

## 論文の内容の要旨

氏名：高橋俊道

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：タイヤ特性のモデル化と車両運動に与える影響に関する研究

### 1. 本論文の位置づけ

様々なドライバの支援システムや、自動運転を見据えた車両の制御システムの市販車への搭載が近年非常に活発になってきており、その機能も多様かつ高機能化している。それらのシステムの開発においては、様々な運転環境やシーン、ドライバの操作などに対し、期待通りに機能することの検証と性能改良が必要であるが、それら全てを実際の車両やシステムそのものを用いて実験的に実施することは、工数・納期的、コスト的に不可能に近い。そこで近年、シミュレーション計算を活用した車両や制御システムの開発が盛んになってきているが、それらのシミュレーションが実際の車両やシステムの開発で有効に活用されるためには、車両の最も基本的かつ重要な機能である“走る、曲がる、止まる”こと、すなわち車両の運動性能が、正確に模擬できていることが前提となる。なお、車両がその基本機能を果たすために最も重要な要素は、タイヤが路面との間で発生している力であることは説明の必要がないであろう。

そこで筆者は、車両運動シミュレーションの精度向上のためには、そこで用いるタイヤモデルの精度向上が最も重要である、との観点から研究を実施してきた。さらに、作成・開発したタイヤモデルを車両運動解析に適用し、その有効性を検証する研究も実施してきた。以下2項において、過去の研究の問題点や課題とそれが解決された時の効果を最初に述べ、それらに対する研究結果の概要を記す。また、3項において今後の課題を述べる。

### 2. 研究の目的と結果の概要

#### 1) 乗用車と大型車タイヤの各種路面における特性の定量化

タイヤの種類や路面が異なった場合の特性変化を、横並びで定量的に比較検討した報告は見当たらないが、これが明らかになれば、車両運動予測精度の向上のみならず、予防安全システムや車両への外部からの情報提供システムの精度向上も期待できる。

第2章において、Magic Formula タイヤモデルを簡単な操作で作成することができるソフトウェアシステムを開発し、乗用車用および大型車用タイヤのドライ路、ウェット路および氷盤路における測定値を用いてモデルを作成した。そのモデルを用いた解析により、以下のことがわかった。

- ・正規化最大制動力は、乗用車および大型車用タイヤ共に氷盤路上ではドライ路上に比べて大きく減少し、15%程度である。ドライ路では大型車タイヤは乗用車タイヤの7割、氷盤路では5割程度である。
- ・正規化最大横力も、乗用車および大型車用タイヤ共に氷盤路上ではドライ路上に比べて2割程度に減少する。ドライ路および氷盤路において、大型車タイヤは乗用車タイヤの5~6割程度である。
- ・水深1mm程度のウェット路上での乗用車タイヤの最大制動力と最大横力は、ドライ路に比較して2割程度減少する。

#### 2) オーバーターニングモーメントの高精度モデルの開発

車両運動解析においてタイヤのオーバーターニングモーメントは無視されることが多く、考慮する場合でも簡易的な取り扱いをしている。より高精度なモデルが開発できれば、車両の耐転覆性能の予測精度の向上が期待できる。

第3章において、過去に提案されているオーバーターニングモーメントのモデルと測定結果の誤差を、より小さくできる新しいオーバーターニングモーメントのモデルを提案した。そのモデルパラメータの

導出のための計算は、第2章で開発した Magic Formula の同定システムに付加した。また、車両運動シミュレーション計算において新モデルを用いると、より実験結果に近い車両の耐転覆性能予測が可能なることを示した。

### 3) 非平坦路における車両の制動性能

車両運動に関する研究では、そのほとんどで路面は平坦であると仮定しており、路面のうねりや凹凸を考慮したものは非常に少ない。非平坦路上での制動性能に関し、制動停止距離とサスペンションの前後支持特性などの車両要素との関係が明らかになれば、性能向上のための設計指針を得ることができる。なおここで開発する車両運動モデルでは、第2章で開発した手法で作成したタイヤモデルを用いる。

第4章において、非平坦路上での車両の直進制動現象のシミュレーションモデルを開発し、実験によりその妥当性を確認した。次に、車両要素特性と制動性能との関係をモデル計算および実験により調べた結果、寄与率に差はあるが、計算結果は実験結果の寄与の傾向を概ね表わしていることを示した。また、過去に報告例がない、サスペンションの前後支持特性と制動性能の関係をシミュレーションにより解析した結果、その弾性と減衰の両特性が関係しており、ばね下前後振動の位相特性に着目する必要があることがわかった。さらに、路面うねりの波長および振幅と制動停止距離の関係を、モデル計算により示した。車両速度とうねり波長から決まる路面からの荷重変動周波数が、ばね下上下の固有振動数を通過する場合には、路面のうねり振幅の増加にしたがって停止距離が急激に増加する。

