

Kazuyoshi Ogawa, Takashi Asano

## 要 旨

浸炭焼入れ歯車の歯元曲げ疲労強度向上に有効な新しい処理法を提案し、その効果を切欠き試験片の 疲労試験および自動車変速機用はすば歯車の疲労試験により調べた。この方法は、ショットピーニング による圧縮残留応力の付与と化学研磨による浸炭異常層の除去とを組み合わせる。化学研磨は浸炭焼入 れ鋼に合わせて開発されたHF1mol/ℓ, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>2mol/ℓからなる研磨液を用い、試料を液中に浸漬するのみ で行う。したがって、歯車のような複雑な形状の部品でも容易に処理を行うことができる。処理の順序 としてはショットピーニング後に化学研磨を行うことが望ましい。これによって平滑な表面と高い表面 圧縮残留応力が得られる。切欠き試験片による片振り疲労試験の結果、浸炭焼入れのままに対して、切 欠き半径 $\rho$ =0.5mmの場合76%、 $\rho$ =1.0mmの場合63%、 $\rho$ =2.0mmの場合51%の耐久限度向上率が得られ た。またモジュール1.75 ~ 2.80の3種類のはすば歯車について、歯元曲げ疲労強度に及ぼす処理の効果を 調べたところ、47 ~ 63%の耐久限度向上率が得られた。ここで、切欠き半径による耐久限度向上率の違 いは有効応力深さクライテリオンにより定量的に予測可能なことを示した。

### Abstract

A new process for improving the fatigue strength of carburized steel gears has been developed, and the effect of the process has been examined with fatigue tests of notched specimens and helical gears for use as automotive transmissions. This process consists of two kinds of treatment: shot peening and chemical polishing. Shot peening yields a highly compressive residual stress near the surface of a workpiece, and chemical polishing removes the oxidized and nonmartensitic layer which is harmful to the fatigue strength. Since the chemical polishing is conducted only by immersing workpieces in a solution containing  $1 \text{ mol}/\ell$  of HF and  $2 \text{ mol}/\ell$  of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, it is easy to treat complex-shaped workpieces like gears. Furthermore, a smooth surface and highly compressive residual stress are obtained by treat workpieces with chemical polishing after shot peening. The factors of increase of fatigue strength by means of the combined process are 1.76, 1.63 and 1.51 for the carburized notched specimens whose notch radii are 0.5 mm, 1.0 mm and 2.0 mm, respectively, and the factors of increase of tooth-root fatigue strength range between 1.47 and 1.63 for three kinds of helical gears whose the modules vary from 1.75 to 2.80.

キーワード

浸炭焼入れ,歯車,疲労強度,ショットピーニング,化学研磨,残留応力,鋼,切欠き,表面処理

## 1.まえがき

浸炭焼入れ鋼は,強度と靭性を兼ね備えた材料とし て,動力伝達系の機械部品等に広く用いられている。 特に自動車用の駆動系歯車は,そのほとんどが浸炭焼 入れ鋼製である。浸炭焼入れ鋼はそのままでも優れた 強度特性を有しているが,近年,車両軽量化の要請が 強く,一層の疲労強度向上が望まれている。そのため に,これまで各種の強化技術が検討されてきた。それ らは大きく二つに分類される。ひとつは,通常のガス 浸炭焼入れにおいて鋼の表面に生じる,低強度な浸炭 異常層を低減するか,または無くする手法であり, (a)材料化学成分の改良,(b)浸炭焼入れ法の改良,(c) 砥石または電解による研磨,がある。他のひとつは圧 縮残留応力を付与する手法であり、ショットピーニン グがある。これらのうち最も効果が高いのはショット ピーニングであり,広く実用されている1~4)。このシ ョットピーニングに, さらに研磨による浸炭異常層の 除去を組み合わせれば,単独の処理よりもより高い強 化率が得られる可能性がある。この方法についても, 報告例5)があるが, 歯車のような複雑な形状の部品に 対しては、砥石や電解による研磨は量産性という点か らあまり実用的ではない。

