浸炭歯車の曲げ強度に対するショットピーニングの効果*

井上 克己^{*1}, 前原 利之^{*2}
山中 将^{*3}, 加藤 正名^{*1}The Effect of Shot Peening on the Bending Strength
of Carburized Spur Gear TeethKatsumi INOUE, Toshiyuki MAEHARA,
Masashi YAMANAKA, and Masana KATO

The quantitative effects of hardness and residual stress produced by shot peening on the bending strength of carburized spur gears of $m=5$ are investigated. The residual stress of every test tooth is measured by an X-ray diffraction method. The intensity of shot peening has little effect on the fatigue strength. The mean strength is about 1200 MPa which is about 1.3 times that of carburized gears without shot peening. When a tooth surface is electropolished and a higher compressive residual stress is applied to the fillet, the fatigue strength is still 250 MPa higher than that of the shot peening gears. In this study, the improvement of fatigue strength is assumed to be caused by an increase of both hardness and residual stress, and an experimental formula is proposed to estimate the fatigue strength.

Key Words: Carburized Gears, Shot Peening, Fatigue Strength, Residual Stress, Case Hardness

1. 緒 言

動力伝達用歯車に浸炭焼入れなどの表面硬化処理を施すと表面硬化層が形成され、これに起因する圧縮残留応力を生ずる。硬化層と圧縮残留応力は歯車の強度向上に有効であり、その効果を定量的に求めるためにこれまでにいくつかの研究⁽¹⁾が行われている。著者ら⁽²⁾も SCM 420 H 浸炭歯車を用いた多数個曲げ疲労試験を行い、PSN 曲線を求めるとともに、表面硬さ、心部硬さおよび歯元表面の残留応力の関数として疲労強度を推定する実験式を得ている。この結果、表面の硬さと残留応力の増加が疲労強度向上に効果的であることが知られた。

表面での上記の値はショットピーニング加工で増大するので、これを併用することによって浸炭歯車の疲労強度がいつそう向上すると考えられる。Townsend⁽³⁾らは AISI 9310 浸炭歯車にショットピーニングを施すことによってピッチングに対する寿命が 1.6 倍増加す

ることを示している。Lawrenz⁽⁴⁾はショットピーニングを施した 4118 浸炭歯車の疲労強度が 29% 向上すると報告している。久松ら⁽⁵⁾は、SCM 420 H 浸炭歯車にショットピーニングを施した場合、ショットの当たる状態が強度に影響するため寿命のばらつきは大きくなるが、破壊確率 10% の疲労強度で 48% の向上が見られることを示している。

本研究では、始めに、SCM 415 および SCM 420 H ショットピーニング浸炭歯車について、X 線側傾法を用いて全試験歯の残留応力を測定し、硬さの測定結果と合わせてこれらの増加に対するショットピーニングの効果を求める。ついで、電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて一定応力振幅の曲げ疲労試験を実施し、S-N 曲線を求めるとともに疲労強度の向上に対するショットピーニングの効果を明らかにして、合わせて疲労強度の推定を行う。

2. 試験歯車の諸特性

2・1 試験歯車の熱処理・ショットピーニング条件

試験歯車諸元は前報⁽²⁾と同じ $m=5$, $z=18$, $b=8$ とした。歯車材の化学組成を表 1 に示す。SCM 415 と SCM 420 H は炭素量がわずかに異なるだけである。疲労試験機の能力から歯幅が制限され全面浸炭を行うと

