



ボイラ及び圧力容器用 2.25Cr-1Mo 鋼の高温疲労寿命に及ぼすヒート，熱処理，ひずみ制御モードの影響

山口 弘二*・木村 恵*・小林 一夫*・早川 正夫*

Influence of Heats, Heat-treatments and Strain Control Mode on High Temperature Fatigue Lives of 2.25Cr-1Mo Steels for Boiler and Pressure Vessels

Koji YAMAGUCHI, Megumi KIMURA, Kazuo KOBAYASHI and Masao HAYAKAWA

Synopsis : High temperature fatigue tests were conducted for normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steels of three heats. As compared with the reference data, the influence of heats, heat-treatments and testing conditions such as testing temperature, strain rate and strain control mode on the high temperature fatigue lives were investigated. The results obtained are as follows.

- 1) Heats of the normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steels scarcely affected the fatigue lives at high temperatures.
- 2) Between annealed and normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steels there was scarcely difference in the fatigue lives.
- 3) Strain rate between 10^{-3} and 10^{-2} /s scarcely affected the high temperature fatigue lives of 2.25Cr-1Mo steel.
- 4) Strain control mode and testing temperature affected the fatigue lives. In this case the strain control modes are axial and diametral.
- 5) From these results, the ASME fatigue design curves of 2.25Cr-1Mo steel for nuclear components were unconservative for the data tested under axial strain control at each temperature. Modified design curves were proposed for normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steels.

Key words : high temperature fatigue; low cycle fatigue; 2.25Cr-1Mo steel; fatigue design curve.

1. 緒言

NIMS (物質・材料研究機構) 疲労データシートの出版配布は、1978年から開始され2004年にNo. 96までに達した¹⁾。広範囲な国産金属構造材料について疲労特性が系統的に明らかにされている。高温疲労特性データシートにおいても、ひずみ速度効果、クリープ疲労特性、高温長期疲労特性などの課題を掲げ、そのなかで代表的な高温材料を取り上げてきたが、クリープデータシート²⁾のように多数ヒートの試験を同時に実施することは出来なかった。しかし、30年のデータが蓄積されたことから、複数ヒートのデータを比較することが出来るようになった。本研究では、最も代表的な高温材料である2.25Cr-1Mo鋼について、高温疲労特性に及ぼすヒートの影響を検討した。さらに、文献データ³⁻⁷⁾と比較して、熱処理の影響やひずみ制御方法(軸ひずみ制御と径ひずみ制御)の影響を明らかにした。これらの検討結果を用いて、高温機器の設計に活用されてきたアメリカ機械学会 ASME Boiler and Pressure Vessel Code⁸⁾の疲労曲線が、軸ひずみ制御データに対して危険側になっていることを指摘し、修正した疲労曲線を提示する。

2. 実験方法

焼きならし焼き戻し(normalized and tempered)された2.25Cr-Mo鋼の高温疲労データシートを2004年にNo. 94として出版した⁹⁾。過去に同材についてNo. 62¹⁰⁾とNo. 7¹¹⁾で出版している。この3ヒートの化学成分、熱処理条件をTable 1に示す。材料はすべて焼きならし焼き戻しされた後、溶接後熱処理がなされている。

疲労試験は、軸ひずみ制御、高温大気下で行った。疲労試験片は直径10mm、または6mmの平滑丸棒である。ひずみ波形は三角波、ひずみ速度は 10^{-3} /sまたは 10^{-2} /sで行っている。

No. 94では長期高温疲労特性として 10^{-3} /sのひずみ速度で 10^6 回まで、 10^{-2} /sのひずみ速度で 10^7 回までの長寿命疲労試験を行っていることが特徴である。

3. 試験結果

Fig. 1とFig. 2にNIMS FDS No. 94⁹⁾から400°Cと600°Cのデータを示す。ひずみ範囲を全ひずみ範囲、塑性ひずみ範囲、弾性ひずみ範囲に分けて、それぞれ破損繰り返し数との関係で示した。ここで横軸の N_{25} は、規格等で定義され

Table 1. The chemical compositions and heat-treatment of 2.25Cr-Mo steel plates.

