研　究　速　報

損傷力学モデルによる金属材料の低サイクル疲労寿命予測

Prediction of Low Cycle Fatigue Life of Metals by Using Damage Mechanics Models

都　井　　裕*・広　瀬　智　史*

Yutaka TOI and Satoshi HIROSE

1. は　じ　め　に

金属材料の力学的特性として，弾性変形，粘塑性変形，クリープ変形，延性破壊，疲労破壊などが上げられる．従来これらの各特性は，古典的連続体力学，破壊力学などにより，個別に研究されてきたが，マイクロボイドやマイクロクラックといった微視的損傷を考慮することが可能な理論体系である連続体損傷力学の発展により，連続体力学の枠組みの中でこれらの諸特性を表現する道が開けた．しかしながら，この理論は実際の工業設計および解析の現場において十分に活用されているとは言い難い．この理論の実験的検証が十分でなく，また実験により決定される材料定数値も十分に準備されていないことが一因であろう．

著者らは，過去に代表的な4種類の金属材料に対して，公表されている実験結果に基づき，連続体損傷力学に用いられる材料定数値を求めた．続いて，その材料定数値を用いて，予ひずみあるいは予疲労を与えた予損傷材料の準静的引張り変形挙動および動的引張り変形挙動の予測を試み，連続体損傷力学モデルによる材料変形破壊挙動予測の可能性を示した[1]．

本研究では，さらに非損傷材料の低サイクル疲労寿命の予測を試みる．すなわち，Lemaitreの損傷発展式を拡張し，弾性損傷，非繰り返し塑性損傷，繰り返し塑性損傷，低速および高速な変形における損傷を区別した損傷発展式を用いている．繰り返しの有無の考慮は，本報における新たな提案であり，他の区別は文献1）においてその妥当性を示した．

本研究における連続体損傷力学モデルの同定，すなわち材料定数値の決定は，準静的引張り試験結果，動的引張り試験結果，片振り引張り応力下の疲労試験結果を用いて行う．続いてその同定されたモデルを用いて低サイクル疲労試験における変形挙動と破断繰り返し数の予測を行い，実験結果と比較しその有用性を判断したい．　次の2章では，本研究において用いた構成方程式について述べる．3章では，同定により決定された材料定数値を示す．4章では，同定されたモデルを用いた低サイクル疲労寿命予測結果と実験結果とを比較する．最後の5章はまとめである．

*東京大学生産技術研究所　人間・社会部門

2. 損傷力学に基づく構成方程式モデル

本研究においては，損傷の主たる原因はマイクロボイドであり，異方性の影響は少ないため，スカラー損傷変数を仮定する等方性理論を用いた[2]．

弾性構成方程式としてはひずみ等価性仮説より成立する以下の式を用いた．

$$\{\bar{\sigma}\}=\frac{\{\sigma\}}{1-D}=[D_e]\{\varepsilon^e\}=[D_e](\{\varepsilon\}-\{\varepsilon^{vp}\}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$\{\bar{\sigma}\}$は有効応力，$[D_e]$は弾性体の応力ひずみマトリックス，$\{\varepsilon^e\}$は弾性ひずみ，$\{\varepsilon\}$は全ひずみ，$\{\varepsilon^{vp}\}$は粘塑性ひずみ，$\{\sigma\}$は公称応力，Dはスカラー損傷変数である．また本研究では，動的な塑性変形挙動も扱うため，Perzyna[3]による粘塑性構成方程式を村上ら[4]が損傷の影響を考慮して拡張した，次式の粘塑性ひずみ式を用いた．

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}=\gamma\left\langle\frac{f}{q+\left\{(x_0-q)\exp\left(-\beta\varepsilon_{eq}^{vp}\right)\right\}}-1\right\rangle^m\frac{\partial f}{\partial\sigma_{ij}} \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに，fは降伏関数であり，Mises形の降伏条件にひずみ等価性仮説を適用して得られ，次式のように表される．

$$f=\left(\frac{3}{2}\frac{s_{ij}}{1-D}\frac{s_{ij}}{1-D}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

（2）式および（3）式において，$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$は粘塑性ひずみ速度，$\varepsilon_{eq}^{vp}$は累積相当粘塑性ひずみ，$s_{ij}$は偏差応力，$\sigma_{ij}$は公称応

