

金属疲労の基礎と 疲労強度設計への応用 (増補)

工学博士 中村 宏

工学博士 堀川 武 共著

博士(工学) 松原 剛

コロナ社

ま え が き

著者らは、金属材料の疲労強度に関する研究と実際の機械・構造物の疲労強度の問題に関する仕事を行ってきた^{1),2)}。企業の設計技術者からは、疲労強度評価法と疲労強度データの使い方に関する平易な説明を求められることをしばしば経験してきた。特に、疲労強度設計の立場から金属疲労の基礎的事柄とデータの使い方に主眼をおいたテキストが求められていることがわかった。

疲労強度の研究はドイツの鉄道技師であったヴェーラーによって鉄道車軸に関して本格的に実施された。それ以来、160年余の月日が流れている古い研究分野であるが、全世界で年間数千件の論文や資料が発表されていることから見ても、なお今日的な解決課題を含んでいる分野である。

最近では、応力の繰返し数で 10^7 回を越えて 10^9 回の領域を扱う“ギガサイクル疲労”の研究が行われて、その破壊機構に関して様々に議論されている。この場合に疲労き裂が材料の表面からではなく、内部から発生し、S-N線図が低応力側に二段階に折れ曲がって低下する。

また、最近の遊技機の事故や鋼構造橋の劣化の問題などに見られるように維持管理と補修の問題にも疲労損傷に関する知識の必要性が再認識される社会情勢にある。

著者の一人は旧国鉄の鉄道技術研究所で、主として鉄道車両の各部材の疲労強度問題に関する経験を有し、その後、著者らの川崎重工業(株)技術研究所、龍谷大学理工学部での研究成果を「機械の研究」Vol. 53, No. 12~Vol. 55, No. 11に発表した。本著はその内容を基礎にその後の研究成果や資料を追加してとりまとめた。

本書は企業の設計技術者に利用していただくという視点で書かれている。1章は疲労強度設計の枠組みとして、疲労限度設計の全体像がわかるように工夫

した。2章は疲労強度の基礎とし、疲労強度に関する用語の説明に当てている。3章は疲労強度に及ぼす影響因子について平易に説明し、1章で述べた疲労限度設計に使う影響因子の評価を定量的に行ううえでの必要資料としての位置づけを担っている。4章は実働荷重下の疲労強度と疲労き裂進展挙動を説明し、疲労寿命推定法がわかるようにした。5章は疲労き裂進展挙動と寿命推定法についてまとめている。6章は実機の疲労強度評価に関して著者らの経験したことを述べている。文章の表現は可能な限り平易にとりまとめることを心掛けた。関係者の参考になれば幸いである。

2008年7月

著 者

増補にあたって

本書は発行以来17年、5刷を重ねるに至り、その間に疲労強度研究は格段に進んでいる。実機応用の観点で見れば、疲労き裂と材料欠陥に対する評価法の進歩は特に著しく実用例も多くみられるようになった。企業の設計技術者に利用していただくという視点を維持しつつ、今回の増補を機に旧版で説明できていなかった疲労き裂開閉口と組み合わせ応力の評価を新しく追加した。さらに、き裂進展に影響する因子とき裂進展下限界の節では実用の観点からのデータを増補して充実を図った。内部欠陥からのき裂進展に関して改訂を行い、加えて設計者の便を考慮して鋳鋼材の疲労強度評価過程を詳細に説明している。また、新しい高周波焼入れ技術は、例えば自動車用変速機小型歯車の疲労強度向上に大きく寄与しており、小型平歯車を使った疲労試験結果を追加した。さらに、ネジ継手の疲労強度評価法とその疲労試験結果についても新しい項を設けた。関係者の参考になれば幸いである。

2026年2月

著 者

目 次

1. 疲労強度設計の基礎

1.1 疲労強度設計の枠組み	1
1.2 疲労限度設計	4
1.3 疲労寿命設計	10
1.4 損傷許容設計	11

2. 金属疲労強度の基礎知識

2.1 材料の変形と破壊	14
2.1.1 金属材料の機械的性質	14
2.1.2 破壊の微視的様相	18
2.2 疲労破壊の特徴	19
2.2.1 微視的挙動と疲労き裂の発生	19
2.2.2 疲労き裂の進展	25
2.2.3 疲労破面の特徴	27
2.3 疲労に関する用語	31

