

# 曲線内側レールへの摩擦緩和材の効果的な散布方法

深貝 晋也\* 伴 巧\*  
 陳 樺\*\* 名村 明\*\*

## An Effective Application Method of Friction Moderator to Low Rail of Curve

Shinya FUKAGAI Takumi BAN Hua CHEN Akira NAMURA

Lubrication between the running surface of low rail and wheel tread has recently been recognized as a valid method in reducing squealing noise and growth of rail corrugation. We have developed a friction moderating system (FRIMOS) as a method of the lubrication between the running surface of low rail and wheel tread. This report describes the results of the prediction of distribution and durability of friction moderator by a simplified calculation model to obtain the knowledge about an effective application timing and amount of friction moderator.

キーワード：車輪／レール，摩擦緩和材，急曲線，潤滑，FRIMOS，散布方法

### 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<sup>1)</sup>。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<sup>2), 3)</sup>。本稿では、FRIMOSに関して、車輪／レール間に散布した摩擦緩和材の車輪通過に伴う挙動およびレールへの付着状態を把握し、効果的な散布のタイミングおよび散布量を導くことを目的として、簡易計算モデルを作成し、レールへの摩擦緩和材の付着分布と、潤滑性能の持続効果の予測を行った結果を報告する。なお、作成したモデルについては、構内試験線および営業線において評価した。その結果についてもあわせて報告する。

### 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

\* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

\*\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

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直径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）<sup>4)</sup>の最新技術を転用し、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

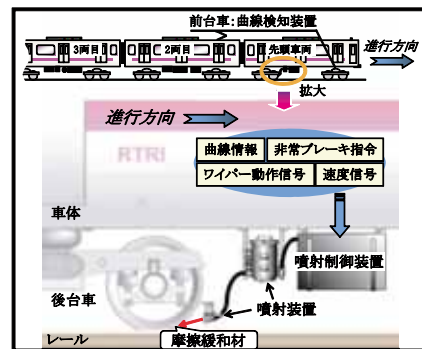


図1 車輪／レール摩擦緩和システム (FRIMOS) の基本構成

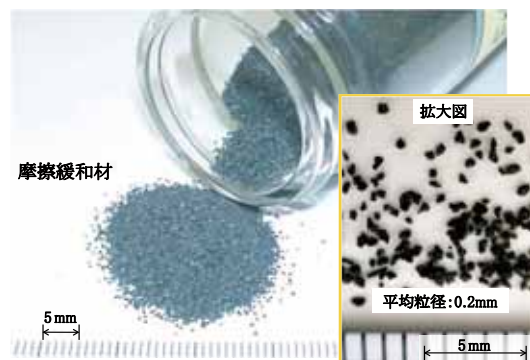


図2 摩擦緩和材の外観

特集：鉄道力学

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曲線を対象に摩擦緩和材が噴射されている。運用開始から4年が経過する現在、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、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。

### 3. 摩擦緩和材分布の簡易計算モデル

#### 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得るため、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」の評価等に用いている。摩擦係数 $\mu$ 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。

車輪試験片に摩擦緩和材を付着させ、その後、レール試験片の左端から右端に向かって転動させた。ここで、摩擦緩和材は紙に満遍なく載せ、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車輪試験片に付着させた。また、摩擦緩和材は車輪試験片の全周長の内、1/3程度に付着させた。

