

自動車用材料における高強度鋼の適用およびその問題点 (第1報、高強度鋼およびその表面処理材の疲労強度特性)

高 行男・井藤賀 久岳

1. 緒 言

燃費向上を達成するためには、エンジンの改良による高効率化、トランスミッションの改良による伝達損失の低減および車両の軽量化などが考えられる。しかし安全対策による車両構造の改良や新技術の採用により車両重量は増加傾向にある。そのため車両の軽量化技術は重視されている⁽¹⁾。車両の軽量化には、例えば、鉄鋼材料からアルミニウム合金などへの変更や樹脂化などの使用部材の変更および使用部材の高強度化による薄肉化がある。

ところで、機械・構造物に用いられている鉄鋼材料は繰返し数が 10^7 回で破壊を生じない最大の応力を疲労限度とし、これを一般に機械・構造物の疲労設計の基礎資料としている。しかし、高強度鋼や表面処理材の中には、通常の疲労限度以下の応力でも繰返し数 10^7 回以上で疲労破壊を起こすものがあることが確認された⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。このことは従来の疲労設計に重大な問題を提起する。

以上の観点から、本報告では、まず高強度鋼を自動車材料として使用するに当たり必要性和問題点について述べる。次に、ベアリング等に用いられる高強度鋼である高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用いて疲労試験を行い、高強度鋼の疲労特性および内部起点型破壊について検討し、同材に表面処理(ショットピーニング処理および微粒子衝突処理)を施した試験片に対して同様の疲労試験を行い、未処理材の結果と比較、検討した。

2. 使用例および現状での問題点

2.1 使用例

環境問題を背景に今日、自動車が社会から求められていることの一つに省エネルギー化、すなわち燃費向上がある。近年、従来から規制の対象となっているCO、HC、NO_xおよび黒煙等だけでなく、地球温暖化防止の観点からCO₂の排出抑制も求められている。1997年に各国に対するCO₂削減目標が定められたことに伴い、日本でも1998年に「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(省エネ法)の改訂が行われた⁽⁶⁾。これにより、ガソリン自動車は2010年度を目標年度として、ディーゼル自動車は2005年度を目標年度として、新たな燃費基準を車両重量区分ごとに設定された。各対象自動車において新燃費基準が達成された場合の1995年度に対する燃費向上率を表1に示す。

燃費向上のためには、高効率のエンジンや伝達装置を開発することはもちろんであるが、車両重

量を軽減することが求められる。特にエンジンやトランスミッションなどの作動部品の重量軽減はその部品の慣性力が小さくなるため、その部品を支持しているシャフトやケースなどの重量も軽減できる。すなわち、一つの部品の重量軽減に伴いそれに付随する多くの部品の重量軽減も可能となる。部品等の重量軽減の方法としては次の2つがある。

- ・ 部材の変更(例えば、鉄鋼材料からアルミニウム合金などへの変更や樹脂化)
- ・ 部材の高強度化(材料自体の強度を増したり、表面処理を行うことによる高強度化)

自動車における高強度鋼および表面処理材の使用例としては、トランスミッション、軸受、等速ジョイント、コイルばね、ボルト類などがある。

2.2 問題点

高強度鋼や表面処理材は通常の鉄鋼材料とは異なる破壊形態を生じるため、これらを自動車等に使用した場合、次の点を認識する必要がある。従来、機械・構造物に用いられている鉄鋼材料は繰返し数が 10^7 回までの試験で破壊しなければ永久に疲労破壊は起こらないものとして、いわゆる疲労限度が決定されてきた。一般に機械・構造物の疲労設計において、この疲労限度を基準とした方法が広く普及している。すなわち、この疲労限度以下の応力域で使用される機械・構造物は、破壊することなく永久に使用できると考えられていた。しかし、高強度鋼や表面処理材の中には、繰返し数 $10^8 \sim 10^9$ 回まで疲労試験を続行すれば、通常の疲労限度以下の応力でも疲労破壊を起こすものがあることが確認された。このことは、従来の疲労限度を基礎とする疲労設計が不適切であり、機械・構造物の長期信頼性の保証においてきわめて重大な問題を提起した。この長寿命域での破壊形態は部材の表面からのき裂発生ではなく、内部にき裂が発生する、いわゆる内部起点型破壊が生じる。この内部起点型破壊は、金属内部に存在する介在物や欠陥を起点として発生し、fish-eyeと呼ばれる特徴的な破面を生じる。最近、高強度鋼等の内部起点型破壊に関する研究が盛んに行われているが、き裂の発生やその進展メカニズムは明確になっていない。

