

実働非比例多軸負荷における NH₃ 発電ガスタービンプレード材料 SUH660 のクリープ疲労寿命予測手法の構築

立命館大学 理工学部機械工学科

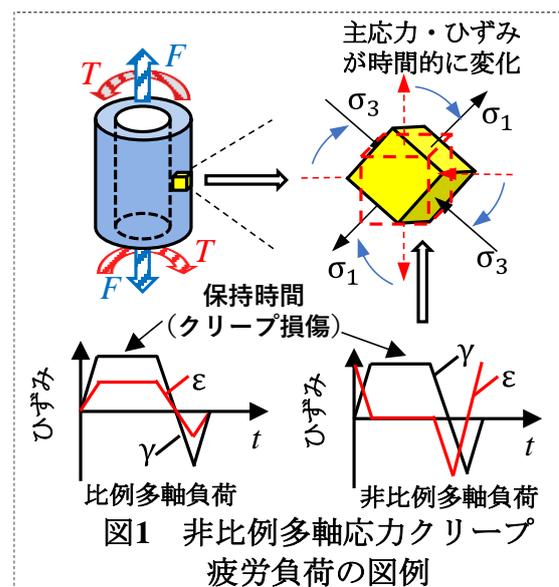
何 磊

1. はじめに

高温などで実際に使用されている際には、熱応力および機械負荷により、主軸方向、振幅、繰返し速度が変化する非比例多軸変動負荷が発生する。従来の一方向一定振幅研究により、非比例多軸負荷では一方向の引張圧縮負荷に比べて材料の疲労寿命が著しく低下することが分かった¹⁾。現在、一般的に用いられている多軸疲労強度設計は、ミーゼスやトレスカの相当応力、相当ひずみを用いて多軸負荷波形を単軸負荷波形に置き換えることで行われている。しかし、この手法は主軸方向が変化しない比例多軸負荷には適用できるが、主軸方向が時間ごとに変化する非比例多軸負荷では適用できないことが分かっている¹⁾。また、多くの多軸疲労研究が一定振幅のもとで行われ、実際の構造物に作用するような変動負荷に着目した研究は少ない。すなわち、変動負荷に関する研究の多くが多軸応力条件を考慮しない単軸負荷条件で行われている。このことから実際の配管など構造物に作用するような非比例多軸変動負荷が疲労寿命に及ぼす影響が不明であり、変動負荷と非比例多軸の影響を考慮した疲労寿命予測手法を構築することは、機器の安全性向上のために重要である。先行研究で Heらは非比例多軸の影響を考慮するために非比例多軸変動負荷において時間ごとに変化する主軸方向を定量化する IS 法²⁾を用いて高サイクル域における疲労寿命予測手法を確立したが、低サイクル域における有用性については検証されていない³⁾。したがって低サイクル域における非比例多軸変動負荷の寿命予測手法を確立することは必要不可欠である。

また、優れた高温特性を持つ SUH660 が新エネルギー発電ガスタービンの圧縮機のブレードの材料として使用されている。実際の使用では、ガスタービンの起動・停止により、圧縮機のブレードは繰返し疲労負荷と一定荷重でのクリープ負荷、いわゆる、クリープ疲労損傷を受ける。さらに、周期が異なる温度変化による繰返し熱応力と機械的応力との重畳負荷により、主ひずみ軸方向が時間に伴って変化する非比例多軸荷重状態になり(図1)、このように、非比例負荷損傷と多軸負荷損傷とが重畳し、圧縮機ブレードの寿命が大きく低下する。したがって、非比例多軸応力状態下での圧縮機ブレードのクリープ疲労寿命を予測することは、安心・安全な発電装置の開発にとって非常に重要である。