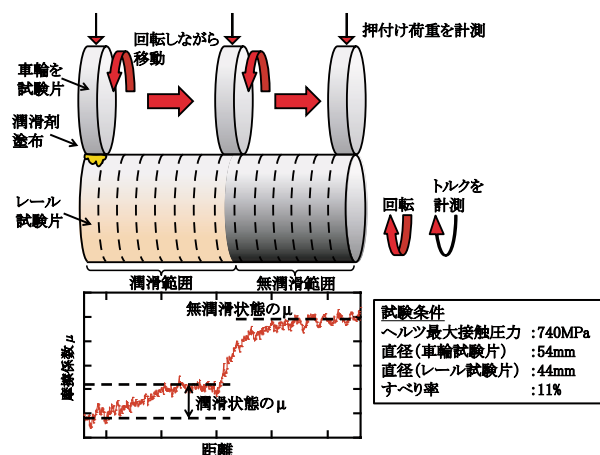


図3 円盤/円筒型摩擦試験装置

##### 3.1.2 試験結果

代表的な試験結果を図4に示す。なお、摩擦係数は最大値で規格化している。摩擦緩和材は車輪試験片の約1/3に付着しているため、車輪試験片が1回転する間に、摩

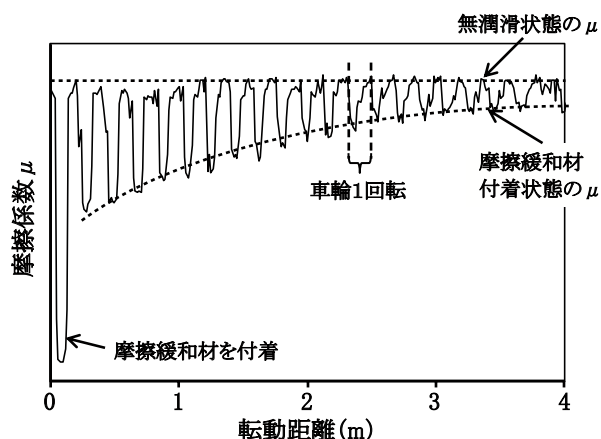


図4 円盤/円筒型摩擦試験装置による測定例

擦緩和材が付着している部分では摩擦係数が低くなり、付着していない部分では高くなっている。転動距離の増加に伴い、摩擦緩和材の付着による摩擦係数の低減効果は、徐々に小さくなっていることがわかる。

ここで、車輪試験片が1回転する間に、無潤滑状態の摩擦係数と摩擦緩和材付着状態の摩擦係数の差(低減効果 $\Delta\mu$ )をとり、回転数に対してプロットすると図5のようになる。

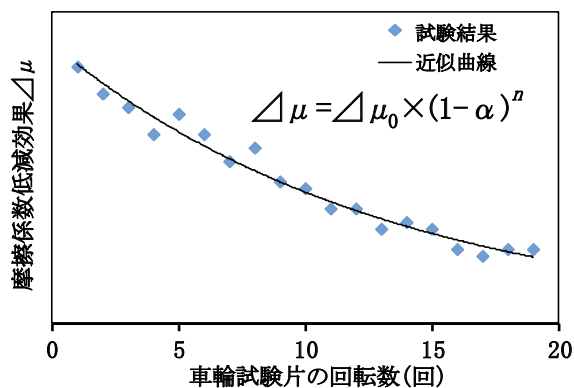


図5 摩擦緩和材による摩擦係数低減効果 $\Delta\mu$ と車輪試験片回転数の関係

図中の近似式より、 $\Delta\mu$ 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、 $\Delta\mu$ 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、 $\Delta\mu$ と車輪試験片の回転数 $n$ は、次の関係式で表わされる。

$$\Delta\mu = \Delta\mu_0 \times (1 - \alpha)^n \quad (1)$$

ここで、 $y$ 切片を $\Delta\mu_0$ とおき、また $\alpha$ 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 $\alpha$ を算出した結果、 $\alpha \approx 0.06 \sim 0.09$ であった。

#### 3.2 簡易計算モデルの考案

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量を  $R_{m,n}$ 、車輪上に存在する摩擦緩和材量を  $W_{m,n}$  とすると、それぞれ以下の式で表わすことができる。

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

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

ここで  $\beta$  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  $\beta$  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6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。

