

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2報, 高強度鋼の疲労強度に及ぼす湿度の影響)

高 行男・井藤賀久岳

1. 緒 言

近年,自動車に対する社会の要求は省エネルギーおよび環境に対する優しさである。省エネルギー言い換えれば低燃費車を実現するためには,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環境対策としての新技術の採用等により車両重量は増加傾向にある⁽¹⁾。軽量化の方法としては,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等がある⁽²⁾。

ところで,通常の鉄鋼材料においては, $S-N$ 曲線は繰返し数 $N=10^5\sim 10^7$ 回程度で水平となり,それ以下の応力では疲労破壊を生じないことから,水平部の応力が疲労限度として機械や構造物の設計に用いられてきた。しかし近年,高強度鋼では繰返し数 $N=10^7$ 回を超える長寿命域において疲労破壊が生じることが確認された⁽³⁾。そのため,従来から行われてきた設計方法では対応できないという実用的な問題が生じている。このような高強度鋼の破壊は,高応力・短寿命域における破壊は従来の鉄鋼材料と同様の表面起点型であるのに対して,低応力・長寿命域における破壊は介在物を起点とする内部起点型であり,その破面にはfish-eyeが観察される⁽⁴⁾。

前報では高強度鋼である高炭素クロム軸受鋼およびその表面処理材に対して疲労強度特性を明らかにした⁽¹⁾。高強度鋼は環境に対する感受性が高いことから,大気湿度の影響によっても疲労強度特性が変化することが予想される。そこで,本報では湿度を制御した環境中において高炭素クロム軸受鋼を用いて疲労試験を行い, $S-N$ 曲線の形態および破壊機構に及ぼす湿度の影響について詳細に調査,検討した。また自動車部品の場合,水の付着および海水や融雪剤による塩害など大気湿度より厳しい環境での使用が考えられるため,これらの影響についても考察した。

2. 供試材および実験方法

2.1 試験片

本研究に用いた材料は,高炭素クロム軸受鋼SUI2であり,その化学成分を表1に示す。材料に焼入れ(835℃・40分保持後油冷),焼戻し(180℃・120分保持後空冷)の熱処理を施した。機械的性質は,引張強さ σ_B :2316MPa,ビッカース硬さHV:755である。その後,図1の疲労試験片形状

寸法に研削加工した。応力集中係数は1.06ではほぼ平滑とみなせるものである。研削加工後、最小断面部周辺をエメリー紙およびバフを用いて順次研磨を行った。

図2にバフ研磨前(研削加工のまま)に測定した残留応力の分布を示す。X線回折法を用いて、表面を電解研磨により徐々に除去することによって測定を行った。図から明らかなように、表面には-600MPa程度の残留応力が存在し、内部に向かって単調に減少している。なお、バフ研磨後の最小断面部表面の残留応力を測定したところ-400MPa程度であった。また、同部分の粗さについてみると、最大高さおよび算術平均粗さは、それぞれ $R_y=0.149\mu\text{m}$ 、 $R_a=0.010\mu\text{m}$ である。

2.2 試験方法

疲労試験には自作の片持ち回転曲げ疲労試験機(繰返し速度 $f=60\text{Hz}$)を用い、試験機を湿度制御装置内に設置し疲労試験を行った。試験中の湿度制御装置内の湿度を一定(設定湿度の $\pm 5\%$)となるように制御し、5、45、55および85%の4湿度レベルで実験を行った。疲労試験後、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いてfish-eye等の破面様相を詳細に観察した。

3. 実験結果および検討

3.1 S-N曲線

各湿度レベルにおける疲労試験結果を図3に示す。SEMによる破面観察により表面起点型破壊のものは白印(○, △, ◇, □)、内部起点型破壊のものは黒印(●, ▲, ◆)で表した。また図中の実線は、各湿度における表面起点型破壊および内部起点型破壊のデータに対して引かれたものである。

図から明らかなように、湿度5、45および55%において、それぞれのS-N曲線は2段折れ曲がりを示す。内部起点型破壊が生ずる最も高い応力を遷移応力(破壊起点が表面から内部へ遷移する応力)と定義すると、遷移応力は湿度の増加に伴い低下する傾向がある。さらに、湿度85%では内部

表1 化学成分 [mass%]