NIMS FDS No. and (issue year)	Major chemical compositions in mass. %	Heat-treatment	Plate Thickness
No.94 (2004)	0.08C-0.24Si-0.46Mn-0.007P-0.002S-2.26Cr-1.00Mo	930°C/0.5 h AC+720°C/0.5 h AC+670°C/1 h FC	25mm
No.62 (1989)	0.13C-0.02Si-0.50Mn-0.007P-0.009S-2.43Cr-0.96Mo	920°C/1.3 h AC+670°C/2.3 h AC+650°C/10.3 h FC	37mm
No.7 (1978)	0.11C-0.24Si-0.51Mn-0.005P-0.002S-2.29Cr-0.99Mo	930 °C /1 h AC+700 °C /1 h AC+640°C 1 h FC	60mm

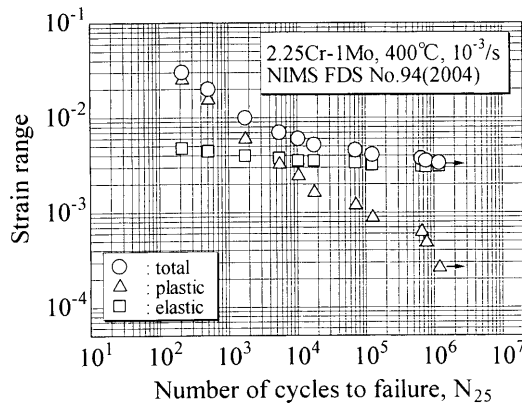


Fig. 1. S-N diagram at 400°C for normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steel in NIMS FDS No. 94.

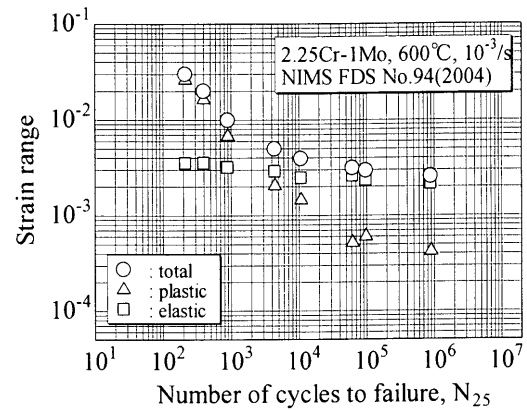


Fig. 2. S-N diagram at 600°C for normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steel in NIMS FDS No. 94.

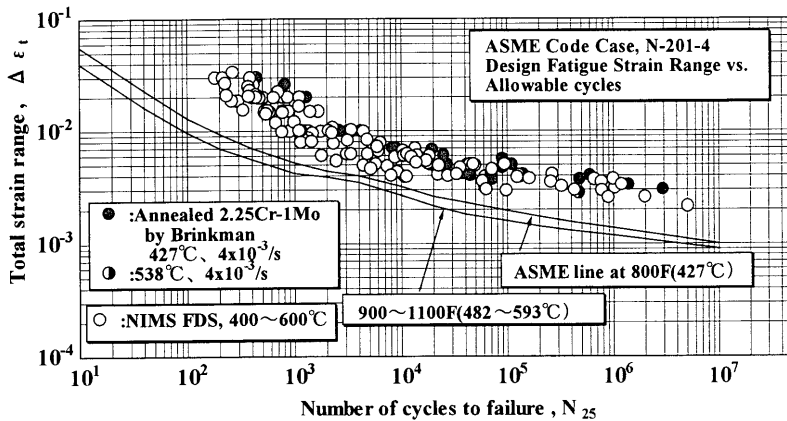


Fig. 3. ASME fatigue design curve and the fatigue lives of normalized and tempered and of annealed 2.25Cr-1Mo steels.

