

技術論文

ギアの運転中における残留応力の変化

Change of Residual Stress Profile in Gear Surface during Operation

安達修平*
Syuhei Adachi

要　　旨

種々の条件でショットピーニングされた、船外機用ギアについて、実機耐久試験を行ない、ギア表面近傍の残留応力分布が運転中に変化する様子と、ピッティング発生寿命との関連性を調べた。

運転時間と共に、最表面の残留応力は、一定のある圧縮応力値に近づくのに対し、やや深部に存在する残留応力ピーク値は、一方的に解放され、ある値に到達するとピッティングが発生することが判明した。

最も長いピッティング発生寿命は、高Ni含有鋼に2段ピーニング処理を施した場合に得られた。これらのことから、ピッティング発生寿命を向上させるには、表面近傍の残留圧縮応力をできるだけ高く設定し、かつ解放されにくくするための処理を行なうことが有効であると考えられる。

Abstract

Relationship between pitting life of gears and the relaxation behavior of residual-stress-profiles during operation was investigated.

Endurance tests of an outboard motor were carried out to study pitting resistance of the transmission gears shot-peened in various conditions and materials.

The residual stress on the surface had a tendency to reach a constant compressive stress, while the peak stresses measured in a subsurface region were relaxed continuously. Pitting was observed when the peak stress had reached to a certain stress level.

The longest pitting life was observed for the specimen in the high Ni containing steel with the dual shot peening treatment.

From the results it was suggested that the effective method to improve the pitting resistance of gears was to settle the near-surface residual compressive stress as high as possible combined with a treatment to prevent the relaxation.

1. はじめに

船外機(OUTBOARD MOTOR 図1-(a))やSTERN DRIVE SYSTEM(注1)のトランスマッisionには、通常、浸炭焼入れ鋼にショットピーニングを施したもののが用いられている。これ

らのギアが組み込まれているLOWER CASEと呼ばれる部分は航走中は水中に没しているため、流体からの抵抗をできるだけ少なくする必要からコンパクト化が要求されており、それだけギアへの負荷が厳しくなる傾向にある。特にピッティングに代表される面損傷に対する信頼性の確保は重要であり、ショットピーニングによるギア表面への圧縮残留応力の付与は耐ピッティング性を向上

