

ショットピーニングにおける残留オーステナイト、 加工誘起マルテンサイトおよび予応力が圧縮残留応力に及ぼす影響*

衛 藤 洋 仁^{*1}, 松 井 勝 幸^{*1}
神 泰 行^{*2}, 安 藤 柱^{*3}

Influence of Retained Austenite, Strain Induced Martensite and Pre-Loaded Stress upon Compressive Residual Stress with Shot Peening Method

Hirohito ETO^{*4}, Katsuyuki MATSUI,
Yasuyuki JIN and Kotoji ANDO

^{*4} ISUZU MOTORS LTD.,

3-25-1 Tono-machi, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 210-8524 Japan

To introduce a large and deep compressive residual stress with the Shot Peening method, the authors conducted an experiment using Vacuum Carburized and Shot Peened or Stress Shot Peened specimens, and investigated the influence of Arc height (Ah), Shot radius (R), retained Austenite (γ_R) content, Strain Induced Martensite (M_Q) content and loaded stress (σ_{pre}) upon compressive residual stress (σ_r) systemically. The major results obtained are: (a) The surface residual stress (σ_{rs}) and the maximum compressive residual stress ($\sigma_{r\max}$) were almost dependent of Ah/R . (b) There is a little influence of γ_R content after Shot Peening upon σ_{rs} and $\sigma_{r\max}$. (c) There was hardly any influence of M_Q content upon σ_{rs} and $\sigma_{r\max}$. (d) Approx.50% of σ_{pre} was introduced as σ_{rs} and $\sigma_{r\max}$. (e) Further, it was found the a linear relation exists between Ah/R , γ_R & σ_{pre} and σ_{rs} ($\sigma_{r\max}$).

Key Words: Fatigue, Residual Stress, Steel, Retained Austenite, Strain Induced Martensite, Shot Peening

1. 緒 言

地球環境および経済性の観点から、自動車部品では、疲労強度向上による小型軽量化が強く求められている。著者らは、自動車部品の疲労強度向上を図るために、疲労破壊のプロセスと疲労破壊の各段階における抵抗因子とを詳細に調査・解析してきた。その結果、浸炭歯車のように応力比(R)が正の応力条件で使用される機械部品では、大きくて深い圧縮残留応力を導入することが疲労強度向上にとり重要であるとの結論を得た^{(1)~(3)}。大きな圧縮残留応力を経済的に導入する方法としては、ショットピーニングがあり、この方法に関するさまざまな研究が実施されている^{(4)~(6)}。ところで、材料に大きな圧縮残留応力を導入するためには、次の二つの条件が必要である。(1)材料の降伏応力を大きくする。なぜならば、降伏応力以上の圧縮残留応力を導入することは、不可能に近いからであ

る。(2)材料がある程度以上硬くなると、ピーニング強度が不足して、導入できる最大圧縮残留応力が飽和する。この問題を克服するためには、材料の変形抵抗を下げた状態でショットピーニングを実施するのが有用である。

変形抵抗を下げた状態で、ショットピーニングを実施する方法としては、温間ショットピーニング法やストレスショットピーニング法がある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、硬さを向上させる簡便な方法としては、鋼への浸炭焼入れ法等がある。ところが、鋼に浸炭焼入れ等を行うと、軟らかい残留オーステナイトが発生しやすい。残留オーステナイトは硬さや疲労強度の向上に対してマイナス要因である。しかし、幸いなことに、この残留オーステナイトはショットピーニングによりマルテンサイトへ加工誘起変態することが知られている。さらに、残留オーステナイトのマルテンサイト変態は、体積膨張を伴うため、これを利用することにより、大きくて深い圧縮残留応力を導入できる可能性がある。そこで、本論文では、高降伏応力(高硬さ)の材料を用い、残留オーステナイト量が異なる3種類の試験片を製作し、これに、ショットピーニング、ダブルショットピーニングおよびストレスダブルショットピーニングを施した。次に、初期残留オーステナイト量、ショット

* 原稿受付 2002年8月5日。

^{*1} 正員、いすゞ自動車(株)車両研究実験部(〒210-8524 川崎市川崎区殿町3-25-1)。

^{*2} 日神金属(株)(〒220-0005 横浜市西区南幸2-16-11)。

^{*3} 正員、横浜国立大学工学部(〒240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。

E-mail: hirohito_etou@notes.isuzu.co.jp

ピーニング条件およびストレスショットピーニング時の予応力がショットピーニングによる残留応力分布に及ぼす影響を系統的に調査した。その結果、いくつかの興味深い知見が得られたのでここに報告する。

