

氏 名	加 藤 康 志 郎
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 15 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 46 年 3 月 山形大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	限界せん断応力特性に基づく EHL トラクション力の評価に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 江村 超 東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 井上 克己

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

近年、工作機械、産業用ロボットの高精度化、自動車などの高速化に伴い、歯車を起因とする振動と騒音が問題視され、歯車に代わる動力伝達要素として、また、精密送り要素として、静寂性に富むトラクションドライブへの関心が急速に高まっている。

トラクションドライブでは動力は滑らかな回転要素間に形成される油膜を介して伝えられることより、伝達可能な力は歯車に比べ格段に小さい。トラクションドライブの伝達力を高めるには、接触圧力を高くし、油のせん断抵抗を十分に引き出す高度な設計が要求される。

ところが、油膜圧力や油膜厚さの評価に多用されている油のせん断特性をニュートン粘性とした従来の弾性流体潤滑 (Elastohydrodynamic Lubrication : EHL) 理論は、高圧下のトラクション力を過大に評価するためトラクション力の評価には用いられず、トラクション力は実験結果に適合する限界せん断応力を含む非線形モデルで評価されている。しかし、トラクション力も、油膜圧力、油膜厚さと同様に潤滑理論に基づき統一的に評価されるべきであり、それには限界せん断応力特性を導入した EHL (NN-EHL) 理論の確立が必要である。しかし、NN-EHL 理論に関する研究は極めて少なく、まして高圧までのトラクション特性を詳細に解析した例は見受けられない。さらに、これまでに報告された限界せん断応力特性は、特殊な装置内で求められており、これを求めることは容易ではない。限界せん断応力特性を簡単に求める手法の確立もまた急務である。

トラクションドライブでは、転がり接触面のスピンやスキューによるトラクション力の劣化も考えられる。スピン、スキューの影響もトラクション力同様に限界せん断応力特性に基づき評価されなければならない。また、トラクションドライブの運動には起動と停止が含まれる。この時、潤滑状態は境界潤滑や部分 EHL の範囲に置かれるが、この様なトラクション力に関して潤滑油の限界せん断応力からの評価はほとんどなされていない。

本研究は、トラクション力および潤滑状態を限界せん断応力特性を用いて統一的に検討し、EHL トラクション力の評価方法を確立することを目的とする。はじめに、油のせん断特性に限界せん断応力特性のモデルを用いた非ニュートン流 EHL 理論を構築し、潤滑状態とトラクション特性に検討を加える。ついで、解析結果に基づき 2 円筒試験の最大トラクション係数より、限界せん断応力を求める手法を検討する。つぎに、これらの結果をもとに、スピン・スキューを含む EHL トラクション力の簡易な評価式の提案を行う。さらに、境界潤滑下、部分 EHL 下のトラクション力と限界せん断応力の関係を明らかにする。

## 第2章 潤滑油の限界せん断応力が弾性流体潤滑特性に及ぼす影響

本章では、潤滑油のせん断特性を図1 (b) とし、2円筒線接触下における NN-EHL 理論の基礎式を導き、これに FEM を適用し、潤滑油の特性が弾性流体潤滑下の油膜圧力、厚さおよびせん断応力に与える影響について高圧を含む広い範囲にわたる解析を行い、ニュートン流 EHL 理論の解との比較を行った。なお、限界せん断応力  $\tau_L$  は、

$$\tau_L = \tau_0 + m_L p$$

とした。ここで、 $\tau_0$  は潤滑油の大気圧における限界せん断応力、 $m_L$  は潤滑油の物質定数、 $p$  は油膜圧力である。

その結果、限界せん断応力の存在はトラクション特性には大きな影響を与えるが、圧力スパイクを減少させる以外、圧力スパイクを除く油膜圧力、油膜厚さにはほとんど影響を与えないことを明らかにした。さらに、油膜厚さは限界せん断応力が存在しても、従来の EHL 解析で評価できることを明らかにした。

