

炭素鋼 S45C の片振り疲労寿命に及ぼす圧縮予歪の影響

玉 木 裕 和^{1,*1} 北 澤 留 弥^{1,2,3} 吉 田 誠⁴ 堀 部 進^{1,*2}

¹早稲田大学大学院創造理工学研究科総合機械工学専攻

²独立行政法人日本学術振興会

³独立行政法人宇宙航空研究開発機構

⁴早稲田大学各務記念材料技術研究所

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 77, No. 11 (2013), pp. 514–521

© 2013 The Japan Institute of Metals and Materials

Influence of Compressive Pre-Strain on Tensile Fatigue Life in Carbon Steel S45C

Hirokazu Tamaki^{1,*1}, Rumi Kitazawa^{1,2,3}, Makoto Yoshida⁴ and Susumu Horibe^{1,*2}

¹Department of Modern Mechanical Engineering, Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-0072

²Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo 102-0083

³Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara 252-5210

⁴Kagami Memorial Research Institute for Materials Science and Technology, Waseda University, Tokyo 169-0051

For S45C carbon steel with three heat treatments, pulsating tension tests were carried out under controlled stress condition. The effect of compressive pre-strain, Bauschinger effect and controlling factors on fatigue life were examined. The following results were obtained. The decrease of pulsating fatigue life was caused by three factors, i.e. increase of the total plastic strain amplitude, cyclic plastic strain amplitude and cyclic creep rate. The increase of Bauschinger strain led to the increase of the value of the three factors. Then it resulted in shorter fatigue life. In order to examine the cyclic stress conditions to the fatigue life, the stress ratio was defined as the ratio of maximum cyclic stress to yield stress of each material. Bauschinger strain was occurred when the stress ratio was under the threshold for each material. As the result, cyclic plastic strain amplitude and cyclic creep rate were increased and then pulsating fatigue life was reduced. [doi:10.2320/jinstmet.J2013024]

(Received March 29, 2013; Accepted August 12, 2013; Published November 1, 2013)

Keywords: pre-strain, fatigue life, Bauschinger effect, plastic strain, cyclic creep, carbon steel

1. 緒 言

繰返し変形による疲労破壊において、繰返し前に予歪を加えると寿命が変化することが知られている。それゆえ、疲労挙動に及ぼす予歪の影響(予歪効果)はこれまで様々な材料で報告されている。多くの研究は両振り条件で行われており、平均応力を持つ条件下での予歪の影響はほとんど報告されていない。実環境下では非対称な繰返し負荷を考慮する必要があるため、両振りだけでなく、片振り条件で予歪の影響を調査することは極めて重要である。

両振り条件下での疲労挙動に及ぼす予歪の影響は、例えば以下の報告がある。R. B. Heywood¹⁾はアルミニウム合金の予き裂材に対して引張予荷重を加えると寿命が延長し、圧縮予荷重が加わると寿命が短縮することを明らかにした。Lanning ら²⁾は Ti-6Al-4V 合金の予き裂材で 1% から 5% の引張予歪で寿命が短縮することを報告している。戸梶ら³⁾は

0.33% C 炭素鋼に引張予荷重を加えると、予荷重が下降伏点相当の荷重では疲労強度がわずかに処女材(圧縮予歪を与えていない材料)より低下するが、予荷重が大きくなるに従って疲労強度は上昇すると示している。Kang ら⁴⁾は焼きなまされた 0.1% C 炭素鋼は引張予歪で疲労限が上昇し、焼入焼戻された 0.5% C 炭素鋼では予き裂の影響で疲労限が減少すると報告している。

一方片振り条件下では、Yang ら⁵⁾がばね鋼 SAE5160 に引張予歪を与え部分片振り条件での実験を行っている。繰返し塑性歪範囲(塑性歪振幅の 2 倍の値)、繰返しクリープ速度と、両者の和で定義された全塑性歪範囲(全塑性歪振幅の 2 倍の値)はすべて予歪の存在に依存し、疲労寿命に影響を与えることが報告されている。また、Kariya ら⁶⁾は 5056-H34, 6061-T6 アルミニウム合金と、フェライト・パーライト組織の 0.22% C 炭素鋼を用いて圧縮予歪付加材の完全片振り疲労試験を行い、疲労寿命への影響を調査している。5056-H34 アルミニウム合金と 0.22% C 炭素鋼では圧縮予歪による寿命への影響は少なく、6061-T6 アルミニウム合金では寿命が短縮することを報告しており、アルミニウム合金に関してパウシンガー効果が大きい材料は圧縮予歪の寿命へ

*1 早稲田大学大学院生(Graduate Student, Waseda University)

*2 2012 年逝去(Passed away in 2012)

の影響も大きいことを明らかにした。

以上より、様々な材料で歪の影響を調査した研究が行われているが、平均応力を持った条件において歪と疲労の関係はまだ明確ではない。Yang ら⁵⁾の研究では炭素鋼の部分片振り疲労試験において、引張歪量が増加すると塑性歪範囲、繰返しクリープ速度、全塑性歪範囲が増加し、これら支配因子が疲労寿命に影響を及ぼすことが報告されている。ところが、支配因子と疲労寿命との関係性は定性的な報告にとどまり、定量的な検討が行われていない。

また、片振り条件下での歪の存在と疲労寿命との関係を明確にするためには、歪に起因するバウシinger効果と疲労寿命の支配因子との関係を体系的に検討する必要があると考えられる。低サイクル疲労過程での繰返し軟化は、バウシinger効果が関与していると考えられている⁷⁾。また、バウシinger効果による軟化作用は疲労の初期段階において次第に増加した後、その後はほぼ一定値として作用することが報告されている⁸⁾。Buciumeanu ら⁹⁾は、バウシinger効果のほとんどない Al7175 とバウシinger効果の大きな Ck45 に対し、疲労寿命予測を行った。従来の寿命予測モデルを用いると、Al7175 では疲労寿命を正確に予測することができるが、Ck45 では寿命を短く見積もることを示した。彼らはバウシinger効果が疲労寿命に影響を与えており、バウシinger効果を含んだ寿命予測モデルを用いることでより正確な寿命予測が可能であると報告している。また、Kariya ら⁶⁾は、Al 合金においてバウシinger効果が大きい材料では歪による寿命短縮が大きくなることを報告している。これらの研究から、バウシinger効果が疲労寿命に影響を与えることは明らかである。しかし疲労寿命とバウシinger効果の定量的な関係が調査された例はない。