2. 実験方法

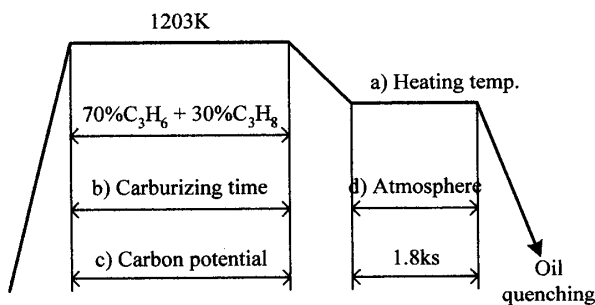
供試材は、JIS 機械構造用合金鋼 SCM 822 H であり、その化学成分を表 1 に示す。この丸棒を、 $40 \times 100 \times 8$ mm の板材に熱間鍛造後、焼なまし処理を行い、その後、 $30 \times 90 \times 5$ mm の平滑材に機械加工した。これに、図 1 に示す 3 種類の真空浸炭または真空浸炭窒化処理を施した。その詳細な条件を、表 2 に示した。このように、熱処理条件を変化させたのは、残留オーステナイト量を三段階に変化させるためである。以下では、それぞれの真空浸炭材を VC1, VC2 と、また真空浸炭窒化材を VCN と略すことにする。それぞれの供試材で得られた初期の残留応力分布、残留オーステナイト量および硬さを表 3 に示した。

Table 1 Chemical composition of used material [wt.%]

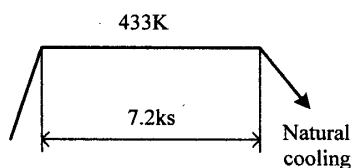
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.22	0.25	0.86	0.010	0.016	0.02	0.03	1.13	0.36

Table 2 Vacuum carburizing conditions

Condition	VC1	VC2	VCN
a) Heating temp.	1123K	1143K	1143K
b) Carburizing time	1.50ks	1.44ks	1.26ks
c) Carbon potential	0.70%	0.80%	0.95%
d) Atmosphere	N ₂	N ₂	N ₂ +NH ₃



(a) Vacuum carburizing (carbonitriding)



(b) Low temp. tempering

Fig. 1 Vacuum carburization

なお、 σ_{rs} および σ_{rmax} は、それぞれ表面での残留応力値および最大圧縮残留応力値である。 γ_{rsunp} および γ_{runp} は、それぞれ初期のすなわちショットピーニング前の表面の残留オーステナイト量および最大残留オーステナイト量であり、体積率(vol.%:以下単に%と示す)で示した。また、 H_{vs} および H_{vmax} は、それぞれ表面(断面 30 μ m 位置)硬さおよび断面最大硬さである。これより、表面での残留応力値は、たかだか -100 MPa、最大値は概略 -400 MPa であることがわかる。これに対して、最大残留オーステナイト量は、それぞれ 15.2%, 23.4% および 47.4% であり、期待通りの三段階に変化していることがわかる。

上記試験片に、2 種類のショットピーニングを施した。一つは、通常のインペラタイプによるショットピーニングである(以下 ISP と略す)。もう一つは、二段ピーニングである(以下 DSP と略す)。その条件を、表 4 に示した。DSP では、ピーニング時の予応力(以下 σ_{pre} と略す)を、-1 000 MPa, 0, 1 000 MPa および 1 400 MPa の 4 種類に変化させた。表 5 に表面改質法の組合せを示した。実験条件は、合計 11 条件である。なお、ISP のアークハイト(以下 A_h と略す)は 0.55 mm(A)であった。また、DSP には空気直圧型

Table 3 Refined surface characteristics of unpeened test piece

Test piece	σ_{rs} (MPa)	σ_{rmax} (MPa)	γ_{rsunp} (%)	γ_{runp} (%)	H_{vs} (HV0.3)	H_{vmax} (HV0.3)
VC1	-98	-258	7.4	15.2	738	756
VC2	-79.5	-412	15.5	23.4	763	785
VCN	-47	-407	27.6	47.4	587	787

Table 4 Shot peening conditions

(a) Impeller type single shot peening condition

	Specification
Shot velocity	73.8m/s
Shot dia.	ϕ 6.8mm
Shot hardness	Approx.560HV
Arc height	0.55mm(A)
Coverage	$\geq$ 300%

(b) Double shot peening condition

	Primary peening	Secondary peening
Air pressure	392kPa	196kPa
Nozzle dia.	ϕ 10mm	ϕ 11mm
Shot dia.	ϕ 0.7mm	ϕ 0.08mm
Shot hardness	Approx.700HV	Approx.700HV
Arc height	0.30mm(C) [1.05mm(A)]	0.35mm(N) [0.117mm(A)]
Coverage	$\geq$ 300%	$\geq$ 300%

ショットピーニングマシンを用い，第一段ピーニング時と第二段ピーニング時の Ah は，それぞれ 0.30 mm (C) と 0.35 mm (N) であった。また， σ_{pre} の付与には四点曲げ法を用い，試験片に貼付したひずみゲージのひずみ量で応力を制御した。残留オーステナイト量と残留応力測定には，微小部 X 線測定装置を用いた。測定位置は試験片中央部とし，応力はその長手方向に評価した。残留応力は，試験片をウインドウ法でマスキングしてから，所定の深さまで電解研磨し，Cr-K α 線，入射 X 線ビーム径 ϕ 2 mm， $2\theta - \sin^2\psi$ 法 ($\psi: 0, 10, 20, 30$ および 40°) で測定した。また，ショットピーニングにおける残留応力と残留オーステナイ

