

# 列車を安全に止める制輪子

半田 和行

材料技術研究部(摩擦材料 副主任研究員)



はんだ かずゆき

## はじめに

鉄道車両には、安全に減速し停止するために高い信頼性をもった機械的ブレーキ（基礎ブレーキ装置）が装備されています。この基礎ブレーキ装置の働きをうけて最終的に摩擦ブレーキ力を発生する部材（ブレーキ摩擦材）を制輪子と呼んでいます。現在の鉄道車両では電気ブレーキ等の摩擦によらないブレーキ装置も装備されていますが、これらが機能しない場合でも制輪子を含む基礎ブレーキ装置によって列車は安全に減速・停止し、かつ停止し続けることができます。ここでは鉄道用制輪子の種類を解説するとともに、主に在来線車両の制輪子と車輪の特性を紹介し、鉄道システムにおける制輪子の役割について説明します。

## 吸収エネルギーとブレーキ装置

制輪子に求められる基本的な特性の一つに、最高速度から所定の減速度で安定して列車を減速・停止させることが挙げられます。このとき、ブレーキ摩擦材は摩擦相手材とともにブレーキ摩擦力を発生することで車両の運動エネルギーを熱に変換し外部に放散します。自動車と鉄道車両の1車軸あたりの車両運動エネルギーの例を図1に示します。鉄道の制輪子が負担するエネルギーは自動車のそれと比較して大きいことが分かります。運動エネルギーは速度の二乗に比例するため図1に示すように新幹線車両をはじめとする高速車両ではエネルギーが飛躍的に増大します。このことから鉄道車両では大きく分けて2種類の基礎ブレーキ装置が使い分けられています。

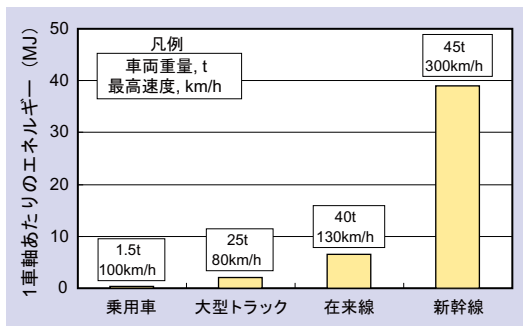


図1 鉄道車両と自動車の1車軸あたりの運動エネルギーの例

一つは踏面制輪子で、車輪の踏面にブレーキ摩擦材が作用するものです(図2 (a))。車輪踏面は列車速度と同じ周速度で回転するため、小さな押付力で大きなブレーキ効果が得られます。単純で軽量の構成が可能ですが、高速車両では車輪の温度上昇のため使用できません。

二つめはディスクブレーキです(図2 (b))。車輪とは別に車軸に装備されたブレーキディスクに制輪子(ライニング)を作用させるものです。ブレーキ時に発生する熱はその大部分がブレーキ摩擦材ではなく摩擦相手材に吸収されますが、ディスクブレーキ方式ではディスクの耐熱性と放熱性を確保することで高速車両でも使用できます。

## 制輪子の材質と特性

踏面制輪子は、材質面から主に鑄鉄制輪子、合成制輪子、焼結合金制輪子に大別されます(表1)。鑄鉄制輪子は鉄道黎明期から使われている材質で、パーライトと呼ばれる純鉄と炭化物の層状組織の中に黒鉛が分散した組織を持ちます。黒鉛は摩擦面で潤滑効果を示すため制輪子と車輪双方の摩耗が抑えられ、制輪子として望ましい特性を示します。鑄鉄制輪子は現在では主に降雪地域、山間線区や路