内部起点型破壊が生じた一例として日本精工のトロイダルCVTがあり、開発実験段階でfish-eyeが生じる破壊が確認された。これを解決するため、当初の高強度材よりも介在物の数を低減した超高清浄度の高強度鋼を使用している⁽⁷⁾。

3. 供試材および実験方法

3.1 供試材および試験片

表1 1995年度に対する燃費向上率

対象自動車	新燃費基準が達成された場合の1995年度に対する燃費向上率(目標年度)
ガソリン乗用自動車	22.8% (2010年度)
ガソリン貨物自動車(車両総重量2.5トン以下)	13.2% (2010年度)
ディーゼル乗用自動車	14.9% (2005年度)
ディーゼル貨物自動車(車両総重量2.5トン以下)	6.5% (2005年度)

本研究に用いた供試材は高炭素クロム軸受鋼SUI2であり、その化学成分および熱処理条件を表2および表3に示す。熱処理後の引張強さは、 σ_b :2316MPaである。熱処理後、図1に示す形状に機械加工した。応力集中係数は $\alpha=1.06$ であり、ほぼ平滑材と見なせる。この状態の試験片をUT材とする。

表面処理材としてUT材の表面に、表4に示す条件で微粒子衝突処理(FPB材)およびショットピーニング処理(SP材)を行った。FPB材は①、②の順に2段階に処理されている。なお、メッシュサイズ#300は粒径55 μ m程度である。

3.2 ショットピーニングとは

ショットピーニングとは冷間加工の一種で、無数の金属や非金属の球(ショット)を高速で金属表面に衝突させる表面処理方法である。ショットが高速度で材料の表面に衝突すると、表面層の硬さおよび圧縮残留応力が増加し、疲労強度が向上する。

また、耐摩耗性の向上、耐応力腐食割れ特性の向上、放熱性の向上、流体抵抗の減少等の効果がある。ショットは硬いので材料表面がへこみ、表面に丸いくぼみを残す。したがって、ショットピーニングを行った面は無数のくぼみ(痕)でおおわれるようになり梨子地模様となる。ショットピーニングは材料依存性が少ないことから、ばね、歯車、コネクティングロッド、クランクシャフトといった自動車部品から、ジェットエンジン、翼、ランディングギアなどの航空機関連、化学プラントの圧力容器など様々なところに利用されている⁽⁸⁾。

ショットピーニング処理の一種である微粒子衝突処理は、非常に小さなショット(直径:40~200 μ m程度、通常のショットピーニングのショット直径:500 μ m~数mm程度)を部材に対して100m/sec以上という非常に高速で噴射して処理を行う。そのため、ショットが衝突したときに瞬間的に熱が発生し、この熱により熱処理を行うことができる。これによって通常のショットピーニングよりもはるかに疲労強度が向上する。また、非常に細かい凹凸(マイクロプール)を形成するため、表面の面荒れが少なくそこに潤滑油が保持されるので摺動性が向上する⁽⁹⁾。摺動向上の使用例と

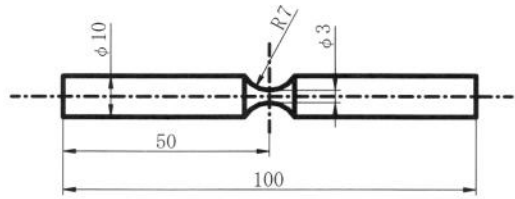


図1 疲労試験片の形状寸法

表2 化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
1.01	0.23	0.36	0.012	0.007	0.06	0.04	1.45	0.02

表3 熱処理条件

Material	Quenching	Tempering
SUI2	835℃ / 40min, O.Q.	180℃ / 120min, A.C.