ト量は，図 2 に示す特性値に着目して評価した。すなわち，図 2 のごとく残留応力のピークが 1 個の ISP では，表面での残留応力 (σ_{rs})，最大残留応力 (σ_{rmax})，また表面での残留オーステナイト量 (γ_{rs})，最大残留オーステナイト量 (γ_{rmax}) および最大応力点に対応する位置での残留オーステナイト量 (γ_{RD}) などを評価した。これに対して，二つの圧縮残留応力のピークがある DSP では，表面での残留応力 (σ_{rs})，ピーク位置での残留応力 (σ_{rmaxs} と σ_{rmaxp})，また，表面での残留オーステナイト (γ_{rs})，最大残留オーステナイト量 (γ_{rmax}) およびピーク応力位置に対応する残留オーステナイト量 (γ_{RDS} と γ_{RDP}) などを測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 各種ショットピーニングによる残留応力分布と残留オーステナイト分布 表 4 に示した条件で，ショットピーニングを実施した後で得られた残留応力および残留オーステナイト分布の典型的な例を図 3 と図 4 に示した。これらの図に示したのは，実験番号 III，IV，VIII および IX の 4 例である。このような実験結果に基づいて，2 章で定義した残留応力と残留オーステナ

Table 5 Combination of surface refining methods

Test piece No.	Vacuum carburizing			Shot peening		σ_{pre} (MPa)
	VC1	VC2	VCN	ISP	DSP	
I	○			○		0
II		○		○		0
III			○	○		0
IV	○				○	0
V		○			○	0
VI			○		○	0
VII		○			○	1000
VIII		○			○	-1000
IX	○				○	1400
X		○			○	1400
XI			○		○	1400

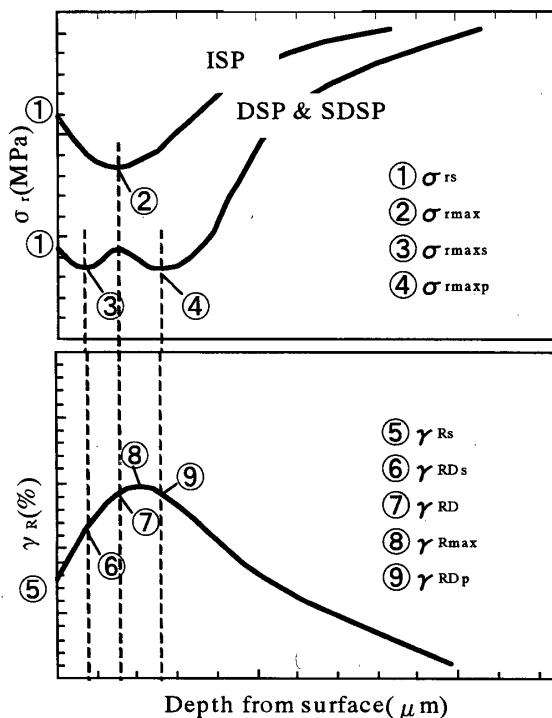


Fig. 2 Schematic representation of σ_r and γ_R distribution

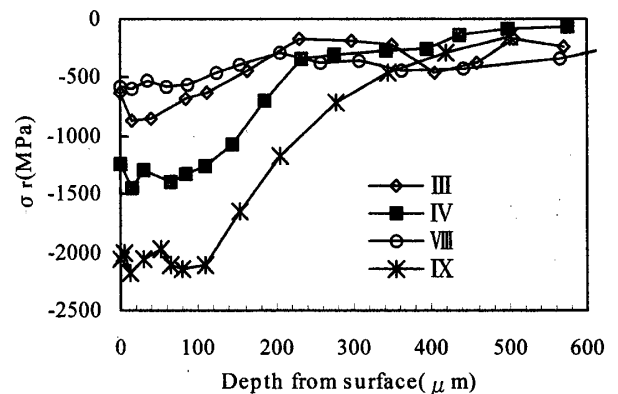


Fig. 3 σ_r distribution of each test piece

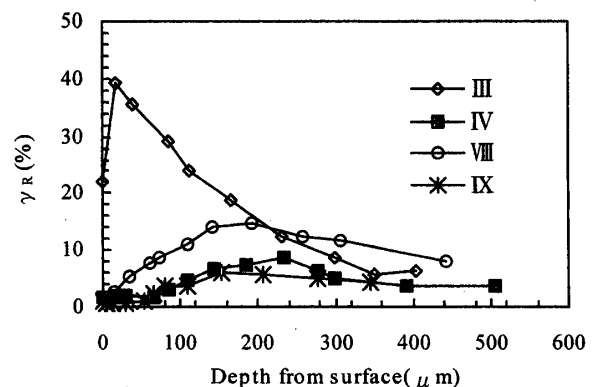


Fig. 4 Distribution of γ_R content with each test pieces

イトに関する特性値を評価し，それらの値を表6，7および表8に示した．なお，表8の実験条件VII以下に示した，Before および After とは，ストレスダブルショットピーニング(SDSP)において，それぞれ予応力を負荷した状態と除荷した後での残留応力分布である．

