

## 技術資料



## Technical Paper

# 高濃度浸炭鋼のショットピーニング処理後の残留応力分布に及ぼす浸炭層硬さおよび炭化物の影響

加藤万規男\*, 狩野隆\*

## Effect of Hardness and Carbide in Carburized Case on the Residual Stress Produced by Shot Peening of the Super Carburizing Steel

Makio Kato and Takashi Kano

### Synopsis

*The super carburizing is a promising heat treatment to strengthen case hardened parts such as gears and other automotive parts. The bending fatigue strength is improved with the increase of surface hardness and residual stress produced by shot peening. However, it will be a probability that the residual stress changes with material hardness and carbide in carburized case.*

*The present work investigated about the effect of hardness, retained austenite and carbide in carburized case on residual stress. As a result, it was clarified that the increase of residual stress by shot peening on super carburizing steel can be evaluated by the average hardness of carburized case and was hardly influenced by the retained austenite. In addition, the carbide in carburized case was effective to dispersion hardening of martensite, therefore, the average hardness of carburized case on super carburizing steel was higher than that of eutectoid carburizing steel and the plastic flow area of super carburizing steel became smaller than that of eutectoid carburizing steel. For this reason, the increase of the residual stress on super carburizing steel was smaller than that of eutectoid carburizing steel.*

*Furthermore, the bending fatigue test was also referred.*

## 1. 緒 言

歯車やシャフトなどの浸炭焼入れ部品の疲労強度向上を目的としてショットピーニングが広く適用されている。ショットピーニング処理により疲労強度が向上する理由は、不均一塑性ひずみの発生による圧縮残留応力 ( $\sigma_R$ ) の付与と硬さの向上で説明されるが、この塑性ひずみの分布は被処理材である浸炭材の硬さプロファイルや残留オーステナイト ( $\gamma_R$ ) 量などに影響されると考えられるため、浸炭層の炭素濃度分布などが変化するとショットピーニングの効果にも差異が生じると考えられる。

近年、浸炭の炭素濃度を共析組成以上に高める高濃度浸炭処理が歯車などの疲労強度を向上させる技術として注目されている<sup>1)</sup>が、高濃度浸炭処理材は共析浸炭処理材

に比べて浸炭層の炭素濃度や  $\gamma_R$  量が高くなるのに加え、硬質の炭化物（主にセメンタイト）が分散していることも影響し、これにショットピーニングを適用した場合の硬さや  $\sigma_R$  の分布は共析浸炭材のそれとは異なったものになると考えられる。高濃度浸炭材にショットピーニング処理を施した後の硬さや  $\sigma_R$  の分布を調査した例としては SCM415 を供試材とした永村らの報告<sup>2)</sup>があるが、SCM415 を供試材とした実験（表面の炭素濃度を 2～3% 程度に制御した高濃度浸炭処理を SCM415 に適用しており、浸炭層の焼入れ組織異常などが懸念される）では、高濃度浸炭材にショットピーニング処理を適用した場合の特徴が十分に明らかにされたとはいえない。

そこで今回、大同特殊鋼(株)が開発した高濃度浸炭にも対応可能な高強度歯車用鋼を用いて、高濃度浸炭材に対する

ショットピーニング処理の影響を評価することを試みた。本報告では、ショットピーニング後の  $\sigma_R$  分布に及ぼす被処理材の硬さプロファイルおよび  $\gamma_R$  の影響を、共析浸炭材の場合と比較して評価した結果を報告する。また、高濃度浸炭材にショットピーニングを施した材料の曲げ疲労強度についても報告する。

## 2. 実験方法

### 2. 1 供試材

今回、実験に供した高強度歯車用鋼の成分を Table 1 に示す。参考として、JIS 肌焼鋼の成分も併記した。本鋼種は、一般的な肌焼鋼と比較して Cr, Si の含有量が高いことが特徴であり、高濃度浸炭にも共析浸炭にも適した成分となっている。Cr は浸炭層に析出させる炭化物の量を増加させるとともに、浸炭層の焼入性を確保する目的で 2.65 wt% 程度を添加している。Si は母相（マルテンサイト）の焼戻し硬さを向上させつつ、さらに炭化物の形態を制御する目的で 0.45 wt% 程度を添加している。

供試材としては、Table 1 に示した成分を 70 ton アーク炉および炉外精錬設備で溶製した材料を用いた。溶製材を熱間圧延によって直径  $\phi 30\text{mm}$  の棒鋼に成形した後、1198 K

の焼きならし処理を施し、これを切削加工することによって  $\phi 15 \times 100\text{mmL}$  の円柱状試験片に仕上げた。

### 2. 2 浸炭処理およびショットピーニング処理

Fig.1 に、高濃度浸炭および共析浸炭の処理条件を示す。高濃度浸炭（処理 a）処理は、炭化物を微細に分散させるために繰返し浸炭法を採用した。1 次浸炭および 2 次浸炭の処理温度はそれぞれ 1293 K、1123 K であり、2 次浸炭後の表面炭素濃度が 1.5 wt% 程度となるように浸炭、拡散の時間を調整した。共析浸炭（処理 b）処理は、1233 K での浸炭処理をおこない、表面の炭素濃度を約 0.75 wt% に調整した。主に熱処理ひずみの低減を目的として、浸炭後に 1123 K で 0.9 ks 間保持し、直ちに 393 K の油槽中に投入して焼入れをおこなった。なお、本研究では、高濃度浸炭処理、共析浸炭処理ともに、モジュール式真空浸炭炉<sup>3)</sup>を用いた真空雰囲気下での処理を適用している。

今回適用したショットピーニング処理の条件を Table 2 に示す。ショットは平均粒径  $\phi 0.8\text{mm}$ 、硬さ 800 HV の鋼球であり、これをインペラー型の投射機を用いて投射する、いわゆるハードショットピーニング（HSP）を適用した。HSP 処理のイメージを Fig.2 に示す

Table 1. Chemical compositions of steels[wt%].

