



# 金属疲労の歴史と今

東京工業大学 名誉教授  
小林 英男

この資料は、(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 FQA小委員会 における講演資料を掲載したものです。この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

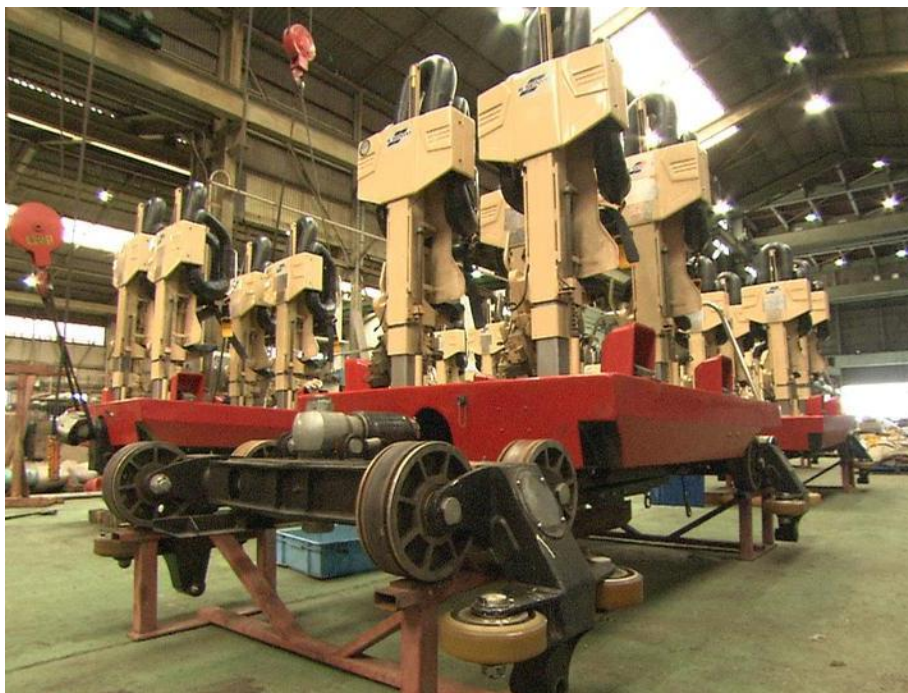
(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 FQA小委員会 ナレッジプラットフォーム公開資料(2015年):「金属疲労の歴史と今」東京工業大学名誉教授 小林英男

- **ジェットコースター脱輪事故の衝撃**
- **最近の我が国における金属疲労事故  
—25年間—**
- **原子力分野における金属疲労事故  
—25年間—**
- **金属社会の落とし穴**
- **金属疲労のメカニズムと特性**
- **金属疲労の事故と対処の歴史**

# ジェットコースター 脱輪事故の衝撃

- 金属疲労の社会問題 -

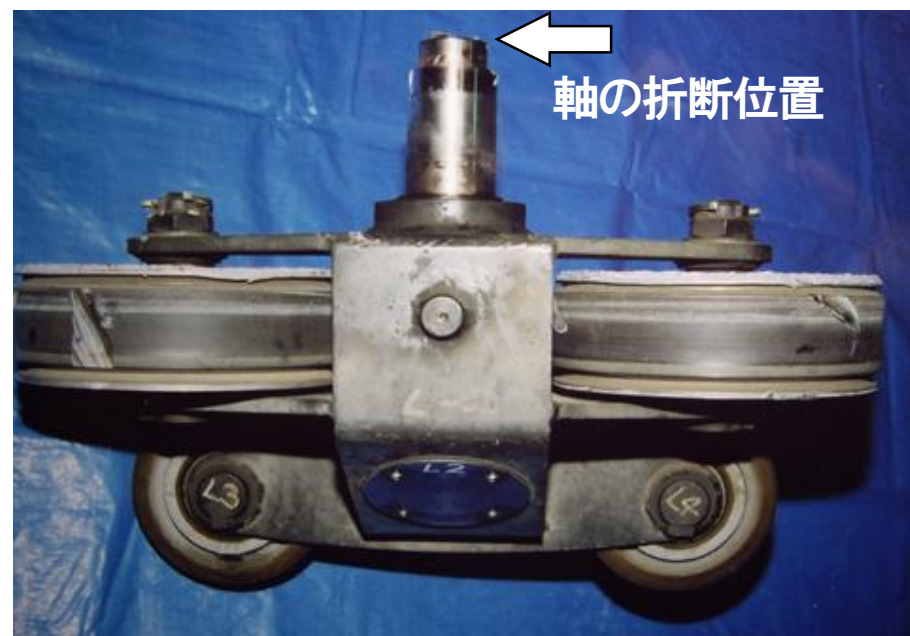
1. 日時:平成19年5月5日 12時50分ごろ
2. 場所:大阪府吹田市千里万博公園の遊園地「エキスポランド」
3. 機器:ジェットコースター「風神雷神Ⅱ」(6両編成)の「風神」
4. 概要:大型連休中の5月5日に、千里万博公園の遊園地「エキスポランド」で、ジェットコースター「風神」(6両編成)が脱輪し、2両目にいた女性客が車両とレール左側の手すりに挟まれて死亡し、他の乗客19人が重軽傷を負った。レールを挟む車輪・車軸群を構成するユニットとコースター(乗り物)は、軸で連結されている。軸のコースター側端に切ったねじとナットの締結部分で、軸が折断し、脱輪した。  
軸の折断の原因は「**金属疲労**」である。



