

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04155

研究課題名(和文) スクイズ運動下での摩擦力と表面損傷に対する粗さ形状の影響把握

研究課題名(英文) A study on effect of surface roughness for friction force and surface damage under squeeze motion

研究代表者

山本 建 (Yamamoto, Takeshi)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：20780323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：自動車に多く用いられているベルト無段変速機は、伝達面の摩擦係数を向上させることで性能を大きく向上できる。一般に伝達面を粗くすれば油膜が切れて摩擦係数は高まるが、接触面圧が高くなり損傷しやすくなる。本研究者は、これまで注目されていなかったスクイズ運動が大きく影響すると考え、粗さと摩擦係数、接触面圧の関係解明を目指した。独自の試験機を用いて摩擦係数を測定し、電気抵抗の測定により接触面圧の把握を行い、動力を伝達する方向に対し直角方向の溝を形成することで、摩擦係数が向上することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気自動車はコストや航続距離など技術課題が大きく、内燃機関やハイブリッドは当分の間、生産されるため、変速機の性能向上への要求は依然として高い。多くの日本車が採用するベルト無段変速機は摩擦によって動力を伝達するため、摩擦係数を高めることにより小さな力で伝達することが可能となり、燃費性能を向上できる。本研究では、これまで注目されていなかったスクイズ現象に注目し、独自の摩擦試験機と測定方法によって伝達面の微細形状と摩擦の関係を調べ、性能を向上させる形状を見出した。

研究成果の概要(英文)：The performance of continuously variable transmission belts, which are widely used in automobiles, can be greatly improved by increasing the friction coefficient of the transmission surface. In general, roughening the transmission surface increases the coefficient of friction by breaking the oil film, but it also increases the contact surface pressure, making it more susceptible to damage. The researcher believed that squeeze motion, which has not received much attention, has a significant influence, and aimed to elucidate the relationship between roughness, friction coefficient, and contact surface pressure. We measured the coefficient of friction using an original testing machine and determined the contact surface pressure by measuring electrical resistance, and found that the coefficient of friction was improved by forming grooves perpendicular to the direction of power transmission.

研究分野：機械要素

キーワード：トライボロジー 変速機

1. 研究開始当初の背景

無段変速機は現在、多くの小型自動車に搭載されている。変速機構は鋼製ベルトまたはチェーンとプーリからなり、摩擦によって動力を伝達する。プーリは油圧ピストンで狭圧され、ベルト/チェーンとの接触面に摩擦を生むための押付け力が付与される。ここで摩擦係数を高めることができれば必要押付け力は下がり、油圧仕事や軸受摩擦の低減による燃費改善、薄肉化による構造部品の軽量化など多くのメリットをもたらす。

冷却および表面損傷防止のため伝達面は油で潤滑されており、接触面は混合潤滑状態にある。潤滑油は鉱物油であるため油の摩擦係数(トラクション)は小さく、摩擦力の大半は境界膜を含めた接触域が担うため、粗さ形状が摩擦係数に大きく影響する。摩擦係数を高めるには粗さを大きくして油膜を切りたいが、単純に粗くしては粗さ先端の接触面圧が高くなり、異常摩耗や焼付きなど表面損傷を起こす恐れもある。しかしながらスクイズ運動下での摩擦係数と接触面圧を調べた例は見当たらない。すなわち設計に必要な理論やデータが十分にはないため、経験的に接触面形状や粗さ形状を決めている。

2. 研究の目的

実機相当のスクイズとすべりを再現する摩擦試験機を用いて、これまで明らかになっていなかったスクイズ運動下での摩擦と接触面圧の動的な挙動を測定し、それらに粗さが与える影響を把握する。その結果をもとに、表面損傷を生じることなく高摩擦係数を得る粗さ形状を見出す。

