

技術論文

Technical Paper

ピッチング強度に及ぼすショットピーニングによる加工硬化および残留応力の影響

石倉亮平*¹, 井上圭介*¹, 小林祐次*², 辻 俊哉*²

Influence of Work Hardening and Residual Stress Induced by Shot Peening on Pitting Resistance

Ryohei Ishikura, Keisuke Inoue, Yuji Kobayashi, and Toshiya Tsuji

Synopsis

The present study investigated the influence of work hardening and compressive residual stress induced by shot peening on the pitting fatigue strength. We prepared the test specimens of which surface roughness is the same by grinding after two kinds of shot peening for various carburized steels.

As a result, the pitting strength increased with peening intensity and increasing surface hardness after tempering at 573 K by the shot peening. And it was found that increasing of surface hardness before testing and compressive residual stress under testing contribute to improving of pitting strength. Because the number of crack initiation of material with higher hardness and higher compressive residual stress is fewer, when pitting strength was compared between specimens with the same hardness after testing.

In addition, high silicon material that is given more than 1000 HV and 1800 MPa compressive residual stress has extremely higher pitting fatigue strength than that applied the conventional peening treatment for carburized SCM420H. This is because the amount of decrease in hardness and compressive residual stress after tempering at 573 K becomes small with increasing silicon.

1. 緒 言

ショットピーニング (SP と記す) は、自動車の変速機用浸炭歯車の疲労強度を改善するため、広く一般に適用されている。近年、自動車の燃費改善を目的に、浸炭歯車をより小型化するための技術として、著者らは 1000 HV 以上の表面硬さかつ 1800 MPa 以上の圧縮残留応力を実現するプロセス技術を開発し、歯元の曲げ疲労強度を格段に向上してきた^{1)~5)}。そのため、歯車の寿命を支配する破損形態は歯元折損から歯面のピッチング

損傷へ移行することが想定され、歯面の一層の硬さ向上が必要とされている。しかし、このような高硬さ、高圧縮残留応力を付与した材料のピッチング強度については十分に検討されていない。

また、ピッチングに対する SP の効果に関する報告としては、SP により強度が向上した^{6)~16)}、SP の効果が顕著ではなかった^{17)~19)}、SP により強度が低下したなど²⁰⁾さまざまである。強度向上要因としては表層硬さの向上や圧縮残留応力の増加^{7)~16), 21)}が、低下要因としては表面粗さの増加²⁰⁾が多く取り上げられているが、

2010 年 11 月 23 日受付

*1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

*2 新東工業(株)商品開発センター (New Product Development Center, Sintokogio, Ltd.)

逆に硬さの向上や圧縮残留応力の増加はピッチング破損低減への効果がないといった報告^{6), 15), 20)}もあり、ピッチングに対する影響因子について一般化した見解が得られていない。これらの研究は、いずれもSPによって材料要因である硬さ、圧縮残留応力、表面粗さが同時に変化した試験片を用いており、それらの要因が重畳してピッチングに影響しているため、SPの効果を見極めることが困難であったと考えられる。

そこで本研究では、材料成分およびSP条件の組合せを変化させ、研磨仕上げによって表面粗さを揃えた試験片のピッチング評価を行い、ピッチング寿命に及ぼすSPによる硬さの向上および圧縮残留応力の効果を明らかにすることを試みた。また、1000 HV以上の高硬さでかつ、1800 MPa以上の高圧縮残留応力を付与した材料のピッチング強度も評価したのであわせて報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本研究で用いた供試材の化学成分をTable 1に示す。浸炭歯車に一般的に用いられるJIS肌焼鋼SCM420H(図表中ではJと略す)を基本仕様とし、Siを高めたA鋼、Siを高めてCr量を抑えたB鋼の計3鋼種である。A鋼はSCM420Hよりも焼戻し軟化抵抗性を高めた成分系^{22)~24)}であり、耐ピッチング特性に優れた材料となっている。

Table 1. Chemical composition of specimens (mass%).

Steel	No.	C	Si	Mn	Cr	Mo
SCM420H	J	0.20	0.25	0.80	1.17	0.16
Steel A	A	0.18	0.83	0.63	1.27	0.15
Steel B	B	0.20	0.90	0.79	0.60	0.30

B鋼は浸炭中の表層炭素濃度を高めても浸炭層に炭化物が析出せず、焼入れ後の残留オーステナイト量(γ_R 量)を増加させることが可能な成分²⁵⁾となっている。これらの材料を150 kgの真空誘導炉で溶製し、その後、熱間鍛造によって ϕ 32 mmの棒鋼に鍛伸した。この棒鋼に1198 Kの焼ならし処理を施した後、機械加工にて ϕ 26.04 mm \times 130 mmのローラーピッチング試験片を製作し、次節以降に記述する浸炭処理およびSP処理を実施した。なお、今回の実験では、SP処理による表面性状の影響を排除するため、試験部(転走面)は片肉20 μ mの研磨を行い、いずれの試験片も転走面の直径を ϕ 26.0、粗さをRa \approx 0.10 μ mに仕上げた。試験ローラーの形状はFig.1のとおりである。

2. 2 浸炭条件と浸炭品質

各鋼種に適用した熱処理条件および浸炭品質をTable 2に示す。本研究では、SP後の硬さおよび圧縮残留応力に大きな影響を与えるSP前の硬さおよび γ_R 量を変化させるため、材料ごとに表面の炭素濃度や焼戻し温度を調整した。また、浸炭層の粒界酸化や焼入れ異常組織の生成を防止するため、浸炭処理は非酸化雰囲気(真空浸炭: VCQTと略す)で行った。

