

損傷力学モデルによるアルミニウム合金の低サイクル および高サイクル疲労シミュレーション

Low-Cycle and High-Cycle Fatigue Simulation of Aluminum Alloy by Damage Mechanics Model

都井 裕*・山崎 伸也*

Yutaka TOI and Shinya YAMAZAKI

1. はじめに

近年、連続体損傷力学に基づく構成方程式を導入した応力変形解析法、いわゆる「局所的破壊解析法 (local approach to fracture)」により、応力変形解析と損傷・破壊解析を融合した解析が可能となりつつある^{1), 2)}。この方法の実用化には現時点では、理論式の検証、材料定数の決定、有限要素依存性などいくつかの問題点もあるが、応力変形解析と材料破壊解析の統合化に対し一つの有望なアプローチと考えられる。日常的な解析ツールとしての実用性を獲得するには今しばらくの時間を要するものと思われるが、疲労損傷などに代表されるように従来は数理解析的な取扱いが困難であった材料損傷・破壊現象に対する計算力学的手法としての期待度は高い。

本報告では、上述の局所的破壊解析法、すなわち材料損傷・破壊を考慮した固体の応力変形解析法を、アルミニウム合金の低サイクルおよび高サイクル疲労シミュレーションに適用する。すなわち有限要素1要素により、損傷力学に基づく弾粘塑性損傷構成式を用いて、 $10 \sim 10^5$ 回程度までの繰返し応力を受けるアルミニウム合金の疲労損傷挙動をシミュレートし、S-N曲線に対する既存の実験結果と対応させることにより、連続体損傷力学に基づく構成式モデルを用いた数値材料試験シミュレータ³⁾の有用性について述べる。2章では損傷力学モデルによる疲労シミュレーション法、3章ではアルミニウム合金の低サイクルおよび高サイクル疲労シミュレーション結果と実験結果⁴⁾の比較について述べる。最後の4章はまとめである。

2. 損傷力学モデルによる疲労シミュレーション法

本章では、連続体損傷力学に基づく弾粘塑性損傷挙動の構成方程式モデルおよびこれを用いた応力・ひずみ挙動の計算法について述べる。本研究では、単軸引張り状態のア

ルミニウム合金のみを対象としているので、スカラー損傷変数による等方性理論の使用に限定する^{1), 2)}。以下に、本稿の弾粘塑性損傷解析で用いた関係式の概要を示す。

粘塑性ひずみ速度 $\{\dot{\epsilon}^{vp}\}$ として村上ら⁵⁾による次式を用いる。

$$\{\dot{\epsilon}^{vp}\} = \gamma \left\langle \frac{\sqrt{J_2'}}{(1-D)\{q + (x_0 - q)e^{-\beta \epsilon_{eq}^{vp}}\}} - 1 \right\rangle^m \frac{\{\sigma\}}{\sqrt{J_2'}(1-D)} \quad \dots (1)$$

ここに、 J_2' は偏差応力の第2次不変量、 D はスカラー損傷変数、 ϵ_{eq}^{vp} は相当粘塑性ひずみ、 γ 、 q 、 x_0 、 β 、 m は材料定数である。(1)式はPerzynaの粘塑性構成式を、損傷の影響を含むように拡張したひずみ速度式である⁵⁾。

また、損傷発展方程式としてLemaitreによる次式を用いる¹⁾。

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S}\right)^s \dot{p} \quad \dots (2)$$

ここに、 Y はエネルギー解放率、 \dot{p} は累積相当粘塑性ひずみ速度、 S および s は材料定数である。(2)式は様々な損傷形態に適用可能な統合的な損傷発展式である¹⁾。エネルギー解放率 Y として次式を用いる¹⁾。

$$-Y = \frac{\sigma_{eq}}{2E(1-D)^2} \quad \dots (3)$$

ここに、 σ_{eq} はvon Misesの相当応力、 E はヤング率である。累積相当粘塑性ひずみが限界値 ϵ_{pd} を越えると、(2)式に従い損傷が発展する。したがって、

$$\dot{D} = 0 \quad p < \epsilon_{pd} \text{ の場合} \quad \dots (4)$$

$$\dot{D} = \dot{D} \quad p \geq \epsilon_{pd} \text{ の場合} \quad \dots (5)$$

と表現される。累積相当粘塑性ひずみ速度 \dot{p} は、

*東京大学生産技術研究所 人間・社会大部門

$$\dot{p} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{eq}^{vp} \dot{\epsilon}_{eq}^{vp} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (6)$$

