

α 3 編 材 料 力 学

企画・編集	大野信忠 久保司郎	影山和郎 小林英男	岸本喜久雄 坂真澄	北村隆行
執筆 者	秋庭義明 伊藤高敏 大矢弘史 笠野英秋 河井昌道 久保司郎 才本明秀 座古勝彦 渋谷陽二 末益博志 角洋一 武尾文雄 田中拓玢 陳玢玢 土岐仁 長岐滋 野口裕久 林一夫 福永久雄 宮野靖志 山田聖志 渡邊勝彦	芦田文博 井上裕嗣 小川武史 金崎宏 関東康祐 合田公一 坂真澄 笹川和彦 渋谷嗣 菅田淳 丸谷政志 武田展雄 田辺裕治 辻知章 轟章 仲町英治 野田尚昭 原利昭 北條正樹 武藤睦治 横堀壽光 渡辺豊	足立忠晴 今谷勝次 小沢喜仁 上西研 菊池正紀 近藤恭平 酒井信介 佐々木克彦 庄子哲雄 鈴木秀人 高橋邦弘 伊達秀文 谷本敏夫 東郷敬一郎 富田佳宏 中村春夫 野中勇 琵琶志朗 水野衛 村岡幹夫 吉田総仁 和田敦	石川隆司 大野信忠 影山和郎 神谷庄司 北村隆行 近藤俊美 坂根政男 塩澤和章 進藤裕英 鈴木寛 高橋由紀夫 田中英一 丹野顯郎 戸梶惠郎 鳥居太始 野口博司 橋田俊之 福田博二 箕島弘文 山内雅修

目 次

第 1 章 基 礎

<p>1・1 荷重1</p> <p> 1・1・1 速度による分類.....1</p> <p> 1・1・2 分布様式による分類.....1</p> <p> 1・1・3 作用による分類.....1</p> <p>1・2 支持条件および支持反力1</p> <p>1・3 応力の定義2</p> <p> 1・3・1 内力と応力.....2</p> <p> 1・3・2 垂直応力とせん断応力.....2</p> <p> 1・3・3 平面応力.....2</p> <p> 1・3・4 三軸応力.....2</p> <p> 1・3・5 偏差応力.....2</p> <p> 1・3・6 座標変換と主応力.....2</p> <p> 1・3・7 応力だ円体.....3</p>	<p> 1・3・8 モールの応力円.....3</p> <p>1・4 応力の釣合い方程式4</p> <p>1・5 ひずみの定義4</p> <p> 1・5・1 変形とひずみ.....4</p> <p> 1・5・2 垂直ひずみとせん断ひずみ.....5</p> <p> 1・5・3 体積ひずみ.....5</p> <p> 1・5・4 平面ひずみ.....5</p> <p> 1・5・5 三軸ひずみ.....5</p> <p> 1・5・6 偏差ひずみ.....5</p> <p> 1・5・7 座標変換と主ひずみ.....5</p> <p> 1・5・8 ひずみのだ円体とモールのひずみ 円.....6</p> <p>1・6 ひずみの適合条件6</p>
---	--

1・7 ひずみエネルギー	7	1・9・4 弾性安定	10
1・7・1 定義	7	1・10 固体力学における変分原理	10
1・7・2 引張り・圧縮	7	1・10・1 境界値問題の定式化	10
1・7・3 せん断	7	1・10・2 仮想仕事の原理	11
1・7・4 三軸応力	7	1・10・3 最小ポテンシャルエネルギーの原理	11
1・8 フックの法則と弾性係数	7	1・10・4 フー・鷲津の原理	11
1・8・1 引張り・圧縮	8	1・10・5 ヘリンガー・ライスナーの原理	11
1・8・2 体積変化	8	1・10・6 最小補足エネルギーの原理	11
1・8・3 せん断	8	1・10・7 補仮想仕事の原理	12
1・8・4 ポアソン比	8	1・11 熱応力	12
1・8・5 弾性係数間の関係	8	1・12 有限変形理論	13
1・8・6 三軸応力(等方性材料)	8	1・12・1 変形とひずみ	13
1・8・7 三軸応力(異方性材料)	8	1・12・2 応力	14
1・9 弾性問題	9	1・12・3 応力の釣合い方程式	14
1・9・1 弾性問題の基礎式	9	1・12・4 更新ラグランジュ方式	14
1・9・2 二次元弾性問題	9		
1・9・3 三次元弾性問題	9		

