

通電摩擦実験を模擬したパンタグラフすり板の熱伝導解析

森本 文子* 久保田 喜雄 (鉄道総合技術研究所)

Heat transfer analysis of pantograph contact strip simulating friction experiment with electrical current

Fumiko Morimoto*, Yoshitaka Kubota (Railway Technical Research Institute)

For reducing wear of pantograph contact strips, it is important to clarify their wear mechanism. It is known that arc discharge, electric current, and contact force affect the wear of the contact strip. These factors also affect the temperature rise of the contact strip. Clarifying the relationship between the surface temperature and the wear of contact strips may lead to better understanding of the wear phenomenon. Since surface temperature is difficult to be measured experimentally, the authors tried to estimate it by numerical analysis. In this study, we estimated the frictional surface temperature by FEM analysis which simulate the experiments with a copper-impregnated carbon contact strip and actual contact wire. We also introduce the estimation of the microscopic temperature distribution using a microscale FEM model.

キーワード：パンタグラフすり板，温度上昇，電流，有限要素解析
(Pantograph contact strip, temperature rise, electric current, FEM)

1. はじめに

パンタグラフすり板（以下、すり板）は、パンタグラフの上部に取り付けられたしゅう動部材で、鉄道車両の走行のための電力をトロリ線から受け取る電気接点部材である。すり板は走行に伴い摩耗する消耗部材であり、メンテナンスコスト低減のためその摩耗低減は絶えず求められている。摩耗低減のためにはその摩耗メカニズムを十分に理解している必要がある。

すり板の摩耗には、離線時のアーク放電や通電電流、押上力、トロリ線の左右移動速度などが影響すると考えられている。これらはいずれも通電摩擦に伴って摩擦面で発生するエネルギーに関係しており、すり板の温度上昇への影響因子でもある。これまで筆者らはすり板の摩擦面近傍の温度と摩耗の関係性を明らかにすることにより、すり板摩耗の現象解明につながる可能性があると考え、実験では測定が難しい摩擦面近傍の温度を解析により推定することに取り組んできた。

前報では新幹線用パンタグラフを対象に行った実験と解析について報告した⁽¹⁾が、今回、新たに在来線用パンタグラフを用いた通電摩擦実験の結果をもとに、銅含浸型メタライズドカーボンすり板の擦面近傍温度を FEM 解析により推定したので報告する。本報告では、解析対象とする実験の概要と、それを模擬した解析による温度推定結果を述べるとともに、マイクロメートルオーダーの構造を反映させたモデルによる FEM 解析を試みた結果を紹介する。

2. 実験の概要

〈2・1〉 実験条件 実験の詳細は本シンポジウムの「銅含浸型メタライズドカーボンすり板の通電に伴う温度上昇と摩耗」に記載したのでそちらを参照されたい。ここでは、解析に関係する内容を中心に実験の概要を記す。

実験には鉄道総研が保有する高速パンタグラフ試験装置を用いた。本装置は回転円盤に取り付けられたトロリ線がパンタグラフと通電接触する仕組みを持つ。最大 1000A の通電が可能で、円盤の左右加振によりトロリ線左右移動を模擬できる。すり板とトロリ線の片当たりが解消されるまでなじみ運転を行ったのち、電流、押上力、左右移動速度、風速等を変えた実験を行った。各試番の実験条件を表 1 に示す。

表 1 実験条件

試番	速度 (km/h)	距離 (km)	押上力 (N)	電流 (A)	トロリ線 上下加振	トロリ線 左右移動 速度(m/s)	送風速度 (km/h)	環境温度 (°C)	相対湿度 (%)								
1	100	200	60	0	無	0.3	100	20	50								
2				500													
3				90						1000	無						
4											あり						
5				30						1000	無						
6											あり						
7				100						30	1000	無					
8												あり					
9				200						60	1000	無	0.1	0 (送風無し)	100		
10																	0
11																	500
12																	0.001
13																	
14																	0.001

