

浸炭鋼の表面残留応力におよぼす 水ジェットを用いたハードショットピーニングの効果

石黒 隆義*・島崎 利治*・寺山 清志*・米口 明雄*²

Effects of Hard Shot Peening with Water Jet
on Surface Residual Stress Distribution of Carburized Steels

Takayoshi ISHIGURO, Toshiharu SHIMAZAKI, Kiyoshi TERAYAMA and Akio YONEGUCHI

Synopsis : It is well known that residual compressive stress is an important factor to fatigue strength of carburized parts for automotive industry *etc.* A systematic study of effect of hard shot peening conditions using high pressure water jet on the surface residual stress distributions in carburized and nitridized SCM-420 steel with surface retained austenite of 4, 12 and 24 pct has been conducted. As a result, high peak value, 1125 MPa and high integrated mean value of stress distribution of compressive residual stress from surface to 300 μ m depth were obtained by hard or high energy shot peening with water jet. These increment were caused by elasto-plastic peening effect of matrix and transformation of retained austenite, especially most effective to the specimen with 4 pct surface retained austenite. Effect of 2 step peening on compressive residual stress at most surface was not conspicuous in this study.

Key words : residual stress distribution ; water jet peening ; hard shot peening carburized steel ; residual austenite ; stress induced transformation.

1. 緒言

近年、自動車などで環境保護のための規制、高出力化、低燃費化の面より、浸炭鋼部材の一層の高強度化、軽量化が望まれている。車軸、歯車などでは幾つかの特性が要求されており、特に切欠靱性に加えて曲げ疲労特性を高めるために従来表面近傍の硬度と圧縮残留応力の増大に着目し、浸炭、窒化など熱処理を組み合わせ、更にショットピーニング処理を行うことが非常に有効であることは良く知られている。また、この浸炭窒化及び熱処理プロセスで生ずる異常層については、浸炭方法及び浸炭鋼の化学組成及び雰囲気面のより研究されてきた¹⁾。ショットピーニングについては、ショットの衝突エネルギーの面より遠心力を利用するインペラー方式から高压空気による方法へと高エネルギー化、すなわちハードショットピーニング化に向かっており、表面近傍で圧縮残留応力の高いピーク値及びその分布の高い積分平均値が発生することが認められ、回転曲げ疲労特性及び歯車テスト寿命が著しく向上することが知られている^{2)~5)}。また、秦野らは大径ショットと小径ショットを二段階でショットピーニングを行うことにより、最表面部の圧縮残留応力が高くなることを認めている³⁾。本研究では、疲労強度に対して重要な因子である表面近傍での圧縮

残留応力分布に着目し、JIS浸炭鋼を用いて浸炭窒化及び熱処理によりショットピーニング前の残留オーステナイト量(γ_R)を変え、高压水を利用したショットピーニングによりショットピーニングの衝突エネルギーを従来法以上に高めることにより、表面残留応力ピーク値及び分布の積分平均値をどこまで高めうるか、またそのための最も有効な初期および変態 γ_R はどの程度であるのか、更に、最表面近傍の残留応力分布に対する二段階ピーニングおよび異径ショットを混合した混合ピーニングの効果についても検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究に用いた鋼材の化学組成を Table 1 に示す。JISのSCM420鋼の25 ϕ ×100mm熱延棒材を入手し、熱間圧延、920°C×1h焼鈍後、フライス加工、研削を経て26×53×8mmの試験片を作製した。

表面 γ_R 量の異なるA, B, Cの三シリーズの試験片を作製するために、AではRXガス+C₃H₈ガス、910°Cカーボンポテンシャル(C.P.)0.8%で1h10min浸炭、830°C×30min保持後油冷、130°C×2h焼戻し、空冷、液体窒素処理および160°C×2h焼戻しを行い、Bでは上記の浸炭、油焼入れ後

平成5年6月10日受付 平成5年10月8日受理 (Received on June 10, 1993; Accepted on Oct. 8, 1993)

* 富山大学工学部 (Faculty of Engineering, Toyama University, 3190 Gofuku Toyama 930)

* 2 富山大学工学部学生 (現: 日本発条(株)) (Student, Faculty of Engineering, Toyama University, now NHK Spring Co., Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of steels tested (mass %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	N	O
0.20	0.24	0.78	0.024	0.022	1.13	0.16	0.047	0.0062	0.015

