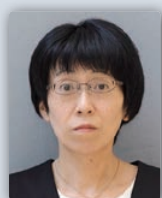


パンタグラフすり板の物性を再現する



森本 文子
Fumiko Morimoto
材料技術研究部
摩擦材料研究室
主任研究員



久保田 喜雄
Yoshitaka Kubota
材料技術研究部
摩擦材料研究室
主任研究員

はじめに

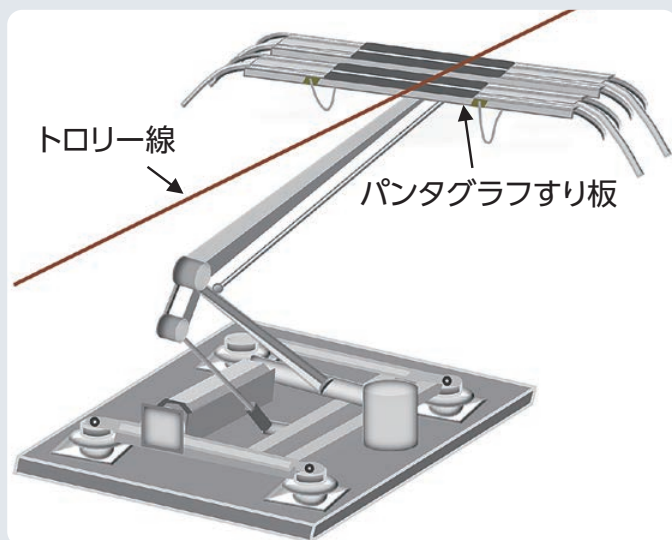
電車のパンタグラフの最上部には、パンタグラフすり板（以下、すり板）と呼ばれる摩擦部材が取り付けられています。すり板は、トロリー線と摩擦しながら電気を車両に送る役割を担っています（図1）。

すり板には電気を通しやすいこと（導電性）、自らが摩耗しにくいこと（耐摩耗性）、相手のトロリー線を摩耗させにくいこと（潤滑性）、および使用中に壊れにくいこと（機械的強度）といった、複数の性能が求められます。そのため、すり板には導電性の高い銅や鉄などの金属

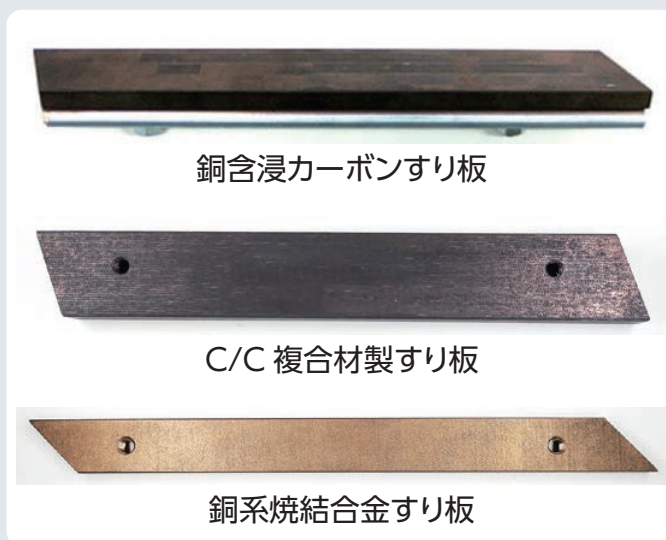
と二硫化モリブデンなどの潤滑材を混ぜた材料や、銅に潤滑性の高い炭素を組み合わせた材料などの複合材料が用いられています。新しい複合材料を開発する際には、耐摩耗性、潤滑性や機械的強度については材料を作製して測定する必要があります。また、導電性などの物性は、構成材料（すり板でいうと銅や炭素）の物性や割合だけでなく材料中での配置にも影響されるため、物性評価の目的でも材料を作製する必要があります。

