

### 低炭素鋼の引張圧縮：ねじりの組合せ応力 下における疲労寿命に及ぼす温度上昇の影響

Misumi, Masaaki / 三角, 正明 / Yanagisawa, Junichiro / 大  
川, 功 / Takahashi, Hideo / 柳澤, 潤一郎 / Ohkawa, Isao  
/ 高橋, 秀夫

---

(出版者 / Publisher)

社団法人日本材料学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

材料 / 材料

(号 / Number)

433

(開始ページ / Start Page)

1122

(終了ページ / End Page)

1127

(発行年 / Year)

1989-10-15

# 低炭素鋼の引張圧縮-ねじりの組合せ応力下における 疲労寿命に及ぼす温度上昇の影響†

大川 功\* 高橋 秀夫\*  
柳澤潤一郎\*\* 三角 正明\*\*\*

## Effect of Heat Generation on the Fatigue Strength of a Low Carbon Steel under Combined Push-Pull and Torsional Loading

by

Isao OHKAWA\*, Hideo TAKAHASHI\*, Junichiro YANAGISAWA\*\*  
and Masaaki MISUMI\*\*\*

Fatigue tests were conducted at a frequency of 20 Hz or 5 Hz under push-pull or reversed torsion or combination of these two loading modes. Temperature of specimen rose by heat generation during cyclic stressing at 20 Hz but was kept at room temperature by air-cooling throughout the testing at 5 Hz. The variations of fatigue strength and strain range resulted from heat generation were studied in each loading mode.

The heat generation became greater in the order, torsional, combined, push-pull loading, which resulted in shortening of the fatigue life at higher stress amplitude. The fatigue strength under combined loading was able to be evaluated by using  $S-N$  diagrams derived on the basis of Gough's ellipse quadrant theory except that the slope in the finite fatigue life region varied depending on temperature rise.

Mises' equivalent plastic strain range  $(\Delta\varepsilon_p)_{eq}$  increased rapidly at an early stage of fatigue life and decreased during subsequent stress cycles. In the case of heat generation, the change of  $(\Delta\varepsilon_p)_{eq}$  was amplified and its average in fatigue process was lowered.

The relationship between the maximum of  $(\Delta\varepsilon_p)_{eq}$  and fatigue life was expressed by a straight line with a narrow scatter band on a log-log diagram, irrespective of the heat generation.

**Key words** : Combined loading,  $S-N$  diagram, Temperature rise, Equivalent stress, Plastic strain range, Work hardening

### 1 緒 論

材料の疲労強度に影響を及ぼす因子の一つとして温度の変化があるが、これはふん囲気温度の変化と疲労発熱に基づく試料温度の変化による影響とに大別することができる。前者については、主として繰返し過程でふん囲気温度が変動する場合の累積繰返し数比についての検討がなされている<sup>1)~3)</sup>。後者については、従来から疲労過程における発熱は、材料の内部摩擦、塑性ひずみあるいは履歴エネルギーと密接な関係があることが指摘されており、履歴エネルギーはほとんど熱エネルギーとして試料の温度上昇に寄与する<sup>4)</sup>、あるいは疲労過程において履歴エネルギーと温度上昇の比がほぼ一定である<sup>5)</sup>との報告もなされている。また各種荷重条件下での応力振幅—温度上昇曲線において、急激に温度が上昇

しはじめる応力値から疲労限度を推定する方法や、1サイクル当りの発熱量と疲労寿命および微視的き裂発生寿命の関係<sup>9)</sup>、あるいはこの基準式を用いて切欠き係数を算定する方法についても報告されている<sup>10)</sup>。

一方、疲労発熱による温度上昇が常温での疲労寿命に及ぼす影響については、温度上昇が著しい場合、これに冷却を施すと疲労強度は大幅に向上するとの報告がある<sup>11),12)</sup>。著者らの一人も、これまでに内部摩擦の大きいオーステナイト系ステンレス鋼を用いて回転曲げ疲労試験を行い、疲労過程における内部摩擦、温度の変化と  $S-N$  特性の関係について検討してきたが、その結果、内部摩擦の増大ともなつて試料温度は上昇し、疲労強度は低下することを確認している<sup>13)~15)</sup>。繰返しともなう温度上昇は、内部摩擦の観点から材料<sup>16)</sup>、熱処理、