ジェットコースターの外観

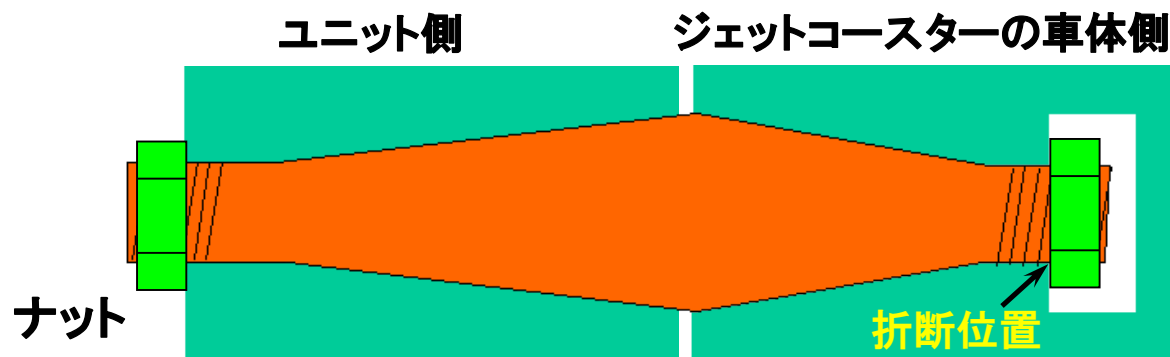


軸の外観

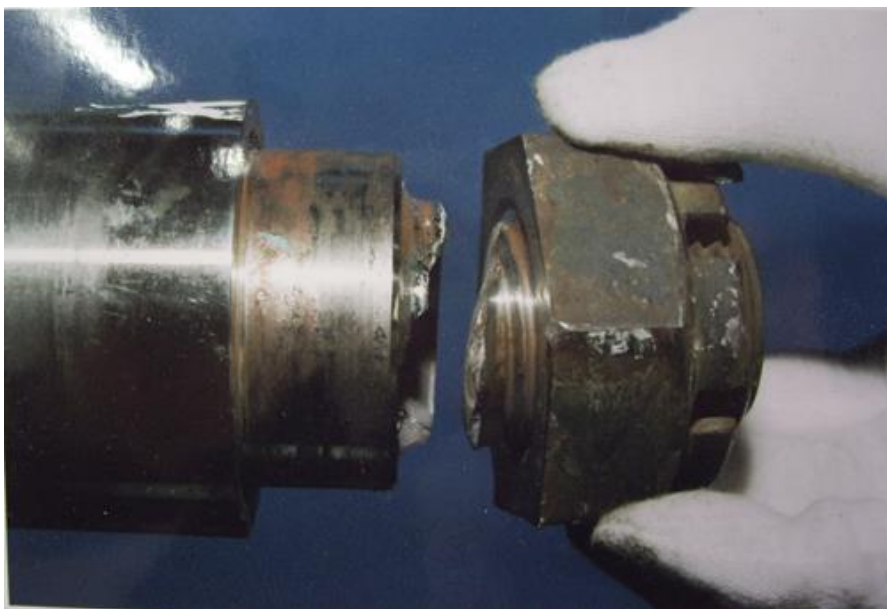


車輪・車軸群構成ユニット

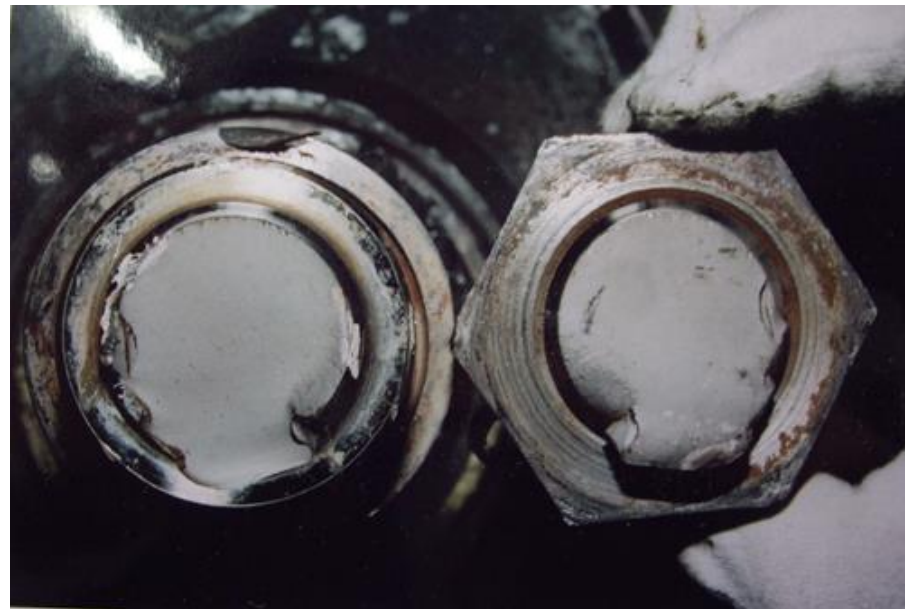
# 軸の切断の様相



ユニットとコースターを連結する軸



軸の折断位置



破面のマッチング

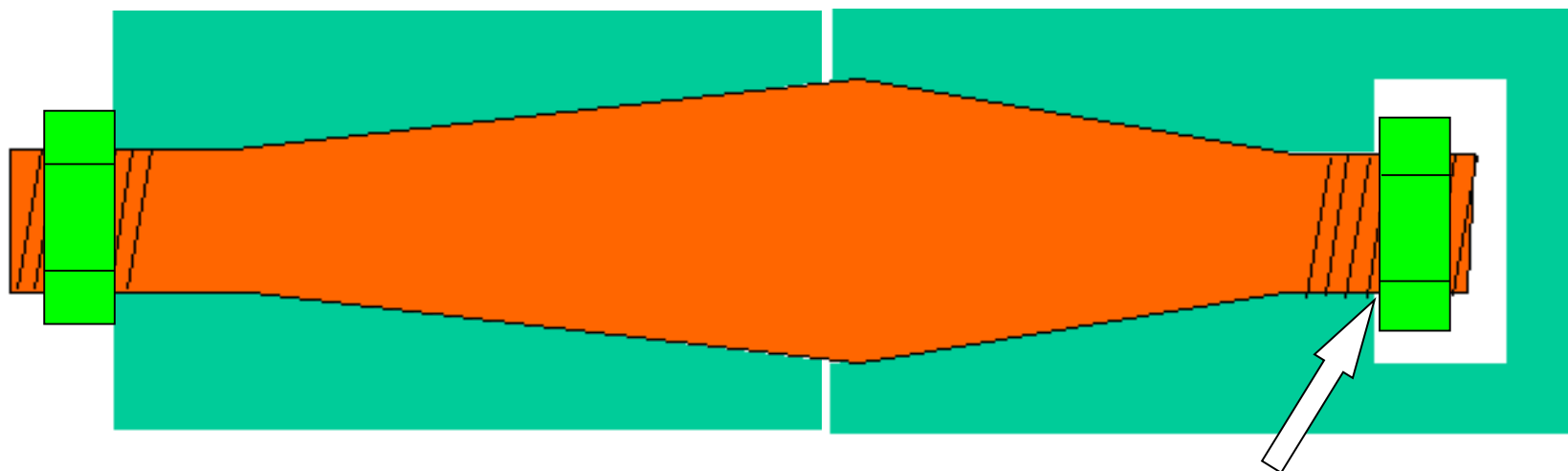
- 破面の目視観察結果(平坦、ラジアルマーク、ビーチマーク)から、疲労破壊と判定され、疲労破面が全破面の70%以上を占める。
- その後の電子顕微鏡による観察結果(フラクトグラフィ)から、全破面にわたって疲労破壊の特徴であるストライエーション(縞状模様)が認められ、ストライエーションの間隔(疲労き裂進展速度)はほぼ一定である。
- 最終破面が小さいことから(30%以下)、疲労破壊の原因となる繰返し応力は低く、またストライエーションの間隔が一定であることから、負荷は曲げモーメントが支配的である。
- 疲労き裂はジェットコースターの使用期間15年の初期に発生し、長期間の使用中に徐々に進展し、事故当日に軸の折断に至った。

- ジェットコースター「風神雷神Ⅱ」は、事故車両の「風神」と同機種の「雷神」がペアで交互に走行していた。
- 事故後に「雷神」を調査した結果、「風神」の軸折断と同じ箇所に、目視でき裂が検出された。
- 「風神」と「雷神」の疲労破壊(き裂)は、当然起きるべき確定事象で、「雷神」もいずれは軸折断に至った。

- 折断した軸は、コースター側に固定され、ユニットの回転（実際には揺動）を支える。（軸自身が回転し、曲げモーメントを受ける、いわゆる車軸ではない。）
- 軸はコースター側のテーパ孔に挿入され、端部に切ったねじを介してナットでコースター側に締結されている。
- ナットの締結が十分であれば、軸とコースターは一体となり、ユニットの負荷（遠心力による軸力）によってねじが疲労破壊することはない。
- ナットの締結が不十分であれば、軸とテーパ孔の間に空隙が生じ、ナット（ねじ）が直接にユニットの負荷を受け、また曲げモーメントが発生する。
- ねじの疲労破壊は、ナットの締結不十分が原因である。