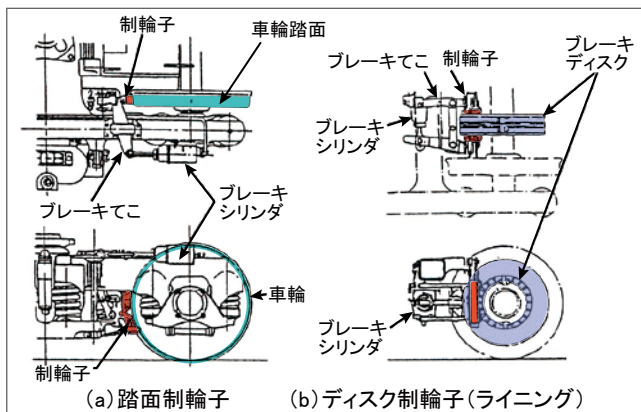


図2 鉄道車両用制輪子の種類<sup>1)</sup>

表1 踏面制輪子の種類と外観、組織および成分

	鑄鉄制輪子	合成制輪子	焼結合金制輪子
外観			
金属組織		<ul style="list-style-type: none"> <li>黒鉛</li> <li>硬質粒子</li> <li>パーライト</li> </ul>	
成分	<ul style="list-style-type: none"> <li>鑄鉄（鉄、炭素）</li> <li>合金鑄鉄の場合、合金元素・燐化物等を含む</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フェノール樹脂</li> <li>繊維状物質</li> <li>黒鉛</li> <li>金属粉</li> <li>金属ブロック</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>銅</li> <li>鉄</li> <li>黒鉛</li> <li>硬質粒子</li> <li>潤滑材</li> </ul>

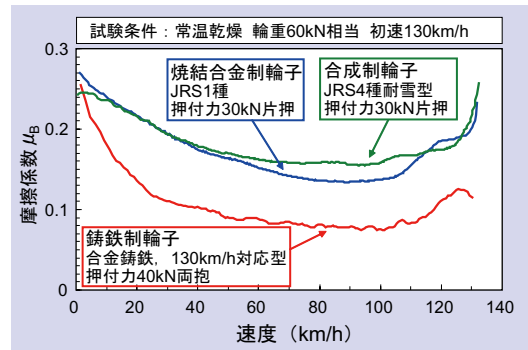


図3 各種制輪子の摩擦係数の速度依存性

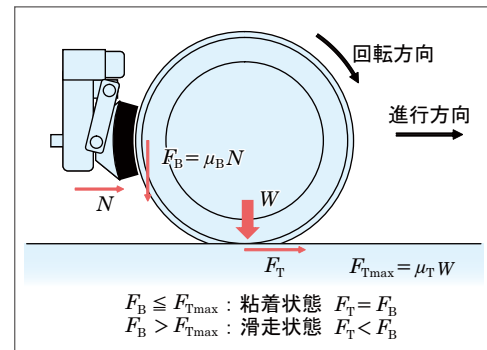


図4 制輪子によるブレーキ力発生の様式図

面電車で使われています。合成制輪子はフェノール樹脂を繊維状物質および添加材とともに焼成したもので、自動車用ブレーキパッドと同種の材質です。軽量で摩擦係数が高く摩耗が少ない特性を持ち、最も広く使われています。合成制輪子には、車輪踏面に適度な粗さを付けることにより粘着特性の向上を図った増粘着型や、降雪環境での性能低下を防ぐ耐雪型等もあります。焼結合金制輪子は金属等の粉末を成型・焼結したもので、金属母材中に黒鉛、硬質粒子、および潤滑成分が分散した組織を持ちます。母材、黒鉛、硬質物質の組合せという点で鑄鉄と同様の材料ですが、鑄鉄の場合と異なり各々の組成、面積率、分散形態を原料粉末の種類と配合によって比較的自由に調整できることから、所期の特性を満足するように材質を設計できる利点があります。

各種踏面制輪子の実車の非常ブレーキに相当する条件での摩擦係数の変化の例を図3に示します。図3中の合金鑄鉄は鑄鉄制輪子としては最も高い摩擦性能をもつ材質ですが、それでも合成制輪子や焼結合金制輪子と比較すると、摩擦係数が低く、摩擦係数の速度に対する変化が大きいことがわかります。

ディスクブレーキの制輪子（ライニング）の材質は、主に車両の速度域によって使い分けられており、在来線では合成ライニング、新幹線では焼結合金ライニングが使用されています。これは、融点の高い金属系材料でなければ高速車両のエネルギーに対応できないためです。