* 技術本部要素研究部

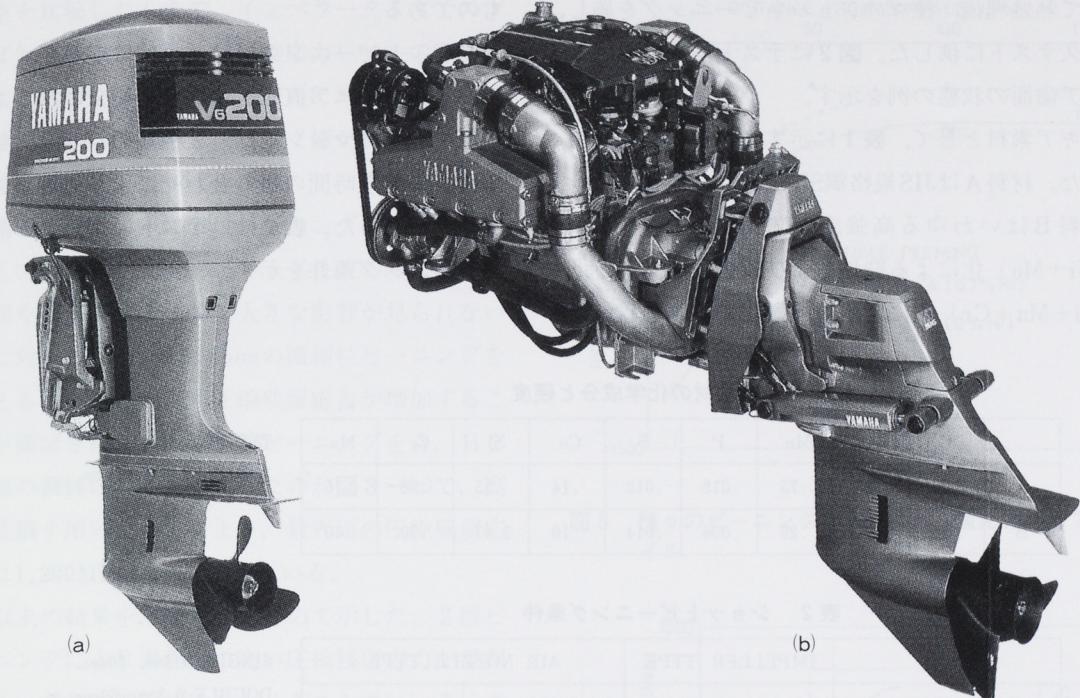


図1 YAMAHA OUTBOARD MOTOR (a)と STERN DRIVE SYSTEM (b)

させるきわめて有効な手段として積極的に用いられている。しかし、運転中のギアへの負荷が著しく大きく、長時間に及ぶ場合には、初期に設定した残留応力分布が変化してしまう結果、期待された寿命に達しないこともある。

疲労試験中の残留応力の変化に関しては多くの研究があるが〔1-7〕、ほとんどが試験片による理想的な条件のもとでの、しかも最表面の応力に限定した測定であり、実機テストでギア歯の応力プロファイルの変化を調べた例は極めて少ない。〔8〕

本稿では種々のショットピーニング処理を施したギアについて実機耐久テストを行ない、その間に歯面の残留応力プロファイルがどのように変化するかを調査した結果について報告する。

(注1) ステアリング機構付きドライブユニットを備えた船内機システム(図1-(b))

2. 試験方法

シミュレーション用船外機のピニオンギアにつ



(a) テスト前



(b) テスト後

図2 テストに用いたギアの歯面状態の例

いて熱処理後、種々のショットピーニングを施し、耐久テストに供した。図2にテスト前後におけるギア歯面の状態の例を示す。

ギア素材として、表1に示す2種類の材料を用いた。材料AはJIS規格鋼SNCM220相当材であり、材料Bはいわゆる高強度ギア用鋼の一種で、高(Ni+Mo)化による靭性および疲労強度向上と低(Si+Mn+Cr)化による粒界酸化の抑制を狙った

ものである。

ショットピーニング機は、目的に応じてインペラータイプとエア直圧タイプを使い分けた。エア直圧タイプのマシンでは、2種類のショット粒径と種々の処理時間の組み合わせにより処理条件の設定を行なった。表2に、テストに用いたショットピーニング条件を示す。

表1 ギア素材の化学成分と硬度

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	wt %
A	.20	.25	.75	.015	.012	.14	.55	.58	.16	
B	.16	.06	.29	.006	.014	.10	2.97	.30	.40	

表面硬度: HRC 62

有効硬化深さ E : 1 mm

表2 ショットピーニング条件

	IMPELLER TYPE	AIR NOZZLE TYPE	
SHOT SIZE mm	0.8	0.3	0.04
SHOT HARDNESS	HRC 40-50	HRC 40-50	HRC 63-65
S. SPEED* m/sec	~50	~100	

SINGLE; 0.3mm, 50sec.

DOUBLE; 0.3mm, 50sec. +
0.04mm, 30sec.

