

異物混入潤滑下における表面硬化鋼の転動疲労特性

平岡 和彦*1・桂 隆之*2・山縣 裕*3・小池 俊勝*3

Rolling contact fatigue properties of surface hardened steel under contaminated lubricant environment
Kazuhiko Hiraoka, Takayuki Katsura, Hiroshi Yamagata and Toshikatsu Koike

Synopsis: In this study, factors which affect the rolling contact fatigue life of surface hardened steel under the contaminated lubricant environment were investigated. The most suitable method for a long service life was also examined. Consequently, it was confirmed that stress concentration relief on a trash impression mark by the optimization of retained austenite quantity was effective for longer life. In addition, effects of chemical compositions and heat treatment were also observed, it was found that reinforcement of temper softening resistance with silicon content increase or the super carbonitriding was effective for longer rolling contact fatigue life.

Key words: surface hardened steel; rolling contact fatigue life; contaminated lubricant environment; retained austenite; temper softening resistance; silicon; super carbonitriding.

1. 緒言

軸受や軸受機能を持つ各種転動部品の基本的な長寿命化対策は、剥離起点となり得る鋼中非金属介在物の低減であり、従来から継続してその努力がなされてきている¹⁾。一方、最近では使用環境の過酷化やメンテナンスフリーの傾向に伴ない不良潤滑により起こされたとみられる表面起点型の剥離損傷が多く見受けられる。その中でも潤滑油中に混入する異物の圧痕を起因とするものは頻度が高く、また自動車のトランスミッションやデファレンシャル軸受等のように部品の機構上そのような環境が避けられない場合が多いので、特に材料面での対策が期待される分野である。異物圧痕による剥離のメカニズムは、圧痕周縁部への応力集中により、表面き裂を生じ、引続き剥離に至るものと考えられている²⁾。筆者もそれを裏付ける事例として本研究に先立ち異物混入潤滑下のスラスト型寿命試験において Fig.1 に示す様な圧痕周縁部からのき裂を観察している³⁾。また、このメカニズムに基づいた剥離対策については、既に多くの報告がある。例えば村上らは、圧痕への応力集中緩和の観点から、材料硬さを高く保ち、かつ残留オーステナイトを多く存在させるための熱処理と材料との組合せによる新しい軸受の開発を紹介しているし⁴⁾、戸田らは、圧痕周縁の盛り上がりの転動中の経時変化を考慮した残留オーステナイト量の適正化について報告している⁵⁾。いずれの報告も、硬さを高く保つことを基本に、応力集中緩和のためにクッションとしての役割を荷う残留オーステナイト

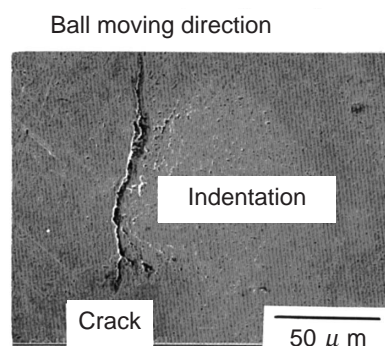


Fig.1. The crack generation from the indentation edge.

を適切に含有させることがキーテクノロジーとなっている。一方、実際の異物混入潤滑下で使用される転動部品には、様々な事情から種々の鋼種が用いられ、かつ種々の表面硬化熱処理が採用されている。その結果、硬さや残留オーステナイト量がほぼ同じであっても、種々のマイクロ組織を呈したり、成分系が異なったりすることがある。ここで、果たしてこれらは同じ寿命を有するかという疑問が生ずる。すなわち、異物圧痕の形状を左右する硬さと残留オーステナイト量のみが指標となって寿命が決まり、熱処理方法によるマイクロ組織の差異や成分の影響は直接受けていないのだろうかという疑問である。本研究では、まず従来から面疲労対策として効果が高いとされている浸炭窒化焼入れ⁶⁾、高濃度浸炭焼入れ⁷⁾等の熱処理対策や、焼戻し軟化抵抗を上げることを狙ったSiとMo添加による成分対策⁸⁾

*1 技術研究所 軸受・構造用鋼グループ長

*2 技術研究所 軸受・構造用鋼グループ

*3 ヤマハ発動機株式会社 研究開発センター

Table1. Chemical composition (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SCM420	0.20	0.23	0.81	0.012	0.007	0.08	1.14	0.15
Steel A	0.23	1.01	0.78	0.015	0.007	0.06	1.49	0.98

