

# 車輪とレールの間に介在する物質が起こす現象

伴 巧

材料技術研究部(摩擦材料 主任研究員)



ばん たくみ

## 車輪とレールの接触が担う役割とは

日本に初めて鉄道が開業したとき、車輪とレールは既に鉄製でした。レールは、車輪の沈み込みを防止するために、地面に板や石材を敷き詰めた敷設物が起源とされています。つまりレールとは、荷車の荷重を支持して、車輪を円滑に回転させる役割を基本としています。その後、車輪の進路を案内するために、フランジ(つば)付きのレールが用いられた時代を経て、18世紀後半にフランジは車輪側へと移され、現在の車輪とレールの原型ができました。当時は馬や人が動力源になっていたため、車輪とレールの間で駆動力の伝達は不必要でしたが、19世紀に入り蒸気機関車が登場すると、車輪とレールの接触部は車輪の回転力をレールに伝える重要な役割を担うこととなります。いわゆる粘着鉄道の始まりです。さらに、導電性を持つ車輪とレールを利用した信号システム(軌道回路)が19世紀後半に発明されると、車輪とレールの接触部に電気接点としての役割も課せられ、現在では電気鉄道に不可欠な帰線電流(電化区間で電車から変電所に戻る電流)も車輪とレールの接触部を経由しています。

## 車輪とレールの間の介在物

現行の車輪およびレールは、材質に剛性の高い高炭素鋼

を使用していますが、双方の接触点に加わる大きな荷重によって両接触部は変形を生じます。これにより車輪とレールの間には約 $1\text{cm}^2$ の接触面が形成されます。通常、この接触面内に様々な物質が介在した状態で列車は運行され、介在物の種類と量(厚み)が車輪とレールの間で起こる種々の現象に影響を及ぼします。表1は主な介在物の種類を示したもので、一見きれいに思える接触面でも微視的に観れば図1に示すようにナノメートル( $10^{-9}\text{m}$ )単位の物質が付着しています。図中の「一般の汚れの膜」とは大気中に存在する分子サイズの有機物や、酸素や水分子などで構成されています。このように表面が乾燥した状態での車輪とレールの間の摩擦係数(粘着係数)は0.4前後で、ゴムタイヤとアスファルト路面の間の摩擦係数に比べれば小さいですが、車両の加速または減速時に問題が発生することはありません。しかし、雨天時や結露などでレールに水が付着すると、粘着係数は大きく低下し、場合によっては車輪の空転や滑走が発生します。また、雨上がり後のレール面上に生成する赤さびは、多量に堆積した場合に軌道回路の短絡(輪軸が左右レールをショートさせること)状態を悪くすることが知られています。

また、沿線環境や気象条件によりもたらされる介在物と列車運行時に生じる介在物は、一部の鉄さびと金属系の摩

表1 車輪とレールの間の主な介在物

|               |   |
|---------------|---|
| 環境・気象上、介在する物質 | 大気中の汚れ、踏切の汚れ<br>水、雪、結氷、鉄さび<br>青草、落ち葉、虫<br>海水(波の華)、黄砂  |
| 列車運行上、介在する物質  | 車輪とレールの摩耗粉<br>ブレーキシューの摩耗粉<br>油煙(オイルミスト)類<br>噴泥、洗面所の排水 |
| 意図的に介在させる物質   | 増粘着材(砂、セラミックス)<br>潤滑材(油、グリス、他)<br>各種摩擦調整材<br>レールめっき   |

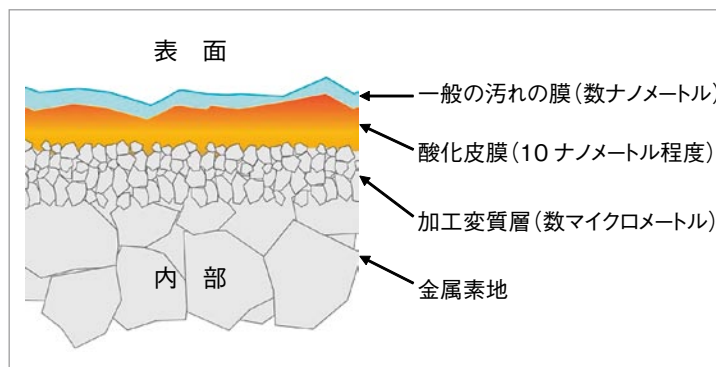


図1 金属の表層構造を示す模式図



図2 熱処理レールの走行面に生成した変色帯



図3 一般的なレール面の赤さび

耗粉を除いて、程度に差はありますが車輪とレールの間の粘着係数を減少させる物質です。これらは多量に介在したり、複数が競合した場合に空転や滑走といった問題を発生させるため、粘着係数を増加させる（増粘着）対策に、古くから「砂まき」が行われてきました。

