

潤滑供給方法ならびにしゅう動条件がマイクロピッチングに与える影響

Effect of sliding conditions and oil supply methods on micropitting

理科大・工, Rtec-Instruments 株式会社 (正) *國井 卓人 理科大・工 (正) 佐藤 魁星

理科大・工 (学) 福田 柊弥 理科大 (正) 佐々木 信也

Takuto Kunii**, Kaisei Sato*, Toya Fukuda*, Shinya Sasaki*

*Tokyo University of Science, **Rtec-Instruments K.K.

1. 緒言

急速なモータリゼーションに伴う排気ガス排出量の増加は、大気汚染や地球温暖化など様々な環境問題を引き起こしてきた。これらの課題を解決するべく、自動車業界では、二酸化炭素を排出するエンジン車に代わり、環境負荷を大きく削減できる可能性のある電気自動車(Electric vehicle, EV)の普及が世界的に加速している 1)。EV の更なる高効率化には、モータの小型化が重要であり、出力トルクを維持するため、モータの高速回転化が求められている。しかし、モータの高速回転化に伴って、単位時間当たりにおける減速機歯車歯面の接触回数が増加することから、疲労寿命の向上が求められる 2)。また、高速回転化に伴い、遠心力による潤滑油の飛散や油温の上昇による潤滑油の粘度低下が貧潤滑を引き起こし、金属同士の直接接触が増加することで、しゅう動条件はより過酷になると考えられる。そのため、摺動面の信頼確保のため、潤滑油の供給方法の検討が行われている。

油の循環を用いた潤滑方法には、油浴潤滑や強制潤滑がある。油浴潤滑は軸受や歯車を潤滑油に一部浸漬させ、かき上げることでしゅう動面に供給する給油法である。強制潤滑はオイルタンク、ポンプ、ろ過器、油温管理装置、配管系をもつ強制潤滑方式で潤滑油が絶えず供給される給油法である。特に、厳しいしゅう動条件下では、給油量や給油温度が高精度でコントロール可能であり、高い冷却効果を発揮する強制潤滑が有用である。しかしながら、潤滑方法が疲労摩耗に及ぼす影響についての知見は少ない。

本研究では、潤滑方法の違いが疲労摩耗に及ぼす影響を調査するため、マイクロピッチング摩耗試験機 (MPT-3000, Rtec-Instruments, US) を用いて、油浴潤滑ならびに強制潤滑で転がり疲労摩擦試験を行った。また、引き込み速度を変化させた転がり疲労摩擦試験を行うことで、潤滑方法や引き込み速度が疲労摩耗の発生に及ぼす影響を調査した。

2. 実験概要

2・1 四円筒摩擦試験機を用いた転がり疲労摩擦試験

転がり疲労摩擦試験には、三点接触形式での摩擦試験が可能な四円筒摩擦試験機を用いた。リング試験片およびローラ試験片の材質は歯車鋼の SCM420 であり、潤滑油には市販の E-axle 用潤滑油 (e-TRANSAXLE FLUID TE, TOYOTA, JP) を用いた。

2・2 油浴潤滑と強制潤滑による疲労試験

潤滑方法は油浴潤滑と強制潤滑の 2 種類とし、転がりすべり条件で疲労試験を行った。すべり率 (Slide-roll-ratio, SRR) の負号は中心ローラの周速が外側リングの周速よりも遅いことを意味する。Table 1 に試験条件を、Fig. 1(a) に油浴潤滑、Fig. 1(b) に強制潤滑の概略図を示す。強制潤滑では、電動駆動連続型ギアポンプ (ACM-II-1, LUBE, JP) を用いた。ギアポンプからシリコンチューブを介して、四円筒摩擦試験機に挿入された真鍮製のチューブからローラに直接潤滑油を滴下する仕組みとなっている。

2・3 引き込み速度を変化させた疲労試験

疲労試験において、潤滑方法は強制潤滑、引き込み速度は 4000, 5000, 6000 mm/s の 3 種類、試験時間は 2・1 の接触回数に合わせて 1.32×10^6 回になるように設定した。Table 2 に試験条件を、Fig. 1 (c) に強制潤滑の概略図を示す。条件、概略図の通りローラとリングの径を変更させることで、より高速の引き込み速度に対応できるように変更している。

