

## 車輪とレール間のさびが粘着係数に 及ぼす影響の基礎試験

陳 樺\* 曾根 康友\*\* 白 官錫†  
中原 綱光† 石田 誠\*\*\*

### A Fundamental Study on Effect of Rust upon Adhesion Coefficient between Wheel and Rail

Hua CHEN Yasutomo SONE Koan-Sok BAEK  
Tsunamitsu NAKAHARA Makoto ISHIDA

This paper describes the effect of different kinds of rust, in which the constituent element is Ferric oxide, Iron oxide, Oxyhydroxide or Ferric chloride, on the traction coefficient between two discs of rolling-sliding frictional machinery. The disc surfaces were investigated by means of RAMAN spectroscopic analysis before and after the rolling experiments. The results indicated that  $\gamma$ -FeOOH had an effect on increasing the adhesion, however,  $\text{Cl}^-$  decreased the adhesion compared with the surface condition without rust. Moreover, the adhesion obtained in the case of  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  has been identified to be greater than that of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

キーワード：車輪，レール，粘着係数，さび，表面分析，ラマン分光法

#### 1. はじめに

車輪とレール間の粘着係数あるいは摩擦係数に関しては，車両運転条件や気象・雰囲気条件などにより生成される表面性状や表面酸化物あるいは接触面間の介在物に依存するなどの知見が得られている<sup>1-4)</sup>。

従来から，車輪の空転は小雨または雨の降り始めに発生しやすく，これはレール面に付着した水分の界面化学的作用により短時間に鉄イオンが溶け出して生成されるさび( $\gamma$ -FeOOH)が粘着係数を低下させると考えられた<sup>5, 6)</sup>。その点に関して，伴らはレールトリボメータを用いて，さびの生成量と動摩擦係数の関係を調べ，生成初期の微細なさびは摩擦係数を低下させる効果があることを確認した<sup>7)</sup>。また，大野らはさび層中に含まれる $\beta$ -FeOOH，または無定形 FeOOH が摩擦係数を著しく低下させ，水と共存した場合は，特に大きな潤滑作用を発揮することを明らかにした<sup>8)</sup>。

一方，海底トンネル内において，直線で上り勾配の力行（車輪が駆動状態）区間において，ほかの区間に比べて特に波状摩耗の発生が顕著であることが報告された<sup>9)</sup>。それは，海底トンネル内の湿潤環境や塩分付着等によ

り，レール面上にさびが生成し，車輪とレール間の摩擦係数を低下させるため，駆動力（接線力）と輪重変動に依存する限界接線力（輪重×粘着係数）の大小関係でわずかであると考えられるが巨視滑り状態と微小滑り状態の間で振動する，いわゆるロールスリップ現象が波状摩耗を形成する原因の一つと推定された。そこで石田らは，勾配や列車本数などの車両走行条件が同様で，波状摩耗が起きている新関門トンネルと波状摩耗が起きている北九州トンネルのレール表面分析を行い，新関門トンネルは北九州トンネルに比較してさびが生成しやすかつ成長が早く，さび層の厚さも大きいことを確認した<sup>4)</sup>。また，トンネル内に暴露した調査レールをX線回折により分析し，粘着係数を低下させることが指摘されているさび( $\beta$ -FeOOH)が新関門トンネルにおいてのみ検出された<sup>4)</sup>。

急曲線部走行時の乗り上がり脱線現象に関して，内軌頭頂面と車輪踏面間の摩擦力（転向横圧に相当）が大きな役割を果たすことが明らかにされている<sup>10)</sup>。その摩擦係数を決定する要因の一つである表面酸化物について，Tanagakiらは，車輪を模擬した平板試験片とレールを模擬した試験片表面の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ と $\text{Fe}_3\text{O}_4$ に着目した繰り返し転動試験により， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の割合が大きい場合に高い摩擦係数， $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の割合が小さい場合に低い摩擦係数が得られることを示した<sup>11)</sup>。