力，x_0は降伏応力，γは粘性係数，q，β，mは材料定数である．

次に損傷発展方程式として，Lemaitreの提案式に多少変更を加えたものを次式に示す．

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S_1}\right)^{S_2} \dot{\varepsilon}_{eq} \quad \cdots\cdots (4)$$

Lemaitreは，塑性損傷の場合として上式と異なり，相当ひずみ速度$\dot{\varepsilon}_{eq}$ではなく相当塑性ひずみ速度$\dot{\varepsilon}_{eq}^{vp}$を用いているが，塑性域において弾性ひずみ速度は塑性ひずみ速度に比べ極めて小さく無視できると考え，上式のように仮定した．また，損傷発展の条件として

$$\dot{D} = 0 \quad \left\{\varepsilon_{eq} < \varepsilon_{pd} \;\; or \;\; \sigma_{eq} \le \sigma_f\right\} \quad \cdots\cdots (5\,a)$$

$$\dot{D} > 0 \quad \left\{\varepsilon_{eq} \ge \varepsilon_{pd} \;\; and \;\; \sigma_{eq} > \sigma_f\right\} \quad \cdots\cdots (5\,b)$$

$$0 \le D \le D_{cr} \quad \cdots\cdots (5\,c)$$

を仮定している．すなわち，累積相当ひずみε_{eq}がある損傷発生限界ひずみε_{pd}を超え，かつ相当応力σ_{eq}が疲労限σ_fを超えているときのみ，損傷が生ずる．$\dot{D}$は損傷速度であり，D_{cr}は損傷限界値である．Dの値がD_{cr}に達した時，材料にクラックが生じる．Yは，弾性ひずみエネルギー開放率であり，次式のように表現される．

$$-Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} R_v \quad \cdots\cdots (6)$$

$$R_v = \left\{\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu)\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right)^2\right\} \quad \cdots\cdots (7)$$

ここに，R_vは（7）式で表される3軸関数，Eはヤング率，νはポアソン比，σ_Hは静水圧応力である．（4）式における，S_1，S_2は損傷定数であり，S_2は文献2）に従い，その値を1.0に固定した．

また，損傷発展式（4）で用いられる損傷定数S_1，S_2，ε_{pd}，D_{cr}は，文献5)では材料ごとに一定値と仮定したが，本来は温度および損傷の種類に依存するものである[6]．本研究では，変形中は温度一定としているため，文献1）で提案しているように，弾性変形と塑性変形，高速変形と低速変形の相違を考慮してこれらの損傷定数を決定した．すなわち，各材料定数の変形速度依存性を次式のように仮定した．

$$S_1 = S_0^e \quad （弾性損傷）\cdots\cdots (8)$$

$$S_1 = S_0^p(1+c_s\dot{\varepsilon}_{eq}) \quad （塑性損傷）\cdots\cdots (9)$$

$$\varepsilon_{pd} = \varepsilon_{pd0}(1+c_e\dot{\varepsilon}_{eq}) \quad \cdots\cdots (10)$$

$$D_{cr} = D_{cr0}(1+c_D\dot{\varepsilon}_{eq}) \quad \cdots\cdots (11)$$

弾性と塑性では微視的変形機構が異なるため，その損傷発展も異なると考えられるので，弾性時と塑性時では異なるS_1を仮定している．S_0^eは静的弾性損傷定数，S_0^pは静的塑性損傷定数，ε_{pd0}は静的損傷発生限界ひずみ，D_{cr0}は静的損傷限界値である．c_s，c_ε，c_Dは，損傷定数のひずみ速度依存性を最も単純な線形式で仮定した場合の係数値である．また，繰り返し荷重を負荷した場合の塑性損傷機構は，非繰り返し塑性損傷の場合とは異なると考えられる．よって本報ではそれらの区別も考慮した．すなわち，

$$S_1 = S_0^{pf} \quad （繰り返し塑性損傷）\cdots\cdots (12)$$

と仮定した．

3. 材料定数値の決定

耐食性アルミ合金であるAL 6061-T 6の低サイクル疲労挙動の予測を試みる．

まず，AL 6061-T 6に対する構成式モデルの同定を行った．板橋らの実験[7]では，準静的引張り試験におけるひずみ速度$\dot{\varepsilon}=0.001$［s^{-1}］，動的引張り試験におけるひずみ速度は$\dot{\varepsilon}=1000$［s^{-1}］である．片振り引張り試験では，20［Hz］で正弦波状の応力振幅を与えている．