表4 表面処理条件

		Mesh size (Material)	Arc height	Gauge pressure (MPa)	Bombarding time (sec)
FPB	①	#300 (FHS)	0.21mmN	0.6	30
	②	#300 (FHB)	0.12mmN	0.4	30
SP		ϕ 0.5mm (FHS)	0.27mmA	0.4	60

FHS: High speed steel, FHB: Ceramics

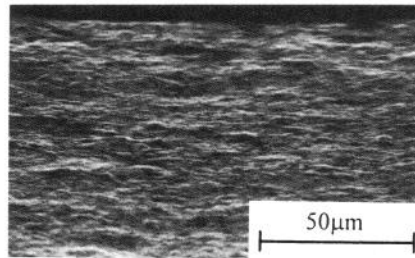
して、ホンダインサイトのピストンのスカート部がある⁽¹⁰⁾。

3.3 試験片の表面性状

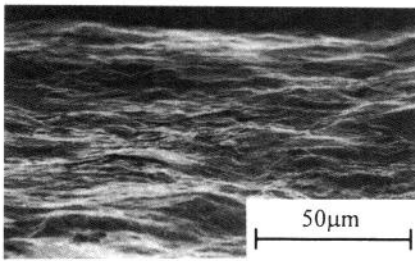
試験片表面のSEM写真を図2に示す。図から明らかなように、未処理材(UT材)には線状の研削溝が存在し、両処理材(FPB材およびSP材)には半球状のくぼみが認められる。ショット粒子の大きさの相違により、FPB材のくぼみの大きさはSP材のそれに比べて小さい。また、SP材のくぼみ周辺は大きく隆起していることがわかる。これを定性的に評価するためにそれぞれの表面粗さの測定を行った。最小断面部の表面粗さを3次元表面構造解析顕微鏡(Zygo New View 200)を用いて、同一試験片について4箇所測定した。その結果の平均値を表5に示す。FPB材の最大高さ粗さ R_z および算術平均粗さ R_a は未処理材とはほぼ同程度であるのに対して、SP材はそれらの約2倍である。

表5 表面粗さ

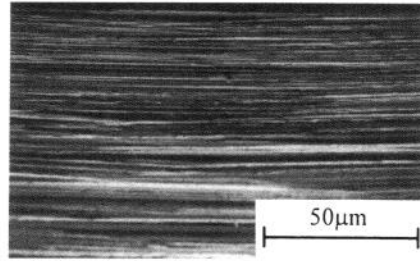
Material	R_z (μm)	R_a (μm)
FPB	3.060	0.514
SP	6.553	1.130
UT	2.797	0.381



(a) FPB



(b) SP



(c) UT

図2 試験片表面

次に、試験片内部方向にピッカース硬さ(測定荷重:2.9N)を測定した。その結果を図3に示す。表面処理によって両処理材の表面層の硬さは内部の母材部に比べて上昇しており、その影響深さは処理方法にかかわらず表面から $100\mu\text{m}$ 程度である。しかし、その領域におけるFPB材の硬さはSP材に比べてやや大きい。なお、深さ $100\mu\text{m}$ 以上において処理材と未処理材の硬さの相違が見られるが、これは供試材のロットの違いによるものと考えられる。

さらに、残留応力分布を測定した。その結果を図4に示す。測定にはX線応力測定装置(マック・サイエンスMO3X-HF)を用いて、表6の条件で同一試験片について最小断面部表面の4箇所測定した。深さ方向への測定は、表面層を順次電解研磨により除去することによって行った。なお

図4の各曲線は表面層除去による残留応力の再分布を考慮して測定値の補正を行った結果である。図から明らかなように、試験片表面の残留応力は未処理材では -600MPa 程度であるのに対して、処理材ではいずれも -1000MPa 以上の圧縮残留応力を生じている。また、未処理材では表面で最大圧縮残留応力を生じるのに対して、FPB材およびSP材ではそれぞれ表面から $20\mu\text{m}$ および $40\mu\text{m}$ 程度の内部で最大圧縮残留応力(-1500MPa 程度)を生じている。SP材の圧縮残留応力は内部方向にFPB材よりも緩やかに減少しており、その結果FPB材よりも深い、表面から約 $160\mu\text{m}$ まで圧縮残留応力が存在している。