そこで、本研究では炭素鋼 JIS S45C を用いて、以下の3点を調査した。(1)完全片振り、圧縮歪という条件で、塑性歪振幅、繰返しクリープ歪速度、全塑性歪振幅が疲労寿命の支配因子であるかどうか検討し、疲労寿命と定量的に対応付ける。(2)疲労寿命、繰返しクリープ歪速度および塑性歪振幅とバウシinger効果との定量的な関係を明確化する。(3)応力条件を降伏応力で除して整理することで、疲労寿命変化とバウシinger効果発現の応力条件との関係を明らかにする。以上の3点について検討することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 供試材および熱処理

実験に用いた材料は機械構造用炭素鋼 JIS S45C である。供試材の化学組成を Table 1 に示す。

試料を所定の大きさに切り出した後、3条件で熱処理を施した。はじめに各試料を 820℃ で 45 分間保持し、その後炉冷したものを B-1 材、油冷したものを A-1 材、水冷した後 600℃ で 60 分保持し空冷したものを A-2 材と定義する。異なる熱処理により降伏比を変化させることで、降伏比が圧縮歪付加後の疲労寿命に及ぼす影響を調査することを目的とする。3材料の降伏比を含む機械的特性は Table 2 に示す。A-1 材と A-2 材との比較では、A-1 材は降伏比が低く A-2

材は高い。B-1 材は強度と降伏比が低い比較材であり、最大引張強さは A-1 材と A-2 材より低く、降伏比は A-1 材と同程度である。Fig. 1 に各材料の光学顕微鏡による組織写真を示す。ナイタールを用いた腐食において、腐食されずに残った白い領域はフェライト組織の存在を意味する。A-1 材は

Table 1 Chemical composition of JIS S45C.
(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.45	0.22	0.72	0.02	0.03	0.15	0.06	0.2

Table 2 Mechanical properties of JIS S45C.

	Ultimate tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation	Yielding ratio
A-1	971.7	619.9	0.22	0.64
A-2	906.5	823.5	0.35	0.91
B-1	666.6	382.2	0.41	0.57

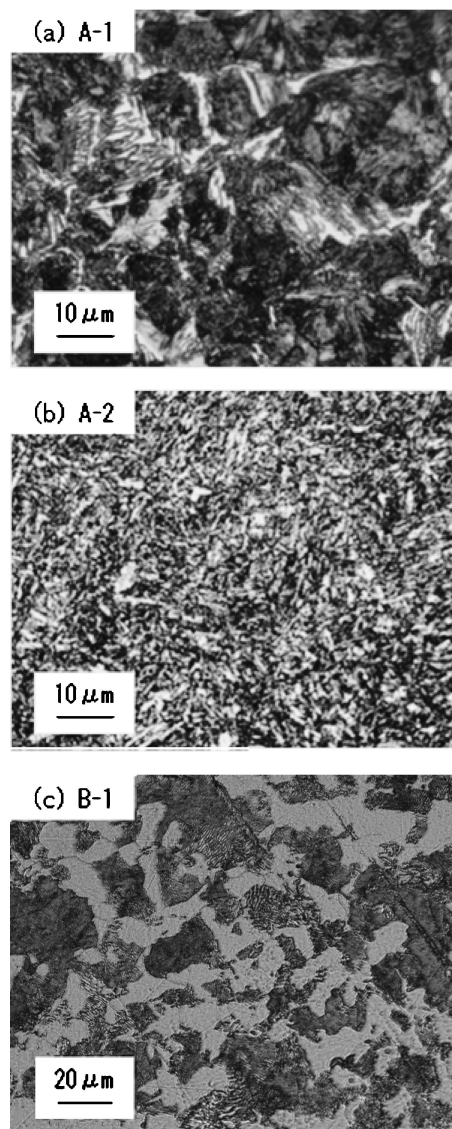


Fig. 1 Optical micrographs after heat treatment; (a) A-1: bainite + pearlite structure, (b) A-2: ferrite and cementite structure, and (c) B-1: ferrite and pearlite structure.

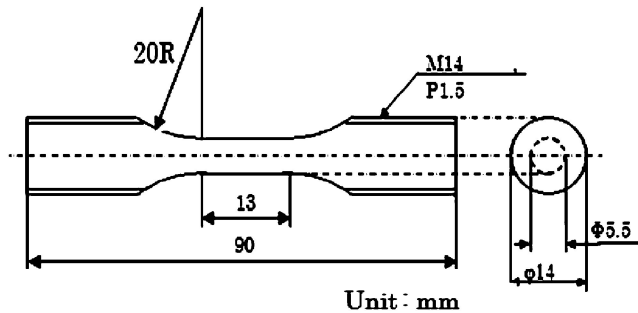


Fig. 2 Dimension of test specimen.

ベイナイト組織と微細パーライト組織が混在している．A-2材はフェライト+セメンタイト組織，B-1材はフェライト+パーライト組織である．

熱処理の後試験片を平行部が直径 5.5 mm，長さ 13 mm，全長が 90 mm のダンベル型試験片に機械加工し，平行部を # 1500 のエメリー紙を用いて長手方向に研磨した．試験片形状の詳細を Fig. 2 に示す．

2.2 引張試験

機械的特性を調べるため，引張試験を室温において島津製作所軌道グラフ AG-25TB を用いてクロスヘッド速度 0.5 mm/min で行い，最大引張強さ，下降伏点(LYP)または 0.2%耐力および破断伸びを求めた．その結果を Table 2 に示す．降伏応力に関して，A-1 材は 0.2%耐力での値であり，A-2 材，B-1 材は LYP での値である．

2.3 圧縮予歪付加および疲労試験

島津疲労試験機サーボパルス EHF-EB100kNT-10L 型を用い，応力制御で常温大気環境中，周波数 10 Hz の sin 波，応力比 $R=0$ の片振り条件下で疲労試験を行った．予歪材料の場合は同試験機を用い疲労試験直前にあらかじめ圧縮の 0.8%塑性歪を付加した状態から疲労試験を行う．繰返しにおける応力-歪ヒステリシスループを記録し，全塑性歪振幅 ϵ_{ta} ，塑性歪振幅 ϵ_a ，繰返しクリープ歪速度 $\dot{\epsilon}_r$ ，破断繰返し数 N_f を測定した．

