

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

鉄道におけるトライボロジー

トライボロジーとは、摩擦・潤滑・表面損傷などを取り扱う工学の分野を表す用語です。鉄道におけるトライボロジーとして該当する車輪／レール、摩擦ブレーキ、軸受、トロリー線／パンタグラフすり板を取り上げ、現状と課題を材料技術の観点から紹介いたします。



宮内 瞳岬
Toru Miyauchi
材料技術研究部
摩擦材料研究室
室長
【専門分野】ブレーキ材料、
鑄鉄制輪子、トライボロジー

はじめに

トライボロジーという言葉はご存じでしょうか？トライボロジー辞典によると、“**相対運動を行いながら相互作用を及ぼし合う表面およびそれに関連する実際問題の科学技術と定義される。**摩擦・潤滑・表面損傷などを取り扱う工学の分野を表す用語として、1966年にイギリスで提唱され、一般に用いられるようになった。”とあります。1992年、日本潤滑学会は日本トライボロジー学会に改称され、現在ではトライボロジーという言葉は工学の分野では一般的に使用されるようになりました。

鉄道におけるトライボロジーには、

どのような箇所が該当するでしょうか？車輪／レール、摩擦ブレーキ、軸受、パンタグラフすり板／トロリー線などです(図1)。これらについての現状、問題点および課題などについて材料技術の観点から述べたいと思います。

車輪／レール

列車加速時の駆動力と減速時のブレーキ力は車輪とレール間の摩擦(粘着)によって得られます。

安定した高速走行を行うために、降雨時などにおいても一定の粘着係数を確保する必要があります。降雨時や落ち葉により車輪／レール間の粘着係数が低くなると、起動時もしくは加速時

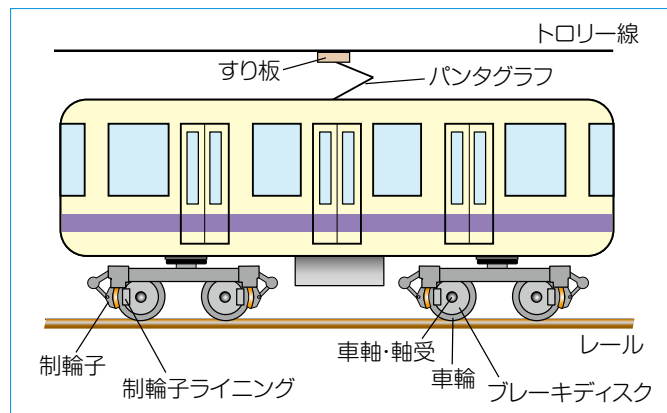


図1 鉄道におけるトライボロジー該当箇所

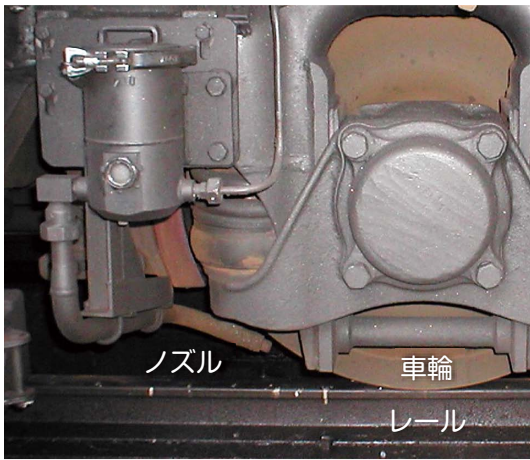


図2 セラジェット



図3 レール波状摩耗

に車輪が空転することがあります。また、列車が勾配を登れなくなる場合もあります。ブレーキ時には、ブレーキの摩擦力が粘着力より高い場合、車輪がロックし、車輪踏面がレール上を滑走します。

新幹線電車においては、粘着係数を確保するため、開業の初期から増粘着研磨子を車輪踏面に押し付けることにより車輪踏面の汚れを除去し、適度な粗さを与えてきました。在来線車両には、砂まき装置が取り付けられています。近年では、セラミックス粒子を車輪とレール間に少量噴射する増粘着材噴射装置(セラジェット)(図2)が開発され、新幹線電車や在来線車両で実用化されています。

