平成26年7月5日

(公社) 日本技術士会北陸本部 富山県支部 第21回講演会

金属材料の疲労破壊機構と最新研究

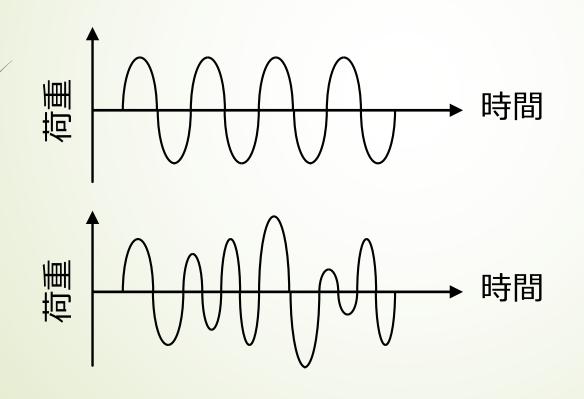
富山大学大学院理工学研究部 教授 小熊規泰

コンテンツ

- ▶ 1. 疲労破壊とは
- 2. 金属材料の疲労特性
- 3. オンライン寿命予測
- 4. 建築に関連した研究

1. 疲労破壊とは

一定荷重を規則的に繰り返している、または、 荷重が不規則に変動する際に生じる破壊



静的強度以下の応力(荷重) でも破壊に至る

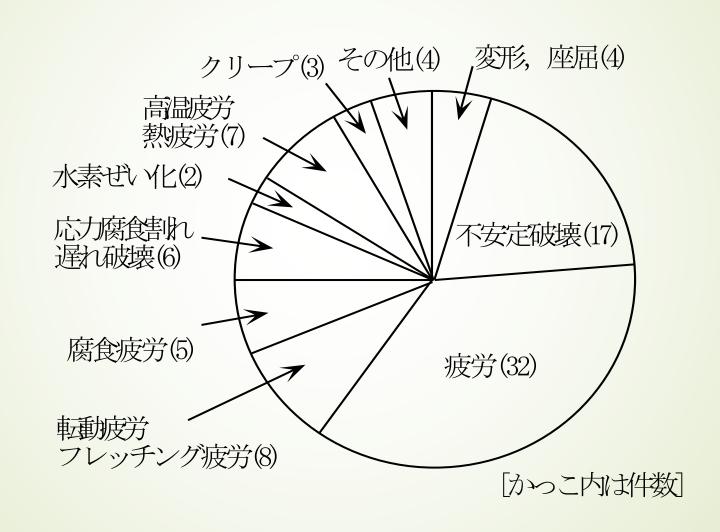


疲労強度に基づいた 設計が必要

疲労破壊による重大事故

- ▶日航ジャンボ機墜落事故(1985年8月12日) 後部圧力隔壁の金属疲労
- ▶美浜原発事故(1991年3月13日)
 蒸気発生器内伝熱管の金属疲労
- ▶高速増殖炉「もんじゅ」ナトリウム漏洩事故(1995年12月8日) 温度計さや管の金属疲労
- ▶ガルーダ・インドネシア航空機事故(1996年6月13日)
 第3エンジンコンプレッサーファンの金属疲労
- ▶ドイツ・インターシティエクスプレス脱線事故(1998年6月3日) 車輪の金属疲労
- ▶三菱自動車タイヤ脱落事故(2002年1月10日) ハブボルトの金属疲労
- ▶エキスポランド・ジェットコースター転落事故(2007年5月5日) 車軸の金属疲労 (直後に米国・中国でも発生)

機械要素の破壊原因の分類



なぜ事故が起きるか?

