2 mm の有効硬化層深さを有する浸炭硬化ローラの疲労寿命

關 正憲^{*1}, 山西 利幸^{*2}, 西澤 誠二^{*2}, 藤井 正浩^{*3}

Fatigue life of case-hardened steel roller with an effective case-hardened depth of 2 mm

Masanori SEKI^{*1}, Toshiyuki YAMANISHI^{*2}, Seiji NISHIZAWA^{*2} and Masahiro FUJII^{*3}

^{*1}Department of Mechanical Systems Engineering, Okayama University of Science

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-0005, Japan

^{*2}Technology Research Center, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

19 Natsushima-cho, Yokosuka-shi, Kanagawa 237-8555, Japan

^{*3}Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan

Received 20 June 2014

Abstract

In this study, case-hardened steel rollers with an effective case-hardened depth of 2 mm were fatigue-tested using a roller testing machine in order to elucidate their rolling contact fatigue life. They were made of three kinds of steels. These experimental results were compared with the results of the case-hardened steel roller with an effective case-hardened depth of 0.7 mm. The surface properties of all the test rollers were almost the same. The failure mode of all the test rollers was pitting due to surface cracking. The fatigue life and the surface durability of the rollers with an effective case-hardened depth of 2 mm were improved by the toughness effect due to nickel and the reduction of sulfur content in this experimental range. On the other hand, those with an effective case-hardened depth of 2 mm were far superior to those with an effective case-hardened depth of 0.7 mm. It was confirmed that the surface durability of the case-hardened steel rollers increased as their effective case-hardened depth increased under the same surface hardness.

Key words : Gear, Steel, Fatigue, Case hardening, Effective case-hardened depth

1. 緒 言

藤田・吉田らは、表面下き裂発生に起因するスポーリング損傷が発生した浸炭硬化ローラの疲労試験結果より、相対曲率半径と面圧強さに対する浸炭の最適有効硬化層深さの関係を算定した(Fujita, et al., 1977). また T.Tobie は、歯車の曲げ疲労試験結果より、モジュールならびに相対曲率半径と曲げ強さに対する浸炭の最適有効硬化層深さの関係を導くとともに、歯車の運転疲労試験結果より、モジュールならびに相対曲率半径とピッチング強さに対する浸炭の最適有効硬化層深さの関係を導いた(Tobie, et al., 2005). ここでピッチング強さとは、表面き裂発生に起因するピッチング損傷に対する面圧強さである。

これまでに著者らは浸炭の有効硬化層深さが 1 mm 前後のローラと歯車の疲労試験を実施し、それらの疲労強度を明らかにしてきた(Seki, et al., 2010), (Seki, et al., 2012). しかし、船舶や減速機で用いられる歯車には大型のものが存在することから、浸炭の有効硬化層深さがより深いローラや歯車についても疲労試験を実施し、それらの疲労強度を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、3 種類の鋼材を用いて大型歯車を想定した 2 mm の有効硬化層深さを有する浸炭硬化ローラを製作し、その転がり疲労試験を行った。そして、ローラの損傷形態として表面き裂発生に起因するピッチング損傷に焦点を絞り、浸炭硬化ローラの疲労寿命に及ぼす 3 種類の鋼材ならびに浸炭の有効硬化層深さの影響に

について検討した。

2. 試験ローラと相手ローラ

2・1 ローラの製作

本研究ではローラ用の材料として3種類の鋼材が用いられた。ニッケルクロモリブデン鋼 (JIS : SNCM420), クロモリブデン鋼 (JIS : SCM822), 欧州ニッケルクロモリブデン鋼 (EN : 18CrNiMo7-6) の3種類であり, 表1にそれらの成分を示す。表2にはローラの製作条件および表記名を示す。3種類の鋼材を図1に示す直径60 mmの試験ローラと相手ローラの形状に機械加工した後, 浸炭焼入れ焼戻しと研削仕上げを施した。ローラの表記名として, 表2に示す表記名の前に試験ローラにはT, 相手ローラにはMを付けた。

なお, ローラにおける浸炭の有効硬化層深さ (550 HV 以上) が2 mm 程度となるように, 3種類の鋼材に対して表2に示す浸炭処理条件を用いた。ここで本研究では, 試験ローラと相手ローラのヤング率を206 GPa とし, ポアソン比を0.30 とした。

