浸炭材のピッチング疲労強度に及ぼすすべり条件の影響[†]

牧 野 泰 三^{*} 堀 本 雅 之^{**} 松 本 齊^{**}

Effect of Slip Condition on the Contact Fatigue Strength for Pitting of the Carburized Steel

by

Taizo MAKINO^{*}, Masayuki HORIMOTO^{**} and Hitoshi MATSUMOTO^{**}

The objective of the present paper is to clarify the effect of slip condition, ie. slip ratio, outer surface velocity, and lubrication oil temperature on the contact fatigue strength for pitting (pitting strength) of the carburized steel. Rolling contact fatigue (RCF) tests were conducted on 26mm diameter specimens made of carburized steel under oil lubrication. Then, slip ratio, outer surface velocity, and lubrication oil temperature as the slip condition were changed on the RCF tests. As a result, pitting strength decreased with the increase of slip ratio, the decrease of outer surface velocity, and the decrease of lubrication oil temperature. Furthermore, relationships between the above-mentioned three parameters, friction coefficient, and contact surface temperature were evaluated. Then slip ratio, outer surface velocity, and lubrication oil temperature influenced to friction coefficient and contact surface temperature. The friction coefficient slightly decreased when contact surface temperature increased. Lastly, it was found that the friction coefficient was main parameter which directly determines the pitting strength.

Key words : Rolling contact fatigue (RCF), Slip condition, Pitting, Carburized steel, Friction coefficient, Lubrication oil temperature, Contact surface temperature

1 緒 言

歯車歯面に生じる損傷形態としてピッチングが挙げられる。ピッチングは、油潤滑下で転がり接触にともなう繰返し応力の作用により発生し、すべり条件によりその発生限度が大きく変化することが知られている。^{1)~3)}

実際の歯車では、かみあいにともないすべり率および面圧が変化するのに対し、ピッチングを再現するために用いられる2円筒転がり接触タイプの試験機では、すべり率と面圧は、試験を開始してからピッチングが発生して終了するまで、通常一定である。したがって、実際の歯車歯面のピッチングに関する疲労限度（以下、ピッチング強度と呼ぶ）を定量的に評価するには、種々のすべり条件下のピッチング強度を把握しておく必要がある。ピッチング強度に及ぼすすべり条件の影響としては、これまで、すべり率、接触面温度等の特定因子の影響を扱った例^{4)~6)}は多数あるが、すべり率、周速、および潤滑油温度の影響を総合的に評価した検討は少ない。

そこで、本研究では、浸炭材を対象として、ピッチング強度に及ぼすすべり率、周速、および潤滑油温度等のすべり条件の影響を明らかにすることを目的とし、油潤滑による種々のすべり条件下で転がり接触疲労試験を行った。

2 供試材、試験片、および試験方法

2・1 供試材

供試材はJIS SCM822を若干改良した成分系の低合金鋼⁷⁾である。Table Iに化学成分を示す。この鋼片を鍛

Table I. Chemical composition.

[mass %]				
C	Si	Mn	Cr	Mo
0.21	0.10	0.78	1.02	0.41

伸し、1523Kから空冷の溶体化処理、続いて1198Kから空冷の焼準処理を行った。そして、粗機械加工、Fig. 1に示すパターンの浸炭焼入れ・焼もどし処理、仕上げ加工を行い、試験片を得た。

2・2 試験片

Fig. 2に、試験片形状を示す。試験片は、ピッチングを発生させる小ローラーと、その相手材である大ローラーから構成される。両者はともに同じ供試材から製作されているが、小ローラーの接触面（中央φ26mmの外周部）は浸炭後黒皮ままであるのに対し、大ローラーの接触面（外周部）は浸炭後ペーパー研磨して黒皮を除去している。Fig. 2中には、小ローラーと大ローラーの接触状況も示している。これより、小ローラーと大ローラーが幅

Fig. 1. Pattern of carburized treatment.

[†] 原稿受理 平成 15 年 2 月 10 日 Received Feb. 10, 2003

^{*} 正 会 員 (株)住友金属小倉 〒802-8686 北九州市小倉北区許斐町, Sumitomo Metals (Kokura), Ltd., Kokurakita-ku, Kitakyushu, 802-8686

^{**} (株)住友金属小倉 〒802-8686 北九州市小倉北区許斐町, Sumitomo Metals (Kokura), Ltd., Kokurakita-ku, Kitakyushu, 802-8686

Fig. 2. Configuration of test specimens.

