

炭素鋼の疲労特性調査

城戸 竜太、倉本 英哲

焼き入れ焼き戻し処理を施した機械構造用炭素鋼 S45C を用いて、回転曲げ及び単軸引張疲労試験を行った。結果は以下のとおりである。

横軸を繰り返し回数の対数とし、縦軸を応力振幅とする S-N 曲線を求めたところ、応力振幅の低下と共に繰り返し数は増加した。回転曲げ及び単軸引張疲労試験において、同じ繰り返し数での応力振幅を比較すると、全ての試験片で、回転曲げ疲労の試験結果の方が、大きくなっていた。また、すべての試験片、試験条件ごとに、疲労破壊しなくなる疲労振幅、いわゆる疲労限度を示した。試験結果は、日本材料学会標準で S-N 曲線を表す式として提案されている次式で整理した。

$$\sigma_a = -A \log_{10} N_f + B \quad (N_f < N_w) \quad (1)$$

$$\sigma_a = E \quad (N_w \leq N_f) \quad (2)$$

ここで、 σ_a は応力振幅、 A は回帰直線(傾斜部)の勾配、 N_f は破壊するまでの繰り返し数、 N_w は疲労破壊しなくなる限界の繰り返し数、 B は回帰直線(傾斜部)の切片、 E は疲労限度である。

(1)、(2)式の A 、 B 、 E の値と引張強さの関係を求めたところ、 A 、 B 、 E の全てで、試験片の引張強さの上昇に伴い、値が大きくなる傾向を示した。

横軸に平均応力、縦軸に応力振幅をとる疲労限度線が直線で表されるものと仮定し、実験結果から疲労限度線図を求め、疲労設計で用いられることの多い代表的な疲労限度線図と比較した。代表的な疲労限度線としては、グッドマン線、修正グッドマン線、ゲルバー線、ゾーダーベルグ線があり、これらは、引張強さ、降伏応力などの静的強度を用いて、疲労限度線を予測するものであるが、今回、本報告のすべての実験結果と一致する線図は無かった。このことから、疲労限度線が、単純な静的強度のみで整理されるものではなく、金属組織の違い等によるその他の材料特性の影響によっても変化するものと考えた。

キーワード：金属疲労、疲労限度、平均応力、S-N 曲線、疲労限度線図

1. 緒言

金属製品、部品の破損原因の 7~8 割は、金属疲労によるものであると言われている⁽¹⁾。金属疲労とは、材料の強度以下の負荷であっても、繰り返し負荷されることで、破壊に至る現象である。金属疲労による破壊は、目視では、ほとんど変形が確認できない状態で進行していき、ある時突然破壊に至ることになる。疲労による製品、部品等の破壊事故を防ぐためには、使用する材料の疲労特性を把握することが不可欠である。

材料の疲労特性を調べる方法として、繰り返し応力

を負荷する疲労試験がある。疲労試験では、図 1 のような正弦波の応力を試験片に加え、破壊するまでの繰り返し数 N_f を計測する。ここで、応力の最大値を σ_{max} 、最小値を σ_{min} とすると応力振幅及び平均応力は、それぞれ、 $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ 、 $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$ で表される。疲労試験の結果は、横軸に繰り返し数 N の対数、縦軸に応力振幅 σ_a で整理することが一般的であり、これは S-N 曲線と呼ばれている。多くの鉄鋼材料における S-N 曲線を見てみると、およそ $10^6 \sim 10^7$ 回の繰り返し数で、これ以上回数を増やしても破断まで至らない下限の応力振幅が存在する。これを疲労限度と呼び、強度的に

高い信頼性を要求される機械装置を設計する場合には、発生する応力振幅を疲労限度以下に抑えることが基本となる。

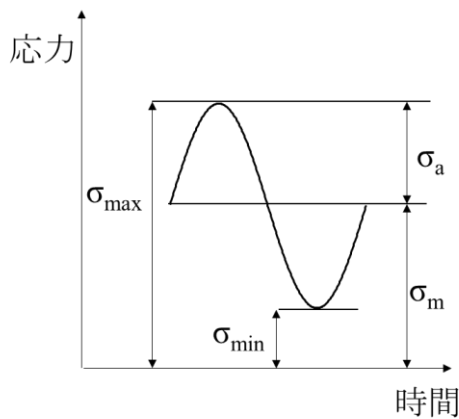


図1 応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の関係

代表的な疲労試験方法として、回転曲げ疲労試験があり、日本産業規格に試験方法が規定されており、広く普及している⁽²⁾⁽³⁾。他に、引張、曲げ、ねじりといった負荷方法での疲労試験も一般的に行われる。一方で、疲労試験には多くの時間を要することから、引張強さや硬さを用いて疲労限度を近似的に推定している。