### 制輪子が「制する」二つの力

鉄道システムの特長の一つに、車輪の転がり抵抗が小さく輸送のエネルギー効率が高い点が挙げられます。これは、硬いレールの上を硬い車輪が転がるため接触部の弾性変形量が小さいことによります。しかし同時に、単位荷重あたり車輪がレールに伝達できる駆動力の最大値（粘着係数）が小さいという欠点を持ちます。

図4は、踏面制輪子によるブレーキ力の発生を模式的に示します。制輪子によって車輪に作用するブレーキ摩擦力  $F_B$  は基礎ブレーキ装置が発生する押付力  $N$  と制輪子の摩擦係数  $\mu_B$  により

$$F_B = \mu_B N$$

で表されます。レールから車輪に作用し車両を減速させるブレーキ駆動力  $F_T$  の最大値  $F_{Tmax}$  は、輪重  $W$  と粘着係数（最大接線力係数）  $\mu_T$  により

$$F_{Tmax} = \mu_T W$$

で表されます。ここで  $F_B$  と  $F_{Tmax}$  の関係により

$$F_B < F_{Tmax} \text{ のとき } F_T = F_B \text{ 粘着状態}$$

$$F_B > F_{Tmax} \text{ のとき } F_T < F_B \text{ 滑走状態}$$

が成立します。

制輪子の材質が制輪子／車輪間の摩擦係数  $\mu_B$  に影響することは当然ですが、同時に車輪／レール間の粘着係数  $\mu_T$  に対しても大きな影響を与えます。粘着係数には速度、水膜の状態、車輪踏面の粗さ、温度・湿度等が複雑に影響しますが、この中で車輪踏面粗さは制輪子材質によって大

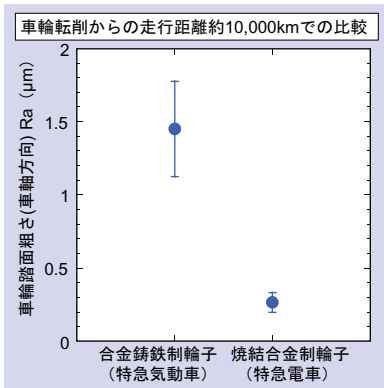


図5 制輪子材質による車輪踏面粗さの比較

表2 日本と欧州の車輪材質の比較

	日本の車輪	欧州の車輪
材質	SSW-Q3S/R	R7
準拠規格	JIS E 5402	UIC 812-3
炭素量(wt.%)	0.60-0.75 (0.65-0.70)	≤0.52
降伏応力(MPa)	(600-700)	≥520
引張強さ(MPa)	(1000-1100)	820-940

※括弧内は実測値

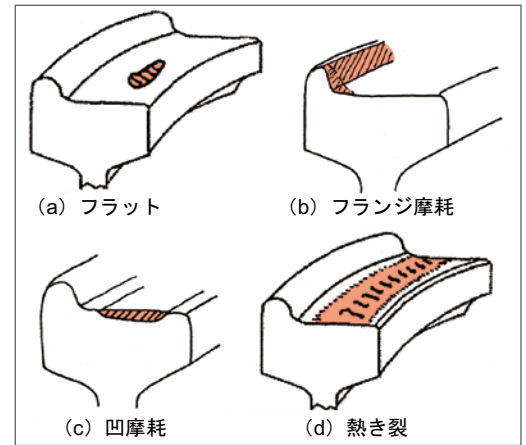


図6 車輪使用中に発生する踏面損傷の種類

大きく変化する因子であるため(図5), 粘着係数 $\mu_T$ 自体が制輪子の材質に依存します。さらに, 摩擦係数 $\mu_B$ も温度・湿度, 水分・氷や雪の存在等の外部環境に依存する変数です。このため制輪子の材質設計にあたっては,  $\mu_B$ の絶対値と速度に対する安定性を確保するとともに外部環境変化による $\mu_B$ の変化率を減らし, 同時に大きな $\mu_T$ を得ることが求められます。これらを使用環境による各々の優先度合いに応じて満足するように表1に示す各種の材質が使われています。

このように現在の制輪子ブレーキシステムは, 単に減速の手段としてのみでなく, 加速時も含めたレール/車輪間粘着の調整手段として重要な役割を果たしています。また同様の目的のため, ディスクブレーキ方式の車両で粘着係数を確保する増粘着研磨子や, ディスクブレーキのブレーキ力の一部を分担しつつ踏面粗さを調整する制動力分担型踏面制輪子なども使われています。