基本仕様となるSCM420H(J)に対しては1203 Kで0.78 ksの浸炭処理と22.2 ksの拡散処理を実施した後、油焼入れ、焼戻し(433 K \times 7.2 ks)を行った。この条件で得られた浸炭層の最表面硬さは745 HV、有効硬化層深さ(513 HV深さ)は1.2 mmであり、浸炭層最表面の炭素濃度が0.7 mass%、 γ_R 量が約15 vol%となっている。A鋼に対しては、SCM420Hとほぼ同等の炭素濃度となるように条件を調整した。また、A鋼の焼戻し処理は433 K(A1)と413 K(A2)の2水準を適用することで硬さを変化させた(A1:747 HV, A2:772 HV)。B鋼

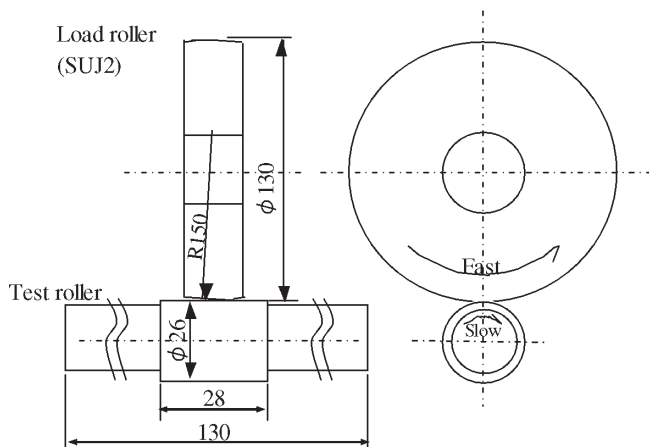


Fig.1. Schematic diagram of roller pitting testing specimen.

Table 2. Heat treatment conditions and carburizing properties.

Steel	No.	Conditions of heat treatment		Carburizing properties	
		Surface carbon content [mass%]	Tempering temperature [K]	Retained austenite [vol.%]	Surface hardness [HV]
SCM420H	J	0.70	433	14.8	745
Steel A	A1	0.75	433	23.2	747
	A2		413	24.4	772
Steel B	B	0.95	433	43.1	697

に対しては、SP 処理後の加工誘起マルテンサイト変態による硬化を最大限に発揮させる^{1), 26), 27)}ことを目的に、1.0%の炭素濃度を得るように浸炭条件を設定し、 γ_R 量を43.1 vol%と多くしている (B:697 HV)。今回試作した中で A2 鋼のみが 750 HV 以上となっており、硬さ 1000 HV 以上でかつ、圧縮残留応力 1800 MPa 以上付与可能な条件^{1), 4), 5)}となっている。

Fig.2 に浸炭表層の光学顕微鏡観察組織を示す。SCM420H (J) と浸炭濃度がほぼ同等である A1 鋼および A2 鋼のマルテンサイト組織には大きな差異は認められない。また、炭素濃度を高めた B 鋼では、 γ_R (白くみえる相) 量が多く確認されるが、炭化物の析出は認められない。

上記に示した試験片の最表面硬さおよび硬化層断面の硬さ分布は、マイクロピッカー硬さ試験機 (測定荷重 2.94 N) で測定を行った。最表面硬さは転走面をバフ研磨した後、圧子を直打ちすることで評価した。また、炭素濃度および γ_R 量は、それぞれ電子マイクロアナライザ (EPMA)、X 線回折法によって定量化した。

2. 3 ショットピーニング処理条件

今回の実験では、SP 処理後の硬さと圧縮残留応力を変化させるため、投射材硬さが異なる 2 種類の SP 処理を適用した。投射粒子の特性を Table 3 に示す。投射粒

子は、浸炭歯車に一般的に適用されている硬さが約 700 HV である Conditioned Cut Wire (SP ①と略す) と、試験片の浸炭層より硬い 1000 HV のジルコニア製の高硬度粒子 (SP ②) を用いた。SP 処理は空気流型直圧噴流式装置を用いて行い、試験片転走部の領域を処理範囲とした。処理条件は、投射圧を 0.2 MPa、カバレッジを 300%とした。

試験片の仕様を Table 4 に示す。材料および SP 条件を Table 4 のように組み合わせることで硬さおよび残留応力を変化させた。このうち A2-SP ②は硬さ 1000 HV 以上、圧縮残留応力 1800 MPa 以上付与可能なプロセスの条件^{1), 4), 5)}に該当し、B-SP ②については γ_R の加工誘起変態量の最大化を狙ったものである。

残留応力の測定は、JIS-B2711 に規定される X 線残留応力測定法に則り実施した。測定条件は、特性 X 線を Cr K α 線、測定方向を試験片の回転方向と同じ接線方向とした。

2. 4 ピッチング試験方法

ピッチング評価には、コマツエンジニアリング (株) 製ローラーピッチング (RP と略す) 試験機を用いた。RP 試験は前述の Fig.1 に示すように、大小の二円筒を油潤滑下にて一定面圧で接触させ、すべりを与えながら回転させることにより、歯車の

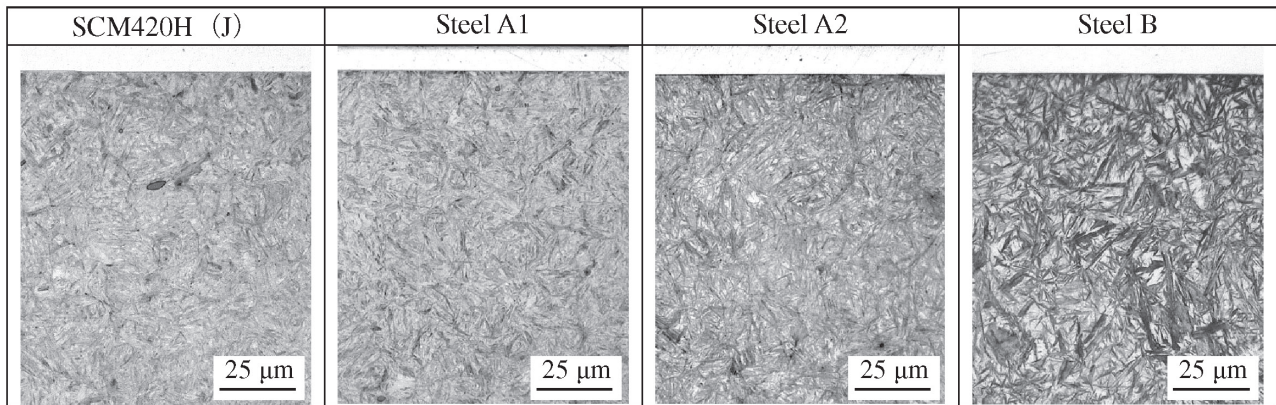


Fig.2. Optical microphotographs of carburized specimen near surface.