▶疲労設計ミス

- ・異なる負荷形式の疲労強度データに基づく設計
- ・形状の設計ミス(応力集中の未考慮)
- ・安全率の過小評価

▶コスト優先メンテナンス

- ・点検周期の延長や点検の割愛
- ・高精度(高価な)検査技術の軽視

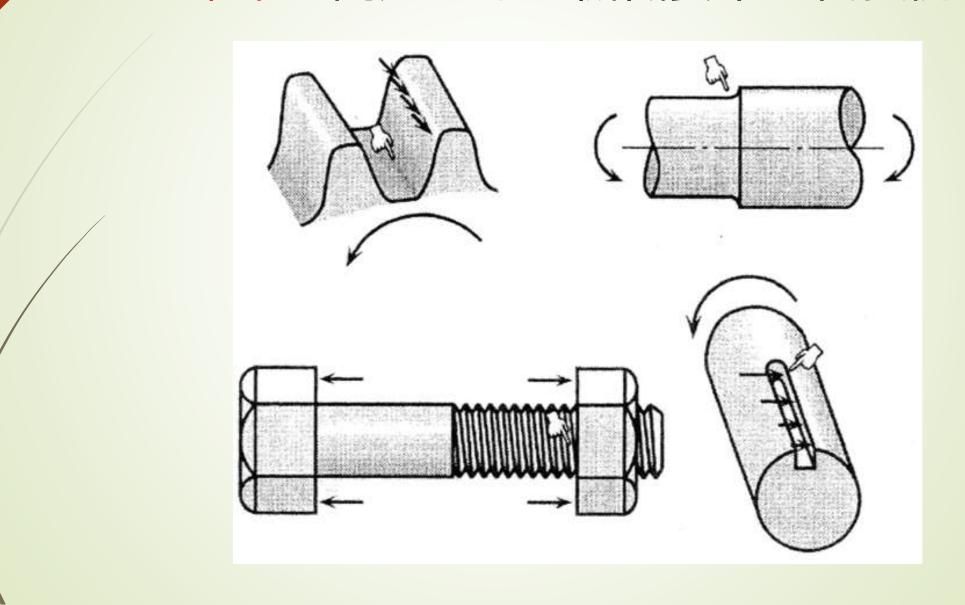
ト不適切な使用

- ・スペック以上の負荷(人為的または想定外)
- 設計想定外の過酷環境

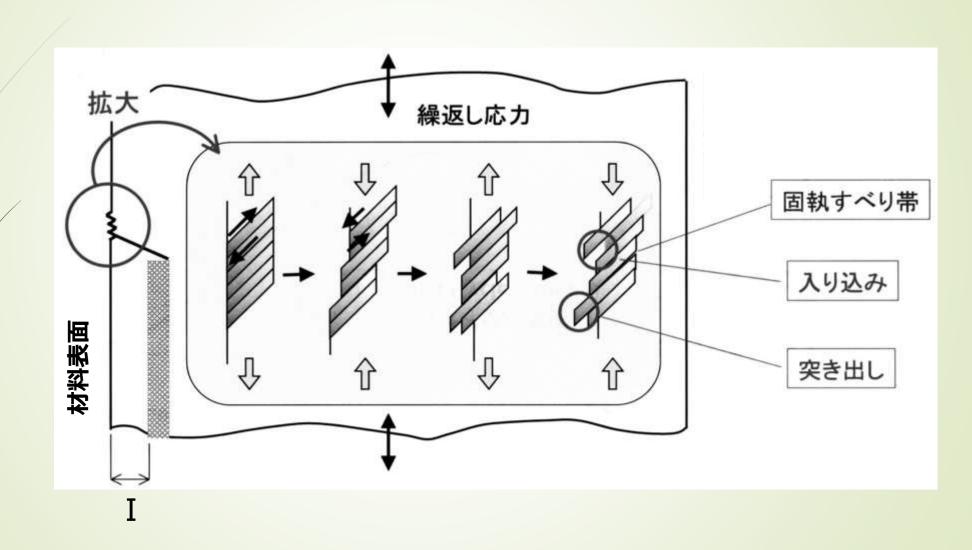
▶技術者不足

- ・疲労の本質を理解した設計技術者不足
- ・経営と安全を見据える現場技術者不足

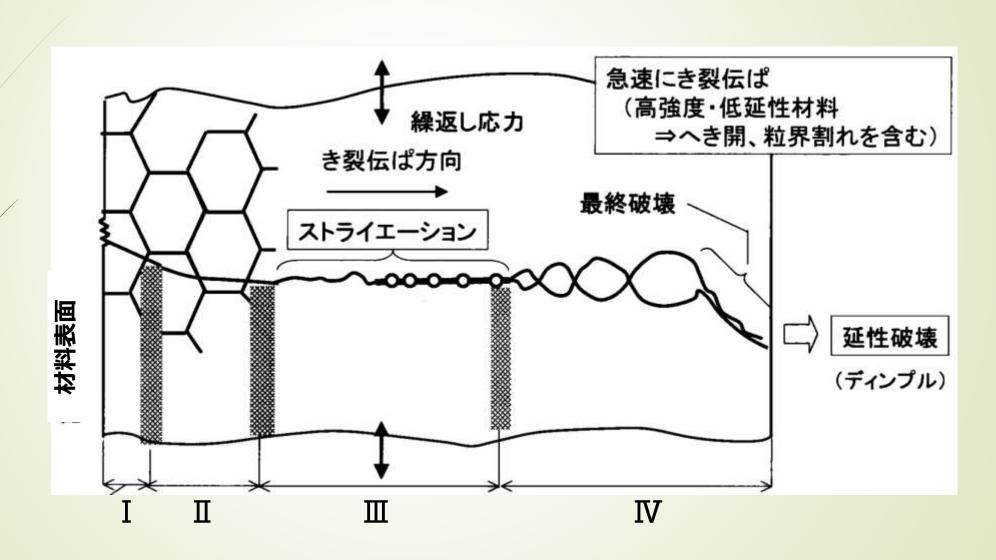
応力集中が問題となる機械要素の代表例



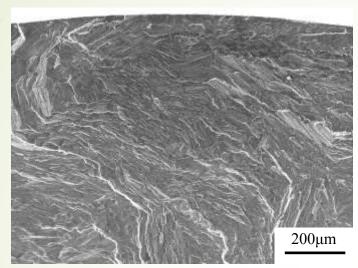
疲労過程(初期)



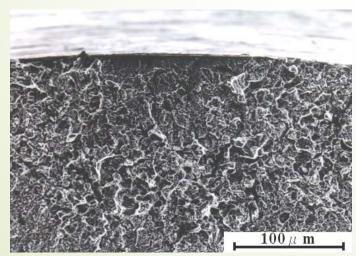
疲労過程(中期~最終破壊)