〈2・2〉 測定項目 円盤の回転速度、通電電流、すり板とトロリ線間の電位差、左右移動速度のほか、熱電対により図 1 に示す位置におけるすり板内部温度を測定した。また、試験前後の舟体重量を測定し、その差からすり板の体積摩耗率を算出した。

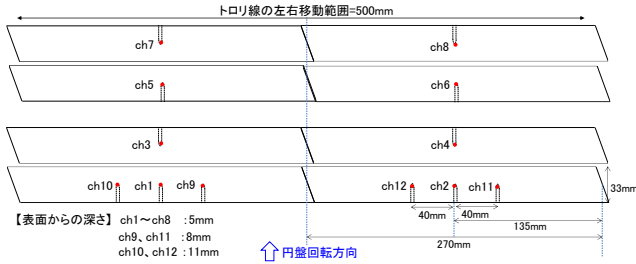


図 1 すり板内部温度の測定点

〈2・3〉 実験結果 すり板とトロリ線間の電位差を V として、 $V > 10V$ の場合にアーク放電が発生したと判定し、実験時間で平均したアーク放電の発生率 (アーク離線率 η) を算出した。アーク放電によりすり板とトロリ線の間で発生するエネルギー W_{arc} を、通電電流 I 、データ数 N 、データ間隔 Δt として次式により算出した。

$$W_{arc} = \sum_{i=1}^N V_i I_i \Delta t \quad (V_i > 10V) \quad (1)$$

$V < 10V$ の場合にはすり板とトロリ線が接触しているとして、接触抵抗に起因して接触部で発生するジュールエネルギー W_R を次式により算出した。

$$W_R = \sum_{i=1}^N V_i I_i \Delta t \quad (V_i \leq 10V) \quad (2)$$

それぞれを実験時間 $T = N \Delta t$ で除して単位時間あたりの値として、アークエネルギー密度 $Q_{arc} = W_{arc}/T$ と接触時のジュールエネルギー密度 $Q_R = W_R/T$ を算出した。これらの値を温度測定の結果と併せて表 2 に示す。

表 2 実験結果

試番	押上力 (N)	電流 (A)	上下加振	左右移動速度 (m/s)	体積摩耗率 ($\text{cm}^3/10^4\text{km}$)	アーク離線率 (%)	Q_R (W)	Q_{arc} (W)	5mm 下温度 ($^{\circ}\text{C}$)		
									最高	平均	
1	0	0	無	0.3	0.0	0.0	0	0	30	26	
2	500	0	無		27.1	0.4	701	29	41	34	
3	60	0	無		34.8	0.5	1823	59	64	46	
4	0	0	あり		642.4	7.7	1931	975	71	56	
5	0	0	無		33.2	0.3	1875	41	56	47	
6	90	1000	無		0.0	0.1	1933	7	60	48	
7	0	0	あり		101.7	1.0	1852	125	79	48	
8	30	0	無		645.1	8.9	2362	1170	104	71	
9	0	0	あり		1965.1	36.1	1766	5138	200	90	
10	0	0	無		7.1	0.0	0	0	34	28	
11	0	0	無		19.3	1.0	681	63	51	43	
12	60	500	無		75.3	0.6	1883	78	80	68	
13	0	1000	無		0.1	12.2	0.1	1863	11	54	43
14	0	0	無		0.001	134.6	0.2	2128	21	162	(56~162)

3. 熱伝導解析

〈3・1〉 解析モデル パンタグラフには舟体が二つ付いているが、形状および境界条件の対称性から一つの舟体の 1/2 部分をモデル化した。解析モデルを次項で述べる境界

条件と併せて図 2 に示す。主すり板、さや、補助すり板、銅板、すり板取り付け板 (すり板を取り付けるためのアルミニウム合金製の板) の各部分に用いた物性値を表 3 に示す。

