

機械材料およびその機械的性質と試験法

社団法人 日本材料学会

機械材料およびその機械的性質と試験法

¥ 2,500

1984

昭和59年4月1日 第5版発行

編 者 社 団 日 本 材 料 学 会
法 人

著者の了解
により
検印廃止

印 刷 者 京都市左京区山端川岸町40番地
進行印刷出版株式会社
中 川 肇

発 行 者 京都市左京区吉田泉殿町1番地の101
社団法人 日 本 材 料 学 会

序

日本材料学会は、材料学に関する研究の進歩をはかり、学術の発展および技術の向上に寄与することを目的としているが、その使命遂行の一つとして、「機械材料とその試験法」を刊行し、材料学に関する学生教育に多大の貢献をしてきている。

その後の材料学の著しい進歩にかんがみ、より一層有効な材料の選択、およびより合理的な設計のための基礎的知識を与えることを目的とし、さきに刊行した教科書の内容を検討するとともに、新しい構想のもとに「機械材料およびその機械的性質と試験法」を刊行することとした。

本書は、機械系学生用の教科書を目的として編集したものであるが、さらに一般自然科学系学生ならびに工業界における技術者の参考書としても有用であることを期している。

編集委員および執筆者一覧

編集委員長

遠藤吉郎 京都大学工学部

編集委員

大 路 清 嗣	大阪大学工学部	田 中 吉 之 助	京都大学工学部
駒井謙治郎	京都大学工学部	田 村 今 男	京都大学工学部

執 筆 者

足 立 正 雄	京都大学工学部	島 村 昭 二	機械技術研究所
伊 佐 重 輝	鉄鋼短期大学	城 野 政 弘	大阪大学工学部
遠 藤 吉 郎	京都大学工学部	田 中 吉 之 助	京都大学工学部
大 路 清 嗣	大阪大学工学部	田 村 今 男	京都大学工学部
大 谷 隆 一	京都大学工学部	西 原 正 夫	株式会社神戸製鋼所
大 矢 根 守 哉	京都大学工学部	福 迫 達 一	大阪大学工学部
小 倉 敬 二	大阪大学工学部	藤 井 太 一	大阪市立大学工学部
河 合 弘 迪	京都大学工学部	藤 田 利 夫	東京大学工学部
川 端 季 雄	京都大学工学部	藤 原 晴 夫	徳島大学工学部
鯉 淵 興 二	株式会社日立製作所	三 浦 精	京都大学工学部
小 寺 沢 良 一	大阪大学基礎工学部	三 谷 裕 康	大阪大学工学部
駒井謙治郎	京都大学工学部	村 上 陽 太 郎	京都大学工学部

目 次

I. 材 料 の 基 礎

1, 金属材料の構造

1.1 金属の結晶構造.....	1
a. 結晶格子における面と方向表示	
b. 金属の原子配列 (bcc, fcc, cph) c. ステレオ投影	
d. 結晶によるX線回折 e. 合金の構造	
1.2 結晶における欠陥.....	9
a. 点欠陥 b. 転位の定義 c. 転位の運動およびおもな性質	
d. 転位の増殖 e. 面欠陥, 結晶粒界	
1.3 す べ り.....	20
a. 転位運動によるすべり b. すべり面とすべり方向	
c. 単結晶におけるせん断応力 d. 単結晶の加工硬化	
1.4 双 晶 変 形.....	23
1.5 単結晶と多結晶.....	24

2. 塑 性

2.1 降 伏.....	27
2.2 ひずみ硬化とひずみ時効.....	28
a. ひずみ硬化 b. バウシニング効果 c. ひずみ時効	
2.3 温度とひずみ速度の影響.....	30
a. 温度の影響 b. ひずみ速度の影響 c. 組合せ効果	
2.4 塑性変形の力学的法則.....	32
a. 降伏条件 b. 塑性法則	

3. 破 壊

3.1 破壊の形態.....	36
3.2 破壊強さ.....	37

4. 相 律 と 状 態 図

4.1 相 律.....	39
--------------	----

2 目 次

4・2 凝固と変態	40
a. 核生成 b. 成長 c. 拡散	
4・3 平衡状態図	44
a. 全率固溶型 b. 共晶型 c. 包晶型 d. 状態図の例	
e. 鉄-炭素系状態図 f. 三元系状態図	

