

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560169

研究課題名(和文) 転がり・すべり接触面の接触領域内混合潤滑状態分布を考慮した摩擦係数推定式の構築

研究課題名(英文) Estimation formula of coefficient of friction considered distribution of mixed lubrication condition at rolling-sliding contact surface

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：歯車のかみ合い摩擦損失低減のために、接触領域に混合潤滑状態分布がある場合のころがり・すべり接触面の摩擦係数推定式を検討し、下記の結果を得た。

(1)混合潤滑状態でも弾性流体潤滑油膜厚さ分布の薄い部分が主に接触し、摩擦係数は最小油膜厚さ部分に着目して良い。(2)接触領域を細部分の潤滑状態を考慮した摩擦係数を面積分した値と最小油膜厚さから求めた摩擦係数の値はほぼ同値である。(3)線接触片当たりで潤滑状態分布がある場合でも、接触領域の最小油膜厚さを考慮すれば摩擦係数を推定できる。(4)大きく歯形修正を施した歯面を有する歯車のかみ合い摩擦による動力損失も、考案した式で求めることができる。

研究成果の概要(英文)：For the improvement of reducing power loss and preventing tooth surface failure of power transmission gears, it is necessary to estimate the coefficient of friction under mixed lubrication condition at tooth mesh (rolling-sliding contact surface) with high accuracy.

(1)Coefficient of friction is able to estimate by using of proposed estimation formula under the condition of oil film thickness distribution. (2)Coefficient of friction at minimum oil film thickness is almost same as coefficient of friction integrated coefficient of friction at contact area in spite of lubrication condition distribution. (3)Coefficient of friction can be estimated by using proposed formula under the 3D contact condition like point contact and misaligned contact. (4) Power loss of transmission gears with tooth profile modification can be estimated by using proposed formula with high accuracy.

研究分野：機械要素・トライボロジー

キーワード：摩擦係数 転がり・すべり接触面 混合潤滑 境界潤滑部分比率 歯車 かみ合い摩擦 動力損失 動力伝達効率

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）の使用限界向上と動力損失低減のニーズが高まっている。転動面の使用限界を向上につながる歯面損傷の防止と動力損失低減につながるかみ合い摩擦仕事低減のために、歯、かみ合い歯面の摩擦係数を正確に予測する必要がある。自動車用トランスミッションなどの歯車かみ合い歯面は、ほとんどが混合潤滑状態にあり、かつ同時接触面内の潤滑状態に分布がある。申請者が考案した混合潤滑状態下にある転がり - すべり接触面の摩擦係数推定式は接触面内の最小油膜厚さと両接触面の小油膜部分のみに着目したものであった。歯車などの一般的な転がり - すべり接触面には油膜厚さ分布が存在するため、前述の式が潤滑状態分布がある場合に成り立つか、あるいは潤滑状態を考慮した修正を行う必要があるかについて解明する必要が生じ、本研究を実施した。

2. 研究の目的

接触領域には必ず潤滑状態分布が存在し、領域内各部の摩擦力（接線力）の和を法線力で除した値が摩擦係数となる。潤滑状態を考慮することは常に詳細な油膜厚さ分布計算を必要とするため、通常の設計式には適さないため、分布を考慮する簡易な摩擦係数推定式を考案する。

1) 点接触状態の摩擦係数の解明

点接触で潤滑状態分布が存在する場合は、油膜厚さと油膜圧力も分布を持つ。このような場合の摩擦係数の推定方法について明らかにする。

2) 片当たり線接触状態の摩擦係数の解明

円筒が片当たりする場合は、接触端部に局所接触圧力が生じ、油膜厚さも薄くなる。通常接触端部は塑性変形が生じており、接触圧力は接触繰り返しに伴い材料のシェイクダウンリミット（約0.4HV ピッカース硬さ）にまで低下する。このような場合の摩擦係数の推定方法を明らかにする。

3) 接触圧力と潤滑状態分布がある歯形修正を施した歯車かみ合い歯面の摩擦係数

歯面修正した歯車のかみ合い歯面には歯当たり領域に潤滑状態分布が存在する。歯面の潤滑状態を計算し、提案した摩擦係数推定式でかみ合い摩擦係数が評価できるかについて、はすば歯車とコニカルギヤについて明らかにする。

3. 研究の方法

1) 点接触の混合潤滑状態分布の解明

球と平板の接触にて、混合潤滑状態を作り、負荷運転による接触痕跡と弾性流体潤滑油膜厚さ分布（解析）との関連を調べる。これにより、表面粗さ突起干渉が存在する混合潤滑状態で、弾性流体潤滑理論に基づく油膜厚