3. 研究の方法

3.1. 摩擦力の測定

研究代表者が設計製作した、回転および軸方向に揺動するローラに球面ピンを衝突させ、3分力計によって押付け力と摩擦力を同時に測定する。ピンの衝突は実機におけるプーリへのかみ込み時のスクイズ、ローラ回転は伝達方向のすべり、ローラ軸方向揺動は変速やプーリ弾性変形による半径方向すべりに相当する。接触面の曲率半径、スクイズ速度、すべり速度は実機をほぼ再現できる。本装置を用いて接触開始から定常状態に至るまでの過渡的な摩擦係数の測定を行った。

3.2. 接触面圧の推定

面圧の算出には荷重と面積を要するが、それぞれ接触と油膜の分担比をもとめなければならない。接触面積は二面間の電気抵抗より算定する方法を用いた。装置の構成を図1に示す。電気抵抗の測定は日置電機製 RM3545、スリップリングは東測製 S6 を用いた。

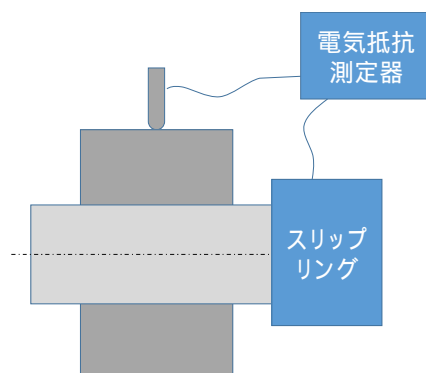


図1. 接触部の抵抗測定装置

3.3. EHL 数値計算による粗さ、テクスチャの設計

直接接触を考慮した非定常 EHL 数値計算を行い、粗さによる影響の分析とテクスチャの設計検討を行った。テクスチャを表現するためには多数のメッシュが必要であり、さらに非定常計算であるため多数回の計算を要し、計算時間が極めて長くなる。そこで、レイノルズ方程式に対してはマルチグリッド法、弾性変形に対しては高速フーリエ変換の利用により計算高速化を図った。

4. 研究成果

4.1. 粗さに対する摩擦係数と電気抵抗

Rq0.1~2.0 まで 4 レベルの粗さと鏡面 (Ra0.02) でローラを製作し、摩擦の測定を行った。ピンは鏡面 (Ra0.02) とした。実験結果を図2に示す。おおむね粗さに応じて摩擦係数の立ち上がり速度と定常値が高くなっている。なお負荷開始から 0.05sec 程度までは粗さによらず摩擦係数の立ち上がり角度が同じである。これは試験機のピン支持部が弾性変形を起こしているためと考えられる。荷重立ち上がり直後の測定を行うためには試験機の高剛性化を図る必要がある。

電気抵抗の測定結果を図3に示す。Ra0.02 (鏡面) とそれ以外では抵抗値は大きく異なり、接触面積の差異を示しているが、Rq0.1~2.0 (実機相当) の間に値や挙動の違いは見られず、接触状態の差異を観測することは出来なかった。配線など全体の抵抗値に対して接触部の抵抗が極めて小さく、接触面積の差による抵抗の差はさらに小さい値であるため、判別ができなかったと考える。押付け力が働くと、ごく短時間で抵抗値は低下している。抵抗計に 0.02sec 程度の計測遅れがあることを考えると、Rq0.1~2.0 はごく小さな押付け力が働いた時点で接触を開始していると考えられる。少数の粗さの先端が接触を開始し、徐々にその領域が広がって摩擦係数が高