† 原稿受理 平成元年1月17日 Received Jan. 17, 1989

\* 正 会 員 法政大学工学部 小金井市梶野町, College of Engineering, Hosei University, Kajino-cho, Koganei

\*\* 学生会員 法政大学大学院 小金井市梶野町, Graduate Student, Hosei University, Kajino-cho, Koganei

\*\*\* 正 会 員 成蹊大学工学部 武蔵野市吉祥寺北町, Faculty of Engineering, Seikei University, Kita-machi, Kichijoji, Musashino

予加工の有無、繰返し応力に依存し、あるいは試験片の寸法形状<sup>12)</sup>、試験機への固定方法などにも関係があると考えられる。

本研究ではさらに、温度上昇は繰返し応力の種別、試験片断面内での応力分布の有無にも関連があるものと考え、引張圧縮、ねじりの各単軸応力下およびそれらの組合せ応力下において疲労試験を行った。また、温度上昇が各応力負荷形式での疲労寿命に及ぼす影響について調べるため、空冷により温度上昇を抑えた場合についても疲労試験を行い、温度上昇を生ずる場合の疲労寿命特性と比較検討した。さらに応力繰返しにともなう温度、ひずみおよび硬さの変化を調べ、これらと疲労寿命の関連についても検討した。

## 2 試料および実験方法

供試材は Al キルド低炭素鋼 CH10A で、直径 19 mm の丸棒素材から試験部の直径 14 mm、長さ 32 mm の中実試験片に切削加工後、熱処理を施した。さらに硬さ測定のため、試験部の一部を電解研磨した。供試材の化学成分、熱処理、機械的性質および時効能を Table I に示す。試料には段階的な徐冷を施し、できるだけ時効能を抑えた。表中の熱処理後の時効能は引張試験における下降伏点の回復能力から求めたものであるが、その値は 2% とかなり小さい。

疲労試験は引張圧縮とねじりの各単軸両振応力下およびそれらの組合せ応力下（組合せ応力比  $\tau/\sigma = \infty, 0, 1/\sqrt{3}$ ）において、荷重制御試験を行った。用いた試験機は電気油圧サーボ式複合応力試験機（鷲宮製作所製、軸力荷重 98 kN、ねじり負荷 980 N·m）である。繰返し速度は 20 Hz および 5 Hz で、5 Hz の場合、風量 5 m<sup>3</sup>/分の送風機により空冷し、試験片の温度上昇を抑えた。なお、繰返し数  $5 \times 10^6$  回にて打切りデータとした。

Table I. Chemical composition, heat treatment, mechanical properties and strain-ageing potential of the material.

Chemical composition %	C	Si	Mn	P	S	Al
	0.120	0.010	0.350	0.020	0.015	0.025
Heat treatment	920°C 1 hr FC, 710°C 4 hr FC, 550°C 4 hr FC, 400°C 8 hr FC, 300°C 8 hr FC, 200°C 12 hr FC, 100°C 24 hr FC					
Mechanical properties	Yield stress in tension		MPa		252	
	Tensile strength		MPa		328	
	Elongation		%		46	
	Contraction of area		%		74	
	Yield stress in torsion		MPa		118	
Torsional strength		MPa		492		
Micro-vickers hardness		$H_v$		85		
Strain ageing potential					%	
						2.0

FC; Furnace cooling in vacuum.

疲労過程における温度の変化は、試験片平行部中央において赤外線放射温度計を用いて連続的に測定した。また、試験片平行部中央に貼ったひずみゲージからの信号とロードセルから得られる荷重信号を用いてヒステリシスループを求め、これより疲労過程における全ひずみ幅および塑性ひずみ幅を算出した。さらに、全試料につき、応力繰返しにともなうマイクロビッカース硬さの変化を調べた。

## 3 実験結果および考察

### 3.1 疲労寿命特性

Fig. 1 は Mises 説に基づく等価応力  $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$  を用いて、疲労試験結果を整理したものである。(a) は後述のように、繰返し過程において温度上昇を生ずる 20 Hz の場合であり、(b) は空冷により温度上昇を抑えた 5 Hz の場合である。いずれの場合も疲労強度はねじりが最も高く、ついで組合せ、引張圧縮の順となっている。疲労限度は、20 Hz の場合それぞれ 165, 143, 127 MPa、一方、5 Hz 空冷では 162, 140, 130 MPa であり、同一応力負荷形式における両者の疲労限度はほぼ等しい。これは試験片の温度上昇が問題とならぬ限り、およそ 100 Hz までの範囲では、疲労強度に繰返し速度の影響はほとんど現われなとする他の研究結果<sup>17), 18)</sup>と一致する。これに対し、有限寿命域での直線のこう配は 5 Hz 空冷の方が大きく、とくに温度上昇の著しい高応力レベルでは、温度上昇を抑えることにより、寿命は 2~3 倍程度延伸することがわかる。

