

# 損傷評価プログラム DAMAGE 90 の適用性について

(その2: アルミニウム合金および鋳鋼材の疲労寿命の同定と予測)

On the Applicability of the Program DAMAGE 90 for Damage Evaluation

(Part 2: Identification and Prediction of fatigue life for Aluminum and Cast steel)

岡 田 和 三\*・都 井 裕\*

Kazumi OKADA and Yutaka TOI

## 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>では、筆者の一人らが提案した構成方程式モデル<sup>2)</sup>を同定した鋼材およびアルミニウム材の、単軸引張挙動および片振引張応力下の疲労挙動に対する DAMAGE 90<sup>3)</sup>の適用性を検討した。その結果、引張挙動については、実験結果と若干の定量的相違はあるが、損傷進展の様子は比較的良くシミュレートすること、また疲労挙動については、筆者の一人らが導入した損傷強度パラメータを用いることによって、高サイクル疲労寿命の実験結果とほぼ良好に対応することが分かった。

本報告では引き続き、前報で用いたアルミニウム材の、引張圧縮応力下の低サイクル疲労挙動に対する適用性について検討する。次いで、他の2種類のアルミニウム材および鋳鋼材に対する同定、すなわち材料定数の決定を試みる。さらに、その同定結果に基づき鋳鋼材の回転曲げ疲労寿命を予測してみた。

## 2. DAMAGE90 の概要

DAMAGE 90 は前報でも述べたように、メソスケールでの塑性ひずみが無視し得るいわゆる準脆性 (quasi-brittle) の概念を導入し、高サイクル疲労損傷のシミュレーションを主目的としている。

その概念をモデル化するために、Fig. 1 に示すような、メソスケール体積要素 (以下ではメソ要素) とミクロスケール体積要素 (以下ではミクロ要素) の2つのスケール要素を考える。そしてメソ要素 (ミクロ要素部を除く) は弾性変形 (あるいは弾塑性変形) し、ミクロ要素においてのみ弾塑性変形および損傷が生じると仮定し、ミクロ要素の降伏応力  $\sigma_s^\mu$  と疲労限界応力  $\sigma_f^\mu$  を次式で与える。

$$\begin{aligned} \sigma_s^\mu &= \sigma_f \\ \sigma_f^\mu &= \sigma_f \frac{\sigma_f}{\sigma_y} = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_y} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

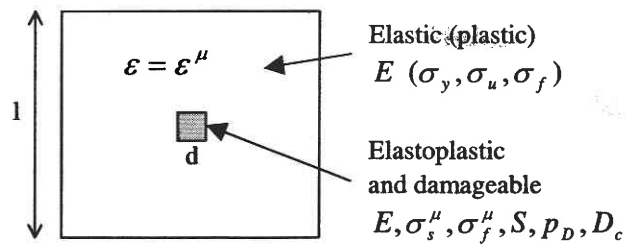


Fig. 1 Two-scale volume element

ここで、上付き添字の  $\mu$  はミクロ要素の値を意味し (以下同じ)、 $\sigma_f$  は疲労限界応力、 $\sigma_y$  は降伏応力である。

すなわち、応力レベルがメソ要素の疲労限  $\sigma_f$  を超えると、ミクロ要素 (物理的にはマイクロインクルージョン周辺の欠陥部分などに相当) において塑性変形が発生し、塑性ひずみの累積による損傷進展を経てメソクラックの発生に至ると考える。また、ミクロ要素のひずみ  $\epsilon^\mu$  は、Lin-Taylor の仮説によって、メソ要素のひずみ  $\epsilon$  に等しいものと仮定する。

さらに、ミクロ要素は弾/完全塑性体と仮定し、クラックの閉鎖効果は無視して、損傷発展を考慮した構成方程式を次式のように与える。

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij} &= \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p \\ \epsilon_{ij}^e &= \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_{ij}}{1-D} - \frac{\nu}{E} \frac{\sigma_{kk}}{1-D} \delta_{ij} \\ \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \begin{cases} \frac{3}{2} \frac{\bar{\sigma}_{ij}^p}{\sigma_s^\mu} \dot{p}, & \text{if } f = 0 \\ 0, & \text{if } f < 0, \end{cases} \\ \dot{D} &= \begin{cases} \frac{\sigma_s^{\mu 2}}{2ES} R_v \dot{p}, & \text{if } p \geq p_D \\ 0, & \text{if } p < p_D \end{cases} \dots \dots \dots (2a) \end{aligned}$$