疲労強度は、残留応力の影響を強く受けることは良く知られている。例えば、溶接部で、引張残留応力場であれば疲労強度は低下し、反対に圧縮残留応力場であれば、疲労強度は向上する。平均応力 σ_m については、この残留応力と同じ効果を示すもので、やはり、引張側の平均応力で疲労強度は低下し、圧縮側の平均応力で疲労強度は向上する。ここで、S-N 曲線は、繰り返し数 N と応力振幅 σ_a のみで整理されるため、平均応力 σ_m の影響を読み取ることはできない。平均応力 σ_m を考慮した形で、疲労強度を評価するためには、図2に示す疲労限度線図を用いることになる。図中の青線で示す三角形は、降伏限界であり、縦軸と横軸に交わる点の σ_Y は降伏応力を示している。斜めの赤線が疲労限度線と呼ばれるもので、この線以下の領域では疲労破壊しないことを示している。

代表的な疲労限度線には、グッドマン線、修正グッドマン線、ゾーダーベルグ線、ゲルバー線があり、これらは、引張強さ、降伏応力などの静的強度を用いて、疲労限度線を予測するものである。なお、グッドマン線、修正グッドマン線、ゾーダーベルグ線については、比例式となっている。

図2中の応力比 R は、最小応力 σ_{\min} を最大応力 σ_{\max} で除した値 ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) であり、応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の関係を表す方法として用いられる。応力比 $R=-1$ の場合、同じ大きさでの引張と圧縮応力が交互に負荷されるので、図1における平均応力 σ_m を0とした応力波形で表される。また、応力比 $R=0$ の場合、図1における最小応力 σ_{\min} を0とした応力波形で表される。図2において、応力比 $R=0$ の場合、最小応力 σ_{\min} が0となり、 $\sigma_m = \sigma_a$ となるため、グラフの横軸に対して45°のライン上(図中破線で示す)で、疲労限度を示すことになる。

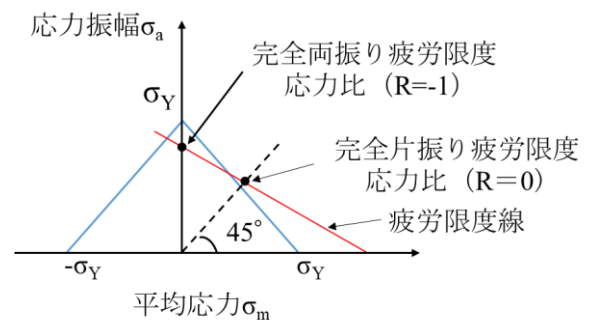


図2 疲労限度線図

本報告では、焼き入れ焼き戻し処理した機械構造用炭素鋼 S45C について、回転曲げ疲労及び単軸引張疲労試験を行い、疲労特性を調査した。

2. 試験方法

2.1 試験片

供試材は、市販の機械構造用炭素鋼 S45C であり、その組成を表1に示す。

供試材に、焼き戻し温度が、200°C、500°C、650°Cの焼き入れ焼き戻し処理を行い、図3に示す試験片形状に機械加工し、回転曲げ及び単軸引張疲労試験に供した。焼き入れ処理の処理温度は、870°Cとし、2時間保持後に水焼き入れを行った後、それぞれの戻し温度で2時間の焼き戻し処理を行った。熱処理は、焼き戻し温度が500°C、650°Cの場合、直径24mmの丸棒の状態で

表1 供試材の化学成分(mass%)

C	Si	Mn	P	S
0.47	0.25	0.71	0.023	0.013

行い、焼き戻し温度が 200°C の場合、歩留まり向上のため、直径 20mm の丸棒の状態で行った。なお、焼き戻し温度が 200°C の場合の単軸引張疲労試験に供した試験片形状は、試験治具の強度不足のため、図 3(c) の形状とした。以降、本報告では、熱処理していない試験片を未処理材、焼き入れ焼き戻しを行った試験片を、その焼き戻し温度の違いにより、200°C 材、500°C 材、650°C 材と呼ぶ。