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

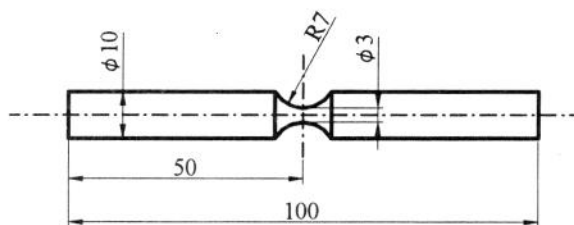


図1 試験片形状

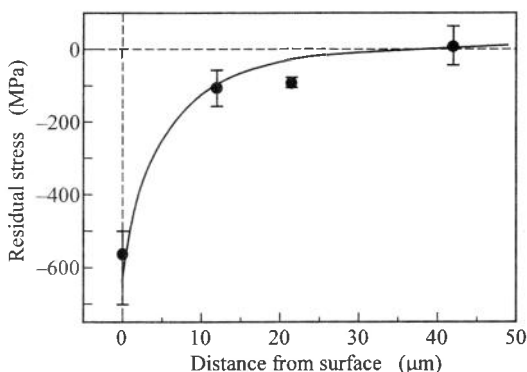


図2 残留応力

起点型破壊を示さず、実験を行ったすべての試験片において表面起点型破壊となり、疲労寿命は応力の減少に伴い単調に増加する。すなわち、腐食環境下におけるS-N曲線と類似の様相を呈し、2段折れ曲がりとは認められない。遷移応力の低下、および高湿度環境中で内部起点型破壊が生じないことは、外部環境中の湿度により表面からのき裂発生が促進されたためであると考えられる。すなわち、外部環境中の湿度は表面を活性にすることから、ある湿度以上の環境中では内部起点型破壊は生じず、すべて表面起点型破壊となると考えられる。

ところで、各湿度において遷移応力以上の表面起点型破壊となる高応力・短寿命域では、湿度の違いによる疲労寿命の顕著な差異は認められない。設定した湿度レベルでは、破壊までの時間が短いために疲労寿命にほとんど影響を及ぼさなかったと考えられる。一方、遷移応力以下の内部起点型破壊となる低応力・長寿命域においても、各湿度における疲労寿命には顕著な差異は見られない。これはき裂が内部で発生するため、試験片表面に達するまで外部環境中の湿度の影響を受け難いためであると考えられる。

湿度レベルに伴う遷移応力の変化を図4に示す。ここで、遷移応力は各湿度レベルにおいて、内部起点型破壊が認められた最も高い応力として定義している。ただし、湿度85%の結果については、内部起点型破壊が認められなかったため、繰返し数 $N=2 \times 10^8$ 回に対する応力を用いた。図から明らかなように、遷移応力は湿度の増加に伴い低下するが、その湿度依存性は湿度55%を境に折れ曲がる傾向がある。図中に示す灰色の帯域は、湿度を制御していない室温大気中におけるバフ研磨を行っていない研削加工のままの試験片の疲労試験結果において、表面起点型破壊および内部起点型破壊が混在した範囲を示している。この結果から、室温大気中では湿度が変動する雰囲気中で実験が行われているが、平均的には60%程度の湿度に相当することが示唆される。