2・4 疲労試験後の表面形状観察

白色干渉計 (UP-3000, Rtec-Instruments, US) を用いてローラ表面画像を 4 か所ずつ取得した。さらに解析ソフト (Mountains Map, Digital Surf, FR) を用いて平面化处理を行い、粗さの計測ならびにピッチング深さ、疲労損傷面積 (Damaged Area Percentage, DAP) の算出を行った。平均面から 1 μm の深さをしきい値として二値化を行い、DAP を算出した。

2・5 疲労試験後の断面形状観察

試験片内部の微細構造ならびに損傷を調査するため、ローラをワイヤ放電加工機 (AG400L, Sodick, JP) により切断し

た．樹脂で包埋した後に研磨およびエッチングを行い，試験片断面の凹凸や不純物を取り除いた．走査電子顕微鏡（TM3030Plus, Hitachi High-Tech, JP）でクラックおよびマイクロピッチングが発生した箇所の断面画像を取得した．

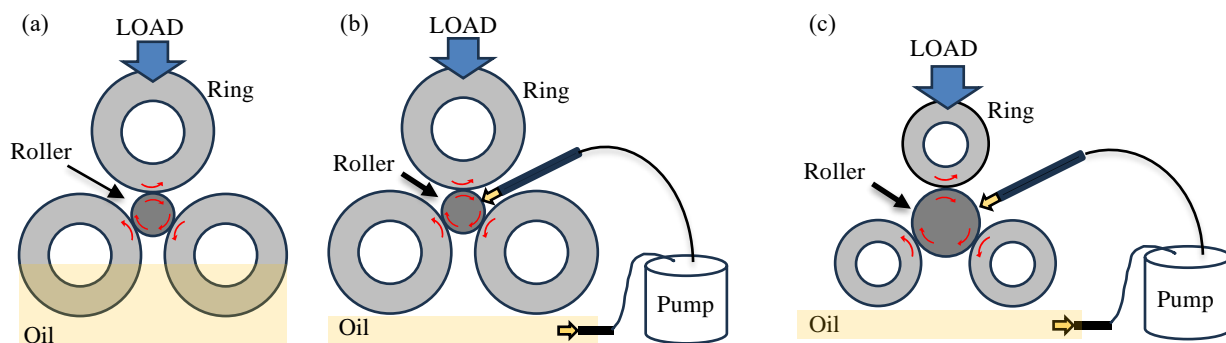


Fig. 1 Schematic diagram of MPT-3000
(a)Dip-feed lubrication, (b)Forced-feed lubrication, (c)Forced-feed Lubrication (>4000 mm/s)

Table 1 Test conditions with different lubrication method

Load		[N]	1203, 1638
Maximum Hertzian pressure		[GPa]	3.0, 3.5
Lubricant temperature		[°C]	60
Lubricant volume	Dip-feed lubrication	[mL]	100
	Forced-feed lubrication	[mL/s]	1
Entrainment speed		[mm/s]	3000
Slide-roll-ratio (SRR)		[%]	-0.5 -2.0 -5.0
Test duration		[min]	90
Contact cycle		[$\times 10^6$]	1.32
Test Specimens Diameter	Outside Ring	[mm]	54.25
	Center Roller	[mm]	12
Hardness		[HV]	790
Surface roughness (Roller, Sq)		[μm]	0.8
Surface roughness (Ring, Sq)		[μm]	2

Table 2 Test conditions with different entrainment speed

Load		[N]	1910
Maximum Hertzian pressure		[GPa]	3.0
Lubricant temperature		[°C]	60
Lubricant volume		[mL/s]	1
Entrainment speed and Test duration			4000
			135
			5000
			108
			6000
Slide-roll-ratio (SRR)			90
			-0.5
			-2.0
Contact cycle			-5.0
			1.32
			42.25
Test Specimens Diameter	Outside Ring	[mm]	24
	Center Roller	[mm]	790
Hardness		[HV]	790
Surface roughness (Roller, Sq)		[μm]	0.8
Surface roughness (Ring, Sq)		[μm]	2