第2章 引張り・圧縮とねじり

2・1 棒の引張り・圧縮	15	2・6 コイルばね	18
2・1・1 断面に生じる応力	15	2・7 軸の応力集中	18
2・1・2 熱応力	15	2・7・1 段付棒のねじり	18
2・1・3 衝撃応力	15	2・7・2 環状V溝を有する軸のねじり	18
2・2 丸軸のねじり	15	2・7・3 キー溝を有する軸のねじり	18
2・2・1 弾性変形	15	2・8 組合せ応力を受ける軸	18
2・2・2 塑性変形	16	2・8・1 弾性変形	18
2・3 一様断面真直軸のねじり	16	2・8・2 塑性変形	19
2・3・1 弾性変形	16	2・9 軸の座屈	19
2・3・2 塑性変形	16	2・9・1 丸軸のねじり座屈	19
2・4 各種断面型の軸のねじり	16	2・9・2 薄い円筒かくのねじり座屈	19
2・5 薄肉構造材のねじり	17	2・10 応力波の伝ば	19
2・5・1 薄肉閉断面材のねじり	17	2・10・1 弾性波	19
2・5・2 薄肉開断面材のねじり	18	2・10・2 塑性波	20

第3章 はりの曲げ

3・1 はりのせん断力と曲げモーメント	21	3・8・1 せん断力による応力	30
3・1・1 外力と支持反力	21	3・8・2 せん断応力によるたわみ	31
3・1・2 はりのせん断力と曲げモーメント	21	3・8・3 せん断中心	31
3・1・3 面積モーメント法	21	3・9 移動荷重を受けるはり	31
3・2 断面二次モーメントおよび断面係数	22	3・10 不静定はり	33
3・3 はりの曲げモーメントによる応力	24	3・10・1 3モーメントの式	33
3・4 曲げモーメントによる傾斜とたわみ	24	3・10・2 重ね合わせ法	34
3・5 せん断力, 曲げモーメント, たわみ, 傾斜の図表	25	3・10・3 エネルギー法	34
3・6 主軸まわり以外の曲げによる応力とたわみ	29	3・11 平等強さのはり	34
3・7 曲げひずみエネルギー	30	3・12 組合せはり	34
3・8 せん断力によるはりの応力とたわみ	30	3・13 はりの塑性曲げ	35
		3・13・1 単純曲げ	35
		3・13・2 極限曲げモーメント	35
		3・13・3 はりの崩壊荷重	36

3・13・4 曲げと軸力のもとでの崩壊……………36	3・16 はりの座屈……………38
3・14 はりの衝撃曲げ……………36	3・16・1 はりの横座屈……………38
3・15 曲りばり……………36	3・16・2 比例限度以上におけるはりの横 座屈……………39
3・15・1 曲りばりの応力……………36	3・16・3 小曲率曲りばりの飛び移り……………39
3・15・2 曲りばりのたわみ……………37	
3・15・3 円環の曲げモーメントとたわみ ……………37	

第4章 柱の圧縮・座屈

4・1 短柱……………40	4・5・2 サウスウェルの式……………43
4・1・1 軸荷重を受ける短柱の応力……………40	4・6 中間軸荷重の作用を受ける長柱の座屈 荷重……………43
4・1・2 断面の核, 核半径……………40	4・6・1 中央に集中軸荷重のある場合……………43
4・2 一様断面の長柱の座屈……………40	4・6・2 一様分布軸荷重(自重)のある場 合……………43
4・2・1 比例限度以内における座屈: オイ ラーの座屈理論……………40	4・7 断面の変化する柱……………44
4・2・2 比例限度以上における座屈……………41	4・7・1 断面の変化する長柱の座屈……………44
4・3 横荷重・集中曲げモーメントなどを受 ける長柱……………42	4・7・2 一様強さおよび最小重量の長柱……………44
4・4 初期たわみおよび偏心荷重を受ける長 柱……………43	4・8 せん断変形および圧縮変形の影響を受 ける長柱の座屈荷重……………44
4・4・1 初期たわみのある長柱……………43	4・8・1 せん断変形の影響を受ける場合……………44
4・4・2 偏心荷重を受ける長柱……………43	4・8・2 せん断および圧縮変形の影響を受 ける場合……………44
4・5 曲げを伴う長柱の軸圧縮強度……………43	4・9 薄肉材よりなる柱の座屈……………45
4・5・1 ペリの式……………43	