3.2 破面観察

湿度5、45および55%における内部起点型破壊の破面様相の一例を図5に示す。内部起点型破壊

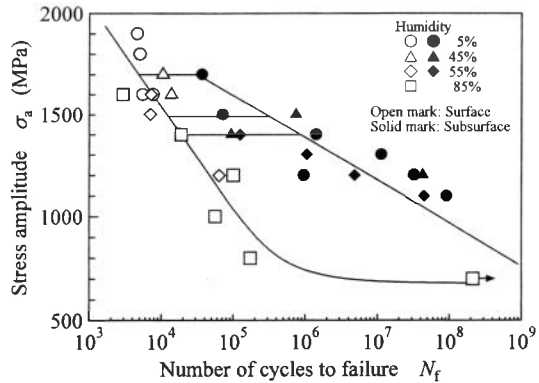


図3 S-N曲線

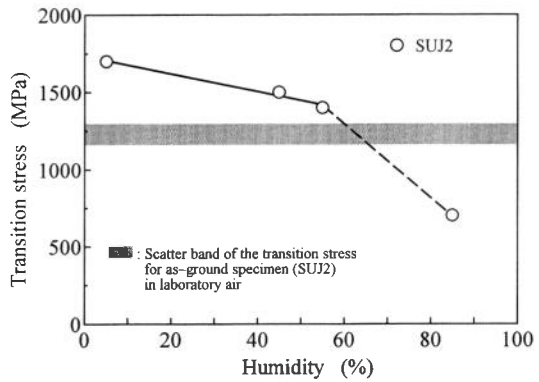
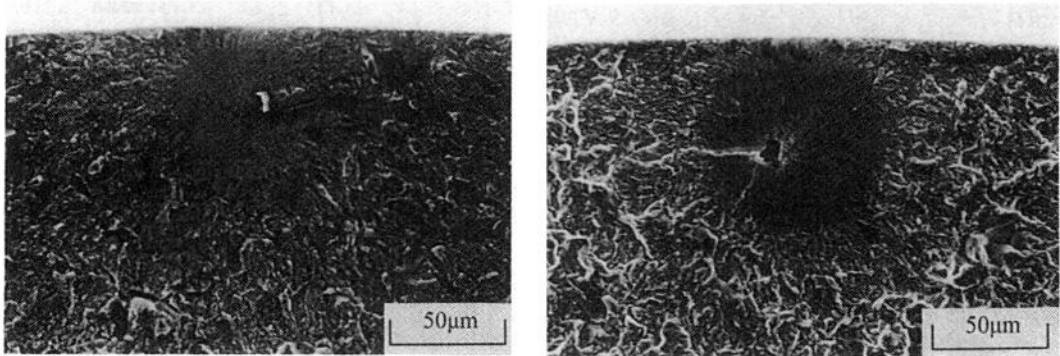


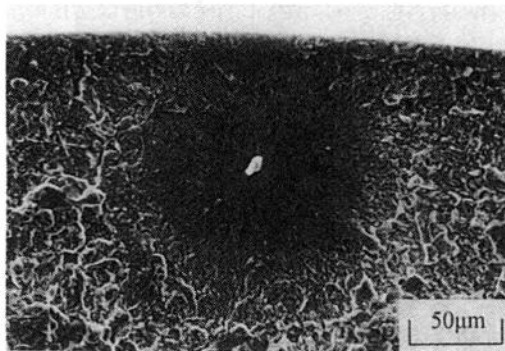
図4 遷移応力

のすべての破面にfish-eyeが確認され、その形態は湿度に関係なくほぼ同様の様相であった。すなわち、すべてのfish-eyeはほぼ円形で、その中心付近に介在物が認められた。さらに、fish-eyeは例外なく試験片表面に内接していた。このことより、fish-eyeの形成には湿度はほとんど影響を及ぼしていないことが示唆される。これはき裂が内部で発生するため外部環境中の湿度の影響を受け難く、また発生したき裂が、試験片表面に達するまで、外部環境に触れないためであると考えられる。



(a) Humidity 5%, $\sigma = 1300\text{MPa}$, $N_f = 1.14 \times 10^7$.

(b) Humidity 45%, $\sigma = 1200\text{MPa}$, $N_f = 4.31 \times 10^7$.



(c) Humidity 55%, $\sigma = 1300\text{MPa}$, $N_f = 1.08 \times 10^6$.

図5 内部起点型破壊の破面様相

3.3 fish-eyeの定量的検討

破壊起点となった介在物の試験片表面からの距離 d_{inc} とfish-eyeの直径 d の関係を図6に示す。なお図には、室温大気中における研削加工のままの試験片に関する結果も示した。図から明らかなように、 d_{inc} と d の関係は湿度にかかわらず同様であり、介在物の位置はfish-eyeのほぼ中央である。また、 d_{inc} および d も湿度に依存しないことがわかる。

次に、内部起点型破壊を生じた試験片において、き裂発生起点となった介在物およびfish-eyeの大きさを調査し、介在物およびfish-eyeに対する応力拡大係数幅 ΔK_I および ΔK_{II} を村上らが提案している次式⁽⁵⁾を用いて求めた。

$$\Delta K_i = 0.5 \sigma_{inc} \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}} \quad (1)$$

$$\Delta K_r = 0.65 \sigma_0 \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}} \quad (2)$$