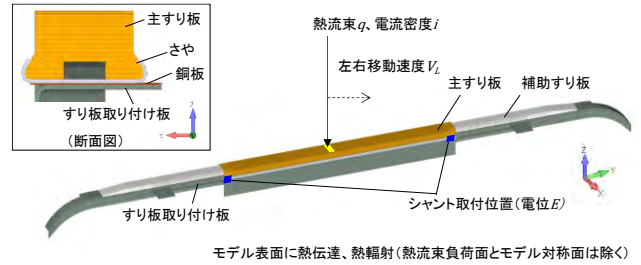


図 2 解析モデル形状と境界条件

表 3 解析に用いた物性値

	材料名	密度 (kg/m^3)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	電気抵抗率 ($\mu\Omega\text{m}$)
主すり板	PC78A	3119	13.9	577	1.26
さや	SPCC※	7870	73.3	481	130.0
補助すり板	A5052	2628	138	917	0.0493
銅板	C1100	8940	391	405	0.0171
すり板取り付け板	A5052	2628	138	917	0.0493

※さやはSGCC(SPCC)に亜鉛溶融めっきを施した材料製だが、物性値不明のためSPCCで代用。

〈3・2〉 境界条件 以下の境界条件をモデルに与えて非定常熱伝導解析を行った。解析対象時間は、実測温度が飽和するとみなせた左右移動 160 往復分 (約 530 秒間) とした。ただし、解析では一往復ごとにほぼ同じ温度変化が繰り返される試番 14 については 4 往復分 (4000 秒間) とした。

(1) 熱流束 すり板とトロリ線の間には、接触中は摩擦仕事および接触抵抗に起因するジュールエネルギーが、アーク放電中はアーク放電によるエネルギーが生じ、各エネルギーの一部が熱として流入することによりすり板は温度上昇する。単位時間あたりの摩擦仕事は、摩擦速度 (= 円盤の周速) v 、摩擦係数 μ 、押上力 P として、 $\mu P v$ で表される。実験時間で平均した摩擦仕事密度 Q_{fr} は、アーク離線率 η を用いて次式とする。

$$Q_{fr} = (1 - \eta) \mu P v \quad (3)$$

Q_{fr} のうち、すり板に熱として流入する割合を熱分配率 α_{fr} ($0 < \alpha_{fr} < 1$) とし、同様にして接触時のジュールエネルギー密度 Q_R 、アークエネルギー密度 Q_{arc} についてもすり板への熱分配率をそれぞれ α_R ($0 < \alpha_R < 1$)、 α_{arc} ($0 < \alpha_{arc} < 1$) とすると、単位時間あたりのすり板への入熱量 Q は次式となる。

$$Q = \alpha_{fr} Q_{fr} + \alpha_R Q_R + \alpha_{arc} Q_{arc} \quad (4)$$

α_R 、 α_{arc} の値は、摩擦面から 5mm 深さ位置における解析温度を実測温度に合わせこむことにより後述のとおり決定した。

モデルに付与する熱流束 q は、式(4)の Q をトロリ線とすり板 4 列分の接触面積 $4S = 4lw$ で除して次式で与えられる。ここで、 l はすり板のレール方向幅、 w はすり板とトロリ線の接触幅である。

$$q = Q/4S \quad (5)$$

式(3)~式(5)より熱流束 q を算出するにあたり、 η 、 P 、 V 、 Q_R 、 Q_{arc} には実験値を用いた。その他に必要なパラメータ値を前出の熱分配率と併せて表 4 に示す。このうち摩擦係数 μ は本実験では測定しなかったため、他の試験機による結果を参考に 0.2 とした。

(2) 熱伝達 モデルの 1/2 対称面以外の面に、空気への熱伝達条件を付与した。ただし、熱流束負荷領域については、熱流束負荷中の熱伝達条件は除いた。熱伝達係数 h は、後述の解析結果で示すとおり送風速度 100km/h の場合は 80W/m²K、送風無しの場合は 40W/m²K とした。

表 4 解析で用いたパラメータ

摩擦仕事のすり板熱分配率	α_{fr}	0.45
接触抵抗によるジュールエネルギーのすり板熱分配率	α_R	0.3
アークエネルギーのすり板熱分配率	α_{arc}	0.3
摩擦係数	μ	0.2
トロリ線接触幅 (m)	w	4.0E-03
すり板幅 (m)	l	3.3E-02
接触面積 (m ²)	$S=lw$	1.3E-04

