

材料強度要論

幾德工業大学教授

成蹊大学名誉教授

工学博士

榎本信助著

材料強度要論

幾德工業大学教授

成蹊大学名誉教授

工学博士

榎本信助著



1979

東京

株式会社

養賢堂発行

まえがき

機械や構造物の設計や製作の過程においては、単に材料力学の知識のみでなく、使用する材料の性質、とくに機械的性質についての知識が必要である。後者についての知識は、従来は個々の資料の集積として、材料力学の付録的な存在に過ぎなかった。しかし、機械や構造物の設計が高度化し、その使用環境や条件が過酷となり、あるいは高度に経済的要求がなされる現在は、これらに対応する材料の力学的挙動についての理解が不可欠である。

工業用材料として用いられる固体の力学的挙動は、その結晶あるいは分子構造、さらには原子構造の物理的挙動が密接に関係しており、この見地から、材料の巨視的挙動や強度を理解しようとする学問分野が、材料科学として近年形づけられつつある。

本書は工学系大学、高専における初等材料力学の補完的知識として、材料科学的見地から、材料の力学的性質および挙動を解説したものであり、必ずしも材料強度学の範ちゅうにこだわらず、弾性、残留応力、材料破損条件説など、強度設計に関係のある分野も含め、さらに材料強度試験において現われるデータのばらつきの処理に関し、その統計的取扱について、参考としてつけ加えた。

また、諸種の数値、データおよび計算例題には、メートル法重力系単位と同時に、JISにおいて採用されつつあるSI（国際標準）単位を併用し、これに慣れるよう配慮した。

本書の内容については、未熟な個所が多いと思われるので、諸賢のご叱正が得られれば幸である。

最後に、本書の刊行に当たり、慶応義塾大学教授川口光年博士、職業訓練大学校教授宮入宮人博士および成蹊大学助教授三角正明博士に校正刷りを読んでいただき、いろいろな御教示を与えられたことを感謝したい。

昭和54年8月

著 者

目 次

第1章 弾 性	1
1.1 線形弾性	1
1.1.1 異方体の弾性	1
1.1.2 等方体の弾性	2
1.1.3 複合材料の弾性	3
1.2 弾性の本質	5
1.2.1 縦弾性	6
1.2.2 横弾性, ボアソン比	7
1.3 擬弾性	8
1.3.1 熱弾性余効	8
1.3.2 原子の拡散	10
1.4 エラストマーの弾性	10
文 献	11
演習問題	11
第2章 塑 性	13
2.1 結晶構造のすべり	13
2.2 完全結晶格子のすべり強さ	13
2.3 転 位	15
2.3.1 刃状転位	15
2.3.2 らせん転位	16
2.3.3 転位場のひずみと応力	17
2.3.4 転位場のひずみエネルギー	18
2.3.5 転位の相互作用	19
2.3.6 転位の増殖	20
2.4 層状構造の塑性	21
2.5 静荷重試験における塑性特性	22
2.5.1 弾性限, 降伏点	22
2.5.2 負荷と除荷	23
2.5.3 バウシinger効果	24
2.5.4 加工硬化(ひずみ硬化)	24
2.5.5 析出硬化	25

2.5.6 塑性内部摩擦	26
文 献	28
演習問題	28
第3章 金属のクリープ	30
3.1 金属のクリープ特性	30
3.2 金属のクリープの機構	31
3.2.1 遷移クリープ	31
3.2.2 定常クリープ	31
3.2.3 加速クリープ	32
3.2.4 高温における金属のクリープ破壊	32
3.2.5 合金のクリープ	33
3.3 クリープ挙動の表示	33
3.3.1 遷移クリープ	33
3.3.2 定常クリープ	34
3.4 金属のクリープ強さ	35
3.5 応力緩和	36
3.6 クリープ試験	37
文 献	37
演習問題	38
第4章 硬 さ	40
4.1 押込み硬さ	40
4.1.1 ブリネル硬さ	41
4.1.2 ビッカース硬さ	42
4.1.3 ロックウェル硬さ	43
4.1.4 プラスチックの押込み硬さの測定	44
4.2 反発硬さ	45
4.3 ひっかき硬さ	46
4.4 硬さ測定値の評価	47
4.4.1 各種硬さ値の間の関係	47
4.4.2 硬さと引張強さとの関係	48
4.4.3 高分子材料の硬さ	48