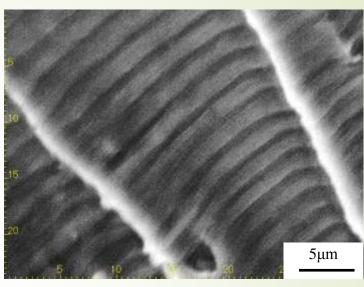
疲労破壊破面



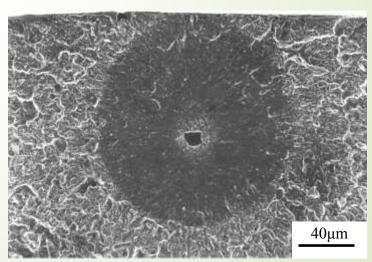
Mg合金AZ31の低サイクル疲労



鉄鋼SUJ2の低サイクル疲労



AI合金A2024の高サイクル疲労

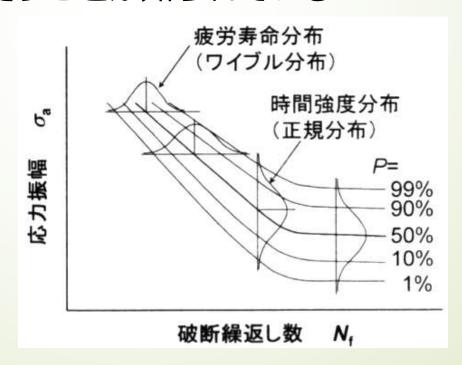


鉄鋼SUJ2の超高サイクル疲労

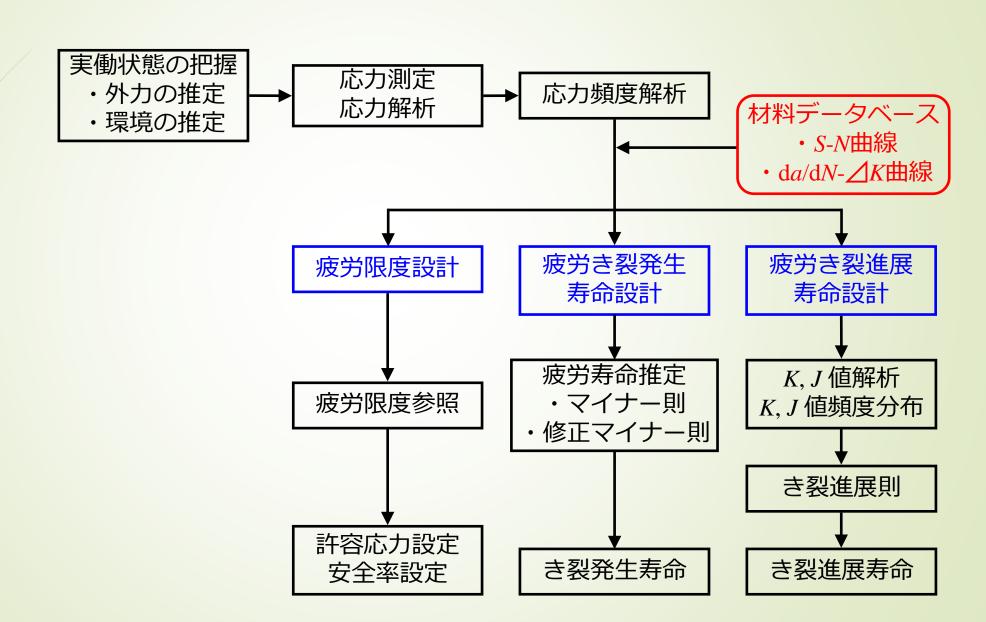
2. 金属材料の疲労特性

外力や部材強度だけでなく疲労強度や疲労寿命も固有のばらつきをもつ. 負荷応力レベルが一定であっても, 疲労寿命は大きなばらつきをもつ(それゆえ, 寿命は対数軸で表示する)

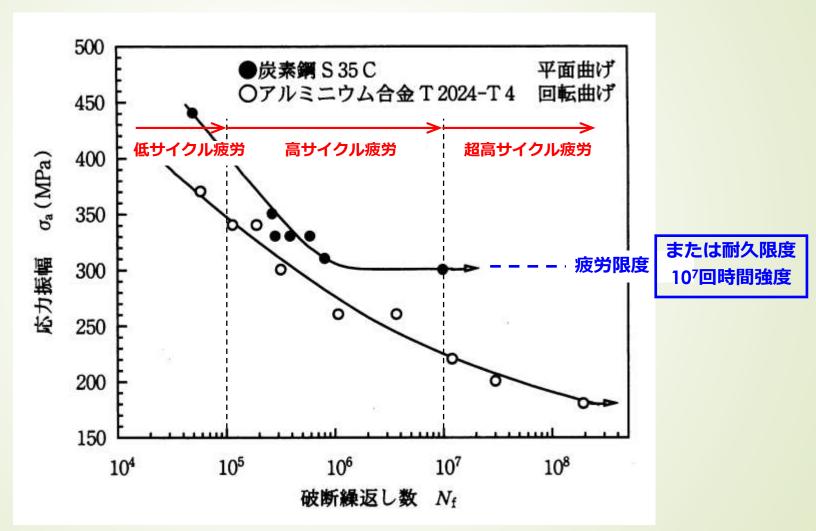
疲労寿命の分布特性はワイブル分布に従い,疲労強度のそれは正規分布に従うことが知られている



疲労強度設計の流れ



一般的なS-N曲線



Stress amplitude vs. Number of cycles to failure

高強度鋼の超長寿命疲労特性

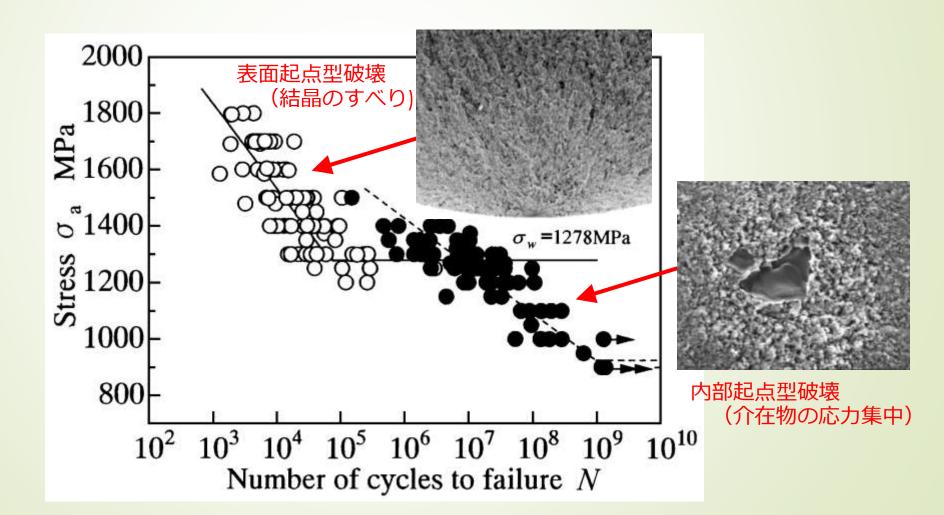
回転軸の応力繰返し数

	区間	往復距離	便数	法令検査	走行距離	タイヤ径	総回転数
新幹線	東京-博多	2,130km	2往復/日	30日 (7日)	(127,824km) 30,000km	860mm	4.73×10^7 1.11×10^7
自家用車	富山-奈良	800km	1往復/月	24月	19,200km	615mm	9.94×10 ⁶

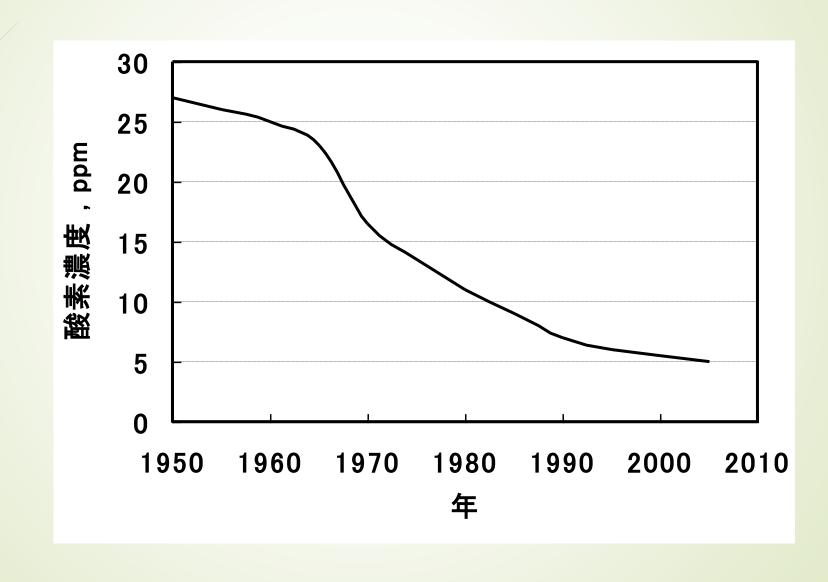
応力繰返し数107回の疲労限度設計では危険

高強度鋼のS-N曲線(近年の研究)