Table 3. Shot peening conditions.

No.	Shot material	Diameter [mm]	Density [g/cm ³]	Hardness [HV]
SP①	Steel	0.6	7.8	700
SP②	Zirconia	0.6	4.6	1000

Table 4. List of specimens.

Steel	No.	As VCQT	VCQT +SP①	VCQT +SP②
SCM420H	J	○	○	○
Steel A	A1	○	○	○
	A2	—	—	○
Steel B	B	○	—	○

ピッチングを再現する試験である。試験条件は面圧 3.0 GPa, すべり率 -60%, 回転数 1500 rpm とした。潤滑油は CVT 用オイルを用い, 油温 363 K, 流量 2 L/min で試験を行った。負荷ローラーは, 軸受鋼 SUJ2 を焼入・焼戻し後に表面研削した, 直径 130 mm, 曲率半径 150 mm である。なお, 本論では, ピッチング寿命は, 仕様あたりのサンプル数を 2 から 3 本として試験ローラーにピッチングが発生するまでの繰り返し数の対数平均を代表値として用い, 考察を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 試験片の表面特性

RP 試験に供した試験片の表面特性を Table 5 に整理した。この表には, 次節以降に説明する 573 K × 10.8 ks 焼戻し後の硬さと残留応力の調査結果も併せて記した。

各試験片の硬さ分布を Fig.3 に示す。基本仕様の SCM420H (Fig.3 (a)) は, SP 前および SP の強弱によって狙いどおり硬さが振れており, SP 前, SP ①および SP ②の最表面硬さはそれぞれ 745 HV, 920 HV, 948 HV である。A 鋼の硬さは, 433 K 焼戻し材 (A1) では SCM420H (J) の同仕様とはほぼ同等 (Fig.3 (b)) となっている。また, 413 K の低温焼戻し材 (A2) に SP ②を施した試験片では, 1057 HV と高い値を示した。 γ_R 量を高めた B 鋼は, SP ②により最表面硬さが 1088 HV (Fig.3 (c)) まで向上し, 今回作製した中で最も高い値が得られた。この理由としては, 他に比べて SP による加工誘起マルテンサイト変態量が 36.1% (Table 5, B-VCQT と B-SP ②の γ_R の差) と極めて多いこと, 炭

素濃度の増加によるマルテンサイト硬さの増加が挙げられる。

各試験片の残留応力分布を Fig.4 に示す。SCM420H, A1 鋼および B 鋼では, いずれも SP ①および SP ②により, それぞれ約 800 MPa, 1300 MPa の表層圧縮残留応力が得られている。また, A2-SP ② (Fig.4 (b)) では, 約 1800 MPa と高い圧縮残留応力を示し, これまでの著者らの実験結果^{1)~5)}と一致している。以上のことから, いずれの仕様も狙いどおり, 硬さおよび残留応力を変化させつつ, 表面粗さを揃えた試験片ができています。

3. 2 表面特性に及ぼす熱負荷の影響

歯車の歯面のように面圧負荷が高くすべりを伴う場合, 摩擦熱により表面温度が上昇するため, 歯面の耐ピッチング性は 573 K 焼戻し硬さと相関があるといわれている^{23), 24)}。そこで, SP 処理を施した材料の硬さや残留応力に及ぼす熱負荷の影響について検討した。

各試験片に 573 K × 10.8 ks の焼戻し処理を行った後の最表面硬さを Fig.5 に示す。また図中には, 軟化量を追記した。SCM420H の焼戻し硬さは試験前の硬さと同様に, SP の強弱の順 (SP ②: 771 HV > SP ①: 720 HV > VCQT: 603 HV) に高くなっている。焼戻し軟化抵抗を高めた A1 鋼では, SP 仕様においても SCM420H の同仕様よりも軟化量が小さく, 高い硬さが得られた。この傾向は, 著者らの高 Si 鋼を用いた結果²⁸⁾と一致する。高 γ_R 量である B 鋼に SP ②を適用した試験片の 573 K 焼戻し硬さは 943 HV であり, 試験前の硬さと同様に最も高い値を示した。

Fig.6 に最大圧縮残留応力と焼戻し温度 (保持時間

Table 5. Surface properties of specimens.

Steel	No.	Before testing					After 573K tempering			
		Surface roughness Ra [μ m]	Retained austenite [vol.%]	Surface hardness [HV]	Surface residual stress [MPa]	Max. residual stress [MPa]	Retained austenite [vol.%]	Surface hardness [HV]	Surface residual stress [MPa]	Max. residual stress [MPa]
SCM420H	J-VCQT	0.12	14.8	745	-95	-517	0.0	603	-113	-113
	J-SP①	0.08	3.2	920	-826	-1293	0.0	720	-240	-377
	J-SP②	0.07	0.0	948	-1191	-1828	1.1	771	-555	-572
Steel A	A1-VCQT	0.15	23.2	747	-247	-247	2.6	675	-149	-291
	A1-SP①	0.09	5.3	963	-750	-1477	1.9	823	-392	-487
	A1-SP②	0.06	1.4	989	-1345	-1893	0.0	913	-765	-1005
	A2-SP②	0.06	0.0	1057	-1853	-2121	2.0	917	-987	-987
Steel B	B-VCQT	0.09	43.1	697	101	-440	3.0	669	-214	-369
	B-SP②	0.06	7.0	1088	-1442	-1791	3.1	943	-864	-864

