



高濃度浸炭窒化法による 二輪車用クランクピンの転動疲労特性改善

Super-carbonitriding to Improve the Rolling-Contact Fatigue Life of Motorcycle Crank Pins

新野 力也 Rikiya Nino 小池 俊勝 Toshikatsu Koike 山縣 裕 Hiroshi Yamagata
平岡 和彦 Kazuhiko Hiraoka※) 桂 隆之 Takayuki Katsura※)
●研究開発センター 応用プロジェクト開発室 / 山陽特殊製鋼株式会社 技術研究所※)

Abstract

The aim of this research project was to improve the rolling-contact fatigue life of crank pins used in motorcycles. In smaller displacement motorcycles a needle bearing is used at the big end of the connecting rod and this bearing subjects the crank pin to high levels of Hertz stress. This high-level stress can at times lead to pin breakage due to rolling-contact fatigue caused by pitching and the like. Also, impurities in the engine oil can bring on rolling-contact fatigue induced breakage at an earlier stage in the life of the crank pin. The life duration of a crank pin depends not only on the quality of the steel used but also the heat treatment process used to strengthen the steel. In this project we subjected high-quality Cr-Mo steel with an oxygen concentration of up to 10 ppm to four different types of heat treatment (normal carburizing, carbonitriding, super-carburizing and super-carbonitriding) and then compared the rolling-contact fatigue life using a thrust type test machine. Granules of high-speed steel were added to the lubricating oil to simulate actual use conditions and it was found that the super-carbonitrided steel showed the longest rolling-contact fatigue life, equivalent to 1.6 times the life of normal carburized steel. This is due to the fact that the super-carbonitriding improved the resistance to temper softening. The super-carbonitrided crank pins developed as a result of this research are presently being used on Yamaha's YZ450F off-road competition motorcycle.

要旨

本研究は二輪車に用いられるクランクピンの転動疲労寿命向上を目的とした。小型二輪車ではコンロッド大端側の軸受にニードルベアリングが用いられているが、ベアリングはクランクピンに高い Hertz 応力を印加する。この高い応力は時にはピッチングのような転動疲労による破壊をもたらす。また、異物混入したオイルは転動疲労破壊を早期に誘起する。クランクピンの寿命を長くする為に材料である鉄鋼の品質だけではなく、熱処理も重要な因子である。本研究では酸素濃度 10ppm 以下の高品質 Cr-Mo 鋼を材料にそれぞれ 4 種類の熱処理（普通浸炭、浸炭窒化、高濃度浸炭、高濃度浸炭窒化）を施し、スラスト型転動疲労装置で転動疲労寿命を比較した。潤滑油中には高速度鋼の粉末を加え、実機の運転条件を再現した。高濃度浸炭窒化処理を施したものが最長の転動疲労寿命を示し、普通浸炭の 1.6 倍に達した。これは高濃度浸炭窒化処理が焼戻し軟化抵抗を改善したためと考えられる。本研究により開発した高濃度浸炭窒化はオフロード競技用ヤマハ YZ450F に採用されている。

1 はじめに

クランクシャフトは燃焼圧力を回転運動へ変換する。二輪車のエンジンは高剛性で高疲労強度を有する強いクランクシャフトが必要である。二輪車の4ストロークエンジンには2種類のクランクシャフトがある。一つは四輪車用エンジンでも一般的な一体型で、もう一方は複数の部品を組み合わせる分割型である。単気筒の二輪車用エンジンには一般的に高強度と低コストを満足する後者が用いられる。

分割型クランクシャフトは主に3つの部品から構成される。すなわちクランクピンと2つのメインジャーナルを有するカウンターウェイトである。図1は分割型クランクシャフトを分解した時の写真である。反対側のウェブはコンロッド大端部を明瞭にするために取り外している。クランクピンはカウンターウェイトのウェブに圧入されている。コンロッド大端部はニードルベアリングを介しクランクピンと結合し、ニードルベアリングはクランクピン表面上を回転するケージで固定されている。