まっていくと考えられるが、前述したように摩擦測定、接触面積測定ともに必要な精度に達して
おらず、改良または方法の変更が必要である。

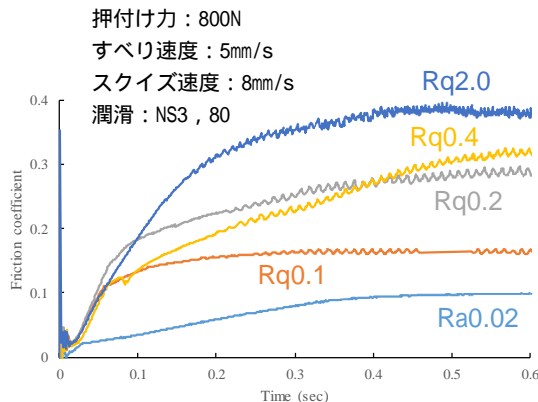


図 2 . 摩擦特性に対する粗さの影響

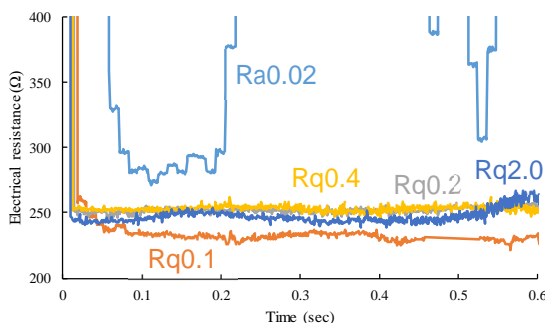


図 3 . 電気抵抗測定結果
(条件は図 2 と同じ)

4 . 2 . EHL 計算による摩擦係数の算出

電気抵抗による接触状態の精密な測定が困難であったので、接触を考慮した非定常 EHL 計算を用いて解析を行った。簡易的に EHL 計算は粗さを考慮せず平滑面として計算を行い、算出した油膜厚さと粗さに対して次式で摩擦係数をもとめた。

$$\mu = \frac{\sum_i \sum_j \{ \mu_f F(h_{i,j}) + \mu_d [1 - F(h_{i,j})] \} \Delta x \Delta y}{Q} \quad (4)$$

$F(h_{i,j})$ は、表面粗さの基準線を油膜厚さの基準面としたときの、各節点における油膜厚さに対する累積分布関数である。図 4 に結果を示す。ごく短時間で接触を開始して粗さに応じた摩擦係数を発生し、0.2sec 程度まで漸増する。この結果は定性的には実験と一致する。前述した試験機の弾性変形により押付け力発生直後の摩擦係数は低いが(図 2)、電気抵抗は押付け力発生直後から接触していることを示しており(図 3)、数値計算と一致する。定常値は粗さによらず一定であり、この点においては実験と不一致である。今回、粗さを考慮せずに EHL 計算を行っているため、定常値が一致しないと予想される。今後、粗さを考慮した EHL 計算を行う必要がある。

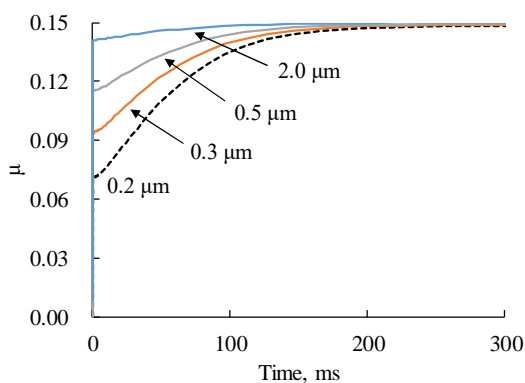


図 4 . 数値計算による摩擦特性



図 5 . 計算したテクスチャ形状

4 . 3 . テクスチャによる摩擦特性の向上

スクイズ油膜形成による摩擦の立ち上がり遅れを改善するべく、テクスチャの効果を検討した。図 5 に示すような形状パターンについて数値計算を行った結果を図 6 に示す。直交溝やクロスハッチなど、すべり方向に対して角度を持った溝が効果を示した。これはスクイズ膜がすべりによって溝に排出され、油膜が薄くなったことによる。溝は 1 本よりも細かいピッチで多数の溝を形成した方が、より早く油膜が排出され、摩擦係数の立ち上がりが速くなる。

直交多条溝の試作を行うべく、諸元(溝ピッチと幅)の設計検討を行った(図 7)。摩擦の立ち上がり速度と定常値に収束した摩擦とはトレードオフの関係にあり、溝幅が大きいほど立ち上がりは速くなるが、溝により平坦部が小さくなると定常値は低下する。したがって溝幅とピッチをできるだけ小さくすると良い。加工が可能な限り溝幅を小さくし、溝幅 5 μm、ピッチ 50 μm に

