

CAEツールを活用した疲労強度設計システムの構築

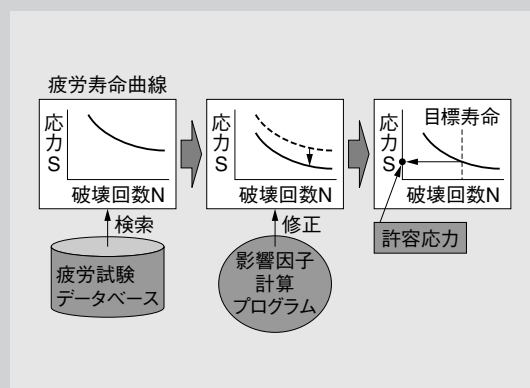
🔗 疲労強度設計, 疲労データベース, CAE

* 高津一誠 Kazushige Takatsu

* 佐々木聖夏 Kiyoka Sasaki

概要

繰り返し荷重を多数回受ける製品は、荷重が加わるとにき裂が進展し最終的に破壊に至る、金属疲労を考慮した強度設計が必要である。しかし疲労強度設計は、荷重の大きさや環境によって適用すべき手法が異なること、また疲労強度を低下させる各種因子の影響度算定が複雑であることから手間がかかる。これを改善するため、疲労設計支援専用のCAEツール（Computer Aided Engineering Tool：設計支援用のコンピュータ・システム）を導入し、適用基準を定め、また当社がこれまで行ってきた研究成果をツールに反映させることで、効率的に設計を行えるようにした。



高サイクル疲労解析を例にしたツールの概要

1. ま え が き

当社は1983年から三次元CAE（Computer Aided Engineering）ツールを導入し、現在では解析技術の活用が全社に普及している。構造解析分野では、負荷荷重によって破壊や永久変形を起こさない静的強度の解析や、固有振動数や周波数応答解析など動特性の解析などが行われている。静的強度は、CAEの活用によってそれまでは単純な形状でしか計算できなかった応力集中を、複雑な形状でも考慮できるようになり、応力推定の精度が向上し、手間が削減された。しかし、繰り返し荷重によって生ずる金属疲労は、CAEの利用が進んでいなかった。その原因は、疲労強度に影響を及ぼす因子にある。疲労強度は、影響を及ぼす因子が複数あり、その計算に手間がかかる。また、形状・寸法に関わる因子も材料定数が関係するため、構造

解析ツールで算定した応力値が直接使用できない。

この状況を改善するため、**疲労強度設計の評価を支援するツールと当社のノウハウを組み合わせ**て効率的な疲労設計システムを構築したので、本稿でその内容を紹介する。

2. 疲労強度設計の手法

2.1 手法と適用対象

疲労強度設計は、対象に負荷される応力レベルや使用環境などによって、以下のように異なる手法を選択して、また場合によっては組み合わせ、用いる必要がある。

(1) 高サイクル疲労解析 比較的小さい負荷応力レベルかつ多い繰り返し数で破断する疲労現象の疲労強度を解析する手法である。負荷応力の大きさと疲労破壊に至る繰り返し回数との関係を示した、S-N曲線を用いて疲労寿命を評価する。当

*システム技術研究所

社製品で例を示すと、AGV（無人搬送車）の発進・停止で荷重が負荷される駆動部や、回転機の運転時にトルクが変動してねじり荷重が加わるシャフトなどが対象である。

(2) 低サイクル疲労解析 比較的大きい負荷応力レベルかつ少ない繰り返し数で破断する疲労現象の疲労強度を解析する手法である。ひずみの大きさと疲労破壊に至る繰り返し回数との関係を示す $\epsilon-N$ 曲線を用いて疲労寿命を評価する。当社製品で例を示すと、発電機の起動・停止で遠心力荷重が負荷されるロータコイルやファンなどが対象である。

(3) 疲労き裂進展解析 き裂がある部材の疲労強度を解析する手法である。き裂先端近傍の応力場を表現する応力拡大係数とき裂進展速度との関係を示すき裂進展曲線を用いて疲労寿命を評価する。当社製品で例を示すと、溶接構造を持つ回転機における回転子の未溶着部などが対象である。