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Tested steel	0.18	0.44	0.36	0.010	0.011	0.12	0.06	2.65	0.03
JIS SCM420	0.20	0.20	0.75	0.013	0.013	0.15	0.10	1.10	0.15

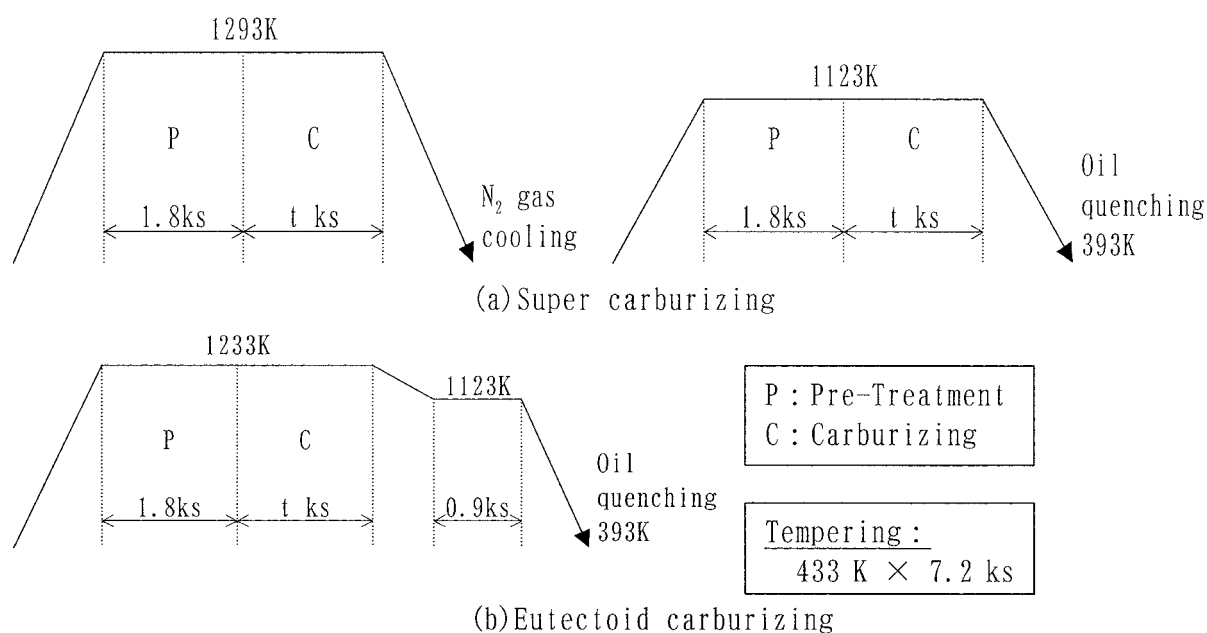


Fig.1. Heat treatment process of vacuum carburizing.

## 2. 3 硬さおよび残留応力分布の測定

浸炭処理後およびHSP後の硬さは、 $\phi 15 \text{ mm} \times 100 \text{ mmL}$ の試験片の縦断面の硬さを、マイクロビッカース硬度計で測定し評価した。最表層を基準として、半径方向への距離（深さ）0.05 mm の位置から 2.0 mm の位置までの測定結果を硬さプロファイルとして整理し、浸炭処理および HSP 処理による硬化層深さも数値化した。以下、特に断わらなければ、「表層硬さ」は 0.05 mm 位置の硬さを意味する。

$\sigma_R$  の測定は X 線回折法 ( $\sin^2 \phi$  法) によりおこなった。 $\sigma_R$  の測定位置は試験片の長手方向中央部とし、電解研磨によって表面層の除去をおこないながら測定を繰り返すことで、試験片の半径方向（深さ方向）への  $\sigma_R$  分布も調査した。なお、以下  $\sigma_R$  としては、長軸方向の残留応力値を意味する。

Table 2. Shot peening condition for test specimen.

Shot dia.	$\phi 0.8 \text{ mm}$
Shot hardness	Approx. HV 800
Arc height	0.990 mmA
Coverage	300 %

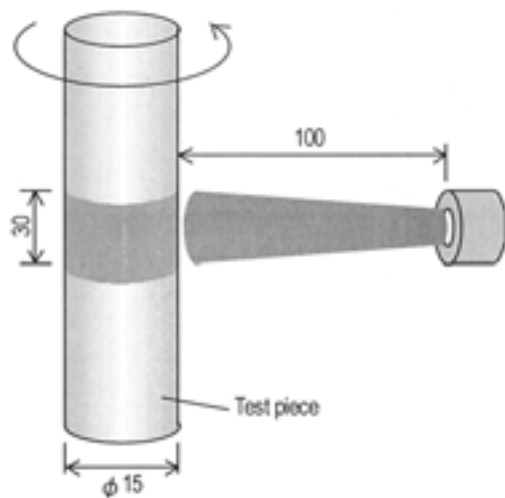


Fig.2. Treating method of HSP.

## 2. 4 疲労試験

疲労強度は、応力比 0（完全片振り）の曲げ疲労試験における  $10^5$  回付近の時間強度を評価した。本試験では、HSP 処理を施した浸炭層を破壊の起点とするため、試験片には応力集中係数 1.63 の切欠きを付与した。試験片の形状を Fig.3 に、疲労試験の条件を Table 3 に示す。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 ミクロ組織の観察

Fig.4 に浸炭処理後の試験片表層部の光学顕微鏡組織写真を示す。高濃度浸炭材と共析浸炭材の母相マルテンサイトの形態には大きな差異は認められないが、高濃度浸炭材では幅  $10 \mu\text{m}$  程度の粗大な  $\gamma_R$ （白くみえる相）が確認される。ただし、X 線回折法で測定した表層から  $10 \mu\text{m}$  までの平均  $\gamma_R$  量 (Table 4) は、高濃度浸炭材で 23.4 vol%，共析浸炭材で 17.8 vol% と、共に 20 vol% 程度の値となっている。

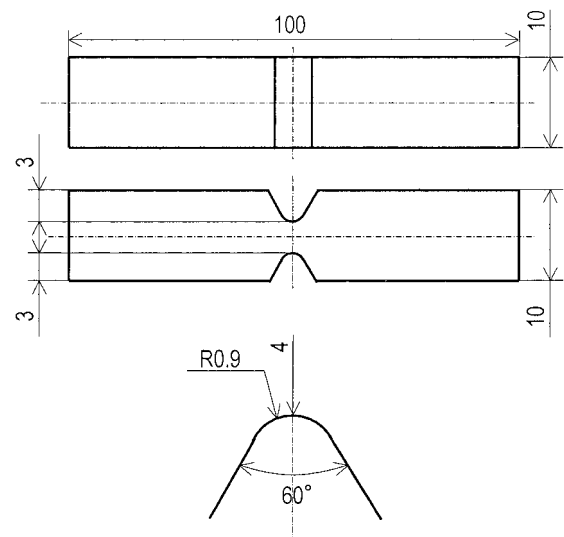


Fig.3. Shape of bending fatigue test specimen.

Table 3. Bending fatigue test condition.

Testing machine	Oil pressure servo exam. machine
Control method	Load control
Atmosphere	Room temperature
Determination of life	Rupture life

Table 4. Carburizing properties.