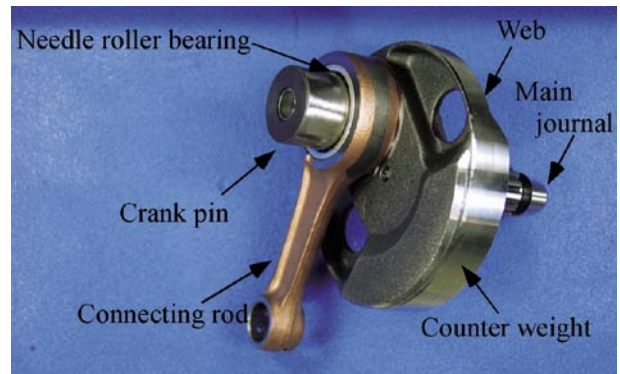


図1 コネクティングロッドとクランクシャフト
(もう一方のウェブは大端部を示すため取り除いている)

高出力の二輪車は高い回転速度を生みニードルベアリングに高いHertz応力を印加する。

クランクピン上の応力は3GPaにも達する。この高いHertz応力によりピッチングまたはフレーキングのような転動疲労破壊が誘引される。高い硬度と強度を付与するためにクランクピンは通常Cr-Mo鋼を浸炭して使用している。

高出力に耐え得るクランクピンにするには、耐転動疲労特性が要求される。本研究ではJIS-SCM420 Cr-Mo鋼に4種類の熱処理を施し転動疲労寿命を比較した。

ピッチングに対し2種類の発生機構が提案されている。1つは表面直下から亀裂が発生する機構である。この亀裂は表面直下のHertz応力最大点近傍に存在している介在物を起点とする。別に表面を起点とする亀裂発生がある。これは潤滑油中の異物の噛み込みによって生じる表面の傷が起点であると報告されている^{1,2)}。

表面直下起点の亀裂発生に対しては、鋼中の不純物低減が有効とされている³⁾。不純物はたいてい酸化物であり、鋼中の酸素濃度を低減することが有効である。クランクピンは浸炭されて使用されている。最表面を起点とする亀裂発生には普通浸炭よりも強力な浸炭を施すことが必要である。本研究では4つの浸炭熱処理を比較し、高濃度浸炭窒化が最も有効であるという結果を得た。

開発した熱処理（高濃度浸炭窒化）はヤマハモーターサイクルYZ450Fに採用されている。

2 実験方法

2.1 試験片

JIS-SCM 420 Cr-Mo 鋼を浸炭熱処理用素材に用いた。組成は表 1 に示す。酸素濃度は二次精錬により 10ppm 以下に低減している。

試験片は外径 60mm、内径 20mm、厚さ 9mm のリング状の形状になるように機械加工を施した。試験片の上部に図 5 で後述する転動疲労試験を行った。試験片にはそれぞれ図 2 で示す 4 種類の熱処理を施した。以下通常浸炭を C、浸炭窒化を CN、高濃度浸炭を SC、高濃度浸炭窒化を SCN と表記する。浸炭処理後、試験片表面 50 μ m を研磨で除去した。除去後の表面の最終的な表面粗さは $R_a = 0.05 \sim 0.1 \mu$ m とした。

試験片は光学顕微鏡観察、微小ビッカース硬さ試験、X 線による残留オーステナイト測定と残留応力測定を行った。

2.2 浸炭窒化

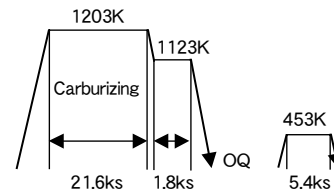
浸炭層の組織写真を図 3 に示す。表 2 に表面硬度、残留オーステナイト量、残留応力をまとめた。

図 3 に示すように C 材ではマルテンサイトと残留オーステナイトが観察された。残留オーステナイト量は 27.6% であった。SC と SCN 材では球状の炭化物が微細に分散しているのが確認された。炭化物粒径は 1-2 μ m だった。いずれの熱処理でも高い残留オーステナイト量を示している。

