

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月16日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560153

研究課題名（和文） 転がり接触面端部および微小転動体の塑性変形進行を考慮した転動疲労現象の解明

研究課題名（英文） Effect of Local Contact Pressure Considered Plastic Deformation at Contact End and under Micro Size Contact Condition on Rolling Contact Fatigue

研究代表者

松本 将（MATSUMOTO SUSUMU）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40367173

研究成果の概要（和文）：歯車や転がり軸受の転がり接触面の耐久性向上のために、特に端部接触と微小曲率半径接触部に塑性変形が生じる場合の転動疲労現象を明らかにした。(1)塑性変形を伴う線接触片当り端部の転動疲労寿命は、接触領域全面をローラ幅とした接触応力の大きさで決まる。(2)転動疲労ピットの起点になる初期のマクロピットは、接触領域内の最小油膜厚さ位置に生じる。(3)転動体サイズの影響は、接触面が油膜で分離されない場合は認められないが、油膜分離される場合は影響がある。すなわち、応力体積の影響は油膜非分離のときのみ考慮すれば良い。以上の結果より、塑性変形を伴う条件下で歯車や転がり軸受を使用できる場合があることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：For the improvement of rolling fatigue durability of gears and rolling bearings, the effects of plastic deformation under the local high contact pressure due to end contact or micro size contact on rolling fatigue were explained. (1)The rolling fatigue limit at contact end is depended on the contact width after plastic deformation. (2)The position of rolling fatigue pit initiation is the minimum oil film thickness zone under mixed lubrication condition. (3)Rolling fatigue limit is not influenced by contact size and stress volume under the mixed lubrication condition. The design concept for rolling contact surfaces under plastic contact condition is explained based on the results as above.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 平成21年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 平成22年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 平成23年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：工学・機械工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素、トライボロジー、転がり接触面、転動疲労

1. 研究開始当初の背景

各種機械の小型高出力化に対応して、転がり接触面を有する機械要素（歯車、転がり軸受、トラクションドライブ、カムなど）の使用限界向上と信頼性向上のニーズが高まっ

ている。転動面の使用限界を向上させるには、転動要素本来のサイズをフル活用し、要素端部（エッジ部）まで有効に接触させることが理想である。しかし片当りやシャープエッジ（小曲率半径）により接触面端部に塑性変形を

伴うような大きな局所接触圧力が生じ、端部の転動疲労ピットを起点として要素が使用不能になる事例も珍しくない。その理由は、塑性変形を伴う転がり接触面端部や小サイズ転動面の転動疲労現象が未解明なため、端部形状や寸法などの適切な設計ができないためである。国際競争力のある機械要素の創出のために、損傷発生メカニズムの解明と定量的な設計データの取得が強く求められている。

2. 研究の目的

転がり接触面の片当りや端部接触による塑性変形進行で接触圧力と潤滑油膜厚さの分布が変化する場合の転動疲労ピット発生位置の特定、および端部特有の微小曲率半径を考慮した転動疲労設計手法の研究は実施されていない。そこで、次の3項目の解決を目的とした。

1) 塑性変形が進行する場合の転動疲労発生位置と発生限界の解明

事前検討で、塑性変形を伴う転がり接触面端部の転動疲労ピットは必ずしも初期形状の端部には生じず、塑性変形後形状による接触圧力と潤滑油膜形成状態で決まる接触部内側に生じることが確認された。特に、転動疲労ピットが片当たり端部に集中しない理由が、端部接触領域の塑性変形の影響かどうかを解明して行く。そのために、円筒片当り条件での転動疲労試験で実施する。

2) 転動疲労発生位置と最大接触圧力位置と最大油膜圧力位置関係の解明

従来の転動疲労設計は潤滑油膜を考慮しない最大接触圧力は基準となっている。しかし接触端部のように接触圧力と油膜圧力の分布が異なる3次元接触での接触面内の転動疲労の発生起点位置は解明されていない。初期接触痕部で表面起点型転動疲労の源となる初期き裂が生じる可能性が大きい、これまで確認されたことがない。初期転動疲労ピットの発生位置と油膜厚さ分布、油膜を考慮しない接触圧力分布、接触領域内のすべり率分布などの各種分布との対応を明らかにし、転動疲労損傷の発生メカニズム解明を目的にした。

