

潤滑性能を向上させた新幹線用すり板の開発

宮平 裕生* 土屋 広志** 久保田 喜雄*

Development of a Contact Strip for Shinkansen with Improved Lubricating Properties

Yuki MIYAHIRA Hiroshi TSUCHIYA Yoshitaka KUBOTA

In order to extend the life of the contact strip, a new contact strip was manufactured using MnS pre-alloyed free cutting steel powder. Since wear of N5C-5 was reduced by more than 30% as compared with the present contact strip as a result of an experiment using with test equipment, after installing the new contact strip in a Shinkansen car a running test was carried out. As a result of the running test, the slider wear was reduced by 3% as compared with the present article and the contact wire wear was almost the same as that observed when the present article was used. Accordingly it was put in practical use.

キーワード：すり板，新幹線，トロリ線摩耗，焼結合金，快削鉄粉

1. はじめに

パンタグラフすり板（以下，すり板）は，電車の最上部に位置するパンタグラフの上に取り付けられた摩擦部材で，トロリ線（架線）に押し付けられ通電・摩擦することにより，電車は走行しながら電力の供給を受けている。このすり板は電車部品の中でも交換頻度が高く，また，相手材であるトロリ線も摩耗させるため，メンテナンスコストを低減させる上で重要な部材である。

新幹線電車のパンタグラフでは鉄系焼結合金が使用されており，1980年代前半に東北新幹線での240km/h走行にあわせて開発されたすり板（以下，現用すり板；TF5A，BF31）が，現在も継続して使用されている。一部の線区では，近年の固体潤滑技術を反映して従来と異なる潤滑成分を用いて製造した鉄系焼結合金すり板^{1) 2)}（以下，改良すり板；T3-2，N4-2-1）が使用されており，現用すり板を使用している線区でも，改良すり板への置き換えが進んでいる。しかし，さらなるメンテナンスコスト低減のために，すり板寿命の延伸が求められている。そこで，すり板の耐摩耗性向上を目指した新たなすり板（以下，開発すり板；N5C-5）を開発し，その性能を定

置試験および現車試験で評価した。

本報告では，改良すり板と開発すり板の開発経緯と，開発すり板での定置試験結果および現車試験結果について述べる。本報で扱う新幹線用焼結合金すり板は表1の通りである。なお，「現用すり板」は旧JRS規格では「改良形すり板」として登録されているが，本報告では混同を避けるため「現用すり板」と表記する。

2. 新幹線用焼結合金すり板の開発

2.1 新幹線用すり板の開発目標

すり板の開発では，すり板自身の耐摩耗性向上だけではなく，相手材への影響も考慮して材料設計する必要がある。すり板の材料設計において考慮すべき項目は，(1) すり板自身の耐摩耗性，耐アーキ性を保持するための硬質金属粒子の種類と添加量，(2) 潤滑性を保持し，トロリ線を摩耗させないための潤滑成分の種類と添加量，(3) 車両電気部品として必要な機械的特性と導電性，(4) 消耗部品としての経済性の4項目である。かつての現用すり板の開発では(1)を優先し，(2)についてはそれまでの低融点重金属の利用を踏襲していた。改良すり板の開発では，(2)を重視し，潤滑成分を最近の固体潤滑技術を反映したものに置き換えることとした^{1) 2) 3)}。そして，開発すり板の開発では，(2)の潤滑成分の変更を踏襲した上で，(1)を重視した。

2.2 固体潤滑剤の影響

一般的には多量の固体潤滑剤を添加すれば，現用すり板の低融点重金属による潤滑と同程度の潤滑性を確保することは可能である。しかし，固体潤滑剤の多くはすり板材の強度を低下させ，電気抵抗率は大きくなり，コス

表1 新幹線用焼結合金すり板一覧

	型番	すり板概要
現用すり板	TF5A BF31	従来から使用されているすり板 (旧JRS：15121-4C-15AR4T)
改良すり板	T3-2 N4-2-1	固形潤滑剤の成分を変更したすり板
開発すり板	N5C-5	固形潤滑剤の成分を変更した上で， すり板の摩耗の低減を図ったすり板