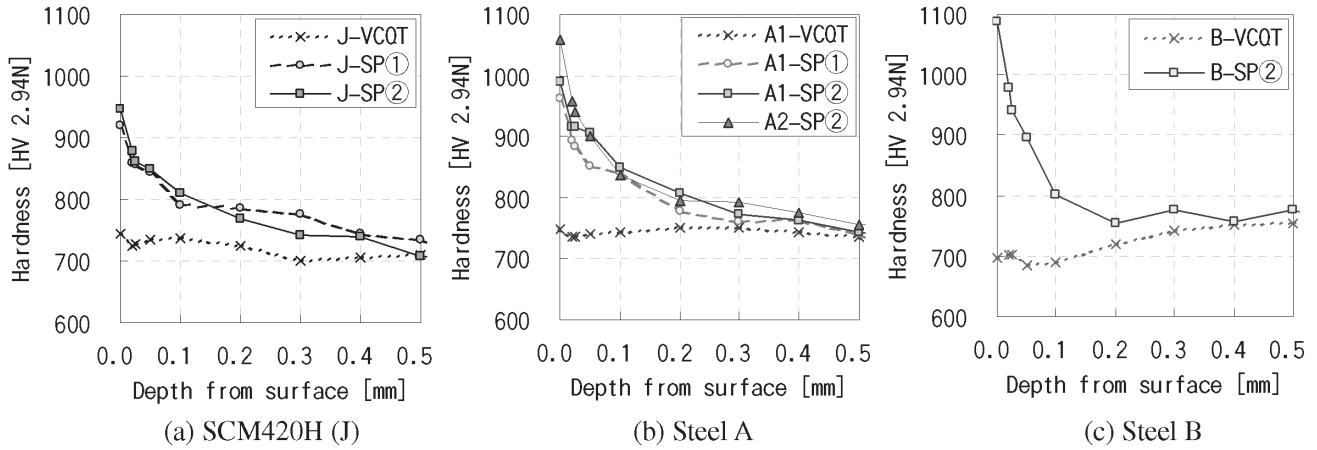


Fig.3. Hardness distribution of specimens.

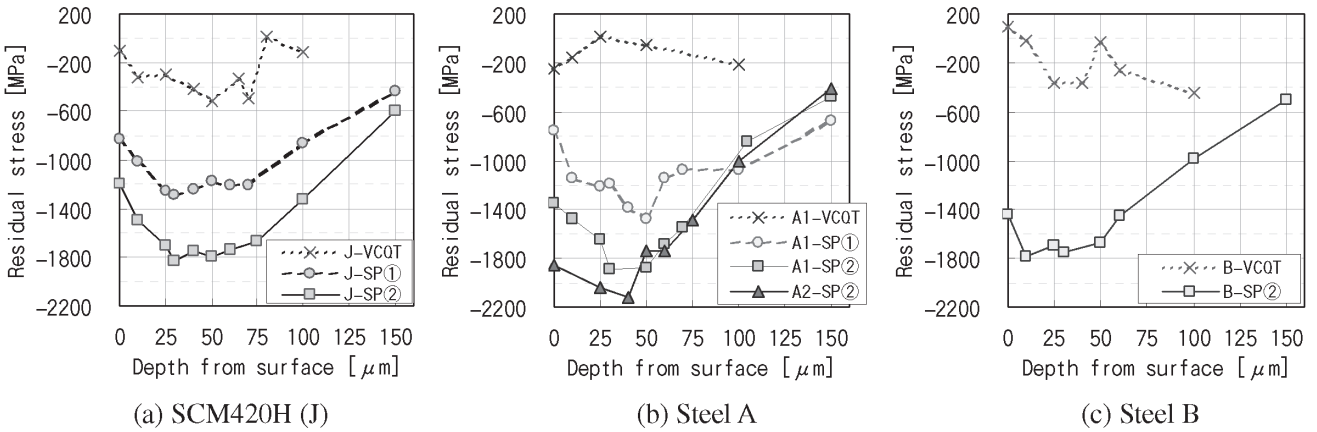


Fig.4. Residual stress distribution of specimens.

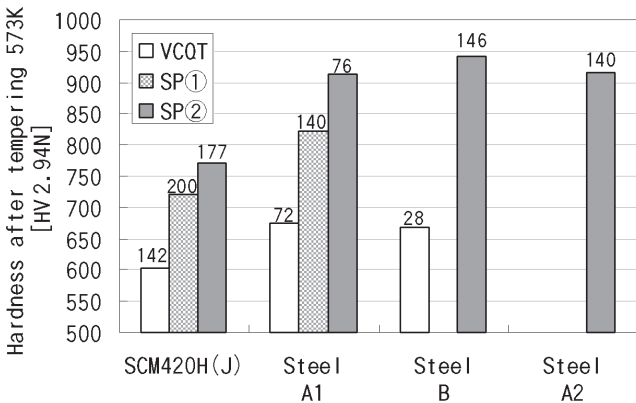


Fig.5. Surface hardness of specimens after tempering 573 K.