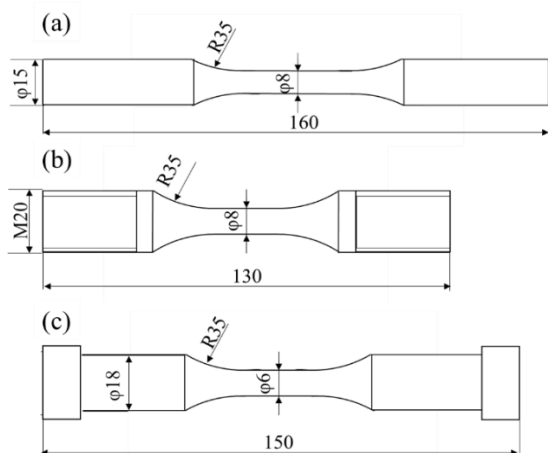


図 3 試験片の形状及び寸法

- (a) 回転曲げ疲労試験片
- (b) 単軸引張疲労試験片
- (c) 単軸引張疲労試験片

2.2 金属組織観察

熱処理後の試料を切り出し、樹脂埋めした後、研磨、琢磨により鏡面に仕上げた。その後、3% ナイタル液による腐食を行い、金属顕微鏡（ライカマイクロシステムズ製 DMI8 型）で観察を行った。

2.3 引張試験

試験方法は、JIS Z 2241 の金属材料の引張試験方法による。ただし、試験速度を 2mm/min の一定速度とし、標点距離を 25mm とした。

試験片形状は、図 3(b) に示す単軸引張疲労試験片と同じとし、(株)島津製作所製 AG-250kNI で試験を実施した。

2.4 ビッカース硬さ試験

試験方法は、JIS Z 2244 のビッカース硬さ試験方法による。試験装置は、(株)フューチャアテック製 FM-

ARS7000 型を使用し、試験力は、0.9807N とした。

2.5 疲労試験

疲労試験として、回転曲げ疲労試験及び、単軸引張疲労試験を行った。

回転曲げ疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験機（株）東京衡機製）で実施した。応力比は-1 であり、回転数は、3600rpm で一定とした。

単軸引張疲労試験は、油圧サーボ式疲労試験機（株）島津製作所製 EHF-UD-100KN 型）で行った。

応力比 R を 0.1 とした片振り正弦波の負荷とし、周波数は 17Hz とした。

3. 試験結果及び考察

3.1 金属組織観察

図 4 にそれぞれの試験片の光学顕微鏡による組織観察結果を示す。

図 4(a) より、未処理材は、典型的なフェライト・パーライト組織であることが分かる。また、図 4(b) より、200°C 材はマルテンサイト組織であることが分かる。図 4(c)、(d) は、ほぼ同様の組織形態で、微細なパーライト組織になっており、粒界部には、フェライトの析出が見られた。図 4(c) と (d) を比較すると、図 4(d) の 650°C 材で、僅かに結晶粒が粗大化している。

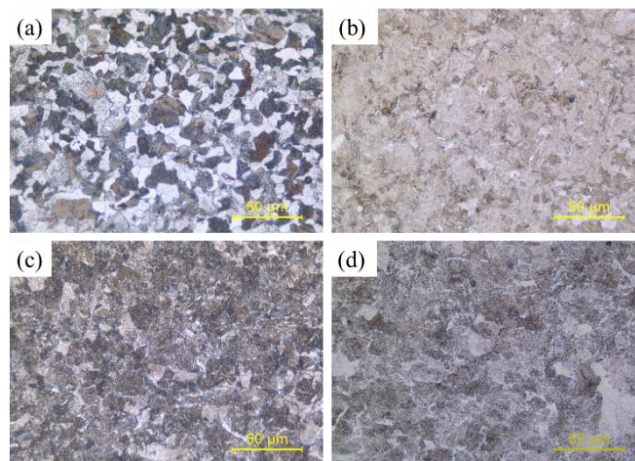


図 4 各試験片の組織観察結果

- (a) 未処理材
- (b) 200°C 材
- (c) 500°C 材
- (d) 650°C 材

表 2 各試験片の引張特性及びビッカース硬さ

試験片	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	真破断応力 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	ビッカース硬さ HV0.1
未処理材	583	799	995	16	34	236
200°C材	1340	1688	1990	6	19	582
500°C材	685	902	1549	25	59	256
650°C材	489	705	1315	31	64	226