7mmで線接触していることがわかる。なお、小ローラー、大ローラー接触面の表面粗さは R_{max} で $0.64 \sim 2.61 \mu m$ 、 R_a で $0.10 \sim 0.27 \mu m$ であった。

Fig. 3に小ローラー接触面下のビッカース硬さ分布を示す。表面硬さはHV650～700、有効硬化層深さ（HV500以上の範囲）は約1mmとなっている。Fig. 4に小ローラー接触面下のX線残留応力分布を示す。ここで、残留応力の方向は円周方向である。Fig. 4より、表面に $-200 \sim -350 \text{ MPa}$ の圧縮残留応力が生じていることがわかる。Fig. 5に、試験片横断面のマイクロ組織の光学顕

Fig. 3. Vickers hardness distribution.

Fig. 4. X-ray residual stress distribution.

Fig. 5. Micro structure on cross section of small roller.

微鏡写真を示す。表面近傍では高炭素の焼もどしマルテンサイト、内部では低炭素の焼もどしマルテンサイトベイナイトの混合組織となっている。また、表面直下に浸炭まま黒皮の表面性状に起因した深さ $10 \mu m$ 程度の不完全焼入れ組織が生じている。

2・3 試験方法

試験機には、2円筒転がり接触型疲労試験機（コマツエンジニアリング製）を用いた。Fig. 6に、本試験機の構造の模式図を示す。図からわかるように、小ローラーと大ローラーが転がり接触する構造となっている。試験片の押付け荷重は、大ローラー側に取付けた負荷レバーに載荷した重錘重量で設定している。小ローラー、大ローラー間のすべりは、それぞれの回転軸に取り付けた歯車の歯数比によって調整している。また、試験中、小ローラーと大ローラーの接触部に、設定温度に制御した潤滑油を 2 l/min 噴射している。潤滑油の種類は、自動車オートマチックトランスミッション用オイルである。

試験では、小ローラーの累積回転数（以後、繰返し数と呼ぶ）で、 1×10^7 を打ち切り繰返し数としている。試験途中で、ピッチングが発生した場合、負荷レバー上に取り付けた振動センサーで感知して、試験を自動停止させている。なお、試験前に繰返し数で約 3×10^4 回、無負荷によるならし運転を行っている。

試験条件としては、すべり率で $40 \sim 160\%$ 、潤滑油温度（以下、単に油温と呼ぶ）で $313, 353 \text{ K}$ の2段階、小ローラーの周速（ V_s ）で $0.41, 1.36 \text{ m/s}$ の2段階をパラメータとして採用している。ここで、すべり率（ S_r ）の定義を次式に示す。

$$S_r = (V_L - V_s) / V_s \quad (1)$$

Fig. 6. Schematic illustration for testing apparatus.

Table II. Test conditions.

Outer surface velocity of small roller V_s [m/s]		1.36	1.36	0.41
Oil temperature [K]		353	313	313
Slip ratio S_r [%]	40	X	X	—
	80	X	X	X
	120	X	—	—
	160	X	X	—

X : tested, — : not tested

ここで、 V_L : 大ローラー周速、 V_s : 小ローラーの周速
Table IIに、各パラメータについて、試験を行った組合せを示している。

3 試験結果

3・1 損傷形態とS-N線図

試験では、ピッチングのほか、焼付き、スコアリング等の損傷が生じた。Fig. 7に、試験で生じた損傷の代表例の外観写真を示す。大部分のピッチングは、図中 (a) に示す、矢じり型き裂を起点としたはく離をともなう性状であった。ただし、ピッチングと分類した中の一部で、図中 (b) に示す形状のはく離（ここではスクエア型と呼ぶ）が観察された。スクエア型では、外観だけでなく、表面下のき裂の進展形態も矢じり型と異なる。詳細は、後の4・3節で述べる。一方、焼付きは、図中 (c) に示すように、円周方向にすべりにともなう無数の傷をともなう性状であった。また、スコアリングは、図中 (d) に示すように、小ローラー接触面全面の著大な摩耗と多数のはく離をともなう性状であった。ここで、著大な摩耗とは、深さにして0.03～0.1mmのレベルである。ちなみにピッチングが生じた試験片では、接触面の深さ（摩耗または変形による）は、0.01mm以下であった。以下

Fig. 7. Outer view of typical failure on small roller.