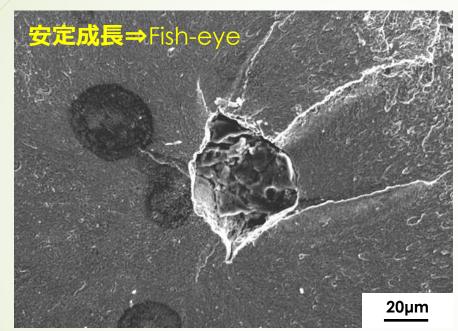
> 二重S-N曲線(表面起点型:内部起点型)

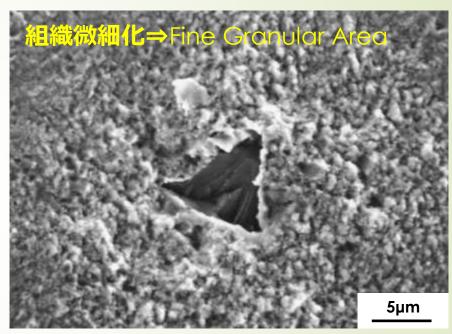


製鋼技術の向上による酸素含有量の減少



内部起点となる非金属介在物





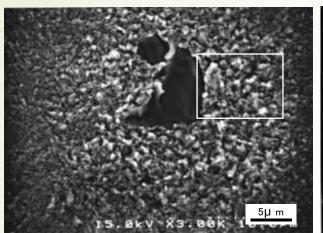
酸化物系介在物

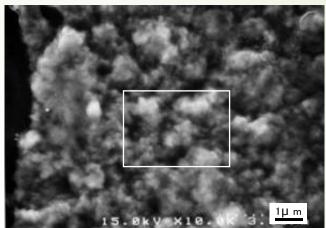
酸素濃度 = 高 介在物寸法 = 大 疲労寿命 = 短

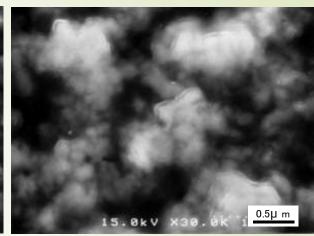
窒化物系介在物

酸素濃度 = 低 介在物寸法 = 小 疲労寿命 = 長

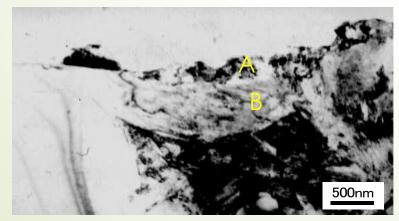
拡大観察

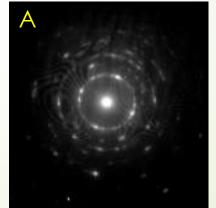


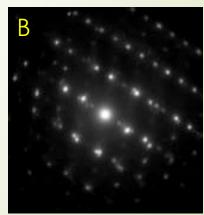




断面観察



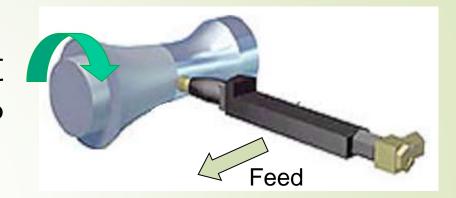




制限視野X線回折パターン

ロール加工(寿命向上策)