Fig. 2 は Gough の 1/4 だ円説を有限寿命域まで拡張し、等価応力  $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + k^2\tau^2}$  を用いて疲労試験結果を整理したものである。ここで、 $k$  は引張圧縮とねじりにおける時間強度の比  $\sigma_N/\tau_N$  をとっているが、この値は一般に繰返し数により異なると考えられる。<sup>19)</sup> 本研究では、20 Hz, 5 Hz 空冷いずれの場合も各応

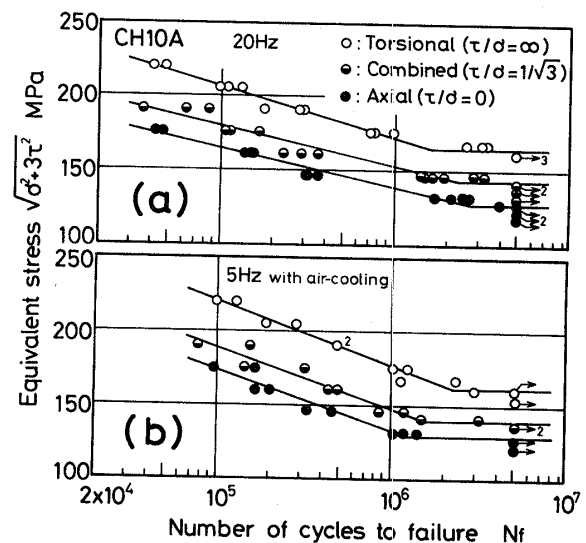


Fig. 1.  $S-N$  diagrams based on the von Mises' distortion energy theory.

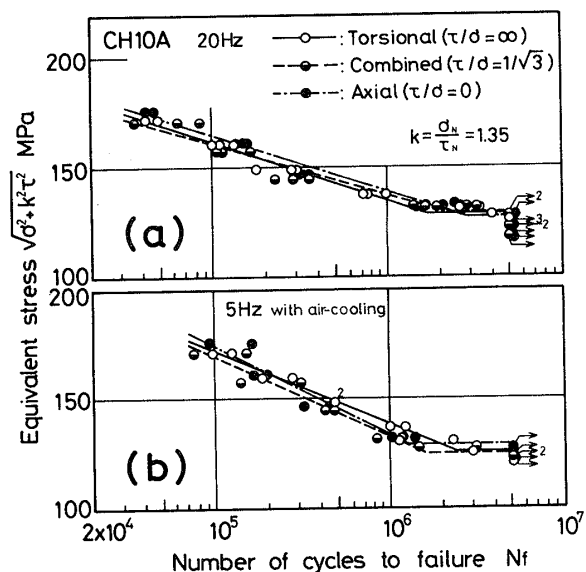


Fig. 2. S-N diagrams based on the Gough's ellipse quadrant theory.

力負荷形式における S-N 線図の形状はほぼ等しいことから、全寿命域で  $k$  は一定として整理した。20 Hz, 5 Hz 空冷の場合とも  $k=1.35$  とすると、有限寿命域での直線のこう配は両者で異なるが、温度上昇のいかにかわからず、組合せ応力下における疲労強度はほぼ 1/4 だ円説に基づく等価応力により整理できることがわかる。

### 3・2 疲労過程における表面温度の変化

繰返し速度 5 Hz の場合、空冷により試験片の温度上昇は抑えられ、疲労試験を行った最大応力レベルにおいても表面温度の変化は  $10^\circ\text{C}$  程度であった。以下、20 Hz の場合の測定結果を示す。

