

湿潤状態における軸ごとの車輪とレールの粘着係数を考慮した ブレーキトルクの配分に関する研究

坂西 空* 林 世彬 須田 義大 (東京大学)

横江 隆司 藤本 啓二 岸田 泰司 (西日本旅客鉄道)

Study on the allocation of braking torque considering the adhesion coefficient between wheel and rail
for each axle under wet conditions

Sora Sakanishi*, Shihpin Lin, Yoshihiro Suda (The University of Tokyo)

Takashi Yokoe, Keiji Fujimoto, Taiji Kishida (West Japan Railway Company)

The adhesion coefficient between wheel and rail decrease under the wet condition, and skid may occur when railway vehicle is breaking. This is a serious safety risk to the operation of vehicle. In some long train sets, braking force of leading car is set weak and that of trailing cars are set strong. But this method is difficult to be applied for short train sets. In this paper, we study on the allocation of braking torque for each axle using MBD simulation so that the railway vehicle can fully utilize the adhesion force.

キーワード：鉄道車両，ブレーキ性能，粘着，滑走，湿潤条件，マルチボディダイナミクスシミュレーション，
(Railway vehicle, braking performance, wheel-rail adhesion, skid, wet conditions, MBD simulation)

1. 序論

鉄道において，車輪とレールの間の粘着力は車両の運動を支配する重要な要素である。しかし，雨天時など車輪・レール間に水が介在する条件では摩擦係数が減少するため，ブレーキ時に滑走が発生し制動距離が延びるなど安全上の問題が生じる。

雨天時の車輪・レール間の摩擦係数は，レール上の水膜が車輪の通過により部分的に除去されることにより，編成の先頭軸より後方の軸の方が摩擦係数が高くなると考えられる。この特性を利用したブレーキ手法として，新幹線車両において先頭車両のブレーキ力を低く，中間車両のブレーキ力を高く配分している事例がある⁽¹⁾。しかしながら，1両ごとにブレーキトルクを配分する手法は，短編成の車両に適用することは困難である。

また，水膜介在時の車輪・レール間の摩擦係数を理論的に解明する取り組みとして，大山らによって弾性流体潤滑 (EHL) 理論に基づいたモデル化⁽²⁾がなされている。王らは同理論を楕円接触混合熱弾性流体潤滑理論に発展させ数値解析を行うとともに，模型実験により液膜厚さと接線力係数の測定を実施し⁽³⁾⁽⁴⁾，複数の軸が連続して走行する場合の1軸ごとの接線力係数を明らかにした⁽⁵⁾。

筆者らは前報⁽⁶⁾において，王らの研究結果を実車のブレーキ制御に反映する手法を検討するため，Simpack を用いて滑

走再粘着制御を有する鉄道車両のマルチボディダイナミクスシミュレーションモデルの構築を実施した。

本研究では，前報のモデルを活用し，短編成の車両において各軸の粘着力を最大限に利用するため1軸ごとにブレーキトルクの配分を変化させる手法について，マルチボディダイナミクスシミュレーションを用いて検討する。

2. 本研究で使用するシミュレーションモデル

〈2・1〉 モデルの概要 前報⁽⁶⁾においてモデリングの対象とした車両は，西日本旅客鉄道の保有する車両のうち，短編成で走行する形式の1つである。同車両の最高速度は110km/h，常用最大ブレーキによる減速度は3.9km/h/sである。

本稿では，前報のモデルに対して連結器を追加し，2両編成モデルを作成する (図1参照) とともに，先行研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾に基づいて各車輪とレール間の摩擦係数の設定を行った。

連結器は車体に対し3方向の回転と前後方向の並進の自由度を持ち，前後方向には緩衝器を模したばね要素を設定している。

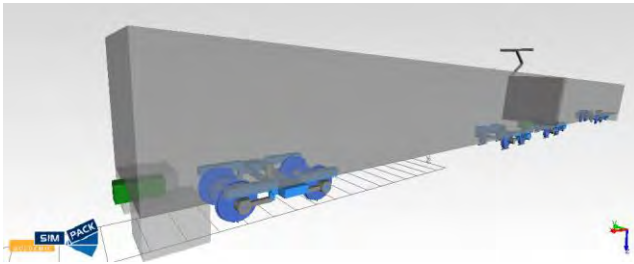


図 1 2両編成モデルの外観

〈2・2〉 車輪・レール間の摩擦係数 王らの模型実験では、車輪・レール間に介在する液体として水ではなく油を使用した。そのため、雨天時を想定した摩擦係数の設定にあたり、実験結果の接線力係数の数値をそのまま使うことはできない。