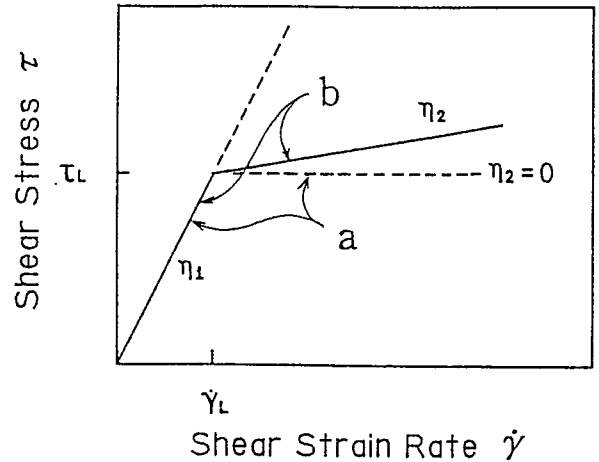


図1 潤滑油のせん断特性のモデル

## 第3章 限界せん断応力を有する潤滑油のトラクション特性

本章では、第2章で構築した NN-EHL 理論を用いて、弾性流体潤滑下のトラクション特性の解析を行い、潤滑油、ローラの材質と形状、運転条件がトラクション特性におよぼす影響を検討した。

その結果、潤滑油の粘度や物質定数、ローラの材質と形状、荷重と転がり速度がトラクション特性に及ぼす影響を明らかにし、伝達力が大きくかつ応答性に優れたトラクションドライブを得るための設計条件を個々の因子につき定量的に示した。

また、高荷重、高速で、さらに、高弾性係数で半径の小さなローラほど、僅かなすべり率でトラクション係数は限界せん断応力より定まる一定値（最大トラクション係数）に達する。この値は限界せん断応力の特性値（ $\tau_0$ 、 $m_L$ ）と他の設計条件より、

$$\mu_{\max} = m_L + \tau_0 \left( \frac{2 \pi R}{w E'} \right)^{1/2}$$

と表される。なお、高圧領域における、本式の結果と解析結果および実験結果との相違は1%にも満たない。ここで、 $E'$  は等価縦弾性係数、 $R$  は相対曲率半径、 $w$  は2円筒に作用する単位幅当りの荷重である。

## 第4章 2円筒試験による限界せん断応力と最大トラクション係数の評価

本章では、2円筒試験機をレオメータに見立て、実験で得られた最大トラクション係数から、限界せん断応力の特性値（ $\tau_0$ 、 $m_L$ ）を求める手法を検討した。最大トラクション係数と実験条件が明らかであれば、第3章の簡易式により  $\tau_0$ 、 $m_L$  を求めることができる。しかし、油膜の温度は実験条件毎に異なるので、 $\tau_0$ 、 $m_L$  の計算精度を高めるにはトラクション係数の温度補正が必要となる。はじめに、トラクション係数の温度補正を検討し、次に、得られた温度補正值をもとにローラの材質と形状が最大トラクション係数に及ぼす影響を検討した。

その結果、最大トラクション係数の温度補正值は高圧下のトラクションカーブの熱影響領域より求められる。また、この値より限界せん断応力の温度特性を知ることができることを明らかにした。

確立した手法を用いて、トラクションオイル Santotrac50 の 313K および Daphne 7074 の 313~373K の  $\tau_0$ 、 $m_L$  を求めた。

さらに、セラミックス製のローラを用いた実験より、高圧下の最大トラクション係数はローラの熱伝導率に大きく影響されるが、形状の影響は少なく無視できること、ローラの材質が最大トラクション係数に及ぼす影響は、油膜の温度上昇とトラクション係数の温度補正值より統一的に求められることを明らかにした。

## 第5章 スピン・スキューを含む EHL トラクション力の評価

本章では、はじめに、スピン・スキューの定義を明確にし、次に限界せん断応力特性に基づくトラクション力の簡易計算を行い、スピン・スキューが EHL トラクション力に及ぼす影響を理論的に調べた。