高硬度ボール,ローラーを表面に 押し付け,表面粗さを小さくする



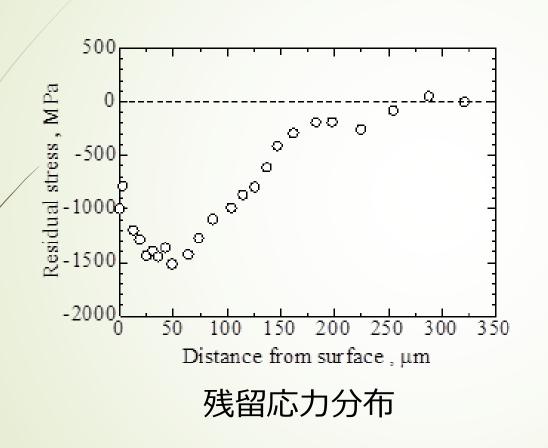
ロール加工の利点

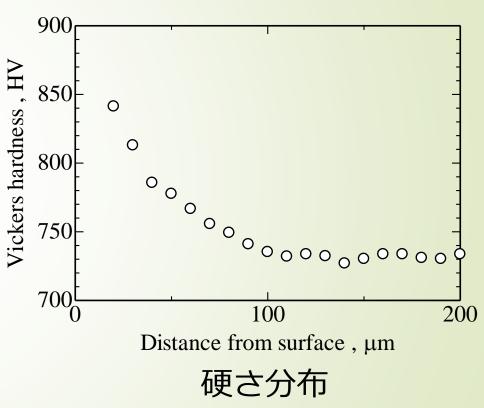
•圧縮残留応力の付与

表面起点型破壊寿命の延命

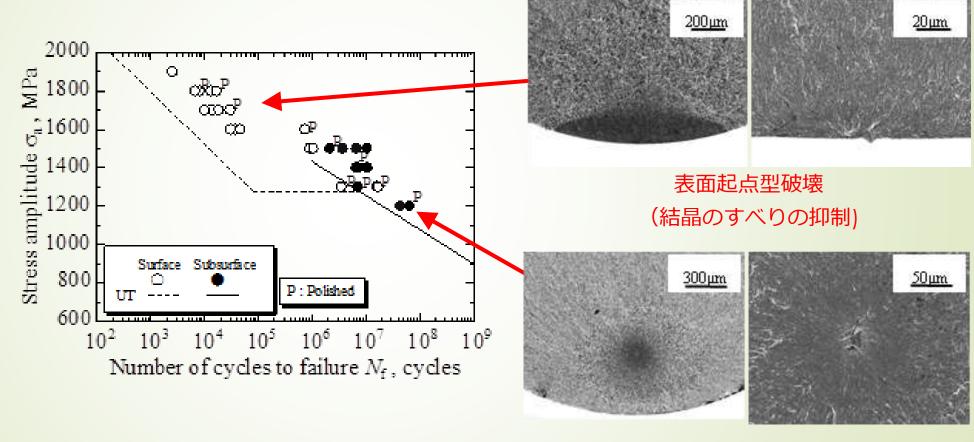
- ・表層の硬さの上昇
- ・表面仕上げによる表面粗さの低減

残留応力分布と硬さ分布





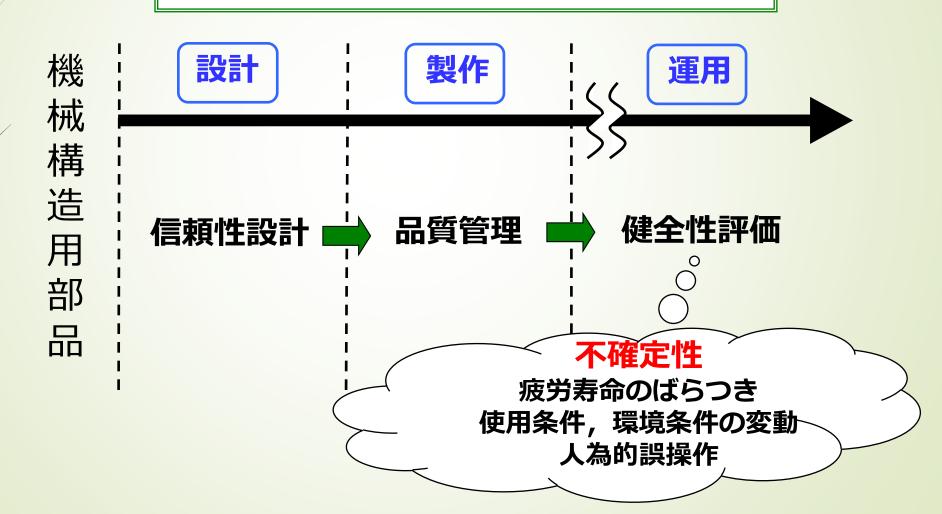
ロール加工材のS-N特性



内部起点型破壊 (破壊起点の深化→応力振幅の減少)

