

2610 制輪子と車輪踏面の境界で発生する諸問題の研究

The investigations of many problems generated on the boundary
of brake shoes and wheel tread

○飯島 宏康 (西日本旅客鉄道(株)) 長澤 新 ((財)鉄道総合技術研究所)

真野 辰哉 (西日本旅客鉄道(株))

Hiroyasu IIJIMA, West Japan Railway Company
Arata NAGASAWA, Railway Technical Research Institute
Tatsuya MANO, West Japan Railway Company

In order to study the cause of the rapid concave wear of wheel treads generated on power cars of 223-2000 EMUS which are operated on conventional lines up to maximum's speed 130 km/h, we tried to elucidate the generating mechanism of "metallic inclusion" which occurred between brake shoes and wheel treads.

In this report, we showed that "metallic inclusion" between brake shoes and wheel treads was caused by the overlap of following conditions: mixing of ceramic grains, wet condition and weak pressing force of tread brake.

Keyword: composition brake shoes, concave wear of wheel treads, snowproof braking, tread brake

1. はじめに

最新の在来線近郊型電車である 223 系 2000 代は、最高運転速度 130km/h で設計され、電動車の踏面ブレーキには台車設計上最大値に近いユニットブレーキ（シリンダ直径：180mm、テコ比：3.5、片押し）が採用されている。その結果、非常・常用ブレーキ帯域の押付力は確保されたが、耐雪ブレーキ帯域の押付力は従来車と比べ、要求される機能よりも過大となっている（Table 1 参照）。

Table 1 Method of tread brake and force of snowproof braking

車種	223系2000代 M車	223系1000代 M車	485系 M車
ブレーキ機構	ユニット式 (片押)	ユニット式 (両押)	リンク式 (片押)
シリンダ径 (mm)	180	152	152
テコ比	3.5	3.0	約3.0
制御方法	上げ制御	上げ制御	上げ制御
BC圧実測値 (kPa)	30	40	30
制輪子押付力 実測値(kN)	1.5	2.4	0.7
ブレーキ効率	0.58	0.68	0.41
			0.23

一方、当該電車は耐雪ブレーキの使用時期（冬期）に 223 系 2000 代 Mc 車を中心にカジリを伴った急激な車輪踏面凹摩耗が発生し、乗り心地の低下や車輪転削によるコスト増が問題になっていた。発生当初からその原因究明に取組み、耐雪ブレーキの過大な押付力が車輪凹摩耗の主原因であるという結論に至り、対策として耐雪ブレーキ圧を下限値（30kPa）に調整した。しかし、現在においても耐雪ブレーキだけでは説明できないカジリを伴う急激な凹摩耗が突発

的に発生している。

そこで、車輪凹摩耗の原因究明として、当該電車の制輪子と車輪を用いてその境界面で起こるカジリの発生メカニズムを鉄道総研と協力して解明した。

2. カジリ発生から車輪凹摩耗に至るまでの仮説

試験条件を設定するにあたり、カジリ発生から車輪凹摩耗に至るまでの推定原因を検討した。まず、耐雪ブレーキ圧の対策後に発生した車輪凹摩耗の状況調査により得られた特徴と事例を Table 2 に示す。

Table 2 Characteristic of concave wear of wheel tread

車輪凹摩耗の特徴	平成15年4月28日発見された事例
①先頭車両のMc車のみで発生する(8両編成3M5T)	Mc3 T T M T T M Tc ※●はモータ軸を示す
②急激に凹摩耗が進展する	制輪子摩擦面
③1,2軸の車輪踏面摩耗量が3,4軸に比べ相対的に多い	※転削後の走行距離約8万km
④カジリが発生している	2軸 4軸 3軸 6軸
⑤耐雪ブレーキ圧30kPaに調整しても発生する	
⑥耐雪ブレーキを使用する季節以外でも発生する	
⑦追跡調査しても再現性がない	
⑧当該車両だけで突発的に発生する(頻度が低い)	

これまでカジリに関する研究は耐雪形合成制輪子（4 種）で行われてきた^{1),2)}。その理由は、耐寒耐雪仕様の合成制輪子が導入された当初、カジリを伴った車輪凹摩耗が発生したからである（現在は対策済みである）。耐雪形合成制輪子は、その使用環境から降積雪時においてもブレーキ性能が低下しないことが必要不可欠で、耐水性能を高めるために

若干の硬質物質を配合しており、その硬質物質がカジリの核となってカジリを発生させるという研究結果が得られている^{1),2)}。ところが、当該電車で使用されている制輪子は高速用に開発された増粘着タイプの1種合成制輪子で、これまでにカジリ発生メカニズムを解明した研究は行われていない。