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 元 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：材料技術

とも高くなる。そのため固体潤滑剤を多量に添加すると、すり板に求められる機械的特性、導電性、経済性を満足できない可能性が高く、実際の開発では、固体潤滑剤の添加量は限られる⁴⁾。

2.3 硬質粒子の影響

2.1 節で述べた耐アーク性とは、電車が走行中にすり板とトロリ線が離れることで発生する離線アークへの耐性であり、離線アークは高速走行時や、冬季のトロリ線への着霜発生時に多く発生する。アークが発生すると熱による急激な温度上昇が起こり、材料の蒸発、熔融、軟化といった影響をすり板に与える。従来からの定置摩耗試験結果では、離線アークが頻繁に発生する条件で摩擦した場合、すり板の摩耗率はアーク放電の電流量に比例して増加することが知られており、すり板の摩耗はアーク放電の影響が支配的であると考えられている。図1は異なる材料の模擬トロリ線に対する現用すり板の摩耗率とアーク放電電流との関係を示したものであるが、模擬トロリ線材料に関係なくすり板摩耗率はアーク放電電流にほぼ比例して増加していることがわかる⁵⁾。このため、すり板の摩耗を低減させるには耐アーク性を高めることが重要となる。一般に、硬い材料は融点が高い。そのため、すり板の耐アーク性を高めるためには硬質粒子の添加が有効であることが知られており、すり板の摩耗を低減するには硬質粒子を増量すれば良い。しかし、硬質粒子の増量は相手材であるトロリ線摩耗を増加させるため、トロリ線の摩耗を抑制するために固体潤滑剤を増量する必要がある。先述の通り固体潤滑剤の増量には限度があるため、耐アーク成分の添加量も限られる。

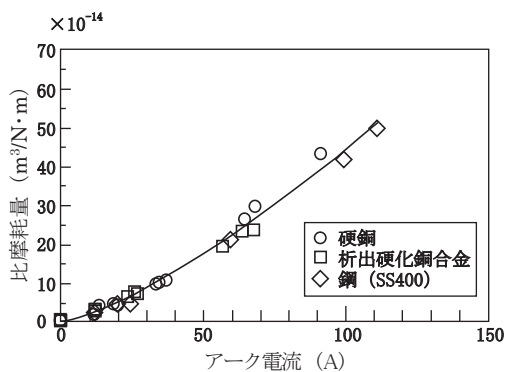


図1 現用鉄系焼結合金すり板の摩耗率とアーク放電電流との関係⁵⁾

2.4 改良すり板の開発

改良すり板の開発では、潤滑特性の向上よりも潤滑成分の変更に重点を置き、潤滑成分を替えてもすり板の耐摩耗性およびトロリ線への影響が現用すり板と同等であることを目標として開発を行った。各種すり板の潤滑成分の付与方法を表2に示す。改良すり板のうち T3-2 は、

固体潤滑剤の種類と添加量を調整し、素地となる鉄粉に潤滑成分や耐アーク成分を加えて混合・成形・焼結させる一般的な焼結合金手法 (TF5A と同様) で製造した。一方、N4-2-1 は T3-2 の製造方法と同じ工程を行った後、不足する潤滑成分を補うため基材の硫化処理を行い、潤滑剤として働く金属硫化物を後から生成させる新たな方法で製造した。これらの方法で製造した2種類の改良すり板で現車試験を行った結果、改良すり板使用時のすり板とトロリ線の摩耗は、現用すり板使用時と同程度であった¹⁾。この結果から、新幹線の一部線区では2種類の改良すり板が採用された。

しかし、改良すり板の正式採用後、保管中の N4-2-1 の表面に錆が発生し、ボルト穴部に発生した錆の影響ですり板をボルト締結できない事象が発生した。これは、焼結合金が多孔質体のため、N4-2-1 の硫化処理時の溶液がすり板内部に留まり、徐々にすり板表面から滲出・吸湿し、鉄成分の発錆を誘発したためである。この対策として、N4-2-1 に高粘度の防錆油を塗布・乾燥させたコーティング材や、N4-2-1 の表面を銅めっきしたものを試作したが、どちらも発錆を抑制できなかった。このため、N4-2-1 は現在では使用されていない。