Fig. 3 は応力繰返しにともなう試験片表面温度の変化の一例を示したものであり、(a) がねじり、(b) が組合せ、(c) が引張圧縮の場合である。いずれの場合も温度はピークに達した後しだいに減少し、破断時に急増しており、この温度変化の傾向は繰返し応力が大きいほど一層明りょうに現われている。Fig. 4 は疲労過程における温度上昇の代表値としてその最大値  $\Delta T_{\max}$  (破断時を除く) をとり、Mises の等価応力との関係を示したものである。いずれの場合も繰返し応力が増加するにつれて  $\Delta T_{\max}$  は大となるが、同一応力レベルで比較すると、 $\Delta T_{\max}$  の値にかなり大きな違いがみられ、引張圧縮の場合が最も大きく、ついで組合せ、ねじりの順になっている。これはねじり負荷の場合、試験片断面内に応力こう配が存在することから、各応力負荷形式での試験片全体の発熱量に相違を生ずるためであると考えられる。さらに、Fig. 5 は  $\Delta T_{\max}$  を Gough 説に基づく等価応力を用いて整理したものである。Fig. 2(a) に示したように、各応力負荷形式における三本の S-N 線図はこの等価応力を用い

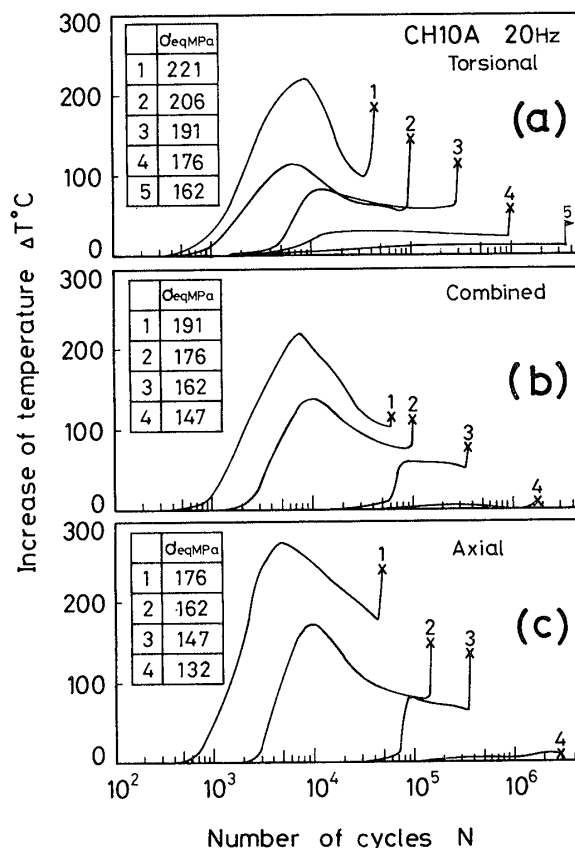


Fig. 3. Variation of temperature during cyclic stressing.

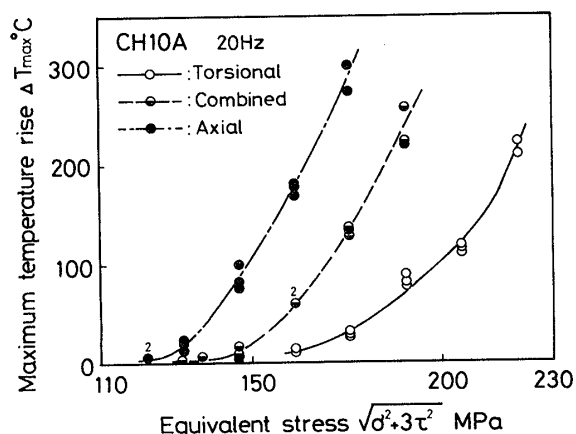


Fig. 4. Relation between maximum temperature rise and Mises' equivalent stress.

てほぼ整理できることから、同一等価応力において三者の  $\Delta T_{\max}$  を比較することは、同一寿命における温度上昇を比べるのとほぼ等価である。Fig. 5 より、同一等価応力 (同一寿命) における  $\Delta T_{\max}$  は、Fig. 4 と同様、引張圧縮、組合せ、ねじりの順に大きいが、応力負荷形式による違いははるかに少ない。

### 3・3 疲労過程におけるひずみの変化

Fig. 6 は繰返し速度 20 Hz の  $10^5$  回時間強度付近における Mises の等価全ひずみ幅  $(\Delta \epsilon_t)_{\text{ea}} = \sqrt{\Delta \epsilon_t^2 + \Delta \gamma_t^2/3}$  および等価塑性ひずみ幅  $(\Delta \epsilon_p)_{\text{ea}}$

