

博士学位論文審査要旨

2013年12月17日

論文題目：乗用車用タイヤの振動特性に関する研究

学位申請者：松原 真己

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 小泉 孝之

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

代表的な NVH 性能のひとつにロードノイズがある。ロードノイズとは、荒い路面走行時における路面とタイヤの接触に起因する現象である。その為、タイヤ振動特性が大きく影響を与えることが知られている。振動騒音低減の観点からホイール・サスペンション系とタイヤの連成振動を考えた場合、タイヤメーカーではホイール・サスペンション系とタイヤの固有振動数が連成しないように、各種振動モードの固有振動数を任意にコントロールするため、タイヤ剛性の設計指針を提示できるタイヤモデルが必要とされている。また、タイヤは接地・転動することで非接地・非転動時の振動特性から変化することが知られており、その要因について未だ解明されていない。その為、接地・転動することによる動力学的な境界条件の変化がタイヤ振動特性に与える影響を解明することが必要である。本論文ではロードノイズに関するタイヤ振動特性を予測する上で必要となるタイヤモデルの構築と接地・転動時のタイヤ振動特性の変化要因について解明することを目的としている。

本論文は全7章で構成され、第1章では前述の通り、ロードノイズとタイヤ振動特性の関係、タイヤ開発における振動特性の予測・解析方法における課題と本研究に関する必要性について述べている。第2章では、試験タイヤにおける実験モード解析を実施し、トレッド部の振動挙動が不伸張変形仮定を満たすことを示している。第3章では、タイヤの各種振動モードについて力学モデルと Rayleigh 法を用いて解析し、その振動特性について明らかにしている。第4章では転動することにより発生する回転効果がタイヤ振動特性に与える影響を Hamilton の原理より導出した運動方程式より明らかにしている。第5章では接地状態をばねによる拘束系と見立て、接地・非転動時のタイヤ振動特性についてレセプタンス法により拘束系を有するタイヤの運動方程式を導出し解明している。第6章では接地・転動時の振動解析を行い、転動速度違いによる振動特性変化について明らかにしている。最後に第7章において本研究の成果を総括するとともに今後の展望を記している。本研究の成果はタイヤの振動解析に大きく寄与し、タイヤ設計の効率化及びタイヤモデルを用いた振動予測の精度向上が期待できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2013年12月17日

論文題目： 乗用車用タイヤの振動特性に関する研究

学位申請者： 松原 真己

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 小泉 孝之

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2010年3月に修了し、2011年4月に同博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集C編 Vol.77 No.777 pp.2018-2029, SAE International Journal of Passenger Car-Mechanical Systems Vol.6 No.2 pp.1154-1160, SAE International Journal of Passenger Car-Mechanical Systems Vol.6 No.2 pp.1171-1176に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2013年12月7日午前10時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑検討が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、英語に関しては本学工学研究科博士課程（後期課程）在籍中に語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 乗用車用タイヤの振動特性に関する研究
氏 名： 松原 真己

要 旨：

代表的な NVH 性能のひとつにロードノイズがある。ロードノイズとは、荒い路面走行時における路面とタイヤの接触に起因する現象であり、路面の凹凸により励起されたタイヤ振動が、車軸、サスペンション、ボディを介して車室内騒音となる。その為、タイヤ振動特性が大きく影響を与えることが明らかにされており、タイヤを部分構造として組み込んだ車両の NVH 性能予測に関する研究がなされている。

振動騒音低減の観点からホイール・サスペンション系とタイヤの連成振動を考えた場合、ホイール・サスペンション系とタイヤの固有振動数が連成しないようにする必要がある。そのため、タイヤメーカーは各振動モードの固有振動数を任意にコントロールするため、タイヤ剛性の設計指針を提示できるタイヤモデルを必要としている。タイヤ振動挙動の解明に特化した場合、従来広く用いられている有限要素法による数値シミュレーションと比較し、力学モデルによる解析の方が優位である。タイヤの力学モデルの開発は多くの研究が行われているが、横並進モード、面内振りモード、径方向モード、横曲げモードのタイヤ振動特性を包括して解析できるモデルは存在しない。

また、車体メーカーにとっては路面により励起されたタイヤ振動がホイールを通して車軸振動となるため、実稼動状態における車軸振動予測精度は重要である。実稼動状態におけるタイヤ振動特性及び路面入力を如何に表現するかが鍵となるが、タイヤ振動特性に着目すると非接地・非転動時と接地・転動時ではその特性が変化する。この変化要因として考えられるものに、回転効果、接地拘束、およびそれらが複合した場合の影響が考えられる。これらの境界条件の動力学的な変化がタイヤ振動特性に与える影響について十分に解明されていない。

本論文ではロードノイズに関するタイヤ振動特性を予測する上で必要となるタイヤモデルの構築と接地・転動時のタイヤ振動特性の変化要因について解明することを目的に7章で構成している。

第1章では前述の通り、研究の背景について述べるとともに、タイヤ振動に関する解析技術の現状と課題、論文の構成を述べた。

第2章では、非接地・非転動時におけるタイヤ振動特性を明らかにするため、実験モード解析を実施した。径方向モード、横曲げモードの振動形状について把握するとともに、特に横曲げモードについて半径方向と周方向振動の振動分析から、不伸張変形仮定の条件を満たしていることを確認した。

