

金属材料強度試験便覧

日本材料学会編

編集委員および執筆者一覧

編集委員長

山 田 敏 郎 京都大学工学部

編集委員

足 立 正 雄	京都大学工学部	中 村 宏	川崎重工業株式会社
遠 藤 吉 郎	京都大学工学部	西 原 正 夫	株式会社神戸製鋼所
田 中 吉 之 助	京都大学工学部	野々村 泰三	明石工業高等専門学校
田 中 道 七	立命館大学理工学部	藤 原 義 堂	日本材料学会

執 筆 者

会 田 俊 夫	京都大学工学部	田 中 吉 之 助	京都大学工学部
青 山 咸 恒	株式会社豊田中央研究所	田 中 道 七	立命館大学理工学部
足 立 正 雄	京都大学工学部	田 村 今 男	京都大学工学部
伊 藤 文 人	東京都立大学工学部	寺 沢 正 男	武蔵工業大学工学部
遠 藤 吉 郎	京都大学工学部	中 村 宏	川崎重工業株式会社
大 路 清 嗣	大阪大学工学部	波 田 凱 夫	株式会社神戸製鋼所
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	西 村 尚	東京都立大学工学部
大 和 久 重 雄	日本アロイ株式会社	蓮 井 淳	慶応義塾大学工学部
奥 島 啓 式	京都大学工学部	林 卓 夫	大阪大学基礎工学部
金 沢 武	東京大学工学部	平 野 富士夫	九州大学工学部
川 田 雄 一	東京都立工科短期大学	宮 川 松 男	東京大学工学部
小 寺 沢 良 一	大阪大学基礎工学部	八 木 順 吉	大阪大学工学部
小 若 正 倫	住友金属工業株式会社	山 崎 正 八 郎	株式会社山崎精機研究所
笹 田 直	東京工業大学工学部	山 田 敏 郎	京都大学工学部
砂 本 大 造	三菱重工業株式会社	横 井 信	金属材料技術研究所

序

日本材料学会の前身である日本材料試験協会が、「材料試験便覧」を編集し丸善株式会社より出版したのは昭和32年であり、絶版となつてからすでに十数年を経ている。

工業の発展を支配するものは材料とその適正な利用であることは当時も今日も変りはないが、材料に関するその後の科学と技術の進歩・発展は、材料特に金属材料の強度に関する新しい知見をもたらしたことに鑑み、本会では3年前に綿密な計画のもとに「金属材料強度試験便覧」の編集に着手し、今日ここに刊行をみたのである。

本便覧の目的とするところは、金属材料の強度試験を行うに際して、その指針を与えると共に、試験方法そのものだけでなく、試験を必要とする理由と根拠を示し、設計者に必要な強度およびその試験に関する知識を与え、更に現場における試験担当者に強度試験の意義と重要性を理解してもらうことである。あわせて金属材料の強度試験が各種の事故の原因究明のために行われる場合が多くなっていることをも考慮して、特に破損、破壊に関しては詳細な解説を与えるよう配慮されている。

本便覧は第Ⅰ編「総論」と第Ⅱ編「各論」からなり、総論においては金属材料の強度と試験に関する基本的な考え方と意義を総括的に述べ、適正な指針が与えられている。各論においては各種の試験について専門家の執筆により、実際に試験に従事する技術者にとって必要な試験方法が詳述されている。本便覧の執筆ならびに編集に当られた諸氏は、わが国における権威ある研究者、技術者であり、今日発刊をみるに至ったのはこれら諸氏の献身的努力によるものであり、深く謝意と敬意を表するものである。

