曲線内側レールへの摩擦緩和材の効果的散布方法

材料技術研究部　摩擦材料研究室
研究員　深貝 晋也

１．はじめに

車輪とレールの接触問題は、鉄道固有の課題の一つであり、また、走行安全性、メンテナンスおよび環境問題など様々な領域に関わる問題である。特に急曲線部では、車輪踏面と曲線内側レールの車輪走行面（以下、内軌走行面と呼ぶ）との摩擦により「きしり音」や「波状摩耗」が発生し、沿線環境の悪化や保守コストの増加を招いている。

一方、こうした問題の対策として、車輪踏面と内軌走行面との摩擦を低減する材料（潤滑剤）の適用が、近年国内外で注目されている[1)]。鉄道総研においても、内軌走行面潤滑に関する研究に取り組んでおり、既に車輪／レール摩擦緩和システム（FRIMOS）を開発、実用化している[2)]。本稿では、現状より少量の摩擦緩和材でFRIMOSの効果を得ることを目的として、散布後の摩擦緩和材の挙動をモデル化し、効果的な散布方法の検討を行った結果を報告する。

２．車輪／レール摩擦緩和システム（FRIMOS）の概要

FRIMOSは、図1に示すように「摩擦緩和材」と、車上から微量の摩擦緩和材を車輪踏面／内軌走行面へ効率よく供給する「噴射装置」、および噴射の制御を行う「噴射制御装置」で構成される。摩擦緩和材は、カーボンを主成分とする平均粒径0.2mmの乾燥粒子であり（図2）、車輪とレールの摩擦係数を適度に低下させる。また噴射装置は、車輪の空転・滑走防止に用いられるセラジェット（増粘着材噴射装置）[3)]の最新技術を利用し、車両部品としての信頼性・耐久性を確保するとともに共通部品を用いることで、製作コストを大幅に抑えている。

FRIMOSは横浜高速鉄道こどもの国線で2007年に採用され、長津田駅と恩田駅間の２曲線部を対象に摩擦緩和材が噴射されている[2)]。運用開始から４年以上が経過する現在、FRIMOSは順調に稼働し続け、きしり音や波状摩耗の防止効果を発揮する一方、FRIMOSが原因と考えられる様な軌道回路およびブレーキ関係のトラブルの発生は見られない。

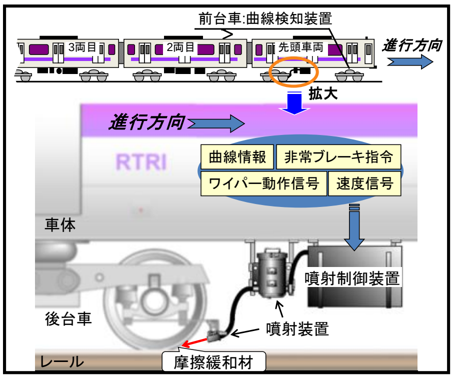

図１　車輪／レール摩擦緩和システム（FRIMOS）の基本構成

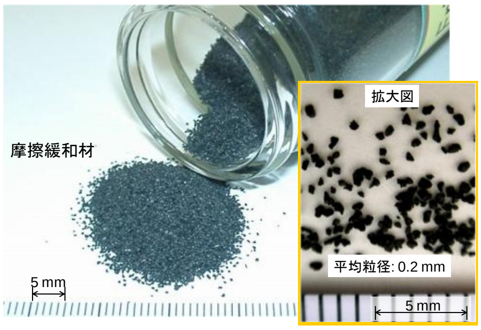

図２　摩擦緩和材の外観

３．摩擦緩和材分布の計算モデル

3.1　室内試験

車輪とレールの間に供給された後の摩擦緩和材の挙動についての基礎的知見を取得し、その挙動をモデル化するため、室内試験装置を用いて試験を行った。

3.1.1　試験装置および試験方法

測定に用いた円盤／円筒型の摩擦試験装置とその測定例を図 3 に示す。本試験装置は、円筒状のレール試験片（長さ 110mm、半径 44mm）と、円盤状の車輪試験片（長さ 5mm、半径 54mm）により構成されている。車輪試験片は、レール試験片上を螺旋状に転動接触し、車輪試験片とレール試験片の接触が一過性となるようにしたものであり、潤滑剤の「延び性」の評価等に用いられる。摩擦係数 μ は、両者の回転速度の差から発生するトルクと、押付け荷重により評価することができる。摩擦緩和材を紙に満遍なく載せ、この紙ごと車輪及びレール試験片の間に巻込ませることにより摩擦緩和材を車輪試験片に付着させた後、車輪試験片をレール試験片の左端から右端に向かって転動させた。

