

## S8-1-5 輪軸ヨーモーメント検知による摩擦制御とその効果

[機] 須田義大 [機] 小峰久直 (東京大学) [機] 松本耕輔 (東京大学院・東京メトロ)

留岡正男 遠藤康信 岩本厚 (東京メトロ)

[機] ○中居拓自 佐藤興志 (住友金属工業)

[機] 谷本益久 岸本康史 (住友金属テクノロジー)

Friction Control between Wheel and Rail by detecting Yaw Moment of wheelset

Yoshihiro Suda, Hisanao Komine, Kosuke Matusumoto (The University of Tokyo)

Masao Tomeoka, Yasunobu Endo, Atsushi Iwamoto (Tokyo Metro Co. Ltd.)

Takuji Nakai, Yoshi Sato (Sumitomo Metal Industries Ltd.)

Masuhisa Tanimoto, Yasushi Kishimoto (Sumitomo Metal Technology, Inc.)

Friction control between wheel and rail is a key technology for curving performance of the subway train at severe curve sections. Onboard friction control system by spraying friction modifier to the top of rail has been developed for Tokyo Metro line. In this paper, new feed back friction control system by detecting yaw moment acting on bogie truck running through the curve section is discussed.

キーワード：摩擦制御，摩擦調整剤，曲線通過性能，きしり音，ヨーモーメント，

Keyword: Friction control, Friction modifier, Curving performance, Squeal noise, Yaw moment

### 1. 緒論

鉄製の車輪が同じく鉄製のレール上を転走する鉄道車両においては、車輪／レール間の転がり、すべり摩擦特性が非常に重要である。都市鉄道に多数存在する急曲線において車両、台車をスムーズに通過させ、かつ制動・駆動力を確保するために、筆者らは摩擦調整材<sup>(1)</sup>を車上から適用する方法を提案し、現在では東京メトロの営業路線の一部で実際に適用されるに至っている(図1)<sup>(2)(3)(4)</sup>。車上摩擦制御システムでは、レール頭頂部に摩擦調整材を噴射させることで車輪／レール間の摩擦制御を実現するが、その噴射頻度、噴射量はPQ測定結果等から経験的に決定されてきた。本報では、摩擦係数のフィードバックによる摩擦制御の最適化を目指し、輪軸に作用するヨーモーメントを検知し、摩擦調整材を最適に噴射する方法について検討したので、その結果を報告する。



図1. 摩擦調整材噴射装置／営業線試験車両

### 2. 車上摩擦制御システム

#### 2.1 摩擦調整材噴射装置

現在、東京メトロ丸ノ内線および千代田線の一部区間において実現されている車上摩擦制御システムでは、ケルサン社製の摩擦調整材 KELTRACK™ を使用している。図2にシステム構成を示すが、速度、進行方向等の車両情報より曲線および噴射量を制御器にて判定し、タンクを含む供給ユニットに対して、電磁弁開閉およびポンプ回転を指示することで、摩擦調整材および圧縮空気を送出し、最後尾の台車排障器に取り付けられた専用ノズル内部にて両者を混合し、レールの頭頂部に霧状に吹き付ける。その際、曲線方向を判定し、内軌レールのみ摩擦調整材を適用するが、これは車輪横圧の低減により効果的であることを筆者らは各種シミュレーションにより確認しているためである<sup>(5)</sup>。また、万一過剰に摩擦調整材を適用した場合にも制動、駆動性能には悪影響を及ぼさないというメリットも得られる。

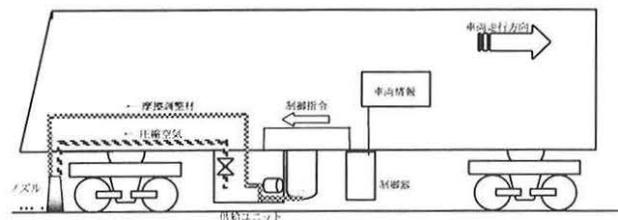


図2. 摩擦調整材噴射装置／システム構成

レール上の摩擦調整材は次列車通過までの数分間に乾燥するため、後続列車は車輪・レール間に乾燥した摩擦調整材を介在させることが可能になる。

車上からの摩擦調整材適用の利点は、入口緩和曲線、円曲線および出口緩和曲線からなる曲線区間全部に均一に調整材を噴射することが可能で、またその設定を車両基地等で容易に変更可能な点にある。例えば、特定の曲線区間において摩擦係数が増加し、騒音、波状摩耗等が発生した場合には重点的にその区間を摩擦調整し、きしり音等が全く発生していない曲線では、摩擦調整材の適用頻度を低くする、といった設定が可能である。

