

# 自動車用材料における表面処理の適用およびその問題点 (第1報, 浸炭処理鋼の疲労強度に及ぼす微粒子衝突処理の影響)

高 行男・井藤賀久岳

## 1. 緒 言

自動車に求められているキーワードは、安全、環境、燃費、リサイクルである。これらは材料と密接に関連している。特に環境問題を背景に、燃費は、排ガス問題とともに注目されている。自動車技術の革新には材料が重要な役割を果たす。材料があったので使用する一方、使用目的のために材料は新たに開発される。燃費を考えると軽量化がキーポイントとなっている。鉄鋼からアルミやプラスチックなどの材料の変更があり、アルミボディやF1分野のFRP(繊維強化プラスチック)はよく知られている<sup>1)</sup>。後者の材料(CFRP)は最近では航空機の主要材料となっている。

自動車重量の7割を構成する鉄鋼も軽量化のために取り組んでいる。その代表が高張力鋼板である。鉄鋼は一般に鉄というが、鉄と鋼を指し、高張力鋼板は強度が高い鋼のことでハイテンと称されている。つまり素材自体の強度を上げて部材を薄肉に軽量化する。一般に鋼材の強度を上げると内部破壊の現象など疲労強度特性が異なるので、使用にあたっては十分留意する必要がある<sup>2)-4)</sup>。一方自動車部材において、素材は同じだが表面処理をして疲労強度や摩耗特性の向上を図ってきたが、これも軽量化に対処しているといえる。浸炭処理してコネクティングロッドの小型化はその一例である。

表面処理には、多くの種類がある。高周波焼入れ、レーザー焼入れ、浸炭、窒化、浸流、PVC、CVD、イオン注入、Al ナイジング、Cr ナイジング、TRD 処理、溶射、そしてショットピーニングなどがある。自動車部品では、浸炭処理(浸炭焼入れ)、高周波焼入れ、軟窒化処理などが、主に耐疲労性、耐摩耗性、耐食性などの向上を目的として利用されている。ところで表面処理の分野でもハイブリッドという言葉がある。つまり一種類だけの処理でなく、例えば浸炭処理とショットピーニングの組み合わせなどである<sup>5)</sup>。表面処理は部材表面を強くするので疲労強度特性に影響することは推察されるが、ハイブリッド処理の効果に関する報告は十分といえない<sup>6)</sup>。そこで、破壊起点が表面か内部かとの視点も加え浸炭処理鋼の疲労強度特性に及ぼす微粒子衝突処理の影響について検討した<sup>7)</sup>。本稿ではその内容を述べ、軽量化の視点で自動車用材料を見つめる資料とする。微粒子衝突処理(FPB)とは、ショットピーニングと称してもよいと思われるが、ショット粒子が小さく、結果としてショットピーニングに無い特徴を示す。微粒子衝突処理の高

強度鋼の疲労強度に及ぼす影響については既に調査し報告している<sup>2)</sup>。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片と浸炭処理

供試材料はクロムモリブデン鋼 (SCM415) である。化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。図1には試験片形状を示した。今回の試験には基礎データを得ることを目的としているので、

表1 化学成分 (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo
0.16	0.25	0.70	0.022	0.012	1.03	0.01	0.04	0.17

表2 機械的性質

Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Breaking strength on final area $\sigma_T$ (MPa)	Elongation $\delta$ (%)	Contraction of area $\psi$ (%)
632	1108	24	56

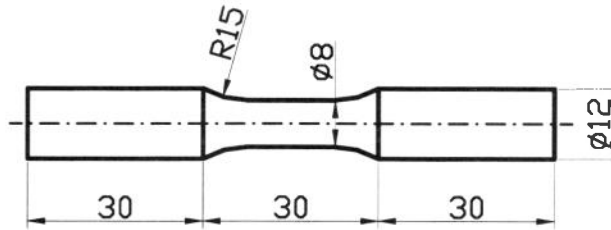


図1 試験片形状 (mm)