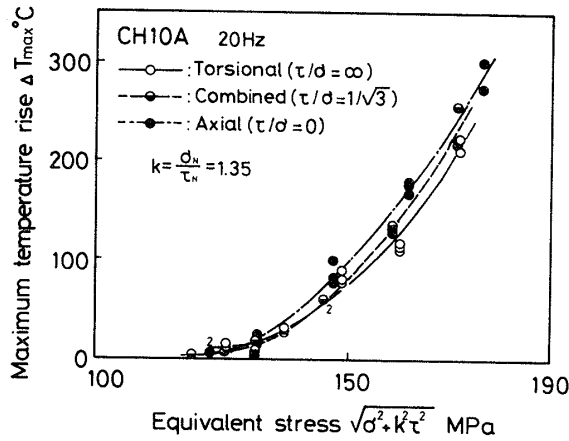


Fig. 5. Relation between maximum temperature rise and Gough's equivalent stress.

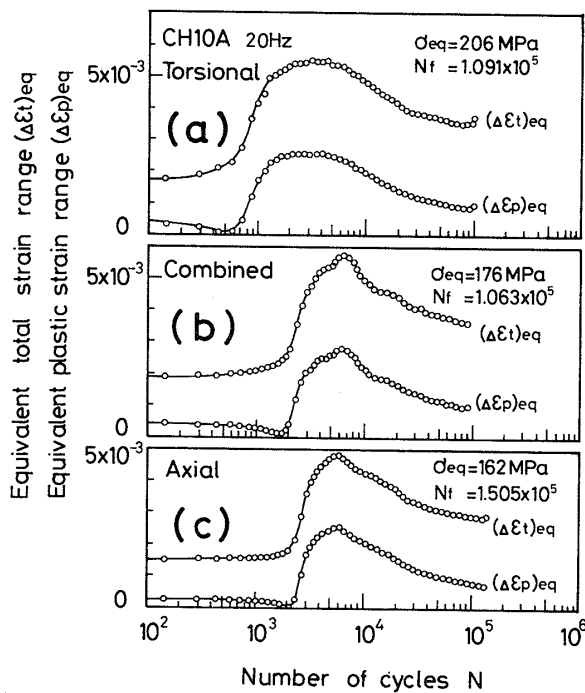


Fig. 6. Variation of total and plastic strain range during cyclic stressing in 20 Hz.

$=\sqrt{\Delta\epsilon_p^2 + \Delta\gamma_p^2/3}$  の変化を示したものである。Fig. 7 は、Fig. 6 と同じ応力レベルにおける 5 Hz 空冷の場合である。Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、全ひずみ、塑性ひずみともに温度上昇を生ずる 20 Hz の方が初期の増加は遅いが増加量は大き、かつその後の減少も著しい。図は省略したが、温度上昇をほとんど生じない低応力域では両者のひずみ挙動に相違はみられなかったことから、高応力域におけるこのひずみ挙動の違いは温度上昇に起因するものであると考えられる。<sup>20)</sup> 田中らも Al キルド低炭素鋼を用い、温度が高いほど塑性ひずみの増加が遅延することを報告している。

Fig. 8 は、疲労過程における塑性ひずみ幅の最大値と平均値の比を等価応力に対して示したものである。ここで、塑性ひずみ幅の平均値としては繰返し過程に

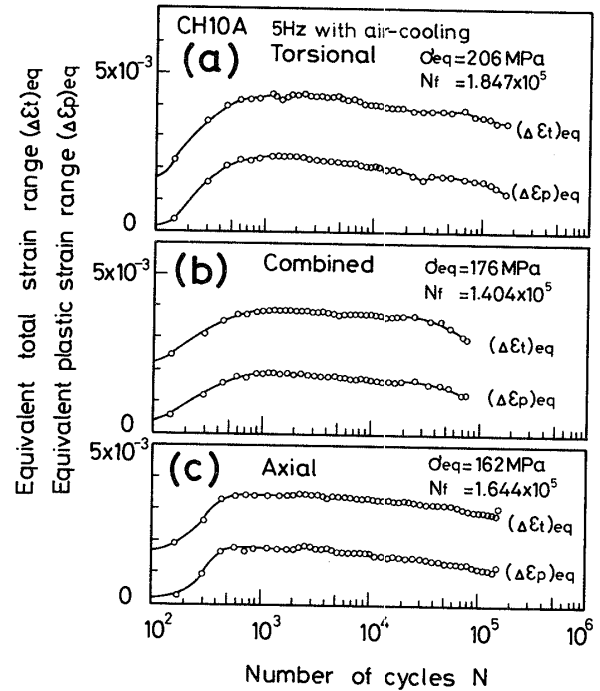


Fig. 7. Variation of total and plastic strain range during cyclic stressing in 5 Hz air-cooled.