そこで,部品形状が複雑であっても,ほぼ均一に表 面層を除去し研磨できる,化学的な研磨法に着目した。 化学研磨法としては,別稿<sup>6,</sup>で述べられている浸炭焼 入れ鋼に対して開発された方法を用い,それとショッ トピーニングを組み合わせて処理したときに,浸炭焼 入れ試験片の疲労強度がどの程度向上するか,および, その向上率が,処理順序や切欠き半径によってどのよ うに変化するかについて検討した。さらに変速機用の 浸炭焼入れ歯車について,その効果を確かめた。

2. 強化方法

#### 2.1 化学研磨

化学研磨は,別稿<sup>6)</sup>で詳細に述べられている浸炭焼 入れ鋼に合わせて新たに開発された方法を用いた。研 磨液はHF 1mol/ℓ,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 2mol/ℓ,安定剤および界面活 性剤から成っている。この研磨液中に,試験片あるい は歯車を浸漬して,表面を化学的に溶解研磨した。液 温は40 とした。この場合,研磨速度は12~14µm/min である。研磨量は,浸炭異常層が完全に除去される25

- ~30µmとした。処理後の表面は鏡面となった。
  - 2.2 ショットピーニング

装置としては,空気噴射式のショットピーニング機 を用いた。粒子硬さはHv590,Hv800を基本として, 一部Hv450のものも用いた。粒子直径は0.66mm,カ バレージは300%以上で,粒子硬さによらず同一とし た。粒子速度は60m/sを基本とした。ここで粒子速度 は,高速シャッタTVカメラによる実測値をもとに導 出した粒子直径,粒子重量密度および空気圧を変数と する実験式<sup>7)</sup>を用いて,空気圧を変えることにより設 定した。Hv590の粒子を用いて処理した場合をSPM, Hv800の場合をSPHと呼ぶ。なお一部,粒子硬さ Hv800,粒子速度30m/sで処理したもの(SPH3と呼ぶ), および粒子硬さHv590,粒子速度40m/sで処理したも の(SPM4と呼ぶ)もある。

2.3 処理の組み合わせ

化学研磨とショットピーニングの組み合わせの効果 を見るために,以下の組み合わせで処理を施した試験 片を用意した。すなわち,(1)浸炭焼入れのまま(ASC), (2)化学研磨後ショットピーニング(CP + SPM, CP + SPH),(3)ショットピーニング後化学研磨(SPM + CP, SPH + CP),および比較用として(4)化学研磨のみ (CP),(5)ショットピーニングのみ(SPM, SPH)の 計5種類である。

#### 3. 切欠き試験片による評価

3.1 試験片

SCr420の丸棒素材(直径30mm)よりFig.1に示す形状の切欠き試験片を作製し,その後,有効硬化層深さ0.7mmのガス浸炭焼入れを施した。試験片の切欠き半



Fig. 1 Shape and dimensions of specimens.

径は歯車の歯元半径を考慮して,0.5,1.0,2.0mmの3 水準とした。浸炭焼入れ後の試験片の断面硬さ分布を Fig.2に,表面付近の顕微鏡組織をFig.3に示す。浸 炭異常層の最大深さは約20µmである。いずれも浸炭 焼入れ試験片として標準的な性状である。

この試験片に前章で述べた強化処理を施した。疲労 強度に影響の深い試験片の残留応力分布をFig.4に, 表面粗さをFig.5に示す。ショットピーニング後化学 研磨品であるSPH + CPが最も優れた性状を示してい る。

3.2 処理順序の影響

ショットピーニングと化学研磨を組み合わせて処理 する際の,処理順序の影響を調べた。疲労試験は片持 ち式の平面曲げで行い,応力比R = 0の完全片振りと した。Fig. 6(a)に,切欠き半径p = 1.0mmの化学研磨 後ショットピーニング試験片の疲労試験結果を,浸炭 焼入れのままの結果と対比させて示す。この処理では ショットピーニング条件をかなり大きく変化させて も,疲労強度にはあまり差が見られない。一方Fig.



Fig. 2 Hardness distribution of as carburized specimen.