ユニット側

ジェットコースターの車体側



折断位置

- 回転ドア、エスカレーター、エレベーター、ジェットコースターなど、すべて同じ問題
- 機械システムの本質危険の認識の欠如
- 動く機械のメンテナンスの重要性の認識の欠如
- 一般社会と産業社会の区分

**日時:1996年6月17日(月)**

**場所:米国ハワイ州バーバース・ポイント航空基地**

**機器:防衛庁海上自衛隊ヘリコプターSH-60J 8215号機の  
主回転翼ハブ**

**概要:**

- ・日米共同訓練中の事故
- ・ハブがボルト穴を起点として疲労破壊し、地上滑走中に主回転翼が破壊し、搭乗員など8名が軽傷
- ・防衛庁は疲労破壊の原因をボルト穴の加工時に生じた突起物(バリ)の残留と推定
- ・1999年7月3日に、防衛庁は製造元の三菱重工業(株)に対して、11億円の損害賠償を請求→裁判→和解

## □一般論

- 人(または組織)の過失の有無
- 物(または製造)の欠陥の有無

## □ライセンス生産の特殊性

- SH-60Jは米国シコルスキー社(設計者)の図面による三菱重工業(株)のライセンス生産
- 設計に欠陥があっても、契約上、変更が困難
- 設計の欠陥は物証の提示が困難であるが、製造の欠陥は物証の提示が容易

- 主回転翼ハブ(メインロータハブ)の破壊が二次き裂
- ダンパーブラケット取付フランジのボルト穴が一次き裂
- 貫通ボルト穴のハブ内面側が起点
- ボルト穴の貫通とねじ切りによる応力集中

○ハブ(ダンパーブラケット取付フランジ)の加工

○フランジの円周上に8個の穴あけ加工

○穴にねじ切り

○ハブ内面からのざぐり加工(ボルト穴の貫通)

○ショットピーニング(詰物の挿入でねじを保護)

## □貫通ボルトとナットの締結

- ・ボルトの一端が頭部、他端をねじ切り
- ・ボルト穴は貫通、ねじ切りなし

## □植込みボルトとナットの締結

- ・ボルトの両端にねじ切り
- ・ボルトを本体にねじ込み(貫通なし)

## □ボルト穴の貫通

ボルト穴の貫通により、ハブ内面で応力が集中

## □ボルト穴の貫通ねじ切り

ら線状のねじの山と谷がハブ内面と交差し、さらに高い応力が集中

## □ショットピーニングの不具合

ねじを保護する詰物の挿入により、ボルト穴の内表面の施工なし

# 最近の我が国における 金属疲労事故 — 25年間 —

年	事故名称	原因
1985	御巢鷹山の日航ジャン機の墜落	後部圧力隔壁の疲労
1991	原子力発電所蒸気発生器の伝熱細管破断	フレットング疲労
1995	高速増殖原型炉もんじゅの二次系ナトリウム漏洩	温度計さやの流体振動疲労
1999	H-II ロケット8号機の打上げ失敗	ポンプ羽根の流体振動疲労
2002	大型トレーラーの車輪脱輪	車輪ハブの疲労
2007	ジェットコースターの脱輪	軸ねじ部の疲労

- 日航ジャンボ機墜落事故(1985)から  
ジェットコースター脱輪事故(2007)まで
- 種々の産業分野から一般社会の場まで
- ほぼ5年ごとの社会的影響が大きい事故の  
繰り返し
- なぜ事故は克服できないのか、繰り返されるのか

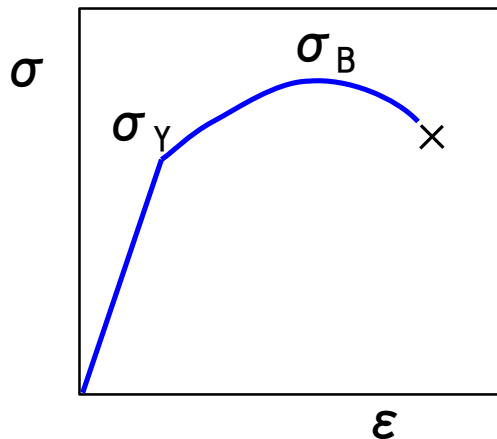
# 原子力分野における 金属疲労事故 — 25年間 —

# 原子力発電所の疲労破壊(き裂)の歴史的事例

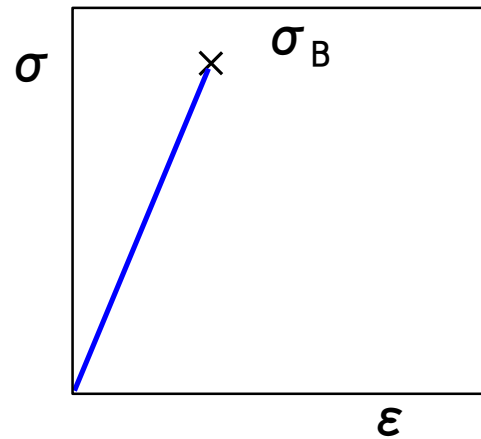
年	発電所	機器	材料	事象	原因
1988	玄海1号機	余熱除去系配管	304 溶接部	一次冷却水 漏洩	熱成層
1989	福島第二3号機	再循環ポンプ 軸受リング	316NG 溶接部	リング脱落	溶込み不良 共振
1991	美浜2号機	蒸気発生器 伝熱管	インコネル	伝熱管破断	流体振動 フレットング疲労
1995	高速増殖原型炉 もんじゅ	二次冷却系配管 温度計さや	304	ナトリウム 漏洩	流体振動
1999	敦賀2号機	再生熱交換器 連絡配管エルボ	304	一次冷却水 漏洩	温度揺らぎ
2003	泊2号機	再生熱交換器 胴側出口配管	304	一次冷却水 漏洩	温度揺らぎ
2006	浜岡5号機	低圧蒸気 タービン	クロム鋼	羽根のき裂	流体振動
2007	玄海2号機	余剰抽出水系統 取出配管エルボ	304	UTで き裂検出	熱成層

UT:超音波探傷試験

- 金属社会
- 金属は鬼に金棒の材料
  - 鬼－強さ、金棒－延性
- 延性(塑性変形して壊れる)
  - 加工しやすい、壊れるまでの裕度あり(安全)
- 鬼の泣き所が金属疲労
  - 延性という特性で疲労が起きる