本研究では，全塑性歪振幅 ϵ_{ta} ，塑性歪振幅 ϵ_a ，繰返しクリープ歪速度 $\dot{\epsilon}_r$ をそれぞれ式(1)，式(2)および式(3)のように定義した．

$$\epsilon_{ta} = (r_3 - r_1) / 2 \quad (1)$$

$$\epsilon_a = (r_3 - r_2) / 2 \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_r = r_2 - r_1 \quad (3)$$

ここで r_1 ， r_2 ， r_3 は Fig. 3 の N サイクル目の応力と歪関係模式図で定義され，平均応力と交わった時の歪である．全塑性歪振幅は，Yang ら⁵⁾が定義した全塑性歪範囲(塑性歪範囲と繰返しクリープ歪速度の和)を 2 で割った値であり，疲労とクリープの影響を統合的に評価するために用いる．

これらのパラメータをそれぞれ縦軸にとり，横軸にサイクル数をとることで，圧縮予歪による寿命変化への関与を調査する．

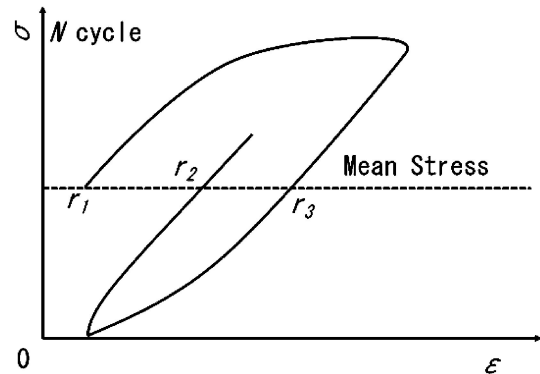
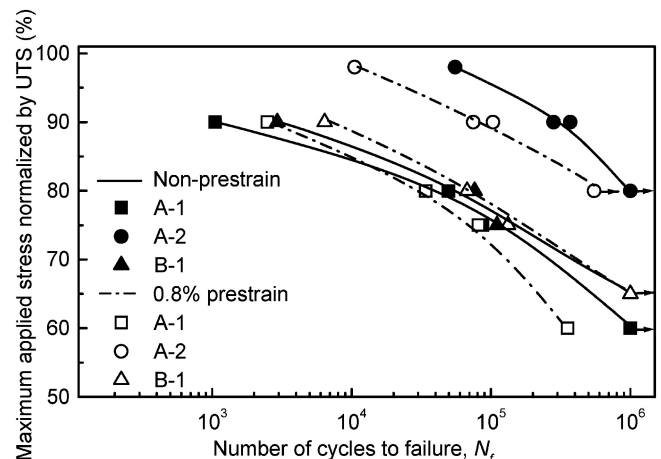
Fig. 3 Stress strain hysteresis loop at N cycle.

Fig. 4 Fatigue life curves of S45C with or without pre-strain.

3. 実験結果

3.1 疲労寿命曲線

Fig. 4 に熱処理の異なる A-1，A-2 および B-1 における 3 材料の疲労寿命をそれぞれ示す．縦軸に最大引張強さ(UTS)で除した最大応力，横軸に破断繰返し数をとっている．また Fig. 4 で得られた疲労寿命を用いて，圧縮予歪による疲労寿命の変化を定量的に表すため疲労寿命比を求め，Fig. 5 に示す．なお，疲労寿命比は予歪なし材料に対する 0.8%予歪材料の疲労寿命の比と定義した．つまり，疲労寿命比が 1 より小さいほど圧縮予歪によって寿命短縮していることになる．

Fig. 5 を見ると，A-1 材と B-1 材の疲労寿命比は応力条件に応じて変化することが分かる．高応力の試験で予歪により寿命が延長しており，中応力の試験では予歪による寿命の変化を示さなかった．一方，低応力の試験では，A-1 材で予歪による疲労寿命の短縮が起こった．B-1 材は 100 万サイクルに到達して試験を止めたため疲労寿命比を求めることができなかった．

対して，A-2 材は他の 2 材料とは疲労寿命変化の傾向が明確に異なっており，UTS90%および 97%の高応力条件で疲労寿命が著しく減少している．

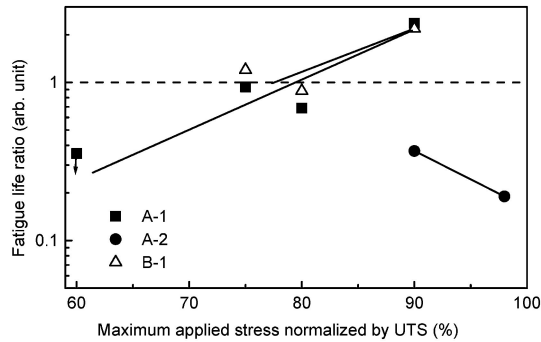


Fig. 5 The ratio of fatigue lives of 0.8% prestrain to that of non-prestrain.

3.2 全塑性歪振幅を用いた繰返し応力-歪応答曲線 (t-CSSR)

全塑性歪振幅の応力-歪応答曲線 (t-CSSR) を Fig. 6(a): A-1 材, (b): A-2 材, (c): B-1 材に示す. Fig. 6において, 測定値が非常に小さく厳密な値を得ることができない場合があった(特に(b): A-2 材の予歪なしでの測定値で顕著に現れた). そのため, 便宜的に 1×10^{-6} の値を測定下限界と設定し, それ以下の値は 1×10^{-6} とみなす処理を行った.

全塑性歪振幅は塑性歪振幅と繰返しクリープ歪速度の両方を含む値と定義され, クリープと疲労, 両者の寄与による損傷を統合的に評価することができると考えられる. Fig. 6(a), (b), (c)の曲線形状に着目すると, A-1 材, A-2 予歪材および B-1 材の各高応力条件では同様の傾向が現れている. その傾向は, 開始数十サイクルでの全塑性歪振幅の急激な減少と, その後のほぼ平坦な部分に分けられる. これは, 繰返し初期には繰返しクリープ歪速度の影響が強く現れ, その後はクリープ歪速度の影響がなくなり, 比較的値の安定した塑性歪振幅の影響のみが現れているためと考えられる. これについて 3.3 で詳しく述べる.