*; NOMINAL SHOT SPEED

耐久運転は、ピニオンギア回転数6,000rpm、平均面圧2,100MPa、歯すべり速度6m/sec.、潤滑油温度約100°Cの条件で行なった。

残留応力および残留オーステナイト量の測定は、全自動X線回折装置により行なった。応力の測定は、歯丈方向について $\sin^2\psi$ 法を用いて行なった。測定位置は歯筋中央におけるピッチ円部を中心とする3mm角エリアで、歯面深さ方向の応力分布測定には、4mm角にマスキングした部分を電解研磨する方法を用いた。

3. 結 果

1) ショットピーニング条件と残留応力分布

図3に種々のショットピーニング条件で処理したギア歯の残留応力プロファイルを示す。図3-(a)はピーニングマシンの2つのタイプによる応力

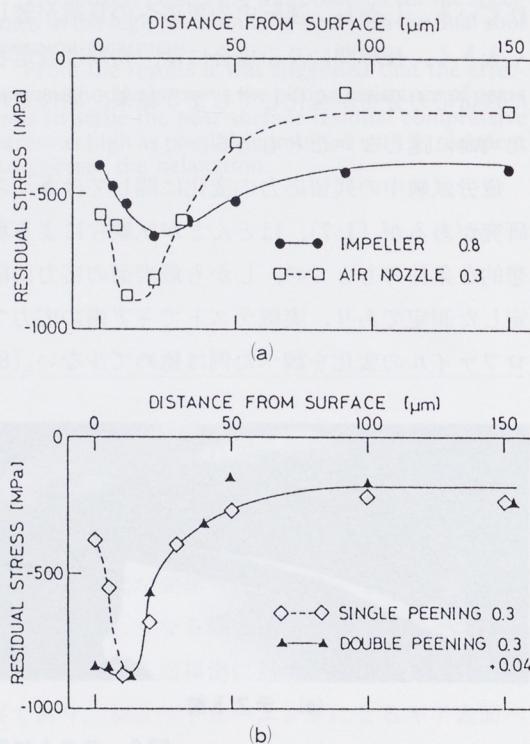


図3 種々のピーニング条件による残留応力プロファイル

分布を比較したもので、インペラータイプでのプロファイルが比較的低い圧縮応力レベルで深部までなだらかな分布をしているのに対し、直圧タイプでのものは圧縮応力のピーク値が高く浅い分布となっている。

図3-(b)は、主に2段ピーニングの影響を示したもので、径0.3mmのショット粒1段のみでは処理時間を多少変化させても大きな影響が見られないのに対し、さらに径約40μmの微細粒ピーニングを加えると、最表面での圧縮残留応力が増加することが確認された。この2段ピーニングをA、B 2種類の鋼種に施して比較したのが図3-(c)で、高強度鋼を用いることにより、最表面の圧縮残留応力は1,200MPa以上に達している。

以上の結果を、図4にまとめて示した。2段ピーニングにより表面での高い圧縮残留応力が確保され、高強度鋼と組み合わせることでいっそうの改善が計られることがわかる。

2) 運転中の応力プロファイルの変化

図5-(a)は、インペラータイプのマシンでピーニングを施したギアについて、50時間の耐久テスト終了時の応力プロファイルをイニシャル状態のそれと比較したものである。初期に認められた深さ20μmでの応力ピークは消滅し、代わって最表面の圧縮残留応力が著しく増加している。

直圧タイプマシンによるピーニングを施したギアでは図5-(b)に示すように、イニシャル状態において明確に認められた応力ピークが、100時間の耐久テスト後には完全に消滅し、ピーク位置における応力は400MPa以上も開放されている。反面、最表面での残留応力の変化は小さく、やや圧縮側にシフトする傾向がみられる。

なお、図5-(a)および(b)に示した耐久テスト後のギア歯の一部には、ピッチ円近傍にピッティングの発生が認められた。これに対し、2段ピーニングを施したギアには、100時間の耐久テスト後も面損傷は見られず、微細粒ピーニング追加による