4. オンライン寿命予測

安全・安心な社会環境の構築



オンライン健全性評価技術

- ●昇温
- ●過電流
- ●音響
- ●振動法
- ▲E法 -----シノイズ混入による誤診断

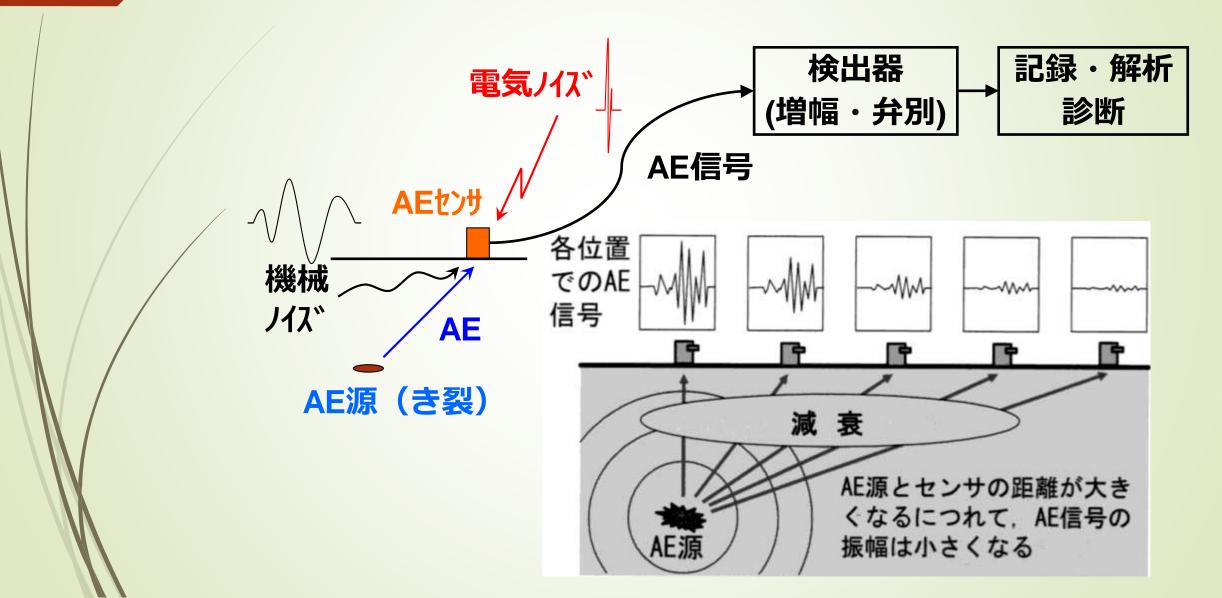
Acousutic Emission 音響放射

機械ノイズ, 電気ノイズ ⇒周波数フィルタ, 空間フィルタ, 波形フィルタ

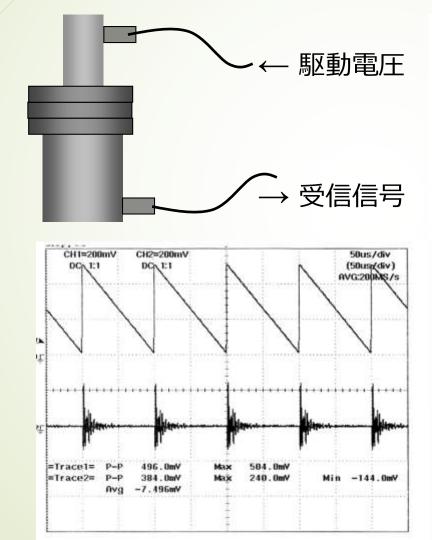
▶減衰によるSN比の低下

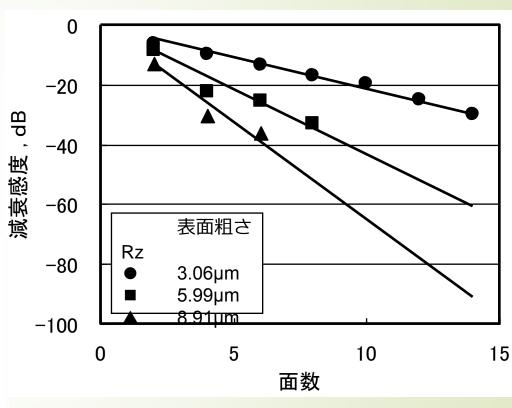
距離減衰, 界面減衰 ⇒ワイヤレスAEセンサ

AE信号の距離減衰



AE信号の界面減衰

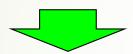




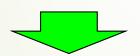
センサは検査対象に近い方が良い

回転体の損傷監視

・回転軸や軸受などの回転体をAE法で監視する場合,従来の 有線AEセンサでは,距離減衰・界面減衰の影響を受ける ⇒ ワイヤレス化

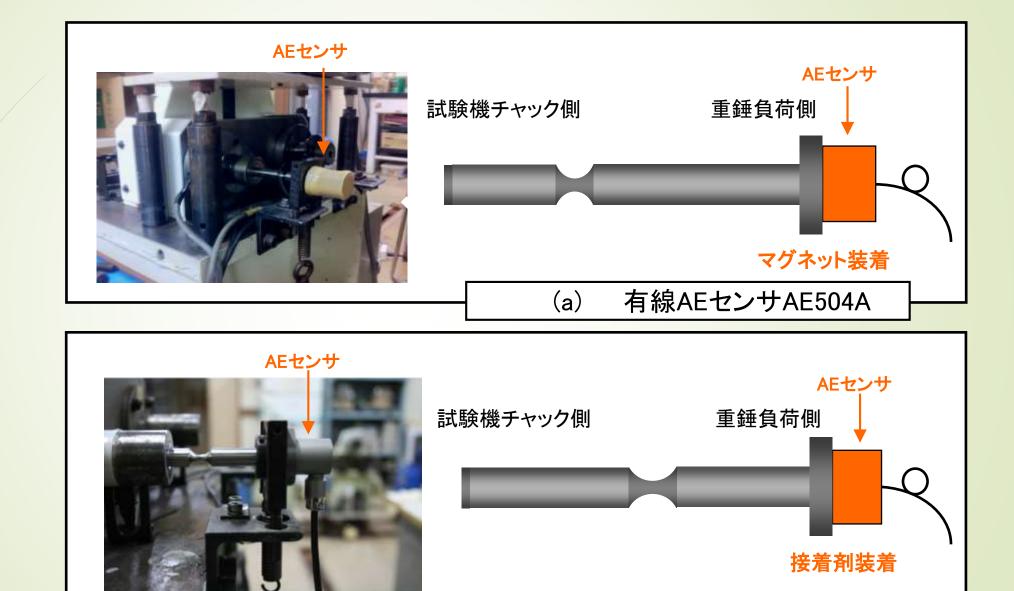


・FM方式ワイヤレスAEセンサでは,バッテリー,アンテナの スペースが必要,かつ,バッテリー切れが懸念



・電磁誘導方式のワイヤレスAEセンサを開発

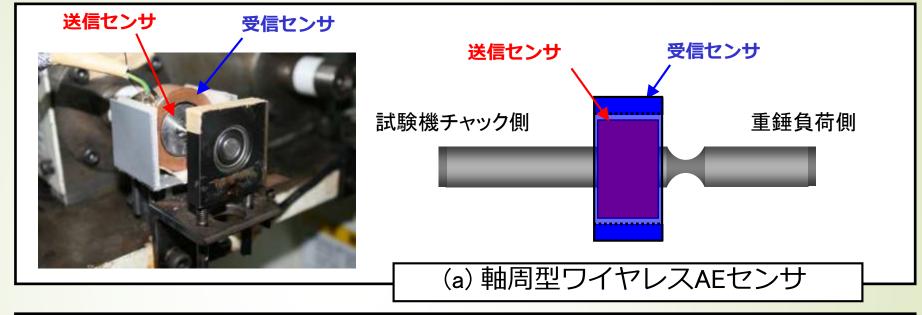
有線AEセンサ

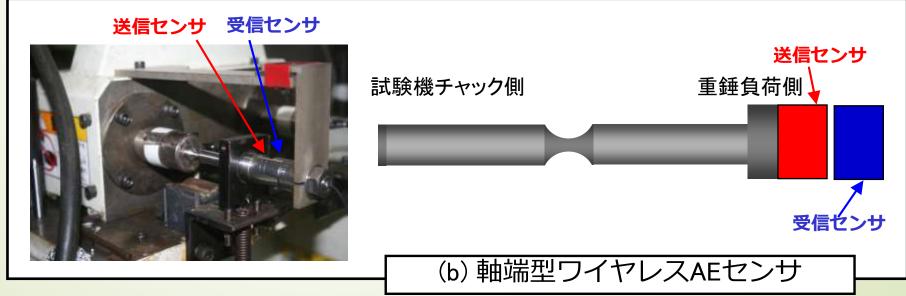


(b)