Fig. 6(a), (b), (c)において予歪材の測定値が予歪なし材より大きい場合の応力条件では, 寿命が減少する傾向が見られる (Fig. 4, Fig. 5). そのため, 全塑性歪振幅の増加は疲労寿命減少と関係があると考えられる. また Fig. 6(b): A-2 材において, 下降伏応力 (UTS90.8%) より応力条件が低い場合, 予歪なし材の全塑性歪振幅の測定値が読み取れなかった. Fig. 6(c): B-1 材を見ると, 予歪なし UTS65% の曲線が繰返し途中で急激に上昇していることが分かる. これは応力条件 (UTS65%) が下降伏応力 (UTS57.3%) に近いため, コットレル雰囲気からの転位の離脱が起こった結果生じたと推測される. また Fig. 6(a), (b), (c)において, 予歪を付加した場合, 全塑性歪振幅は第 1 サイクルから高い値を持つ. これは圧縮予歪により転位の集積が起こることで逆応力が生じ, 引張方向への変形が容易になるためと考えられる (パウシンガー効果)¹⁰⁾.

3.3 塑性歪振幅を用いた繰返し応力-歪応答曲線 (CSSR) および繰返しクリープ歪速度曲線

Fig. 7(a)に各材料の塑性歪振幅の繰返し応力-歪応答曲線 (CSSR), Fig. 7(b)に各材料の繰返しクリープ歪速度とサイ

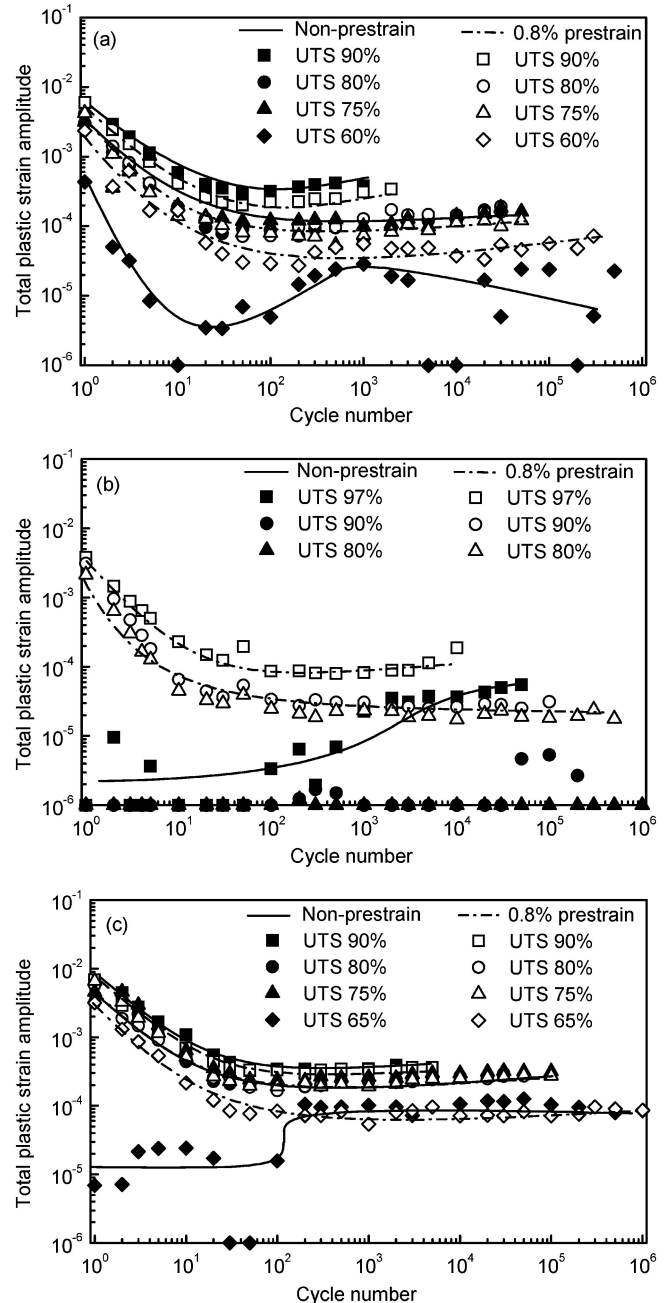


Fig. 6 The variation of total plastic strain amplitude during cycling (t-CSSR); (a) A-1, (b) A-2 and (c) B-1.

クル数の関係を示す. 応力条件は, 各材料の降伏応力に最も近い応力振幅を用いた. これは, すべての材料で予歪の影響が顕著に現れたためである. Fig. 6 と同様 1×10^{-6} の全塑性歪振幅を測定下限界と設定する処理を施している.

Fig. 7(a)において塑性歪振幅はグラフ形状が比較的平坦な傾向を示し, 値がサイクル数に対して安定している. 一方 Fig. 7(b)の繰返しクリープ歪速度は, 繰返しの初期から数十サイクルにかけて急激な減少が起こり, その後は測定限界値以下に収束していた. Fig. 7(a), (b)から塑性歪振幅および繰返しクリープ歪速度の両者において, 予歪材の測定値が予歪なし材より大きい場合の応力条件では, 疲労寿命が減少する傾向が見られる (Fig. 4, Fig. 5). したがって, 全塑性歪振幅と同様, 塑性歪振幅と繰返しクリープ歪速度の増加も

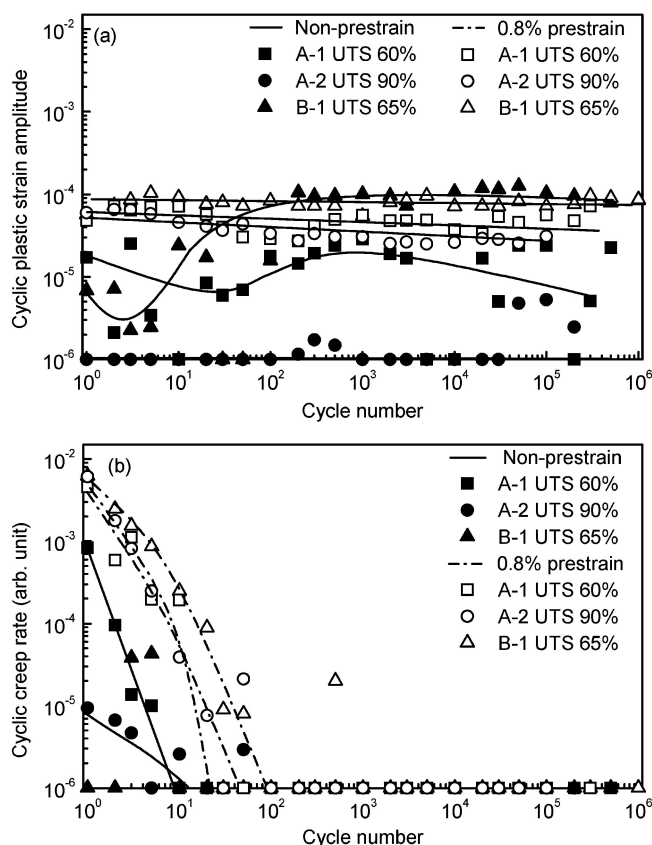


Fig. 7 Relationships between various parameters; (a) cyclic plastic strain amplitude and (b) cyclic creep rate, and cyclic number at stress amplitude in the vicinity of the yield stress of each material.