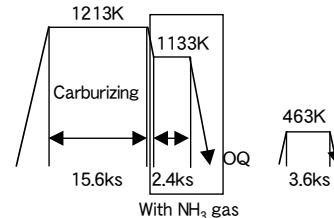
表 1 鋼の組成 (mass%)

	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

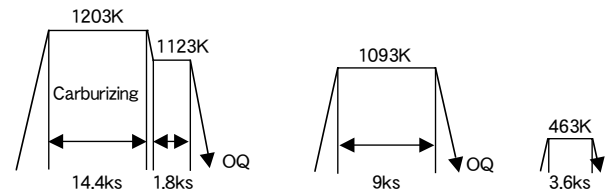
(a) C treatment: 普通浸炭



(b) CN treatment: 浸炭窒化



(c) SC treatment: 高濃度浸炭



(d) SCN treatment: 高濃度浸炭窒化

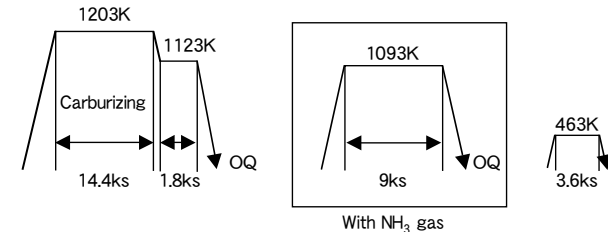


図 2 浸炭熱処理

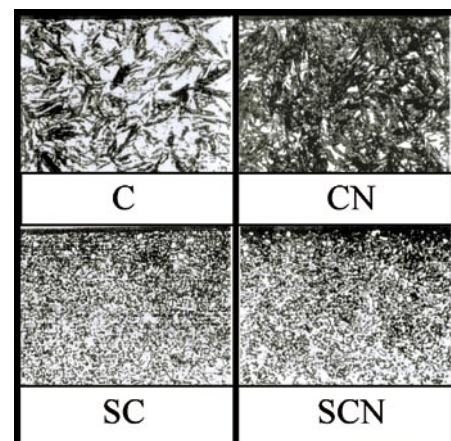


図 3 浸炭後組織 (写真上部が表面)

表 2 各試験片の熱処理後の特性

浸炭熱処理	C	CN	SC	SCN
1. 表面硬度, /HV	730	690	755	749
2. 残留オーステナイト量, vol.%	27.6	22.7	31.3	28.3
3. 残留応力, /MPa	-605	-651	-630	-630

1: 測定点は最表面より深さ 0.05mm

2: 測定点は最表面より深さ 0.1mm

3: 測定点は最表面

図4に各浸炭熱処理の硬度曲線を示す。C材は深さ0.5mmで最大値を示している。これは最表面付近に粗大な残留オーステナイトがあり、最表面で硬度が低下したためである（図3C）。これに対しSC材とSCN材は最表面で最大値を示し、最表面での硬度低下は見られなかった。

2.3 転動疲労試験

図5に示す森式転動疲労試験機を用いて試験を行った。図で示されているように試験機にはリング状の試験片にスラスト力が働く。回転力は軸からスラストワッシャーに伝達される。ワッシャーは静止している試験片に対し相対的な回転力を付与する。試験片最上面で割れが生じると試験機が異常振動し停止する。これを材料の破壊とし、破壊に至るまでの応力サイクルが記録される。試験条件は表3に示している。潤滑油の不純物混入を再現するために、高速工具鋼の粉末を潤滑油中に混入した。試験はすべて異物混入した潤滑油を使用した。粉末はビッカース硬さ750HVで粒径100-150 μ mであった。1Lの潤滑油に付き1gの粉末を混合した。