これらの実験結果における特徴は，得られた表面での残留応力(σ_{rs})および最大残留応力値($\sigma_{r\max}$ ， $\sigma_{r\max p}$ および $\sigma_{r\max s}$)は，それぞれ，-576 MPa から -2 092 MPa，および -580 MPa から -2 224 MPa までと，大幅に変化していることである．また，考察の対象となる残留オーステナイト量も0.8%から30.4%までと，大幅に変化していることである．3・2節以下においては，これらの実験結果を利用して，ショットピーニングによる残留応力分布や残留オーステナイトの加工誘起変態挙動に及ぼす諸因子の影響を解析することとした．

3・2 ストレスダブルショットピーニングを実施したときの残留応力分布と残留オーステナイト分布の特性

Table 6 Refined surface characteristics of ISP test piece

No.	σ_{rs} (MPa)	γ_{RS} (%)	$\sigma_{r\max}$ (MPa)	γ_{RD} (%)
I	-819	2.8	-1067	8.7
II	-757	6.8	-963	16.1
III	-628	22.2	-869	39.1

Table 7 Refined surface characteristics of DSP test piece

No.	σ_{rs} (MPa)	γ_{RS} (%)	$\sigma_{r\max}$ (MPa)	γ_{RDs} (%)	$\sigma_{r\max p}$ (MPa)	γ_{RDp} (%)
IV	-1249	1.7	-1448	2.0	-1388	1.8
V	-1285	1.5	-1442	2.2	-1346	3.6
VI	-1192	10.5	-1325	22.8	-1232	25.6

Table 8 Refined surface characteristics of SDSP test piece

No.		σ_{rs} (MPa)	γ_{RS} (%)	$\sigma_{r\max}$ (MPa)	γ_{RDs} (%)	$\sigma_{r\max p}$ (MPa)	γ_{RDp} (%)
VII	Before*1	-1352	—	-1539	—	-1437	—
	After*2	-1819	1.2	-2038	1.3	-1907	7.4
VIII	Before	-1281	—	-1446	—	-1266	—
	After	-576	1.5	-589	2.5	-580	7.7
IX	Before	-1188	—	-1356	—	-1308	—
	After	-2049	1.1	-2180	0.8	-2109	3.0
X	After	-2032	0.8	-2224	1.9	-2071	5.8
XI	Before	-1223	—	-1125	—	-1119	—
	After	-2092	14.1	-2140	29.9	-1871	30.4

*1 Before removing from loading jig.

*2 After removing from loading jig.

性 図5に，ストレスダブルショットピーニングを施した試験片VIIとVIIIの残留応力分布を示す．図中で， σ_{pre} の記号を付した結果は，四点曲げジグに取付けて，初期の曲げ応力を付与した状態での残留応力分布である．これに対して，無印の結果は，曲げ荷重を取り外した状態での残留応力分布である．試験片VIIのストレスダブルショットピーニング時に付与した予応力(以下 σ_{pre} と略す)は1 000 MPaであるが，試験片VIIIの σ_{pre} は-1 000 MPaである．負荷時の残留応力分布を比べてみると，表面から15 μ m程度までは，両者にほとんど差異が認められないが，それより深い部分では，予応力の影響が顕著に表れていることがわかる．ところが，除荷後の残留応力分布には大きな差異が認められる．すなわち，試験片VIIの表面部(σ_{rs})と最大の残留応力値($\sigma_{r\max s}$)は，それぞれ-1 819 MPaと-2 038 MPaであるのに対して，試験片VIIIのそれは，-576 MPaと-589 MPaであり，試験片VIIの圧縮残留応力に比べて著しく小さくなっている．これは，表面近傍はショットピーニングによる塑性変形領域であるのに対し，内部は予応力による弾性変形であるため，予応力を解放することにより表面近傍の塑性変形領域が予応力の方向に応じてさらに変形するためと考えられる．

次に，初期残留オーステナイト量が同一で， σ_{pre} のみが異なる試験片V，VII，VIIIおよびXの残留オーステナイト量を，表6を用いて比較してみる．ちなみに，これらの試験片の初期残留オーステナイト量は，表面で15.5%，最大値で23.4%である．ダブルショットピーニング後には，表面の残留オーステナイト量(γ_{RS})，ダブルショットピーニングの一段めの最大圧縮残留応力発生位置での残留オーステナイト量(γ_{RDp})およびダブルショットピーニングの二段めの最大圧縮残留応力発生位置での残留オーステナイト量(γ_{RDs})は，それぞれ，0.8～1.5%，1.3～2.5%および

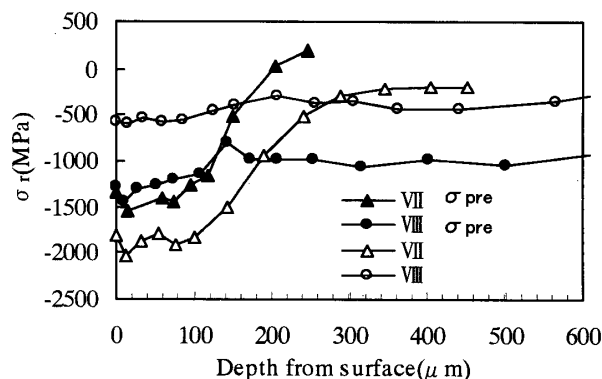


Fig. 5 σ_r distribution of each test piece

3.6~7.7%程度である。これより、ショットピーニング時の予応力が、残留オーステナイトの加工誘起変態挙動に及ぼす影響は、あまり顕著でないといえる。しかし、ダブルショットピーニングにより、残留オーステナイト量は大幅に低下している。