また予歪による疲労寿命減少と対応付けることが可能である。

4. 考 察

4.1 全塑性歪振幅, 塑性歪振幅および繰返しクリープ歪速度と疲労寿命の相関

Fig. 6, Fig. 7 で得られた全塑性歪振幅, 塑性歪振幅および繰返しクリープ歪速度と, 圧縮予歪付加による疲労寿命の変化の関係を調査するため, 新たに全塑性歪比, 塑性歪比および繰返しクリープ歪速度比を定義する. 処女材での実験値に対する 0.8% 圧縮予歪での実験値の比をとり, サイクル数との関係を描いた. 得られたグラフを Fig. 8 に示す. 応力条件として各材料の降伏応力に最も近い応力振幅を用いた. これは, すべての材料で予歪の影響が顕著に現れたためである. 縦軸(全塑性歪比, 塑性歪比および繰返しクリープ歪速度比)が 1 より大きいならば, 予歪によりそれぞれの値が増加したことを意味する.

各歪比が最大値をとるサイクル数は, Fig. 8(a), (c): 全塑性歪比および繰返しクリープ歪速度比では 1~10 サイクル, Fig. 8(b): 塑性歪比では 1~100 サイクルである. そのため, すべての歪比は比較的初期の繰返し段階で最大値を持つ. 各歪比の最大値は, そのサイクルで予歪の影響が最も強く現れていることを意味する. よって, 予歪は繰返し初期に強い影響を与えることが示される.

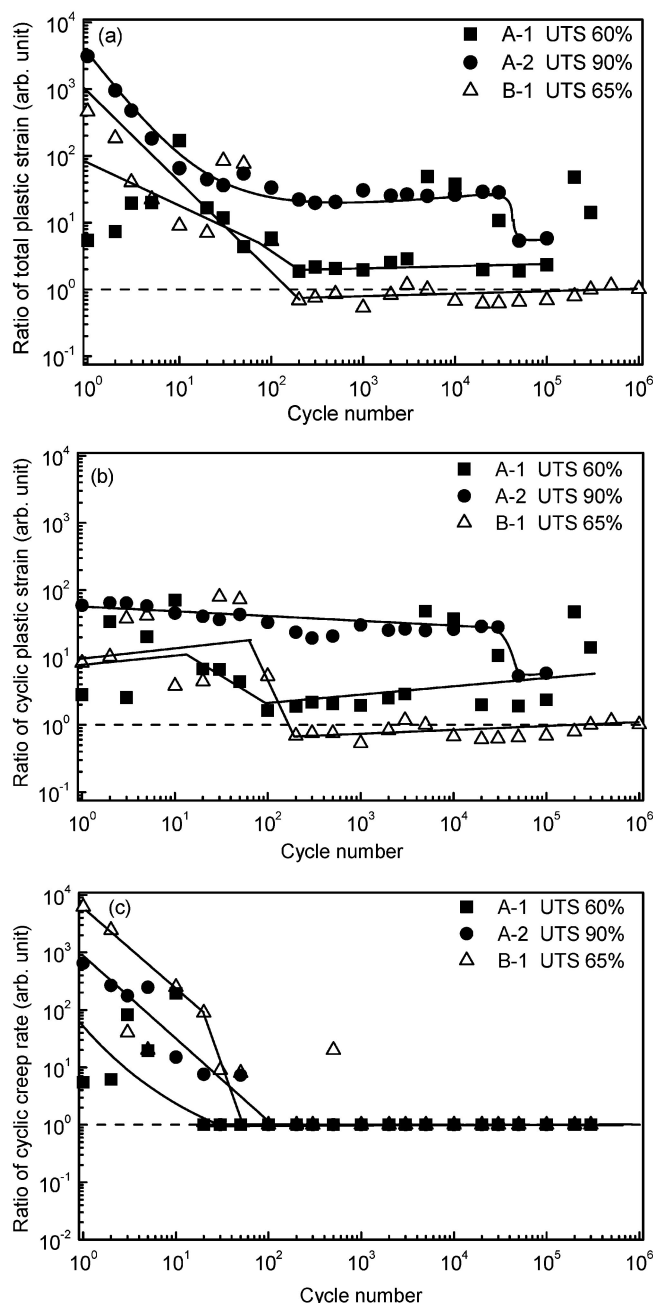


Fig. 8 Relationships between the ratio of various parameters; (a) total plastic strain, (b) cyclic plastic strain amplitude and (c) cyclic creep rate, and cyclic number at stress amplitude in the vicinity of the yield stress of each material.

Fig. 8 で求めた全塑性歪比, 塑性歪比および繰返しクリープ歪速度比の最大値を縦軸にとり, Fig. 5 の疲労寿命比を横軸にとったグラフを Fig. 9 に示す. 縦軸はそれぞれ, (a) は最大全塑性歪比, (b) は最大塑性歪比, (c) は最大繰返しクリープ速度比である. 各歪比の最大値をパラメータに用いた理由は, 予歪の与える影響が最大となる場合と比較することが, 予歪付与が疲労寿命に及ぼす影響を考慮するのに適していると考えたためである.

