

○森本 文子 [機] [電] 久保田 喜雄 (鉄道総研)

Simulation of pantograph strip material considering mesoscopic heterogenic structure

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

In order to increase the functionality and the life of sliding material, it is necessary to improve material properties and clarify the behavior of the material under the service conditions. Most types of sliding material are composite material, and its material properties are largely affected by the mesoscopic structure. In this study, the authors made an image-based mesoscopic model by X-ray computed tomography for one of pantograph strip material and evaluated the equivalent thermal and electrical conductivity by the homogenization method. The calculated conductivities are more consistent with the experimentally measured values than the estimation by the rule of mixture based on the Voight model. The stress, temperature and current density distribution in the mesoscopic model are also calculated.

キーワード：パンタグラフすり板，均質化法，X線CT，FEM

Key Words：pantograph strip, homogenization method, X-ray computed tomography, Finite Element Method

1. はじめに

鉄道用摩擦材料の特性向上および長寿命化のためには、材料の改良や摩擦現象における材料挙動の解明が必要である。摩擦材料の多くは複数の材料で構成された複合材料であり、構成材料の割合のほか、形状や大きさ、空間的な分布等を含む微視的構造が複合材料全体の特性や挙動に影響すると考えられる。微視的構造と物性の関係が評価できれば、特性向上のための材料設計において多大なコストと時間を要する実材料の試作を行わずに、材料の割合や配置等の提案につなげることができる。そこで、材料の微視的構造を反映した物性を評価できるシミュレーション手法の一つである均質化法¹⁾²⁾に着目し、鉄道用材料の物性評価や現象解明への活用可能性を検討することとした。均質化法は、実スケールにおける材料特性とそれより十分小さいスケールにおける微視的構造をつなぐ計算手法の一つで、周期的な微視的構造を持つ非均質体を等価な材料挙動を示す均質体に置き換えた場合の等価物性を評価することができる。そのため、この手法は小さな非均質構造が周期的に積み重なったマクロ構造を持つとみなせる複合材料や多孔質材料に有効である。解析に必要となる微視的構造モデルは、計

算機上で模擬的に作成するほか、X線CTやFIB-SEMによる測定画像から実材料の構造を反映して作成することもできる³⁾。前報⁴⁾では、パンタグラフすり板材を対象に、X線CTによる画像をベースに作成した材料の微視的構造を模擬したFEMモデル（以下、微視的構造モデル）を用いて、均質化法により弾性定数を再現できることを確認した。本報では、同様の手法により、すり板材として重要な物性である熱伝導率、電気伝導率を算出し実測値と比較した結果を示す。また、劣化現象の解明に向けた一検討として、微視的構造モデル内部の応力、温度、電流密度分布の算出事例を示す。

2. 解析対象

解析対象とした材料は、パンタグラフすり板材の一つである銅含浸カーボン系すり板材（東洋炭素（株）製、PC78A）である。本材料は多孔質炭素に銅を含浸した材料で、ほぼ等方性とみなせる。表1に弾性定数および今回の解析で想定した各構成要素の体積分率の目安値を示す。

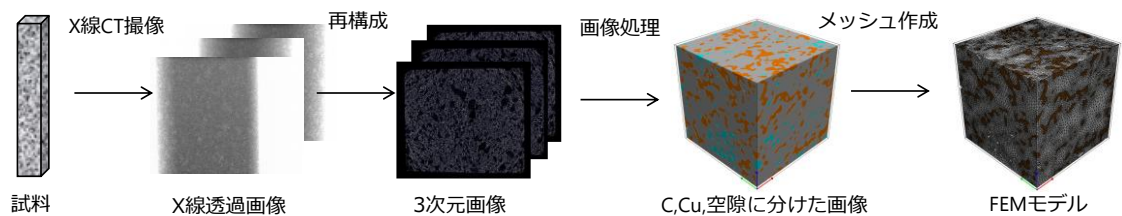


図 1 X 線 CT を用いたモデル化の手順

表 1 銅含浸カーボン系すり板材の物性値と
構成要素の体積分率の目安値

ヤング率 E(GPa)	ポアソン比 ν	熱伝導率 λ (W/mK)	電気伝導率 σ (/Ωmm)	体積分率 (%)		
				炭素	銅	空隙
28.8	0.23	11.3	794	78-85	15-20	1-4