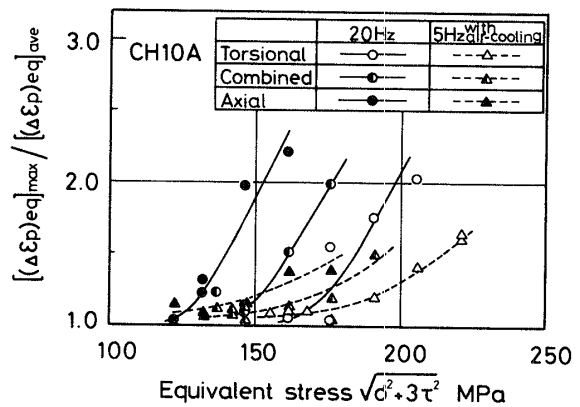


Fig. 8. Relation between  $[(\Delta\epsilon_p)_{eq}]_{max} / [(\Delta\epsilon_p)_{eq}]_{ave}$  and Mises' equivalent stress.

おける二乗平均値を用いた。<sup>\*1</sup> 20 Hz, 5 Hz 空冷の場合とも応力の低下にともない、最大値と平均値の比はしだいに 1 に近づくが、高応力域ではいずれの負荷形式とも比の値は 20 Hz の方が大きく、疲労過程において塑性ひずみ幅の変化がより顕著に現われることを意味している (Fig. 6)。

\*1 菊川ら<sup>21)</sup>は Manson-Coffin 則に基づき、塑性ひずみ幅に関する線形累積損傷則

$$\left(\frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_0}\right)^a N_f = 1$$

を導入した。ここで a,  $\epsilon_0$  は材料定数で、 $a=2$ ,  $\epsilon_0$  は破断延性に比例する値である。繰返し過程で塑性ひずみ幅が変化する場合、上記累積損傷則の観点から、その平均値として、

$$[(\Delta\epsilon_p)_{ave}] = \left\{ \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} (\Delta\epsilon_{p,i})^2 \right\}^{1/2}$$

を用いた。

### 3・4 塑性ひずみ幅と疲労寿命の関係

Fig. 9 は、疲労損傷と密接な関係のある塑性ひずみ幅と疲労寿命の関係を両対数グラフ上に示したものである。Fig. 9(a) は塑性ひずみ幅として前述の疲労過程における二乗平均値を用いた場合であるが、20 Hz、5 Hz 空冷のいずれの負荷形式においても、それぞれ高サイクル域に至るまでほぼ Manson-Coffin 則が成立している。5 Hz 空冷の場合ねじりの線図が若干上方に位置しており、Fig. 1(b) と同様な傾向が認められるが、20 Hz の場合負荷形式による相違はほとんどみられない。すなわち 20 Hz、5 Hz 空冷の場合とも、Mises の等価応力よりも等価ひずみを用いた整理の方がはるかに有効であることを示している。ここで直線の傾きをみると、5 Hz 空冷の場合  $-0.50 \sim -0.55$  と  $-0.5$  前後の値となるのに対し、20 Hz では  $-0.42 \sim -0.45$  とゆるやかである。これは 20 Hz の短寿命域での実験点が下方に位置するためであり、温度上昇により塑性ひずみ幅は急増するがその後の減少も大で (Fig. 6)、このため平均値はかえって小さくなることを意味している。

Fig. 9(b) は塑性ひずみ幅の代表値としてその最大値を用いた場合である。長寿命域では Fig. 9(a) と大差ないが、短寿命域では実験点は上方に移動し、とくに温度上昇が大きい 20 Hz の場合これが顕著である。この結果、直線の傾きは 20 Hz の場合  $-0.53 \sim -0.66$ 、5 Hz 空冷の場合  $-0.59 \sim -0.61$  となった。