さ分布が形成されているかを実証する。

2) 片当たりする線接触の摩擦係数の解明

2 ロール試験にて、一方のロールの軸方向にテーパを与えて片当たり状態をつくり、摩擦係数を実測する。摩擦係数の実測値と端部の塑性変形に伴う形状変化も考慮した摩擦係数測定値を比較し、端部接触時の摩擦係数の推定方法を明らかにする。

3) 修整歯面を持つ歯車の摩擦係数の解明

かみ合い歯面に潤滑状態分布を持つ動力伝達用歯車を用い、動力損失トルク測定値から換算した摩擦係数値と潤滑状態分布から提案式を用いて解析で求めた摩擦係数値を比較する。これによって、提案式が混合潤滑状態分布を持つ接触面の摩擦係数推定に使用できるかどうかを明らかにする。

4. 研究成果

1) 点接触の混合潤滑状態分布の解明

球（転がり軸受用球、SUJ2、直径24.5mm）と平板（銅合金）を組み合わせて、純すべり接触にて、負荷運転初期のしゅう動痕の形状を調べた。試験機の状態を図1に示す。平板側から負荷レバーで負荷をかけ、2円筒で支えられた球に押し付けた。

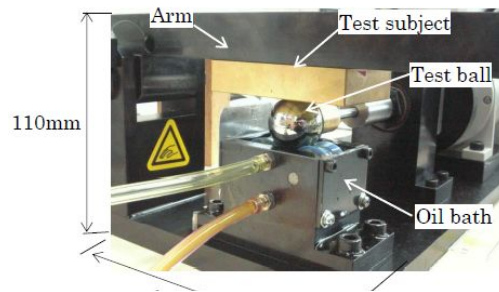


図1 点接触試験機の外観

一般的に、点接触状態の弾性流体潤滑油膜厚さ分布は図2に示すように、最小油膜厚さ部分が接触領域の周辺（図の黒い部分の馬蹄形の部分）に生じる。

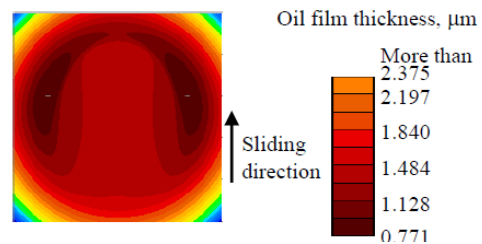


図2 油膜厚さ分布計算(1.0Pa,1353rpm)

これに対応する、純すべりで実験した平板（銅合金）側のしゅう動痕の形状を図3に示す。白く見えるしゅう動痕の形状が馬蹄形をしており、位置も計算結果に対応する。

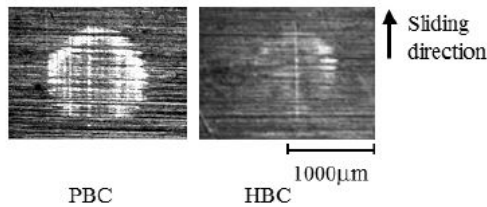


図3 しゅう動痕の状態(1.0Pa,1353rpm)

接触領域の中央部の進行方向の油膜厚さ分布(計算)と表面粗さの関係をモデル化して示した結果を図4に示す。図4の最小油膜厚さ部分が接触する状況があることが分かった。

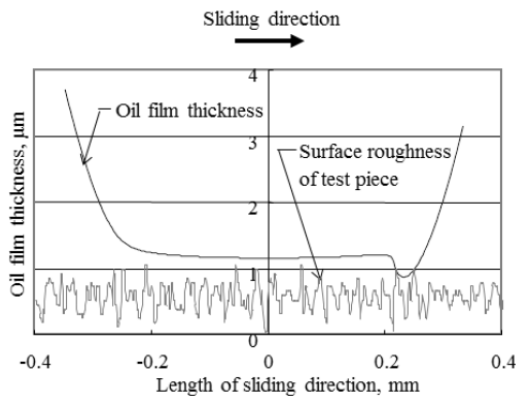


図4 混合潤滑状態の潤滑状態

弾性流体潤滑油膜厚さ分布に対応するしゅう動痕パターンが生じることより、混合潤滑状態でも表面粗さを考慮しない油膜厚さ分布計算結果を用いることが分かった。逆に言えば、表面粗さ突起干渉がある混合潤滑面に対して、表面粗さを考慮しない弾性流体潤滑油膜厚さ解析結果を用いることができる。なお、混合潤滑状態での油膜厚さ分布パターンが生じることが確認されたのはこれが初めてである。