### 4) 過渡的鉛直荷重変動時のコーナリング特性

タイヤ横力とアライニングモーメントの応答に関しては、スリップ角に対する過渡特性の研究は多く報告されているが、鉛直荷重変動時の応答は明らかになっていない。実際の路面の凹凸やうねりに起因する鉛直荷重変動時の応答が明確になると、タイヤ特性評価における新たな指標が加わることになる。また、その応答が定式化されると、より現実近く精度の高い車両運動解析を行うことができると期待される。

第5章において、スリップ角を固定し、荷重を過渡的に変動させたときの横力とアライニングモーメントを実験により調べた結果、それらの定常特性では説明できないことがわかったため、微小スリップ角領域に適用可能なタイヤ過渡応答モデルを開発した。計算と実験を比較した結果、応答波形やダイナミッククロスは、荷重変動の波長が概略 2m 以上では、モデルは実験とよく一致することがわかった。続いてそのモデルを改良し、大スリップ角領域まで適用可能なモデルを開発した。改良モデルでは、定常値を表わす項を Magic Formula で置き換え、等価スリップ角と交差長を表わす新たな表記式を導入した。実験結果と比較した結果、横力の応答に関しては、転動波長が 1m 以下の範囲まで一致し、さらに短い波長範囲まで適用できる可能性があることがわかった。

### 5) うねり路面におけるタイヤ横力と車両運動の関係

上記3)で述べたように、路面のうねりや凹凸を考慮した車両運動解析は非常に少なく、鉛直荷重変動時のタイヤ横力の過渡特性が車両運動に与える影響に関する研究は見当たらない。従来の車両運動解析ではタイヤの定常特性のみを考慮しており、過渡特性を考慮した結果と異なることがわかれば、車両運動性能評価の新たな視点を提示することができる。なおここで実施する車両運動シミュレーションでは、第5章で開発したタイヤモデルを用いる。

第6章において、第5章で開発したタイヤ過渡特性モデルを車両運動解析ソフトに導入し、うねりのある路面における車両運動をシミュレーション解析できる環境を構築した。サイン波状のうねりのある路面におけるサイン波操舵角入力に対する車両応答を、タイヤの定常特性のみを考慮したモデルと過渡特性も考慮したモデルを用いて解析した。タイヤ横力の過渡特性を考慮すると、うねりの波長が長い場合は車両の横加速度の平均値が減少するが、波長が短い場合は逆に増加することがわかった。そのメカニズムは、4輪タイヤの荷重、タイヤモデルのストリング前端部の横変位、交差長、等価スリップ角の変動を詳細に解析することにより理解できる。

また、同じうねりのある路面上での車両の定常円旋回運動の解析も実施した。路面のうねり波長が一

定であってもタイヤ荷重変動の周波数は連続的に変化し、車両のばね上やばね下の固有振動数との関係で、車両の横加速度やヨーレートの応答は変化する。うねり波長が長い路面上では横加速度の平均値は減少するが、波長が短い路面上では変動周波数が高い領域で横加速度が増加する。これは上記と同様な詳細解析により説明できる。なお、4輪で発生するタイヤ横力に対しては、荷重とスリップ角、等価スリップ角の位相関係も影響している。

### 3. 今後の課題

以下の点に関する追加実験や検証、モデル開発が必要であると考えます。

#### Magic Formula に関して

本論文で用いた複合スリップ時のアライニングモーメントの実験値はばらつきやノイズが大きく、方程式が妥当なものであるか判断できなかった。今後、より精度の高い測定データを入手し、妥当性を検証する必要がある。Magic Formula は、ドライ路における乗用車タイヤの特性を念頭に開発されたため、大型車タイヤの氷盤路における複合スリップ特性の測定値と、同定した Magic Formula の一致度はあまり高くなかった。この点を改善するためには、Magic Formula の方程式を改良する必要がある。

#### 過渡的鉛直荷重変動時のタイヤモデル

大スリップ角領域まで適用可能なモデルは、転動波長が 1m 以下の範囲まで適用できる可能性があるが、現時点では実験データが少ないため、今後実験を追加して検証する必要がある。

#### うねり路面走行時のタイヤ特性と車両運動

本論文では、車両運動に与えるタイヤ横力の影響を、シミュレーションにより解析したが、今後実験により検証することが望まれる。また、横力のみならず、アライニングモーメントが車両運動に与える影響も解析する必要がある（特にステアリング系に対する影響）。

以上