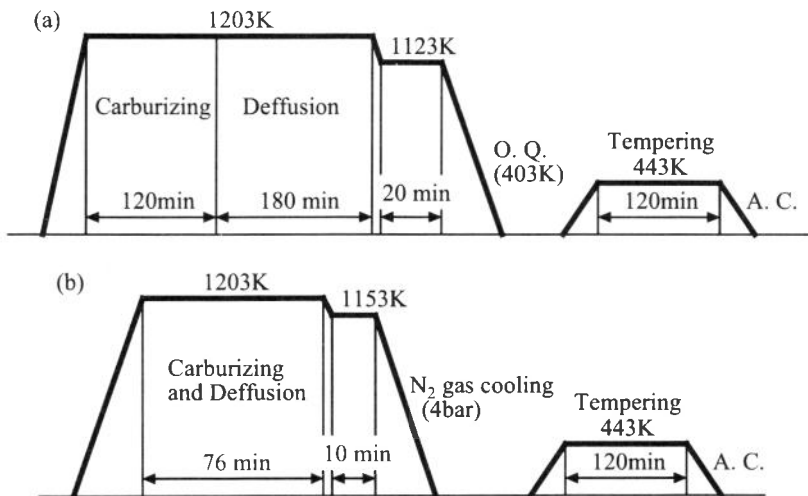


図2 浸炭処理条件, (a)ガス浸炭, (b)真空浸炭

試験片は平滑とし、2種類の浸炭処理を用いている。ガス浸炭処理と真空浸炭処理の処理条件を図2に示す。

用いた試験機は小野式回転曲げ試験機（3420rpm）で試験片には繰り返し曲げ応力が負荷される。

## 2. 2 浸炭処理試験片に対する微粒子衝突処理

微粒子衝突処理（FPB）の処理条件を表3に示す。この処理はショットピーニングに比べ小さな粒子を使用するが、本実験では直径55 $\mu\text{m}$ の2種類の粒子を用いた。表に示すスチールのを最初にショットし、その後にセラミックスをショットしている。この2段階の処理もハイブリッド処理と考えてよいと思われる。最終処理後の表面粗さを表4に示すが、FPB処理前の結果も合わせて示した。FPB処理により粗さは増すが、通常のショットピーニングに比べると粗さへの影響は小さい<sup>9)</sup>。

表3 微粒子衝突処理条件

Material of particles	Steel	Ceramics
Particle diameter ( $\mu\text{m}$ ) (Mesh size)	55 $\pm$ 18 (#300)	53 $\pm$ 9 (#300)
Particle hardness (HV)	750	1000
Gauge pressure (MPa)	0.49	0.39
Ejection velocity (m/s)	200	200
Arc height (mmN)	0.17	0.10
Bombarding time (s)	20	20

表4 試験片表面粗さ

Specimen	GC	FPB-GC	VC	FPB-VC
Maximum height, $R_y$ ( $\mu\text{m}$ )	1.99	3.39	2.09	3.11
Arithmetical mean deviation, $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	0.26	0.43	0.13	0.40

試験片断面の硬さを微小ピッカース硬度計（0.98N）で測定した。FPB処理前と後の結果を合わせて図3に示したが、GCはガス浸炭処理、VCは真空浸炭処理を意味する。浸炭処理により硬さは試験片表面から内部にかけて変化する。有効硬化層深さ（550HV）は、GCが1mm程度で、VCの0.5mmの比べ大きい。浸炭処理表面近傍の硬さはFPB処理によりさらに上昇する。VC試験片では970HVから1300HVとなるが、硬さの上昇が認められるのは表面から50 $\mu\text{m}$ 程度の領域である。

残留圧縮応力はX線回折装置を用い、各試験片に対し順次電解研磨を施して求めた。図4にその結果を示すが、真空浸炭処理材の残留応力は-300MPaである。FPB処理をすると、-1600

MPa に上昇し、内部に向かい低下していくことがわかる。FPB 処理は通常のショットピーニングに比べ、最大残留応力は表面近傍の生じて内部に向かい急速に低下していく特徴を示す<sup>9)</sup>。