3.4 実験方法

用いた疲労試験機は(株)ホーコス製の4連式片持ち回転曲げ疲労試験機(繰返し速度： 3150rpm)であり、室温大気中で疲労試験を行った。破断後の試験片破面を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察し、き裂発生近傍やfish-eyeの様相を詳細に調査した。

4. 結果および検討

4.1 未処理材の結果

未処理材(UT材)の疲労試験結果を図5に示す。SEMによる破面観察に基づいて表面起点型破壊のものは白印(Δ)、Fish-eyeを伴う内部起点型破壊のものは黒印(\blacktriangle)で表した。また図中の

各直線は表面起点型および内部起点型のそれぞれにおいて最小自乗法で求めた。図から明らかなように、高応力・短寿命域では通常の材料の破壊と同様に表面起点型であるのに対し、低応力・長寿命域では材料内部に存在する介在物を破壊起点とする内部起点型である。すなわち、応力に依存して破壊起点は遷移し、その $S-N$ 曲線は通常のそれとは異なり2段に折れ曲がる。この折れ曲がり部の応力(以後、遷移応力)は 1200MPa 程度である。

4.2 表面処理材の結果

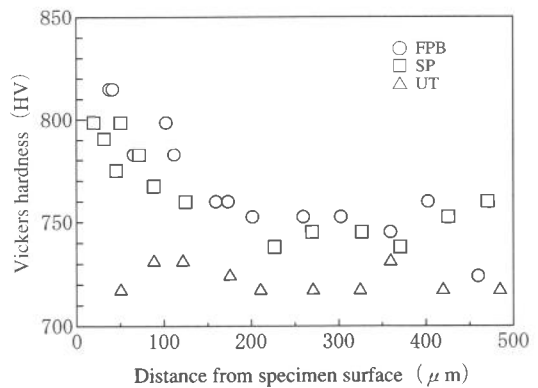


図3 ビッカース硬さ分布

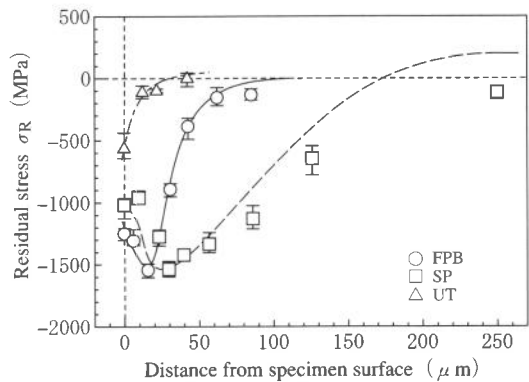


図4 残留応力分布

表6 X線残留応力測定条件

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction	211
Diffraction angle 2θ (deg.)	156
Stress Constant (MPa/deg.)	-293
Slit area (mm)	1×2
Tube voltage (kV)	30
Tube current (mA)	20
Incident angle (deg.)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30

表面処理材 (FPB材およびSP材) の疲労試験結果を図6に示す。図5と同様に表面起点型破壊を白印(○, □), fish-eyeを伴う内部起点型破壊を黒印(●, ■)で区別した。また, UT材の結果も併記した。両処理材ともUT材と同様に, S-N曲線は2段折れ曲がりを示し, 遷移応力以上の応力域では表面起点型, それ以下の応力域では内部起点型の破壊となる。両処理材の遷移応力は, FPB材では1800MPa, SP材では1550MPaとなり, UT材のそれに比べて高応力となっている。