3. イメージベースモデルを用いた均質化法による熱伝導率・電気伝導率の算出

3.1 解析手法

(1) X 線 CT 画像を用いたモデル化

図 1 に X 線 CT 画像を用いた微視的構造モデルの作成手順を示す⁴⁾。はじめに材料の X 線 CT 撮像を行い、透過画像を 3 次元画像として再構成し、得られた画像の一部から一辺 600μm の立方体領域を抽出した。次に、空隙、炭素、銅の順で X 線透過率が低い、すなわち画像輝度が低いことを利用して、表 1 の体積分率になるように輝度の閾値を定め、空隙、炭素、銅の領域に分割した。分割後の画像に対し、空隙を除いた炭素と銅の領域に対してメッシュを切り、FEM モデルを作成した。さらに、位置による体積分率のばらつきおよび等価物性の違いを評価するため、図 2 のとおり 1 辺 600μm の立方体領域を 8 分割した 1 辺 300μm の 8 つの立方体領域①～⑧に対して同じ閾値を用いて同様に各構成要素の分離とモデル化を行った。モデル化および次節の均質化解析には 3 次元画像データ変換ソフト simpleware⁵⁾を用いた。

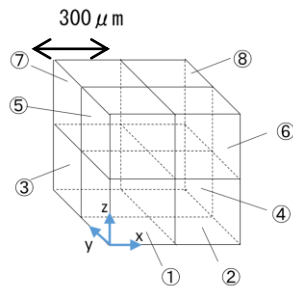


図 2 1 辺 600 μm のモデルと 300 μm のモデルの位置関係

(2) 熱伝導率と電気伝導率の算出

均質化法では、非均質な微視的構造モデル（領域 γ 内のある点での位置座標を y 、座標 y における熱伝導率を $k(y)$ ）とすると、モデルを均質化材料で置き換えた場合の等価熱伝導率 k^H は次式で表される。

$$k^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y (k - k \cdot \nabla_y \chi) dy \quad (1)$$

式(1)中の特性関数 χ は、モデルに単位温度勾配を与えたときの応答関数で、次式を解いて得られる。

$$\begin{aligned} \int_Y \nabla_y \bar{T}^1 \cdot k(y) \chi^j dy \\ = \int_Y \nabla_y \bar{T}^1 \cdot k I(y) dy \quad \forall \bar{T}^1 \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式は実際には FEM により離散化して数値的に解く。

電気伝導率の場合は、上式で k を電気伝導率 σ 、温度 T を静電ポテンシャル ϕ で置き換えて得られる。

前項で作成したすり板材モデルを均質化解析して熱・電気伝導率を算出するには、モデル内の各位置での熱・電気伝導率、すなわち銅と炭素の熱・電気伝導率が必要となる。しかし、モデルの炭素部分は CT 測定の分解能未達の微小な空隙を含む多結晶炭素で、空隙を取り除いた炭素部分のみの物性値は実測できないこと、また一般に多結晶炭素の物性は結晶配向や空隙率によって大きく異なるため、モデルの炭素部分に与えるべき物性値は不明である。そこで、炭素部分のみで微視的構造モデルを作成してその熱・電気伝導率を算出し、その値が銅含浸前の多孔質炭素材料の熱・電気伝導率の実測値を再現するように炭素の熱・電気伝導率を推定した。推定値を用いて、すり板材の熱・電気伝導率を算出した。

3.2 解析結果と考察

銅含浸前の多孔質炭素を模擬した 1 辺 600μm のモデルにより、均質化による物性値が実測値を再現するように決めた炭素の熱・電気伝導率の推定値を、銅の熱・電気伝導率と合わせて表 2 に示す。表 3 に、すり板材モデルの体積分率と表 2 の値を用いて均質化法により算出した熱伝導率、電気伝導率を示す。モデル 300①～⑧による結果について、体積分率による単純な複合則⁶⁾を用いた推定値および実測値との比較を図 3 に、銅の体積分率と熱伝導率および電気伝導率の関係を図 4 および図 5 に示す。

表 2 解析で用いた炭素と銅の物性値

	熱伝導率 λ (W/mK)	電気伝導率 σ (/μΩm)
炭素	3.6	0.026
銅	391	58.48

表 3 モデルの構成要素の体積分率と熱・電気伝導率

モデル	体積分率 (%)			熱伝導率 λ (W/mK)	電気伝導率 σ ($\mu\Omega\text{m}$)
	C	Cu	空隙		
600	79.83	15.70	4.47	18.5	1.27
300①	79.47	14.83	5.70	14.2	1.03
300②	75.25	19.89	4.86	24.5	2.65
300③	79.37	16.46	4.17	17.7	1.53
300④	80.16	14.75	5.09	14.1	1.10
300⑤	81.69	14.48	3.82	13.1	0.84
300⑥	82.01	14.97	3.02	13.5	0.85
300⑦	84.04	12.58	3.38	12.1	0.77
300⑧	82.87	12.19	4.94	11.1	0.70
300①~⑧avg.	80.61	15.02	4.37	15.0	1.18

