

平成 21 年 4 月 15 日現在

研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号： 18560143
 研究課題名（和文） 転がり接触面の塑性変形進行を考慮した転動疲労発生限界
 研究課題名（英文） Rolling Fatigue Limit Taken into Consideration of Plastic Deformation of Rolling Contact Surface

研究代表者

松本 將（MATSUMOTO, Susumu）
 早稲田大学・情報生産システム研究科・教授
 研究者番号：40367173

研究成果の概要：

転がり接触面を有する機械要素の使用限界向上策として、転動面の塑性変形を許容する新たな転動面疲労設計手法を取りまとめた。設計手法の骨格として、世界で初めて次の3点を実証的に解明した。転動面の塑性変形が安定化（飽和）する接触圧力、内部加工硬化と転動繰返し数の関係 接触面端部の局所接触圧力と端部塑性変形進行の関係 塑性変形が生じる転動面の転動疲労ピット寿命は初期の最大接触圧力発生位置ではなく、塑性変形後の形状に基く接触圧力によって決まる。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000円	0円	1,000,000円
2007年度	1,100,000円	330,000円	1,430,000円
2008年度	1,300,000円	390,000円	1,690,000円
年度			
年度			
総計	3,400,000円	720,000円	4,120,000円

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：トライボロジー、機械要素

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、ローラ、カム、トラクションドライブなど）の使用限界向上と信頼性向上ニーズが高まっていた。自動車や航空機のトランスミッションギアは転動疲労による歯面損傷が使用限界を規定する状況であった。従来の歯面強度設計手法は接触圧力が弾性接触範囲でなされており、塑性変形を許容していなかった。そこで使用限界の大幅な向上を図るためには、転動面接触圧力の設計許容値を使用

材料の塑性変形域まで使用できる条件を解明し、積極的に機械要素設計へ取り入れて行くことが解決策のひとつであった。研究開始時において、転がり接触面の塑性変形及び塑性変形が生じる転動面の転動疲労発生挙動とその限界に関する研究例がなかった。すなわち、転動疲労に関して塑性変形を考慮できるデータが存在しないために、転動面設計において塑性変形を許容しない状況であった。また、接触面端部などの形状が不適（曲率半径が小さい）場合の弾性限界を超える局所接触圧力による端部損傷を防止するための具

体的な形状設計手法が見当たらない状況であった。

2. 研究の目的

本研究においては、転がり接触面の使用条件を、従来挙動が未解明なために使用してこなかった塑性域に広げて、機械要素の転動面設計選択肢を拡大することを大きな目的とした。

そのために、次の3点を具体的な研究目的とし、総合して動力伝達機械要素（歯車、トラクションドライブ）の設計手法への展開につなぐことにした。

- (1) 転がり接触繰返しに伴う塑性変形進展の定量表現
- (2) 端部接触の塑性変形進行状況の把握
- (3) 塑性変形が進行する転がり接触面の転動疲労発生限界の確認

3. 研究の方法

塑性変形を伴う転動面の变形挙動と転動疲労発生状況を解明するために、研究方法を下記の3ステップに設定した。

- (1) 第1ステップ：転がり接触面の塑性変形進行に伴う接触圧力と弾性流体潤滑油膜厚さ変化挙動の解明

転動繰返しに伴う塑性変形の進行と飽和（シェイクダウンリミット）の定量的確認実験を実施した。光干渉式弾性流体潤滑油膜厚さ測定装置（図1、以降EHL測定装置と略す）を用いて、転動面に塑性変形進行状況を in-situ 観察し、油膜厚さ変化状況を確認した。実験は点接触条件とし、鋼球（SUS304）を半透過ガラス板に所定の荷重で押し付けて転動繰返し数で最大 10^7 回まで異なった繰返し数の実験サンプルを作成し、実験後の形状測定と内部加工硬化状況（特に転動に伴う最大せん断応力発生位置付近）を測定した。