両処理材とも表面処理による硬さ上昇と大きな圧縮残留応力の導入により, UT材の遷移応力以上の応力域においても表面からのき裂発生が阻止され, 内部からき裂が発生したと考えられる。FPB材に比べてSP材の遷移応力が低いのは, SP材の表面層の硬さおよび圧縮残留応力がFPB材よりも低いことと, SP材の表面粗さがFPB材よりも大きいことに起因すると考えられる。すなわち, 表面層における硬さや圧縮残留応力の増加および表面粗さの減少が遷移応力の上昇をもたらしたため, FPB材において遷移応力が最も高くなったと考えられる。

両処理材ともそれぞれの遷移応力以上の高応力域では, 未処理材と同様に表面からき裂が発生した。この応力域では両処理材の疲労寿命はほぼ同程度であるが, 未処理材に比べて長寿命である。これは表面の硬化層や圧縮残留応力のために, き裂の発生や進展に対する抵抗が増加したことによると考えられる。

未処理材の遷移応力以下では, 必ずしも処理材の疲労寿命が未処理材のそれに比べ長くない, 処理の有無や処理方法により疲労寿命はほとんど影響を受けていない。このことは内部起点型破壊が生じる場合, 硬化層, 残留応力および表面粗さは疲労寿命にほとんど影響を及ぼさないことを示している。

4.3 破面様相

内部起点型破壊の特徴的な破面様相であるfish-eye(未処理材)および介在物を図7に示す。図中の白く見えるところがfish-eyeと呼ばれるものであり, その中央付近には破壊起点となった介在物が認められる。このようなfish-eyeが発生するメカニズムは, 十分に解明されていない。

両処理材のfish-eyeおよび破壊起点となった介在物の様相を図8に示す。FPB材は未処理材と同

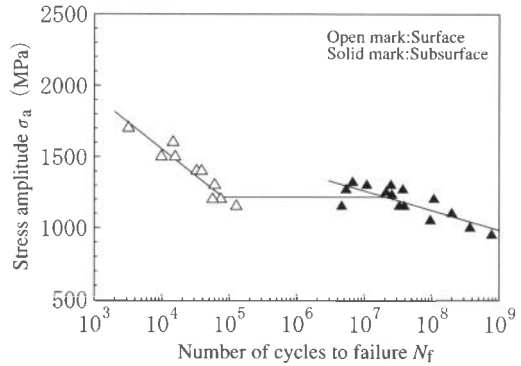


図5 UT材のS-N曲線

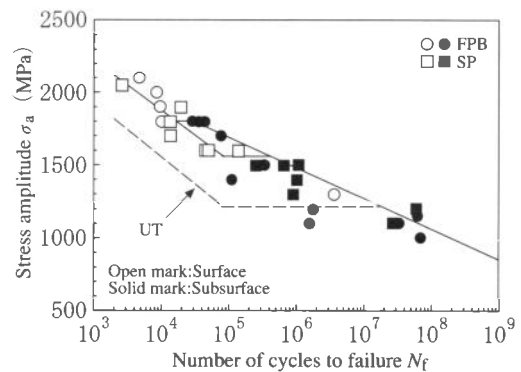


図6 FPB材およびSP材のS-N曲線

様に、そのfish-eyeは例外なく試験片表面に内接していたが、SP材におけるfish-eyeの境界は試験片表面より40~60 μm 内側に位置していた。また、FPB材および未処理材のfish-eyeの境界は明瞭であるが、SP材のそれは不鮮明である。すべての試験片においてfish-eyeの中心付近に介在物が認められた。この介在物にはアルミナ、硫化マンガンや窒化チタンなどであり、これらは材料の製造過程において含まれる不純物が粒状に存在するものである。

4.4 fish-eyeの定量的検討

fish-eyeの試験片半径方向長さ $2b$ およびその直角方向長さ $2a$ の関係を図9に示す。図中の破線は $2a=2b$ を表すので、破線上に位置するfish-eyeは真円を意味する。UT材の $2a/2b$ の平均値は0.98であり、ほぼ真円である。一方、FPB材およびSP材の $2a/2b$ の平均値は、それぞれ1.16および1.24であり、fish-eyeの形状は試験片半径方向に直角な方向に長い楕円である。fish-eyeの寸法はUT材では30~