160°C×2h焼戻しを, CはRXガス+C₃H₈ガス, 870°C, C.P.0.8%で40min浸炭に続いて4h30minRXガス+C₃H₈+NH₃中, 870°C C.P.+N.P=0.9%で浸炭窒化, 更にRXガス+NH₃中で1h30min窒化後油冷し最後に160°C×2h焼戻しを行った。

2・2 高圧水および鋼ショットによるハードショットピーニング処理方法

ショットピーニング処理は, 試験片の26×53mmの面に直角に, 径2mmのノズルよりノズル/試験片間距離105mm, 送り速度8.3×10⁻³m/sでショットの混入した高圧水を投射し試験片の短片に平行に20×26mmを走査した。γ_R量の異なるA, B, C系列の各試験片に対して行った高圧水の圧力, 鋼ショット(硬さH_{RC}60)の粒径及び混入量及び高圧水によるショットピーニング条件の詳細はTable 2に示す。表中のNo. 1, No. 2系列は高圧水のみでピーニング処理するもので水圧がそれぞれ69, 118MPaとした。No. 3系列は59MPaの高圧水に径0.8mmの鋼ショットを混入したもの, No. 4系列は水圧118MPa, 径0.4mm鋼ショットを混入, No. 5系列は水圧118MPaに径0.8mmショット混入, No. 6系列は水圧59MPa, 混入ショット径0.8mmで1段処理, 引き続

Table 2. Conditions of hard peening with water jet and steel shot.

No.	Pressure of water jet (MPa)	Dia. of shot (mm)	Apparent impact energy (10 ⁻² J/m ²)		Remark
1	69	—	10.1		Water jet only
2	118	—	22.6		"
3	59	0.8	26.0		Single
4	118	0.4	61.0		"
5	118	0.8	61.0		"
6	59	0.8	26.0	87.0	2 steps
	118	0.4	61.0		
7	118	0.8+0.4	61.0		Mixed

Table 3. Conditions of ordinary shot peening with air jet and impeller.

No. of specimen	Dia. of shots (mm)	Air pressure (MPa)	Speed of shot (m/s)	Coverage (%)	Method
B-9	0.8	0.49	—	300	Air jet
B-10	0.4	0.49		300	
C-9	0.8	0.49		300	
	0.4			300	
C-10	0.8	—	70	300	Impeller

き水圧118MPa, 混入ショット0.4mmで2段処理を行った。No. 7系列は水圧118MPa, 径0.8及び0.4mmのショットを混合したものを示す。また比較のために行った通常のインペラー方式及びエアノズル方式によるショットピーニング処理条件をTable 3に示す。γ_R量, B, C系列の試片に対し, 混入ショットの径および硬さを高圧水による場合と同一とし, エアノズル方式では投射圧0.49MPaで, またインペラー方式では70m/sの投射速度でカバーレージ300%, アークハイト0.75mmで処理した。

2・3 残留応力, γ_R量の測定

浸炭, 浸炭窒化及び熱処理を行った試片について, 表面を過酸化水素水, 弗酸混合液を用い化学研磨で逐次除去しながら深さ方向に50, 100, 150, 200, 300μmのレベルで測定した。残留応力の測定は, 試験片幅(25mm)方向について理学電機製X線残留応力測定装置を用い, CrKα₁線の焼戻しマルテンサイト(211)面の回折を利用して行い, Sin²ψ法により算出した, また板厚減による残留応力の補正についてはR. Richman and R. Landgrafの方法⁹⁾に従って検討した。

次にγ_R量の測定は理学電機製X線回折装置を用いて焼戻しマルテンサイト(200)とγ_R(220)回折パターン積分強度値の比較より求めた。γ_Rの積分強度値が小さいため, 数点の回折結果より平均値を取った。

3. 実験結果

3・1 ピーニング処理の単位面積当たりの衝突エネルギー

処理面積は26×20mmで水圧(P)とノズル径より水の流量を算出し, 水と混合ショットの混合比から求めた混合体の密度(ρ)と水圧よりショットを混入した高圧水の流速Vを(1)式より算出し,

$$V = \sqrt{(2P/\rho)} \dots\dots\dots (1)$$

更にこのVと混合体の密度から見かけの衝突エネルギーを求めた結果をTable 2に併記した。その結果, 高圧水のみ0.1 J/m²から最高0.61 J/m²となった。処理条件No. 6は2段の処理によるエネルギー値を加えたために0.87 J/m²となったものである。また通常ショットピーニングであるインペラー方式およびエアノズル方式での値はそれぞれ0.61 J/m²の約1/20及び1/5となった。