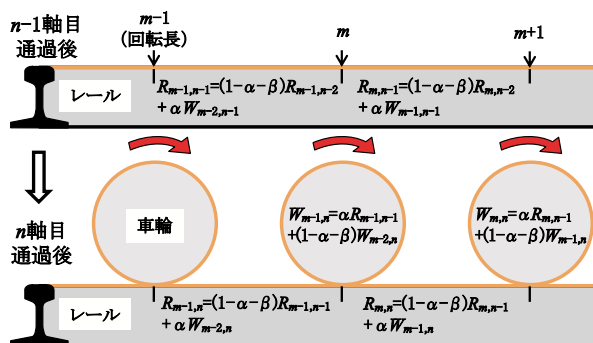


図6 散布後の摩擦緩和材の分布モデル

#### 4. 簡易計算モデルの評価

##### 4.1 構内走行試験による簡易計算モデルの評価

考案した計算モデルを評価するため、鉄道総研構内の試験線において走行試験を行った。試験実施箇所は鉄道総研構内の半径100mの曲線(単線)で、図7に示すように、牽引車と付随車の2両編成(計6軸)の試験列車を用いて、走行試験を行った。列車が走行する前に、図中点線の楕円で示す内軌走行面において、摩擦緩和材を7mの範囲に散布している。

試験列車が4.5往復した後の内軌走行面の摩擦係数  $\mu$  を鉄道総研において開発したレールトリボメータ<sup>2)</sup>で測

定した。また、前述の計算モデルにより散布位置からの距離に対応した摩擦緩和材の残存率  $R$  を算出した。なお計算上、摩擦緩和材は車輪3周分(約8.1m)に散布するとした。また残存率  $R$  は、車輪1周分(約2.7m)への散布量を100%としたとき、レール上に残存する摩擦緩和材の割合とした。移着率  $\alpha$  については、室内試験結果から得られた移着率 ( $\alpha=0.06 \sim 0.09$ ) の値を3段階に振り分けて設定した ( $\alpha=0.06, 0.075, 0.09$ )。また、消費率  $\beta$  については、本試験では通過軸数が少ないことから、 $\beta=0$  とした。

摩擦係数  $\mu$  の実測値と摩擦緩和材の残存率  $R$  の計算値を併せて図8に示す。摩擦係数は、散布箇所で0.35(図中A)となり、散布箇所から離れるに従い上昇し、20mほど離れると0.5前後(図中B)の値となった。一方、残存率  $R$  については、いずれの移着率  $\alpha$  においても、散布箇所が高く、散布箇所から離れるに従い低減しており、全体的に、摩擦係数  $\mu$  が高い箇所ほど、残存率  $R$  が低くなる傾向が見られた。散布箇所では、その前後から不連続に残存率  $R$  が高くなっているが、移着率  $\alpha$  が大きくなるに従い散布箇所における残存率  $R$  は低減し、その前後の残存率  $R$  は増加している。これは、移着率  $\alpha$  が大きいほど車輪による摩擦緩和材の移動が早く進むことを示していると考えられる。