4.5 高温における硬さ	49	6.3.5 腐食環境	71
文 献	49	6.4 低サイクル疲労	72
演習問題	49	6.5 繰返し荷重の種類と疲労強度	73
第5章 ぜい性破壊とき裂	51	6.5.1 回転曲げ疲労限度と繰返しねじり疲労限度との関係	73
5.1 ぜい性破壊とじん性	51	6.5.2 組合わせ荷重による疲労	74
5.2 衝撃試験	52	6.5.3 転動疲労	76
5.3 ぜい性破壊の特性	53	6.6 疲労寿命の推定	78
5.4 ぜい性破壊強さに及ぼす各種因子の影響	53	6.6.1 マイナーの累積被害則	78
5.4.1 温度の影響	53	6.6.2 疲労き裂の成長と応力拡大係数	79
5.4.2 切欠き	54	6.7 疲労の統計的性質	81
5.4.3 化学成分と結晶粒度	54	6.7.1 疲労現象の確率過程的性質	81
5.5 き裂の発生と成長	55	6.7.2 疲労寿命の分布	81
5.5.1 転位機構からみたき裂の発生	56	6.7.3 $P-S-N$ 線図	82
5.5.2 Griffith のき裂成長理論	56	6.7.4 時間強度の分布	83
5.5.3 応力拡大係数	58	6.8 プラスチックの疲労	83
文 献	60	6.8.1 $\dot{S}-N$ 曲線	84
演習問題	60	6.8.2 温度の影響	84
第6章 疲 労	62	6.8.3 繰返し速度の影響	85
6.1 疲労現象	62	文 献	85
6.1.1 繰返し荷重	62	演習問題	85
6.1.2 疲労の進行と破壊	62	第7章 粘弾性	87
6.2 疲労試験	64	7.1 無定形固体	87
6.2.1 繰返し応力	64	7.1.1 ガラス質	87
6.2.2 繰返し荷重	65	7.1.2 高分子	87
6.2.3 $S-N$ 線図 (ウェーラー線図)	66	7.2 無定形固体の粘性と粘弾性模型	88
6.2.4 疲労限度線図, S_e-S_m 線図	67	7.2.1 粘性	88
6.3 疲労限度に影響を及ぼす因子	68	7.2.2 模型要素	90
6.3.1 材料の静的強さ	68	7.2.3 マックスウェル模型	91
6.3.2 切欠き効果	68	7.2.4 ケルビン・フォークト模型	92
6.3.3 寸法効果	70	7.2.5 バーガー模型	93
6.3.4 表面効果	71		

7.3 高分子材料の変形挙動	93	9.2.5 スプリングバック	121
7.3.1 温度依存性	93	9.3 表面加工による残留応力	123
7.3.2 変形挙動	94	9.4 熱処理による残留応力	124
7.3.3 応力-ひずみ線図	95	9.4.1 焼入れ	124
7.3.4 クリープ	96	9.4.2 浸炭	124
7.3.5 内部摩擦	97	9.4.3 窒化	125
7.4 複合材料	98	9.4.4 高周波焼入れ	125
7.5 セラミック材料	100	9.4.5 強化ガラス	125
7.5.1 ガラス	101	9.5 残留応力の測定	126
7.5.2 セメント、コンクリート	103	文 献	128
7.5.3 焼結セラミック	104	演習問題	128
文 献	105	第10章 破損条件諸説	130
演習問題	105	10.1 主な破損条件説	130
第8章 摩擦と摩耗	107	10.1.1 最大主応力説	130
8.1 摩擦	107	10.1.2 最大主ひずみ説	130
8.1.1 すべり摩擦	107	10.1.3 最大せん断応力説	131
8.1.2 転がり摩擦	109	10.1.4 全ひずみエネルギー説	131
8.2 摩耗	111	10.1.5 せん断ひずみエネルギー説	132
8.2.1 凝着摩耗	111	10.1.6 モールの説	134
8.2.2 アブレシブ摩耗	111	10.2 諸説の比較	135
8.2.3 腐食摩耗	112	演習問題	138
8.2.4 浸食	113	第11章 材料強度の統計的試験とデータの処理	139
8.2.5 転がり接触摩耗	114	11.1 試験片の準備	139
8.2.6 フレッチング	114	11.2 観測値の度数分布と分散	139
8.2.7 高分子材料の摩耗	115	11.3 正規分布	141
文 献	115	11.3.1 正規分布の特性	141
演習問題	116	11.3.2 正規分布の判定と統計量の図式解法	144
第9章 残留応力	117	11.3.3 対数正規分布	144
9.1 残留応力の発生	117	11.4 極値分布	148
9.2 変形による残留応力	117	11.5 統計的試験	148
9.2.1 丸棒の塑性ねじり	117	11.5.1 プロビット法	149
9.2.2 板のロール圧延	119	11.5.2 ステアケース法	149
9.2.3 板バネのプリセットチン	120		
9.2.4 オートフレッチャージ	120		