一方、近年ではコンピューターシミュレーションにより、材料の構造を考慮した物性予測

図1 パンタグラフすり板



(a) パンタグラフ



(b) 各種のすり板

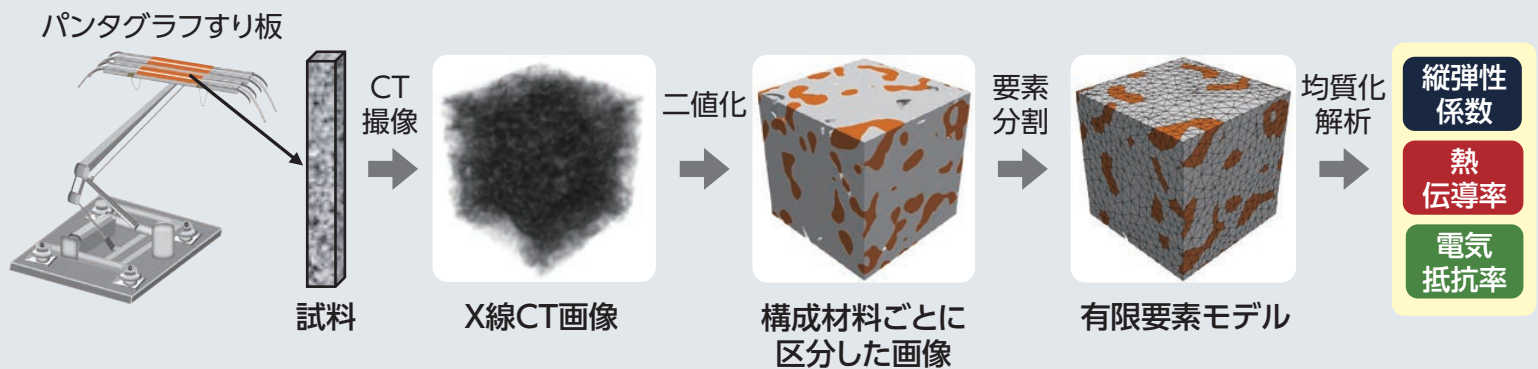


図2 X線CT画像を用いた材料のモデル化と物性算出の手順 文献1より引用

を行う手法が発展しており、物性評価のための材料作製の回数の低減による材料開発の迅速化や、設計指針の検討への活用が期待されています。そこで、すり板材の開発や、使用に伴う物性変化の把握に役立てることを目標に、コンピュータ上ですり板材の構造を再現したモデルを作成し、物性を算出する手法の構築に取り組みました。本稿では、その取組みについて紹介します。

すり板材のモデル化と物性算出の手順

すり板材のモデル化と物性算出の手順を図2に示します。

■ (1) X線CTによる内部構造の把握

材料をコンピュータで扱えるようなデジタルデータとしてモデル化するためには、まず材料の内部構造を把握する必要があります。これには、病気の検査でも使われるX線CT^①を使いました。すり板から切り出した試験片をX線CTで撮像し、内部構造を三次元画像（複数の断面画像）化しました。

■ (2) 構成材料ごとの区分

図2からわかるように、X線CTで得られる画像はグレースケールの画像です。これだけではどこがどの構成材料なのかははっきりとはわかりません。そこで、原子番号が小さいほどX線透過率が高く、炭素などの軽い元素ほど暗く見えることを利用して、実組織を極力再現するよう

な設定で複数回の二値化を行うことで炭素や銅といったすり板の構成材料ごとに区分した画像データを作成しました。

■ (3) 有限要素モデルの作成と均質化法による物性算出

(2)の画像データをもとに、材料内部の構造を反映した有限要素モデル^②を作成しました。このモデルでは、炭素や銅などの各構成材料の領域を多数の小さな要素に分割し、それぞれに対応する材料の物性値を与えています。

作成した有限要素モデルに対して、力や温度差、電位差を与えた際の材料内部の応答を、均質化法^③を用いて解析し、すり板材全体の平均的な物性を算出しました。

① X線CT

CTとはComputed Tomography（コンピューター断層撮影）の略で、X線CTは対象物に多方向からX線を照射し、その透過画像をもとに内部の構造を立体的に再構成する技術です。軽元素ほどX線透過率が小さいため、画像の輝度差から、内部の元素分布を把握できます。

② 有限要素モデル

複雑な材料や構造を細かいパーツに分け、それぞれに材料の性質を設定して作るシミュレーション用のモデル。力や温度差などを与えると、材料内部がどう反応するかを計算できます。