一方、環境や気候の影響が少ない地下区間や列車本数が多い都市鉄道の場合は、これまでの話とだいぶ異なります。特に急曲線走行時の車輪フランジと曲線外側レール（外軌）側面の接触部、および車輪走行面と曲線内側レール（内軌）走行面の接触部は、激しく擦り合うために、双方の表層部は摩耗して金属素地が露出した状態になります。このように介在物が気成分以外に無い接触状態では、車輪とレールの間の摩擦係数が0.6以上になることもしばしばあります。また、普通レールより硬い熱処理レール使用箇所において、レールの車輪走行面内にピンク色の変色帯が見られることがあります（図2）。摩擦係数測定器によるその部分の測定値は0.7前後と非常に大きく、赤色系の色であることから、この帯はレール表層に生成した三酸化二鉄（ $Fe_2O_3$ ）と推定できます。曲線区間における摩擦係数の増大は、内軌走行面の「波状摩耗」や「きしり音」発生の原因になることから、最近では内軌走行面の潤滑が各方面から注目されています。

本稿では、数ある介在物の中でも介在する機会が多い「鉄

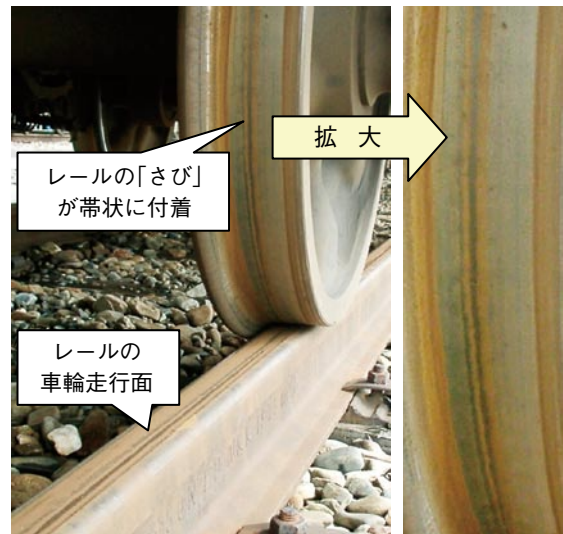


図4 車輪に付着する赤さびの様子



黒い皮膜

紙ヤスリで磨いた面

図5 黒さびが付着したレールの走行面状態

さび」と、増粘着対策に有効な「セラミックス系増粘着材」および新しい内軌走行面潤滑剤の「カーボン系摩擦緩和材」について、車輪／レール接触部でのふるまいを紹介します。

### 「鉄さび」が起こす諸現象

「鉄さび」とは鉄や鉄合金の腐食生成物の中で水に溶けない物質の総称です。前述の三酸化二鉄（ $Fe_2O_3$ ）も鉄さびの一種ですが、通常よく目にするレール面の赤さび（図3）は主にオキシ水酸化鉄（ $FeOOH$ ）です。このオキシ水酸化鉄には $\alpha$ 型、 $\beta$ 型、 $\gamma$ 型、無定型など複数のタイプがあって、生成直後はレモン色やオレンジ色をしています。しかし、時間が経過すると、徐々に茶褐色へと変化します。通常、レールに生じた赤さびは、車輪の走行により取り除かれる一方で、図4のように車輪踏面にも付着します。また、列車本数の少ない線区においては、赤さびの取れたレール面が図5のように黒ずんでいる場合が多々見られます。これは酸化鉄（ $FeO$ ）や四酸化三鉄（ $Fe_3O_4$ ）などの黒さびで、緻密な皮膜として存在しています。黒さびは赤さびに比べて絶縁性は低いものの、数ミクロン程度に堆積すると、短絡現象に影響を及ぼしかねません。また、黒さびは粘着係数を下げる物質であり、閑散線区における低粘着現象の要因の一つに挙げられています。