第3章では非接地・非転動時のタイヤ振動特性に着目し、横並進モード、面内振りモード、径方向モード、横曲げモードの振動特性を表現できるタイヤの力学モデルの構築および固有振動数コントロールするためのタイヤ部材剛性設計の指針を示すことを目的とした。まず、円筒形状のタイヤの力学モデルを構築し、不伸張変形仮定より定義したひずみの関係式から固有関数を定義した。その結果、円筒シェル理論に基づき、横並進モード、面内振りモード、径方向モード、横曲げモードを評価できる振動形状を確認した。次に円筒シェル理論に基づき運動エネルギー、ポテンシャルエネルギー、Rayleighの方法より固有振動数を導出した。固有振動数の実験値と解析値を比較し、導出した理論の妥当性を確認した。さらに、導出した固有振動数の式から、タイヤ構造部材の剛性に関する寄与度の式を導出した。これにより、タイヤ構造部材の剛性について、

各振動モードに対する寄与度を算出した。この結果を用いて、各振動モードの固有振動数をタイヤの剛性を設計することでコントロールすることが可能である。また、寄与度の結果から、径方向モード、横曲げモードは曲げ、振りに関する振動を無視できることを明らかにした。横並進モード、面内振りモード、径方向1次モード、横曲げ1次モードはトレッド部が剛体運動する振動モードであり、タイヤ振動は膜振動の挙動であることを明らかにした。以上のように横並進モード、面内振りモード、径方向モードおよび横曲げモードを解析的に同時に考慮する力学モデルを開発し、その妥当性を確認した。

第4章では、非接地・転動時における径方向モードの振動に関するタイヤ振動特性を振動試験から把握し、回転効果の影響を理論解析により解明することを目的とした。まず、突起乗り越し試験を実施し、サイドウォール部振動をレーザードップラ振動計より計測した。その振動成分を分析し、転動時のタイヤにおいて、異なる周波数に対して2次以降の同一モードの移動波が発生することを実測した。次に円環モデルを基に、円筒シェル理論から運動エネルギーとポテンシャルエネルギー、Hamiltonの原理より振動に関する運動方程式を導出した。また、運動方程式から、非接地・転動時における固有振動数の式を導出した。タイヤ固有振動数の実験値と解析値が定性的に同様の傾向を示すことを確認した。さらに、振動変位を回転座標系から慣性座標系に座標変換し、ドップラー効果の影響を考慮した。その結果、慣性座標系から見たモードにおいてコリオリ力とドップラー効果は移動波の励起と固有振動数の分離に影響を与え、遠心力は固有振動数の増加に影響を与えることを解明した。慣性座標系から見た1次モードは遠心力の影響を受けず、コリオリ力とドップラー効果の影響がキャンセルすることで見かけ上、回転効果の影響が現れないことを明らかにした。

第5章では、接地・非転動時における径方向モードの振動に関するタイヤ振動特性を実験モード解析、およびレセプタンス法による接地拘束のモデル化を行った。実験モード解析より接地・非転動時の振動特性変化は接地面拘束によるモード形状変化によるものであることを明らかにした。非接地時の固有振動数1, 2, 3,...次に対して周方向波数が1, 2, 3,...となるのに対して、接地時においては、周方向波数が1.5, 2.5, 3.5,...となることを確認した。次に、第4章と同じ力学モデルを用いて理論解析を行った。固有関数を周方向波数（固有関数）で定義することで、接地・非転動時の固有振動数は非接地・非転動時の固有振動数から簡易的に評価できることを確認した。またレセプタンス法より、接地・非転動時のモード形状および固有振動数は非接地・非転動時の振動モードの重ね合わせで評価できることもわかった。さらに、その振動モードの採用数により固有振動数の予測精度が変化することがわかった。レセプタンス法を用いて3つのモード数の採用範囲で予測した固有振動数と固有関数定義による方法で予測した固有振動数を比較した。その結果、固有振動数の予測結果に対してレセプタンス法の非接地・非転動時の周波数応答関数における卓越ピークに基づき採用モード数を決定する方法が優位であった。また、固有関数定義による方法はレセプタンス法における近傍2つのモードを採用する方法と同程度の精度であることがわかり、簡易的な評価として十分であることがわかった。

第6章では、接地・転動時における径方向モードの振動に関するタイヤ振動特性を第4章、第5章を基に理論解析を行い、回転効果および接地拘束の影響が複合する場合のタイヤ振動特性について解明した。第5章と同様にレセプタンス法を用い理論解析した結果、接地・転動時の振動モードは非接地・転動時の固有モードの重ね合わせで評価でき、固有振動数が予測できることがわかった。また、レセプタンス曲線から接地・転動時のモード形状における周方向波数は近傍に存在する非接地時の固有モードの影響を強く受けることがわかった。また、接地・転動時の振動モードは移動波として励起されており、振動波形の移動方向は重ね合わせに寄与する進行波および後退波の成分の大きさから決定される。また、励起周波数近傍に存在する非接地・転動時の振動モードはタイヤが転動することで発生するコリオリ力の影響を受け変化するため、接地・転動時の振動モードも同様に影響を受け変化することを明らかにした。固有振動数を解析する際、解析精度に影響を及ぼすのは採用モード数であり、採用モード数が同一であれば転動速度に大きく依存せず解析精度

に対する影響は小さいことがわかった。特に、接地・転動時における1次モードは近傍の非接地・転動時1次モードの影響を強く受けるため、定在波が励起されることがわかった。このことから、接地・転動による1次固有振動数低下の主因はゴムの剛性変化によるものであることが明らかとなった。以上のように径方向モードについて接地・転動時のタイヤ振動特性について理論式を導出し、実稼動時のタイヤ振動特性を解明した。

第7章では本研究で得られた知見をまとめている。

以上のように、本論文では非接地・非転動時のタイヤ振動特性を評価できる力学モデルの開発について述べた。また、径方向モードに着目し、非接地・転動時、接地・非転動時、接地・転動時におけるタイヤ振動特性の理論解析について述べた。これら研究はタイヤの振動解析に大きく寄与し、タイヤ設計の効率化およびタイヤモデルを用いた振動予測技術の精度向上が期待できる。