通常の滑り表面の摩擦・摩耗に及ぼすさびの影響につ

\* 鉄道力学研究部（軌道力学）

\*\* 材料技術研究部（潤滑材料）

\*\*\* 軌道技術研究部

† 東京工業大学 大学院理工学研究科

特集：鉄道力学

いては、1950年代から注目され、研究がなされてきた。摩擦係数の増減は、酸化反応の進行と接触界面での金属変形による酸化層の破壊の程度、つまり酸化層と金属の下地のヤング率の比、突起の半接触幅に対する厚さの比に依存することが示された<sup>12-16)</sup>。一方、車輪/レールの転がり摩擦特性に対するさびの影響について、文献<sup>1-11)</sup>のほか、大野らはレールトリボメータを用いて、実際の軌道に敷設されているレール面上にさびが存在する場合の摩擦係数を測定し、例えば、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、無定形 $\text{FeOOH}$ と $\text{Fe}_3\text{O}_4$ などが存在する場合の静摩擦係数は0.50-0.60、動摩擦係数は0.35前後になることを示した<sup>17)</sup>。また、大野らはレールに散水後の経過時間(酸化反応の進行状況が異なる)と摩擦係数の関係について、経過時間が長くなると摩擦係数が上昇することを示した<sup>8)</sup>。

以上のように、空転・滑走や波状摩耗、乗り上がり脱線などのトライボロジー現象に車輪とレール間のさびあるいは表面酸化物の影響は極めて大きいため、それらの現象を防止あるいは抑制するためにはさびと摩擦係数あるいは粘着係数の関係を明らかにすることが重要となる。そのためには、例えばレール表面に関して、可能な限り車輪転走の直前および直後の状態を分析することが有効であると考えられる。そのような分析、つまりその場(In-Situ)分析には、ラマン分光法(RAMAN)が適することが指摘されている<sup>18)</sup>。

本研究では、さびで覆われる幾つかの試験片を試作し、2円筒転がりすべり摩擦力試験機を用いてトラクション係数(転がりすべり状態にある回転体の接触部に作用する接線力係数)の時間的変化を測定し、また、実験前と実験後の表面性状について、ラマン分光法により定性分析を行った。以下、得られた実験結果と表面分析結果を報告する。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

2円筒転がりすべり摩擦力試験機を図1に示す。駆動側と制動側には、それぞれ2.5kWサーボモーターが装備されており、すべり率を両者の回転速度の差により設定することができる。試験片への荷重は、コイルばねによって制動側の軸が駆動側の軸を押え付けて与える。制動側モーター部は、X-Y方向(X:(回転)軸、Y:(回転軸に直角水平方向)軸)に移動可能なリニアガイドで浮動支持され、トラクションのX-Y方向成分を、ロードセルを用いてそれぞれ測定できるようになっている。このほか、駆動側には振動加速度検出器、制動側モーター部の軸心には熱電対が設置され、振動と試験片の温度を測ることができる。本試験機には、もう一つの特徴として、環境雰囲気コントロール作成装置が整備され、密閉した

