

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	KAWARA Tetsuaki
氏名	河田 哲明
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博 乙 第 34 号
学位授与	令和 6 年 12 月 19 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 4 項該当
論文題目	モビリティの走行性能に与える懸架機構の影響と設計諸元との関係
論文審査委員	(主査) 教授 神谷 恵輔 ¹ (審査委員) 教授 西島 義明 ¹ 教授 日比野 良一 ² 教授 田中 浩 ¹

論文内容の要旨

モビリティの走行性能に与える懸架機構の影響と設計 諸元との関係

今日モビリティを取り巻く環境の変化が激しい。こうした変化を生む要因としては、国内においては人口減少および高齢化が挙げられる。また、グローバルには環境保護（地球温暖化防止）への機運の高まりが挙げられる。自動運転は働き手の減少を補い、高齢者による認知・操作ミス防止に役立つとして期待されている。そして、自動車動力の電動化は CO2 排出削減の旗頭として期待されている。

このような国を挙げての施策ではあるが、予想された問題や新たな問題が顕在化してくることでそれらの普及にブレーキが掛かりつつある。自動運転普及への障害としては、『すれ違い』が困難な狭い幅員道路比率の高さが挙げられ、Door to door の移動が困難なものにしている。そのため、本格的な完全自動運転への期待感が薄らぎつつある。自動車の電動化への障害としては、バッテリー火災、航続距離、車両価格への懸念があり、最近では電動化によるタイヤ早期摩耗が顕在化してきた。タイヤ摩耗粉はマイクロプラスチックによる海洋汚染につながり、新たな環境問題になりつつある。以上から、自動運転および電動化の本格的な普及には 5~10 年を必要とすると思われる。そし

て、自動運転に関して言えば、乗用車においては将来的にも「人」主体のレベル 3 以下が主流であり続け、商用車においては近い将来レベル 4、5 の完全自動運転になることが予想される。乗用車におけるレベル 3 以下の自動車においては、自らが運転を行う中・低速度の走行においてキビキビしたハンドリングが求められる。そして、高速走行での機敏過ぎない安定した車両挙動との両立が求められることは言うまでもない。そこで、ハンドリング性能に大きく影響するフロントサスペンションのコンプライアンス特性について検討を行った。

モビリティを取り巻くもう一つの環境変化として、高齢者を対象とした施策である「特定原動機付自転車 (20km/h 以下)」や「超小型モビリティ (60km/h)」の新設がある。これらは、運転免許証は返納したくないが、従来の自動車の運転には自信がないといった人向けの近距離移動車としても期待されて登場した。しかし、実情は制限速度および動力性能が低く設定され、速度の高い自動車との混走を強いられることで利用者の精神的負担が大きい。そのため高齢者が扱うにはハードルの高い乗り物になってしまっている。以上から、高齢者にとって近距離移動の乗り物の主役は最高速度 6km/h 以下電動車いすであり続けると考えられる。近年、電動車いすの需要が増加するにつれ、その転倒事故が増加している。電動車いすでの転倒時の衝撃は運転手の体重に車いす重量も加算される。よって、重

¹ 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

症化率が高い。そこで、登降坂路における耐転倒性の高い電動車いすの懸架装置に関して検討を行った。

本論文は全7章からなり、各章の内容について以下に示す。

第1章は緒論であり、モビリティを取り巻く環境を踏まえ本研究の目的と論文構成について示した。

第2章では、自動車用タイヤの自動車を曲げるコーナリングフォース（以降、CF とする）と切ったタイヤを元の方向に引き戻すセルフアライニングトルク（以降、SAT とする）について検討した。これまでのこの2つの力に関する研究は主に 80km/h 以上の高速域を対象としていた。本論文では 175, 195, 225 の3種類のタイヤを用いて時速 10, 20, 30, 100km/h の極低速を含む広い範囲の値を実験的に測定した。なお、取得した CF と SAT は3, 4章のサスペンションコンプライアンス特性の検討に使用した。主な検討結果は以下のとおりである。

1. 低速の操舵開始直後における CF の立ち上がりには遅れが生じる。SAT には遅れが無い。
2. 高速においては CF, SAT とともに遅れ時間が小さく、両者の差異が無くなる。
3. 低速においては定説である $SAT=CF \times \text{ニューマチック}$ トレールにならない条件が存在する。

第3章では、フロントサスペンションのコンプライアンスステアの発生メカニズムを定性的に示し、2章で取得した CF および SAT を用いた CAE 計算により先の発生メカニズムの正しさを検証した。これにより、コンプライアンスステアの設計検討に多大な工数を必要としていたが、設計者が直感的に検討できるようにした。主な検討結果は以下のとおりである。