と定義される。

上述の損傷発展式は、塑性変形下の損傷進展が支配的な低サイクル疲労破壊にはそのまま適用可能であるが、降伏応力以下の応力レベルにおける損傷進展を考慮する必要がある高サイクル疲労破壊に対しては、後述のように(2)~(6)式における累積相当粘塑性ひずみ速度を累積相当弾性ひずみ速度に置き換えることにより、弾性変形時の損傷進展を計算する。すなわち、(6)式における粘塑性ひずみ速度が弾性ひずみ速度に置換され、(4)式における限界ひずみも降伏点以下の疲労限に相当するひずみレベルとなる。

ひずみ等価性仮説¹⁾に基づく、応力変化率 $\{\dot{\sigma}\}$ と弾性ひずみ速度 $\{\dot{\epsilon}^e\}$ の関係は、次式により与えられる。

$$\{\dot{\sigma}\} = (1-D) \left\{ \dot{\sigma} \right\} = (1-D) [D_e] (\{\dot{\epsilon}\} - \{\dot{\epsilon}^{vp}\}) = [\bar{D}_e] \{\dot{\epsilon}^e\} \dots (7)$$

ここで、以下の関係を用いている。

$$\{\bar{\sigma}\} = \frac{\{\sigma\}}{1-D} \dots \dots \dots (8)$$

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^e\} + \{\epsilon^{vp}\} \dots \dots \dots (9)$$

$$[\bar{D}_e] = (1-D) [D_e] \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $\{\dot{\sigma}\}$ は有効応力変化率、 $\{\dot{\epsilon}\}$ は全ひずみ速度、 $[D_e]$ は等方性弾性体の応力・ひずみマトリックス、 $[\bar{D}_e]$ は損傷弾性体の応力・ひずみマトリックスである。

以上の関係式に従って、粘塑性ひずみおよび損傷の発展を考慮することにより、有限要素解析における運動方程式は次式のように導かれる。

$$\{F_{INT}\} + [M]\{\ddot{u}\} = \{F\} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $[M]$ は集中質量マトリックス、 $\{F_{INT}\}$ は等価節点内力ベクトルであり、次式により計算される。

$$\{F_{INT}\} + \int [B_0]\{\sigma\} dV \dots \dots \dots (12)$$

初期時刻における初期状態から出発して(12)式を繰返し解くことにより、材料損傷を考慮した数値材料試験計算が可能となる。初期損傷が無ければ、損傷変数は初期値零をとる。その後、(2)式に示すように応力および累積粘塑性ひずみに依存して損傷が増大する。損傷の理論上の最大値は1

であるが、実際には1未満の臨界値（これを D_{cr} と記す）で不安定なクラック伝播が起こり、材料は破断する。

なお、一般に疲労破壊は準静的現象であり、慣性項を含まない静的平衡方程式による計算が可能であるが、本研究では広範囲のひずみ速度域に対応可能な材料試験シミュレータとするため、(1)式のような運動方程式に基づく計算を行なっている³⁾。

3. アルミニウム合金の疲労シミュレーション

アルミニウム合金は軽量で高強度であるため、主に航空機や機械部品などに多く用いられている。これらの部品はしばしば低応力から高応力レベルに至る繰返し応力を受ける。本章では、アルミニウム合金の試験片レベルにおける疲労挙動のシミュレーションを行なうが、まず降伏応力以上の応力負荷を受ける低サイクル疲労を対象とする。続いて、低サイクル疲労から高サイクル疲労までを含むシミュレーションに拡張する。対象材料は、航空機に多く使用されている代表的なアルミニウム合金である Al2024-T3 である。

モデル鋼材とした Al2024-T3 は「超ジュラルミン」とも呼ばれるアルミニウム合金であり、主要な材料定数値を Table 1 に示す。続いて、文献4) に示されている応力・ひずみ曲線、累積塑性ひずみの進展などに関する材料特性データを参考に、損傷パラメータの値を決定した。このようにして決定した損傷パラメータおよび損傷発生限界ひずみの値を Table 2 に示す。

疲労繰返し荷重として、Fig. 1 に示すような両振りの正弦波状引張り・圧縮応力を、様々な応力振幅に対して材料破断に至る繰返し数まで負荷した。ここに σ_{max} および σ_{min} はそれぞれ繰返し応力の最大値と最小値を表し、応力振幅 σ_a は次式のように定義される。

Table 1 Material properties for Al2024-T3

Material	Tensile Strength (Mpa)	Yield Stress (Mpa)	Elongation (%)	Young's Modulus (Gpa)
Al2024-T3	490	350	20	75

