

京都大学	博士（工学）	氏名	杉 浦 豪 軌
論文題目	動的な接触機構解析を応用した等速ジョイントの動作原理解明		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、自動車のドライブシャフトに一对で用いられている2種類の等速ジョイントを対象に、ジョイント内部の動力伝達機構に起因して実用的な課題となっている力学現象について、接触や摩擦を考慮したマルチボディダイナミクスの数値解析により解明した結果と、これに基づいた解決方策の提案をまとめたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景と本論文の目的および論文の構成について述べている。ドライブシャフトは量販車に多く使われている前輪駆動に必須の部品であり、1960～1970年代に現在のツェッパ形等速ジョイント（タイヤ側に使用）とトリポード形等速ジョイント（デファレンシャルギヤ側に使用）の組合せに概ね定まったことから、1980年代には運動学解析によって等速性などの基本特性を、1990年代には力学解析によってジョイント内部の力を解析評価するための研究・開発が進められてきた。しかしながら、ジョイント内部の動力伝達機構が複雑なため、解析のための定式化と計算方法の構築が煩雑になり、これらの計算方法を設計に十分に活用することは困難であった。他方、2000年頃から急速に進歩したマルチボディダイナミクスの汎用ソフトウェアを用いることで、多数の部品が多点的に接触してトルク伝達する等速ジョイントを対象に実機の機構や形状を詳細にモデル化しても計算できるようになってきた。その結果、積年の未解決課題となっていた、ツェッパ形ジョイントのボール荷重変動、トリポード形ジョイントのスラスト力を模擬できるようになってきたものの、力学現象の原理解明には至っていない。そこで、本論文では、着目した2種類のジョイントの力学課題に対し、マルチボディモデルによる数値解析を活用することで原理を解明するとともに、解決方策を提案することを目的としている。</p> <p>第2章では、第一の力学課題であるツェッパ形等速ジョイントのボール荷重の変動原理解明について述べている。一般的な等速ジョイントでは、交差角が付いた状態でトルクを伝達すると、トルクの変換方向を変えることに起因して副次的な曲げモーメント（二次モーメント）が発生する。そこで、ボール荷重はトルク伝達を担うだけでなく、トルクと交差角から決まる二次モーメントを満たすように増減するとの仮説を立て、従来研究では簡略化した条件で説明されてきた二次モーメントを導出する計算式を、本来のボール6個に拡張して定式化した。これを基にボール荷重変動の波形を求め、設計や製造の制約に影響されない理想機構状態のボール荷重基本波形を明確にした。一方、ツェッパ形ジョイントの実機諸元から構成部品間の接触や摩擦を考慮したマルチボディモデルを作成して実機のボール荷重の数値解析を実施し、同条件のジョイントの実測値との比較検証を行った。このモデルの実機相当の設計諸元を理想状態に変更していくことで、ボール荷重の基本波形が成立することを確認して仮説を裏付けるとともに、基本波形から実機諸元への波形の変化分を比較して設計諸元が及ぼす影響を明らかにした。また、構成部品の一つであるインナレースにスリット加工をすることで、その溝側面にひずみゲージを貼布して実働状態のボール荷重を直接計測できる新規の実験手法を提案し、それにより実験検証を行った。</p> <p>第3章では、前章で得られたボール荷重の変動原理から荷重変動の低減原理を導き、マルチボディモデルによる数値解析で検証するとともに、低減方策を提案してその効果を示した。具体的には、前述のボール6個かつ理想機構状態の二次モーメント式を</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	杉 浦 豪 軌
<p>実機状態に拡張して考察することでボール荷重変動を低減する原理を示した。そして、前章と同様にツェッパ形等速ジョイントのマルチボディモデルを作成し、数値解析によってこの原理を検証した。最後に、この荷重変動低減原理を実現するボール溝形状（同方向傾斜溝）について提案し、数値解析を用いて低減効果を確認するとともに、ドライブシャフトへの適用時に留意すべき点についても示している。</p> <p>第4章では、ドライブシャフトに用いる際に対となるトリポード形等速ジョイントを対象として、第二の力学課題であるスラスト力の発生原理の解明について述べている。すなわち、第2章、第3章と同様に、部品間で発生する接触力と摩擦力を模擬したマルチボディモデルによる数値解析によってスラスト力を算出している。ここでは、第1章の序論で紹介があった従来研究において、部品数が多いため簡易的な表現のみでモデル化されていた、ローラの針状ころ軸受に注目し、独自の接触・摩擦モデルを提案することで、計算時間をかけずに挙動を正確に模擬する方法を提案している。そして、この解析モデルにより得られたスラスト力を実測値と比較することでモデルの妥当性を検証した。さらに、解析結果から接触部位ごとの摩擦力の寄与を求め、針状ころが傾くスキュー挙動による影響は主成分である回転3次のスラスト力には及ばないこと、回転3次のスラスト力発生の主要因がローラとローラ溝のすべり摩擦であることを明らかにした。</p> <p>第5章では、前章で抽出した、ローラとローラ溝のすべり摩擦によるスラスト力を詳細に把握するため、3軸のローラを有するトリポード形等速ジョイントからローラ1軸分の部品を切り出して解析している。ここで、解析モデル中の1軸ローラに実働状態を模擬した運動を与えるため、ローラを支持するローラ軸とローラ溝の間の相対運動について定式化し、これを駆動拘束条件としたマルチボディダイナミクス解析からローラの接触・摩擦挙動を求めた。これより、ローラのすべり摩擦力発生の主要因は、ローラの転動方向がローラ軸の揺動に従って変化するのに対し、ローラの進行方向がローラ溝に規制されるため、それぞれの方向が一致しないことと解明した。さらに、ローラが3軸であるため回転3次スラスト力が発生するとの定説を覆し、回転2次のすべり摩擦力をスラスト力の方向に換算する際、揺動角に関する正弦をとることで回転3次の成分となって現れることを示した。また、解析と同様に実機のローラ1軸分を切り出してローラに対するローラ溝の接触反力を計測する装置を製作し、これを用いて計測した結果との比較から解析モデルの妥当性を検証している。</p> <p>第6章では、前章で示したスラスト力の発生要因を基に低減方策について検討している。トリポード形等速ジョイントに関するこれまでの研究・開発では、試行錯誤によって様々なスラスト力低減方策が提案されてきたが、低減に至る力学的な要因については解明されていなかった。本研究では、設計変更が少なく実現性が高い、ローラ溝の接触様式の変更に着目し、ローラとローラ溝を2点接触させる方法についてその低減原理について検討している。まず机上で理論式を導くことによって行い、それをマルチボディモデルによる数値解析結果と比較した。その結果、スラスト力の低減は、ローラ溝形状のパラメータを適切に設定することで二つの接触点でのすべり摩擦力が相殺されて実現することを示し、低減の効果が実機相当の接触・摩擦状態においても有効であることを示した。さらに、試作した2点接触ジョイントによる実機試験でもスラスト力の低減効果を確認している。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、自動車のドライブシャフトに一对で用いられる2種類の等速ジョイントを対象に、ジョイント内部の機構に起因して課題となっている力学現象について、接触や摩擦を考慮したマルチボディダイナミクスによって解明した結果と、これに基づいた解決方策の提案をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. ツェッパ形等速ジョイントのボール荷重の変動原理について、ボール荷重はトルク伝達を担いながらも交差角付与時に発生する二次モーメントを満たすように変動することを明らかにした。また、設計上の制約や摩擦がない理想的な機構の状態でのボール荷重変動波形は、回転2次の波形となり、変動幅、最大値、最小値のそれぞれが交差角0度のボール荷重値の2倍、3倍、-1倍で表せることを示した。