(a)延性破壊



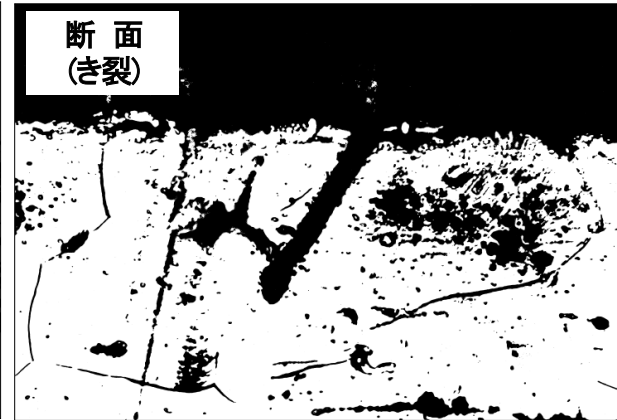
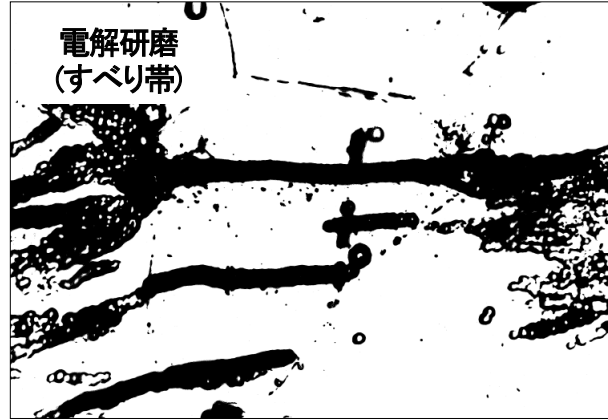
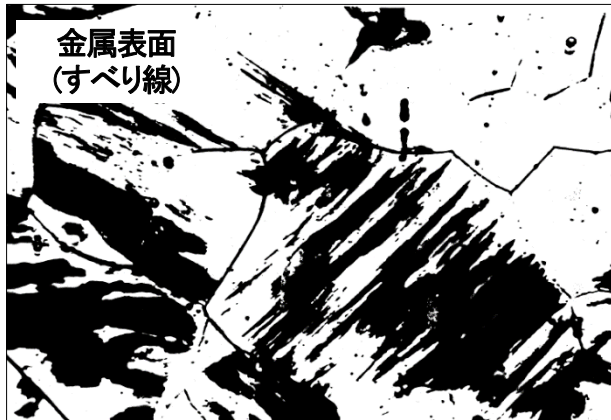
(b)脆性破壊

$\sigma_Y$ :降伏強さ  
 $\sigma_B$ :引張強さ

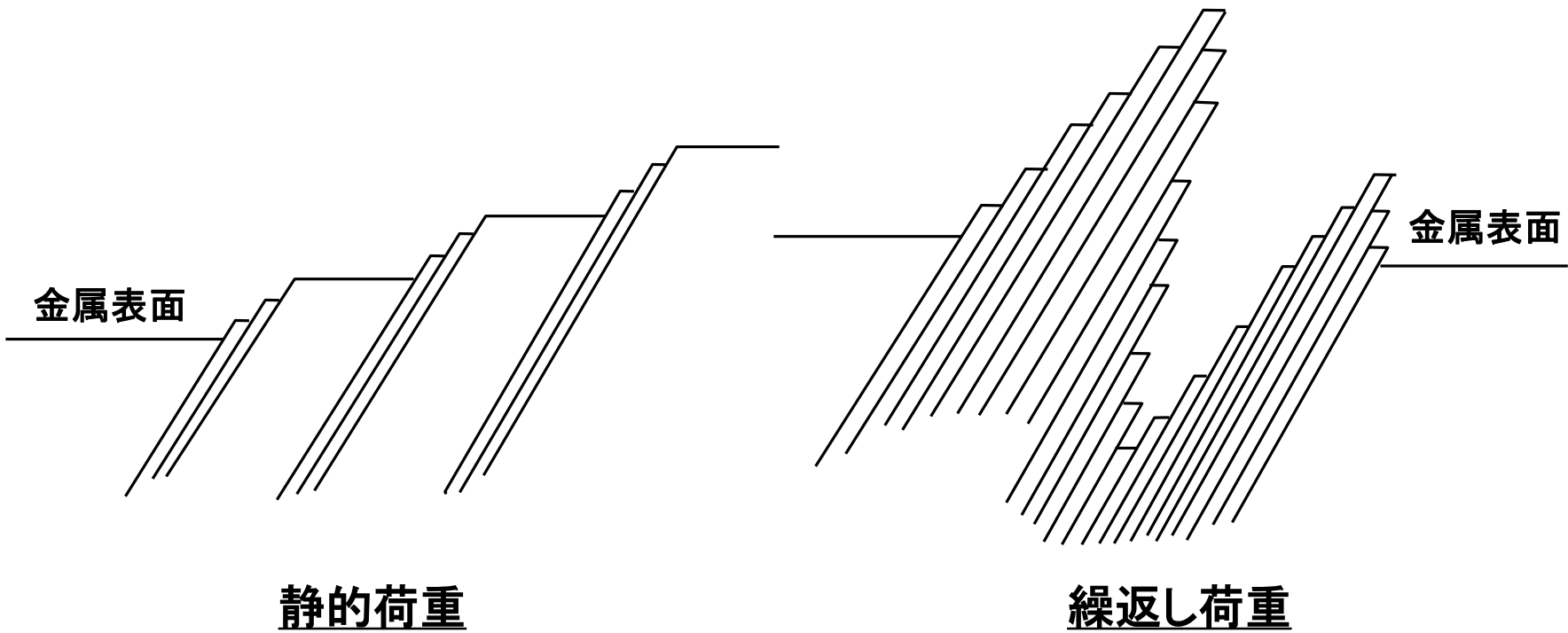
## 材料の応力 $\sigma$ -ひずみ $\varepsilon$ 線図

- 延性のある金属に力を繰り返し加え、塑性変形させると金属疲労が起きる
- 針金の切断のコツ  
できるだけ鋭角的に曲げる  
(局所的に大きな塑性変形)  
一方向に曲げたら、いったん真直ぐに伸ばし、  
逆方向に曲げる  
(引張りと圧縮の塑性変形を交互に繰り返す)
- き裂の発生  
塑性変形による金属表面の肌荒れ(凹凸)
- き裂の進展  
塑性変形によるき裂の開口と閉口

