

## ブレーキ摩擦力が変化する要因と 摩擦力変化が車の運動に及ぼす影響に関する研究

倉迫 涼一

本論文では、移動手段のひとつである自動車において、ドライバーおよび乗員が心地良い移動時間を過ごせるように、制動時における車の運動を安定させるため、ブレーキ摩擦力に着目してその変化する要因と摩擦力変化が車の運動に及ぼす影響に関して研究を行う。ドライバーのブレーキ操作に対する車の運動を含む安定した制動性能を得るには、機械力学、機構学、熱力学、トライボロジーに基づき、総合的にブレーキ摩擦力を解析する必要がある。

ドライバーが同じように操作しても、制動時の速度、乗員数、積載物、およびブレーキの使用履歴などの影響でブレーキ摩擦力が変化する場合がある。引き摺り試験や低速でのテストピース試験などでは、摩擦力変化の研究は行なわれている。しかし、一般的に使われるような速度で制動中にブレーキ摩擦力が変化する場合はほとんど行われてなく、摩擦力変化の要因は示されていない。一回の制動中にドライバーが車を同じ様に減速させたいとき摩擦力変化が起きると、ブレーキペダルを踏む力を減少させる場合や増加させる場合が起きる。

ブレーキ摩擦力が変化すると車の運動にも影響を及ぼす。例えば、ブレーキ摩擦力の変化が車の前輪で大きくなり、後輪で小さくなるというように逆向きに起きた場合、車のピッチングや上下方向の運動に影響を及ぼし、ドライバーだけでなく、乗員もいつもと違う感覚を覚えることが考えられる。車のステアリング操作による横方向の運動に関しては、乗員の感覚に関する検討も含めて多くの研究が行なわれている。しかし、制動時の車の運動や乗員の感覚に関する研究はほとんど見られない。

ブレーキの機能は、運動エネルギーから熱エネルギーへ摩擦を用いて変換する装置と考えることができ、その性能には摩擦面の状態が大きく関係する。流体摩擦では温度一定で表したストライベック線図がよく用いられるが、ブレーキの場合にはその機能から温度に関係した指標が必要と考えた。ブレーキの温度に関しては、ロータやパッドの制動開始時の温度、および平均的な温度上昇、さらに環境である空気の温度などがある。しかし、こ

れらは摩擦を行なう面から離れている温度や冷却性能にかかわる比較的長い時間の影響を受ける温度であり、直接摩擦面に影響を与える温度ではない。そこで、一回の制動中のような短時間でブレーキ摩擦力が変化する要因を検討するには、摩擦面の温度を指標とすることが必要と考えた。摩擦面の温度は摩擦面を構成する材料に直接影響することから、摩擦面の温度変化を知ることは重要である。すなわち、ブレーキ摩擦力が変化する要因を正確に知ることは、所望のブレーキ制動力を発生させることができるブレーキシステムを設計するために必要である。

本研究の目的は、安定して所望の制動力を生み出すことに加えて、制動時の車の運動や乗員への影響に配慮してブレーキを設計するための指針を明らかにすることである。そのために以下の項目について検討する。

- ・ブレーキ摩擦力が変化する要因としてブレーキのロータとパッド間の摩擦面の温度を考え、摩擦面温度の数値的解析や実験的解析によって摩擦面形状やロータ厚さが摩擦力の変化に与える影響を明らかにする。
- ・ブレーキ摩擦力変化が制動時の車の運動に及ぼす影響を必要最小限の諸元で表せるモデルを提示して解析を行い、車の諸元を設計するための指針と根拠を得る。
- ・制動時の車の運動と乗員の頭部運動の関係を実験的に明らかにし、乗員の頭部運動に配慮して乗員が心地良いと感じる車の運動を設計する手掛かりを示す。

本論文は、八つの章から構成されている。以下は各章の内容である。

第1章では、ブレーキの役割と本研究の課題と目的、研究の概要について述べた。そして、自動車においてドライバーおよび乗員が心地良い移動時間を過ごせるように制動時における車の運動を安定させるために、従来の研究では行なわれていなかった、1回の制動中のブレーキ摩擦力に着目して摩擦力が変化する要因と摩擦力変化が車の運動に及ぼす影響に関して研究を行なうこととした。

第2章では、研究の切り口を述べた。ブレーキの機能を基本的なモデルで説明し、実際のブレーキシステムの構成を示した。そして、運動から熱へのエネルギー変換を行なうパッドとロータ間のブレーキ摩擦力が摩擦面温度の影響を受けると推定したデータを示した。さらに、摩擦力変化が前輪と後輪の制動力配分変化となり、サスペンションの諸元で決まる接地点の移動方向とあわせて、制動時の車の運動に影響する原理を示した。

第3章では、摩擦面温度が摩擦力変化に影響するという推定を検証するための検討を行った。企画設計段階での使いやすさを考慮して、出来るだけ少ない諸元で計算可能な摩擦面を含むロータ厚さ方向1次元の温度分布計算手法を提示した。計算手法を摩擦面直下0.2 mmの温度を実験で計測して検証した。摩擦力が変化したときのパッド入口摩擦面温度が影響あることを計算結果で示した。高温で安定した摩擦力を得るための温度条件を常温から1100℃まで計測したロータ物性値から考察した。さらに、数値計算によって高温、高負荷制動条件において摩擦面形状は摩擦面温度に影響を与えるが、ロータ厚さは摩擦面温度に影響をほとんど与えないことを把握した。