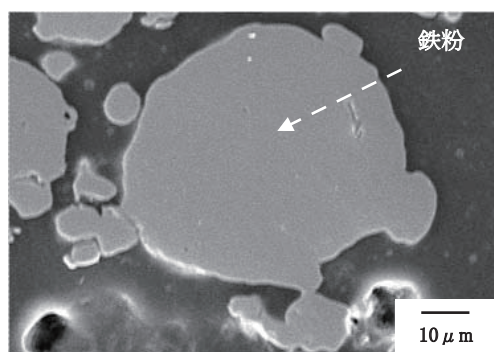
表2 各種すり板の潤滑成分の付与方法

すり板	潤滑成分の付与方法	
現用	BF31	焼結後の基材に低融点金属を含浸
	TF5A	
改良	T3-2	鉄粉と固体潤滑材を混合して焼結
	N4-2-1	
開発	N5C5	鉄粉と固体潤滑材を混合して焼結 + 鉄粉に MnS 快削鉄粉を使用

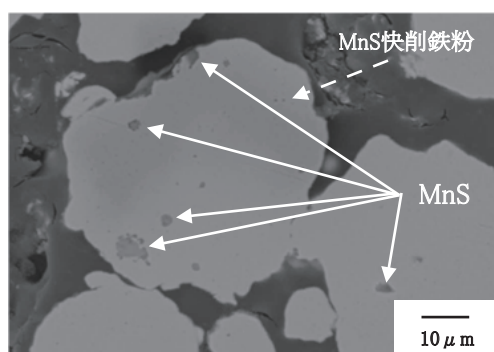
2.5 開発すり板の開発

改良すり板 T3-2 は、潤滑成分を従来の低融点金属から変更しても、従来のような鉄粉に固体潤滑剤を混合する方法を用いて、すり板とトロリ線の摩耗を現用すり板と同程度にすることができた。しかし、すり板の摩耗を低減させるためには、同様の方法では、すり板の機械的特性や導電性を改良すり板と同程度に維持することが容易ではないと考えられた。また、N4-2-1 のように後から硫化処理を行う方法は、錆を増長するだけでなく、製造コストも高い。

そこで、新たなすり板製造方法として、自己潤滑性を持つ硫化マンガンプレアロイ型快削鋼粉 (以下、MnS 快削鉄粉)⁶⁾ に着目して、これを素地材料に使用し、すり板素地自体の潤滑特性を向上させる新たな製造方法で試作を行った。MnS 快削鉄粉は、溶製中の鉄にマンガンおよび硫黄を添加し、凝固時に MnS を鉄粉中に分散させて鉄粉自体に潤滑性を持たせた原料で、自動車のエンジンのバルブガイド等の焼結機械部品に用いられている (図2)。



(a) 現用すり板BF31の鉄粉



(b) 開発すり板N5C-5のMnS快削鉄粉

図2 鉄粉とMnS快削鉄粉の断面顕微鏡写真

2.5.1 鉄粉焼結体の摩耗試験

素地の摩耗特性を評価するため、MnS快削鉄粉および従来の鉄粉のみを焼結した摩耗試験片を試作し、鉄道総研所有の「集電材摩耗試験機」を用いて摩耗試験を行った。

集電材摩耗試験機は、無酸素銅板 (JIS C1020P-1/2H) 製の模擬トロリ線 (幅 5mm) を取付けた直径 1m の回転円盤外周に、摩耗試験片 (摩擦幅 25mm) をコイルばねで一定荷重で押付け、通電摩擦する装置である。円盤には 2 個まで試験片を取付けることができ、模擬トロリ線側を正極、すり板試験片側を負極として直流 100V で 400A まで通電できる。押付荷重は 49N である。模擬トロリ線は、1 回の試験ごとに削正し、一定のしゅう動状態を保つようにした。

試験条件は、すり板押付力：49N、通電電流：DC 100A / すり板 1 枚、摩擦速度：50km/h、摩擦時間：60 分間とした。模擬トロリ線の摩耗量はレーザー形状測定

