

損傷評価プログラム DAMAGE 90 の適用性について

——その1：金属材料の単軸引張および片振引張疲労——

On the Applicability of the Program DAMAGE 90 for Damage Evaluation

— Part 1: Uniaxial tension and fatigue under unilateral tension of metals —

都 井 裕*・岡 田 和 三*

Yutaka TOI and Kazumi OKADA

1. はじめに

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」の展開により、近年、応力変形解析と損傷・破壊解析を融合した数値解析が可能となりつつある^{1,2)}。この解析法は、これまで個別に研究されていた応力変形解析と材料破壊解析とを統合する有力なアプローチの一つであるが、現時点では、理論式の実験的検証、材料定数の決定、有限要素サイズ依存性などの問題点があつて、日常的な解析ツールとしての実用化にはもう少し時間を要するものと思われる。しかしながら、疲労損傷などに代表されるように、従来は数値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。

著者の一人らは、金属材料の力学的挙動に対し、損傷力学に基づく弾粘塑性損傷構成方程式を定式化し、任意の三次元ひずみ（あるいは応力）履歴を入力し、応力（あるいはひずみ）と損傷の履歴を数値的に計算することのできる数値材料試験法を開発した³⁾。損傷発展方程式の定式化に際し、損傷の種類（弾性損傷と塑性損傷）とひずみ速度効果を考慮するために、4つの新しい材料パラメータを導入した。代表的な金属材料、すなわち各2種類の鋼材およびアルミニウム材の、静的・動的引張試験結果と片振引張応力下の疲労試験結果を用いて、構成方程式モデルの同定、すなわち材料定数の決定を行うとともに、予ひずみあるいは予疲労を受けた予損傷材の静的・動的引張挙動を予測し、実験結果と良好に対応することを確認した³⁾。

他方、Lemaitre と Doghri は統合型の損傷力学モデルに基づき、弾塑性有限要素解析などから得た着目点のひずみ成分の履歴から損傷進展さらにはクラックの発生を予測するポスト処理プログラム DAMAGE 90 を開発し、ソースリストを公表している⁴⁾。DAMAGE 90 の基礎となる構成方

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

程式系は、塑性変形におけるひずみ速度の影響が考慮されていないこと、損傷発展方程式における前述の4つの材料パラメータが含まれていない点で、著者らの数値材料試験法と異なっている。また様々な簡易式を用いており、著者らの数値材料試験法のように構成方程式系を精密に数値積分していない。しかしながら、実用性の見地からデータ入力および計算が大幅に簡単化されている。本報告では、DAMAGE 90 を鋼材およびアルミニウム材の静的単軸引張挙動および片振引張応力下の疲労挙動の計算に用いることにより、どの程度まで実験結果と整合するか、換言すればこれらの力学挙動のモデリングに対し、どの程度まで適用可能かについて考察した。

2. DAMAGE90 の概要

DAMAGE 90 においては、高サイクル疲労損傷を表現することを主目的に、準脆性 (quasi-brittle) の概念が導入されている。すなわち図1に示すように、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、メソ要素（ミクロ要素部を除く）はヤング率 E 、降伏応力 σ_y 、引張強度 σ_u 、疲労限界応力 σ_f の下で弾性変形（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ずると仮定される。ミクロ要素の降伏応力 σ_s^μ と疲労限界応力 σ_f^μ は、次式により与えられる。

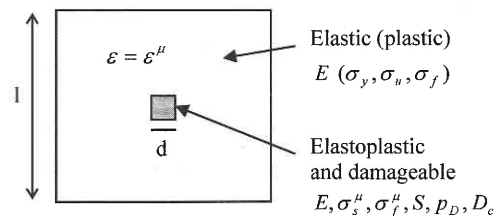


Fig. 1 Two-scale volume element

研 究 速 報

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

ここで、上付き添字の μ はマイクロ要素の値を意味する (以下同じ)。すなわち、応力レベルがメソ要素の疲労限 σ_f を超えると、マイクロ要素 (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。また、マイクロ要素のひずみ ϵ^μ は、Lin-Taylor の仮説によって、メソ要素のひずみ ϵ に等しいものと仮定する。