3. 疲労強度の影響因子

3.1 機械的性質と疲労強度	42
3.1.1 引張強さと疲労限度	42
3.1.2 硬さと疲労限度	46
3.2 応力集中の影響	48
3.2.1 切欠係数 β	49
3.2.2 切欠材の分岐点	52

3.2.3 切欠係数 β の推定式	54
3.3 平均応力の影響	57
3.3.1 基本的視点	58
3.3.2 平均応力評価式	58
3.3.3 耐久限度線図	59
3.4 組合せ応力の影響	61
3.4.1 疲労強度の傾向	61
3.4.2 疲労限度評価式	63
3.5 表面粗さの影響	70
3.6 表面硬化処理の影響	73
3.6.1 高周波焼入れ	73
3.6.2 タフトライド処理	79
3.6.3 表面薄膜処理	83
3.6.4 浸炭・窒化处理	85
3.6.5 その他の表面処理	87
3.7 腐食環境と疲労強度	89
3.7.1 腐食環境下の疲労強度	90
3.7.2 材料の引張強さと腐食疲労強度	92
3.7.3 腐食疲労破壊防止法	92
3.8 高温環境，低温環境の影響	94
3.8.1 高温環境	94
3.8.2 低温環境	97

4. 実働荷重と疲労寿命

4.1 実働荷重下の疲労強度	99
4.1.1 実働応力波形と疲労試験波形	99
4.1.2 変動応力振幅疲労試験	101
4.1.3 重畳波形疲労試験	102
4.1.4 間欠負荷応力波形疲労試験	103
4.2 線形累積損傷則	104

4.2.1	ヒステリシスループと疲労損傷	104
4.2.2	線形累積損傷則	109
4.3	重畳波形下の疲労試験結果	118
4.4	間欠負荷応力波形下の疲労試験結果	120
4.5	疲労寿命推定法	121
4.5.1	疲労寿命推定の手順	121
4.5.2	応力頻度読取り法	123
4.5.3	疲労寿命の計算	125

5. 疲労き裂進展と疲労寿命

5.1	応力拡大係数	129
5.2	疲労き裂進展特性	131
5.3	疲労き裂の開閉口	134
5.4	疲労き裂進展に影響する因子	136
5.5	疲労き裂進展寿命推定	142
5.6	き裂進展の下限界	143
5.7	微小き裂	145
5.8	内部欠陥からのき裂進展	150

6. 機械部品の疲労と疲労強度設計

6.1	ボルトの疲労強度と設計	152
6.1.1	ボルトに発生する応力	152
6.1.2	内力係数の計算	155
6.1.3	ボルトの疲労強度に影響する因子	157
6.1.4	大型ボルトについての疲労試験結果	163
6.1.5	ねじ継手の疲労試験結果	166
6.2	歯車の疲労強度と設計	170
6.2.1	歯車の応力測定結果	171
6.2.2	実測応力から見た歯車の疲労強度	175

6.2.3	疲労寿命の検討	176
6.2.4	交番荷重の取扱い	178
6.2.5	交番荷重下の疲労損傷評価法	181
6.2.6	小形試験片と歯車の疲労強度比較	184
6.2.7	パルサータ疲労試験とランニング疲労試験	186
6.2.8	高周波焼入れ歯車の疲労強度	188
6.3	ディーゼル機関燃焼室壁部材の疲労寿命設計	190
6.3.1	燃焼室壁部材の疲労強度問題	191
6.3.2	鋳鋼，鍛鋼の疲労強度	195
6.3.3	疲労寿命推定法	199
6.4	船用プロペラの疲労と寿命	209
6.4.1	二軸船プロペラ翼の実働応力と疲労寿命	209
6.4.2	可変ピッチプロペラの実働応力と疲労寿命	216
6.4.3	応力拡大係数を使った検討	221
6.5	クランク軸の疲労強度	222
6.5.1	クランク軸の疲労強度	222
6.5.2	クランク軸の実働応力	227
6.5.3	実物クランク軸のき裂進展と評価	230
6.6	車軸の疲労強度と設計	234
6.6.1	車軸の強度設計	235
6.6.2	車軸の損傷例	236
6.6.3	車軸の疲労寿命設計	238
6.6.4	高周波焼入れ車軸の残留応力分布	240
6.6.5	圧入軸の疲労強度（寸法効果）	242
6.7	ねじり軸の疲労強度	243
6.7.1	ねじり疲労試験結果	243
6.7.2	寸法効果，切欠効果の検討	247
6.7.3	キー溝部の応力集中	249
6.7.4	疲労き裂の発生状況	250
6.8	車両用台車枠の疲労強度と設計	252
6.8.1	疲労強度評価基準（JIS E 4047）の使用例	252
6.8.2	疲労寿命推定のS-N線図	257