3.2 静的強度特性

表 2 に、引張試験及び硬さ試験の結果を示す。

ビッカース硬さは、200°C材、500°C材、未処理材、650°C材の順に小さくなった。焼入れ焼き戻し処理を行った試験片について、焼き戻し温度の上昇に伴い、引張強さ、耐力は小さくなり、伸びは大きくなった。未処理材は、500°C材、650°C材の間の引張強さと耐力を示したが、伸びは500°C材よりも小さくなった。一般的に、硬度の低下に伴い、伸びは大きくなる傾向を示す。

しかし、未処理材は、この関係になかった。典型的なフェライト・パーライトの組織形態から、焼きなまし、又は、焼きならし処理をしたものではないかと考える。

3.3 疲労強度特性

3.3.1 S-N 曲線

図 5 に、各試験片の回転曲げ及び単軸引張疲労試験結果をまとめた S-N 曲線を示す。

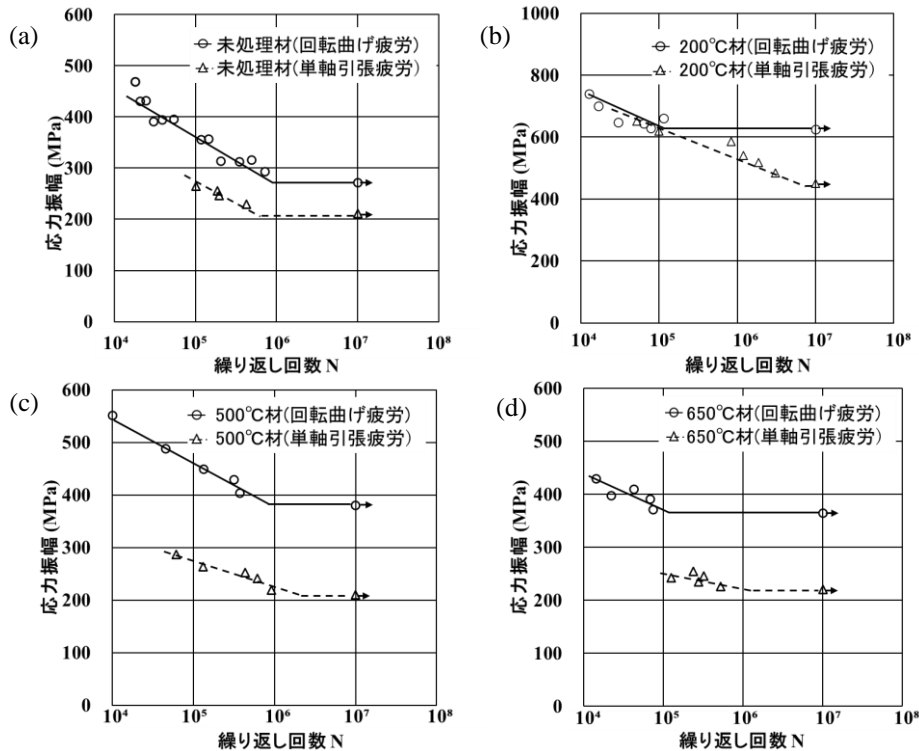


図 5 各試験片の回転曲げ及び
単軸引張疲労における S-N 曲線

- (a) 未処理材
- (b) 200°C材
- (c) 500°C材
- (d) 650°C材

図中の矢印は、繰り返し数 10^7 回までに破断しなかった試験片を表す。図より、すべての試験片及び試験方法で、応力振幅の低下に伴い繰り返し数は増加していき、ある応力振幅以下では、疲労破壊しなくなる。この破壊しなくなる応力振幅が、疲労限度 E であり、表 3 に各試験片の疲労限度を示す。表中には、回転曲げと単軸引張疲労の疲労限度(σ_r 及び σ_t)とあわせて両者の比 (σ_t/σ_r) を示しているが、すべての試験片で単軸引張疲労の方が小さくなり、およそ 0.6~0.8 倍となっている。 σ_t/σ_r は、1 に近いほど平均応力の影響を受けにくいと言え、本報告での試験片では、未処理材、200°C材の方が 500°C材、650°C材のよりも、平均応力の影響を受けにくいことを示していると考えられる。