図7 構内試験線における走行試験の概要

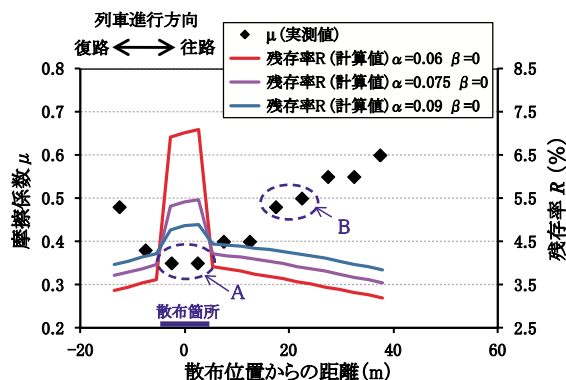


図8 散布位置からの距離と摩擦係数  $\mu$  および残存率  $R$  の関係

特集：鉄道力学

4.2 営業線走行試験による簡易計算モデルの評価

4.1節と同じく、営業線においても評価のための走行試験を行った。試験実施箇所は、複線、円曲線長133m、半径185mの曲線である。毎列車（10両編成）通過後に摩擦緩和材を約3mの範囲に散布し、1000軸以上通過した時点でレールトリボメータにより摩擦係数 $\mu$ を測定した。散布位置からの距離と摩擦係数 $\mu$ および摩擦緩和材の残存率 $R$ の関係を図9に示す。なお、計算においても、摩擦緩和材は毎列車ごとに散布したとし、1000軸通過するまで計算を繰り返した。また残存率 $R$ は車輪1周分（約2.7m）への毎散布量を100%とした。また、移着率 $\alpha$ については、図8と同じ3段階の値をとり、消費率 $\beta$ については、摩擦係数の実測値との相関が比較的良好な値に設定した（ $\alpha=0.06, 0.075, 0.09, \beta=0.01$ ）。

図9に示すように、無潤滑箇所（図中C）で0.7程度であった摩擦係数が、散布箇所から列車進行方向に向かって低下し始め、若干の起伏が見られるものの、おおよそ一定の値（0.15～0.4程度）を保ったまま、円曲線の全範囲（133m）に渡って続いていることがわかった。一方、摩擦緩和材の残存率 $R$ は、いずれの移着率 $\alpha$ においても、一旦増加した後に低減する山なりの傾向を示し、摩擦緩和材の移着率 $\alpha$ が大きくなるに伴い山のピーク位置が散布位置より遠方に移動した。ここで、実測した摩擦係数の変化には、計算した摩擦緩和材の分布に見られるような山なりの変化は認められない。これは、ある残存率以上となると、摩擦係数が下がり止まる（飽和する）ことを示すと推測される。ただし、摩擦緩和材の残存率 $R$ は、図8と比較して全体的に小さく、現段階で飽和値の定量的な判定はできていない。

4.1節と同様に、全体的に摩擦係数 $\mu$ が高い箇所ほど、残存率 $R$ が低くなる関係性が見られることから、摩擦緩和材は考案した計算モデルと同様に、車輪の転動によりレール上に延ばされている可能性が高い。

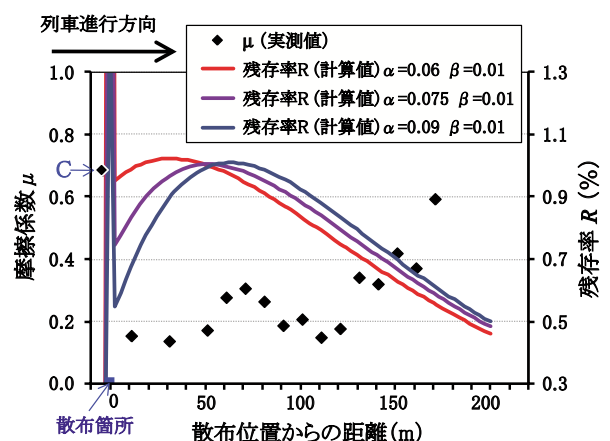


図9 散布位置からの距離と摩擦係数 $\mu$ および残存率 $R$ の関係

5. 簡易計算モデルを用いた持続効果の予測

5.1 異なる散布範囲での持続効果の予測

4章より、摩擦緩和材は考案した計算モデルと同様に、車輪の転動によりレール上に延ばされている可能性が高いことがわかった。本計算モデルを用いて、散布範囲を変えた際の摩擦緩和材の持続効果の違いを予測するとともに、確認のための構内走行試験を行った（図10）。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も同一の場所でレールトリボメータにより摩擦係数 $\mu$ を測定した。なお、散布は往路走行時に実施した。

図11に簡易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 $\alpha$ については、図8、9の中間値、消費率 $\beta$ については図9の消費率の半分値に設定した（ $\alpha=0.075, \beta=0.005$ ）。また、残存率 $R$ を計算した定点と計算上の散布範囲の位置関係は、摩擦係数の測定箇所と実際の散布範囲の位置関係と同じとした。図11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12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、摩擦係数の増加傾向が緩やかであることがわかる。これは、残存率 $R$ 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、例えば、FRIMOSの搭載車両数が限られ、比較的少ない頻度でしか散布できない場合には、散布範囲を長くとり、持続軸数を延ばすことで対応できる可能性がある。