Table 2 Damage parameters for low cycle fatigue of Al2024-T3

Material	S_1	S_2	D_{cr}	ϵ_{cr}
Al2024-T3	0.854	1.0	0.65	0.009

研 究 速 報

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \dots\dots\dots (13)$$

計算された S-N 曲線と実験結果⁴⁾の比較を Fig. 2 に示す。図中のプロットは実験結果を示している。試験片には初期亀裂を有するもの、冷間処理されたもの、予荷重を受けたもの、初期ひずみを与えられたもの、焼鈍されたものなどが含まれている。図中の縦破線（限界繰返し数 10⁴ 回）から左側はいわゆる低サイクル疲労領域、右側は高サイクル疲労領域である。低サイクル疲労領域において本計算結果は、Bonora と Newaz による計算結果⁴⁾と同程度に、実験結果と良好に対応した。しかしながら高サイクル疲労領域に入ると、計算結果は実験結果と比べ若干高い応力レベルを与えており、限界繰返し数の増大とともに実験結果と離れていく傾向が見られる。Bonora と Newaz による計

算結果⁴⁾も同様の傾向を示している。

そこで、本シミュレーションを低サイクル疲労領域とともに高サイクル疲労領域を含む計算に拡張する。低サイクル疲労領域では応力レベルが降伏応力を超えるため、主に塑性ひずみによって損傷が発展するが、高サイクル疲労領域では降伏点以下の応力レベルとなるため、弾性変形領域での損傷発展を考慮しなければならない。そこで弾性変形領域における損傷は疲労限度 280 MPa 以上で発生すると仮定し、弾性時と塑性時で異なる損傷パラメータを用いた計算を行った。用いた損傷パラメータ値を Table 3 に示す。ここに、(1) は低サイクル疲労のみを計算する場合に用いた損傷パラメータ、(2) は低サイクル疲労および高サイクル疲労を一貫して計算する場合に用いた損傷パラメータを表す。

このような方法により、低サイクル疲労領域から高サイクル疲労領域に至る S-N 曲線を計算した結果を Fig. 3 に示す。これを見ると、弾性変形時の損傷発展が考慮されたため塑性ひずみによる損傷発展が支配的な低サイクル領域でも若干応力レベルが低下しているが、高サイクル領域まで含め実験結果⁴⁾とほぼ良好に対応していることがわかる。すなわち、上述のような修正により、低サイクル疲労領域

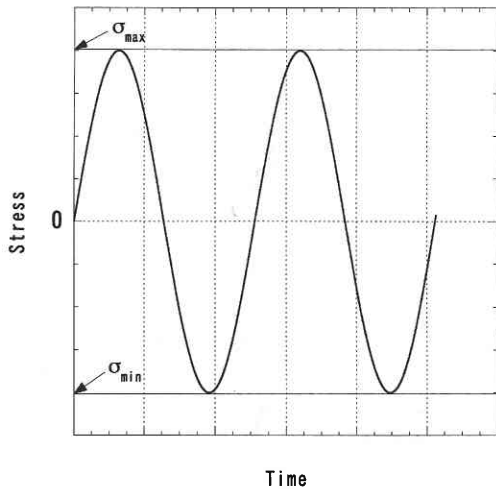


Fig. 1 Cyclic loading for fatigue analysis

Table 3 Damage parameters for low and high cycle fatigue of Al2024-T3

	Elastic Deformation		Plastic Deformation	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
(1)	0.864	1.0	0.864	1.0
(2)	0.664	1.1	0.864	1.0

