3211 車輪/レール間の摩擦制御による曲線通過性能向上法に関する研究 (数値シミュレーションと走行装置による内・外軌塗布の影響の検討)

# Study on improving method of curving performance with friction control between wheel/rail (Effect of spraying the friction modifier on the inner/outer rail at the curve section)

[機]須田義大、[機]岩佐崇史、[機]小峰久直、藤井毅(東京大学生産技術研究所) [機]松本耕輔、生方伸幸、荻野智久(帝都高速度交通営団) [機]中居拓自(住友金属) 岸本康史(住友金属テクノロジー)

Yoshihiro SUDA, Takeshi IWASA, Hisanao KOMINE, Takeshi FUJII (University of Tokyo) Kousuke MATSUMOTO, Nobuyuki UBUKATA, Tomohisa OGINO (Teito Rapid Transit Authority) Takuji NAKAI (Sumitomo Metal Industries, LTD) Yasushi KISHIMOTO(Sumitomo Metal Technology, Inc)

Key Words: Railway vehicle, Friction control, Curving performance, Scale model, Experiments with model

#### Abstract

The concept of controlling car dynamics with the parameter of creep force by using friction modifier was proposed by the authors. The fundamental experiment of evaluating creep force characteristics with or without friction modifier by the two-roller-rig testing machine was performed. On the other, on-board spraying friction modifier system has been developed and equipped with the service car showing the effect of improved carving performance. This paper presents experimental and theoretical results of improved curving performance by the proposed method of friction modification between wheel and rail with scaled model vehicle.

#### 1. 緒言

狭い国土や起伏の激しい地形、大都市の過密交通システム を有するわが国にとって、鉄道車両の急曲線通過性能向上は 重要な課題の一つである。従来の車両設計の視点では、車輪 踏面勾配を大きく、軸箱前後支持剛性を低くすることが解決 法として有効であるとされてきた。

しかし、一般に曲線通過性能(自己操舵性)と、高速走行 時の直進安定性(蛇行動安定性)は相反するため、これらを 両立するための研究が、各方面から行われてきた。近年実用 化してきた各種自己操舵台車や、後輪に独立回転車輪を用い た前後非対称台車の開発などがその一例である。これらは台 車を構成する要素である輪軸や支持剛性、リンク機構などの 構造・形状・力学的特性に着目したものである。

それに対して筆者らは、近年開発された摩擦調整材 (KELTRACK<sup>™</sup> HPF)[1]を用い、かつそれを車上から塗布 することによって、急曲線通過性能向上を主目的とした合理 的な車輪/レール間の摩擦制御手法を提案した[2-6](Fig. 1)。 これは、車両の運動性能を決定する車輪とレールの接触とそ れによって発生するクリープ力自体を設計変数として捕ら え制御の対象とするという、新しいコンセプトに基づくもの である。既に、摩擦調整材を用いた場合の基本的なクリープ 力特性を調べるための、2ローラー試験機を用いた基礎的な 検討[7-9]、理論解析による摩擦制御による急曲線通過性能向 上メカニズムの検討[3,4]、実システムの開発と試験[10]、模 型試験機を用いた模擬実験[13]を行い、その効果を明らかに してきた。



Fig. 1 Concept of friction control

本研究は、摩擦制御による急曲線通過性能向上のメカニズ ムを明らかにし、効果的な制御手法を確立することを目標に、 摩擦調整剤塗布状態における車両運動シミュレーション、2 ローラー試験機[7]を用いた基礎特性試験、1/10 スケールの走 行試験機による走行実験を組み合わせ、摩擦制御の効果を検 討したものである。

#### 2. 摩擦調整材の基礎特性

摩擦制御の実験・数値シミュレーションを行うに際し、摩 擦調整材の基礎特性を把握することは重要である。本章では その実験結果について述べる。

#### 2-12円筒式転がり接触試験機

実験には2円筒式転がり接触試験機を用いた。これは2つ の円筒に微小な滑りを与えながら接触転動させることによ り、滑り率に対する接線力特性を測定する装置である。

[Na03-51] 日本機械学会第 10 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2003-12.9~11. 川崎〕

この試験機の模擬レール上に摩擦調整材を適量撒布し、摩擦制御時のレール/車輪間の摩擦基礎特性を調べた。



#### 2-2 摩擦基礎特性試験結果

得られた摩擦特性線図を Fig. 3 に示す。無塗布状態(DRY) に比べ、摩擦調整材を塗布した場合 (FC) は滑り率が小さい 領域でトラクション係数が低く、大きい領域に向かうにつれ て徐々に摩擦係数が増加する傾向 (Positive Friction) がある ことが確認された。また、試験を繰り返すうちに徐々に摩擦 調整材が磨耗し消費され (INT)、やがて無塗布状態に漸近す ることも確かめられた。



Fig. 3 Fundamental characteristics of friction controller (Exp.)