本研究では、進行方向 1 軸目の摩擦係数は適宜設定し、2～5 軸目の摩擦係数は軸ごとの接線力係数の測定結果より 1 軸目の接線力係数に対する 2～5 軸目の接線力係数の比を計算し、各回の結果の異常値を除く幾何平均をとったものを 1 軸目の摩擦係数に乗じることとした。また、実験の行われていない 6 軸目以降については、4 軸目と 5 軸目の摩擦係数の比を外挿した (表 1 参照)。

表 1 1 軸目の摩擦係数に対する後続の軸の摩擦係数の比

軸	摩擦係数の比
2	1.0167
3	1.0624
4	1.1144
5	1.1550
6	1.1972
7	1.2409
8	1.2862

また、車輪の滑り率により摩擦係数が変化することが知られていることから、王らの理論計算結果に基づいて、滑り率 0 のときの摩擦係数を 1 としたとき滑り率 2% で 1.865 となるように設定した。

3. 湿潤条件を模擬したシミュレーション

〈3・1〉 シミュレーション条件 平坦で十分に長い直線軌道においてモデリングの対象車両の最高速度 110km/h からのブレーキシミュレーションを行った。なお、シミュレーション開始時点では惰性走行とし、5 秒後より停止するまでブレーキを作用させた。

各軸に作用させるブレーキトルクの合計は実車の常用最大ブレーキの減速度に合わせて設定し、実際のブレーキ制

御に近い静止時の軸重に比例した配分 (以下、均等ブレーキと呼ぶ) と、別途乾燥条件で行ったシミュレーションにおける減速時の軸重と湿潤条件での設定摩擦係数の積に比例した配分 (以下、傾斜配分と呼ぶ) の 2 条件を設定した。また、実車と同様に台車単位での滑走制御を実施した。

1 軸目の摩擦係数は、0.055 とし、後続の軸は 2・2 節の通り設定した。

表 2 各軸のブレーキトルク

軸	ブレーキトルク [Nm]	
	均等ブレーキ	傾斜配分
1	5104	4804
2	5104	4413
3	5248	5237
4	5248	4695
5	5248	5841
6	5248	5198
7	5104	5802
8	5104	5418

〈3・2〉 結果 両条件における輪軸角速度のシミュレーション結果を図 2 及び図 3 に、ブレーキ開始後の走行速度と走行距離を図 4 に示す。

図 2 より、各軸に均等にブレーキをかけた場合、先頭より 1, 2, 4 軸目でブレーキ開始直後より滑走が生じたことがわかる。3 軸目より 4 軸目の方が摩擦係数が大きいにもかかわらず 3 軸目は滑走していないのは、ブレーキをかけたことに伴う輪重移動のためである。その後、滑走した各軸は滑走再粘着制御により再粘着するが、2, 4 軸目は同制御の解除後に滑走を開始し、再粘着と滑走を繰り返した。

また、ブレーキ開始から停止までの時間は約 31 秒であった。

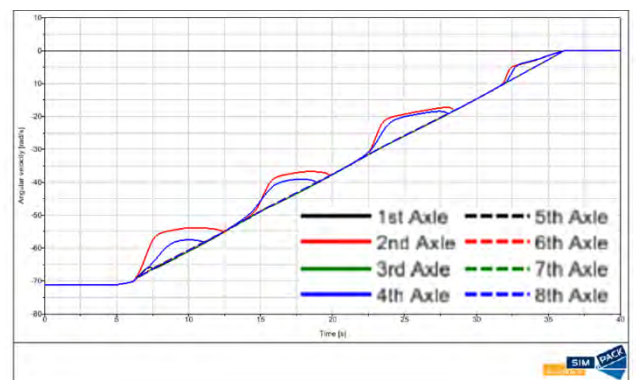


図 2 輪軸角速度 (均等ブレーキ)