これらのことをふまえ、カジリ発生から車輪凹摩耗にいたるまでの仮説を Fig.1 に示す。ポイントとなるカジリの核として、「増粘着材として挿入されている鑄鉄ブロックの硬質化」と「車輪もしくはレールの硬質摩耗粉」の2つを想定した。また、外的因子（レール上の異物等）についても関係していると推定した。

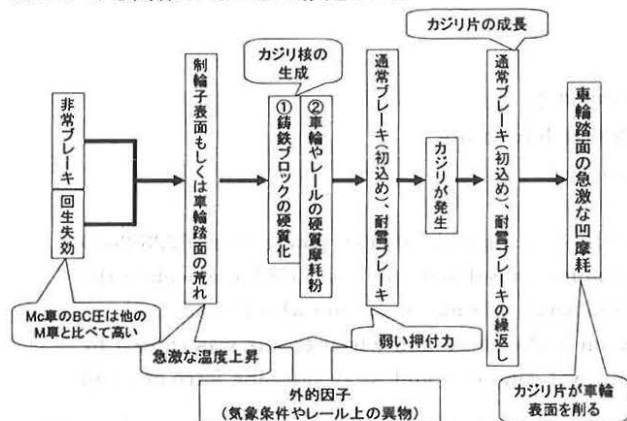


Fig.1 Hypothesis from "metallic inclusion" generating to concave wear of wheel tread

3. 試験内容

3.1 試験機の概要

本試験は（財）鉄道総合技術研究所のブレーキ性能試験機を用いて実施した。当試験機はディスクブレーキ試験ユニット、踏面ブレーキ試験ユニット、粘着試験ユニットの3つのユニットで構成され、車輪の最高速度は500km/h（車輪径860mm）、慣性モーメントは軽快車両から機関車クラスまでの重量に対応可能となっている。さらには、散水・降雪装置が付加されており、実際の使用環境に合わせた試験を行うことができる。なお、今回の試験は踏面ブレーキ試験ユニットを使用した。

3.2 供試制輪子

223系M車に使用されている増粘着タイプの1種合成制輪子の概観写真を Fig.2 に示す。上下のブロックに一箇所ずつ増粘着材として鑄鉄ブロックが摺動方向と直角に挿入されているのがわかる。なお、摺り合わせ条件として制輪子摩擦面の車輪踏面との接触面積が80%以上に達してから試験



Fig.2 Adhesion improvement type composition brake shoe

に供することとした。

3.3 供試車輪

223系M車で実使用されていたB型波打車輪を試験に用いた。なお、車輪径は790mm、転削済みの車輪である。

3.4 測定項目と試験条件

Table 3 に主な測定項目と試験条件を示す。今回の試験では制輪子の温度分布を細かく分析するために、挿入材である鑄鉄ブロック部も含め12箇所に熱電対を取付けているのが特徴である。

Table 3 Measurement data and examination conditions

項目	内容	備考
制輪子温度	熱電対により12点測定	・鑄鉄ブロックにおいても測定 ・摩擦面下10mm
車輪温度	熱電対により3点測定	・フランジ側、中央、反フランジ側の3点 ・踏面下10mm
ブレーキ押付力	1.0～35 (kN)	・223系2000代Mc車(空車条件)を想定して設定 ・耐雪ブレーキ帯の押付力は過去の実測値を使用
車輪速度	15～130 (km/h)	・最高運転速度は130km/h
ブレーキトルク	ロードセル	
周囲温度	室温条件	・耐雪ブレーキ試験においても室温で実施
散水量	0～400 (ml/min)	
散水温度	4℃と10℃	
硬さ測定	ショア硬さ	・試験前後の車輪踏面、制輪子鑄鉄ブロック
状態観察	デジカメ、マイクロスコープ	・車輪踏面、制輪子摩擦面、カジリ片
車輪踏面形状	ミニプロフ(踏面形状測定装置)	・試験前と全試験終了後に測定

3.5 測定項目と試験条件

前述の仮説に基づき、以下に示す4種類のブレーキ試験について全67試番、291回のブレーキ試験を実施した。

停止・減速ブレーキ試験

常用ブレーキ帯については機器故障等により回生ブレーキが失効した条件、つまり空気ブレーキのみの条件を想定して試験を実施した。なお、試験は1段ブレーキで実施している。