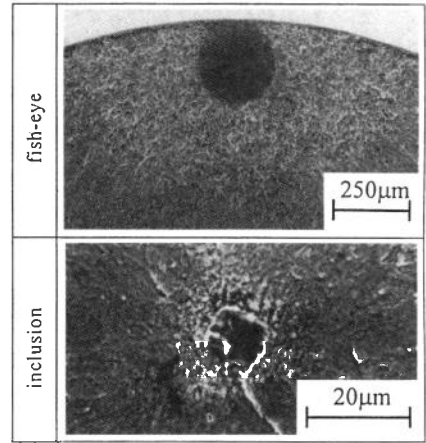


図7 UT材のfish-eyeおよび介在物の様相 ($\sigma=1150\text{MPa}$, $N_f=3.9\times 10^6$)

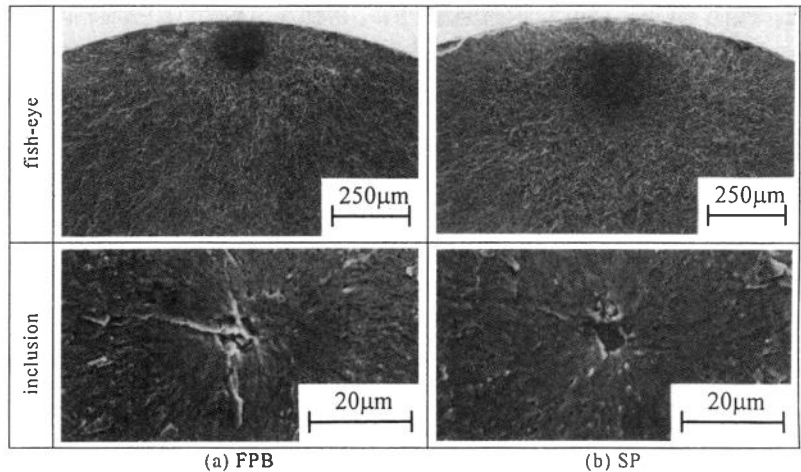


図8 FPB材およびSP材のfish-eyeおよび介在物の様相 (FPB: $\sigma=1400\text{MPa}$, $N_f=1.11\times 10^6$, SP: $\sigma=1400\text{MPa}$, $N_f=1.03\times 10^6$)

270 μm , FPB材では80~250 μm , SP材では250~360 μm であった。このfish-eyeの大きさの相違は、表面から破壊起点となった介在物までの深さに関係しており、それらはUT材では15~165 μm , FPB材では40~140 μm , SP材では130~220 μm であった。すなわち、FPB材では表面からの深さが40 μm 以内、SP材では130 μm 以内に存在する介在物はき裂起点とならない。このことは後述するように残留応力分布と関連している。

次に、fish-eyeの試験片半径方向長さ $2b$ に対するfish-eyeの表面側の半径 b_s との関係を図10に示す。図中の破線は未処理材の平均値を示す。 $b_s/2b$ はUT材では0.54であり、これに対してFPB材では0.48, SP材では0.44である。すなわち、UT材の介在物はfish-eyeの中心より若干試験片中心方向寄りに位置するのに対して、両処理材では表面方向寄りに位置する。これはき裂の進展挙動に硬化層

や圧縮残留応力が影響を及ぼしていることを示唆している。UT材の場合、応力勾配のために中心方向に比べて表面方向へのき裂進展が促進されるので表面方向に長くなる。一方処理材では、硬化層や圧縮残留応力に起因して表面方向へのき裂進展抵抗が大きくなるので、試験片中心方向に長くなると考えられる。

負荷により生じる曲げ応力の引張側と圧縮残留応力の和である重ね合わせ応力と破壊起点となった介在物の位置（試験片表面からの深さ）の関係を図11 (a) および (b) に示す。なお、図では負荷応力として1000MPaの例を示したが、異なる負荷応力についても重ね合わせ応力の分布は同様の傾向となる。図から明らかなように、FPB材、SP材およびUT材では、それぞれ表面から50 μm 、200 μm および50 μm 程度で重ね合わせ応力が最大となり、この付近に存在していた介在物からき裂が発生していることがわかる。処理材に比べて未処理材において介在物の位置が分散しているのは、重ね合わせ応力の最大値近傍の分布がなだらかであるためと考えられる。