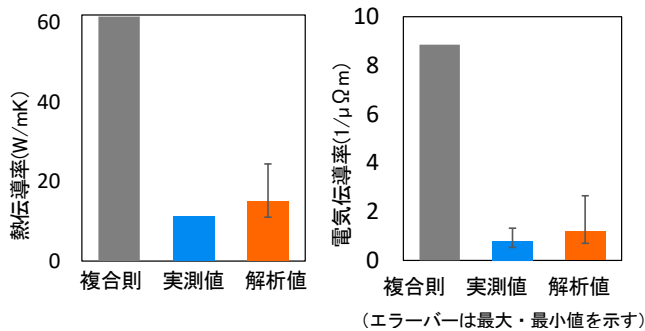


図 3 実測値と解析値の比較

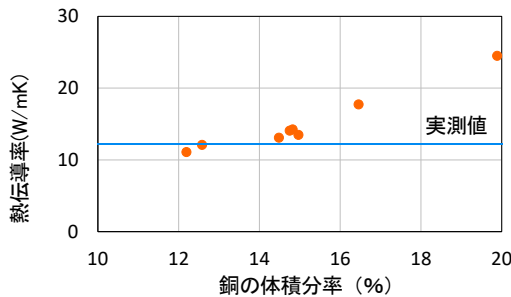


図 4 銅の体積分率と熱伝導率の関係

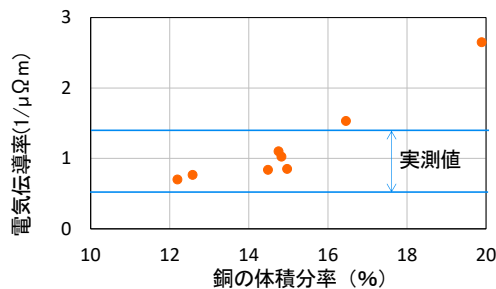


図 5 銅の体積分率と電気伝導率の関係

図 3 のとおり、熱伝導率、電気伝導率とも解析値は体積分率による複合則に比べて実測値に近い値となった。これは非均質な微視的構造を反映できたためと考えられる。また図 4 および図 5 のとおり、銅が多いほど伝導率が高いという定性的に妥当な結果が得られ、銅の体積分率が 12%~15% の範囲では実測値を再現した。

前報で同様に解析したヤング率の結果と比べると、熱伝導率、電気伝導率の方が銅の体積分率に強く依存すること

がわかった。炭素の物性値に対する銅の物性値は、ヤング率は 5 倍であるのに対し、熱伝導率は 110 倍、電気伝導率は 2200 倍であることから銅が PC78A の物性に及ぼす影響度が大きいと考えられる。

4. モデル内部の応力、温度、電流密度の算出

4.1 目的

パンタグラフすり板は、トロリ線との接触に伴う力学的負荷に加え、摩擦熱や、通電に伴うジュール熱、離線時のアーク放電による熱的負荷を受ける。すり板内部の応力や温度等の物理量分布は、通常、均質物性としたすり板全体のモデルによる FEM 解析で評価するが、今回作成した微視的なスケールのモデルを用いることにより、劣化現象の解明に必要な物理量分布が把握できる。微視的スケールの物理量分布を求めるにあたり、すり板全体を今回のような数 μm のスケールの構造で模擬することは現実的ではなく、別途マクロモデルを作成した上でのズーム解析や均質化法による局所化、必要箇所のみ微視的構造を考慮したモデル化等が考えられる。しかしいずれの方法もモデル化には時間を要するため、今回は定性的評価を目標に、最も簡便な方法として実条件を反映した境界条件を微視的構造モデルに直接課することで試行的に内部の応力分布等を算出した。

4.2 解析条件

FEM モデルには前章で用いた 1 辺 300 μm 立方体のうちの一つを用いた。構造解析により応力分布を、電流-熱伝導解析により温度と電流密度の分布を算出した。

(1) 構造解析

境界条件を図 6(a)に示す。底部は完全拘束で、上部には通常の静押付力の 10 倍に相当する荷重を負荷し、定常静解析を行った。想定した実条件を表 4 に、材料定数⁴⁾を表 5 に示す。

表 4 想定した実条件 (構造解析)

すり板幅(mm)	33
トロリ線との接触幅(mm)	1
押付力(N)	64×10
押付圧力(MPa)	19.4

表 5 構造解析で用いた材料定数

	ヤング率(GPa)	ポアソン比
炭素	24	0.22
銅	118	0.33

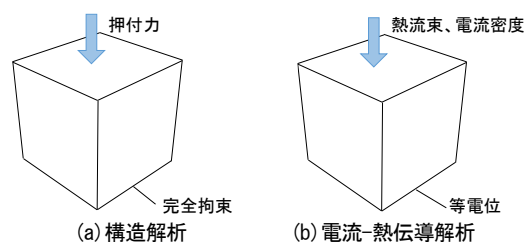


図 6 境界条件

(2) 電流-熱伝導解析

境界条件を図 6(b)に示す。モデルの上面に、想定した表 6 の実条件に対応する熱流束、電流密度を課した。トロリ線のジグザク偏位を考慮するとすり板上の接触幅への入熱時間は約 4.5ms となるため、図 7 に示す時間依存の熱流束と電流密度を課した過渡解析を行った。初期温度は 20℃、底面の電位は 0V とした。材料定数には表 2 の値を用いた。

