

浸炭鋼の表面残留応力におよぼす水ジェットを用いた ストレスショットピーニングの効果

石黒 隆義*・島崎 利治*・寺山 清志*・内田 真一*²・宇野 章*³

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

Takayoshi ISHIGURO, Toshiharu SHIMAZAKI, Kiyoshi TERAYAMA, Shinichi UCHIDA and Akira UNO

Synopsis : Fatigue is generally a surface related phenomenon as the fatigue cracks usually initiate at the surface and propagate into the bulk material. The surface layer of residual compressive stress induced by shot peening is of primary practical importance. Roughly speaking, the residual stress acts as an applied mean stress and a compressive residual stress will therefore relate fatigue crack initiation and growth. The work hardening results in an increased dislocation density which hinders dislocation movements due to the fatigue load and suppresses localized plastic deformation which is a starting feature for crack initiation. From Mises-Hencky criterion and our previous investigation, it is expected that one of the effective way of obtaining high hardness and residual compressive stress to hard materials is high energy hard shot peening under applied tensile stress.

A systematic study of hard shot peening with water jet under various tensile stressing on surface residual stress of carburized SCM420 specimens has been conducted. As a result, the highest peak value, 1400MPa and distributions of residual compressive stress at the surface region were obtained. Also peak residual stresses increase linearly with applied tensile stress. These increments were caused by enhancing effect which is explained by Mises-Hencky criterion of shot penetration to the hardened surface due to applied tensile stress.

Key words : residual stress distribution ; shot peening ; high water back pressure ; retained austenite ; pre-stress ; carburized steel.

1. 緒言

開口モードで破壊する浸炭部品の高サイクル疲労強度向上法として、その表面硬度すなわち静的強度の向上と表面圧縮残留応力の増大が特に曲げ疲労荷重を受ける部品で重要であることはよく知られている。この圧縮残留応力を高めるために多くの研究がなされてきた。近年はエアージェットによりショットの衝突エネルギーを高めたハードショットピーニングがバネなどで実用化されており、著者ら¹⁾は更に高圧の水ジェットを用いたショットピーニングにより、すなわち高エネルギーショットピーニングにより、初期残留オーステナイト量の異なる浸炭材について残留オーステナイトのマルテンサイトへの変態量と表面残留応力の変化を中心に検討したところ、最適な残留オーステナイト量およびショットの径と高衝突エネルギーの効果を確認した。次に表面残留応力レベルを更に高めるために、押し込み硬さに対するMises-Henckyのクライテリアに基づいた研究^{2,3)}を応用し、高衝突エネルギーに加えて部材表面に予め引張

応力を付与しておくことによりショットの侵入効果を図ること(ストレスピーニング)を試みた。ストレスピーニングについて低エネルギーレベルショットピーニングでは、バネ鋼および低強度鋼についての研究⁴⁻⁷⁾は既に行われているが、本研究では著者らの以前の研究と組み合わせた高エネルギーウォータージェットストレスピーニングにより、浸炭鋼の表面圧縮残留応力および硬度分布をどこまで高められるかを調べるものである。

2. 実験方法

2・1 供試材

本研究で使用した供試材は、自動車用歯車類に多用されている浸炭鋼SCM420で、その化学組成をTable 1に示す。

熱延棒鋼 $\phi 25 \times$ 長さ100[mm]を、鍛造・焼鈍・放電加工を経て、 $20 \times 100 \times 4$ [mm]の短冊状試験片に加工した。

浸炭処理は、前報¹⁾でピーニング後の表面残留応力に最も有効であった表面残留オーステナイト量に基づき約6%に

平成7年8月31日受付 平成8年3月4日受理 (Received on Aug. 31, 1995; Accepted on Mar. 4, 1996)

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

* 2 富山大学大学院生 (現:(株)スチールセンター) (Graduate Student, Toyama University, now Steel Center)

* 3 富山大学大学院生 (Graduate Student, Toyama University)

Table 1. Chemical compositions of steel, SCM420(JIS) [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

Table 2. Conditions of hard shot peening with back water and air jet pressure.

	water jet	air jet
Pressure of Carrier [MPa]	118	0.49
Dia. of steel shot (HRC60)[mm]	0.8	0.8
Dia. of Nozzle [mm]	2	10
Coverage [%]	200	300

Table 3. Shot peening conditions under various applied stresses.

