

架線ーパンタグラフの機械的接触に 起因する摩耗メカニズム



山下 主税
Chikara Yamashita
電力技術研究部
集電管理研究室長



根本 公紀
Koki Nemoto
電力技術研究部
集電管理研究室
研究員

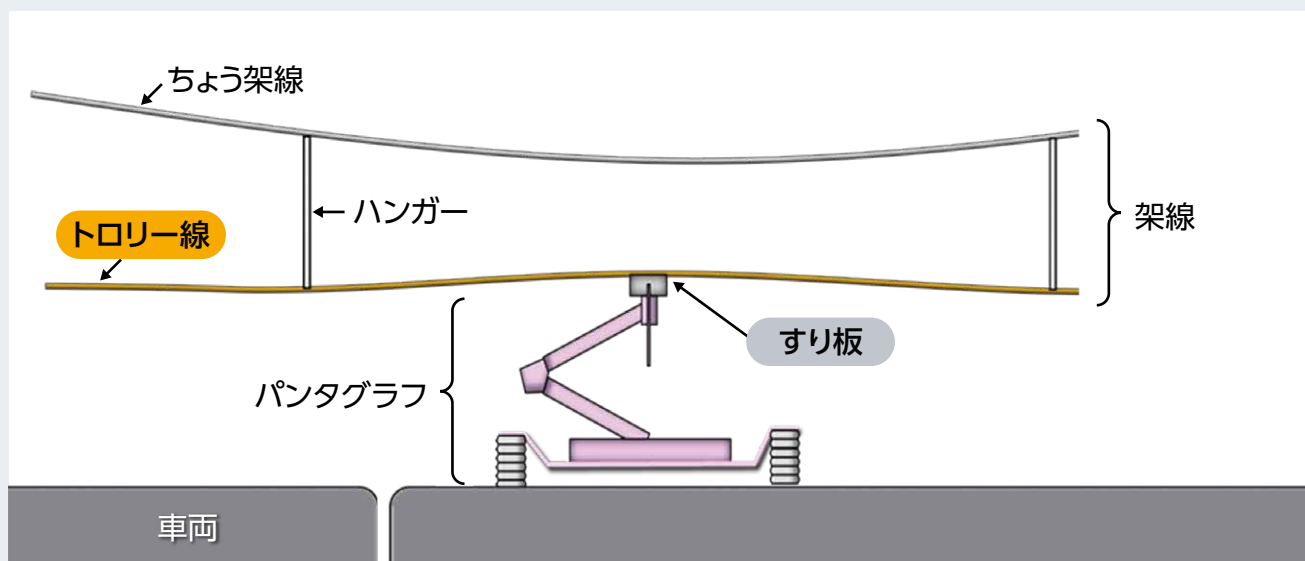
はじめに

電気鉄道において、電気車と電車線の間で電力を授受する技術を「集電」と呼びます。電気車の運転に必要な大電流を効率よく集電するため、現状では電車線と集電装置を接触させてしゅう動する「しゅう動集電方式」を採用しています。このため、集電の技術には電気的な境界領域と、機械的な境界領域の技術の両面があります。

電気鉄道のしゅう動集電方式は多くの場合、

電車線にトロリー線やちょう架線などを用いた架空電車線（以降、架線と呼称します）、集電装置にすり板を搭載したパンタグラフを用いています（図1）。架線とパンタグラフには、電気的・機械的な技術課題がありますが、ここでは、両者が接触することで生じる機械的な「摩耗」について、近年解明したメカニズム¹⁾²⁾を紹介いたします。なお、電気的な摩耗に関するメカニズムは2017年5月のRRR³⁾で紹介しています。

図1 架線ーパンタグラフによるしゅう動集電システム



集電材料の摩耗形態を把握する

集電時に直接接触する架線側のトロリー線と、パンタグラフ側のすり板は、「集電材料」と呼ばれます。これらの集電材料は走行中に擦れ合い摩耗しますが、その摩耗量は接触力や速度、電流の大きさなどの条件によって大きく異なります。そのため、設備の信頼性向上やメンテナンスコスト削減のためには、どのような条件でどのような摩耗が生じるか、摩耗のメカニズムを把握したうえで対策する必要があります。