その結果、限界せん断応力を有する潤滑油において、スピン・スキューの存在は、高圧ほどトラクション力を低下させる。また、スピンに比べスキューの影響は大きく、ごく小さいスキュー角でもトラクション力は大幅に低下することが分かった。

解析結果をもとに、スピン・スキューを含むトラクション力を限界せん断応力を用いて簡単に評価できる簡易式を提案した。

提案した簡易式にはローラのコンプライアンスや油膜や弾性は考慮されていない、そのため簡易式によるトラクションカーブの立ち上がり勾配は実際よりも大きなものとなるが、スピン・スキューの存在によるトラクション係数の低下は実験値のそれと定量的に一致することより、提案式は十分に有効である。

## 第6章 境界潤滑下および部分 EHL 下のトラクション特性

本章では、転がり・すべり往復運動機構を採用し、トラクションドライブの起動と停止に伴う潤滑モードの変化とトラクション係数との関係を調べた。試料間に微小電流を流し、その変化より潤滑モードを推定した。

その結果、境界潤滑、部分 EHL および EHL 下の最大トラクション係数は、膜厚比  $\lambda$  で整理され、最大トラクション係数は、 $\lambda > 1$  では潤滑油の限界せん断応力に、 $\lambda < 1$  では突起干渉に大きく影響されることを明らかにした。

## 第7章 結 論

本研究で明らかにされた主な結論を総括している。本研究により、EHL トラクション力に関する諸特性（油膜厚さ、油膜圧力、スピン・スキューの影響、境界潤滑および部分 EHL 下のトラクション特性）を、潤滑油の限界せん断応力特性を用いて統一的に評価することが可能となった。

## 審査結果の要旨

トラクシヨンドライブ装置は、油膜のトラクシヨン力により動力を伝達する伝動装置であり、可変速伝達が可能なことから自動車用変速装置への適用が試みられているが、その動力伝達の機構は未だ十分明らかになってはいない。近年、潤滑油には粘性挙動を示す限界のせん断応力が存在することが明らかになり、その油膜特性やトラクシヨン特性に及ぼす影響が注目されている。本論文は、弾性流体潤滑理論により、トラクシヨン特性は主として油の限界せん断応力特性に依存して定まることを示し、実験により油の限界せん断応力を求め、これに基づいてトラクシヨン面の性能と設計法を論じたものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、限界せん断応力を有する粘性流体の弾性流体潤滑について解析し、実用上十分な高圧域まで計算した結果について述べている。従来油膜厚さの評価にはニュートン粘性を仮定して得られた評価式が用いられていたが、限界せん断応力を有する非ニュートン粘性流体でも、従来の評価式が有効であることを解析により明らかにしている。これは実用上優れた成果である。

第3章は限界せん断応力を有する粘性流体の弾性流体潤滑理論によるトラクシヨン特性の解析結果である。実用の運転条件では、わずかな滑りで接触面全域が限界せん断応力に達し、最大トラクシヨン力は限界せん断応力に直接関係することを詳細な計算により示している。また、最大トラクシヨン係数を見積もる近似式を提示している。

第4章では、前章の結果に基づき、2円筒試験機をレオメータとして用い、円筒試験で得られた最大トラクシヨン係数から油の限界せん断応力特性を簡便に求める手法を開発し、トラクシヨン油を含めた幾つかの油の限界せん断応力特性を得ている。

第5章では、トラクシヨンドライブでは伝動接触面内速度の不均一がその性能に大きく影響することから、これをスピンおよびスキューの効果として明確に定義し、スピン、スキューのトラクシヨン力に及ぼす影響を解析し、その結果を限界せん断応力を用いて設計式に纏めている。これは有用な結果である。

第6章では、起動と停止に伴う潤滑モードとトラクシヨン性能の過渡状態を調べ、トラクシヨン係数は、油膜厚さが表面粗さより大きい範囲で、油の限界せん断応力に依存することを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、トラクシヨンドライブ装置の基本性能を油の限界せん断応力に着目して明らかにしたものであり、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。