

損傷力学を用いた二液式スラスタ用ニオブ合金のクリープ疲労解析

升岡正, 都井裕 (東京大学), 香河英史, 池田博英 (JAXA)

Tadashi Masuoka, Yutaka Toi(Tokyo University), Hideshi Kagawa, Hirohide Ikeda(JAXA)

1. 緒言

静止衛星や宇宙ステーション補給機等の軌道変換および姿勢制御に使用される二液式スラスタの燃焼器に対し、従来品より耐熱温度が高く長寿命な材料の適用が進んでいる。燃焼器には従来から表面にシリサイドコーティングを施したニオブ合金材 (C103)¹⁾ が広く使用されているが、欧米では超耐熱合金としてイリジウム/レニウム²⁾ や白金ロジウム³⁾を使用したスラスタがすでに市場に投入されており、国内においても、窒化珪素系セラミクスを使用したスラスタ⁴⁾ が実用化されている。また、JAXAでは従来のニオブ合金材の表面に耐熱性および耐酸化性を向上させた新しいコーティング⁵⁾ を使用したスラスタの開発が進められている。このような、超高温環境で長時間使用されるスラスタ燃焼器について、設計段階から寿命を精度よく予測する手法に対する期待は大きい。スラスタに使用される燃焼器の損傷として想定される、クリープ、疲労を含む材料の弾粘塑性現象を材料内部に発生する損傷や破壊と関連付ける力学体系として、連続体損傷力学^{6,7)} (以下、損傷力学と称する) は高いポテンシャルを有している。しかし、構成方程式モデルが複雑でありその実験的検証や材料定数値の同定が困難なため、実際の工業設計および解析の現場において実用性を獲得しているとは言い難い⁸⁾。このような中、著者らは二液式スラスタに広く使用されているニオブ合金材 (C103) に対し、損傷力学に基づく簡潔な構成方程式モデルを使用し、低サイクル疲労寿命を精度よく再現できることを確認した⁹⁾。本研究では、スラスタの高性能化への要求を踏まえ、使用温度環境を従来よりも高い 1500°C と想定し、クリープ疲労試験を実施しこれを精度よく再現する損傷力学モデルの定式化および材料定数の同定を行なう。また、実施したクリープ疲労試験と同様のクリープ疲労解析を実施し、破断寿命について実験結果と解析結果を比較することにより損傷力学モデルで使用される構成方程式および材料定数の妥当性を評価したのでこれらについて報告を行う。

2. 損傷力学モデル

弾性構成方程式は、ニオブ合金材を等方性損傷体と仮定し、ひずみ等価性仮説を適用した式(1)により与えられる¹⁰⁾。

$$\dot{\sigma}_{ij} = (1-D)D_{ijkl}^e (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^{vp} - \dot{\epsilon}_{kl}^c) - \dot{D} \frac{\sigma_{ij}}{1-D} \quad (1)$$

式中、 $\dot{\sigma}_{ij}$ は応力変化率、 D_{ijkl}^e は弾性体の応力・ひずみマトリックス、 $\dot{\epsilon}_{kl}$ は全ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{kl}^{vp}$ は粘塑性ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{kl}^c$ はクリープひずみ速度、 D はスカラー損傷変数である。

粘塑性構成方程式は、ミーゼスの降伏条件を適用した式(2)を用いた^{6,10)}。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{3}{2} \left\langle \frac{f}{K} \right\rangle^n \frac{\sigma_{ij}^D - X_{ij}^D}{(\sigma_{ij} - X_{ij})_{eq}} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\sigma_{ij}^D - X_{ij}^D}{(\sigma_{ij} - X_{ij})_{eq}} \quad (2)$$

ここに,

$$f = \left(\frac{\sigma_{ij}}{1-D} - X_{ij} \right)_{eq} - R - \sigma_y \quad (3)$$

式中, f はミーゼスの降伏関数, $\langle \rangle$ は Macauley の括弧, K, n は材料定数, p は累積相当粘塑性ひずみ, x_{ij} は移動硬化による背応力, R は等方硬化による応力, σ_y は降伏応力である. 上添字 D は偏差成分, 下添字 eq は相当量であることを示す.

等方硬化による応力 R , 背応力 x_{ij} について, 繰り返し载荷への適用を考慮し, 以下の式を用いた^{6), 10)}.

$$R = R_\infty [1 - \exp(-bp)] \quad (4)$$

$$\dot{X}_{ij} = \gamma (X_\infty \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} - X_{ij} \dot{p}) \quad (5)$$

式中, $R_\infty, b, X_\infty, \gamma$ は材料定数である. ここでは, 移動硬化による背応力は増分形として与えている.