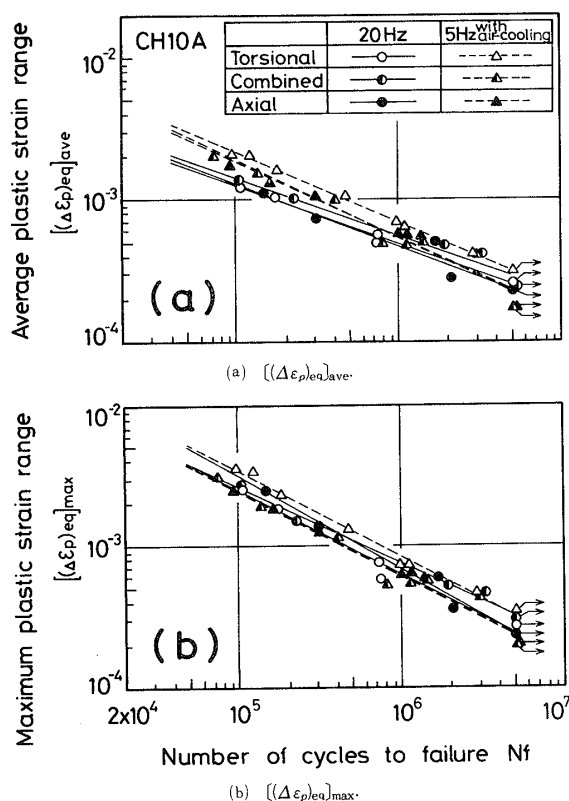


Fig. 9. Manson-Coffin plots.

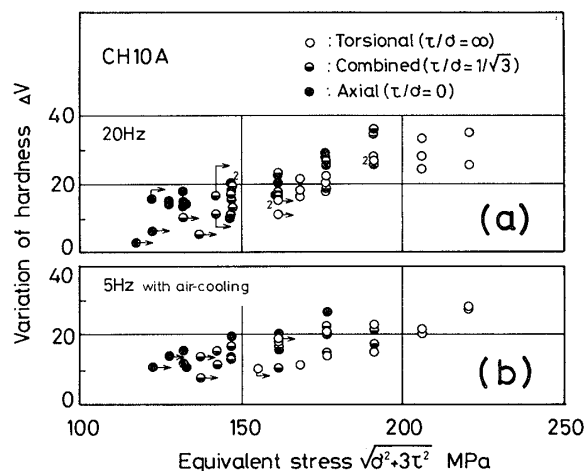


Fig. 10. Relation between variation of hardness and Mises' equivalent stress.

Fig. 9(a) と同様、5 Hz 空冷のねじりの実験点がやや上方に位置するものの、全実験点は傾き  $-0.6$  前後の狭い帯状領域にはほぼおさまることがわかる。このことから、温度上昇を生ずる場合の組合せ応力下における疲労寿命は、最大塑性ひずみ幅を用いることにより、温度上昇がない場合の試験結果からある程度予測可能であると考えられる。

### 3・5 応力繰返しにともなう硬化と疲労強度の関連

Fig. 10 は全試料につき、疲労試験前後における硬さの変化を Mises の等価応力に対してプロットしたものである。(a)、(b) いずれも応力が高くなるにつれて硬化量は大きくなるが、供試材は時効能が小さいことから推して、その大部分は繰返し加工硬化によるものであると考えられる<sup>22)</sup>。また高応力域では、試料温度が上昇する 20 Hz の方が硬化量は大きくなる傾向が認められる。

ここで、Fig. 6 と Fig. 7 の対比あるいは Fig. 8 より、高応力域では 20 Hz の方が塑性ひずみ幅の変動は大きく、試料は繰返し初期に著しく軟化した後、しだいに硬化することを示している。また、Fig. 3 の温度変化も同様な軟化、硬化特性を示している。

Fig. 10 の硬さはいずれも常温におけるものであり、20 Hz の繰返し過程における高温硬さは測定していないが、上記のことから考えると、温度上昇過程において試料は著しく軟化し、機械的強度もまた低下するものと推察される。このため、疲労被害の進行は温度上昇により促進され、その後しだいに硬化するものの、温度上昇がない場合に比べ短寿命になるものと考えられる (Fig. 1)。他の研究者もおよそ  $300^{\circ}\text{C}$  以下の温度域では室温よりも硬化量は大きい<sup>23), 24)</sup>が、疲労強度は低下することを指摘している。

## 4 結 論

時効能を抑えた Al キルド低炭素鋼を用い、繰返し

速度 20 Hz (空冷せず) および 5 Hz (空冷) の条件下で引張圧縮, ねじりの組合せ応力試験を行い, 疲労強度に及ぼす温度上昇の影響について比較検討した. その結果, つぎの結論が得られた.