本便覧が金属材料を使用するすべての工業界における技術者、設計者のみならず研究者にとっても常に座右の書として活用されることを念願するものである。

昭和52年1月

社団法人 日本材料学会
会 長 功 刀 雅 長

目 次

I 総 論

第1章 金属材料の性質と

強度1

1.1 弾性的性質1

1.2 塑性的性質3

1.2.1 降伏条件3

1.2.2 塑性変形4

a. すべり変形と降伏4

b. 加工硬化6

1.3 組織と力学的性質8

1.3.1 固溶体強化8

1.3.2 析出強化8

1.3.3 焼入、焼もどし、焼鈍9

1.4 破 壊9

1.4.1 延性破壊9

a. 延性破壊の機構10

b. 延性に及ぼす主な影響因子10

1.4.2 ぜい性破壊11

a. ぜい性材料の破壊条件12

b. き裂付近の応力と変位14

1.5 ひずみ速度に対する特性16

1.5.1 ひずみ速度の影響16

1.5.2 ひずみ速度と強度16

1.5.3 弾性波、塑性波の伝ば17

1.5.4 ひずみ速度と延性19

1.5.5 衝撃試験19

1.5.6 遷移温度19

1.6 繰返し荷重に対する特性20

1.6.1 疲労現象20

1.6.2 高サイクル疲労と低サイク
ル疲労221.6.3 高サイクル疲労における強
度特性24

a. 平均応力の影響24

b. 組合せ応力下の疲労強度26

c. 切欠効果と寸法効果27

d. 表面硬化処理材の疲労強度28

1.6.4 低サイクル疲労における強
度特性291.6.5 変動荷重による疲労と疲労
被害31a. 実働荷重による疲労とシミュレ
ーション試験31

b. 疲労被害と直線被害則32

c. 重畳波荷重下の強度37

1.6.6 疲労き裂39

a. 停留き裂39

b. き裂成長速度と応力拡大係数40

1.6.7 疲労破面41

1.7 温度に対する特性44

1.7.1 温度の影響44

1.7.2 高温試験と低温試験44

1.7.3 クリープとクリープ試験44

1.7.4 リラクセーション試験46

1.7.5 動クリープ試験と高温疲労
試験46

1.7.6 熱疲労試験と熱衝撃試験47

1.7.7 衝撃試験およびぜい性破壊
試験47

1.8 環境に対する特性47

1.8.1 応力腐食割れ48

1.8.2 環境疲労49

1.9 表面損傷51

1.9.1 表面の観察51

a. 表面の形状51

b. 表面性質53

1.9.2 摩 耗55

1.9.3 転動疲労56

1.9.4 腐 食57

1.9.5 キャビテーション・エロー

(2) 目 次

ジョン	58
1.9.6 フレッシング	59
第2章 材料特性と要素の	
強度	60
2.1 外力	60
2.2 応力	60
2.3 変形	61
第3章 構造物の強度	62
3.1 構造物の破壊と強度	62
3.2 構造物の弾性および塑性挙動	63
3.3 構造物のぜい性破壊	64
3.4 構造物の疲労破壊	65
3.5 接合部の強度	65
第4章 欠陥検査	68
4.1 非破壊検査	68
4.2 破壊検査	69
4.3 問題点	69
4.3.1 き裂の定義	69
4.3.2 不純物, 非金属介在物	70
第5章 金属材料強度試験の	
意義と分類	71
5.1 材料試験の目的と意義	71
5.1.1 目的と意義	71
5.1.2 材料試験の果す役割	71
a. 学問的立場としての材料試験	72
b. 工業的立場としての材料試験	72
5.1.3 材料試験結果の取扱いに 対する注意	74
a. 試験結果の利用について	74
b. 試験結果の解析ならびに実験計画 について	75
5.2 材料試験の分類	75
5.2.1 力学的特性値に関する試験	75
5.2.2 物理的的特性値に関する試験	76
5.2.3 化学的的特性値に関する試験	76

5.3 材料試験の自動化	76
5.3.1 引張試験機の自動化	77
5.3.2 その他の試験装置	78
5.3.3 データ処理の自動化	78
a. オンライン・リアルタイム処理	78
b. オフライン・バッチ処理	80

II 各 論

第1章 応力測定および

荷重検査	81
1.1 緒 論	81
1.2 試料表面におけるひずみと 応力	81
1.2.1 弾性ひずみと応力の関係	82
a. 主応力方向既知のとき	82
b. 主応力方向未知のとき	82
1.2.2 応力測定上の注意	83
1.3 ひずみ計によるひずみ測定	83
1.3.1 金属抵抗ひずみ計	83
1.3.2 半導体ひずみ計	84
1.3.3 繰返しひずみ測定法	88
1.4 その他の応力測定法	89
1.4.1 X線による応力測定	90
1.4.2 ぜい性塗膜法	91
1.4.3 光弾性応力測定法	93
1.5 残留応力とその測定	95
1.5.1 残留応力の成因	95
1.5.2 残留応力測定法	96
1.6 強度試験時の荷重検定	98
1.6.1 荷重指示目盛の検査	99
1.6.2 静荷重による応力状態の検 査	100
1.6.3 動荷重による応力状態の検 査	101
1.7 結 言	101

第2章 静荷重による材料

試験	103
2.1 引張試験	103
2.1.1 引張試験の目的	103
2.1.2 応力-ひずみ線図	103
a. 公称応力-ひずみ線図	103
b. 真応力-ひずみ線図	105
2.1.3 降伏条件	108
a. 最大せん断応力説	108
b. 最大せん断ひずみエネルギー説	108
c. 最大せん断応力説と最大せん断ひずみエネルギー説との比較	110
2.1.4 引張試験における破断	111
a. ぜい性材料の破断	111
b. 延性材料の破断	112
2.1.5 引張試験結果に影響を及ぼす諸因子	112
a. 試験片形状の影響	113
b. 試験温度の影響	116
c. 試験速度の影響	117
2.2 圧縮試験	118
2.2.1 圧縮試験の目的	118
2.2.2 応力-ひずみ線図	118
a. 公称応力-ひずみ線図	118
b. 真応力-対数ひずみ線図	119
c. 圧縮試験による真応力-対数ひずみ線図と引張試験による真応力-対数ひずみ線図との比較	119
2.2.3 圧縮試験における破断	120
a. ぜい性材料の破断	120
b. 延性材料の破断	120
2.2.4 圧縮試験結果に影響を及ぼす諸因子	121
a. 試験片と押し金具との間の摩擦力の影響	121
b. 試験片形状の影響	122
2.3 曲げ試験	123
2.3.1 曲げ試験の目的	123
2.3.2 応力-ひずみ線図	123
a. 弾性曲げ	123

b. 塑性曲げまたはフックの法則に従わない材料の曲げ	124
c. 大曲げ	126
d. 曲げ応力-曲げひずみ線図	126
e. 曲げモーメント-曲げひずみ線図	127
2.3.3 曲げ試験結果に影響を及ぼす諸因子	128
a. 試験片形状の影響	128
b. 押し治具先端半径の影響	130
c. 中央集中荷重曲げ試験のスパンの影響	131
2.4 ねじり試験	132
2.4.1 ねじり試験の目的	132
2.4.2 応力-ひずみ線図	132
a. 弾性ねじり	132
b. 塑性ねじりまたはフックの法則に従わない材料のねじり	133
c. ねじり試験における応力-ひずみ線図と引張試験における応力-ひずみ線図との比較	134
2.4.3 ねじり試験における破断	135
a. ぜい性材料の破断	135
b. 延性材料の破断	135