Fig. 9(a), (b), (c) を見ると, 疲労寿命が短縮すると, 全塑性歪比, 塑性歪比および繰返しクリープ歪速度比の最大値はそれぞれ増加することが分かる. よって, 全塑性歪振幅, 塑性歪振幅および繰返しクリープ歪速度の予歪付加による増

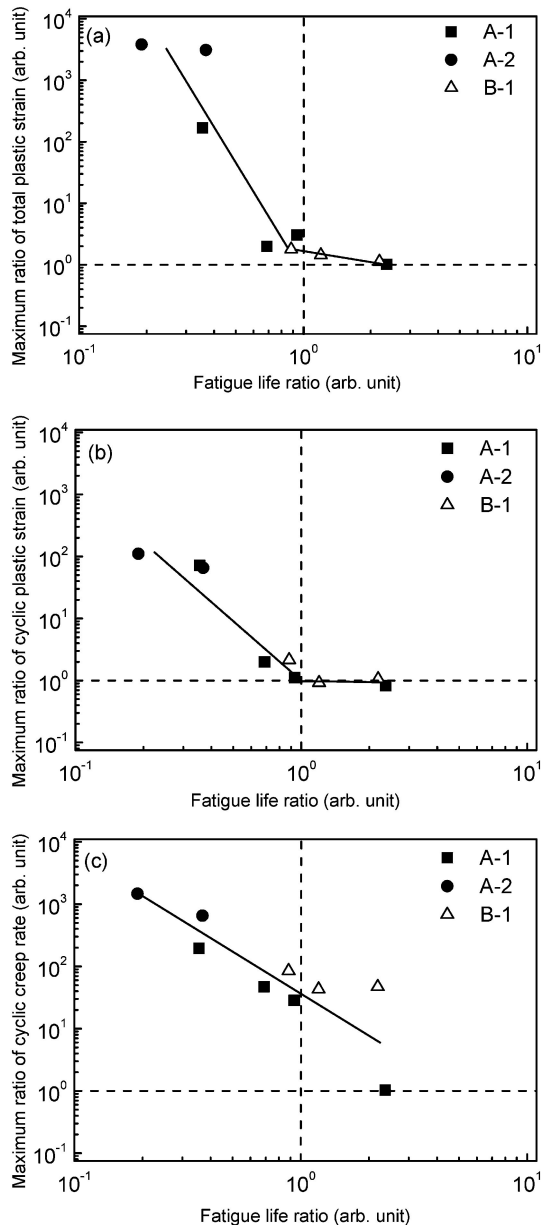


Fig. 9 Relationships between various parameters and fatigue life; (a) maximum ratio of cyclic plastic strain, (b) maximum ratio of cyclic creep rate, and (c) maximum ratio of total plastic strain.

幅量が、疲労寿命短縮の支配因子であることが結論付けられる。

一方、寿命が延長した場合について、Fig. 9(b)の塑性歪比は一定値を持ち、Fig. 9(a)および Fig. 9(c)の全塑性歪比および繰返しクリープ歪速度比は減少傾向が見られた。そのため、塑性歪振幅は予歪付与による寿命延長に寄与しない。全塑性歪振幅および繰返しクリープ歪は寿命延長に関与している可能性があるが、詳細は明らかでない。

4.2 バウシinger効果の片振り疲労寿命への関与

上述したように、圧縮予歪がある時、疲労寿命には全塑性歪振幅、塑性歪振幅、繰返しクリープ速度が影響を及ぼす。そのため、バウシinger効果が全塑性歪振幅、塑性歪振幅、繰返しクリープ速度に及ぼす影響を調査することで、バウシ

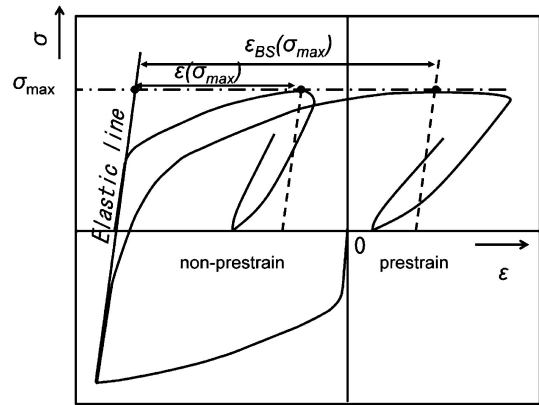


Fig. 10 Definition of the Bauschinger strain.

ンガー効果と疲労寿命の関係を明らかにすることが可能である。バウシinger効果が片振り疲労寿命へ与える影響を定量的に調べるため、バウシinger歪比 (BSR) を新たに定義した。これは、処女材の疲労試験 1 サイクル目における、最大応力 σ_{\max} での弾性直線からの歪 $\epsilon(\sigma_{\max})$ と、0.8% 圧縮予歪付与時のバウシinger歪 $\epsilon_{BS}(\sigma_{\max})$ を用いて以下のように表すことができる。

$$BSR = \epsilon_{BS}(\sigma_{\max}) / \epsilon(\sigma_{\max}) \quad (4)$$

バウシinger歪の定義を Fig. 10 に示す。上記のように定義したバウシinger歪比 (BSR) を用いて、バウシinger効果と圧縮予歪が片振り疲労寿命およびその支配因子に与える影響との関係を明らかにする。BSR を横軸に、疲労寿命比、最大塑性歪比および最大繰返しクリープ歪速度比をそれぞれ縦軸に設定し作図を行った。得られたグラフを Fig. 11 に示す。

Fig. 11(a) は、BSR の増加に伴い疲労寿命が減少することを示している。また、Fig. 11(b), (c) から、塑性歪比および繰返しクリープ速度比の最大値は BSR 増加に伴い増加することが分かる。疲労寿命とその支配因子は共に BSR と相関しているため、これらは BSR に従属した変数である。以上の結果から、予歪付加はバウシinger歪増大をもたらし、これが塑性歪振幅、繰返しクリープ歪速度の増加と疲労寿命の短縮を引き起こしたと考えられる。

BSR と最大塑性歪比および最大クリープ速度歪比の詳細な対応関係は Fig. 11(b) および (c) に示される。(b) : 最大塑性歪比は BSR 増加に伴い急激に増加し、100 倍程度まで増加すると一定となる。一方 (c) : 最大クリープ速度比は、BSR 増加に伴い緩やかに単調増加していく。

BSR の違いが最終的に疲労寿命にどのように影響を与えるかは、Fig. 11(a) に示される。BSR が 1 付近である場合、最大塑性歪比の急激な増加の影響が現れ、BSR 増加に伴い疲労寿命比は急激に減少する。BSR が比較的大きい場合、最大塑性歪比は一定となりクリープ歪速度比のみ増加するため、BSR 増加に伴う寿命比減少は緩やかになる。つまり、BSR が大きくなっても寿命比の変化は小さい。

