

微視的構造モデルによるパンタグラフすり板材の物性評価

森本 文子* 久保田 喜雄*

Evaluation of Material Properties of Pantograph Strip by Microscopic Structure Model

Fumiko MORIMOTO Yoshitaka KUBOTA

Most types of sliding material in railway usage are composite material, and its material properties are largely affected by mesoscopic structure. To clarify the relationship between mesoscopic structure and material properties by simulation is useful for effective improvement of material properties. In this study, we make an image-based mesoscopic model by X-ray computed tomography for one of pantograph contact strip material and evaluate equivalent elastic modulus, thermal conductivity and electrical resistivity by homogenization method. The calculated material properties are more consistent with the experimentally measured values than the estimation by the rule of mixture based on the Voigt 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，複合材料，微視的構造，FEM

1. はじめに

パンタグラフすり板や制輪子に使用される鉄道用摩擦材料の多くは複数の材料から構成された複合材料であり，含まれる材料の組合せや割合，形状，大きさ，配置などの微視的なスケールでの構造が複合材料全体の物性や挙動に影響すると考えられる。鉄道用摩擦材料の開発は最終的には材料の試作とその性能評価を行う実験的手法により進めることとなるが，解析により物性が把握できれば，より好ましい物性を持つ構造の提案や，試作の省略による材料開発の効率化が期待できる。そこで，鉄道用摩擦材料の物性向上および材料開発の効率化への適用を目的として，材料のモデル化と物性算出手法を構築することとした。

材料の特性や挙動を推定する解析手法には，材料を原子・分子の集合体として扱う手法から，材料を均質な連続体として扱う手法まで，対象とするスケールに応じて様々な手法がある。たとえば鉄道総研では原子スケール

の解析手法の活用に関する検討例¹⁾があるが，実スケールとの間に乖離があり材料評価や現象解明への活用には至らなかった。実スケールを扱う実用的な手法として有限要素法（FEM）があるが，通常は複合材料の微細な構造を考慮せずに均質な材料としてモデル化する。そこで，複合材料の材料組織が反映でき，実スケールと大きく乖離しない μm スケールの構造をモデル化し，実測値と比較可能な物性値を算出する手法を構築した。手法の手順を図1に示す。

本手法では，まず試料を μm スケールの分解能のX線コンピュータ断層撮影法（X-ray Computed Tomography：X線CT）によって撮像し，内部の三次元画像を取得する。次に，得られた画像からその材料の持つ微視的構造の特徴を表すのに十分な大きさの領域をモデル化対象として抽出し，構成材料別に領域を分離したのち，メッシュを切ってFEMモデル（以下，微視的構造モデル）を作成する。最終的に，作成したモデルを用いて，均質化法²⁾³⁾によって物性を算出する。

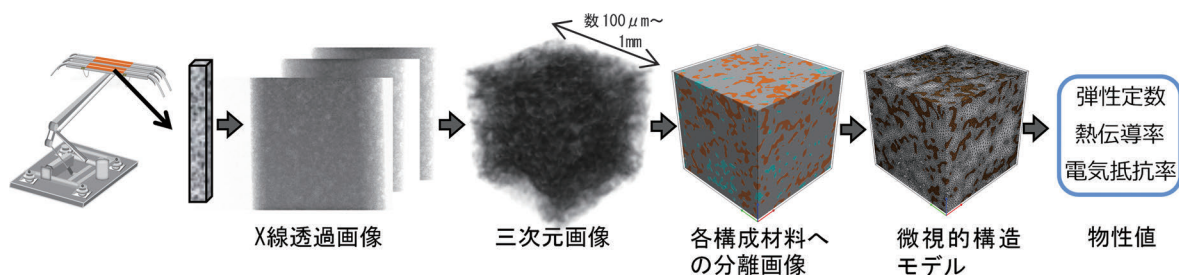


図1 X線CTを用いたモデル化および物性算出手順

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

本論文では、パンタグラフすり板材料の一つである銅含浸カーボン材料（2章）に本手法を適用した結果を述べる（3～5章）。最後に、モデルの活用例として内部の応力や温度の分布を算出した結果を紹介する（6章）。

2. 対象材料

対象とした材料は、パンタグラフすり板材料の一つである銅含浸カーボン材料（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。光学顕微鏡によるPC78Aの材料組織写真を図2に示す。黄色い部分が銅、黒い部分が空隙、その他のグレーの部分が炭素である。