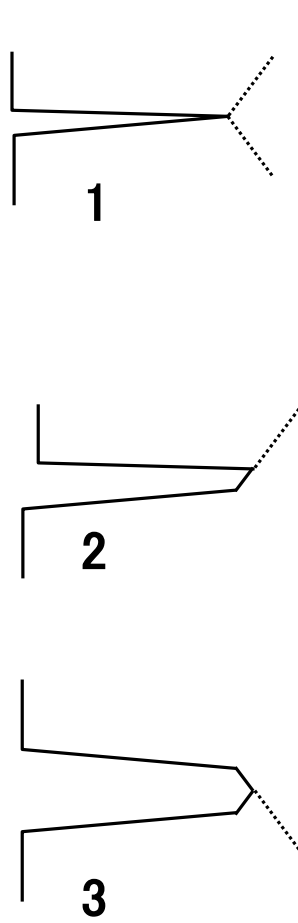
# 疲労き裂の発生メカニズム



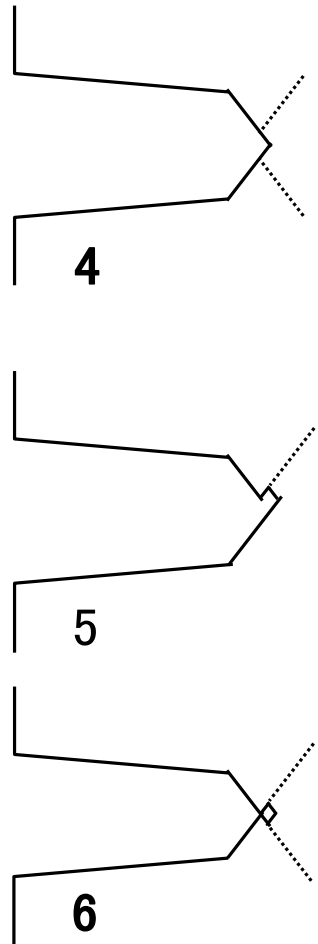
# 静的荷重下と繰返し荷重下のすべり帯の断面形状



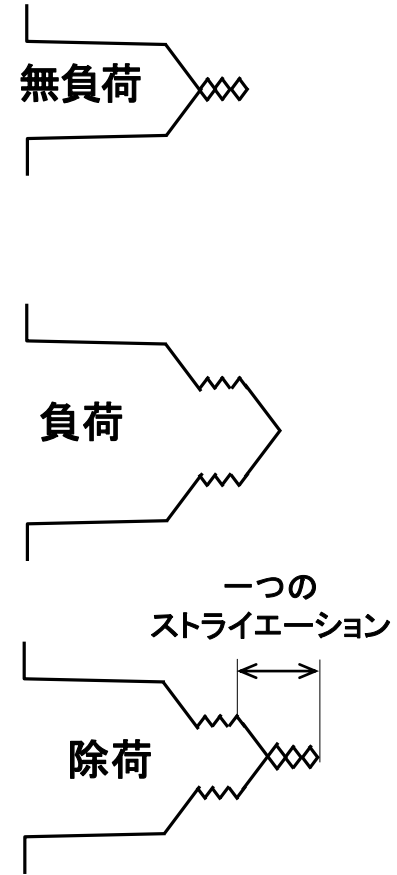
P.J.E. Forsyth(中沢 一, 小林英男訳): 金属疲労の基礎, 養賢堂, (1975), 39.



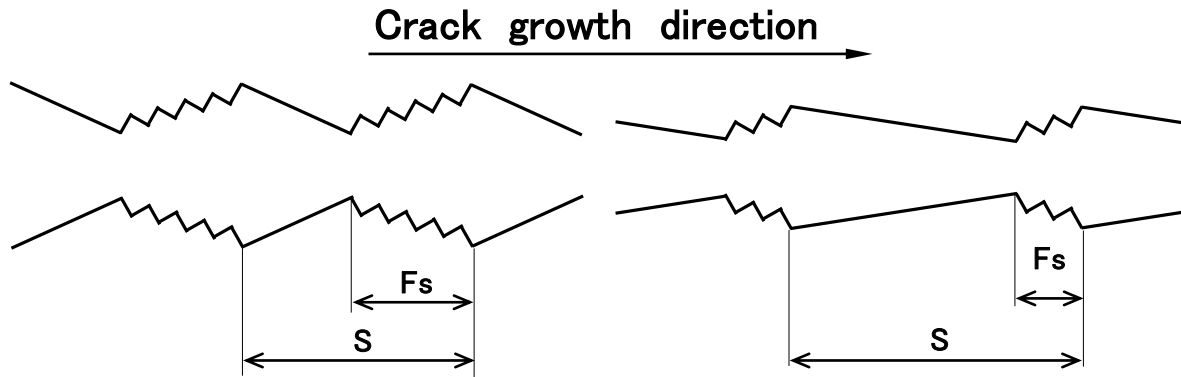
(a) 負荷過程



(b) 除荷過程

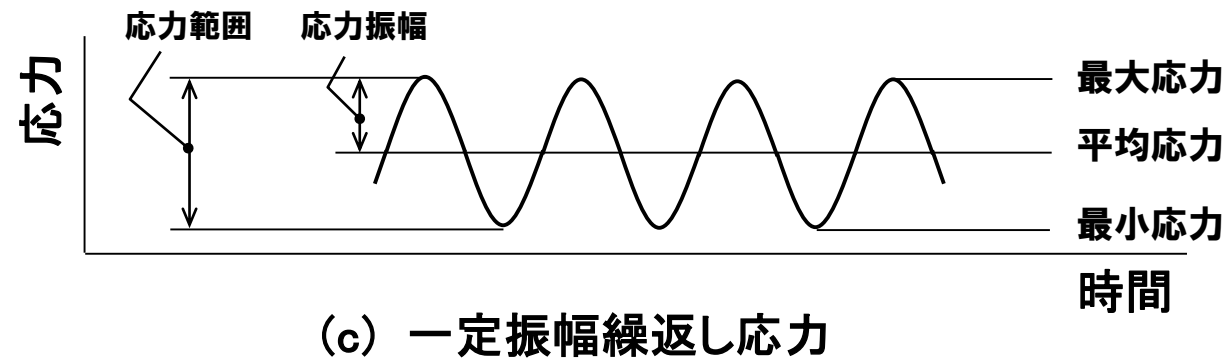
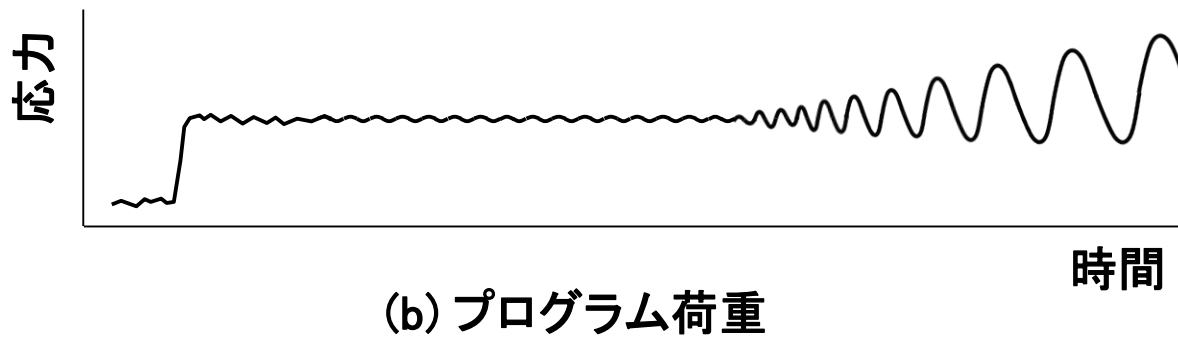
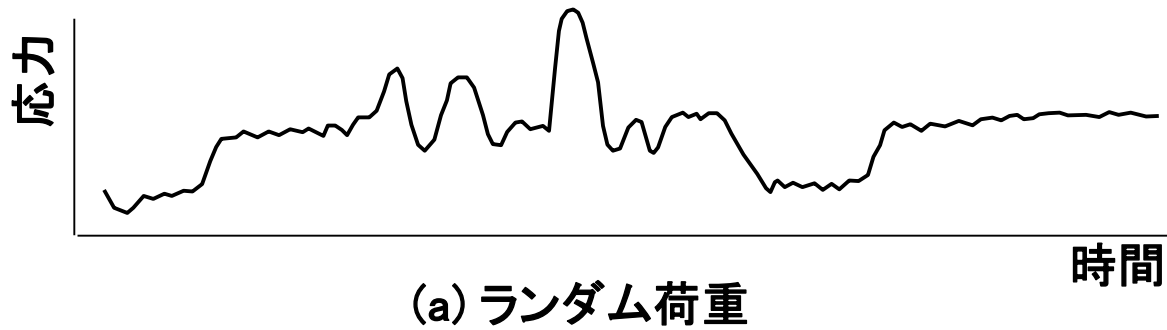