マイクロ要素は弾/完全塑性体と仮定し、クラックの閉鎖効果を無視すると、損傷発展を考慮した構成方程式は次式のように与えられる。

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

ここに、

$$\begin{aligned} f &= \frac{\sigma_{eq}}{1-D} - \sigma_s^\mu \\ p_D &= \epsilon_{pD} \frac{\sigma_u - \sigma_f}{\sigma_s^\mu - \frac{\sigma_f^2}{\sigma_y}} \dots\dots\dots (2b) \end{aligned}$$

式中、 ϵ_{ij} は全ひずみ、 ϵ_{ij}^e は弾性ひずみ、 ϵ_{ij}^p は塑性ひずみ、 ν はポアソン比、 E はヤング率、 σ_{ij} 、 σ_{kk} は公称応力、 D は損傷変数、 δ_{ij} はクロネッカーデルタ、 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ は塑性ひずみ速度、 $\tilde{\sigma}_{ij}^D$ は偏差応力、 σ_s^μ はマイクロ要素の降伏応力、 \dot{p} は相当塑性ひずみ速度、 σ_{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_ν 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、 ϵ_{pD} は単軸の損傷発生限界ひずみ、 σ_u は引張強度である。

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。

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

ここに、 D_{1c} は単軸の損傷限界値である。

DAMAGE 90 に材料定数 $E, \nu, \sigma_f, \sigma_y, \sigma_u, S, \epsilon_{pD}, D_{1c}$ およびひずみ 6 成分の履歴を入力することにより、応力、累積ひずみ、損傷変数などの履歴が計算され、静的な応力-ひずみ曲線および疲労 SN 曲線などをプロットすることができる。

3. 材 料 定 数

計算対象とした金属材料は、鋼材が SM490A および SN490B、アルミニウム材が 2219-T87 および 6061-T6 の 4 種類である。著者の一人らは、単軸引張試験結果と片振引張応力下の疲労試験結果^{5,6,7)} を用いて、文献 3) で提案した構成方程式モデルを同定した³⁾。決定された材料定数のうち本計算に用いるものを表 1 に示す。表中の S_0^p と S_0^e は、それぞれ塑性変形時、弾性変形時の損傷強度パラメータ S である。文献 3) におけるモデリングでは、メソ要素あるいはマイクロ要素などを考えることなく、弾性損傷と塑性損傷に、単純に異なる材料パラメータ値を与えている。

4. 力学特性のシミュレーション

単軸引張挙動の計算に際しては、 ϵ_{11} のみを入力し、 ϵ_{22} と ϵ_{33} は次式で計算される。

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

この仮定により、塑性変形の非圧縮性が保持される。

DAMAGE 90 は基本的に、両振応力または両振ひずみによる疲労損傷解析しか行えない。片振引張応力下の疲労をシミュレートする場合の両振入力ひずみ $\pm \epsilon_{11}$ と片振応力振幅 σ_{11} の関係は、図 2 を参照すると次式により与えられる。

Table 1 Material constants of steel and aluminum

	SM490A	SN490B	2219-T87	6061-T6
E [GPa]	210	210	73	70
ν	0.3	0.3	0.3	0.3
σ_f [MPa]	399	280	223	194
σ_y [MPa]	420	360	380	300
σ_u [MPa]	550	538	453	321
S_0^p [MPa]	0.47	0.48	0.69	0.37
S_0^e [MPa]	600	300	120	100
ϵ_{pD}	0.11	0.12	0.05	0.055
D_{1c}	0.53	0.54	0.24	0.2

$$\sigma_{11} = E(2\varepsilon_{11} - \varepsilon_s) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、ひずみ ε_s は σ_s^μ/E である。このように変換すると両者における累積相当塑性ひずみは等しくなり、片振応力下の疲労挙動のシミュレーションが可能となる。