第4章では、第3章で開発した摩擦面を含むロータ厚さ方向1次元の温度分布を計算する手法の確認と適用範囲および実験結果を解析するための検討を行った。ロータ厚さ方向

に半径方向を加えた2次元温度分布計算手法を提示した。2次元計算で求めた制動有効半径付近で温度変化は厚さ方向1次元計算結果と一致しており、半径方向のエネルギー移動はないという仮定は、制動中の摩擦面温度を計算する上では問題ないことを示した。続いて、1次元モデルと2次元モデルの適用範囲を制動終了後、冷却の影響がでる時間まで計算結果を示し明確にした。企画設計段階で必要になる制動中の摩擦面温度の把握には、計算時間が短く、諸元も少ない1次元モデルが有効であり、冷却の影響を考慮する場合には2次元モデルが有効である。実験で摩擦面形状違いによる摩擦力変化が起きた要因が、パッドに含まれるスズの融点との関係があることを2次元温度分布計算結果と試験終了品の分析結果から推定した。以上のことから、ブレーキ摩擦力が変化する要因に摩擦面温度の影響が大きいことを確認できた。したがって、安定したブレーキ摩擦力を得るためには、摩擦面温度を考慮した摩擦面形状の設計が有効であると考えられる。

第5章では、ブレーキの摩擦力変化によって制動力配分が変化したときの車の運動への影響を検討し、第6章の乗員が心地良いと感じる側面視の車の運動を設計する手掛かり、第7章の平面視2自由度モデルと合わせた準3次元の運動解析につなげる。制動時の車の運動を解析するための側面視2自由度解析モデルを提示した。フロント制動力配分が0.8から0.82に0.02変化すると、上下変位、ピッチ角度は10%程度変化することを確認した。フロント制動力配分が0.8と0.82では、接地面最大摩擦力と制動力の差がマイナスになる輪が前輪であるか後輪であるか、およびマイナスである時間の長さに影響することを確認した。計算が簡便であることを利用して、フロント制動力配分0.7~0.9の間での上下変位、ピッチ角度および接地荷重への影響を確認した。この計算で用いた諸元では、フロント制動力配分が0.82付近で接地荷重に変化点が存在することを確認した。

第6章では、乗員が心地良いと感じる車の運動設計へ方向性を示すヒントを得るため、ピッチ方向の運動の向きが乗員に与える影響を実験で解析した。制動減速度と車の運動を模擬できる実験装置を製作した。そして、乗員頭部の運動に着目して計測を行い、車のピッチ方向の運動の影響を確認して以下のことが推定できた。ピッチ方向の車の運動は、前側が下がる向きが乗員頭部に作用する直線加速度を小さくして、頭部とシートの角度差も小さくする。したがって、ピッチ方向の運動の方向性は、一般的な車の運動である前下がり向きである。制動の減速度を前側下がりピッチ運動で模擬するドライビングシミュレータは、頭部に作用するx方向加速度の向きが異なっていること、頭部角度の向きは同じだが発生する要因が異なることが、シミュレータで乗り物酔いを経験する人々がいる理由の1つである。

第7章では、車の軽量化が進んだ場合の車の運動を推定するため以下の検討を行なった。平面視での車の運動を側面視モデルと組み合わせた準3次元モデルとして解析する手法を開発した。フロント制動力配分0.7~0.9の間でy方向速度とz方向角速度の影響を計算で確認した。計算に用いた諸元では、y方向速度とz方向角速度の絶対値が、フロント制動力配分が0.82付近で最も小さくなり、フロント制動力配分が0.76~0.77および0.83~0.84の間で急に変化することとその要因も推定した。制動初期の制動力配分に影響するリア制動力の発生遅れ時間が、y方向速度、z方向角速度へ与える影響を確認した。フロント制動力の発生時間からのリア制動力の遅れ時間を増やしていくと、y方向速度、z方向角速度が0から変化するリア制動力の遅れ時間が存在する。計算結果は実験により検証し、メ

カニズムを推定できた。

提示したブレーキの摩擦面温度を含む厚さ方向 1 次元温度分布計算手法は、車の企画設計段階で使いやすいように、後の設計段階で変更困難な空間形状を決める必要十分な力学的な根拠を示せる。さらに、摩擦面温度を含む厚さ方向と半径方向 2 次元の温度分布計算手法は、冷却性能の設計から実験解析まで広く検討を行なえる手法と考える。そこで、テストピース試験の装置や形状、試験条件も摩擦面温度を考慮して決めることで、安定した性能把握ができる装置開発も可能になる。摩擦材料の性能をテストピース試験で摩擦面温度との関係を把握した上で、実機の設計を行なえば、効率のよいやり直しの少ない摩擦材料開発や車への適合が行えると考えている。

制動時の車の運動解析モデルは、必要最小限の諸元で制動時の過渡的な運動を模擬できていることを実験で検証した。乗員が心地良いと感じる車の動かし方を実現する接地点の動かし方を考慮した、サスペンション設計の指針を与えることができると考える。

乗員が心地良いと感じる車の動かし方は、実験によって乗員頭部の運動に与える影響が小さいピッチングの向きについて手掛かりが得られた。したがって、今後の生理指標などを考慮した、量的な検討へと発展できると考える。