### 車輪の特性と使用実態

踏面制輪子の摩擦相手材である車輪の特性と使用実態についても紹介しましょう。車輪やレールにはほぼ炭素のみを含む鉄鋼(炭素鋼)が使用されており, 炭素量が高いほど硬く摩耗しにくい傾向があります。その反面, 炭素量が低いほどねばく壊れにくい(靱性が高い)傾向があり, 両者のトレードオフの中で炭素量が選択されています。日本国内で使われている車輪と欧州で最も広く使用されている車輪の材料組成を表2に示します。日本の車輪は欧州と比較して炭素量が高く, 耐摩耗性が優先されていますが, 同時に, より低炭素の欧州車輪に要求される壊れにくさの基準(靱性規格値)をも満たします<sup>2)</sup>。これは, 日本の車輪が, 高炉・転炉・連続鋳造法と呼ばれる製法で製造された鋼材(鋼塊)から鍛え(鍛造)られており, 不純物の少なさ(鋼材清浄度)の点で優れること, および熱処理の精度が高い

ことによります。車輪の熱処理は, 外周部全体に円周方向に縮もうとする力(圧縮残留応力)を付与し, これにより表面傷等が生じた場合でも車輪全体が急激に壊れる(脆性破壊)ことを防いでいます。この熱処理は, 踏面ブレーキが使われる車輪(SQ車輪)と使われない車輪(RQ車輪)で異なる工程が使分けられています。踏面制輪子が高速車両で使用できないのは, 車輪の温度が過度に上昇した場合, 熱処理で付与された車輪の応力状態が変化して安全性が低下する可能性があるためです。

車輪の使用中に生じる踏面損傷の種類を図6に示します。フラットは車輪の回転のロック(車輪滑走)により生じ, フランジ摩耗は曲線外軌(外側)レールとのすべり接触により生じます。近年, 在来線車両の車輪の使用状況が飛躍的に改善され, 車輪踏面の形状や状態を復元するための車輪の削正(車輪転削)の周期が延び, 車輪使用寿命も大幅に長くなっています。これは, 滑走防止装置(ABS)の普及と曲線でのレール側頭部(ゲージコーナ) / 車輪フランジ間の適切な潤滑によります。在来線での車輪の使用実態例を表3に示します。ABSの装備と適切な塗油が行われている場合には車輪の使用寿命が走行距離120万km以上となっています。最新の車両検査体系<sup>3)</sup>では走行距離240万kmの時点で車両改修工事が計画され, これが寿命(車両ライフサイクル)の基準となることから, 使用状態が良好である場合には, 車輪は車両のライフサイクルに対して一回だけの交換で使用できることが分かります。

### 車輪/制輪子系の課題

このように車輪や制輪子の使用状況が改善される中で近年, 車輪/制輪子系の材料に関連して, ブレーキ性能や車両の安全性には何ら悪影響を及ぼさないものの, 車両メンテナンスのシステム化と高品位な輸送サービス提供の観点からいくつかの課題が浮上してきています。

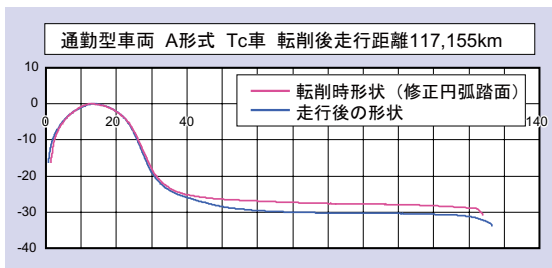


図7 車輪踏面凹摩耗の例



図8 車輪踏面熱き裂の例

一つめは、車輪踏面摩耗、いわゆる車輪の凹摩耗です。図7は、ある通勤型車両の車輪転削後約12万km走行時の車輪踏面形状を示しています。この線区では車上レール塗油器が使われておりフランジ摩耗がほとんど見られない反面、車輪踏面が大幅に摩耗していることがわかります。このような車輪凹摩耗は、車輪踏面形状を変化させ車両の運動特性や乗り心地を悪化させる可能性があります。