3. 実験結果

3・1 油浴潤滑と強制潤滑による疲労試験

Fig. 2 に二値化後のローラ表面画像を, Fig. 3 に発生したクラックの断面画像を示す. 油浴潤滑の二値化画像から, SRR が高い条件ほどピッチング発生面積と対応する黒色部の面積が大きくなることが観察され, SRR の増加に伴いピッチングの発生が増加したと考えられる. また, 潤滑方法に着目すると, 全ての条件で油浴潤滑よりも強制潤滑のほうが, マイクロピッチングの発生が少ないことが確認された. また, 断面観察から, 強制潤滑のクラックは油浴潤滑に比べて約 0.4 倍の長さ, 約 0.6 倍の角度であった. さらに, SRR が-0.5%から-5.0%に増加すると, 潤滑方法にかかわらず, クラックの長さは約 1.2 倍, 角度は 1.6 倍に進展する結果になった.

3・2 引き込み速度を変化させた疲労試験

Fig. 4 に発生したクラックの断面画像を引き込み速度別で示す. 引き込み速度 4000 ~ 6000 mm/s の速度帯ではクラックの挙動に変化はないものの, SRR が-0.5%から-5.0%に増加すると, クラックの長さは約 1.9 倍, 角度は約 2.3 倍に進展する傾向が確認された. Fig. 5 に各 SRR における DAP 値, Fig. 6 に各引き込み速度における DAP 値のグラフを示す. この結果から, 引き込み速度を変化させた場合においても DAP 値は大きく変化しないことが確認され, SRR が増加するとともに DAP が増加することが分かる. 強制潤滑においてこの試験での速度範囲内においては少なくとも引き込み速度は支配的ではなく, SRR が DAP の増加に支配的であったと考えられる.