* 昭和 62 年 9 月 1 日 日中ショットピーニング会議において講演、原稿受付 昭和 62 年 11 月 24 日。

^{*1} 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻青葉)。

^{*2} トヨタ自動車工業(株)東富士研究所 (〒410-11 裾野市御宿 1200)。

^{*3} 学生員、東北大学大学院。

歯幅方向に均一な試験片と考えられなくなるので、側面からの浸炭を防止するために約 20 μm の銅めっきを施してからホブ切りした。AGMA の推奨値⁽⁶⁾に基づき表 2 に示す有効浸炭深さ (550 Hv までの深さ) d_{eff} を選択して浸炭焼入れしたのち、表 2 に示すショットピーニングを施した。本実験では SAE⁽⁷⁾ S-230 (平均粒径 0.71 mm)、硬さ HRC 57 のショットを用いた。これらの試験歯車を表 2 に示した系列コードで表すことにする。CN 系列は浸炭工程の終了前に 1 L/min の NH_3 ガスを 15 min 間加えた歯車である。CN 系列の歯車を用いた NP1-NP9 系列のショットピーニング条件は表 3 に示してある。EP1, EP2 系列は歯元表面に大きな圧縮残留応力を得るためにショットピーニング後の SP2, SP3 系列を歯底から歯元ま

で約 30 μm 電解研磨した歯車である。

2.2 試験歯の硬さ 歯元切断面における硬さの深さ方向分布の例を図 1 に示す。浸炭歯車の場合は表面から 0.2~0.3 mm の深さで硬さが最高になり表面ではこれより減少しているが、ショットピーニング歯車では表面で最高の硬さとなっている。2.4 節で詳しく述べるように、ある範囲ではショットピーニング加工の強さが増すほど歯の表面硬さが高くなる傾向があり、NP 系列の測定例では 30~80 Hv 上昇した。歯車ではその形状が複雑なため、ショットの当たり方も一様ではない。そこで、同じ SCM 415 材で 40 mm×20 mm×厚さ 10 mm の平板を作成し、浸炭焼入れ後に 3 種類の強さのショットピーニングを施した場合の硬さを測定したが、ショットピーニングの強さと表面硬さ

表 1 試験歯車材 (SCM 415, SCM 420 H) の化学組成 (%)

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM415	Range	0.13-0.18	0.15-0.35	0.60-0.85	<0.030	<0.030	0.90-1.20	0.15-0.30
	Measured	0.15	0.31	0.77	0.020	0.022	1.04	0.18
SCM420H	Range	0.17-0.23	0.15-0.35	0.55-0.90	<0.030	<0.030	0.85-1.25	0.15-0.35
	Measured	0.20	0.28	0.79	0.022	0.011	1.17	0.14

表 2 試験歯車の熱処理・ショットピーニング条件

Code	d _{eff} (mm)	Arc Height Type A(mm)	Coverage (%)	Material	Note
C	0.9	—	—	SCM415	
SP	0.9	0.55	3×98		gears in group C are used
CN	0.9	—	—		see note*
NP1-NP9	0.9	See table 4			gears in group CN are used
SP1	1.3	0.30	3×98	SCM420H	
SP2,EP1	1.3	0.55			
SP3,EP2	1.3	0.70			
SP4	0.9	0.55			

Note EP1 and EP2 are electro-polished after shotpeening

Shot size :SAE S-230, Hardness :HRC57

* NH_3 of 1L/min is added in 15min. at the last carburizing stage

表 3 NP1~NP9 系列のショットピーニング条件

Code	NP1	NP2	NP3	NP4	NP5	NP6	NP7	NP8	NP9
Arc Height Type A (mm)	0.25	0.55	0.70	0.28	0.57	0.72	0.29	0.59	0.85
Coverage (%)	150	150	150	300	300	300	450	450	600

の上昇量の関係は歯車の場合とほぼ同じであることがみとめられた。

2・3 歯元の残留応力 残留応力と残留オーステナイトの測定には、島津製作所製 X 線応力測定装置 SMX-50 を用いた。本試験歯車では回折 X 線の半価幅が大きいので、走査範囲を大きくしても明りょうなバックグラウンドが得られず、半価幅法による測定値にはかなりのばらつきがある。そのために放物線近似法を採用してピーク位置を算出することにしたが、ショットピーニング歯車に対する回折 X 線の曲線形状が浸炭歯車のそれとは異なり、放物線近似範囲の選び方によってはピーク位置計算値に誤差を生ずる。そこで、ショットピーニング歯車の放物線近似範囲を浸炭歯車に対する範囲⁽²⁾と同じにせず、本実験では各回折曲線に最も適した近似範囲を計算してピーク位置を求める方法を採用した。その他の測定条件は前報⁽²⁾と同じである。なお、残留応力の測定は浸炭あるいはショットピーニングを施した後、特別な処理をしない状態で測定した。