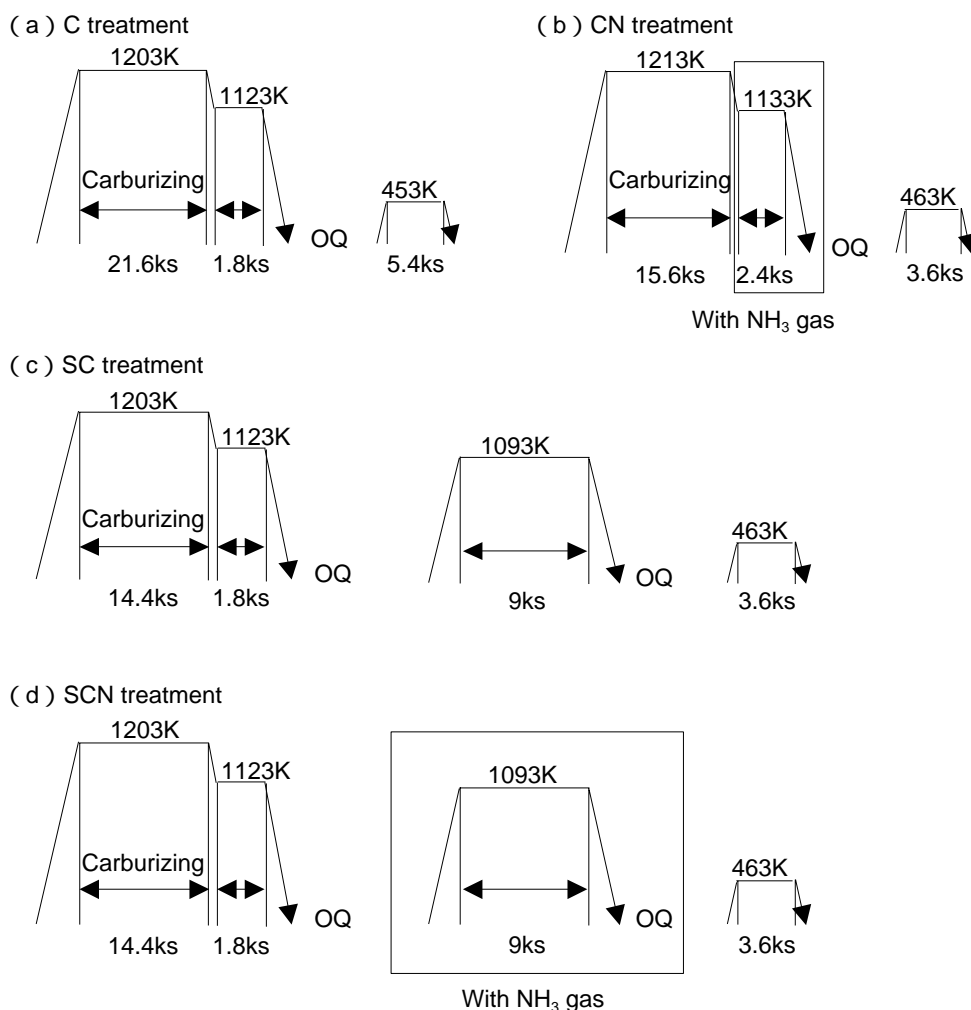


Fig.2. Heat treatment conditions of C, CN, SC and SCN treatment

あるいはそれらの組合せ対策を施したものについて異物混入潤滑による転動疲労寿命試験を行なった。そして、それらの結果を基に当該環境の寿命を左右する要因についての検証を行ない、最適な長寿命化方法を模索した。

2. 実験方法

2.1 供試材

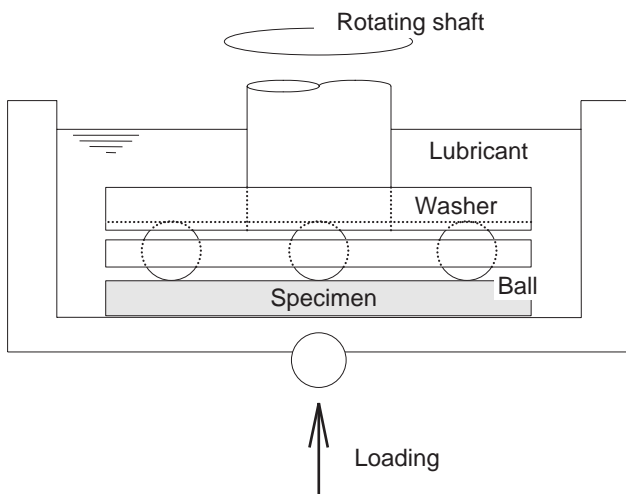
供試材は、Table1に成分を示すJIS SCM420（以下SCM420と略）とSteel Aを用いた。Steel AはSCM420に対し、SiとMoを各々1mass%添加している点が特徴である。SCM420は90ton電気炉にて出鋼し、連続鋳造材により製造した鋳片を外径65mmに圧延した量産工程材である。Steel Aは、試験溶解炉（100kg真空誘導溶解炉）

により溶製したインゴットを、外径65mmに熱間鍛造して供試した。各々の供試材から機械加工により外径60mm、内径20mm、厚み9mmの後述のスラスト型寿命試験片の粗加工を行なった。さらに表面硬化のために次の各種表面硬化熱処理を行った。その内容は、浸炭焼入焼戻し（略号C）、浸炭窒化焼入焼戻し（略号CN）、高濃度浸炭焼入焼戻し（略号SC）ならびに高濃度浸炭窒化焼入焼戻し（略号SCN）である。なお、これらの処理でいう窒化とは、表面硬化のための浸炭と同時に窒素の表面への侵入を狙ったものであり、高濃度は、浸炭処理の炭素濃度を共析点以上として、表面への炭化物析出を狙ったものである。各々の熱処理は以下の本文や図表においては前述の略号で示す。熱処理条件の詳細はFig.2に示す。なお、試験の都合によりSteel AのC処理は実施していない。各表面硬化処理の後、