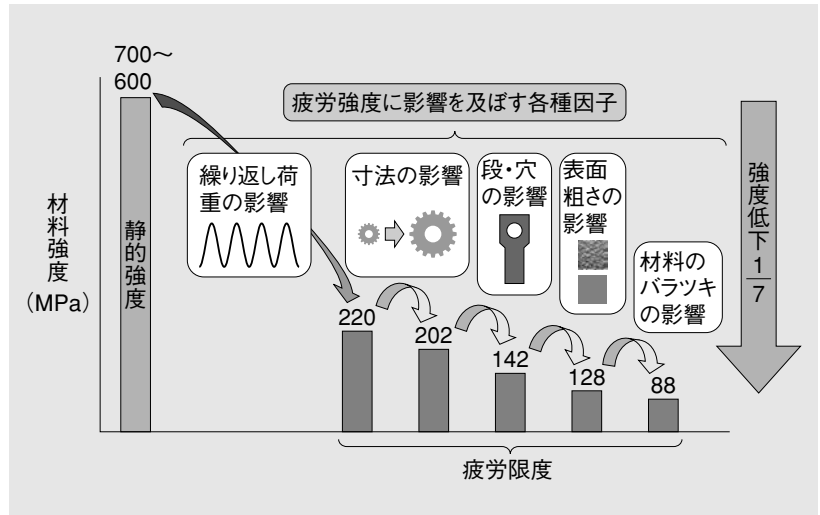
(4) 高温強度解析 高温環境下で時間に依存して増大するひずみ量を解析する手法である。当社製品で例を示すと、電子部品の発熱により時間とともに変形していくはんだ部などが対象である。

(5) 実働荷重解析 実働荷重の大きさが一定でなく変動する場合、その影響を考慮した疲労解析を行うための手法である。

2.2 各種因子の影響

単調な引張荷重で破壊する場合と比べて、繰り返し荷重で破壊する疲労では、より小さな荷重でも破壊に至る。また、特定回数の繰り返し荷重を加えても疲労破壊が起らない強度は、各種因子の影響によって大きく変動する。第1図に疲労強度の影響因子を示す。この例は、疲労強度として繰り返し荷重を何回加えても疲労破壊が起らない強度である疲労限度に対する各種因子の影響を示している。疲労強度設計では、これら因子の影響を見積もって強度を計算する必要があるため手間がかかる。影響因子を以下に示す。

- (1) 寸法 寸法が大きくなると強度が低下
- (2) 段・穴など 応力集中が起きる場所で強度が低下



第1図 疲労強度の影響因子

因子の影響で疲労強度は大きく変動する。因子には各種あり、その影響を見積もるには手間がかかる。

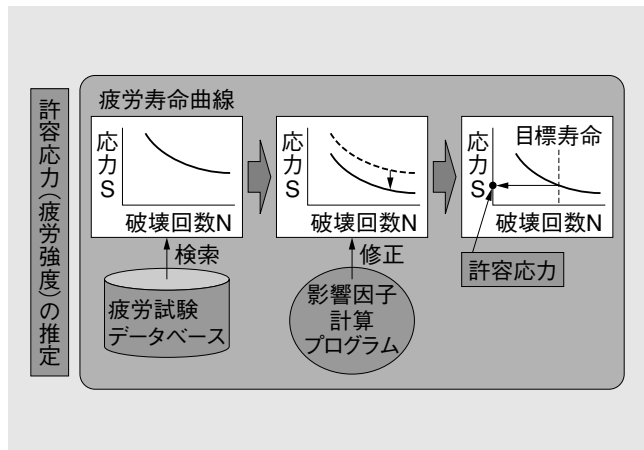
- (3) 表面粗さ 材料の表面粗さが大きいと強度が低下
- (4) 材料のバラツキ 同一材料でも疲労強度にバラツキあり