Fig. 3 Photomicrograph of the surface layer on the cross section of as-carburized specimen. 6(b)にショットピーニング後化学研磨試験片の結果を 示すが,この場合はショットピーニング条件による疲 労強度の変化がやや大きい。ここで最も疲労強度の高 かった条件で処理順序の影響を見ると,明らかに,後 で化学研磨を施した試験片の方が高い。この理由は, 定性的には以下のように考えられる。Fig.4に示した 試験片の残留応力分布を見ると,疲労強度向上に効果 の大きい表面付近の圧縮残留応力の大きさは,後化学 研磨試験片の方が高く,またFig.5に示した表面粗さ



Fig. 4 Residual stress distributions of treated specimens.





豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 30 No.1 (1995.3)

の値を見ても,後化学研磨試験片の方がR<sub>max</sub>の値が小 さく,疲労強度的に有利である。この点について,も う少し定量的に考察する。残留応力の効果は一般に平 均応力と等価であると言われており<sup>8,9)</sup>,圧縮残留応 力が大きいほど耐久限度は高くなる。そこで,ショッ トピーニングにより発生した残留応力についても同様 と考えて,耐久限度との関係を見る。なおその場合, 残留応力は内部へ向かって分布を持っているので,ど の部分の値を用いるかが問題となる。ここでは,疲労 強度に影響が深い表面層の代表値として,後出の



(a) Shot-peened after chemical polishing



(b) Chemically polished after shot peening



豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 30 No.1 (1995.3)

3.4節で述べる有効応力深さクライテリオンで評価 される有効応力深さΔrを用いることとした。すなわち, 表面から70µm深さまでの残留応力の平均値を取り, それと耐久限度との関係を見た。Fig.7にその結果を 示す。圧縮残留応力が高いほど耐久限度も高くなって おり,残留応力が平均応力として作用していることが わかる。また詳細に見ると,化学研磨後ショットピー ニング試験片とショットピーニング後化学研磨試験片 の実験点は,それぞれ別の関係線上に乗っている。こ の両者の差は,前述の表面粗さによるものと考えられ る。すなわち,同じ圧縮残留応力値であっても表面粗 さのより良い後化学研磨試験片の方が,より高い耐久 限度を有している。以上の結果より,処理順序として はショットピーニング後に化学研磨を施すのが良いと 言える。

### 3.3 各処理材の比較

 浸炭焼入れのまま(ASC),ショットピーニング (SPH),化学研磨(CP),およびショットピーニン グ後化学研磨(SPH+CP)の各試験片の疲労強度を比 較した。Fig. 8(a),(b),(c)に,切欠き半径ρ=0.5,1.0,
2.0mmの各試験片について,S-N線図を示す。図中 の"i"印は,内部起点破壊であったことを示す。SPH+
CP試験片の場合は,切欠き半径によらず耐久限度付 近ではすべて表面下0.13~0.16mm内部の起点からの



Fig. 7 Relations between endurance limit and residual stress at  $70\mu$ m depth of shot-peened and chemically polished specimens.



(a) Notch radius 0.5mm, Stress ratio R = 0



(b) Notch radius 1.0mm, Stress ratio R = 0



(c) Notch radius 2.0mm, Stress ratio R = 0

Fig. 8 Comparison among S-N curves of treated specimens.

破壊であったが,起点には特に明瞭な非金属介在物が 認められることはなかった。これらのS - N線図より, 各処理試験片の片振り耐久限度 $\Delta \sigma_w$ (公称応力)を読 み取り,Fig.9に示す。いずれの切欠き半径の場合も, 処理種別による疲労強度の順序はほぼ同じであり, SPH + CP試験片の疲労強度が最も高くなった。浸炭 焼入れのままに対する,SPH + CP試験片の耐久限度 の向上率は,切欠き半径 $\rho$  = 0.5mmの試験片で76%, $\rho$ = 1.0mmの試験片で63%, $\rho$  = 2.0mmの試験片で51%で あった。

3.4. 切欠き半径の影響

Fig. 9で切欠き半径による耐久限度の違いを見ると, いずれの処理条件でも,切欠き半径の大きい方が見か け上耐久限度が高くなっている。これは公称応力で比 較をしているためである。一方,応力集中を考慮して 切欠き部の最大応力 $\Delta\sigma_{max}$ (応力集中率 $K_t \times \Delta\sigma_w$ )で耐 久限度を比較すると,化学研磨試験片を除いて,いず れの処理でも,切欠き半径2.0mmの場合が最も耐久限 度が低くなった。切欠き半径が大きいほど,切欠き部 最大応力でみた耐久限度が低くなるのは,耐久限度が 最表面の応力で決まるのではなく,表面から有る深さ までの作用応力に支配されることを意味している。そ こで,破壊が表面から起こる場合,疲労強度は表面か ら $\Deltat$ だけ入った位置の応力 $\sigma_{eff}$ で決まるとする有効応



Fig. 9 Comparison among endurance limits of treated specimens represented by nominal stress.

豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 30 No. 1 (1995.3)

力深さクライテリオン<sup>10)</sup>に従って,実験結果を解析 する。

切欠き部表面付近の応力勾配を $\chi$ {( $1/\sigma_{max}$ )( $d\sigma/dx$ )}と すると,板曲げにおける $\chi$ は近似的に, $\chi = (2/\rho) + (2/d)$ で表される。ただし,dは板厚である。有効応力 深さを $\Delta t$ ,耐久限度における $\Delta t$ の深さでの応力範囲を  $\Delta \sigma_{eff}$ とすると, $K_t \cdot \Delta \sigma_w \ge \Delta \sigma_{eff}$ は式(1)のように関係づ けられる。

化学研磨試験片の場合は,有効応力深さがほとんど 0になった。これは化学研磨試験片が,表面近傍にお いて一様で高い硬さ分布を有しており,また圧縮残留 応力は比較的低いために,ごく最表面で疲労強度が決 まることを表している。一方,浸炭焼入れのままの試 験片は,表面に20数µmの浸炭異常層を有しているこ と,ショットピーニング試験片の場合は,内部方向に 向かって,高い圧縮残留応力の分布を有していること のために,有効応力深さが大きいものと考えられる。 Table 1の値を用いて各処理条件について描いた式(1) の関係線を実験結果とともにFig. 10に示す。実験点 と式(1)の関係線はほぼ一致しており,有効応力深さ クライテリオンによって,切欠き半径の影響をほぼ説 明できることがわかる。

4. 歯車による評価

歯車について,前記の切欠き試験片で得られたよう な高い強度向上率が得られるかどうかを,モジュール

Table 1Estimated critical depth  $\Delta t$  and critical stress<br/>range  $\Delta \sigma_{eff}$  which is endurance limit stress<br/>range at critical depth  $\Delta t$ .

	$\Delta t$ , mm	$\Delta\sigma_{e\!f\!f}$ , MPa
ASC	0.04	1150
СР	0.00	1580
SPH	0.07	1460
SPH + CP	0.07	1700

豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 30 No.1 (1995.3)

の異なる3種類の自動車変速機用のはすば歯車A,Bお よびCについて調べた。歯車A,B,Cの歯直角モジュ ールはそれぞれ2.80,2.25,1.75であり,歯元半径は それぞれ1.3,1.1,0.9mmである。ショットピーニン グおよび化学研磨の方法は切欠き試験片の場合と同様 である。ショットピーニング条件はHv800の粒子を用 いるSPHとした.試験に供した処理種別は,ASC,CP, SPH,SPH+CPの4種類である。ただし歯車Bの場合 のみSPHの試験は行っていない。疲労試験は,歯車対 をかみ合わせた状態で,一方の歯車を固定し,他方を 揺動させる非回転かみ合い式の共振式歯車疲労試験機

Fig. 11に,3種類の歯車について,耐久限度で見た 各処理品の強化率を示す。いずれの歯車においても, ショットピーニング後化学研磨品であるSPH + CPの 強化率が最も高く,歯車Aで55%,歯車Bで63%,歯 車Cで47%の強化率が得られた。ただし歯車Aおよび Cの場合は,前章の切欠き試験片の結果から期待され るより,歯元半径の影響を考慮しても強化率はやや低 い。この原因のひとつとして,歯車AおよびCの場合, Fig. 12に示す破面のSEM写真に見られるように,破 壊が表面から180~230μm内部の比較的大きな非金属



Fig. 10 Relations between reciprocal of notch radius and endurance limit of treated specimens represented by notch-root stress.