3・2 残留オーステナイト分布

Fig. 1は, ショットピーニング前のA, B, C試片のγ_Rおよび表面残留応力の表面から深さ方向の分布を示した。最表面部のγ_Rは, それぞれ4, 12, 24%であるが, Aでは100μm, B, Cでは50μmの深さで最大値を示した。この試験片にTable 2, Table 3に示したピーニング処理を行ったもののγ_Rの分布を代表的な処理条件No. 1と6についてそれぞれFig. 2とFig. 3に示した。

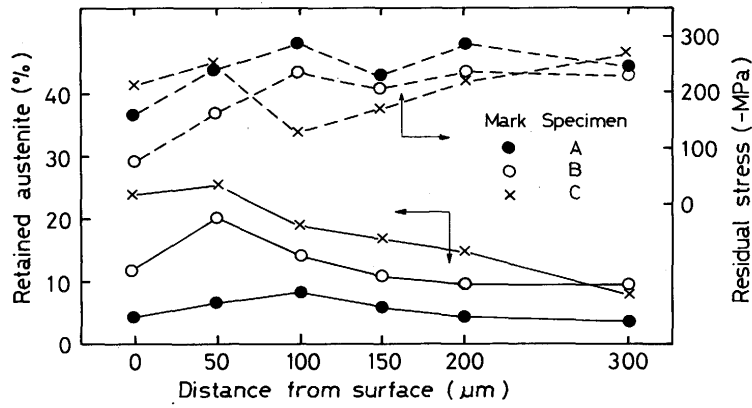


Fig. 1. Retained austenite and residual stress distributions of unpeened specimens.

Fig. 2より高圧水のみでのピーニングでは γ_R の少ないA試験片ではほとんど変態していないが、 γ_R の高いB, C試験片では0~100 μm の範囲で測定精度の問題もあるが γ_R の変態が若干生じている。Fig. 3では、径0.8と0.4mmショットの2段ショットによる結果であるがA試験片では200 μm 、B, C試験片では300 μm まで γ_R の変態が生じている。 γ_R の変態量、変態率ともに表面から50 μm のところでも最大になった。ピーニング条件No. 3, 5, 7についてもFig. 3とほぼ同様の γ_R の分布が得られた。

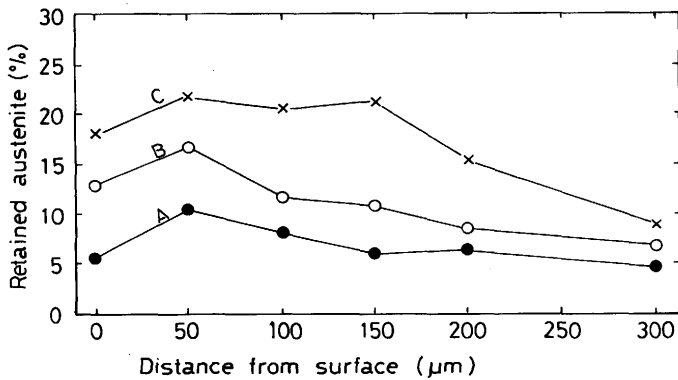


Fig. 2. Retained austenite distributions of water jet peened specimens (condition: 1).

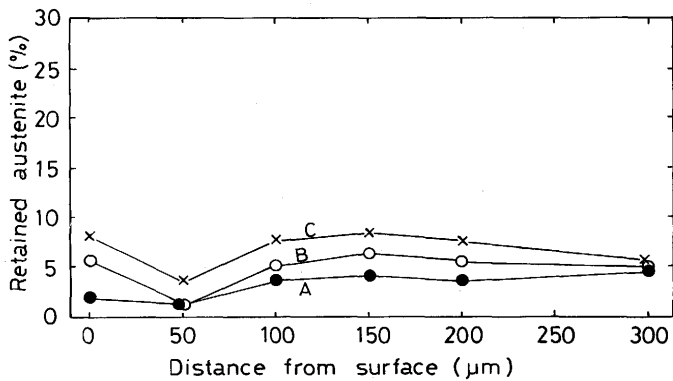


Fig. 3. Retained austenite distributions of mixed hard shot peened specimens (condition: 6).