例年、高温多湿となる梅雨期を迎えると、レールの鉄さ

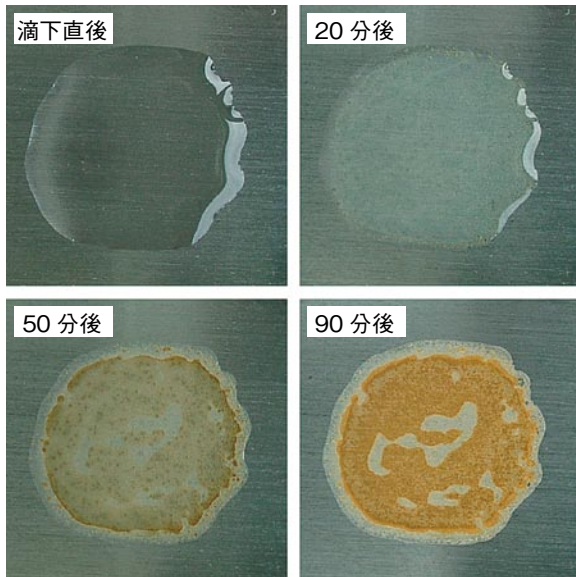


図6 レール表面にたらしした水滴の経時変化

びに起因して、短絡不良が発生する可能性が高まります。元来、車輪やレールはさびやすく、磨いたレール表面にたらしした水滴は、図6のように簡単に赤さびを発生させます。この実験は雨水と同程度の水素イオン濃度に調整した弱酸性水溶液 (pH5.6) を用い、室温放置状態で行っていますが、鉄さびの生成過程はpHや温度条件により多様に変化をすることが知られています。なお、図6で放置50分後に見られる緑色の斑点は、硫酸イオンや塩素イオン等の存在下で生成すると言われている「緑さび」ですが、不安定な物質のため、時間の経過とともに他の種類の鉄さびへと変わります。

これまで携わったレール面の鉄さび問題で、短絡不良発生箇所共通した事柄のうち、レールの特徴としては頭頂部の摩耗が挙げられます。これは、レール頭頂部が平坦になることで、多量の浮さび(表面に粉をまぶした状態)が生成しやすい状況を招くためと考えられます。加えて、平坦なレール頭頂面は車輪踏面との接触圧力を低下させるため、一般的には介在物の影響が顕著に現れやすい状態になります。具体的には、レール走行面では図7に示した模式図のように、降雨後に発生する鉄さびの量が表面に残る水の量によって異なり、大きな水滴ほど多量に浮さびを生成します。平坦な頭頂部には大きな水滴が残るため、列車の通過がない時間帯に蒸発が進行すると多量の浮さびが発生します。なお、鉄さびの生成過程は電気化学反応のため、レールに流れる電流も影響する複雑な現象です。いずれにしても、「レール走行面を常に水切れの良い状態に保持することで、浮さびの発生を少なくできる」と考えられます。

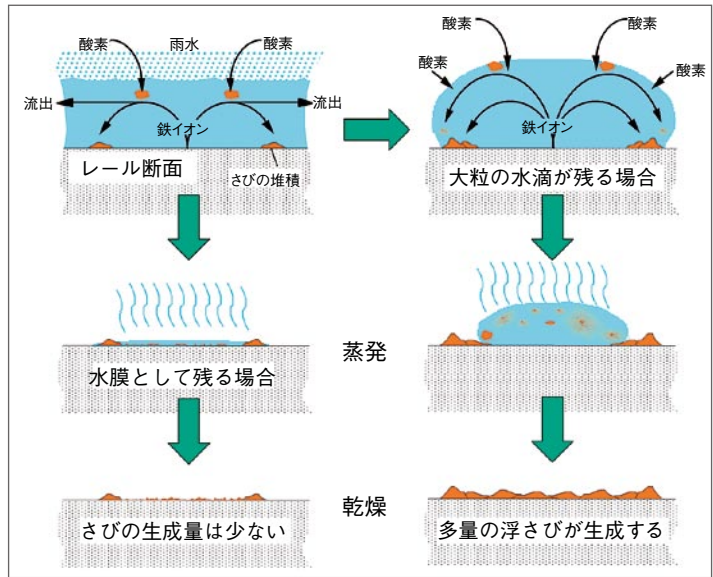


図7 鉄さびの生成過程を示す模式図

一方、レール表面に付着したさび(オキシ水酸化鉄)の摩擦特性は、さび粒子の大きさ、量、摩擦速度等によって変化します。特に速度依存性は大きく、比較的高い静摩擦係数と低い動摩擦係数の関係から、接触部に摩擦振動を生じさせやすい状況をもたらします。

### 摩擦制御を目的に介在させる物質

図8の増粘着材噴射装置(セラジェット)で使用される「増粘着材」や摩擦緩和システム(フリモス)用に開発された「摩擦緩和材」は、どちらも直径が0.3mm程度の粒子で車上から車輪とレールの間へ供給して接触部の摩擦状態を改善するために使用される物質です。

#### (1) セラミックス系増粘着材

車輪とレールの間の低粘着問題に、先人達は「砂まき」という解決策を見出し、以降「大粒の砂(小砂利)を砕く際の抵抗こそが、粘着力増大の源」との考え方が主流を占めていました。しかしながら基礎的な実験等を進めた結果、砂粒等の硬質粒子による増粘着機構は、①粘着係数は供給粒子の粒径には依存しない、②供給粒子は車輪とレールの間の接触圧に耐えられる大きさまで砕かれてから接触面内に入っていく、その大きさは粒子の機械的強度に依存する、③これらの砕かれた微粒子が接触面に一層並んだ状態でその効果は飽和するため、従来の砂まきのような量は不要である、④油や落ち葉などの皮膜が厚くなる厳しい条件では機械的な強度の高い材料の使用が望ましい、等が明らかにされています<sup>1)</sup>。