3.1.2　試験結果

代表的な試験結果を図 4 に示す。摩擦係数低減効果（$\varDelta\mu$）は、無潤滑状態の摩擦係数から付着させた状態の摩擦係数の差（図 3）であり、また最大値で規格化している。図より $\varDelta\mu$ は回転数の増加に伴い、指数関数的に低下することがわかる。ここで、$\varDelta\mu$ の低下が、車輪試験片からレール試験片への摩擦緩和材の移着に起因すると仮定すると、$\varDelta\mu$ と車輪試験片の回転数 n は、次の関係式で表わされる。

$$\varDelta\mu = \varDelta\mu_0 (1-\alpha)^n \qquad (1)$$

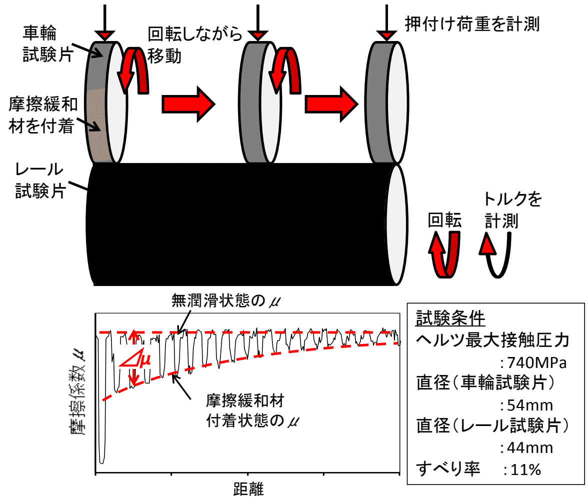

図 3　円盤／円筒型摩擦試験装置

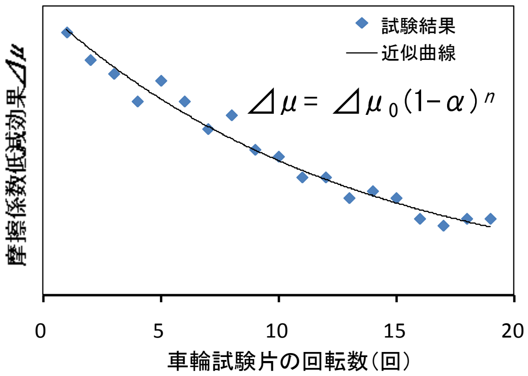

図 4　摩擦緩和材による摩擦係数低減効果 $\varDelta\mu$ と車輪試験片回転数の関係

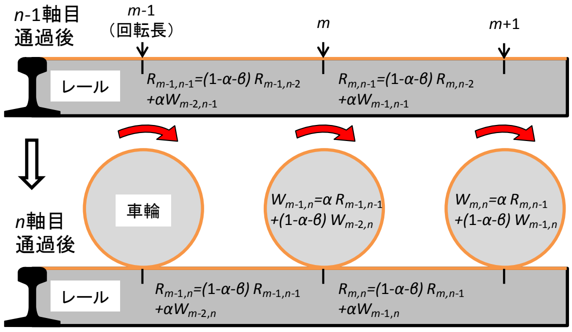

図 5　散布後の摩擦緩和材の分布モデル

ここで、y 切片を $\varDelta\mu_0$ とおき、また α は摩擦緩和材の移着率とする。室内試験を複数回行い、移着率 α を算出した結果、α ≒0.06～0.09 であった。