2) 片当たりする線接触の摩擦係数の解明

2つのローラ(直径30mm、幅10mmと5mm)の5mm幅の方に、1/50,1/100,1/500radのテーパを付け、図5に示す試験機によって摩擦係数を測定した。潤滑油はVG30鈹油を25の油浴潤滑で供給し、荷重250N、回転速度1,000rpm(低速側700rpm)とし、30%のすべり率を与えた。ローラ材組合せはSCM435(300Hv)同士およびSUJ2(724Hv)同士とした。

摩擦係数の推定は次式(松本式)を用いた。

$$f = f_L(1 - \alpha) + f_S \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = 0.5 \log D \quad (2)$$

$$D = (R_{z1} + R_{z2}) / h_0 \quad (3)$$

各記号の内容は下記である。

f : 摩擦係数

f_L : 流体潤滑負荷分担部分の摩擦係数

f_S : 境界潤滑部分の摩擦係数

α : 接触域での境界潤滑部分の割合
 D : 潤滑状態(ただし $1 < D$)
 R_{z1}, R_{z2} : 2面の最大高さ粗さ
 h_0 : 2面間の弾性流体潤滑最小油膜厚さ

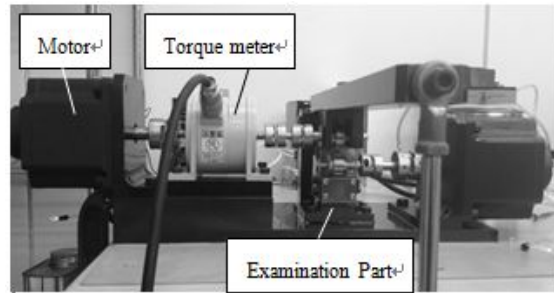


図5 摩擦係数測定用2ローラ試験機

試験結果を図6に示す。片当たり状態では接触端部が急速に塑性変形するため、表面粗さがわかる運転開始直後と20sec運転後の2点のみを使用した。なお、摩擦係数の推定に必要な油膜厚さは、片当たり端部の接触領域をローラ幅として求めた。

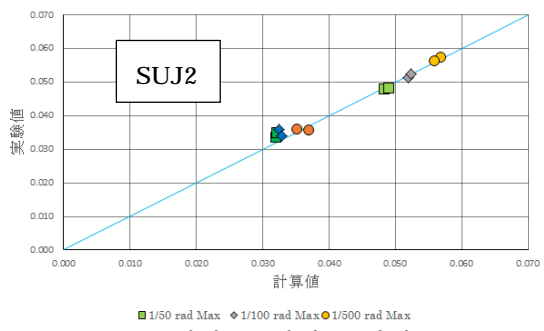
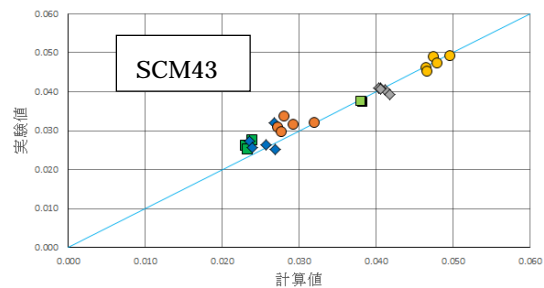


図6 片当たり状態での摩擦係数の実験値と計算値の対応

片当たり時は油膜厚さ分布があるが、2ローラの場合は片当たり端部を2ローラ接触とすることで、実測摩擦係数とほぼ同じ値になることが分かった。軸方向の油膜厚さ分布の最小油膜厚さ部分是最端部側にあるが、最小油膜厚さに及ぼす荷重の影響が小さいため、便宜的に接触領域を平行2ローラとして考えることが分かった。

なお、3次元接触の極端な例として上記試験の下ローラを球に変えて摩擦係数を測定

した。最小油膜厚さから求めた摩擦係数と実測値がほぼ一致した。また、歯面の潤滑油膜厚さ分布と油膜圧力分布から各部分の摩擦力（接線力）を求め面積分した摩擦力から求めた摩擦係数と提案式で求めた摩擦係数値はほぼ一致することも実証した。