PC78Aの物性値およびかさ密度から推定した各構成要素の体積分率を表1に示す。

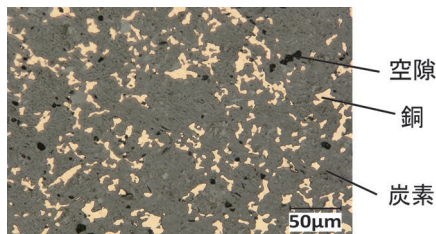


図2 PC78Aの材料組織

表1 PC78Aの物性値と構成要素の体積分率推定値

ヤング率 (GPa)	ポアソン比	熱伝導率 (W/mK)	電気伝導率 (/Ωmm)	体積分率(%)		
				炭素	銅	空隙
28.8	0.23	13.9	796	78~85	15~20	1~4

3. X線CTによる内部構造の観察

3.1 撮像方法

図3にX線CTの模式図を示す。X線CTはX線を対象物に照射し、透過したX線を検出することで内部構造を知ることができる。試料の密度や原子番号によってX線透過率が異なるため、検出器にて可視化される二次元透過像には試料の内部構造が反映される。試料を回転させ、多方向からの透過像を集めてコンピュータ処理することにより試料内部の三次元画像が得られる。三次元画像では試料内の各位置のX線透過率をグレースケー

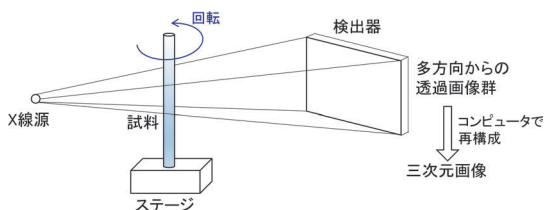


図3 X線CTの模式図

表2 X線CT撮像条件

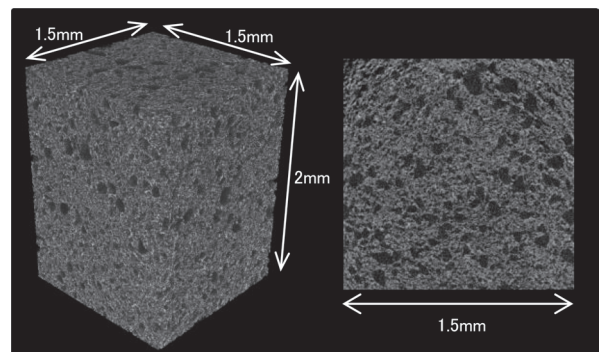
試験片サイズ [mm]	管電圧 [kV]	検出器	ボクセル分解能 [μm]
2×2×10	110	CCDカメラ	1

ルの画像輝度に対応付けており、透過率が高い部分ほど低輝度で黒く、低い部分ほど高輝度で白く表示される。

表2に、今回のX線CT測定条件を示す。測定装置としてBruker製Skyscan2211を用いた。

3.2 結果

PC78Aの三次元画像およびその断面画像の一部を図4に示す。白い部分が主に銅で、黒い部分が主に空隙、その間のグレー部分が主に炭素であると考えられるが、空隙と炭素の境界は不明瞭であった。また、後述するが黒色部分にも連続的な輝度の分布があるため、空隙と考えられる黒色部分であっても実際には空隙と密度の低い炭素が混在していると考えられる。



(a) 三次元画像

(b) 断面画像

図4 X線CT測定結果

4. 微視的構造モデルの作成

4.1 作成方法

X線CT画像からモデルを作成するにあたり、まず画像処理時間の短縮のため解像度を落として1辺3μmの立方体を1ボクセル（ボクセルは三次元画像の画素単位）としたのち、ノイズ除去を行った。その後、微視的構造を代表する領域として1辺600μmの立方体領域を抽出した。次に、空隙、炭素、銅の順でX線透過率が高い、すなわち画像輝度が低いことを利用して、表1の体積分率となるように輝度の閾値を定め、空隙、炭素、銅の領域を画像上で分離した。この際、空隙として分離された領域のうち10ボクセル未満でつながった部分と、銅として分離された領域のうち50ボクセル未満でつながった部分は、メッシュ後の要素数削減のため炭素として割り当て直した。分離後の画像に対し、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

