

氏名（本籍） 加藤 慎治（神奈川県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 乙第 1035 号
学位授与の日付 2019 年 9 月 30 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目 ショックアブソーバの性能向上のための動的
摩擦特性に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 佐々木信也
教授 荒井 正行 教授 小林 宏
准教授 宮武 正明 教授 向後 保雄
教授 野口 昭治

論文内容の要旨

1. 研究の背景

自動車の運動性能（操縦安定性，乗り心地）にとって，サスペンション構成部品であるショックアブソーバの寄与率が高いことは，周知の通りである．ショックアブソーバ部品におけるトライボロジー特性の要求は，従来フリクションを極力下げることであった．その結果，様々な工夫がされ，通常の使用であれば数十ニュートンのフリクションレベルとなっている．しかし，最近ではそのフリクションはショックアブソーバの油圧バルブで制御できない微振幅領域や上死点，下死点で発生する作動油の油柱剛性の影響で発生する油圧力の不感帯での減衰力を補うために必要な力であることが解ってきている．そのため，摩擦はショックアブソーバの減衰力の構成要素として重要であり，ショックアブソーバの良し悪しを決める非常に重要な要素となっている．ショックアブソーバは 1mm 以下の微小振幅から数十 mm 領域での往復動摩擦であり，実際に部品で発生している動的な摩擦特性はストライベック曲線で説明が困難な状況が多くみられる．その理由として往復動摩擦の動的摩擦特性を解明する研究が進んでいないことが原因として考えられる．そこで，本研究では往復動で生じる摩擦の動的特性を計測し評価する摺動試験方法，およびその評価方法，往復動の動的摩擦について研究し往復動摩擦のトライボロジーの技術を革新させて自動車の乗り心地を改善させる研究である。

2. 研究実施内容

2.1 「動的摩擦計測システムの開発と評価指標の提案」

2.1.1 「動的摩擦特性の測定方法」

従来の摩擦の速度特性 (μ - v 特性) 評価技術は三角波や回転により一定速度条件により摺動速度を都度変えて測定した往復動摩擦の RMS 平均値を用いていた。ショックアブソーバの摩擦を研究する上で重要となる往復動摩擦における行程切り替わり時のスパイク波形や、その後の動摩擦へ移行する動的摩擦特性を測定評価する必要がある。しかし、動的摩擦は測定が困難であり一般的な摩擦測定評価装置では測定できないという課題があった。さらに、往復動作の摩擦は微振幅などの振幅条件や周波数により、潤滑状態が大きく変化することから、様々な振幅、周波数条件で評価する必要がある。そこで往復動摩擦における動的摩擦測定方法として電磁加振機を用いコンピュータから Sin 波形を出力し、振幅と周波数を制御しつつ様々な加振条件を自動で制御し同時に測定するシステムを構築した。振幅や加振中心は評価対象によって異なる摩擦係数の大きさによって変化しないよう PID 制御により常時修正するようにした。極微小な摩擦力の変化を SN 比良く計測するために各条件で摩擦が安定するようになりし時間と回数を設定し、計測時は 100 波形を加算平均するなどの工夫により動的摩擦特性を精密に評価可能なシステムを開発した。この摩擦測定技術の研究成果により従来評価できていなかった微振幅 $\pm 0.1\text{mm}$ から動的な摩擦の速度特性挙動を捉えることに成功し潤滑油の添加剤による動的摩擦特性が評価可能となった。

2.1.2 「往復しゅう動における動的摩擦特性の指標」

前研究成果で得た動的摩擦測定装置を用い現状使われているショックアブソーバの作動油とオイルシール材の組み合わせを変えて往復動摩擦の動的特性を評価した。その結果、往復動摩擦は作動油とシール材料の組み合わせで様々なパターンの動的速度波形がありストライバック曲線では整理できない潤滑特性があることを確認した。動的摩擦波形のパターンを「行程切り替わり時のスパイク波形」「動摩擦の速度特性」「振幅による摩擦変化」に分類し「スパイク指標」「丸さ指標」「振幅依存指標」の3つに分類し指標化することを提案し、各摩擦特性を計測データから自動で動的摩擦特性の特徴を解析するデータ処理ソフトを作った。