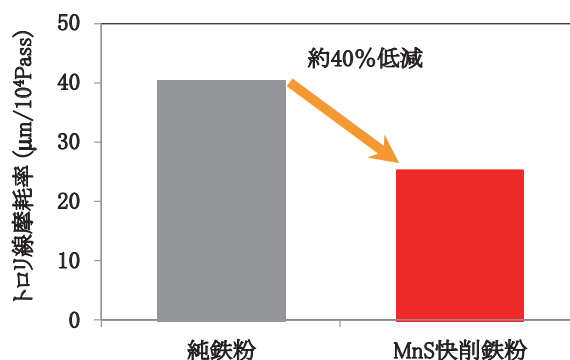


図3 定置試験での鉄粉の種類とトロリ線摩耗率の比較 (50km/h, 100A)

器 (キーエンス製) を使用して、試験前後の模擬トロリ線の高さ変化から 1 万回転あたりの模擬トロリ線寸法摩耗率を求めた。試験の結果を図 3 に示す。MnS 快削鉄粉は、鉄粉に比べて模擬トロリ線の摩耗率が約 40% 低減し、従来の鉄粉よりも潤滑性が向上することを確認した。

2.5.2 開発すり板 N5C-5 の試作

すり板の耐摩耗性を向上させるには硬質金属粒子の増量が必要であるが、硬質粒子の増量はトロリ線摩耗を増加させるため、固体潤滑剤を増量する必要がある、これまでのようなすり板の製造方法では、すり板の機械的特性や導電性を低下させてしまう。しかし、MnS 快削鉄粉を使用すると素地の潤滑性が従来よりも向上するため、硬質粒子の添加量を従来よりも大幅に増量させても、潤滑性を維持することができる。

表 3 に新幹線用焼結合金すり板の諸元を示す。改良すり板では、硬質粒子として高融点の Cr (クロム) や Cr-V (クロム・バナジウム) を添加していたが、N5C-5 ではこれに加えて FeTiNx (窒化フェロチタン) や Fe-Mo (フェロモリブデン) といった鉄系の硬質粒子を添加した。鉄系の硬質粒子は酸化しやすいため、酸化皮膜の形成による凝着摩耗の低減効果や、素地の鉄粉と結び付いて高硬度素地を形成する。このようにして試作した N5C-5 は、すり板の機械的特性や導電性を N4-2-1 より高めることができた。さらに、MnS 快削鉄粉の使用により、N4-2-1 で行っていた硫化処理の工程を省略することができ、経済性も高めることができた。

表 3 新幹線用焼結合金すり板の諸元

種類	諸元	密度 (g/cm ³) (目標値)	硬さ (HB)	引張強さ (MPa)	シャルピー衝撃値 (J/cm ³)	抵抗率 (μΩcm)	素地	硬質成分	潤滑成分
	すり板 型番								
現用すり板	TF5A	7.1	91	282	21.7	40	鉄粉	Cr	MoS ₂
	BF31	7.4	95	220	13.0	25		Fe-Ti, Fe-Mo	---
改良すり板	T3-2	7.0	100	255	11.0	58		Cr	MoS ₂ , Bi, BN
	N4-2-1	6.8	95	207	10.5	59		Cr, Cr-V	MoS ₂ , WS ₂
開発すり板	N5C-5	6.9	113	260	10.5	45	MnS 快削鉄粉	Cr, Cr-V, FeTiNx, Fe-Mo	MoS ₂ , WS ₂

3. 開発すり板 N5C-5 の定置試験

3.1 集電材摩耗試験機での試験

3.1.1 試験概要

N5C-5 のすり板摩耗特性を比較するために、「集電材摩耗試験機」で定置摩耗試験を行った。N5C-5 は N4-2-1 の後継として開発されたため、比較すり板は N4-2-1 とした。試験は、すり板押付力：49N、通電電流：DC 0A、100A / すり板 2 枚、摩擦速度と摩擦時間は 25km/h-40 分間、50km/h-60 分間、100km/h・200km/h・300km/h-30 分間の 5 通りとした。トロリ線の摩耗は寸法摩耗率で表し、すり板試験片の摩耗量は、試験前後の試験片の質量変化と試験片の密度から摩耗体積を求め、比摩耗量で表した。