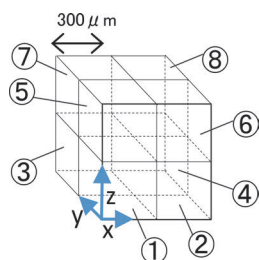


図5 1辺600 μm モデルと300 μm モデルの位置関係

デル（以下、モデル600）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それに伴う物性値の違いの確認に用いるため、上記1辺600 μm の立方体領域を図5に示すように8分割し、1辺300 μm の立方体モデル（以下、モデル300①～300⑧）を作成した。モデル作成には三次元画像変換ソフト simpleware を用いた。

4.2 結果と考察

図6に、モデル600の立方体領域の画像輝度の分布を空隙、炭素、銅に割り当てた輝度の範囲とともに示す。ここで、モデル300①について、空隙、炭素、銅の領域に分離した画像と微視的構造モデルを例として図7に示す。また、別試料ではあるが同じ材質の光学顕微鏡による材料組織写真と併せて、分離後の二次元断面画像を図8に示す。各モデルのメッシング後の各構成要素の体積分率は後述の表4に示す。

図6のように空隙、炭素、銅の輝度の違いは明確ではなく、実際には同じ輝度でも複数の構成要素を含んでいる可能性がある。しかし、輝度の閾値による単純な分離方法ではあるが図8および表4より、実材料に近い各構成要素の分布、体積分率を持つモデルが得られたと考える。また、表4よりモデル600とモデル300①～⑧で体積分率を比べると、モデル300①～⑧の平均値はモデル600の値に近いが、たとえば銅の体積分率は12%～20%とばらつきが大きかった。これは実材料を撮像した画像を基にしているため、場所による構造の不均一性を反映したものと考える。このような不均一性はあるものの、今回は計算時間を考慮して、300 μm サイズのモデルを8個用いることにより平均的には実物の

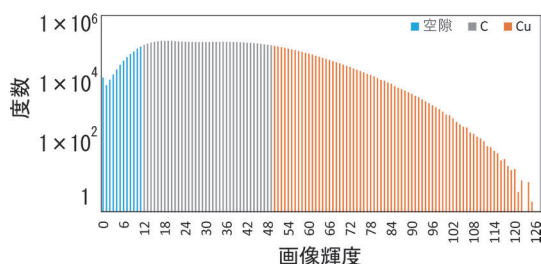


図6 X線CT画像の輝度分布と輝度による空隙、炭素、銅への割り当て

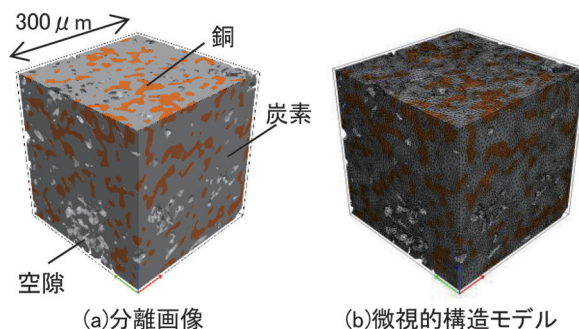


図7 構成要素への分離画像とモデル化の例

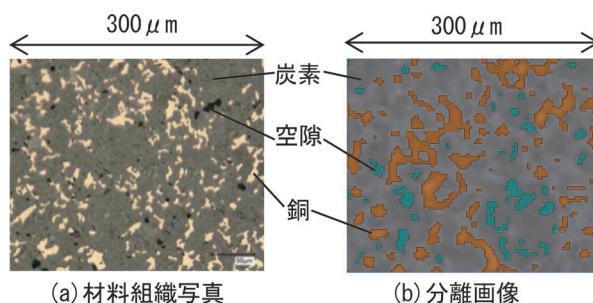


図8 材料組織写真と断面の分離画像の比較

構造を模擬でき、物性評価が可能と判断した。

今回のように実材料を基に計算モデルを作成する場合、モデル化領域のサイズが大きいかほど実材料の不均一性による影響が少ないが、画像処理や次節の物性算出の計算負荷が大きくなるため、対象とする材料の構造の特徴と目的に応じて適切なモデル化領域の大きさを決める必要がある。