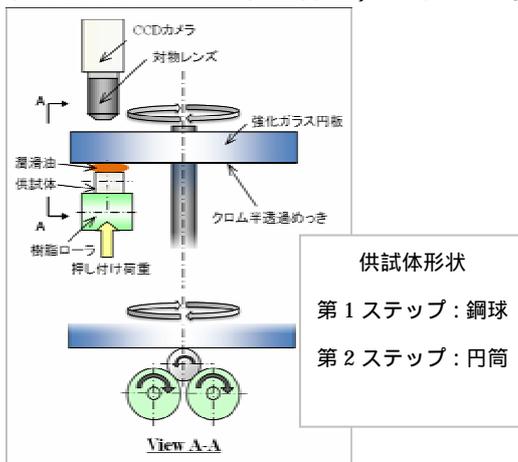


図1 光干渉式弾性流体潤滑油膜厚さ測定装置

- (2) 第2ステップ：局所転がり接触圧力による塑性変形の進行と飽和現象の解明

線接触条件の端部の局所接触圧力による塑性変形進行の in-situ 観察を実施した。第1ステップで用いた EHL 測定装置を用い、端部形状を変えた円筒試験片（調質鋼）を半透過ガラス円板に押し付けて、転動繰返し数に伴う油膜厚さ分布変化と試験後の形状測定で変形進行状況を測定した。

- (3) 第3ステップ：塑性変形が進行する転がり接触面の転動疲労発生限界の確認

転動疲労ピット（ピッチング損傷）を発生させるために、4ローラ試験機（図2）を使用し、センターピンをテーパ形状にして強制片当りで端部を塑性変形させながらピッチング試験を行い、転動疲労データの取得を行った。

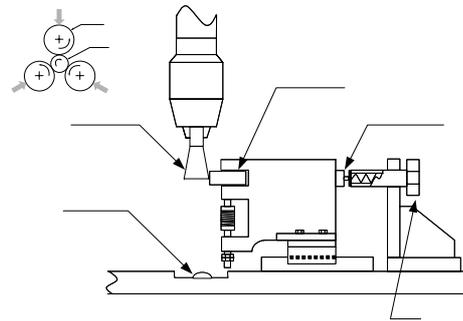


図2 端部片当り4ローラ転動疲労試験機

4. 研究成果

初期の計画通り、世界で初めて転動面の塑性変形進行の in-situ 観察に成功し、塑性変形進行の定量化と塑性変形を伴う転動面の転動疲労発生状況と発生限界が確認できた。主な結果を下記に示す。

- (1) 転がり接触面の塑性変形進行に伴う接触圧力と油膜厚さ変化挙動を解明

転がり接触繰返しの増加に伴う鋼球転動接触面の形状を観察した。図3に示すように接触領域の形状が、初期の真円から繰返し数と共に楕円形状に変化した。

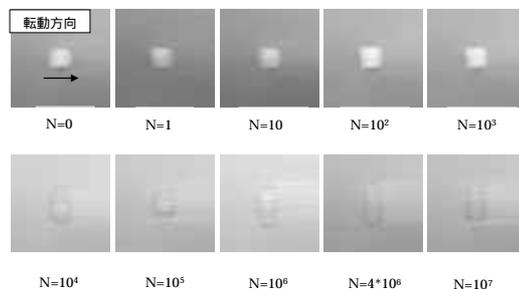


図3 塑性変形による転動面接触領域の変化状況（SUS304, 1.6GPa）

また、接触領域（接触面積）も増加し、塑性変形による接触圧力の低下現象が生じていることが確認された。また、最小油膜厚さ位置も、初期の転動方向の中央端部から両端部へ移行してゆくことも観察された。

観察された接触繰返しに伴う接触領域形状から接触圧力（ P_H ）を逆算し、接触圧力の変化を求めた。また塑性変形が生じる材料には塑性歪の蓄積に伴う加工硬化が存在する。そこで、実験後鋼球の進行方向中央断面のピッカース硬さ（ H_V ）の深さ方向分布を測定した。転動に伴って生じる内部せん断応力が最大となる位置付近が最も大きく加工硬化することが確認された。

以上のデータを総合すると、塑性変形が生じる転がり接触面は、塑性変形に伴う接触圧力の低下と内部の加工硬化による変形抑止作用が同時に生じている。そこで、得られたデータを各繰返し数時点の P_H/H_V （接触圧力/内部せん断応力最大位置のピッカース硬さ）で整理すると、図4のようになる。図4を設計に使用できる線図にしたのが図5である。