表面から50 μ mの削り代で平面研磨を行ない、表面粗さがRa = 0.05 ~ 0.1 μ mの範囲に入るようにラッピング処理により寿命試験片を仕上げた。試験片の確性調査は、表面直下のミクロ組織観察、表面から深さ方向へのマイクロビッカース硬度分布、最表面から0.1mm深さまで電解研磨した状態でのCuターゲットX線回折による残留オーステナイト量測定ならびに最表面のX線残留応力測定を実施した。なお残留応力は、試験片の円周方向を測定した。

2・2 異物混入潤滑転動疲労試験

転動疲労試験は、森式スラスト型試験機にて実施した。試験機のプロット図と詳細条件をFig.3に示している。本試験では、異物圧痕による表面起点型の剥離寿命を評価するために、潤滑油中に異物を混入させて試験を行なっている。異物は、ガスアトマイズにより作成した硬度750HVの球状ハイス粉末を100 ~ 150 μ mに分級したものをを用いた。その混入量は潤滑油中1リットルに対し1gである。



Test conditions	
Contact stress	$P_{max} = 5.3\text{GPa}$
Loading speed	1800cpm (3 Ball)
Ball	SUJ2 3/8inch.
Lubricant	PURESAFTY 10 (COSMO)
Contaminant	Gass atomized powders of high speed steel diameter : 100 ~ 150 μ m Hardness : 750HV Amount : 1gram per 1liter

Fig.3. Schematic of thrust type RCF tester and the test conditions.

2・3 圧痕形状評価試験

異物圧痕による剥離は、基本的には圧痕周縁部への応力集中によるき裂から生じるものと考えられる。そこで各条件の寿命試験片について、圧痕形状の特徴を定量的に評価

するために、HRC硬さ試験の円錐型圧子による圧痕形状の測定を実施した。評価値は、表面粗さ計の測定チャートから圧痕の左右の盛り上がり量を読取り、両値を足して2で除した値とした。盛り上がり量測定の手順をFig.4に示す。測定回数は各条件について、1つの試験片を用いて寿命試験面内を任意に場所を変えて5回行なった。

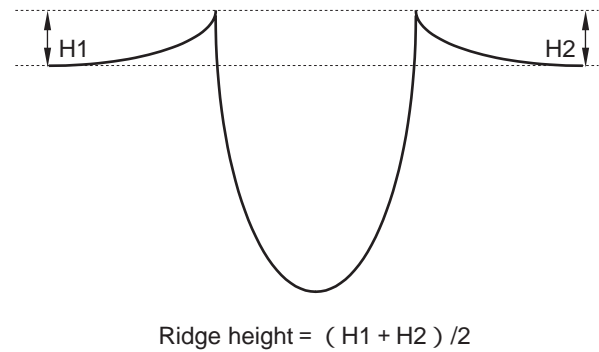


Fig.4. Measuring method of Ridge height.

3．実験結果

3・1 寿命試験片の確性調査結果

各試験片表面直下のミクロ組織をFig.5に示す。ここで、CならびにCN処理材は地の組織観察を主眼とするために3%ナイトルによる腐食により観察を行なっている。またSCならびにSCN処理材は、高濃度浸炭による析出炭化物の状態を観察するために、ピクルール腐食により観察を行なっている。まず、CならびにCN処理材は、SCM420ならびにSteel Aともにマルテンサイトを主体に残留オーステナイトを含んだ組織である。但し、SCM420のC処理材は、全体的に白っぽい腐食組織であり残留オーステナイトが多く、かつマルテンサイト組織が若干CN処理材に比べて粗く見受けられる。これは、特に狙ったものではないが一般の浸炭に対し、若干表面炭素量が高くなったことによるものと考えられる。一方、SCならびにSCN処理材は、いずれの鋼種でも高濃度に浸炭した結果、炭化物の析出が認められる。またその形状は、良好な球状を呈し、ネット状のものは認められない。炭化物の大きさは、SCM420の両処理で1 ~ 2 μ m程度、Steel Aは両処理ともに1 μ m程度であり、Steel Aの方が炭化物が小さくなる傾向がある。また、Steel AのSCN処理材は、残留オーステナイトと見られる腐食されずに白く見られる部分が、20 μ m程度の大きさで塊状に存在している。Fig.6に試験片の深さ方向の硬度分布を示す。SCM420のCならびにCN処理材は、表面から0.2mm程度までの最表面部において内部と比べて硬さが低下する傾向が認められる。また