3) 転動疲労発生限界に及ぼす微小相対曲率半径の影響の解明

接触面端部の局所接触圧力が大きくなる主要因は端部の相対曲率半径が小さくなるためである。接触端部と中央部を仕分ける設計を行うためには、相対曲率半径の大小が転動疲労損傷形態と寿命に及ぼす影響を明らかにする必要がある。転がり軸受の転動疲労設計コンセプトは、図1に示すように弾性接触幅と転動に伴う内部せん断応力が最大となる深さで決まる応力体積が小さい方が材料欠陥の数が少ないため損傷発生確率が小

さく、転動疲労寿命が長くなるとされている。しかし、相対曲率半径が0.1mm~1.0mmの微小サイズの転動疲労に関する実証データがない。本現象は転動面が潤滑油膜で分離されるかどうかで傾向が変わると推定されるので、潤滑油膜形成状態をモニターしながらの実験検証を行う。

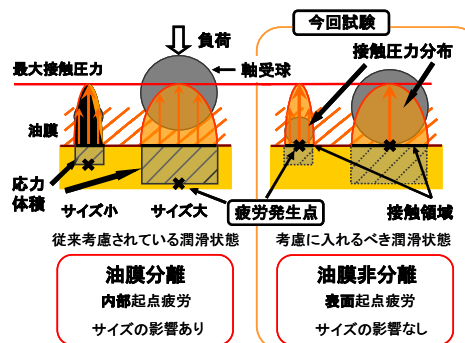


図1 潤滑状態と応力体積の関係

3. 研究の方法

1) 塑性変形が進行する場合の転動疲労発生位置と発生限界の解明

狙い：片当り条件(片当り角度0~3deg)を変えた試験ローラにより、転動疲労ピット発生位置の接触圧力(解析値)、油膜厚さ(解析値)および表面粗さと転動疲労発生条件の関係を定量化し転動疲労最弱位置を解明する。

実験装置：4ローラ式転動疲労試験機(図4)を用いる。

試験片形状：ピット発生を発生させる中央ローラの直径5mm、周囲ローラを10mm、中央ローラをテーパ形状とし、端部片当り(一方向テーパ、端部自由端)と中央部強当り(中高凸テーパ、自由端なし)とする。試験片当り角は転動要素の実状を考慮して1/100、1/1000、1/5000とする。

試験片材料：調質鋼(S45C、ビッカース硬さ約200)、軸受鋼(ビッカース硬さ約720)とする。

試験接触圧力：初期形状での強当り部が塑性変形する条件

試験時間：転動疲労ピットが5個程度発生する迄とする。

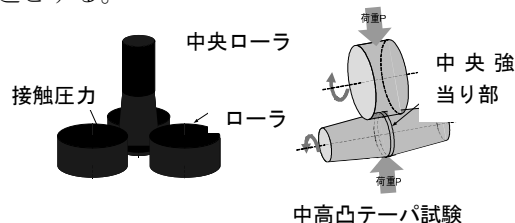


図4 テーパーローラによる片当り試験

2) 転動疲労発生位置と最大接触圧力位置と最大油膜圧力位置関係の解明

狙い：表面粗さと油膜厚さの比で決まる初

期なじみ（表面粗さレベルの摩耗と塑性変形の進行を弾性流体潤滑油膜圧力分布となじみ進行部との位置関係を明らかにする。更に初期なじみ分布とピット発生位置の関係から転動疲労に油膜圧力分布を考えない従来方法の可否を明らかにする。

