データベースを用いた疲労強度特性の予測*
(第1報, 高サイクル疲労強度の予測)二瓶正俊^{*1}, 今野武志^{*1}Prediction of Fatigue Strength Properties
using Material Strength Database
(1st Report, Prediction of High-Cycle Fatigue Strength)

Masatoshi NIHEI and Takeshi KONNO

The dialogical integrated system for a material strength database (DIMS) was newly developed. In this study, the prediction procedures for fatigue strength properties were investigated using DIMS. It was found that the high-cycle fatigue strengths were accurately estimated by a multivariate analysis on the basic material factors of heat treated materials such as chemical composition and heat treatment temperature, under the limited conditions which were classified by materials used, heat treatment conditions and/or the fatigue fracture mode. From these results, the fatigue strength prediction procedure was proposed and examined for several published data sets, and it was found that the proposed prediction procedure, which used the multicorrelations among several material properties in the database system, was quite suitable for the prediction of high-cycle fatigue strength.

Key Words: Fatigue, Life Prediction, Numerical Analysis, Database System, Multivariate Analysis

1. はじめに

近年, 多くの分野でのデータベースの利用技術の発展は著しいものがある。材料強度分野でも JICST (日本科学技術情報センター) での金属材料強度データベースのサービス開始など, 学協会を含め活発な活動が行われている。さらには, 企業内データベースとして各種 CAD, CAM など付随したプライベートなデータベースを考慮すれば, 現在相当な数のデータベースが稼働あるいは利用可能な状態と考えられる。

しかし, 材料強度分野に限ってみれば膨大な情報を含むデータベースが有効に利用されているとはいえない。これは, 大部分のデータベースは非公開であり, データベースの利用には多くの制限があるのがその理由の一つであり, さらに, JICST のデータベースサービスに見られるように多くのデータベースはデータの検索のみに主体を置いたものが多く, 検索したデータの整理, 解析, 評価などの統合的データベース利用環境が整備されていないことが材料強度分野でデータベ

ースが有効に利用されていない大きな理由と考えられる。著者らはこれまでもデータベース利用技術開発を進めてきたが⁽¹⁾, 本研究ではさらに一層の利用技術開発を図るため, 統合的なデータベース利用環境の構築を行い, 材料強度データベースの中に含まれる情報から必要な知識を抽出し, それらを体系化することにより材料の寿命や強度特性を予測する手法開発を目指した。そのため, EWS (エンジニアリングワークステーション) 上で稼働するはん用の研究支援材料強度評価システム (DIMS) を独自に開発し, これを用いて材料製造時段階のミルシートの情報から 10^7 疲労強度を予測する手法について検討した。

2. 開発した DIMS の概要

2・1 仕様 DIMS (Dialogical Integrated system for Material Strength database) は UNIX ネットワーク環境下での利用を前提に, X-Window システムを利用して材料強度データベースの検索, 結果の解析, 評価さらにそれらを表示する統合化システムとして作成した。含まれるデータは現在のところ金材技研疲労データシートとクリープデータシートを中心に 45 材種, 332 ヒートの材料について, 材料, 機械的性質, 高サイクル疲労, 低サイクル疲労, 疲労き裂伝ば,

* 平成3年4月1日 第68期通常総会講演会および平成3年10月16日 第69期全国大会講演会において講演, 原稿受付平成3年11月7日。

^{*1} 正員, 金属材料技術研究所 (〒153 東京都目黒区中目黒 2-3-12)。

クリープ破断などの各種特性値が解析・評価可能になっている。図1に開発したDIMSの構成を示す。

データ検索用のDBMSツール、統計解析・評価ツール、図形作成表示ツール、入出力インターフェースツールなど各種ツール群をGUI (Graphical User Interface) としてX-Windowシステムを用いたポップアップメニュー形式の管理ルーチンがDIMS全体の実行、入出力の管理を行っている。したがって、ユーザからはこの管理ルーチンしか見えないことになる。当システムの実行にはUNIX環境でX-WindowシステムX11R.3以上、主メモリとして8Mバイト以上が動作環境として必要である。

2・2 データの評価法 DIMSの中で各種疲労特性、クリープ特性データは以下のような標準的と考えられる方法⁽²⁾でそれぞれ解析評価することが可能である。

(1) 高サイクル疲労特性

高サイクル疲労データ(回転曲げ、軸力、ねじり)を傾斜部は主成分法により、水平部はプロビット法により2直線近似して得られた折れ線のこう配、折れ曲り点、 10^7 疲労強度などの回帰情報からS-N曲線をあてはめる。この際、分布の対称性、等分散性を仮定している⁽³⁾。