た破損繰返し数¹²⁾で、定常状態から引張側荷重が25%低下した時点の回数を意味する。塑性ひずみ範囲と破損繰返し数の関係は、マンソン・コフィン¹³⁾の関係と呼ばれ、低サイクル疲労では最も基本となる経験式である。通常両対数グラフ上で直線関係となるが、10⁶回までの高サイクル域までのデータを取得すると600°Cでは10⁴~10⁵回あたりで明らかな折れ曲がること判る。

マンソン・コフィン関係が高サイクル域で折れ曲がる原因について詳細は不明である。しかし、このような現象は高サイクル域まで取得されひずみ制御試験では焼鈍された2.25Cr-1Mo鋼³⁾、9~12Crフェライト系耐熱鋼¹³⁻¹⁵⁾、さらに繰返し加工硬化する316FRオーステナイトステンレス鋼¹⁶⁾の高温でも観察されている。

一方、全ひずみ範囲と破損繰返し数との関係は、滑らかな曲線関係にあり、データのばらつきが非常に少ないことが判る。広い寿命域にわたってばらつきの少ないデータが取得できたのは、NIMS疲労データシートにおいて試験片の温度制御、温度計測、疲労試験機の荷重軸の軸心調整、軸伸び計、加熱炉などについて常に改良してきた結果^{12,17)}と考えている。

Fig. 3は、疲労データシートのデータをアメリカ機械学会ASMEの高温疲労設計曲線の図⁹⁾にプロットしたものである。試験温度は400, 500, 600°Cである。ひずみ速度は10⁻³/sと10⁻²/sである。Fig. 3には同時にBrinkmanの2.25Cr-1Mo鋼のデータ(黒印)もプロットした。Brinkmanの用いた材料は焼鈍(annealed, 焼きなまし)材

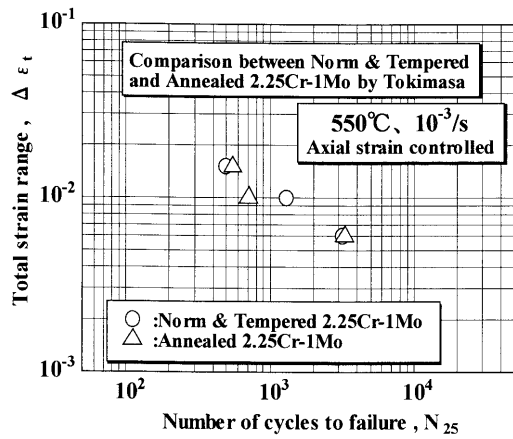


Fig. 4. Influence of heat-treatment on the fatigue lives for 2.25Cr-1Mo steels by Tokimasa⁴⁾.

の3ヒートで、試験条件は径ひずみ制御、ひずみ速度は $4 \times 10^{-3}/s$ 、試験温度は427と538°Cである。ASMEの疲労設計曲線は、Brinkmanのデータに対して、寿命で1/20、全ひずみ範囲で1/2だけずらした包絡線で求めている。BrinkmanとNIMSデータシートの試験条件は、ヒート、熱処理、ひずみ速度、試験温度、制御モードなどが異なるが、データの広がりには寿命で1桁以上ある。しかもASMEの疲労設計曲線は、少なくとも600°Cの軸ひずみ制御データに対して危険側にあることは一目でわかり、注意が必要である。次節で、ばらつきの要因について文献データ等と比較しながら検討する。

4. 考察

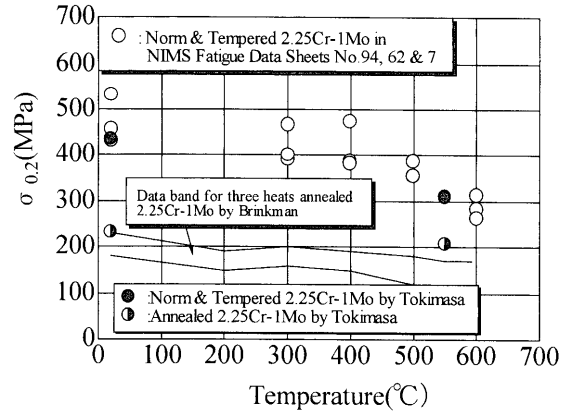
4.1 熱処理の影響

時政⁴⁾は2.25Cr-1Mo鋼について熱処理の影響を調べている。焼鈍材と焼きならし焼き戻し材について軸ひずみ制御で疲労試験を行った。熱処理条件の詳細は報告されていないが、焼鈍材がフェライト・パーライト組織、焼きならし焼き戻し材はフェライト・ベイナイト組織であると報告されている⁴⁾。その結果をFig. 4に示す。低サイクル疲労寿命に対して2.25Cr-1Mo鋼の熱処理の影響は小さいといえる。