3.3 ショットピーニング後の残留オーステナイト量が圧縮残留応力に及ぼす影響 浸炭焼入れ焼戻し品のショットピーニング後における圧縮残留応力を支配する因子としては、①焼戻しマルテンサイトの塑性変形、②残留オーステナイトが加工誘起マルテンサイト変態することによる体積膨張、③加工誘起マルテンサイト自体の塑性変形、および④残留オーステナイトの塑性変形が考えられる。

図6に、試験片I~VI ($\sigma_{pre}=0$ MPa) で得られた最大の圧縮残留応力(以下 σ_{rmax} と略す)とその位置でのショットピーニング後の残留オーステナイト量 (γ_R) との関係を示した。□印は、インペラ式ショットピーニングの σ_{rmax} とその位置での残留オーステナイト量 (γ_{RD}) との関係であり、◆印はダブルショットピーニングの第一段めの σ_{rmax} とその位置での残留オーステナイト量 (γ_{RDP}) との関係がある。これより、残留オーステナイト量が多くなると、その位置での σ_{rmax} が小さくなる傾向が認められる。これは、残留オーステナイトの降伏応力が、焼戻しマルテンサイトや加工誘起マルテンサイトのそれより低いことに起因していると推察される。また、インペラ式ショットピーニングの結果(□)とダブルショットピーニングのそれ(◆)とはほぼ平行であるが、両者の残留応力値には約 400 MPa の差異があり、ダブルショットピーニングによるほうが絶対値が大きいたことがわかる。この残留応力値の差異は、インペラ式ショットピーニングと空気直圧式ダブルショットピーニングの強度差により、焼戻しマルテンサイトや加工誘起マルテンサイトの塑性変形量に差異が生じたためであると推察される。

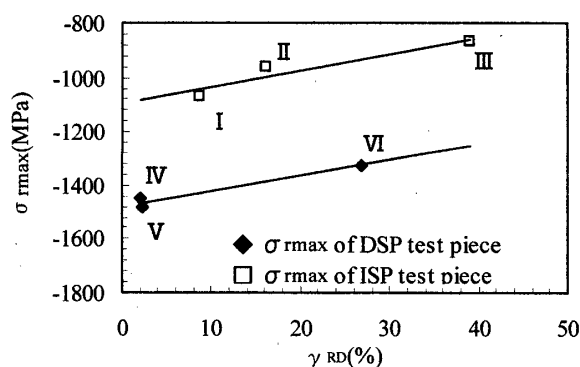


Fig. 6 Influence of γ_{RD} upon σ_{rmax}

3.4 ショットピーニングによるアークハイトが残留応力に及ぼす影響

ショットピーニングの強度を定量的に示す尺度としては、アークハイト(以下 Ah と略す)が用いられている。ここで、 Ah とはアルメンストリップ(板状試験片)へショットピーニングを施したときの表面近傍の塑性変形による曲り量を表す。 $\phi 0.8$ mm のショットを用いたショットピーニングによる Ah は 0.30 mm (C) [A 試験片換算値: 1.05 mm (A)] (Ah の換算は SAE J 442⁽⁹⁾ に準拠した)、微細な $\phi 0.08$ mm のショットのみを用いたときの Ah は 0.35 mm (N) [A 試験片換算値: 0.117 mm (A)] であった。ただし、このようにショット径が異なると Ah には大きな差異があるものの、最大圧縮残留応力はほぼ同じ値を示していた。また、ショット径による最大圧縮残留応力発生深さは、それぞれ 55~65 μ m と 8~16 μ m であり、 Ah の大きさ、すなわち表面近傍の塑性変形深さの影響を受けていると考えられる。これは、 Ah は圧縮残留応力の深さ方向に対する積分的な値である⁽¹⁰⁾(単位は MPa $\cdot$ mm)ことから、 Ah の因子だけでは圧縮残留応力の定量的な評価ができないことを示す。

そこで、今回は表面の圧縮残留応力、インペラ式ショットピーニングの最大圧縮応力、ダブルショットピーニングの一段めの最大圧縮残留応力およびダブルショットピーニングの二段めの最大圧縮残留応力を議論するために、 Ah の深さ方向要素を以下の方法で取り除いた。