Carburizing		—	Super carburizing		Eutectoid carburizing	
Hardness at 0.05 mm depth		Hv	812	911	743	844
Effective case depth		mm	0.94	0.94	0.70	0.71
Retained austenite		vol%	23.4	2.1	17.8	2.2
Max. residual stress		MPa	-335	-1382	-255	-1358
HSP		—	—	○	—	○
Surface carbon content	Total	wt%	1.53		0.74	
	In martensite	wt%	0.74		0.65	
Carburizing depth		mm	1.52		1.01	
Carbide morphology		—	Fig.5		—	
Carbide average diameter of surface		$\mu\text{m}$	0.54		—	
Carbide area fraction of surface		vol%	13.7		—	
Carbide composition		—	Cementite		—	

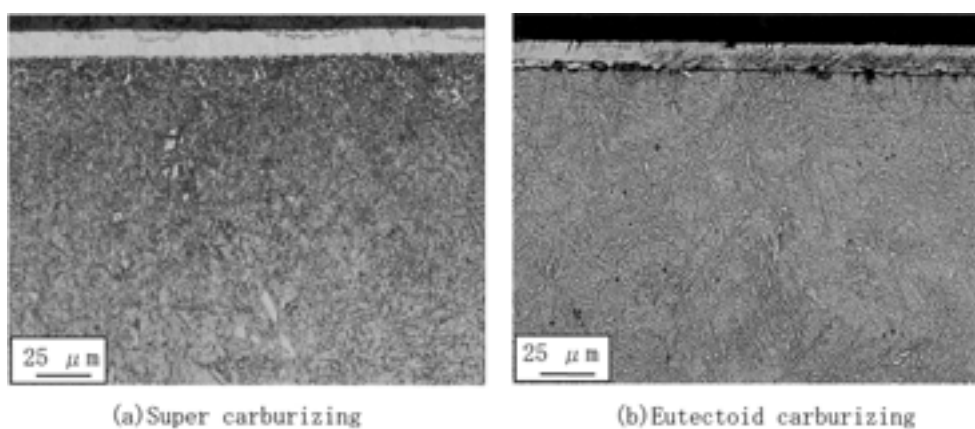


Fig.4. Optical micrographs of the carburized specimen near surface.

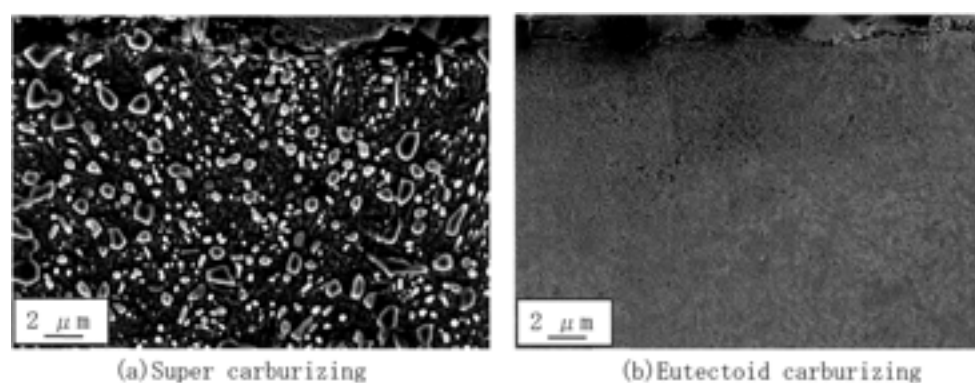


Fig.5. Carbide morphology of the carburized specimen near surface.

Fig.5 に、試験片の表層部を 5% - ピクリン酸アルコール溶液で腐食した組織の SEM 反射電子像を示す。高濃度浸炭材の浸炭層には球状の微細な炭化物が分散しているのが確認できる。炭化物には、円相当径が  $1\mu\text{m}$  程度のものとサブミクロンオーダーのものが混在しているが、全ての炭化物の平均円相当径を算出すると、約  $0.54\mu\text{m}$  であ

る。また、炭化物の体積率は 13.7 vol% である。

本研究で用いた供試材の組成に、表面の炭素濃度が 1.53 wt% となるように高濃度浸炭処理を行った場合、析出する炭化物は Cr を 1.4 wt% 程度含有するセメンタイトであると推察される。円相当径  $1\mu\text{m}$  程度の炭化物については、このことを EDX 分析によって確認している。

浸炭後の平均結晶粒径（旧  $\gamma$  粒径）は、高濃度浸炭材で  $10.2\mu\text{m}$ 、共析浸炭材で  $19.8\mu\text{m}$  である。繰返し浸炭法（2 回焼入れ）の影響で、高濃度浸炭材の方が共析浸炭材に比べて結晶粒は細かくなっている。

### 3. 2 浸炭層の炭素プロファイル

Fig.6 に、EPMA ライン分析による表層から深さ 2 mm までの炭素濃度の分布（浸炭プロファイル）を示す。表層から深さ 1.5 mm までの炭素濃度は、共析浸炭材に比べて高濃度浸炭材の方が高くなっている。高濃度浸炭材の表層炭素濃度は 1.53 wt%，共析浸炭材のそれは、0.74 wt% である。

Fig.7 には、表層から深さ 0.3 mm までの炭素濃度分布の詳細を示した。図中には、熱力学平衡計算ソフト・サーモカルクで計算した、炭化物を除いたマルテンサイト中の炭素濃度分布も示してある。この図より、高濃度浸炭材の炭素は主に炭化物として存在していることが理解できる。一方、マルテンサイト中の炭素濃度は高濃度浸炭材の方が共析浸炭材よりも若干高くなっており、共析浸炭材で 0.56 ~ 0.65 wt% であるのに対して、高濃度浸炭材では 0.69 ~ 0.74 wt% である。

供試材のミクロ組織および浸炭プロファイルの特徴を Table 4 に整理した。この表には、次節以降で説明する硬さ分布と  $\sigma_R$  分布の調査結果も併せて記した。

### 3. 3 HSP 後の硬さ分布におよぼす浸炭後硬さの影響

HSP 処理前の高濃度浸炭材と共析浸炭材の硬さ分布を Fig.8 に示す。高濃度浸炭材の表層硬さは 812 HV であり、

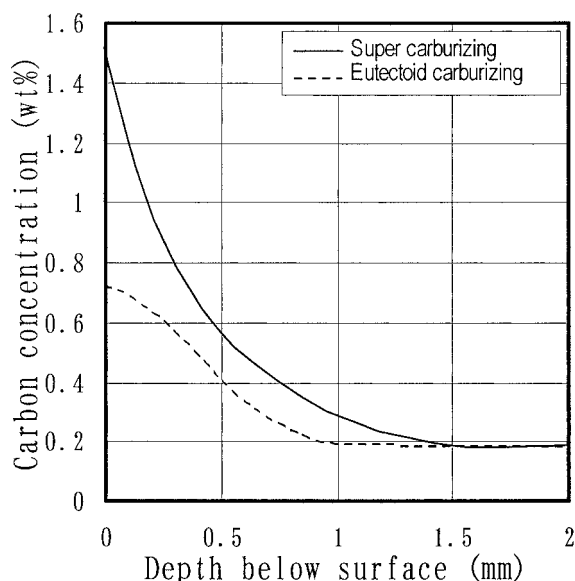


Fig.6. Carbon concentration profiles of the test specimen analyzed by EPMA.