10.8 ks) の関係を示す。いずれの試験片も 473 K 以上の温度で圧縮残留応力が大きく減衰しているが、573 K では材料と SP の組合せによって圧縮残留応力に差

がつく結果となっている。まず、SP 別に比較した場合、SP 強弱の順 (SP ② > SP ① > VCQT) に圧縮残留応力が高く、SP ①の 400 MPa 前後に対し、SP ②では最大で 1000 MPa を超える高い値が得られている。また、材料別に比較した場合、焼戻し軟化抵抗性の高い高 Si 鋼の A 鋼と B 鋼は SCM420H より圧縮残留応力の減衰量が小さい傾向であった。この傾向は、福岡らの高 Si 鋼を用いた実験^{7), 8)}と一致しており、Si の増量による焼戻し時の炭化物の成長と転位の消失を遅延させる効果を始め、ひずみの減少を停留させる効果²²⁾によるものと考えられる。高硬さでかつ高圧縮残留応力であった A2-SP ②の 573 K 焼戻し特性は A1-SP ②とほぼ同等であった。これは、SP 後の高硬さや高圧縮残留応力を付与するプロセスのひとつである低温焼戻し処理の適用は、SP に続く 573 K 焼戻し後の硬さや残留応力にはあまり影響しないことを示唆している。

3. 3 RP試験結果と焼戻し硬さとの関係

RP試験結果をTable 6に整理し、各試験片のRP寿命をグラフ化したものをFig.7に示す。この表には、破損寿命の対数平均値の他に、573 K焼戻し硬さの保持時間(10.8 ks)と対比するため、任意の曲面の総接触時間も併記した。なお、総接触時間は寿命回数から求まる試験時間に式(1)によって得られる係数Aをかけて算出した。

$$A = \frac{2a}{\sqrt{2\pi R}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、係数Aは試験ローラーの円周に対する接触面の長さの比、Rは試験ローラーの半径(=13 mm)、aはヘルツの弾性接触理論²⁹⁾から求まる楕円形接触面の回転方向の半径(=0.556 mm)である。

Fig.7に示すように、いずれの鋼種においても、SPによりピッチング寿命が向上し、SP②の方がSP①よりも長寿命であった。基本仕様のSCM420H(J)では、VCQT品に対してSP①が約1.75倍、SP②が約5.48倍

に向上していた。A1鋼では、SCM420HのVCQT品より約2.4倍の寿命向上を確認し、SP処理品においてもSCM420Hの同仕様よりいずれも長寿命が得られた(A1-SP①:4.81倍、A1-SP②:10.4倍)。また、A2-SP②では、 4×10^7 回以上でもピッチングが発生しなかった。一方、表層硬さや焼戻し硬さが最も高く、長寿命が期待されたB-SP②では、4.82倍と寿命向上度が小さい結果となった。

RP試験後の外観およびき裂の発生状況の代表例をFig.8に示す。SCM420H-VCQT材(Fig.8(a))では、剥離形態が矢尻形であること、表面にはせん断応力が発生する方向にき裂が存在していることから、破損形態は村上らが報告している³⁰⁾表面起点のピッチングと推定される。一方、B-SP②(Fig.8(b))では、比較的平坦なせん断形の破面を呈しており、深さ200 μm付近にき裂に沿った白色組織の生成が確認された。これは平岡が報告している³¹⁾White Etching Area (WEA)に類似していることから、内部起点型の破壊であると考えられ

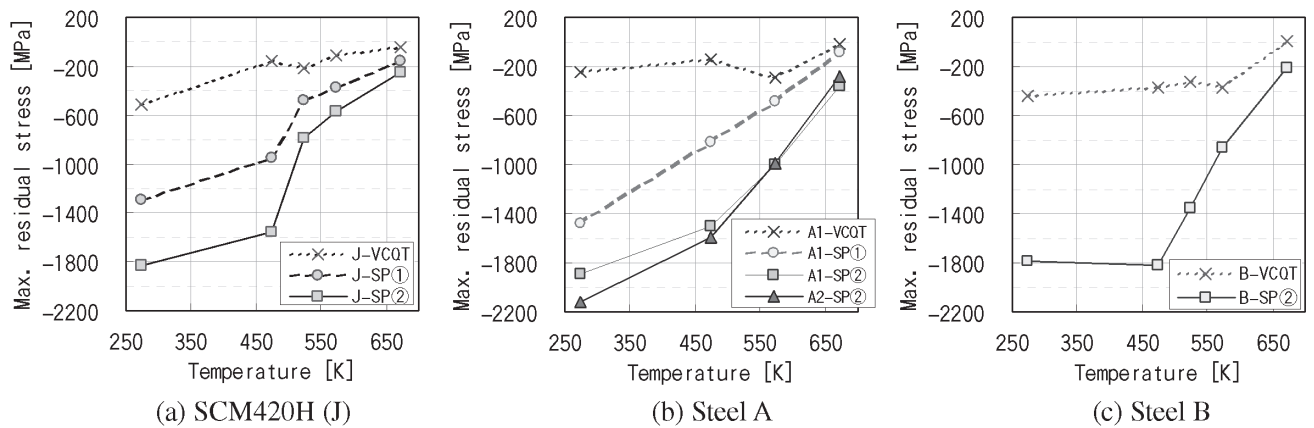


Fig.6. Maximum residual stress change in accordance with tempering temperature (x10.8 ks).

Table 6. Result of pitting test.

Steel	No.	Number of cycles	Total contact time [ks]
SCM420H	J-VCQT	3,495,696	1.9
	J-SP①	6,131,482	3.3
	J-SP②	19,163,968	10.4
Steel A	A1-VCQT	8,435,506	4.6
	A1-SP①	16,828,805	9.2
	A1-SP②	36,367,884	19.8
	A2-SP②	>40,000,000	21.8
Steel B	B-VCQT	5,401,667	2.9
	B-SP②	16,856,355	9.2