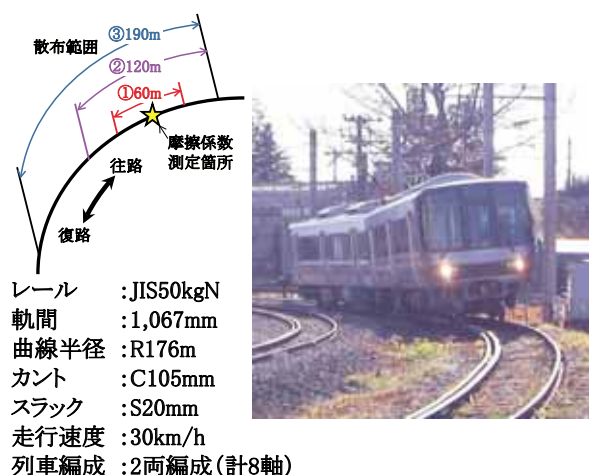


図10 構内試験線（単線）における走行試験の概要

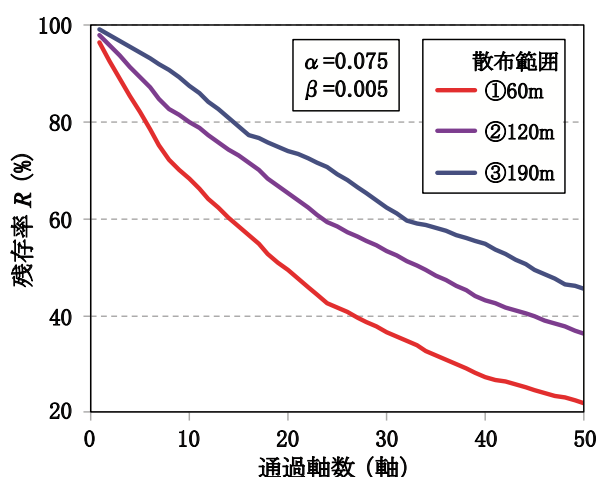


図11 残存率  $R$  と通過軸数の関係

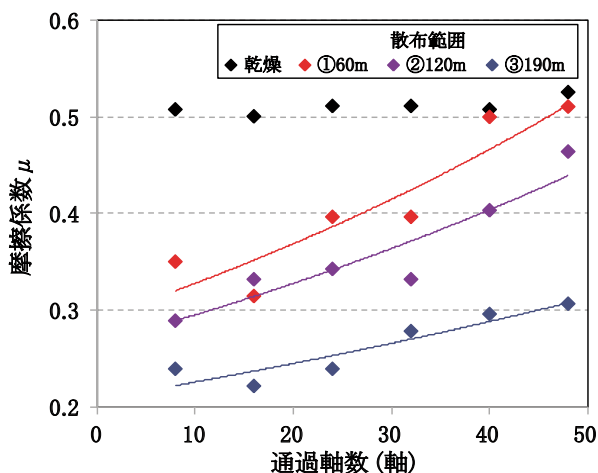


図12 摩擦係数  $\mu$  と通過軸数の関係

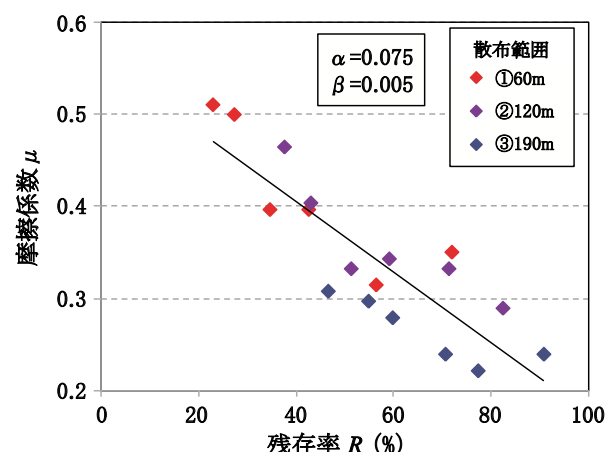


図13 残存率  $R$  と摩擦係数  $\mu$  の関係

ここで、摩擦緩和材の残存率  $R$  に対する摩擦係数  $\mu$  の関係を図13に示す。図より、摩擦係数と残存率の間には、残存率が低減するほど摩擦係数が増加する線形関係が認められ、このことは、計算モデルの仮定と一致する。