第5章 平板の曲げ

5・1 等方性平板の曲げ……………46	5・2 直交異方性平板の曲げ……………57
5・1・1 平板の弾性微小たわみ……………46	5・3 平板の座屈……………57
5・1・2 平板の弾性大たわみ……………52	

第6章 圧力・遠心力などを受ける円板, 円筒および球

6・1 円板……………59	6・2・3 内外圧を受ける円筒の塑性変形……………64
6・1・1 内外圧を受ける円板の弾性変形……………59	6・2・4 組合せ円筒……………64
6・1・2 内外圧を受ける円板の塑性変形……………59	6・2・5 回転円筒……………65
6・1・3 回転円板……………59	6・2・6 円筒の熱応力……………65
6・1・4 厚さが一様でない回転円板……………60	6・2・7 内圧を受ける円筒の破壊……………66
6・1・5 回転円板の塑性変形……………60	6・2・8 圧力容器の設計基準……………66
6・1・6 回転円板の破壊……………61	6・3 球……………67
6・1・7 円板の熱応力……………61	6・3・1 内外圧を受ける中空球の弾性変形 ……………67
6・1・8 円板の変形挙動の数値解法……………62	6・3・2 内圧を受ける厚肉球の塑性変形……………67
6・2 円筒……………63	6・3・3 薄肉球殻……………68
6・2・1 内外圧を受ける円筒の弾性変形……………63	6・3・4 球の熱応力……………68
6・2・2 内外圧を受ける薄肉円筒……………64	

第7章 応力集中, 接触応力および接合応力

7・1 応力集中……………70	7・1・2 応力集中の例……………70
7・1・1 定義と概説……………70	7・1・3 応力集中の干渉……………75

7・1・4 応力集中の軽減法	76	7・3 接合応力	78
7・1・5 応力集中の簡便解析	76	7・3・1 全平面を形成しない二つのくさび による接合モデル	78
7・1・6 応力集中と塑性変形	76	7・3・2 全平面を形成する場合	78
7・2 接触応力	77	7・3・3 対数型の応力特異性	79
7・2・1 接触応力概説	77		
7・2・2 接触応力の例	77		

第8章 構造力学

8・1 骨組構造	80	力	88
8・1・1 骨組構造	80	8・3・4 開断面薄肉はりの曲げねじり	88
8・1・2 トラスの解析	80	8・3・5 薄肉柱の座屈	88
8・1・3 ラーメンの解析	81	8・4 殻構造	89
8・1・4 ラーメンの塑性崩壊解析	83	8・4・1 殻理論の基礎と分類	89
8・2 薄板構造	84	8・4・2 殻の膜理論	89
8・2・1 せん断場理論	84	8・4・3 殻の曲げ理論	90
8・2・2 張力場理論	85	8・4・4 殻の非線形理論	91
8・3 薄肉はり構造	86	8・5 薄肉構造物の座屈	92
8・3・1 はりの弾性理論	86	8・5・1 平板の座屈	92
8・3・2 薄肉はりのねじり解析	87	8・5・2 薄肉材の壁面座屈	94
8・3・3 曲げを受ける薄肉はりのせん断応		8・5・3 殻の座屈	94

第9章 非弾性変形と構成式

9・1 非弾性変形の分類	97	9・5・1 定義	104
9・2 単軸応力下の塑性変形	97	9・5・2 平面問題のヘンキーの式	104
9・2・1 応力とひずみ	97	9・5・3 ガイリンガーの式とホドグラフ	105
9・2・2 引張り・圧縮の応力-ひずみ曲線	97	9・5・4 剛塑性体の平面ひずみ問題の完全 解	105
9・2・3 結晶の塑性変形と転位	98	9・6 残留応力	105
9・2・4 単結晶および多結晶の降伏	98	9・6・1 残留応力の分類	105
9・2・5 集合組織と異方性	99	9・6・2 残留応力測定法	105
9・2・6 繰返し硬化・軟化特性とラチェット 変形	99	9・6・3 残留応力の利用	105
9・2・7 変形抵抗の温度およびひずみ速度 依存性	99	9・6・4 残留応力の除去	106
9・3 塑性構成式	100	9・7 塑性不安定	106
9・3・1 初期降伏条件	100	9・8 粘弾性変形	107
9・3・2 完全塑性体	100	9・8・1 定義	107
9・3・3 後続降伏曲面	101	9・8・2 線形粘弾性理論	108
9・3・4 最大塑性仕事の原理と流れ則	101	9・8・3 非線形粘弾性理論	108
9・3・5 負荷と徐荷	101	9・9 クリープ変形	109
9・3・6 硬化法則	102	9・9・1 定義	109
9・3・7 変形理論	103	9・9・2 定常クリープ	109
9・3・8 静水圧依存の構成式	103	9・9・3 非定常クリープ	110
9・3・9 降伏曲面の尖り点を考慮した構成 式	104	9・10 統一型非弾性構成式	111
9・3・10 粘塑性構成式	104	9・10・1 特徴	111
9・4 塑性の一般的諸定理	104	9・10・2 内部状態変数	111
9・4・1 唯一性定理	104	9・10・3 具体的な構成式と発展式	111
9・4・2 極限解析の上下界定理	104	9・11 結晶すべりに基づく構成式	112
9・5 すべり線場の理論	104	9・11・1 すべり系	112
		9・11・2 分解せん断応力	112
		9・11・3 すべり速度とひずみ速度	112