#### 2-3 摩擦調整材塗布モデル

Fig. 3のような摩擦特性が得られた主な要因として、摩擦 調整材の材料特性と、摩擦調整材が模擬レール上に点在して いたことが考えられる。

そこで摩擦調整材点在状況下における接触力解析を行う ために、Kalker の FASTSIM[13]に薄膜潤滑理論[14]や境界潤 滑理論[15]の要素を組み込み、摩擦制御時の摩擦特性を表現 できる解析モデルを作成した。式(1)は本モデルで利用した境 界潤滑理論の式であり、それぞれ *A<sub>r</sub>* は真実接触面積、*s<sub>i</sub>* は 真実接触点のせん断強さ、αは2物体の真実接触面内におけ る直接接触の占める割合を表している。

$$F = A_r \{ \alpha s_m + (1 - \alpha) s_i \}$$
(1)

Fig. 4 に、上記で説明したモデルを使って解析した摩擦調 整材点在状況下における接触力解析の結果を示す。

解析結果においても、摩擦調整材の塗布量が多くなると Positive friction の傾向が強まり、摩擦調整材塗布による摩擦 特性の変化をよく説明できていることがわかる。詳細は、文 献[16]に述べてある。



Fig. 4 Fundamental characteristics of friction modifier (Sim.)

#### 3. 急曲線通過の数値解析

急曲線通過性能が摩擦制御によりどのように向上される かを考察するため、マルチボディダイナミクス解析を行った。 本性ではそれに対する考察と結果について述べる。

### 3-1 摩擦制御と輪軸回転数

摩擦制御時の曲線旋回性解析に、ここでは新しい概念として 輪軸の回転数の影響を考慮し、検討を行った。

たとえば後輪軸に着目し、簡単のため線形クリープ・非フ ランジ接触・横滑りゼロ・輪重均衡・定常を仮定する。この とき輪軸回転軸周りのモーメント釣り合い式と滑り率の定 義式より、以下の式が導出される。

Fig. 5 は y を横軸、 $\kappa_{in}/\kappa_{out}$  を縦軸にとったグラフ中に、 式 (2) をもとに $\omega/V_0$ が一定となる軌跡を示した模式図であ る。この図中において、曲線部内軌側の摩擦制御を行うこと を考えると、図中〇から★に移動することに相当する。つま りこの式は、摩擦制御により車速に対する輪軸の回転速度の 比が変化する。すなわち車速 $V_0$ が一定であっても摩擦調整 剤塗布状況によって輪軸回転速度 $\omega$ が変化するということ を示している。



このことから、摩擦制御時におけるダイナミクス解析を行う 際には、従来の鉄道車両運動解析では変数として考えられて いなかった輪軸の回転方向の自由度を考慮に入れた解析す る必要があることがわかる。

# 3-2 解析プログラム

前節の考察から、後述する検証実験で用いる二軸台車 1/10 スケールモデル単体を、両輪軸の回転方向を含む 12 自由度 のマルチボディーシステムとしてモデル化した。その概略を Fig.6に示す。自由度は、台車について前後・左右・ヨー・ロー ルの4自由度に考慮し、輪軸については、前後・左右・ヨー・ ピッチ(車輪回転)の4自由度に考慮した。

運動方程式は、式(3)~(6)のように表すことができる。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & m_j \end{pmatrix}$$
(3)  
$$\mathbf{C} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \left( \frac{\partial U_C}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)$$
(4)  
$$\mathbf{K} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial U_K}{\partial \mathbf{q}} \right)$$
(5)  
$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F}$$
(6)