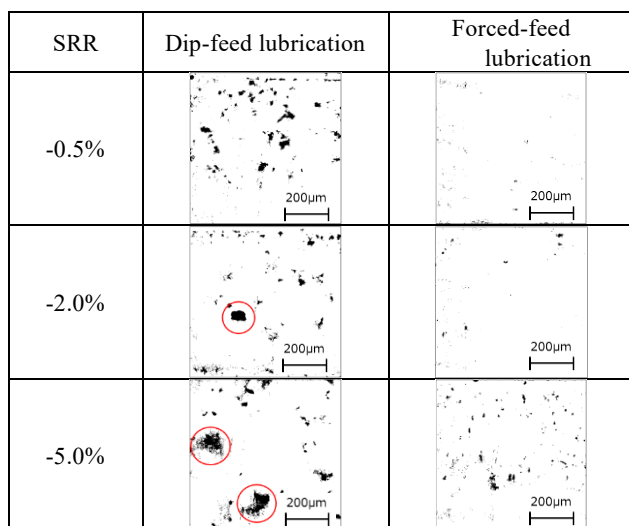


Fig. 2 Binarized image

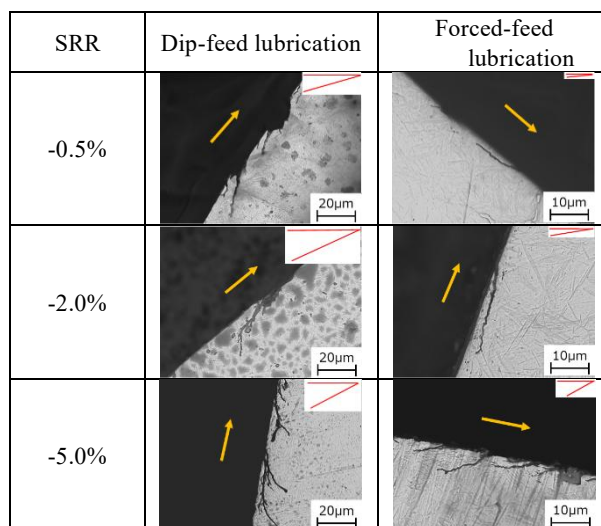


Fig. 3 Image of cross section of different lubrication method test

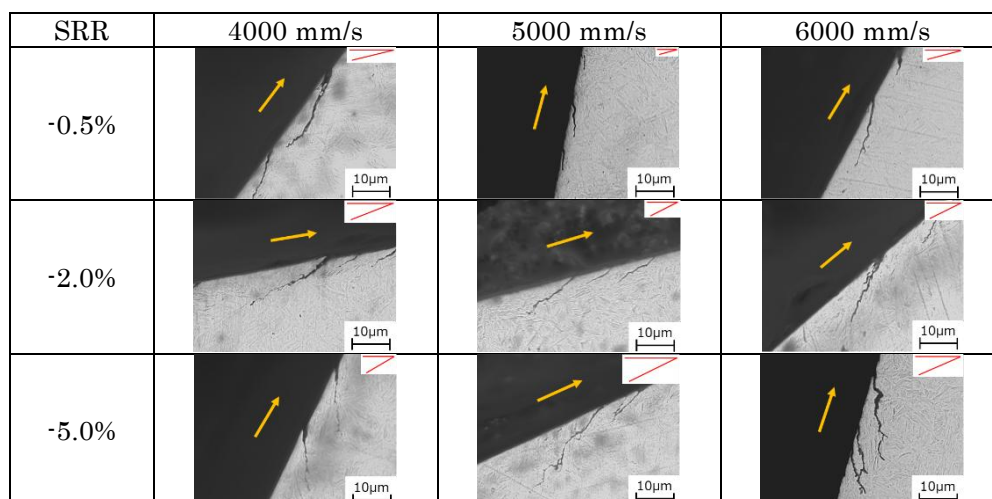


Fig. 4 Image of cross section of different entrainment speed test

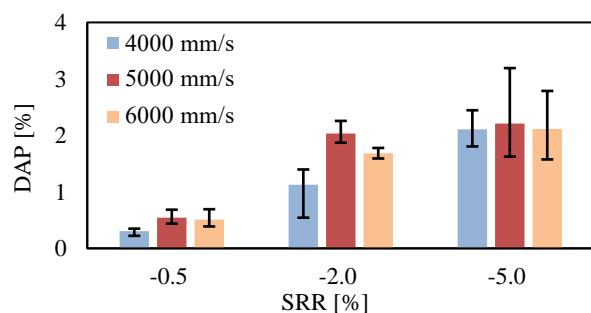


Fig. 5 Damage area percentage of different SRR

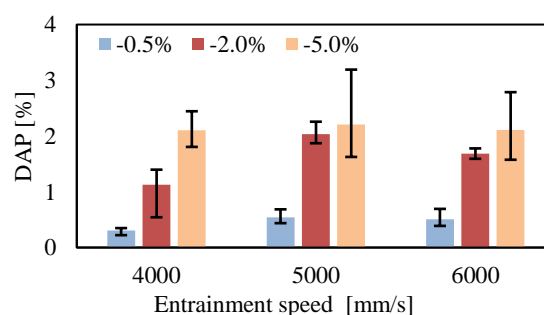


Fig. 6 Damage area percentage of different entrainment speed test

4. 考察

Fig. 7 に油浴潤滑と強制潤滑による疲労試験の DAP を示す。本試験において、油浴潤滑よりも強制潤滑の方が疲労損傷を抑制し、摩擦係数も低いことが確認された。これは高圧・高速回転の条件下でも潤滑油がしゅう動面に十分に供給され油膜が形成されたためと考えられる。一方、油浴潤滑では高速回転に伴う遠心力の影響で潤滑油がしゅう動面から離散しやすく、油膜が薄く不均一なことで潤滑性能が低下したと考えられる。強制潤滑では十分な潤滑油供給は摩擦熱による油槽中の温度上昇を防ぎしゅう動面の冷却効果が作用していたとも考えられ、油浴潤滑よりも摩擦発熱を抑えられるとともにしゅう動面に安定した油膜が形成されたことで、クラックやマイクロピッチングの発生が抑制されたと考えられる。