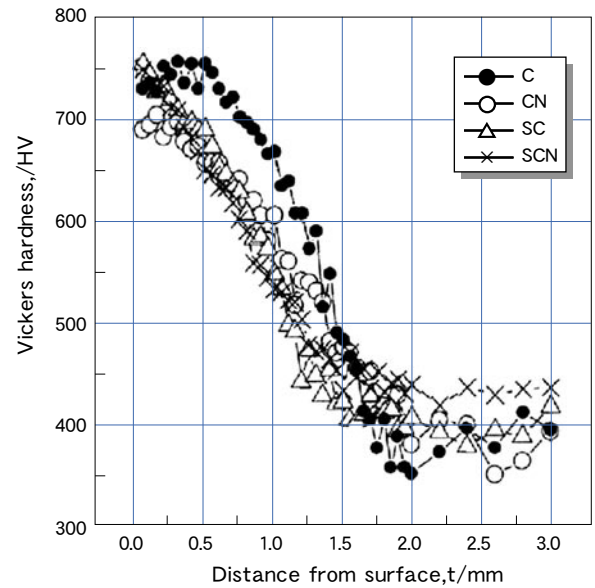


図4 各浸炭熱処理の硬度曲線

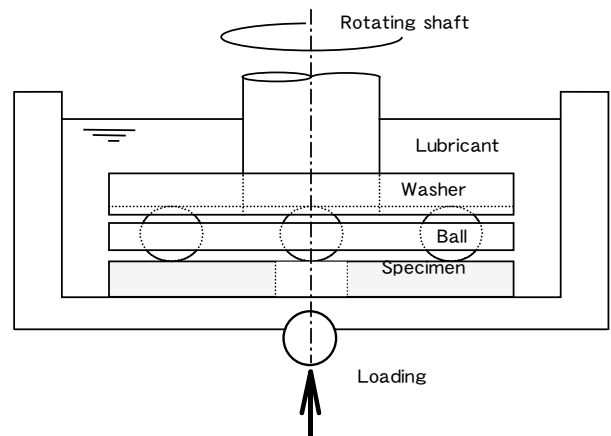


図5 転動疲労試験機の模式図

表3 転動疲労試験の条件

印加応力 (Hertz 応力)	$P_{max}=5.3$ GPa
回転速度	1,800rpm (球は3個)
球	SUJ2 ϕ 9.5mm
潤滑油	Puresafety 10 (コスモ)
不純物	ガスアトマイズ法で作成した高速度鋼 直径：100-150 μ m 硬さ：750 HV 混入量：1 g/L

3 結果と考察

3.1 転動疲労寿命

図6にWeibull分布に基づき転動疲労結果を整理した。各プロットは各々破壊した試験片に相当する。各浸炭熱処理の傾きは概ね同等である。これは転動疲労破壊が単一のモードで起こったことを示唆している。図7は図6から50%の破壊確率（L50寿命）をまとめたものである。SCN材は4種類の浸炭熱処理で最長の寿命を示す。転動疲労寿命は他の3種類に比べ突出していることがわかる。

3.2 焼戻しによる硬度低下

転動疲労試験中に局所的な温度上昇が起こり表面層を破壊している可能性がある。温度に対する浸炭相の影響を調査する為、573 Kで焼戻し硬度の低下を調査した。図8は3時間まで保持したときの表面硬度を示している。SCN材の硬度低下は最小を示している。