11.6 母数の推定	151	11.7.3 分布形によらない有意検 定	154
11.6.1 母平均の点推定	152	文 献	155
11.6.2 母標準偏差の点推定	153	演習問題	155
11.7 有意性の検定	153	付表 A・材料の機械的性質	158
11.7.1 二つの標本標準偏差の間 の差の検定	153	付表 B SI 単位	160
11.7.2 二つの標本平均の間の差 の検定	154	索 引	163

第1章 弾 性

固体に外力を加えると変形を生じ、外力を除くと元の形状にもどるとき、弾性変形を行ったという。応力-ひずみ線図が、図 1.1 における OA のように線形をなす場合と、OB のように曲線状をなす場合とがある。前者は多くの金属や結晶体にみられ、後者はゴムや合成繊維にみられる。

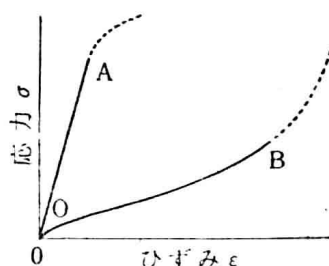


図 1.1 弾性の種類
OA: 線形弾性
OB: ゴム弾性

1.1 線形弾性 (Linear elasticity)

1.1.1 異方体の弾性

方向によって弾性の異なる線形弾性体 (異方体, anisotropic body) においては、直方体に作用する各々の応力、たとえば σ_x が垂直ひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ およびせん断ひずみ $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ の線形関数であることを意味する。6 個の応力成分は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + C_{13}\varepsilon_z + C_{14}\gamma_{yz} + C_{15}\gamma_{zx} + C_{16}\gamma_{xy} \\ &\dots\dots\dots \\ \tau_{yz} &= C_{41}\varepsilon_x + C_{42}\varepsilon_y + C_{43}\varepsilon_z + C_{44}\gamma_{yz} + C_{45}\gamma_{zx} + C_{46}\gamma_{xy} \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

で表わされる。 C_{ij} は 36 個の比例定数で、弾性係数 (elastic constants) と呼ぶ。式 (1.1) はその逆の関係も成りたち、

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y + S_{13}\sigma_z + S_{14}\tau_{yz} + S_{15}\tau_{zx} + S_{16}\tau_{xy} \\ &\dots\dots\dots \\ \gamma_{yz} &= S_{41}\sigma_x + S_{42}\sigma_y + S_{43}\sigma_z + S_{44}\tau_{yz} + S_{45}\tau_{zx} + S_{46}\tau_{xy} \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

ここに s_{ij} を弾性コンプライアンス (elastic compliances) と呼ぶ。

(2) 第1章 弾 性

ひずみから応力を計算するには、6 個のひずみ成分を知る必要があることとなる。しかし幸いに、多くの固体の構造は対称性をもつため、必要な係数はかなり減少する。まず、数式の対称性のため、 $c_{ij}=c_{ji}$, $s_{ij}=s_{ji}$ となるので、弾性係数の数は 21 個が独立となる。結晶における三斜晶系が、これに属する。