二つめは、車輪踏面の熱き裂です。実車に発生した踏面熱き裂の例を図8に示します。踏面熱き裂は、車輪の安全性に影響はありませんが、亀裂を除去し踏面状態を復旧するのに頻繁な車輪転削を必要とし、車輪の寿命を著しく短くしてしまいます。表3の例でも、熱き裂が発生する車両(形式B)では車輪転削周期が他と比較して短いことがわかります。

近年の研究によりこれらは、制輪子による温度サイクルとレールとの転動による繰返し応力の双方が影響していることが確認されています<sup>4)</sup>。鉄道総研では、実物大の車輪

表3 在来線車両での車輪の使用実態例

形式	A(新形式)	C(新系列)	A(新形式)	B(新系列)	C(新系列)
ABS	×	○	○	○	○
塗油	○車上	○車上	○車上	○地上	×
走行線区	通勤A	通勤A	通勤B	地下鉄乗入C	近郊D
車輪転削周期(10 <sup>4</sup> km)	9-12	26-30	20-30	6-7	25-30
車輪転削理由	フラット	凹摩耗	凹摩耗	熱き裂	フランジ摩耗
車輪交換寿命(10 <sup>4</sup> km)	60	120	120	80	120以上
備考	引退済		ABS取付改造		塗油器設置予定

の試験に微視的な材料分析や計算による内部状態推定的手法(図9)を組み合わせ、これら事象のメカニズムを解明し対策の確立に取り組んでいきたいと考えています。

### 鉄道システムと制輪子

制輪子は、大きなエネルギーを持つ鉄道車両を安全に減速し停止させるという重要な役割を担っています。さらに踏面制輪子の場合、車輪踏面という車両とレールとの接触部分を摩擦するという特徴から、車両システム全体やさらに広く鉄道輸送を構成する様々な技術領域と関連しています。制輪子の、車輪をはじめとする鉄道車両や車両以外を含めた鉄道システム全体との相互関係を具体的事項の例とともに模式的に図10に示します。制輪子は、単体の要素技術として捉えるのではなく、鉄道システム全体における位置付けを把握することが重要であると言えます。

### おわりに

鉄道を支える小さなものとして、制輪子の役割と働きを中心に車輪の材質や鉄道システムにおける位置付けについて紹介しました。本稿が鉄道システムにおける車輪/制輪子系の材料への関心と理解の一助となれば幸いです。[RRR]

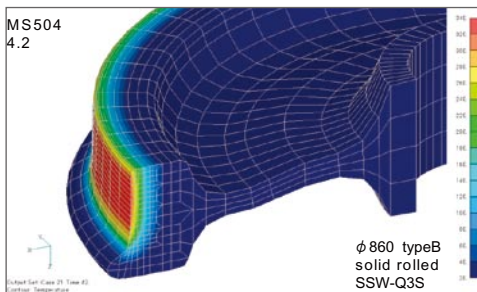


図9 制輪子ブレーキ時の車輪内部温度分布の解析例

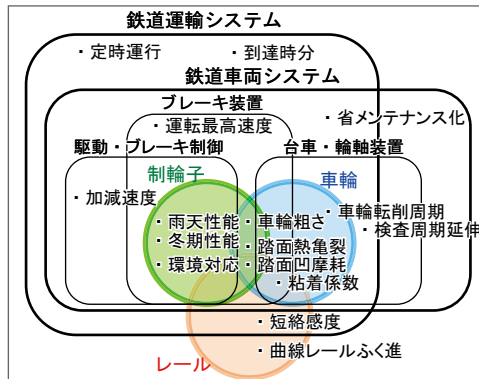


図10 制輪子に関連する現象・事象と技術領域の模式図

### 文献

- 1) 出村要 他：鉄道車両のブレーキ技術、機械の研究、Vol.49, 1997
- 2) ZEVrail Glasers Annalen Vol.130, No.10, p.428, 2006
- 3) 一木剛：JR東日本の新しい車両保全体系、鉄道車両と技術、Vol.79, 2002
- 4) 半田和行 他：J-Rail2005講演論文集、pp.347-350、土木学会、2005