一般的に、ある材料の摩耗特性を把握するためには、実物ではなく室内のモデル実験が行われます。しかしながら、摩耗量などの値は機器の構成や摩擦の仕方、環境などシステムに依存するため、モデル実験で実物と同じ接触力やしゅう動速度の条件を再現しても、実物の摩耗特性を再現することは困難です。そこで、実物やモデル実験などの集電システムによらず、共通して見られる「摩耗形態」に着目することで、摩耗のメカニズムを解明することができると考えました。これは、どのような摩耗形態が発現

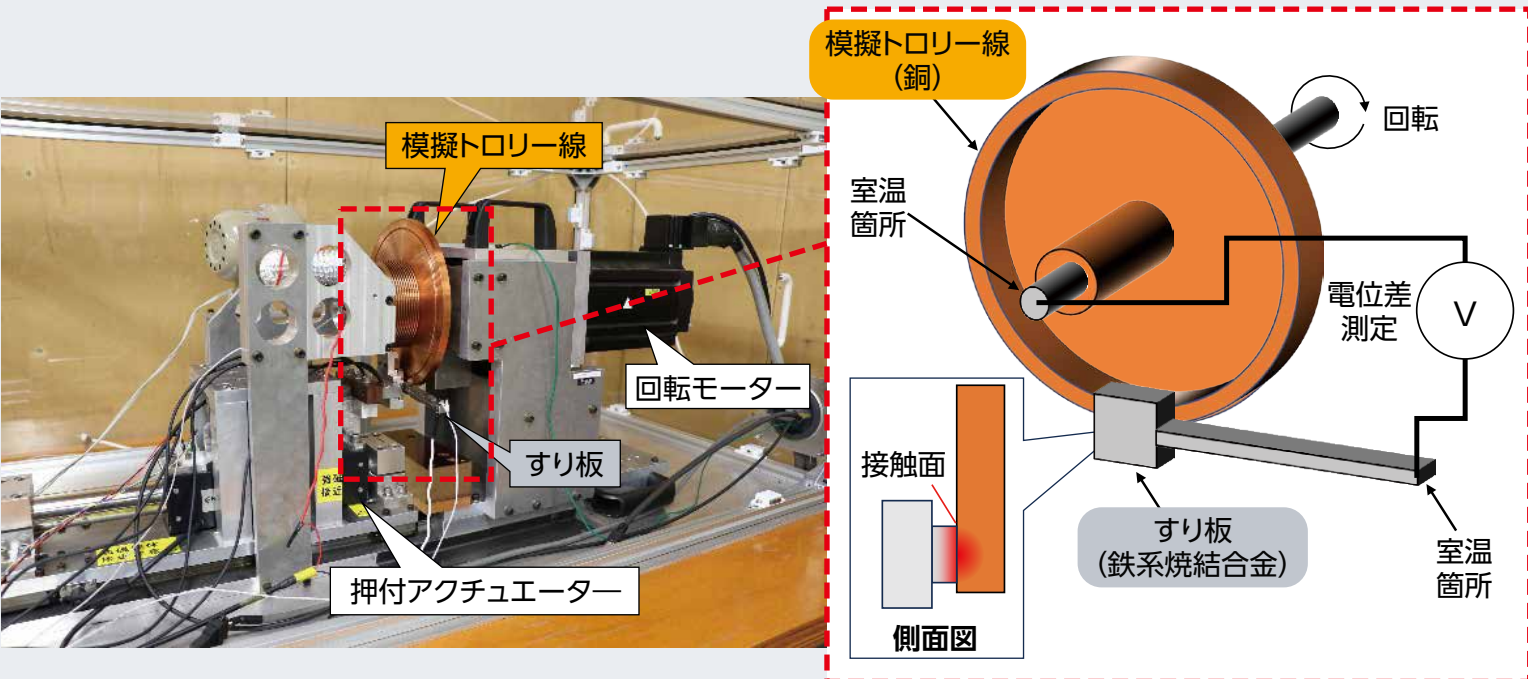
するかは、材料の軟化や溶融といった材料固有の特性に基づくことが多く、集電システムに依存しないためです。

摩耗実験機

材料の軟化や溶融は温度に依存します。そこで、摩耗形態の発現メカニズムを解明するためのモデル実験として、模擬トロリー線とすり板の接触面温度を測定できる実験機を開発しました(図2)。これは、ある物質の両端に温度差が生じると、その両端に電位差が生じる「ゼーベック効果」を応用したものです。模擬トロリー線とすり板の接触面温度が上昇すると、接触面から十分離れた各材料の室温箇所との間に電位差が生じるため、各室温箇所の電位差を測定することで接触面温度を推定することができます。