ここに、

\*東京大学生産技術研究所 機械・生体系部門

研究速報

$$f = \frac{\sigma_{eq}}{1-D} - \sigma_s^\mu$$

$$p_D = \varepsilon_{pD} \frac{\sigma_u - \sigma_f}{\sigma_s^\mu - \frac{\sigma_f^2}{\sigma_y}} \dots\dots\dots (2b)$$

式中、 $\varepsilon_{ij}$ は全ひずみ、 $\varepsilon_{ij}^e$ は弾性ひずみ、 $\varepsilon_{ij}^p$ は塑性ひずみ、 $V$ はポアソン比、 $E$ はヤング率、 $\sigma_{ij}$ 、 $\sigma_{kk}$ は公称応力、 $D$ は損傷変数、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーデルタ、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ は塑性ひずみ速度、 $\bar{\sigma}_{ij}^p$ は偏差応力、 $\sigma_s^\mu$ はマイクロ要素の降伏応力、 $\dot{p}$ は相当塑性ひずみ速度、 $\sigma_{eq}$ はMisesの相当応力、 $\dot{D}$ は損傷速度、 $S$ は損傷強度パラメータ、 $R_v$ は3軸関数、 $p$ は累積相当塑性ひずみ、 $p_D$ は損傷発生限界ひずみ、 $\varepsilon_{pD}$ は単軸の損傷発生限界ひずみ、 $\sigma_u$ は引張強度である。

なお、損傷強度パラメータ $S$ は、材料、温度および損傷の種類に依存する<sup>4)</sup>値であり、筆者の一人らは特に損傷の種類に着目して、新たに3つのパラメータすなわち弾性損傷時の $S_0^e$ 、静的塑性損傷時の $S_0^p$ および繰り返し塑性損傷時の $S_0^{pf}$ を提案している<sup>2,5)</sup>。

損傷変数 $D$ の値が次式で与える損傷限界値 $D_c$ に達したときに、材料中にメソクラックが発生する。

$$D_c = D_{1c} \frac{\sigma_u^2}{\sigma_s^{\mu 2} R_v} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $D_{1c}$ は単軸の損傷限界値である。

このプログラムは前述したように、高サイクル疲労損傷を表現するために(1)式を与えているが、その $\sigma_s^\mu$ をより大きな値に仮定することによって、実質的に塑性ひずみの支配的な領域を計算することになり、低サイクル疲労損傷をシミュレートするようになる。

3. 低サイクル疲労寿命のシミュレーション

DAMAGE 90による単軸の引張圧縮の計算に際しては、 $\varepsilon_{11}$ のみを入力し、 $\varepsilon_{22}$ と $\varepsilon_{33}$ は次式で計算される。

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\frac{1}{2}\varepsilon_{11} + \left(\frac{1}{2} - \nu\right) \frac{\sigma_{11}}{E(1-D)} \dots\dots\dots (4)$$

この仮定により、塑性変形の非圧縮性が保持される。また、両振り入力ひずみ $\pm \varepsilon_{11}$ と塑性ひずみ幅 $\varepsilon^p$ の関係は、Fig. 2を参照すると次式により与えられる。

$$\varepsilon^p = 2(\varepsilon_{11} - \varepsilon_s) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、ひずみ $\varepsilon_s$ は $\sigma_s^\mu / E$ である。

シミュレーションの対象とした材料は、耐食性アルミニウム合金6061-T6である。筆者らの一人らが、単軸引張試験と片振引張応力下の疲労試験結果<sup>6)</sup>を用いて、文献5)で提案した構成方程式モデルを同定し、その同定結果に基づいて引張圧縮応力下の低サイクル疲労寿命を予測

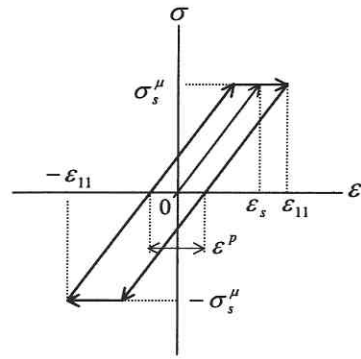


Fig. 2 Input strain  $\pm \varepsilon_{11}$  and plastic strain range  $\varepsilon^p$