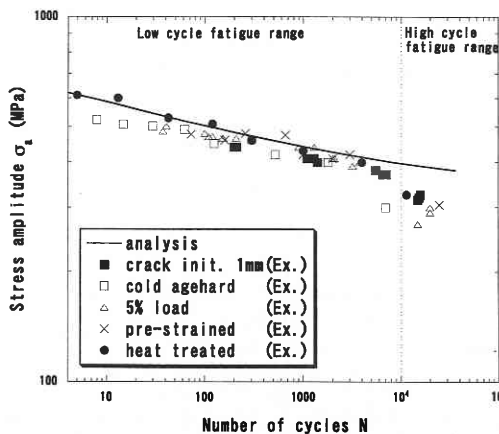


Fig. 2 Low cycle fatigue of Al2024-T3

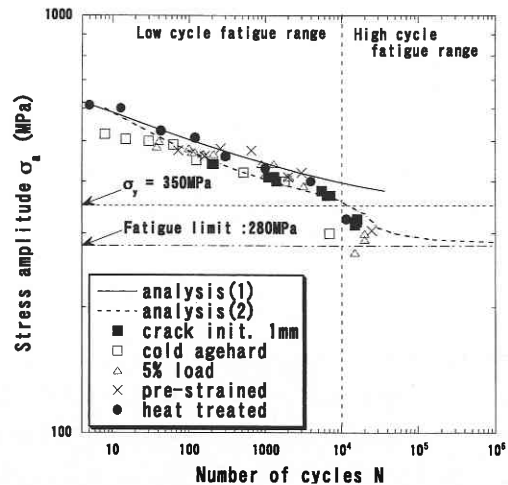


Fig. 3 Low and high cycle fatigue of Al2024-T3

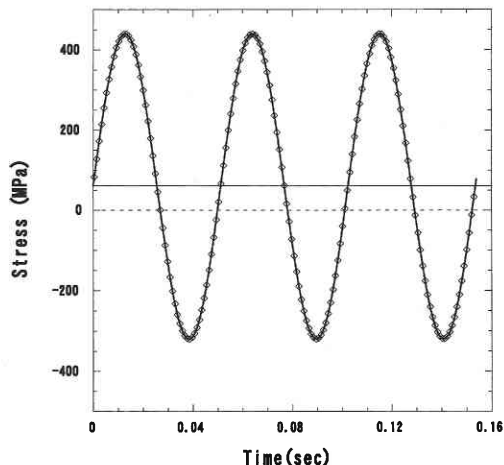


Fig. 4 Cyclic loading with mean stress of 60 Mpa

と高サイクル疲労領域の双方を同時に計算することが可能となった。

ここで、疲労繰返し応力に対する平均応力 σ_m を次式により定義する。

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \sigma_{max} - \sigma_m \dots\dots\dots (14)$$

この平均応力 σ_m を 0.0, 20.0, 40.0, 60.0 MPa と変えた場合の低サイクル疲労に与える影響を計算する。平均応力を 60.0 MPa とした場合の繰返し応力パターンを Fig. 4 に示す。Fig. 5 に応力繰返し回数と損傷発展の関係をログプロットして示す。繰返し回数のある段階までは少しずつ損傷が蓄積され、ある段階から急激に発展している様子がわかる。これは定性的に実際の疲労損傷現象と対応しているものと考えられる³⁾。文献4) おける Bonora と Newaz の計算結果と比較すると、本計算の方が平均応力による影響は相対的に小さい。すなわち、損傷の発展が疲労破壊末期に集中しているので、平均応力の大小が損傷発展に及ぼす影響は相対的に小さくなるが、平均応力の上昇により損傷発展が早期に起こり、疲労寿命が短縮される結果となる。

本章の計算により、低サイクル疲労領域から高サイクル疲労領域に渡る疲労 S-N 曲線の全体をほぼ良好にシミュレートし得る計算モデルが提示された。

4. ま と め

本報告では、連続体損傷力学に基づく構成式を用いて弾粘塑性および材料損傷を考慮したアルミニウム合金の数値材料試験を試みた。弾性変形時と塑性変形時は同一形式の

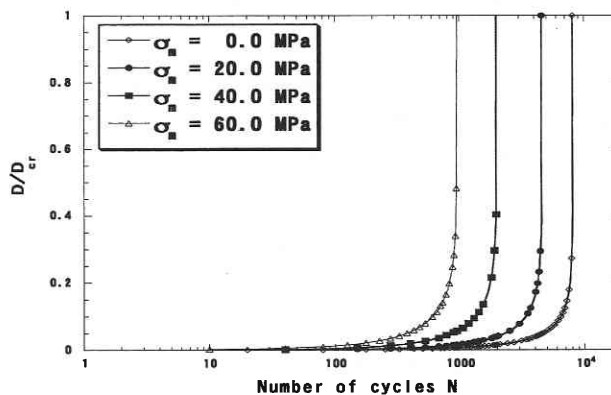


Fig. 5 Damage evolution in Al2024-T3

損傷発展方程式に対し、異なる損傷パラメータ値を仮定している。このような損傷発展式を用いて、 $10 \sim 10^5$ 程度の繰返し応力を受けるアルミニウム合金の低サイクルおよび高サイクル疲労破壊現象をシミュレートし、低サイクル疲労から高サイクル疲労に跨る領域において、S-N 曲線に関する計算結果が既存の実験結果とほぼ良好に対応することを確認した。

本研究で示したような損傷力学モデルに基づく数値材料試験法は、他の様々な材料および損傷に適用可能と考えられ、限定された材料試験結果に基づく、複合的な条件下における予損傷材料の力学的特性把握、さらには材料損傷・破壊を考慮した構造崩壊解析への適用などにおいて有用と判断される。

最後に、本論文の原稿作成に協力した東京大学生産技術研究所の李廷権助手に感謝する。

(2000年6月20日受理)

参 考 文 献

- 1) Lemaitre, J., A Course on Damage Mechanics, Second Edition, Springer, (1996), 206.
- 2) Skrzypek, J. and Ganczarski, A., Modeling of Material Damage and Failure of Structures (Theory and Applications), Springer, (1999), 148.
- 3) 都井, 山崎, 日本機械学会論文集 (A), (2000), 投稿中.
- 4) Borona, N. and Newaz, G. M., Low Cycle Fatigue Life Estimation for Ductile Metals Using a Nonlinear Continuum Damage Mechanics Model, Int. J. Solids Structures, 35-16, (1998), 1881.
- 5) 村上他, スポール損傷解析に対する損傷力学の適用, 日本機械学会論文集 (A), 60-578, (1994), 230.