3.1.2 試験結果

集電材摩耗試験機での模擬トロリ線摩耗率の比較を図 4 に、すり板の比摩耗量の比較を図 5 に示す。N5C-5 での模擬トロリ線の摩耗率は N4-2-1 と同程度、すり板自体の摩耗率は N4-2-1 より大幅に減少しており、低速度域 (25km/h) および高速度域 (300km/h) で 30～40% 減少した。

3.2 パンタグラフ総合試験装置での試験

3.2.1 試験概要

実物のパンタグラフを用いてすり板摩耗特性を評価するために、TPS301 パンタグラフにすり板を搭載し、「パンタグラフ総合試験装置」で定置摩耗試験を行った。比較すり板は、N4-2-1 が実車で使用されていないため、T3-2 とした。

パンタグラフ総合試験装置は、横回転する円盤側面に周長 10m の無酸素銅板 (JIS H3140 C1100BB-H) 製の模擬トロリ線 (幅 10mm) が取付けられており、実物パンタグラフに搭載したすり板と、通電摩擦する装置である。模擬トロリ線側を正極、すり板側を負極として交流および直流 100V で 400A まで通電できる。また、模擬トロリ線は上下加振および左右変位を与えることができる。模擬トロリ線は、1 回の試験ごとに削正し、一定のしゅう動状態を保つようにした。

試験は、すり板押付力：74N、通電電流：AC100V - 400A、摩擦速度：270km/h、摩擦距離：1000km、とした。また、約 30 秒ごとに ±180mm の左右変位を加え、上下加振は行わなかった。模擬トロリ線の摩耗は 12 箇所測定点を設けて各測定点でデジタルノギスを用いてトロリ線高さを測定し、試験前後の高さ変化の平均値を通過パンタグラフ数で除し、1 万回転あたりの模擬トロリ線平均寸法摩耗率を求めた。すり板の摩耗量は、試験前後のすり板質量変化をすり板密度と走行距離で除し、1 万 km あたりのすり板体積摩耗率を求めた。

3.2.2 試験結果

パンタグラフ総合試験装置でのすり板と模擬トロリ線の摩耗比較を図 6 に、試験後の模擬トロリ線摩擦面を図 7 に示す。N5C-5 は T3-2 よりも、すり板体積摩耗率で 37%、トロリ線平均寸法摩耗率で 33% 減少した。また、N5C-5 ではトロリ線摩擦面に黒色の移着物が T3-2 より多く付着しており、黒色で光沢のある摩擦面を呈していた。