実験装置：転がり・すべりなじみ試験機(図3)を使用する。

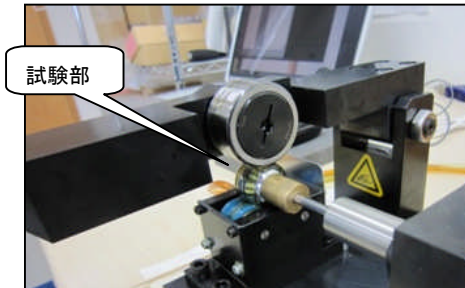


図3 転がり・すべりなじみ試験機

試験片形状：回転軸端に転がり軸受球(直径25.4mm)を固定し、ローラ(直径40mm)との純すべり、および転がり条件とする。

試験材料：ローラを軸受鋼(SUJ2、ビッカース硬さ約750)、球(軸受鋼、ビッカース硬さ約750)とする。

試験接触圧力：初期の強当たり部が塑性変形する条件および弾性接触条件とし、接触圧力は実測形状をもとに数値解析する。

試験潤滑状態：接触域の弾性流体潤滑膜厚分布を解析し、表面粗さ(最大高さ粗さ)を最小膜厚さと最大油膜厚さの中間値に設定する。解析結果と転動疲労位置の対応をつける。

3) 転動疲労発生限界に及ぼす微小相対曲率半径の影響の解明

狙い：局所接触圧力が上昇する原因となる接触部曲率半径の大きさをパラメータとし転動疲労発生限界を確認し表面起点型と内部起点型転動疲労現象への応力体積の影響を明らかにする。

実験装置：スラスト転がり軸受試験機(図4)試験片材料：転がり軸受球(SUJ2)と平面(SUJ2)を組み合わせる。

試験片形状：試験球の直径を0.1mm~5mmとし、プラスチック保持器(自製、図4右)に保持して転動試験を行う。

潤滑油膜条件：油膜分離および非分離条件とし、油膜分離状況は電気導通法で確認する。

観察データ：ピット発生状況として直径0.1mm以下のピットもカウントする。

4. 研究成果

1) 塑性変形が進行する場合の転動疲労発生位置と発生限界の解明

端部が塑性変形する場合、片当たり端部側には図5に示すように、必ずしも初期端部側に転動疲労ピットが生じず、初期接触圧力分布とは無関係であることが分かった。このこ

とは、接触面内のピット発生に対する過酷さ

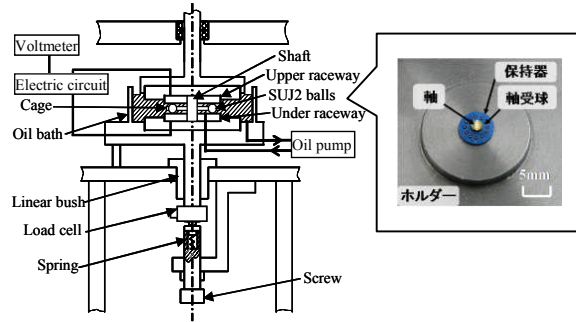


図4 微小球の転動疲労試験機

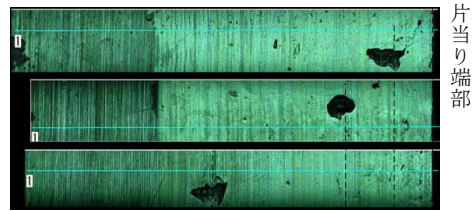


図5 片当たり端部の転動疲労ピット発生状況

がほぼ同等になったことを示している。すなわち塑性変形により端部の接触圧力が低下するとともに、端部の加工硬化(強度上昇)が生じ、接触域全体が弾性接触に変化して行くことが推定された。

そこで、転動繰返し数と片当たり端部の初期接触圧力(塑性変形を考慮しない端部弾性接触圧力)および塑性変形後の接触圧力との関係を整理してみた。同一材料を用いたにもかかわらず、初期接触圧力で整理するとピット発生データにばらつきがみられた。しかし、負荷運転とともに減少して行く接触圧力を考慮して損傷発生時の接触領域(軸方向の接触幅)を円筒の接触長さとした2円筒接触として最大接触圧力を計算してみたところ、図6(片側テーパ(カラー印)と中凸テーパ(黒印))に示すように、それぞれのデータはほぼ同一線上に分布した。ピット発生位置は広く接触領域に分布し、必ずしも初期の片当たり側に生じなかった。また片当たり端部ではない場合も、局所強当たりの接触幅で整理すると、片当りの場合とほぼ同様の限界になることが分かった。