チャンバー内の試験片周辺の温度および湿度を制御することが可能となっている。

水潤滑条件下の実験は、チャンバー内の試験片の近くに給水用ノズルが設置され、水タンクからさび効果の少ない純水が試験片の接触部に噴射される。

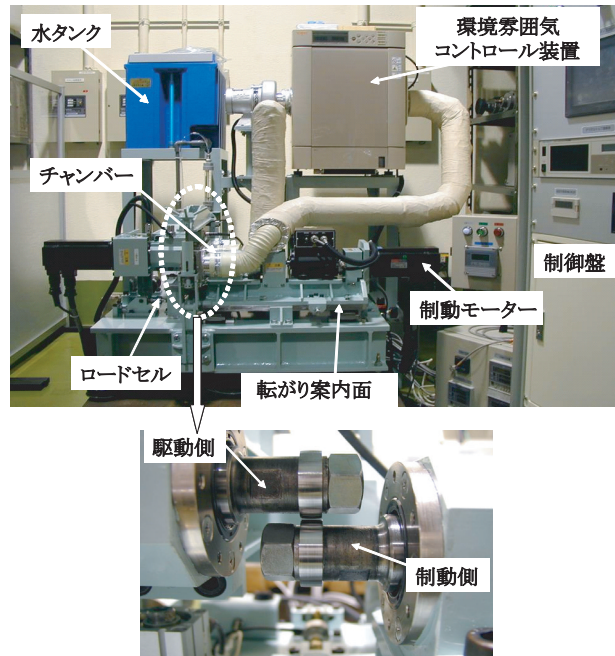


図1 2円筒転がりすべり摩擦力試験機

2.2 試験片

本研究で使用する駆動側と制動側の試験片は、普通レール(JIS 60kg)から切り出した直径30mm、幅8mmの円筒である(図2)。実際の車輪とレール間の接触圧力が得られるように、制動側の試験片の接触踏面は平らであり、駆動側の試験片の接触踏面には曲率半径40mmのクラウニングが施されている。試験片の接触踏面の粗さは $Ra0.08 \sim 0.12\mu\text{m}$ 、硬さは $Hv270 \pm 10$ の範囲である。表面粗さの測定には、白色光源による光学式三次元表面形状測定システム(AG社、 $\mu\text{Surf NanoFocus}$ )、試験片の硬さの測定には、マイクロビッカース硬さ計(アカシ、HM-124)を用いた。

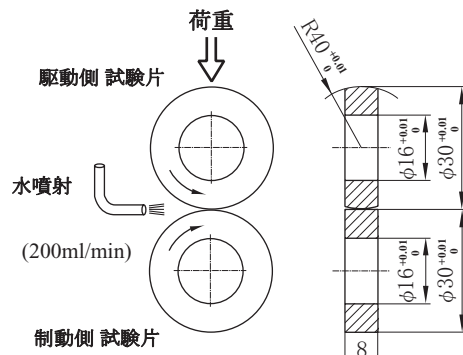


図2 試験片の寸法

表面付着物に関して、湿潤、湿気のある塩素および乾燥雰囲気下の条件下で生成すると考えられるさび、例えば、水酸化鉄、塩化鉄および酸化鉄の皮膜で覆われている駆動と制動側両方の試験片を試作した。水酸化鉄の生成については、2通りの方法によった。一つは、脱イオン蒸留水を試験片に噴霧し、35°C×1hr 湿潤→40°C×5min 加熱→40°C×55min 乾燥を1サイクル(2hr)として、計2サイクルを実施した(以後、水酸化鉄①と記す)。もう一つは、試験機のチャンバー(図1)の中に試験片を入れ、温度50°C、相対湿度80%RHの条件下において63hrで保持した(以後、水酸化鉄②と記す)。塩化鉄の生成については、塩分1%の脱イオン蒸留水を試験片に噴霧し、35°C×0.5h 塩水→35°C×0.5h 湿潤→40°C×1h 乾燥を1サイクル(2hr)として、計3サイクルを実施した。酸化鉄の生成については、2通りの方法によった。一つは、試作した水酸化鉄①試験片を高温炉に入れて加熱し、炉温が660°Cに達した時点で5分間を保持して、さび層中のオキシ水酸化鉄(FeOOH)を酸化鉄( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)に熱分解する処理を行った(以後、酸化鉄①と記す)。もう一つは、洗浄後の試験片を140°Cに熱したアルカリ性の薬品に10分間浸透させて、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>皮膜(膜厚約1~3 $\mu$ m)を作り出す黒染め処理を行った(以後、酸化鉄②と記す)。

### 2.3 実験条件と方法

実験条件は、面圧800MPa、転がり速度1.26m/s、すべり率0.7%、チャンバー内の温度30°C、相対湿度60%RHと設定した。両試験片の相対すべり距離は、すべり率、転がり速度および時間の積になるので、ここでは、運転時間100秒がすべり距離0.882mに相当する。水潤滑の場合は、上記の条件以外に、20±2°Cの純水を200ml/minで噴射して実験を行った。

実験前に試験機の温度、湿度およびリニアガイドの起動摩擦を安定させるために、まず、試験片を装着しない状態で30~40分間運転させた。試験片を装着した後、設定した雰囲気条件になるように気温と湿度を制御して定常になってから、接触面圧、転がり速度、すべり率などを設定して実験を行った。試験片間に発生するトラクションは、X-Y転がり案内面に設置したロードセルにより検出され、A/Dコンバータを通してパソコンに収録された。