ここで、 σ_{inc} は応力勾配を考慮した介在物の位置における応力、 σ_0 は試験片表面の応力（公称応力）であり、いずれも応力振幅である。

図7に ΔK_i および ΔK_r と疲労寿命 N_f の関係を示す。図中の直線は、湿度5, 45および55%における ΔK_i と N_f の関係を最小自乗法により求めたものである。図から明らかなように、 ΔK_i は2.6~6.1MPa \sqrt{m} であり、 ΔK_i の減少に伴って N_f は増加する傾向にあるが、湿度の相違による差異は認められない。一方、 ΔK_r は大きくばらついており、 N_f との明瞭な相関は認められない。図5に示したようにすべてのfish-eyeはほぼ円形で試験片表面に内接しており、その中心付近に介在物が存在することから、き裂発生起点となる介在物の位置によってfish-eyeの大きさが決定されると考えられる。また、内部き裂発生起点

（介在物の位置）は試験片に存在する残留応力と負荷応力との重合わせ応力が最大となる位置近傍であることが確認されている^{(6),(7)}。したがって、内部起点型破壊の起点となりうる領域（本研究では、図6に示した通り試験片表面から5~125 μm_w の深さ）に含まれる介在物のうち、大きさや形状等によりき裂発生起点となる介在物が決まり、その位置によってfish-eyeの寸法が決定されるため、 N_f との明瞭な相関は認められなかったと考えられる。

なお ΔK_r と N_f の関係にも、湿度の相違による顕著な差異は認められないが、これはき裂発生が試験片内部を起点とするために、外部環境中の湿度の影響を受けなかったためと考えられる。

3.4 外部環境の影響

高強度鋼においては、大気中でも湿度が存在するため十分に腐食環境中であることが確認できた。このような環境よりさらに厳しい条件である水分、海水や融雪剤を含む水分の付着により疲労強度の低下について考えると、さらに疲労強度の低下が予想される。水中における疲労強度の一例として、低合金鋼SNCM439の大気中および水中における疲労試験の結果⁽⁸⁾を図8に示す。図から

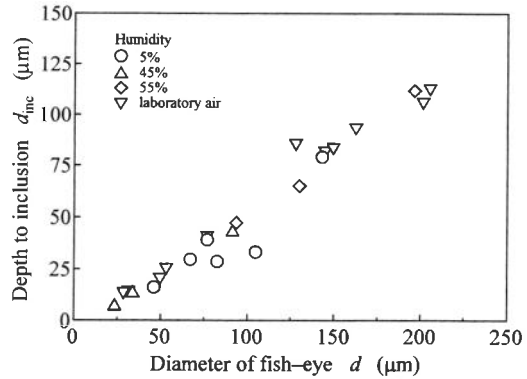


図6 破壊起点となった介在物の試験片表面からの距離 d_{inc} とfish-eyeの直径 d の関係

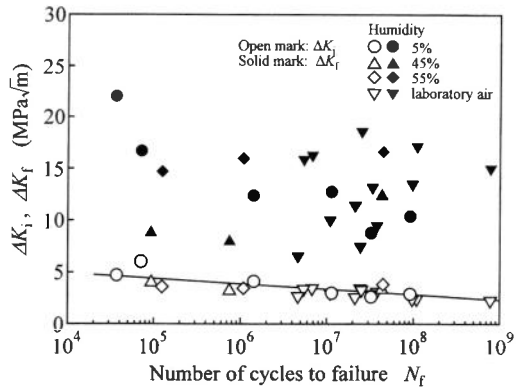


図7 介在物およびfish-eyeに対する応力拡大係数幅 ΔK_i および ΔK_r と疲労寿命 N_f の関係

わかるように、大気中でのS-N曲線は2段折れ曲がりを示すが、水中のそれは一般的な腐食環境中の様相を示す。また、大気中に比べ強度が著しく低下していることもわかる。これは試験片表面に腐食ピットが生じたためであると考えられる。また、高強度鋼において1% NaCl水溶液中の疲労試験結果、乾燥空気中や湿潤空気中(湿度90%以上)のき裂進展速度に比べ、1%NaCl水溶液中のそれが著しく速いとの報告⁽⁹⁾もな