表5に示すように、残留オーステナイトの量は、FPB 処理によるマルテンサイト化のためと推察されるが、低下する。

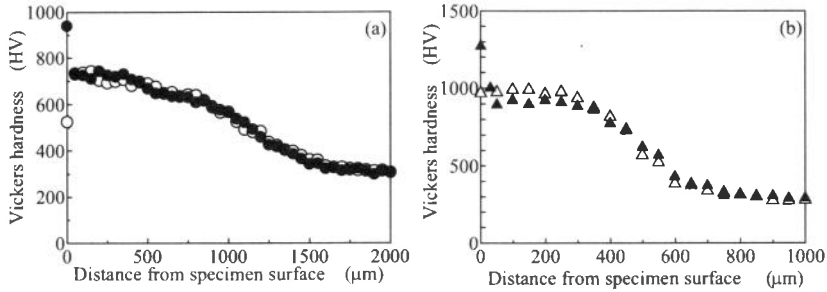


図3 ビッカース硬さ, (a) (○, ●) GC, FPB-GC 試験片, (b) (△, ▲) VC, FPB-VC 試験片

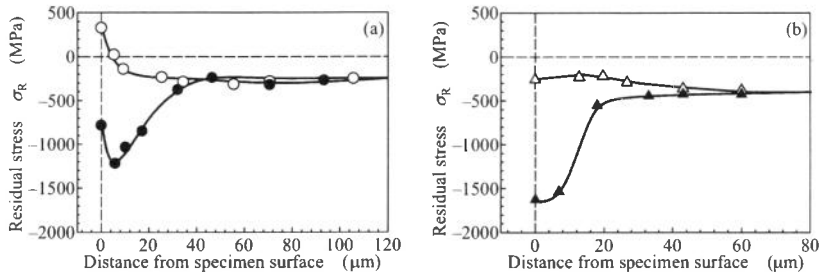


図4 残留応力, (a) (○, ●) GC, FPB-GC 試験片, (b) (△, ▲) VC, FPB-VC 試験片

表5 残留オーステナイト (vol. %)

GC	FPB-GC	VC	FPB-VC
26.0	6.0	14.6	1.1

### 3. 実験結果および検討

#### 3. 1 浸炭処理試験片の疲労強度

疲労試験は繰返し数が $10^4$ から $10^7$ の範囲で行った。両浸炭処理材とも疲労破壊は試験片表面から開始していた。図5に示すように、ガス浸炭処理材の疲労強度は真空浸炭材に比べ低い。この要因は浸炭処理により生じる異常層のためである<sup>9)</sup>。

#### 3. 2 浸炭処理試験片の疲労強度に及ぼす FPB 処理の影響

浸炭処理試験片に FPB 処理した場合の疲労強度を調査した。その結果を図6に示すが、FPB 処理材では破壊形態が2種類となる。すなわち表面起点型と内部起点型である。図にはそのこと

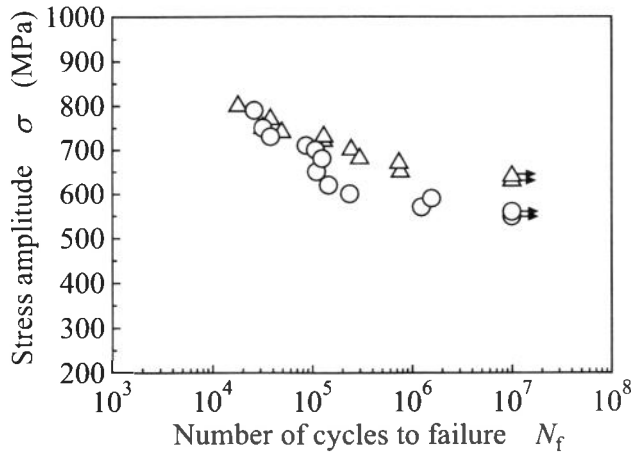


図5 S-N曲線, (○) GC 試験片, (△) VC 試験片

を区別して表示している。浸炭処理後 FPB 処理した試験片では、負荷応力の低下に伴い破壊起点が表面から内部に遷移する応力が認められる。供試材においては見かけ上単純な S-N 曲線に見えるが、破壊形態が異なることに留意する必要がある。つまり高炭素クロム軸受け鋼に対する FPB 処理の場合に見られた 2 段折れ曲がりの S-N 曲線<sup>10)</sup>でないが、内部破壊の現象に留意する必要がある。内部起点型破壊に対する疲労限度については今後の課題であるが、見かけ上、ガス浸炭後に FPB 処理した試験片では 750MPa と真空浸炭後に FPB 処理した試験片の 650MPa より高くなっている。FPB 処理はガス浸炭処理材に対し真空浸炭処理材より効果的であるといえるが、今後データを蓄積し検討する必要がある。