第3章 衝撃試験

3.1 衝撃試験の目的	137
3.2 衝撃試験機の種類	137
3.2.1 落錘式	138
3.2.2 振子式	138
3.2.3 回転円板式	140
3.2.4 その他	140
3.3 シャルピーおよびアイゾット衝撃試験	141
3.3.1 試験片	141
3.3.2 試験方法	143
3.3.3 衝撃試験値に及ぼす試験片形状の影響	144
3.3.4 衝撃試験値に及ぼす温度の影響	145
a. 靱性ぜい性と衝撃値	145

(4) 目 次

b. 低温ぜい性と衝撃値	146	a. ビッカース圧子	164
c. 焼もどしぜい性と衝撃値	148	b. スープ圧子	164
3.4 回転円板式衝撃試験	148	4.4.3 試験機	164
3.4.1 衝撃引張試験	148	4.4.4 くぼみ測定	165
3.4.2 衝撃ねじり試験	149	4.4.5 試料	165
3.5 ポブキンソンプレッシャー		4.4.6 測定方法	165
バー法	150	4.4.7 微小硬さに及ぼす諸因子	166
3.5.1 測定の原理	150	a. 荷重依存性	166
3.5.2 実験方法	152	b. 試料の準備法によるひずみ	166
第4章 硬さ試験	154	4.5 ロックウェル硬さ試験	166
4.1 硬さ試験法の分類	154	4.5.1 ロックウェル硬さ	166
4.2 ブリネル硬さ試験	154	4.5.2 圧子	169
4.2.1 ブリネル硬さ	154	4.5.3 試験機	169
4.2.2 圧子	155	4.5.4 試料	170
4.2.3 試験機	156	4.5.5 測定方法	171
4.2.4 くぼみ測定	157	4.5.6 ロックウェル硬さに	
4.2.5 試料	157	及ぼす諸因子	172
4.2.6 測定方法	157	a. 圧子形状誤差	172
4.2.7 ブリネル硬さに及ぼす		b. 試験面のあらさ	172
諸因子	160	c. 試料面の傾斜	172
a. くぼみの形状	160	d. 荷重負荷速度	172
b. 使用温度	160	e. 荷重保持時間	173
4.3 ビッカース硬さ試験	160	4.6 ロックウェル・スーパーフ	
4.3.1 ビッカース硬さ	160	イシャル硬さ試験	173
4.3.2 圧子	160	4.6.1 ロックウェル・スーパー	
4.3.3 試験機	161	フィシャル硬さ	173
4.3.4 くぼみ測定	162	4.6.2 圧子	174
4.3.5 試料	162	4.6.3 試験機と測定法	174
4.3.6 測定方法	162	4.6.4 試料	175
4.3.7 ビッカース硬さに及ぼす		4.7 ショア硬さ試験	175
諸因子	163	4.7.1 ショア硬さ	175
a. くぼみの測定誤差	163	4.7.2 試験機	175
b. 加工層の影響	163	4.7.3 試料	177
c. 表面状況と傾きの影響	163	4.7.4 測定方法	177
d. 測定温度	163	4.7.5 硬さに及ぼす諸因子	177
4.4 微小硬さ試験	163	a. 試料の厚さと重さ	177
4.4.1 微小硬さ	163	b. 表裏面のあらさ	177
4.4.2 圧子	164	c. 試料表面の加工層	177
		d. ハンマの先端半径	178