試験片の表面付着物の定性分析は、ラマン分光法により、実験前並びに実験後に同一の箇所で行った。ただし、装置の都合上でその場の分析ができないため、実験の場所と離れたところで行われた。試験片を実験場所から測定場所へ移動する際に、極力さびの進行を抑えるように乾燥剤や真空パックを利用した。ラマン分光分析装置(KAISER OPTICAL SYSTEM, Holo Lab 5000R)は、レーザー光源の波長532nm、測定スペクトル領域100~4400cm<sup>-1</sup>、分解能5cm<sup>-1</sup>である。

### 3. 実験結果と考察

試験片の接触面にさびの生成処理の有無によるトラクション係数の違いを確認するために、さびを生成させていない清浄な試験片(以後、さび処理なし試験片と呼ぶ)について、乾燥と水潤滑条件下での実験を行った。それから、さびの皮膜を有する試験片を用いて、乾燥条件のみにおいて実験を行った。図3は、乾燥条件でのさび処理なし、酸化鉄①と酸化鉄②の試験片のトラクション係数を比較した結果、図4は、水潤滑条件下でのさび処理なし、水酸化鉄①と塩化鉄の試験片のトラクション係数を比較した結果である。

図3から、乾燥条件でのさび処理なしの場合の最大トラクション係数が最も高く、次いで、酸化鉄①、酸化鉄②の順に小さくなるのがわかる。すべり時間が長くなるにつれて何れのトラクション係数も定常値に漸近するが、酸化鉄①の場合は、比較的低い値を示している。図4から、水酸化鉄①の場合の最大トラクション係数が最

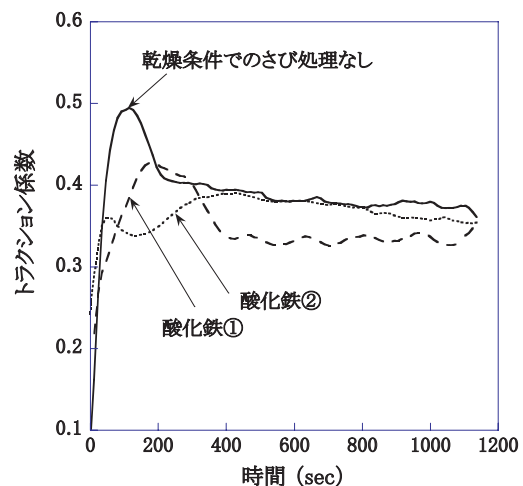


図3 乾燥条件でのさび処理なし、酸化鉄①と酸化鉄②の試験片のトラクション係数

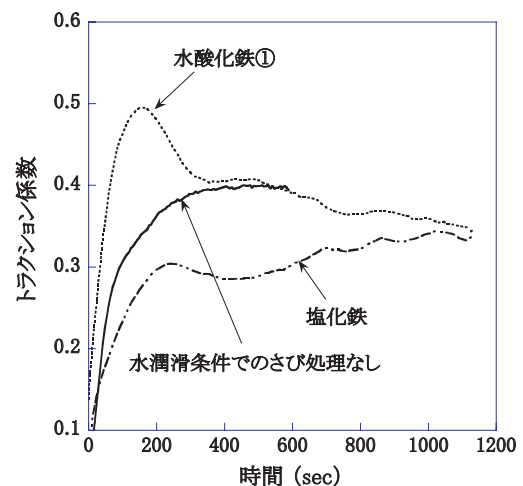


図4 水潤滑条件下でのさび処理なし、水酸化鉄①と塩化鉄の試験片のトラクション係数

特集：鉄道力学

も高く、それから、水潤滑条件でのさび処理なし、塩化鉄の順に小さくなるのがわかる。すべり時間が長くなると水酸化鉄①と水潤滑条件でのさび処理なしの場合のトラクション係数がほぼ同じ値になるが、塩化鉄の場合のみトラクション係数が依然低い値を示している。図3と図4のトラクション挙動を見ると、摩擦の初期において、トラクション係数がすべり時間の増加とともに大きくなり、ピーク値を超えたところで一旦低下し、それから再び大きくなって定常値に漸近していく傾向が多い。そして、2回目のピーク値は、1回目よりも大きくなる場合がある。これらの挙動は、摩擦過程に伴う表面性状変化に関係すると考えられる。つまり、図5のようにすべり時間が長くなるに従ってトライボケミカル反応により表面酸化物の性質が変化するので、トラクション係数は常に新たな表面生成物に依存して変化する。