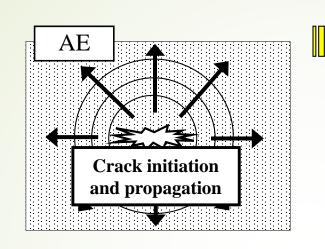
有線AEセンサM-WW

ワイヤレスAEセンサ

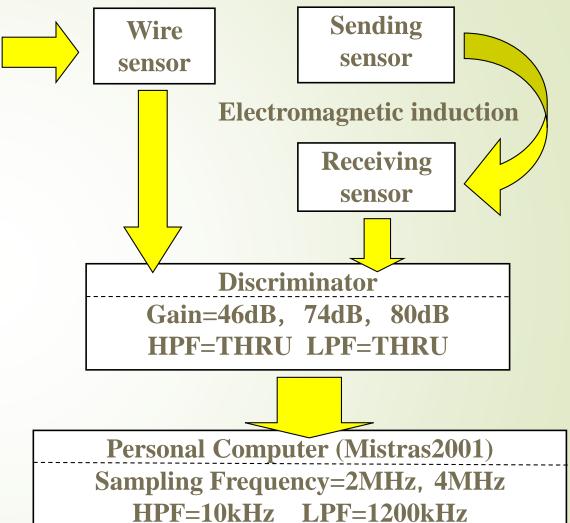




AE計測システム



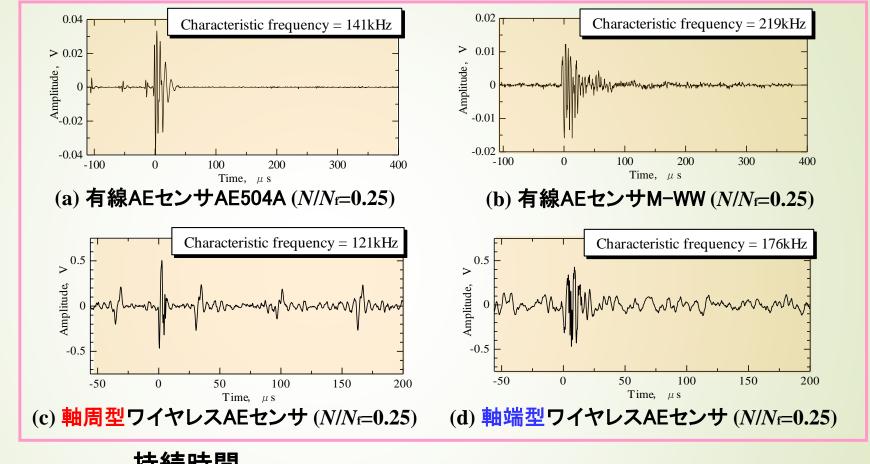




Block diagram of AE measuring system

Trigger Level=30dB, 50dB, 68dB, 74dB

AE計測結果 持続時間



持続時間

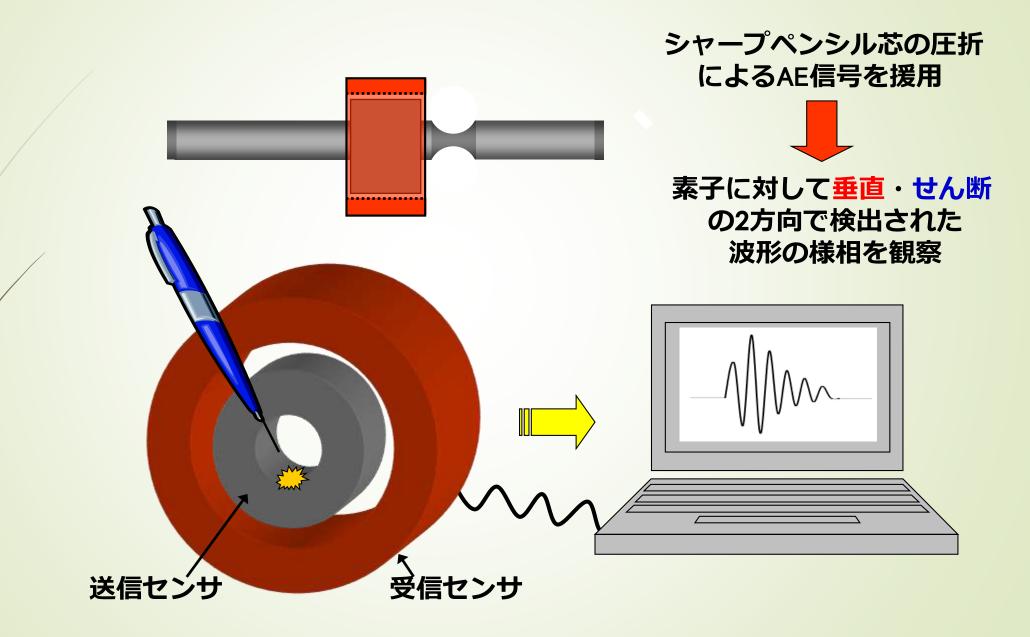
- (a) 有線AEセンサAE504A **40μs**
- (b) 有線AEセンサ M-WW **60μs**
- (c) 軸周型ワイヤレスAEセンサ 20µs
- (d) 軸端型ワイヤレスAEセンサ 40µs

持続時間に差異あり! 軸周型ワイヤレスAEセンサは短い

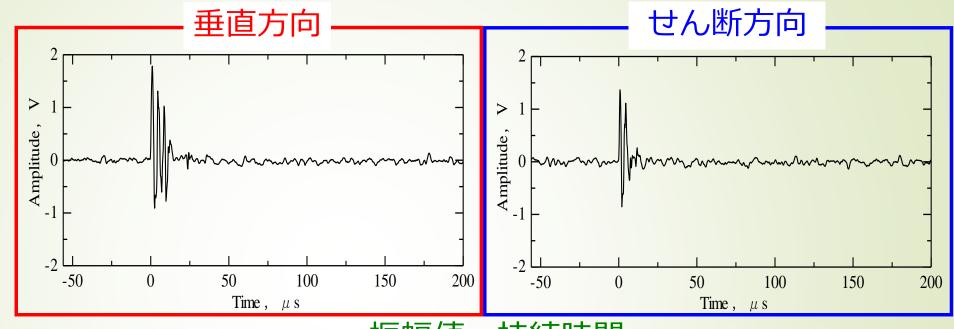


き裂発生位置とAE素子位置の関係?