5. 均質化法による物性値の算出

5.1 算出方法

均質化法のイメージ図を図9に示す。均質化法は、実スケールにおける材料物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で、周期的な微視的構造を持つ非均質体をそれと等価な材料挙動を示す均質体に置き換えた場合の物性を評価することができる。本研究では弾性定数、熱伝導率および電気抵抗率を算出したが、数学的取り扱いは共通しているため、ここでは弾性定数の算出式²⁾³⁾のみ示す。

非均質な微視的構造モデル（領域 Y ）内のある点での位置座標を y 、座標 y における弾性定数を $E_{ijkl}(y)$ とすると、モデルをそれと等価な均質材料で置き換えた場合の弾性定数 D_{ijkl} は式(1)で表される。

$$D_{ijkl} = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl}(y) - E_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \right) dy \quad (1)$$

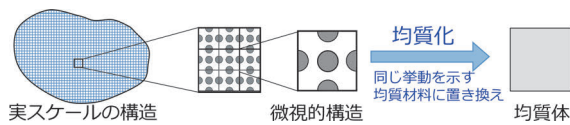


図9 均質化法のイメージ図

式(1)中の特性関数 χ_m^{kl} は式(2)を周期境界条件下で解いて得られる。

$$\int_{\gamma} E_{ijmn}(\mathbf{y}) \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \frac{\partial \delta u_i}{\partial y_j} d\mathbf{y} = - \int_{\gamma} E_{ijkl}(\mathbf{y}) \frac{\partial \delta u_i}{\partial y_j} d\mathbf{y} \quad (2)$$

ここで δu_i は仮想変位である。4章で作成した微視的構造モデルに対し、simplewareのモジュールを用いて式(1)(2)の均質化解析を行い、物性を算出した。

5.1.1 炭素の物性値

PC78Aの物性値を式(1)により算出するには、モデル内の各位置での物性値、ここでは炭素と銅の物性値が必要となる。銅は公称値⁴⁾を用いることとしたが、モデルの炭素部分はCT測定 of 分解能未達の微小な空隙を含む多結晶炭素で、その物性値は実測できない。一般に多結晶炭素の物性値は出発原料、製造プロセス、熱処理温度、密度、空隙率や結晶配向等により大きく異なり⁵⁾、文献等により値を定めることも難しい。そこで、4章の方法で銅含浸前のカーボン基材を模擬した1辺600 μ mの立方体モデルを画像の炭素部分のみを用いて作成し、均質化法により算出した物性値がカーボン基材の実測値を再現するように炭素の物性値を定めた。

5.1.2 PC78Aの物性値

PC78Aのモデルに対し、銅の物性値と、前節の方法で定めた炭素の物性値を与えて均質化解析し、PC78Aの物性値を算出した。

5.2 結果と考察

5.2.1 炭素の物性値

カーボン基材を模擬したモデルにより、均質化解析による物性値が実測値を再現するように決めた炭素の推定物性値を表3に示す。表3には次項で用いるため銅の物性値を併記した。

各種の文献による炭素物性の推定値や実験値としては、たとえばヤング率については、単結晶黒鉛の値から理論推定した等方性多結晶黒鉛の値として15~25GPa⁶⁾がある。同様に熱伝導率は無定形炭素で1.5W/mK⁷⁾、多結晶黒鉛の例として2~200W/mK⁵⁾等がある。電気抵抗率は、多結晶黒鉛の例として0.3~1 $\mu\Omega$ m⁵⁾のほか、人工黒鉛に対する経験則による熱伝導率と電気抵抗率の関係⁸⁾を用いると、例えば熱伝導率2~200W/mKの範囲に対応して6~670 $\mu\Omega$ mと算出される。今回用いた表3の炭素の物性値はこれらの文献値の範囲内にある

表3 解析で用いた炭素と銅の物性値

	ヤング率E (GPa)	ポアソン比 ν	熱伝導率 λ (W/mK)	電気抵抗率 ρ ($\mu\Omega$ m)
炭素	24	0.22	3.8	38.46
銅 [※]	118	0.33	391	0.0171