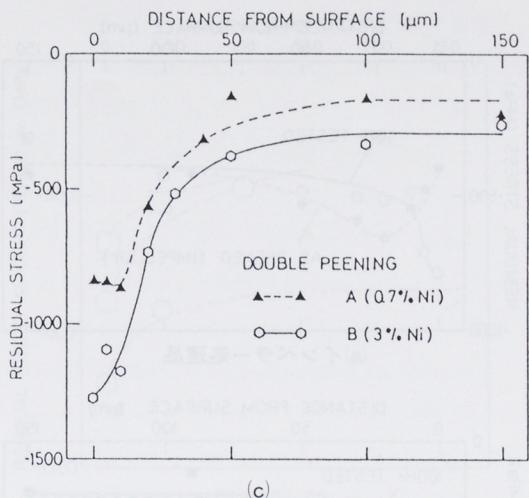
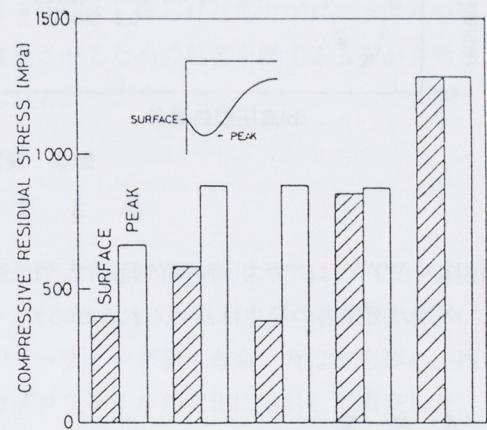


図3 種々のピーニング条件による残留応力プロファイル



WORK MATERIAL PEENING MACHINE	A	A	A	A	B
	IMPELLER	AIR NOZZLE			
SHOT DIA. mm	0.8	0.3	0.3 + 0.04		
P. TIME sec.	—	50	100	50	30

図4 ピーニング条件と残留応力値

改善効果が認められた。

さらにこの効果を確認するために高強度鋼と2段ピーニングを組み合わせたギアについて長時間の耐久テストを実施し、所定時間経過後の残留応力プロファイルを測定した。図5-(c)に、結果の代表例を示す。1段ピーニングのギアの場合と異なり、最表面の圧縮残留応力が運転時間とともに減少する傾向にあることがわかる。しかし、この