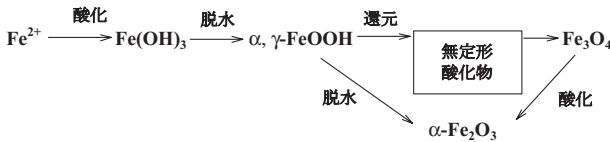


図5 鉄さびの生成モデル

鉄道において、粘着係数はトラクション係数の最大値と定義されている。試験片の表面付着物と粘着係数の関係を調べるため、再度実験を実施した。この場合は、トラクション係数の最大値（第1回目のピーク値）を得るところで実験を停止し、また、実験前と実験後にラマン分光法により表面付着物の定性分析を行った。図6に、乾燥条件でのさび処理なし、酸化鉄①、酸化鉄②の試験片の最大トラクション係数、図7に、水潤滑条件でのさび処理なし、水酸化鉄①、水酸化鉄②と塩化鉄の試験片の最大トラクション係数を示す。乾燥条件でのさび処理なしと酸化鉄①の試験片の最大トラクション係数の相関関係を除き、すべりが始まってから最大トラクション係数

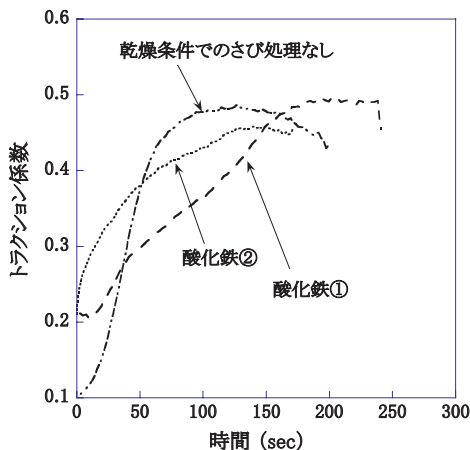


図6 乾燥条件でのさび処理なし、酸化鉄①、酸化鉄②の試験片の最大トラクション係数

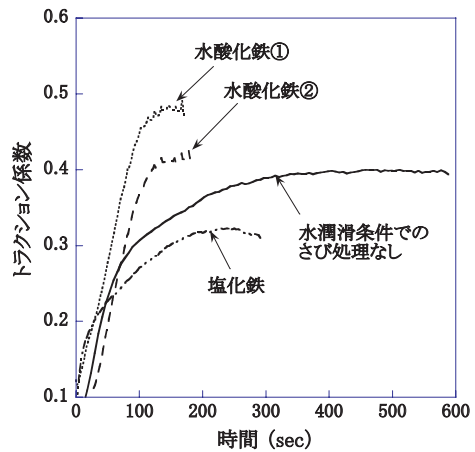


図7 水潤滑条件でのさび処理なし、水酸化鉄①、水酸化鉄②と塩化鉄の試験片の最大トラクション係数

に至るまでの過程において、図6、7の実験結果と図3、4はほぼ傾向が一致していることが確認できる。

図8は、ラマン分光法により測定した乾燥条件でのさび処理なし、酸化鉄①、酸化鉄②の試験片の実験前と実験後の表面付着物である。ただし、さび処理なしの場合は、実験前のオージェ電子分光法（AES）による元素分析結果から、ラマン分光の分解能以下の酸化膜しか存在しないことを確認したので、実験前にラマン分光による分析は行わなかった。図8に示すように、乾燥条件でのさび処理なしの場合は、実験後に $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、酸化鉄①の場合は、実験前に $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、実験後に $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、酸化鉄②の場合は、実験前と実験後に $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が検出された（表1）。図には示していないが、同一の酸化物に関して、実験前より実験後のラマン散乱強度が弱くなっているのが、実験中にさびの皮膜が擦られてさびの量が少なくなったと推定される。