Al-Hassani らの研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ によれば、図7に示すように被処理品に接触した硬球が及ぼす塑性領域の深さ (h_p) と硬球半径 (R) および圧痕のくぼみ深さ (Z) との間には次の関係式が成り立つことが知られている。

$$h_p/R = k(Z/R)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

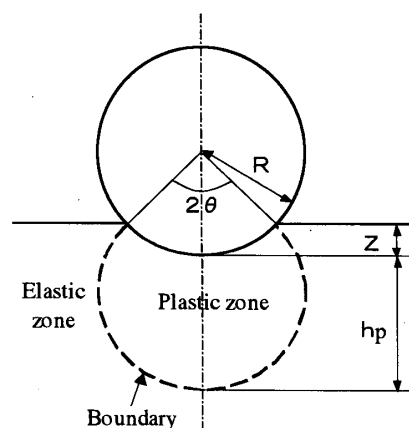


Fig. 7 Schematic of elastic-plastic boundary below contact zone

ここで， k は定数である。

くぼみとショットがなす角度を 2θ とすると，式(1)は次のように表される。

$$h_p = kR(1 - \cos \theta)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)より， h_p はショット半径 (R) に比例すると言える。

渡邊らの研究⁽¹³⁾によれば， h_p はアルメンストリップのたわみ (δ) すなわち Ah に比例するとされており， Ah/R を因子とすれば，ショット半径の塑性深さに及ぼす影響を取り除ける。ここで， Ah/R は前述の①～④，すなわち，ショットピーニング前の焼戻しマルテンサイトの塑性変形，ショットピーニングによる加工誘起マルテンサイト変態，ショットピーニングによる加工誘起マルテンサイトの塑性変形および残留オーステナイトの塑性変形の効果を意味すると考えられる。

3.5 塑性深さを考慮した Ah/R が残留オーステナイトおよび残留応力に及ぼす影響 図8に，一例として，VC2試験片における Ah/R と最大圧縮残留応力発生位置の残留オーステナイト (γ_{RD})，最大圧縮残留応力発生位置のショットピーニング前の残留オーステナイト (γ_{RDunp}) および最大圧縮残留応力 (σ_{rmax}) との関係を示す。ここで，SP前 ($Ah/R=0$) の残留オース

テナイトと残留応力は，インペラ式ショットピーニングの最大圧縮残留応力とダブルショットピーニングの一段めの最大圧縮残留応力発生位置の平均深さにおけるショットピーニング前の残留オーステナイトと残留応力とした。また， γ_{RDunp} を示す△印を結んだ実線と γ_{RD} を示す□印を結んだ点線との差が加工変態マルテンサイト量である。図8から，次のことが言える。

- ① Ah/R の値が大きいほうが最大圧縮残留応力は著しく大きくなる。
- ② Ah/R の値が大きいほうが残留オーステナイト量は減少し，逆に，当然加工誘起マルテンサイト量は増加する。

3.6 加工誘起マルテンサイトが残留応力に及ぼす影響 図9に， $Ah/R=3.0$ の条件における加工誘起マルテンサイト (以下 M_Q と略す) 量と最大圧縮残留応力 (以下 σ_{rmax} と略す) との関係を示す。

M_Q 量と σ_{rmax} との間には明確な相関が認められない。 $Ah/R=1.4$ においても調査したが，図9と同様に M_Q 量と σ_{rmax} との間には明確な相関が認められなかった。

VC1にダブルショットピーニングを施したIVの M_Q 量，表面の残留オーステナイト量および表面の圧縮残留応力はそれぞれ，5.7%，1.7%および-1249 MPaであった。VC2にDSPを施したVのそれらは14.0%，1.5%および-1285 MPaであり， M_Q 量はショットピーニング後の圧縮残留応力にほとんど影響を及ぼさないとと言える。また，この結果はVIとVおよびIXとXの各位置 (表面，ダブルショットピーニングの一段めの最大圧縮残留応力発生位置およびダブルショットピーニングの二段めの最大圧縮残留応力発生位置) においても同様であった。