(2) 低サイクル疲労特性

ひずみの弾性および塑性成分と破断寿命との関係をそれぞれ線形回帰により別個に求め、それらを合成したCoffin-Manson則の $\epsilon_{ta}-N_f$ 曲線へのあてはめを行う。

$$\epsilon_{ta} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^{-b} + \epsilon'_f(2N_f)^{-c}$$

ただし、 ϵ_{ta} :全ひずみ振幅、 N_f :疲労寿命、 E :縦弾性係数、 σ'_f , ϵ'_f , b , c :材料定数。

(3) 繰返し応力-ひずみ関係

塑性ひずみと応力の関係を線形回帰し、次式の指数

硬化則によるあてはめを行う。

$$\epsilon_{ta} = \sigma_a/E + (\sigma_a/K')^{1/n'}$$

ただし、 ϵ_{ta} :全ひずみ振幅、 σ_a :応力振幅、 E :縦弾性係数、 K' , n' :材料定数。

(4) 疲労き裂伝ば特性

下限界値を考慮した次式についてシンプレックス法による非線形回帰⁽⁴⁾によるあてはめを行う。

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)$$

ただし、 da/dn :き裂伝ば速度、 ΔK :応力拡大係数範囲、 ΔK_{th} :同下限界値、 C , m :材料定数。

(5) クリープ破断特性

Larson-Miller⁽⁵⁾あるいはManson-Hafner⁽⁶⁾の直交多項式回帰によるあてはめを行う。

(6) このほか、統計解析ルーチンとして通常の線形回帰、多変量回帰⁽⁷⁾などのはん用ツールも解析評価に使用できる。図2にDIMSの操作例を画面イメージとして示した。これは、適当な検索条件により検索したS-Nデータを表示し、それに前述の2直線近似回帰を行ったところで、このあとさらにその解析結果を用いた各種の評価も可能である。

3. 解析結果と考察

本研究では前節で述べたDIMSを解析評価用ツールとして用いて材料の疲労強度特性値を各種材料特性値の相関関係から予測する手法の検討を行った。この際、対象とする疲労強度特性値としては前節の評価法で述べたような2直線近似回帰により求めた平滑材の 10^7 疲労強度、解析に用いる材料データとしては鉄鋼材料に限定した。

3・1 単相関を用いた 10^7 疲労強度の推定 材料の機械的性質と 10^7 疲労強度の間に高い相関があることはよく知られている⁽⁸⁾。

図1 DIMSの構成

図2 DIMSの操作イメージ

図3に、例として、炭素鋼についてのビッカース硬度と 10^7 回転曲げ疲労強度の相関を示した。この相関を利用することによりビッカース硬度から 10^7 回転曲げ疲労強度を容易に推定することができ、材料の受け入れ検査などに有効であることがわかる。図4には、同様に炭素鋼についての引張強度と 10^7 回転曲げ疲労強度の関係を示した。図からもわかるように、両者の間にも強い相関が認められる。

このように、機械的性質のうちの一部と 10^7 回転曲げ疲労強度との間には強い相関があり、これらを利用して疲労強度特性値を推定することが可能である。

次に、材料製造段階での情報(ミルシートの情報)である化学成分や製造履歴に注目して疲労強度特性値を推定する可能性について検討した。ただし、本研究では製造履歴として材料の最終熱処理温度で代表させた。図5には炭素鋼について化学成分および最終熱処理温度と 10^7 回転曲げ疲労強度との関係を示した。

図中には、個々の因子との関係を線形回帰して得られた回帰の寄与率も一緒に示してある。全体として、炭素量と熱処理温度以外は前述の機械的性質と 10^7 回転曲げ疲労強度との間にみられた強い相関は得られず、これらの単相関関係を利用した疲労強度特性値の直接の推定は難しいと考えられる。これは、化学成分により材料の状態図が熱力学的平衡に基づいて決まり、材料の物理的構造がその状態図からの冷却過程により決まると考えると、最終的にそれらの組合わせで決まる材料のバルクな機械的性質が個々の因子とそれほど高い単相関関係を示さないのは当然の事と考えられる。

3.2 重相関を利用した疲労強度特性値の推定

単相関の利用が困難な化学成分や熱処理温度など材料

図3 ビッカース硬度と 10^7 回転曲げ疲労強度の相関(炭素鋼)