※無酸素銅 C1011 公称値⁴⁾

ことから、妥当と判断した。

5.2.2 PC78Aの物性値

表3の値を用いて、PC78Aの各モデルの物性値を均質化法により算出した結果を表4に示す。電気抵抗率は直接算出される電気伝導率の逆数として算出した。

図10に、モデル300①~⑧の均質化解析の結果を、銅の体積分率に対する物性値として表1の実測値と併せて示す。銅の割合が大きいくほどヤング率、熱伝導率が高く、電気抵抗率は低い傾向にあった。ヤング率に比べて、熱伝導率と電気抵抗率は銅の割合に大きく依存した。これは、炭素の物性値に対する銅の物性値の比率が、ヤング率は約5倍であるのに対し、熱伝導率は約110倍、電気伝導率は約2250倍と2桁から3桁大きいためだと考えられる。

均質化解析により算出された物性値と実測値を比較すると、銅の割合が12%~16%の範囲では3つの物性値はいずれも実測値に近い値が算出された。

図11にモデル300①~⑧の解析結果の平均値を、実測値および、構成材料の体積分率に比例して物性が決ま

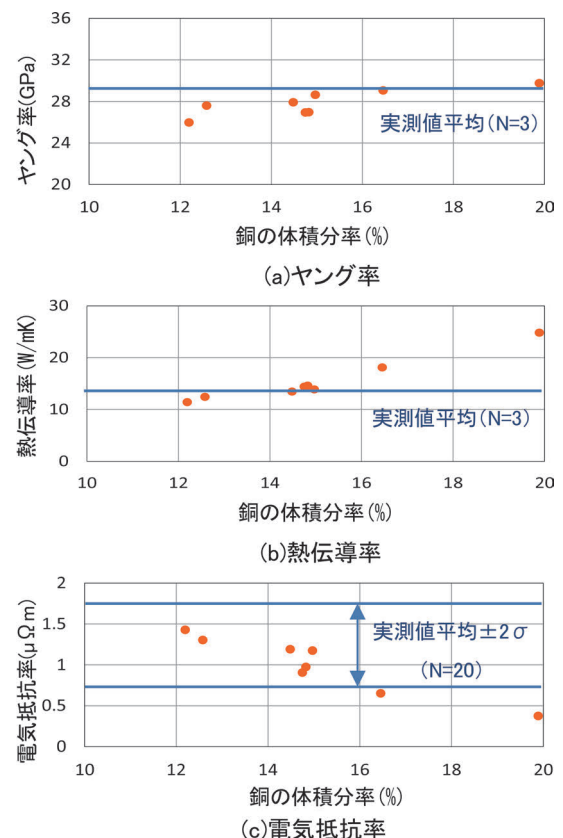


図10 銅の体積分率に対する解析による物性値

表4 各モデルの体積分率と物性値の算出結果

モデル	体積分率(%)			物性値			
	炭素	銅	空隙	ヤング率 E(GPa)	ポアソン比 ν	熱伝導率 λ (W/mK)	電気抵抗率 ρ ($\mu\Omega\text{m}$)
600	79.83	15.70	4.47	28.12	0.23	16.10	0.79
300①	79.47	14.83	5.70	26.97	0.23	14.58	0.98
300②	75.25	19.89	4.86	29.76	0.23	24.82	0.38
300③	79.37	16.46	4.17	29.07	0.23	18.10	0.65
300④	80.16	14.75	5.09	26.95	0.23	14.38	0.91
300⑤	81.69	14.48	3.82	27.93	0.23	13.44	1.19
300⑥	82.01	14.97	3.02	28.65	0.23	13.84	1.18
300⑦	84.04	12.58	3.38	27.61	0.23	12.41	1.30
300⑧	82.87	12.19	4.94	25.98	0.23	11.39	1.43
300①~⑧ 平均値	80.61	15.02	4.37	27.86	0.23	15.37	0.85

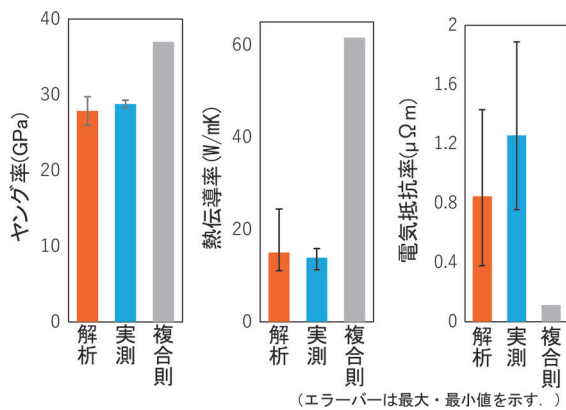


図11 解析と実測による物性値の比較

るとする複合則⁹⁾による結果と比較して示す。本手法では複合則よりも実測値により近い値が得られた。これは、複合則では構成要素の体積分率のみを用いるのに対し、本手法では割合以外に各構成要素の配置や形状等の微視的構造を反映したためと考えられる。