弾性体の弾性係数は、その材料の原子の格子構造によって決まるものであるから (1.2 節参照)、格子構造の対称性が弾性係数に反映する。対称性をもつ格子構造の弾性係数の決定方法は F. Neumann によって求められ、ニューマンの方法⁽¹⁾と呼ばれている。これは格子構造に対称性がある場合に、その対称面について座標軸を回転しても、弾性係数は変わらないことを利用して、係数を決定するのである。

3 直角座標面において、対称な結晶構造では、定数の数は次式のように最大 12 個が考えられる。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y + S_{13}\sigma_z, & \gamma_{yz} &= S_{44}\tau_{yz} \\ \epsilon_y &= S_{12}\sigma_x + S_{22}\sigma_y + S_{23}\sigma_z, & \gamma_{zx} &= S_{55}\tau_{zx} \\ \epsilon_z &= S_{13}\sigma_x + S_{23}\sigma_y + S_{33}\sigma_z, & \gamma_{xy} &= S_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \quad (1.3)$$

ここに S_{11} は x 方向の弾性係数の逆数 $1/E$ であり、 S_{12} は σ_x による y 方向の弾性係数 $-\nu/E$ に相当し、同様に S_{13} は σ_x による z 方向の弾性係数である。また、 S_{44} , S_{55} , S_{66} もせん断弾性係数の逆数である。立方晶系 (Al, Cu, α -Fe など) では $S_{11}=S_{22}=S_{33}$, $S_{12}=S_{13}=S_{23}$ および $S_{44}=S_{55}=S_{66}$ となり、式 (1.3) はさらに簡単になり

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y + S_{12}\sigma_z, & \gamma_{yz} &= S_{44}\tau_{yz} \\ \epsilon_y &= S_{12}\sigma_x + S_{11}\sigma_y + S_{12}\sigma_z, & \gamma_{zx} &= S_{44}\tau_{zx} \\ \epsilon_z &= S_{12}\sigma_x + S_{12}\sigma_y + S_{11}\sigma_z, & \gamma_{xy} &= S_{44}\tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

で与えられ、係数は 3 個が独立となる。

1.1.2 等方体の弾性

結晶粒がランダムに配置している多結晶体、および非晶体で長距離規則性のない無定形固体は、巨視的に等方性 (isotropy) であり、式 (1.4) において、

$$s_{11}=1/E, \quad s_{12}=-\nu/E, \quad s_{44}=1/G$$

を代入し

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z), & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_z), & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G} \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y), & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

の6式となる。

等方質固体では、垂直ひずみを測定するすべての方向に、同じ弾性係数 E を適用して応力を求めることができる。弾性係数 E, G, ν は、それぞれ縦弾性係数、せん断弾性係数およびポアソン比 (Poisson's ratio) と呼ばれているが、

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.6)$$

で関係づけられるから、独立の係数は2個となる。

上述の関係式には、時間の項が含まれていないが、実際の測定では微量ではあるが、時間に依存する熱弾性が存在する。これについては1.3節で述べる。

弾性係数は温度の上昇とともに、一般に減少する。

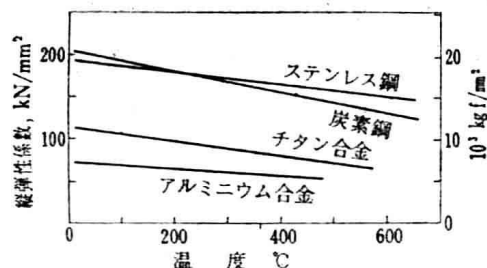


図 1.2 温度と縦弾性係数の関係

図 1.2 は工業用金属の E の変化を示す。金属の弾性係数は構造鈍感性をもち、含有合金成分をある程度変化させても、あまり影響を受けない。例えば付表 A に示す炭素鋼と合金鋼は、5% 以内の変化に止まっている。