これより、次の新たな知見が得られた。

塑性変形が生じる転動面の P_H/H_V は約0.4でシェイクダウン（塑性変形が飽和）する。

シェイクダウンする接触繰返し数は、転動開始時の接触圧力が大きいほど大きくなる。

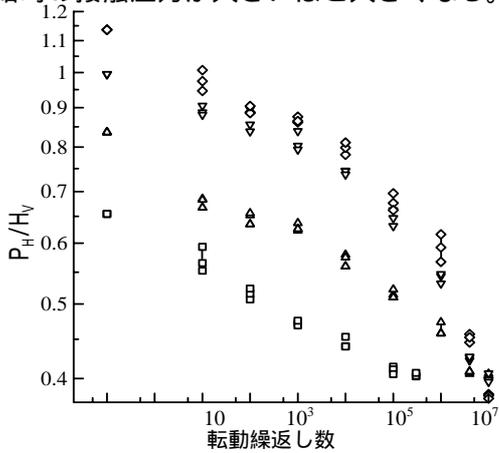


図4 塑性変形が生じる転がり接触面の P_H/H_V の繰返し数に伴う変化

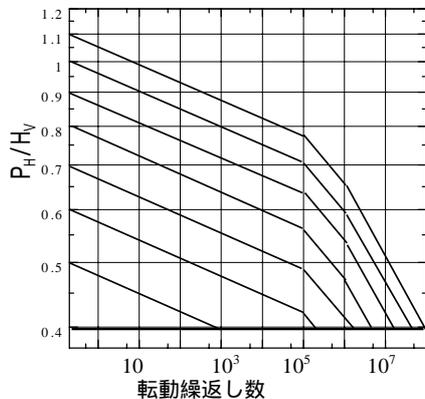


図5 塑性変形する転動面の設計用チャート

(2) 局所接触圧力による線接触端部の塑性変形の進行と飽和現象の解明

線接触の接触端部は端部形状の曲率半径の影響を受けて局所接触圧力が生じる。EHL測定装置にて、円筒試験片を用いて端部に塑性変形が生じる条件で実験を行い、変形進行状況を観察した。図6に端部形状（ほぼ直角）の場合の油膜厚さ分布（光干渉縞）の計測例を示す。油膜厚さ分布の観察から、初期の接触端部は塑性変形により接触領域の内部に移動して行くことが認められた。

変化の状況を接触繰返し数で整理した結果は図7のように、約 10^4 回でほぼ飽和した。

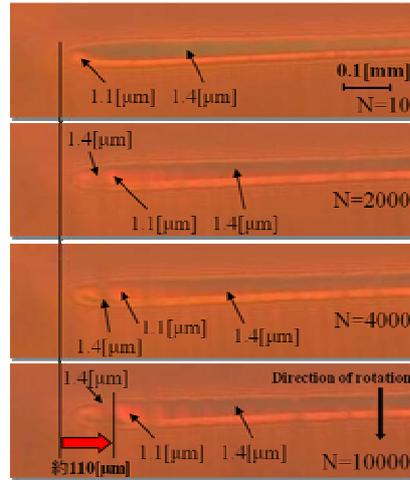


図6 塑性変形による端部の移動観察

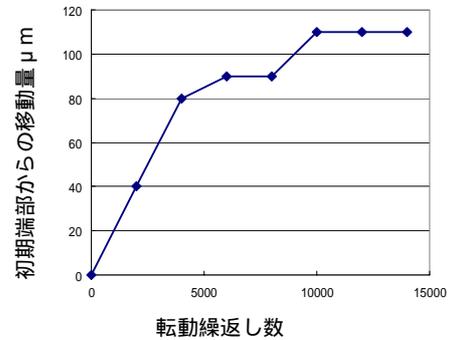


図7 転動繰返しに伴う端部移動量変化

塑性変形後の形状測定から、端部が約2 degの勾配で塑性変形していることがわかったため、予め円筒端部に2 degのテーパを与えて接触繰返しに伴う変化を確認したところ、図8に示すように変化は生じなかった。すなわち、シェイクダウン後の形状が予測でき、初期形状として予想された形状を付与すれば、転動繰返しによる塑性変形は生じないことが確認できた。