Table 1 Chemical components of materials

Material	wt%								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SNCM420*	0.21	0.20	0.60	0.020	0.003	0.08	1.70	0.52	0.23
SCM822*	0.23	0.21	0.81	0.009	0.013	0.11	0.06	1.07	0.35
18CrNiMo7-6**	0.18	0.22	0.56	0.015	0.012	N/A	1.50	1.63	0.25

*: JIS G 4053 : 2008 **: EN 10084 : 2008

Table 2 Manufacturing conditions of rollers

Specimen		SNCM	SCM	CNM
Material		SNCM420*	SCM822*	18CrNiMo7-6**
Machining		Turning		
Heat treatment		Case hardening		
Case hardening	Temperature	1223 K		
	Time	15.0 h	18.5 h	16.5 h
	Carbon potential	1.45	1.40	1.50
Quenching		1123 K x 0.5 h, Oil cooling		
Tempering		503 K x 3.5 h, Air cooling		
Finishing		Grinding		

*: JIS G 4053 : 2008 **: EN 10084 : 2008

Fig.1 Shapes and dimensions of test roller pair

2・2 ローラの性状

図2に試験ローラの硬さ分布を示し、図3に相手ローラの硬さ分布を示す。マイクロビッカース硬度計（フューチャテック製FM-7D）を使用し、ローラ軸断面においてローラ円周面からの深さ z ごとにダイヤモンド圧子の押込み荷重0.98 N（100 gf）、押込み時間30 secの条件で硬さ測定を行った。これらの図より、試験ローラおよび相手ローラのそれぞれにおいて、3種類のローラの硬さ分布はほぼ同じであることが確認できる。なお、浸炭の有効硬化層深さは、試験ローラで2.0 mm～2.3 mmであり、相手ローラで1.9 mm～2.0 mmであった。

図4に試験ローラ円周面における表面写真と粗さ曲線を示す。表面写真は走査型レーザ顕微鏡（オリンパス製OLS1200）によって撮影されたものであり、粗さ曲線は触針式表面粗さ測定機（ミツトヨ製SV-524）を用いてローラ円周面をローラ軸方向に測定して得られたものである。本研究で使用した試験ローラと相手ローラの両ローラに研削仕上げを施したため、ローラ円周方向の研削痕を確認することができ、いずれのローラにおいても同様の粗さ曲線であった。

Fig.2 Hardness distributions of test rollers

Fig.3 Hardness distributions of mating rollers

Fig.4 Surface photographs and roughness curves of test rollers

Table 3 Surface properties of test roller pairs

Specimen	T-SNCM	M-SNCM	T-SCM	M-SCM	T-CNM	M-CNM
HV	678	675	705	699	677	675
ECD mm	2.0	1.9	2.3	1.9	2.1	2.0
$(\sigma_x)_r$ MPa	-149	-370	-157	-355	-176	-303
$(\sigma_y)_r$ MPa	-317	-570	-270	-524	-251	-527
Ra μm	0.32	0.26	0.36	0.37	0.46	0.46
Rz μm	3.19	2.86	3.08	3.33	3.49	3.83

表3に試験ローラと相手ローラの表面硬さ、浸炭の有効硬化層深さ(ECD)、表面残留応力、表面粗さを示す。ここで表面硬さは、各ローラにおける深さ $z=25\text{ }\mu\text{m}\sim 1.0\text{ mm}$ の硬さ分布を外挿して求めた深さ $z=0.0\text{ mm}$ に対する硬さであり、浸炭の有効硬化層深さは、硬さ分布の550 HVに対する深さ z である。また表面残留応力の測定は、X線回折装置(リガク製 RINT2000)により CrK α 線を用いて $2\theta-\sin^2\psi$ 法(The Society of Materials Science, 1982)で行った。表中の $(\sigma_x)_r$ は、ローラ円周面におけるローラ軸方向の表面残留応力であり、 $(\sigma_y)_r$ は、ローラ円周面におけるローラ円周方向の表面残留応力である。表中の Ra と Rz は、粗さ曲線を測定した触針式表面粗さ測定機によって得られ、それぞれローラ円周面におけるローラ軸方向の算術平均粗さと最大高さ粗さである。

表3より、試験ローラと相手ローラで表面残留応力の違いが少しみられたが、これはローラ形状による影響が現れたと考えられる。一方、3種類の鋼材による表面残留応力の違いはみられなかった。また、図2と図3の硬さ分布ならびに図4の粗さ曲線で示したように、表面硬さと表面粗さは、すべてのローラではほぼ同じであった。