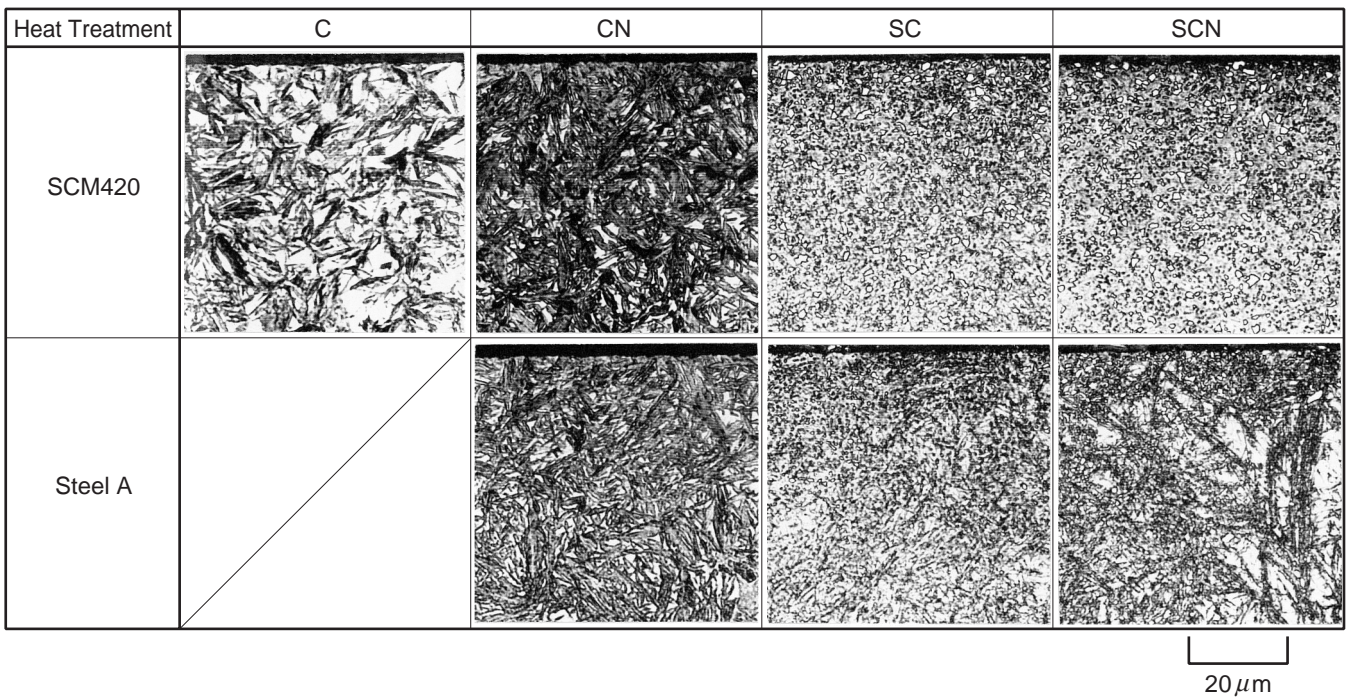


Fig.5. Optical micrographs of specimens

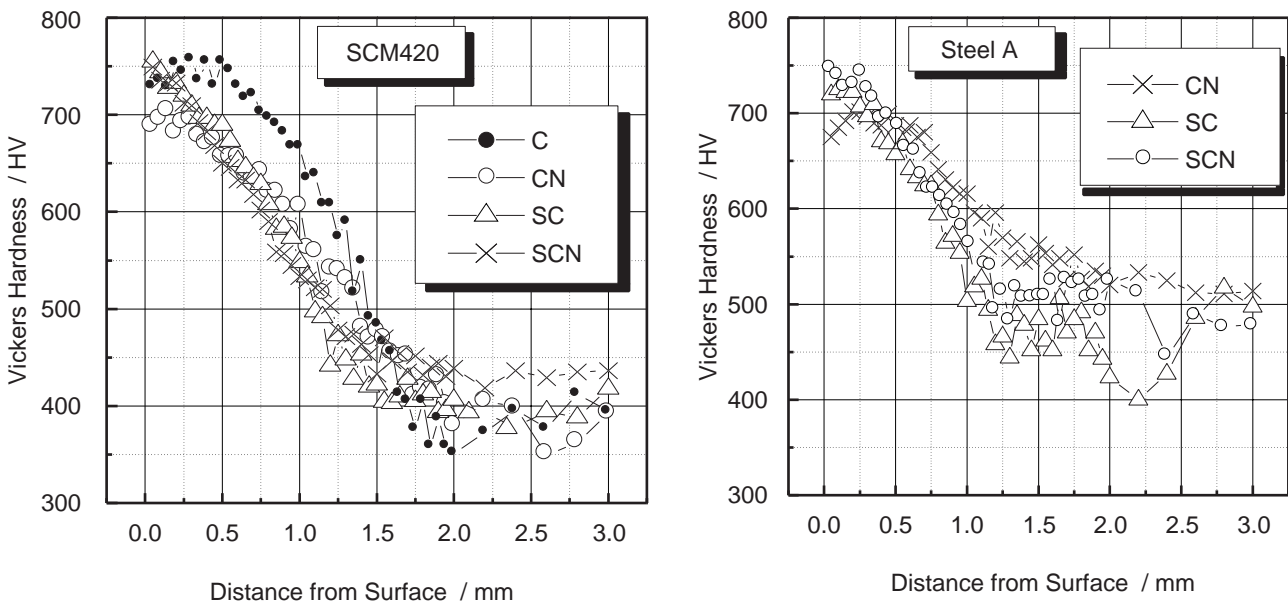


Fig.6. Hardness of specimens

CN処理は、他の処理条件と比べて最表面硬さが低く、測定最表面の50 μ m深さの部位で690HVである。一方高濃度に浸炭したSCとSCN処理材は、表面硬さの低下はなく最表面が最高硬さを示している。Steel AもSCM420と類似した傾向であり、CN処理材は測定最表面である50 μ m深さ位置では675HVまで硬さ低下している。Table 2には、各条件材の表面硬さ（Fig.6の測定最表面である50 μ m深さの値）、残留オーステナイトならびに残留応力値を示す。残留オーステナイト量は、各鋼種内においては、高濃度に浸炭されたSCとSCN処理が高い値を得ている。また鋼種間の比較では、SCM420の方がSteel Aに比べて、同じ熱