以上から、材料ごとの BSR の違いと予歪付与による疲労寿命の変化との関係が示される。本研究のように BSR がある程度大きな材料同士で比較した場合、BSR による疲労寿

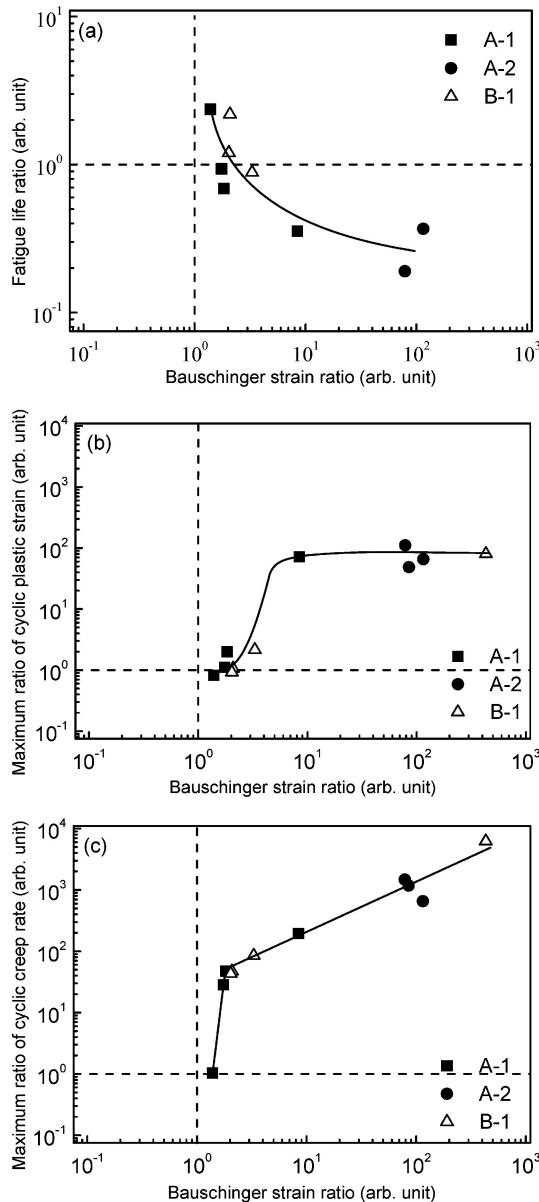


Fig. 11 Relationships between various parameters and Bauschinger strain ratio; (a) fatigue life ratio, (b) maximum ratio of cyclic plastic strain, and (c) maximum ratio of cyclic creep rate.

命の差異は小さい。それは Fig. 11(b)に示すように、BSRが増加しても塑性歪比が一定を保つためである。異なる塑性歪比を示す BSR の材料同士で比較した場合には、予歪付与による疲労寿命変化がより顕著に現れると考えられる。

4.3 繰返し応力条件による圧縮予歪効果の差異

上述したように、圧縮予歪がある時、疲労寿命には全塑性歪振幅、塑性歪振幅、繰返しクリープ速度が影響を及ぼす。そして、全塑性歪振幅、塑性歪振幅、繰返しクリープ速度にはバウシinger歪が影響を及ぼす。そのため、繰返し応力条件がバウシinger歪に及ぼす影響を調査することで、応力条件と疲労寿命の関係を明らかにすることが可能である。圧縮予歪の影響と繰返し応力条件との関係を調査する目的で、繰返しの最大応力 σ_{\max} と各材料の処女材の降伏応力 σ_{ys} に関

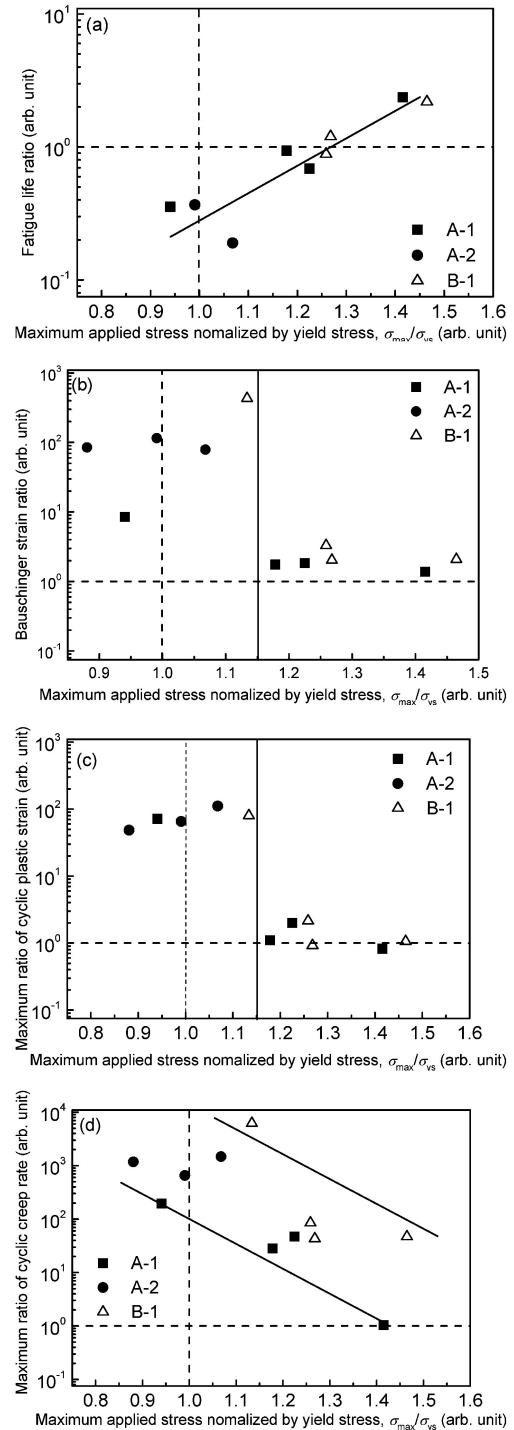


Fig. 12 Relationships between various parameters and maximum applied stress normalized by yield stress; (a) fatigue life ratio, (b) Bauschinger strain ratio, (c) maximum ratio of cyclic plastic strain, and (d) maximum ratio of cyclic creep rate.

