疲労 · S-N曲線 · 疲労限度 · 修正グッドマン · 応力集中 · 技術資料 · 公開

疲労設計 入門

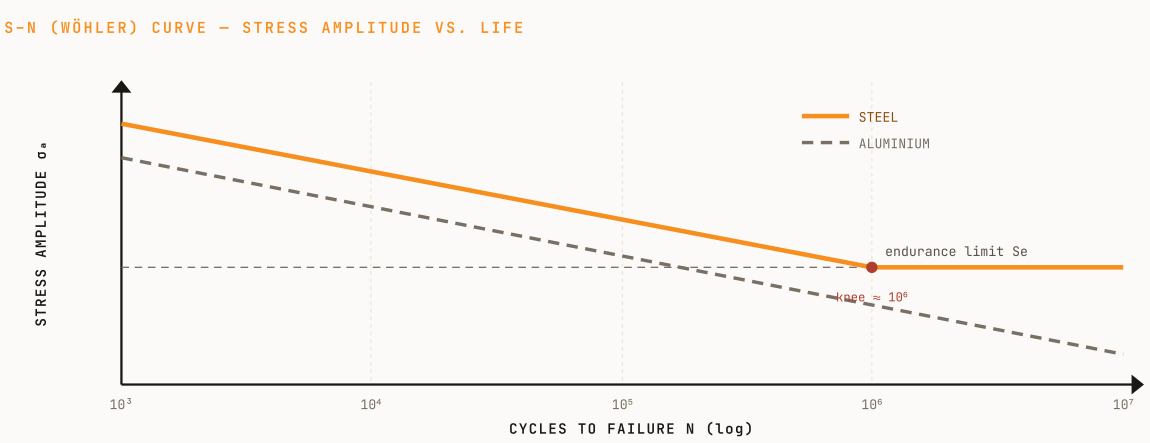
繰返し荷重による破壊を防ぐ設計 — S-N曲線と疲労限度、それを引き下げるマリンの修正係数、平均応力（修正グッドマン）の補正、そして実際にき裂が発生する切欠き。

改訂	発行	作成	付属資料
1.0	June 2026	Ideambox エンジニアリング	PDF技術資料

概要

使用中に破損する機械部品の大半は疲労で壊れる — 静的強さを大きく下回る繰返し応力によるき裂である。疲労を支配するのは応力*振幅*（と平均応力）であり、き裂は応力集中部から成長し、表面粗さに極めて敏感である。本資料は高サイクル疲労の設計手順をまとめたものである。

第1節は疲労とは何かを説明する。第2節は S-N曲線と疲労限度、第3節は試験片の疲労限度を実部品の値に下げるマリンの修正係数を扱う。第4節は平均応力の補正（修正グッドマン／ゲルバー／ゾーダーバーグ）、第5節は応力集中と切欠き感度、第6節は設計ルールとチェックリストである。



S-N曲線。鋼には疲労限度 — それ以下では無限に使用できる応力 — がある。アルミニウムや大半の非鉄合金は曲線が下がり続けるため、有限の繰返し数で評価する。表面、寸法、切欠きはいずれも実際の限度を引き下げる。

目次

1. 疲労とは
2. S-N曲線と疲労限度
3. 疲労限度の修正係数（マリンの修正係数）
4. 平均応力の補正
5. 応力集中と切欠き
6. 設計ルールとチェックリスト

1. 疲労とは

繰返し荷重を受ける部品は、降伏点をはるかに下回る応力でもき裂を生じて破壊することがある。き裂は応力集中部で発生し、1サイクルごとにわずかずつ進展し、最後に残りの断面が突然破断する。その駆動力は**変動応力**であり、**平均応力**によって修正される。

1.1 用語

応力振幅 σ_a	応力範囲の半分 — (σ_max − σ_min)/2 — 疲労の主要因
平均応力 σ_m	(σ_max + σ_min)/2 — 引張の平均応力は寿命を縮める
応力比 R	σ_min / σ_max（R = −1 は完全両振り、R = 0 は片振り）
疲労限度 Se	鋼が無限に耐える応力振幅（$>10^6$–10^7 サイクル）
S-N曲線	応力振幅と破断繰返し数の関係（両対数）、回転曲げ試験による
Kt / Kf	切欠きにおける形状係数（応力集中係数）／切欠き係数

高サイクル疲労（$>10^3$ サイクル、弾性域）は以下の S-N／疲労限度による方法で扱う。極低サイクルの塑性疲労にはひずみ-寿命法が必要である（本資料の対象外）。

2. S-N曲線と疲労限度

応力振幅を破断繰返し数に対してプロットすると、S-N（ヴェーラー）曲線が得られる：

- **鋼**には**疲労限度**がある
  10^6 サイクル付近に折れ点があり、それ以下では寿命は事実上無限である。試験片による推定値は `Se' ≈ 0.5 · Sut`（Sut > ~1400 MPa では ~700 MPa を上限とする）。