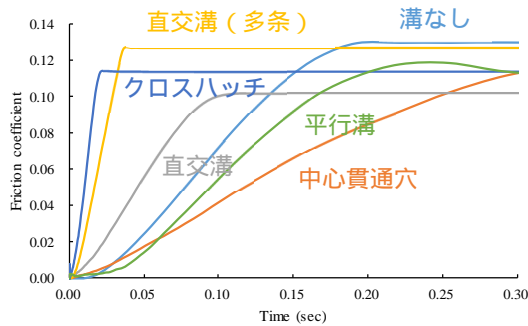


図 6 . テクスチャによる摩擦係数への効果

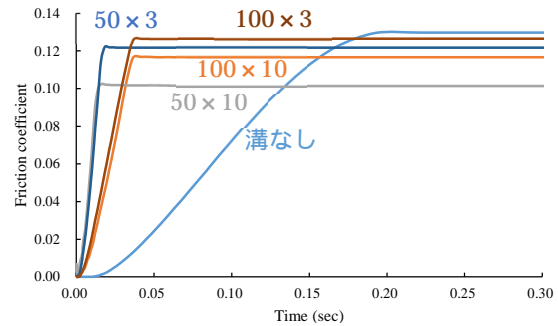


図 7 . 直交溝の諸元と摩擦特性

諸元を決定し、試作を行った。ただし焼入れ鋼に加工を行うことはできず、表面にニッケルリンめっきを施したのち、放電加工で溝を形成した。ローラ 1 周のうち半周だけに溝を形成し、平坦部とテクスチャ部との比較を行った。

測定結果を図 8 に示す。溝部と溝のない平坦部で押付け力発生から 0.025sec 以後に限れば摩

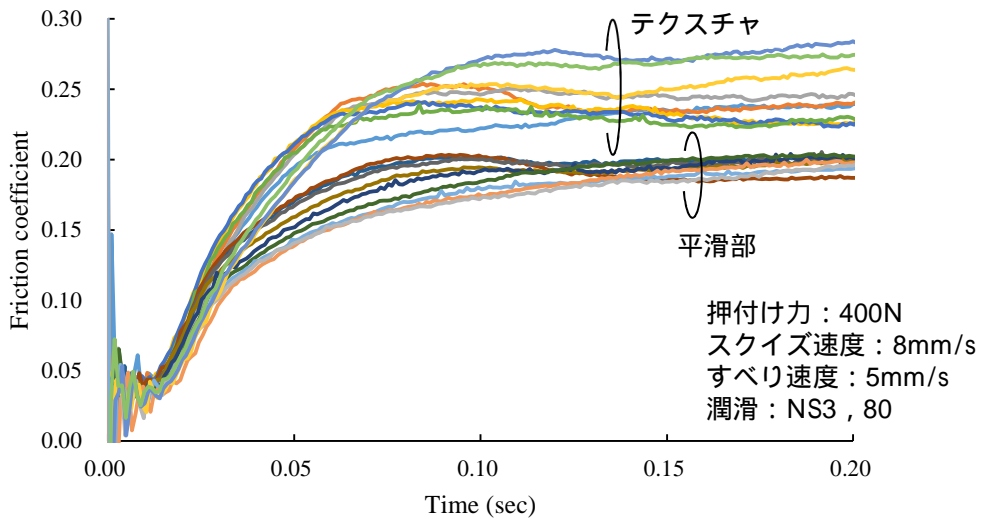


図 8 . テクスチャローラの摩擦測定結果

擦特性は大きく異なっており、溝形成部は摩擦係数の立ち上がりが速く、定常値の摩擦係数も高い。ただし、それ以前の時間については前述の試験機変形により、摩擦特性の差異を判別できていない。図示はしていないが、電気抵抗値は平坦部と溝部で差異はなく接触面積の大小は判別で

