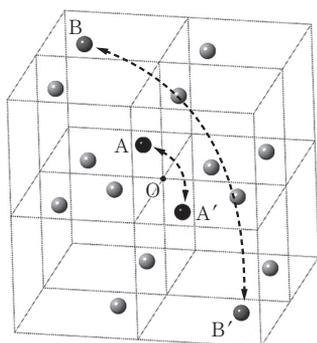


図1.4 反転操作 (I) の例

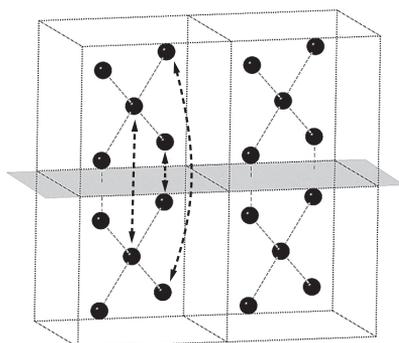
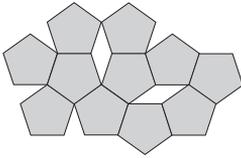


図1.5 鏡映操作 (σ) の例

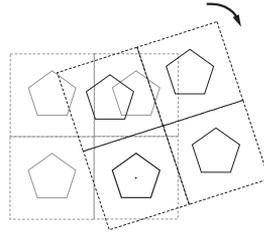
例であり、A および B で示される原子は対称中心である原点 O に対し、反転操作によって A' および B' に移される。これ以外の原子も同様であり、この結晶全体が反転操作によって不変に保たれている。また、図 1.5 に示すのは鏡映操作の例である。中央の灰色で示す鏡映面に対し上下の原子配列は鏡の関係になっており、この鏡映操作でやはり結晶全体が不変に保たれる。

孤立した分子の場合、結晶とは異なり周期構造を作る必要がないため、回転操作 C_n の n に関して制限はない。しかし、結晶の場合、並進対称性を両立させる必要があるため、 $n=1, 2, 3, 4, 6$ に限定される。つまり、分子では許さ

れる5回回転操作が結晶を不変に保つことは不可能であり、並進対称性を保ちながら5回軸を同時に持つことはできない。例えば、**図 1.6 (a)** に示すように、5回軸を保つよう五角形で格子を作ろうとしても、ただちに隙間ができてしまう。また、**図 (b)** のように、5回軸を持つ分子を格子状に配置して結晶を作ることができるが、空間格子は5回対称を持つことができないため、当然、結晶全体は5回回転操作によって不変に保たれない。7回軸以上についても同様である。



(a) 正五角形は平面に隙間なく敷き詰めることはできない例



(b) ユニットセルに正五角形を配置した結晶は5回対称を持たない例

図 1.6 5回回転操作が結晶を不変に保てない理由

結晶では上述した五つの回転操作 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_6 とそれらに続けて反転操作を行う回反操作 IC_1 , IC_2 , IC_3 , IC_4 , IC_6 が許される。ここで、 C_1 は恒等操作、 IC_1 は単なる反転操作である。また、 IC_2 は鏡映操作 σ に等しい。結晶で許される点群の独立な対称操作はけっきょく、 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_6 , IC_1 , σ , IC_3 , IC_4 , IC_6 の10個となり、国際記号を使うとこれらは 1 , 2 , 3 , 4 , 6 , $\bar{1}$, m , $\bar{3}$, $\bar{4}$, $\bar{6}$ と簡潔に表すことができる。結晶で許されるこれら10個の対称操作を組み合わせるにより合計32の点群が得られ、これを特に**結晶点群** (crystallographic point group) と呼ぶ。独立な分子ではこのような制限はないが、結晶では並進対称性を両立する必要があるため点群が32種類に限られる。