以上のデータより、負荷運転により端部塑性変形が進行した場合は、概ね組み合わせた円筒表面の形状がフィットし、平行な線接触状態と変わらぬ転動疲労限界となることが分かった。塑性変形を伴う場合は接触領域のほぼ全域から同程度の確率で転動疲労ピットが生じる可能性が大きいことが分かった。

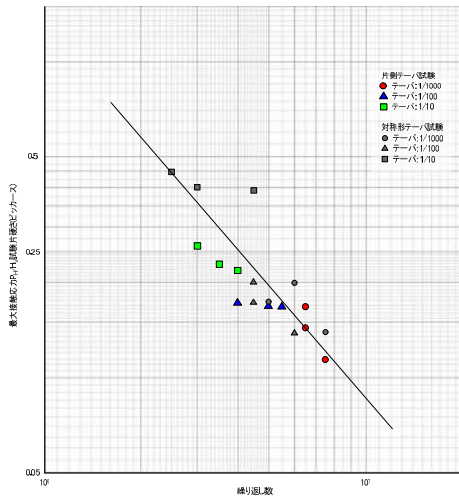


図6 片当りのピッチング発生限界

2) 転動疲労発生位置と最大接触圧力位置と最大油膜圧力位置関係の解明

球と円筒の点接触状態で潤滑油膜厚さ分布を固定するために純すべり条件で接触面の初期状態を観察した結果を図8に示す。計算した弾性流体潤滑油膜厚さが最小になる(図7の濃紺色の部分)とほぼ同じ初期接触痕が確認された。

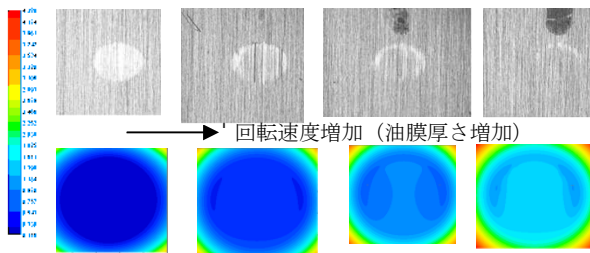


図7 油膜厚さ分布と初期接触痕形状

次に上記の接触形態を純転がりに変えて、転動疲労ピットの発生位置を確認した。結果を図8に示すが、異なる接触圧力(油膜を考慮しない)で実験を行ったが、マクロには接触領域の左右に接触線が生じた。その部分を拡大すると、マイクロピットであることが分かった。このピットは転動繰返し数の増加に伴い増加して行くことも確認できた。

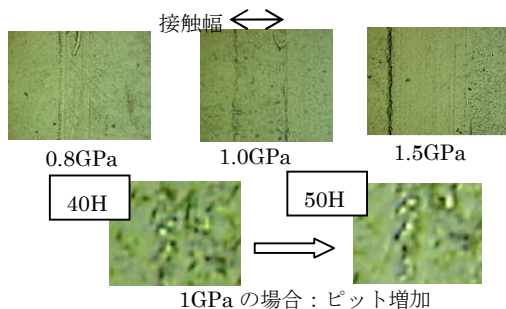


図8 ローラの接触線上のマイクロピット

接触領域では油膜厚さ分布(青色)の他に、接触圧力分布(緑色)、PV(接触圧力×相対すべり速度:朱色)などがあるので、それらの分布を図9に示す。それぞれの最過酷位置は異なるので、ピット発生位置(矢印)と対応させてみた。接触中心線からの距離で比較したところ表1のようになり、ピット発生位置は最小油膜位置と一致することが分かった。

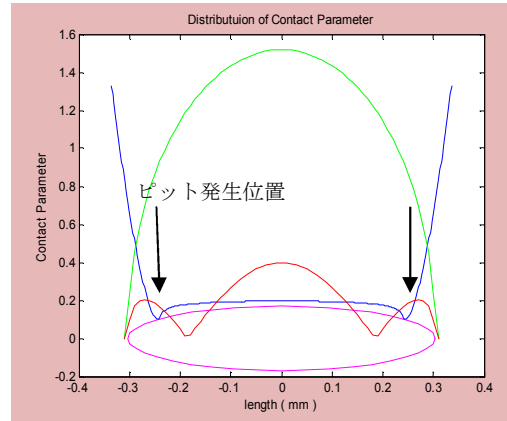


図9 接触領域内の諸因子の分布

表1 最小油膜位置とピット発生位置の関係

| 接触圧力 | 0.8GPa | 1.0GPa | 1.5GPa |
|-----------|--------|--------|--------|
| 最小油膜位置 mm | 0.34 | 0.53 | 0.60 |
| ピット位置 mm | 0.35 | 0.51 | 0.62 |