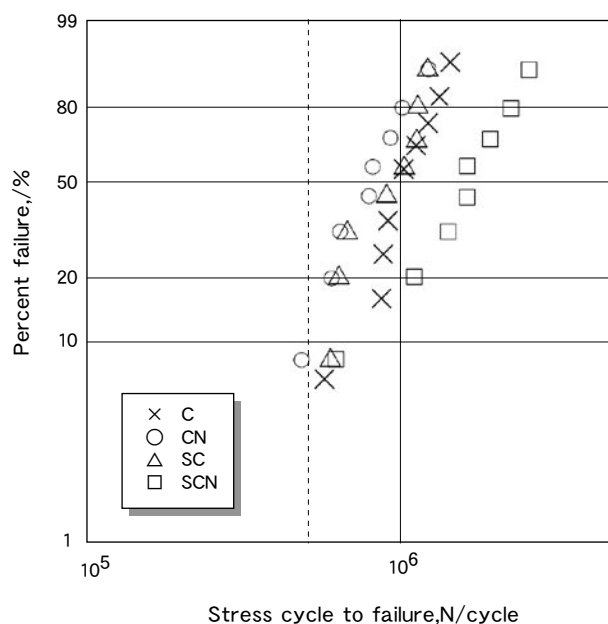


図6 転動疲労試験のWeibull 確率

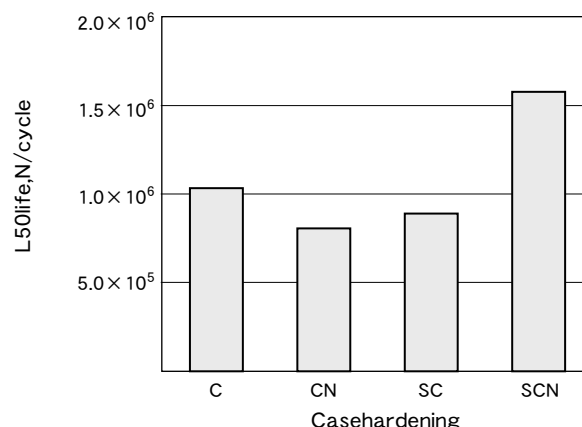


図7 L50 寿命

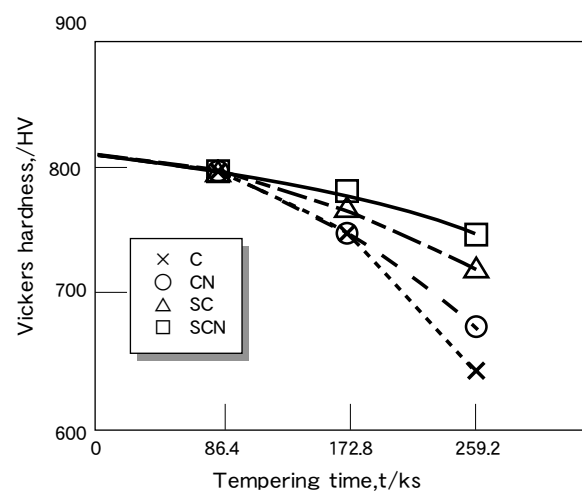


図8 573 K 焼戻し後の硬度

3.3 L50 寿命と焼戻し後の硬さ

L50 寿命に影響を及ぼす支配的因子を明らかにするため、他の特性と L50 寿命を比較検討した。それぞれ図 9 は表面硬さ、図 10 は残留オーステナイト量、図 11 は 573 K 焼戻し後の表面硬度と L50 寿命の関係である。図 9 は L50 寿命と表面硬度には関連がないように見える。戸田らは残留オーステナイト量が 20 ～ 30% であれば、L50 寿命が伸びることを示唆している⁴⁾。本研究で残留オーステナイト量はこの範囲内である。しかしながら図 10 で示されるようにその効果は明らかではない。

図 11 は SCN 材が最長の寿命を示している一方、硬度が 745 HV 以下では L50 寿命が変化しないことを示している。測定点は多くはないが、図 11 は硬度の増加につれて寿命が延びる傾向を示している。これまで、浸炭層中の窒素濃度増加に伴い焼戻し時の硬度低下が抑制されることが報告されている⁵⁾。析出した炭化物は高温でも安定である。従って SCN 材は最も高い熱的安定性を有すると考えられる。

藤田らは転動疲労試験中の浸炭した試験片の表面温度を評価している⁶⁾。Pmax が 2GPa の時、表面より深さ 1mm の位置の温度を測定し、理論的に表面の最高温度が 673 K にまで達すると推定している。今回の実験においても同様な温度上昇が現れたとすれば浸炭層は高温で分解する。従って最も熱的に安定な SCN 材の表面が変化せず高応力下でも最も長い疲労寿命を示すと考えられる。