する $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ という比に着目する。 $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ を横軸に、疲労寿命比、バウシinger歪比 (BSR)、最大塑性歪比および最大繰返しクリープ歪速度比をそれぞれ縦軸に設定し作図を行った。得られたグラフを Fig. 12 に示す。なお降伏応力は引張試験で得られた値ではなく、疲労試験 1 サイクル目の応力歪曲線から求めた値を用いた。これは試験片ごとの値のばらつき、引張試験と疲労試験の歪速度の差異を考慮したためである。

Fig. 12(a)を見ると、 $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ は疲労寿命比と相関があり、 $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ が小さいほど疲労寿命は減少傾向を示すことが分かる。疲労寿命比を調査した Fig. 5 では、A-2 材のみ応力条件に対する疲労寿命変化の傾向が異なっているように見えたが、降伏応力で整理するとすべての材料が同様の傾向を示していることが分かった。

また Fig. 12(b), (c)を見ると、BSR および最大塑性歪比において、 $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ に予歪の影響が現れる境界値が存在することが分かる。 $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ の境界値を約 1.15 とみなし、Fig. 12(b), (c)中に直線で示した。境界以上の応力条件において予歪付加の影響がほとんど現れなくなる。一方、境界以下では BSR は各材料で異なる値を持ち(Fig. 12(b))、最大塑性歪比は全材料ではほぼ 100 である(Fig. 12(c))。一方、Fig. 12(d)から最大クリープ速度比は、おおむね $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ が小さいほど大きな値を示すことが分かる。

以上の結果から、降伏応力で整理した場合、低応力であるほど、予歪付与の影響が大きくなることが示される。その理由は以下のように考察される。塑性歪比およびクリープ歪速度比が最大となるのは繰返し初期であったので(Fig. 8(a), (b), (c)参照)、1 サイクル目の歪に着目する。処女材で疲労試験を行う場合、試験応力が降伏応力を超えて降伏が起こる場合と、降伏応力を超えずに降伏しない場合とに分類できる。一方予歪を付加した疲労試験では、バウシinger 効果により明確な降伏点が消滅するため、応力条件にかかわらず降伏が起こる。1 サイクル目の歪差がより大きくなるのは、処女材で降伏が起こらず、予歪付与材で降伏が起こる場合(応力条件が降伏応力以下の場合)である。よって、応力が低い場合に予歪付与の影響が大きくなると考えられる。また、Fig. 12(b) および (c) の BSR と最大塑性歪比に存在する $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ の境界値は、全材料共通の値ではなく、各材料で異なる値を持つ可能性がある。各材料の境界値は、降伏開始応力(上降伏点)の違いや、応力-歪曲線における明確な降伏点の有無に影響を受けると予想される。

4.4 各材料の降伏比の違いによる圧縮予歪効果の差異

各材料組織の違いにより生じる予歪付与が寿命に与える影響の差異は、材料の降伏比だけで決定される。その理由は Fig. 12(a)の疲労寿命比と $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ との相関に帰着される。

Fig. 12(a)の直線を各材料の降伏比の大小に応じて右側にシフトさせることで、横軸を UTS で除した応力に変換することができる。これは Fig. 5 の疲労寿命比の曲線に対応する。A-2 材のように、降伏比が大きい材料ほど疲労寿命比の曲線がより右側に移動する。以上から、降伏比が大きい材料では疲労寿命が減少する応力の範囲が広がる。

5. 結 言

本研究は熱処理条件を変化させた 3 種類の炭素鋼 S45C において、圧縮予歪の片振り疲労寿命に与える影響を調査する目的で荷重制御の完全片振り疲労試験を実施した。全塑性歪振幅、塑性歪振幅、繰返しクリープ歪速度、バウシinger 歪および応力条件と疲労寿命との関係を検討した。以下に結論を示す。

(1) 圧縮予歪の付与で片振り疲労寿命の短縮が起こったとき、全塑性歪振幅、塑性歪振幅、繰返しクリープ歪速度はすべて増加していた。全塑性歪振幅、塑性歪振幅、繰返しクリープ歪速度は圧縮予歪を与えた場合における片振り疲労寿命の支配因子である。

(2) 圧縮予歪を付加すると 1 サイクル目の引張でバウシinger 歪が生じる。バウシinger 歪は塑性歪振幅、繰返しクリープ歪速度増加を引き起こし、片振り疲労寿命を減少させる。

(3) 繰返しの最大応力 σ_{\max} と処女材(圧縮予歪を与えていない材料)の降伏応力 σ_{ys} に関して、 $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ に圧縮予歪の影響が発現する境界値が存在する。 $\sigma_{\max}/\sigma_{ys}$ が境界値以下のときバウシinger 歪が生じ、塑性歪振幅と繰返しクリープ歪速度の増加、片振り疲労寿命の短縮が起こる。

実験に協力して下さった現三菱重工業㈱ 羽田野浩平氏、現東京ガス㈱ 葛西良征氏に深く感謝の意を表します。本研究は早稲田大学のもの・こと・ひと研究所の支援によって行われたことを付記し、関係各位に感謝の意を表します。

文 献

- 1) R. B. Heywood: *Colloquium on Fatigue/Colloque de Fatigue/Kolloquium über Ermüdungsfestigkeit*, (Springer-Verlag OHG., Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1956) pp. 92-102.
- 2) D. B. Lanning, T. Nicholas and G. K. Haritos: *Mech. Mater.* **34** (2002) 127.
- 3) K. Tokaji, Z. Ando, N. Nakano and K. Takegoshi: *Zairyo* **27** (1978) 285-290.
- 4) M. Kang, Y. Aono and H. Noguchi: *Int. J. Fatigue* **29**(2007) 1855-1862.
- 5) Z. Yang and Z. Wang: *Mater. Sci. Eng.* **210**(1996) 83-93.
- 6) M. Kariya, K. Hatano and S. Horibe: *J. Mater. Eng. Perform.* **19** (2010) 1205-1207.
- 7) S. Horibe, R. Sagawa, T. Fujita and T. Araki: *Tetsu to Hagane* **64**(1978) 268-277.
- 8) S. Sasaki, Y. Ochi and S. Tsujimoto: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A* **50**(1984) 551-559.
- 9) M. Buciumeanu, L. Palaghian, A. S. Miranda and F. S. Silva: *Int. J. Fatigue* **33**(2011) 145-152.
- 10) T. Yakou and T. Hasegawa: *Tetsu to Hagane* **70**(1984) 1551-1558.