曲線部での摩擦・摩耗・潤滑

2000年に発生した地下鉄日比谷線の列車脱線事故の主な要因の一つとして、車輪とレール間の摩擦係数が挙げられています。

鉄道車両が曲線部を通過する際には車輪フランジとレールゲージコーナー間の大きな作用力とその接触形状に依存するすべりにより、レールや車輪フランジに大きな摩耗が生じることがあります。また、急曲線において、レール上に波長50～150mmの連続する凹凸(波状摩耗, 図3)が見られることが

あります。曲線部ではきしり音が発生することもあります。

これらの曲線部の諸問題を軽減するため、摩擦係数を適当な範囲に調整する摩擦調整剤が開発されています。

車輪・レールの材質と損傷¹⁾

一体圧延車輪の炭素量は0.60～0.75%であり、踏面の熱処理の区分により、使い分けられています。国内で一般的に使用されているレールには、普通レール、熱処理レールがあります。普通レールの炭素量は0.63～0.75%、熱処理レールの炭素量は0.72～0.82%で、熱処理レールは普通レールより硬く、主に急曲線の外軌に耐摩耗用として使用されています。

車輪がレールを転がり、滑ることで、車輪とレールが接触する部分に損傷が発生します。車輪の損傷としては、「凹摩耗」、曲線走行による「フランジ直立摩耗」、「フラット」、「剥離」、「多角形摩耗」、車輪踏面に制輪子による摩擦が加わることによる「熱き裂」、寒い地方で発生する「と食(☞参照)」などがあります。一方、レールの損傷

☞ と食

フラット剥離の一つの形態と考えられていますが、詳細な発生メカニズムはわかっていません。

としては、「波状摩耗」のほか、「頭頂面摩耗」、曲線部における「側面摩耗」、転がり接触疲労損傷である「シェリング」や「ゲージコーナーき裂」、緩曲線の外軌側レールのゲージコーナーに発生する「きしみ割れ(☞参照)」などがあります。これらのうち、シェリングはレール折損につながる可能性があり、現在でも最も大きな損傷の一つで、転がり疲労層を除去してシェリングの発生を抑えるために、と石によるレール削正が行われています。

摩擦ブレーキ

鉄道の摩擦ブレーキには踏面ブレーキとディスクブレーキがあります。踏面ブレーキとは、制輪子と呼ばれるブロックを車輪踏面に押し付ける方式で、ディスクブレーキは、ディスクを車軸もしくは車輪側面に取り付け、制輪子ライニングを押し付ける方式です。

制輪子²⁾

現在使用されている制輪子には、材質別に铸铁制輪子、樹脂系の合成制輪子、焼結合金制輪子があります。

铸铁制輪子は、他の制輪子と比較して、摩擦係数が低い、摩耗量が多い、重いなどの欠点を有しています。しかし、铸铁制輪子は、その摩耗粉が車輪踏面に付着することで、車輪踏面を粗面化し、車輪/レール間に高粘着係数が得られます。また、湿潤条件下で摩擦係数が安定しているなどの長所があり、摩擦性能が改善された合金铸铁制輪子が北海道では広く使用されています。

☞ きしみ割れ

レールゲージコーナー部の車輪接触に際して、大きい滑りをとめないながら過大横圧が負荷され、その表層部が塑性変形して連続的に発生する細かいピッチのせん断疲労き裂をいいます。

合成制輪子は、鑄鉄制輪子より摩擦係数が高く、摩耗量も少ないのですが、車輪踏面を鏡面化します。すると雪や雨などの水潤滑条件では制輪子/車輪間の摩擦係数が低下し、さらには、車輪/レール間の粘着係数も低下し、ブレーキ時には滑走することもあります。そのため、合成制輪子に硬質物質を混在した耐雪型合成制輪子が開発され、車輪踏面を粗面化し、ブレーキ効果を上げました。その反面、その制輪子摩耗片が制輪子面に介入し、ブレーキ熱と融雪水の存在で焼入れ硬化し、それが核となって車輪踏面にかじり(☞参照)を発生させたり、凹摩耗を引き起こす問題があります。

焼結合金制輪子は、合成制輪子の欠点を解決するために採用されました。水潤滑条件で車輪/制輪子間の摩擦係数が低下するという合成制輪子の欠点を補うことができましたが、車輪踏面の温度を上昇させ、高速時に踏面に熱き裂が発生しやすい傾向にあり、改良が進められています。

ディスクブレーキ

在来線では、ディスク材料として主に鑄鉄、制輪子ライニング材料として合成樹脂が使われています。新幹線では、ディスク材料として、鑄鉄より強度の高い鍛鋼が、また制輪子ライニング材として合成樹脂より耐熱性の高い銅系焼結合金が使われています。