一方で、図9や過去の試験結果<sup>2)</sup>を考慮すると、残存率  $R$  と摩擦係数  $\mu$  の関係は必ずしも線形関係ではなく、ある残存率以上となると、摩擦係数は下がり止まる(飽

和する)と考えられる。また、図9の摩擦係数は、0.2よりも低い値まで低減しているのに対して、図12ではやや高い。こうしたことから、図13の線形関係は、摩擦緩和材による潤滑状態(飽和状態)から無潤滑状態への移行状態において得られたものと考えられる。

しかしながら、図8,9においては、残存率  $R$  が数%のオーダーにおいて摩擦係数が増加し始めるのに対して、図13においては、高い残存率において既に増加が認められる。これは、今回の試験では、これまでの試験と比較して少ない軸数で、摩擦係数が増加したことに起因すると考えられるが、その理由については現時点で不明である。

## 5.2 単線・複線の持続効果の予測

過去の走行試験において、摩擦緩和材の騒音低減の持続効果は、単線営業線では200軸以上、複線営業線では100軸強である結果が得られている<sup>2), 3)</sup>。このように単線と複線で持続効果に違いが生じる原因を探るため、計算モデルにより、単線区間と複線区間の定点での残存率  $R$  を比較した。図14は、計算モデルによる比較を行った仮定の単線及び複線区間である。摩擦緩和材の散布区間は、単線区間、複線区間ともに50mとし、残存率  $R$  は車輪1周分(約2.7m)への散布量を100%とした。移着率  $\alpha$  と消費率  $\beta$  については、図11と同じ値に設定した( $\alpha = 0.075$ ,  $\beta = 0.005$ )。また、残存率  $R$  を計算した箇所は、単線、複線ともに、散布区間の中央付近と出口付近の2箇所とした。

単線・複線区間の残存率  $R$  の比較結果を図15に示す。図から単線の結果は、複線の結果に比べて通過軸数に対する残存率の低減が緩やかであることがわかる。ここで、単線営業線および複線営業線の騒音測定点である、単線の中央付近(単線S-1)と複線の出口付近(複線D-2)を比較する。単線S-1で200軸通過した際の残存率を仮定の有効限界値とすると、この値は複線D-2の80軸通過した際の残存率と同等となる。つまり持続軸数は、複線では単線の1/2~1/3程度となっていることがわかる。これは、単線では車両の往復により摩擦緩和材がレール上を移動しては戻され、同じ場所に停滞する傾向にあるためであると考えられる。実際の車輪とレールの間でもこれと同様の現象が生じ、単線区間と複線区間での持続効果の差として表れている可能性が高い。また、複線においては、摩擦緩和材が前方に移動し続けるために、散布範囲の中央付近(複線D-1)よりも出口付近(複線D-2)の方が、摩擦緩和材が残存すると推測される。