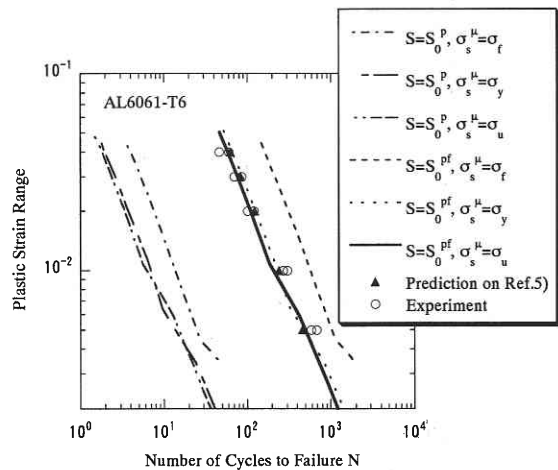


Fig. 3 Simulation of low-cycle fatigue life

し、良好な結果を得た材料である。その材料定数のうち本計算に用いるものは以下のとおりである。すなわち、 $E=70$  [GPa]、 $\nu=30$ 、 $\sigma_f=194$  [MPa]、 $\sigma_y=300$  [MPa]、 $\sigma_u=321$  [MPa]、 $S_0^e=0.37$  [MPa]、 $S_0^{pf}=18$  [MPa]、 $\varepsilon_{pD}=0.055$ 、 $D_{1c}=0.2$ である。

Fig. 3に、低サイクル疲労寿命の計算結果を示す。○印は森野らの実験結果<sup>7)</sup>であり、▲印は上述の文献5)の予測値である。計算は、損傷強度パラメータ $S$ の値を $S_0^e$ あるいは $S_0^{pf}$ に、マイクロ要素の降伏応力 $\sigma_s^\mu$ を $\sigma_f$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_u$ と仮定し、(5)式に従う両振りひずみを与えて全部で6通り行った。

$S=S_0^{pf}$ 、 $\sigma_s^\mu=\sigma_u$ とした時の計算結果が、実験結果および文献5)の予測値にほぼ一致していることが分かる。すなわち、文献5)で提案した材料パラメータ $S_0^{pf}$ の有用性が確認される。また、低サイクル疲労損傷は、 $\sigma_s^\mu=\sigma_u$ と仮定することによって良好にシミュレートできることを示している。

4. DAMAGE90による同定と予測

前報において単軸引張および高サイクル疲労挙動、また前章では低サイクル疲労挙動のシミュレーションが比較的

良好にできることが分かったので、以下では公表されている実験結果に基づいて、DAMAGE 90 による同定と予測を試みる。

4.1 アルミニウム材に対する同定

用いた材料は 2 種類で、いずれも高強度アルミニウム合金の 7075-T6 と 2017-T4 であって、西谷らによって応力-ひずみ曲線<sup>3)</sup>が、また森野らによって引張圧縮応力下の低サイクル疲労寿命の実験結果<sup>7)</sup>が示されている。

Fig. 4, 5 に、それぞれ 7075-T6 と 2017-T4 に対する同定結果を示す。○印は実験結果<sup>7,8)</sup>である。前報および前章の結果を踏まえて、応力-ひずみ曲線と疲労寿命曲線のいずれの同定計算にも  $\sigma_s^u = \sigma_u$  を仮定した。

決定された材料定数は以下のとおりである。すなわち、7075-T6 に対しては、 $E=75.5$  [GPa],  $\nu = 0.3$ ,  $\sigma_u = 691$  [MPa],  $S_0^p = 4$  [MPa],  $S_0^{pf} = 70$  [MPa],  $\epsilon_{pD} = 0.08$ ,  $D_{1c} = 0.045$  であり、また 2017-T4 に対しては、 $E=76.5$  [GPa],  $\nu = 0.3$ ,  $\sigma_u = 543$  [MPa],  $S_0^p = 3$  [MPa],  $S_0^{pf} = 54$  [MPa],  $\epsilon_{pD} = 0.1$ ,  $D_{1c} = 0.06$  である。

応力-ひずみ曲線の計算結果 (Fig. 4(a), Fig. 5(a))

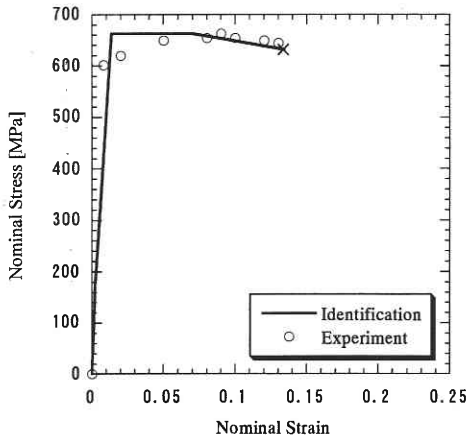
は、前報で述べたように、ひずみが損傷発生限界値に達するまでは実験結果と定量的な相違があるが、その後のひずみの増加に伴う応力の減少傾向すなわち損傷速度とメソクラックの発生点 (×印) は実験結果に比較的良く対応していることが分かる。また、低サイクル疲労寿命の計算結果 (Fig. 4(b), Fig. 5(b)) も、前章のシミュレーションと同様に、いずれの材料の場合にも実験結果にほぼ一致している。