これは，ショットピーニングでは M_Q の体積膨張による内部応力が，ショットピーニングによる塑性変形により緩和されたためと推察される。

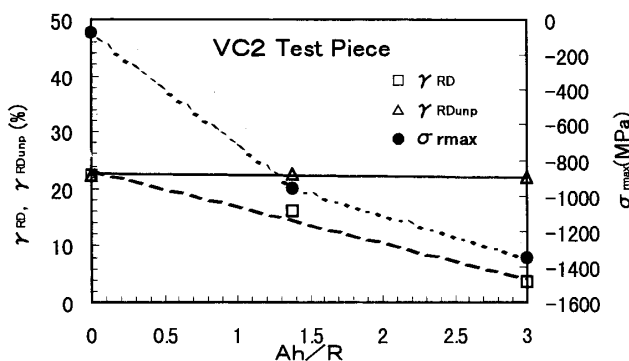


Fig. 8 Influence of Ah/R upon γ_{RD} , γ_{RDunp} and σ_{rmax}

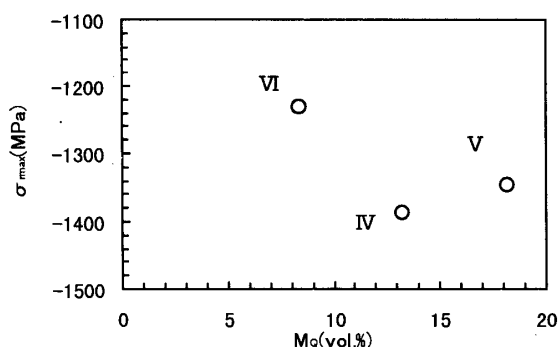


Fig. 9 Influence of M_Q upon σ_{max} at the condition of $Ah/R=3.0$

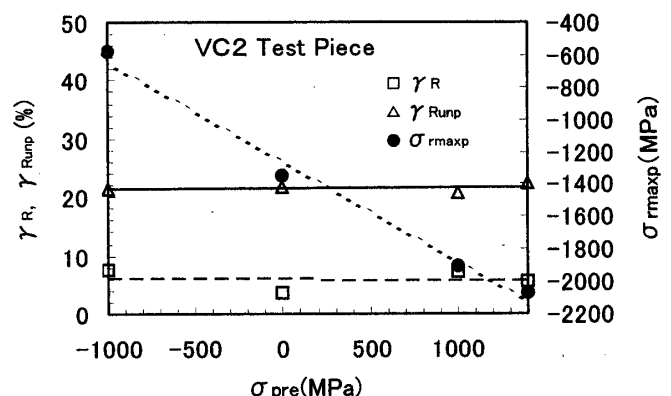


Fig. 10 Influence of σ_{Pre} upon γ_R , γ_{Runp} and σ_{rmaxp}

3・7 ストレスショットピーニング時の予応力が残留オーステナイトに及ぼす影響 図10にVC2試験片におけるストレスショットピーニング時の予応力(以下 σ_{pre} と略す)と残留オーステナイトおよび最大圧縮残留応力(以下 $\sigma_{r\max p}$ と略す)の関係を示す。これより、次のことが言える。

- ① σ_{pre} と $\sigma_{r\max p}$ との間には比例関係が認められ、 σ_{pre} が高いほど大きな $\sigma_{r\max p}$ が得られる。
 - ② σ_{pre} が変化しても、残留オーステナイト量はほぼ一定の値である。したがって、 σ_{pre} が変化しても、加工誘起マルテンサイト量はほぼ一定である。
- これらの①と②の関係はVC1およびVCNにおいても同様であった。

予応力 0 MPa, 1 000 MPa, 1 400 MPa の $\sigma_{r\max p}$ はそれぞれ -1 346 MPa, -1 907 MPa, -2 071 MPa であった。これより、予応力の約 50% が $\sigma_{r\max p}$ を大きくする効果があるといえる。また、与えられた予応力すべてが有効に働かない理由は、ショットピーニングにて片面のみ圧縮残留応力が導入され、試験片の反り(塑性変形)および中立面の移動などが起こったためと考える。

3・8 塑性深さを考慮した Ah/R 、残留オーステナイトおよびストレスショットピーニング時の予応力が残留応力に及ぼす影響 ショットピーニング処理における圧縮残留応力の発生機構やそれらに影響を及ぼす個々の因子の定量的な評価は、塑性変形や相変態等が複雑に絡むため難しい。しかし、本実験では、図6と図8～10から、次のことが言える。

(a) ショットピーニング後の残留オーステナイト量(以下 γ_R と略す)が多くなると圧縮残留応力(以下 σ_r と略す)は小さくなる傾向が認められた。

(b) Ah/R の値が大きいほうが σ_r は著しく大きくなる。また、 Ah/R の値が大きいほうが γ_R は減少し、逆に、当然ショットピーニングによる加工誘起マ

ルテンサイト(以下 M_Q と略す)量は増加する。

(c) M_Q と σ_r の間には明確な相関が認められなかった。

(d) ストレスショットピーニング時の予応力(以下 σ_{pre} と略す)と圧縮残留応力との間には比例関係が認められ、 σ_{pre} が高いほど大きな σ_r が得られる。また、 σ_{pre} が変化しても、 γ_R 量はほぼ一定の値である。

これらの結果を踏まえて、 Ah/R 、ショットピーニング後の表面の残留オーステナイト(γ_{RS})、 σ_{pre} と表面の圧縮残留応力(σ_{rs})および最大圧縮残留応力発生位置の残留オーステナイト(γ_{RD})、 σ_{pre} と最大圧縮残留応力($\sigma_{r\max}$)の関係を示す回帰式を求めた。その結果式(3)および式(4)を得られた。図11および図12にその関係を示す。

$$\sigma_{rs} = -276Ah/R + 7.1\gamma_{RS} - 0.59\sigma_{pre} - 451 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_{r\max} = -172Ah/R + 7.1\gamma_{RD} - 0.54\sigma_{pre} - 822 \quad \dots\dots\dots(4)$$

なお、上記式の適用条件は本試験条件、すなわち試験片硬さ = 587～787 H V, $Ah/R = 1.4 \sim 3.0$, $\gamma_R = 0.8 \sim 29.9\%$ および $\sigma_{pre} = -1\,000 \sim 1\,400$ MPa である。また、DSP は、 σ_{rs} は二段め、および $\sigma_{r\max}$ は一段めの条件を用いた。