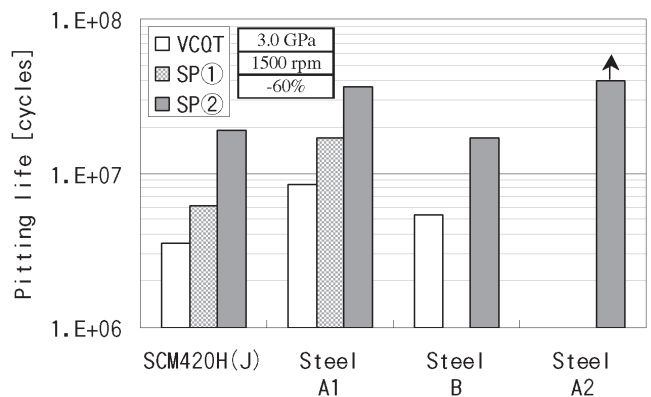
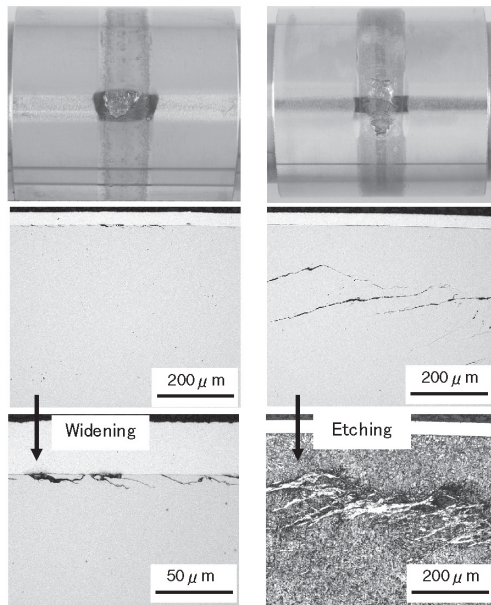


Fig.7. Pitting life of specimens.

る。B-SP②の表面硬さ見合いに寿命が向上しなかった原因は、破壊起点がSPの影響層よりも深いためと推測され、今後のデータ整理には排除することとした。

ピッチング寿命と573 K焼戻し後の最表面硬さの関係をFig.9に示す。なお、573 Kでの表層残留応力値を图中に併記した。SPによって焼戻し硬さを高めた材料においても、ピッチング寿命はおおよそ573 K焼戻し硬さで整理されることが確認できる。しかしながら、SP別に分けて整理した場合、SP②はSP①の同一焼戻し硬さ



(a) SCM420H (J-VCQT) Nf=3,495,696 (b) Steel B (B-SP②) Nf=16,856,355

Fig.8. Surface photographs and optical micrographs of specimens after testing.

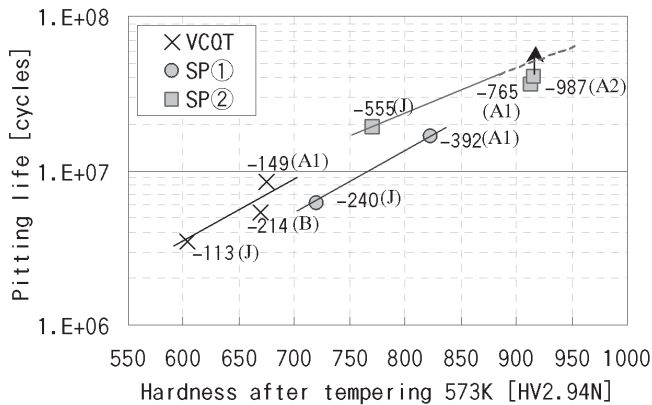


Fig.9. Relationship between surface hardness after tempering 573 K and pitting life.

対比、長寿命の傾向となった。これは573 Kでの表層の圧縮残留応力値が500 MPa以上と高く、寿命向上に寄与したことを示唆する結果である。一方、VCQT品については、SP①の同一焼戻し硬さより長寿命であり、573 Kでの残留応力値では説明できない結果となった。これらの要因については、次節で記述する試験後の表面特性と573 K焼戻し後の表面特性を比較することで解明することを試みた。

3. 4 RP試験後の表面特性

ピッチング寿命と573 K焼戻し硬さの関係の妥当性を検証するため、試験後の表面特性を調査した。Fig.10に試験後と試験前の最表面硬さの関係を示す。SP処理材ではいずれも100 HV前後と軟化が確認されるが、

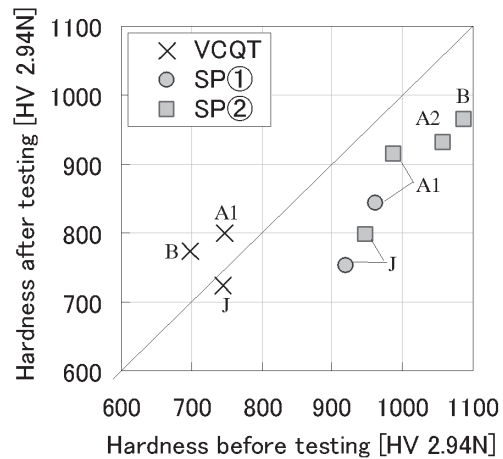


Fig.10. Comparison between surface hardness before testing and that after testing.

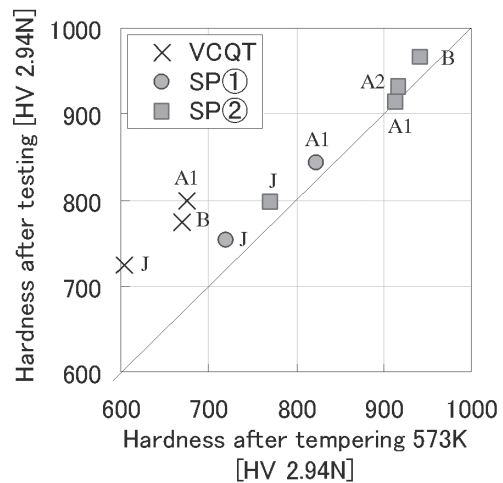


Fig.11. Comparison between surface hardness after tempering 573 K and that after testing.