ここで、 M は質量マトリクス、 C、 K はそれぞれ減衰、 弾性マトリクスであり、 $U_C$ 、 $U_\kappa$ はそれぞれ減衰エネルギ 一、弾性エネルギーである。外力Fは軸ばね上下方向弾性力、

車輪接触力、重力分力、遠心力、その他の外力に整理して計 算した。



3-2 解析結果

上記モデルを用い、摩擦制御の有・無の条件に於いて急曲 線通過時の車両のダイナミクスを評価した。解析に用いたパ ラメータを Table 1 に、解析結果を Table 2 および Fig. 7 にそ れぞれ示す。ただし、車輪/レール間の接触力解析には、2章 の実験結果に基づき同定された3次関数(Cubic-Saturation)モ デルを採用した。

シミュレーション結果から、摩擦制御により車両のダイナ ミクスに変化が生じ、急曲線におけるフランジ反力が減少す ることが導き出された。また、前軸外軌横圧の低減を目的と するならば、曲線内軌側のレールにのみ摩擦調整材を塗布し た場合にその効果が強く現れるということが示された。

| Table 1 Property of constants at those simulations |  |  |  |
|--|--|--|--|
| Mass (axle)  | 4.3[kg]<br>73[kg]<br>3.9753 • 10 <sup>-3</sup> [kgm <sup>2</sup> ] |  |  |
| Mass (body)  |  |  |  |
| Inertia around y axis (axle)                       |  |  |  |
| Inertia around z axis (axle)                       | 5.8863 · 10 <sup>-2</sup> [kgm <sup>2</sup> ]                      |  |  |
| Inertia around x axis (body)                       | 0.58083[kgm <sup>2</sup> ]   |  |  |
| Inertia around z axis (body)                       | 3.0948[kgm <sup>2</sup> ]  |  |  |
| Distance between suspensions                       | 0.24[m]  |  |  |
| Wheelbase  | 0.50050[m]   |  |  |
| Distance between axle and body<br>(height)         | 0.16[m]  |  |  |
| Radius (wheel)                                     | 0.043[m]   |  |  |
| Gauge  | 0.1426[m]  |  |  |
| Cant at wheel flange                               | 70[°]  |  |  |
| Minimum radius (at constant curve)                 | 3.3[m]   |  |  |
| Max cant (at constant curve)                       | 3.9662[°]  |  |  |
| Max tilt (at the experimental line)                | 0.7448[°]  |  |  |
| Constant of gravity                                | 9.81[m/s <sup>2</sup> ]  |  |  |
| Velocity (at first)                                | 1.2[m/s]   |  |  |

| m       | m         |         |        |
|---------|-----------|---------|--------|
| Table 2 | Results ( | of simu | ations |

1.2[m/s]

|  | Without<br>friction<br>control | Friction<br>controlled<br>(Inner<br>rail) | Friction<br>controlled<br>(Outer<br>rail) | Friction<br>controlled<br>(Both<br>rails) |
|--|--------------------------------|---|---|---|
| Flange force<br>for the<br>leading axle<br>[N]   | 121.595                        | 104.408                                   | 113. 181                                  | 100.258                                   |
| Lateral force<br>for the<br>leading axle<br>on outer rail<br>[N]                           | 87.894                         | 68.491                                    | 83.660                                    | 67.684                                    |
| Torque for<br>the trailing<br>axle by<br>friction [Nm]                                     | 2.675                          | 2.040                                     | 1.980                                     | 1.605                                     |
| Revolution<br>of the<br>trailing axle<br>at constant<br>curve in a<br>meter run<br>[rev/m] | 4.4745                         | 4.5120                                    | 4.4554                                    | 4.4840                                    |



Fig. 7 Figures of chart about creep force for a bogie

## 4. 急曲線走行試験

摩擦制御による急曲線通過性能向上効果を検証するため、 1/10 スケールの模型走行試験機[2]を用いた走行試験を行った(Fig. 8)。



Fig. 8 Vehicle model

この試験機は、半径 3.3m の急曲線軌道を有し、急曲線通 過時の諸状態量を測定することができる。この試験機の軌道 上に摩擦調整材を塗布し、摩擦制御前後の状態量の変化を観 察した。ただし、本実験ではより一般的な急曲線通過を模擬 対象とするため、予めモデル台車に 3.58°の舵角を付与する ことで等価的に曲率半径を大きくした。