- **アルミニウムと大半の非鉄合金**には**明確な疲労限度がない**
  曲線は下がり続けるため、有限寿命で評価する（例：5×10^8 サイクルにおける疲労強さ）。

- ~10^3 から 10^6 サイクルの有限寿命域はほぼ対数直線である。目標寿命に対してはこの範囲で補間する。

`Se'` は鏡面仕上げした試験片の値である。実部品は必ずこれより弱い — そのためにマリンの修正係数がある。

3. 疲労限度の修正係数（マリンの修正係数）

試験片の疲労限度を設計値に引き下げる：`Se = ka · kb · kc · kd · ke · Se'`。

係数	考慮する要因	代表値
ka — 表面	表面仕上げ（き裂は表面から発生する）	研削 ~0.9、機械加工 ~0.7–0.8、熱間圧延 ~0.5–0.7、鍛造のまま ~0.3–0.5
kb — 寸法	大きな断面ほど早く破壊する（曲げ／ねじり）	~1.0（d ≤ 8 mm）から ~0.75（大径）まで；軸荷重 = 1.0
kc — 荷重形式	曲げ・軸荷重・ねじりの違い	曲げ 1.0、軸荷重 0.85、ねじり 0.59
kd — 温度	温度による強さの変化	室温付近で ~1.0
ke — 信頼度	より高い生存率に対するばらつき	50% 1.00、90% 0.90、99% 0.81、99.9% 0.75

表面仕上げ（ka）は通常、単独で最大の低減要因である — 鍛造肌や腐食した表面では疲労限度が半減することもある。疲労が支配的な部品に研削、研磨、ショットピーニングを施すのはこのためである。標準的な表面係数は `ka = a · Sut^b`（a、b は仕上げごと；Sut は MPa）。

4. 平均応力の補正

引張の平均応力は許容応力振幅を低下させる。σ_a と σ_m は次のいずれかで組み合わせる：

基準	式	用途
修正グッドマン	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sut = 1/n$	ぜい性寄りの材料／安全側設計の標準
ゲルバー	$\sigma_a/Se + (\sigma_m/Sut)^2 = 1/n$	延性鋼、安全側の度合いが小さい（データによく合う）
ゾーダーバーグ	$\sigma_a/Se + \sigma_m/Sy = 1/n$	最も安全側；降伏に対しても保護する

ここで **n** は疲労に対する安全率である。通常は修正グッドマンを標準とする。最大応力における静的降伏も必ず照査する（$\sigma_max \le Sy/n$）。

5. 応力集中と切欠き

疲労き裂は**応力集中部** — 隅肉（フィレット）、穴、キー溝、ねじ、段付き部、工具痕 — から発生する。形状係数 **Kt** は公称応力に乗じる係数であり、*疲労*に対する影響は `Kf = 1 + q(Kt - 1)` で表す。ここで **q**（切欠き感度、0–1）は材料強さと切欠き半径とともに大きくなる。

- 修正グッドマンの照査では、Kf を*変動*応力に（多くの場合は平均応力にも）適用する。
- 十分な**隅肉半径**は最も安価な疲労対策である
  鋭い入隅はき裂の発生源となる。
- **ねじ、キー溝、圧入端部は典型的なき裂発生箇所である**
  最高応力域から外すか、細部を入念に設計する（転造ねじ、逃げ溝の丸み）。

6. 設計ルールとチェックリスト

- **すべての入隅に丸みを付ける**
  段付き部や断面変化部の隅肉半径を最大限大きくする。

- **高応力部の表面を改善する**
  仕上げを細かくし、ショットピーニング／表面ロール加工で圧縮残留応力を付与する（疲労強さが大きく向上する）。

- **応力集中部を重ねない**
  高応力域の隅肉部に穴をあけない。

- **平均応力を抑える**
  予荷重、圧縮残留応力、対称な荷重が有効である。

- **溶接部には適切な継手詳細を用いる**
  溶接止端は厳しい切欠きである。止端をグラインダ仕上げ／ピーニングし、疲労強度等級の定められた継手形式を用いる。

- **設計チェックリスト：** 危険断面の σ_a と σ_m を求める → Kf を適用する → Se = ka·kb·kc·kd·ke·Se′ を推定する → 修正グッドマンで疲労の安全率 n を求める → σ_max で静的降伏を照査する → 余裕が小さければ、まず表面仕上げ、隅肉、残留応力を改善する。

Ideambox のばね・ボルト締結ツールと併せて使用するとよい。これらの疲労安全率はまさにこの修正グッドマンの手法を用いている。

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/ja/downloads/fatigue-design-primer/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact