

### 荷重制御下における広範な寿命域でのねじり疲労に及ぼす静的負荷の影響

富田, 晃一郎 / TOMITA, Koichiro

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010370>

# 荷重制御下における広範な寿命域での ねじり疲労に及ぼす静的負荷の影響

## Influence of static loadings on load-controlled torsional fatigue in wide life range

富田 晃一朗

Koichiro TOMITA

指導教員 大川 功

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

It is proposed that a shear strain-based model including mean stress effect on critical plane was modified taking the influence of variation in cyclic strain and accumulation of ratcheting strain over the life from low to high cycle regions. Thus, torsional fatigue tests with static torsion or tension were performed on smooth tubular specimens of steels with different deformation properties to examine suitability of the estimation. As a result, it was shown that the model gave an explanation of the influence of static loadings on torsional fatigue life of steels.

**Key Words** : *Torsional fatigue, Static loadings, Plastic shear strain, Ratcheting strain*

### 1. 緒言

機械部品や構造部材などの実機における破壊事例の大半は疲労破壊によるものであり、しかもこれらの部材に加わる荷重は単独であることは稀であり、引張り、曲げ、ねじりなどの複数の負荷が作用することが多い。このため部材における応力状態は、複数の繰返し応力や静的応力が同時に作用する多軸応力状態となっている。つまり、多軸応力状態における応力-ひずみ応答の変化、疲労き裂の成長挙動や材料の変形挙動を正しく見積もることが必要不可欠である。

実機は、繰返しの荷重に静的な荷重が付加される場合も多く、この場合の疲労寿命予測は実用上重要となる。多軸応力状態に静的荷重が付加される場合でも、データの少なさゆえに多軸のデータを単軸に等価してから Goodman 線図のような経験則を用いて評価されたものが多いのが現状である。さらに、繰返しねじりに静的荷重を付加した事例のように多軸応力状態になると、き裂成長速度の変化やラチェット変形のような疲労変形の促進、繰返し応力-ひずみ応答の変化などが単軸応力下のものとは大きく異なると考えられる。それによって、元々単軸の経験則に基づいて得られた予測寿命は実際の寿命より危険側に予測されることもありうる。

静的なねじりや引張りの付加がねじり疲労強度に及ぼす影響について、臨界面上でのき裂成長に関する平均応力効果を考慮したさまざまな寿命評価モデルが提案され

ている[1,2]。静的荷重が寿命に及ぼす影響は寿命域によって異なることが分かった。高サイクル域では、き裂成長が促進され短寿命となる。一方、低サイクル域ではラチェット変形が促進され材料の破壊延性が低下し短寿命になる[3]。また、静的荷重を付加することによって材料は加工硬化/軟化し、応力-ひずみ応答が変化することが分かっている[4]。

しかし、今までに提案されてきた静的荷重の影響を見積もるクライテリアは寿命域に依存した形のものほとんどである。そのため、き裂、ラチェット変形や応力-ひずみ応答の変化など複数の要因で破壊が起きた場合を想定した寿命予測式はない。

本研究では、静的荷重を付加した繰返しねじり下の低サイクル域から高サイクル域にわたる広範な寿命域における寿命評価法を検討した。さらに、硬化軟化特性が異なる二種類の鋼材を用いて繰返しねじりに静的なねじりと引張りを付加して疲労試験を行い、この寿命試験結果に得られた寿命評価法を適用し、その妥当性を検討した。

### 2. 静的荷重を付加した際の寿命評価モデル

(1) 繰返しねじりに静的荷重を付加した際の応力-ひずみ応答の変化

繰返しねじりに静的荷重を付加すると、それにともなって材料が硬化/軟化し、繰返し応力-ひずみ関係が変化

すると考えられる。そこで、繰返しねじりに静的荷重を付加した際の応力-ひずみ応答を見積もる必要がある。

まず純ねじりの場合の繰返し応力-ひずみ応答は、Ramberg-Osgood型に従うとして以下に示す。

$$\tau_a = k_0 \gamma_{p0}^{n_0} \quad (1)$$

ここで、 $\tau_a$  はせん断応力振幅、 $\gamma_{p0}$  は純ねじり下での塑性せん断ひずみ振幅である。式中のパラメータ  $k_0$  及び  $n_0$  は、それぞれ純ねじりでの繰返し強度係数と繰返しひずみ加工硬化指数である。

また、Lorenzo[4]は繰返し応力-ひずみ応答に及ぼす平均応力の影響を見積もるために、荷重制御下で最大引張り荷重  $\sigma_{max}$  を一定として、平均引張り応力  $\sigma_m$  と塑性ひずみ振幅  $\epsilon_p$  を片対数にプロットすると傾きが等しい直線群が得られるとして、以下の式を提案した。

$$\log \epsilon_p = \log \epsilon_{p0} + \alpha_1 \sigma_m \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon_p$  は平均引張り応力を付加した時の塑性ひずみ振幅、 $\epsilon_{p0}$  は完全両振り繰返し引張り圧縮時の塑性ひずみ振幅、 $\alpha_1$  は直線群の傾き、 $\sigma_m$  は平均引張り応力である。

Lorenzo は式(2)によって繰返し引張り圧縮荷重  $\sigma_a$  に静的な引張り  $\sigma_m$  を加えた場合の繰返しひずみの変化を見積もった。また、式(2)の関係を用いれば、平均応力が 0 での繰返し応力-ひずみ曲線が既知であること及び一つの直線の傾きが既知であれば、様々なレベルの平均応力を付加した時の塑性ひずみを予測することできると考えられる。式(2)を繰返しねじりに静的荷重を付加した場合にも適用するために Mises の等価式を用いて、等価平均せん断応力  $\tau_{eqm}$  を定義した。

$$\tau_{eqm} = \sqrt{\tau_m^2 + \frac{1}{3} \sigma_m^2} \quad (3)$$

また、Lorenzo の関係式は、せん断ひずみの場合にも適用できると仮定して式(2)を一般化した形式に修正した。

$$\log \gamma_p = \log \gamma_{p0} + \alpha \tau_{eqm} \quad (4)$$

$$\log \left[ \frac{\gamma_p}{\left( \frac{\tau_{eqmax}}{k_0} \right)^{\frac{1}{n_0}}} \right] = \alpha \tau_{eqm} \quad (5)$$

ここで、 $\gamma_p$  は静的荷重付加時の塑性せん断ひずみ振幅、 $\gamma_{p0}$  は純ねじりでの塑性せん断ひずみ振幅、 $\tau_{eqm}$  は付加する等価平均せん断応力、 $\tau_{eqmax}$  は等価最大せん断応力である。式(5)は式(4)に式(1)を代入したものであり、式(5)は  $\tau_{eqmax} = const$  の直線の傾き  $\alpha$  を示したものである。この材料定数  $\alpha$  は、任意の静的荷重付加条件下でのひずみ測定により定めることができ、この  $\alpha$  の値を用いて静的な

ねじりあるいは引張り付加条件下におけるせん断塑性ひずみ振幅  $\gamma_p$  を推定することができる。式(4)の模式図を Fig1 に示す。

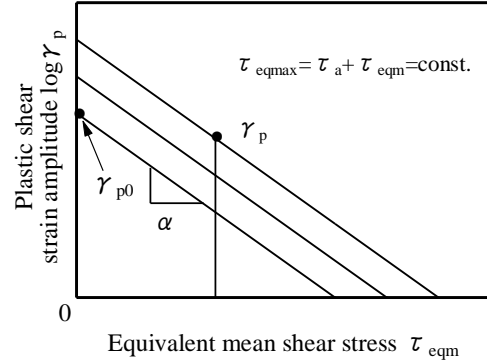


Fig.1.  $\log \gamma_p$  versus  $\tau_{eqm}$  for constant values of  $\tau_{max}$ .

## (2) ラチェットひずみの累積

過去の研究結果より、ラチェットひずみの大きさや累積速度は付加する静的荷重の大きさに依存し、また、その累積過程において寿命の初期段階で最も大きく変形し、破壊に近づくとき変形は飽和に向かっていくことも分かっている。

繰返しねじりに静的ねじりまたは静的引張りを付加すると、繰返しに伴い周方向または軸方向に疲労変形が累積する。これまでに得られた実験結果より、ラチェットひずみ  $\gamma_c$  あるいは  $\epsilon_c$  は両対数線図上の直線でほぼ近似できることからラチェット変形の累積過程は以下の式で表せる。

$$\gamma_c = \gamma_f (N/N_f)^{\beta_t} = A_\tau N^{\beta_t}, \quad \epsilon_c = \epsilon_f (N/N_f)^{\beta_\sigma} = A_\sigma N^{\beta_\sigma} \quad (6)$$

$\gamma_f$  と  $\epsilon_f$  は破壊時のラチェットひずみである。係数  $A_\tau$ 、 $\beta_t$ 、 $A_\sigma$  及び  $\beta_\sigma$  は繰返しせん断応力  $\tau_a$  と等価平均せん断応力  $\tau_{eqm}$  あるいは等価最大せん断応力  $\tau_{wqmax}$  に依存するが、平均応力下での塑性せん断ひずみ振幅  $\gamma_p$  も同変数に依存することから、これらの係数はこの  $\gamma_p$  を用いて表すことができると考えた。 $\tau_{wqmax}$  = 一定の条件下において、係数  $A_\tau$ 、 $A_\sigma$  と  $\log \gamma_p$  の関係は等しい傾きを持つ直線群で表せると仮定し、平均応力  $\tau_{eqm} = 0$  のときにラチェットひずみは生じず、 $A_\tau$ 、 $A_\sigma$  は 0 になることを考慮して以下の関係が得られた。

$$A_\tau = B_\tau \log \left( \frac{\gamma_p}{\gamma_{p0}} \right) = B_\tau \alpha \tau_{eqm}, \quad A_\sigma = B_\sigma \log \left( \frac{\gamma_p}{\gamma_{p0}} \right) = B_\sigma \alpha \tau_{eqm} \quad (7)$$

さらに、指数  $B_t$  と  $B_\sigma$  はと塑性せん断ひずみ振幅  $\gamma_p$  の関係が両対数線図上の直線で表されるならば、次式が得られる。

$$\beta_\tau = C_\tau + D_\tau \log \gamma_p = C_\tau + D_\tau \alpha \tau_{eqm} + D_\tau \log \left( \frac{\tau_{eqmax}}{k_0} \right)^{\frac{1}{n_0}}$$

$$\beta_{\sigma} = C_{\sigma} + D_{\sigma} \log \gamma_p = C_{\sigma} + D_{\sigma} \alpha \tau_{eqm} + D_{\sigma} \log \left( \frac{\tau_{eqmax}}{k_{\sigma}} \right)^{\frac{1}{n_{\sigma}}} \quad (8)$$

式(7), (8)の各種材料定数は, ラチェットひずみの測定結果を用いて決定される.

### (3) 臨界面上でのき裂成長に及ぼす平均応力効果

静的荷重を付加した際のき裂成長に及ぼす影響は過去の既存のモデルを使用する.

Akidらは[5], 最大せん断断面上に作用する静的引張り応力の影響を以下の式で表した.

$$\gamma_{eq} = \gamma_{max} + k \frac{\sigma_{nm}}{E} \quad (9)$$

ここで,  $k$  は材料定数,  $\sigma_{nm}$  は最大せん断断面上に作用する静的な垂直応力であり,  $E$  は縦弾性係数である.

また, Miller[1] と Marquis[2]は最大せん断断面上に作用する平均せん断応力の影響を以下の関係で示した.

$$\Delta \tau \cdot e^{A|\tau_m|} = f \quad (10)$$

$A$  と  $f$  は材料定数である. 式(9), (10)の形式ならば, 静的引張りまたは静的ねじりを付加しなかった場合は純ねじりと同じ結果になる形式となっている.

### (4) 修正 Coffin-Manson 則

過去の研究結果より, 繰返しねじりに静的ねじりまたは静的引張りを付加した場合, ほとんどの場合においてせん断型の破壊き裂がほとんどであった. また, 応力ひずみ応答の変化やラチェットひずみの累積などを全て塑性せん断ひずみに関係づけて予測式を構築してきた. よって, 静的荷重の影響を見積もった寿命予測式もせん断ひずみ型のモデルをベースにしたものが適していると考えられる. そこでまず, 純ねじりの場合の Coffin-Manson プロットを次式で表す.

$$\gamma_{p0} N_f^a = H \quad (11)$$

ここで,  $a$  と  $H$  は材料定数である. 静的荷重を付加した場合, これに式(9), (10)で示した臨界面上でのき裂成長に及ぼす平均垂直応力と平均せん断応力の影響を考慮したクライテリア及び静的荷重を付加にともなう塑性せん断ひずみの変化とラチェット変形の影響を組み込んで式(11)を修正したモデルを以下に示す.

$$\left( \gamma_p + k \frac{\sigma_m}{E} \right) e^{u|\tau_m|} N_f^a = H - f N_f^b \quad (12)$$

ここで,  $k$  と  $u$  はそれぞれ, き裂面上に作用する平均垂直応力と平均せん断応力の影響の程度を表す係数である.

関数  $f$  はラチェット変形が寿命に及ぼす影響を表しているものである. 過去の研究結果をみると, 低応力下においても破壊時のラチェットひずみの変形量は大きいことが分かっている. しかし, ラチェット変形の影響は高応力, 短寿命域においてより顕著となることから, 累積ひずみの大きさよりはむしろ累積速度に依存すると考えられる. そこで, 静的なねじりと引張り付加の場合について,  $f$  の関数形を次式で表した.

$$f = J_{\tau} \left( \frac{\gamma_f}{N_f} \right)^{m_{\tau}}, \quad f = J_{\sigma} \left( \frac{\varepsilon_f}{N_f} \right)^{m_{\sigma}} \quad (13)$$

さらに  $\gamma_f/N_f$  と  $\varepsilon_f/N_f$  はラチェットひずみの平均累積速度とみなすことができ, 式(7)に組み込むことで平均累積速度の予測式が得られた.

$$\frac{\gamma_f}{N_f} = Q_{\tau} B_{\tau} \alpha \tau_{eqm} \gamma_p^{r_{\tau}}, \quad \frac{\varepsilon_f}{N_f} = Q_{\sigma} B_{\sigma} \alpha \tau_{eqm} \gamma_p^{r_{\sigma}} \quad (14)$$

式(14)の形式によってラチェットひずみの平均累積速度を等価平均応力  $\tau_{eqm}$  と関係付けることができると考えた. これによって, 付加する静的荷重が 0 の場合はラチェット変形の累積速度も 0 になる. また, これによって塑性せん断ひずみ振幅  $\gamma_p$  と関係付けることができると思われる.

式中の各係数は, ラチェットひずみの測定結果を用いて定めることが可能である.

以上のことから, 実験により決定すべき材料定数を多数含んでいるものの, 静的荷重付加条件下での寿命  $N_f$  は式(12)より求めることができる.

## 3. 材料の変形挙動と疲労寿命

### (1) 供試材と試験条件

前章で提案した静的荷重の影響を見積もった寿命予測式の妥当性を検討するために確認実験が必要となる. そこで, 実験に用いる供試材は, 機械構造用中炭素鋼 JIS S45C, オーステナイト系ステンレス鋼 JIS SUS316L である. それらの化学成分を表 1 で示す. 中炭素鋼 JIS S45C は, 真空炉で 850°C で一時間焼きなましを行い, JIS SUS316L は焼きなましと同様の効果がある溶体化処理を行ったものを機械加工し, それぞれ Fig2 に示す中空試験片を作成した.

鷺宮製作所製の電気油圧式サーボ試験機 (容量: 軸力 100kN, ねじり 1050N·m) を使用し, 室温において荷重制御下で疲労試験を実施した. 試験は両振りの繰返しねじりとこれに静的ねじり及び引張りを付加した場合について行い, 荷重は正弦波で負荷した. ねじり応力振幅  $\tau_a$  と静的引張り応力  $\sigma_m$  は公称応力である.

荷重制御試験は, 高サイクルから低サイクル域までの広範囲の寿命域で試験を行った. 純ねじりに静的ねじりとトルクと静的引張り荷重を付加した試験を行った. 高サ

イクル域の場合は中炭素鋼  $\tau_m=55,104,110$  MPa  $\sigma_m=96,176,180$  をステンレス鋼は  $\tau_m=104$ MPa,  $\sigma_m=180,210$ MPa の平均応力を付加した。また、低サイクル域では両材料ともに等価応力比  $R_\tau=\tau_{eqmin}/\tau_{eqmax}=-0.9,-0.8$  一定となる平均応力を付加した。

また、塑性ひずみは多数試験片法で求め、試験片の試験部のみひずみを算出して使用している。ラチェットひずみは、試験部にマイクロビッカース硬さ試験機で、試験部に圧痕を打った。その圧痕の間隔の変化から、相対的な変位を求めラチェットひずみを算出した。

Table.1 Chemical composition and Mechanical properties

S45C	Chemical Composition %	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
			0.45	0.18	0.67	0.03	0.18	0.06	0.05
Mechanical Properties	Yield Stress in tension		371MPa						
	Tensile strength		591MPa						
	Elongation		30.50%						
	Contraction of Area		50.10%						
Heat treatment		850°C 1hour Annealed							
SUS316L	Chemical Composition %	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
		0.01	0.51	1.55	0.03	0.03	12	17.2	2.34
Mechanical Properties	0.2% proof Stress		347MPa						
	Tensile strength		570MPa						
	Elongation		54%						
	Contraction of Area		75%						

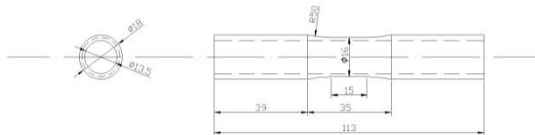


Fig.2. Configuration of specimens

### (2) 疲労寿命特性

Fig3 と Fig4 はそれぞれ中炭素鋼 S45C とオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の純ねじりに静的ねじりまたは静的引張りを付加した際の疲労寿命結果であり、縦軸に寿命の 1/2 時点での塑性せん断ひずみを使って評価したものである。その結果、両材料ともに純ねじりの回帰直線に対して静的ねじりもしくは静的引張りを加えた場合、いずれも短寿命となった。

これは荷重制御下における試験では、静的なねじりあるいは引張りの付加は、ねじり疲労に様々な影響を及ぼからである。まず、変形に関する観点からは、平均応力にとまなう塑性せん断ひずみ振幅  $\gamma_p$  の変化とラチェットひずみの累積による材料の延性低下が考えられる。また、き裂成長に関しては、静的荷重の付加によって生じる平均応力が臨界面上でのき裂成長を促進する。とくに低サイクル疲労寿命域では、繰返しクリープ変形前の影響が顕著になると考えられる

### (3) 繰返し応力-応答の変化

Fig5 と Fig6 は S45C と SUS316L の繰返し数比にとまな

う塑性せん断ひずみの変化を示したグラフである。S45C は、純ねじりは繰返し数にとまなせん断塑性ひずみは減少する。つまり、完全両振り繰返しねじりに負荷によって加工硬化することを示している。一方、SUS316L は、純ねじりにおいて繰返し数比にとまな塑性せん断ひずみが増大し、S45C とは違い軟化挙動を示した。

式(1)を用いて、純ねじりの繰返し応力-ひずみ応答を求めた。その結果、

純ねじりにおいて S45C の場合、 $k_0=619.8$ MPa,  $n_0=0.194$  SUS316L は  $k_0=511.8$ MPa,  $n_0=0.132$  であった。静的荷重を付加した時の繰返し応力-ひずみ応答を見ると、静的ねじりを付加した場合は、S45C の場合、 $k_0=625.8$ MPa,  $n_0=0.188$  SUS316L は  $k_0=528.7$ MPa,  $n_0=0.116$ , 静的引張りを付加した場合は S45C の場合、 $k_0=539.0$ MPa,  $n_0=0.170$  SUS316L は  $k_0=507.7$ MPa,  $n_0=0.126$  となった。つまり、静的ねじりを付加することによって、純ねじりと比較して相対的に加工硬化が促進されたことを示している。一方、静的引張りを付加した場合は、個々に見ると純ねじりよりも硬化したのものもあるが、軸方向の変形が促進され断面積の減少により塑性せん断ひずみが上昇したのものがある。それによって、静的引張りを付加した場合は純ねじりに対して相対的に軟化したような傾向を示したと考えられる。

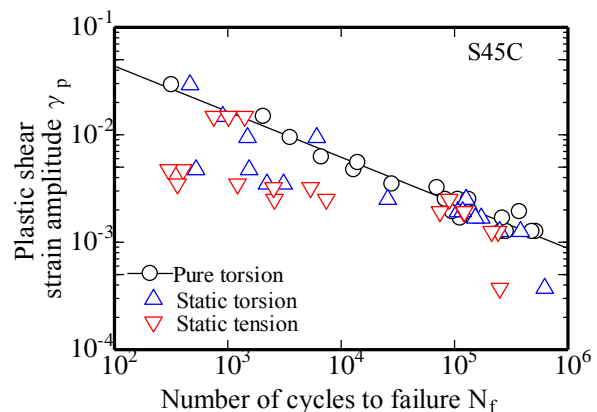


Fig.3. Coffin-Manson plot in S45C

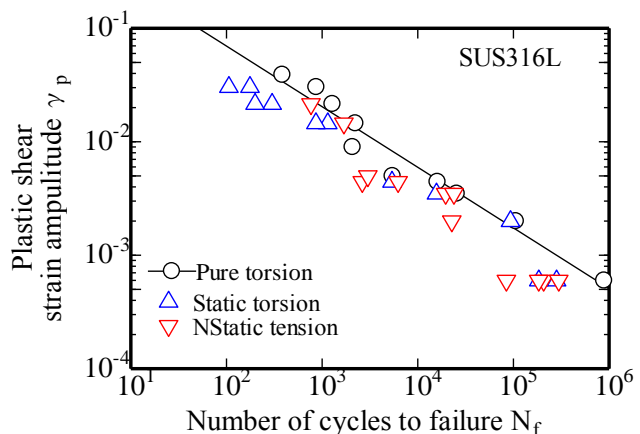


Fig.4. Coffin-Manson plot in SUS316L.

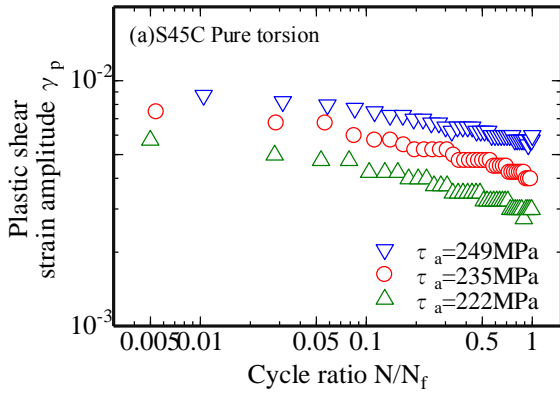


Fig. 5. Variation of plastic shear strain amplitude  $\gamma_p$  with cycle ratio for S45C in pure torsion.

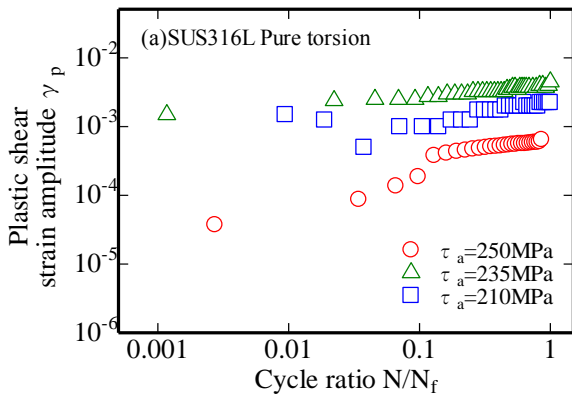


Fig. 6. Variation of plastic shear strain amplitude  $\gamma_p$  with cycle ratio for SUS316L in pure torsion.

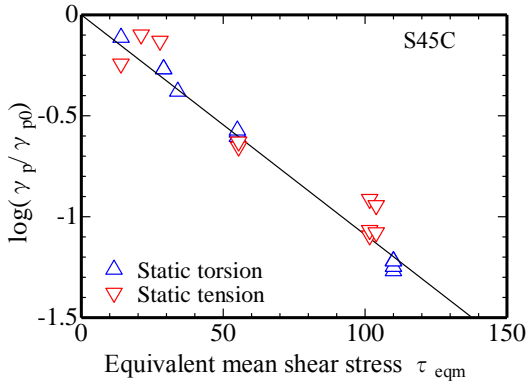


Fig. 7.  $\log(\gamma_p/\gamma_{p0})$  versus equivalent mean shear stress  $\tau_{eqm}$  for S45C.

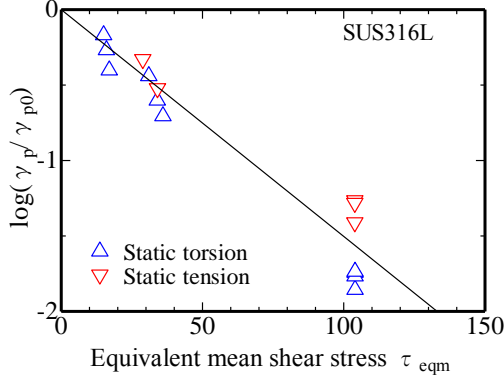


Fig. 8.  $\log(\gamma_p/\gamma_{p0})$  versus equivalent mean shear stress  $\tau_{eqm}$  for SUS316L.

式(5)は $\tau_{eqmax} = const$ での直線の傾き  $\alpha$  を示しており、Fig7と8は両材料において式(5)の両辺の値をプロットして回帰直線の傾き  $\alpha$  を示したものである。その結果、S45Cの場合、 $\alpha = -0.0110$ 、SUS316Lの場合  $\alpha = -0.0156$ であった。つまり、引張り圧縮だけでなく、ねじり、ねじりと引張りの組合せである等価応力で一般化しても成り立つことを示している。傾き  $\alpha$  が定まることによって平均応力が付加されたときの塑性ひずみ振幅  $\gamma_p$  を予測することができると考えられる。

#### (4) ラチェット変形の累積

繰返しねじりに静的ねじりと引張りを付加することによって、せん断と引張りのラチェットひずみ  $\gamma_c$  と  $\epsilon_c$  が発生する。