破壊起点となった介在物の代表寸法 $\sqrt{\text{area}}$ から、村上らが提案している次式⁽¹¹⁾を用いて初期の応力拡大係数 K_i を求めた。

$$K_i = 0.5 \sigma_i \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}}$$

ここで、 σ_i は応力勾配を考慮した介在物の位置での応力に残留応力を考慮した重ね合わせ応力である。求められた K_i と疲労寿命 N_f の関係を図12に示す。本研究と同様の未処理材において、すでに K_i の減少に伴って疲労寿命は増加するとの指摘⁽¹²⁾があるが、本研究では表面処理を施すことにより、短寿命域での結果も得られ、さらにその傾向が明瞭になったと考えられる。また、 K_i と N_f の関係に処理の有無や処理方法の相違の影響はほとんど認められない。

4.5 表面層除去材の疲労強度

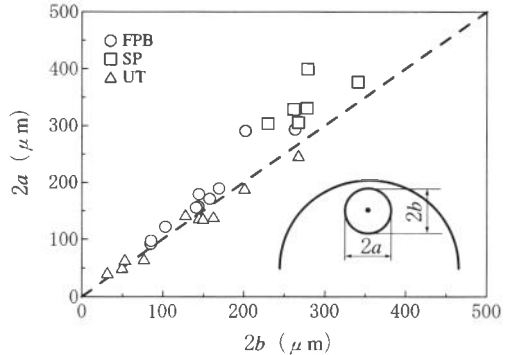


図9 fish-eyeの形状

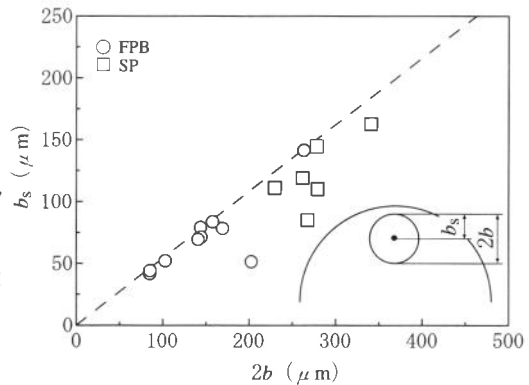


図10 介在物の位置

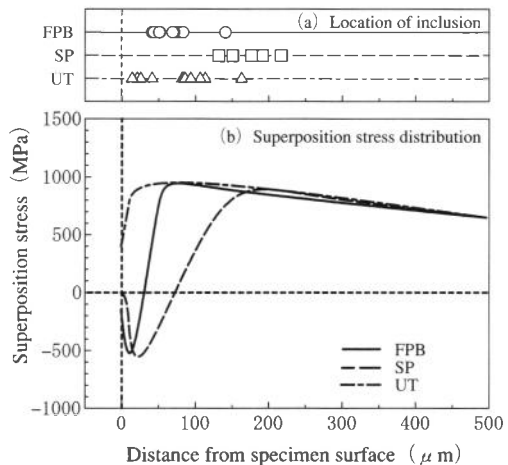


図11 介在物の位置と重ね合わせ応力の関係

SP材の表面をエメリー紙の2000番まで研磨を行った後バフ研磨を行った試験片を用いて、遷移応力以上の応力 ($\sigma = 1600, 1700\text{MPa}$) で疲労試験を行った。その結果を図13に示す。表面を研磨していない試験片であれば表面起点型破壊を生じる応力であるが、表面層除去後の試験片では内部起点型破壊を生じた。また、その疲労寿命もFPB材のそれとほぼ同程度であった。高応力域でも内部起点型破壊が生じたのは、表面層除去により表面粗さが低下したことおよび表面の低い圧縮残留応力層が除去されたためであると考えられる。すなわち、表面粗さの低下に伴い、表面層の凹凸が無くなり応力集中が減少し、表面からのき裂発生が抑制されたためであり、また、低い圧縮残留応力層が除去されたことにより、試験片表面近傍の圧縮残留応力は高くなったため、表面からのき裂発生が抑制されたと考えられる。表面処理後の処理によっては、さらに疲労強度が向上することを認識する必要がある。