Specimen No.	Surface before Peening	Type of Peening	Applied Surface Stress[MPa]
A-1	as carburized	not peened	0
A-2	as carburized	water jet + steel shot	0
B-2			300
C-2			600
D-2			900
A-3	polished	water jet + steel shot	0
B-3			300
C-3			600
D-3			900
A-4	as carburized	air jet + steel shot	0
B-4			300
D-4			900
A-5	polished	air jet + steel shot	0
B-5			300
D-5			900

なるように次の条件で行った。RXガス+C₃H₈ガス、930°C・カーボンポテンシャル(C.P.)=0.8%で、70分浸炭、850°C×30分保持後油冷、120°C×30分保持後空冷、130°C×120分焼戻しを行い、空冷、液体窒素処理および160°C×120分焼戻しを行った。

2・2 応力付加方法

ネジ負荷式(荷重点間隔20mm)の4点曲げの治具を作成して、20×100×4mm試験片の20×100mmの面の中央に20×20mmの1様モーメント場を生ずるように、外表面に貼付したストレングージの出力を見ながら所定の応力値、300、600および900MPaになるよう荷重点のネジにより負荷した。また、負荷応力は、試験片のビッカース硬度値を4.8で除した値を0.2%耐力とし、その約0、20、40および60%に相当する値である。

2・3 高圧水および空気圧によるショットピーニング条件

ショットピーニングは均一応力付加領域の20×20mmを十分カバーするように、試験片中央部の20×30mmに直角にTable 2の条件で行った。この条件は前回の研究で最も高い圧縮残留応力値が得られたものである。また比較のために空気圧によるショットピーニングも行った。

2・4 応力下でのショットピーニング処理方法

本研究の目的である付加応力のショットピーニングにおよぼす効果を調べるためにTable 3に示すように、浸炭のままおよび表面異常層(約30μm)を耐水ペーパーで除去した試験片について、0、300、600および900MPaの表面引張応力を付加した状態で高圧水および空気圧によるショットピーニングを行った。なお比較のための空気圧によるショットピーニングについては600MPaの応力付加条件を省略した。

2・5 残留応力・残留オーステナイトの測定

表面および深さ方向での両者の測定は、過酸化水素水とフッ化水素を97:3の割合で混合した溶液を用い、測定と化学研磨を繰り返し、0、25、50、100、200および300μmにおいて行った。

残留応力の測定は、理学電機製X線応力測定装置を用い、CrKα₁線の焼戻マルテンサイト(211)面の回折を利用し、sin²ψ法により算出した。また板厚減による補正については、R. RichmanとR. Landgrafの方法を用いて検討した。

次に残留オーステナイト量は理学電機製X線回折装置を用い、焼戻マルテンサイト(200)面と残留オーステナイト(220)回折パターンの積分強度の比較により求めた。

2・6 硬さ測定

硬さ測定はマイクロビッカース硬度計を用い、荷重300gfで行った。硬さについても化学研磨により、残留応力と同様に表面から、0、25、50、100、200および300μmの各レベルで測定した。

3. 実験結果

3・1 残留応力分布

浸炭処理のままの試験片について付加応力レベルごとの高圧水によるショットピーニング後の残留応力分布を、Fig. 1に示す。応力無付加の場合の分布曲線(A-2)に比べ、付加応力レベルが増加するほど残留応力の分布曲線が高応力側に移動し、その最大値も応力無付加での1200MPaから付加応力900MPaでの1600MPaまで約400MPa増加している。また表面異常層を除去したものについて同様な処理を行ったA-3、B-3、C-3およびD-3の試験片の結果は、高圧水によるショットピーニングでは異常層のあるものとあまり差がなかったので省略した。