3・3 残留応力分布

Fig. 4に高圧水のみによるピーニング処理(条件No. 1)したものの残留応力分布をピーニング処理しないものと比較して示した。最表面部でA, B, C試験片ともに200~300MPaの圧縮残留応力の増加がみられるがピーク値で500MPa程度であり、小島ら²⁾のデーターからも小野式回転曲げ疲労強度が600MPaと従来浸炭材の値と余り変わらないと推定される。

Fig. 5はショットピーニング条件No. 3, 4についての残留応力分布曲線を示した。条件No. 3のC試験片では50 μm

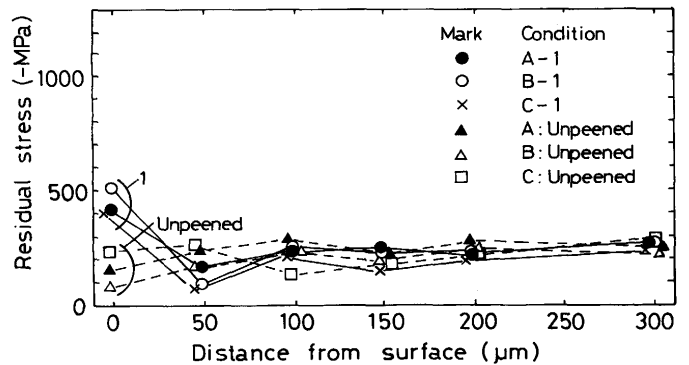


Fig. 4. Residual stress distributions of water jet peened specimens (condition: 1).

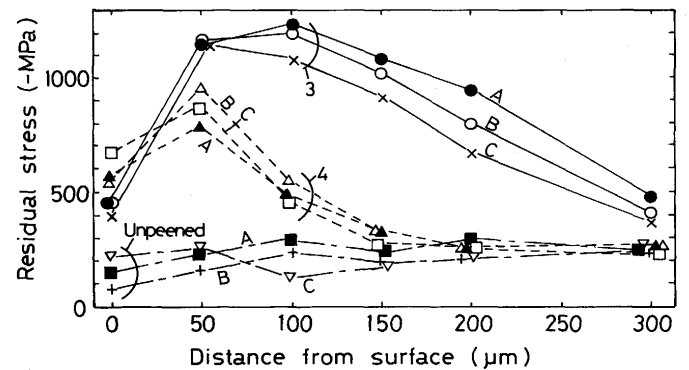


Fig. 5. Residual stress distributions of unpeened and hard shot peened specimens (condition: 3 and 4).

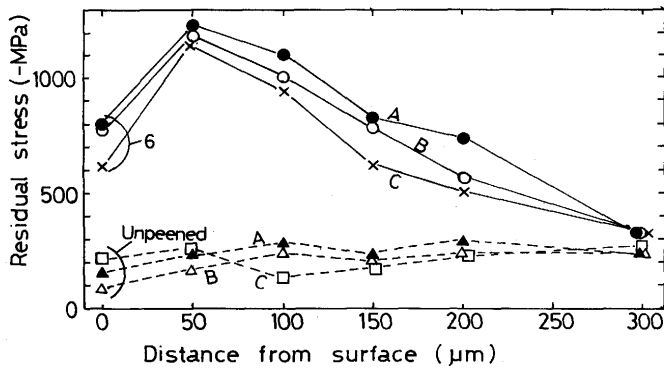


Fig. 6. Residual stress distributions of 2 step hard shot peened specimens (condition: 6).

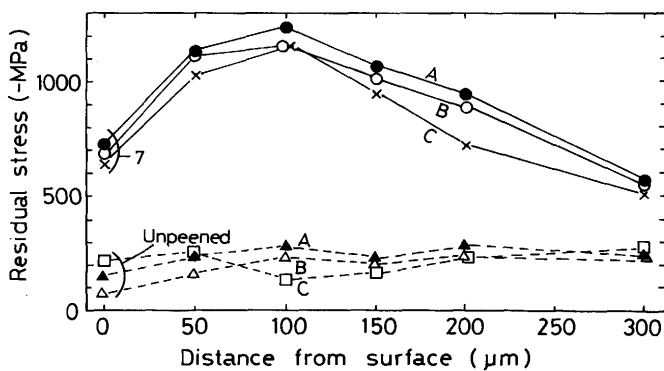


Fig. 7. Residual stress distributions of mixed hard shot peened specimens (condition: 7).