9・11・4 単結晶材料に対する構成式	113	9・12・1 定義	113
9・11・5 多結晶材料に対する構成式	113	9・12・2 損傷発展式	113
9・12 損傷変数	113	9・12・3 損傷を考慮した構成式	114

第10章 材料の強度

10・1 静的強度	116	10・3・4 高温疲労寿命	133
10・1・1 材料の破壊	116	10・3・5 高温疲労き裂の発生と進展	133
10・1・2 単軸応力下の静的強度	117	10・4 環境強度	134
10・1・3 多軸応力下の静的強度	117	10・4・1 応力腐食割れ	134
10・1・4 代表的な材料の静的強度	117	10・4・2 水素脆化割れ	135
10・1・5 強度と靱性	117	10・4・3 環境疲労	135
10・2 疲労強度	118	10・4・4 腐食疲労の発生と進展	136
10・2・1 疲労破壊	118	10・5 衝撃強度	136
10・2・2 S-N 曲線と疲労限度	118	10・5・1 衝撃強度	136
10・2・3 き裂の発生と進展	119	10・5・2 シャルピー衝撃値と遷移温度	137
10・2・4 疲労強度のばらつき	123	10・5・3 熱衝撃	137
10・2・5 疲労強度に及ぼす諸因子の影響	124	10・6 強度設計	138
10・2・6 低サイクル疲労	128	10・6・1 強度設計の目的と考慮すべき 破損形態	138
10・2・7 組合せ材の疲労	129	10・6・2 応力の分類とそれぞれに対する 評価	138
10・3 高温強度	131	10・6・3 安全確保と信頼性評価	139
10・3・1 クリーブ変形	131	10・6・4 詳細解析の適用	140
10・3・2 クリーブ破断	132	10・6・5 破壊力学の適用	140
10・3・3 クリーブき裂の発生と進展	132		

第11章 破壊力学と界面力学

11・1 線形弾性破壊力学	142	11・3 破壊靱性	149
11・1・1 線形弾性特異応力場と応力拡大 係数	142	11・3・1 種々の材料の破壊靱性	149
11・1・2 エネルギー解放率	146	11・3・2 R 曲線と引裂き係数	150
11・1・3 小規模降伏	146	11・3・3 き裂先端の拘束効果	151
11・1・4 ダグデルモデル	147	11・4 界面力学	151
11・2 弾塑性破壊力学	147	11・4・1 界面に沿うき裂	151
11・2・1 弾塑性特異応力場と J 積分	147	11・4・2 界面と交叉するき裂	152
11・2・2 J 積分とき裂先端開口変位 CTOD との関連	149	11・4・3 T 型接合板の界面き裂	152

第12章 複合材料の力学

12・1 複合材料の特質	154	12・3 粒子分散・短繊維強化複合材料の力学 特性	158
12・1・1 複合材料の特質	154	12・3・1 短繊維強化複合材料におけるシ アラグ理論	158
12・1・2 複合材料の強化形態	154	12・3・2 エシエルビーの等価介在物とそ の応用	158
12・1・3 母材の種類	154	12・4 異方性	160
12・1・4 界面問題	155	12・4・1 異方性弾性の構成式	160
12・2 一方強化複合材料の力学特性	156	12・4・2 座標変換	161
12・2・1 繊維方向弾性率とポアソン比	156	12・4・3 温度・湿度の影響	161
12・2・2 繊維直角方向弾性率とせん断弾 性率	156		
12・2・3 織物材等の力学特性	157		