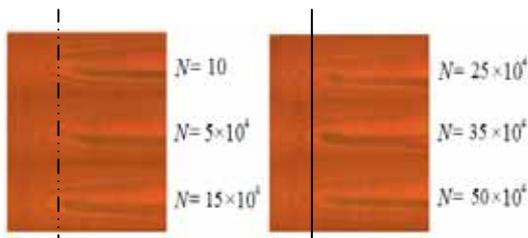


図8 塑性変形分を修正した場合の端部

これより、次の新たな知見が得られた。

端部の塑性変形は端部局所応力緩和の方向に移動し、所定の回数でシェイクダウンする。そのため、初期形状端部の接触条件は消滅する。

予想される塑性変形分を形状修正しておけば、塑性変形は防止できる。

(3) 塑性変形が進行する転がり接触面の転動疲労発生限界の確認

塑性変形が生じる転動面は接触圧力分布が変化し、初期の局所接触圧力が大きい部分に転動疲労ピットが生じることはない。図9に4ローラ試験機で実験した事例を示すが、ローラ形状はテーパであるため、写真の右端が初期に最も接触圧力が大きい位置である。しかし、塑性変形による形状変化と接触圧力分布変化で、転動疲労ピットは初期の接触端部ではなくより内側に生じることが確認された。

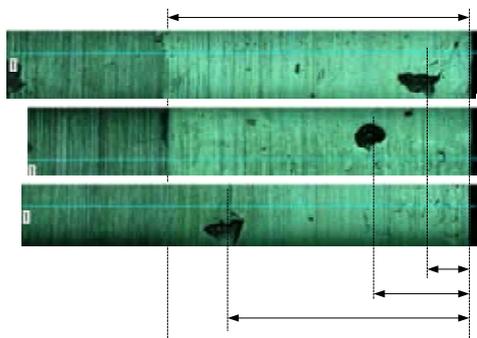


図9 片当りローラの転動疲労ピット発生位置（初期テーパ角：0.001 ラジアン、右端が初期端部）

観察された表面起点き裂型の転動疲労ピットは確率的に生じる現象であるために、少ない回数の実験で発生位置の断定は困難であったが、傾向として転動面全面が変形する場合は、接触領域の初期端部ではない内側に生じることが判った。また、0.001rad以下の片当りでは接触圧力分布に大きな変化は生じない。そこで、すべての転動疲労試験データを、塑性変形後の接触幅を基準としたフラット面として接触圧力を計算し整理すると、図10のように異ったテーパ角で初期の端部局所接触圧力が大きく異なる転動疲労デー