Table 3 は得られた実験結果である。ただし、データは摩擦 調整材塗布前と塗布直後の状態量比較(%)という形で示す。

|   | Friction<br>controlled<br>(Inner rail) | Friction<br>controlled<br>(Outer rail) | Friction<br>controlled<br>(Both rails) |
|---|--|--|--|
| Lateral force for<br>the leading axle<br>on outer rail<br>[%]                 | 29.2(81.3)                             | 122.6(95.1)                            | 31.5(87.1)                             |
| Revolution of the<br>trailing axle at<br>constant curve in<br>a meter run [%] | 100.5(100.3)                           | 99.0(99.6)                             | 100.3(100.1)                           |
| Torque for the<br>trailing axle by<br>friction [%]                            | 89.8(76.0)                             | 98.9(74.0)                             | 57.9(70.4)                             |

実験結果の傾向は概ね解析結果のそれと一致しており、摩 擦制御による急曲線通過性能の向上を実験により確認する ことができた。

#### 5. 結言

2ローラでの基礎実験や営業線における実台車の実験等 で、車輪/レール間の摩擦特性を制御する事により、車両の 曲線旋回性能が大きく向上することを明らかにしてきたが、 ここではスケールモデル試験機を用いた実験とその理論解 析を行い、摩擦制御と曲線旋回性能向上の関係を定式的に取 り扱った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 2) 摩擦制御時の曲線旋回性解析に新しい概念として、輪軸の回転数の影響を考慮し、曲線旋回モデルを提唱し解

析を行った。その結果、摩擦制御時の車両ダイナミック ス解析時には、従来の車両運動解析では変数として考え られていなかった輪軸の回転方向の自由度を、考慮する 必要があることが明らかになった。

3) さらに、これらの事象を検証するために 1/10 スケー ルモデル実験を行った結果、摩擦制御により曲線旋回性 は向上すること、及び前・後軸の輪軸回転数に差が現れ たこと等、提唱したモデルによる解析結果と一致した。

#### 6. 参考文献

- [1] D. Eadie, J. Kalousek, K. Chiddick, The Role of High Positive Friction (HPF) Modifier in the control of Short Pitch Corrugations and Related Phenomena, Proc. of the 5th International Conference of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2000), 2000.7
- [2] 留岡・谷本他、車輪とレール間の摩擦コントロール(第2 報:実台車を用いた実験).J-Rail'99, 1999.12.
- [3] 須田・小峰他、車輪/レール間の摩擦制御と曲線旋回性 能、J-Rail2000, 2000.12.
- [4] Y. Suda, H. Komine, et.al., Improvement of curving performance with friction control between wheel and rail, Proc. of the 17<sup>th</sup> IAVSD Symposium, 2001.8.
- [5] M. Tomeoka, M.Tanimoto, et.al., Friction control between wheel and rail, Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2000), 2000.7.
- [6] 留岡、車輪とレール間の摩擦調整について、R&m Vol.9, 2001.9.
- [7] 留岡・谷本他、車輪とレール間の摩擦コントロール(2 円 筒試験機による接触基礎試験、J-Rail'99, 1999.12.
- [8] 須田・岩佐他、車輪/レール表面状態とクリープ特性、 J-Rail2000, 2000.12.
- [9] 須田・岩佐他、鉄道における車輪/レール表面状態とク リープ特性、第10回交通・物流部門大会(TRANSLOG2001)
- [10] 留岡・松本他、車輪/レール間摩擦調整材噴射装置の開発、第10回交通・物流部門大会(TRANSLOG2001)
- [11] 須田・小峰他、スケールモデルによるガイドウェイビー クル走行試験機の開発、第 10 回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2001)
- [12] 須田・小峰他、鉄道における車輪/レール間の摩擦制御 に関する研究(模型走行実験における曲線通過性能の向 上)、第10回交通・物流部門大会(TRANSLOG2001)
- [13] B. Jacobson 他; "Rolling contact phenomena"; Springer; 2000
- [14] 榎本他;薄膜潤滑トライボロジー;東京大学出版会; 1994.9
- [15] 木村他;トライボロジー概論;養賢堂;1982.8
- [16] 松本・須田ほか、車輪/レール接触状態とクリープ特性 第4報(数値解析モデルによる車輪/レール接触状態の同 定)、本講演会発表予定