6.8.3 溶接試験片と実物台車枠の比較……………258
6.8.4 日本鋼構造協会指針（JSSC）……………259
6.8.5 普通鑄鋼材の疲労強度と JIS E 4047……………260

引用・参考文献……………266

索 引……………277

1

疲労強度設計の基礎

われわれを取り巻く巨大化，複雑化，高度化した各種機械・構造物はハード，ソフトの両面において，その信頼性，安全性の確保に多くの労力が必要である。また，金属疲労が原因で事故が発生した最近の例に見るまでもなく，製造者はもとより管理者の責任も問われている。さらに，PL法の制定に伴い製造物に対するメーカ責任はますます重いものとなっている。

機械・構造物の破損原因の6～7割が金属疲労であるといわれてきたが，技術の進歩した今日においてもその割合は変わらない。一方，金属の疲労破壊に関与する影響因子が多いこと，因子間の競合などがあることから，ますます問題解決を複雑なものにしている^{1),2)}。本章では疲労強度設計に関して概略的にその枠組みを述べる。

1.1 疲労強度設計の枠組み

機械や構造物が稼働中に受ける荷重と環境の組合せに対応して発生する損傷を分類したのが表1.1である。領域Aは腐食の影響を無視して取り扱える強度上の問題であり，破損 (break) と呼ばれている。静的破壊 (static failure)，衝撃破壊 (impact failure) や疲労破壊 (fatigue failure) がこの領域に入る。

領域Bは環境のみによる腐食 (corrosion) が問題となる領域であり，部材の全面にわたる腐食である全面腐食 (general corrosion)，二つの部品が接触

表 1.1 機械や構造物における荷重因子と環境因子
および損傷の分類

		環 境 因 子	
		あ り	な し
荷 重 因 子	あ り	領域 C：「環境破壊」 ・応力腐食割れ ・腐食疲労	領域 A：「破 損」 ・静的破壊 ・衝撃破壊 ・疲労破壊
	な し	領域 B：「腐 食」 ・全体腐食 ・隙間腐食 ・孔食	

している隙間で腐食が発生する隙間腐食 (crevice corrosion)，微小なピット状に腐食する孔食 (pitting corrosion) などの問題を扱う領域である。

領域 C は環境と外力の組合せによる強度を考えなければならない領域であり，応力の繰返しに着目すると次のように分類される。応力が一定の場合は遅れ破壊 (delayed fracture) である応力腐食割れ (stress corrosion cracking)，水素脆化割れ (hydrogen embrittlement) などが強度設計上の注意点である。また，応力が繰り返される場合は腐食疲労 (corrosion fatigue) が問題となる。

腐食疲労では金属材料の疲労限度が存在しないことから，疲労限度設計はできない。また，耐環境性材料であるステンレス鋼のボルトを海水環境下で使用した場合，孔食が発生して強度低下が予想外に大きいことを経験した。

領域 A は大気中の水分の影響を無視できない場合もあることが実験室のデータからわかっているが，ここではそこまで厳密な議論はしないことにする。

一方，材料の破壊形態による分類を表 1.2 に示す。各分類項目に対応した破壊名称を示しているが，各破壊形態に対応して多くの研究成果が報告されている。強度設計の観点から，簡単な説明を備考欄に示す。