この実験機を使い、模擬トロリー線(銅)とすり板(鉄系焼結合金)の組み合わせで接触力としゅう動速度を変化させ、摩耗面の状態と温度の関係を調査しました。

図2 摩耗実験機と概要¹⁾



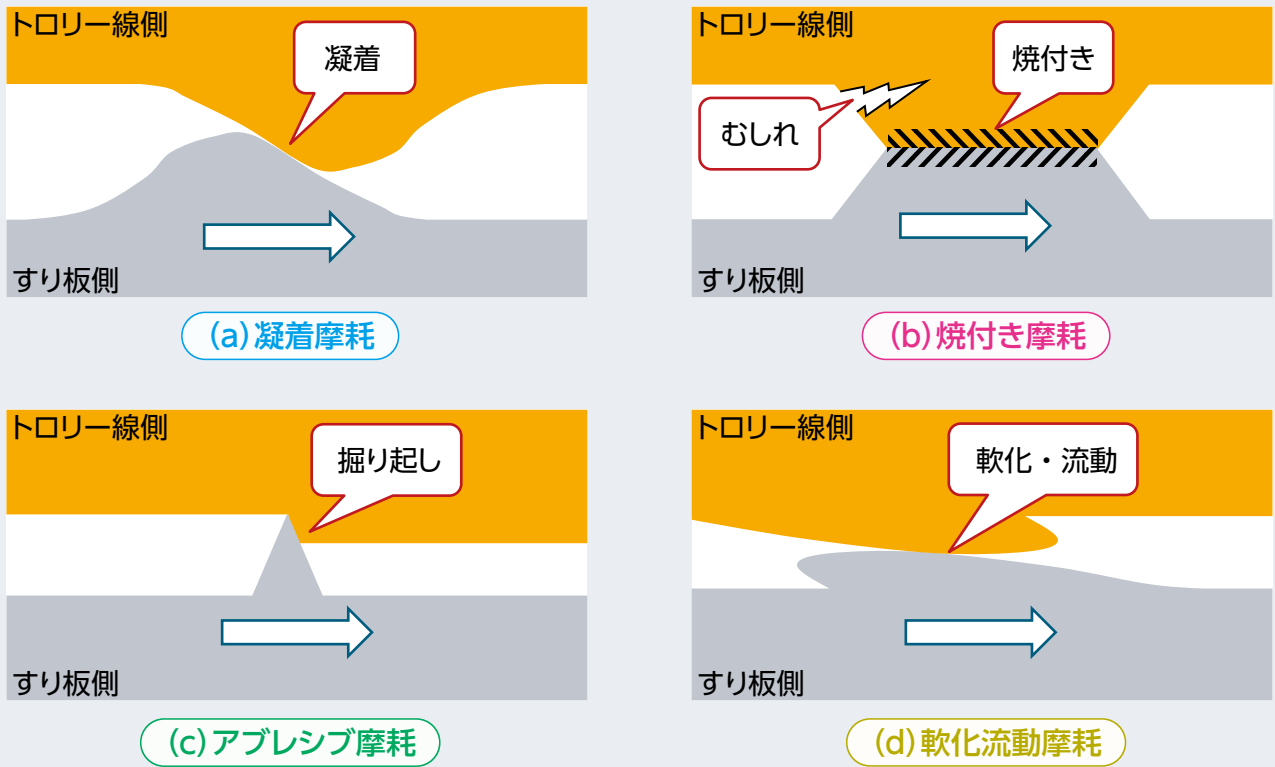


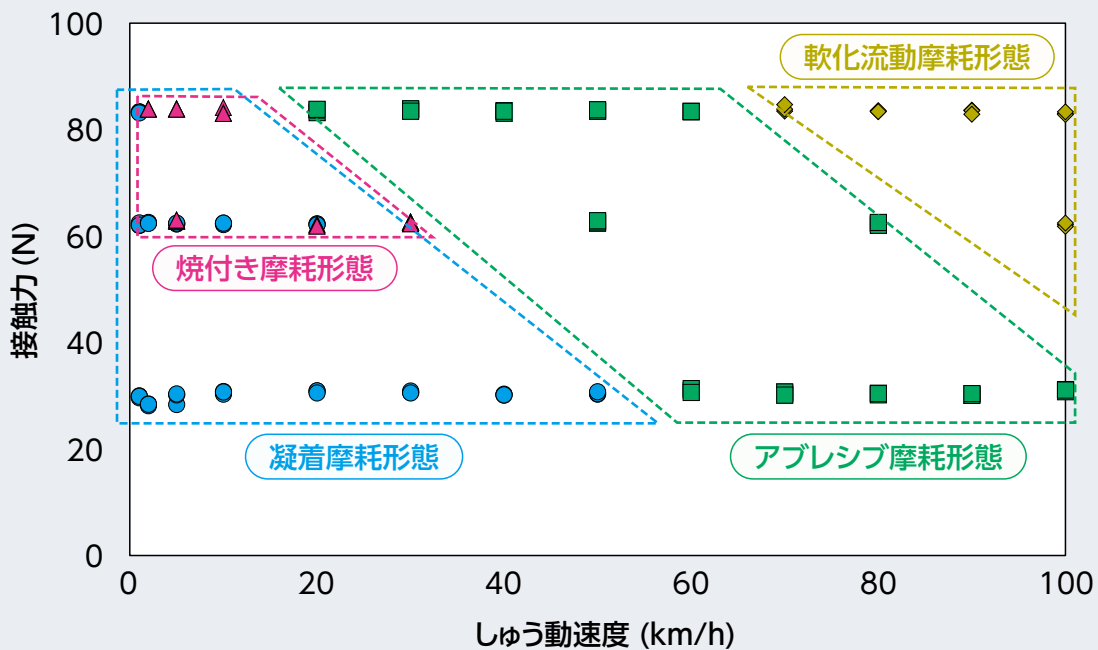
図3 各摩耗形態のメカニズム

摩耗実験による摩耗形態の分類

摩耗実験の結果、模擬トロリー線とすり板の機械的な接触による摩耗形態は、図3の4種類に分類できることがわかりました。図4に各摩耗形態が発現した実験条件を示します。また、