3.2　計算モデルの考案

実際の車輪とレールの間でも式(1)の関係が成り立ち、車輪とレール間で摩擦緩和材が相互に移着し合

うこと、また、摩擦係数の低減効果が車輪／レールの境界に存在する摩擦緩和材の量に比例することを仮定して計算モデルを考案した。すなわち、車輪が m 回回転した位置において、n 軸目が通過する際に、レール上に存在する摩擦緩和材の量を $R_{m,n}$、車輪上に存在する摩擦緩和材の量を $W_{m,n}$ とすると、それぞれ以下の式で表わすことができる。

$$R_{m,n} = (1 - \alpha - \beta)R_{m,n-1} + \alpha W_{m-1,n} \qquad (2)$$

$$W_{m,n} = \alpha R_{m,n-1} + (1 - \alpha - \beta)W_{m-1,n} \qquad (3)$$

ここで β は、車輪とレールの間での摩擦緩和材の消費率とする。消費率 β は、摩擦緩和材がレールと車輪の接触面から徐々に排除され、消費される割合を想定しており、曲線諸元、走行する車両、走行速度等様々な要因により変わる値と考えられる。式(2)の右辺第 1 項は、レールから車輪に($\alpha R_{m,n-1}$)だけ移着し、($\beta R_{m,n-1}$)だけ消費することを表し、また第 2 項は、車輪からレールに($\alpha W_{m-1,n}$)だけ移着することを表す。そして、これら 2 項の和がレール上に残存する摩擦緩和材の量を表す。式(3)についても同様である。式(2)、(3)を用いて、モデル図を描くと図 5 のようになる。式(2)、(3)の計算を繰り返すことで、任意の車輪回転位置における、任意の軸数が通過した後の、車輪円周長（約 2.7m）当りのレール上に残存する摩擦緩和材の量が算出できる。

4．　計算モデルを用いた効果的な散布方法の検討

4.1　効果的な散布タイミングの予測

散布範囲を変えた際の摩擦緩和材の持続効果の違いと計算による摩擦緩和材量の違いを比較するため、構内走行試験を行った（図 6）。図中に示すように、摩擦緩和材は長さの異なる 3 つの範囲（①、②、③）に散布し、いずれの範囲に散布した場合でも同一の場所でレールトリボメータにより摩擦係数 μ を測定した。なお、散布は往路走行時に実施した。

図 7 に計算モデルにより予測した定点での摩擦緩和材の残存率 R と通過軸数の関係を示す。なお、残存率 R は車輪 1 周分（約 2.7m）への毎散布量を 100%とし、移着率 α および消費率 β については他の試験結果をもとに設定した（α＝0.075、β＝0.005）。また、残存率 R を計算した定点は、摩擦係数の測定箇所と同じとした。図 7 より、いずれの散布範囲の場合も通過軸数の増加に伴い、残存率 R は低減するが、長い範囲に散布するほど、残存率 R の低減が緩やかであることがわかる。

一方、摩擦係数の測定結果を図 8 に示す。図より、いずれの散布範囲においても、散布後通過軸数の増加に伴い、摩擦係数が増加するが、散布範囲が長いほど、摩擦係数の増加が緩やかであることがわかる。これは、残存