e. ハンマの運動	178	5.2.1 試験片の準備	211
f. 操作ハンドルのもどし回転速度	178	a. 素材からの切出し熱処理および加工	211
g. 操作ハンドルの往きの回転速度	178	b. 試験片の形状と寸法	214
h. 試料に対する押付力	178	5.2.2 高サイクル疲労における標準試験法	217
i. 試験機の傾斜	178	a. 両振り応力下の $S-N$ 曲線の求め方	217
j. 試料面の傾斜	178	b. 平均応力を伴う場合の試験法	218
k. 支持台の重量	178	c. 定応力試験と定ひずみ試験	218
4.8 高温硬さ試験	178	d. 試験結果がばらつくときの耐久限度および時間強度の求め方	219
4.8.1 高温硬さ	178	5.2.3 低サイクル疲労試験法	221
4.8.2 圧子	178	5.2.4 疲労強度のばらつきを考慮した試験法と結果の統計的処理	222
4.8.3 測定方法	179	a. $P-S-N$ 線図	222
4.8.4 試験機	180	b. 順序統計量による推定と仮説の検定	226
a. 明石高温ビッカース硬度計	180	c. 母集団が正規分布をなす場合の推定と検定	228
b. 高温微小硬さ試験機	181	d. プロビット法とステアケース法	231
4.9 硬さ試験機の管理	181	5.2.5 迅速試験法と簡易試験法	237
4.9.1 ロックウェル硬さ基準片	181	a. 単一試験片による応力階差試験法	238
4.9.2 ロックウェル・スーパーフィシャル硬さ基準片	182	b. ロカチ法	238
4.9.3 ショア硬さ基準片	182	c. ブロー法とその修正法	239
4.9.4 ビッカース硬さ基準片	184	d. 履歴仕事とその関連量の計測による方法	240
4.9.5 ブリネル硬さ基準片	184	5.2.6 実働荷重の解析とシミュレーション試験法	241
4.9.6 硬さ試験機の管理と実態調査	184	a. 実働荷重の解析法	241
付 表	186	b. シミュレーション試験法	246
第5章 疲労試験	193	c. 直線被害則の検討と修正 $S-N$ 曲線の求め方	248
5.1 基礎事項	193	5.3 疲労試験機	251
5.1.1 繰返し応力と繰返しひずみ	193	5.3.1 疲労試験機の種類と性能	251
5.1.2 高サイクル疲労強度	196	5.3.2 回転曲げ疲労試験機	254
a. $S-N$ 線図	196	5.3.3 曲げ・ねじり疲労試験機	256
b. 両振り耐久限度	198	5.3.4 引張圧縮疲労試験機	259
c. 耐久限度線図	200	a. 機械振動式疲労試験機	259
d. 組合せ応力下の耐久限度	202	b. 油圧式疲労試験機	265
5.1.3 低サイクル疲労強度	204		
5.1.4 実働荷重とシミュレーション荷重	205		
5.1.5 応力拡大係数	209		
5.2 疲労試験方法と試験結果の整理	211		

(6) 目 次

c. 動電式疲労試験機	269	6.3.1 クリープ破断試験方法	330
d. 電気油圧サーボ式疲労試験機	271	a. クリープ破断試験方法の規格	330
5.3.5 高, 低温試験装置と内圧試験装置	273	b. クリープ破断試験機	330
a. 高温試験装置	273	c. クリープ破断時間のばらつきと要因	331
b. 低温試験装置	274	6.3.2 クリープ破断データ	332
c. 内圧試験装置	275	a. クリープ破断データの整理	332
5.3.6 衝撃疲労試験機	276	b. クリープ破断データの外挿	332
形状係数の図集 (付図)	282	6.3.3 特殊な条件下のクリープ破断試験	337
付 表	297	6.4 リラクセーション試験	338
第6章 高温強度試験	312	6.4.1 応力のリラクセーション	338
6.1 高温引張試験	312	6.4.2 リラクセーション試験方法	339
6.1.1 許容応力と高温引張性質	312	a. リラクセーション試験方法の規格	339
6.1.2 高温引張試験方法	313	b. リラクセーション試験機	341
a. 高温引張試験方法の規格	313	c. リラクセーション試験機の精度と試験方法	342
b. ひずみ速度の影響	314	6.4.3 リラクセーション試験結果の整理	344
c. 試験温度の影響	315	a. リラクセーション曲線	344
d. 高温引張試験機	317	b. リラクセーション設計線図	345
e. 高温引張試験に際しての注意	318	c. リラクセーションの塑性ひずみ速度	345
6.1.3 高温引張試験データの整理	319	d. リラクセーションとクリープの関連性	346
6.2 クリープ試験	320	6.5 多軸応力下のクリープ試験	347
6.2.1 クリープとクリープ破断	320	6.5.1 引張-ねじり組合せクリープ試験	348
a. 許容応力とクリープおよびクリープ破断性質	320	6.5.2 軸荷重-内圧組合せクリープ試験	349
b. クリープ試験とクリープ破断試験	321	6.5.3 2軸引張クリープ試験	350
c. クリープ曲線	321	6.5.4 内圧厚肉円筒クリープ試験	351
6.2.2 定応力クリープ試験	322	6.5.5 回転円板クリープ試験	352
6.2.3 クリープ試験方法	322	6.5.6 静水圧クリープ試験	352
a. クリープ試験方法の規格	322	6.5.7 切欠きクリープ試験	353
b. 応力による誤差	322	6.6 変動応力・変動温度下のクリープ試験	355
c. 温度による誤差	324		
d. クリープ試験機	324		
e. クリープ試験に際しての注意	325		
6.2.4 クリープ試験データの表示	326		
a. クリープ限度とクリープ制限応力	326		
b. クリープデータの数式表示	327		
c. クリープ設計線図	328		
6.3 クリープ破断試験	330		

6.6.1	変形強度の推定	355
a.	時間硬化説およびひずみ硬化説	356
b.	時間硬化説とひずみ硬化説の比較	356
c.	その他の仮説	357
d.	組合せ応力下の問題	357
6.6.2	破断強度の推定	358
6.7	動クリープ試験	359
6.7.1	動クリープ試験機	359
6.7.2	動クリープ試験結果の例	360
a.	動クリープ曲線と時間強度線図	360
b.	繰返し速度の影響	361
c.	切欠きの影響	362
6.7.3	動クリープ強度の推定	362
a.	動クリープ破断強度	362
b.	動クリープ変形強度	364
c.	その他の結果	365
6.8	高温疲労試験	366
6.8.1	高温疲労試験の必要性和その種類	366
6.8.2	高温高サイクル疲労試験法	367
6.8.3	高温高サイクル疲労強度について	368
6.8.4	高温低サイクル疲労試験法	369
6.8.5	高温低サイクル疲労強度について	372
6.9	熱疲労試験	374
6.9.1	熱疲労試験の必要性	374
6.9.2	熱ひずみ自己拘束型の試験	374
6.9.3	熱ひずみ外部拘束型	375
6.9.4	機械的ひずみ重畳型	376
6.9.5	モデルまたは実物による熱疲労試験	378
6.9.6	熱疲労強度について	379
6.10	熱衝撃試験	379
6.10.1	熱衝撃破壊とは	379
6.10.2	熱衝撃試験法	380
6.10.3	熱衝撃強度について	381