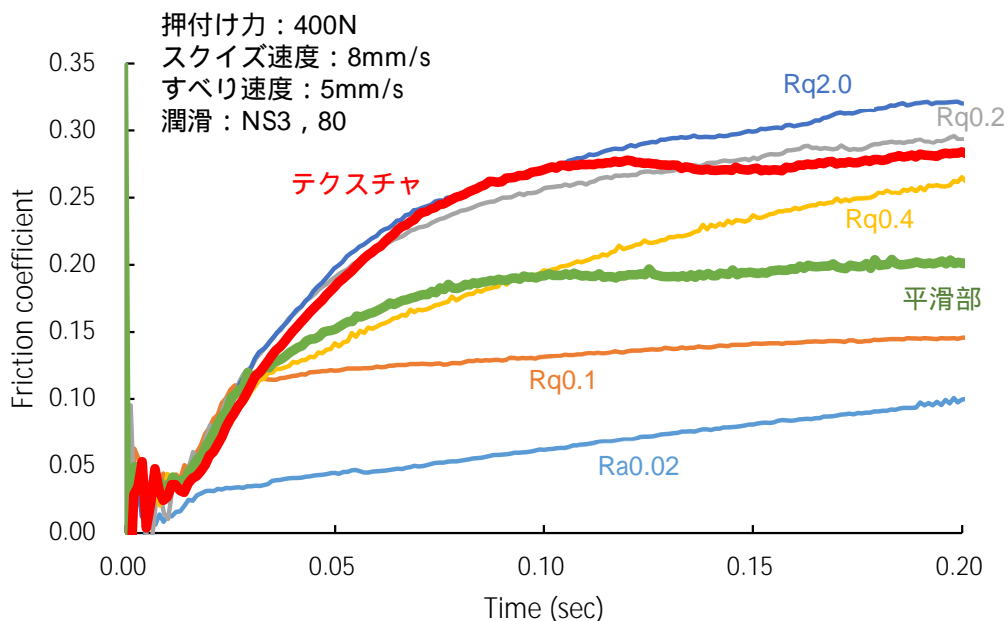


図 9 . テクスチャとノーマルローラの比較

きていない。

図9はテクスチャローラと図2との比較である。テクスチャローラの平坦部の面粗度はRq0.02（鏡面）と同等であった。したがってベース（平坦面）の粗さに対し摩擦係数が向上した、すなわち耐摩耗と高摩擦の両立できた可能性がある。この効果を確認するため今後、耐摩耗試験および精度の高い接触面積測定に取り組む必要がある。

4.4. 結論

- (1) 粗さに対する摩擦係数と電気抵抗：Rq0.02, 0.1, 0.2, 0.4, 2.0の5レベルの粗さにおいて、粗さが大きくなるほど荷重開始時の摩擦係数の立ち上がり速度が向上し、定常安定値も高くなることを実験確認できた。しかしながら電気抵抗値はRq0.02とそれ以外では大きく異なり、接触面積の差異を示すものの、Rq0.1～2.0では有意差がなく接触状態の差を判別することは出来なかった。
- (2) EHL 計算による摩擦係数の算出：電気抵抗による接触状態の精密な測定が困難であることがわかったので、接触を考慮した非定常 EHL 計算を用いて解析を行った。粗さによる流量係数の変化を考慮していない簡易計算ではあるが、定性的に上記(1)の結果を表現できた。今後、計算に粗さの影響を取り込み、より精度の高い解析を行う予定である。
- (3) テクスチャによる摩擦特性の向上：各種形状パターンについて EHL 計算を用いて摩擦係数の計算を行ったところ、すべり方向に対して直角に形成した溝が効果を示した。これはスクイズ膜がすべりによって溝に排出され、油膜が薄くなり、直接接触を促進するためである。計算にて諸元の最適化を行い、製作した試験片の実験評価を行ったところ、摩擦係数の定常値は大きく上昇したが、立ち上がり速度については、試験装置の剛性不足により差異を判別できなかった。
- (4) 荷重開始から 10msec 以内の摩擦特性を測定するためには試験機の剛性アップが必要あり、実機製造バラツキ範囲の粗さによる接触状態を把握するには、電気抵抗法よりも分解能の高い方法が必要であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本 建
2. 発表標題 スクイズ運動を考慮したチェーンCVTの摩擦測定
3. 学会等名 日本トライボロジー学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------