12・4・4 異方性材料の強度則	161	12・7・1 応力集中	166
12・5 積層板理論	162	12・7・2 時間依存特性	166
12・5・1 古典積層理論	162	12・7・3 衝突特性	168
12・5・2 積層構成と弾性特性	163	12・7・4 疲労特性	169
12・5・3 最適設計	164	12・7・5 層間破壊	171
12・6 座屈と振動	164	12・8 試験方法	173
12・6・1 座屈の基礎式と解析例	164	12・8・1 異方性材料の評価の課題とその 特殊性	173
12・6・2 振動の基礎式と解析例	165	12・8・2 代表的な試験法とその考え方	173
12・7 強度と破壊	166		

第 13 章 材料試験および実験応力解析

13・1 静的強度試験	178	13・10 フラクトグラフィ（破面解析）	192
13・1・1 引張試験	178	13・10・1 破面観察，計測技術	192
13・1・2 圧縮試験	179	13・10・2 破壊機構と破面様相	192
13・1・3 曲げ試験	179	13・10・3 破面様相の定量結果と破壊力学 パラメータとの関連	192
13・1・4 ねじり試験	179	13・10・4 数値的破面解析技術	193
13・1・5 その他の試験	180	13・11 き裂および欠陥の検査法	194
13・1・6 材料試験機	180	13・11・1 目視試験，浸透探傷試験	194
13・2 疲労試験	180	13・11・2 超音波探傷試験	194
13・2・1 疲労試験機	181	13・11・3 アコースティックエミッション 試験	194
13・2・2 疲労強度試験と疲労限度の決定 法	182	13・11・4 放射線透過試験	194
13・2・3 その他の疲労試験	182	13・11・5 赤外線による方法	194
13・3 クリープ試験	183	13・11・6 マイクロ波，ミリ波による方法 試験	194
13・3・1 クリープおよびクリープ破断試 験	183	13・11・7 磁気探傷試験	194
13・3・2 応力リラクゼーション試験	183	13・11・8 渦流探傷試験	195
13・3・3 クリープ支配下の高温低サイク ル疲労試験	184	13・11・9 電位差法	195
13・4 環境強度試験	184	13・12 材質劣化の検査法	195
13・5 衝撃試験	184	13・12・1 焼戻し脆化	195
13・5・1 衝撃引張り，圧縮試験	184	13・12・2 炭化物脆化	195
13・5・2 シャルピー試験	185	13・12・3 σ （シグマ）相脆化	195
13・5・3 計装化シャルピー試験	185	13・12・4 熱時効脆化（スピノーダル分解 による脆化）	195
13・5・4 熱衝撃試験	185	13・12・5 照射脆化	195
13・6 硬さ試験	185	13・12・6 水素脆化	195
13・6・1 ブリネル硬さ	186	13・12・7 浸炭	195
13・6・2 ビッカース硬さ	186	13・12・8 γ - γ' 相平衡	195
13・6・3 ロックウェル硬さ	186	13・12・9 軟化	196
13・6・4 ショア硬さ	188	13・13 ひずみおよび応力の測定	196
13・6・5 各種硬さの関係	188	13・13・1 変位計	196
13・6・6 他の硬さ試験	188	13・13・2 電気抵抗ひずみゲージ，光ファ イバひずみセンサ	196
13・7 破壊靱性試験	188	13・13・3 X線による応力測定法	196
13・7・1 K_{Ic} 試験	188	13・13・4 音弾性による応力測定	197
13・7・2 J_{Ic} 試験	189	13・13・5 赤外線による応力測定	198
13・7・3 CTOD 試験	190	13・13・6 磁気ひずみによる応力測定	198
13・7・4 動的破壊靱性試験	190	13・13・7 レーザラマンによる応力測定法 試験	198
13・7・5 その他の破壊靱性	191		
13・8 疲労き裂進展試験	191		
13・9 応力腐食割れ試験	191		

13・13・8	光弾性による応力測定法……………198	13・13・12	切抜き, 切込みおよび穴あけ による残留応力測定法 ……………199
13・13・9	応力塗料, めっき法, 再結晶法 ……………198	13・13・13	画像処理法 ……………199
13・13・10	格子法, モアレ法 ……………199	13・14	微小材料の試験 ……………199
13・13・11	ホログラフィー干渉法, スペ ックル法, コースティックス 法 ……………199	13・14・1	材料物性評価試験……………199
		13・14・2	内部応力評価試験……………200
		13・14・3	薄膜の付着強度評価試験……………200