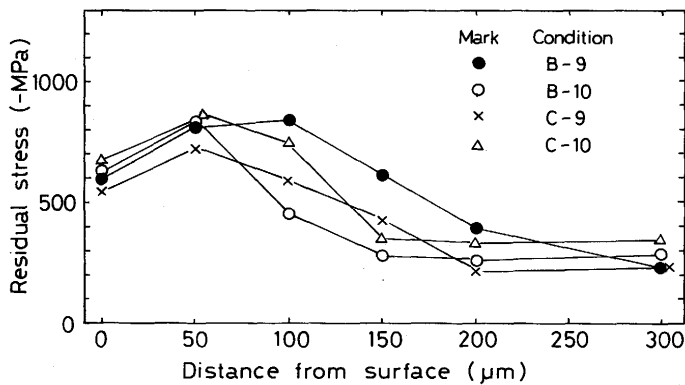


Fig. 8. Residual stress distributions of shot peened specimens with ordinary methods.

深さで最大値を示し、A、B試片では100μmで最大値を示した。同一径のショット(0.8mm)を用い、水圧を2倍として衝突エネルギー密度を0.26から0.61 J/m²に高めた条件No. 5の応力分布もほぼ同様の分布曲線を示したので省略した。一方、衝突エネルギー密度が0.61 J/m²でもショット径が0.4 mmの条件No. 4では、Fig. 5に示したように初期γ_Rレベルにかかわらず50mmの位置でピーク値を持つ低い残留応力分布を示した。

Fig. 6は、秦野らによって最表面残留応力レベルが高くな

るとされている2段ショットによるピーニング結果(条件No. 6)に対する残留応力分布曲線であるがピーク値は高いが最表面の値は高くないことが判る。Fig. 7は0.8mmと0.4 mmのショットを混合した条件No. 7のショットピーニング応力分布曲線であるが、0.8mmのみでの一段ショットと同じエネルギー密度でのピーニング条件No. 3とほぼ同様な分布形状を示した。

Fig. 8は、通常行われているインペラー方式とエアノズル方式によるショットピーニング処理後の残留応力分布を示した。表面より50~100μmのところピーク値を示したが、その値は高圧水を用いたショットピーニング処理をしたものに比して30から40%程度低い値を示した。

4. 考察

4.1 残留応力分布に及ぼすショットピーニングの衝突エネルギーとショット径の影響

単位面積あたりに与えた見かけの衝突エネルギーは、Table 2に示したようにピーニング条件No. 4, 5, 7では等しいが、圧縮残留応力分布はFig. 9に示したように表面γ_R量4%のA試片に対するピーニングの結果を比較するとA-4とA-5, A-7の間に大きな差があり、また衝突エネルギーの小さい処理条件No. 3の試片の残留応力分布曲線はむしろ条件No. 5, 7に近い。また条件No. 3, 5ではショットの径が同じであることから見かけの衝突エネルギーよりもショット径の影響が大きいことが判る。このことは単位面積あたりの衝突エネルギーを高圧水中に混入させたショットの量をもとに計算したが、個々のショットの質量差が有効な衝突エネルギー差となることを示している。また、残留応力分布ピーク位置が表面から50~100μmに存在する理由について橋内ら⁷⁾と同様にHertzの理論に従うとして

$$\tau_{max} = 0.31P_{max} \dots\dots\dots (2)$$

$$Z = 0.47 \sqrt{(2hr - h^2)} \dots\dots\dots (3)$$

ここでτ_{max}は接触圧力Pにより生ずる最大せん断応力、Zは

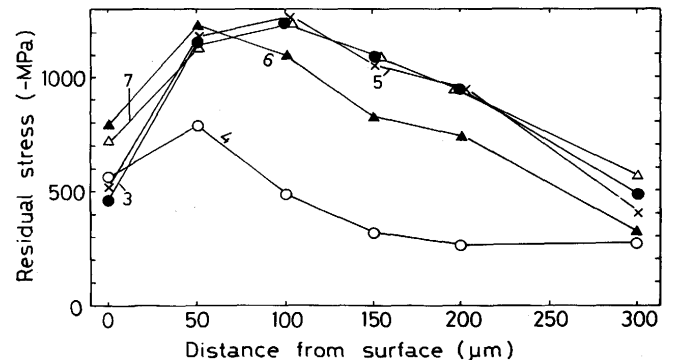


Fig. 9. Residual stress distributions of hard peened specimens with 4 pct initial retained austenite.