クリープ変形に対しては Perrin らがフェライト鋼(0.5 Cr-0.5Mo-0.25V)に適用した式(6)を用いた¹¹⁾.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} A \sinh \left[\frac{B \sigma_{eq} (1-H)}{(1-\Phi)(1-D)} \right] \frac{\sigma_{ij}^D}{\sigma_{eq}} \quad (6)$$

式中, $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$ はクリープひずみ速度, A, B は材料定数である. H は硬化変数, Φ は軟化変数であり, それぞれ式(7), 式(8)で与えた.

$$\dot{H} = \frac{h_c \dot{\varepsilon}_{eq}}{\sigma_{eq}} \left(1 - \frac{H}{H^*} \right) \quad (7)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{K_c}{3} (1 - \Phi^4) \quad (8)$$

硬化変数 H は, 第一期クリープ領域のひずみ硬化を表し, クリープひずみの蓄積とともに零から H^* まで増加する. 軟化変数 Φ は時効軟化を表し, 第三期クリープ領域に影響を及ぼす. $\dot{\varepsilon}_{eq}^c$ は相当クリープひずみ, h_c, H^*, K_c は材料定数である.

弾粘塑性損傷解析において, 材料損傷は延性損傷, 疲労損傷およびクリープ損傷の和であると仮定し, 式(9)を用いて算出した.

$$\dot{D} = \dot{D}_p + \dot{D}_f + \dot{D}_c \quad (9)$$

式中, \dot{D}_p は延性損傷変化率, \dot{D}_f は疲労損傷変化率, \dot{D}_c はクリープ損傷変化率である.

延性損傷および疲労損傷における損傷発展方程式は, ニオブ合金を粘塑性損傷体と仮定し式(10), (11)を用いた. ここでは, 延性損傷について, 現在の相当粘塑性ひずみの値がそれまでに履歴した同ひずみの最大値を超えた場合のみ損傷が進展する⁹⁾.

$$\dot{D}_p = \left(-\frac{Y}{S_{p1}} \right)^{S_{p2}} \dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} \quad \left(\varepsilon_{eq}^{vp} \geq \varepsilon_{eq}^{vp} MAX \text{ の場合} \right) \quad (10)$$

$$\dot{D}_f = \left(-\frac{Y}{S_{f1}} \right)^{S_{f2}} \dot{p} \quad (11)$$

ここに,

$$Y = \frac{1}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3} (1+\nu) \sigma_{eq}^2 + 3(1-2\nu) \sigma_H^2 \right] \quad (12)$$

式中 S_{p1}, S_{p2} は延性損傷強度材料パラメータ, S_{f1}, S_{f2} は疲労損傷強度材料パラメータ, $\varepsilon_{eq}^{vp} MAX$ はそれまでの履歴における相当粘塑性ひずみの最大値, Y はひずみエネルギー密度解放率, E はヤング率, ν はポアソン比, σ_H は静水圧応力である.

クリープ損傷における損傷発展方程式は式(13)を用いた¹¹⁾.

$$\dot{D}_c = CN\dot{\varepsilon}_{eq} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}} \right)^\lambda \quad (13)$$

ここに,

$$N = 1, \quad (\sigma_1 \geq 0) \quad (14)$$

$$N = -1, \quad (\sigma_1 \leq 0) \quad (15)$$

すなわち, 最大主応力 σ_1 が引張と圧縮の場合ともに式(13)に従いクリープ損傷は進展すると仮定した. 式中, C と λ は材料定数である.

3. クリープ疲労解析

ニオブ合金材 (C103) から平板の疲労試験片 (幅: 10 mm, 厚さ: 3 mm, 平行部: 30 mm) を製作し, 4種類の異なる応力範囲でクリープ疲労試験を実施した. 各試験条件を第1表に示す. 試験環境は 1500°C, 真空中である. 試験は荷重制御とし, 1Hzの正弦波で荷重を与えた. 試験片が未破断の場合は, 最大 2000 サイクルで試験を打ち切った. 第1図にクリープ疲労試験で得られたひずみの時間履歴について, 実験結果 (図中 Exp と記載) と2章の構成方程式を用いて得られた解析結果 (図中 Model と記載) を示す. 疲労損傷強度材料パラメータ S_{f1} , S_{f2} については著者らが常温疲労試験で取得した材料定数値を使用した. クリープ疲労解析で使用了材料定数を第2表にまとめて示す. 実験結果が示すように, 引張側に応力サイクルを与えると, 主にクリープ変形によりひずみが正側に進展する. 解析結果は応力サイクルによるひずみの増加と応力範囲の違いによるひずみ増加量の違いをよく再現している. 第2図に応力範囲:

-30-30MPaのクリープ疲労試験で得られた応力・ひずみ線図(1および2000 cycle)について, 実験結果と解析結果を示す. 実験結果が示すように, 1サイクル目と2000サイクル目について応力・ひずみ線図がほとんど動いていない. これは, 引張と圧縮のクリープによるひずみ量に差がないことを示している. よって, 本解析ではクリープの材料定数について, 引張と圧縮で同じ値を用いて計算を行った. その結果, 解析では1サイクル目と2000サイクル目で応力・ひずみ線図に差がない結果になった.