表 3 各試験片の疲労限度

材質	回転曲げ 疲労限度	単軸引張 疲労限度	疲労限度比
	σ_r	σ_t	
未処理材	271	212	0.78
200°C材	625	450	0.72
500°C材	380	216	0.57
650°C材	371	220	0.59

S-N 曲線を表す式として、日本材料学会標準⁽⁴⁾で、次式が提案されている。

$$\sigma_a = -A \log_{10} N_f + B \quad (N_f < N_w) \quad (1)$$

$$\sigma_a = E \quad (N_w \leq N_f) \quad (2)$$

ここで、 σ_a は応力振幅、 A は回帰直線(傾斜部)の勾配、 N_f は破壊するまでの繰り返し数、 N_w は疲労破壊しなくなる限界の繰り返し数、 B は回帰直線(傾斜部)の切片、 E は疲労限度である。表 4 に、実験結果により求めた式(1)、(2)の A 、 B 、 E の値を示す。一般的には、静的強度が高いほど、疲労強度は高くなる⁽⁵⁾。このことから、式(1)、(2)中の B 、 E については、引張強さ σ_B に依存するものと考えられる。

図 6(a)、(b) に σ_B と B 、 E の関係を示す。図から、 B 、 E 共に、 σ_B の増加に伴い、増加することが分かる。また、単軸引張疲労よりも回転曲げ疲労の値の方が、大きくなっている。

次に、疲労破壊の進展速度は、クラックの進展速度に依存する。いわゆる、予寿命と呼ばれるものである。

表 4 実験より求めた式(1)、(2)における A 、 B 、 E の値

材質	回転曲げ疲労			単軸引張疲労		
	A	B	E	A	B	E
未処理材	96	847	271	57	553	212
200°C材	113	1194	625	84	1053	450
500°C材	87	899	380	44	497	216
650°C材	58	665	371	26	379	220

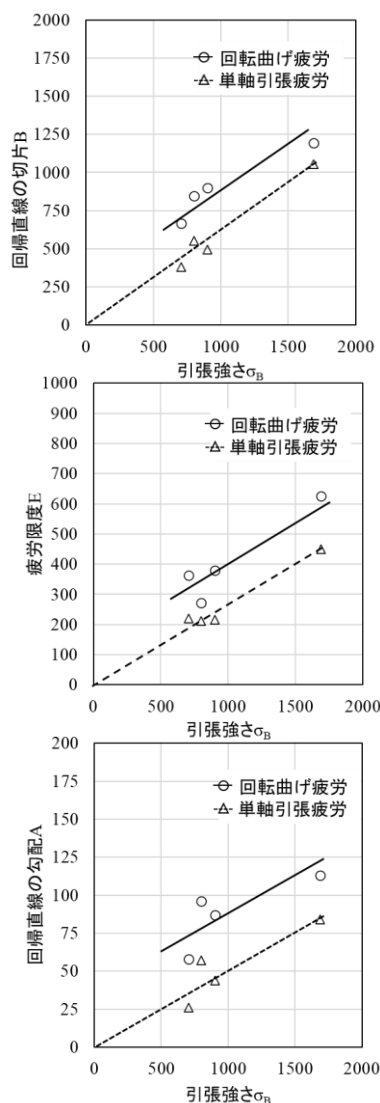


図 6 引張強さ σ_B と B 、 E 、 A の関係

- (a) 回帰直線の切片 B
- (b) 疲労限度 E
- (c) 回帰直線の勾配 A

後藤ら⁽⁶⁾は、同じ強度の SCM 材と SCr 材において、クラックの進展速度の違いで、両者の予寿命が異なることを報告し、このとき、SCr 材の回帰直線（傾斜部）の勾配の方が大きく、この理由として、クラックの進展速度が大きくなっていったことを報告している。つまり、A は、値が大きくなるほど、クラックの進展速度が速いことを表していると考えられる。ここで、図 6(c) に σ_B と A の関係を示す。 σ_B の増加に伴い A の値は、大きくなっており、これは、一般的に、強い(硬い)材料ほど、クラックの進展速度が速くなることを表していると考ええる。