本研究では、非比例多軸実働荷重におけるアンモニア発電用圧縮機のブレード材料のクリープ疲労寿命モデルを構築することを目的とする。



2. 試験方法

2.1 供試材および試験片

本研究では、供試材として析出強化型オーステナイト系ステンレス鋼である SUH660 を使用した。試験片の形状および寸法については図 2 に示す。本研究では、標点部外径 12mm，内径 9mm，平行部長さ 8mm のオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 鋼の中空円筒試験片を用いた。試験片の外表面研磨にはエメリー紙 #600，#1200，#2000 で行った後，アルミナ粒子 1 μ m でバフ研磨を行った。

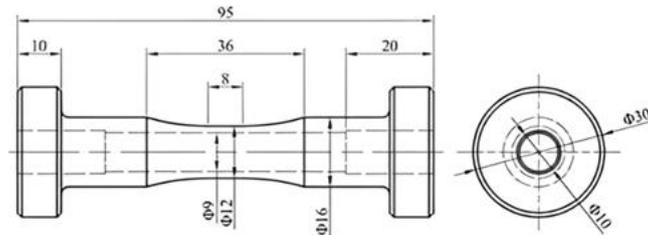


図 2 試験片の形状および寸法 (mm)

2.2 試験条件

本実験では、図 3 の電気油圧サーボ式多軸低サイクル疲労試験機を用いた。本試験機は、コンピュータ制御によって軸方向荷重とねじり方向荷重を同時に制御することが可能である。本試験機の仕様は、最大負荷 50kN，最大トルク 500N \cdot m 作用させることが可能である。荷重計測器にはロードセル，変位計測には二つの渦電流センサを備えたレバー式の伸び計を用いた。変位計測の際には，レバーの先端を試験片標点部に当てばねを用いて固定し，変位計測を行った。また，二つの渦電流センサによって軸方向変位とねじり角をそれぞれ計測することが可能とした。

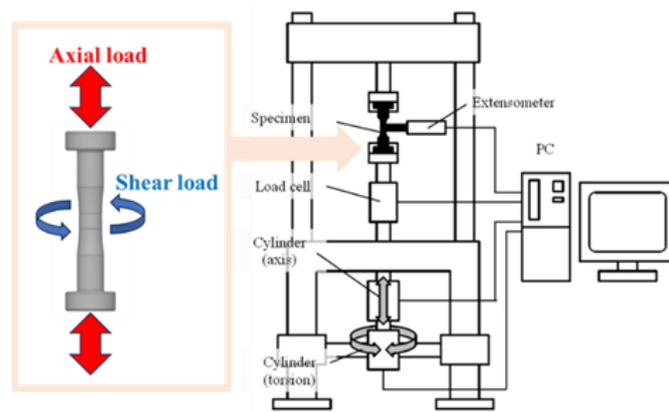


図 3 多軸疲労試験機模式図

本研究ではひずみ範囲内の 40 個の乱数をプログラムによって取得した。これを波形のピーク値として使用し，1 ブロックとして周期的に負荷された。本研究では二つの軸方向負荷パタ

ーンを作成した．また，両軸方向はともに 40 点のピーク値を持ち，1 ブロックあたり 18.5 サイクルで構成され，最大主ひずみおよびひずみ速度を 0.6%と 0.1%/s とした．非比例多軸変動負荷試験ではねじりひずみは軸ひずみと位相差を変更して非比例多軸変動負荷を作成した．代表的な単軸疲労およびクリープ疲労負荷パターンはそれぞれ図 4(a)(b)に示す．