3. 疲労強度設計の効率化

3.1 疲労強度設計支援ツールの概要

このように異なる手法を使い分け、あるいは組み合わせ、また各種因子の影響を考慮する必要がある疲労強度設計には手間がかかる。これを改善するために、METIS/Win（以下、METIS）を導入した。METISは、材料強度の実データを元に定量的・統一的に疲労強度設計を支援するためのCAEツールである。このツールは、(株)三菱総合研究所主催の当社を含む約20社の参加によるマルチクライアントプロジェクトによって作成されたUNIX版METISを、(株)三菱総合研究所がWindows版に作り直したものである。

第2図に疲労強度設計支援ツールの概要を、第1表にデータベースと計算プログラムの要件を示す。METISは、解析手法ごとに疲労試験データを格納したデータベースと、疲労強度に影響を及ぼす各種要因の計算を行うプログラムを備えている。METISの特長の一つは、実際の疲労試験データ（試験片ごとのデータ）をそのまま収録している点である。データには、日本材料学会・旧金属材料技術研究所（現：物質・材料研究機構）の疲労試験データがあり、お客様のデータ登録が行え



第2図 疲労強度設計支援ツールの概要

疲労強度設計の効率向上のため、疲労試験データベースと影響因子計算プログラムから成るツールを導入した。

第1表 データベースと計算プログラムの要件

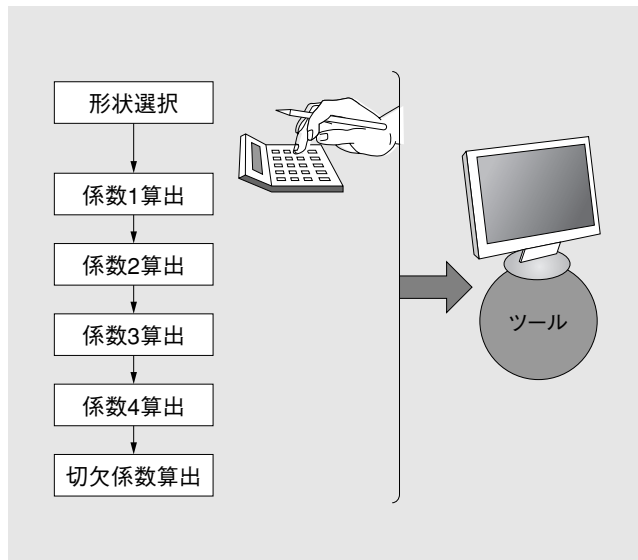
本データ以外に、社内での実験データなども登録している（例えば、はんだの高温強度データなど）。

機能	データベース	計算プログラム
高サイクル疲労解析	鉄鋼264, 銅材11, アルミ材66, その他8種類 (4178件)	S-N曲線作成・推定, 切欠係数計算, 安全率計算, 等価相当応力計算
低サイクル疲労解析	鉄鋼49, 銅材1, アルミ材8, その他6種類 (420件)	ϵ -N曲線作成・推定, 応力ひずみ曲線推定, 切欠係数計算, 等価相当応力計算, 仮想応力振幅計算, 安全率計算
疲労き裂進展解析	鉄鋼94, 銅材3, アルミ材11, その他1種類 (729件)	き裂進展抵抗曲線作成・推定, 応力拡大係数計算, き裂進展寿命計算
高温強度	鉄鋼52, アルミ材3 (1817件)	応力・破断時間線図作成, LMP線図作成, 安全率計算
実働荷重	—	応力カウント計算, 擬似ランダム波作成

る。これによって、線図だけでは分からないデータのバラツキを評価したり、実際に試験を行った範囲を確認して線図の不適切な外挿を防いだりすることができる。また、例えば平均応力の影響などで、条件に合うデータがあれば、影響因子計算プログラムによらず実データで強度評価を行うこともできる。