第7章 加工性試験 382

7.1	溶接性試験	382
7.1.1	溶接割れ試験	383
a.	重ね継手溶接割れ試験	384
b.	スリット形溶接割れ試験と斜めY形溶接割れ試験	384
c.	U形溶接割れ試験	384
d.	その他	384
7.1.2	溶接部の最高硬さ試験	384
7.1.3	溶接部の切欠きぜい性および延性試験	385
7.2	焼入性試験	387
7.2.1	破面検査法	387
7.2.2	P-F法	384
7.2.3	U曲線法	384
7.2.4	ロックウェル—インチ法	388
7.2.5	ジョミニー法	389
7.2.6	ジョミニー式一端焼入法	389
7.2.7	変則ジョミニー法	390
7.2.8	D_I 法	390
7.3	被削性試験	391
7.3.1	切削抵抗に関する試験法	392
7.3.2	工具寿命に関する試験法	392
7.3.3	仕上面品質に関する試験法	394
7.3.4	切くず処理に関する試験法	394
7.4	塑性加工性試験	395
7.4.1	プレス成形性	395
a.	深絞り性	395
b.	張出し性	395
c.	伸びフランジ性	396
d.	曲げ加工性	397
7.4.2	プレス成形性試験	397
a.	深絞り性試験	397
b.	張出し性試験	400
c.	伸びフランジ性試験	401
d.	曲げ加工性試験	401
7.4.3	予変形材のプレス成形性	402

(8) 目 次

a. 単純変形経路と複合変形経路	403	9.1.2 摩耗の測定と表示	430
b. 複合変形経路をとる場合の変形限界線図	403	a. 重量測定	431
c. 成形高さで比較した場合の変形経路の効果	404	b. 体積測定	431
d. 成形限界線図	405	c. ラジオアイソトープ法	431
7.4.4 基礎的材料特性による成形性の評価	406	d. 摩耗量の表示	431
第8章 要素試験	408	e. 摩耗試験の同時測定項目	432
8.1 ワイヤロープの強度試験	408	9.1.3 摩耗試験形式	433
8.1.1 JISに規定する強度試験	408	a. 筒形	433
a. 素線の強度試験	408	b. ピン/回転円板形	433
b. ワイヤロープの(引張)切断試験	408	c. ピン/回転円筒形	433
8.1.2 ワイヤロープの引張試験	409	d. 平板/回転円筒形	434
8.1.3 ワイヤロープの衝撃引張試験	410	e. 四球式	434
8.1.4 ワイヤロープの疲労試験	410	f. ころがりを伴う試験形式	435
8.2 ばねの強度試験	414	g. 実機試験	435
8.2.1 ばねの強度試験	414	9.1.4 試験条件による摩耗率の相違	435
8.2.2 ばねの疲労試験	415	9.2 転動疲労	437
8.3 ねじの強度試験	416	9.2.1 転動疲労の特徴と影響因子	437
8.3.1 ねじ部品の強度試験	416	9.2.2 接触応力	440
8.3.2 ねじ部品の疲労試験	418	9.2.3 EHL	440
8.3.3 ねじ結合体の強度試験	419	9.2.4 転動疲労試験機的方式	441
8.4 歯車の強度試験	420	9.2.5 モデル試験機および実物試験機の例	443
8.4.1 歯車の曲げ強度試験方法	421	9.3 腐食試験	447
a. 静的曲げ強度試験方法	422	9.3.1 腐食試験の問題点	447
b. 曲げ疲労強度試験法	422	9.3.2 腐食試験のプログラム例	449
8.4.2 歯車の歯面強度試験方法	425	9.3.3 現用の腐食試験の標準方法と推奨手段	452
a. ローラ試験片によるピッチング試験	425	9.3.4 標準化されていない現用の腐食試験法	452
b. 歯車の運転試験によるピッチング試験	426	第10章 強度に及ぼす環境効果	457
8.4.3 歯車のスクーリング強度試験方法	428	10.1 応力腐食割れ・水素ぜい性	457
第9章 表面損傷試験	430	10.1.1 応力付加方法	457
9.1 摩耗試験	430	a. 定荷重式	457
9.1.1 摩耗試験概説	430	b. 定ひずみ式	457
		c. K _{1sc} による割れ感受性の評価	459