実機に見られる破壊はこれらが単独の場合もあるが，組み合わせあった場合もある。例えば，貨物船のハッチカバーボルトの破損例では，ねじ底に応力腐食

表 1.2 破壊形態による分類

分類	破壊形態	備考
負荷形式	1) 静的破壊(単調増加荷重)	引張試験や部材の最終時に見られる
	2) 衝撃破壊(衝撃的荷重)	衝撃荷重により材料の脆化が起こりやすい
	3) 疲労破壊(繰返し荷重)	疲労損傷は繰返しせん断変形による。機械・構造物の破損事故原因の60%以上が疲労
	4) クリープ破断(一定荷重)	材料の熔融温度の約40%以上の温度環境
	5) 遅れ破壊	応力腐食割れ, 液体脆化割れ, 水素脆化割れ, 中性子照射脆化割れ
環境・温度	1) 高温疲労	高温環境の疲労。クリープを伴う場合もある
	2) 熱疲労	温度の繰返しによる熱応力の繰返し疲労
	3) クリープ	材料の熔融温度の約40%以上の温度環境
	4) 低温疲労	疲労強度は常温より, 一般に高くなる
	5) 低温脆性	寒冷地使用の溶接部材では要注意
き裂進展の安定性	1) 安定破壊	疲労き裂進展, 応力腐食割れ, その他
	2) 延性/脆性不安定破壊	大きなき裂の拡大のときに見られる
破断部の塑性変形の難易度	1) 延性破壊	塑性変形を伴う。引張試験での最終破壊
	2) 脆性破壊	塑性変形をほとんど伴わない破壊
破面の形態	1) へき開破壊	垂直力による破壊(雲母の破壊など)
	2) 延性破壊	微小空孔の合体による。ディンプルが特徴
	3) せん断破壊	せん断応力によるすべり面分離
金属組織	1) 粒内破壊	結晶粒内のすべり変形。き裂が結晶粒内を通る。例) 疲労破壊
	2) 粒界破壊	結晶粒界の弱化による。き裂が結晶粒界を通る。例) クリープ破壊, 応力腐食割れなど
腐食環境	1) 溶解型破壊	APC (active path cracking)
	2) 水素吸蔵型破壊	HE (hydrogen embrittlement)

割れによって微小なき裂が発生し、その後に疲労によりき裂が進展して破壊することを経験した。このような場合には疲労破壊に対する対策のみを行っても問題は解決しない。疲労破壊の起点となった応力腐食割れの対策を第一にするべきであるが、応力腐食割れの破面は非常に微小領域であり、主破断面では見落としがちであり、単純な疲労破壊であると判断されやすい。このような場合

4 1. 疲労強度設計の基礎

は、主破断面の次のねじの谷底にき裂が発生し、残留している場合があり、このき裂を液体窒素で冷却して開口して破面観察することで、疲労き裂の起点を観察できる場合がある。

一般的に、強度設計 (strength design) とは設計応力 (design stress) を使用材料の許容応力 (allowable stress) 以下にすることである。疲労強度設計の許容応力は部材に作用する応力の種類、使用環境、形状、材料などによって影響を受ける。

さて、疲労強度設計法を概念的に

- 1) 疲労限度設計 (耐久限度設計ともいう)
- 2) 疲労寿命設計
- 3) 疲労き裂進展寿命設計
- 4) 損傷許容設計

のように大きく分類して本書では取り扱う。

これらの疲労強度設計法に関して、その枠組みを最初に説明する。なお、疲労強度に影響する応力の種類、使用環境、形状、材料などの影響因子についての詳細は3章で述べる。

1.2 疲労限度設計

一般的に、強度設計の基本は材料の基準強さを安全率 s で除して許容応力 (allowable stress) σ_{ai} を定め、設計応力 (design stress) σ_d が σ_{ai} 以下になるようにすることである。疲労強度設計 (fatigue strength design) の場合は材料の基準強さは疲労限度 (fatigue limit) である。疲労限度は種々の因子によって影響を受けるので、その評価が難しい。また、それぞれの影響因子が競合して影響することもあるので設計者にとってはどのように取り扱えばよいか難しい場合もある。ここではそれぞれの影響因子を整理して示し、日本機械学会が提案している評価式に基づいてその取扱い方を説明する³⁾。