耐雪ブレーキ試験

耐雪ブレーキ帯域のブレーキ押付力については実測値に基づいて設定した(1.5kN～3.0kN)。なお、試験環境は耐雪ブレーキにおいても室温条件で実施している。

コンビネーション試験

非常ブレーキと耐雪ブレーキ試験を連続的に組合せた試験を実施した。

異物混入試験

想定されるカジリの核、もしくは外部から車輪と制輪子間に侵入すると考えられる異物を強制的に混入させてブレーキ試験を実施した。異物の種類とその概観写真、混入条件等を Table 4 に示す。

Table 4 Kind of mixing substance

系統	異物種類	大きさ/成分等	概観写真	混入条件
鉄系異物	車輪転削屑	—	—	制輪子摩擦面に塗布
	車輪チップ	10×10×1 (mm)	—	制輪子摩擦面に埋込み
	レールチップ	10×10×1 (mm)	—	制輪子摩擦面に埋込み
セラミックス系異物	アルミナ	・主成分Al ₂ O ₃ ・粒径約0.3mm		制輪子摩擦面に塗布一試験開始後上部から境界面に散布
	川砂	・粒径大、粒度分布大 ・機関車用のまき砂		制輪子摩擦面に塗布一試験開始後上部から境界面に散布
	土	・粒径極小と推定 ・総研降雨試験場から採取		制輪子摩擦面に塗布一試験開始後上部から境界面に散布
	6号珪砂	・主成分SiO ₂ ・粒径約0.3～0.6mm ・気動車、電車用のまき砂		制輪子摩擦面に塗布一試験開始後上部から境界面に散布
	粉砕6号珪砂	6号珪砂を金属ハンマで粉砕したもの	—	制輪子摩擦面に塗布一試験開始後上部から境界面に散布

なお、セラミックス異物において粉碎 6 号珪砂を用いたのは、レール上に存在する異物が車輪の転動により粉碎されることを想定している。

4. 試験結果と考察

4.1 停止・減速ブレーキ試験

全 67 試番中、21 試番においてさまざまな試験条件で停止・減速ブレーキ試験を実施したが、カジリは発生しなかった。その中で最もブレーキ条件の厳しいと考えられる非常ブレーキの測定データと試験後の制輪子摩擦面の写真を Fig. 3 に示す。なお、試験条件は「速度：130km/h－押付力：35kN－散水：有り（400ml/min）－ブレーキ回数：5 回」である。

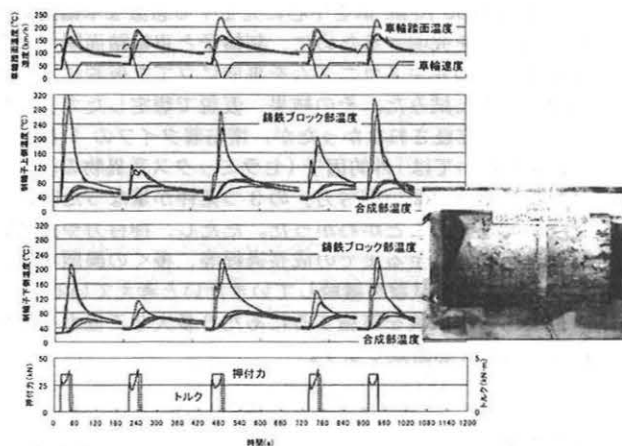


Fig.3 Measurement data of emergency braking examination

Fig. 3 から、試験後の制輪子摩擦面は散水条件にもかかわらず、制輪子からの摩耗粉や結合材の炭化膜に全体が覆われていることがわかる。これらの摩耗粉や炭化膜は制輪子と車輪踏面間の潤滑材として機能することから、仮にカジリの核が生成したとしてもその核が直接車輪踏面に接触することを防ぎ、さらにはその核を摩耗粉とともに境界面から脱出させる働きをすると推察される。一方、押付力が弱い耐雪ブレーキ試験ではこのような炭化膜は観察されなかった。したがって、摩耗粉や炭化膜が大量に生成するような強い押付力のブレーキが単独に作用してもカジリ現象は発生しないと考えられる。