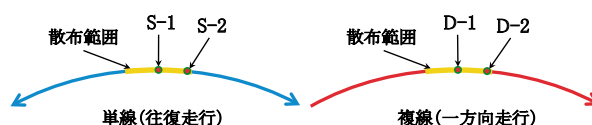


図14 計算に供した仮定の単線・複線区間

特集：鉄道力学

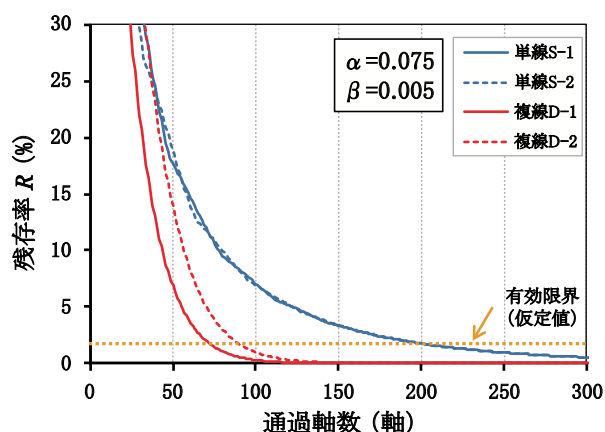


図15 単線・複線区間の残存率 R の比較

6. 計算モデルによる部分散布の検討

4章および5章で述べたように、摩擦緩和材は車輪の転動によりレール上に延ばされ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場合と、部分的かつ散布量を変化させながら散布した場合で、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。なお、残存率 R は一定の割合で散布した場合の車輪1周分(約2.7m)への散布量を100%とした。比較結果を図16に示す。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、地点により散布量を変化させて部分的に散布した場合は、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、全域に散布した場合は、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、部分的な散布は、全域への散布の半分以下である。そのため、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

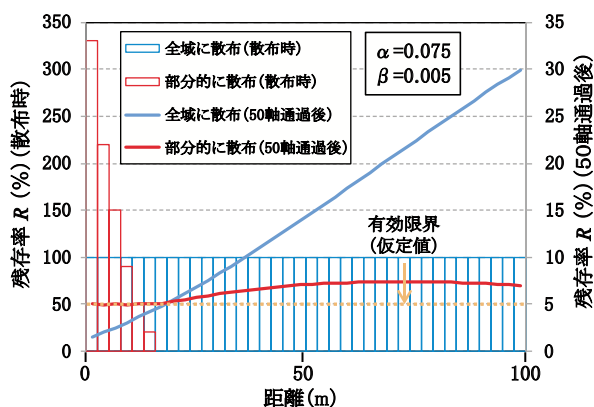


図16 計算モデルによる全域散布と部分散布の比較

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ことがわかる。

7. まとめ

鉄道総研において開発した車輪／レール摩擦緩和システム (FRIMOS) に関して、車輪／レール間に散布した摩擦緩和材の車軸通過に伴う挙動およびレールへの付着状態を把握し、効果的な散布のタイミングおよび散布量を導くことを目的として、簡易計算モデルを作成し、レールへの摩擦緩和材の付着分布と、潤滑性能の持続効果の予測を行った。また、作成したモデルについては、構内試験線および営業線において評価した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 簡易計算モデルにより算出した摩擦緩和材の付着分布と実際の路線での測定結果を比較した結果、摩擦係数が高い箇所ほど、残存率が低くなる関係性が確認できた。
- (2) 同一曲線では、散布範囲が長いほど持続軸数が延びる傾向がある。FRIMOSの搭載車両数が限られ、比較的少ない頻度でしか散布できない場合には、散布区間を長くとり、持続軸数を延ばすことで対応できる可能性がある。
- (3) 単線路線では、車両の往復により緩和材が同じ場所に停滞する傾向にあり、定点においては複線路線よりも効果が持続する可能性が高い。また複線区間では、散布区間の中央付近よりも出口付近の方が、効果が持続する可能性がある。
- (4) 摩擦緩和材の散布に際して、一律に散布するのでは無く、曲線ごとに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。

謝 辞

営業線での走行試験に協力頂いた東京臨海高速鉄道株式会社、能勢電鉄株式会社の関係各位に深く感謝する。

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) 緒方政照，伴巧，深貝晋也，石田誠，名村明：車輪／レール摩擦緩和システムの開発，鉄道総研報告，Vol.21, No.6, pp.51-56, 2007
- 3) 伴巧，名村明：摩擦緩和材に関する最近の動向，日本鉄道施設協会誌，Vol.48, No.10, pp.840-843, 2010
- 4) 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