4.2 鋳鋼材に対する同定と予測

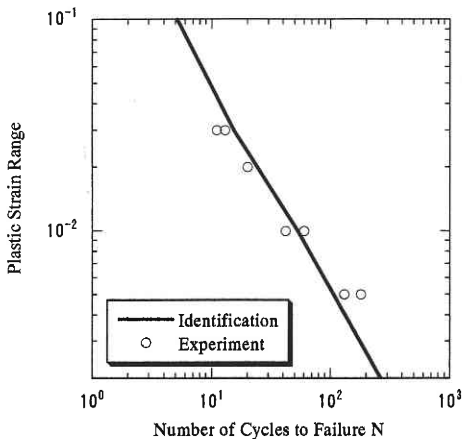
松浦による単軸引張試験の応力-ひずみ曲線<sup>9)</sup> および千々岩らによる引張圧縮応力下の高サイクル疲労試験の SN 曲線<sup>10)</sup> を用いて同定した。その結果を Fig. 6 に示す。○印は実験結果<sup>9,10)</sup> である。

決定された材料定数は以下のとおりである。すなわち、 $E=210$  [GPa],  $\nu = 0.28$ ,  $\sigma_f = 166$  [MPa],  $\sigma_y = 318$  [MPa],  $\sigma_u = 506$  [MPa],  $\epsilon_{pD} = 0.13$ ,  $D_{1c} = 0.16$ ,  $S_0^p = 0.8$  [MPa],  $S_0^c = 115$  [MPa] である。