次に浸炭処理のままの試験片について付加応力レベルごとの空気圧によるショットピーニング後の残留応力分布を、Fig. 2に示す。この場合も無付加応力の場合の分布曲線(A

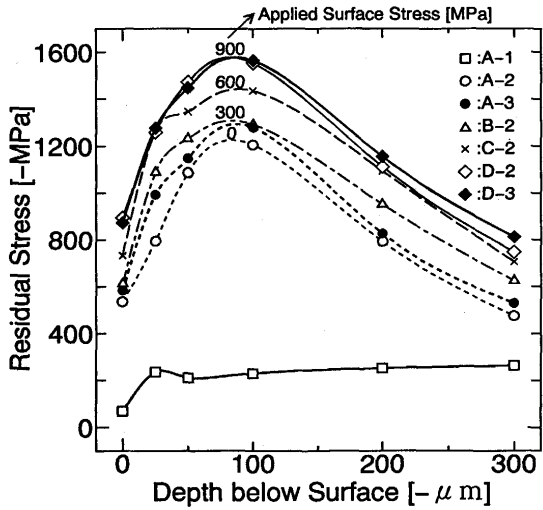


Fig. 1. In depth residual stress surveys for peened specimens with back water jet pressure under various applied stresses.

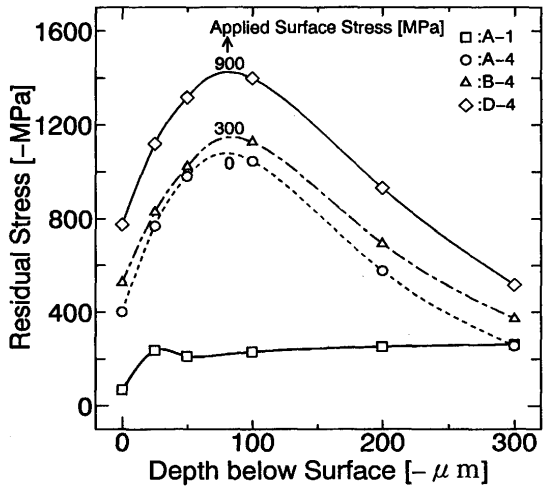


Fig. 2. In depth residual stress surveys for peened specimens with back air jet under various applied stresses.

-4)に比べ、付加応力300MPaでは変化が少ないが、付加応力900MPaでは約400MPa増加した1400MPaの高い値がでることがわかる。

残留応力の最大値と付加応力の関係を、Fig. 3に示し、全試験条件をまとめてあるが、表面状況に関係なく付加応力レベルの増加とともに残留応力の最大値がほぼ直線的に増加している。またどの付加応力レベルでも高水圧ジェットの方が空気圧ジェットに比べ、約150MPa高い。

また実歯車の疲労試験結果と対応するとされている⁸⁾300 μm深さまでの残留応力分布の積分平均値についても、Fig. 4に示すように、Fig. 3と同様、両ショットピーニングとも付加応力レベルと比例することがわかる。

今回の研究で最大残留応力値を示した付加応力レベル900 MPaでの残留応力の分布曲線を、Fig. 5にまとめた。水ジェットによる分布曲線(D-2, D-3)は表面異常層の有無にか

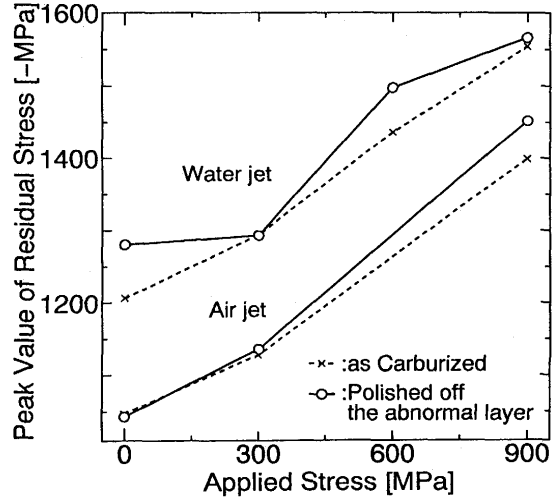


Fig. 3. Peak values of residual stresses v.s. applied stresses under the shot peening.

