

サノ トシナリ

| | |
|---------|---|
| 氏名 | 佐野 敏成 |
| 学位の種類 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 博第1113号 |
| 学位授与の日付 | 平成30年3月26日 |
| 学位授与の条件 | 学位規則第4条第1項該当 課程博士 |
| 学位論文題目 | トラクションドライブにおけるEHL油膜のせん断挙動と温度に関する研究 (A Study on Shear Behavior and Temperature Distribution of EHL Oil Films in Traction Drive) |
| 論文審査委員 | 主査 教授 糸魚川 文広 教授 中村 隆 教授 北村 憲彦 |

論文内容の要旨

本研究は、実用的なトラクションドライブの設計にあたり、その実運転において最大トラクション係数を逐次推定し、係数変化に適切に合わせた法線力制御の実施による高効率化・小型化を目指すものである。最大トラクション係数の特性は、高面圧下における接触部の油膜内せん断応力のレオロジー特性を反映したものである。即ち係数推定の高精度化に取り組むべきは、油膜せん断現象を物理的に解釈し、必要十分な因子を正確に求めることである。本論文ではこれを目的とし、まずトラクションドライブの構成・機能に併せて周辺環境を考慮することにより、最大トラクション係数の推定に必要な不定の内部変数は唯一「油膜の実温度」であると結論付けた。油膜温度の推定には、油膜入口のせん断発熱による温度上昇の他、油膜厚さ方向の熱伝導から導く温度上昇式に、転動面上の熱源移動による温度上昇式を連成させ、各々が寄与する温度を足し合わせるモデルを提案した。その発熱源となる油膜せん断応力を算出するレオロジーモデルを定式化する必要がある。初めに油膜内で粘性から塑性に遷移するレオロジー領域境界のせん断連続性を、せん断発生層の厚み変化として解釈する新たな提案をした。この解釈を基に接触楕円内のレオロジー特性を粘性と塑性の2つのモデルの組合せで表現した。粘性モデルは理論導出されたEyring式とし、そのレオロジーパラメータには油の分子構造を考慮して実温度で導出された畑の提案式を用いた。この提案式により分子量、大気圧下の粘度や密度などの測定容易な一般特性から実用数値が導出可能となり、レオロジーモデルの一般化や扱いやすさの

観点においても非常に普遍性の高いモデルとなった。これに対して塑性モデルは限界せん断応力式とし、高速二円筒試験機で計測したトラクション係数を用いて実験データ特性と良く一致する実験式を導出した。実験式は圧力と温度の一次関数となり、温度には油膜温度推定値の最大値を用いた。このように塑性モデルには理論的な導出手法が無く、従来から実験式を導く方法がとられていた。本論文では更に一般性を高めるために、圧力と温度の比例係数を理論的に導く手法を新たに提案した。具体的には前述したレオロジー領域境界における物理量の連続性を利用してエネルギーを媒介変数とし、粘性域のレオロジーパラメータを利用して塑性域の分子間相互作用力を求め、発生する応力を推定する方法とした。この時、分子間の相互作用にはレナードジョーンズ・ポテンシャルを利用した。

このように一般性、普遍性を持ったレオロジーモデルの温度関数は実温度の精度が要求される。そこで本論文では厚さ $0.2\mu\text{m}$ の薄膜温度センサを開発し、接触部の油膜内をセンサが通過する際の瞬間的な温度上昇を直接計測して検証を行った。四円筒試験機のローラ転動面全体に厚さ $8\mu\text{m}$ の SiO_2 絶縁膜を RF マグネトロンスパッタ法で成膜し、その表面に Pt をセンサ形状にパターンニングした。接触部外の計測値をベース温度とした温度推定値は、接触部を通過する際の最大上昇温度計測値と一致した。この時の温度推定モデルは、絶縁膜の熱伝導率を精度良く計測し、接触部内における転動面への伝熱を正確に再現することにより良く一致することが判明した。薄膜の熱伝導率計測は一般に困難であるが、ナノ秒サーモリフレクタンス法を用いることで高精度に計測することが可能となった。更に車両搭載用のハーフトロイダル無段変速機を用いた温度計測では、無段変速機能を生かして計測手法を工夫することにより、接触楕円内の温度分布計測にも世界で初めて成功した。