応力-ひずみ曲線の計算結果 (Fig. 6(a)) は、前項のアルミニウム材と同様に、実験結果と定量的な相違はあるが、

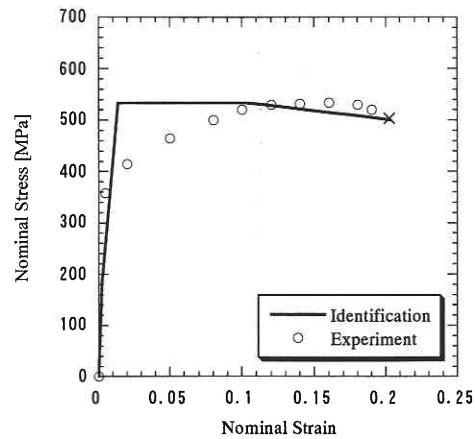


(a) Stress-strain curve

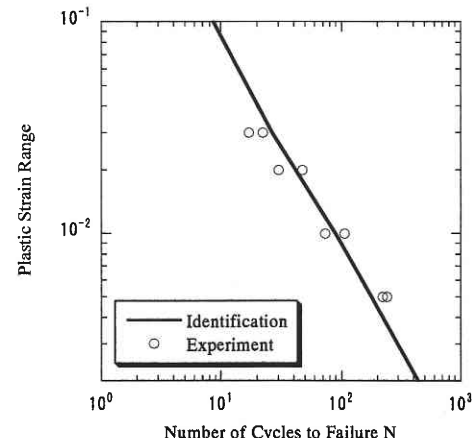


(b) Low-cycle fatigue life

Fig. 4 Identification for AL7075-T6

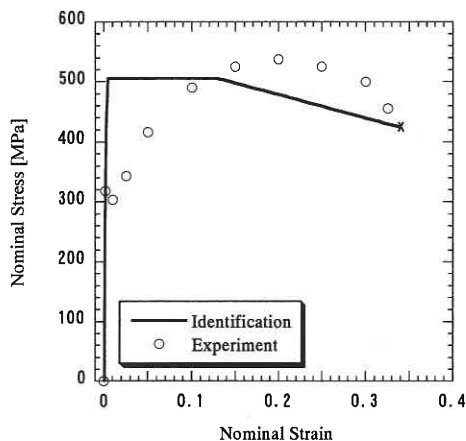


(a) Stress-strain curve

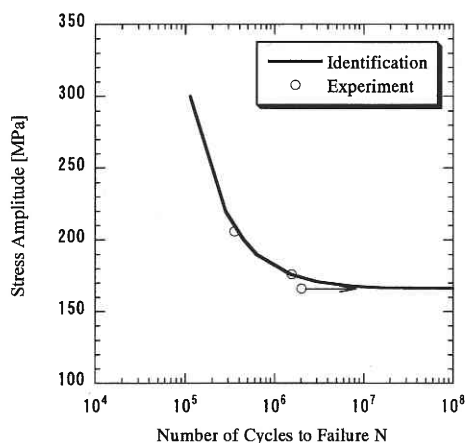


(b) Low-cycle fatigue life

Fig. 5 Identification for AL2017-T4



(a) Stress-Strain Curve



(b) High-cycle fatigue life

Fig. 6 Identification for Cast steel

損傷発生限界ひずみ、損傷速度およびメソクラックの発生点 (×印) は実験結果に対応していて、 $\epsilon_{pD}$ 、 $S_0^p$  および  $D_{1c}$  の同定は十分であると考えられる。また、高サイクル疲労寿命の計算結果 (Fig. 6(b)) も、少ない実験結果ではあるが、ほぼそれに一致している。

上記の同定された材料定数を用いて、千々岩らの回転曲げ疲れ試験の実験結果<sup>10)</sup>を予測してみたのが、Fig. 7である。○印は実験結果である。計算は、実験の曲げ応力に相当するひずみ成分を有限要素法により求め、それらを入力することによって行った。

予測の計算結果 (実線) は、疲労限界応力が実験結果より低く、やや精度の悪い予測結果になっている。しかし、 $\sigma_s^u$  の値のみを換えた計算結果 (点線) は実験結果と良好に対応するので、同定された  $\epsilon_{pD}$ 、 $D_{1c}$  および  $S_0^e$  の値は高サイクル疲労寿命の予測計算に十分な信頼性をもって使用し得るものとする。

まとめ

本報告では、アルミニウム材の低サイクル疲労挙動に対

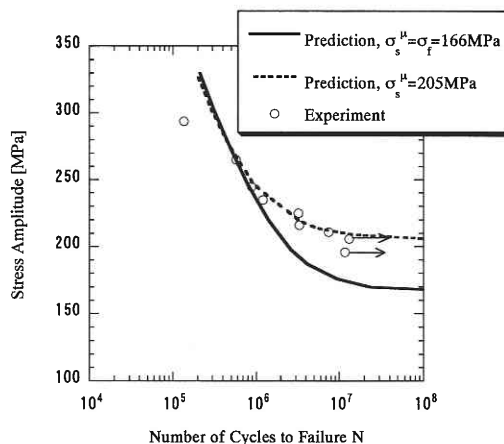


Fig. 7 Prediction of fatigue life under rotary bending for Cast steel

する DAMAGE 90 の適用性について検討した。また、アルミニウム材および鋳鋼材に対する同定を試み、鋳鋼材の回転曲げ疲労寿命を予測した。その結果、以下のことが分かった。

- ①アルミニウム材の低サイクル疲労挙動は、繰り返し塑性損傷時の損傷強度パラメータ  $S_0^{pf}$  を用いて、 $\sigma_s^u = \sigma_u$  と仮定することにより、比較的精度良くシミュレートできる。
- ②材料定数  $\epsilon_{pD}$ 、 $D_{1c}$ 、 $S_0^e$ 、 $S_0^p$ 、 $S_0^{pf}$  の値は、単軸引張試験結果、引張圧縮応力下の高サイクル疲労および低サイクル疲労試験結果を用いて、比較的簡単に推定できる。
- ③鋳鋼材の引張圧縮試験結果から同定した材料定数を用いて予測した回転曲げ疲労寿命の計算結果は、実験結果と若干の相違があった。

(2004年3月29日受理)

参考文献

- 1) 都井裕・岡田和三, 生産研究, 55巻, 3号, (2003), 301-304.
- 2) 都井裕・広瀬智史, 機論 (A), 69巻, 679号, (2003), 530-537.
- 3) Lemaitre, J. and Doghri, I., Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 115, (1994), 197-232.
- 4) Lemaitre, J., Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 51, (1985), 31-49.
- 5) 都井裕・広瀬智史, 生産研究, 54巻, 5号, (2002), 335-338.
- 6) Itabashi, M. and Fukuda, H., Journal of Materials Processing Technology, 117-3, (2001).
- 7) 森野数博・ほか3名, 機論 (A), 64巻, 622号, (1998), 1443-1448.
- 8) 西谷弘信・ほか2名, 機論 (A), 51巻, 464号, (1985), 1017-1025.
- 9) 松浦次義, 日本機械学会誌, 63巻, 503号, (1960), 1622-1631.
- 10) 千々岩健児・ほか3名, 日本機械学会誌, 69巻, 572号, (1966), 1134-1145.