図5に各摩耗形態の典型的な摩耗面を、図6に摩耗面の硬さ測定結果を示します。なお、摩耗面の硬さはビッカース硬さ[®]で表しています。各摩耗形態のメカニズムと特徴、実験結果との関係について以下に述べます。

図4 実験条件と発現した摩耗面状態¹⁾

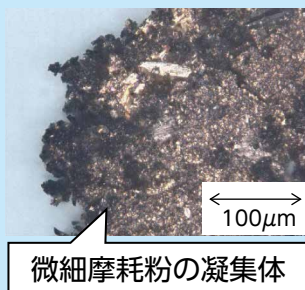
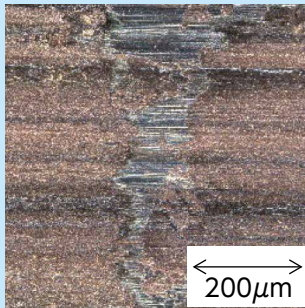
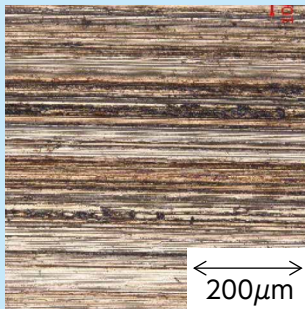


模擬トロリー線

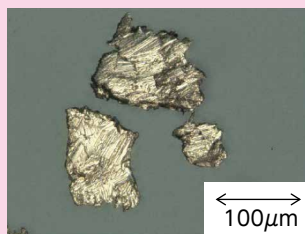
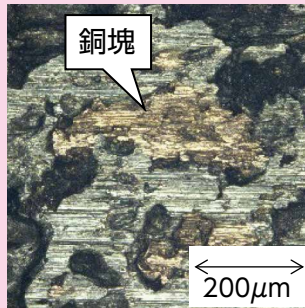
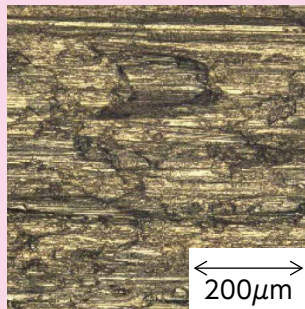
すり板