タは、ほぼ1本の疲労S-N(応力 繰返し数)曲線で表せるようになることが判った。

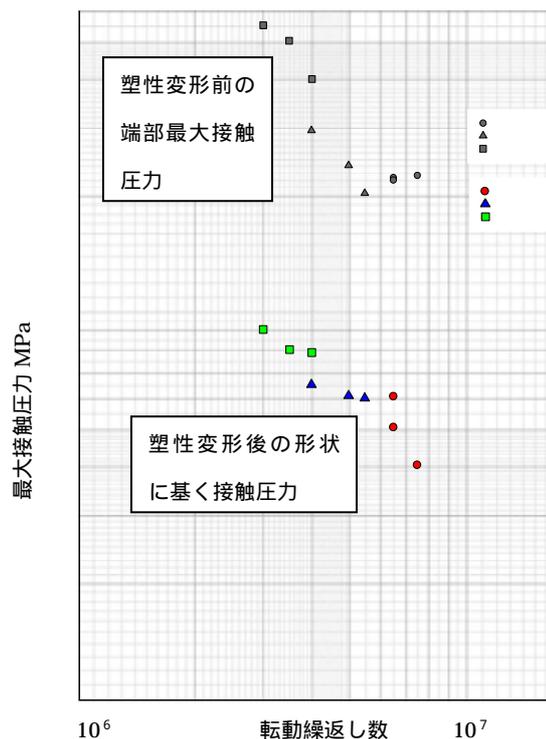


図10 塑性変形する転動面の転動疲労限界

これより、次の新たな知見が得られた。

塑性変形が生じる転がり接触面端部のピッチングは初期形状の端部には発生せず、接触域のやや内側に生じる。

塑性変形が生じる転動面の転動疲労限界は、塑性変形後の接触幅（変形後の形状）が予想できれば規定することができる。

(4) 動力伝達機械要素（歯車、トラクションドライブ）の設計手法への展開

機械要素設計への展開するために、転がり接触繰返し数の増加に伴う形状変化による、接触圧力と弾性流体潤滑油膜厚さの変化を計算することが必要である。

塑性変形の進行を考慮した弾性流体潤滑油膜厚さ計算手法を取りまとめた。塑性変形を伴う転がり接触面の弾性流体潤滑油膜厚さの計算流れ図を図11に示す。本計算手法の新規なところは、変形がシェイクダウンする形状を考慮し、繰返し数の関数として油膜厚さを表現する点である。

図12に実測油膜分布と計算結果を示すが、両者は良好に対応し、塑性変形が生じている転動面の油膜計算が可能とする成果が得られた。

これらの結果より、得られた新たな知見は次のとおりである。

塑性変形を考慮して機械要素転動面の設

計を行う道筋を明らかにすることができた。
 塑性変形進行の予測を可能とすることにより、
 転動繰り返しに伴う弾性流体潤滑油膜厚さの
 推移計算が可能となった。

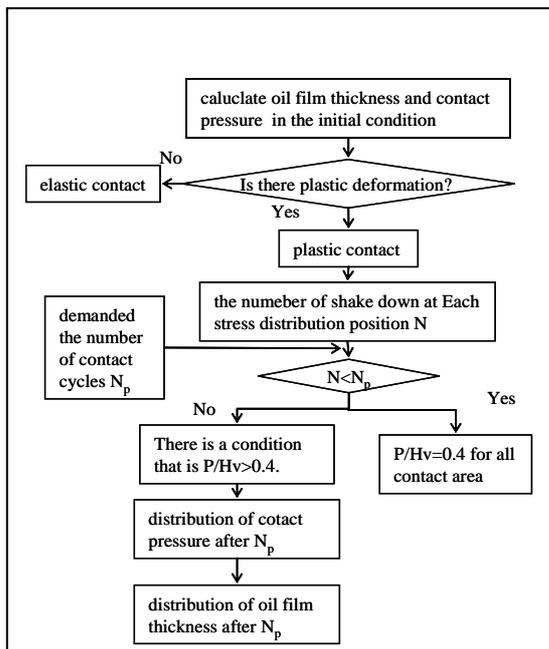


図 1 1 塑性変形を考慮する弾性流体潤滑油膜厚さ計算流れ図

	N=0	N=10 ⁶
Experimental results 実測		
Calculation results 解析		

図 1 2 塑性変形が生じる面の弾性流体潤滑油膜厚さ解析結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

- (1)市橋俊彦,高倉豊,松本將, FZG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, トライボロジスト, 査読有, 54 巻, 4 号, 2009, pp. 293-299
- (2)Takeshi Yoshimi, Susumu Matsumoto, Yasuyoshi Tozaki, Takafumi Yoshida, Hiroyuki Sonobe, Takashi Nishide, Work

Hardening and Change in Contact of Rolling Contact Surface with Plastic Deformation, Tribology Online, 査読有, Vol. 4, No. 1, 2009, pp. 1-5

(3)吉田孝文, 東崎康嘉, 松本將, マルチレベル法によるだ円接触EHL解析の最小油膜厚さに関する研究, トライボロジスト, 査読有, 52 巻, 2 号, 2008, pp. 138-147

(4) 塩津勇, 松本將, 園部浩之, アンギュラ玉軸受転用型 2 段減速トラクションドライブの負荷運転性能, トライボロジスト, 査読有, 51 巻, 11 号, 2007, pp. 812-818

(5) 塩津勇, 松本將, 東崎康嘉, 吉見壮司, 諫山秀一, 円すいころ軸受転用型マイクロトラクションドライブの開発, トライボロジスト, 査読有, 51 巻, 10 号, 2006, pp. 736-743

(6)Isamu Shiotsu, Susumu Matsumoto, Hiroyuki Sonobe, Yasuyoshi Tozaki, Effect of Retainer Materials on Efficiency of Micro-Traction-Drive Utilizing Angular Contact Ball Bearings, Tribology Online, Vol. 1, No. 1, 査読有, 2006, pp. 25-28