処理条件で比較した場合、残留オーステナイト量は多い傾向がある。最表面残留応力は、何れも600～700MPa程度の圧縮の値であり、特に熱処理による傾向は認められない。

3・2 異物混入潤滑転動疲労試験結果

得られた寿命試験結果のワイブルプロットをFig.7に示す。各条件のプロットは、寿命の優劣にかかわらず勾配がほぼ同じであり、単一のモードで剥離が起こったと考えられる。本実験の場合は、狙いとした混入異物による圧痕起点の剥離が起こっていると解釈される。各条件の50%破損寿命（ L_{50} 寿命）をFig.8に示す。SCM420では、SCN

Table2. Hardness, retained ausutenite and residual stress of life test specimens

	Steel grade	SCM420				Steel A		
		C	CN	SC	SCN	CN	SC	SCN
1	Hardness of surface/HV	730	690	755	749	675	720	746
2	Retained ausutenite /vol%	27.6	22.7	31.3	28.3	19.5	26.7	25.1
3	Residual stress/MPa	- 605	- 651	- 630	- 630	- 696	- 615	- 716

1 : Measured at 0.05mm depth from specimens' surface
 2 : Measured at 0.1mm depth from specimens' surface
 3 : Measured at specimens' surface

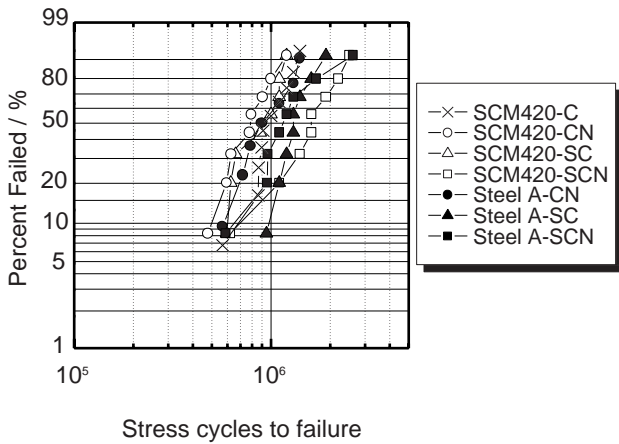


Fig.7. Weibull plot of the Life test.

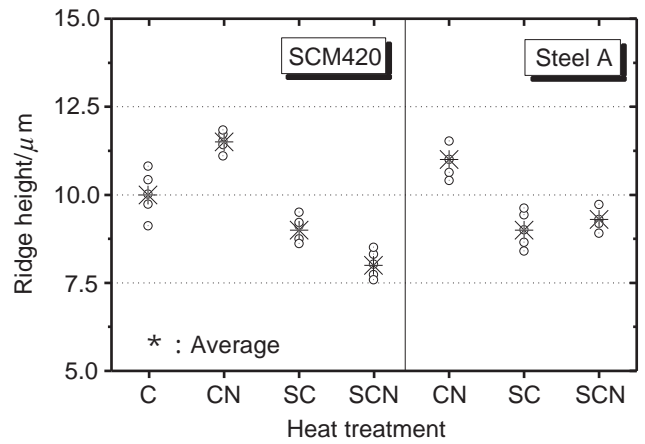


Fig.9. Comparison of Ridge height.

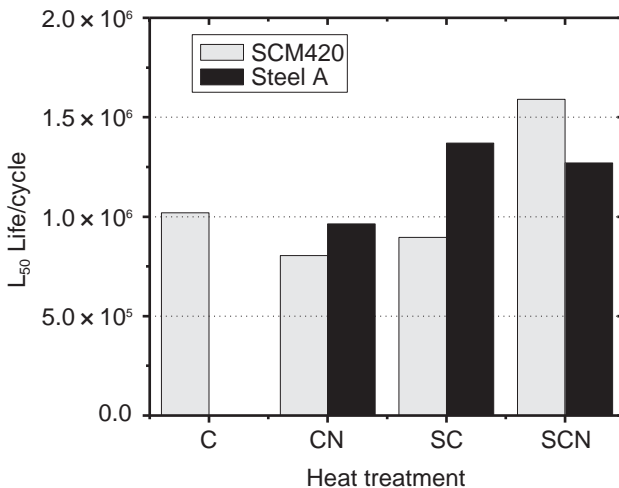


Fig.8. Comparison of L₅₀ Life

処理材が最も長寿命であった。またC, CNならびにSC処理材は大差はないが、その中ではC処理がCNやSC処理材よりは若干長寿命であった。Steel Aは、SCM420とは異なり、SC処理が最高を示し、SCN処理ではそれより若干寿命は低下した。