引き込み速度を高速化した 4000 ～ 6000 mm/s の速度帯の試験では、一般的に引き込み速度の増加に伴い遠心力が増加しオイルが飛散しやすくなると考えられるものの、今回の実験結果では引き込み速度の増加に伴い DAP 値の大きな変化が確認されなかったことから、オイルの飛散が DAP に与える影響は小さかったものと考えられる。Fig. 8 に、Dowson-Higginson の式を用いて算出した試験終了時の膜厚比 Λ を示す。算出した膜厚比 Λ は、引き込み速度増加に伴い増加する。このことから、遠心力による飛散と油膜厚さの増加がトレードオフになったことで、DAP 値が一定になったものと考えられる。また、SRR の増加に伴う疲労摩耗の増加は先行研究でも示されているように、接線力の増加が支配的な要因であると考えられる 3)。Fig. 9 に摩擦係数と DAP の相関を示す。Fig. 9 より本試験でも先行研究と同様に、SRR の増加に伴い摩擦係数が増加する傾向が確認された。以上より、強制潤滑は油膜厚さを安定的に形成する効果を発現し、高速回転条件下で疲労損傷を低減できる潤滑方法と考えられるとともに、摩擦係数の増加は DAP の増加を促進するものと考えられる。

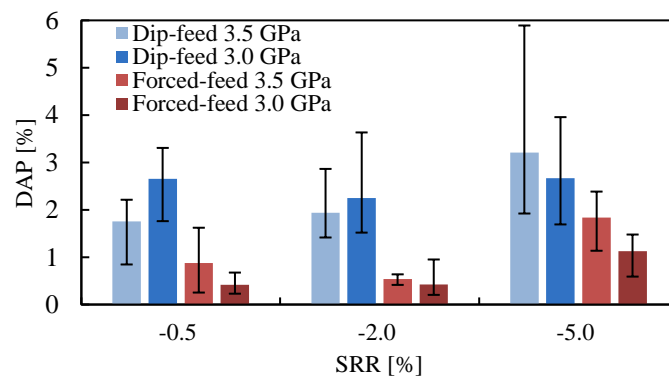


Fig. 7 Damage area percentage of different lubrication method test

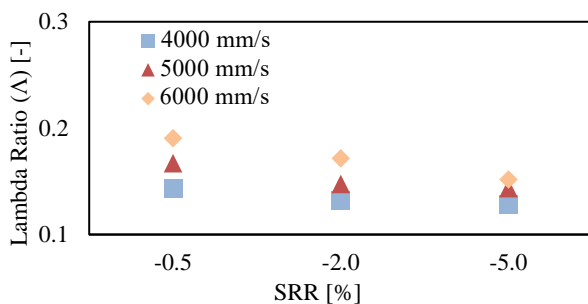


Fig. 8 Film thickness ratio of different SRR

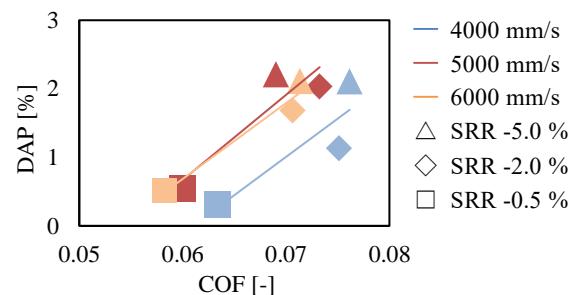


Fig. 9 Regression line between COF and DAP of different entrainment speed test

5. 結言

潤滑方法の違いが疲労摩耗に及ぼす影響を調査するため、四円筒摩擦試験機 (MPT-3000, Rtec-Instruments, US) を用いて、油浴潤滑ならびに強制潤滑で転がり疲労摩擦試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 強制潤滑は油浴潤滑と比較して各 SRR において疲労摩耗を低減した
- (2) SRR 値の増加は、クラック長さと進展角度に増加をもたらした。
- (3) 強制潤滑下における 4～6 m/s の引き込み速度域では、引き込み速度の増加に伴う、疲労摩耗の増加は確認されなかった。これは、十分な潤滑油が摩擦面に供給されたためと考えられる。

6. 文献

- 1) 呉睿, “電気自動車の普及による環境への影響”, 国際・都市社会文化研究, (2020), pp. 137-142.
- 2) 板垣浩文, “電気自動車駆動用モータの高速化に資するトラクションドライブ技術”, トライボロジスト, Vol.165, No.3, (2020), pp. 132-139.
- 3) 橋本和弥, 洲上太一, 鍵恵介, 梅沢修, “SCM420 浸炭鋼の高面圧下におけるすべりを伴う転がり疲労過程”, 鉄と鋼, Vol. 108, No. 1, (2022), pp. 76-87