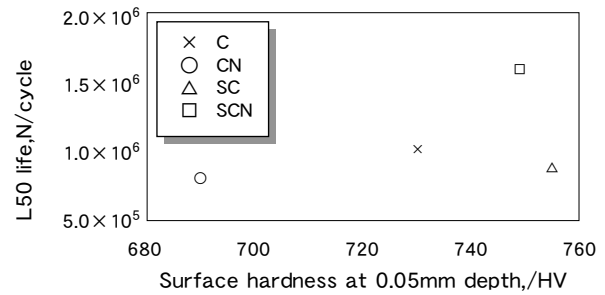


図 9 L50 寿命と表面硬度

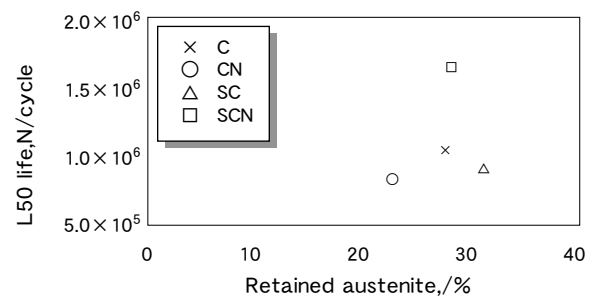


図 10 L50 寿命と残留オーステナイト量

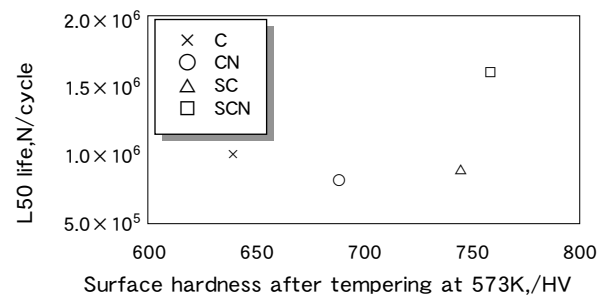


図 11 L50 寿命と 573 K 焼戻し後の表面硬さ

4 おわりに

JIS-SCM420 Cr-Mo 鋼に普通浸炭、浸炭窒化、高濃度浸炭、高濃度浸炭窒化を施し転動疲労寿命を比較した。材料の酸素濃度は 10 ppm 以下で、転動疲労寿命を低下させる非金属介在物の量を低減した。異物が混入した潤滑油を再現するために、高速度鋼の粉末を試験機の潤滑材に混入した。試験結果は高濃度浸炭窒化材の L50 寿命が普通浸炭材の 1.6 倍に達し、4 種類の浸炭熱処理中最長を示した。高濃度浸炭窒化材の長寿命は焼戻し軟化抵抗の増加にあると考えられる。開発した高濃度浸炭窒化熱処理は量産車 YZ450F に採用した。本研究を遂行するに当たり同和鋳業株式会社に熱処理をご協力いただきまして、感謝いたします。

■参考文献

- 1) Y. P. Chiu and J. Y. Liu, "An Analytical Study of the Stress Concentration around a Furrow Shaped Surface Defect in Rolling Contact", Trans. ASME, 92(1970), 258.
- 2) 平岡和彦, "軸受鋼", 特殊鋼, 49(2000), 1.
- 3) 古村恭三郎ら, "クリーンな潤滑及び異物混入潤滑条件下における長寿命軸受材料の開発", NSK 技報, 656(1993), 15.
- 4) 戸田一寿ら, "Effect of Ridge around Dent and Retained Austenite on Rolling Contact Fatigue Life", 日本金属学会誌, 58(1994), 1473.
- 5) 渡辺陽一ら, "浸炭窒化焼入れ後ショットピーニング処理による歯車の接触疲れ寿命の改善", 自動車技術 20004279.
- 6) 藤田公明ら, "SCM21 浸炭硬化ローラの面圧強さに及ぼすすべり率の影響", 日本機械学会論文集, C-45(1979), 945.

■筆者



新野 力也



小池 俊勝



山縣 裕