τ_{max} を発生する接触面からの深さ, h はくぼみの深さ, r は押しつけたショットの半径であり, (2)式から衝突エネルギーが大きいとき, τ_{max} が大となり残留応力の増大が考えられ, また (3) 式より残留応力のピーク位置を試算すると本研究の径0.4, 0.8mmショットで $h=r/3$ とすると処理条件No. 4 の Z は $70\mu\text{m}$, 条件No. 3, 5 は $140\mu\text{m}$ となり Fig. 9 のピーク位置がほぼ一致することが判る。

4・2 2段ショットピーニング及び混合ピーニングの効果

秦野らによると0.8mmハードショットピーニング後に0.1mmビーズのピーニングを行うことにより最表面部近傍の残留応力分布を高め, 歯車の疲労強度の向上に有効であるとしているが, 上記の (3) 式の最大せん断応力の発生位置の Z を小さくするためにはピーニング処理面の硬度を高めるか, すなわち比重の大きな小径ショットを硬化面に衝突させることによってショット径 (r) 及びくぼみ深さ (h) を小さくすればよい。しかし r を小さくすれば衝突エネルギーが小さくなるため高い残留応力は得られない。従って, h を小さくするためにピーニング処理面の硬度を高め, 比重の大きな小径ショットを硬化面に衝突させることによって最表面近傍の残留応力分布を高めることが考えられる。Fig. 5, Fig. 6 及び Fig. 9 から0.8mmと0.4mmのショットによる2段ショットで0.8mmのみでのショットピーニングに比して残留応力のピーク位置がやや表面側に移動していることが判る。しかし最表面部の残留応力値はあまり向上しなかった。この原因については一段目と二段目のショット径の比の効果を十分検討できなかったこと, 次に初期 γ_R の差が小さかったこと, 初期 γ_R の多いC試片の応力値が最も低いことも考えて第1段階のピーニングで初期 γ_R が全て変態しなかったために (2段ピーニング後でもA, B, C試片がそれぞれ2, 6, 8%残留), (3)式の h が小とならなかったものと考えられる。

次に条件No. 7の混合ピーニングの効果についてであるが, Fig. 7に示したように残留応力分布は0.8mmショットによる一段ピーニングと近い分布位置を示したが表面から $300\mu\text{m}$ 深さまでの積分値は本実験で最も高く, 子安らの報告に従えば積分平均値が歯車の寿命と比例しており, 最表面部の残留応力値の向上はあまり期待できないが今後検討の余地がある。

4・3 初期残留オーステナイトの効果

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 及び Fig. 9 より0.4mmショットを使用した条件No. 4を除いて表面残留応力値と分布のピーク値はほぼ同様の傾向を示したので代表的な処理条件No. 6, すなわち2段ピーニング処理した試片について検討すると, Fig. 10に示したように初期残留応力分布の異なる試片A, B, Cの γ_R に対するハードショットピーニング処理後の残留応力分布の関係, また Fig. 11はハードショットピーニング処理により変態した残留オーステナイト ($\Delta\gamma_R$) とハードショットピーニング処理による残留応力の変化量 ($\Delta\sigma_R$) の関係

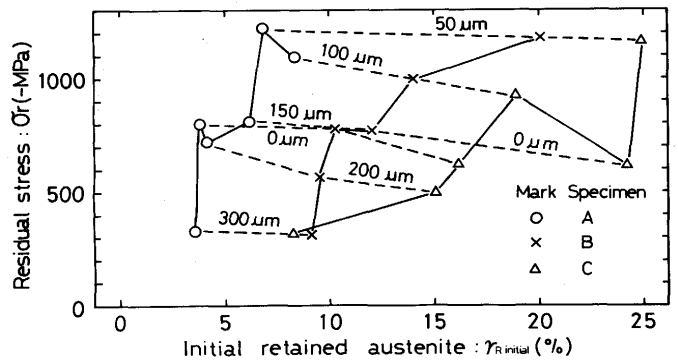


Fig. 10. Residual stress at the each depth from surface vs. initial surface retained austenite.