d. 定ひずみ速度試験	459	11.5 電子顕微鏡による金属組織	
10.1.2 試験環境	460	観察法	484
a. オーステナイト系ステンレス鋼の 塩化物による応力腐食割れ	460	11.5.1 試料の調整	484
b. 炭素鋼の応力腐食割れ	461	a. レプリカ法	484
c. 高張力鋼の硫化物腐食割れ	461	b. 抽出レプリカ法	486
d. 黄銅のアンモニアによる応力 腐食割れ	462	c. 透過電顕薄膜作成法	486
10.2 環境疲労	464	11.5.2 電子顕微鏡	487
10.2.1 腐食疲労	464	11.5.3 電顕像の解釈	489
a. 速度ならびに波形効果	464	11.6 走査電子顕微鏡	492
b. 応力種類の影響	467	11.7 その他の電子顕微鏡	493
c. 腐食液	467	第12章 構造物試験	496
10.2.2 吸着疲労	469	12.1 構造物の屋内試験	496
a. 大気環境	469	12.1.1 試験の目的と計画	496
b. 油中疲労	469	12.1.2 試験体の製作	496
第11章 金属組織試験	471	12.1.3 試験装置	497
11.1 肉眼組織観察	471	a. 構造物試験機	497
11.1.1 破面観察	471	b. 耐力床と反力壁	497
11.1.2 肉眼腐食組織	472	c. 載荷用ジャッキ	497
11.1.3 サルファープリントおよび フォスフォラス(リン)プリ ント	473	d. 振動台	498
11.2 光学顕微鏡組織観察	473	e. 起振機	498
11.2.1 試片の調整	474	f. 風 洞	498
a. 試片の採取	474	12.1.4 試験方法	498
b. 研 摩	474	a. 境界条件	498
c. 腐 食	476	b. 載荷条件	500
11.2.2 顕微鏡	476	c. 計 測	502
11.2.3 光学顕微鏡観察法	477	12.2 構造物の屋外試験	504
11.3 結晶粒度測定	480	12.2.1 試験の目的と計画	504
11.3.1 結晶粒現出法	480	12.2.2 野外における構造物の特 性	504
11.3.2 結晶粒度算出法	481	a. 単純な応用力学理論の限界	504
11.4 鋼中非金属介在物の顕微鏡 的試験法	483	b. 支持条件のあいまいさ	505
11.4.1 非金属介在物の種類	483	c. 温度の影響	505
11.4.2 試験片の採取および検鏡	483	d. 測定に影響するその他の要素	505
11.4.3 清浄度の判定	484	12.2.3 静的荷重による試験	505
		a. 荷 重	505
		b. 応力とひずみの測定	506
		c. たわみと変形の測定	507
		d. 支点反力の測定	510
		12.2.4 動的荷重による試験	511

(10) 目 次

a. 荷 重	511	14.3 巨視的破面の特徴	537
b. 応力とひずみの測定	512	14.4 微視的破面における特徴的 模様	538
c. たわみと振動変位の測定	513	14.4.1 粒内破壊	539
d. 荷重と反力の測定	515	a. 延性破壊	539
第13章 ぜい性破壊試験	517	b. ぜい性破壊	539
13.1 緒 言	517	c. 疲労破壊	540
13.1.1 ぜい性破壊の一般的特徴	517	14.4.2 粒界破壊	541
13.1.2 ぜい性破壊強度設計	518	14.5 破面の定量解析	542
13.2 ぜい性破壊の力学的基礎	518	14.5.1 ストライエーション解析	542
13.2.1 破壊力学の基礎	518	14.5.2 ストレッチゾーン解析	543
a. 線型破壊力学	518	14.5.3 その他	543
b. 弾塑性き裂	519	第15章 非破壊試験	545
c. K , ϕ , ρ の関係	520	15.1 非破壊試験の目的	545
13.2.2 ぜい性破壊の条件	520	15.2 放射線透過試験	546
13.3 ぜい性破壊試験	521	15.2.1 放射線源	546
13.3.1 ぜい性破壊発生試験	522	a. X線と低エネルギーX線装置	546
a. ディープ・ノッチ試験	522	b. 高エネルギーX線装置	547
b. 溶接ビード付広幅引張試験	524	c. γ 線と γ 線装置	547
c. 表面切欠き角変形付広幅試験	525	d. 放射線源の選択	549
d. COD曲げ試験	526	15.2.2 物質による放射線の吸収	549
13.3.2 伝ば停止特性試験	528	15.2.3 X線フィルムと写真法	550
a. Robertson 試験	528	15.2.4 X線透視試験と蛍光増倍 管	552
b. 二重引張試験	529	15.2.5 透過写真の観察方法	552
c. DCB試験	530	15.3 超音波探傷試験	553
13.3.3 遷移温度試験	530	15.3.1 超音波探傷試験法の原理と パルス反射式超音波探傷	553
a. シャルビー衝撃試験	530	15.3.2 音波の性質	554
b. NRL落重試験	531	a. 音波の速度, 周波数, 波長	554
第14章 破面解析	533	b. 音波の反射と透過	554
14.1 概 説	533	c. 斜入射の場合の反射, 透過, 屈折	555
14.2 破面解析技術	534	d. 超音波の指向性	556
14.2.1 肉眼, ルーペ, 実体顕微鏡 による巨視的解析	534	e. 超音波の減衰	556
14.2.2 金属顕微鏡	534	15.3.3 探触子	557
14.2.3 透過電子顕微鏡	534	15.3.4 欠陥の大きさの測定	558
14.2.4 走査電子顕微鏡	535	15.4 磁粉探傷試験	558
14.2.5 破面の保存および処理	536	15.4.1 磁粉探傷試験の原理	558
14.2.6 立体解析およびマッチング 解析	536		
14.2.7 その他	536		