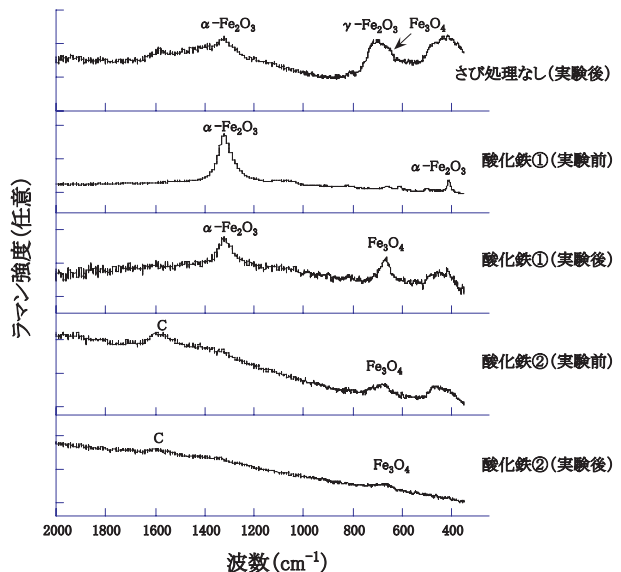


図8 乾燥条件でのさび処理なし、酸化鉄①、酸化鉄②の試験片の表面分析結果

表1 実験前後の表面付着物(図6)

試験片	実験前	実験後
さび処理なし		$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
酸化鉄①	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
酸化鉄②	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>

表1の実験前後の表面付着物の分析結果を図6と照らし合わせると、 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(酸化鉄①)を有する場合の粘着係数がFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(酸化鉄②)より高く、また、同じFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の場合でも、 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(酸化鉄①)のみある場合の粘着係数が $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(乾燥条件でのさび処理なし)がある場合に比べて高くなっていることがわかる。

図9は、ラマン分光法により測定した水潤滑条件でのさび処理なし、水酸化鉄①、水酸化鉄②、塩化鉄の試験片の実験前と実験後の表面付着物である。上述と同じ理由で、実験前にラマン分光による分析を行わなかった。水潤滑条件でのさび処理なしの場合は、実験後に $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、水酸化鉄①および水酸化鉄②の場合は、実験前に $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>と $\gamma$ -FeOOH、実験後に $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、塩化鉄の場合は、実験前に $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>とFeCl<sub>3</sub>、実験後に $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が検出された(表2)。図8と同様に、同一の酸化物に関して、実験前より実験後のラマン散乱強度が弱くなっている。

表2の実験前後の表面付着物の分析結果を図7と照ら

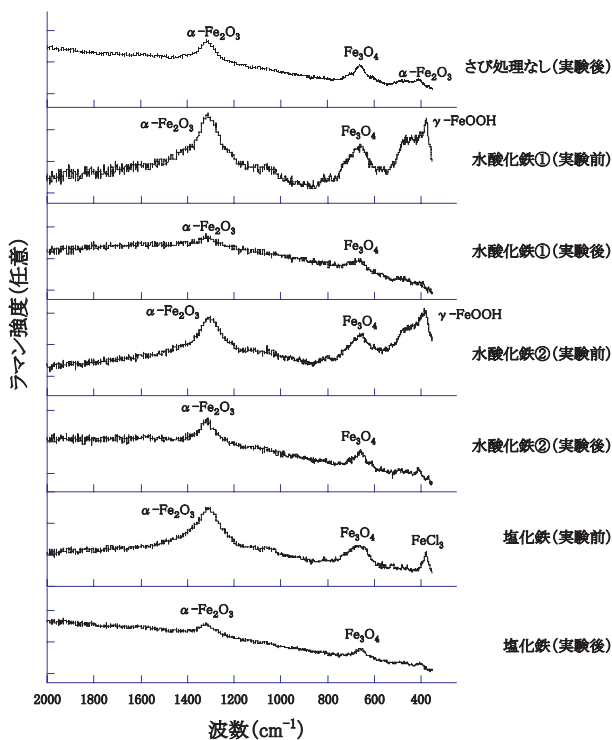


図9 水潤滑条件でのさび処理なし、水酸化鉄①、塩化鉄の試験片の表面分析結果

表2 実験前後の表面付着物(図7)