(3) 熱輻射 熱伝達を与えた面と同じ面に、熱輻射率 $\varepsilon=0.2$ の熱輻射条件を与えた。

(4) 電流密度と電位 通電により舟体内部で発生するジュール熱を考慮するため、電流密度および電位の境界条件を与えた。電流密度 i は、実験中の平均電流を接触面積 4S で除して求めた。また、電位の境界条件として、2 箇所のシャント取付位置の銅板の要素表面に 0V を与えた。

〈3・3〉 解析結果と考察

(1) 熱伝達係数の決定 試番 14 では左右移動周期が 1000 秒と長いので、温度測定点においてその直上をトロリ線が通過した後は熱流束の影響は受けず、ほぼ熱伝達により温度変化すると考えられる。そこで、試番 14 におけるトロリ線通過後の温度低下曲線を模擬するよう解析値を合わせこむことにより、送風速度 100km/h の場合の熱伝達係数 h を 80W/m²K と決定した (図 3 参照)。送風無しの場合の熱伝達係数 h は、次項で定めた熱分配率を用いて熱流束を決定後、試番 10 の実測値平均 (摩擦面から 5mm 下の 8 測定点の平均値) を模擬するよう 40W/m²K と決定した。

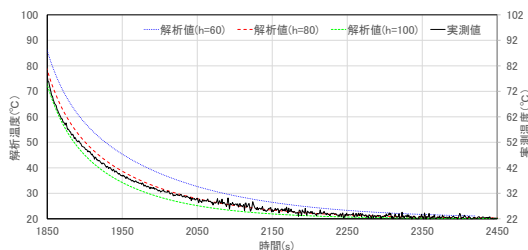


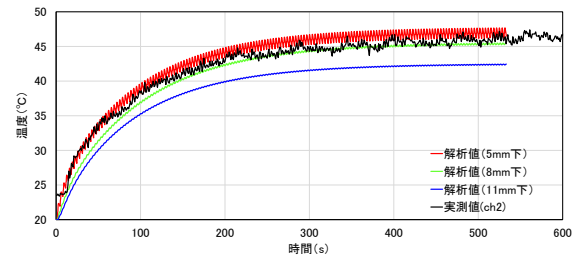
図 3 解析と実測の比較による熱伝達係数の決定 (試番 14)

等温加熱平板に対する層流の式⁽²⁾を用いて、実測した風速をもとに熱伝達係数を見積ると、送風速度 100km/h の場合は 67 W/m²K~103 W/m²K であり、上記の合わせこみによる

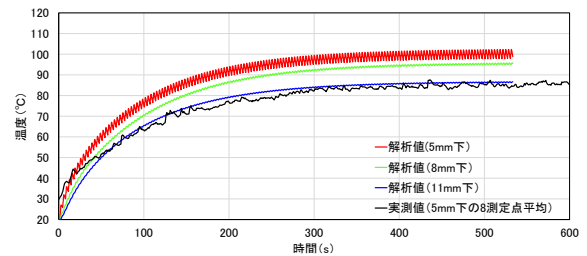
値はこの範囲であった。同様に送風無しの場合は 16 W/m²K~26W/m²K と見積られるが、合わせこみによる値はこれより高かった。この理由として、送風無しの場合にも環境温度制御用の空調による空気の流れがあることや円盤の左右移動によってすり板近傍の空気流は複雑となり、上述の式で前提としている層流とはみなせない可能性が考えられる。

(2) 熱分配率の決定 摩擦仕事のすり板への熱分配率は、通電無しの試番 1 における 8 測定点の実測値平均との合わせこみにより $\alpha_{fr}=0.45$ とした。