## 2.2 営業線における摩擦制御

現在、東京メトロの一部車両に摩擦調整材噴射装置を搭載し、営業線における摩擦制御の適用試験を実施中である。表 1 に試験区間の概要を示すが、R130m の急曲線から R300m の中曲線までが存在しており、車上摩擦制御の確認に適している。

表 1. 摩擦調整材噴射装置／営業線の試験区間

曲線半径 (m)	130	180	180	200	300	
曲線長 (m)	250	150	70	220	400	1090
噴射量 (mL/日)	330	300	60	500	350	1540

曲線半径が異なると走行中の台車および輪軸の姿勢が異なるため、摩擦調整材の必要量が各曲線に対して異なる。そこで、制御器には曲線毎の適用量（単位距離毎の噴射量）を記憶させ、調整している。その適否については、リアルタイムの地上PQ測定によりその状態を把握している（図 3）。

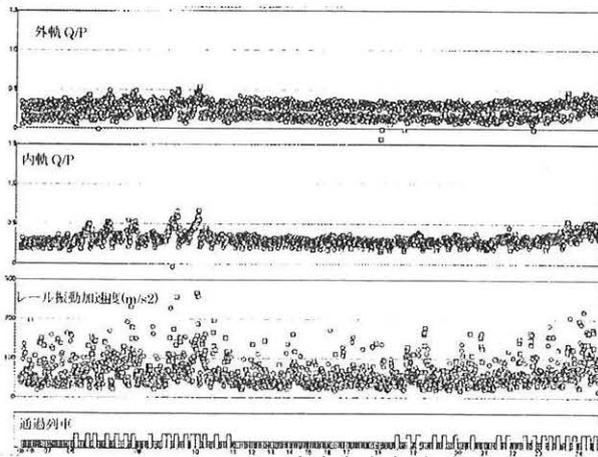


図 3. 地上 PQ 測定の結果例

現在、総延長約 3km の複線区間の当該路線を、500~750 両/日（2,100~3,000 輪軸/日）が通過しているが、約 2,000m（複線合計）の曲線区間に対して車上より摩擦調整材を適用し、その使用量は複線合計で約 1.5L/日となっている。

## 2.3 車上噴射システムの管理

前項で示した摩擦調整材の適用方法では地上 PQ 測定結果をもとに摩擦調整材の適用量設定を変更する。しかしながら、営業線における摩擦状態は時々刻々と変化しており、その全てに即時に対応することは困難である。そのため、最適と考えられる噴射量に対して、若干多めの摩擦調整材を適用することで、摩擦調整材が大きく不足することのないようにしている。結果として摩擦調整材の使用量が多くなり、また摩擦係数が管理すべき値に対して低めになる結果となる。

## 3. ヨーモーメント検知による摩擦制御

### 3.1 ヨーモーメント検知フィードバック摩擦制御システム

地上からの測定による噴射設定管理では、最適な摩擦制御には不十分であると考え、車上から摩擦係数を把握する方法を検討した。曲線走行中の台車には、前軸に横圧  $Q$  が作用し、一方で後軸には大きな縦クリープ力  $T$  が作用する（図 4）。縦クリープ力  $T$  による後軸の反操舵方向のヨーモーメントは、前軸の外軌横圧  $Q$  を増加させる方向に作用するが、摩擦調整材を内軌レールに適用すると、後軸の縦クリープ力  $T$  を低減させることが可能であり、前軸の横圧  $Q$  が低下する。見方を変えれば、この縦クリープ力  $T$  を検知することが出来れば、摩擦係数を把握することが可能になり、最適な摩擦制御を実現することが可能になる。

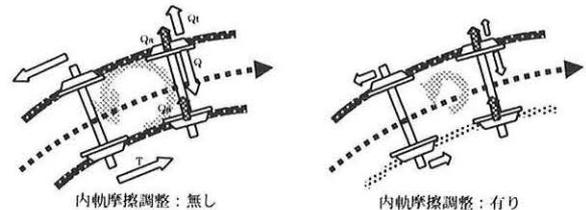


図 4. 後軸クリープ力と横圧の関係

図 5 に筆者らが提案するフィードバック制御のアルゴリズムを示す。台車進行方向に対して後尾側に位置する輪軸のヨーモーメントおよび輪重を測定し、摩擦係数を推定する。この車両が噴射対象となる曲線に進入し、その際の摩擦係数が予め設定したしきい値を越えた場合のみ噴射装置を動作させ、レール上に摩擦調整材を噴射する。曲線中全てまたは途中において摩擦係数がしきい値を下回った場合には噴射装置は動作しないため、不必要に摩擦調整材を消費することがなく、常に適切な摩擦状態に管理することが可能になる。