1.1.3 複合材料の弾性

弾性および強度を増加させるため、プラスチックにガラス繊維、炭素繊維や金属細線などを、一方向に配向して混入すると、この複合材料 (compo-

(4) 第1章 弾 性

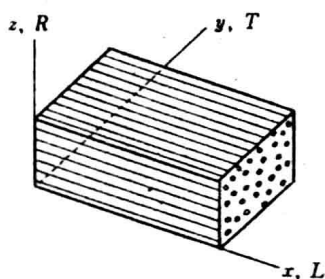


図 1.3 一方向強化複合材

site materials)は巨視的に異方性をもつ材料となる。このようにして作った異方性板は、繊維方向と直角方向の外力に対しては、全然効果を持っていない。そこでこのような異方性板を、方向を変えて重ね合わせた積層板は、強度部材としてその軽さと耐食性などの特長を発揮し、近年広く利用されている。

繊維が一方向に配向された一方向強化材(図 1.3)では、 yz 面内では等方性と考えられるから、式 (1.3) において、 $S_{12}=S_{13}$, $S_{22}=S_{33}$, $S_{44}=2(S_{22}-S_{33})$, $S_{55}=S_{66}$ となり、方向を図のように L, T, R で表わすと

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_L &= S_{11}\sigma_L + S_{12}\sigma_T + S_{12}\sigma_R \\ \varepsilon_T &= S_{12}\sigma_L + S_{22}\sigma_T + S_{23}\sigma_R \\ \varepsilon_R &= S_{12}\sigma_L + S_{23}\sigma_T + S_{23}\sigma_R \\ \gamma_{TR} &= 2(S_{22}-S_{23})\tau_{TR} \\ \gamma_{RL} &= S_{55}\tau_{RL}, \quad \gamma_{LT} = S_{55}\tau_{LT} \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

となり、独立の弾性係数は 5 個となる。

直交異方性板(平面応力)の場合は、上式で $\sigma_R = \tau_{TR} = \tau_{RL} = 0$ とおき、弾性係数を E, G, ν で表わすと

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_L &= \frac{1}{E_L}\sigma_L - \frac{\nu_{TL}}{E_T}\sigma_T \\ \varepsilon_T &= \frac{1}{E_T}\sigma_T - \frac{\nu_{LT}}{E_L}\sigma_L \\ \gamma_{LT} &= \frac{1}{G_{LT}}\tau_{LT} \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

となるが、ここにマックスウェルの関係^(*):

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad (1.9)$$

が成り立つので、独立定数は 4 個である。

複合材料の基材の弾性係数が与えられた場合の、 L 方向の平均弾性係数は

Tsai⁽³⁾, Clark らによって実用式が示されている。

$$\left. \begin{aligned} E_L &= E_f \phi_f + E_m(1 - \phi_f) \\ \nu_L &= \nu_f \phi_f + \nu_m(1 - \phi_f) \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

ここに添字 m, f はそれぞれマトリックス (母材) と繊維を表わし, ϕ は容積率である。

直交異方性板から, x 軸が角度 θ をもつ長方形板を切りとり, これに σ_x , σ_y または τ_{xy} を作用させると, 図 1.4 のように複雑な変形をする。この場合の応力とひずみの関係は $E_L, E_T, G_{LT}, \nu_{LT}, \nu_{TL}$ および θ の関数として導くことができる⁽⁴⁾。

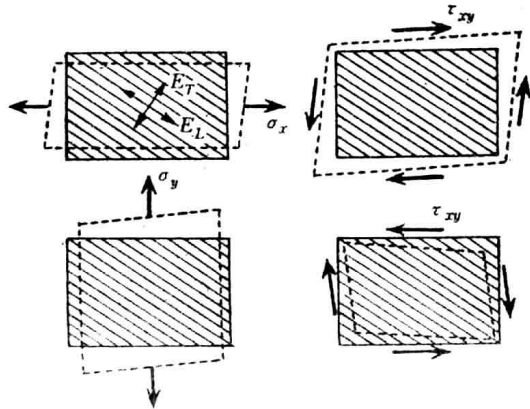


図 1.4 異方性板の変形 ($E_L > E_T$)

なお, プラスチック複合材の強さについては 7.4 節に記述してある。

1.2 弾性の本質

金属結晶および無定形固体の弾性は, 原子間に働く引力と斥力の本質によるもので, 一次的な引力は二つの同種の原子が, 電子を共有することによる共有結合と, 正負の電荷が静電的に互いに引き合うイオン結合のために生ずる。しかし, 原子は密着するまで近づくことはなく, ある一定の間