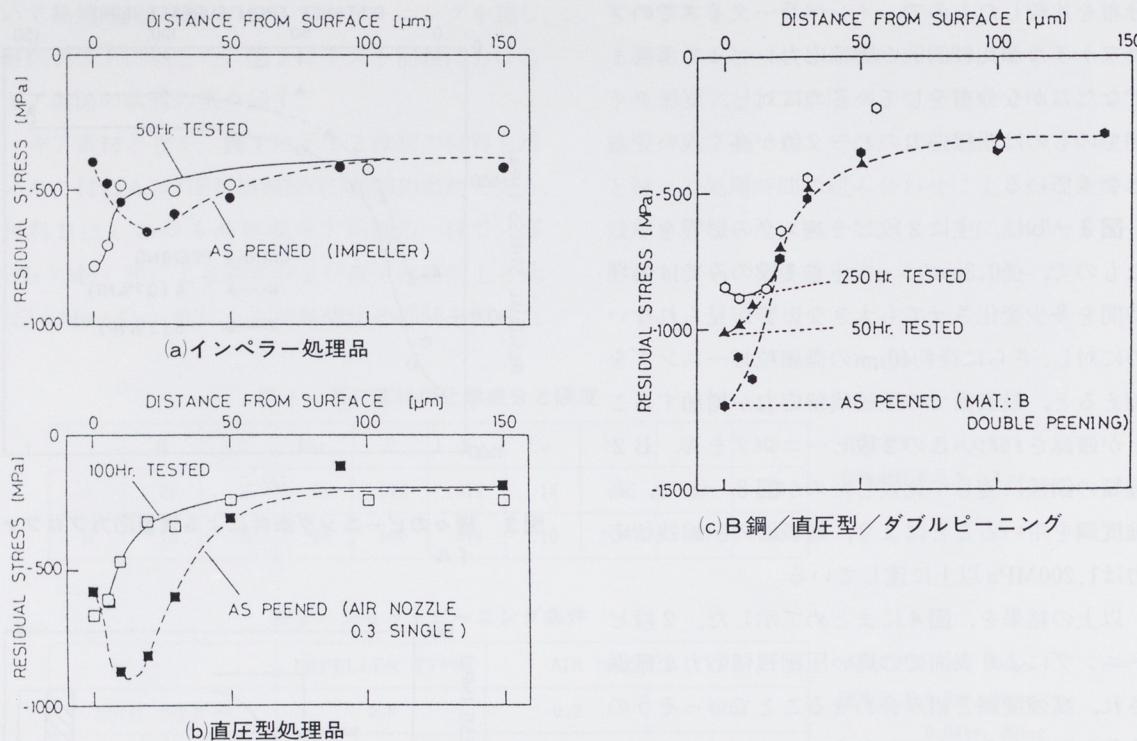


図5 残留応力分布の運転中の変化

仕様のギアでは、テスト時間の範囲で、ピッティング等の面損傷の発生は認められなかった。

4. 考察

ギアへのショットピーニングに期待される効果としては、歯元疲労強度の向上が一般的であり、歯面の耐面損傷性向上の効果については必ずしも一致した見解に達しているとは言えない。本実験結果では、最表面での初期残留圧縮応力が高い程、ピッティング発生までの時間が長くなる傾向が認められた。(図6) 反面、初期残留圧縮応力のピーク値とピッティング寿命との間には、明確な相関は見られなかった。これらのことから、歯元疲労曲げ疲労強度を向上させる目的で施される、比較的大径のショットによる高インテンシティ型ピーニングでは、表面での圧縮残留応力が不充分なために、所定の耐ピッティング性が得られないこ

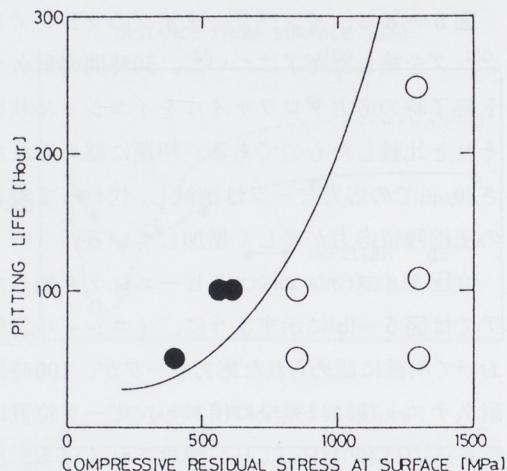


図6 ピッティング寿命と表面残留応力の関係

とが予想される。本実験における2段ピーニングによるピッティング寿命向上効果は、2段目の微細粒ショットによる最表面の高残留圧縮応力の結果と考えられる。高強度鋼の使用により圧縮残留応力レベルをさらに40%近くまで引き上げること