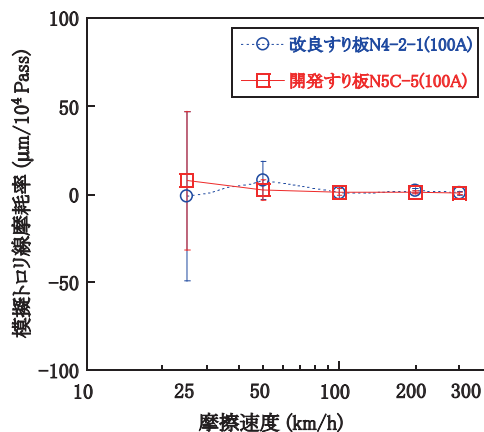


図 4 集電材摩耗試験機での模擬トロリ線摩耗率の比較

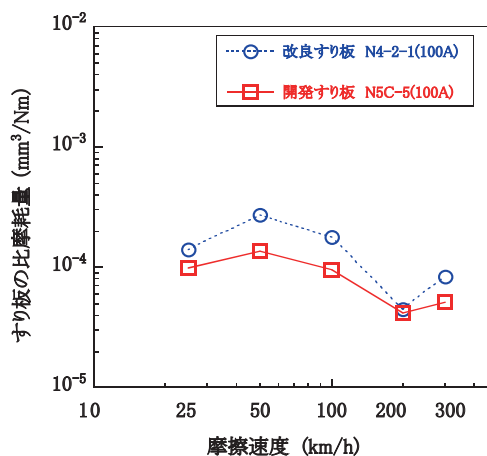


図 5 集電材摩耗試験機でのすり板摩耗量の比較

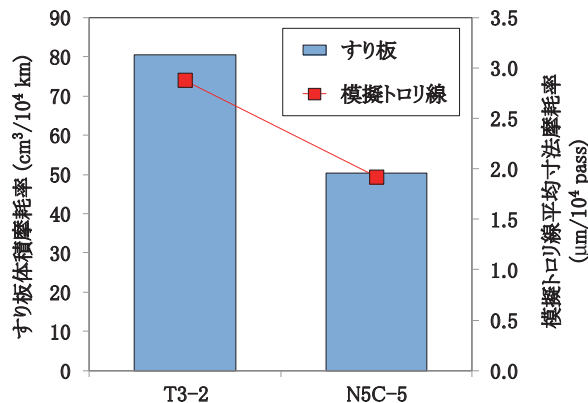


図 6 パンタグラフ総合試験装置での摩耗測定結果

4. 開発すり板の現車試験

4.1 試験概要

N5C-5を実用化するため、8両編成の新幹線営業車を使用して新幹線の特定区間（以下、試験区間）で現車試験を行った。試験はステップ1～3の3段階で、ステップ毎にすり板およびトロッコ線の摩耗評価を行い、段階的にN5C-5の搭載割合を増加させた。なお、N5C-5を搭載した車両以外には全てT3-2を搭載した。現車試験の概要を表4に、N5C-5の搭載時期と搭載編成数を表5に示す。ステップ2、ステップ3でのすり板の移行は、すり板が摩耗限度に達した段階で順次営業車両にN5C-5を搭載した。

4.2 すり板摩耗率の算出方法

すり板の摩耗管理はすり板の残存厚さで行われているため、最大寸法摩耗率を算出した。デジタルノギスを用いてすり板の最大摩耗寸法を測定し、1パンタグラフに装着されたすり板で最大の摩耗寸法を走行キロで除し、1万km当たりのすり板最大寸法摩耗率を算出した。

4.3 すり板摩耗率およびすり板の表面状態の比較

ステップ2からステップ3までに試験区間で使用した全てのすり板（N5C-5、T3-2）の摩耗率を調査した。すり板取り外し月と最大寸法摩耗率（月平均）の関係を図8に示す。折れ線グラフは縦軸左側のすり板摩耗率、棒グラフは縦軸右側の調査パンタグラフ数である。パンタグラフ集電電流は第2パンタより第1パンタの方が大きいため、両すり板とも第1パンタの方がすり板摩耗率は大きくなっているが、N5C-5とT3-2で摩耗推移に大きな差は認められなかった。両すり板とも2～4月の摩耗率が大きい。これは冬季のトロッコ線着霜による離線アークが原因と考えられる。N5C-5とT3-2を混用した、2011年10月～2012年3月のすり板摩耗率の平均を図9に示す。すり板最大寸法摩耗率はN5C-5の方がT3-2より約3%小さかった。

4.4 トロッコ線調査

開発すり板N5C-5がトロッコ線摩耗に与える影響を調査するため、表5に示すようにステップ2の終了後とステップ3の終了直前に、新幹線駅構内のパンタグラフ停止位置でトロッコ線の摩耗調査を行った。トロッコ線の種類はCS-110mm²で、測定点でマイクロメータでのトロッコ線残存直径測定と摩擦面写真の撮影を行った。調査箇所のトロッコ線は、ステップ2の開始直前に新線に張替えられたため、新線の状態から開発すり板が導入されたものとみなし、N5C-5導入試験中のトロッコ線の摩耗推移を調査した。駅構内トロッコ線の張替日からの経過日数とトロッコ線残存直径の関係を、T3-2使用時である張替前のトロッコ線の摩耗推移とともに図10に示す。N5C-5導入試験中