1. CF および SAT によるコンプライアンスステアの発生メカニズムには3つの形態がある。
2. SAT のよるコンプライアンスステアは CF による物より大きな値を持つ。

第4章では、フロントサスペンションのコンプライアンス特性値を使用することで旋回横力を受けた際のキングピン軸が変位することで生じる弾性主軸が存在すること

を示した。これにも第2章で取得した CF を用いた CAE 計算により、弾性主軸の実態値を明らかにした。従来は、コンプライアンス特性値をコーナリングスティフネスに加工してサスペンション性能の指標としてきたが、本研究の弾性主軸が新たな性能指標になり得ることを示した。主な検討結果は以下のとおりである。

1. キングピン軸の諸元である①キャスト角 ②キャストトレール ③キングピン角 ④キングピンオフセットのすべての値が、弾性主軸により転舵によるタイヤスリップ角を減少させる方向に変化することを示した。
2. 弾性主軸化したキングピン軸特性値と操縦安定性評価における「操舵開始直後の舵の効き」に強い相関関係があることが分かった。

第5章では、従来からある電動車いすの懸架機構を調査し、その最小回転半径や登降坂路での転倒性能について検討を行った。主な検討結果は以下のとおりである。

1. ジョイスティック型6輪電動車いすが同4輪型やハンドルタイプに比べ小回り性に優れる。
2. 市販されているジョイスティック型6輪電動車いすの懸架機構の耐転倒性に前後差が存在する。

第6章では、ジョイスティック型6輪電動車いすの耐転倒性を向上させる新たなパッシブリンクを検討した。その主な検討結果は以下の通りである。

1. 片側3つの車輪を2つのロッカリンクで繋ぎ互に関連性を持たせる新たなパッシブリンク機構を考案した。そして、それが論理的に転倒性能を向上させ得ることを示した。
2. 試作車を使用し、登降坂角度が 10deg から 20deg に向上することを実験的に確認した。

第7章は結論であり、本研究で得られた知見を総括した。

以上により、モビリティの走行性能に与える懸架機構の影響と設計諸元を明らかにすることで『人による運転』に寄与する懸架機構への提案が行えた。電動車いすに関しては、免許返納高齢者の安全な近距離移動を可能にする6輪電動車いすの新たな懸架機構への提案が行えた。

論文審査の結果の要旨

今日モビリティを取り巻く環境の変化が激しい。こうした変化を生む要因としては、国内においては人口減少および高齢化が挙げられる。また、グローバルには環境保護（地球温暖化防止）への機運の高まりが挙げられる。自動運転は働き手の減少を補い、高齢者による認知・操作ミス防止に役立つとして期待されている。そして、自動車動力の電動化はCO₂排出削減の旗頭として期待されている。

このような国を挙げての施策ではあるが、予想された問題や新たな問題が顕在化してくることでそれらの普及にブレーキが掛かりつつある。自動運転普及への障害としては、『すれ違い』が困難な狭い幅員道路比率の高さが挙げられ、Door to door の移動が困難なものにしている。そのため、本格的な完全自動運転への期待感が薄らぎつつある。自動車の電動化への障害としては、バッテリー火災、航続距離、車両価格への懸念があり、最近では電動化によるタイヤ早期摩耗が顕在化してきた。タイヤ摩耗粉はマイクロプラスチックによる海洋汚染につながり、新たな環境問題になりつつある。以上から、自動運転および電動化の本格的な普及には5~10年を必要とすると思われる。そして、自動運転に関して言えば、乗用車においては将来的にも「人」主体のレベル3以下が主流であり続け、商用車においては近い将来レベル4、5の完全自動運転になることが予想される。乗用車におけるレベル3以下の自動車においては、自らが運転を行う中・低速度の走行においてキビキビしたハンドリングが求められる。そして、高速走行での機敏過ぎない安定した車両挙動との両立が求められることは言うまでもない。そこで、ハンドリング性能に大きく影響するフロントサスペンションのコンプライアンス特性について検討を行った。

モビリティを取り巻くもう一つの環境変化として、高齢者を対象とした施策である「特定原動機付自転車(20km/h以下)」や「超小型モビリティ(60km/h)」の新設がある。これらは、運転免許証は返納したくないが、従来の自動車の運転には自信がないといった人向けの近距離移動車としても期待されて登場した。しかし、実情は制限速度および動力性能が低く設定され、速度の高い自動車との混走を強いられることで利用者の精神的負担が大きい。そのため高齢者が扱うにはハードルの高い乗り物になってしまっ