素子に対するAEの受波方向の調査



AE波伝播特性



振幅値・持続時間

垂直方向 > せん断方向

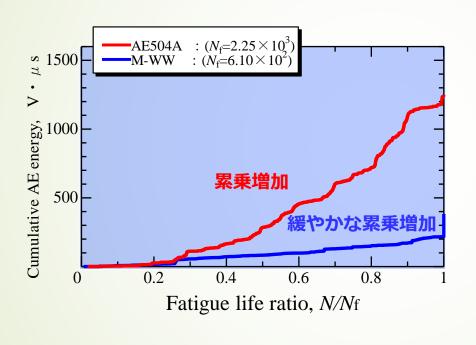
軸周型ワイヤレスAEセンサで検出したAE信号は 圧電素子の受波方向に依存



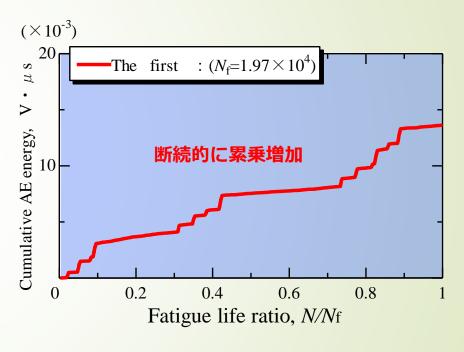
軸周型ワイヤレスAEセンサの適用は信号検出信頼性に劣る

AE計測結果 累積AEエネルギー値

有線AEセンサ



軸端型ワイヤレスAEセンサ





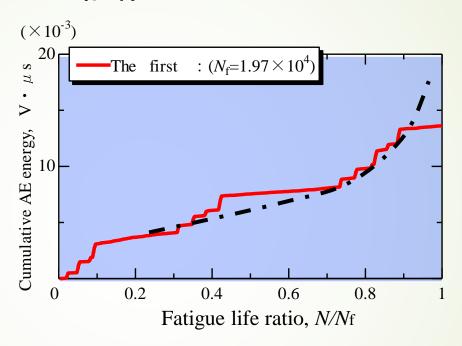
寿命比との間に相関あり



疲労寿命との間に相関あり?

損傷診断と寿命予知の可能性

軸端型ワイヤレスAEセンサ



疲労後期になるほど累積AEエネルギーは累乗的に増加



- ・累積AEエネルギー値が任意のしきい値を超えれば損傷検出可
- ・累積AEエネルギーの勾配の分析により寿命予知の可能性あり

5. 建築に関連した研究

- ▶ 木造住宅へのニーズ
 - ・間取りの自由度を高める大空間化
 - ・開放感のある室内空間を確保する大開口化
- 公共建築物木材利用促進法の制定



木造ラーメン工法



大震災 ⇒ 強度向上, 揺れの吸収機構の開発

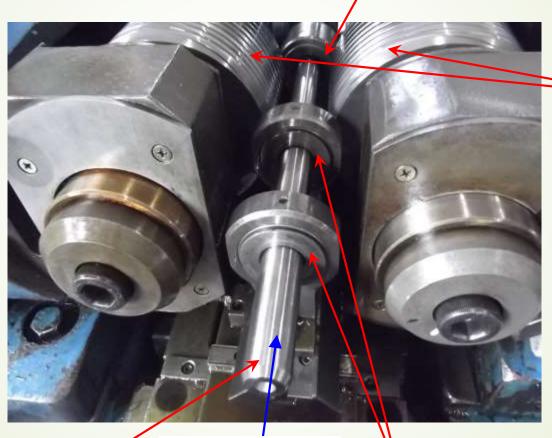
- ▶ 柱と梁の締結部の強度向上と美観のための部材
 - ⇒ 特殊螺旋ボルト (Lag Screw Bolt: LSB)
- ▶ 加工方法:切削加工→転造加工
 - ・素材コスト削減
 - ・加工コスト削減
 - 部材強度向上





LSBの転造加工

LSB支持リング



転造ダイス

素材歩み方向

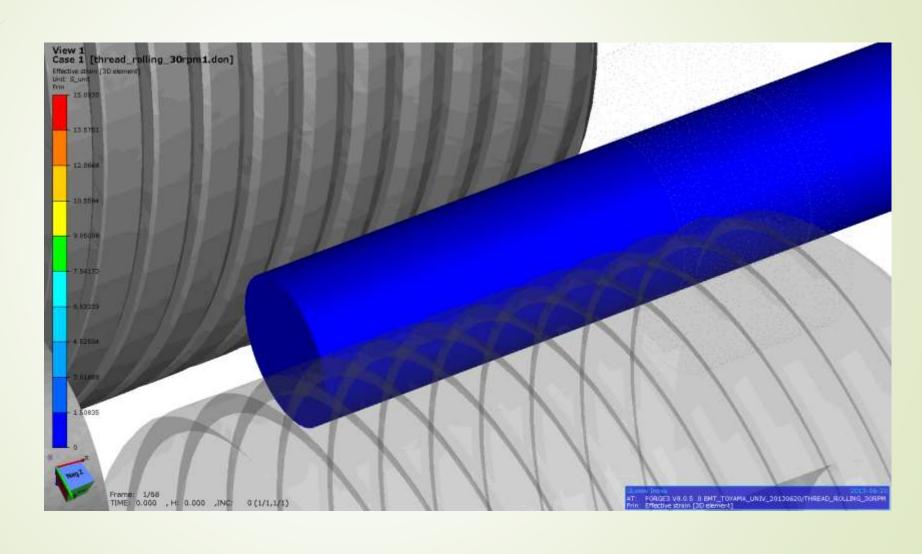
素材

素材支持リング:上下拘束,左右可動

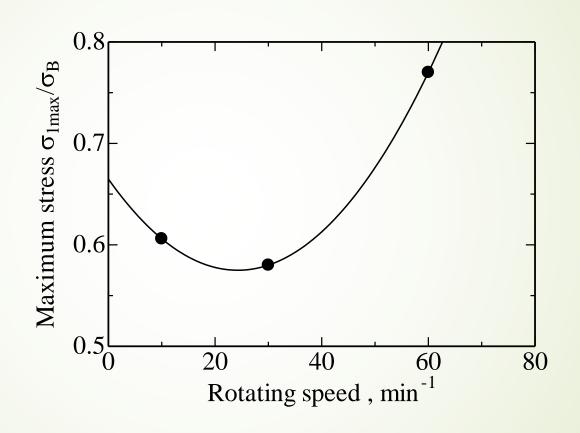
転造シミュレーションによる最適加工条件の特定

- > ダイス
 - ・回転速度:10,30,60min-1(両ダイス駆動)
 - ・制御:変位制御=ダイス中心間隔207mmへ移動
- > 素材の摩擦条件
 - ・クーロン摩擦: 0.5
 - ・粘塑性摩擦:相対すべり速度依存式
- > アプリケーション
 - ・3次元弾塑性解析ソフトウェア FORGE HPC・2011SP1

転造シミュレーション結果



ダイス回転速度と最大主応力の関係



回転速度20~30rpmがダイス負荷の小さい条件

おわりに

機械構造物の安全・安心を確保する ための疲労特性研究・評価技術開発 に日夜邁進しております

ご清聴ありがとうございました