試験片	実験前	実験後
さび処理なし		$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
水酸化鉄①	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\gamma$ -FeOOH Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
水酸化鉄②	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\gamma$ -FeOOH Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
塩化鉄	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> FeCl <sub>3</sub>	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>

し合わせると、 $\gamma$ -FeOOHを有する場合(水酸化鉄①、水酸化鉄②)の粘着係数が $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(水潤滑条件でのさび処理なし)より高く、また、FeCl<sub>3</sub>を有する場合の粘着係数が小さいことがわかる。

#### 4. 酸化物による粘着係数の変化

本研究で得られた実験結果と表面付着物の分析結果を総合的に考察すると、乾燥雰囲気の下で生成されるさび(図6)、例えば、主成分 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の皮膜が車輪あるいはレールの表面に存在する場合の粘着係数が、乾燥条件でのさびなし状態に比べて高いことが推定される。また、主成分Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の皮膜が存在する場合は、粘着係数を低下させる効果があると考えられる。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>よりもFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の粘着係数が大きいことは、水谷ら<sup>19)</sup>とTanagakiら<sup>11)</sup>の実験結果と一致する。

一方、湿潤あるいは湿気のある塩素雰囲気の下で生成されるさび(図7)、例えば、主成分 $\gamma$ -FeOOHのさび層が車輪あるいはレールの表面に存在する場合の粘着係数が、水潤滑条件でのさびなし状態に比べて高いことが推定される。また、塩素イオン(Cl<sup>-</sup>)のさび層を有する場合は、粘着係数を大きく低下させる効果があると考えられる。これらの結果について、清浄な試験片(水潤滑)、純水噴霧(主成分： $\gamma$ -FeOOH)および3%NaCl水溶液を噴霧(主成分：短時間噴射で $\gamma$ -FeOOH、長時間噴射で $\beta$ -FeOOHが生成される)して生成したさび試験片を用いた大野ら<sup>8)</sup>の実験結果と傾向が一致する。ただし、彼らの報告では、主成分 $\beta$ -FeOOHの場合の摩擦係数が一番小さいことを示した。 $\beta$ -FeOOHは、Cl<sup>-</sup>あるいはF<sup>-</sup>の存在下で生成される特有のオキシ水酸化鉄である<sup>20)</sup>。本研究では、大野らのさび生成時間に比べて塩水の噴射時間が短いため、 $\beta$ -FeOOHの生成が認められなかった。ただし、Cl<sup>-</sup>を含有することによって、潤滑効果があったと推測される<sup>21)</sup>。この結果から、海底トンネル内や海沿い線区など比較的塩素環境に長時間暴露される

特集：鉄道力学

地点においては、粘着条件が悪くなることが考えられる。

実際には、粘着係数に対する影響因子の中、さびの主成分以外、さびの皮膜の厚さの影響も考えられる。また、走行速度や輪重、すべり率、雰囲気(温度&湿度)などの接触条件下におけるトライボケミカル反応により、接触部の表面性状(表面粗さ、表面硬さ、新たな酸化物の生成など)を変化させ、粘着係数の変化をもたらす場合もあると考えられる。

5. まとめ

車輪とレール間にさびが介在する場合の粘着挙動を明らかにするために、湿潤、湿気のある塩素および乾燥雰囲気下の条件下で生成されると考えられるさび、例えば、水酸化鉄、塩化鉄および酸化鉄の皮膜で覆われる試験片を試作し、2円筒転がりすべり摩擦力試験機を用いた基礎試験を行った。また、ラマン分光法により実験前と実験後の表面付着物について定性分析を行った。結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 主成分  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の皮膜が存在する場合の粘着係数は、さびが殆どない状態に比べて高かった。また、主成分 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の皮膜を有すると、粘着係数を低下させる効果があった。
- (2) 主成分  $\gamma$ -FeOOH のさび層を有する場合の粘着係数は、水潤滑条件下でのさびが殆どない状態に比べて高かった。また、Cl<sup>-</sup> を含有する場合は、粘着係数を大きく低下させる効果が示された。
- (3) Cl<sup>-</sup> は、粘着係数を低下させる可能性が示され、しゅう動試験の最後まで残存した。
- (4) トラクション係数の挙動は、摩擦過程で生ずるトライボケミカル反応による生成物に依存することが示された。