ている。以上から、高齢者にとって近距離移動の乗り物の主役は最高速度6km/h以下電動車いすであり続けると考えられる。

近年、電動車いすの需要が増加するにつれ、その転倒事故が増加している。電動車いすでの転倒時の衝撃は運転手の体重に車いす重量も加算される。よって、重症化率が高い。そこで、登降坂路における耐転倒性の高い電動車いすの懸架装置に関して検討を行った。

本論文は全7章からなり、各章の内容について以下に示す。

第1章は緒論であり、モビリティを取り巻く環境を踏まえ本研究の目的と論文構成について示した。

第2章では、自動車用タイヤの自動車を曲げるコーナリングフォース（以降、CFとする）と切ったタイヤを元の方向に引き戻すセルフアライニングトルク（以降、SATとする）について検討した。これまでのこの2つの力に関する研究は主に80km/h以上の高速域を対象としていた。本論文では175、195、225の3種類のタイヤを用いて時速10、20、30、100km/hの極低速を含む広い範囲の値を実験的に測定した。なお、取得したCFとSATは3、4章のサスペンションコンプライアンス特性の検討に使用した。主な検討結果は以下のとおりである。

1. 低速の操舵開始直後におけるCFの立ち上がりには遅れが生じる。SATには遅れが無い。
2. 高速においてはCF、SATともに遅れ時間が小さく、両者の差異が無くなる。
3. 低速においては定説である $SAT=CF \times \text{ニューマチックトレール}$ にならない条件が存在する。

第3章では、フロントサスペンションのコンプライアンスステアの発生メカニズムを定性的に示し、2章で取得したCFおよびSATを用いたCAE計算により先の発生メカニズムの正しさを検証した。これにより、コンプライアンスステア的设计検討に多大な工数を必要としていたが、設計者が直感的に検討できるようにした。主な検討結果は以下のとおりである。

1. CFおよびSATによるコンプライアンスステアの発生メカニズムには3つの形態がある。
2. SATのよるコンプライアンスステアはCFによる物より大きな値を持つ。

第4章では、フロントサスペンションのコンプライアンス特性値を使用することで旋回横力を受けた際のキングピン軸が変位することで生じる弾性主軸が存在することを示した。これにも第2章で取得したCFを用いたCAE計算により、弾性主軸の実態値を明らかにした。従来は、コンプライアンス特性値をコーナリングステイフネスに加工してサスペンション性能の指標としてきたが、本研究の弾性主軸が新たな性能指標になり得ることを示した。主な検討結果は以下のとおりである。

1. キングピン軸の諸元である①キャスタ角 ②キャスタトレール ③キングピン角 ④キングピンオフセットのすべての値が、弾性主軸により転舵によるタイヤスリップ角を減少させる方向に変化することを示した。
2. 弾性主軸化したキングピン軸特性値と操縦安定性評価における「操舵開始直後の舵の効き」に強い相関関係があることが分かった。

第5章では、従来からある電動車いすの懸架機構を調査し、その最小回転半径や登降坂路での転倒性能について検討を行った。主な検討結果は以下のとおりである。

1. ジョイスティック型6輪電動車いすが同4輪型やハンドルタイプに比べ小回り性に優れる。
2. 市販されているジョイスティック型6輪電動車いすの懸架機構の耐転倒性に前後差が存在する。

第6章では、ジョイスティック型6輪電動車いすの耐転倒性を向上させる新たなパッシブリンクを検討した。その主な検討結果は以下の通りである。

1. 片側3つの車輪を2つのロッカリンクで繋ぎ互いに関連性を持たせる新たなパッシブリンク機構を考案した。そして、それが論理的に転倒性能を向上させ得ることを示した。
2. 試作車を使用し、登降坂角度が10degから20degに向上することを実験的に確認した。

第7章は結論であり、本研究で得られた知見を総括した。本論文により、モビリティの走行性能に与える懸架機構の影響と設計諸元を明らかにすることで『人による運転』に寄与する懸架機構の提案を、電動車いすに関しては免許返納高齢者の安全な近距離移動を可能にする6輪電動車いすの新たな懸架機構の提案を行うことができた。

以上、本論文は、学術的にも、工学的にも高い価値を有し、機械工学分野の発展に寄与すること多大であり、博士（工学）の学位論文として、十分価値あるものと認められる。