2.2 「微小往復摩擦の動的摩擦特性に及ぼす作動油の影響」

実際のショックアブソーバにおいては、行程繰り返し時の停止や動き出し時にスパイク状の摩擦変化が生じたり、 μ - v 特性に往復周波数依存性などが見られたりする。そこで、新たに開発した動的摩擦挙動計測システムを用い、鉄鋼と銅合金との微小往復動摩擦特性に及ぼす作動油添加の影響を調べた結果、添加剤により摩擦特性に大きな差が生じることが判った。本研究では、摩擦面の機器分析結果をもとに、添加剤の違いによる潤滑メカニズムへの影響について考察を行った。

ショックアブソーバの性能に及ぼす動的摩擦特性の影響を把握することを目的として、摩擦の速度依存性を高精度で計測可能な装置を開発し、動的摩擦特性の特徴を抽出するための評価指標用い作動油の添加剤の影響について調査した結果以下の事が明らかにな

った。

- ・ Cu ボールと鋼の摩擦特性は、. エステル添加剤のみでは微振幅 0. 2mm で潤滑が不足して摩擦が上昇する。
- ・ ZnDTP による潤滑では表面に硫黄、リンなど添加剤由来の反応膜が形成され 0. 5～1%以上添加することで微振幅条件においても潤滑を維持する。
- ・ エステルに ZnDTP の両方を添加すると反応膜の形成は少なくなり、吸着膜による潤滑で微振幅条件における潤滑も維持する。

2. 3 「ショックアブソーバの摩擦特性が及ぼす自動車の官能特性への影響」

作動油添加剤の影響を研究し明らかにした異なる動的摩擦特性を持つ作動油について実車官能評価を実施した。実車評価結果を数値化し動的摩擦特性の各指標と相関分析を実施し、摩擦特性と車両官能特性の関係について関連付けすることを試みた。得られた結果を基にこれまで明確になっていないショックアブソーバの摩擦特性による性能改善に有効となる摩擦特性、悪影響を及ぼす摩擦特性について以下のことが明らかになった。

- ・ 車両の官能特性と相関がある摩擦特性はシール (NBR)、軸受部 (Cu) 共に振幅依存指標であり、油膜切れや添加剤由来の摩擦特性に起因する振幅に依存する摩擦特性であった。
- ・ シール摺動の振幅に依存する摩擦特性は乗り心地、操縦安定性に影響し、微振幅時に摩擦が小さくならない摩擦特性が (振幅に依存しない一定の摩擦特性) が乗り心地、操縦安定性ともに良くなる。
- ・ 軸受部 (Cu 摩擦) は微振幅時に摩擦特性は乗り心地特性との相関があり、微振幅時に摩擦が大きくならない摩擦特性は乗り心地が良くなる。
- ・ 動的摩擦挙動を整理し実車官能評価結果と相関分析をすることで、摩擦が及ぼす車両への影響について把握することが可能となった。

3. 結論

3. 1 微振幅往復動特有の動的摩擦特性を評価システム。

微小振幅往復動試験装置により、これまで困難であった微振幅往復動にて高精度に摩擦特性を測定することが可能となった。また、摩擦の計測から指標数値化まで自動化し、多くの条件を迅速評価するシステムを構築した。

3. 2 動的摩擦特性の指標提案

摩擦の動特性を数値評価する為に微振幅往復動時の特徴について次の 3 つの指標を提案した。

- (1) スパイク指標
- (2) 丸さ指標、
- (3) 振幅依存指標

3. 3 動的摩擦特性に着目した摩擦調整技術

開発した動的摩擦評価装置と評価指標を用い、作動油添加剤による摩擦動特性を調査し、各添加剤が及ぼす摩擦特性と摺動表面で生じる現象を明らかにした。

- ・ ZnDTP 添加剤は振幅依存指標 (AI) の特性に影響する。
- ・ ZnDTP は添加量 0.5%以上入れると微振幅時の潤滑状態が改善され、添加量を増加させるとさらに良くなる。
- ・ 潤滑特性が改善した摺動表面には ZnDTP 由来の硫黄、りんが検出されたことから、反応膜が生成されることが (AI) の特性と関係していることが分った。