製造段階で得られる情報を用いるため、多変量回帰による重相関の利用を試みた。この際、結果の適用範囲についても検討を加えながら解析を行った。

3.2.1 ビッカース硬度の推定 ビッカース硬度と材料の強度特性値との間に相関があることは従来か

図4 引張強度と 10^7 回転曲げ疲労強度の相関

図5 化学成分、熱処理温度と 10^7 回転曲げ疲労強度の相関

らもよく知られている。

図6に本研究で解析に用いた全鋼種についてビッカース硬度と引張強度の関係を示した。○印は炭素鋼, △印はステンレス鋼, ◇印は表面硬化処理した肌焼鋼, □印はそれ以外の鋼種を示している。◇印で示した肌焼鋼は表面硬化処理をしているため, 表面におけるビッカース硬度とバルクな材料の性質である引張強度との間に他鋼種のような相関が得られないのがわかる。

次に, 図6で同一の材料グループとみなされる肌焼鋼を除く全鋼種について, 化学成分と最終熱処理温度からのビッカース硬度の推定を試みた。この際, 化学成分としては工学的に利用されているJISの炭素当量で用いられているのと同じの成分を用いた。

つまり, 本研究ではビッカース硬度が次式のように化学成分と最終熱処理温度の多変量関数として表されると仮定している。

$$Hv' = f([C], [Si], [Mn], [Ni], [Cr], [Mo], [V], T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし, $[C], [Si], [Mn], [Ni], [Cr], [Mo], [V]$ は化学成分(重量%), T は最終熱処理温度(°C)。

図7に多変量解析により得られた最適化式から求めたビッカース硬度の推定値を縦軸に, 実測値を横軸に示した。図中, ○印は焼入れ焼戻し材, □, △印は焼なまし, 焼準, 溶体化などの場合で, □印は棒材, △印は板材である。○印と□印については実測値と推定値との間に, 広い範囲にわたり直線関係が得られるのに対し, △印で表される焼入れ焼戻し材以外(実際には焼なまし材)の板材についてはそれらの直線関係からはずれていた。したがって, ここで焼入れ焼戻し材以外の材料については熱処理あるいは素材形状によるグループ分けも必要なのがわかる。

図6 ビッカース硬度と引張強度の相関

以下の解析においては, ここで検討した適用範囲をもとに, 材種データとして肌焼鋼を除き, さらに焼入れ焼戻し材に絞って解析に用いた。したがって, 最終熱処理温度は焼戻し温度とした。図8にはその場合のビッカース硬度の推定値と実測値の関係を示した。図中の実線は線形回帰を行って得られた95%信頼区間を示し, 破線はこう配1の直線を示している。

これからビッカース硬度は材料の化学成分と最終熱処理温度としての焼戻し温度から十分に精度よく推定できることがわかる。

また, ここで最終熱処理温度としての焼戻し温度に代えて, 硬度と相関があることが知られている焼戻しパラメータ $[M = (T_r + 273.15) \times (C + \log_{10} t), T_r: \text{焼戻し温度} (^\circ\text{C}), t: \text{処理時間} (\text{hr}), C: \text{定数} (=20)]$ を用いても同様な結果を得ることができる。

3・2・2 疲労強度の推定 図3で得られた相関か

図7 ビッカース硬度の推定 (肌焼鋼を除く全鋼種)

図8 ビッカース硬度の推定 (グルーピング後)

ら容易に類推できるように疲労強度についても(1)式と同様な多変量解析を利用した疲労強度の推定を行うことができる。その結果を式(2)に示した。

$$\begin{aligned}\sigma_{wb} = & g([C], [Si], [Mn], [Ni], [Cr], [Mo], [V], T_t) \\ = & -249.4 + 243.1[C] + 83.47[Si] - 0.7018[Mn] \\ & + 25.59[Ni] + 8.911[Cr] + 442.4[Mo] \\ & - 1173[V] + 339000/T_t \cdots \cdots (2)\end{aligned}$$

ただし、 T_t は焼戻し温度(°C)。

この場合、解析に用いた材料の範囲は図5に比較して広がっているにもかかわらず、自由度2重調整済み寄与率は0.80と大きかった。ちなみに、図5と同様な材料範囲に限定すると式(2)の係数は異なるものの、自由度2重調整済み寄与率は0.93となり、多変量回帰の利用により推定精度が高くなっていると考えられる。

図9に 10^7 回転曲げ疲労強度について、式(2)による推定値を縦軸に、実測値を横軸に示した。図中□印のデータはばね鋼の非金属介在物による内部破壊の結果であり、本研究では健全材についての疲労強度の推定を試みているため、解析には用いていないが、疲労破壊モードもまた本研究のような場合のグループ分けの基準の一つとして考慮しなければならないものと考えられる。また、図中に示した破線はこう配1を示しており、推定値は低強度側で非安全側、高強度側で安全側にずれているのがわかり、式(2)の適用にはこの点も十分に考慮する必要がある。また、式(2)はあくまでも多変量解析による数学的な最適化式であり個々の因子の物理的寄与を検討できるものではないが、式(2)で焼戻し温度の影響の大きいのが個々の因子の影響度評価から、さらに式(2)で個々の因子の偏相関係数の値が焼戻し温度について最大となることからわ