6. 微視的モデルのその他の活用例

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を、均質物性としたすり板全体のモデルによるFEM解析で算出した事例はある¹⁰⁾が、微小な表面凹凸同士が接触する摩擦現象の理解には材料の不均質性を考慮したより詳細な物理量分布の把握が重要と考える。

そこで、今回作成したモデルを用いて、 μm スケールの物理量分布を算出した。今回は最も簡便な方法として、実条件を反映した境界条件を直接微視的構造モデルに与えることで内部の物理量分布を算出する手法を試行した。

6.1 算出方法

FEMモデルには前章で用いた1辺 $300\mu\text{m}$ 立方体モデルのうちモデル300④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。材料定数には表3の値を用いた。

構造解析の境界条件を図12(a)に示す。底部は完全拘束とし、上部には通常のトロリ線の静押付力に相当する荷重を負荷し、定常静解析を行った。ここで想定した条件を併せて表5に示す。

電流-熱伝導解析の境界条件を図12(b)に、想定した条件を表6に示す。トロリ線はレール方向に対しジグザクに架設されているため、トロリ線とすり板の接触部はすり板上をまくらぎ方向に往復移動する。今回想定した条件では、すり板上のある位置でのトロリ線の接触時間は 4.5ms となる。この状況を模擬して、モデル上面に図13に示す時間依存性を持つ熱流束と電流密度を与

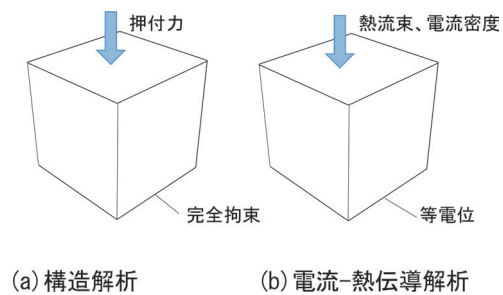


図12 境界条件

表5 構造解析で想定した条件

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

表6 電流-熱伝導解析で想定した条件

すり板幅(mm)	h	33
トロリ線との接触幅(mm)	w	1
走行速度(km/h)	v	100
押付力(N)	P	64
通電電流(A)	I	200
摩擦係数	μ	0.2
接触抵抗($\text{m}\Omega$)	R	20
摩擦熱(W)	$Q_f = \mu Pv$	356
接触抵抗ジュール熱(W)	$Q_R = RI^2$	800
摩擦熱分配率	α_f	0.2
接触抵抗ジュール熱分配率	α_R	0.8
すり板側への熱量(W)	$Q = \alpha_f Q_f + \alpha_R Q_R$	711
トロリ線偏位による接触位置の左右移動速度(m/s)	v_L	0.22
熱流束(W/m^2)	$q(t) = Q \cdot f(t) / (w \cdot h)$	$2.2 \times 10^7 \times f(t)$ [※]
電流密度(A/m^2)	$i(t) = I \cdot f(t) / (w \cdot h)$	$6.1 \times 10^6 \times f(t)$ [※]
すり板上のある位置でのトロリ線接触時間(ms)	$t_q = w / v_L$	4.5

※ $f(t)$ は図13に示す。

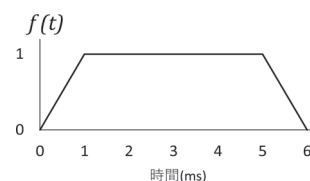


図13 熱流束と電流密度の時間関数

えて、解析対象時間 6ms の過渡解析を行った。初期温度は 20℃、底面の電位は 0V とした。

6.2 結果と考察

銅と炭素の領域を色分けしたモデルを図 14 (a) に、相当応力分布を同図 (b) に示す。銅の部分が主に荷重を負担する結果となった。これは、炭素に比べて銅のヤング率が高いためと考えられる。

5ms 後の温度分布と電流密度分布を図 15 (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併せて同図 (c) (d) に示す。銅領域に比べて炭素領域が高温という結果となった。これは、銅に比べて炭素の熱伝導率が低く、下面への熱移動が遅いためと考えられる。電流分布については、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という結果が得られた。