浸炭層中に炭化物が分散していることで、共析浸炭材（743 HV）よりも 70 HV 程度硬さが高くなっている。浸炭による硬化深さ（ここでは全硬化層深さ）は、高濃度浸炭材で 1.52 mm、共析浸炭材で 1.01 mm であり、高濃度浸炭材の方が深くまで硬化されていることが分かる。表層から 0.3 mm までの硬さ分布の詳細を Fig.9 に示すが、高濃度浸炭材と共析浸炭材の硬さの差は深さ 0.3 mm 位置まで 50 ~ 70 HV 程度を保っている。

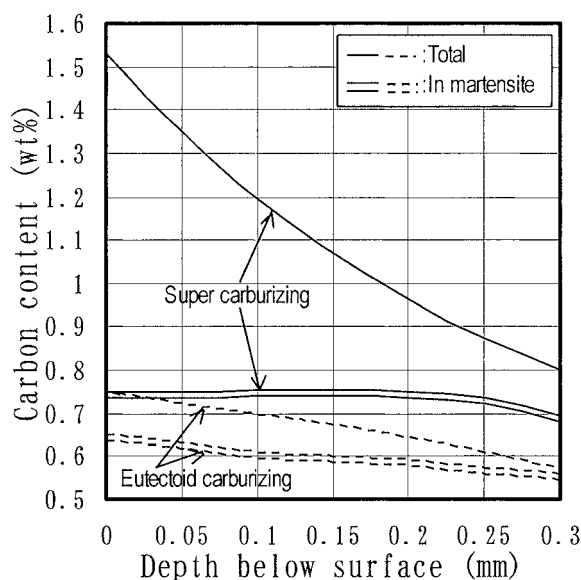


Fig.7. Detailed carbon concentration profiles of the test specimen near surface.

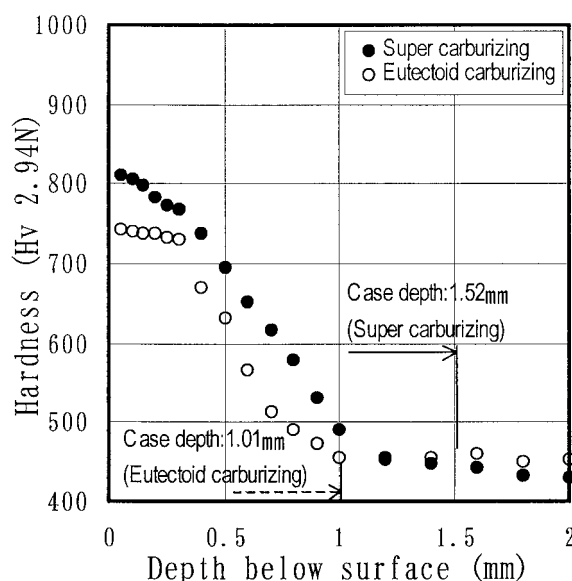


Fig.8. Hardness profiles of the carburized specimen.

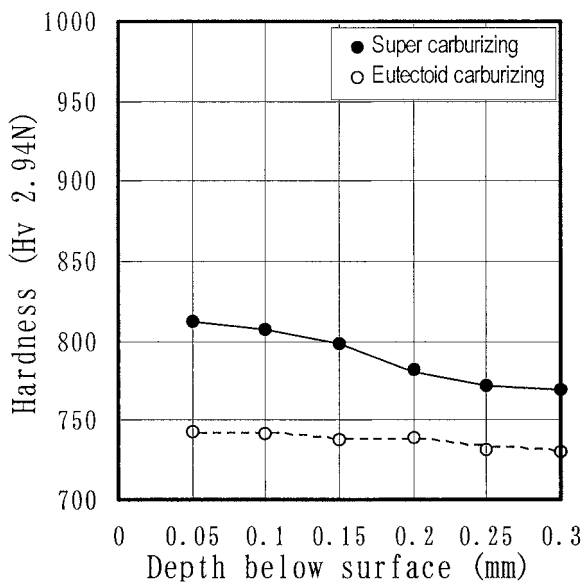


Fig.9. Detailed hardness profiles of the carburized specimen near surface.

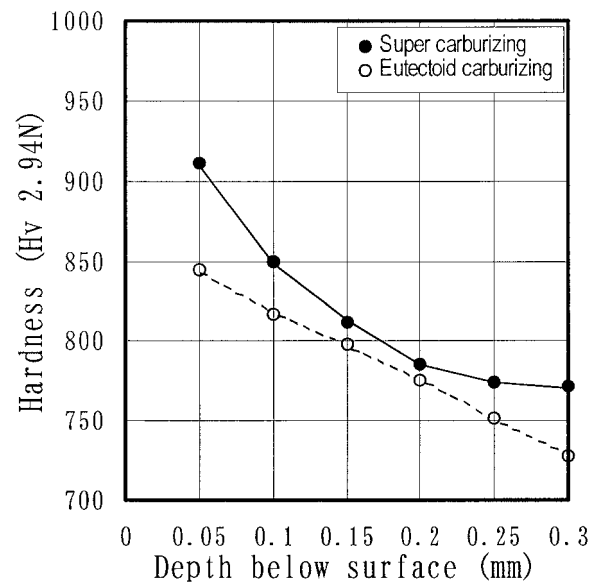


Fig.11. Detailed hardness profiles of the specimen after HSP near surface.

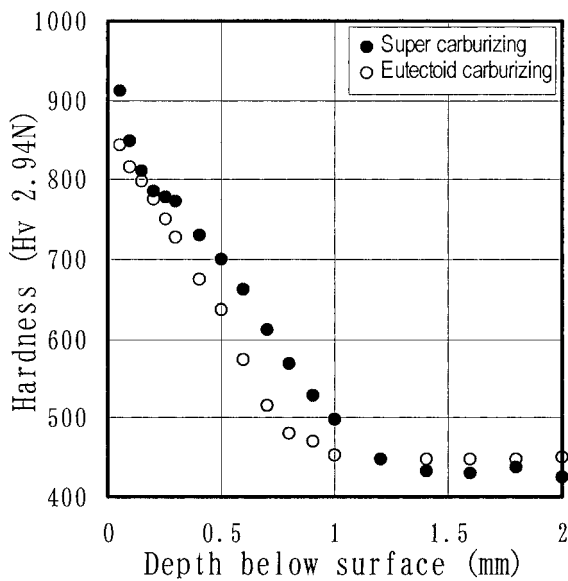


Fig.10. Hardness profiles of the test specimen after HSP.