5. 熱 処 理 と 加 工

5・1 熱処理とその基礎	52
a. 焼なまし b. 過飽和固溶体からの析出と拡散変態 c. 時効硬化	
d. マルテンサイト変態	
5・2 加工と組織	54
a. 冷間加工 b. 回復と再結晶 c. 熱間加工	

6. 高分子材料の構造と性質

6・1 高分子固体構造	58
6・2 高分子の転移	58
a. ゴム状態からガラス状態へ b. ガラス状態での高分子固体の弾性	
c. ゴム状態での高分子固体の弾性 d. 高分子の粘弾性	
6・3 高分子の結晶	64
6・4 破 壊	65

Ⅱ. 材料の機械的性質と試験法

1. 引 張 性 質

1・1 試験の意義と試験法	67
1・2 応力-ひずみ線図	69
a. 公称応力-ひずみ線図 b. 真応力-ひずみ線図	
c. 試験片形状の影響	
1・3 圧縮, 曲げ, ねじり	73
a. 圧縮 b. 曲げ c. ねじり	
1・4 工業試験	78
a. 張出し性試験 b. 深絞り性試験 c. 曲げ加工性試験	

2. 硬 さ

2・1 試験の意義と試験法	80
---------------	----

2・2	ブリネル、マイヤー、ビッカース硬さ	80
	a. ブリネル硬さ b. マイヤー硬さ c. ビッカース硬さ	
2・3	ロックウェル硬さ	83
2・4	その他の硬さ	85
2・5	硬さと材料性質の関係	85

3. 衝撃強さ

3・1	試験の意義と試験法	87
3・2	衝撃吸収エネルギー	89
3・3	延性—ぜい性遷移温度	90

4. 破壊じん性

4・1	ぜい性（不安定）破壊発生条件	93
4・2	き裂先端近傍の特異応力場	94
	a. 線形破壊力学 b. 小規模降伏とき裂先端開口変位 (CTOD)	
	c. 弾塑性破壊力学と J 積分	
4・3	破壊じん性	98
	a. 平面ひずみ破壊じん性 (K_{IC}) 試験 b. CTOD 試験	
	c. J_{IC} 試験 d. 動的およびき裂伝ば阻止破壊じん性	

5. 疲 労

5・1	疲労試験と $S-N$ 線図	102
	a. 概説 b. 疲労試験機 c. $S-N$ 曲線, $P-S-N$ 曲線	
5・2	き裂の発生と進展	109
5・3	組合せ応力による疲労	111
	a. 疲労強度に及ぼす平均応力および組合せ応力の影響	
	b. 疲労き裂進展における平均応力（応力比）の影響	
5・4	切欠き効果と寸法効果	113
	a. 切欠き効果 b. 寸法効果	
5・5	実働荷重による疲労	116
5・6	塑性疲労と熱疲労	117
	a. 塑性疲労 b. 熱疲労	
5・7	高温疲労	121

6. ク リ ー プ

6・1	クリープ現象	123
-----	--------	-----

4 目 次

6・2 試 験 法	126
6・3 クリープ強さの求め方	126
6・4 切欠きおよび応力変動の影響	129

7. 環 境 強 度

7・1 腐食	132
a. 乾食 b. 湿食 c. 腐食の種類 d. 防食法	
7・2 応力腐食割れと水素ぜい化	139
a. 応力腐食割れ b. SCC き裂の進展速度	
7・3 腐 食 疲 勞	142
a. 腐食疲労におけるき裂の発生と進展	
b. 材料, 環境と腐食疲労強度 c. 応力状態と腐食疲労強度	
d. 腐食疲労き裂の進展速度特性 e. 腐食疲労による破壊の防止	

8. 摩 耗

8・1 試験の意義と試験法	147
8・2 摩耗機構と耐摩耗性	148
a. 接触面積 b. 凝着摩耗 c. アブレシブ摩耗 d. 腐食摩耗	
8・3 ころがり摩耗	153

9. フ ラ ク ト グ ラ フ ィ

9・1 概 説	156
9・2 巨視的破面の特徴	157
9・3 微視的破面における特徴的模様	158
a. 粒内破壊 b. 粒界破壊	
9・4 破面の定量解析	162
a. ストライエーション解析 b. ストレッチゾーン解析	