上記式から、 Ah/R と σ_{pre} の増大は σ_r を大きくする要因であるが、逆にショットピーニング後の γ_R 量が多いと σ_r を小さくする要因と言える。これら、 γ_R の降伏応力がショットピーニング前の焼戻しマルテンサイトおよび M_Q のそれらと比べ低いことが原因と推察される。また、Al-Hassani の解析はショットを剛体としている。一方、本実験では、非処理材に比べて硬さが低いにもかかわらず、 Ah/R でよく整理できた。これは、ショットの弾塑性変形の影響は Ah に表れている⁽¹⁴⁾ ためと推察される。

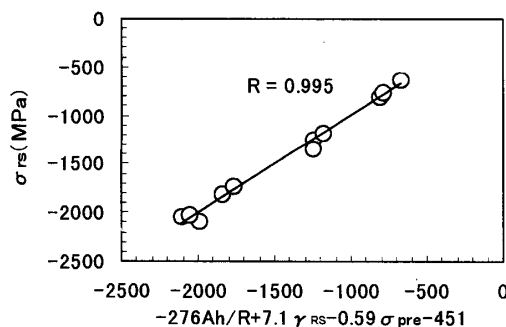


Fig. 11 Relation between $-276Ah/R + 7.1\gamma_{RS} - 0.59\sigma_{pre} - 451$ and σ_{rs}

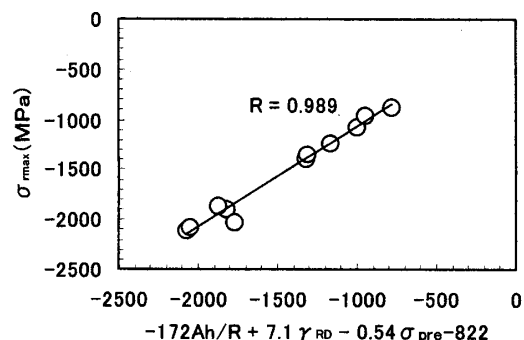


Fig. 12 Relation between $-172Ah/R + 7.1\gamma_{RD} - 0.54\sigma_{pre} - 822$ and $\sigma_{r\max}$

4. 結 言

JIS 機械構造用合金鋼 SCM 822 H に真空浸炭(浸炭窒化)を行い、3 水準の残留オーステナイト量の誘験片を製作した。これらに 2 種類のショットピーニングや 3 種類の応力ショットピーニング処理を施し、ショットピーニング条件および残留オーステナイトが残留応力に及ぼす影響を系統的に調査した。この結果、下記の結論が得られた。

(1) ショットピーニングで導入される表面および最大の圧縮残留応力は、ショット半径が塑性深さに及ぼす影響を取り除いた Ah/R に比例する。

(2) ショットピーニング後に残留しているオーステナイト量が多くなると表面および最大の圧縮残留応力は小さくなる傾向である。それは、残留オーステナイトの降伏応力が低いためである。

(3) ショットピーニングによる加工誘起マルテンサイト量は表面および最大の圧縮残留応力に影響を及ぼさない。これは、ショットピーニングではショットピーニングによる加工誘起マルテンサイトの体積膨張による内部応力が、ショットピーニングによる塑性変形により緩和されたためと推察される。

(4) ストレスショットピーニング時に付与した引張予応力の約 50% が表面および最大の圧縮残留応力を大きくする効果がある。

(5) 上記結果より、11 のデータを用い式(3)と式(4)が得られた。その相関係数はそれぞれ 0.995 と 0.989 である。つまり、圧縮残留応力を大きくする因子はアークハイト/ショット半径 (Ah/R) とストレスショットピーニング時に付与した引張予応力であり、逆に小さくする因子はショットピーニング後の残留オーステナイト量である。

文 献

- (1) 松井勝幸, 横浜国立大学学位論文, (2000-3).
- (2) 石上英征・松井勝幸・丹下彰・安藤柱, 圧力技術, **38-4** (2000), 205-215.
- (3) 松井勝幸・衛藤洋仁・雪竹克也・三阪佳孝・安藤柱, 機論, **66-650, A** (2000), 1878-1885.
- (4) 丹下彰・安藤柱, 日本材料学会第 10 回破壊力学シンポジウム講演論文集, (1999-9), 6-10.
- (5) 松井勝幸・衛藤洋仁・川崎一博・三阪佳孝・安藤柱, 機論, **65-637, A** (1999), 1942-1947.
- (6) 石上英征・松井勝幸・神泰行・安藤柱, 機論, **66-648, A** (2000), 1547-1554.
- (7) 丹下彰, 横浜国立大学学位論文, (2001-3).
- (8) 石上英征, 横浜国立大学学位論文, (2001-3).
- (9) SAE Handbook J 442 Revised Jan 95, (1995-1).
- (10) Guagliano, M., *J. Mater. Process Technol.*, **110-3** (2001), 227-286.
- (11) Al. Hassani, S. T. S., *SAE821452*, (1982).
- (12) Al. Obaid, Y. F., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **57** (1990), 307-312.
- (13) 渡邊吉弘・長谷川典彦・松村義和, 材料, **44-496** (1995), 110-115.
- (14) 松井勝幸, いすゞ自動車社内技術報告書, (2002-11).