Fig.10 には HSP 後の硬さの分布を、また、Fig.11 にはその表層付近の詳細を示す。HSP 後の表層硬さは、高濃度浸炭材で 911 HV、共析浸炭材で 843 HV であり、高濃度浸炭材も共析浸炭材も HSP 処理によって約 100 HV 硬さが向上していることが確認できる。しかし、両者の硬さの差は内部になるほど小さくなり、深さ 0.2 mm 位置ではほぼ同じ硬さ (780 HV) となっている。Fig.12 には HSP による硬さの向上量を表層からの距離に対してプロットした図を示すが、高濃度浸炭材の方が HSP によって硬化される領域が浅い範囲に限定されていることが確認できる。HSP

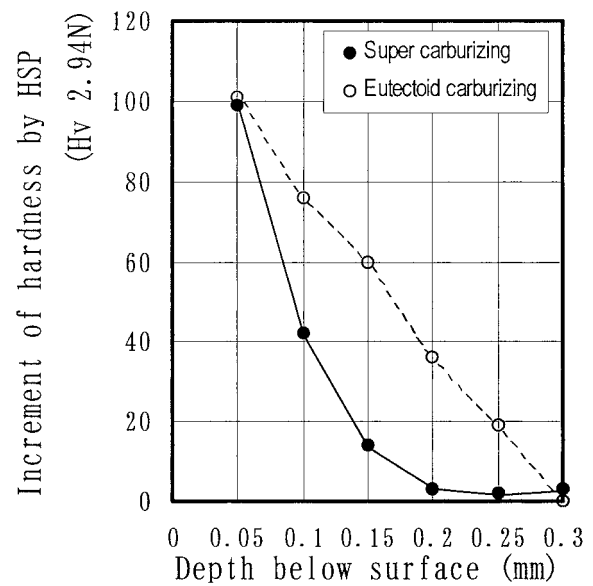


Fig.12. Increment of hardness by HSP.

により硬化される領域 (硬化深さ) は、高濃度浸炭材では約 0.2 mm、共析浸炭材では約 0.3 mm となっている。

Fig.13 に HSP 後の表層部を 1% ナイタル溶液で腐食して現出した組織の SEM 反射電子像を示す。表層部には HSP による加工層としての塑性流動層 (白線より表層側) が確認できる。この塑性流動層の平均深さは、高濃度浸炭材では約  $2.2\mu\text{m}$ 、共析浸炭材で約  $3.1\mu\text{m}$  であり、共に HSP による硬化深さの 1% 程度となっている。塑性流動層内に存在する炭化物は塑性変形しており、割れや破壊が発生している炭化物は観察されなかった。すなわち、硬質

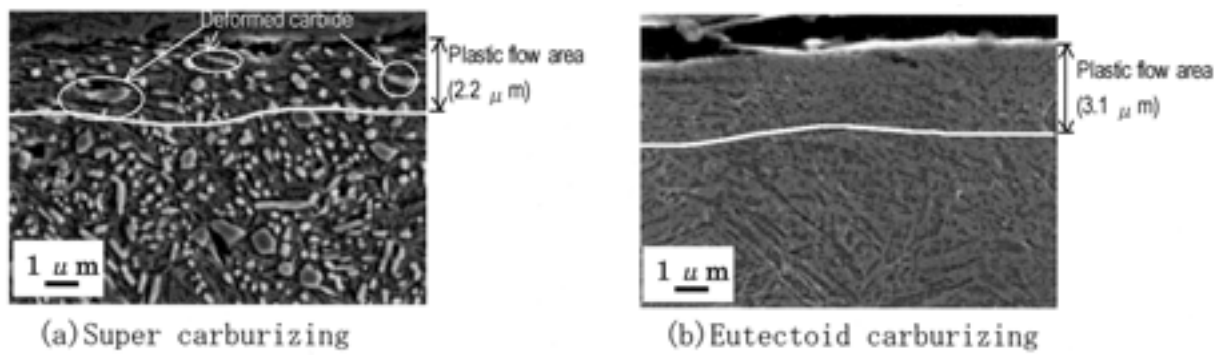


Fig.13. Plastic flow area below contact zone by HSP.

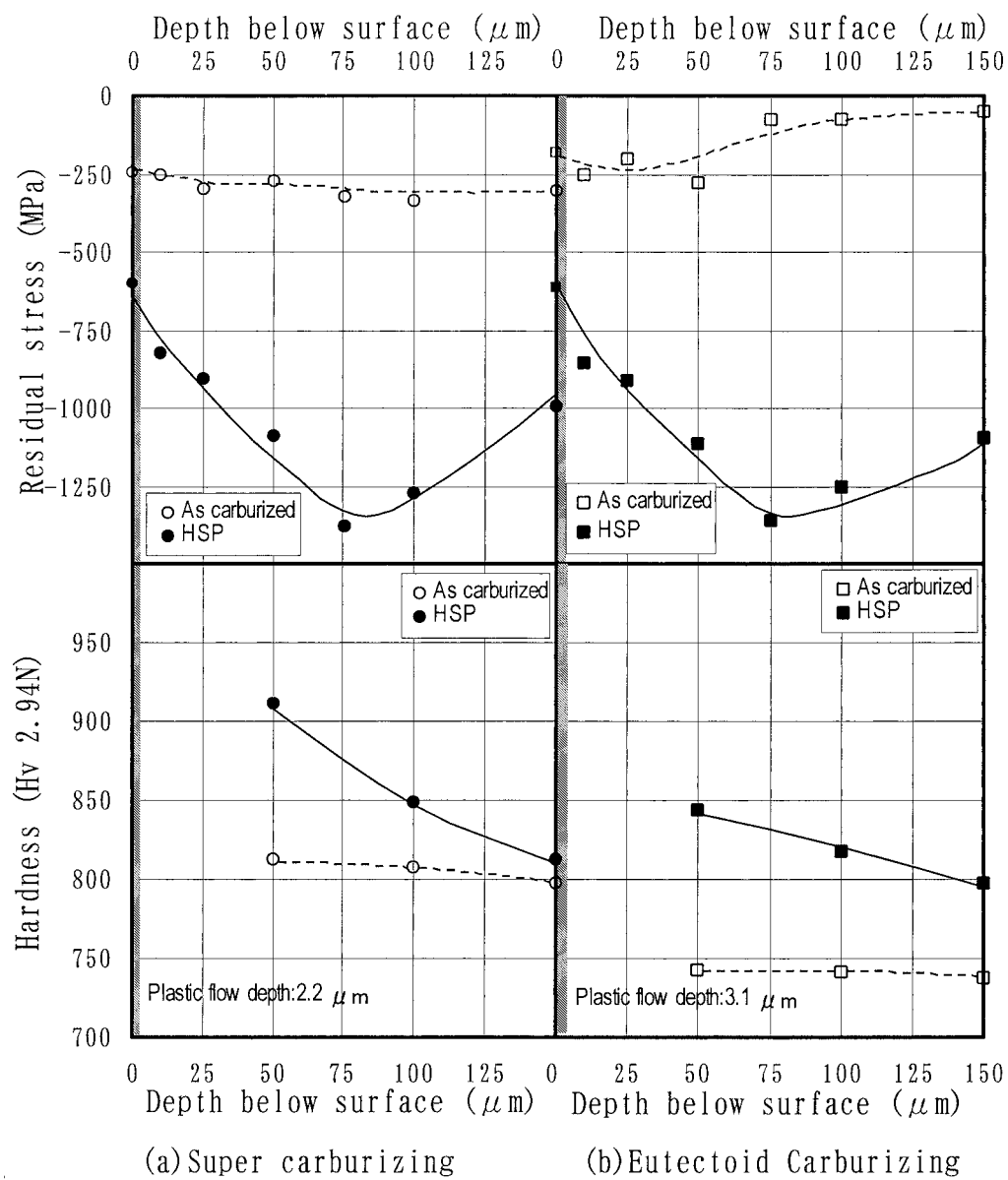


Fig.14. Relationship between residual stress and hardness profiles of carburized specimen.