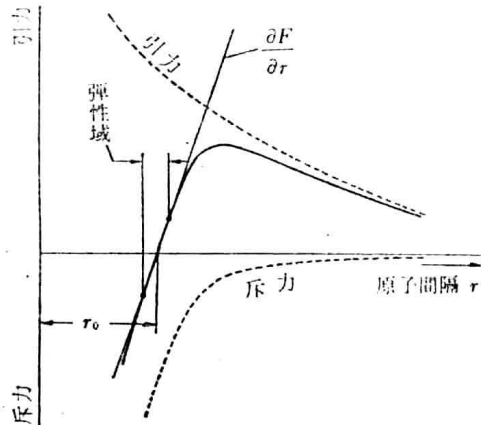


図 1.5 原子間力と原子間隔の関係 r_0 の位置でつりあいを保つ

(6) 第1章 弾 性

隔を保って配列されており、それ以上近づかせようとする、それに反発する力が働く。これは原子核の正電荷の反発のためである。原子間に働く引力と斥力の原子距離との関係は図 1.5 に示すようになり、正味の作用力は、引力と斥力の和で与えられるから、二つの原子は距離 r_0 でつりあいを保つ。原子間に働く正味の力は

$$F = \frac{A}{r^M} - \frac{B}{r^N}, \quad N > M \quad (1.11)$$

ここに A, B, M, N は結合形態による定数であり、右辺第1項は引力、第2項は斥力を表わす。図における実線が式 (1.11) を表わし、コンドン・モース曲線 (Condon-Morse curve) という。

1.2.1 縦弾性

図 1.6 に示すように、外力が作用していないときは、原子は点線で示した

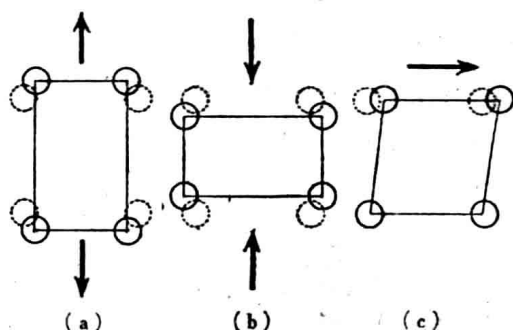


図 1.6 原子の弾性変位

位置につりあいを保っているが、引張力を受けると、その方向の原子間隔が増えて引張応力を生じ (図 (a))、圧縮力を受けると原子間隔は減じて圧縮応力を発生する (図 (b))。せん断力を受けると、図 (c) のようにひずみ、対

角線方向の2個の原子間の伸縮によって、せん断応力を生ずる。

縦弾性係数 E は、コンドン・モース曲線の r_0 における接線の傾きを表わす (図 1.5 参照)。結晶物質における弾性ひずみの限界は ± 0.005 を超えることはほとんどないから、この範囲のコンドン・モース曲線は線形と考えるとさしつかえない。