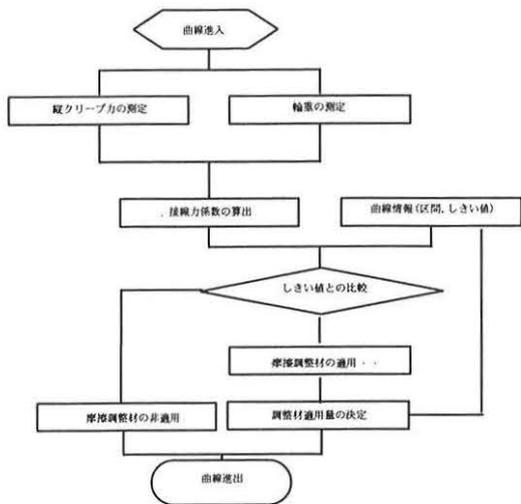


図5. ヨーモーメントフィードバック制御アルゴリズム

### 3.2 PQ測定による現車試験

既存の車上摩擦制御システム搭載車両に前項のフィードバック制御システムを追加して現車試験を実施した。ヨーイングモーメント測定車両にはPQ輪軸を装着し、輪重および横圧を測定した。また、ヨーモーメントを算出するために、軸箱前後荷重としてモノリンクに作用する応力を測定した(図6, 表2)。なお、後軸の左右モノリンクに歪みゲージを貼り付け、左右応力の差をとる事で、ヨーモーメントに相当する荷重を算出した。また、既に摩擦調整材による摩擦制御を実施している営業線区間のため、終車後に試運転車両(3両)を3編成同時に走行させながら摩擦係数を変化させ、制御装置の動作を確認した。

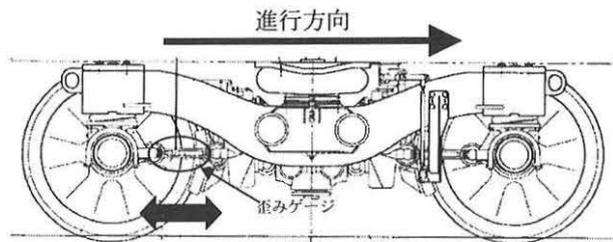


図6. 軸箱前後荷重(モノリンク荷重)測定位置

表2. フィードバック制御試験条件

項目	適用	
軌道	試験区間	丸ノ内線分岐線
	軌間	1435mm
	レール	50N
	曲線半径	R130m~R300m
	スラック	7~17mm
	曲線長	60~350m
車両	編成	3両
	車体長	18m
	荷重条件	空車
	台車	ボルスタレス
	軸箱支持装置	モノリンク式
測定項目	踏面形状	凹弧踏面
		輪重 P
		横圧 Q
		接線力(軸箱前後荷重) T

図7に後軸接線力係数 T/P と先頭軸の内軌 Q/P の測定結果に示すが、両者には相関性があり接線力係数を車輪・レール間摩擦係数の指標として代用可能なことが示された。

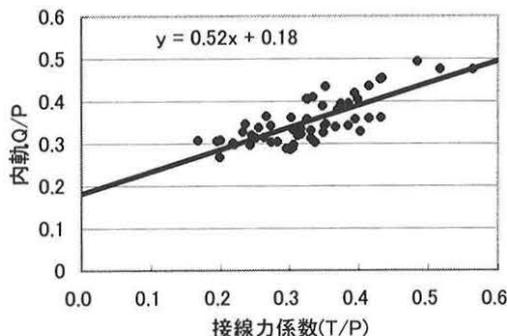


図7. 現車試験結果 (T/P と内軌 Q/P の関係)

そこで、接線力(モノリンク前後荷重)のしきい値を変化させた場合の摩擦調整材噴射状況を調査した。表3に示すように、しきい値が低い(2.0kN)場合には、全ての曲線で噴射制御 ON となったが、しきい値を 8.0kN と高くとした場合には、最も急な曲線 R130 を除いて噴射 OFF となり、適切な摩擦係数管理が可能であることが示された。図8~図10に測定波形を示す。

表3. フィードバック摩擦制御/現車試験結果

接線力しきい値 (kN)	曲線半径			
	R130m	R181m (1)	R181m (2)	R301
2.0	ON	ON	ON	ON
4.0	ON	ON	ON	OFF
8.0	ON	OFF	OFF	OFF