従来の転動疲労設計は、油膜を考慮しない接触圧力を基準にしてきた。本実験結果から、最初にピットが生じる位置は接触圧力最大位置ではなく、油膜厚さ最小位置であることが分かった。完全に平行な線接触では最大接触圧力が必ず最小油膜厚さ位置を通過するので見分けはつかないが、3次元接触になるとそれらの影響が異なることが分かった。これにより点接触や線接触片当りの場合は、最小油膜位置に着目した転動疲労ピット防止設計が必要であることが明らかになった。

3) 転動疲労発生限界に及ぼす微小相対曲率半径の影響の解明

標準の転がり軸受に用いられている軸受球のサイズを変えて、転動疲労ピット発生限界(10⁷回で損傷が生じない接触圧力)を比較した結果を図10、図11に示す。

図10は転動面が油膜厚さで分離されない混合潤滑状態の実験結果である。この場合、実験の範囲ではサイズの影響は生じなかった。すなわち、表面起点型の転動疲労に対しては、応力体積の影響はないことが分かった。

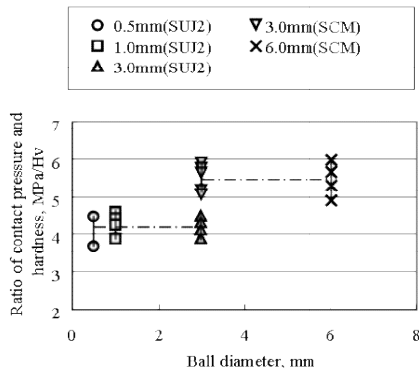


図 10 油膜非分離での球サイズの影響

図 1 1 は転動面が油膜で分離された状態での転動疲労ピット発生限界を示す。油膜非分離の状況と似たようにサイズの影響はないように見える。しかし、内部起点の転動疲労寿命を転がり軸受の動定格寿命として検討してみると、図 1 2 のようにサイズの影響があるとした定格寿命にほぼ対応する傾向が確認され、応力体積の影響が存在することが分かった。

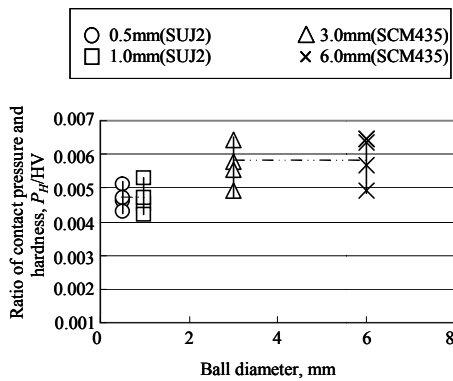


図 1 1 油膜分離での球サイズの影響

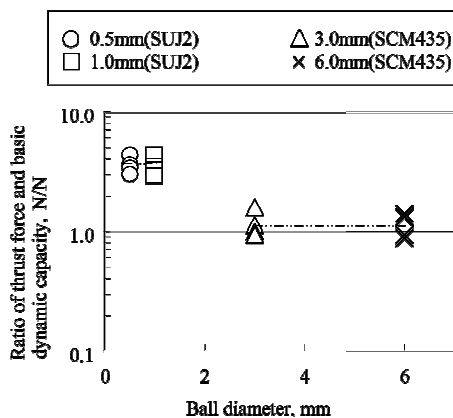


図 1 2 サイズと動定格荷重比の関係

5. まとめ

転がり接触面の片当り端部や微小転接触部に生じる転動疲労ピット発生に対する塑

性変形や相対曲率半径（サイズ）の影響を検討し、次の結果を得た。

- 1) 塑性変形を伴う線接触片当り端部の転動疲労寿命は、接触領域全面をローラ幅とした接触応力の大きさで決まる。
- 2) 転動疲労ピットの起点になる初期のマイクロピットは、接触領域内の最小油膜厚さ位置に生じる。
- 3) 転動体サイズの影響は、接触面が油膜非分離の場合は認められないが、油膜分離の場合は影響がある。すなわち、応力体積の影響は油膜非分離のときのみ考慮すれば良い。