歯元危険断面近傍の歯形方向残留応力 σ_{RT} が曲げ強度に強く影響すると考えられるから、この残留応力を測定するのが望ましい。しかし本試験歯車では隣接歯を切除しなければこの応力の測定は困難である。そこで切除しないで測定できる歯底の歯幅方向残留応力 σ_{RZ} で代用することを考え、両者の相関を以下に考察する。なお浸炭歯車の場合は $\sigma_{RT} = \sigma_{RZ}$ と考えてよい⁽²⁾。本研究におけるショットピーニング加工の配置を図 2 に示す。ショットが歯車に対して角度をもって入射するので試験歯車の両側に同じ歯車を加工して作ったスペーサを重ねて歯車側面にショットを当てないようにし、歯幅方向の均一性を確保した。1 枚の歯車について歯底の歯幅方向残留応力の測定例を図 3 に示す。浸炭歯車の残留応力は歯車内でほぼ一様と考えてよい。ショットピーニング歯車の場合には X 線側傾法

の測定方向 (ψ 角を増す方向) をショットの流れの方向と一致させた場合 (ψ : same) と逆の場合 (ψ : opp.) で応力測定値が異なる現象が見られた。このように応力値に差を生ずるのは、ショットピーニングがもともと方向性を有する加工法であるため特定方向に集合組織が発達すること、および X 線側傾法がこの方向性の影響を受けることに起因すると思われる。

歯底の歯幅方向残留応力の深さ分布の例を図 4 に示す。この場合、ショットピーニング歯車の表面下約 50 μm の深さに圧縮残留応力の大きなピークが見られ、その最大値は浸炭歯車より約 800 MPa 大きい。図 4 より約 0.3 mm の深さまでショットピーニングの効果が認められる。また、 ψ : same と ψ : opp. の測定値は約 40 μm の深さでほぼ一致している。本研究では 2 方向の測定値の平均値を歯底表面の歯幅方向残留応力とみなすことにした。図 3 の結果では、ショットピーニングによって残留応力は浸炭歯車の場合より約 250 MPa 増加している。上述の定義による歯底の歯幅方向残留応力 σ_{RZ} と隣接歯を切除して測定した歯元歯形方向残留応力 σ_{RT} の関係を図 5 に示す。測定値のばらつきはかなり大きいですが、 σ_{RZ} より σ_{RT} を推定するという本研究の目的から、両者の関係を次式で表すことにし、

図 2 試験歯車のショットピーニング加工配置図

図 1 硬さの深さ方向測定例

図 3 試験歯車の残留応力測定例

以後、この σ_{RT} を歯車の残留応力 σ_R と呼ぶことにする。

$$\sigma_R = \sigma_{RT} = 0.74 \sigma_{RZ} \dots\dots\dots (1)$$

なお、2・2節で述べた平板は歯車のピッチ円と同じ位置に置き歯車と同角度でショットピーニングを施したものであるが、ショットの流れに平行な方向の残留応力測定値と流れに直角方向の値はほぼ等しかった。また、本試験歯車についての測定からは、歯底の歯幅方向残留応力は歯元の歯幅方向残留応力より大きく、後者は同じ場所の歯形方向残留応力より大きいことが知られた。したがって、平板を用いた上述の結果がショットピーニング歯車の場合と異なるのは歯の形状に起因すると考えられる。

浸炭歯車の場合に20%以上見られた表面の残留オーステナイトはショットピーニングによってほぼ0%となり、ショットピーニングの効果範囲内で深さの増加にともなって10%程度まで増加した後、浸炭歯車と同様に再び減少する。