介在物を起点として起こっており,そのために表面層 の強化の効果が減殺された可能性が高い。したがって, より清浄度の高い鋼材を用いれば,歯車においても切 欠き試験片で得られたような強化率が得られるものと 考えられる。

### 5.まとめ

浸炭焼入れ鋼の疲労強度向上法として、ショットピーニングと化学研磨の組み合わせ処理を検討し、浸炭焼入れのままに対して、疲労強度がどの程度向上するか、その向上率が切欠き半径によってどのように変化するか、および変速機用歯車に適用した場合の強化率はどうかについて調べた。その結果をまとめると以下のようである。

(1)ショットピーニングによる圧縮残留応力の付与 と,化学研磨による浸炭異常層の除去とを組み合わせ ることにより,浸炭焼入れ試験片の疲労強度は,それ ぞれ単独の処理よりも向上する。特に,ショットピー ニング後に化学研磨を施す方が,化学研磨後にショッ トピーニングを施すよりも高い強度向上率が得られ る。ショットピーニング後化学研磨品の疲労強度が高 い理由は,ショットピーニングとその後の化学研磨に よって得られる,表面付近の高い圧縮残留応力および 良好な表面粗さによる。



Fig. 11 Ratio of strengthening in tooth-root endurance limits of treated herical gears.

(2)ショットピーニング後化学研磨による耐久限度 の向上率は,切欠き半径の小さい場合ほど高く, $\rho$  = 0.5mmの試験片で76%, $\rho$  = 1.0mmの試験片で63%で あった。強化率に及ぼす切欠き半径の影響は,有効応 力深さクライテリオンにより,定量的に予測すること ができる。

(3)3種類の歯車について調べた,ショットピーニン グ後化学研磨による耐久限度の向上率は,63~47%で あり,かなり高い強化率が得られた。ただし,切欠き 試験片で得られた強化率よりはやや低い場合があっ た。この原因のひとつは,非金属介在物が破壊起点に なったことにある。したがって切欠き試験片と同等の 強化率を得るためには,より清浄度の高い鋼材を用い ることが必要である。

### 謝辞

本研究の遂行に当たり,試料準備等で多大なご支援 を頂いたトヨタ自動車(株)生技開発部第2開発室の関 係各位に深く感謝いたします。



(a) Gear A



(b) Gear C

Fig. 12 SEM micrographs of fracture surfaces near the fracture-initiation point of gear A and C. (An arrow indicates a non-metallic inclusion at the fracture-initiation point.)

# 参考文献

- 1) 久松定興, 金沢孝: 自動車技術, 41-7(1987), 722
- 小島芳彦, 三輪能久, 柴田伸也, 有見幸夫: 自動車技術, 42-6(1988), 755
- 小峰厚友,山口徹,菊池雅男,木林靖忠:日本機械学会 論文集A,53-488(1987),702
- 4) 井上克己,前原利之,山中将,加藤正名:日本機械学会 論文集C,54-502(1988),1331
- 5) 鈴木憲一, 梶野正樹, 清水富美男:豊田中央研究所R&D レビュー, 30-1(1995), 27
- 小川一義,浅野高司,斎藤昭則,河村清美,荻野峯雄,相 原秀雄:日本機械学会論文集C,60-571(1994),1120
- 7) 大内田久, 西岡章夫, 早山徹: 材料, 21-227(1972), 733
- Zürn, J., Razim, C. and Grosch, J. : Heat Treatment and Surface Engineering, (1988), 279, ASM Int.
- Ogawa, K., Yamada, H., Saruki, K., Yokoi, M.and Inuzuka, M.: Proc. 4th Int. Conf. Shot-Peening, (1990), Tokyo, 445
- 10) 石橋正:金属の疲労と破壊の防止,(1967),56,養賢堂

 小川一義, 猿木勝司, 山田明, 鈴木泰彦: 日本機械学会 論文集C, 53-485(1987), 171

## 著者紹介



 小川一義 Kazuyoshi Ogawa
生年:1947年。
所属:強度評価研究室。
分野:材料および機械要素の強度評価・ 解析に関する研究。
学会等:日本機械学会,日本材料学会, 自動車技術会会員。
1991年日本材料学会技術賞受賞。



浅野高司 Takashi Asano
生年:1954年。
所属:強度評価研究室。
分野:歯車の疲労強度評価。