損傷の進展評価として, 第3図および第4図に応力範囲(0-90, 0-60 MPa)および応力範囲(0-30, -30-30 MPa)の試験における損傷進展曲線 (横軸: 時間, 縦軸: 損傷変数 D) を示す. ここで, 損傷変数の実験結果の算出方法について, 各サイクルにおける荷重除荷時のヤング率を各応力・ひずみ曲線における傾きから計算し, 初期状態のヤング率との比から算出した. 解析結果は全体的に実験結果に対し小さめの値になったが, 応力範囲が小さい 0-30, -30-30 MPa の試験では損傷がほとんど進展しない点や, 応力範囲が大きい 0-90MPa の条件での急速な損傷進展を良く再現しているといえる. また, 第4図の実験結果が示すように, 圧縮を含む応力範囲: -30-30 MPa の損傷変数は応力範囲 0-30 MPa の損傷変数より大きい値となっており, 解析においてもこれを再現した結果となった. 第3表に応力範囲: 0-90MPa の試験に関するクリープ疲労の破断サイクル数に関する実験結果と疲労寿命の解析結果を示す. クリープ疲労寿命の実験結果と解析結果についてほぼ同等の結果が得られた. 一方, 破断時の損傷変数について, 解析結果はクリープ損傷が支配的であり, 延性損傷および疲労損傷がほとんど進展しない結果となった. この結果の妥当性を評価するために, クリープ疲労試験後に試験片の破面観察を実施した. 第

5 図にクリープ疲労試験後（応力: 0-90MPa）の試験片の破断面写真を示す。破断面はクリープ損傷の特徴を示すディンプルを呈しており、本解析結果は損傷形態としても妥当であるといえる。

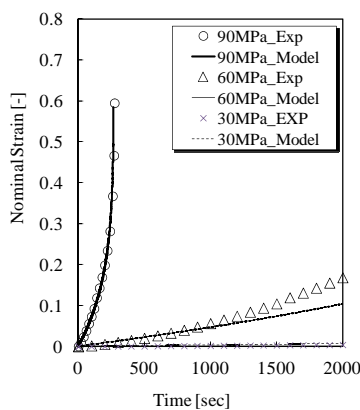
第 1 表 クリープ疲労試験条件

No	Stress range [MPa]	Damage type	Number of cycles
1	0 - 30	creep, fatigue	2000 (Not fractured)
2	0 - 60	creep, fatigue	2000 (Not fractured)
3	-30 - 30	creep, fatigue (Including compression)	2000 (Not fractured)
4	0 - 90	creep, fatigue, ductility	273

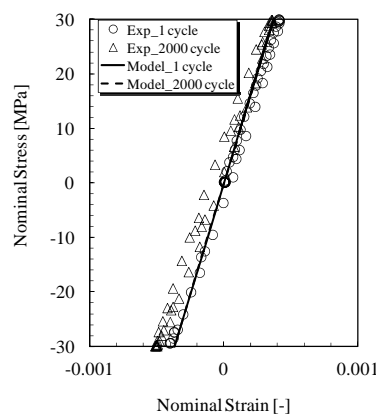
第 2 表 クリープ疲労解析で使用了材料定数

A [sec ⁻¹]	1.15×10^{-6}	B [MPa ⁻¹]	0.10
h_c [MPa]	4.0×10^3	H^*	0.05
K_c	0	C	0.7
λ	1	E [GPa]	81.3
ν	0.3	σ_y [MPa]	75
R_∞ [MPa]	8	b	3
X_∞ [MPa]	8	γ	12
K [GPa]	50	n	1
S_{p1} [MPa]	1.3	S_{p2}	1.0
S_{f1} [MPa]	125	S_{f2}	1.0