4.2 耐雪ブレーキ試験

耐雪ブレーキ試験においてもカジリは見られなかったが、代表的な試験結果を Fig. 4 に示す。

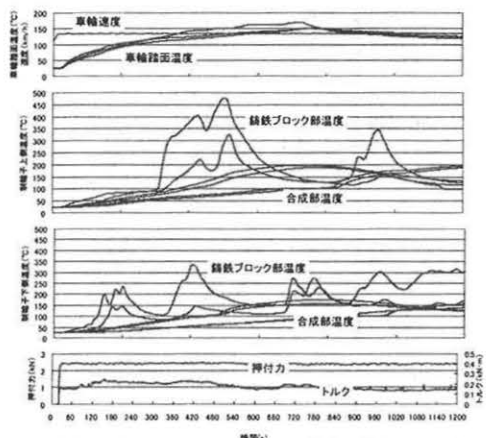


Fig.4 Measurement data of snowproof braking examination

試験条件は「速度：130km/h－押付力：2.4kN（BC 圧 40kPa 相当）－散水：有り（400ml/min）－ブレーキ時間：20min」である。チャート中の鋼鉄ブロック部の温度変化を示している「制 3」、「制 4」、「制 9」、「制 10」の温度変化に着目すると、急激な温度上昇と急激な温度降下を繰り返していることがわかる。この挙動について考察すると、①鋼鉄ブロックが車輪踏面に接触→②急激な温度上昇と摩耗→③車輪踏面と非接触→④急激な温度降下→⑤周辺の合成部が摩耗→⑥再び鋼鉄ブロックが車輪踏面に接触、という挙動が想定される。したがって、鋼鉄ブロックは周囲の合成部よりも率先して摩耗し、その摩耗粉（溶融状態）が車輪踏面に付着することで車輪とレール間の粘着係数の向上に寄与していると推定される。つまり、増粘着材として十分な機能を果たしていると言える。また、鋼鉄ブロック部の硬さ測定において試験前後で硬さの変化は見られなかった。以上のことから、鋼鉄ブロック部がカジリの核となるという仮説は今回の試験では立証されなかった。

4.3 コンビネーション試験

カジリは発生しなかったので詳細は割愛する。

4.4 異物混入試験

本ブレーキ試験においてカジリが発生した。

4.4.1 カジリを発生させる異物の種類について

常温下では車輪踏面よりも硬いレールチップを含め、全ての鉄系異物ではカジリの発生は見られず、逆に摩耗して車輪踏面に付着していた。セラミック系異物においては、「アルミナ」、「土」、「粉碎 6 号珪砂」を混入して耐雪ブレーキ試験を実施したところカジリが発生した。一方、「川砂」、「6 号珪砂」では同一条件の試験でもカジリは発生しなかった。原因としては、これらの異物は粒径が相対的に大きいため、制輪子摩擦面に突き刺さり難いこと、もしくは車輪踏面と制輪子間の境界面自体に混入し難いことが考えられる。以上のことから、粒径の小さいセラミック系の異物が車輪踏面と制輪子間の境界面に混入すると、その異物がカジリの核となってカジリ現象を発生させることがわかった。

4.4.2 カジリを発生させる条件について

Table 5 にカジリの発生した試験条件とカジリの発生しなかった試験条件の代表例を示す。

Table 5 Braking conditions of mixing substance examination

試番	外乱因子	速度 (km/h)	押付力 (kN)	ブレーキ条件	耐雪時間 (min)	散水量 (ml/min)	散水温度 (°C)	カジリ
49	アルミナ	130	35 (非常)	停止	—	0	—	無
51	アルミナ	100	1.5 (30kPa)	耐雪	15	400	4	有
63	土	100	1.5 (30kPa)	耐雪	15	400	4	有
65	粉碎6号珪砂	100	1.5 (30kPa)	耐雪	15	400	4	有
66	粉碎6号珪砂	100	1.5 (30kPa)	耐雪	15	0	—	無

試番No.49 で代表されるように、非常ブレーキ試験においてはカジリは発生しないことがわかった。これは、4.1 で述べたように制輪子摩擦面に発生する摩耗粉や炭化膜がカジリ発生を抑制したと推定される。試番No.66 では、散水条件から乾燥条件に試験条件を変更したところカジリの発生は見られなかった。この原因としては、異物が湿潤状態となって