同定結果を図1と図2に示す．決定された材料定数値は以下のとおりである．すなわち，$E=70$［GPa］，$\nu=0.3$，$\gamma=8200$［s^{-1}］，$q=410$［MPa］，$x_0=300$［MPa］，$\beta=5.0$，$m=1.0$，$S_0^e=100$［MPa］，$S_0^p=0.37$［MPa］，$S_0^{pf}=18.0$［MPa］，$C_s=3.24\times10^{-4}$［s］，$\varepsilon_{pd}=0.055$，$C_\varepsilon=-1.27\times10^{-4}$［s］，$D_{cr0}=0.200$，$c_D=4.0\times10^{-4}$［s］，$\sigma_f=280$［MPa］である．

図中の×印は計算における破断点を示している．図1と図2からわかるように，上記の材料定数値を用いた計算結果はいずれも材料試験結果と良好に対応している．特に図2から，繰り返しの有無により塑性変形時の損傷定数を区別した結果，より良好に実験結果と対応したことがわかる．

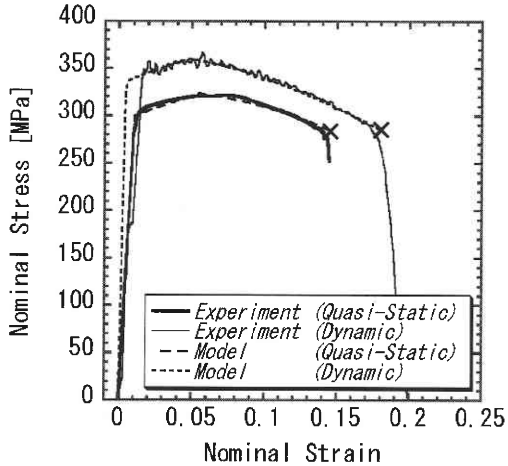

Fig. 1 Stress-strain curves under quasi-static and dynamic tension

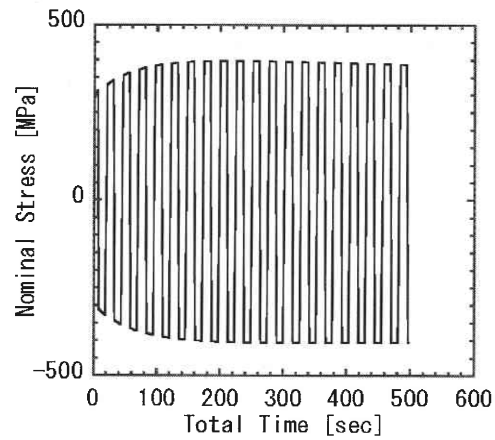

Fig. 4 Time-history of nominal stress

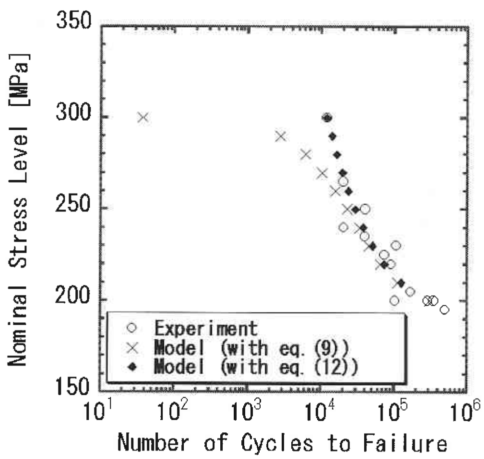

Fig. 2 S-N curves under cyclic tension

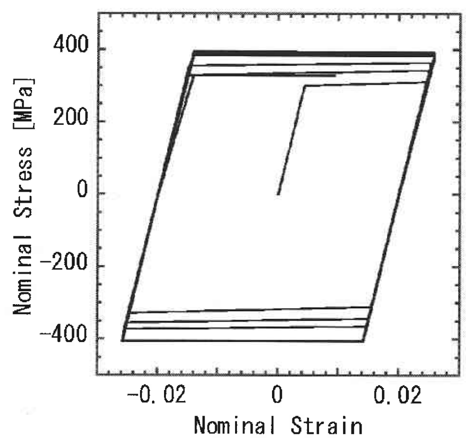

Fig. 5 Stress-strain curves under cyclic tension-compression

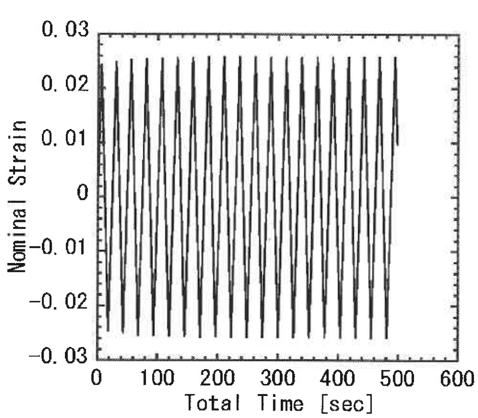

Fig. 3 Time-history of nominal strain

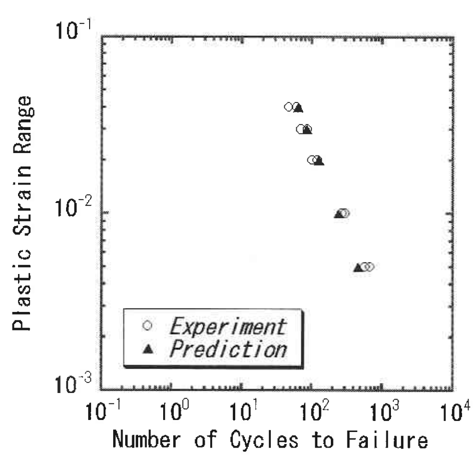

Fig. 6 Low-cycle fatigue life

4. 低サイクル疲労寿命の予測

3章で決定した材料定数を用いて引張り圧縮荷重下の低サイクル疲労寿命の予測を試みる．ひずみ幅を0.5％，1％，2％，3％，4％と変え，各ケースの破断繰り返し回数を計算した．森野らの実験[8]において，繰り返し速度は0.03～0.1［Hz］であり，ひずみ速度は大きく変化しないため，本計算において，引張および圧縮ともにひずみ速度を一定としている．