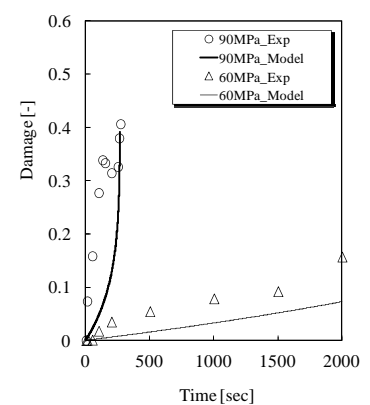
第 1 図 クリープ疲労試験におけるひずみの時間履歴 (応力範囲:0-30,0-60 および 0-90 MPa)



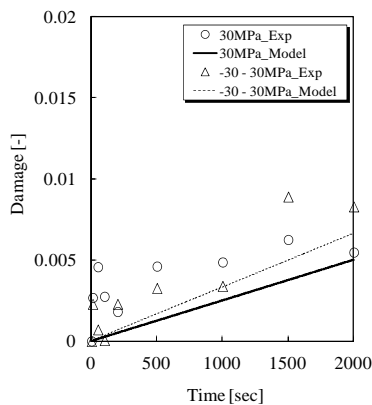
第 2 図 クリープ疲労試験におけるひずみの時間履歴 (応力範囲:-30 - 30 MPa)



第 3 図 損傷進展曲線 (応力範囲:0-60 および 0-90 MPa)



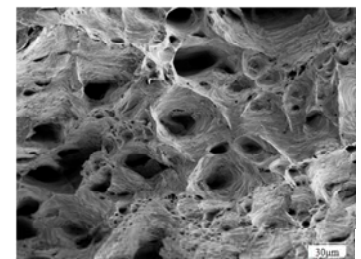
第 4 図 損傷進展曲線 (応力範囲:0-30 および -30-30 MPa)



第 3 表 クリープ疲労寿命の実験および解析結果

D_{cr}	0.41	D_c	0.41
Cycles to Failure (Experiment)	273	D_f	0.12×10^{-4}
Cycles to Failure (Model)	267	D_p	0.12×10^{-2}

第 5 図 クリープ疲労試験（応力範囲: 0-90MPa）後の破断面写真



4. 結言

本研究では、ニオブ合金材（C103）について、1500°Cの超高温環境でクリープ疲労試験を実施し得られた実験結果に基づいて損傷力学モデルを同定した。また、構成方程式および同定した材料定数をそのまま用いてクリープ疲労解析を実施した結果、ひずみ履歴およびクリープ疲労寿命を良好に再現できており、本手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) Schoenman, L.: 4000° F Materials For Low Thrust Rocket Engines, 29th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993, AIAA 93-2406.
- 2) Krismer, D., Dorantes, A., Miller, S., Stechman, C. and Lu, F.: Qualification Testing of a High Performance Bipropellant Rocket Engine Using MON-3 and Hydrazine, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003, AIAA 2003-4775.
- 3) Fick, M., Schulte, G. and Ehmann, D.: Status and Current Developments of Astrium's 400 Bipropellant Engine, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003, AIAA 2003-4778.
- 4) Sawai, S., Sato, E., Uesugi, K., Furukawa, K., Mishima, H., Morishima, K., Nonaka, Y. and Kondo, M.: Development of Ceramic Based 500 N Class Bipropellant Thruster, The 56th International Astronautical Congress (IAC), 2005, IAC-05 -C4.3.01.
- 5) Ohtsuka, M., Hotta, D., Yoshioka, T., Narita, T., Nagata, T., Masuda, I. and Masuoka, T.: Development of Self-Mending Coating System on Nb and Nb-based Alloys, International Symposium on High-temperature Oxidation and Corrosion, 2014, pp. 221-224
- 6) Lemaitre, J.: A Course on Damage Mechanics, 2nd ed., Springer, 1996, pp. 1-228.
- 7) 村上 澄男, : 連続体損傷力学 (損傷・破壊解析の連続体力学的方法), 森北出版, 2008, pp. 1-324.
- 8) Bielski, J., Skrzypek, J. and Kuna-Ciskal, H.: Damage Mechanics: Accomplishments, Trend and Needs, International Journal of Solids and Structures, Vol. 37, No.2, 2000, pp. 267-277.
- 9) 升岡 正, 都井 裕, 長田 泰一, 香河英史, 池田 博英: ニオブ合金の損傷力学モデリング, 日本機械学会年次大会講演論文集, J0410401, 2014.
- 10) 都井 裕, : 計算固体力学入門, コロナ社, 2008, pp.1-153.
- 11) Perrin, I.J. and Hayhurst, D.R.: Continuum Damage Mechanics Analyses of type IV Creep Failure in Ferritic Steel Crossweld Specimens, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 76, 1999, pp. 599-617.