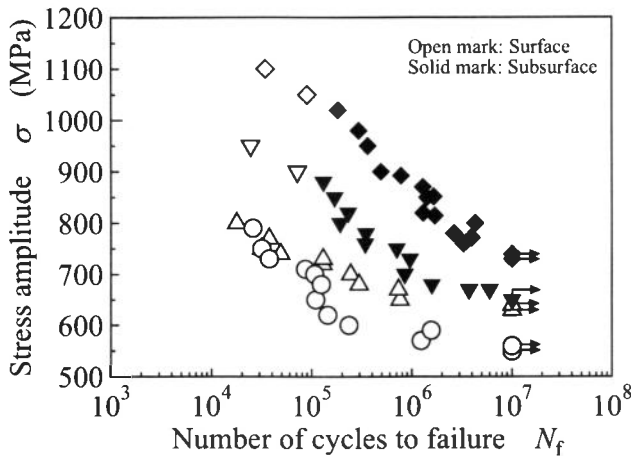


図6 S-N曲線, (○) GC 試験片, (◇, ◆) FPB-GC 試験片, (△) VC 試験片, (▽, ▼) FPB-VC 試験片

### 3. 3 破面特性

浸炭処理材の疲労破面は表面起点型である。一方浸炭処理後 FPB 処理をすると疲労破面は表面起点型と内部起点型となる。内部起点型破面には、図 7(b), (d)に示すように、fish-eye が観察される。硬化層により fish-eye は試験片表面に到達していない。破壊源は、図 7(c)に示すように、fish-eye の中心付近に存在しており、 $Al_2O_3$  と推察される介在物である。しかし、図 7(e)に示すように、介在物が明瞭に観察されない場合もあり、破壊メカニズムについては今後検討する必要がある。図 7(a)は、図 7(b)の試験片表面近傍の領域を観察した結果である。粒界破壊と粒内破壊の様相が混在しているが、特徴的な様相は認められない。

fish-eye の形状について調査した。その結果を図 8 に示すが、fish-eye の試験片の半径方向長さ  $2b$  とそれに直交する方向の長さ  $2a$  で示してある。図中の破線は fish-eye が円とした場合を表わしている。 $2a/2b$  の平均値を求めると、ガス浸炭に FPB 処理した場合は 0.98 で、真空浸炭に FPB 処理した場合は 1.09 であるので、fish-eye はほぼ円形といえる。前者における大きさ

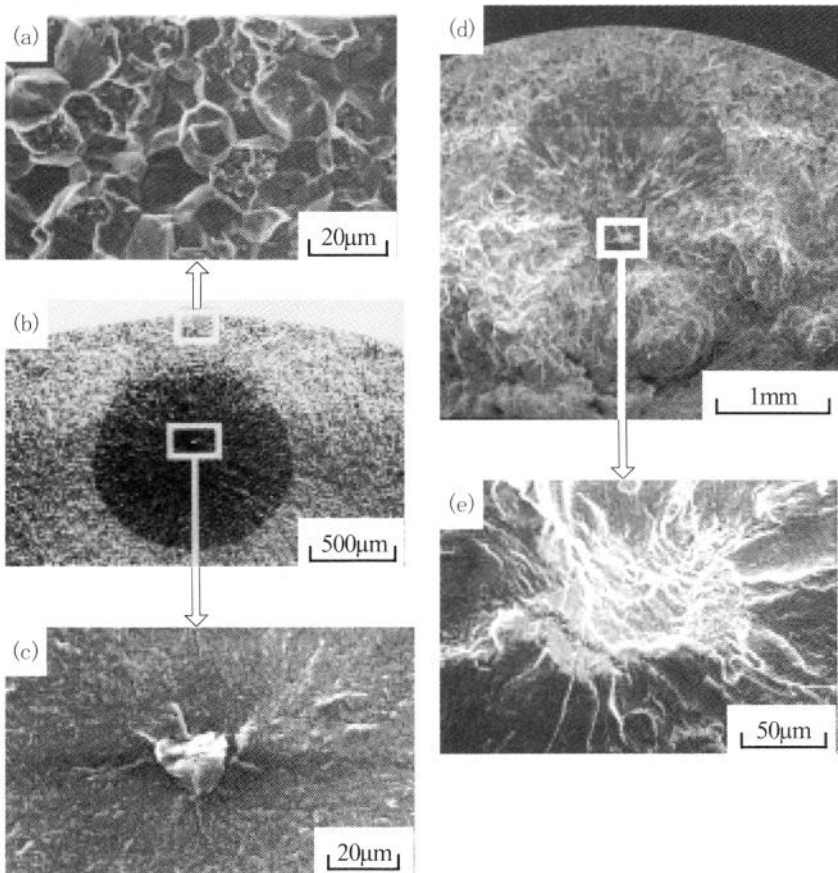


図 7 内部起点型の破面, (a), (b), (c) FPB-VC 試験片 ( $\sigma=670\text{MPa}$ ,  $N_f=5.95 \times 10^6$ ), (d), (e) FPB-GC 試験片 ( $\sigma=890\text{MPa}$ ,  $N_f=7.80 \times 10^6$ )