(c) 1サイクル負荷



## ストライエーションの断面形状





## □ S-N線図

縦軸はひずみ振幅

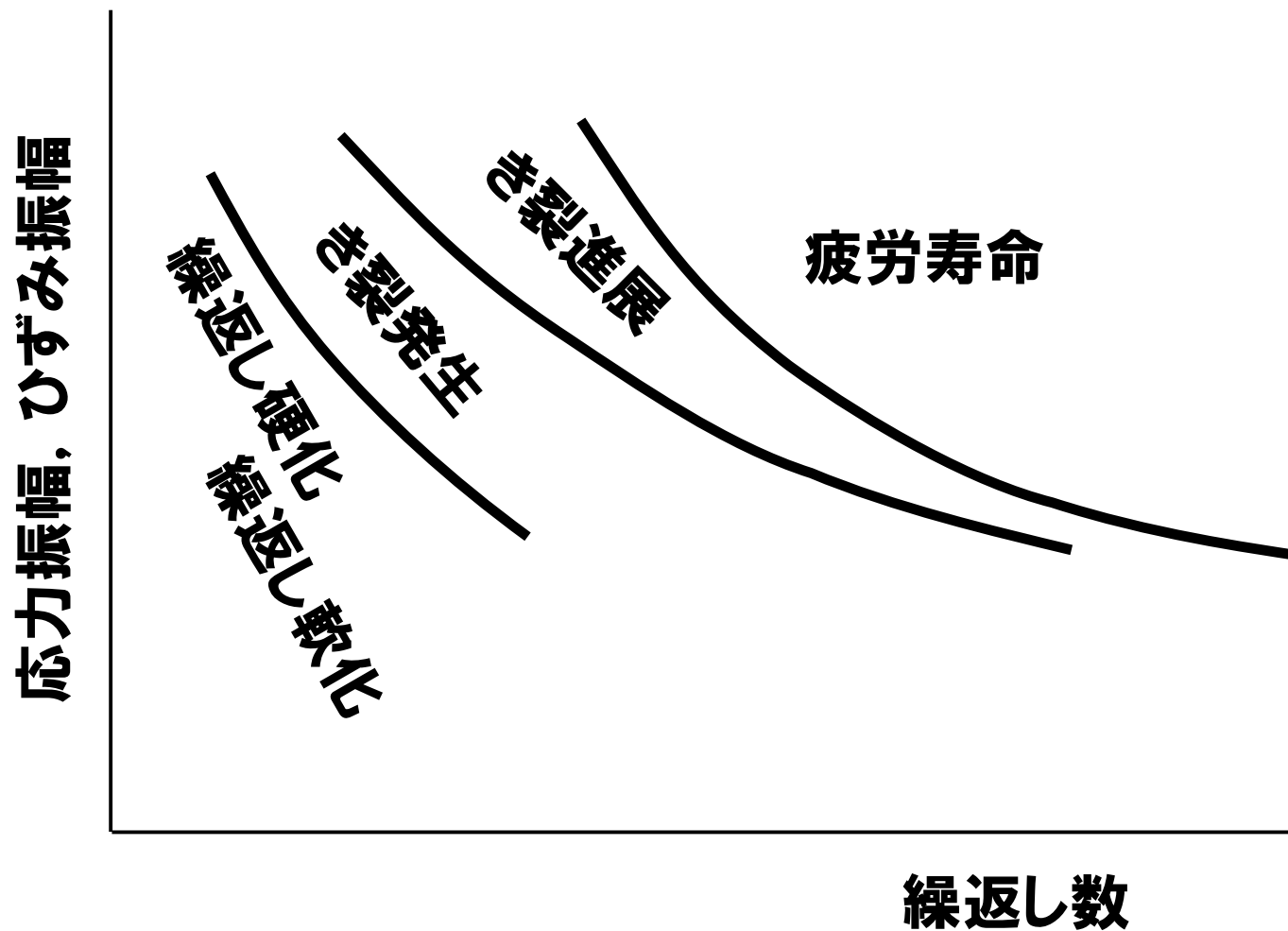
横軸は破壊までの繰返し回数(寿命)