3. 試験方法と試験結果

3・1 疲労試験方法

本研究では、ばね負荷式二円筒滑り転がり疲労試験機(Zhang, et al., 2004)を使用し、試験ローラを低速側、相手ローラを高速側としてローラの転がり疲労試験を行った。表4にローラの滑り転がり疲労試験条件を示す。負荷の基準には、試験ローラと相手ローラ間におけるヘルツの最大接触応力 $p_{\max}$ (Johnson, 1987)を用いた。また、ローラの転がり疲労試験に使用した潤滑油は、ISO VG68 相当のギヤ油であり、その性状を表5に示す。試験ローラ対へ給油量 1500 mL/min で圧力給油を行い、油温は $313\pm 4\text{ K}$ に制御した。

後述するが、本研究のローラの転がり疲労試験は $p_{\max}=2100\text{ MPa}\sim 2750\text{ MPa}$ で行われ、D.Dowson の式(Dowson, 1967-1968)より求めた試験ローラ対の理論最小油膜厚さ $h_{\min}$ は $0.9\text{ }\mu\text{m}$ であった。また、P.H.Dawson が定義した D 値(Dawson, 1965-1966)は本研究で用いたすべての試験ローラ対において $D>1$ であった。

本研究では、ローラ円周面に発生した大きな損傷により異常振動が発生し、振動感受スイッチによって試験機が自動停止したときの試験ローラ繰返し数を疲労寿命 N_f とした。

Table 4 Rolling contact fatigue test condition of test roller

Rotational speed of slower roller	1432 rpm
Circumferential velocity of slower roller	4.50 m/s
Rotational speed of faster roller	1800 rpm
Circumferential velocity of faster roller	5.65 m/s
Specific sliding of slower roller	-25.7 %
Specific sliding of faster roller	+20.4 %
Sliding velocity	1.15 m/s

Table 5 Property of lubricating oil

		Gear oil
Specific gravity	288/277K	0.867
Flash point	K	531
Kinematic viscosity	313K	68.00
$\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$	373K	9.26
Viscosity index		112

3・2 ローラの損傷形態

図5に転がり疲労試験で損傷が発生した試験ローラの円周面写真と軸直角断面写真を示す。本研究で用いたすべての試験ローラの損傷形態は、表面き裂発生に起因するピッチング損傷であり、転がり疲労試験においてローラ円周面に直径 3 mm 程度の大きさのピッチング損傷が発生した。図5の軸直角断面写真で示すようにローラ円

周面で発生したき裂がローラ円周面下を転がり方向に進展し、ローラ円周面付近がはく離して最終的な表面損傷に至った。各試験ローラの損傷深さの最大値は約 0.5 mm～0.8 mm であり、浸炭の有効硬化層深さの範囲内であった。本研究の範囲内では、3 種類の鋼材や負荷条件によってローラの損傷形態に違いはみられなかった。

Fig.5 Observations of failed test rollers

3・3 ローラの疲労寿命

図 6 に転がり疲労試験で得られた試験ローラの $p_{\max}$ – N_f 線図を示す。図中の矢印は、試験ローラ繰返し数が 2.0×10^7 に達するまでにローラに損傷が発生しなかったことを表す。また図中の直線は、転がり疲労試験で得られた各試験ローラのプロットを最小自乗法で近似したものである。

ここで比較対象として、過去に同じ二円筒滑り転がり疲労試験機で実施した有効硬化層深さ 0.7 mm の浸炭硬化ローラの結果(Seki, et al., 2011)を◎のプロットで示し、その表記名を ECD0.7 とする。この試験ローラはクロムモリブデン鋼 (JIS : SCM420) で製作され、形状は図 1 とほぼ同じであるが、本研究で用いた試験ローラのローラ軸方向における接触幅が 3 mm であるのに対し、ECD0.7 は 4 mm であった。図 7 に ECD0.7 の硬さ分布を示し、表 6 に ECD0.7 の表面性状を示す。ECD0.7 の硬さ分布と表面性状の測定方法は、本研究で使用したローラの場合と同じである。ECD0.7 の表面圧縮残留応力は、有効硬化層深さ 2 mm 程度の T-SCM より小さいが、ECD0.7 の深さ $z=0.1$ mm において $(\sigma_x)_r=-179$ MPa, $(\sigma_y)_r=-259$ MPa であり、T-SCM と同等の圧縮残留応力を有することを確認している。また、ECD0.7 の損傷形態も本研究で用いた試験ローラと同様に、表面き裂発生に起因するピッチング損傷であり、その大きさはローラ円周面で直径 4 mm 程度であった。なお、ECD0.7 の損傷深さの最大値は約 0.5 mm～1.0 mm であり、浸炭の有効硬化層深さより深い位置においてもき裂が進展する場合があった。