4 動的摩擦特性が及ぼす実車官能評特性

ショックアブソーバの性能に及ぼす動的摩擦特性の影響を把握することを目的として、摩擦の速度依存性を高精度で計測可能な装置を開発し、動的摩擦特性の特徴を抽出し実際の車両官能特性との関係について確認した結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 車両の官能特性と相関がある摩擦特性はシール (NBR) , 軸受部 (Cu) 共に振幅依存指標であり、油膜切れや添加剤由来の摩擦特性に起因する振幅に依存する摩擦特性であった。
- ・ シール摺動の振幅に依存する摩擦特性は乗り心地、操縦安定性に影響し、微振幅時に摩擦が小さくならない摩擦特性が (振幅に依存しない一定の摩擦特性) が乗り心地、操縦安定性ともに良くなる。
- ・ 軸受部 (Cu 摩擦) は微振幅時に摩擦特性は乗り心地特性との相関があり、微振幅時に摩擦が大きくならない摩擦特性は乗り心地が良くなる。
- ・ 動的摩擦挙動を整理し実車官能評価結果と相関分析をすることで、摩擦が及ぼす車両への影響について把握することが可能となった。

以上

論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査の付託を受けて、標記 6 名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

最近の自動車の利用状況や今後の展開を見据え、車両の乗り心地や操縦安定性に大きく関与するショックアブソーバについて、その性能向上のための技術開発課題として、これまでほとんど論じられることのなかった動的摩擦挙動に着目した。そこで、動的摩擦挙動を正確に把握した上で、動的摩擦特性と車両の乗り心地や操縦安定性との相関を明らかにし、サスペンションの性能向上を図るための研究開発を行った。

第 1 章では、近年の道路環境の改善からショックアブソーバは微低速・微振幅となる使われ方が増え、油圧力が発生しない摩擦力の寄与率が大きくなっていることから、動摩擦特性がショックアブソーバの性能向上の重要な要因となることが考えられる。実際のショックアブソーバ開発過程においては、実車官能評価で平均摩擦では整理できない結果が得られる場合があり、振幅や速度が常に変化するというショックアブソーバ特有の往復しゅう動条件に起因する問題であることを示した。以上を背景として、ショックアブソーバの性能向上のために必要な技術課題を明らかにした。

第 2 章では、ショックアブソーバの動的摩擦特性計測システムを新たに開発し、実際に使われている作動油を用いて動的摩擦特性を計測した。得られた結果を数値化するた

めに従来からの平均的摩擦係数 μ_{RMS} に加え、新たに 2 つの摩擦特性指標（スパイク指標（ SI ）、振幅依存指標（ AI ））を提案した。

第 3 章では、提案した動的摩擦特性定量化指標を用い、動的摩擦特性を制御するための作動油添加剤処方とそのメカニズムを明らかにした。反応系添加剤はしゅう動界面に形成されるトライボ膜によって微振幅時に摩擦が上昇する現象を抑制する効果があり、動的摩擦特性（ AI ）を制御するための添加剤として $ZnDTP$ の処方が有効であることを明らかにした。

第 4 章では、動的摩擦特性の異なる作動油を選択し、実車に使用した際の官能特性と動的摩擦特性との関係を解析し、動的摩擦特性の定量化指標 AI において良い相関が得られることを示した。 AI が小さい場合には、乗り心地と操縦安定性を両立させながら性能改善が可能であることを確認した。

第 5 章では、本研究で得られた知見について整理し、本研究全体の総括と今後の研究課題及びそれらを解決するための方針をまとめた。

車両官能特性と摩擦特性の関係を解明するために、ショックアブソーバの動的摩擦特性定量化指標を提案し、動的摩擦特性を制御するための作動油添加剤処方を確立した。ショックアブソーバに求められる動的摩擦特性の指標による定量化は、乗り心地と操縦安定性を両立させるショックアブソーバ開発を大きく前進させることが期待される。

以上のことから、本論文が博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。