## □ S-N曲線

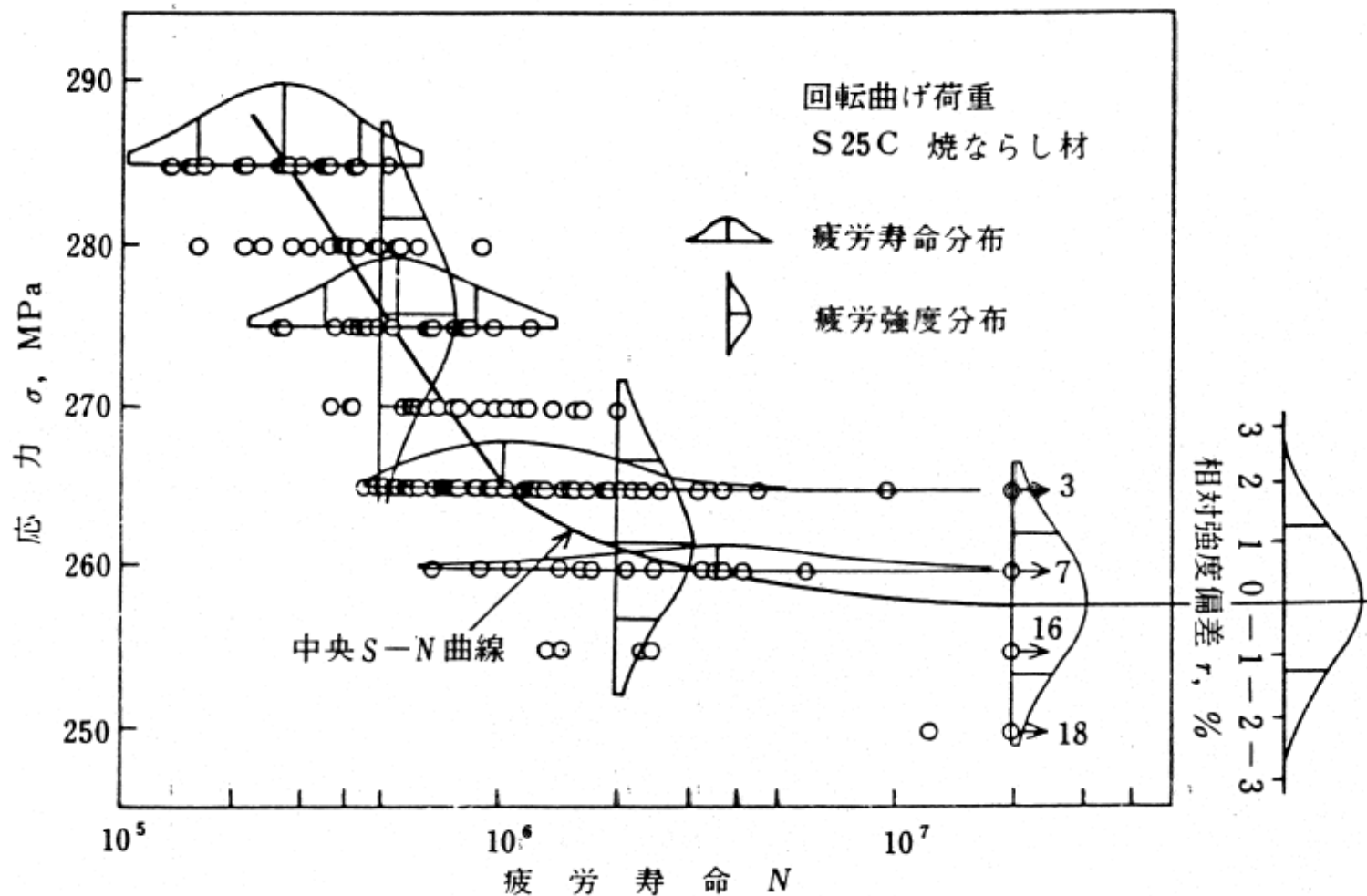
ひずみ振幅が小さくなるほど繰返し回数が多くなる。

- ひずみ振幅に縦弾性係数を乗ずれば応力振幅  
弾性変形の範囲では応力振幅でもよい。  
塑性変形の範囲ではひずみ振幅が正しい。

# 疲労破壊のS-N曲線

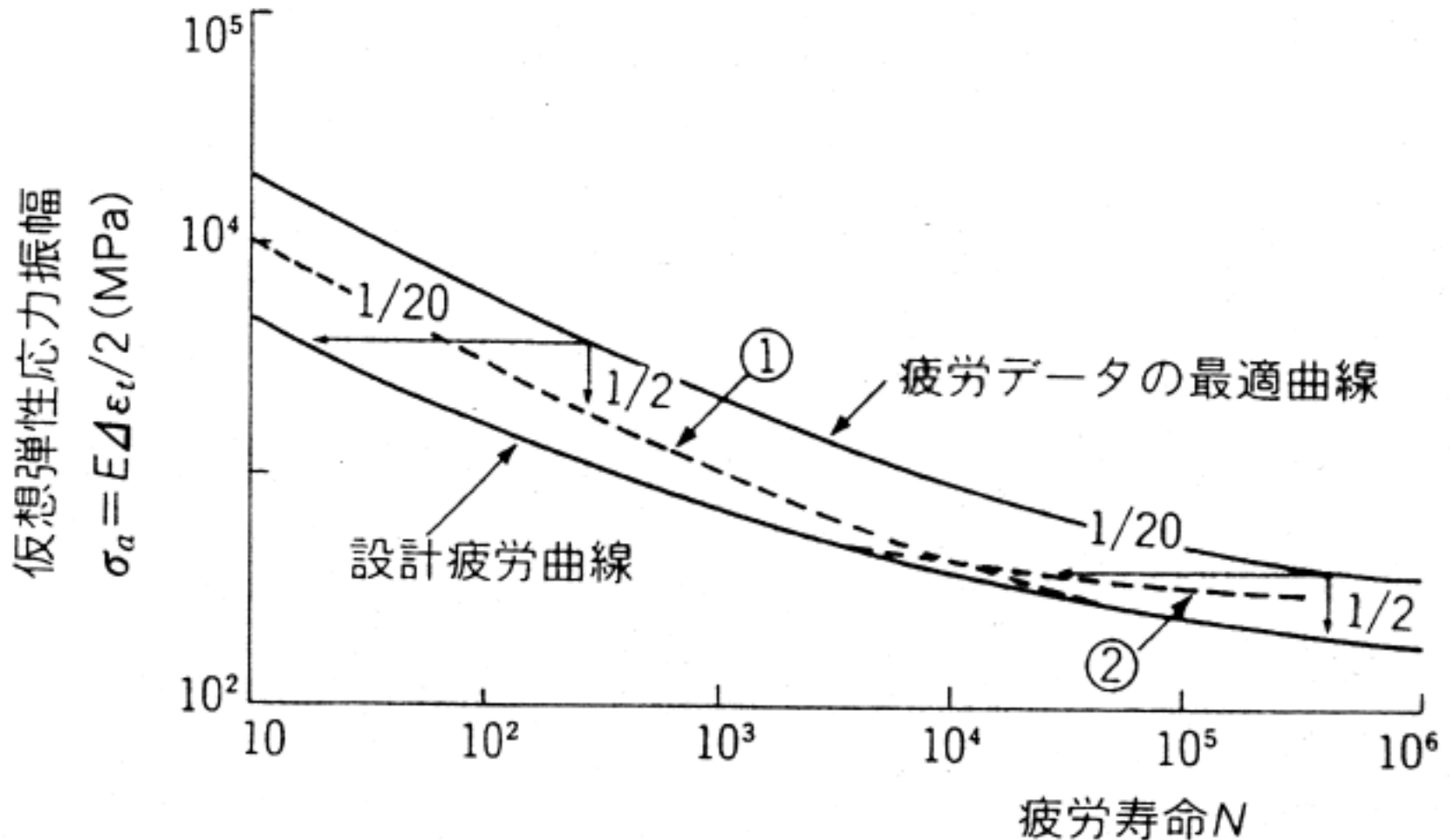


# 疲労データの変動の代表例

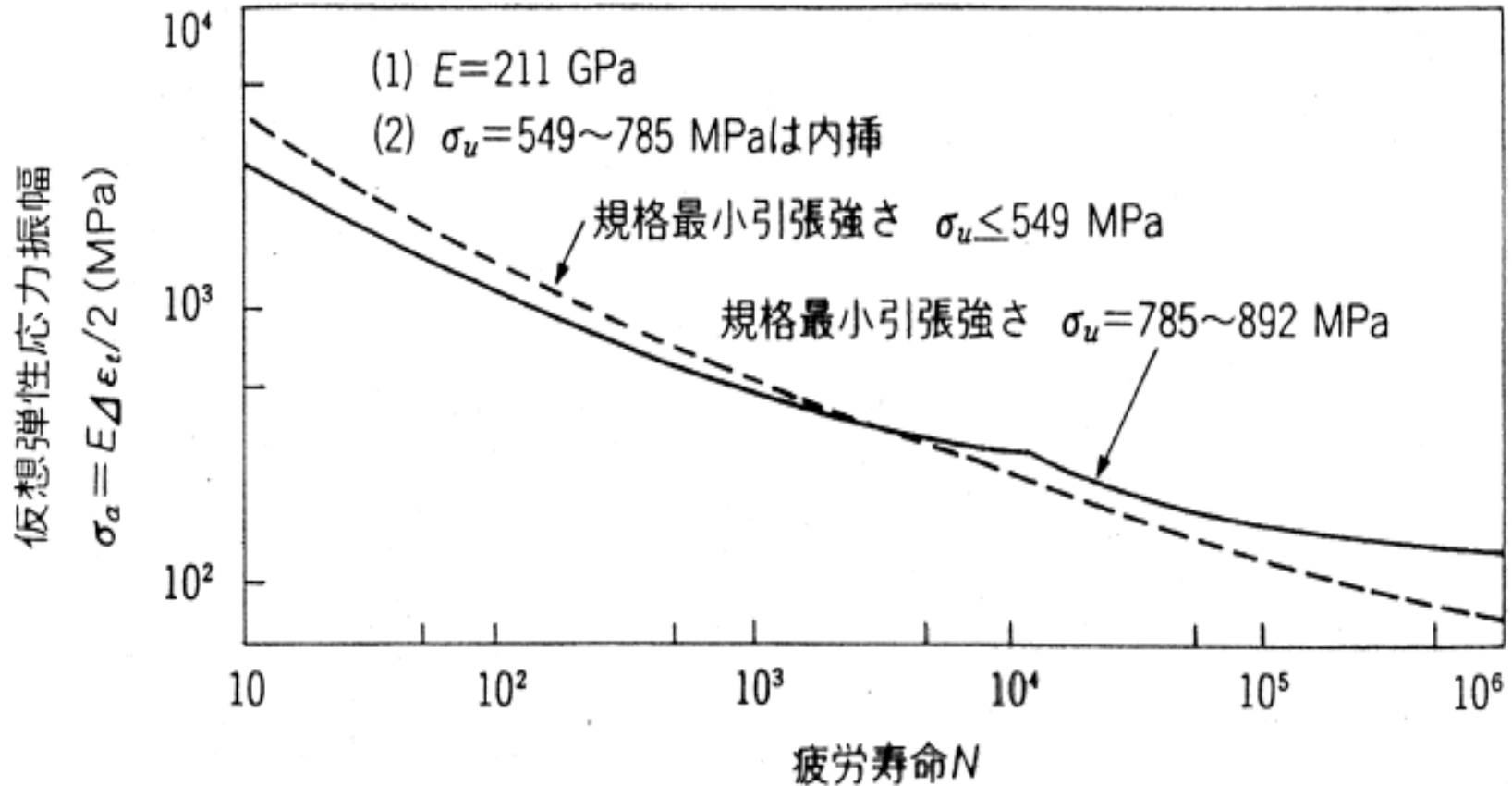


S.Nishijima, ASTM STP, No.744, p.75, (1981)

# 設計疲労曲線の作成方法



[曲線①(応力で1/2)と曲線②(寿命で1/20)の下限包絡線]



温度 $371^\circ\text{C}$ 以下の炭素鋼，低合金鋼，  
フェライト系ステンレス鋼および高張力鋼の設計疲労曲線

JIS B 8266:2003, 圧力容器の構造 - 特定規格

- 強さ(引張強さ)と延性(破断ひずみ)は相反する特性
- 強さの異なる材料のS-N曲線は交叉
- 交叉点を境いとして、低サイクル疲労と高サイクル疲労を区別
- 低サイクル疲労の支配材料因子は延性
- 高サイクル疲労の支配材料因子は強さ

- 青銅器時代と鉄器時代には、道具が突然に壊れる摩訶不思議な現象という認識
- 18世紀にイギリスで起きた産業革命がヨーロッパ各国に広まり、機械工業が大規模化し、鉄道が普及して事情が一変
- 金属が突然壊れる事故は深刻な社会問題となり、原因究明が各国で行われるようになった。

- アメリカの国宝
- 鐘は共振で疲労し、割れる
- 疲労き裂は開口しない（き裂閉口）
- 自由の鐘の割れは大きく開口
- 鑄造後の冷却によるインターナルストレス



- 金属疲労の特性の認識は、事故の再現試験の成功
- 1829年、ドイツ、J. Albert チェーンの実物疲労試験
- 1852年、ドイツ、A. Wöhler 車軸の実物疲労試験
- 1880年、ドイツ、A. Wöhler 試験片の回転曲げ疲労試験

## □ 産業革命が生みだした動く機械

（各種の産業機械、エンジン、ポンプ、  
鉄道の鋼橋、車軸、レール、ロープなど）

□ 往復、回転などの運動による力の繰り返し

□ 金属疲労が起きる機械の一部または部品  
（チェーン、車軸、ねじ、歯車、ばねなど）

- 19世紀で近代製鉄技術は完成
- 20世紀初頭に鉄鋼生産の中心はヨーロッパからアメリカへ
- U.S.スチールは一社でドイツ一國に匹敵する生産量
- 第一次と第二次世界大戦が大量消費に拍車