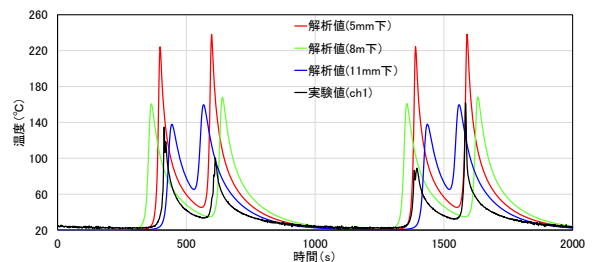
定めた α_{fr} の値を用いて、通電電流 1000A で離線率の低い試番 3 と離線率の高い試番 4 について同様に合わせこみを行い、 α_R および α_{arc} の値をいずれも 0.3 と定めた。試番 3 の解析と実測の比較を図 4(a) に示す。図には、摩擦面から 8mm 下および 11mm 下の解析値も示した。



(a) 試番 3



(b) 試番 9



(c) 試番 14

図 4 摩擦面から 5mm 下における温度の解析と実測の比較

(3) 解析と実測の比較と摩擦面温度の推定 上記で定めたパラメータを用いて全試番について熱伝導解析を行い、摩擦面温度を推定した。解析結果の例として、試番 14 の温度分布を図 5 に示す。各試番のすり板内部温度の実験値と解析値、解析による摩擦面温度を、モデルに与えた熱流束と電流密度と併せて表 5 に示す。

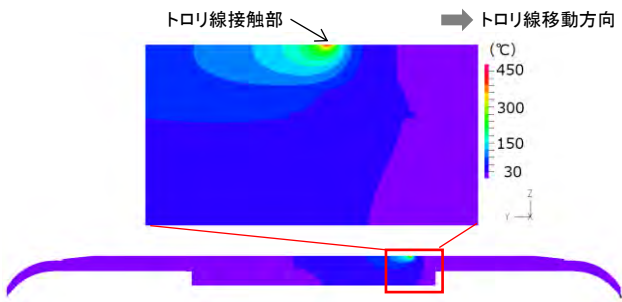


図 5 温度分布の解析例(試番 14)

表 5 解析による摩擦面温度の推定結果

試番	押上力 (N)	電流 (A)	上下加振	左右移動速度 (m/s)	体積摩耗率 (cm ³ /10 ³ km)	アーク離線率 (%)	解析用熱流束 q(W/m ²)	電流密度 i(A/m ²)	5mm下実測温度 (°C)		解析温度(°C)		(解析値-実測値)/実測値	
									最高	平均	5mm下	摩擦面		
1	60	0	無	0.0	0.0	278139	0	30	30	26	25.6	28.8	0.003	
2	60	500	無	27.1	0.4	690565	868708	41	34	34.1	42.0	0.002		
3	60	500	無	34.8	0.5	1345823	1716670	64	46	47.7	63.1	0.037		
4	60	500	あり	642.4	7.7	1906974	1696536	71	56	59.4	81.5	0.060		
5	60	500	あり	33.2	0.3	1365376	1705955	56	47	48.1	63.7	0.023		
6	90	1000	無	0.0	0.1	1528463	1755170	60	48	51.4	68.9	0.070		
7	90	1000	あり	101.7	1.0	1545251	1755250	79	48	51.8	69.6	0.079		
8	30	500	無	645.1	8.9	2136398	1739203	104	71	63.9	88.5	-0.101		
9	30	500	あり	1965.1	36.1	4013156	1703888	200	90	102.3	148.9	0.137		
10	60	0	無	134.6	0.2	1499275	1711411	34	28	28.7	32.0	0.011		
11	60	500	無	7.1	0.0	281139	0	51	43	42.0	50.9	-0.033		
12	60	500	あり	19.3	1.0	698859	871290	80	68	63.9	80.1	-0.060		
13	60	1000	無	0.01	75.3	0.6	1389795	1707036	54	43	49.7	71.5	0.155	
14	60	1000	あり	0.001	12.2	0.1	1342672	1710078	162	(56~162)	238.2	463.3	0.472	

摩擦面から 5mm 下の解析温度と実測値平均の差は、14 試番中 10 試番で 10%未満であった。解析と実験の差が大きい試番(図 4(b)(c))では、離線率が高い、あるいは前後の測定点間のばらつきが大きい傾向にあった。解析モデルでは接触領域に様に、時間平均した一定の熱流束を入熱しているため、離線アークのように大きく時間変化する入熱や片当たりによる一部の箇所への集中的な摩擦状態などを模擬しておらず、このことが解析と実験で差がある理由として考えられる。