近年では、ディスクと制輪子ライニ

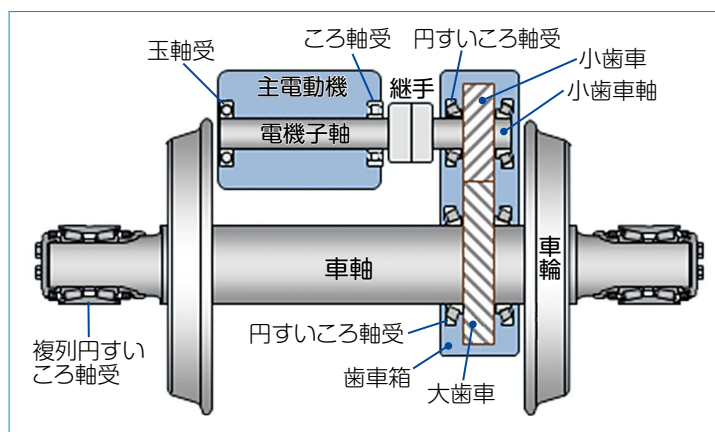


図4 走り装置の軸受使用箇所(例)³⁾

ングの摩擦熱による不均一な接触(熱弾性的不安定現象(☞参照))を考慮して、真実接触面積を増加させるような多分割式の制輪子ライニングが新幹線で導入されています。

課題

日本では1995年に発生した阪神・淡路大震災、2004年に発生した新潟県中越沖地震以降、非常時の新幹線において機械ブレーキによるブレーキ距離の短縮が求められています。

新幹線では、できる限りばね下質量を軽量化したいという要望があります。軽量材料として、アルミ合金基複合材料、炭素・炭素繊維複合材料などが開発されてきましたが、日本の鉄道では実用化されていません。また、最近ではブレーキディスクの締結位置を内周部(内周締結)から、摩擦面(中央締結)に変更することで大幅な軽量化が図られています。

軸受³⁾

鉄道車両では、車軸をはじめ電車の駆動装置を構成する主電動機や歯車装置、またディーゼル車の動力伝達装置である減速機、逆転機、推進軸などに軸受が使用されています。軸受は潤滑を必要とするので、潤滑剤や、オイルシールなど密封装置を含めた潤滑システムとして扱う必要があります。

新幹線電車や在来線電車などに採用されている、平行カルダン駆動方式の走り装置における軸受の使用箇所を図4に示します。主電動機の動力は継手を介して歯車装置の小歯車軸に伝達され、小歯車が車軸に取り付けられた大歯車とかみ合うことで車輪が回転します。

ここでは、車軸軸受と主電動機用軸受についてご紹介します。

車軸軸受

近年の車両では、車軸軸受として車軸の両端に複列の円すいころ軸受やつば付き円筒ころ軸受が用いられ、上下方向のラジアル荷重と左右方向のアキシャル荷重を受けます。車軸軸受の潤滑方式は、高速で走る新幹線電車では一部の車両形式を除いて油浴潤滑であり、在来線車両ではすべてグリース潤滑です。

主電動機用軸受

主電動機の電機子軸の両端にはグリース潤滑のころ軸受と玉軸受が使われており、これらには台車振動による動的荷重が加わりますが、静的荷重が小さいため、車軸軸受ほど厳しい条件ではありません。しかしながら、電動機の発熱による温度上昇と高速回転に耐えなければなりません。軸受に発生する電食を防止するために、軸受の外輪の外周面と端面にセラミックスやポ

☞ かじり

制輪子の摩擦表面に金属の塊が生成される現象。車輪踏面凹摩耗の原因の一つと考えられています。

☞ 熱弾性的不安定現象 (Thermoelastic Instability)

2つの物体間の摩擦熱の発生、温度勾配、弾性接触間の相互作用が不均一な接触を引き起こすというものです。

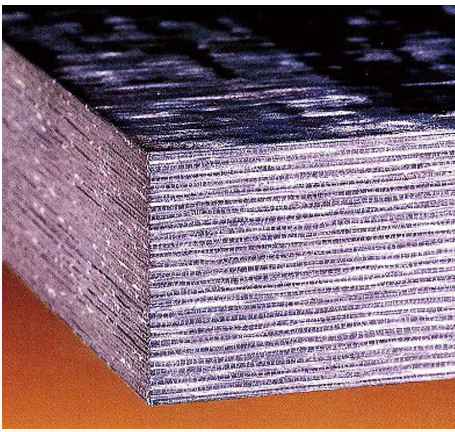


図5 C/C複合材製すり板の組織

リフェニレンサルファイド樹脂を被覆することによる軸受の絶縁化が図られています。

今後の取り組み

軸受や潤滑剤に対して、長寿命化やメンテナンスフリー化への要求が高まってきており、軸受の状態監視技術や潤滑剤の簡便な劣化判定技術などはそれらのために大きな役割を果たすと考えられます。