な炭化物がマルテンサイトを有効に分散強化している状況が理解でき、高濃度浸炭材の塑性流動層の深さが共析浸炭材のそれよりも浅くなるのは、硬質炭化物の分散強化により浸炭層のマクロ硬さが高くなっているためであると考えられる。

### 3. 4 HSP 後の $\sigma_R$ 分布におよぼす浸炭後硬さの影響

高濃度浸炭材と共析浸炭材の圧縮  $\sigma_R$  分布の比較を Fig.14 に示す。  $\sigma_R$  分布におよぼす硬さ分布の影響を検討し易くするために、同図中には硬さ分布も併記した。浸炭処理後（HSP 処理前）の  $\sigma_R$  の絶対値 ( $|\sigma_R|$ ) は高濃度浸炭材の方が若干大きくなっているが、これは共析浸炭材に比べて浸炭後のマルテンサイト中の炭素濃度が高いことの影響として理解できる。一方、HSP 後の  $\sigma_R$  分布は、高濃度浸炭材と共析浸炭材では、ほぼ一致している。

Fig.10 および Fig.11 に示したように、HSP 後の硬さの分布は高濃度浸炭材と共析浸炭材で大きく異なっており、また、3.3 項で示した HSP 後の塑性流動の範囲、すなわち塑性ひずみ ( $\epsilon_p$ ) 分布も両者の間には差異があると考えられるため、HSP により付与される圧縮の  $\sigma_R$  には差異が生じているはずである。

そこで、HSP により付与された  $\sigma_R$  の絶対値の増分 ( $d\sigma_R$ ) を、HSP 後の  $|\sigma_R|$  と浸炭処理後の  $\sigma_R$  の絶対値 ( $|\sigma_{RC}|$ ) の差 ( $d\sigma_R = |\sigma_R| - |\sigma_{RC}|$ ) として評価した。Fig.15 には  $d\sigma_R$  を表層からの距離に対してプロットした図を示す。同図中には浸炭後の硬さ分布も示している。最表層部では、HSP により付与される  $d\sigma_R$  (圧縮残留応力値の増分) は、高濃度浸炭材と共析浸炭材でほぼ同じ値となっているが、全体的に高濃度浸炭材の方が低い値を示しており、芯部に近づくに従いその差は大きくなっている。この両者の  $d\sigma_R$  分布の差を  $\epsilon_p$  の分布の差で簡易的に説明<sup>4)</sup>したのが Fig.16 であるが、高濃度浸炭材と共析浸炭材の HSP 後の  $\epsilon_p$  分布にこのような差が生じていると仮定すれば、 $d\sigma_R$  の分布と  $\epsilon_p$  の分布 ( $\epsilon_p$  の値およびその勾配;  $d\epsilon_p/dx$ ) との間に矛盾を生じさせずに両者の  $d\sigma_R$  分布の差を説明できる。すなわち、HSP によって付与される  $d\sigma_R$  が高濃度浸炭材で低くなる傾向を示したのは、そのマクロ硬さが高いために  $\epsilon_p$  が内部まで分布しないことが理由であると考えられる。

### 3. 5 HSP 後の $\sigma_R$ 分布に及ぼす $\gamma_R$ の影響

高濃度浸炭材の特徴の 1 つとして、共析浸炭材に比べて浸炭層の  $\gamma_R$  量が増加する傾向にあることが挙げられるが、この  $\gamma_R$  量を意図的に増加させ浸炭層のマクロ硬さを

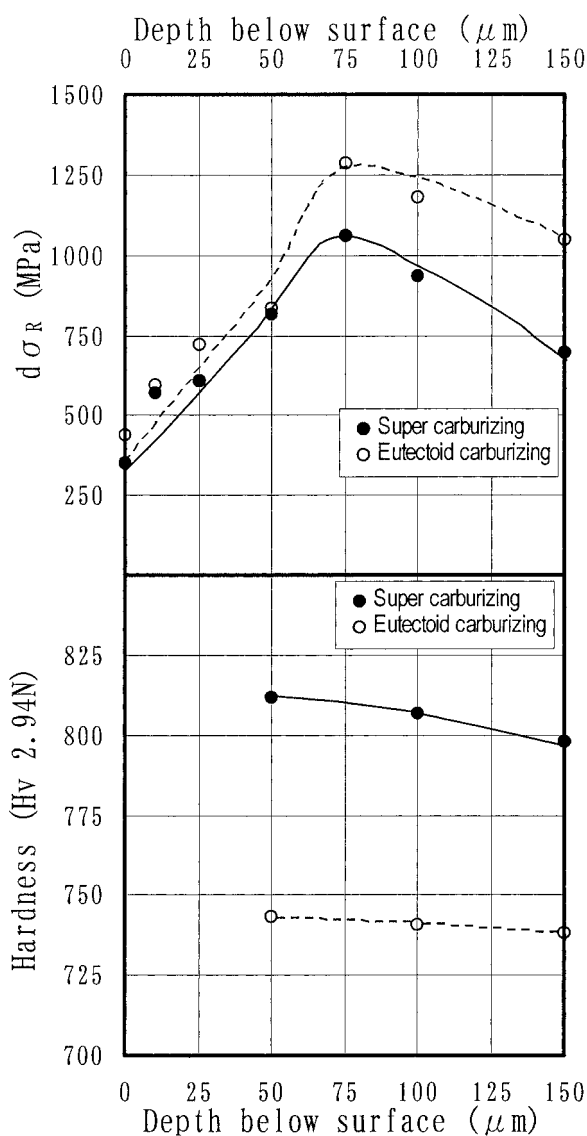


Fig.15. Relationship between increment of residual stress and hardness of carburized specimen.