図7 パンタグラフ総合試験装置での試験後の模擬トロッコ線摩擦面

表4 開発すり板 N5C-5 の現車試験の概要

		試験車両	供試材	N5C-5 搭載編成数	評価項目
ステップ1	試使用	新幹線 8両編成	N5C-5 T3-2	1	・異常摩耗等の有無 ・すり板摩擦面の状態 ・すり板摩耗率
ステップ2	使用編成 拡大		N5C-5 T3-2	5 全編成の1/3	・すり板摩擦面の状態 ・すり板摩耗率
ステップ3	全編成 搭載		N5C-5	14 全編成	・トロッコ線の摩耗状況

表5 開発すり板 N5C-5 の搭載期間と搭載編成数

	2011年			2012年							
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
ステップ1	1編成										
ステップ2			5編成								
ステップ3							全編成 (14編成)				

順次取外し

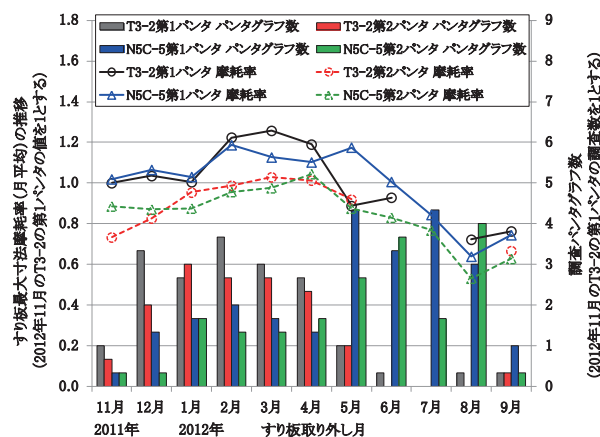


図8 すり板取り外し月ごとのすり板最大寸法摩耗率と調査パンタグラフ数

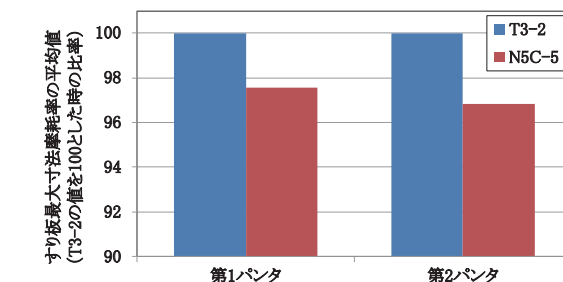


図9 2011年10月～2012年3月のすり板最大寸法摩耗率の平均値の比較

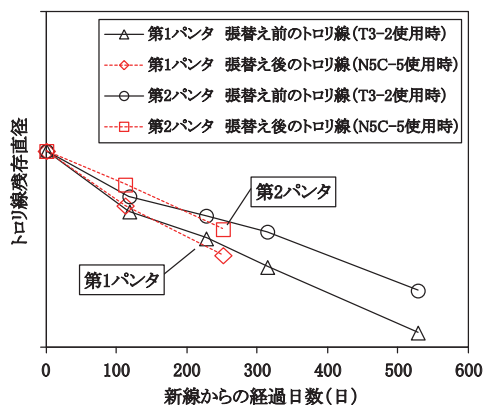


図10 駅構内パンタグラフ停止位置でのトロリ線の摩耗推移

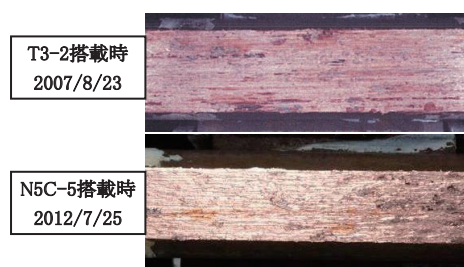


図11 T3-2 および N5C-5 を全編成に搭載した時のトロリ線摩擦面（第1パンタグラフ停止位置）

のトロリ線摩耗推移は T3-2 使用時とほぼ同じであった。

T3-2 および N5C-5 を全編成に搭載した時の、第1パンタグラフ停止位置のトロリ線摩擦面写真を図11に示す。T3-2 搭載時の写真は、T3-2 の導入試験時（2007年8月23日）に撮影したものである。T3-2 搭載時の写真はフィルムカメラで撮影したため色合いが N5C-5 と異なるが、N5C-5 使用時と T3-2 使用時で、トロリ線の摩擦面に違いは認められなかった。