摩耗粉

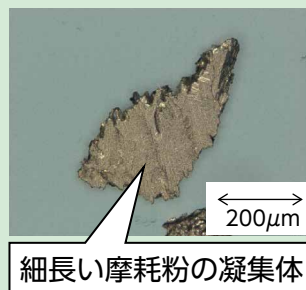
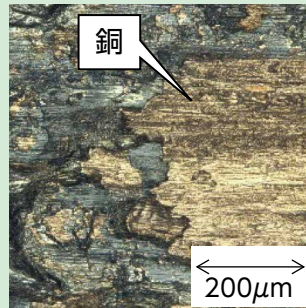
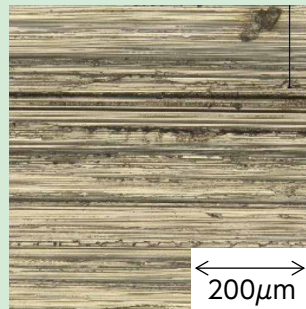
凝着摩耗形態



焼付き摩耗形態



アブレシブ摩耗形態



軟化流動摩耗形態

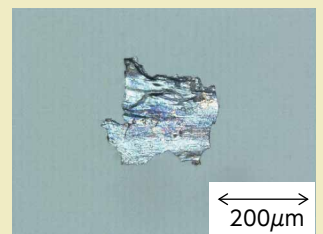
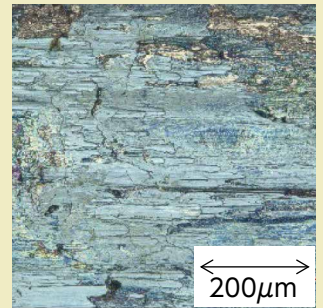
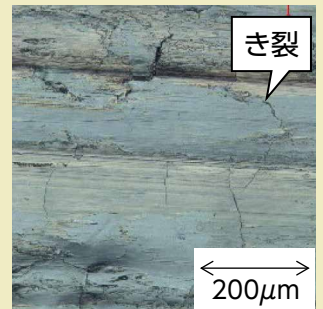


図5 摩耗面状態の分類結果 (摩擦方向：左から右)¹⁾

(1) 凝着摩耗形態 (図3(a))

「凝着摩耗[®]」は、金属同士の摩耗では一般的な形態であり、突起同士が接触してくっつき、離れる際に突起の一部が脱落するもので、本実験では比較的低い接触力と低いしゅう動速度の条件で確認されました (図4中の●)。この形態では、模擬トロリー線の摩耗面は線条痕となり、

ビッカース硬さ

測定対象にダイヤモンド片を押し込むことによつてできたくぼみの寸法や深さから求めた押し込み硬さの一種で、単位はHV (Hardness Vickersの頭文字) で表されます。

凝着摩耗

接触面は完全に平滑ではなく、微小な突起があります。この突起同士の結合を凝着と呼び、摩擦によって凝着部分が破壊された摩耗を凝着摩耗と呼びます。

数 μm の非常に小さい摩耗粉が集まった凝集体が発生します。なお、模擬トロリー線とすり板の硬さを測定すると、いずれも硬さの低下はなく、軟化していません。

(2) 焼付き摩耗形態 (図3(b))

この摩耗は、凝着よりも強い力で突起同士が結合し、軟らかい方の表面をむしっていくことから「焼付き摩耗」と呼んでいるもので、本実験では比較的高い接触力と低いしゅう動速度の条件で確認されました (図4中の▲)。この形態では、模擬トロリー線の表面がむしり取られて凹凸を生じ、すり板に銅の塊が付着します。また、摩耗粉は数百 μm と比較的大きいことが特徴です。なお、模擬トロリー線とすり板の硬さを測定すると、いずれも硬さの低下はなく、軟化していません。