3.3.2 疲労限度線図

各試験片の疲労限度線図を図 7 に示す。縦軸は応力振幅 σ_a 、横軸は平均応力 σ_m である。本実験で得られた

疲労限度線は、回転曲げ(R=-1)及び単軸引張(R=0.1)での試験結果を求め、2点を通る直線で示した。

任意の平均応力が作用するときの疲労限度線図として、次式のグッドマン線、修正グッドマン線、ゲルバー線、ゾーダーベルグ線が提案されている。一般的な疲労設計では、修正グッドマン線図が利用されることが多いようである。

$$\sigma_a = \sigma_{w0}(1 - \sigma_m / \sigma_T) \quad (3) \quad \text{グッドマン線}$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0}(1 - \sigma_m / \sigma_B) \quad (4) \quad \text{修正グッドマン線}$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0}[(1 - \sigma_m / \sigma_B)^2] \quad (5) \quad \text{ゲルバー線}$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0}(1 - \sigma_m / \sigma_Y) \quad (6) \quad \text{ゾーダーベルグ線}$$

ここで、 σ_a は応力振幅、 σ_{w0} は応力比 R=-1 での疲労限度、 σ_m は平均応力、 σ_T は真破断応力、 σ_B は引張強さ、 σ_Y は降伏応力である。