- リベット継手に代わる溶接継手の採用
- 20世紀は鉄鋼の機器と構造が世界にあふれ、金属疲労の事故の多発を招いた。

- 動く機械ではない機器  
(ボイラ、圧力容器、配管など)
- 疲労の原因は力の繰り返しではない。
- 圧力、温度、振動の繰り返し
- 応力としてみれば、疲労のメカニズムは同じ
- 圧力容器の起動停止サイクルによる  
低サイクル疲労  
(動く機械は高サイクル疲労)

- 粗大結晶粒、介在物などの金属組織の弱点
- 機器の構造と形状の弱点
- 構造と形状は必ず不連続と切欠きを伴い、ここに応力が集中
- 応力集中係数が大きいほど、起きやすい。

- (1) 金属の高強度化
- (2) 金属の強さと延性の調和
- (3) 結晶粒、介在物などの金属組織の制御
- (4) 応力集中の軽減
- (5) 適切な表面仕上げ
- (6) 表面硬化
- (7) き裂の削除

- 鉄道車輛では、車軸に車輪を圧入
- 圧入部でフレットィング疲労が起き、き裂が発生
- 定期的に行う超音波探傷試験で、き裂を検出  
(深さ0.2mm以上)
- 車軸のき裂を旋盤で削除し、再使用
- 数回繰り返すと、直径減少で圧入不可
- 車軸を交換

## □フレッティング(fretting)摩耗

- ・金属接触面の微小振幅の相対すべり
- ・摩耗粉、酸化鉄( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、ココア(cocoa)

## □フレッティング腐食

- ・摩耗粉による腐食(摩耗を含めた減肉)

## □フレッティング疲労

- ・圧入部の疲労、腐食疲労、疲労限度の低下
- ・面圧の影響、せん断型の初期き裂

- 航空機は飛ぶために、極端な軽量化の要求
- 航空機の開発は、金属疲労との戦い
- アルミニウム合金は軽いが、疲労には弱い  
( $10^7$ 回疲労強度／引張強さ=0.3)
- 薄板構造のリベット接合で、打抜き加工のリベット孔が疲労の起点となる。

- (1) セーフライフ設計(安全寿命設計)  
〔ジェット旅客機コメットの空中分解(1954年)〕
- (2) フェールセーフ設計  
〔ジェット戦闘機F-111の墜落(1969年)〕
- (3) 損傷許容設計(クラックセーフ設計と  
フェールセーフ設計の組合せ)  
〔日航ジャンボ機の墜落(1985年)〕

- 低サイクル疲労 → 高サイクル疲労  
→ 超高サイクル疲労
- 設計時に予測が困難な負荷  
→ 熱応力、振動応力
- 技術者の専門領域のミスマッチング
  - オートドライブコンピュータ
  - カラーテレビ
  - 航空機
  - ロケットエンジン
  - 原子力発電所