低下させれば、HSP により導入される  $\epsilon_p$  を内部まで分布させられる可能性がある。あるいは、HSP によって  $\gamma_R$  を分解（加工誘起マルテンサイト変態）させることで、その際の変態膨張によって  $d\sigma_R$  が増大する可能性もある<sup>5)~7)</sup>。

今回、この可能性を検証するため、高濃度浸炭焼入れ後にサブゼロ処理 (SZT; 193 K × 43.2 ks) を追加した試料を準備した。  $\gamma_R$  量は、高濃度浸炭材の 23.4 vol% に対し、SZT 材では 5.3 vol% である。これらの試料に HSP 処理を施した後の  $\sigma_R$  を調査することによって、 $d\sigma_R$  に及ぼす  $\gamma_R$  の影響を調査した。

Fig.17 に、高濃度浸炭材とそれに SZT を追加した材料の HSP 前後の  $\sigma_R$  の分布を示す。SZT を施すことによって高濃度浸炭材の  $\sigma_R$  の絶対値は約 25 MPa 大きくなって



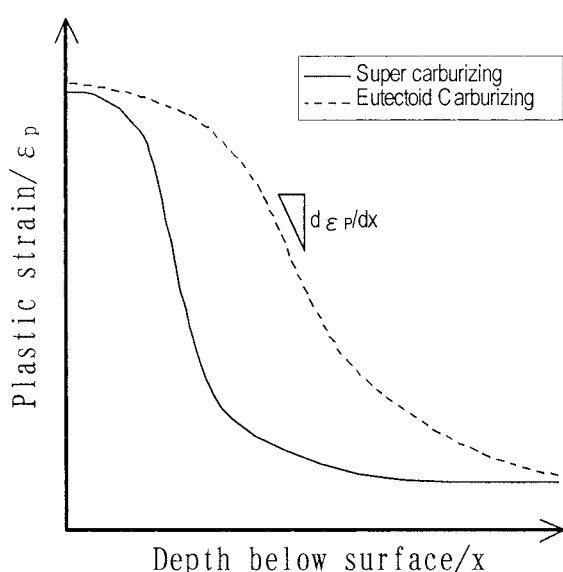


Fig.16. Image of plastic strain deposition.

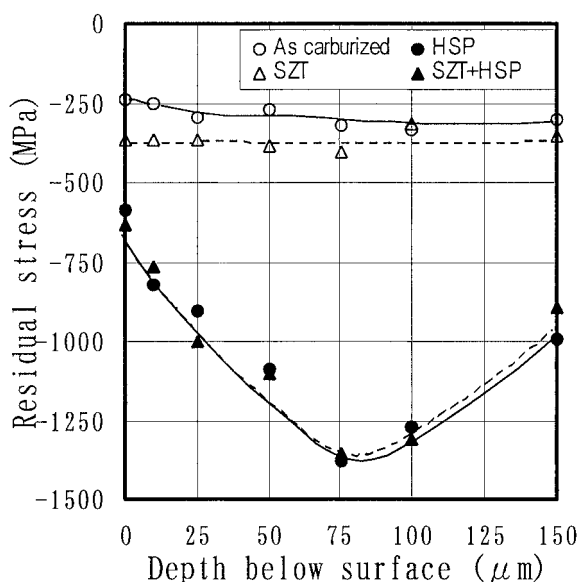


Fig.17. Residual stress profiles of SZT specimen.

いるが、これは  $\gamma_R$  がマルテンサイトに変態硬化した影響としては妥当な結果である。一方、HSP後の  $\sigma_R$  の分布は両者ではほぼ同一となっている。Fig.18に、高濃度浸炭材とSZT処理材の  $d\sigma_R$  の分布を、Fig.15と同様に整理した結果を示す。さらにFig.19には、表層から75  $\mu\text{m}$  位置の  $d\sigma_R$  の値を、浸炭層（表層から150  $\mu\text{m}$  位置まで）の平均硬さに対してプロットした結果を示す。Fig.19中には、HSPによって分解した  $\gamma_R$  量も示した。これらの図は、HSPによって付与される  $d\sigma_R$  値は浸炭層の平均硬さが硬いほど小さくなることを示しており、さらには、炭化物の

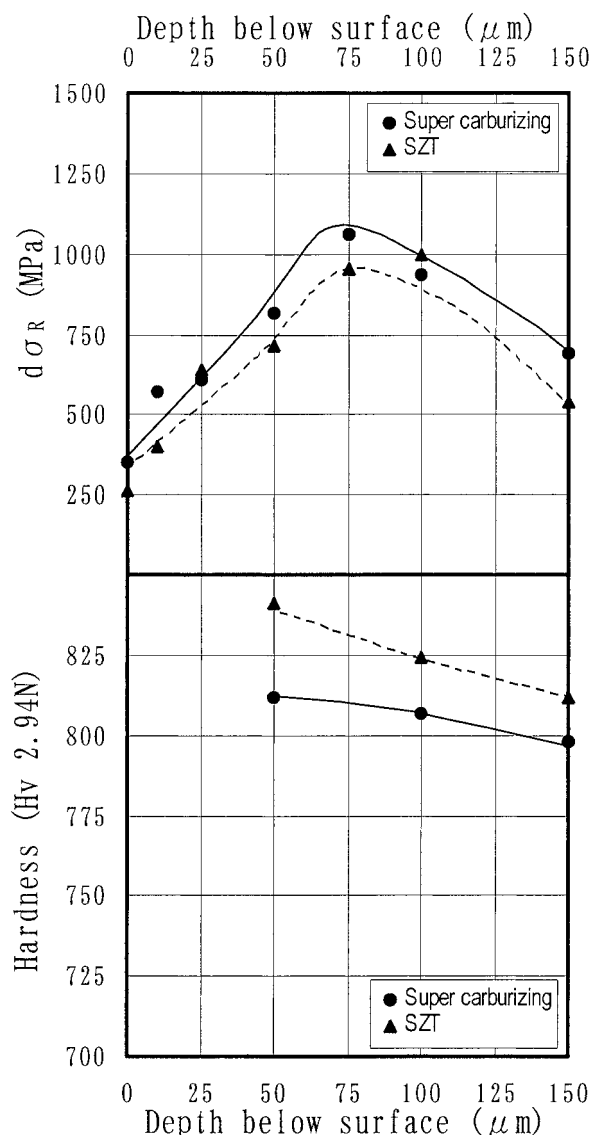


Fig.18. Relationship between increment of residual stress and hardness of SZT specimen.

存在にも  $\gamma_R$  量にも影響されず浸炭層の平均硬さで一律に整理されることを示している。

### 3. 6 疲労強度

Fig.20に、HSP処理を施した高濃度浸炭材および共析浸炭材の曲げ疲労試験結果を示す。Fig.14に示したとおり、両者の  $\sigma_R$  の分布はほぼ同一となっている。また、浸炭層の硬さは、Fig.10およびFig.11に示したように、高濃度浸炭材の方が共析浸炭材に比べて50～70HV程度高くなっている。

Fig.20からわかるように、 $3 \times 10^4$  回よりも高サイクル側では、共析浸炭材に比べて高濃度浸炭材の疲労強度が高い値を示している。この理由として、浸炭層の硬さが高いことが挙げられるが、疲労き裂が母相（マルテンサイト）

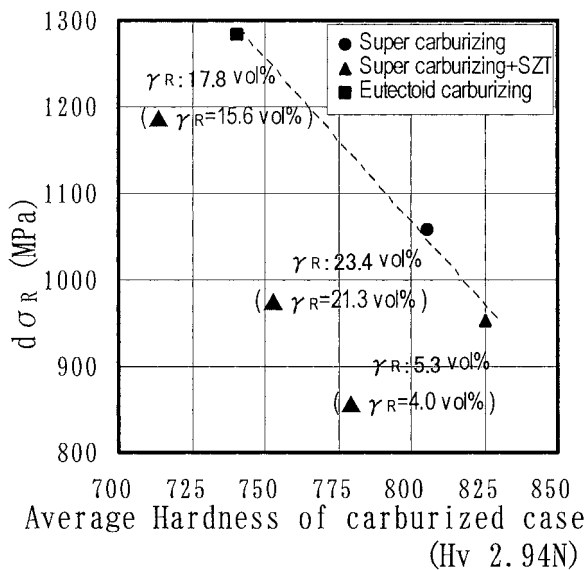


Fig.19. Influence of retained austenite on increment of residual stress at 75  $\mu$ m depth below surface.