無定形固体のうちで、ガラスや架橋形高分子 (7.1.3 項参照) のように、外力に対して原子間力が抵抗する構造では、線形弾性が現われる。

1.2.2 横弾性, ポアソン比

最密結晶構造を例にとり, 図 1.7(a) のように原子がつりあいの位置に配列している場合に, その一部をとりだした位置関係を図 (b) とする. 外力 P

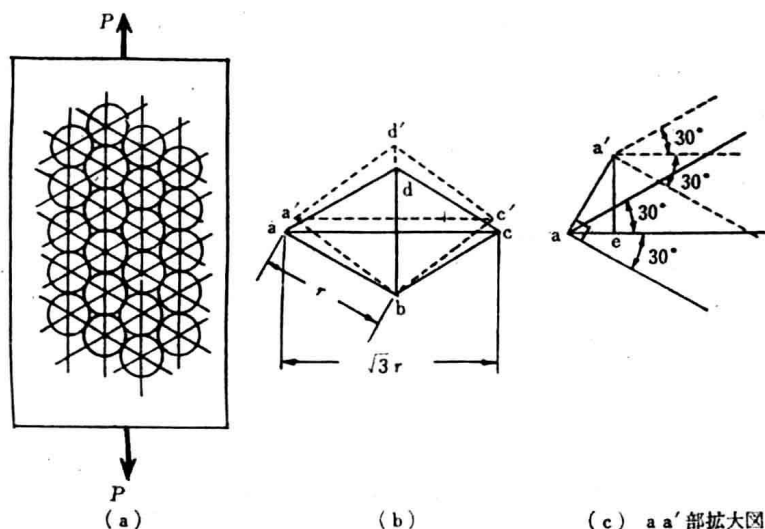


図 1.7 横方向縮み

によって, この菱形 $abcd$ は $a'b'c'd'$ (点線) のように変形し, 対角線 bd は伸び, ac は縮む. 力に平行な対角線の伸びを λ_1 , 力に直角な対角線の縮みを λ_2 とすると, 各々のひずみは

$$\varepsilon_1 = \lambda_1 / r, \quad \varepsilon_2 = -\lambda_2 / (\sqrt{3}r)$$

となる. 変形前後の菱形の幾何学的な関係 (図 (c)) で, 変形は小さいから $ab \parallel a'b'$, $ad \parallel a'd'$ とみなすと

$$\frac{a'e}{ae} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{3}}{1}$$

となるから

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_1 / 3$$

の関係が導かれる. したがってポアソン比は

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{1}{3}.$$

(8) 第1章 弾 性

となる。多くの金属では ν は $1/3$ に近い値をもっている (附表 A 参照)。

ポアソン比の極限値を、ひずみエネルギーの観点から調べてみよう。等方体に外部から仕事が行なされると、その内部自由エネルギーは増加する。すなわちひずみエネルギーは常に正となる。ひずみエネルギーは、体膨張エネルギー (dilatational energy) u_1 とせん断ひずみエネルギー u_2 の和で与えられる (10 章式 (10.6), (10.7) 参照)。

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 \\ &= \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1+\nu}{E}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \end{aligned} \quad (1.12)$$

等方応力 (静水圧応力) を受ける場合は、 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ であるから、右辺第 2 項はゼロとなる。この場合、 u が正であるための必要十分条件は $\nu < 1/2$ である。また純粋せん断応力を与えた場合は、体積変化を生ぜず、右辺第 1 項はゼロとなる。この場合の u が正であるためには $\nu > -1$ でなければならない。結局、ポアソン比は

$$-1 \leq \nu \leq 1/2$$

の範囲にある*。多くの固体のポアソン比は 0 と 0.5 の間にある。

1.3 擬弾性 (Aelasticity)

初等材料力学で取扱う弾性体のひずみは、応力のみの関数であった。しかし場合によっては、ひずみが応力に対し、時間的に遅れて追隨することがある。しかし、外力を除くと、結局元の形に復するときは、この性質を擬弾性という。つぎに述べる熱弾性および原子拡散がこの効果を持ち、磁性金属では磁歪現象のため、弾性余効効果を見わす。

1.3.1 熱弾性余効

一般に、固体を引張ると、体積が膨張して冷却し、圧縮すると体積が収縮して温度が上昇する。いま、試験片を急速に、すなわち断熱的に引張ると、 σ - ε 線図 (図 1.8 (a)) で、弾性変形 ab を行い、その温度は下降する。外

* 黄鉄鉱のポアソン比は、負値となることがある。

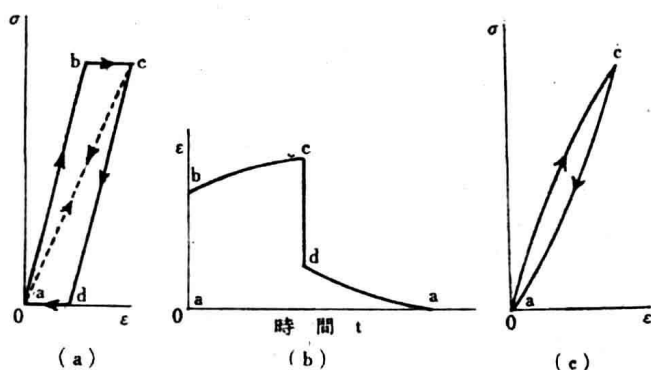


図 1.8 弾性余効

力をそのまま保つと、試料は周囲から熱を受けて次第に元の温度になり、膨張して bc の過程をたどり、ひずみ-時間線図 (図 (b)) 上では、遅延ひずみ bc を生ずる。つぎに、急速に断熱的に荷重を除くと、図 (a) における cd の過程で温度が上昇し、その後、周囲温度まで徐々に下がり a にもどる。この過程で、図 (b) の遅延ひずみ da を生ずる。

