

論文の内容の要旨

論文題目：「トラクションドライブにおける接触部メニスカスの特性を考慮したローラ表面の冷却に関する研究」

学位申請者 平 勇人

キーワード：トラクションドライブ，メニスカス，可視化，圧力推定，冷却

近年、環境問題への意識の高まりから世界中で電気自動車の普及を促進させる動きが出ている。しかし、電気自動車に搭載するバッテリー性能の関係で、航続距離が短いことが課題となっている。これに対し、高速化したモータとそれに対応した減速機を組み合わせることで、動力系全体の小型軽量化および高効率化を行い、航続距離を増加させることが検討されている。従来の歯車方式の減速機では、モータの高速化への対応が難しくなるため、トラクションドライブ方式の減速機と組み合わせることが期待されている。トラクションドライブは、転がり接触部に供給した潤滑油が高圧により固化する弾性流体潤滑部(EHL接触部)を形成して動力伝達を行う方式である。本方式は歯車方式と違って、歯の無いローラによる動力伝達を行うため振動や騒音が小さく、モータの更なる高速化に対応することが可能と考えられる。

トラクションドライブにおいては、EHL接触部を通じて動力伝達を行う構造上、EHL接触部周辺の潤滑状態が動力伝達能力に大きく関わる。例えば、EHL接触部の周囲には、供給された潤滑油によってメニスカスおよびキャビテーションが形成される。これらの形成状態は運転条件により変わることが確認されており、特に高速化に際してはキャビテーション領域の増大やメニスカス後部の油膜破断により、次のEHL接触部が油量不足になることが懸念されている。これらの現象に関する研究は多く見られるが、いずれの研究も実際のトラクションドライブの運転条件と比較すると、非常に低荷重かつ低速の運転条件で観察するにとどまっており、得られた知見がそのままトラクションドライブの改良に適用できるかについては不明である。

また、潤滑油の温度上昇は動力伝達能力の低下につながる事となる。油温の上昇の要因としては、EHL接触部におけるせん断発熱等があるが、そのベースとなるローラの表面温度の上昇も重要である。これに対し、トラクションローラ全体の熱流体解析により、接触部メニスカスの形状が冷却効果に影響を及ぼし得ることが示されているが実際のメニスカス形状の可視化や温度測定による冷却効果の確認を行うまでには至っていない。

以上のように、トラクションドライブにおいては、EHL接触部周辺の潤滑状態が動力伝達能力に大きく関わっていると考えられるため、各種条件を変更した際の転がり接触部の観察を行うことが重要と考えられる。そこで申請者は、自動車用トラクションドライブを想定した転がり実験装置を用いて、まず既存の研究よりも高速の運転条件がメニスカス形状およびキャビテーションの挙動に与える影響について把握することとした。また、これらが変化する理由を明らかにするために、EHL接触部周囲の油膜流れの可視化画像から流速分布を計算するPIV(Particle Image

Velocimetry)解析を利用して圧力推定を行う手法を構築した。この手法を転がり接触部の可視化結果に適用することで、高速化した場合の流体挙動の基本特性について把握することとした。さらに、EHL接触部周辺のメニスカス形状とローラ表面の冷却効果の関係性について、可能な限り高速の運転条件下において、給油条件を変更した場合のローラ表面温度の測定と転がり接触部を可視化し、そのメカニズムの解明を行った。

本論文は、全5章で構成されており、以下に各章の概略を示す。

第1章は、序論であり、転がり接触部の観察における課題、EHL接触部周辺の流体の圧力推定法の検討、ローラ表面の温度測定についての意義を述べ、本研究の目的について明らかにした。