図 6 より、各試験ローラの近似直線の傾きはほぼ同じであったが、本研究で用いた 3 種類の試験ローラの中で、T-SNCM の疲労寿命が最も長く、T-SCM と T-CNM の疲労寿命はほぼ同じであった。ここで、著者の過去の研究 (Yoshida, et al., 2006)では、Ni 含有率が多く、表面付近の硬さが小さい焼結歯車や粉末鍛造歯車の疲労強度は、Ni 含有率が少なく、表面付近の硬さが大きい歯車の疲労強度とほぼ同程度となり、Ni によるじん性の効果があることを示した。このことから、本研究では T-SNCM の Ni 含有率が 1.70 %であり、T-SCM の 0.06 %, T-CNM の 1.50 %より多かったため、Ni によるじん性の効果によって T-SNCM の疲労寿命が最も長くなったと考えられる。一方、Ni 含有率が 1.50 %と高かった T-CNM は、S 含有率が 0.012 %であり、T-SNCM の S 含有率 0.003 %より高いことから、MnS の介在物を形成したと推測した。鋼材によっては疲労試験における破壊起点のほとんどが MnS の介

在物となることを示した研究報告(村上, 宇宿, 1989)がある. したがって, MnS の介在物の悪影響により T-CNM の疲労寿命は T-SNCM より短くなった可能性がある.

Fig.6 $p_{\max}$ - N_f curves of test rollers

Fig.7 Hardness distributions of test rollers

Table 6 Surface properties of case-hardened roller ECD0.7

Specimen	HV	ECD mm	$(\sigma_x)_r$ MPa	$(\sigma_y)_r$ MPa	Ra μm	Rz μm
ECD0.7	789	0.7	-122	-71	0.40	3.27

Fig.8 Relationships between surface durability and effective case-hardened depth of test rollers

3・4 ローラの面圧強さ

本研究では, 疲労寿命 $N_f=2.0 \times 10^7$ に対するヘルツの最大接触応力 $p_{\max}$ を試験ローラの疲労強度, すなわち面圧強さ $(p_{\max})_{\text{lim}}$ とした. 図 8 に各試験ローラの $(p_{\max})_{\text{lim}}$ と浸炭の有効硬化層深さの関係を示す. ECD0.7 と比べ, 本研

究で用いた試験ローラの $(p_{\max})_{\lim}$ がかなり大きく、本研究の範囲内では T-SNCM の $(p_{\max})_{\lim}$ が最も大きかった。表 3 と表 6 で示したように ECD0.7 の表面硬さは試験ローラより大きく、表面硬さ以外の表面性状は同様である。ピッチング損傷の場合、表面硬さが大きくなると、表面粗さに対する敏感性が高く、応力集中が発生しやすくなり、面圧強さが低下する場合がある(鈴木他, 1999)。しかしながら、表面硬さが大きい ECD0.7 が、表面硬さが小さい試験ローラに比べ、面圧強さで約 200 MPa も低くなっているのは、高硬度での応力集中だけでなく、浸炭の有効硬化層深さの違いが面圧強さに大きく影響していると考えられる。図 8 より、浸炭の有効硬化層深さ 0.7 mm と 2 mm 程度で比較すると、有効硬化層深さが深くなれば、ローラの面圧強さが大きくなる傾向がみられた。

3・5 応力振幅による評価

前述のように本研究で使用した試験ローラの損傷形態は、表面き裂発生に起因するピッチング損傷であったことから、前報(Seki, et al., 2007)と同様に垂直応力 σ_y を用い、各ヘルツ応力 $p_{\max}$ に対する試験ローラの振幅最大値 $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ を求めた。図 9 に $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}-N_f$ 線図を示す。この図は、図 6 の縦軸の $p_{\max}$ を $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ に置き換えたものである。また $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ は、ローラ円周面において最大となる垂直応力 σ_y の振幅 $A(\sigma_y)$ を表面硬さ HV で除して、硬さで無次元化したものである。これにより、鋼の強さが硬さに比例するという仮定の下、表面硬さ以外の損傷発生因子の影響を明確化することが可能となる(Fujita and Yoshida, 1979)。