図 3 より、各軸のブレーキトルクを軸重×摩擦係数に比例して配分すると、全ての軸で滑走が発生せず、粘着したまま停車できたことがわかる。

また、ブレーキ開始から停止までの時間は約 28 秒であった。

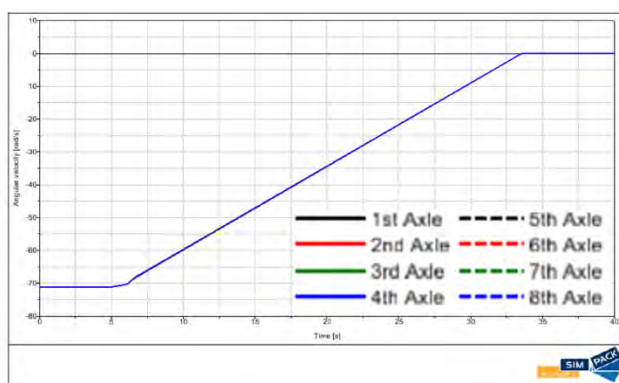


図 3 輪軸角速度 (傾斜配分)

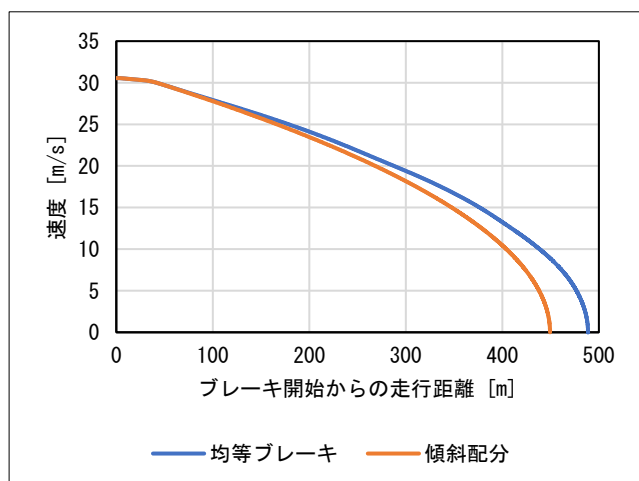


図 4 ブレーキ開始後の走行速度と走行距離

均等ブレーキ時の制動距離は約 489m、傾斜配分時の制動距離は約 449m であった。(図 4 参照)

4. 考察

図 2～図 4 より、各軸のブレーキトルクを軸重×摩擦係数に比例して配分することによって、制動時間を 3 秒程度、制動距離を 40m 程度短縮できることがわかる。この結果より、ブレーキトルクの配分が列車の走行安全性向上に寄与するものと考えられる。

また、ブレーキトルクの配分により滑走の発生が回避できており、車輪のフラットの発生も抑制できると考えられる。

5. 結論

本研究では、雨天時を想定した低摩擦係数条件における、2 両編成の鉄道車両のブレーキシミュレーションを実施した。

その結果、制動時にブレーキトルクを各軸の軸重と摩擦係数の積に比例して配分することにより、滑走を回避し、制動距離と制動時間を短縮できることを示した。

文 献

- (1) 内田清五, 小原孝則:「新幹線高速化のためのブレーキシステム」, RRR, Vol.49, No.11 pp.15-20 (1992)
- (2) 大山忠夫, 陳樺, 石田誠:「鉄道のレールと車輪間の EHL」, トライボロジスト, Vol. 49, No. 4 pp.316-322 (2004)
- (3) 王宇, 林世彬, ホーフノータイヤンスバタット, 須田義大, 三宅宏和, 芦田義朗:「液体潤滑不足条件における車輪とレールの粘着特性に関する研究」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019)講演論文集, S1-2-1 (2020)
- (4) 王宇, 林世彬, 須田義大:「湿潤状態における車輪とレールの粘着係数の数値解析と模型走行車両による実験調査」, 第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2020)講演論文集, JSCM-1-4 (2020)
- (5) 王宇:「レール湿潤状態を考慮した逆踏面勾配独立回転車輪を有する鉄道車両のダイナミクスと制御に関する研究」, 東京大学博士論文 (2021)
- (6) 坂西空, 林世彬, 須田義大, 岸田泰司, 藤本啓二, 横江隆司:「滑走再粘着制御を考慮した鉄道車両のマルチボディダイナミクスモデルの構築」, Dynamics and Design Conference 2022 講演予稿集, 416 (2022)