低サイクル疲労寿命予測の結果を図3，図4，図5および図6に示す．図3，図4，図5はひずみ幅を4％とした場合の結果である．図3，図4では最初の数サイクルのみを図として表している．図3において，ひずみは加工硬化および損傷によりその最大値が徐々に増加しており，図4において，応力は加工硬化後，損傷により現象していく様子がわかる．図5は応力・ひずみ曲線であるが，ヤング率が損傷により変化していることがわかる．図6は森野らの実験とモデルによる計算予測結果とを比較したものである．この図から森野らの実験値と非常に良好に対応していることが確認できる．

5. ま　と　め

本研究においては，まず連続体損傷力学に基づいて弾粘塑性構成方程式モデルを定式化した．繰り返し荷重を負荷した場合の塑性損傷と，繰り返しでない場合の塑性損傷とを区別できるように，Lemaitreの等方損傷発展式を文献1）の提案からさらに拡張した．

この弾塑性損傷構成方程式モデルを，板橋らの行った耐食性アルミニウム合金AL 6061-T 6の各材料試験結果（準静的引張り試験，動的引張り試験，片振り引張り疲労試験）に基づいて同定，すなわち材料定数を決定した．特に，片振り引張り疲労試験結果との同定では，文献1）より良好に対応することを確認した．決定した材料定数を用いて低サイクル疲労寿命予測計算を行った結果，森野らがおこなった低サイクル疲労試験の実験結果と非常に良好に一致することを確認した．

本研究で提案した弾塑性損傷構成方程式モデルは，他の様々な材料，複合条件下における変形挙動予測および破断予測においても有用であることが期待される．

（2002年8月5日受理）

参　考　文　献

1）都井裕・広瀬智史，機論（A），(2002）投稿中
2）Lemaitre, J., A Course on Damage Mechanics, Second Edition, (1996), 1–228, Springer
3）Perzyna, P., Arch. Mech., 32–3 (1986), 403–420
4）村上澄男・ほか3名，機論，60–578, A (1994), 230–235
5）都井裕・山崎伸也，機論（A），67–655 (2001), 511–518
6）Lemaitre, J., Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 51 (1985), 31–49
7）Itabashi, M. and Fukuda, H., Journal of Materials Processing Technology, 117–3, (2001)
8）森野・ほか3名，機論（A），64–622, (1998), 1443–1448