図 9 より、本研究で用いた 3 種類の試験ローラと ECD0.7 の近似直線の差が図 6 の場合に比べて広がっている。この差は表面硬さ以外の影響が現れていることを示しており、3 種類の試験ローラと ECD0.7 では表面残留応力や表面粗さに大差がなかったことから、浸炭の有効硬化層深さの影響が現れていると考えられる。また、3 種類の試験ローラの中で T-SNCM の $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ が最も大きくなっているのは、前述の通り Ni によるじん性の効果ならびに介在物 MnS の形成因子である S 低減の効果が現れていると考えられる。

Fig.9 $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}-N_f$ curves of test rollers

Fig.10 Relationships between maximum amplitude and effective case-hardened depth of test rollers

図 9 で得られる疲労寿命 $N_f=2.0 \times 10^7$ に対する各試験ローラの $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ と浸炭の有効硬化層深さの関係を図 10 に示す。各試験ローラの表面硬さの影響を除外して考えても、浸炭の有効硬化層深さが深くなると試験ロー

ラの $[A(\alpha/\sqrt{3}HV)]_{\max}$ が大きくなる傾向がみられることから、本研究の範囲内では、ローラの面圧強さに浸炭の有効硬化層深さが大きく影響したと言える。特に本研究において、浸炭の有効硬化層深さ 2 mm 程度の試験ローラでは有効硬化層深さの範囲内でき裂が進展したのに対し、有効硬化層深さ 0.7 mm の試験ローラでは有効硬化層深さより深い位置でき裂が進展する場合があったことから、ローラの疲労強度に及ぼす浸炭の有効硬化層深さの影響が顕著に現れたと考えられる。

浸炭硬化鋼の滑り転がり疲労において、低い負荷条件では表面起点型のピッチング損傷が発生しやすく、高い負荷条件では内部起点型のスポーリング損傷が発生しやすい傾向にある。すなわち高い負荷条件において、表面起点型のピッチング損傷に対する疲労強度に比べ、内部起点型のスポーリング損傷に対する疲労強度は小さい(鈴木他, 1999)。しかし、本研究で用いた試験ローラの形状は、図 1 で示したようにローラ円周面からの深さ z が深くなるほどローラ軸方向の幅が大きくなっており、内部での応力が集中しにくく、内部起点型のスポーリング損傷が発生しにくい条件となっている。したがって、本研究で用いた試験ローラでは表面起点型のピッチング損傷に対する疲労強度より内部起点型のスポーリング損傷に対する疲労強度が大きいため、本研究の比較的高い負荷条件においても表面起点型のピッチング損傷が発生したと考えられる。

ここで、ねじり疲労においては、き裂が表面起点の場合、硬化層深さが深いほど疲労強度が増加し、表面硬さだけでなく、硬化層深さも大きく影響することが明らかになっている(越智他, 1999)。その原因として、ねじり疲労過程でミクロな塑性変形が表層から内部へ広がり、材質劣化があるレベルまで達したときにき裂が発生すると推察されている。滑り転がり疲労とねじり疲労では疲労の種類が異なるが、滑り転がり疲労においても表面起点型のピッチング損傷が発生する場合、表面硬さだけでなく、硬さ分布も疲労強度に影響を及ぼしていると考えられる。特に本研究では、浸炭の有効硬化層深さが 0.7 mm と 2 mm 程度で大きく異なり、各ローラの最大の損傷深さにおいて、有効硬化層深さ 0.7 mm のローラより 2 mm 程度のローラの硬さが大きくなっている。したがって、有効硬化層深さが 2 mm 程度の浸炭硬化ローラは、有効硬化層深さ 0.7 mm の浸炭硬化ローラに比べ、疲労寿命や面圧強さが増加する結果になったと言える。

以上の結果、有効硬化層深さが 2 mm 程度の浸炭硬化ローラは、有効硬化層深さ 0.7 mm の浸炭硬化ローラに比べ、疲労寿命が長くなるとともに、面圧強さが大きくなった。したがって、浸炭の有効硬化層深さがローラの疲労寿命や面圧強さに大きく影響することが確認できた。一方、本研究の範囲内では、浸炭の有効硬化層深さがほぼ同じであっても、Ni によるじん性の効果や S 低減の効果によって疲労寿命や面圧強さが増加すると考えられる。