10. 非 破 壊 検 査

10・1 非破壊検査の意義と目的	164
10・2 放射線による非破壊検査	164
a. 放射線の種類とその性質 b. X線および γ 線の発生	
c. 放射線透過検査の原理 d. 放射線検査装置の種類と性能	
e. 放射線検査の欠陥検出性 f. X線による応力測定法	
10・3 超音波探傷法	169
a. 超音波とその性質 b. 超音波探傷法の原理	

c. 各種超音波探傷法とその特徴	d. 超音波探傷法の欠陥検出性	
10・4 その他の検査法		173
a. 磁粉探傷法	b. 浸透探傷法	c. アコースティック・エミッション

Ⅲ. 材 料 各 論

1. 鉄 鋼 材 料

1・1 製鉄・製鋼	176
a. 製鉄原料	b. 製鉄 c. 製鋼 d. 鑄造, 造塊
e. 鋼塊の加工	
1・2 不純物, 偏析, 非金属介在物および結晶粒度	179
a. 鋼中不純物	b. 非金属介在物 c. 快削鋼 d. 偏析
e. 欠陥	f. 結晶粒度
1・3 炭 素 鋼	184
a. 標準組織	b. 変態に及ぼす冷却速度の影響
c. パーライト変態	d. 鋼のマルテンサイト変態
e. 過冷オーステナイトの等温変態	
f. オーステナイトの連続冷却変態	g. 焼入硬化
h. 焼入変形と残留応力	i. 焼入鋼の焼もどし (調質)
j. 鋼の焼なまし	k. 軟鋼 (α 鉄) の性質
l. フェライト・パーライト鋼の性質	m. 焼入れ・焼もどし鋼の性質
・4 低 合 金 鋼	202
a. 合金成分の効果	b. 鋼の強じん性向上法 c. ぜい性
1・5 高 強 度 鋼	211
a. 高強度鋼の必要性	b. マルテンサイト鋼 c. 二次硬化鋼
d. オースフォーム鋼	e. マルエージ鋼
1・6 工 具 鋼	215
a. 工具鋼の組織と性質	b. 高速度工具鋼 c. 軸受鋼など
1・7 ステンレス鋼	221
a. 鋼の耐食性	b. フェライト系ステンレス鋼
c. オーステナイト系ステンレス鋼	
d. マルテンサイト系ステンレス鋼	e. 2相ステンレス鋼
1・8 耐 熱 鋼	225
a. 高温強度と耐酸化性	b. 耐熱鋼 c. 超合金
1・9 表面硬化	228

6 目 次

a. 表面硬化の効果	b. 浸炭	c. 窒化	d. 表面焼入れ	
e. その他				
1・10 鋳鉄・鋳鋼				238
a. 鋳造	b. 鋳鉄の組織	c. 鋳造欠陥	d. 鋳鉄の性質	
e. 各種の鋳鉄	f. 鋳鋼			

2. 非鉄金属材料

2・1	アルミニウムおよびアルミニウム合金	250
	a. アルミニウム b. アルミニウム合金	
2・2	銅および銅合金	255
	a. 銅 b. 銅合金	
2・3	チタニウムおよびチタニウム合金	259
	a. チタニウム b. チタニウム合金	
2・4	鋳造用合金	261
	a. 鋳造用合金の特性 b. 鋳造合金 c. 鋳造用合金の種類と用途	
2・5	軸受合金	264
2・6	ろう付合金	265

3. 高分子材料

3・1	熱可塑性プラスチック	268
3・2	熱硬化性プラスチック	269
3・3	諸特性とその試験法	273
	a. 力学的性質 b. 物理量 c. 強さ d. 耐熱試験その他	
3・4	時間—温度換算則	274
3・5	ゴ ム	275

4. 複合材料

4・1	複 合 則	276
	a. 弾性性質 b. 強度	
4・2	分散強化材	281
4・3	繊維強化材	282
	a. 繊維強化材の種類と構成 b. 静的強度	
4・4	はり合せ材	289
	a. はり合せ材の分類 b. 接着強度 c. サンドイッチ構造	
	d. ハイブリッド	