(1) 高応力域では温度上昇により短寿命となり, *S-N* 線図の有限寿命域でのこう配は 20 Hz, 5 Hz 空冷両者で異なるが, 温度上昇のいかんにかかわらず組合せ応力下における疲労強度は Gough の 1/4 だ円説に基づく等価応力によりほぼ整理することができる.

(2) 同一等価応力 (Mises) における温度上昇は引張圧縮, 組合せ, ねじりの順に大きい. また Gough の等価応力による比較でも同様な傾向が認められるが, 応力負荷形式による差ははるかに小さい.

(3) 温度上昇がある場合, 塑性ひずみ幅の増加は繰返し初期に遅延するが, その後急激に増加するため, 最大値は温度上昇がない場合よりも大きい. しかし, 急増後の減少も著しいため, 塑性ひずみ幅の平均値は温度上昇がない場合よりも小さくなる.

(4) 平均塑性ひずみ幅と疲労寿命の関係は両対数線図上の直線で表わすことができるが, 温度上昇がある場合その傾きはゆるやかになる. また塑性ひずみ幅の代表値としてその最大値をとると, 温度上昇のいかんにかかわらず, 寿命は狭い帯状の領域にほぼおさまる.

(5) 温度上昇をとまなう場合, 繰返しによる硬化はより大きくなる.

(昭和63年11月8日 第19回疲労シンポジウムにて講演)

### 参 考 文 献

- 1) 安藤善司, 加藤容三, 中野典彦, 材料試験, **11**, 379 (1962).
- 2) 平 修二, 藤野宗昭, 佐近淑郎, 松田吉雄, 材料, **22**, 242 (1973).
- 3) 中村 宏, 恒成利康, 堀川 武, 高杉俊二, 材料, **26**, 922 (1977).
- 4) 田中道七, 服部修次, 材料, **26**, 319 (1977).
- 5) V. A. Franyuk and V. B. Rantsevich, Industrial Laboratory, **38**, 1898 (1973).
- 6) 西原利夫, 河倉義安, 日本機械学会誌, **37**, 593 (1934).
- 7) 大野啓充, 鯉淵興二, 高見勝己, 材料, **16**, 115 (1967).
- 8) 大野啓充, 鯉淵興二, 材料, **17**, 806 (1968).
- 9) 眞武友一, 今井康文, 九州大学応用力学研究所報, **45**, 31 (1976).
- 10) 樋口正一, 今井康文, 竹中 稔, 日本機械学会論文集, **40**, 644 (1974).
- 11) 柿内正昭, 桜井忠一, 姫路工業大学研究報告, **18-A**, 155 (1965).
- 12) L. N. Molchanov and N. I. Kharitonov, Industrial Laboratory, **31**, 1884 (1966).
- 13) 大川 功, 榎本信助, 日本材料強度学会誌, **14**, 188 (1979).
- 14) 大川 功, 榎本信助, 日本材料強度学会誌, **15**, 42 (1980).
- 15) 大川 功, 榎本信助, 日本機械学会講演論文集, No. 823-1, 13 (1982).
- 16) 大川 功, 榎本信助, 日本材料強度学会誌, **15**, 61 (1980).
- 17) 河本 実, 田淵修造, 材料試験, **9**, 452 (1960).
- 18) I. Hong, ASME PVP, **72**, 121 (1983).
- 19) 星 実泰, 機械設計, **28**, 54 (1984).
- 20) 田中道七, 服部修次, 材料, **27**, 829 (1978).
- 21) 菊川 真, 城野政弘, 宋 智浩, 材料, **21**, 753 (1972).
- 22) 中川隆夫, 猪飼 靖, 前田隆雄, 材料, **25**, 842 (1976).
- 23) 広瀬素尚, 加藤容三, 長谷川典彦, 材料, **23**, 777 (1974).
- 24) 安藤善司, 加藤容三, 清水達夫, 三芳功達, 日本機械学会論文集, **26**, 86 (1960).