では、スコアリングは焼付きと同様、潤滑不良に起因した損傷として扱うこととした。

Fig. 8に、試験で得られたS-N線図を示す。図の (a) と (b) は油温で区分しており、図中のプロット点はすべり率および周速で区分している。さらに、スコアリングまたは焼付きが生じたプロット点には「/」を付記している。本図より、ピッチング強度として、ピッチングが発生しない最大のヘルツ応力と、焼付き限度として、焼付きまたはスコアリングが発生する最小のヘルツ応力を求めた。その結果の一覧をTable IIIに示す。

Fig. 8とTable IIIより、高すべり率で焼付きが生じやすくなることがわかる。このため、すべり率120%以上では、ピッチングより焼付きが先に発生するために、ピッチング強度が明らかにならなかった。また、油温353K、す

Fig. 8. S-N diagrams.

Table III. List of fatigue limit.

V_s [m/s]	Slip ratio [%]	Oil temp. 353K		Oil temp. 313K	
		Pitting strength [MPa]	Lubrication failure limit [MPa]	Pitting strength [MPa]	Lubrication failure limit [MPa]
1.36	40	2500	—	2400	—
	80	2100	2300	2100	—
	120	—	—	>1900	2000
	160	>1300	1400	>1600	1700
0.41	80	—	—	1800	—

べり率 80% の条件では、ヘルツ応力が高い領域でスコリング、ヘルツ応力が低い領域でピッチングという2つの形態の損傷が発生した。

3・2 すべり率の影響

Fig. 9 に、ピッチング強度と焼付き限度に及ぼすすべり率の影響を整理して示す。これより、油温 353K, 313K の両方で、すべり率の増加とともにピッチング強度、焼付き限度とも低下することがわかる。また、ピッチング強度の線と焼付き限度の線は、すべり率の増加とともに近接し、すべり率 80% と 160% の間で交差することがわかる。

3・3 油温および周速の影響

Fig. 10 に、ピッチング強度と焼付き限度に及ぼす油温と周速の影響を整理して示す。これより、ピッチング強度は油温とともに若干上昇するが、焼付き限度は低下することがわかる。すなわち、油温を下げると、焼付きを抑制することができる。これは、潤滑油の粘度・油膜厚さの増加に起因していると推定される。さらに、Fig. 10 よりピッチング強度は、周速の増加とともに上昇することがわかる。これらの理由については後で考察する。

4 考 察

4・1 ピッチング強度の摩擦係数および接触面温度による整理

第3章の試験結果を考察するため、小ローラー軸のトルクから摩擦係数を、小ローラー接触面表面に取り付

けた接触式熱電対（安立計器製）から接触面温度を測定した。ここで、熱電対は小ローラーが大ローラーと接触した後、3/4 周回った位置に取り付けている。このため、接触面の真の温度より若干低めの温度を計測していることになる。ただし、接触時と温度測定時の時間差は、高々、周速 1.36m/s で 0.045sec、周速 0.41m/s で 0.149 sec のレベルである。一方、摩擦係数 μ は、小ローラー軸のトルク T から、次式に示すように、接線力を押付け荷重で除すことによって算出している。

$$\mu = T / (r \cdot P) \quad (2)$$

ここで、 r ：小ローラー半径 (13mm)、 P ：押付け荷重
試験条件は、Table III に示した周速、油温、すべり率の組合せで、ピッチング強度と同じレベルのヘルツ応力とした。摩擦係数、接触面温度ともに、測定用に用意した試験片を用い、試験開始後 500sec から 2000sec までを周波数 4Hz でサンプリングしたデータを平均している。なお、予め別条件で長時間（繰返し数にして 5×10^5 ）、同様の測定を行い、上記短時間の測定でほぼ同じ測定結果が得られることを確認している。

Table IV に、測定の結果得られた摩擦係数と接触面温度の一覧を示す。Table IV のデータを用いて、ピッチング強度と摩擦係数との関係を整理した。Fig. 11 にその結果を示す。これより、ピッチング強度は、周速、油温、すべり率の組合せによらず、摩擦係数の増加とともに線形的に低下する 1 本の線で整理できることがわかる。