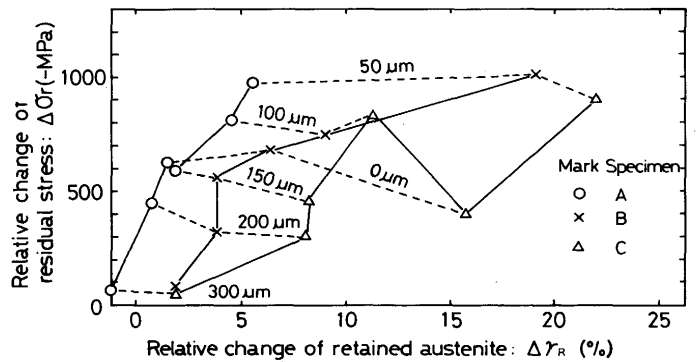


Fig. 11. Relative change of residual stress to the relative change of retained austenite at the same depth from surface.

を示した。Fig. 11に示すように, 初期 γ_R の最も少ない (表面で4%) A試片については, $\Delta\gamma_R$ と $\Delta\sigma$ の関係はほぼ直線関係を示したが, 初期 γ_R の多いB, C試片ではAよりも大きな $\Delta\gamma_R$ でも得られる $\Delta\sigma$ の差はなく, 初期 γ_R が表面で4%あれば本浸炭鋼で高い圧縮残留応力が得られ, 窒化処理の必要がないことがわかる。また, 本法のように高圧水を用いた高い衝突エネルギーでも表面残留応力の積分平均値はやや大きくなり, 今回行った通常ピーニング処理では, 残留応力のピーク値及び積分値も小さかったが, 秦野らの高圧空気をを用いたハードショットピーニングでのピーク値と大差のないことが判った。一方小島らの $\Delta\gamma_R$ が30%で圧縮残留応力ピーク値が最大となるとした結果と異なっている。この原因としてショットピーニングにより発生する圧縮残留応力は焼戻し, マルテンサイト自体のピーニングによる成分と γ_R の変態による成分の合成されたものであり, 本実験では前者の成分が大であり, 初期 γ_R の少ないA試片で効果の大きかったのは, 焼戻しマルテンサイトのピーニングにより生ずる応力成分が過剰な γ_R の存在のために緩和されて小さくならなかったものであり, 一方小島らの結果は初期 γ_R が多いため逆に応力緩和を生じ, 更に余分な γ_R の変態による成分を必要としたものと考えられる。

5. 結言

浸炭、窒化及び熱処理した表面残留オーステナイト(γ_R)量の異なるSCM420鋼について、高圧水に鋼ショットを混入した高エネルギーのショットピーニング処理条件を変化させ、表面残留応力分布に及ぼす影響を検討し以下の結論を得た。

(1) 残留応力のピーク値及び分布は、ショットの混入量から推定した単位面積あたりの衝突エネルギー値よりも主としてショット径の効果が大きい。

(2) 2段ショットピーニング処理により、残留応力分布曲線のピーク位置は、表面側に移動するが最表面の値の増加は僅かであった。

(3) 小径と大径ショットを混合したピーニング処理で、残留応力のピーク値及び応力分布の積分平均値もやや高くなった。

(4) 高圧水によるショットピーニング処理によれば初期

残留オーステナイト(γ_R)量が4%程度あれば十分に高い残留圧縮応力分布が得られ、窒化処理の必要のないことが判った。

本研究に用いたSCM420鋼は新日本製鉄(株)より提供して戴き、また浸炭、窒化は大同特殊鋼(株)並木邦夫博士に、通常ショットピーニングは新東ブレーター(株)成田俊宏氏に御協力を戴きましたことを深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 石黒隆義, 石井伸幸, 関口 進: 日本特許公昭 55-32777
- 2) 小島芳彦, 三輪能久, 須沢昌之, 西村克典, 有見幸夫: マツダ技法, (1987)5, p.165
- 3) 秦野敦臣, 並木邦夫: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1864
- 4) 子安善雄, 蟹澤秀雄, 越智達郎, 柳瀬雅人, 高田啓督, 内藤賢一郎, 石川芳男: 新日鐵技法, (1992)343, p.30
- 5) H. Aoki, E. Nagashima and T. Miura: Shot Peening, (1990), p.513
- 6) R. H. Richman and R. W. Landgraf: Met. Trans. A, 6A (1975), p.995
- 7) 橋内吉雄, 田中正清, 吉久悦二: 日本材料学会, 第21回疲労シンポジウム講演論文集, (1992), p.83