試験後のすり板断面組織観察では摩擦面から約 1mm 下の範囲にわたって銅の溶出がみられたことから、試番によっては摩擦面温度が銅の熔融温度(1085°C)に達していたと推測される。解析による摩擦面の推定温度はいずれの試番でもこれより低く、上述のように実際にはアーク放電や片当たりにより集中的な入熱が生じているが、解析では一様の摩擦を前提としていることがこの原因として考えられる。

4. 微視的構造モデルによる熱伝導解析

前章まではすり板は一様な物性を持つ均質材料であるとして扱ったが、実際の材料は多孔質のカーボン材に銅が含浸された微視的には非均質な構造を持つ。摩擦現象は微小領域での接触現象であるため、微視的スケールでの材料構造を考慮することにより、現象により近い温度分布を推定できる可能性があると考えられる。そこで、銅含浸型カーボン材料の微視的構造モデルを、試験片サイズの FEM モデルに埋め込み、熱伝導解析を試みた。

〈4・1〉 解析モデルと境界条件 図 6(a)に示す銅含浸型カーボン材料の微視的構造モデルは、実物の X 線 CT 画像を用いて作成した⁽³⁾もので、1 辺 300 μ m である。微視的構造モデルを、84 \times 25 \times 10mm の直方体の中央に埋め込んだモデルを作成した。微視的構造モデルと直方体モデルの境界面は FEM ソフト Nastran の固着接触モデルを用いて結合した。モデル中央の帯に、試番 3 に相当する熱流束を与えた。ジュール熱によるすり板内部の発熱は考慮しなかった。

〈4・2〉 解析結果 図 6(b)に温度分布を示す。摩擦面では、熱伝導率が高い銅部分に比べてカーボン部分が高温となった。また、周囲に空隙が多い部分は特に高温となった。微視的構造モデルにより、材料の構造を反映した摩擦面近傍の温度分布をより詳細に把握できる可能性があると考えられる。

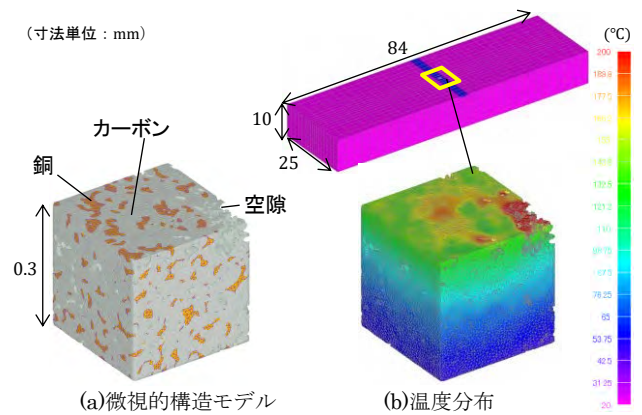


図 6 微視的構造モデルと温度分布

5. まとめ

銅含浸型カーボンすり板の通電摩擦実験を模擬した熱伝導解析により摩擦面付近の温度を推定し、摩擦との関係を考察した。結果は以下のとおりである。

- (1) 離線率が 8%未満で左右移動速度が 0.3m/s または 0.1m/s の場合は、摩擦面から 5mm 下温度の熱伝導解析と実測平均値の差は 10%未満であった。離線率が高い場合やすり板とトロリ線が不均一に接触する場合はこの差が大きかった。
- (2) 微視的構造を考慮した FEM モデルを用いた解析により、摩擦面近傍のより詳細な温度分布が把握できる可能性があると考えられる。

文 献

- (1) 久保田喜雄, 森本文子:「通電しゅう動時のパンタグラフすり板内部温度測定および解析結果」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019)予稿集 (2019)
- (2) 伝熱工学資料, 日本機械学会, p.28 (2009)
- (3) 森本文子, 久保田喜雄:「微視的構造を考慮したシミュレーション手法のパンタグラフすり板材への適用検討」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019)予稿集 (2019)