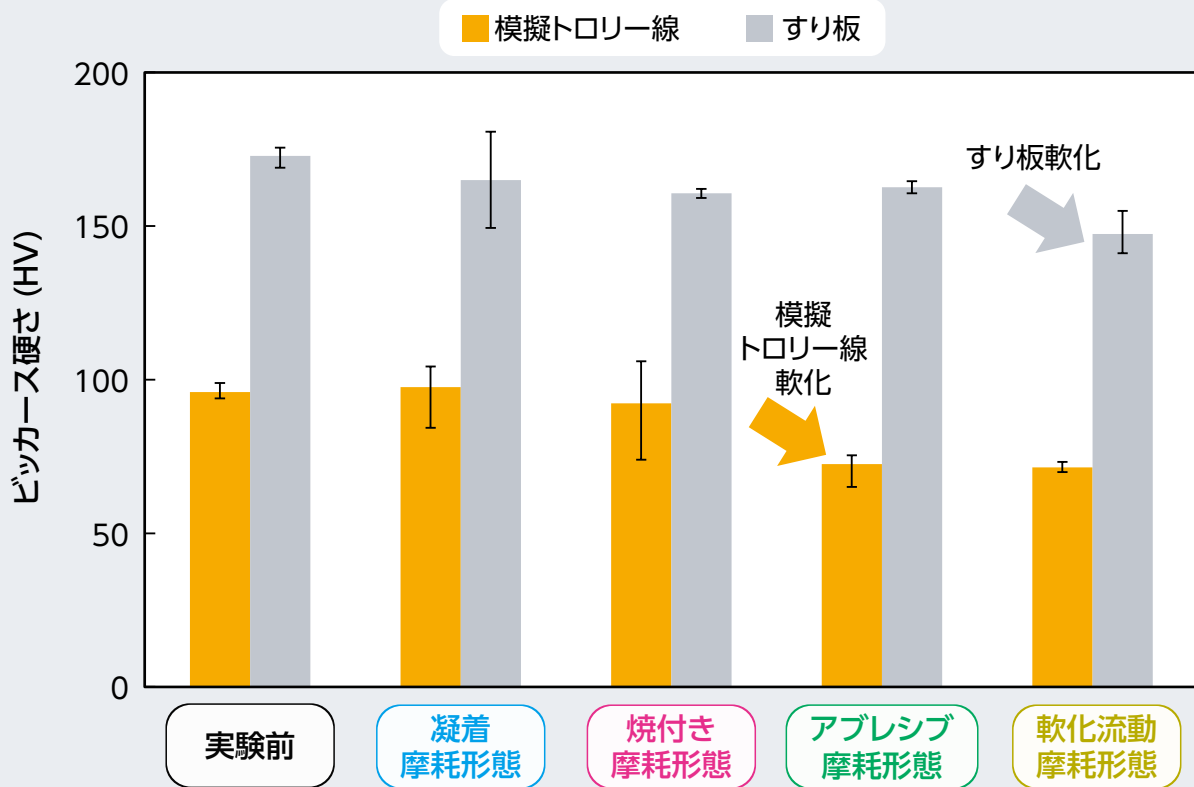


図6 硬さ測定結果¹⁾

(3) アブレシブ摩耗形態 (図3(c))

「アブレシブ摩耗」は、軟らかい方の表面を硬い突起が掘り起こしていくもので、(2)の焼付き摩耗形態と(4)の軟化流動摩耗形態の中間の速度域で確認されました(図4中の■)。この形態では、(1)のように模擬トロリー線の摩耗面は線条痕となりますが、すり板の表面に銅が大量に付着することが特徴で、摩耗粉は細長い銅片が集まった凝集体が発生します。なお、模擬トロリー線とすり板の硬さを測定すると、模擬トロリー線の硬さのみが低下し、軟化していることがわかりました。このことから、軟らかくなった模擬トロリー線の表面を、軟化していないすり板の突起が掘り起こしたものと考えられます。

(4) 軟化流動摩耗形態 (図3(d))

この摩耗は、模擬トロリー線とすり板のどちらも軟化し、表面が流動していたことから「軟

化流動摩耗」と呼んでいるもので、比較的高い接触力と高いしゅう動速度の条件で確認されました(図4中の◆)。この形態では、模擬トロリー線の摩耗面は滑らかでき裂が多数確認できます。模擬トロリー線とすり板の表面は鉄色の流動痕が確認できますが、これはすり板成分が模擬トロリー線に擦り付けられたものです。摩耗粉は模擬トロリー線表面のき裂が進展し、剥がれたものでした。なお、模擬トロリー線とすり板の接触面硬さを測定すると、いずれの硬さも低下していることがわかります。