かる。

4. 疲労強度の予測

10^7 回転曲げ疲労強度について、多変量解析から得られた式(2)を図9中の破線に合わせ込むことで、次式のような疲労強度予測式を導いた。

$$\begin{aligned}\sigma_{wb}^* = & 1.252 \times g([C], [Si], [Mn], [Ni], [Cr], [Mo], \\ & [V], T_t) - 177.0 \cdots \cdots (3)\end{aligned}$$

現在公表されているデータ集⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾に記載されているデータを対象に式(3)の適合性について検討を行った。この際、データ集の中にDIMSに含まれるデータとの重複があるため、それらのデータについては予測対象からはずした。

図10にデータ集に記載のある焼入れ焼戻し材の 10^7 回転曲げ疲労強度の実測値を横軸に、式(3)による予測値を縦軸に示した。

図中、○印は炭素鋼、△印はステンレス鋼、□印はそれ以外の鋼種の予測結果であり、実線で示したこう配1の直線がほぼ中央値となっていた。

また、予測値のばらつきはこう配1の直線に対し、図中に示すような±15%の範囲に大半のデータが入っているのがわかる。なお、これらのデータには焼戻し温度としてJIS規格外のデータも含まれるが、それらに対しても十分な精度の予測が可能であった。同様に、図11には 10^7 両振り軸力疲労強度についての結果を示した。

この場合も、データが少ないものの、図10と同様な手順を用いることにより±15%の予測精度で疲労強度を予測することができた。

したがって、本研究で用いた予測手順を用いれば、

図9 10^7 回転曲げ疲労強度の推定 (グルーピング後)

図10 文献データ^{(9)~(11)}に対する 10^7 回転曲げ疲労強度の予測結果

図 11 文献データ^{(9)~(11)}に対する 10^7 軸力疲労強度の予測結果

材料の化学成分や焼戻し温度といった材料製造時のミルシートの情報から疲労強度を予測できることがわかる。ただし、表面硬化処理をしたような肌焼鋼や非金属介在物破壊を起こす材料を除いた健全鉄鋼材料の焼入れ焼戻し平滑材で、予測精度として $\pm 15\%$ を許容するという制限があることを注記しておく。

つまり、本研究で提案する疲労強度予測手順ははん用の予測式を求めるものではなく、限定された適用範囲内での予測精度の向上を目指したもので、データベースを利用することでそれが容易にできることを示したものである。

5. 結 論

本研究では、データベース利用環境の整備を図るため研究支援材料強度評価システム (DIMS) を独自に開発した。これを解析ツールとして用いて、疲労強度を化学成分や最終熱処理温度といったミルシートの情報

から予測する手順について検討した。

(1) ビッカース硬度や引張強度などの材料の機械的性質からの単相関の利用による疲労強度の推定は、その適用範囲内であれば十分な精度で行うことができる。

(2) ビッカース硬度や疲労強度を多変量解析による重相関を利用して材料の化学成分や最終熱処理温度から推定する場合、材種や熱処理条件、素材形状などの製造履歴等を考慮したグループ分けが必要であり、そうすることで推定精度を向上させることができる。

(3) 本研究で開発したデータベースを利用した疲労強度予測手順に従えば、材料の化学成分や最終熱処理温度といった材料製造時のミルシートの情報から疲労強度を十分に予測できた。また、表面硬化材をのぞく健全鉄鋼材料の焼入れ焼戻し材については、解析に用いた因子の中で焼戻し温度の影響が大きいと考えられる。

文 献

- (1) 石井・三瓶・金澤・西島, 材料, **39** (1990) 444.
- (2) VAMAS Technical Report 6&7 (1990).
- (3) 西島・石井, 材料, **34** (1985) 340.
- (4) 芳賀・ほか 1 名, 回帰分析と主成分分析, 日科技連, (1984), 204.
- (5) Larson F. R. and Miller J., *Trans ASME*, **74** (1952) 765.
- (6) Manson S. S. and Haferd A. M., *NACA TN-2890* (1953).
- (7) 奥野・ほか 3 名, 多変量解析法, 日科技連, (1973), 16.
- (8) 金材技研疲れデータシート資料 1, (1981), 同資料 5 (1989).
- (9) 金属材料疲労強度の設計資料 (I) 改訂第 2 版, 日本機械学会, (1982), 18.
- (10) 金属材料疲労強度データ集, 日本材料学会, (1982).
- (11) CAZAUD R., ほか 3 名, 金属の疲れ (船久保・西島訳), (1973), 184, 丸善.