式(7)、(8)中の係数  $A_\tau$ 、 $\beta_\tau$ 、 $A_\sigma$  及び  $\beta_\sigma$  は繰返しせん断応力  $\tau_a$  と等価平均せん断応力  $\tau_{eqm}$  あるいは等価最大せん断応力  $\tau_{wqmax}$  に依存し、平均応力下での塑性せん断ひずみ振幅  $\gamma_p$  も同変数に依存することから、これらの係数はこの  $\gamma_p$  を用いて表すことができる。そこで、Fig9で炭素鋼の各係数と塑性せん断ひずみ振幅  $\gamma_p$  の相関図を示す。この図の回帰直線から各定数を求めることができる。

一方で、SUS316Lも同様の方法で係数を求めることができる。

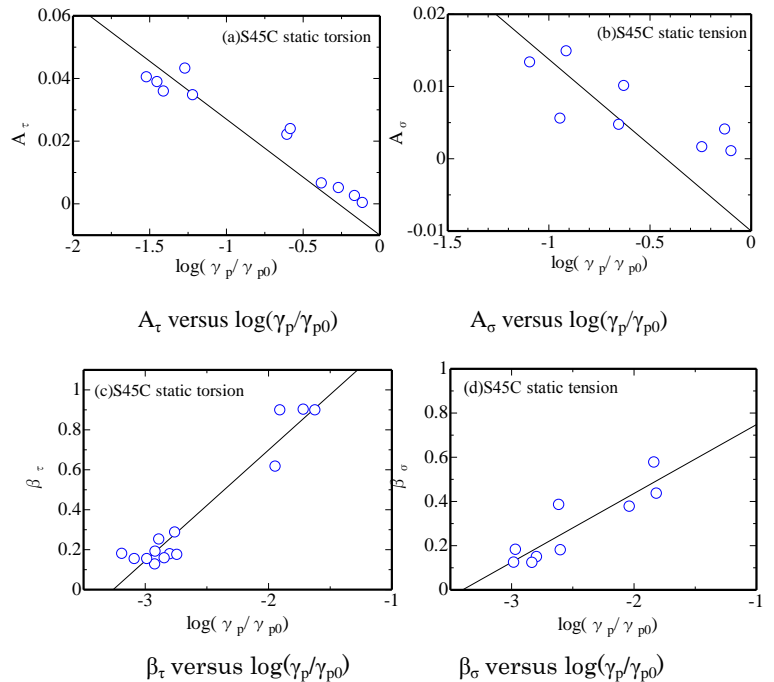


Fig. 9. The parameters versus  $\log(\gamma_p/\gamma_{p0})$  for S45C.

#### 4. 実験結果の検証

これまでに繰返し応力-ひずみ応答の変化の予測、破壊時のラチェットひずみの累積の検証してきた。そこで、最後に式(13)中におけるラチェット変形による寿命減少を表す係数  $f$  を求める必要がある。

式(13)において指数  $b$  が  $a$  に等しいものとする、関数  $f$  とこれらの量の関係は両対数線図上の直線で近似することができる。その相関図を Fig10 と 11 で示す。

また、平均的なラチェットひずみの累積速度  $\gamma_p/N_f$  及び  $\epsilon_p/N_f$  は、平均等価せん断応力が 0 のとき 0 となることが明らかである。これまでに、寿命評価するために必要な定数を両材料ともに全て求めたので、その定数全てを表 2,3 に示す。

そして、式(12) 指数  $b$  が  $a$  に等しいものとして、新たに等価塑性せん断ひずみ  $\gamma^*$  を定義し以下に示す。

$$\gamma^* = \left( \gamma_p + k \frac{\sigma_m}{E} \right) e^{u|\tau_{ml}|} + f \quad (15)$$

式(15)で示した等価塑性せん断ひずみを用いて、両材料の寿命を評価した。その結果を Fig12 で示す。様々な静的荷重条件に対するプロットは、今回試験を行ったあらゆる寿命域にわたって、純ねじりの結果に対する回帰直線とほぼ一致している。

Table.2 Material constants of S45C.

a	H	$n_0$	$k_0$ MPa	$\alpha$	$B_1$	$B_2$
0.4541	0.4021	0.194	619.8	-0.0110	$-2.842 \times 10^{-2}$	$-1.147 \times 10^{-2}$
$C_1$	u	$D_1$	$C_2$	$D_2$	k	$J_1$
1.804	0.00523	0.5433	1.059	0.3116	0.00295	0.68
$m_1$	$J_2$	$m_2$	$Q_1$	r	$Q_2$	$r_2$
2.01	1.78	0.55	$1.27 \times 10^6$	3.61	$4.42 \times 10^3$	3.10