1.1.3 ブラベー格子と晶系

並進対称性のある結晶を記述する際に空間格子を考えると便利であることはすでに述べた。ここでは可能な空間格子を両立すべき点群の対称性を考慮する

索 引

【あ】	界面領域	85	基本構造
アインシュタインの式	化学拡散係数	130	逆格子
アルケマイド原理	化学的短距離秩序	36	既約表現
アルケマイド線	化学的無秩序	35	逆モンテカルロ法
安定平衡	化学量論係数	81	キャピラリ・リザー
	可 逆	60	バー法
	角関数	149	吸熱反応
【い】	拡 散	126	凝固潜熱
一電子近似	拡散係数	126	共晶温度
易動度	拡散対法	131	共晶型状態図
	拡散フラックス	126	共晶組織
	拡散方程式	127	共晶点
	カーケンドール効果	129	共晶反応
	重なり積分	159	共鳴積分
	ガス定数	54	共役線
	活性化エネルギー	141	共役な変数
	合致溶融化合物	107	キルヒホッフの法則
	活 量	76	均 一
	活量係数	77	禁制帯
	価電子帯	171	金 属
	ガラス転移	36	
	カラテオドリーの原理	60	【く】
	カルノーサイクル	60	空間群
	カルノーの原理	62	空 孔
	完全微分	55	駆動力
			クラウジウスの原理
	【き】		クラウジウスの不等式
	規則構造	11	クラベイロンの式
	希薄溶液	78	
	ギブスエネルギー	69	【け】
	ギブス-デュエムの式	74	系
	ギブスの吸着等温式	91	結合軌道
	ギブスの区分界面	85	結 晶
	ギブスの式	70	結晶構造
	ギブスの相律	94	結晶構造因子
【あ】			
永年行列式		160	
永年方程式		159	
エヴァルト球		19	
エヴァルトの作図		18	
液相線		102	
エネルギー固有値		144	
エネルギー単位		146	
エリンガム図		114	
エンタルピー		56	
エントロピー		65	
【お】			
黄金比		47	
【か】			
外 界		51	
外 殻		166	
回 折		16	
回転対称性		3	
開放系		51	
界 面		85	
界面過剰濃度		86	
界面活性成分		91	

結晶点群	5	示量性変数	73		
ケルビン	63	シンモルフィック空間群	8		
原子軌道関数	149			【て】	
原子散乱因子	21			てこの法則	102
現象論的方程式	135			デバイの散乱式	38
		【す】		デュエムの定理	94
【こ】		スピノーダル曲線	121	テルミット反応	115
格子欠陥	27	スピノーダル分解	120	電位-pH図	113
格子面間隔	14	スピン量子数	154	点群	3
構造因子	37			点欠陥	28
誤差関数	128	【せ】		伝導帯	171
固相線	102	正20面体	42		
固有拡散係数	130	生成エンタルピー変化	82	【と】	
孤立系	51	生成物	81	等圧変化	57
		正則溶液	79	等温圧縮率	58
【さ】		積層欠陥	33	動径関数	148
最高占有分子軌道	168	絶縁体	171	動径分布関数	37
最低非占有分子軌道	168	接触角	88	統計力学的エントロピー	66
三重点	96	全圧	76	等積変化	56
		線欠陥	30	トポロジー型の無秩序	35
		全率固溶型状態図	102	トムソンの原理	59
【し】				トレーサー	131
磁気モーメント	156	【そ】			
示強性変数	73	相	93	【な】	
磁気量子数	149	相互拡散係数	130	内殻	166
自己拡散係数	131	相転移	117	内部エネルギー	54
自由エネルギー	68	相平衡	93		
自由電子	162	相変態	95	【ね】	
自由電子モデル	162			熱機関	60
自由度	94	【た】		熱の仕事当量	56
縮退	152	対応粒界	34	熱平衡状態	51
主量子数	149	対称操作	3	熱力学因子	134
シュレーディンガー		対称要素	3	熱力学温度	54, 63
方程式	144	体心立方構造	10	熱力学温度目盛り	63
循環過程	56	体膨張率	58	熱力学第0法則	52
準結晶	45	ダーケンの式	135	熱力学第1法則	55
昇華曲線	96	多体問題	156	熱力学第2法則	59
晶系	7	多電子原子	156	熱力学第3法則	66
状態図	93	断熱過程	56	ネルンストの熱定理	66
状態方程式	53	断熱変化	58		
状態密度	164			【の】	
状態量	55	【ち】		上り坂拡散	137
蒸発曲線	96	超臨界流体	98	ノンシンモルフィック	
消滅則	23			空間群	9