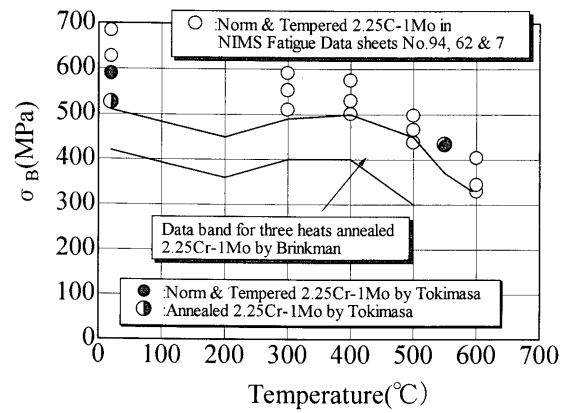
引張特性に対しては、熱処理の影響は現れる。Fig. 5は焼鈍材と焼きならし焼き戻し材の引張試験特性を比較したものである。Brinkmanの焼鈍材3ヒートの結果³⁾もバンド幅で示した。Fig. 5(a), (b)のように熱処理の影響は0.2%耐力では大きく現れ、引張強度では幾らか小さくなる。一方、絞りや伸びに対して熱処理の影響は小さい。Fig. 5(c)に破断絞りの結果を示した。このような引張特性の結果から考えて、ひずみ制御低サイクル疲労寿命に及ぼす熱処理の影響が小さいことは妥当と考えられる。

4.2 ひずみ速度、及びヒートの影響

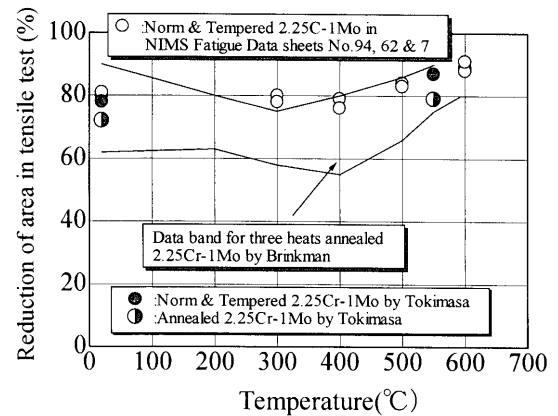
一般に高温疲労に対して三角波のひずみ速度の影響は存



(a) 0.2% proof stress



(b) tensile strength



(c) 0.2% reduction of area

Fig. 5. Comparison of tensile properties for normalized and tempered and for annealed 2.25Cr-1Mo steels. (a) 0.2% proof stress, (b) tensile strength, (c) reduction of area.

在する¹⁾。しかし、Fig. 6に示すように2.25Cr-1Mo鋼の場合、ひずみ速度が $10^{-2}/s$ と $10^{-3}/s$ では大きな差はないといえる。Fig. 6は焼きならし焼き戻し材の軸ひずみ制御試験結果の比較で600°Cの場合である⁹⁾。ひずみ速度の影響が顕著に現れるのは、ひずみ速度がもっと遅い条件の時と考えてよいであろう。