第2章では、運転環境の高速化がメニスカスおよびキャビテーションの形状に及ぼす影響について、可視化を通じて確認した。まず、給油方向と回転方向が同じかみ合い潤滑の条件におけるキャビテーション形状に着目して可視化を行ったところ、既存の研究よりも高速の条件において、キャビテーションは増大せずに縮小する傾向になることを新たに見出した。また、メニスカスが破断する際の流体挙動を可視化したところ、メニスカス後部の破断は大気が強制的に吸引されることで発生することが確認された。更に給油量の増加を行い、メニスカスの形成領域を増大させた場合において、メニスカス後部が破断し難くなるだけでなく、一定の周速からキャビテーション形状が変化しなくなることを明らかにした。なお、これらの可視化結果に対してPIV解析を行うことで、メニスカス内部の流速分布が周速に応じて大きく変化する様子を確認した。

第3章では、第2章で得られた可視化結果に対してPIV圧力推定法の構築を新たに行い、メニスカス内部の圧力分布を算出した。その結果、メニスカス内部では周速の増加とともにメニスカス後部の圧力が低下しており、その中でも最も低圧の領域から大気が侵入することでメニスカスの破断が起きることを明らかにした。また、高速条件では圧力低下の度合いが変化するため、キャビテーションが縮小したことが示唆された。更に供給油量を増加させた実験においては、メニスカス面積が増大した結果、内部の圧力勾配が緩やかになるため、メニスカス破断が抑制されることが示唆された。

第4章では、転がり実験装置の運転条件を更に自動車用トラクションドライブに近づけて、給油条件を変更した場合の転がり接触部周囲のメニスカス形状の可視化とローラ表面の温度測定を行った。まず、給油ノズルの位置や給油方向を変更した場合の比較を行った。その結果、ローラの転がり方向とは逆方向から潤滑油を供給するかみ外れ潤滑の方が冷却効果が高いことを明らかにした。また、メニスカスの可視化結果から、本章で検討した高速条件下では、かみ合い潤滑の場合にEHL接触部後方で油膜破断が生じ、低温の潤滑油が供給されていないことが冷却効果を低下させているとの仮説を立てた。そこで、かみ合い潤滑において、メニスカス後部の二股に分かれた潤滑油を再び合流させる再流動ガイドを設けて温度測定を行った結果、ローラ表面の冷却効果が高まることを確認した。

次に更なる検討として、給油流速を増加させ、かみ合い潤滑とかみ外れ潤滑の両方で温度測定を行った。その結果、かみ合い潤滑では流速の影響が限定的であるの

に対し、かみ外れ潤滑においては、流速を上げ、EHL接触部まで潤滑油が侵入し易くすると冷却効果が高まることが確認された。また、給油方向を回転方向に対して45度の角度をなす斜め方向給油、接触面の真横から給油する水平給油についても比較を行ったところ、水平給油の方が冷却効果が高まることを確認した。

第5章では、本研究の総括として結論を述べた。

以上に述べた通り、本研究では、トラクションドライブのEHL接触部周辺で形成されるメニスカスに着目し、その可視化を行うことで、接触部後方に形成されるキャビテーションや油膜破断のメカニズム解明を行った。その結果、トラクションドライブにおいて形成されるキャビテーション長さには最大値が存在し、周速に対して給油量が不足すると油膜破断を起こすことを確認した。また、キャビテーション形成や油膜破断には、メニスカス内部の圧力変化が関係していることを見出した。更に、ローラ表面の温度測定から、かみ外れ潤滑や再流動ガイドによりEHL接触部の後方に潤滑油を供給することで冷却効果が高まることが示された。このことから、冷却効果は接触部メニスカスの形状が深く関わっており、EHL接触部後方の発熱度合いが高い領域に対して潤滑油を供給することで、冷却効果の向上が見込めるものと考えられる。但し、冷却効果に関係する要因は、例えばローラからの油の飛散など他にも考えられるため、今後ローラ全体の油膜の可視化など、更なる検討が必要と考える。-

以上のように、トラクションドライブにおける給油方法の見直しにより接触部に供給する潤滑油量の低減が可能となり、給油系全体の小型軽量化およびポンプの消費電力の削減につながるといえる。本論文で得られた知見は、トラクションドライブの性能向上および低コスト化に貢献し得るものと考えられる。さらにトラクションドライブだけでなく、転がり軸受などの転がり接触を利用した多くの装置への応用が期待される。