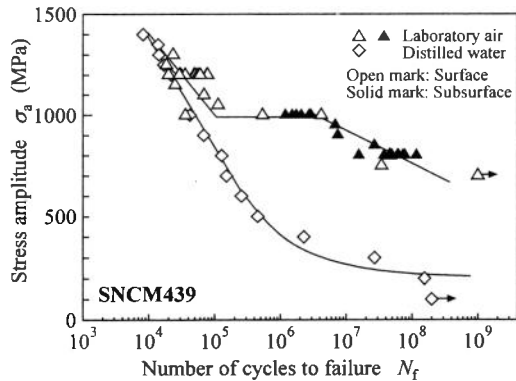


図8 SNCM439におけるS-N曲線

されている。さらに、高強度鋼において大気中の繰返し数 10^7 回の疲労強度 σ_w と水中のそれ σ_{wc} を比較すると、 $\sigma_{wc}/\sigma_w=0.1\sim 0.3$ 程度(大気中において繰返し数 10^7 回の疲労強度が500MPa程度の炭素鋼では、 $\sigma_{wc}/\sigma_w=0.4\sim 0.8$)であり、大気中と塩水中(食塩水中、海水中および人工海水中を含む)を比較すると、 $\sigma_{wc}/\sigma_w=0.1\sim 0.2$ 程度(大気中において繰返し数 10^7 回の疲労強度が500MPa程度の炭素鋼では、 $\sigma_{wc}/\sigma_w=0.3\sim 0.8$)である⁽¹⁰⁾。すなわち、高強度鋼の塩水中における疲労強度は大気中に比べ著しく低下し、その割合は一般に使用されている鉄鋼材料に比べ大きいことがわかる。

このようなことから、雨水、海水、融雪剤等の環境において長期間使用される可能性のある自動車部品に高強度鋼を適用する場合、外部環境の影響について留意する必要がある。

4. 結 言

高炭素クロム軸受鋼SUS2を用いて湿度を制御した環境中において疲労試験を行い、S-N特性および破壊機構に及ぼす湿度の影響について検討した。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 湿度55%以下ではS-N曲線は2段折れ曲がりを示し、湿度の増加に伴い破壊起点が表面から内部へ遷移する応力は低下した。これは湿度が表面におけるき裂発生を促進したためである。しかし、湿度85%ではS-N曲線の折れ曲がり消失し、腐食環境下で見られるような様相を呈した。
- (2) 表面起点型破壊の場合、破断までの時間が短いため湿度の相違による疲労寿命の顕著な差は生じなかった。
- (3) 内部起点型破壊の場合も疲労寿命に及ぼす湿度の影響は見られなかった。これはき裂が試験片内部で発生するため、表面に達するまで外部環境中の湿度の影響を受けないためである。
- (4) すべてのfish-eyeはほぼ円形で試験片表面に内接しており、その中心付近に介在物が存在していた。このようなfish-eyeの形態的特徴も湿度に依存しなかった。

参 考 文 献

1. 高行男, 井藤賀久岳, 中日本自動車短期大学論叢, 33 (2003) 33-42
2. 高行男, アルミvs鉄ボディ, 山海堂 (2002)
3. 江村秀樹・浅見克敏, 日本機械学会論文集, 55-509, A (1989) 45-50
4. 増田千利・西島敏・田中義久, 日本機械学会論文集, 52-476, A (1986) 847-852
5. 村上敬宣・児玉昭太郎・小沼静代, 日本機械学会論文集, 54-500, A (1988) 688-696
6. 戸梶恵郎, 高橋進, 日本機械学会論文集, 67-653, A (2001) 86-93
7. 高行男, 井藤賀久岳, 長谷川達也, 加賀谷忠治, 戸梶恵郎, 中島正貴, 日本機械学会論文集, 68-667, A (2002) 484-490
8. 中島正貴, 戸梶恵郎, 井藤賀久岳, 高行男, 日本機械学会論文集, 67-664, A (2001) 1966-1972
9. 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 藤本知司, 松田良信, 日本機械学会論文集, 45-398, A (1979) 1152-1159
10. 日本機械学会編, 金属材料疲れ強さの設計資料(Ⅲ), 日本機械学会 (1974)