4.1 単軸引張

図3に、単軸引張試験に対応する応力-ひずみ曲線 (×

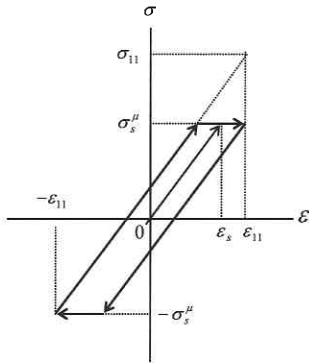


Fig. 2 Strain amplitude ε_{11} and stress amplitude σ_{11}

印はメソクラックの発生点) の計算結果を示す。○印は板橋らによる実験結果^{5,6,7)}である。

マイクロ要素の降伏応力 σ_s^μ の値を σ_y あるいは σ_u と仮定して、単軸引張挙動を計算した。図3に示すように、ひずみが損傷発生限界値 ε_{pd} に達するまでは弾/完全塑性挙動を示し、その後は損傷進展により、ひずみの増加に伴い応力が減少する。応力の減少率または損傷速度は、 σ_s^μ が大きい場合の方が高い。これらの結果は、DAMAGE 90 において用いられている構成式モデルの性質に対応している。

いずれの材料の場合も $\sigma_s^\mu = \sigma_u$ とした方が、総合的に実験結果との対応がよいが、弾/完全塑性に近い挙動を示すアルミニウム材 6061-T6 以外の材料では、実験結果と若干の定量的相違がある。他方、文献3) における数値材料試験法では、弾/完全塑性のような近似を置かず、構成方程式を精密に数値積分しているため、実験結果と極めて良好に対応する応力・ひずみ曲線が得られている³⁾。

4.2 片振引張疲労

図4に、片振引張応力下のSN曲線に関する計算結果を示す。○印は板橋らによる実験結果^{5,6,7)}である。損傷強度材料パラメータ S の値を S_0^p あるいは S_0^e と仮定し、(5) 式に従う両振ひずみを与えて計算した。