4. 結 言

本研究では、ニッケルクロムモリブデン鋼、クロムモリブデン鋼、欧州ニッケルクロムモリブデン鋼を用いて 2 mm の有効硬化層深さを有する浸炭硬化ローラを製作し、その転がり疲労試験を実施した。そして、浸炭硬化ローラの疲労寿命に及ぼす 3 種類の鋼材ならびに浸炭の有効硬化層深さの影響を考察した。その結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) ニッケルクロムモリブデン鋼、クロムモリブデン鋼、欧州ニッケルクロムモリブデン鋼で製作した有効硬化層深さ 2 mm 程度の浸炭硬化ローラの表面性状はほぼ同じであり、ローラの転がり疲労試験での損傷形態は、いずれも表面き裂発生に起因するピッチング損傷であった。
- (2) 有効硬化層深さ 2 mm 程度の浸炭硬化ローラで比較すると、Ni によるじん性の効果や S 低減の効果によって、ニッケルクロムモリブデン鋼製の浸炭硬化ローラの疲労寿命や面圧強さが他の浸炭硬化ローラより増加した。
- (3) 有効硬化層深さ 0.7 mm の浸炭硬化ローラの表面性状や損傷形態は、有効硬化層深さ 2 mm 程度の浸炭硬化ローラと同じであったが、疲労寿命や面圧強さについては有効硬化層深さ 2 mm 程度の浸炭硬化ローラが優れていた。
- (4) 本研究の範囲内では、浸炭硬化ローラの表面硬さを除外して考えても、浸炭の有効硬化層深さが深くなると浸炭硬化ローラの面圧強さが大きくなる傾向を確認した。

謝 辞

最後に本研究で使用した治具や観察試料の製作にご尽力いただいた岡山大学工学部 萩原和彦技術職員に心よりお礼を申し上げます。

文 献

- Dawson, P.H., Further experiments on the effect of metallic rolling surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.180, Part.3B (1965–1966), pp.95–100.
- Dowson, D., *Elastohydrodynamics*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.182, Part.3A (1967–1968), pp.151–167.
- Fujita, K., Yoshida, A., Yamamoto, T. and Yamada, T., The surface durability of the case-hardened nickel chromium steel and its optimum case depth, *Bulletin of the JSME*, Vol.20, No.140 (1977), pp.232–239.
- Fujita, K. and Yoshida, A., Surface failure of soft and surface-hardened steel rollers in rolling contact, *Wear*, Vol.55, No.1 (1979), pp.27–39.
- Johnson, K.L., *Contact Mechanics* (1987), p.84, Cambridge University Press.
- 村上敬宜, 宇宿尚史, 介在物寸法の統計的評価とそれに基づく高硬さ鋼の疲労限度の予測, *日本機械学会論文集*, A 編, Vol.55, No.510 (1989), pp.213–221.
- 越智達朗, 蟹澤秀雄, 渡邊忠雄, 高周波焼入れシャフト材の振り疲労き裂の発生寿命・破断寿命に及ぼす硬さ分布の影響, *鉄と鋼*, Vol.85, No.12 (1999), pp.898–904.
- Seki, M., Yoshida, A., Ohue, Y., Hongo, T., Kawamura, T. and Shimoyama, I., Influence of shot peening on surface durability of case-hardened steel gears, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.1, No.4 (2007), pp.518–529.
- Seki, M., Fujii, M., Kobayashi, Y., Sato, M. and Yoshida, A., Surface durability of powder-forged roller treated by shot peening, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.24 (2010), pp.141–144.
- Seki, M., Wang, L., Nagai, Y., Kobayashi, Y., Gowa, D., Kinoshita, H. and Fujii, M., Rolling contact fatigue evaluation of shot-peened case-hardened steel with a thrust washer testing machine and a roller testing machine, *Proceedings of International Tribology Conference Hiroshima 2011* (2011), p.G–05.
- Seki, M., Soyama, H., Kobayashi, Y., Gowa, D. and Fujii, M., Rolling contact fatigue life of steel rollers treated by cavitation peening and shot peening, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.6, No.6 (2012), pp.478–486.
- 鈴木智博, 小川一義, 堀田昇次, 浸炭鋼のピッチング疲労強度に及ぼす硬化層硬さの影響, *日本機械学会論文集*, C 編, Vol.65, No.637 (1999), pp.3758–3764.
- The Society of Materials Science, *Standard Method for X-Ray Stress Measurement* (1982), p.4, The Society of Materials Science.
- Tobie, T., Oster, P. and Höhn, B.R., Systematic investigations on the influence of case depth on the pitting and bending strength of case carburized gears, *Gear Technology*, Vol.July/August 2005 (2005), pp.40–48.
- Yoshida, A., Seki, M., Ohue, Y. and Sato, M., Fatigue strength of sintered and powder-forged gears with different green density and nickel content, *Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions ICMT2006*, Vol.2 (2006), pp.890–895.
- Zhang, Q., Seki, M., Ohue, Y., Yoshida, A., Murakami, M., Sato, M. and Konishi, M., Study on surface durability of powder-forged rollers with case-hardening, *JSME International Journal, Series C*, Vol.47, No.3 (2004), pp.925–932.