5. 焼結材料

5・1 粉末および粉末焼結法	292
5・2 超硬合金	293
5・3 軸受合金	294
5・4 その他	295
a. 焼結鉄鋼材料	
b. 焼結非鉄金属材料	

Ⅳ. 材料の用途別分類と試験規格

1. 試験関係の規格	298
2. 材料規格（付表）	306
索引	331

I 材料の基礎

1 金属材料の基礎

1.1 金属の結晶構造

a. 結晶格子における面と方向表示

(i) **結晶構造** 金属は結晶性である。すなわち原子が規則正しく周期的に空間に三次元的に配列する。これはX線の回折現象から証明できる。純金属のほとんどは簡単な結晶構造であるが、合金や非金属化合物はさらに複雑な構造をもっている。

結晶中の原子の配列は直線による三次元的網目を用いて表わされる。空間を同じ大きさの無数の平行六面体に分割し、これを空間格子 (space lattice) という。空間格子のおのの点を格子点と称し、任意の格子点の周囲の諸点に対する関係はすべての点について等しい。簡単な構造の空間格子ではすべての格子点に原子があるが、すべての原子が格子点にあるとは限らない。

空間格子のそれぞれの平行六面体の最小の単位を単位胞 (unit cell), あるいは単位格子 (unit lattice) と呼び、結晶は全く同等な単位胞を、三次元的に完全にくい違うことなく面と面とを合わせて積み重ねてできる。すなわち結晶の単位胞の大きさと形状は、図 I・1・1 に示すように、軸長 a , b , c と軸角 α , β , γ で決まる (軸長と軸角を格子パラメータという)。

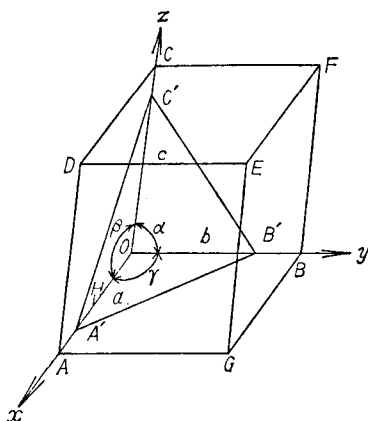


図 I・1・1 単位胞の面の表示

(ii) **平面の位置と方向の表示 (ミラー指数)** 格子の平面と方向を表わすのに単位胞と主軸 x , y , z を考える (図 I・1・1)。任意の平面 $A'B'C'$ は 3 主軸が切りとる切片 OA' , OB' , OC' で規定される。通常、これを表わすのにミラー指数 (Miller indices) すなわち各切片と、その切片が属する単位胞の各大きさ a , b , c の比の逆数を用いる。すると平面

2 I 材料の基礎

$A'B'C'$ は $(a/OA', b/OB', c/OC')$ で与えられるが、この比を保持したままで三つの最小の整数比に直す。たとえば OA, OB, OC の切片をもつ平面は $(a/OA, b/OB, c/OC)$, すなわち (111) 。同様に面 $DFBA$ は $(a/OA, b/OB, c/\infty)$, すなわち (110) 。また面 $DEGA$ は $(a/OA, b/\infty, c/\infty)$, すなわち (100) 。 $OH=OA/2$ の場合、面 HCB は $(a/OH, b/OB, c/OC)$, すなわち (211) である。面 ABC, ABE, CEA および CEB は、それぞれ $(111), (11\bar{1}), (\bar{1}11)$ および $(\bar{1}\bar{1}1)$ であり、これら同型の面群をまとめて $\{111\}$ とかく。指数の上の負号は面が原点 O の負側の軸上で交わることを表わす。図 I・1・2 に立方晶系格子の主要面とミラー指数を例示する。