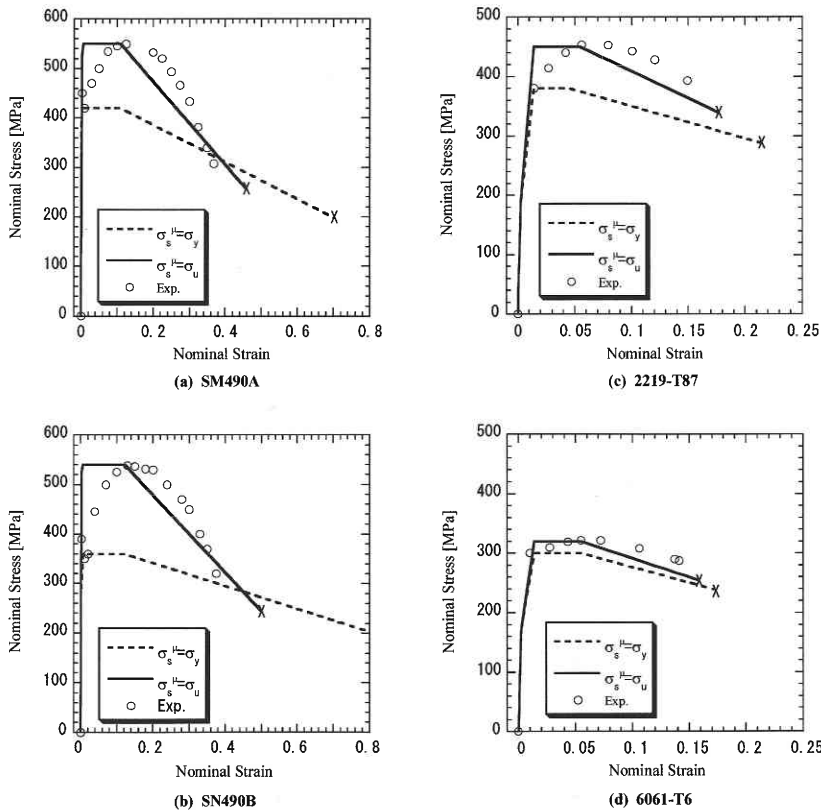


Fig. 3 Stress-strain curves

研究速報

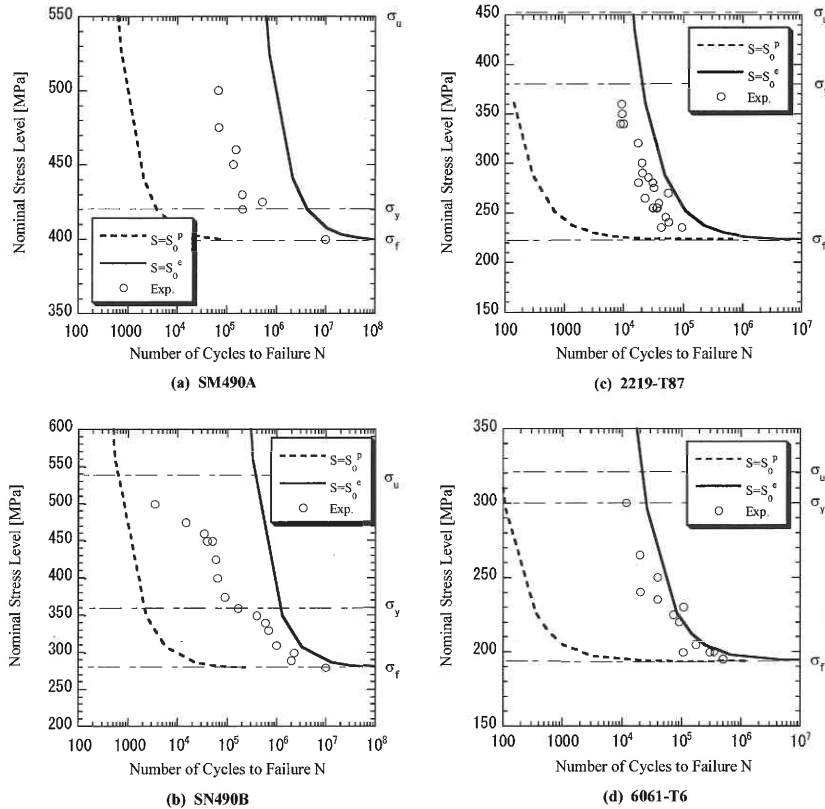


Fig. 4 SN curves

いずれの材料に対しても、応力振幅が降伏応力 σ_y より小さい場合、すなわち高サイクル疲労の場合には、 S_0^e を用いた計算結果と実験結果がほぼ良好に対応している。すなわち、文献3)において提案した新しい材料パラメータ S_0^e の有用性が確認される。また、図4(b)のSN490Bに対する結果に見られるように、低サイクル疲労の場合は、応力振幅が大きくなるに連れて、 S_0^p を用いた計算結果と実験値が近づく傾向が現れている。低サイクル疲労に対する定量的議論は次報で行う予定である。

5. ま と め

本報告では、損傷評価プログラム DAMAGE 90を各2種類の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計算に適用し、実験結果との整合性について論じた。その結果、以下のことが判明した。

- ① $\sigma_s^u = \sigma_u$ と仮定した場合の単軸引張挙動の計算結果(応力・ひずみ曲線)は、総体的には実験結果と近いが、DAMAGE 90では弾/完全塑性体近似を行っているため、定量的な一致度は必ずしも十分ではない。
- ② $S = S_0^e$ と仮定した場合の疲労計算結果(SN曲線)は、

高サイクル疲労の実験結果とはほぼ良好に対応し、低サイクル疲労の実験結果は $S = S_0^p$ と仮定した場合の疲労計算結果(SN曲線)を下限として近づく傾向がある。後者についての定量的議論は次報で行う。

(2003年3月6日受理)

参 考 文 献

- 1) Lemaitre, J., A Course on Damage Mechanics, Second Edition, (1996), 206, Springer.
- 2) Skrzypek, J. and Ganczarski, A., Modeling of Material Damage and Failure of Structures (Theory and Applications), (1999), 148, Springer.
- 3) 都井裕・広瀬智史, 機論(A), 69巻, 679号, (2003), 530-537.
- 4) Lemaitre, J. and Doghri, I., Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 115, (1994), 197-232.
- 5) Itabashi, M. and Fukuda, H., Technology, Law and Insurance, 4, (1999), 37-44.
- 6) 板橋正章・福田博, 材料, 50-3, (2001), 204-209.
- 7) Itabashi, M. and Fukuda, H., Journal of Materials Processing Technology, 117-3, (2001).