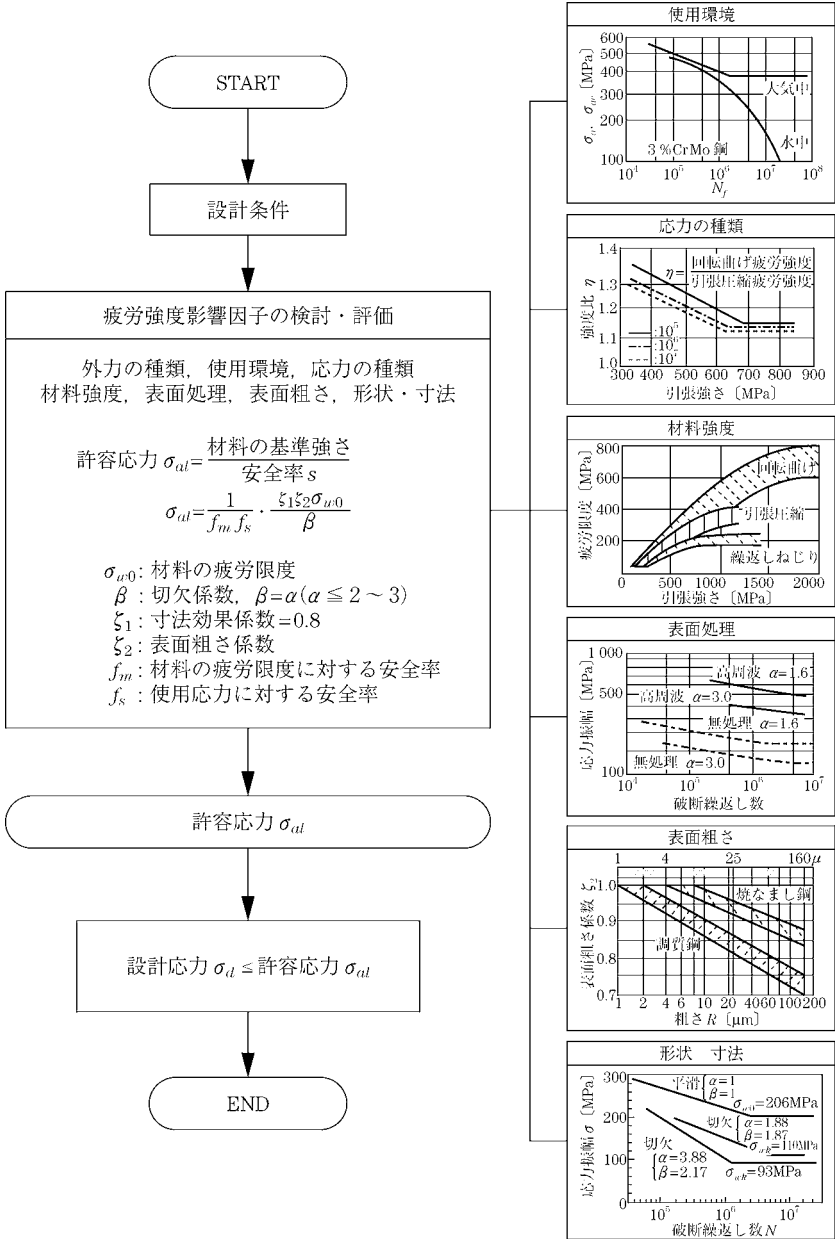


図 1.1 疲労限度設計法の流れ

索 引

	【あ】		【か】		
圧縮残留応力	22, 75	開口変位型	129	き裂進展の下限界値	11
アノード溶解	89, 94	介在物	7	き裂の停留域	53
アルミナ系の介在物	85	回転曲げ	7	き裂発生繰返し数	20
アルミニウム合金	140	回転曲げ疲労限度	42	【く】	
【い】		化学成分	15	クランク軸	222
入込み	19	化学的蒸着	83	繰返し数比	109
インヒビター	93, 190	下限界応力拡大係数範囲	40	繰返し速度の依存性	91
【う】		下限界値	143	【け】	
上降伏点	15	加工硬化過程	16	形状係数	8
内ボス側	236	化合物層	81	ゲルバーの式	58
【え】		過小応力	99, 112	【こ】	
影響因子	4	過小応力振幅	115	高温環境	94
エロージョン	96	過小応力の影響	99	硬化深さ	76
延性破壊	16	ガス浸炭	85	航空機の全機試験	31
塩浴軟窒化法	87	ガス軟窒化法	87	高周波焼入れ	7, 73, 223
【お】		過大応力	99, 112	高周波誘導加熱法	73
応力	14	型入鍛造	223	公称応力	14
応力-ひずみ線図	15	可変ピッチプロペラ	216	公称ひずみ	14
応力拡大係数範囲	11, 132	間欠負荷応力波形	103, 120	孔食	2
応力集中	8	間欠負荷応力波形疲労試験	103	交番荷重	179
応力集中係数	9, 48	完全片振り応力波形	33	——の取扱い	178
応力振幅	32	【き】		降伏	15
応力範囲	32	機械的性質	15	降伏応力	14
応力比	33, 136	ギガサイクル疲労	25	固執すべり帯	21
——の影響	136	基地組織	75	【さ】	
応力頻度読取り法	123	切欠係数	6, 8, 49	最小応力	32
応力腐食割れ	2	切欠効果	247	最大応力	32
遅れ破壊	2	キー溝部	249	材料の疲労限度	6
		球状黒鉛鑄鉄	264	残留応力の影響	75
		強度設計	4	【し】	
		許容応力	4	シェルマーク	28
		き裂進展速度	11		