3) 修整歯面を持つ歯車の摩擦係数の解明

歯車かみ合い歯面上には潤滑油膜厚さ分布が存在する。従って、摩擦係数は歯面上で分布を持つ。歯面上の各点の瞬間摩擦係数を測定することは困難であるため、歯車負荷運転に伴う損失トルク測定値と、提案式による摩擦係数から求めたトルク推定値を比較する。予測値と比較する。

歯面上の潤滑状態分布が明確に出るインポリュートコニカルギヤを用いて、実験と計算を行った。図7に試験装置の状況を示す。

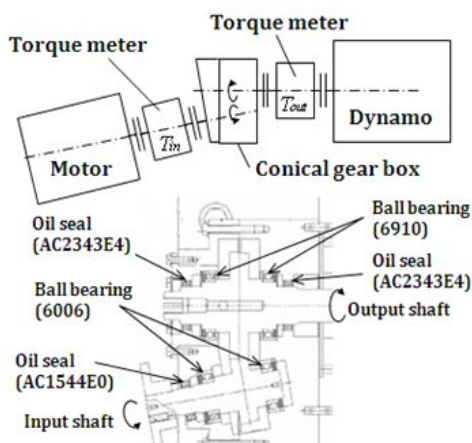
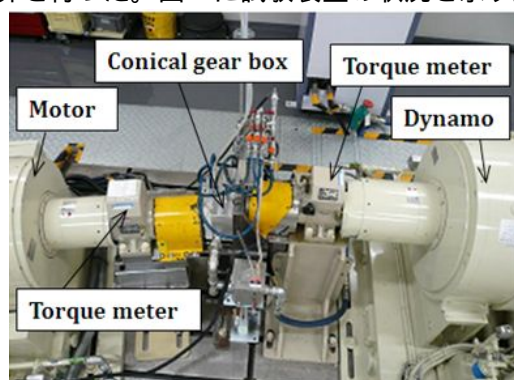


図7 コニカルギヤ試験装置

歯車諸元により、図8のような3種類の相対歯面誤差を持つかみ合い歯面で実験し、図9に示す結果を得た。

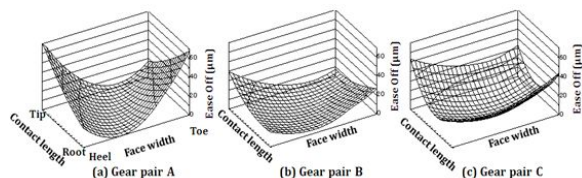


図8 実験した相対かみ合い歯面誤差

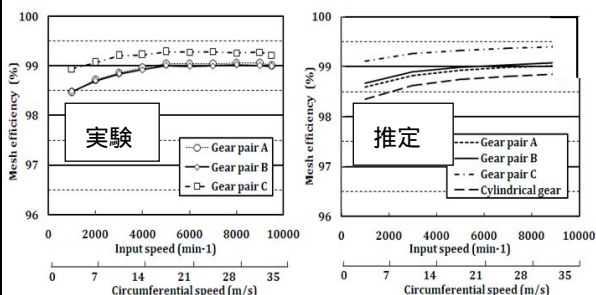


図9 試験歯車効率と予測効率の比較

実験結果との比較の結果、歯面上の多い部分で約 $20 \mu\text{m}$ の相対誤差を持つような場合も、提案式による歯面の摩擦係数分布を求めて、トルク換算すれば、ほぼ正確に動力損失や伝達効率を求めることができることが分かった。

4) まとめ

混合潤滑状態下にある接触領域内で潤滑状態分布がある場合の摩擦係数推定方法について検討し、下記の結果を得た。

- (1) 接触領域内の最小油膜厚さを基にして、提案した摩擦係数推定式を用いれば、潤滑状態に分布があってもほぼ正確に摩擦係数を予測することができる。
- (2) 線接触片当たりの場合は、端部接触幅を円筒の幅とみなした油膜厚さ計算値を基にして、摩擦係数を予測することができる。
- (3) 3次元歯当たりを持つ歯車かみ合い面においても、潤滑状態分布を考慮して求めた各部の摩擦係数分布から、動力損失やかみ合い効率を精度よく計算することができる。

なお、提案した摩擦係数推定式とそれを基にした歯車動力損失推定に関して、研究期間内に欧州（フランス）で開催された世界歯車会議で発表し、The Best Paper Awardを受賞した。混合潤滑状態下の摩擦係数の予測式は、約50年前の米国由来の実験式が使われてきたが、本研究のような単純な潤滑モデルで精度良く予測することが可能となった点を評価された。特に、当該分野の競争相手である独、仏、米国のギヤトランスミッションの中心的な研究者から評価された点は大きな成果といえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- (1) 混合潤滑状態にある転がり-すべり接触面の接線力とピッチング発生限界の関係、松本將, 日本機械学会論文集, 査読有, 81巻, 823号, 2015年, pp.1-11.
- (2) コニカルギヤのかみ合い効率解析, 日本機械学会論文集, 森川邦彦, 永原幹雄, 熊谷幸司, 小森雅晴, 松本將, 日本機械学会論文集, 査読

有,80 卷,815 号,2014 年,pp.1-11.