3・3 圧痕形状評価試験結果

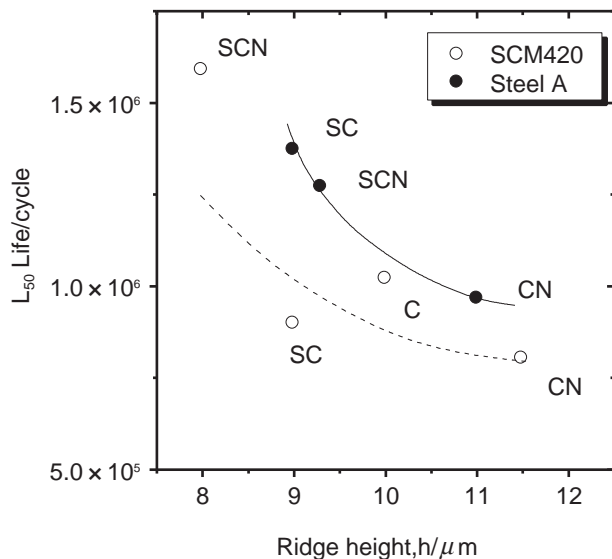
HRC硬さ試験圧痕の評価により得られた各条件材の圧痕盛り上り量をFig.9に示す。比較的L₅₀寿命が良好であったSCM420のSCN処理材や、Steel AのSCならびにSCN処理材は、低い圧痕盛り上り量となっていることがわかる。

なお、ここで得られた圧痕盛り上り量は、実際の転動疲労試験における異物による初期の圧痕の形状評価を代用していることになる。実際の転動疲労試験における圧痕は、試験途中や試験後に測定を行なった場合、経時的な変化を含んでおり、各条件材を公平に評価できないと考えたため、当該の代用試験を初期圧痕評価とした。

4 . 考察

4・1 寿命結果についての考察

Fig.10に圧痕盛り上り量とL₅₀寿命との関係を示す。全体的には、圧痕盛り上り量の値が小さいほど寿命が長い傾向であり、異物圧痕の周縁部への応力集中が大きく寿命に影響していることが裏付けられる。またSCM420とSi, Moを添加したSteel Aとは同結果は層別され、同じ圧痕盛り上り量に対しては、Steel Aが長寿命となる傾向が見られる。このことから、本実験の条件下において、寿命値は圧痕周縁への応力集中だけではなく、SiならびにMo添加による成分の影響を独立で受けていると解釈される。その理由として、転動体と圧痕周縁の盛り上り部との間の微小な滑りの存在⁵⁾の関与が挙げられる。滑りの存在により、最大せん断応力深さは、より表面に近づきかつその値は大きくなると考えられ、表面からのき裂生成が助長されることになる。すなわち、本試験の異物圧痕からの剥離寿命は、圧痕周縁部への応力集中のみで説明されるものではなく、

Fig.10. Relation between Ridge height and L_{50} Life

微小滑りによるき裂発生への抵抗からも影響を受けていると考えられるのである。これらの添加元素が寿命延長に寄与した推定メカニズムとして次の2点が挙げられる。一つは、SiとMoがいずれも焼戻し軟化抵抗を上げる元素であることから、微小滑り部の温度上昇による素材強度低下を抑えたと考えることである。もう一つは、これらの添加元素が微小滑りに伴う局所的な凝着を抑え、それに伴う温度上昇自体を抑えたと考えることである。さらなる詳細な試験片観察や、添加元素を変えた寿命試験の追加によりメカニズムは特定されるものと考えられるが、本研究の範囲では特定できない。

さらに、Fig. 10において熱処理方法自体と寿命との関係を見ると、着眼すべき点がある。まず、SCM420において、C、CNならびにSC処理材の間で、圧痕盛り上がり量に差は生じているものの寿命に大差は生じておらず、SCN処理材のみがずば抜けて長寿命を得ている点である。同鋼種のSCとSCN処理材とでは残留オーステナイト量ならびに表面硬さ（前述Table 2参照）にほとんど差はなく、さらに圧痕盛り上がり量もSCN処理材が $1 \mu\text{m}$ 程度小さいのみでありFig. 10の全体的な傾向においては大きな差があるとはいえない。またFig. 3に示すミクロ組織においても高濃度浸炭に伴う球状炭化物組織であり両者に差異はない。そこで着眼されるのが、窒化がされているかどうかという熱処理方法自体の両者間の違いである。窒化は、焼戻し軟化抵抗を上げる効果があり、前述のSiとMo添加と同じ効果により寿命向上効果をもたらしたことが考えられる。一方同鋼種SCM420のC処理材とCN処理材にも窒化がされているかないかの差があるが、むしろ窒化がされていないC処理材の方が長寿命である。この点は、前述のように結果的にC処理材の方がCN処理材よりも残留オーステナイト量が多く、かつ表面硬さが高くなり、圧痕盛り上がり量も小さ