パンタグラフすり板／トロリー線

電気鉄道では、電車は主にトロリー線からパンタグラフすり板（以後、すり板）といわれる部材を通じて電気を受けとり、車両の運転動力や空調・照明などの電源としています。すり板はトロリー線と摩擦しながら集電するという役割を果たします。

すり板⁴⁾

電気機関車と一部の在来線電車では銅系、新幹線では鉄系の焼結合金すり板が使用されています。それらの材料は、素地の銅または鉄に、耐摩耗性・耐アーク性向上のための硬質金属粒子と、潤滑成分の黒鉛、低融点金属、金属硫化物が添加されています。

現在、自己潤滑性を持つカーボン系すり板が、在来線電車の多くで使用されています。カーボン系すり板は、炭素と金属との複合材であり、その金

属は銅または銅合金で含有量は約40～60質量%です。最近では、炭素繊維を複合したC/C複合材製すり板（図5）が開発され、使用範囲が拡大されています。カーボン系すり板を使用することでトロリー線の表面に皮膜が生成され、銅系焼結合金と比較して、トロリー線の摩耗が低減することがわかっています。このことにより、トロリー線の張り替え頻度が少なくなり、メンテナンスコストが大きく削減できます。

焼結合金すり板の摩耗は、凝着摩耗（図参照）への通電の影響が加わったものとして整理できます。通電の影響は、接触点での接触抵抗によるジュール熱と、離線した際のアーク放電によるふく射熱に大別され、いずれによっても接触点付近の温度上昇により材料が軟化、溶融あるいは蒸発し、摩耗が増えます。

カーボン系すり板では上述の熱による温度上昇ですり板内部の金属粒子の蒸発や溶出により、炭素素材の酸化消耗が進行することで、摩耗が増えます。焼結合金すり板、カーボン系すり板ともにすり板の摩耗率はアーク放電の電流量に比例して増えることがわかっています。

トロリー線

トロリー線は電気を流す役割を果たすため、電気のロスが少なくなるように電気伝導性の高い硬銅トロリー線が

主流です。耐摩耗性向上をねらって硬さを向上したすず入り銅トロリー線も多く使用されています。新幹線では、波動伝ば速度（図参照）を向上させるため、鋼心を銅で被覆することで引張強度と導電性を両立させたCSトロリー線が高速区間で使用されています。高導電性と高強度の両立を図って析出強化銅合金であるPHCトロリー線が開発され、実用化されています。

課題

冬季のトロリー線の着氷霜により、大きなアーク放電が発生し、すり板や舟体を損傷させるという問題が発生しています。トロリー線の着氷霜の予測手法、着氷霜の防止などアークに強いすり板の開発が課題です。

メンテナンスコスト削減のため、新幹線にカーボン系すり板（C/C複合材製すり板）の導入が望まれます。

おわりに

鉄道のトライボロジーに該当する部材として、車輪／レール、摩擦ブレーキ、軸受、トロリー線／すり板を取り上げました。トライボロジーは境界問題であり、いくつかの分野や担当部署が関わります。分野や部署の垣根を越え、協力してトライボロジーの諸問題に取り組んでいきます。[RRR]

文献

- 1) 名村：車輪・レール系の境界技術，第21回鉄道総研講演会，pp.41-50, 2008
- 2) 小原：鉄道のブレーキ，トライボロジスト，第47巻，第9号，pp.27-32, 2002
- 3) 永友他3名：軸受内の荷重分布を図る，RRR，Vol.70，No.8，2013
- 4) 久保：最近のパンタグラフすり板の動向，トライボロジスト，第50巻，第3号，pp.8-13, 2005

凝着摩耗

摩擦面の真実接触点に作用する力に基づく微視的な破壊によって生ずる摩耗。

波動伝ば速度

架線の波動の伝ばする速度をいう。トロリー線の波動伝ば速度の7割付近が常用運転速度の上限とされています。