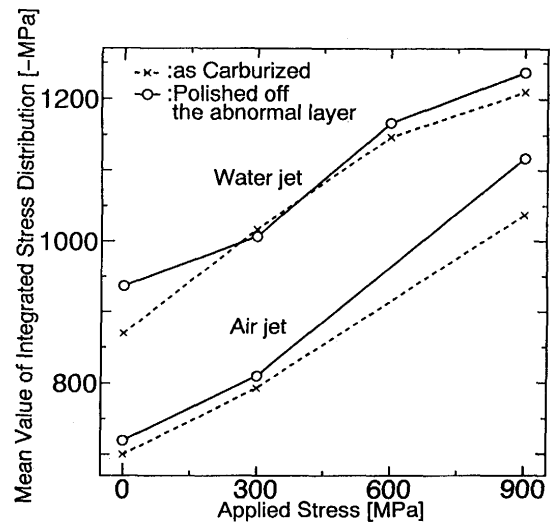


Fig. 4. Mean value of integrated residual stress distribution v.s. applied stresses under the shot peening.

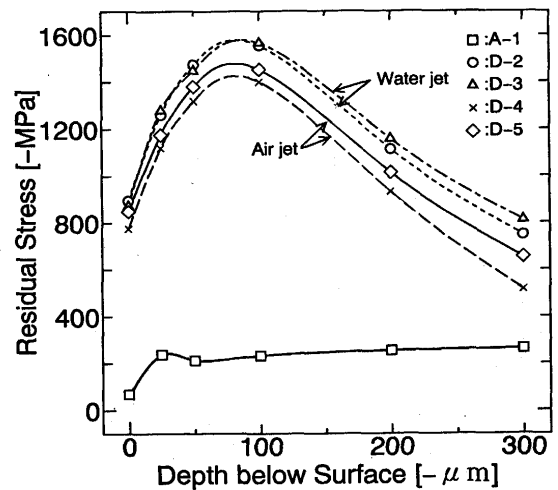


Fig. 5. In depth residual stress surveys for as peened specimens under applied stress, 900MPa.

かわらずほぼ同様になっているが、空気ジェットによる分布曲線(D-4, D-5)は表面から300 μ mまでの深さ方向の全範囲にわたって表面異常層のあった試験片(D-4)の残留応力値は60~125MPa低い値を示している。

3・2 残留オーステナイト分布

浸炭処理のままの試験片で付加応力0, 300, 600および900MPaでの高圧水によるショットピーニング後の残留オーステナイト分布を、Fig. 6にそれぞれA-2, B-2, C-2およびD-2で示す。また初期の残留オーステナイト分布をA-1で示す。この図から残留オーステナイトの最も変態量の多いところは表面から深さ25~50 μ mにおいてであるが、Fig. 1の残留応力の分布曲線での最大値を示すところの深さ50~100 μ mとは必ずしも一致しておらず、また残留応力と残留オーステナイトの変化量も必ずしも比例していないことがわかる。

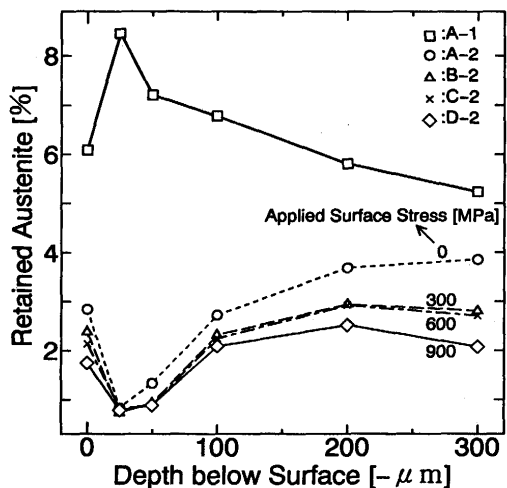


Fig. 6. In depth retained austenite surveys for specimens peening back water jet pressure under various applied stresses.