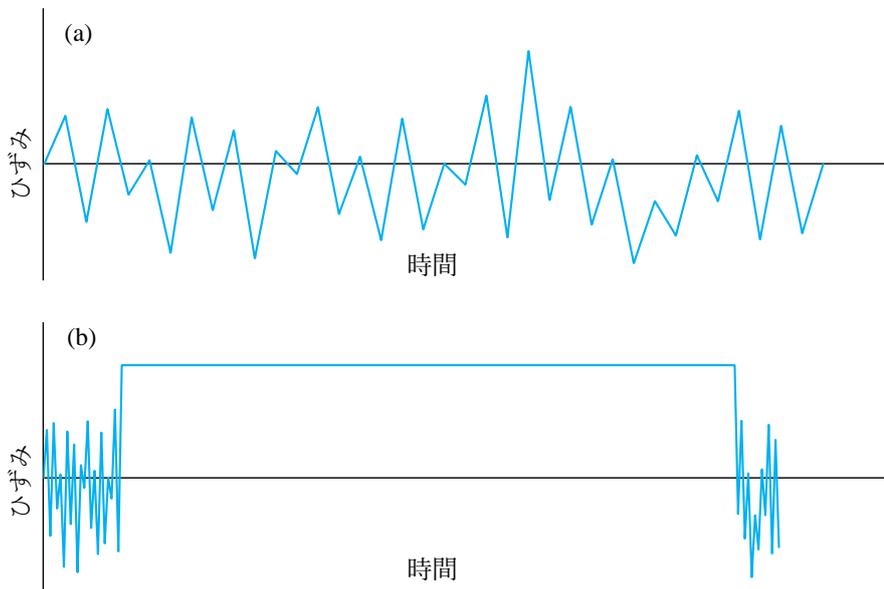


図 4 (a) 単軸ランダム疲労パターン (b) 単軸ランダムクリープ疲労パターン

本研究では，試験温度 700 度の条件下で，単軸および非比例多軸における一定振幅およびランダム負荷での試験を実施し，寿命予測を行った．

3. 寿命予測手法

本研究では二つの疲労寿命予測手法を用いて疲労寿命予測を行った．まず，一つ目の方法について説明する．プログラムで取得した非比例多軸変動負荷波形を IS 法³⁾により非比例変動単軸負荷相当波形 $SI(t)\cos\xi(t)$ に変換し，図 5(a)に示す． ϵ_I を取得する．そして，一般的に用いられる単軸変動負荷試験の疲労寿命評価手法と同様にレインフロー法によって波形を分割し，各サイクルのひずみ範囲の取得とサイクルカウントを行う．得られたひずみ範囲から一定振幅試験の ϵ -N 線図から疲労寿命データを取得し，式(1)の線形累積損傷則によって損傷 D を計算し，この値が 1 になったときに破壊が生じると考える．

$$D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N_i} + \frac{n_n}{N_n} \right) \times Block \quad (1)$$

ここで， n_i は実際のサイクル数， N_i は ϵ -N 線図から得られた各ひずみ範囲での破断サイクル数， $Block$ は実際の破断ブロックを示す．クリープ疲労損傷の場合，式 (2) を用いて損傷を計算する．

$$D = (D_f + D_c) \times Block \quad (2)$$

ここで， D_f ， D_c は 1 ブロックの疲労およびクリープ損傷である．改良延性消耗則⁴⁾によりクリープ損傷を算出する．(ここで省略する)

二つ目はレインフロー法によって得られたひずみ範囲に非比例度の影響を考慮する方法である。一つ目の評価手法と同様にプログラムで取得した非比例多軸ランダム負荷波形を IS 法により単軸負荷相当波形 $SI(t)\cos\xi(t)$ に変換する。二つ目の方法では ε_1 の波形に代わり、非比例負荷による応力増加およびひずみ経路の非比例負荷の強さのパラメータを組み込んだ式(3)を用いて図 5(a)の非比例ひずみ ε_{NP} の波形を取得する。 ε_{NP} から一つ目の手法と同様に疲労寿命データの取得、累積損傷則によって疲労寿命評価を行う。ここで式(3)中の f_{NP} はひずみ経路での非比例負荷の強さを表すパラメータであり、本研究で修正した f_{NP} の算出方法について説明する。算出方法の概略図は、図 5(b)に示す。まず、IS 法によって極座標表示された経路から主軸方向変化量 $\varepsilon_1(t)|e_1 \times e_R|$ を求める。次に L_{path} を 1 ブロックの経路長さとし式(4),(5)を用いて 1 ブロック全体から f_{NP} を算出した。この算出された f_{NP} を用いて式(3)に基づいて図 5(a)の非比例ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{NP}$ を算出し、疲労寿命計算に用いた。