2・4 硬さと残留応力に及ぼすショットピーニング条件の影響 NP1~NP9系列について、ショットピーニング条件に対する表面の硬さと残留応力の変化

図4 残留応力の深さ方向測定例

図5 歯元歯形方向残留応力 σ_{RT} と歯底歯幅方向残留応力 σ_{RZ} の関係

を図6に示す。測定値のばらつきはあるものの、表面硬さはカバレッジおよびアークハイトの増加とともに30~80 Hv上昇する。カバレッジ600%、アークハイト0.85 mmの場合の上昇は上述の値を用いて外挿した場合より、かなり小さい。残留応力はカバレッジにほとんど影響されず、本実験範囲ではアークハイトの増加とともに約40 MPaほど減少する。なお、2・2節の平板を用いた測定でも同様の現象が認められた。

各系列について、諸特性の測定値は後述の表4に示してある。

3. 疲労試験結果

3・1 疲労試験方法 2台の電気油圧サーボ式疲労試験機⁽⁸⁾を用いて一定応力振幅の曲げ疲労試験を行った。歯先から半径方向0.5 mm内側の位置を荷重点とし、負荷速度は20~50 Hzとした。過去の試験結果⁽⁹⁾では、繰返し数 N が 10^6 をこえると $S-N$ 曲線に水平部が現れるようになる。またISOの強度計算式⁽¹⁰⁾における熱処理歯車の寿命係数は $N \geq 3 \times 10^6$ で1.0である。本研究ではこれらを参考にして $N = 3 \times 10^6$ を非破壊の打ち切り繰返し数とし、そのときの応力値を疲労強度とした。各系列について、主として時間強度域の寿命試験とステアケース法に基づく疲労強度の推定を行った。ステアケース法の応力レベル間隔は従来の試験結果の標準偏差を参考にして60 MPaとし、疲労強度はLittleの方法⁽¹¹⁾で算出した。なお、応力レベル S は平面ひずみ条件のもとで二次元有限要素法で計算した引張側の歯元最大実応力⁽¹²⁾で示した。

3・2 疲労試験結果 浸炭歯車であるC系列の疲労試験結果と $S-N$ 曲線を図7に示す。C系列の疲労

図6 硬さ・残留応力とショットピーニング条件の関係

強度は約 950 MPa であり、先に行った SCM 420 H 浸炭歯車の疲労強度⁽²⁾より約 100 MPa 高い、これに対して、CN 系列の疲労強度は約 1050 MPa であり、C 系列の結果に比べて 100 MPa 高かった。CN 系列歯車の精度・硬さ・残留応力および残留オーステナイトは C 系列あるいは SCM 420 H 浸炭歯車の測定値と大差ないので、上に示した差異は CN 系列の浸炭中に加えた NH₃ が異常層生成を抑制した効果とも考えられるが、定量的な考察と追試は継続中である。

ショットピーニング歯車の疲労試験結果例として、SP 系列の結果と SN 曲線を図 7 に合わせて示してある。試験結果のばらつきは C 系列の場合と同程度であり、疲労強度はショットピーニングによって約 280 MPa 上昇した。結果は図示していないが、SCM 420 H 浸炭歯車を用いた SP 1~SP 4 系列の疲労強度は約 1200 MPa であり、系列間の疲労強度に大きな差はなかった。本試験歯車では疲労強度に及ぼす浸炭深さの影響は無視できる⁽²⁾ので、SP 1~SP 4 系列の結果は本実験範囲内でショットピーニング条件の疲労強度に対する影響は小さいことを示している。また、ショットピーニングによる疲労強度の向上は約 350 MPa であり SP 系列の結果とほぼ同じである。

NP 1~NP 9 についての疲労強度を表 4 に示す。ショットピーニングによって硬さと残留応力が増加するにもかかわらず、疲労強度は CN 系列の疲労強度と大差ない。現時点でこの原因を明らかにすることはできなかった。

図 4 に示したようにショットピーニングによって表面数十 μm の深さに大きな圧縮残留応力を生ずる。表面の応力状態が疲労強度に大きく影響すると考え、約 30 μm 電解研磨して歯の表面に高い残留応力を出現させた EP 1, EP 2 系列に対する疲労試験を行った。その結果、疲労強度はショットピーニング歯車である SP 2, SP 3 系列に比較して約 250 MPa 向上した。電解研磨によって歯車表面の組織・粗さなどが変化し、