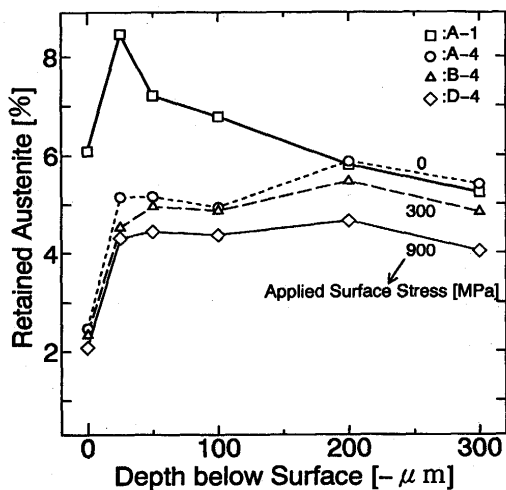


Fig. 7. In depth retained austenite surveys for specimens with peening back air jet pressure under various applied stresses.

浸炭処理のままの試験片での付加応力レベルごとの空気圧ショットピーニングによる残留オーステナイト分布の値を、Fig. 7にそれぞれA-4, B-4およびD-4で示す。水ジェットによるFig. 6に比べ、残留オーステナイト量がどの深さでも多く、したがってそのショットピーニングによる変態量も約3%と少ないことがわかる。しかし、空気圧ジェットの残留応力の増加量は最大で約1060MPaと高水圧ジェットの約1340MPaに比べ280MPa低いにもかかわらず、かなり大きい。したがって、残留オーステナイトからマルテンサイトへの変態による圧縮残留応力への寄与率が空気圧ジェットと高水圧ジェットによるショットピーニングで異なり、約3%の残留オーステナイトの変態を起こす空気圧ジェットのピーニングによる残留応力値の増加量は、約7%の残留オーステナイトの変態を起こす高水圧ジェットのピーニングによる残留応力値の増加量の約80%にも達することがわかった。

3・3 硬さ分布

付加応力レベルが大きくなるほど硬さ分布の増加が大きかった。これは、ショットの侵入深さの増加による加工硬化の増加と、残留オーステナイトの変態量の増加によると考えられる。また、どの条件の試験片でも硬さのピーク値は深さ25 μ mのところに存在している。最も硬度変化の大きい付加応力900MPaでの高水圧ジェットおよび空気圧ジェットによるショットピーニング後の硬さ分布を、浸炭処理のままのものと比較してFig. 8に示す。浸炭処理のままの硬さ分布曲線(A-1)では表面異常層による硬さの低下が著しいことがわかる。空気圧ジェットによりショットピーニングを行えば、表面異常層のあるものでピッカース硬さ約300、表面異常層を除去したもので約650の、表面硬さの増加が見られ、表面部のみ表面異常層の有無による効果の大きいことがわかる(D-4, D-5)が、一方、高水圧ジェットによるショットピーニングを行えば表面異常層の有無の差がほとんど

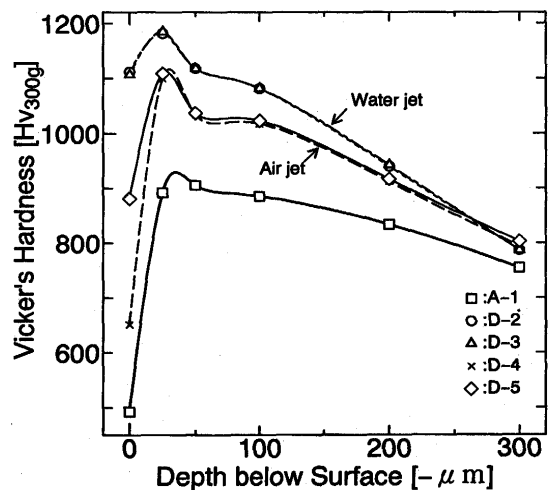


Fig. 8. In depth hardness distribution surveys for as peened specimens under applied stress, 900MPa.