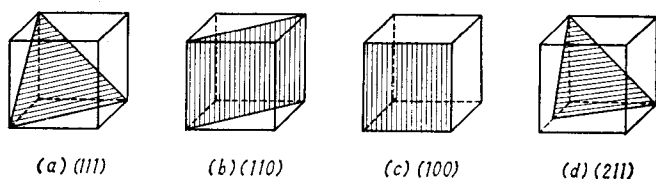


図 I・1・2 立方晶系格子の主要面のミラー指数

図 I・1・3 で、たとえば方向 PQ は原点 O を通り PQ に平行な直線 OE と等価である。 OE の 3 主軸方向の分値 OA, OB, OC を、単位胞の大きさ a, b, c でそれぞれ割った分数の比を最小の整数に直す。したがって方向 PQ は $(OA/a, OB/b, OC/c)$, すなわち (111) である。角括弧は方向を表わすのに使う。方向 CG, AF, DB と EO はそれぞれ $[11\bar{1}], [\bar{1}11], [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ と $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ であり、これら同型の方法群をまとめて $\langle 111 \rangle$ とかく。同様に方向 CE は $[CD/a, CF/b, 0/c]$ であるから $[110]$, また方向 AG は $[0/a, AG/b, 0/c]$ であるから $[010]$, さらに方向 GH は $[EJ/a, EI/b, GE/c]$ であるから $[\bar{1}\bar{1}2]$ である。

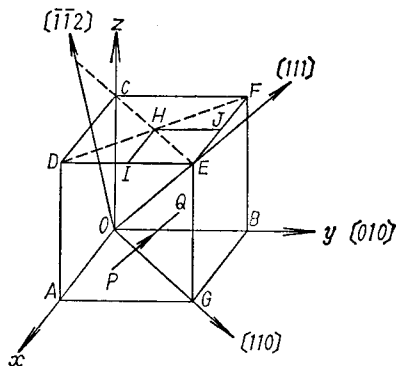


図 I・1・3 方向の表示 (立方晶)

(iii) 六方晶の面と方向の表示 (ミラー・ブラヴェ指数) 六方晶に対してもミラー指数を用い得るが、通常、ミラー・ブラヴェ指数 (Miller-Bravais indices) を使う。これは図 I・1・4 のように、さらに u 軸を加えて底面上で互いに 120° をとる 3 主軸と、これに直

角な主軸を用いる。それぞれの格子パラメータ a_1 , a_2 , a_3 および c について、ミラー指数と同じ操作で面の位置を決定する。面は $(hki\ell)$ として表わされ、 $i = -(h+k)$ の関係が生ずる。(0001) 面を底面と呼ぶ。

この方法による直線の方法はミラー指数の場合と同様に、格子パラメータを考えに入れて原点からそれぞれ主軸に対して平行に移動した距離の比で表わす。図 I・1・5 にミラー・ブラヴェ指数による方向表示の底面上での具体例を示す。

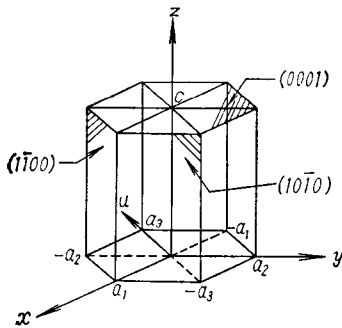


図 I・1・4 六方晶系結晶の主軸と主要面(ミラー・ブラヴェ指数)

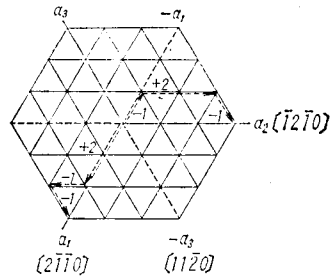


図 I・1・5 六方晶系におけるミラー・ブラヴェ指数による方向の表示例

b. 金属の原子配列 (bcc, fcc, cph)

大多数の金属は、体心立方格子 (body-centered cubic lattice, bcc), 面心立方格子 (face-centered cubic lattice, fcc) およびちゅう密六方格子 (close-packed hexagonal lattice, cph) など対称性の高い簡単な結晶構造をとる。これらの結晶構造は、それぞれ同等な原子配列の層をくい違えて積み重ねてつくることができる。しかし、それぞれの結晶格子に対し特有の積層順序 (stacking sequence) があるので、積層時の原子の占めるくい違い位置に応じて、それぞれ A, B, C...層と区別する必要がある。

ここでは原子を半径 r の剛球と考える。また紙面内にあると考える原子層より、上あるいは下の層の原子は理解しやすいように小円で示す。

(i) 体心立方格子 図 I・1・6(a) に示すように原子は単位胞の各かどと体心の位置にある。 $\langle 111 \rangle$ 方向は原子が接触して並ぶから、これをちゅう密方向という。格子パラメータは $a = 4r/\sqrt{3}$, $\langle 110 \rangle$ 方向の原子間隔は $\sqrt{2}a$ となる。最ちゅう密面 $\{110\}$ の積層順序は ABABAB...である。(110) 面についての積層の原子配列を図 I・1・6(a), (b) に示す。