References

- Dawson, P.H., Further experiments on the effect of metallic rolling surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.180, Part.3B (1965–1966), pp.95–100.
- Dowson, D., *Elastohydrodynamics*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.182, Part.3A (1967–1968), pp.151–167.
- Fujita, K., Yoshida, A., Yamamoto, T. and Yamada, T., The surface durability of the case-hardened nickel chromium steel and its optimum case depth, *Bulletin of the JSME*, Vol.20, No.140 (1977), pp.232–239.
- Fujita, K. and Yoshida, A., Surface failure of soft and surface-hardened steel rollers in rolling contact, *Wear*, Vol.55, No.1 (1979), pp.27–39.

- Johnson, K.L., Contact Mechanics (1987), p.84, Cambridge University Press.
- Murakami, Y. and Usuki, H., Prediction of fatigue strength of high-strength steels based on statistical evaluation of inclusion size, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.55, No.510 (1989), pp.213–221 (in Japanese).
- Ochi, T., Kanisawa, H. and Watanabe, T., Effect of hardness distribution on crack initiation life and fracture life of induction hardened steels for automotive shafts, Tetsu-to-Hagane, Vol.85, No.12 (1999), pp.898–904 (in Japanese).
- Seki, M., Yoshida, A., Ohue, Y., Hongo, T., Kawamura, T. and Shimoyama, I., Influence of shot peening on surface durability of case-hardened steel gears, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.1, No.4 (2007), pp.518–529.
- Seki, M., Fujii, M., Kobayashi, Y., Sato, M. and Yoshida, A., Surface durability of powder-forged roller treated by shot peening, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.24 (2010), pp.141–144.
- Seki, M., Wang, L., Nagai, Y., Kobayashi, Y., Gowa, D., Kinoshita, H. and Fujii, M., Rolling contact fatigue evaluation of shot-peened case-hardened steel with a thrust washer testing machine and a roller testing machine, Proceedings of International Tribology Conference Hiroshima 2011 (2011), p.G–05.
- Seki, M., Soyama, H., Kobayashi, Y., Gowa, D. and Fujii, M., Rolling contact fatigue life of steel rollers treated by cavitation peening and shot peening, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.6, No.6 (2012), pp.478–486.
- Suzuki, T., Ogawa, K. and Hotta, S., Influence of case hardness on pitting fatigue strength of carburized steel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.65, No.637 (1999), pp.3758–3764 (in Japanese).
- The Society of Materials Science, Standard Method for X-Ray Stress Measurement (1982), p.4, The Society of Materials Science.
- Tobie, T., Oster, P. and Höhn, B.R., Systematic investigations on the influence of case depth on the pitting and bending strength of case carburized gears, Gear Technology, Vol.July/August 2005 (2005), pp.40–48.
- Yoshida, A., Seki, M., Ohue, Y. and Sato, M., Fatigue strength of sintered and powder-forged gears with different green density and nickel content, Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions ICMT2006, Vol.2 (2006), pp.890–895.
- Zhang, Q., Seki, M., Ohue, Y., Yoshida, A., Murakami, M., Sato, M. and Konishi, M., Study on surface durability of powder-forged rollers with case-hardening, JSME International Journal, Series C, Vol.47, No.3 (2004), pp.925–932.