VCQT 材では軟化量が小さく、逆に高 Si 鋼の A 鋼と B 鋼では、硬さの向上が認められる。本供試材においては、573 K で析出強化などの加工硬化以外の硬化が起こる要因はないこと、試験前に加工硬化させている SP 材では硬化せず軟化していることから、この硬さ上昇は試験面への相手ローラーの押し付け力による加工硬化の影響と考えられる。

試験後と 573 K 焼戻し後の最表面硬さの関係を Fig.11 に示す。573 K 焼戻し硬さが高い試験片は試験後の硬さも高い傾向を示し、SP 処理を施した試験片ではほぼ 1:1 の関係が認められる。しかし、VCQT 材では焼戻し硬さより試験後硬さの方が 100 HV 程度高くなっている。これは、前述した加工硬化の影響の他、焼戻し保持時間や SP 材に比べて総接触時間が短い (Table 6) ことが理由と考えられる。

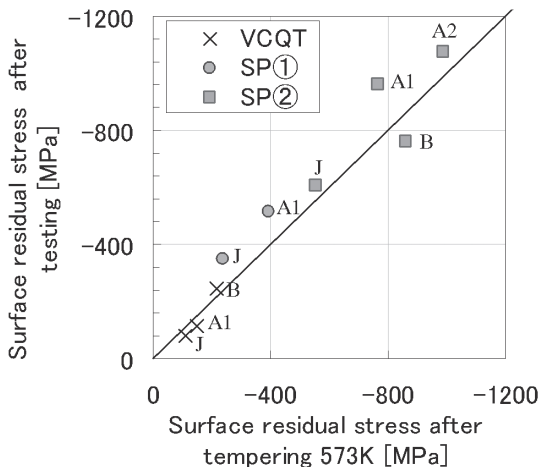


Fig.12. Comparison between surface residual stress after tempering 573 K and that after testing.

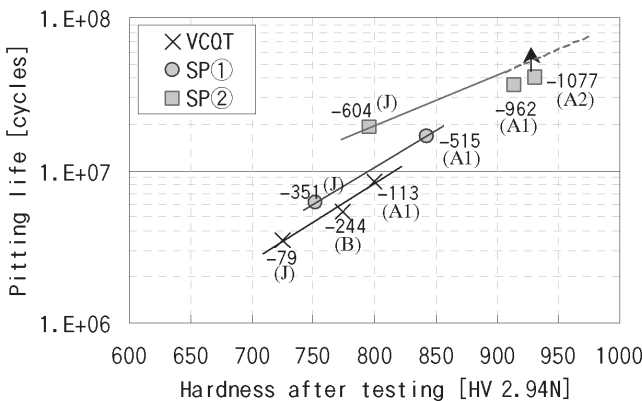
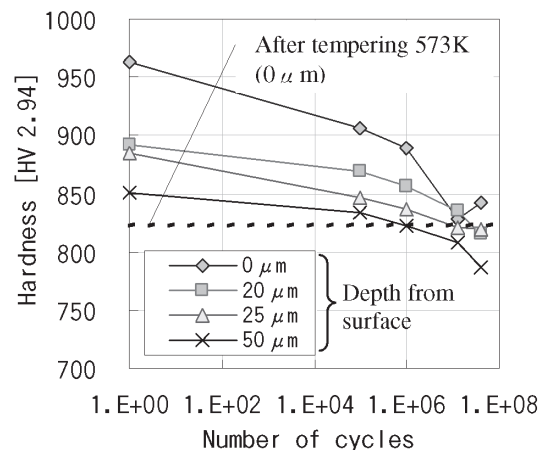


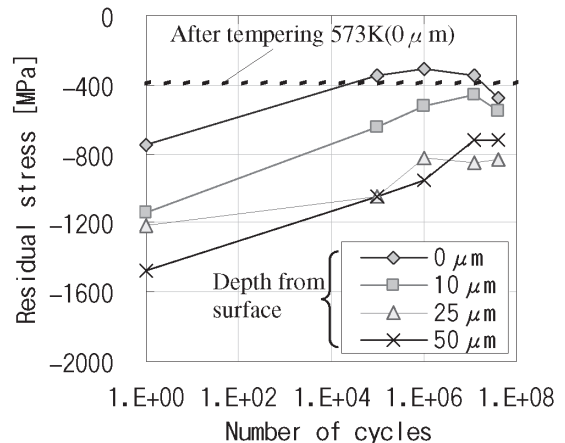
Fig.13. Relationship between surface hardness after testing and pitting life.

Fig.12 に試験後と 573 K 焼戻し後の表層残留応力の関係を示す。573 K 焼戻し後と試験後の残留応力の間には良い相関があり、Fig.11 の硬さの関係とは異なり、全ての仕様においてほぼ 1:1 の関係が得られている。以上のことから、本試験条件においては、試験中の温度はおおよそ 573 K まで上昇していると推測される。

試験後の最表面硬さとピッチング寿命の関係を Fig.13 に示す。図中には試験後の表層残留応力値も併記した。573 K 焼戻し硬さで整理した Fig.9 と異なり、試験後硬さが同じ試験片間で比較した場合、SP の強弱 (SP ② > SP ① > VCQT) の順に寿命が長く、試験後の圧縮残留応力の大小と一致する結果となっている。Fig.14 に SP 材 (A1-SP ①) の硬さおよび残留応力の試験中の変化の一例を示す。硬さおよび圧縮残留応力は繰り返し数とともに減少する傾向であり、短時間では 573 K 焼戻し特性



(a) Change of hardness under testing



(b) Change of residual stress under testing

Fig.14. Change in hardness and residual stress with number of cycles (A1-SP ①).