2. ボール荷重の変動原理に基づく低減原理について、設計諸元や摩擦を考慮した原理に拡張するとともに、ボール荷重が二次モーメントを満たすように変動する際、その要因となるジョイント径方向成分を減らし、変動に寄与しない軸方向成分を増やすことが変動低減につながることを示した。

3. ボール荷重変動を低減する方策として、ボール荷重の軸方向成分を増やすために軸方向に対してボール溝を傾ける同方向傾斜溝を提案した。数値解析では正逆いずれのトルク方向に用いても変動低減効果が得られたが、トルク方向の正逆によってトルク損失が異なるため、不等長ドライブシャフトを適用して常用の交差角が大きい側に損失が減る溝傾角を、交差角が小さい側に損失が増える溝傾角を設定することで左右輪の損失の不つり合いを是正する方策を提案した。

4. トリポード形等速ジョイントのスラスト力の発生原理について、ローラとローラ溝の間でローラの揺動を主要因として発生するすべり摩擦力の溝方向成分がスラスト力となることを示した。1軸のローラと溝では回転1次と3次が主成分であるが、ジョイント本来の3軸では、3分の1周期ずつ位相がずれて回転1次成分が打ち消される一方で、回転3次成分の位相が重なりあって3倍の振幅で主成分となることを示した。

5. スラスト力発生原理に基づいて1組のローラと溝の接触点を2点にすることで、各接触点でのすべり速度がローラ揺動起因分と2点接触によるローラ回転起因分の合成となることを示した。これらの速度比から導かれるすべり摩擦力の溝方向成分を足し合わせると大半が相殺されてスラスト力が減少する原理を解明し、理論式を提案した。

6. スラスト力を低減する方策として、1軸のローラとローラ溝のスラスト力の値は両接触点の位置に影響されることから、接触点が溝幅内に収まる範囲で接触点間距離を拡げることでスラスト力を最小化する方策を示した。

以上のように本論文は、ドライブシャフトに用いられる2種類の等速ジョイントの未解明な力学現象に関する発生原理と低減原理、さらに解決方策を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年2月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。