注) ON=噴射, OFF=非噴射

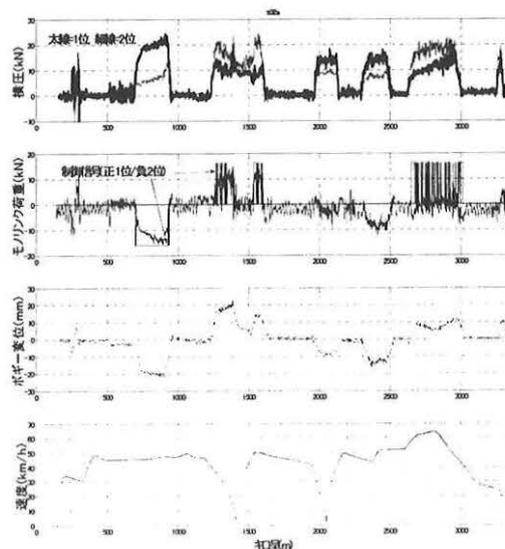


図8. フィードバック摩擦制御試験(しきい値 2.0kN)

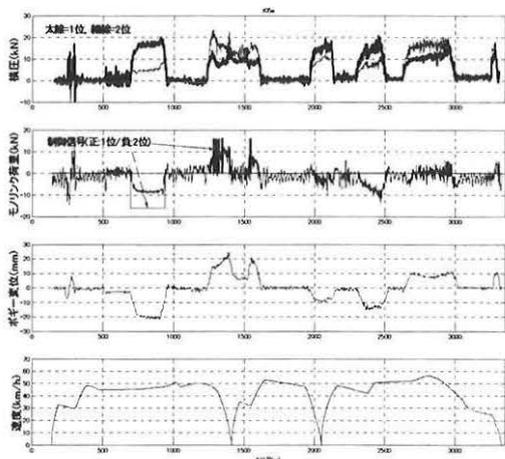


図9. フィードバック摩擦制御試験 (しきい値 4.0kN)

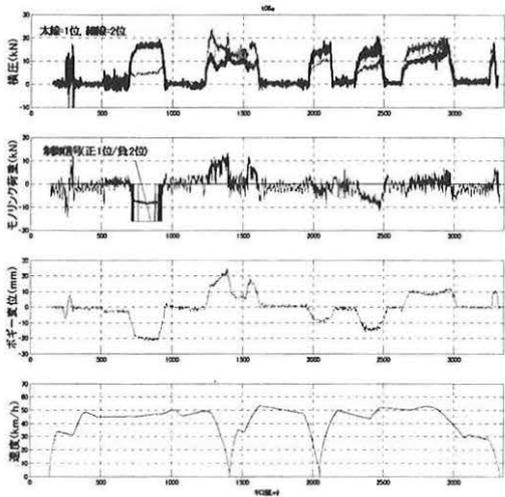


図10. フィードバック摩擦制御試験 (しきい値 8.0kN)

#### 4. まとめ

- ・ 車輪／レール間の摩擦係数を最適に管理するために、摩擦調整材噴射装置にヨーモーメント検知のためのフィードバック制御器を搭載した。
- ・ 軸箱前後荷重（モノリンク荷重）と輪重、横圧を測定した結果、後軸接線力係数と先頭軸の内軌輪重横圧比に相関性があることが分かった。
- ・ 軸箱前後荷重のしきい値を各種変化させることで、摩擦係数に応じた摩擦調整材噴射制御が可能であることが示された。

#### 5. 参考文献

- 1) Eadie, Kalousek, Chiddick : The Role of High Positive Friction (HPF) Modifier in the Control of Short Pitch Corrugation and Related Phenomena,

Proc. The 5<sup>th</sup> International Conference of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2000), (2000).

- 2) 松本, 須田, 岩佐, 留岡, 谷本, 岸本, 中居 : 鉄道における車輪／レール間摩擦制御技術, 第7回鉄道力学シンポジウム(土木学会). (2003.7), pp67-72
- 3) 松本, 留岡, 加部, 野村, 須田, 小峰, 中居, 谷本, 岸本 : 営業線における車輪／レール間摩擦特性制御, 日本機械学会論文集(C編)70巻 695号(2004.7), pp160-165
- 4) Suda, Iwasa, Komine, Tomeoka, Nakazawa, Matsumoto, Nakai, Tanimoto, Kishimoto : Development of Onboard Friction Control, Wear 258 (2005), pp1109-1114
- 5) 須田, 岩佐, 小峰, 藤井, 松本, 生方, 荻野, 中居, 岸本 : 車輪／レール間の摩擦制御による曲線通過性能に関する研究(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) ; 第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (2003.12), pp525-528