a. 原理	558	a. 相関係数の求め方	575
b. 電流による磁場	559	b. 母相関係数の推定	575
c. 磁束密度	560	16.3.3 回帰分析および推定	576
15.4.2 磁粉探傷試験の実施	560	a. 直線回帰	576
a. 前処理	560	b. 直線回帰の応用	576
b. 磁化	560	16.4 要因の配置および分散分析	579
c. 磁粉の適用	561	16.4.1 確率化計画	579
d. 磁粉模様の観察	561	16.4.2 実験データの解析, 分散分	
e. 脱磁	561	析	580
15.5 電気的試験	561	16.5 1元配置法(1因子実験)	581
15.5.1 電磁誘導試験	561	16.5.1 繰返し数が一定の場合	581
15.5.2 電気抵抗法	562	a. 実験方法	581
15.6 浸透探傷試験	563	b. データの構造模型	582
第16章 実験計画法	565	c. 分散分析	583
16.1 実験計画法の目的および		d. 最適水準の決定	587
その概要	565	16.5.2 繰返し数が各水準で一定で	
16.1.1 実験計画の目的	565	ない場合	589
16.1.2 実験計画の実施要領	566	16.6 乱塊法	591
a. 実験目的の明確化	566	16.6.1 実験方法	591
b. 情報の整理	566	16.6.2 データの構造模型	592
c. 因子の選定	566	16.6.3 分散分析	593
d. 交互作用	567	16.6.4 最適水準の決定	594
e. 交絡	567	16.7 ラテン方格法	594
f. 水準の選定	567	16.7.1 実験方法	595
g. 誤差項	568	16.7.2 分散分析	597
h. 実験順序の確率化	568	16.7.3 仮説の検定	597
i. 実験計画の方式	569	16.7.4 最適水準の決定	598
16.1.3 実験計画の実際	570	16.8 2元配置法(2因子実験)	598
16.2 推定と検定	570	16.8.1 2元配置法(繰返しのない	
16.2.1 母数の推定	570	場合)	599
a. 母平均の推定	570	16.8.2 2元配置法(繰返しをラン	
b. 母分散の推定	572	ダムに入れた場合)	600
16.2.2 仮説検定	572	a. 実験方法	601
16.2.3 検定の方法	573	b. データの構造模型	601
a. 分散に関する検定	573	c. 分散分析	601
b. 平均値に関する検定	573	d. 仮説の検定	602
16.3 相関および相関係数	574	e. 最適水準の決定	603
16.3.1 散布図	574	16.8.3 2元配置法(繰返しを乱塊	
16.3.2 相関分析	575	法で入れた場合)	604

(12) 目 次

a. 実験方法	604	16. 10. 5 線点図による割り付け方	619
b. データの構造模型	605	16. 11 直交配列表による実験計画	
c. 分散分析	605	(3水準の場合の実験)	620
d. 仮説の検定	605	16. 11. 1 交互作用がない場合	620
e. 最適水準の決定	606	16. 11. 2 交互作用がある場合	622
16. 9 分割法	606	16. 12 直交配列表によるその他の	
16. 9. 1 1段分割法	607	実験の割り付け	623
a. 1次因子をA, 2次因子をBとし,		16. 12. 1 分割法	625
Aの繰返しを乱塊法で入れた場合	607	16. 12. 2 交絡法	626
b. 1次因子をA, 2次因子をBとし,		16. 13 各種の実験計画法の比較お	
Aの繰返しをランダムに入れた		よびその選定	627
場合	609	16. 13. 1 1因子実験の場合	627
16. 9. 2 2方分割法	610	16. 13. 2 多因子実験の場合	628
16. 9. 3 多方分割法	611	a. 2元配置法	628
16. 9. 4 測定だけをm回する分割		b. 分割法	628
実験	611	c. 直交配列表による実験計画法	628
16. 10 直交配列表による実験計画		付 表	630
(2水準の場合の実験)	612	付 録 1. 金属材料強度試験方法	
16. 10. 1 直交配列表	613	各国規格一覧表	641
16. 10. 2 2水準の場合の実験	614	2. 単位の換算率表	645
16. 10. 3 交互作用がない場合の2水		索 引	649
準の実験	615		
16. 10. 4 交互作用がある場合の2水			
準の実験	618		

I 総 論

第1章 金属材料の性質と強度

1.1 弾性的性質

応力とひずみが比例関係にあり、応力とひずみが1対1に対応し、時間おくれをとともなわないときには、その物体は Hooke の法則に従うことになり、その物体は弾性体である。実用材料においては、ある応力に達するまでは弾性が保たれる。この上限の応力を弾性限と呼ぶ。しかし、弾性限以下の応力においても、厳密にみれば、応力に対してひずみが時間おくれをもつことがあり、この性質を擬弾性 (anelasticity) と呼び、ひずみが平衡値に漸近する現象を弾性余効と呼ぶ。