Fig. 11 中のプロット点では、摩擦係数とともに、接触面温度が Table IV に示すようにそれぞれ異なる。にもかかわらず、上記のように摩擦係数のみで整理できることは、接触面温度の影響が比較的小さいことを意味している。Fig. 12 に、小ローラー接触面から切り出した試料を焼もどした時の表面硬さの変化を示す。図中には、Table IV に示した接触面温度の範囲も示している。これより、試験での接触面温度は、小ローラー表面層が焼もどし軟化する領域よりかなり低い領域にあることがわかる。前述したように、接触面温度の測定値は、接触時と測定時の時間差から、真の温度より低めになるものの、試験後の硬さの低下も見られなかったことから、接触面の温度上昇による軟化は起こっていないと推定される。

Fig. 9. Effect of slip ratio.

Fig. 10. Effect of oil temperature and outer surface velocity.

Table IV. List of the friction coefficient and contact surface temperature.

Outer surface velocity [m/s]	Oil temp. [K]	Slip ratio S_r [%]	Hertzian stress [MPa]	Friction coefficient μ	Contact surface temperature [K]
1.36	353	40	2500	0.029	392
		80	2100	0.045	404
		160	1300	0.075	383
	313	40	2400	0.029	362
		80	2100	0.050	377
		120	1900	0.060	374
0.41	313	80	1800	0.066	336

Fig. 11. Relationship between pitting strength and friction coefficient.

Fig. 12. Change of Vickers hardness due to tempering temperature.

このため、接触面温度はピッチング強度にほとんど影響しなかったと考えられる。

4・2 摩擦係数の支配因子

4・1節で摩擦係数がピッチング強度を決定する重要なパラメータであることが判明したが、ここでは摩擦係数がどのような因子に支配されているかを明らかにするため、Table IVよりさらに網羅的な条件で摩擦係数と接触面温度を測定した。

Fig. 13に、摩擦係数と接触面温度との関係を示す。これより、摩擦係数は接触面温度の上昇にともない若干低

Fig. 13. Relationship between friction coefficient and contact surface temperature.

下する。ただし、摩擦係数のレベルはすべり率と周速によって異なる。図中の同じ種類のプロット点群で接触面温度が異なるのは、面圧が変化しているためである。すなわち、面圧は、摩擦係数に直接影響するのではなく、接触面温度を介して間接的に影響している。3・2節で油温の上昇によりピッチング強度が若干上昇したのは、油温上昇により接触面温度が上昇し、摩擦係数が低下したためと推定される。

Fig. 13中の接触面温度 373Kでの摩擦係数に着目して、すべり率との関係を整理した結果を、Fig. 14に示す。これより、摩擦係数は、接触面温度一定としても、すべり率の増加とともに上昇することがわかる。この傾向は過去の文献と異なる。一般に、摩擦係数は、すべり率の増加とともに上昇するが、あるすべり率を超えると飽和または漸減する傾向を示す^{3), 4), 8)}これに対し、本研究の試験条件では、Dowson-Higginsonの式⁹⁾によるEHL最小油膜厚さが $0.08 \sim 0.20 \mu\text{m}$ であり、表面粗さ R_{max} をこの油膜厚さで除したD値は、5以上となるため、十分な油膜厚さが確保できていないと推定される。また、試験中に表面粗さは若干減少するが、それでも上記油膜厚さより十分大きく、D値にして3以上であることを確認している。したがって、微視的には小ローラーと大ローラー

Fig. 14. Relationship between friction coefficient at 373K and slip ratio.

の間で金属接触が粗さの突起単位で生じることから、すべり率の増加とともに摩擦係数が上昇したと考えられる。

さらに、Fig. 14 より、摩擦係数は、同じすべり率でも周速の増加とともに減少し、その減少幅はすべり率の増加とともに増大していることがわかる。3・3 節で周速の増加によりピッチング強度が上昇したのは、周速増加により摩擦係数が低下したためと推定される。