図 7 試験歯車の平均 S-N 曲線

これが疲労強度に影響することも予想されるが、本研究では上述の疲労強度の向上を残留応力の影響と考え、後の考察に用いる。全系列について、試験歯の硬さ、残留応力、残留オーステナイトの平均値および疲労強度はまとめて表 4 に示してある。

4. 疲労強度に及ぼすショットピーニングの効果

著者らは先に SCM 420 H 浸炭歯車の曲げ疲労強度 σ_u [MPa] を求め、それに影響を与える因子として心部硬さ H_c [Hv]、表面硬さ H_s [Hv] および表面の残留応力 σ_R [MPa] を考えて次の実験式を得た⁽²⁾。

$$\begin{aligned}\sigma_u &= \sigma_{uc} + \sigma_{usc} + \sigma_{ur} \\ &= f(H_c) + g(H_s - H_c) + h(\sigma_R) \\ &= (257 + 1.17H_c) + 2.0\exp[0.011(H_s - H_c)] \\ &\quad - 0.5\sigma_R \dots\dots\dots (2)\end{aligned}$$

ただし、 $\sigma_{uc} = f(H_c)$ 、 $\sigma_{usc} = g(H_s - H_c)$ 、 $\sigma_{ur} = h(\sigma_R)$ は、それぞれ、浸炭前の母材の疲労強度、表面硬化層による疲労強度の増加、残留応力による疲労強度の増加を表す。

ショットピーニングによる金属材料の強度向上の機構は複雑であり、そのとらえ方に応じた解析法が必要となる。たとえば、浸炭焼入れの異常層改善に基づく強度向上を力学的に取扱うにはき裂進展などの微視的な見方と破壊力学的な解析が不可欠であろう。しかし、本研究ではこの取扱いをせず、式(2)を得た観点から、

表 4 各歯車系列の諸特性測定結果

Code	d_{eff} (mm)	H_s (Hv)	H_{max} (Hv)	H_c (Hv)	σ_R (MPa)	γ (%)	σ_u (MPa)	Note*
C	0.90	745	815	310	-250	22	950	24
SP	0.90	825	825	315	-380	0	1230	19
CN	0.93	760	810	340	-260	12	1050	50
NP1	0.93	780	780	330	-310	0	1100	13
NP2	0.93	790	790	340	-270	0	1020	13
NP3	0.93	820	820	330	-285	0	1040	12
NP4	0.93	740	740	340	-315	0	1030	13
NP5	0.93	780	780	350	-280	0	1040	13
NP6	0.93	840	840	340	-280	0	1080	13
NP7	0.93	790	790	340	-290	0	1080	13
NP8	0.93	830	830	350	-280	0	1030	12
NP9	0.93	810	810	350	-270	0	1050	13
SP1	1.27	770	770	365	-320	—	1260	12
SP2	1.27	860	860	375	-280	—	1170	12
SP3	1.27	835	835	365	-295	—	1150	12
SP4	0.89	860	860	380	-310	—	1250	16
EP1	1.27	860	860	375	-670	—	1400	4
EP2	1.27	835	835	365	-670	—	1300	4

Note*: Number of samples in fatigue test

表面硬さと残留応力の増加に注目してショットピーニングの効果を考察することにする。式(2)によるショットピーニング歯車の疲労強度推定値は実験で得られた疲労強度より高い場合が多く、推定の誤差は約10%である。式(2)の浸炭歯車に対する推定誤差は約5%であるから上記の誤差は少し大きい、この誤差を許容できる場合にはショットピーニング歯車に対しても式(2)を適用できる。

式(2)を得たときに $g(H_s - H_c)$ の推定における精度がもっとも問題であった⁽²⁾。そこで、ショットピーニング歯車によるデータを加えてその推定を修正する。疲労強度実験値から式(2)で計算される $f(H_c)$ と $h(\sigma_R)$ を差引き、硬化層の疲労強度向上に対する寄与