直接的な観察・測定が難しい摩擦面近傍の温度等の分布をこのように微視的なスケールで把握可能であることは、摩擦による摩耗や損傷・劣化等の現象の理解に役立つと期待される。なお、今回は試みに 1 辺 300 μm の立方体モデルを用いたが、実現象の把握にはより大きなスケールのモデルにおける微視的スケールの物理量分布を求める必要が生じると考えられる。その場合、すり板全体を数 μm のサイズのメッシュでモデル化することは

現実的ではなく、別途マクロモデルを作成した上でのブーミング解析や、必要箇所のみ微視的構造を考慮したモデル化等が必要と考えられる。

7. まとめ

鉄道用摩擦材料の物性向上および材料開発の効率化への適用を目標として、パンタグラフすり板材料の一つである銅含浸カーボン材料を対象に、材料の X 線 CT 画像を用いて微視的構造をモデル化し、物性を算出する手法を構築した。結果をまとめると以下のとおりである。

(1) X 線 CT 撮像を行い、 μm スケールの三次元内部構造を把握した。

(2) X 線 CT 画像を用いて実物の構造を反映した微視的構造モデルを作成した。

(3) 作成したモデルを用いて、不均質な構造を持つモデルの平均的な物性を算出する計算手法である均質化法により、弾性定数、熱伝導率、電気抵抗率を算出したところ、複合則を用いた推定手法に比べてより実測値に近い値が算出された。

(4) モデルを用いた有限要素解析により応力や温度の分布を算出し、通電摩擦時の微視的スケールでの内部状態を推定した。

本手法を用いることにより、開発プロセスにおける試作前の物性推定や、より望ましい物性を持つ材料の構造の提案が可能となる。

文 献

- 1) 岩淵研吾：材料設計・評価における数値シミュレーションの利用，鉄道総研報告，Vol. 8, No. 9, pp. 43-48, 1994
- 2) 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.
- 3) 寺田賢二郎，菊池昇：均質化法入門，日本計算工学会編，2013
- 4) 伸銅品データブック，社団法人日本銅センター，2012
- 5) 新・炭素材料入門，炭素材料学会編，リアライズ社，2000
- 6) 金順一：炭素の機械的性質，炭素，No. 66, p. 99, 1971
- 7) 理科年表，物 63 (429)，2021
- 8) 高橋洋一：炭素の熱的性質，炭素，No. 65, p. 53, 1971
- 9) 福田博：複合材料力学入門，日本複合材料学会誌，Vol. 22, No. 1, pp. 19-25, 1996
- 10) 森本文子，久保田喜雄：パンタグラフすり板の摩耗に及ぼすトロリ線左右移動速度の影響，第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018) 講演論文集，SS8-1312, 2018

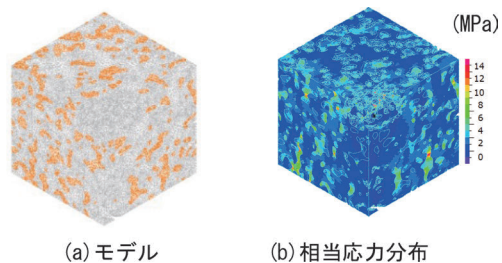


図 14 モデルと相当応力分布

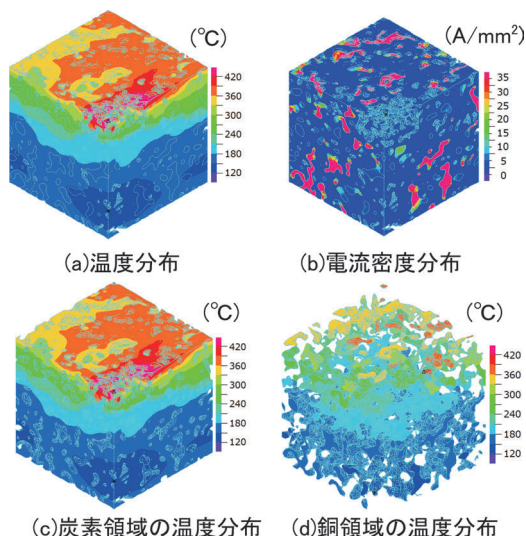


図 15 温度分布と電流密度分布