時間強度	35, 37	セーフライフ設計	12	電気防食	94
下降伏点	16	船級協会の式	171	電気炉焼入れ	74
実働応力波形	99	線形破壊力学	12	転造ボルト	164
絞 り	14	線形累積損傷則	10, 38, 110	【と】	
車 軸	234	せん断破壊	18	等価応力	113, 114
——の疲労強度設計	235	全面腐食	1	【な】	
重畳波形	102	【そ】		【に】	
重畳波形下の疲労試験結果		外ボス側	236	内部の介在物	84
	118	損傷許容設計	4, 12	内力係数	156
重畳波形疲労試験	102	【た】		【ね】	
修正グッドマンの式	10, 58	第Ⅰ段階	27	二軸船のプロペラ翼	209
修正マイナー則		第Ⅱ段階	27	西田正孝氏の線図	48
	11, 38, 115, 125, 126	第Ⅲ段階	27	二段高周波焼入れ	77
衝撃破壊	1	耐久限度線図	9, 60	日本鋼構造協会指針	259
ショットピーニング	87	対数ひずみ	17	【の】	
シリンダカバー	6, 190	楕円表示の式	59	ねじり疲労限度	44
真応力	16	多層薄膜	84	ねじり疲労試験	243
新幹線車軸	25	縦振動により発生する		熱処理	22
——の疲労破面	237	曲げ応力	229	【は】	
真空浸炭	85	タフトライド処理	7, 79, 87	歯形係数	173
浸炭異常層	86	ダブルヘリカル歯車	172	薄膜処理法	83
浸炭窒化	7	単結晶	21	船用減速歯車	172
浸炭焼入れ	85	鍛鋼クランク軸の疲労強度		船用プロペラ	209
浸炭焼入れ処理	85		223	歯 車	170
真ひずみ	17	ダンバ装置	229	破 損	1
【す】		【ち】		破 断	10, 119
水素脆化割れ	2	窒化处理	87	破断繰返し数	34
隙間腐食	2	鋳鋼台車枠	252	ハッチカバーボルト	2
スコ어링	86, 170	鋳 巢	195	パルセータ疲労試験	186
ステアケース法	34	鋳造欠陥	261	【ひ】	
ストラエーション	26, 30	超音波の減衰量	118	被締付物のばね定数	155
すべり帯	20	長寿命側	115	微小欠陥	7
すべり変形	18	【つ】		ヒステリシスループ	105, 107, 120
スリップリング	216	突出し	19	ピストンクラウン	6, 190
寸法効果	9, 247	【て】			
寸法効果係数	6	低温環境	97		
【せ】		ディンプル	133		
静的破壊	1	鉄道車両用台車枠	252		
石油掘削リグ	94				
設計応力	4				
切削条痕	88				