4・3 表面下のき裂の進展形態

3・1 節でピッチング損傷として、矢じり型き裂起点とスクエア型の2形態が観察されることを述べた。そこで、この損傷の断面にて表面下のき裂の進展形態を観察した。

Fig. 15 に、ピッチングを生じた試験片の軸方向に垂直な断面の光学顕微鏡写真を示す。図中 (a) は矢じり型き裂起点のピッチングの断面、(b) は (a) と同じ試験片に観察された浅いき裂の拡大写真、(c) はスクエア型ピッチングの断面、(d) は (c) と同じ試験片に観察されたき裂の拡大写真である。図中(a)より、矢じり型き裂起点のピッチングでは、表面から斜めにき裂が進展し、ある深さで分岐している。この進展形態より、き裂面内の油圧作用によって Mode I 主体でき裂が進展したと推定される。¹⁰⁾ 図中 (b) より、はく離に至っていない浅いき裂でも表面に接していることがわかる。摩擦係数は接触面のせん断応力および接触面通過前後の円周方向応力の変動量を増大させる⁹⁾ため、表面が起点であると考えれば、Fig. 11 に示したようにピッチング強度が摩擦係数に大きく影響されていることが理解できる。Fig. 15 の (c) より、スクエア型のピッチングでは、き裂はほぼ円周方向に平行に進展しており、深さ方向には進展していないことがわかる。また図中(d)より、はく離に至っていない内部き裂が、深さ 0.2 ~ 0.3mm に生じていることがわかる。この深さは、ヘルツ理論による接触半幅の 1/2 に対応していることから、内部のせん断応力の繰返しに起因して、き裂が発生し、Mode II 主体で進展し、はく離に至ったと考えられる。通常、このような内部起点のスクエア型ピッチングは、すべりの無い条件で観察される。⁴⁾ しかしながら、本

研究では、すべり率 40% および 80% で散見された。これは、内部起点の場合、介在物等のばらつきを多く含む因子が支配因子となり、ピッチング強度自体もばらつきが大きくなったためと考えられる。

5 結 言

浸炭材を対象として、ピッチング強度に及ぼすすべり率、周速、および潤滑油温度等のすべり条件の影響を明らかにすることを目的とし、油潤滑による種々のすべり条件下で転がり接触疲労試験を行った。その結果、以下のことがわかった。

(1) 発生したピッチングの性状は矢じり型き裂を起点とした形態が主体であったが、一部に、き裂が表面下で円周方向に平行に進展してはく離した、スクエア型の形態も観察された。

(2) 油温の上昇、すべり率の増加にともない、ピッチングに代わって、焼付き、またはスコアリングが発生しやすくなる。

(3) すべり率の増加とともにピッチングに関する疲労限度（ピッチング強度）、焼付き限度とも低下する。

(4) ピッチング強度は油温とともに若干上昇するが、焼付き限度は低下する。

(5) ピッチング強度は、周速の増加とともに上昇する。

(6) 上記 (3) から (5) の結果は、摩擦係数によって一元的に整理できる。すなわち、ピッチング強度は、周速、油温、すべり率によらず、摩擦係数の増加とともに線形的に低下する。

(7) 上記 (6) の結果は、接触面温度の影響が、摩擦係数と比較して相対的に小さいことを意味している。ただし、接触面温度は、摩擦係数に影響することで、間接的にピッチング強度に影響している。

参 考 文 献

- 1) 成瀬長太郎, 機械の研究, **45**-10, 39 (1993).
- 2) 石橋 彰, 吉野英弘, 中島 巖, 日本機械学会論文集 (第3部), **42**, 2207 (1976).
- 3) 赤岡 純, 似内昭夫, 潤滑, **27**, 268 (1982).
- 4) 鈴木智博, 小川一義, 堀田昇次, 横川光義, 日本機械学会論文集, **C-65**, 3751 (1999).
- 5) 森本精洋, 松本鉄一, 武田晴之, 材料, **50**, 1323 (2001).
- 6) 木南俊哉, 中村貞行, CAMP-ISIJ, **10**, 472 (1997).
- 7) 黒川八寿男, 鎌田芳彦, 西田和彦, 村井暢宏, 住友金属, **48**, 204 (1996).
- 8) 三由 久, 高田 潤, 機械技術研究所所報, **26**-5, 17 (1972).
- 9) 山本雄二, 兼田楨宏, “トライボロジー”, p.119 (1998) 理工学社.
- 10) 村上敬宜, 栄 中, 市丸和徳, 森田健敬, 日本機械学会論文集, **C-62**, 683 (1996).

Fig. 15. Cross section view of pitting and cracks.