見られず(D-2, D-3), ビッカース硬度値が約1200となり, ピーニング前に比べ硬度値で約300の増加があった。

4. 考察

4.1 残留応力および残留オーステナイト分布

著者らの前報¹⁾および今回の結果からも無付加応力状態での高圧水ジェットを用いたショットピーニングでは表面から深さ約100 μm のところに圧縮残留応力のピーク値約1200MPaを示し, 付加応力900MPa下では約1600MPaという約400MPa(30%)の上昇を示している(Fig. 1)。同様に付加応力の効果は空気圧ジェットを用いたショットピーニングでも見られ, 1000MPa(付加応力0MPa)から1400MPa(付加応力900MPa)と約400MPa(40%)の上昇を示している(Fig. 2)。

このように表面に引張応力を付加しておくことにより, 著しく圧縮残留応力値が増加することがわかった。このことは前報¹⁾での研究により, 水圧が59MPaのとき得られた圧縮残留応力のピーク値が約1238MPaで, 同様に水圧118MPaのとき圧縮残留応力が約1252MPaとなるため, ショットの投射エネルギーを高めても, 材料側の圧縮残留応力の向上性に限度があることがわかっており, 今回の付加応力の効果は, 圧縮残留応力の生成機構として焼戻マルテンサイト部に弾塑性ひずみを与えることによるものと, 残留オーステナイトのマルテンサイトへの変態によるものと考えるとき, 鋼表面でのショットの侵入深さ(面積はカバレッジで補えるが)が著しく増大するためであろう。表面に引張応力を与えておいてショットピーニングを行うことにより各ショットが鋼表面で生成するHertzの最大せん断応力分布曲線に, 付加引張応力が合成され, Mises-Henckyのクライテリアにより, 被ショット材の水平方向の残留応力(σ_H):本実験では付加応力に相当する, 被ショット材の深さ方向の残留応力(σ_R), ショットの平均圧力(P), 単軸引張りの降伏応力(S_y)とすれば次式のように表すことができる。

$$(\sigma_H - \sigma_R)^2 + \left(-\frac{2}{3}P + \sigma_R + P\right)^2 + \left(-P + \frac{2}{3}P - \sigma_H\right)^2 = 2S_y^2$$

この式の σ_H を増加させると鋼球押し込みによる浸入深さが大きくなることを, J.Frankel²⁾らが実証しており, 同様に付加応力によりショットの侵入を容易とするものと考えられる。このように浸炭硬化した材料に対してショットピーニングの効果を一層増加させるためには, 表面に引張り応力を付加することが非常に有効であることがわかった。

また残留オーステナイトの変態による圧縮残留応力への影響は, Fig. 1とFig. 6の比較により付加応力レベルを変えてもあまり変わらず, 前報¹⁾の残留オーステナイト量が4%のとき得られた圧縮残留応力のピーク値が約1252MPaで, 同様に残留オーステナイト量が24%のとき圧縮残留応力が

約1189MPaとなるため残留オーステナイト量を高めても効果がなく, また空気圧と高圧水ジェットでの残留オーステナイトの変化量の差(Fig. 6と7の比較, およびFig. 1と2の比較)などより, 今回の残留応力の増加の大部分は焼戻マルテンサイト部の弾塑性変形の寄与によるものであることがわかる。