表 6 想定した実条件(電流-熱伝導解析)

すり板幅(mm)	33
トロリ線との接触幅(mm)	1
走行速度(km/h)	100
押付力(N)	64
通電電流(A)	200
摩擦係数	0.2
接触抵抗(mΩ)	20
摩擦熱(W)	356
接触抵抗ジュール熱(W)	800
摩擦熱分配率	0.2
接触抵抗ジュール熱分配率	0.8
すり板側への熱量(W)	711
トロリ線偏位による接触位置の左右移動速度 (m/s)	0.22

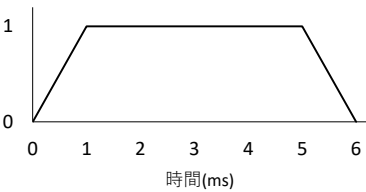


図 7 熱流束と電流密度の時間関数

4.2 解析結果と考察

(1) 構造解析

銅と炭素の領域を色分けしたモデルを図 8(a)に、相当応力分布を同図 (b)に示す。ヤング率の高い銅の部分が主に応力を負担していることがわかる。

(2) 電流-熱伝導解析

5ms 後の温度分布と電流密度分布を図 9(a)(b)に示す。温度分布については、銅の領域と炭素の領域で分けた図も合わせて同図(c)(d)に示す。熱伝導率の高い銅の領域に比べ、炭素領域の温度が高温となり、銅が熱伝達に大きく寄与することがわかる。また、電流に関しても、炭素に比べ電気伝導率の高い銅の領域が主な電流経路となることがわかった。

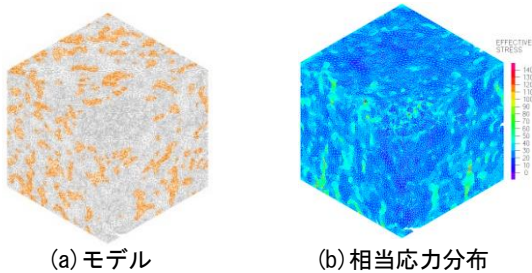


図 8 モデルと相当応力分布

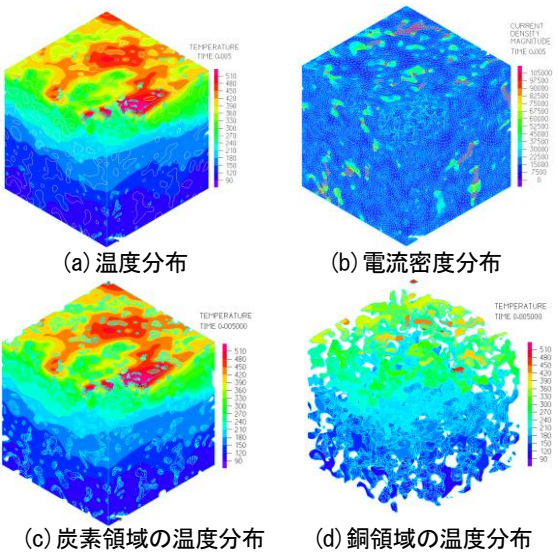


図 9 温度分布と電流密度分布

5. まとめ

微視的構造を考慮した解析手法の鉄道用材料への適用検討として、カーボン系すり板材を対象として X 線 CT 画像から作成した微視的構造モデルを用いて、均質化法による熱伝導率、電気抵抗率の算出を行った。その結果、解析値は体積分率のみによる複合則に比べて実測値に近い値となった。また、同じモデルを用いた FEM 解析により、応力、温度、電流密度の分布を算出し、主として銅の部分が荷重、熱、電流のいずれの伝達も担っていることがわかった。今後、物性評価および使用中の微視的スケールにおける内部の状態を推定することにより、熱特性および導電性に優れたすり板材の微視的構造の提案や、劣化現象解明への知見につなげたい。

参 考 文 献

- 1) J.M.Gudes and Kukuchi : Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.83, No.2 pp.143-198 ,1990.
- 2) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門, 日本計算工学会編, 2013.
- 3) N.Takano,K.Fukasawa,K.Nishiyabu : Structural strength prediction for porous titanium based on micro-stress concentration by micro-CT image-based multiscale simulation”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.52,pp.229-235,2010.
- 4) 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講演論文集,2019.12.
- 5)https://www.synopsys.com/simpleware/software/scani_p.html
- 6) 福田博: 複合材料力学入門, 日本複合材料学会誌, 22,1,1996.