Fig. 7は、ヒートの影響を明らかにするため、焼きならし焼き戻し材の軸ひずみ制御試験の結果を集めたものであ

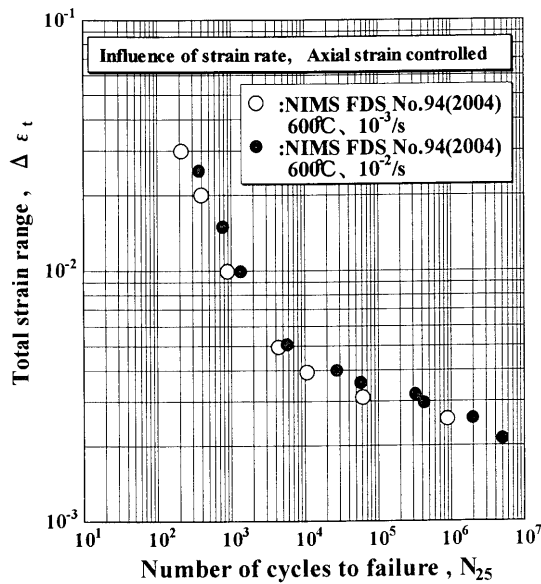


Fig. 6. Influence of strain rate on the fatigue lives for normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steel.

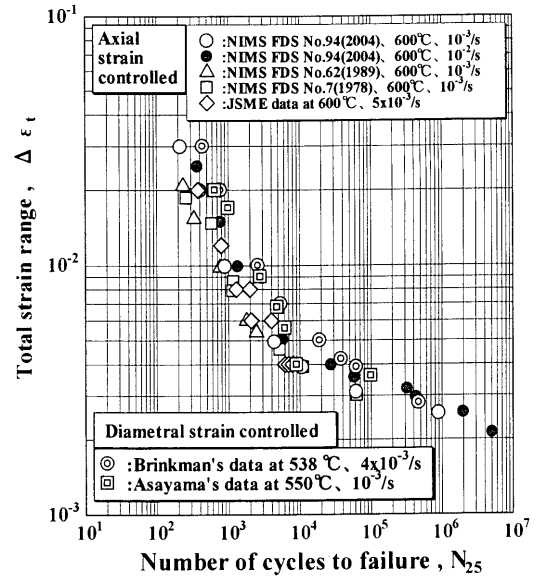


Fig. 8. Influence of strain control mode on the fatigue lives for 2.25Cr-1Mo steels.

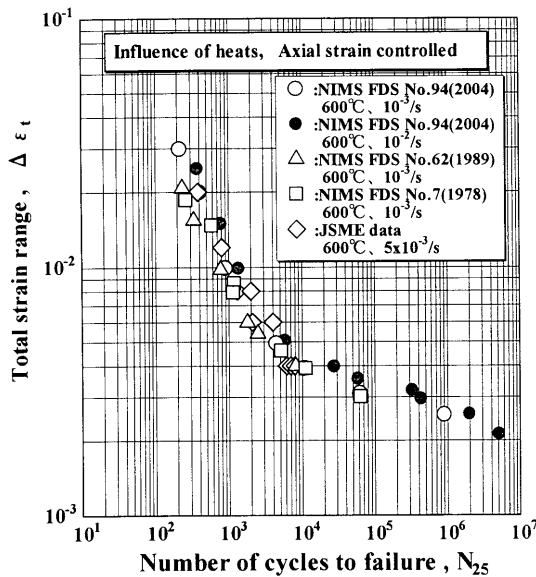


Fig. 7. Influence of heats on the fatigue lives for normalized and tempered 2.25Cr-1Mo steels.

る^{5,9-11})。この図には、4ヒートの焼きならし焼き戻し材について、600°C、ひずみ速度が $10^{-2}/s$ から $10^{-3}/s$ の結果が示されているが、ヒート間の差異は小さいと考えられる。

4.3 軸ひずみ制御と径ひずみ制御の違いの影響

Fig. 8は軸ひずみ制御と径ひずみ制御の結果を同じグラフに示したものである。二重印が径ひずみ制御の結果である。Brinkmanの材料は焼鈍材³⁾、浅山らの材料は焼きならし焼き戻し材⁶⁾であり、試験温度は、538°Cと550°Cである。軸ひずみ制御試験^{5,9-11)}は、600°Cであるが、明らかに軸ひずみ制御試験データが短寿命側に位置している。 10^5 回以上では両者の違いは小さくなる。したがって、Fig. 3で示したようにBrinkmanのデータとNIMS疲労データシー