を求めた結果を図8に示す。図8より、その効果を次式のように定めた。

$$g(H_s - H_c) = 3.1 \exp[0.0097(H_s - H_c)] \cdots \cdots (3)$$

式(3)を用いて式(2)を修正すると次式が得られる。

$$\sigma_u = (257 + 1.17H_c) + 3.1 \exp[0.0097(H_s - H_c)] - 0.5\sigma_R \cdots \cdots (4)$$

表4に示した各系列の試験歯車の硬さと残留応力の平均値を用いて、式(4)の $f(H_c)$ 、 $g(H_s - H_c)$ 、 $h(\sigma_R)$ の寄与を求めた結果を図9に示す。本試験歯車の H_c がほぼ等しいことから $f(H_c)$ に大きな差はない。また、EP系列以外では硬化層の存在による効果は残留応力の効果より大きい。式(4)による疲労強度推定値と実験値の比較を図10に示す。NP系列は平均値と分布域を示してある。一、二の例外を除けば疲労強度の推定誤差は5%以内であり、浸炭歯車も含めて精度よく推定できる。

5. 結 言

SCM 415 および SCM 420 H 浸炭歯車について硬さと残留応力に対するショットピーニング加工条件の影響を明らかにした。加工条件が強すぎる場合を除きショットピーニングの強さとともに硬さは上昇し浸炭歯車の場合より約80 Hv上昇した。表面の残留応力はカバレッジにはほとんど影響されず、アークハイトが高くなるにつれて少し減少する。SP系列では、歯元の残留応力は浸炭歯車より約130 MPa上昇した。

一定振幅曲げ疲労試験を行い、ステアケース法を併用して疲労強度を定め、平均 S-N 曲線を得た。疲労強度に対するショットピーニング条件の影響はほとんど認められなかった。ショットピーニングによって疲労強度は約300 MPa高くなり、各系列を平均して浸炭

図8 表面硬化層の疲労強度向上に対する効果

図9 疲労強度に及ぼす硬さと残留応力の効果

図10 式(4)による疲労強度推定値と実験値の比較

歯車の約1.3倍となった。ショットピーニング後に歯元を電解研磨して高い残留応力を出現させた場合には疲労強度はさらに約250 MPa向上した。

疲労強度の向上をショットピーニングによる表面硬さと圧縮残留応力の増大に基づくものと考え、その影響を考察して疲労強度を推定する式(4)を得た。本推定式は浸炭歯車とショットピーニング浸炭歯車に適用できる。

本研究の一部は昭和60年度文部省科学研究費で行われたことを記し、謝意を表す。

試験歯車の浸炭焼入れは東京熱処理工業(株)で行い、常務取締役 和田昭三氏と熱処理加工部長 吉野吉人氏のご協力をいただいた。また、ショットピーニング加工は日神金属(株)の代表取締役 神泰行氏にお引き受けいただいた。ご好意に深く感謝する。

試験歯車の加工を担当された東北大学工学部精密工学科 精密機械要素学講座 嶋貫貞雄・鈴木初吉両技

官、および精密加工センターの技官の皆様に謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば、会田・小田・草野・伊藤, 機論, 33-252(昭42), 1314, Retting, H., VDI-Z, 111-4(1969), 274, 西岡・西尾・平川, 小松, 住友金属, 26-4(昭49), 33.
- (2) 戸部・加藤・井上・高津・森田, 機論, 51-465, C(昭60), 1018.
- (3) Townsend D. P. and Zaretsky E. V., *Gear Technol.*, 3-1 (1986), 29.
- (4) Lawrenz M. D., *SAE Paper*, 841090(1985).
- (5) 久松・金沢, 自動車技術, 41-7(昭62), 722.
- (6) AGMA 246. 01(1965).
- (7) *SAE Recommended Practice*, J444(1962).
- (8) 戸部・丸山, 機論, 47-420, C(昭56), 1065.
- (9) 戸部・丸山, 機論, 48-427, C(昭57), 383.
- (10) ISO/6336/III(1980).
- (11) Little, R. E., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 5-11(1972), 29.
- (12) Tobe, T., Kato, M., and Inoue, K., *Proc 5th World Cong. Theory Mach. Mech.*, 2(1979), 1105.