(3)Comparison of the fatigue life of lubricating oil under different severe conditions with the FZG pitting of the fatigue life of lubricating oil under different severe conditions with the FZG pitting test, Toshihiko Ichihashi, Hiroshi Fujita, Susumu Matsumoto, VDI-Berichte, 査読有, Vol.2199,2013,pp.841-854.

(4) 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(第2報) - 摩擦係数に及ぼす表面粗さ形状の影響 - 松本將, 豊田展光, トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌), 58 巻,9 号,2013 年, pp.676-684.

(5) 円筒歯車の動力損失に及ぼすトラクション油の影響, 森川邦彦, 永原幹雄, 西原隆太, 松本將, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 79 巻, 803 号,2013 年,pp.2609-2621.

(6) 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2報) - 流体潤滑状態での転動疲労寿命 -, 安江悠好, 松本將, 吉田悠二, トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌), 査読有, 57 巻,7,2012 年, pp.87-495.

(7) 円筒歯車のかみあい効率予測とその向上, 森川邦彦, 西原隆太, 松本將, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 78 巻,788 号,2012 年,pp.1250-59.

[学会発表](計11件)

(1) The new estimation formula of coefficient of friction in rolling-sliding contact surface under mixed lubrication condition for power loss reduction of power transmission gears, S. Matsumoto, K. Morikawa, International Gear Conference(2014), Woodhead Publishing, Vol.2, 2014, pp.1078-1088.[The best paper award in IGC 2014], 査読有, 2014.8.28, フランス(リヨン)

(2) 安江悠好, 弘嶋誠司, 林田泰, 安井潤一郎, 松本將, 歯面の摩擦力を考慮した動力伝達用歯車のマイクロピッチング発生機構の検証, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議 2014 秋盛岡, 査読有, 2014.11.7, 盛岡市(いわて県民情報交流センター)

(3) 陳晟偉, 松本將, 歯車油浴潤滑の潤滑油攪拌損失に及ぼす歯車箱姿勢と油量の影響, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議 2014 春東京, 査読有, 2014.5.11, 東京(国立オリンピック記念青少年総合センター)

(4) 松本將, (基調講演) 摩擦係数推定精度向上による歯車の歯面損傷防止と動力損失低減, 日本機械学会 MPI2013 宮崎, 2013.11.14, 宮崎市(宮日会館)

(5) 松本將, 転がり・すべり接触面の接線力とピッチング発生限界の関係, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 査読有, 2013.9.11, 岡山市(岡山大学)

(6) サンティワンカン・テチャワット, 松本將, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議 2013 春東京, 査読有, 2013.5.22, 東京(国立オリンピック記念青少年総合センター)

(7) 庄加倫, 松本將, 市橋俊彦, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議 2013 春東京, 査読有, 2013.5.20, 東京(国立オリンピック記念青少年総合センター)

(8) 市橋俊彦, 松本將, ギヤ疲労寿命に及ぼす摩耗分の影響, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議 2012 秋北海道室蘭, 査読有, 2012.9.16, 室蘭市(室蘭工業大学)

(9) 林明音, 松本將, グリース潤滑下の EHL 最小油膜厚さに及ぼす枯渇状態の影響, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議 2012 秋北海道室蘭, 査読有, 2012.9.16, 室蘭市(室蘭工業大学)

(10) トワナブットナット, 松本將, 転がり接触繰り返しに伴う人口圧痕リッジ部の接触圧力変化, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議 2012 秋北海道室蘭, 査読有, 2012.9.16, 室蘭市(室蘭工業大学)

(11) 陳俊林, 松本將, 弾性接触変形量に基づく転がり摩擦係数の推定, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 査読有, 2012.9.10, 金沢市(金沢)

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 (Waseda University)

. 部局: 大学院情報生産システム研究科 (Graduate School of Information, Production and Systems)

. 職名: 教授 (Professor)

. 研究者番号: 40367173

(2) 研究分担者: なし

(3) 連携研究者: なし