本研究で目的とする、最大トラクション係数の推定精度を検証したところ、多くの条件では精度よく推定できたが、一部の低面圧条件では一致せず、低めに算出されることが判明した。これは温度推定モデルをシンプルにするために最大温度を用いていることが要因と考えた。接触楕円内の推定温度が高い場合、粘性域の面積割合が増加し、発生するせん断応力積分値が低下しやすいと推定した。これを確認するため、熱伝導の基礎式から導かれる解析解を簡易的に組み合わせることで温度分布を効率的に推定できるモデルを提案し、これらは計測した温度分布とよく一致した。また同時に計測されたトラクション係数に対しても推定値と一致することが確認できた。最後に本研究の結果を物理骨格としたリダクションモデルを作成し、車両制御ループ内における最大トラクション係数の逐次推定が可能であることを実証した。最大トラクション係数を推定できることにより初めてトラクションドライブの適切な諸元設計を行うことができる。更に逐次推定することにより、常に所望の設計トラクション係数を運転点とする制御により、トラクションドライブシステムの伝達効率の向上や耐久性の確保、小型化設計等が可能となる。

論文審査結果の要旨

当審査委員会は佐野敏成氏の学位授与に監視，提出された博士論文，論文目録，論文内容の要旨などの書類について審査するとともに，学力の確認を行い，以下の結論を得た。

佐野氏の論文は，トラクシヨンドライブの実用設計にあたり，運転条件に合わせた法線力制御の実施による高効率化・小型化を実現するのに必要な最大トラクシヨン係数の高精度予測をするための基礎的研究である。この最大トラクシヨン係数は高面圧下における接触部の油膜内せん断応力のレオロジー特性を反映したものであるという観点から，係数推定の高精度化において取り組むべきは，油膜せん断現象を物理的に解釈し，必要十分な因子を正確に求めることであると考へた。そのように考えることで，トラクシヨンドライブの構成・機能に併せて周辺環境を考慮すること，最大トラクシヨン係数の推定に必要な不定の内部変数は唯一“油膜の実温度”であると仮定でき，潤滑油が粘性的挙動から塑性的挙動に遷移するレオロジー領域境界のせん断連続性に対して，油膜内せん断発生層の厚み変化で解釈する新たな提案をしている。この解釈を基に，粘性モデルは理論導出されたEyring式とし，そのレオロジーパラメータには油の分子構造を考慮して実温度で導出された畑の提案式を用いた。塑性モデルは限界せん断応力式とし，まず実験データの特性と良く一致する実験式を導出した。更に一般性を高めるために，分子間のポテンシャルエネルギーをレナード・ジョーンズ型ポテンシャルとして，前述したレオロジー領域境界における物理量の連続性を利用して，粘性域のレオロジーパラメータと塑性域の限界せん断応力の圧力・温度特性（比例係数）を理論的に導いた。この一般性を持ったレオロジーモデルの温度依存性を使った予測には，前述の油膜温度が必要となることから，厚さ $1\mu\text{m}$ 程度のEHL油膜より薄く，高圧転がり環境下でも比接触状態を担保できる厚さ $0.2\mu\text{m}$ の薄膜センサを開発し，接触部内をセンサが通過する際の瞬間的な実温度上昇を直接計測した。四円筒試験機のみでなく，車両搭載用のハーフトロイダル無段変速機を用いた接触部内温度計測にも世界で初めて成功した。更には，接触部の温度上昇を高速，高精度に推定できる計算方法を提案し，計測した接触部上昇温度とよく一致することを示した。また同時に計測されたトラクシヨン係数に対しても推定値が一致し，その特性も正確に表現出来ることを示した。

このように，これまで実験的に導出していた最大トラクシヨン係数を，油膜温度を与えれば精度良く推定できることを示したことは，トラクシヨンドライブを様々な機器へ応用展開する基本設計概念の提示を可能にする成果であり，その価値は非常に大きい。また，実用設計が最終目標であっても，実験式に頼らない物理モデルを基礎にした力学モデルを導出する姿勢は研究者としての資質も十分であると認められる。

以上より，当審査委員会は一致して佐野敏成氏の論文審査および学力の確認の結果を合するとともに，同氏への博士(工学)の学位授与を可とすることが適当であるとの結論に至った。