今後は、実際に敷設されているレールのその場の表面分析を行い、実際のさびと粘着挙動の関係をより明瞭にすることが期待される。

文献

- 1) 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 (2004), pp.316-322
- 2) 陳樺, 石田誠, 伴巧: “表面粗さ突起部形状を考慮した粘着力解析”, 鉄道総研報告, Vol.18, No.8 (2004), pp.35-40
- 3) 石田誠, 青木宣頼: “レール摩擦係数の要因分析”, 日本鉄道施設協会誌, No.3 (2005), pp.22-25
- 4) 石田誠, 青木宣頼, 曾根康友, 伴巧, 白水健介, “塩水環境における波状摩耗の発生原因に関する一考察”, 鉄道総研報告, Vol. 19, No. 9 (2005) pp.11-16

- 5) 大山忠夫: “粘着の考え方と高粘着制御への道”, 電気車の科学, Vol.47, No.3 (1994), pp.11-15
- 6) 例えば: “本社委託研究報告-粘着力の解明”, 鉄道総研, (1966-1967), pp.1229
- 7) 伴巧, 大野薫: “レール表面に生成する鉄さびの摩擦特性”, トライボロジー会議予稿集, 1997-11, pp.388-390
- 8) 大野薫, 小川喜次: “車輪・レール間の粘着への錆の影響”, 鉄道技術研究所速報, No.A-83-70, 1983
- 9) 瀬川祥, 利倉亮一, 石田誠, 瀧川光伸: “海底トンネルにおけるレール波状摩耗解明および対策検討”, 鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail'01), pp.57-58
- 10) 石田誠, 中原綱光: トライボロジスト, Vol.46, No.7 (2001), pp.548-555
- 11) T. Tanagaki, N. Umehara, M. Ishida and Y. Jin: “A foundational study of the effect of produced iron oxides on friction between ring and flat rail steel specimen under repeated rolling and the detective method of iron oxide using electrical resistance”, The third Asia International Conference on Tribology, ASIATRIB 2006, Kanazawa, Japan, October 16-19, 2006, Vol. 1 (2006) pp.627-628
- 12) R. W. Wilson: “Influence of oxide films on metallic friction”, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 212 (1952) pp.450-452
- 13) R. W. Wilson: “The Contact Resistance and Mechanical Properties of Surface Films on Metals”, Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Vol. 68 (1955) pp.625-641
- 14) K. Komvopoulos, N. Saka, and N. P. Suh: “The Significance of Oxide Layers in Boundary Lubrication”, Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol. 108, No. 4 (1986) pp.502-513
- 15) T. Saito, Y. Imada, K. Sugita and F. Honda: “Tribological study of chemical states of protective oxide film formed on steel after sliding in humid atmosphere and in aqueous solutions”, Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol. 119 (1997) pp.613-618
- 16) 今田康夫: “軟鋼の摩擦摩耗特性に及ぼす湿度と生成酸化物の影響”, トライボロジスト, Vol. 41, No. 10 (1996) pp. 844-851.
- 17) 大野薫, 伴巧: “レールトリボメータの改良と車輪・レール間の粘着状態の評価”, 鉄道技術研究所速報, No.A-87-118, 1987
- 18) Y. Sone, J. Suzumura, T. Ban, F. Aoki and M. Ishida: “An In-Situ spectroscopic analysis of rail surface contamination”, 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2006), Brisbane, Australia, September 24-26, 2006, (2006) pp.335-340
- 19) 水谷義之, 中島耕一: “さびの摩擦”, 潤滑, Vol. 22, No. 3 (1977) pp.177-182
- 20) 三沢俊平, 橋本功二, 下平三郎: “防蝕技術”, 23, 1 (1974), pp.17
- 21) Bowden, Tabor: “The Friction and Lubrication of Solids”, Part II, Chapter VII, Oxford (1964)