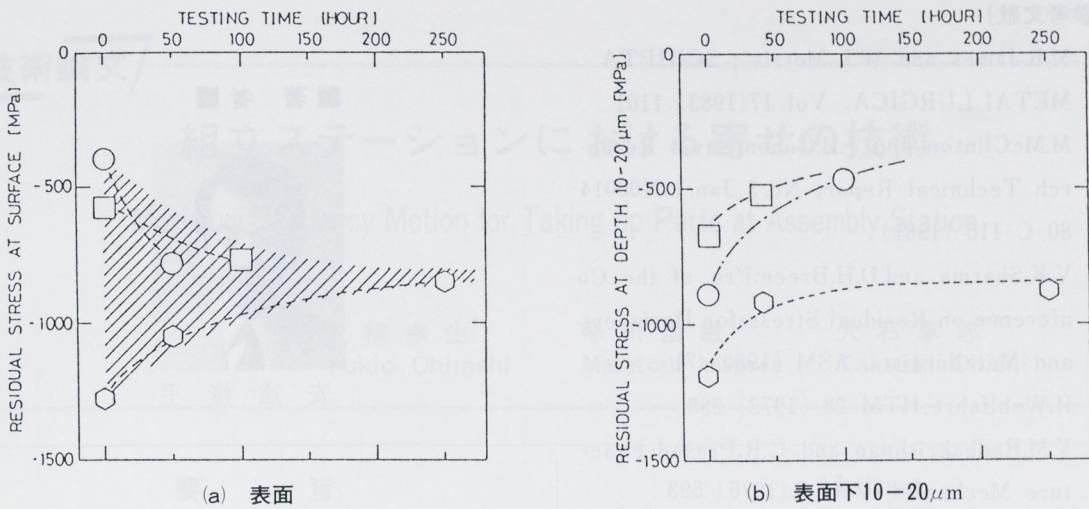


図7 運転中の残留応力値の変化

ができたが、これは高強度鋼の浸炭層中の残留オーステナイト量が約25%と大きいため、ピーニングによる加工誘起変態に伴い、より大きな体積変化が生じたことによると考えられる。

運転中の残留応力の変化を、まとめて図7に示した。興味深いのは、最表面の残留応力の変化で、初期に比較的低い圧縮残留応力をもつものが、運転時間と共にさらに圧縮側へ移行していく現象である。これは、トルクを負荷されたギア歯が相互に接触することにより生じる冷間加工の効果で、Broichhausenら[9]が報告しているcold rollingによる圧縮応力の生成に類似したものと考えられる。また、圧縮応力レベルの初期値が著しく高い場合は、運転時間と共に開放される傾向にある。この結果、長時間の運転中には、最表面の残留応力はある一定のレベル（本実験の場合は約-800 MPa）に収束していくものと推定される。一方、深さ10-20 μmで観測された応力ピーク値は、いずれの場合も運転時間と共に開放されていく傾向にあり、応力レベルが約-500 MPaに達したものにピッティングが発生している。

ギアの耐ピッティング性を向上させる方策としては、初期の最表面での残留圧縮応力をできる限り高くするようなピーニング条件と材料の選択を

行なうと同時に、得られた応力プロファイルの開放を遅延させるための処置を講ずることが有効と考えられる。

5. まとめ

- 1) 浸炭焼入れした高負荷用ギアについて、実機テストを行ない、ショットピーニング条件および材質がピッティング発生寿命に及ぼす影響を、残留応力プロファイルの変化に着目して調査した。その結果、2段ピーニングと高Ni含有鋼の組み合わせにおいて、最も良い結果が得られた。
- 2) 残留応力のピーク値は、運転時間と共に開放されるが、最表面の残留応力は一定の圧縮応力レベルに収束する傾向が見られた。また、ピーク値があるレベルに達するとピッティングが発生する傾向にある。
- 3) ピッティング発生寿命を向上させるには、表面の残留圧縮応力をできるだけ高く設定し、維持するための処置が有効である。

最後に、本実験を遂行するにあたり多大の御尽力を賜わりました、三信工業株式会社に感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) M.R.James and W.L.Morris ; SCRIPTA METALLURGICA, Vol. 17(1983) 1101
 - 2) M.McClinton and J.B.Cohen; Naval Research Technical Report No.3, Jan.1.N00014-80-C-116 (1981)
 - 3) V.K.Sharma and D.H.Breen:Prc. of the Conference on Residual Stress for Designers and Metallurgists. ASM (1980) 71
 - 4) H.Wohlfahrt; HTM 28 (1973) 288
 - 5) V.M.Radhakrishnan and C.R.Prasad; Fracture Mechanics, Vol. 8 (1976) 593
 - 6) J.Bergstroem and T.Ericsson; Shot Peening, DGM (1987) 221
 - 7) A.Bignonnet et. al, ibid, 585
 - 8) A.Bignonnet, ibid, 659
 - 9) J.Broichhausen and W.Calls; Titanium Science and Technology, DGM (1984)

著者



安達修平