実際に空転や滑走が問題となるのは、水、油、落ち葉な



図8 増粘着材(左)と摩擦緩和材(右)

どの潤滑性皮膜によって車輪とレールの間の接触が妨げられ、金属同士が接触している面積が減少する場合があります。特に高速域では、たとえ粘性の低い水であっても速度の上昇とともにその膜厚も増加するため、粘着係数の低下が著しくなります。このような状況では、図9に示すように、それらの皮膜を貫通して車輪とレールの間に力を伝えるための物理的な突起やアンカーを接触表面に作る事が最も効果的であり、費用対効果の観点からはアルミナ(酸化アルミニウム)が実用的なセラミックス材料として選定されました。

なお、アルミナ自体は絶縁材料ですが、少量の使用条件では、接触部の鉄さび層を破碎して短絡を促進させる効果があることも大きなメリットです。

## (2) カーボン系摩擦緩和材

曲線区間においては、車輪とレールの間の摩擦係数増大による内軌走行面の「波状摩耗」や「きしり音」等の発生が問題になっています。この対策に、内軌走行面潤滑はとても効果的な手法です<sup>2)</sup>。しかし、極端に摩擦係数を低下させると、こんどは粘着上の問題が浮上します。そこで、鉄道総研では、一般的な潤滑油とは異なる「摩擦緩和材」を開発しました。

摩擦緩和材の最大の特徴は「乾燥した固体粒子」を使用する点にあります。摩擦緩和の有効成分には、カーボン系潤滑剤であるグラファイト(黒鉛)を選定しましたが、その理由として、①他の固体潤滑剤(例えば二硫化モリブデン(MoS<sub>2</sub>)やフッ素樹脂(PTFE)等)に比べ安価である、②摩擦緩和性能を左右するカーボン粒子内の黒鉛化度(非

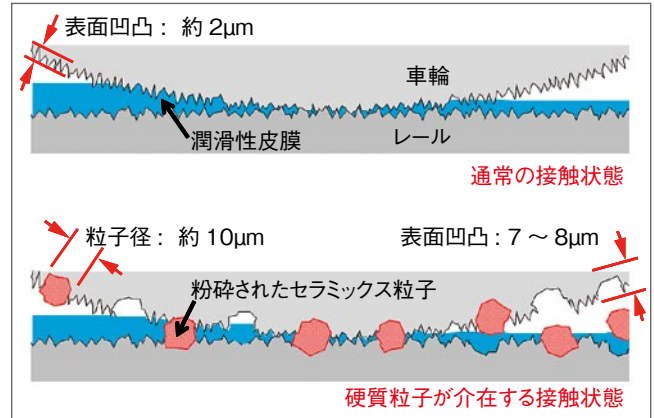


図9 硬質粒子の介在を示す模式図

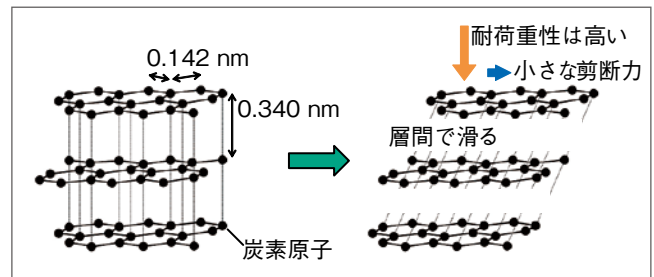


図10 黒鉛の潤滑機構を示す模式図

晶質炭素と黒鉛の割合)が熱処理で調整できる、③導電性を有しており、車輪とレールの間の電気的接触を妨げない、④化学的に安定で、環境や生態系に影響を及ぼす心配がない、が挙げられます。また摩擦緩和材の潤滑機構は、層状構造を有する固体潤滑剤特有のもので、図10に示すように、六方晶形と呼ばれる結晶構造内部で生じる滑りが、そのまま潤滑作用として現れたものです。そのため、摩擦係数の速度依存性は少なく、安定した摩擦状態が得られます。

## おわりに

車輪とレールの間に生じる諸問題は、多種多様で、現状では個別に対策が講じられています。しかし、個々の対策が新たな問題の種になる場合もあります。

本稿が、対策を進める際の一考となれば幸いです。RRR

## 文献

- 1) 大野薫：増粘着材噴射装置(セラジェット)―その1―，RRR，Vol.63，No.1，2006，pp.36-37
- 2) 石田誠：車輪／レール間潤滑による保守低減効果，RRR，Vol.62，No.4，2005，pp.26-29