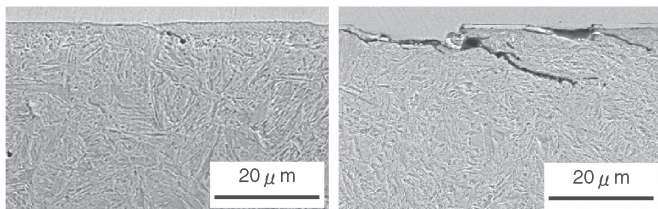
まで減少しないことが認められる。また、Fig.15 に示すように、Fig.13 において試験後硬さがほぼ同等であった SCM420H-SP ②と A1-VCQT の転走面のき裂を SEM 観察により比較した結果、SCM420H-SP ②の方がき裂の数が少なく、短くなっていることが認められる。このことは、試験前の常温硬さや試験中の圧縮残留応力が高い SCM420H-SP ②の方がピッチングき裂発生やき裂進展の抑制がされていることを示唆している。蟹澤らの研究では、SP 材のピッチング疲労のき裂伝播挙動の調査から、圧縮残留応力はき裂進展を抑制させる効果があると報告している¹⁶⁾。Fig.15 で確認されたき裂進展の抑制効果も同様に圧縮残留応力の効果であると考えられる。

以上のことから、ピッチング寿命に及ぼす粗さを除く SP の効果としては、焼戻し硬さの向上を始め、常温硬さの向上や高温環境中の圧縮残留応力の存続についても、ピッチング寿命の向上に対して有効であることがわかった。

4. 結 論

本研究では、材料成分および SP 条件の組合せを変化させ、表面粗さを揃えた試験片を作製し、ピッチング寿命に及ぼす SP による硬さの向上および圧縮残留応力の効果について調査した。以下にその結果を記す。

- 1) 573 K 焼戻し硬さは SP 強弱の順 (SP② > SP① > VCQT) に増加し、SP 処理材においても、ピッチング寿命は従来の研究と同様におおよそ 573 K 焼戻し硬さで整理できる。
- 2) ピッチング寿命の向上に対しては、SP による焼戻し硬さの向上のみならず常温硬さの向上および圧縮残留応力の増加も有効である。硬さ向上はき裂発生抵抗の向上効果として、圧縮残留応力の増加は高温環境中の圧縮残留応力の存続によるき裂進展の抑制効果として、寿命向上に貢献していると推測される。



(a) J-SP②
Nf=19,163,968

(b) A1-VCQT
Nf=8,435,506

Fig.15. SEM microphotographs of specimens after testing.

3) 高 Si 鋼に 1000 HV 以上の硬さ、1800 MPa 以上の圧縮残留応力を付与した材料は、ピッチング寿命が大幅に向上した。これは、Si が試験環境中の硬さ低下のみならず圧縮残留応力の減衰をも抑制する効果があるためである。

(文 献)

- 1) 石倉亮平, 狩野隆, 小林祐次, 宇治橋諭: 電気製鋼, 79(2008), 25.
- 2) 加藤万規男, 松村康志, 石倉亮平, 小林祐次, 宇治橋諭: 電気製鋼, 79(2008), 69.
- 3) 石倉亮平, 狩野隆, 小林祐次, 宇治橋諭, 奥村潔: ショットピーニング技術, 22(2010), 1, 1.
- 4) 小林祐次, 辻俊哉, 杉浦英明, 石倉亮平, 狩野隆, 加藤万規男: 新東技報, 27(2009), 5.
- 5) 中島智之: 特殊鋼, 58(2009), 4, 46.
- 6) 松井勝幸: ショットピーニング技術, 21(2009), 2, 14.
- 7) 福岡和明, 富田邦和, 松井勝幸: ショットピーニング技術, 21(2009), 2, 10.
- 8) 福岡和明, 富田邦和, 松井勝幸: ショットピーニング技術, 21(2009), 3, 169.
- 9) Townsend, D.P. and Zarestsky, E. V.: NASA Technical Paper, (1982), 2047.
- 10) M. Kobayashi, and K. Hasegawa: ICSP-4(1990), 465.
- 11) 橋本宗到: ショットピーニング技術, 4(1993), 3, 101.
- 12) 瓜田龍実, 中村貞行, 岡田義夫, 吉田誠: 電気製鋼, 65(1994), 41.
- 13) 林暢彦, 東海林友紀: いすゞ技法, 87(1992), 90.
- 14) 吉崎正敏: 日本機械学会論文集(C編), 66(2000), 3116.
- 15) 鈴木智博, 小川一義, 堀田昇次: 日本機械学会論文集(C編), 65(1999), 3765.
- 16) 蟹澤秀雄, 佐藤洋: 熱処理, 37(1997), 5, 287.
- 17) 吉田誠, 岡田義夫, 松本隆, 渡辺陽一: 自動車技術会論文集, 125, 27(1996), 2, 125.
- 18) 穂屋下茂, 橋本宗到, 加茂秀敏, 松野下智博: 日本機械学会論文集(C編), 62(1996), 1106.
- 19) 横瀬敬二, 妹尾達行, 武本慎一: ショットピーニング技術, 19(2007), 3, 120.
- 20) 房田秀彦, 内藤賢一郎, 片山昌: CAMP-ISIJ, 6(1993), 1766.
- 21) 井上幸一郎, 中村貞行: 電気製鋼, 71(2000), 19.
- 22) 西村富隆: 熱処理, 20(1980), 7, 342.

- 23) 秦野敦臣, 中村貞行: CAMP-ISIJ, **16**(1993), 796.
- 24) T. Nakamura, T. Hanyuda, M. Yoshid, Y. Murakami: SAE Technical Paper Series, 2001, No.2001-01-0827.
- 25) 森田敏之, 井上幸一郎, 羽生田智紀: 電気製鋼, **77**(2006), 5.
- 26) 辻俊哉, 小林祐次, 石倉亮平, 井上圭介: 日本材料学会学術講演会講演論文集, **59**(2010), 309.
- 27) 辻俊哉, 小林祐次, 石倉亮平, 井上圭介: ばね学会ばね及び復元力応用講演会講演論文集, (2010), 39.
- 28) Y. Kobayashi, S. Ujihashi, K. Okumura, R. Ishikura, T. Kano, M. Kato: ICSP-10(2008), 185.
- 29) 川田雄一, 河本実, 横堀武夫, 宮川松男: 材料強度工学ハンドブック, 朝倉書店, 1966, 231.
- 30) 村上敬宜, 栄中, 市丸和徳, 森田健敬: 日本機械学会論文集(C編), **62**(1996), 683.
- 31) 平岡和彦: ふえらむ, **14**(2009), 1, 33.