くなっており、そのことが窒化自体の効果を上回ったとすれば解釈ができる。またSC処理材の圧痕盛り上がり量がC処理材より小さいにもかかわらず寿命が低くなっているのは解釈が困難である。同条件材の特徴は残留オーステナイト量が他の条件材とは異なり30%を越えている点である。戸田らは、残留オーステナイトが多くなれば圧痕の初期の盛り上がり量は減らすことができるが、一方で加工硬化の助長により転動体の通過によるその減少を阻害してしまうことを指摘し、最適な残留オーステナイト量の上限は20~30%であるとしている⁵⁾。本報告の同条件材の残留オーステナイト量は31.3%であり、戸田らの指摘理由により圧痕盛り上がり量が小さい割に寿命が延びなかったことが考えられる。一方Steel Aの寿命結果において、今までの考察内容からすれば、SCN処理材が全条件中最高寿命を有してもよさそうであるが、結果的にはそうではなく、同鋼種中ではSC処理材が最長寿命であった。この理由は、Fig. 5に示すミクロ組織の特徴に求めることができる。ここでSteel AのSCN処理材は、前述のように $20 \mu\text{m}$ 程度の大きさで塊状の残留オーステナイトを形成している。すなわち残留オーステナイトの局在化のために圧痕盛り上がり量が小さくならなかったことか、あるいは残留オーステナイトはマルテンサイトと比べて硬さが低いことからその塊状の存在部自体が欠陥として働き、き裂の生成を助長したことなどが予測に反して寿命が延びなかった理由であると考えられる。なお、Steel AのSCN処理材とSCM420の同条件材は同時に処理されているので、このミクロ組織の特徴は成分に起因するものと考えられるが詳細な理由は特定できていない。

4・2 圧痕盛り上がり量に対する影響因子

前述のように熱処理や成分の影響は存在するものの、圧痕盛り上がり量が抑えられたものが異物圧痕剥離に有利であることは明らかである。ここでは、圧痕盛り上がり量に対しては、どのような因子が影響をしているかを検討した。Fig. 11は表面硬さと圧痕盛り上がり量との関係である。Fig. 12は残留オーステナイト量と同値との関係である。これらから表面硬さ、残留オーステナイト量ともに圧痕盛り上がり量とよく相関しており、表面硬さが高いほど、また残留オーステナイト量が多いほど圧痕盛り上がり量は少なくなっている。そこでどちらの寄与が大きいかを見極めるために、サブゼロ処理により残留オーステナイト量を減じた場合の圧痕盛り上がり量の変化を調べた。供試材は、SCM420のC処理による寿命試験片である。同材に-203Kにて3.6ksec・保持のサブゼロ処理を付与し、処理前後の圧痕盛り上がり量とHRC硬さの変化を調査した。圧痕盛り上がり量の測定は、前述のFig. 4に示す方法と同じである。Fig. 13にその結果を示すが、サブゼロ処理により残留オーステナイトを減じた結果、圧痕盛り上がり量は、 $10 \mu\text{m}$ から $15 \mu\text{m}$ に変化して1.5倍の値となった。また同処理

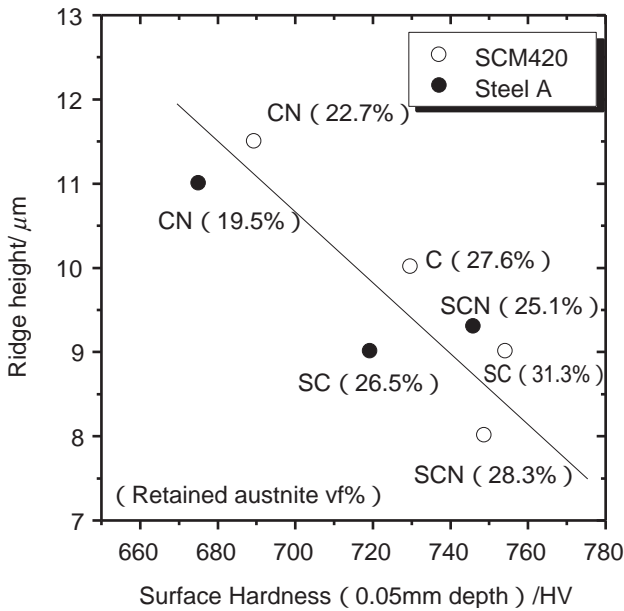


Fig. 11. Relation between Surface hardness and Ridge height.

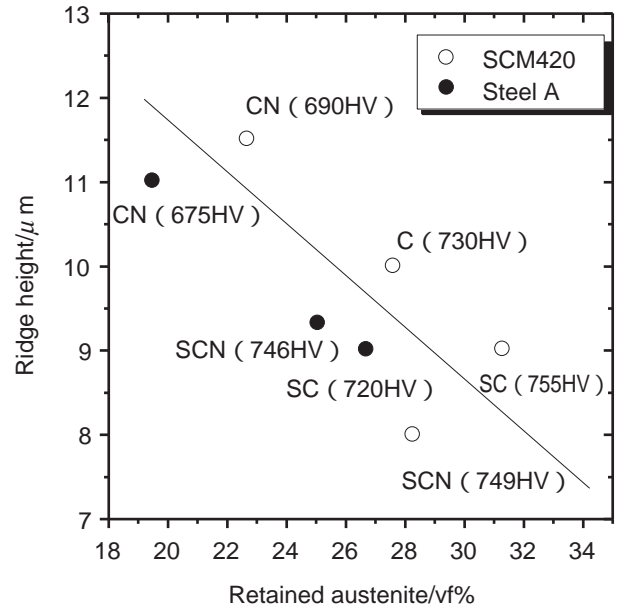


Fig. 12. Relation between Retained austenite and Ridge height.