5. 定置試験と現車試験でのすり板摩耗率の違い

すり板摩耗率は、定置試験では集電材摩耗試験機とパンタグラフ総合試験装置ともに、T3-2 より N5C-5 の方が大幅に小さかったが、現車試験では N5C-5 の方が約3%小さい程度であった。これは、図7に示すように、N5C-5 で定置試験を行うと模擬トロリ線摩擦面にすり板成分による移着膜が形成され、すり板とトロリ線の摩耗が抑制されたが、現車試験ではトロリ線の摩擦面に移着膜が形成されにくかったためと考えられる。実物のトロリ線で図7のような高速区間で撮影した写真は無いが、目視によるトロリ線観察では、実物のトロリ線で図7のような移着膜は確認できなかった。定置試験でのみ移着膜が観察された理由として、定置試験で用いたのが回転試験装置であるため短時間に何度も摩擦するのに対し、実際のトロリ線は摩擦間隔が長いことによる摩擦形態の違いが考えられるが、詳細な原因説明は今後の検討課題である。

6. まとめ

すり板の長寿命化を図るため、素地鉄粉に MnS 快削鉄粉を使用し、素地の潤滑性を大幅に向上させたすり板 N5C-5 を新たに開発した。N5C-5 では素地の潤滑性向上により、潤滑成分の添加量が抑えられ、すり板の機械的特性や導電性を改良すり板と同程度に維持したまま、すり板の耐摩耗性を高める硬質粒子を従来のすり板より多く添加することが可能となった。

こうして開発した N5C-5 で定置試験を行った結果、集電材摩耗試験機では、N5C-5 での模擬トロリ線の摩耗率は N4-2-1 と同程度、すり板自身の摩耗率は N4-2-1 より大幅に減少しており、低速度域（25km/h）および高速度域（300km/h）で 30～40%減少した。また、パンタグラフ総合試験装置では、模擬トロリ線の摩耗率は 33%減少し、すり板の摩耗率は 37%減少した。

N5C-5 は定置試験で良好な結果が得られたことから、新幹線の試験区間で現車試験を行い、N5C-5 の搭載編成数を段階的に増加させてすり板とトロリ線の摩耗を調査した。試験の結果、すり板最大寸法摩耗率は、N5C-5 の方が T3-2 より約3%小さく、N5C-5 導入試験中のトロリ線摩耗推移は T3-2 使用時とほぼ同じであった。また、N5C-5 使用時と T3-2 使用時で、トロリ線の摩擦面に違いは認められなかった。

以上の結果から、改良すり板に比べて N5C-5 はすり板摩耗の大幅改善には至らなかったものの、トロリ線摩耗が改良すり板使用時と同程度であることから、新幹線の一部線区では実用化されている。

謝辞

実車でのすり板摩耗調査およびトロリ線摩耗調査等に協力いただいた東日本旅客鉄道㈱の関係各位、および、すり板の試作に協力いただいた㈱ファインシンターおよび帝國カーボン工業㈱の関係各位に深く感謝の意を表す。

文献

- 1) 土屋広志, 久保俊一, 久保田喜雄: 新しい潤滑成分を用いた新幹線用焼結合金すり板, 電気情報通信学会, Vol.109, No.263, pp.1-6, 2009
- 2) 池田, 土屋: 高速鉄道用パンタグラフのトライボロジーに関わる最近の動向, トライボロジスト, Vol.58, No.7, 2013
- 3) 土屋広志: パンタグラフすり板, 特殊鋼, Vol.61, No.5, 2012
- 4) 寺岡利雄, 青木純久, 他: 鉄系焼結合金の摩耗に及ぼす添加剤の効果, 日本潤滑学会第33期全国大会(岡山)研究発表会予稿集, 1988
- 5) Aoki, S. and Fukuhara, K.: Quarterly Report of RTRI, Vol.38, No.2, p.82, 1997.
- 6) 田中浩之, 古田智之, 谷口祐司: MnS プレアロイ型快削鋼粉と酸化物添加型快削鋼粉による被削性改善, R & D 神戸製鋼技報, Vol.60, No.2, pp.75-78, 2010