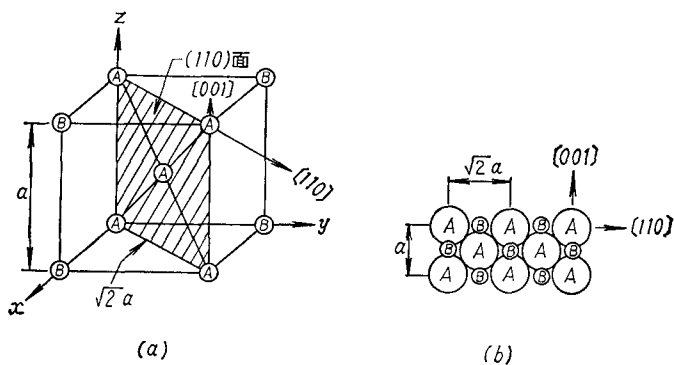


図 I・1・6 体心立方格子の原子配列
(a) (110) 面の原子配列
(b) (110) 面の積層順序と原子配列

(ii) 面心立方格子 図 I・1・7(a) に示すように原子は単位胞の各かどと 6 個の面心の位置にある。ちゅう密方向は $\langle 011 \rangle$, 格子パラメータは $a=2\sqrt{2}r$ である。最ちゅう密面 $\{111\}$ の積層順序は ABCABC... で, 結晶塑性理論で重要な積層順序である (図 I・1・7 (b), (c))。

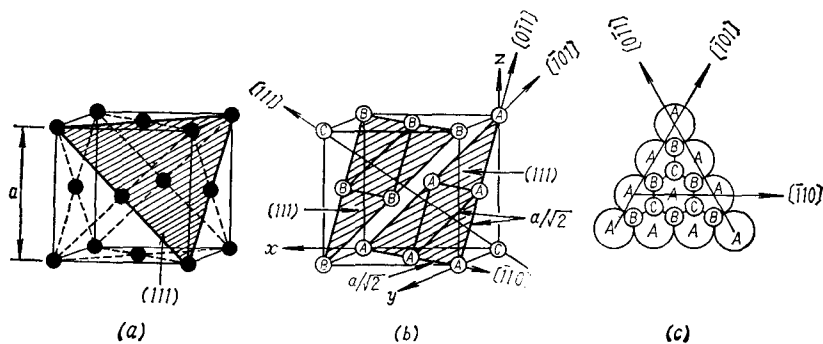


図 I・1・7 面心立方格子の原子配列
(a) 面心立方格子の単位胞
(b) (111) 面の原子配列
(c) (111) 面の積層順序と原子配列

(iii) ちゅう密六方格子 結晶構造は立方晶よりも複雑だが, 積層順序は非常に簡単である (図 I・1・8(a))。すなわち, 面心立方の (111) 面と同じちゅう密面を, ABABAB...

の順序に積層するとちゅう密六方格子が完成する (図 I・1・8(b))。ABABAB… の積層順序を ABCABC… に変えると面心立方格子になる。単位胞は太い線で示し、その各かどと、 $2a/3$, $a/3$, $c/2$ に原子が位置する。原子の剛球モデルでは c 軸と a 軸の軸比は $2\sqrt{2}/3 = (1.633)$ になるが、実在金属では 1.57 と 1.85 の間の値をとる。