【は】		ブラベ格子	6	【め】	
配位数	40	プレーン・ソース法	131	面欠陥	32
配位多面体	12	ブロッホ関数	164	面心立方構造	10
バイノーダル線	122	分 圧	75	【も】	
パウリの排他原理	154	分解溶融化合物	108	モル分率	74
バーガース・ベクトル	31	分子軌道	157	モンテカルロ法	42
刃状転位	30	分子軌道関数	157	【や】	
発熱反応	81	分子軌道法	157	ヤングの式	88
波動関数	144	分子動力学法	42	【ゆ】	
ハミルトニアン	144	フント則	156	融解曲線	96
反位相境界	33	【へ】		輸送係数	135
反結合軌道	162	平衡接触角	88	【よ】	
半導体	171	平衡定数	83	溶 質	77
バンドギャップ	171	閉鎖系	51	溶 媒	77
反応熱	81	並進対称性	3	【ら】	
反応の標準ギブスエネルギー変化	83	平面波	163	ラウエ関数	25
反応物	81	ヘスの法則	81	ラウールの法則	78
【ひ】		ヘルムホルツエネルギー	68	らせん転位	30
非晶質	35	偏晶型状態図	107	ラプラスの式	90
比 熱	57	ヘンリーの法則	78	【り】	
標準生成エンタルピー変化	82	ペンローズ格子	46	理想気体	54
表 面	85	【ほ】		理想溶液	79
表面張力	86	ポアソンの式	59	粒 界	34
ビリアル展開	54	方位量子数	149	量子数	146
頻度因子	141	包晶型状態図	105	量子力学	143
【ふ】		包晶点	105	臨界点	97
ファン・デル・ワールスの状態方程式	54	包晶点	105	【る】	
フィックの第1法則	126	母 液	131	ル・シャトリエーブラウンの原理	84
フィックの第2法則	127	母 相	85	ルジャンドル変換	71
フィボナッチ格子	47	ボルツマン-俣野の方法	132	【れ, ろ】	
フェルミエネルギー	164	ポロノイ多面体解析	43	連続冷却曲線	104
フェルミ準位	164	【ま】		六方最密充填構造	10
不可逆	60	マイヤーの関係式	57		
フガシティー	76	マーキュレス展開	80		
フガシティー係数	76	マックスウェルの関係式	72		
物質波	143	俣野界面	132		
ブラッグ条件	19	マランゴニ対流	91		
		【み】			
		ミラー指数	14		

	[B]	HOMO	168	σ 軌道	166
bcc 構造	10	HOMO-LUMO ギャップ	168		
		[L]		【数字】	
	[F]	LCAO 近似	158	1 次相転移	118
fcc 構造	10	LUMO	168	2 液相分離型状態図	107
	[H]	【ギリシャ文字】		2 成分系状態図	99
hcp 構造	10	π 軌道	167	2 体問題	156
				3 成分系状態図	109

— 著者略歴 —

伊藤 公久 (いとう きみひさ)

- 1978年 東京大学工学部金属工学科卒業
- 1980年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了 (金属工学専攻)
- 1983年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了 (金属工学専攻)
工学博士
- 1983年 東北大学助手
- ～91年
- 1986年 カーネギーメロン大学博士研究員
- ～88年
- 1991年 早稲田大学助教授
- 1996年 早稲田大学教授
現在に至る

平田 秋彦 (ひらた あきひこ)

- 1998年 早稲田大学理工学部材料工学科卒業
- 2000年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了 (材料工学専攻)
- 2003年 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了 (材料工学専攻)
博士 (工学)
- 2003年 大阪大学助手
- 2007年 大阪大学助教
- 2009年 東北大学助教
- 2012年 東北大学准教授
- 2018年 早稲田大学教授
現在に至る

山本 知之 (やまもと ともゆき)

- 1993年 早稲田大学理工学部材料工学科卒業
- 1995年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了 (材料工学専攻)
- 1998年 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了 (材料工学専攻)
博士 (工学)
- 1997年 早稲田大学助手
- 1999年 理化学研究所研究員
- 2002年 京都大学研究員
- 2005年 早稲田大学助教授
- 2007年 早稲田大学准教授
- 2010年 早稲田大学教授
現在に至る

基礎材料科学

Fundamentals of Materials Science

© Kimihisa Ito, Akihiko Hirata, Tomoyuki Yamamoto 2020

2020年10月2日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 伊藤 公久
平田 秋彦
山本 知之
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也
印刷所 新日本印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06652-4 C3043 Printed in Japan

(新井)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

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います。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いません。落丁・乱丁はお取替えいたします。