上記の知見は、従来の歯車や転がり軸受の転動疲労設計には考慮されていない。諸結果から、新たな塑性変形が生じる大面圧での使用、接触端部の微小接触領域での転動疲労設計を定量的に行える可能性が明らかになった。

6. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- (1)混合潤滑状態にある転がりすべり接触面の摩擦係数推定式,松本將,トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌),査読有,56 巻,10 号,2011,pp.632-638
- (2)小径転動体を有する転がり軸受の転動疲労寿命に及ぼす転動体サイズと潤滑状態の影響(第 1 報)-混合潤滑状態での転動疲労寿命-安江悠好,松本將,松下貴之,トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌),査読有,56 巻,7 号,2011,pp.441-447
- (3)転動体に玉を用いたリニア軸受の潤滑状態に及ぼすグリース基油粘度の影響,大野英明,松本將,トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌),査読有,第 56 巻(第 6 号),371-377,2011 年
- (4)混合流体潤滑条件下における初期なじみに及ぼす EHL 潤滑膜厚さの影響,安江悠好,松本將,リムヤンケン,トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌),査読有,56 巻,5 号,2011,pp.312-319
- (5)シリコン粒子分散アルミニウム焼結体の含油率と潤滑特性に及ぼす成形圧力と焼結温度の影響,水流健一,松本將,材料(日本材料学会誌),査読有,59 巻,第 11 号,2010,pp.875-880
- (6)シリコン粒子分散アルミニウム焼結体の潤滑特性に及ぼす配合量と粒度の影響,水流健一,松本將,材料(日本材料学会誌),査読有,59 巻,11 号,2010,pp.869-874
- (7)スラストニードルベアリングのピッチング寿命に及ぼす潤滑油添加剤の影響,市橋俊彦,横溝真人,松本將,トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌),査読有,55 巻,2 号,2010,pp.128-135
- (8)変動プロペラ荷重を受ける船尾管軸受の油膜解析に関する研究(コンテナ船による軸心軌跡計測結果と計算値),高橋定,松本將,立石智裕,大山賢二,黒岩良太,諸星彰三,日本機械学会論文集(C 編),査読有,75 巻,759 号,2009,pp.3054-3061
- (9)ラジアルニードルベアリングのピッチング寿命に及ぼす潤滑油添加剤の影響,市橋俊彦,横溝

真人, 松本將, トライボロジスト (日本トライボロジー学会誌), 査読有, 54 巻, 6 号, 2009, pp.412-418
(10) F Z G 歯車試験でのピッチング寿命に及ぼす自動変速機用潤滑油添加剤と試験条件の影響, 市橋俊彦, 高倉豊, 松本將, トライボロジスト (日本トライボロジー学会誌), 査読有, 54 巻, 4 号, 2010, 293-299

[学会発表] (計 15 件)

(1) J. He, S. Matsumoto, New Method for Evaluation of Elastic and Plastic Deformation of Surface Roughness under Ball on Method for Evaluation of Elastic and Plastic Deformation of Surface Roughness under Ball on Plate Contact Condition, International Tribology Conference, Hiroshima2011, 査読有, 2011. 11. 3, 広島市(広島国際会議場)

(2) Y. Yasue, S. Matsumoto, T. Matsushita, Y. Yoshida, Influence of Contact Surface Size and Lubricating Condition on Rolling Fatigue Life of Rolling Contact of Contact Surface Size and Lubricating Condition on Rolling Fatigue Life of Rolling Contact Surface, International Tribology Conference, Hiroshima2011, 査読有, 2011. 11. 2, 広島市(広島国際会議場)

(3) H. Ohno, S. Matsumoto, Effect of Base Oil Viscosity of Grease on Lubricating Condition of Ball Type Linear Motion Rolling of Base Oil Viscosity of Grease on Lubricating Condition of Ball Type Linear Motion Rolling Bearing, International Tribology Conference, Hiroshima2011, 査読有, 2011. 11. 1, 広島市(広島国際会議場)