もし、負荷と除荷の 1 サイクルにおいて、荷重速度をきわめてゆっくり行えば等温変化となり、 σ - ε 線図上では、図 (a) に破線で示すように、 ac 間を直線的に往復する。中間の速度で負荷、除荷を行うと、図 (c) のようなヒステリシス・ループが描かれる。このように、応力に対してひずみが遅れて追従する現象を、弾性余効 (elastic after effect) という。

このループの面積だけ、熱損失としてエネルギーが消費される。さらに速度を速めて、きわめて速い 1 サイクルが行われると、断熱変化に近づき、図 (a) における直線 ab 上の往復となり、ふたたびエネルギー消費がゼロに近くなる。すなわち、エネルギー消費量はサイクル周波数の関数となり、中間の周波数で、ループの面積は極大となる。

金属試験片 (弾塑性体) に、正、負等大の振動荷重を加えると、応力-ひずみ線図はヒステリシス・ループを描く。その原因は塑性に基づく内部摩擦によるもの (2.5.6 項参照) と、熱弾性に基づく内部摩擦によるものがあり、熱弾性に基づくヒステリシス・ループは上述の理由により、振動速度の関数

として現われる。

帯板の一端を固定し、他端に交番外力を加えて曲げ自由振動を行わせると、上面が凹に曲げられたときは、熱は上面から下面に向かって流れ、上面が凸に曲げられたときは、熱は反対に流れ、振動に応じて熱の交流が行われ、熱弾性内部摩擦の効果により、振動は次第に減衰する*。

1.3.2 原子の拡散

結晶格子中へ浸入した異種原子は、外力によるひずみによって、隣接格子に低エネルギー個所を生ずると、そこへ移住する現象がある。これを原子の拡散 (diffusion) という。この現象は、外力に対し時間的に遅れるので、ひずみに余効効果を生ずる。

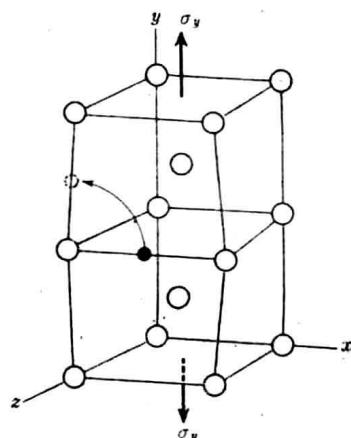


図 1.9 原子の拡散
白丸は Fe, 黒丸は C 原子

図 1.9 は、 α 鉄の体心立方格子中に、浸入した炭素原子の例である。応力が作用していないときは、このような浸入原子は x, y, z 方向に対し、任意の稜辺にランダムに分布している。もし、 y 方向に応力 σ_y が作用すると、 y 方向に平行な辺は引き伸ばされ、他の辺上にあった炭素原子が、図示のように y 方向に平行な辺に移住する。移住によって空いた辺は縮み、ポアソン効果によって、 y 辺は余効的に伸びる。 σ_y が除かれると、

移動原子は再び元の位置へ復帰する。原子の移住は、その活性化エネルギーに依存するので、試料の温度がこの余効的作用に大きな影響を及ぼす。

1.4 エラストマーの弾性 (非線形弾性)

ゴムなどのエラストマー (7.1.2 項参照) は、長い分子鎖が縮んだ状態にあり、これに引張力が作用すると、鎖が直線状に引伸ばされ (uncoiling と

* 実際には、熱弾性内部摩擦のほかに、塑性内部摩擦、磁気弾性余効や、固定端や空気中へのエネルギーの逸散などが、振動減衰の原因となる。