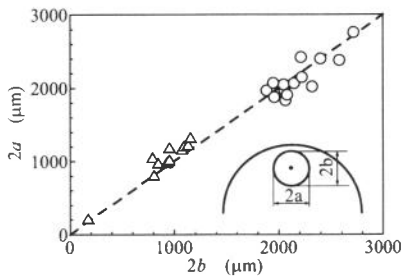


図8 fish-eye の形状, (○) FPB-GC 試験片, (△) FPB-VC 試験片

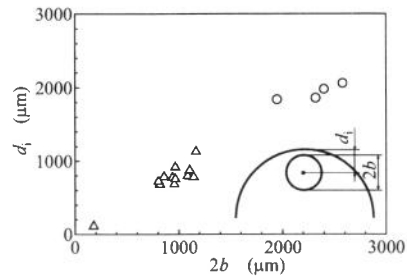


図9 fish-eye における破壊源の位置, (○) FPB-GC 試験片, (△) FPB-VC 試験片

は1835—2222 $\mu\text{m}$ で、後者における大きさは790—1305 $\mu\text{m}$ であった。この大きさの相違は破壊源の位置と関連している。図9に示すように、試験表面から破壊源までの距離  $d_1$  を調査すると、前者の場合は1840—2060 $\mu\text{m}$ で、後者では680—1130 $\mu\text{m}$ である。つまり fish-eye の中心付近に存在する破壊源が、真空浸炭に FPB 処理した場合にはガス浸炭に FPB 処理した場合に比べ試験片表面側に存在している。しかし両場合において、破壊源が存在する領域の硬さは  $\text{HV} = 300$ 程度であった。このことは、内部破壊起点部が浸炭処理によって導入される硬化層と密接に関係していることを意味している。

#### 4. 結 言

ハイブリッド表面処理効果に関する基礎データ蓄積の一環として、浸炭処理鋼の疲労強度に及ぼす微粒子衝突処理の影響について検討した結果の概要を述べた。浸炭処理鋼としては、自動車の歯車材料であるクロムモリブデン鋼に対してガス浸炭と真空浸炭した試験片を準備し、常温における疲労強度特性を調査するとともに FPB 処理をしたハイブリッド材について調査して比較検討した。その結果、ハイブリッド表面処理により破壊形態が異なり、内部破壊の現象が生じることに留意する必要があること、ハイブリッド表面処理の効果は浸炭処理の方法により異なるので、コストに留意して適用する必要があることなどが確認できた。

終わりに、表面処理に関しご助力いただいた中部大学工学部加賀谷教授に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 高 行男, アルミ vs 鉄ボディ, 山海堂, 2002.
- 2) 高 行男・井藤賀久岳: 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), 中日本自動車短期大学論叢, 33, 33-42, 2003.
- 3) 高 行男・井藤賀久岳: 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), 中日本自動車短期大学論叢, 34, 1-7, 2004.
- 4) 高 行男・井藤賀久岳: 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3報, 高強度鋼の疲労強

- 度に及ぼす介在物性状の影響), 中日本自動車短期大学論叢, 35, 1-9, 2005.
- 5) Ando, K., Matsui, K., Ishigami, H., Nasu, K., & Etou, H., Fatigue fracture process and combined surface treatment to increase fatigue limit. Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Fatigue Congress, ed. A. F. Blom, Engineering Materials Advisory Services, 2469-2476, 2002.
  - 6) Jason, J. S., David, K. M. & Greg, F., Optimized carburized steel fatigue performance as assessed with gear and modified brugger fatigue tests, SAE Technical Paper No. 2002-01-1003, 2002.
  - 7) H. N. Ko, C. Kagaya, H. Itoga, K. Ogasawara, N. Egami, K. Tokaji, M. Nakajima, Effect of fine particle bombarding on fatigue strength of carburized Cr-Mo steel. Sixth International Conference SURFACE TREATMENT 2003, Crete, Greece, 119-128, 2003.
  - 8) Kagaya, C., & Egami, N. Trends of surface origination using high velocity impact phenomena of fine particles. Electric Furnace Steel, 71 (1), 51-58, 2000. (in Japanese)
  - 9) W. E. Dowling, Jr., W. T. Donlon, W. B. Copple & C. V. Darragh, The influence of heat treat process and alloy on the surface microstructure and fatigue strength of carburized alloy steel, SAE Technical Paper No. 1999-01-0600, 1999.
  - 10) H. N. Ko, Kagaya, C., Itoga, H., Tokaji, K. & Nakajima, M., Effect of fine particle bombarding on fatigue strength of high strength steel. Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conference on Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects, ed. C. A. Brebbia, WIT Press, 313-322, 2001.