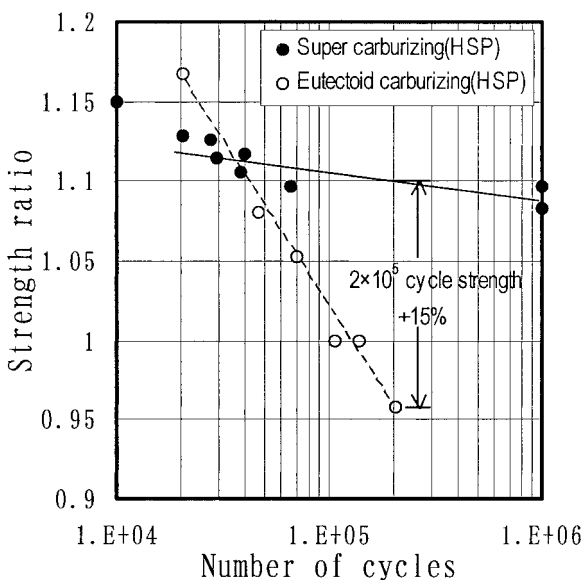


Fig.20. Bending fatigue properties.

に発生していることを考慮すると、正確には、炭化物を除いたマルテンサイトの硬さが高くなっているためであると考えられる。Fig.21に、高濃度浸炭材のHSP後のマルテンサイト硬さを、炭化物の硬さ（約1200HV）とその体積分率から推算した結果を示す。高濃度浸炭材のマルテンサイトの硬さは共析浸炭材のマルテンサイト硬さに比べて高くなっており、表層から0.05mmの位置では約25HVの差があることが確認できる。ただし、例えば、 $2 \times 10^5$ 回時間強度で約15%の強度差が生じている事実をこのマルテンサイトの硬さの影響だけで説明することは困難であり、高濃度浸炭材の特徴である炭化物の微細分散が疲労強

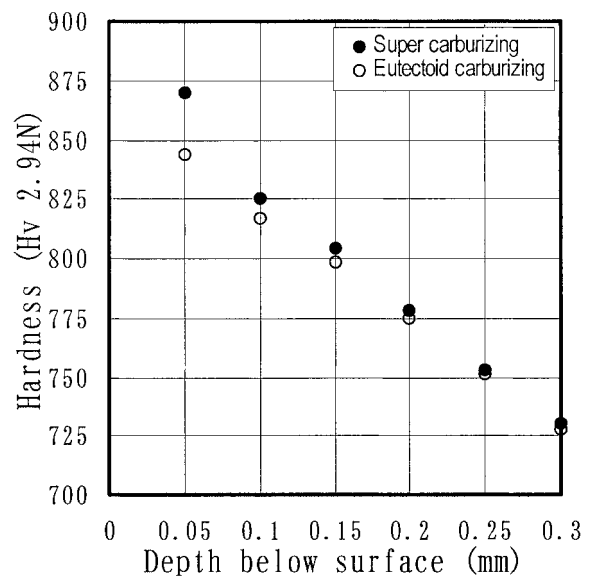


Fig.21. Matrix hardness profiles of test specimen.

度に対して有利に作用している<sup>8)~10)</sup>ことが推察される。

なお、今回評価した高濃度浸炭材と共析浸炭材はHSP後の圧縮 $\sigma_R$ 分布がほぼ同一となったが、 $\sigma_R$ の分布はHSPの条件によって変化するため、HSPの条件によっては当然、高濃度浸炭材と共析浸炭材の疲労強度の関係は変化する。

## 4. 結 言

高濃度浸炭材にショットピーニングを適用した場合の圧縮残留応力（ $\sigma_R$ ）分布を調査し、共析浸炭材の場合と比較して以下の知見を得た。

- 1) ショットピーニング処理によって付与される圧縮残留応力の増分（ $d\sigma_R$ ）は、浸炭層に硬質な炭化物が分散する高濃度浸炭材においても共析浸炭材においても浸炭層の硬さで一律に評価でき、浸炭層の硬さが高い高濃度浸炭材は、共析浸炭材に比べて付与される $d\sigma_R$ は小さくなる。ただし、一般に、浸炭焼入れ後の圧縮 $\sigma_R$ は高濃度浸炭材の方が高くなるため、ショットピーニング後の圧縮 $\sigma_R$ の値は共析浸炭材に比べて必ずしも低くはならない。
- 2) ショットピーニング後の圧縮 $\sigma_R$ の分布が同一の場合、高濃度浸炭材の疲労強度（高サイクル側の時間強度）は共析浸炭材に比べて高くなる傾向にある。これは、疲労き裂の発生箇所となるマルテンサイト相中の炭素濃度が高く強度が高いことに起因すると考えられるが、今回の実験で確認された共析浸炭材との疲労強度の差は、このマルテンサイト相の強度差だけでは説明できず、高濃度浸炭材特有の炭化物の微細分散が疲労強度に対して有利に作用していると推察される。

## (文 献)

- 1) 羽生田智紀：熱処理, **44** (2004), 5, 276.
- 2) 永村和照, 池条清隆, 菊地健, 志賀隆：日本設計工学会中国支部講演論文集, No.17, 29.
- 3) 堀哲, 羽生田智紀：機械設計, **49** (2005), 12, 40.
- 4) 須藤一：残留応力とゆがみ, 内田老鶴圃, (1988), 98.
- 5) 中村守文, 松島義武, 長谷川豊文, 中谷良行：神戸製鋼技報, **42** (1992), 1, 11.
- 6) 広松秀則, 上野英生, 福住達夫, 坂本和夫：三菱製鋼技報, **28** (1994), 1, 2, 22.
- 7) 衛藤洋仁, 松井勝幸, 神泰行, 安藤柱：日本機械学会論文集 (A編), **69** (2003), 733.
- 8) 木村利光, 中村貞行：電気製鋼, **65** (1994), 295.
- 9) 瓜生英樹, 黒島義人, 原田昭治：日本機械学会論文集 (A編), **61** (1995), 2109.
- 10) 安部聡, 池田正一：神戸製鋼技報, **54** (2004), 3, 21.