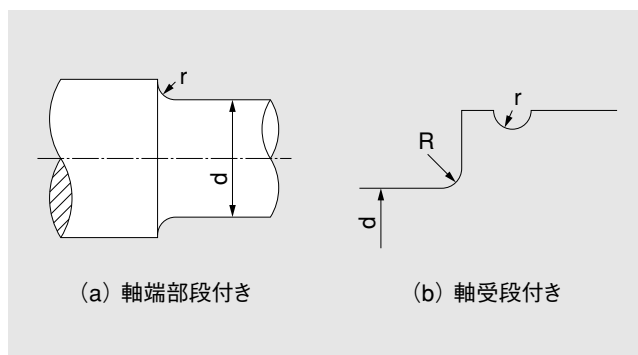
3.2 切欠係数計算における効率化

影響因子のうちでも疲労強度に及ぼす影響度が高い切欠係数について、効率化の内容を更に説明する。切欠係数は、段や穴などの形状によって生じた応力集中に起因して疲労強度が低下する度合いを示したものである。しかし切欠係数は、応力集中の度合いを示した応力集中係数と必ずしも比例関係にはならない。そのため、構造解析ツールなどで求めた応力集中を反映した応力を単純に用



第3図 切欠係数の算出

今まで手間がかかっていた切欠係数の算出が、統一的な方法で簡単に行えるようになった。



第4図 段付き部の例

段付き部のある回転軸について疲労強度計算の効率化を実現し、適用基準を定めた。図中のdは軸直径、r又はRは段付き部の半径を示す。

いて疲労強度を評価することはできない。切欠係数を求めるには、日本機学会の実験式などに基づいて、第3図の左側に示すように多くの係数を求めた上で算出する必要がある。一方METISでは、応力集中箇所の形状をあらかじめ登録されている形状ライブラリから選択し、寸法及び材料定数を指定することで切欠係数を簡単に算出できる。

4. 効率化の実例

4.1 疲労強度計算の適用事例

第4図に段付き部の例を示す。段付きのある回転軸などについて、METISを用いて切欠係数などの因子の影響を計算し、高サイクル疲労解析の手法に基づいて強度計算を行った。また適用基準を策定し、実験式の選択基準や安全率の基準値などを定めた。

4.2 疲労強度研究成果の登録

当社は、これまで疲労強度に関する様々な研究を行い、当社製品の疲労強度設計の精度を向上させる知見を得てきた^{(1)~(6)}。この研究成果をMETISに登録し、他のデータと同様の手順で利用することができるようにした。

5. む す び

今回CAEツールを導入し、疲労強度設計の効率化を実現することができた。効率化の実現にはツールを導入するだけでは十分でなく、適用基準の策定や当社製品にて対象となる因子の影響や材料特性を研究し、その成果をツールへ反映させることが必要である。今後も疲労強度設計に関する研究開発を推進し、効率化だけでなく安全率の適正化を図り、環境配慮設計の推進にも貢献していく。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 渡辺広光・山本晴生・川田雄一：「低炭素鋼のき裂進展挙動に及ぼす平均応力の影響」, 日本機械学会論文集. A編51 (472), 1985-12-25, pp.2692-2698
- (2) 渡辺広光・山本晴生, 川田雄一, 竹淵秀光：

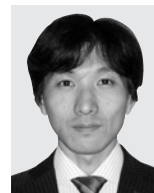
「最大応力が圧縮の過小応力を含む変動応力下の疲労き裂の進展挙動：SUS410を用いた平面曲げの場合」, 日本機械学会論文集. A編53 (486), 1987-02-25, pp.206-210

(3) 萩原芳彦・小賀正樹・柳田豪：「けい素鋼板の疲労き裂進展に及ぼす異方性, スリット角の影響」, 日本機械学会論文集. A編56 (526), 1990-06-25, pp.1366-1370

(4) 渡辺広光・山本晴生・三沢啓志・大塚満章：「タフピッチ銅平板の変動応力下の疲労寿命推定法の検討」, 日本機械学会論文集. A編66 (651), 2000-11-25, pp.2044-2048

(5) 渡辺広光・山本晴生：「有限要素法による鉛フリーはんだの寿命解析」, 日本材料学会 学術講演会講演論文集56, 2007-05-18, pp.123-124

《執筆者紹介》



高津一誠 Kazushige Takatsu
解析技術の研究開発に従事



佐々木聖夏 Kiyoka Sasaki
解析技術の研究開発に従事