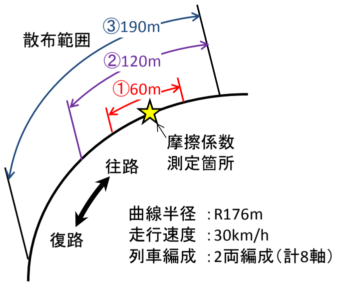

図 6　構内試験線（単線）における走行試験の概要

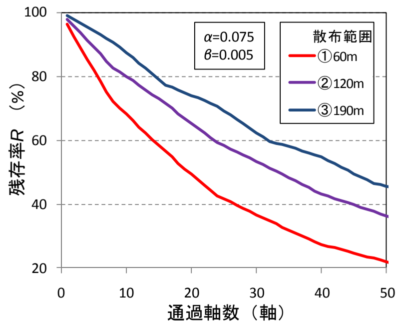

図 7　残存率 R と通過軸数の関係

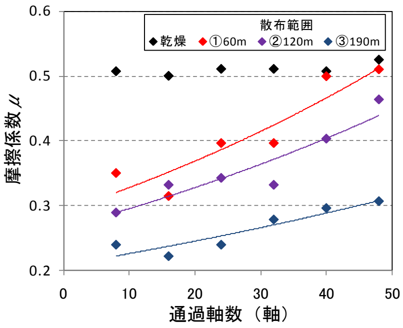

図 8　摩擦係数 μ と通過軸数の関係

率 R の計算結果と併せて考えると、車両が測定点に至るまでの間に長く散布するほど、車両走行に伴って移動してくる摩擦緩和材の量が多くなり、持続効果も向上するためであると考えられる。以上のことから、実測された摩擦係数の変化と計算により得られた摩擦緩和材量の変化に相関が見られ、摩擦緩和材の効果が切れるタイミングを予測し、無駄となる散布を減らせられる可能性がある。

4.2　部分散布の検討

4.1 で述べたように、摩擦緩和材は車輪の転動によりレール上を移動している可能性が高い。このことから、FRIMOS における摩擦緩和材の散布の効率化、例えば、対象とする曲線全域での散布を、部分散布などに代替できる可能性がある。そこで、計算モデルにより、摩擦緩和材を曲線全域に一定の割合で散布した条件 A と、部分的かつ散布量を変化させながら散布した条件 B で、一方向に 50 軸通過させた後の摩擦緩和材の分布状態を例にとり比較した（図 9）。

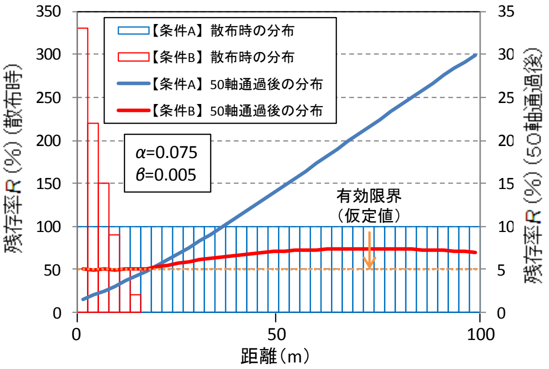

図 9　計算モデルによる全域散布と部分散布の比較

図中には、散布時の分布状態も併記した。なお、残存率 R は条件 A の車輪 1 周分（約 2.7m）への散布量を 100%とした。曲線長を 100m、残存率 R の有効限界値を 5%と仮定すると、図より、条件 B の 50 軸通過後の状態は、対象の曲線長に対して、摩擦緩和材が有効限界値に近い値で無駄なく分布していることが分かり、一方、条件 A では、ほとんどの場所で有効限界値を大幅に上回っており、過剰な分布状態となっていることがわかる。また、散布量の総和を比較すると、条件 B は、条件 A の半分以下である。こうしたことから、摩擦緩和材の散布に際して、単に一律に散布するのでは無く、曲線ごとに適した効果的な散布を行うことで、使用量を低減できる可能性がある。

5．まとめ

現状より少量の摩擦緩和材で FRIMOS の効果を得ることを目的として、散布後の摩擦緩和材の挙動をモデル化し、効果的な散布方法の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

・実測された摩擦係数の変化と計算により得られた摩擦緩和材量の変化に相関が見られ、摩擦緩和材の効果が切れるタイミングを予測し、無駄となる散布を減らせられる可能性がある。

・単に一律に散布するのでは無く、曲線ごとに適した効果的な散布を行うことで、使用量を低減できる可能性がある。

今後は現車でのデータを蓄積し、現車データと計算結果の相関がとれるようモデル精度を高め、FRIMOS の費用対効果の向上に努める予定である。

参考文献

1)　陸康思：摩擦調整剤の効果と展開，鉄道車両と技術，vol.109, No.6, 14-22, 2005

2)　伴巧，深貝晋也，松田博之，名村明，石田誠：摩擦緩和材　最近の動向，鉄道車両と技術，Vol.148, pp.6-10, 2008

3)　大野薫，伴巧，小原孝則:セラミックス粒子噴射による車輪・レール間の増粘着，トライボロジスト，vol.41, No.12, pp.7-12, 1996