トのデータが大きく広がっていたのは、主にひずみ制御モードの違いと試験温度によるものと考えられる。次節では試験温度域ごとに検討する。

径ひずみ制御では、軸ひずみに換算する際の換算式や塑性、塑性ポアソン比の値などの問題が指摘¹⁸⁾されている。最近の試験基準^{12,19)}では軸ひずみ制御が推奨されている。過去の報告書でも、径ひずみ制御データの方が長寿命になる傾向が見られる¹⁸⁾。

4.4 2.25Cr-1Mo鋼の高温疲労設計曲線

400°C⁹⁻¹¹⁾、427°C³⁾及び470°C⁷⁾の結果をASME疲労設計曲線のグラフ⁸⁾にプロットしたのが、Fig. 9である。焼鈍材、焼きならし焼き戻し材を含めて計7ヒートの結果である。 10^4 から 10^5 回以下の低サイクル寿命域で、軸ひずみ制御試験データ(白印)は明らかに低寿命側に位置している。これは前節で考察したように、ヒート、熱処理、ひずみ速度の影響とは考えられない。ひずみ制御モードの違いによるものと考えてよい。ASMEの設計曲線は800F(427°C)、 $4 \times 10^{-3}/s$ で図の実線のように与えられているが、軸ひずみ制御、400°C、 $10^{-3}/s$ の試験条件に対しては余裕が無く危険側であるため、点線のような修正疲労曲線を提案する。

538°C³⁾、550°C^{4,6)}及び600°C^{5,9-11)}の結果をASME疲労設計曲線のグラフ⁸⁾にプロットしたのが、Fig. 10である。焼鈍材、焼きならし焼き戻し材を含めて計10ヒートの結果である。 10^6 回以下のほぼ全疲労寿命域にかけて、軸ひずみ制御試験データ(白印)は低寿命側に位置している。600°Cの場合もひずみ制御モードの違いによるものと考えられる。ASMEの設計曲線は900から1100F(483から593°C)の間は、実線のような一本で与えられているが、軸ひずみ制御、600°C、 $10^{-3}/s$ の試験条件に対してほぼ全疲労寿命域で余裕が無く危険側であるため、400°Cと同様に

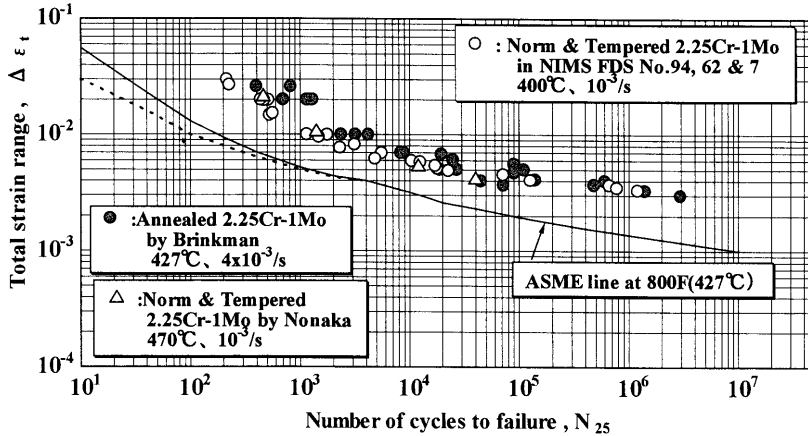


Fig. 9. ASME fatigue design curve and a modified line for 2.25Cr-1Mo steel at 400°C.