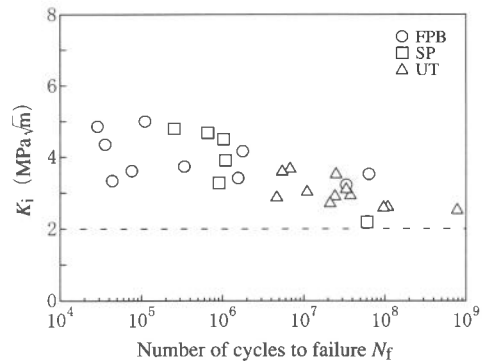


図12 疲労寿命と応力拡大係数との関係

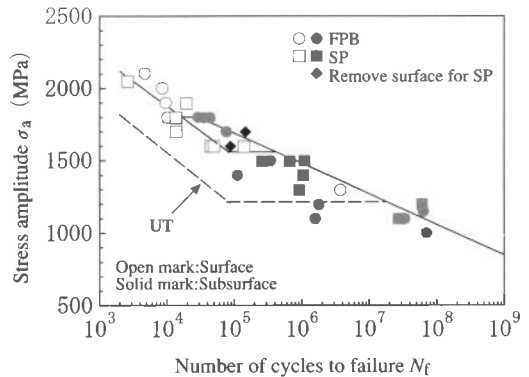


図13 表面除去材の疲労強度

5. 結 言

自動車の部材として使用されている高強度鋼および表面処理材の疲労強度特性の検討を行うため、高炭素クロム軸受鋼SUS2の微粒子衝突処理による表面改質材 (FPB材)、ショットピーニング処理材 (SP材) および未処理材 (UT材) について室温大気中で疲労試験を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) すべての材料とも長寿命域(繰返し数 10^7 回以上)で内部起点型破壊が生じた。このような材料を使用する場合には従来の疲労限度以下の応力についても留意する必要がある。
- (2) 疲労破壊の起点が表面から内部に遷移する応力(遷移応力)はFPB材で最も高く、次いでSP材、UT材となった。微粒子衝突処理およびショットピーニングによる表面改質の効果は、未処理材の破壊起点が表面である場合明瞭に認められたが、破壊起点が内部である場合、疲労破面には顕著な差異はなかった。表面処理を行うに際し、このことを留意する必要がある。
- (3) 内部起点型破壊の疲労破面にはfish-eyeが認められたが、その様相は表面処理の有無や処理方法の相違によって若干異なった。しかし、内部起点型のき裂発生位置は、処理の有無や処理方法の相違にかかわらず、負荷応力の引張側と残留応力の和である重ね合わせ応力の最大値付近で

あった。

参考文献

1. 多田博・佐々木憲夫, 自動車技術, 55- 4 (2001), 9-16.
2. 増田千利・西島敏・田中義久, 機論, 52-476, A (1986), 847-852.
3. 小沼静代・古川徹, 材料, 38-433 (1988), 1128-1132.
4. 江村秀樹・浅見克敏, 機論, 55-509, A (1989), 45-50.
5. 中島正貴・酒井達雄・清水利弘, 機論, 65-640, A (1999), 2504-2510.
6. http://www.city.nagoya.jp/11kankyoho/kotukogai/clean_egy/sec5.html.
7. 町田尚・村上保夫, NSK TECHNICAL JOURNAL, 669 (2000), 1-12.
8. <http://www.shotpeening.gr.jp/frame.html>.
9. <http://www.nsservice.co.jp/wpc/motor/index.htm>.
10. 高 行男, LEMA (日本陸用内燃機関協会誌), 466 (2002), 64-70.
11. 村上敬宣・児玉昭太郎・小沼静代, 機論, 54-500 (1988), 688-696.
12. 塩澤和章・魯連涛・石原外美, 材料, 48-10 (1999), 1095-1100.