ひずみ	14	腐食	1	【も】	
ピーチマーク	28	腐食環境	89	モード I 型	129
ピッチング	86, 170	腐食ピット	91	【や】	
引張圧縮	7	腐食疲労	2	ヤング率	16
引張圧縮疲労限度	43	腐食疲労強度推定法	90	【ゆ】	
引張強さ	14, 16	二段高周波焼入れ	77	有効硬化層深さ	23
非破壊検査	12	普通鍛造	223	【よ】	
表面粗さ係数	6	普通鋳鋼	260	溶接構造台車枠	252
表面粗さの影響	70	物理的蒸着	83	溶接構造物	139
表面硬化処理	22	プラズマ浸炭	86	溶接継ぎ手	252
表面処理	7	フレッティング	234	【ら】	
表面破壊型	36	——に関する検討	248	ライナ	190
表面ロール加工	88, 223	フレッティング疲労強度	240	ラチェットマーク	29
疲労強度評価基準 (JIS E 4047)	252	プロピット法	34	ランニング試験	186
疲労き裂進展	10	分岐点	53	【り】	
疲労き裂進展寿命	142	【へ】		リーク・ピフォア・ フェーリア設計	13
疲労き裂進展寿命設計	4, 11	平均応力	9	粒界割れ	133
疲労き裂の発生点	27	へき開破壊	18, 133	両振り応力波形	33
疲労き裂発生	10	べき乗則	133	【る】	
疲労限度	4, 10, 33	ベーキング処理	88	ルイスの式	172
疲労限度設計	4	変動応力振幅疲労試験	99, 101	【れ】	
疲労試験片	31	【ほ】		レインフロー法	124
疲労寿命推定法	121	防錆剤	6, 93, 190	レンジベア法	124
疲労寿命設計	4	ボルト締結法	152	【ろ】	
疲労損傷	38, 113	ボルトのばね定数	155	ロール加工	226
疲労破壊	1, 84	【ま】			
ピン・ウェブ付け根	228	マイナー則	10		
【ふ】		摩 耗	170		
ファセット	23	【め】			
フィッシュアイ	8, 23	メッキ	88		
フィッシュアイ破壊型	36				
フェイルセーフ設計	12				
不完全な焼入れ層	86				
部材の表面粗さ	8				

【A】

AAR	255
AGMA	171

【C】

Corten-Dolan の方法	126
CrMo 鋳鋼	96
CrN	84

CVD	83
-----	----

【D】

DIN	171
-----	-----

【F】		【M】		【S】	
FEM 解析	9	Manson-Coffin の関係式	106	S-N 線図	33
【H】		【N】		sled-runner 型キー	249
Haibach の方法	126	Neuber の近似式	199	【T】	
HL 法	124	New York 地下鉄用		TiN	84
HT 80 鋼	140	台車枠	252	【X】	
【I】		【P】		X 線応力測定	242
ISO	171	Paris 則 (パリズ則)	11, 40, 133	X 線の半価幅	118
【J】		Peterson の線図	48	【数字】	
JGMA	171	profiled 型キー	249	0.2% 耐力	17
JIS E 4047	260	PVD	83	12 Ni マルエージング鋼	140
【L】		【R】		18 Ni マルエージング鋼	140
LF 委員会	116	R-R 鍛造	223	4 パラメータ法	264
LNG 船	13				

— 著者略歴 —

中村 宏（なかむら ひろし）

- 1945年 東京帝国大学第二工学部機械工学科卒業
- 1945年 運輸省鉄道技術研究所入省
- 1949年 日本国有鉄道鉄道技術研究所に移籍
- 1960年 工学博士（九州大学）
- 1967年 川崎重工業株式会社勤務
- 1987年 龍谷大学教授
- 1997年 龍谷大学名誉教授
- 2013年 逝去

堀川 武（ほりかわ たけし）

- 1966年 金沢大学工学部機械工学科卒業
- 1968年 金沢大学大学院工学研究科修士課程修了（機械工学専攻）
- 1968年 川崎重工業株式会社勤務
- 1977年 工学博士（大阪市立大学）
- 1988年 龍谷大学助教授
- 1993年 龍谷大学教授（理工学部）
- 1999年 龍谷大学副学長
- 2003年 龍谷大学 REC センター長
- 2012年 龍谷大学名誉教授，龍谷大学 REC フェロー

松原 剛（まつばら ごう）

- 1991年 名古屋工業大学工学部機械工学科卒業
- 1993年 名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了（機械工学専攻）
- 1993年 川崎重工業株式会社勤務
- 2006年 博士（工学）（名古屋大学）
- 2021年 川崎重工業株式会社技術研究所特別首席研究員
- 2022年 名城大学教授
- 現在に至る

金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用（増補）

Fatigue Strength of Metal and Application to Fatigue Strength Design

© Shimizu, Horikawa, Matsubara 2008, 2026

2008年9月26日 初版第1刷発行

2026年4月3日 初版第6刷発行（増補）

検印省略

著者 中村 宏
堀川 武
松原 剛
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 壮光舎印刷株式会社
製本所 株式会社 グリーン

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 978-4-339-04722-6 C3053 Printed in Japan

(西村)



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。