$$\Delta\varepsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP})\Delta\varepsilon_1 \quad (3)$$

$$f_{NP} = \frac{\pi}{2\varepsilon_1(t_0)L_{path}} \int_C |e_1 \times e_R| \varepsilon_1(t) dL \quad (4)$$

$$L_{path} = \int_C dL \quad (5)$$

ここで、 α は非比例多軸負荷による材料依存のパラメータであり、比例負荷と比較した際の応力増加の程度を示す。 e_1 および e_R は図 5 に示す ε_1 の単位ベクトルおよび $\varepsilon_1(t)$ の単位ベクトルを表し、 dL はひずみ経路の微小軌跡を示す。また、 C は応力・ひずみ経路での積分路を示し、“ \times ”は外積を表す。

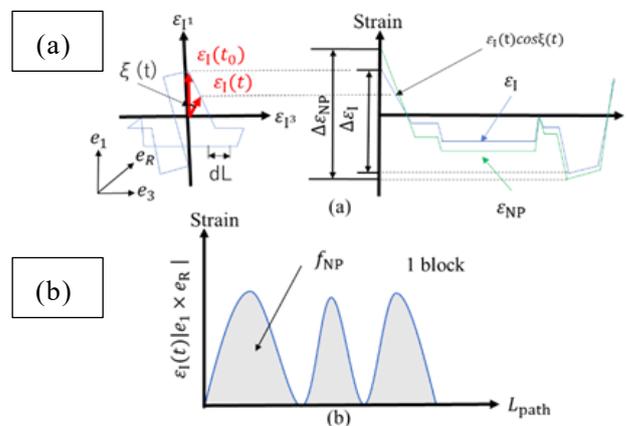


図 5 非比例係数の計算の概略図

4. 結果および考察

単軸負荷での一定振幅試験結果の近似曲線は式(6)に示す。ひずみが減少するにつれて疲労寿命が長くなることが分かった。式(6)が疲労損傷を計算するための基礎データとして使用される。多軸非比例ランダム試験結果については、式(3)、(4)、(5)を用いて波形を単軸規則波形に変換し、式(1)、(2)、(6)を用いて疲労損傷またはクリープ損傷をそれぞれ計算した。結果について、単軸条件下ではクリープ損傷により疲労寿命が大幅に低下されることを示している。しかし、多軸非比例応力状態では、クリープ損傷による寿命低下は前者の状態ほど大きくないこ

とが分かった．本研究で提案された式により予測された寿命は，係数 3 の範囲内評価したことを分かった．（投稿予定のデータのため，ここで図表の示しを割愛する）

$$\Delta\varepsilon = 2.47N^{-0.16} \quad (6)$$

5. 今後の予定

今後，様々なランダム負荷パターンを使用し，負荷の相互作用を調査し，破壊メカニズム解明の上で，本提案した手法の高度化する予定である．

6. まとめ

本研究では，非比例多軸ランダム負荷における析出強化型オーステナイトステンレス鋼 SUH660 のクリープ疲労寿命予測するため，一連の試験を実施し，提案した式を用いて寿命予測を行った．予測したクリープ疲労寿命は係数 3 の範囲内分部していることが分かった．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました．ここに記して謝意を示します．

参考文献

- 1) T. Itoh, T. Yang, Material dependence of multiaxial low cycle fatigue lives under non-proportional loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 33 (2011), pp. 1025-1031.
- 2) T. Itoh, M. Sakane, Y. Shimizu, Definition of stress and strain ranges for multiaxial fatigue life evaluation under non-proportional loading, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 62 (2013), pp. 117-124.
- 3) L. He, L. Xu, T. Itoh, Novel fatigue life prediction approach combined with rain-flow cycle counting process for random multiaxial non-proportional loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 46 (2023), pp. 4392-4405.