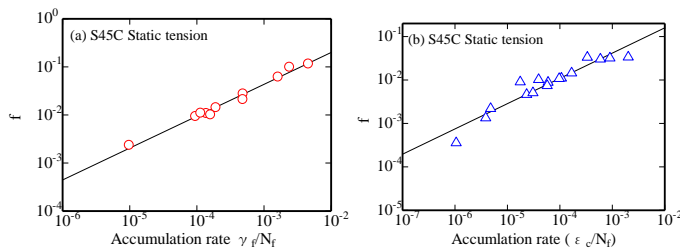


Fig.10. The parameter  $f$  versus accumulation rate for S45C.

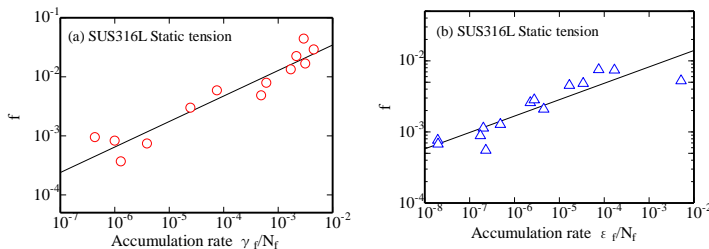


Fig.11. The parameter  $f$  versus accumulation rate for SUS316L.

このことから、この修正したせん断ひずみに基づくモデル、式(13)を用いることにより、本供試材のねじり疲労寿命に及ぼす静的荷重の影響をうまく説明できることが示された。

#### 5. 結論

静的なねじりまたは引張りを受ける繰返しねじり下の広範な寿命域における疲労寿命の評価法について検討した。臨界面上でのき裂成長に及ぼす平均応力の影響を考慮したせん断ひずみ基準のモデルに、静的荷重の付加にともなう繰返し応力-ひずみ応答の変化とラチェットひずみの累積が寿命に及ぼす影響を組み込んだ等価塑性ひずみを求めた。

硬化/軟化特性の異なる二種類の鋼材を用いて上記の負荷条件下において疲労試験を行い、得られた寿命試験結果にこの寿命評価式を適用したところ、その妥当性が確認された。

#### 参考文献

- (1) C. H. Wang et al., Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 14, 2/3, (1991), pp.293-307
- (2) G. Marquis, ECF 13, (2000), pp. 1-8.
- (3) 遠藤達雄ほか, 材料, 34, (1985), pp.1200-1205.
- (4) F. Lorenzo et al., Mater. Sci. Eng., 62, (1984), pp.205-210.
- (5) W. Zhang et al., Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct, Vol. 20, No. 2, pp.167-177, 1997

Table.3 Material constants of SUS316L.

a	H	$n_0$	$k_0$ MPa	$\alpha$	$B_1$	$B_2$
0.570	1.137	0.132	511.8	-0.0156	$-5.287 \times 10^{-3}$	$-5.740 \times 10^{-7}$
$C_1$	u	$D_1$	$C_2$	$D_2$	k	$J_1$
1.612	0.00964	0.3794	3.294	0.7248	0.00320	0.993
$m_1$	$J_2$	$m_2$	$Q_1$	r	$Q_2$	$r_2$
0.54	17.65	0.787	$2.85 \times 10^5$	1.92	$4.53 \times 10^5$	1.73

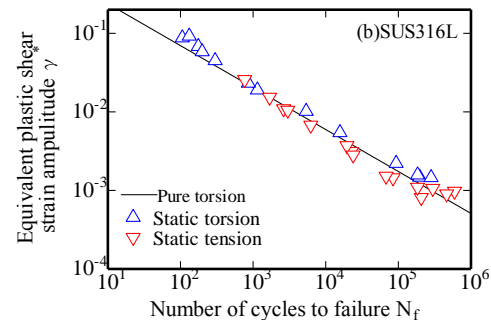
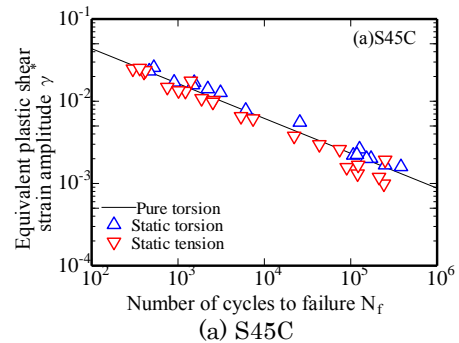


Fig.12. Modified Coffin-Manson plot under load-controlled tests.