(4) T. Hou, S. Matsumoto, Effect of EHL Oil Film Thickness Distribution on the Point Contact between Roller and Ball under of EHL Oil Film Thickness Distribution on the Point Contact between Roller and Ball under Mixed Lubricating Condition, International Tribology Conference, Hiroshima2011, 査読有, 2011. 11. 1, 広島市(広島国際会議場)

(5) Toshihiko ICHIHASHI, Yutaka TAKAKURA, Susumu MATSUMOTO, INVESTIGATION OF EFFECTS OF ADDITIVE FOR ATF AND TEST CONDITION ON PITTING LIFE OF GEAR THOOTH IN THE FZG PITTING TEST, ASME/STLE 2011 International Joint Tribology Conference, 査読有, 2011. 10. 26, 米国(ワシントン)

(6) 夏溢, 侯天昊, 松本將, 転がり軸受の異物噛み込み圧痕形成の予兆検知, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 査読有, 2011. 9. 14, 東京都(東京工業大)

(7) 倪佳偉, 堀内俊宏, 松本將, 小形ギヤードモータの減速歯車の歯面ブリネリングによる異常検知手法, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 査読有, 2011. 9. 12 東京都(東京工業大)

(8) Toshihiko Ichihashi, Hiroshi Fujita, Susumu Matsumoto, The Effects of Lubricating Oil Additives on the Rolling Contact Fatigue

Strength of a Rolling Bearing for an Automatic Transmission, International Brazilian Conference on Tribology, 査読有, 2010. 10, ブラジル(リオデジャネイロ)

(9) 松本將, 混合潤滑状態にある転がり・すべり接触面の摩擦係数推定式, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議福井 2010, 査読有, 2010. 9. 14, 福井市(福井大)

(10) 鄭瑞雲, 松本將, 園部浩之, 稲吉文雄, 遊星ローラ式トラクションドライブの弾性リング破損予兆検知, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 査読有, 2010. 9. 8, 名古屋市(名古屋工業大)

(11) 山口英彦, 安江悠好, 松本將, 塑性変形を伴う転がり接触面端部付近に生じる転動疲労ピット発生位置, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 査読有, 2009. 9. 16, 盛岡市(岩手大)

(12) Takeshi Yoshimi, Susumu Matsumoto, Yuko Yaue, Yasuyoshi Tozaki, Design Method for Rolling Contact with Plastic Deformation, World Tribology Congress 2009, 査読有, 2009. 9. 6, 京都市(京都国際会議場)

(13) Susumu MATSUMOTO, Yuko YASUE, Yusuke TSURUTA, Toshihiko YAMAGUCHI, Takeshi YOSHIMI Pitting at Contact End Changing in Contact and Lubricating Condition due to Plastic Deformation, JSME International Conference on Motion and Power Transmission (MPT2009-Sendai), 査読有, No. 09-203, GSD15, 2009. 5. 14, 宮城郡(松島大観荘)

(14) Toshihiko ICHIHASHI, Masato YOKOMIZO, Susumu MATSUMOTO, Investigation of Fatigue Life of Lubricating Oil Additives Using Radial Needle Bearing Test, Proceedings of the JSME International Conference on Motion and Power Transmission (MPT2009-Sendai), 査読有, No. 09-203, GLE10, 2009. 5. 15, 宮城郡(松島大観荘)

(15) Yasuyoshi TOZAKI, Takeshi YOSHIMI, Shunichi ISAYAMA, Hiroyuki SONOBE, Isamu SHIOTSU, Susumu MATSUMOTO, Development of New Low-Cost CVT Micro-Traction-Drive System Utilizing Tapered Bearing, JSME International Conference on Motion and Power Transmission (MPT2009-Sendai), 査読有, No. 09-203, TD8, 2009. 5. 15, 宮城郡(松島大観荘)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

- i. 氏名: 松本 將
- ii. 所属研究機関: 早稲田大学
- iii. 部局: 大学院情報生産システム研究科
- iv. 職名: 教授
- v. 研究者番号: 40367173

(2) 研究分担者: なし

(3) 連携研究者: なし