4種類の摩耗形態が発現する条件

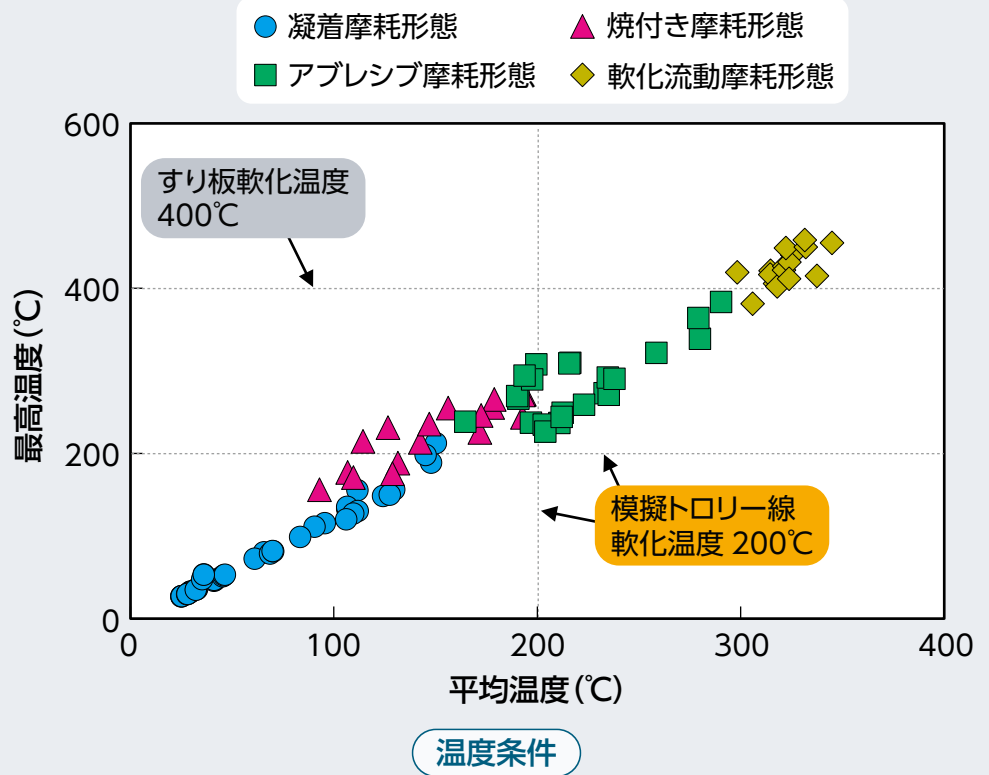
摩耗面分析の結果、4種類の摩耗形態の発現には材料の軟化が影響していると考えられます。材料の軟化には接触面の温度が影響することから、摩耗実験中に測定した平均温度と最高温度で整理し、摩耗形態の発現条件を図7のように

まとめました。この図はモデル実験で得られたものですが、トロリー線やすり板の軟化温度は材料固有の値ですので、この発現条件は実物の集電システムにも適用できると考えられます。

本稿で紹介した結果から、トロリー線やすり板の機械的接触に起因する摩耗は、摩擦熱に起因する接触面の温度上昇と、トロリー線やすり板の軟化温度によって変化することが明らかになりました。このことは、温度上昇のしやすさなどの特性が異なる材料を組み合わせることによって、発現する摩耗形態をコントロールできる可能性を示すものであり、今後の摩耗対策の開発に有効な知見が得られました。

おわりに

本稿では、主に架線とパンタグラフの機械的接触による摩耗メカニズムについて紹介しました。鉄道総研では、引き続き摩耗形態に影響する因子の解明に取り組み、摩耗形態の予測手法や、摩耗を低減する技術の確立を目指します。RRR



摩耗形態	軟化の有無	
	トロリー線	すり板
凝着摩耗形態	軟化なし	軟化なし
焼付き摩耗形態	一瞬だけ軟化	軟化なし
アブレシブ摩耗形態	軟化	軟化なし
軟化流動摩耗形態	軟化	一瞬だけ軟化

軟化の有無

図7 摩耗形態の発現条件 (上: 温度条件, 下: 軟化の有無)¹⁾

文献

- 1) 根本公紀, 山下主税: 集電材料の摩耗形態遷移に及ぼす摩擦熱の影響, トライボロジスト, Vol.67, No.7, pp.496-506, 2022
- 2) 山下主税, 根本公紀: 摩擦熱に起因するトロリー線やすり板の機械的摩耗形態の分類, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.11-16, 2021
- 3) 山下主税: 架線・パンタグラフの摩耗メカニズムを解明する, RRR, Vol.74, No.5, pp.24-27, 2017