弾性体においては、垂直応力 σ がかったとき、 σ とその方向の縦ひずみ ϵ とは比例し、また、せん断応力 τ がかったとき、 τ とそれによるせん断ひずみ γ ともまた比例する。この比例定数をそれぞれ、縦弾性係数またはヤング率 E 、および横弾性係数またはせん断弾性係数 G という。すなわち

$$E = \sigma / \epsilon, \quad G = \tau / \gamma$$

である。垂直応力がかかったときに、その応力に垂直方向のひずみと、応力の方向のひずみとの比は一定であって、この比をポアソン比 ν または $1/m$ であらわす。 m はポアソン数という。また、弾性体の全表面に一樣な応力 (圧力) がかったときに、その応力と体積ひずみとは比例し、その比例定数を体積弾性係数 K という。

これらの比例定数は、弾性範囲内において一定であって、これらを弾性定数という。弾性定数としては、上に記載したものの他に各種の定義によるものがあるが*、等方性体においては、弾性定数のうち独立なものは2個である**。

一般に、垂直応力 σ_x, σ_y および σ_z 、せん断応力 τ_{xy}, τ_{yz} および τ_{zx} が働くとき、垂直ひずみ ϵ_x, ϵ_y および ϵ_z 、せん断ひずみ γ_{xy}, γ_{yz} および γ_{zx} は弾性定数を用いて次のように書くことができる。

$$E\epsilon_x = \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)$$

* 応力とひずみの関係を一般的に示すには、弾性スティフネスまたは弾性コンプライアンスを用いることが多いが、等方性体の場合には、弾性スティフネスは Lamé の定数 λ, μ に帰着される。

** 弾性定数 $E, G, \nu, K, \lambda, \mu$ の間には次の関係がある。

$$E = (3\lambda + 2\mu)\mu / (\lambda + \mu), \quad G = E/2(1 + \nu) = \mu, \quad 3K = E/(1 - 2\nu) = 3\lambda + 2\mu, \\ \lambda = \nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu), \quad \nu = \lambda/2(\lambda + \mu)$$

(2) I 総論 第1章 金属材料の性質と強度

表 1.1 弾性定数 E, G, ν ($E, G: 10^4 \text{ kg/mm}^2$)

材 料	縦弾性係数 (E)	横弾性係数 (G)	ポアソン比 (ν)
マグネシウム	0.40~0.45	0.15~0.17	0.33
アルミニウム	0.72	0.27	0.34
ジュラルミン	0.70~0.72	0.27	0.34
超ジュラルミン	0.75		
チ タ ン	1.05		
軟 鋼	2.07~2.15	0.83~0.85	0.28~0.30
硬 鋼	2.0 ~2.2	0.81~0.84	0.28~0.30
鋳 鋼	2.15	0.83	0.27
鋳 鉄	0.75~1.40	0.29~0.44	0.20~0.29
クロム 鋼	2.05~2.15		
ニッケル 鋼	2.08~2.09	0.84	
ニッケルクロム鋼	2.08		
タングステン鋼	2.16~2.23	0.84~0.87	
コ バ ル ト	1.85~2.13	0.77~0.78	
ニ ッ ケ ル	1.97~2.05	0.73~0.76	0.31
モネルメタル	1.75~1.80	0.63~0.66	0.32
銅	1.05~1.30	0.39~0.47	0.33~0.35
りん 青 銅	0.98~1.35		0.35
黄 銅	0.63~0.98	0.24~0.42	0.33
亜 鉛	0.8 ~1.3	0.32~0.40	0.33
モ リ ブ デ ン	3.33~3.50	1.70~1.40	
ロ ジ ウ ム	3.00		0.47
銀	0.81~0.82	0.29	0.38
カドミウム	0.50~0.70	0.23	0.30~0.33
サ ン	0.40~0.55	0.17~0.28	0.33
タン グ ス テ ン	3.70	1.60	0.17
白 金	1.70	0.62	0.39
金	0.81	0.28	0.42
鉛	0.15~0.17	0.08	0.40~0.45

$$E\varepsilon_y = \sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)$$

$$E\varepsilon_z = \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$G\gamma_{xy} = \tau_{xy}, \quad G\gamma_{yz} = \tau_{yz},$$

$$G\gamma_{zx} = \tau_{zx}$$

弾性定数は、結晶体において
は、一定の原子配列のもとにお
ける結合力に関係するものであ
るから、単結晶においてはその
方向によって弾性定数が異なる
ことは当然である。しかし実用
材料は多結晶であり、等方等質
であると考えられる場合が多い
から、特に非等方的な場合を除
いて、方向に無関係な値と考
えてよい。実用の材料について
の、縦弾性係数、横弾性係数、
ポアソン比の数値を表 1.1 に
示す。弾性定数は構造鈍感であ
るが、温度によって変化する。
縦弾性係数の温度による変化を
図 1.1 に示す。温度が高い範囲
においては、静的あるいは動的
の測定方法の相違によって得ら

れる値が異なるおそれがある。

最初に述べたように、巨視的には、材料は
応力が弾性限に達すると弾性関係を失い、つ
づいて塑性変形を生じる。これらの状態にい
たることをそれぞれ弾性破損および降伏とい
う。

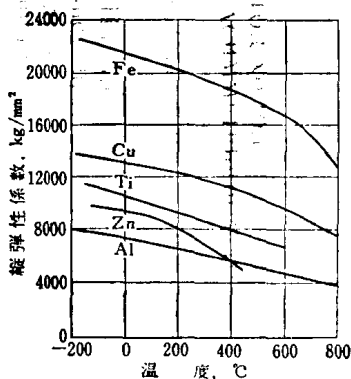


図 1.1 縦弾性係数の温度による変化