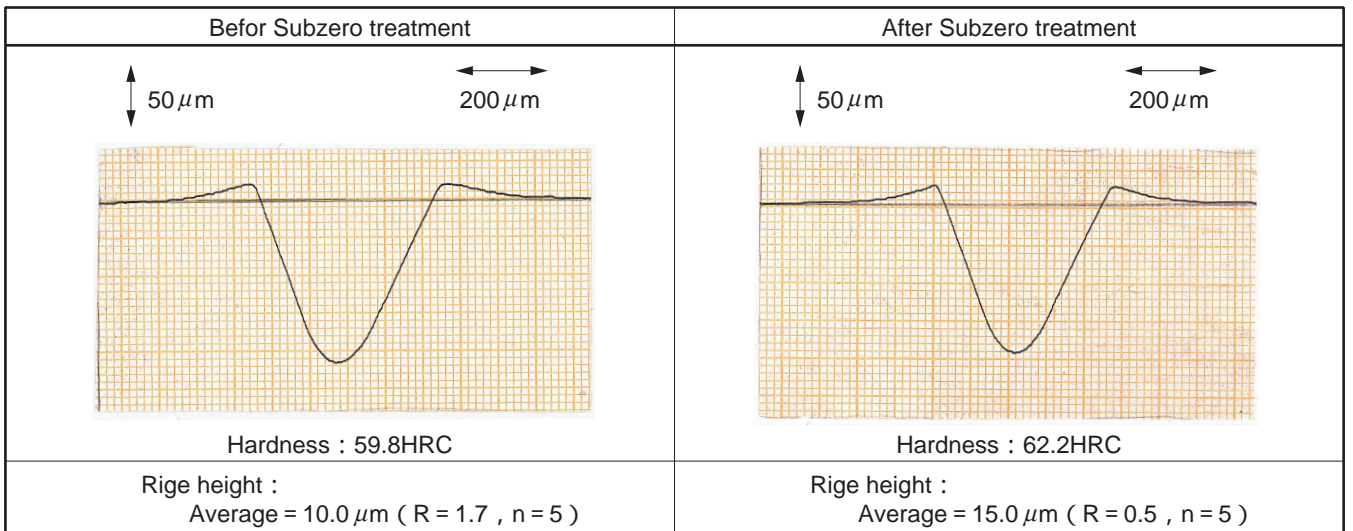


Fig. 13. Comparison of Ridge height before and after Subzero treatment (Steel : SCM420 Heat treatment : C)

により硬さは59.8HRCから62.2HRCに上昇していることから、硬さよりも残留オーステナイト量が支配的に圧痕盛り上り量に寄与していると推定される。

5 . 結論

SCM420ならびにSiとMo添加を特徴とするSteel Aに種々の条件の表面硬化処理を施したものについて、初期圧痕の形状、ミクロ組織、残留オーステナイト量ならびに残留応力を評価し、異物混入潤滑下の転動疲労寿命試験を実施した。それらの結果から以下のことが結論づけられる。

1) 初期圧痕周縁の盛り上り量と異物混入潤滑下の転動疲労寿命との関係について調査した結果、圧痕周縁部の盛り

上り量が小さいほど寿命は長くなる傾向は認められ、従来から述べられている圧痕周縁への応力集中緩和は有効な長寿命化対策であるといえる。

2) SCM420浸炭焼入焼戻し材のサブゼロ処理前後の初期圧痕形状評価により、盛り上り量は、残留オーステナイトの増加により軽減されていることが確認できた。

3) 初期圧痕周縁の盛り上り量と寿命との関係の中で素材成分の影響は層別され、同じ盛り上り量の場合SiとMoを増量添加したSteel Aの方が、SCM420より長寿命が得られた。このことから、寿命値に対しては、単なる圧痕周縁への応力集中だけではなく成分の影響があるとみられ、本研究の供試材であるSiとMoの増量添加は、圧痕周縁部での微小滑りによるき裂発生に抵抗を示したと推定される。

4) 表面硬化熱処理方法の影響については、特にSCM420ベースにおいて高濃度浸炭窒化焼入焼戻し処理が当該環境における長寿命化に有効であることがわかった。その理由は、炭化物析出により表面硬さが高く保たれることと残留オーステナイトを多く含むことの両立と、窒化の効果によるものとの複合効果によると考えられる。なお、Steel Aベースの高濃度浸炭窒化焼入焼戻し処理材が、SCM420ベースの同処理材より短寿命であった理由は、残留オーステナイトの局在により、それ自体が欠陥として働いたかあるいは初期圧痕周縁への盛り上り量緩和に有効に作用しなかったためと考えられる。

文献

- 1) 上杉年一：鉄と鋼，71 (1985)，1631
- 2) Y.P.CHIU，J.Y.LIU：Transaction of ASME，92 (1970)，258
- 3) 平岡和彦：特殊鋼，49 (2000)，1-44
- 4) 村上保夫，三田村宣晶，古村恭三郎：NSK Technical Journal (1992)，652-9

- 5) 戸田一寿，三上 剛，星野照男：日本金属学会誌，58 (1994)，1473
- 6) 渡辺陽一，成田直樹，吉田 誠，蔵本廣志，安部 聡，松島義武：CAMP-ISIJ，12 (1999) 1394
- 7) 安部 聡，幸岡 強，松島義武，中村守文：CAMP-ISIJ，7 (1994) 796
- 8) 沖田滋：'99モーション・エンジニアリングシンポジウム セッション6テキスト (1999) 6-3-1

著者



平岡 和彦



桂 隆之