(7) 正田功彦, 松本將, 古川豊秋, 東崎康嘉, 阪口勝彦, 吉田孝文, 動力伝達歯車装置の非線形シミュレーション手法の研究(第3報, 油膜力を考慮した噛み合い対の振動モデル), 日本機械学会論文集(C編), 72 巻, 717 号, 査読有, 2006, pp. 1446-1453

(8)Yasuyoshi TOZAKI, Akihiko UMEDA, Hiroyuki SONOBE, Susumu MATSUMOTO, Takeshi YOSHIMI, Isamu SHIOTSU, Performance Evaluation of Innovative Micro-Traction-Drive-Utilized Angular-Contact Bearing, Transaction of the ASME, Journal of Tribology, 査読有, Vol. 128, No. 2, 2006, pp. 262-266

(9) 塩津勇, 松本將, 東崎康嘉, 吉見壮司, 梅田彰彦, 園部浩之, 転がり軸受転用型高速マイクロトラクションドライブの開発(第1報. マイクロトラクションドライブの試作と評価), 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 72 巻, 716 号, 2006, pp. 1337-1344

〔学会発表〕(計11件)

(1)Takeshi Yoshimi, Susumu Matsumoto, Yuko Yae, Yasuyoshi Tozaki, Design Method for Rolling Contact with Plastic Deformation, World Tribology Congress 2009, 査読有, 京都市, 2009.9.6, (受理済)

(2)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, 査読有, 仙台市, 2009.5.13, (受理済)

- (3) 鶴田裕介, 松本將, 安江悠好, 転がり接触面端部の塑性変形と潤滑状態変化, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議, 2008.9.17, 名古屋市 (名城大)
- (4) 西脇弘嗣, 城戸良晃, 松本將, 混合潤滑下のEHL油膜厚さ分布と初期接触パターン変化の関係, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議, 2008.9.16, 名古屋市 (名城大)
- (5) 松本將, 城戸良晃, 西脇弘嗣, 吉見壮司, 混合潤滑下接触面なじみに及ぼすEHL油膜厚さ分布の影響, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008.8.5, 横浜市 (横国大)
- (6) 松本將, 安江悠好, 塑性変形を伴う転がり接触面片当り端部の接触状態変化, 日本機械学会MPT2007 シンポジウム (伝動装置), 2007.12.1, 鳥取市 (鳥取県民文化会館)
- (7) 安江悠好, 松本將, 塑性変形を伴う転がり接触面の加工硬化と接触状態の変化, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議, 2007.9.27, 佐賀市 (佐賀大)
- (8) Susumu MATSUMOTO, Jun KATO, Rolling Contact Fatigue Durability at Edge of Rolling Contact Surface, ICMPT2007 (JSME-KSME Joint International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology), C38, 2007.7.3, 札幌市 (北海道大)
- (9) Isamu SHIOTSU, Akihiko UMEDA, Yasuyoshi TOZAKI, Shuichi ISAYAMA, Susumu MATSUMOTO, Development of Micro Traction Drive Modified from Tapered Roller Bearings, ASME, Proc. of IJTC2006, 査読有, IJTC2006-12115, 2006, 米国
- (10) Takeshi YOSHIMI, Susumu MATSUMOTO,

- Yasuyoshi TOZAKI, Takafumi YOSHIDA, Hiroyuki SONOBE, Takafumi NISHIDE, Study on the Change of Contact under the Heavy Load by Optical Interference Method, The Third ASIA International Conference on Tribology, 査読有, Vol.2, 2006.10.17, 金沢市 (金沢都ホテル)
- (11) Isamu SHIOTSU, Hiroyuki SONOBE, Susumu MATSUMOTO, Yasuyoshi TOZAKI, Takeshi YOSHIMI, Syunichi ISAYAMA, Running Performance of Tandem Stage Type Traction Drive Modified from Angular-Contact Ball Bearings, The Third ASIA International Conference on Tribology, Vol.2, 2006.10.17, 金沢市 (金沢都ホテル)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

- . 氏名: 松本 將 (MATSUMOTO, Susumu)
- . 所属研究機関: 早稲田大学
- . 部局: 大学院情報生産システム研究科
- . 職名: 教授
- . 研究者番号: 40367173

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

以上