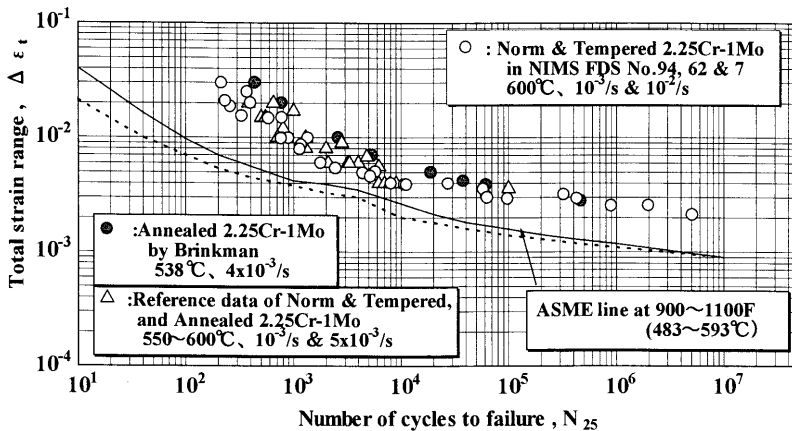


Fig. 10. ASME fatigue design curve and a modified line for 2.25Cr-1Mo steel at 600°C.

点線のような修正疲労曲線を提案する

5. 結言

焼きならし焼き戻した2.25Cr-1Mo鋼3ヒートのNIMS疲労データシートが出揃った。そのデータから、高温疲労寿命特性に及ぼすヒート、熱処理、ひずみ速度、ひずみ制御モードの影響について、文献データも用いて検討した。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 疲労寿命に及ぼすヒートの影響は、焼きならし焼き戻し材では小さい。
- (2) 疲労寿命に及ぼす熱処理の影響は、焼きならし焼き戻し処理と焼鈍処理では小さい。
- (3) 疲労寿命に及ぼすひずみ速度の影響は、 10^{-2} と $10^{-3}/s$ のひずみ速度の範囲では小さい。
- (4) 疲労寿命に及ぼすひずみ制御モードの影響は、大きい。軸ひずみ制御のデータは、径ひずみ制御のデータに対して、短寿命である。
- (5) 2.25Cr-1Mo鋼の高温機器設計で用いられているアメリカ機械学会のASME Code Caseの疲労設計曲線は、軸ひずみ制御データに対して危険側であることが明らかとなり、修正疲労曲線を提案した。

文 献

- 1) 物質・材料研究機構疲労データシート No. 0~No. 96, NIMS, つくば, (1978~2004).
- 2) 物質・材料研究機構クリープシート No. 0~No.50, NIMS, つくば, (1972~2004).
- 3) C.R.Brinkman, J.P.Strizak, M.K.Booker and C.E.Jaske: *J. Nucl. Mater.*, **62** (1976), 181.
- 4) K.Tokimasa and I.Nitta: *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, **35** (1986), 267.
- 5) 日本材料学会高温強度部門委員会非弾性解析ワーキンググループ: 24回高温強度シンポジウム, (1986),16.
- 6) T.Asayama, 程 時珍, Y.Tachibana, Y.Asada: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **53** (1987), 2232.
- 7) I.Nonaka, M.Kitagawa, A.Ootomo, Y.Wada: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 2267.
- 8) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Code Case Nuclear Components N-201-4, ASME, New York, (2001), 240.
- 9) NIMS Fatigue Data Sheet No.94, NIMS, つくば, (2004).
- 10) NRIM Fatigue Data Sheet No.62, NRIM, 東京, (1989).
- 11) NRIM Fatigue Data Sheet No.7, NRIM, 東京, (1978).
- 12) 高温低サイクル疲労試験法, 日本材料学会, 京都, (2002).
- 13) NIMS Fatigue Data Sheet No.86, NIMS, つくば, (2000).
- 14) NIMS Fatigue Data Sheet No.88, NIMS, つくば, (2002).
- 15) K.Kobayashi, M.Kimura, M.Hayakawa and K.Yamaguchi: **40** (2002), 277.
- 16) 新構造材料による実機適用性に関する評価報告書, 金属材料技術研究所, つくば, (2001), 19.
- 17) 北川正樹, 山口弘二: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1431.
- 18) 高速炉構造材料の高温低サイクル疲労試験法に関する研究成果報告書, 日本溶接協会原子力委員会P/FCI小委員会編, (1980), 70.
- 19) 金属材料の高温低サイクル疲労試験法, JIS Z 2279, 日本規格協会, (1992).