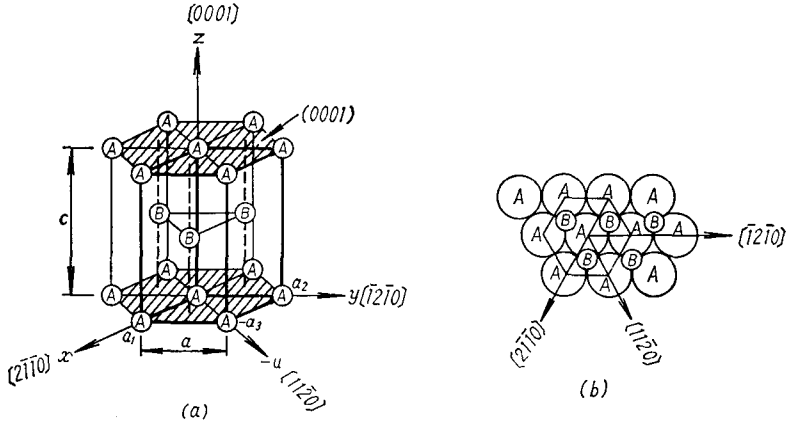


図 I・1・8 ちゅう密六方格子の原子配列

(a) ちゅう密六方格子と単位胞 (ABA の積層)

(b) 積層順序 (ABAB ……)

(iv) 配位数, 単位胞中の原子数と最近接原子間距離 原子のまわりに等距離に近接して存在する最近接原子の数を配位数という。各結晶格子の配位数を表 I・1・1 に示す。

表 I・1・1 結晶構造と配位数, 単位胞中の原子数および最近接原子間距離

結晶構造	配位数	単位胞当り原子数	最近接原子間距離
体心立方	8	2	$\sqrt{3}a/2$
面心立方	12	4	$a/\sqrt{2}$
ちゅう密六方	12	2	a

単位胞中に含まれる原子の数は結晶構造によって異なる。立方格子の一つのかどにある原子は、そのまわりの 8 個の単位胞に共有されているから、一つの単位胞に対しては $1/8$ の寄与がある。かどが単位胞に 8 個あるから、 $1/8 \times 8 = 1$ 個が一つの立方格子に対する寄与である。体心の原子は完全に 1 個として寄与するから、体心立方格子の場合は合計 2 個

6 I 材料の基礎

である。面心の原子は2個の単位胞に共有されているから、一つの単位胞に対しては $1/2$ の寄与があるが、一つの単位胞に面心が6個あるから、 $1/2 \times 6 = 3$ 個が一つの単位胞に対する面心の寄与となる。これにかどの寄与が1個であったから、面心立方格子では合計4個である。同様にちゅう密六方格子では2個となる(表I・1・1)。

原子を剛体球、結晶を剛体球が互いに接した集合体と考えると、原子半径は最近接原子間距離の $1/2$ である。

つぎに以上の三つの結晶格子に属する金属の例を示す。

体心立方格子: Li, K, Na, Cr, W, Mo, V, Ta, Nb, α -Fe, δ -Fe, β -Ti, β -Zr

面心立方格子: Au, Ag, Cu, Al, Ni, Pt, Ir, Rh, Pb, Pd, Ca, β -Co, γ -Fe

ちゅう密六方格子: Mg, Zn, Cd, Be, α -Co, α -Ti, α -Zr

c. ステレオ投影

結晶面、結晶方向を表わすのにミラー指数を用いたが、これらを図示するにはステレオ投影を用いる。

結晶の中心のまわりに半径1の球をえがき、その中心から考えている結晶面に対して法線を引き、球の表面と交わる点をPとする。これを極点と呼ぶ(図I・1・9)。球面上の極点を平面上に投影する操作をステレオ投影という。いま南極Sから極点Pを赤道面に投影するには、Sを視点として極点Pに向って視線を引き赤道面との交点をP'とする。すなわちPはP'に投影される。南半球上の極点に対しては、北極Nを視点として同じ操作で赤道面上に投影する。

ステレオ投影によると、球面上のすべての大円は円または円弧、あるいは中心を通る直

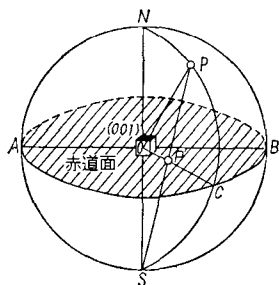


図 I・1・9 極点球とステレオ投影

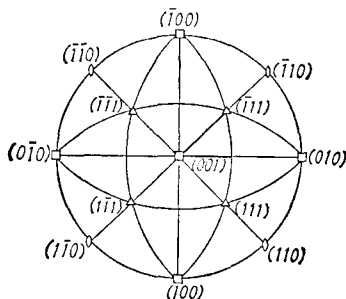


図 I・1・10 標準投影 (001) 面