従来, 表面硬さの低い材料でストレスピーニングの効果が大きくなった³⁾理由は, ショット自体の硬さと被ショット材の硬さがかなり低いいため, 付加応力を与えなくても十分ショットが被ショット材に侵入して圧縮残留応力の増大に寄与したが, 本研究のように被ショット材の硬さ(HRC64)がショットの硬さ(HRC60)と同等以上の場合に付加応力の効果の大きいことがわかる。

4.2 硬さ分布

Fig. 8に示すように高圧水ジェットにより付加応力下でショットピーニングを行った場合には, 表面異常層の有無にかかわらず硬さが増加することがわかる。このことはショットの衝突エネルギーの効果が十分に利用されたことを示しており, 表面異常層の有無により硬さが変わるという空気圧ジェットによるショットピーニングでの表面異常層の効果と大きく異なっており, 疲労特性を論ずる際にこの点はあまり注目されてこなかったが, 転位の移動とその蓄積機構による疲労亀裂の発生と伝播に対して残留応力分布と硬さ分布の両者が有効なものと考えられる。表面硬度の増加に対する付加応力効果は, 残留応力に対する効果と同様に硬化鋼に対する高圧水によるショットの衝突でのHertzの最大せん断応力と付加応力の合成効果が, 表面異常層の効果を打ち消したものと考えられる。

5. 結言

浸炭および熱処理を行ったSCM420鋼について, 付加応力レベルを変えて高水圧に鋼ショットを混入した高エネルギーショットピーニング処理により, 表面圧縮残留応力をどこまで高められるかを検討し, 以下の結論を得た。

(1) 圧縮残留応力のピーク値は付加応力レベルの増加とともに直線的に増大し, 高圧水によるショットピーニングでは1600MPaと高い値となり, 無付加応力の場合の約30%の増加を示した。

(2) 表面下300 μm までの圧縮残留応力の積分平均値も, 付加応力レベルの増加とともに直線的に増大した。

(3) 空気圧によるハードショットピーニングでも, 高水圧による場合と同様に付加応力の効果があることがわかった。

(4) 表面残留オーステナイト変態の残留応力分布への寄与は, 付加応力レベルの影響には見られず, 表面残留応力が残留オーステナイトの変態による効果と焼戻マルテンサイトに弾塑性ひずみを与える効果によるものとする, 前

者の効果が少ないことから、付加応力下での残留応力の大幅な増大は残留オーステナイト以外の大部分を占める焼戻マルテンサイトによる効果が大きいと思われる。

(5)高水圧によるショットピーニングでは表面異常層の有無に関係なく、表面硬さが残留応力と同様に著しく増加した。

本研究に用いたSCM420鋼は新日本製鐵(株)より提供していただき、また浸炭熱処理は田中精密(株)に、高水圧によるショットピーニングはスギノマシン(株)に、空気圧によるショットピーニングは新東ブレーター(株)に御協力をいただきましたことを深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 石黒隆義, 島崎利治, 寺山清志, 米口明雄: 鉄と鋼, **80** (1994), 131.
- 2) J.Frankel, A.Abbate and W.Scholz: *Experimental Mechs*, **33** (1993), 164.
- 3) 米谷 茂: 機械の研究, **23** (1971), 1290.
- 4) H.Berns and L.Weber: *Proc. of 3rd Int. Conf. on Shot Peening*, Garmisch Partenkirchen, (1987), 647.
- 5) 栗原義昭, 浅野正一, 内堀勝之, 高崎惣一: 鉄鋼協会基礎研究会, 組織制御と性質研究部会報告, (1993)
- 6) R.L.Mattson and W.S.Coleman Jr.: *SAE Trans.*, **62** (1954), 546.
- 7) D.Kirk: *Proc. of 3rd Int. Conf. on Shot Peening*, Garmisch Partenkirchen, (1987), 213.
- 8) 子安善郎, 蟹沢秀雄, 越智達郎, 柳瀬雅人, 高田啓督, 内藤賢一, 石川房男: 新日鐵技報, **343** (1992), 30.