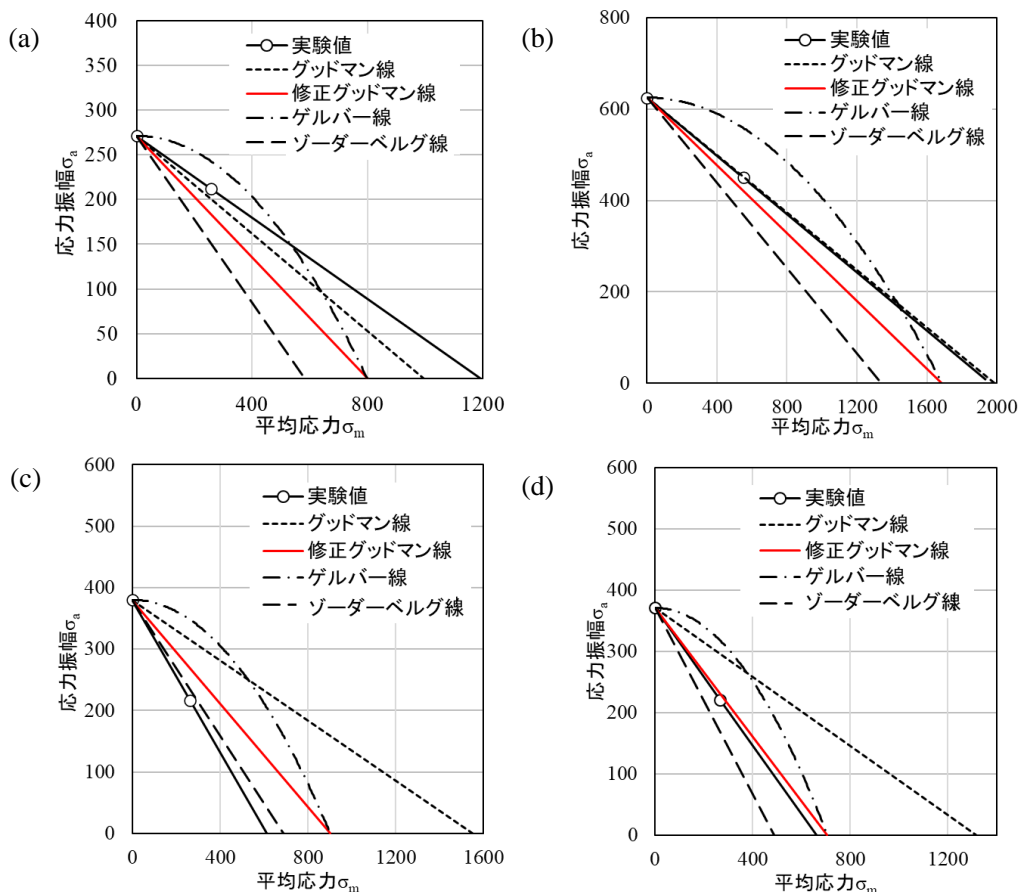


図 7 各試験片の疲労限度線図

- (a) 未処理材
- (b) 200°C材
- (c) 500°C材
- (d) 650°C材

図中には、実験で得られた疲労限度線図と共に、式(3)～(6)で求めた疲労限度線図を併記している。修正グッドマン線図を基準にしてみると、650°C材だけが実験結果から求めた疲労限度線図とよく一致していることが分かる。ここで、未処理材及び200°C材については、安全側であるものの、500°C材については危険側となっている。つまり、500°C材を使用し、修正グッドマン線図を用いて疲労設計すると、疲労破壊してしまう可能性が高くなる。最も安全側のゾーダーベルグ線図を用いて疲労設計した場合でも500°C材については僅かに危険側の設計となり、反対にその他の材料については、過剰品質になる。以上を一例として、提案されている疲労線図では、どのような材料を使用するか、また、どの線図を用いるかによって危険な設計にも、過剰品質の設計にもなることが示唆される。現在、引張特性や硬さなどの基本的な材質特性をもとに求めることのできる高精度で万能の疲労限度線図は無く、適正な設計を行うにあたっては、実験的に線図を求める必要があると考える。

4. 結言

焼入れ焼き戻し処理を施した機械構造用炭素鋼S45Cを用いて、回転曲げ及び単軸引張疲労試験を行った。結果は以下のとおりである。

(1) 横軸を繰り返し回数の対数とし、縦軸を応力振幅とするS-N曲線を求めたところ、応力振幅の低下と共に繰り返し数は増加した。回転曲げ及び単軸引張疲労試験において、同じ繰り返し数での応力振幅を比較すると、全ての試験片で、回転曲げ疲労の試験結果の方が、大きくなっていた。また、すべての試験片、試験条件ごとに、疲労破壊しなくなる疲労振幅、いわゆる疲労限度を示した。得られたS-N曲線について、日本材料科学会で提案されている次式で整理し、A、B、Eを求めたところ、A、B、Eの全てで、試験片の引張強さの上昇に伴い、値は大きくなる傾向を示した。

$$\sigma_a = -A \log_{10} N_f + B \quad (N_f < N_w) \quad (1)$$

$$\sigma_a = E \quad (N_w \leq N_f) \quad (2)$$

式(1)、(2)において、B及びEは材料強度に依存する値であり、また、Aは破壊の進展速度に依存する値であると考えられる。つまり、強い材料ほど疲労強度は強く、しかし、破壊し始めてからの破壊の進展速度は速いことを表している。

(2) 横軸に平均応力、縦軸に応力振幅をとる疲労限度線図が直線で表されるものと仮定し、実験結果より線図を求め、疲労設計で用いられることの多いグッドマン線、修正グッドマン線、ゲルバー線、ゾーダーベルグ線と比較した。これらの線図は、降伏応力、引張強さなどの静的強度を用いて、疲労限度線を予測するものであるが、本報告の全ての試験結果と一致する線図は無かった。このことから、疲労限度線は、単純な静的強度のみで整理されるものではなく、金属組織の違い等によるその他の材料特性の影響によっても変化するものと考えられる。適正な疲労設計を行うためには、提案される疲労限度線図のみでは困難であり、実験的に線図を求める必要があると考える。

おわりに、本調査の実施に際して、使用した電気炉、湿式試料切断機、試料埋込機、研磨機、実体顕微鏡、マイクロビッカース硬度計、疲労試験機は、公益財団法人JKAの公設工業試験研究所等における機械設備拡充により整備したものである。

その他、研究への御協力、御支援いただきました関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 日本材料学会編：疲労設計便覧(1995) 養賢堂
- (2) JIS Z 2274 「金属材料の回転曲げ疲れ試験方法」
- (3) JIS Z 2286 「金属材料の高温回転曲げ疲労試験方法」
- (4) 酒井らほか21名、金属材料信頼性評価標準—S-N曲線回帰法—、JSMS-SD-6-08、(2008)、日本材料学会
- (5) 石橋 正、金属疲労と破壊の防止(1973) 養賢堂
- (6) 後藤真宏、西谷弘信、阿部俊宏、宮川浩臣、日本機械学会論文集(A編)55巻512号(1989)