境界面に混入しやすくなること、水が摩耗粉等を洗い流して異物と車輪踏面とが接触しやすくなることが考えられる。

4.4.3 カジリ発生と制輪子温度変化について

Fig. 5 に試番Na65 の測定データとカジリが発生した制輪子摩擦面の概観写真を示す。

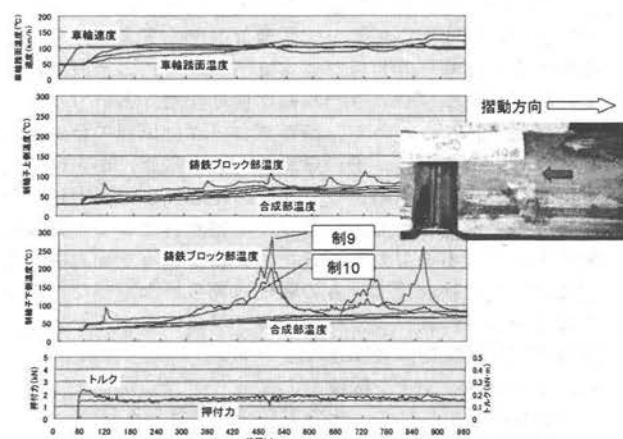


Fig.5 Measurement data of braking condition Na65

この試番では制輪子の温度測定点の「制9」、「制10」付近に大きなカジリが発生したが、Fig 5.においてその状況を検証すると、この測定点だけが300℃近くまでの急激な上昇と下降を繰り返していることがわかる。その他の測定点については、100℃以下で安定した挙動を示していることから、カジリ現象は摩擦境界面で局部的に発生することが推定できる。

4.4.4 カジリの成長について

試番Na65 で発生したカジリ片とカジリ片撤去後の制輪子摩擦面の概観写真をFig. 6 に示す。

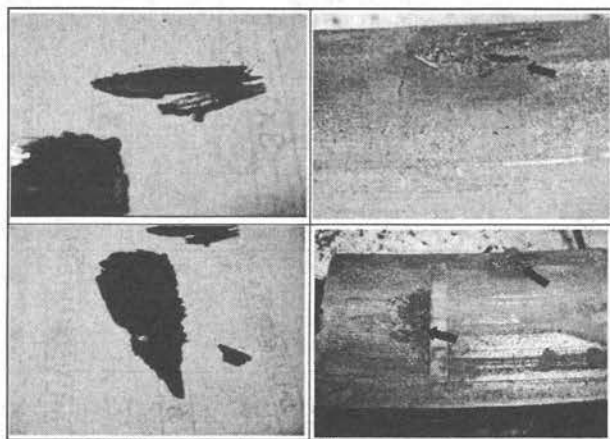


Fig.6 "Metallic inclusion" generated by Na65

発生したカジリ片を観察すると薄い鉄片（成分については分析中であるが、試験後車輪踏面の円周方向に何本もの線キズが発生したことから車輪材であることは明らかである）が何層にも重なっていること、その端部は鋭角に尖っていることがわかった。また、制輪子摩擦面には大きな窪みが発生しており、その局部をマイクروسコープで観察すると相当の熱で溶融（焼損）していることがわかった。これらのことから、鉄系よりも高硬度、高融点であるセラミックス異物が車輪踏面と接触すると瞬間的に鉄を溶融させ、その溶融鉄が今度は制輪子側の摩擦面を溶かしながら堆積し、カジリ片として成長すると推定される。ただし、セラ

ミックス系異物が全てのカジリ片を生成させたのか、それとも発生した溶融鉄自身が二次的に車輪踏面を溶融させて大きく成長したかは今回の試験ではわからなかった。

5. 今後の課題

今後は、①通常ブレーキ（初込め）の条件においてもカジリが発生するかどうかの検証、②カジリの発生と押付力、速度および散水量との関係、③車輪凹摩耗までに至るカジリ片成長過程（条件）の解明に取組み、最終的にはカジリが発生したときの走行距離に対する車輪踏面摩耗量の関係をカジリ片の重量（体積）から推定したいと考えている。

6. まとめ

最高速度 130km/h で高速運転している在来線近郊型電車の 223 系 2000 代 Mc 車を中心に発生する急激な車輪踏面凹摩耗の原因を究明するために、制輪子と車輪踏面間で発生するカジリの発生メカニズムを事前に立てた仮説に基づき解明しようと試みた。その結果、仮説で想定したカジリ核については立証されなかったが、増粘着タイプの 1 種合成制輪子においては「外的因子（セラミックス系異物の混入）」、「湿潤状態」、「弱い押付力」の 3 つ条件が重なった時にカジリが発生することがわかった。ただし、押付力や速度の関係や凹摩耗に至るまでの成長過程等、多くの課題が残されており今後も試験を継続していきたいと考えている。

最後に、本試験を実施するにあたり多大なご協力を頂いた方々に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 山下 哲司：鉄道技術研究所速報Na76-25（耐雪形合成制輪子による車輪踏面凹摩耗の原因となるカジリ発生条件の検討(その1)）、1976年3月
- 2) 山下 哲司：鉄道技術研究所速報Na85-123（耐雪形合成制輪子による車輪踏面凹摩耗の原因となるカジリ発生条件の検討(その2)）、1985年5月