③ 均質化法

材料内部の細かな構造による応答を有限要素モデルなどで計算し、その結果を平均化して、材料全体としての性質を求める解析手法です。

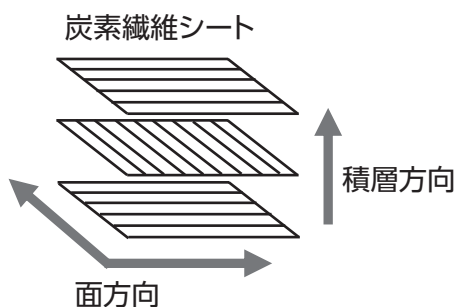
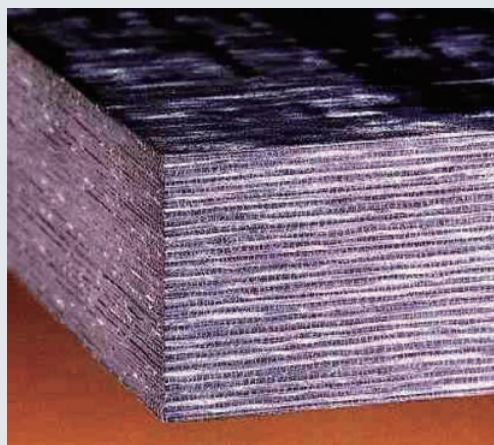


図3 C/C複合材の外観と構造

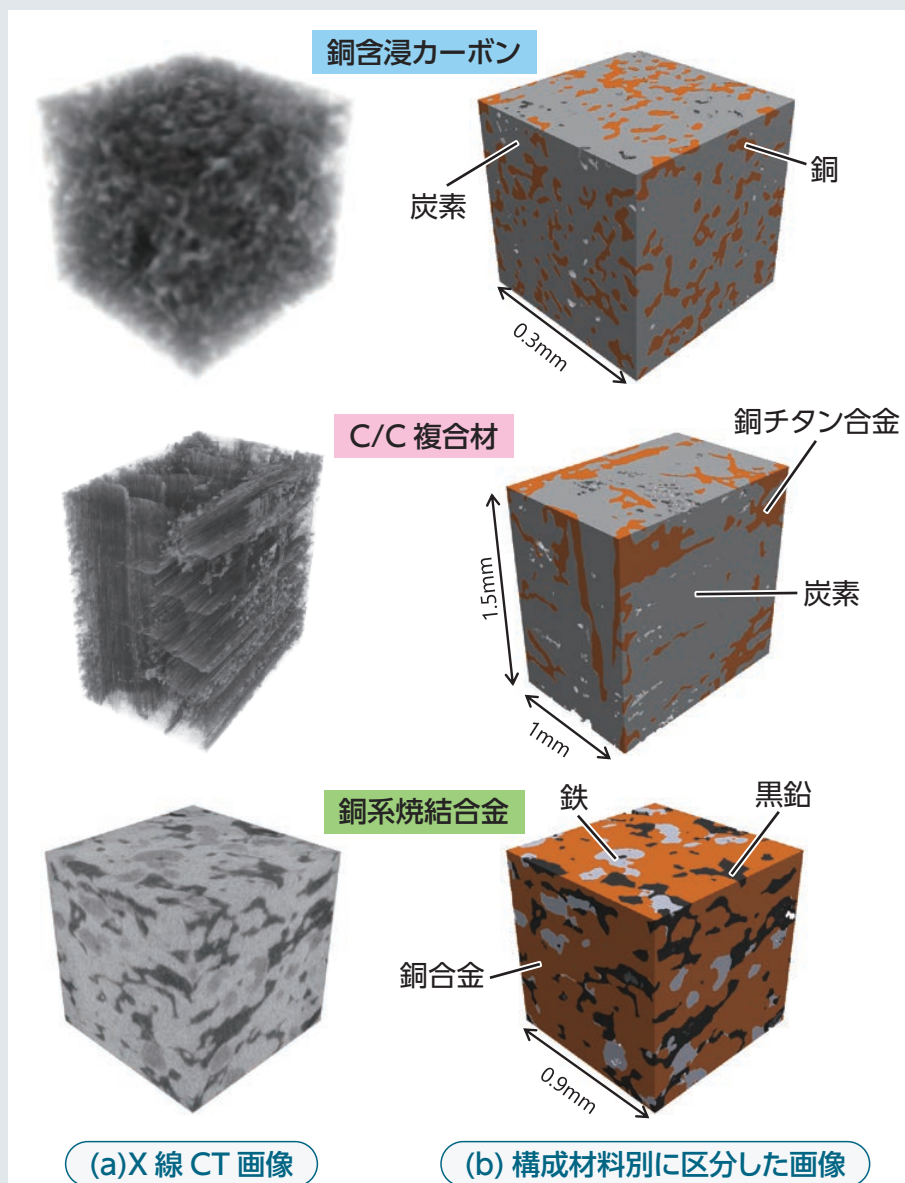


図4 X線CT画像と構成材料別に区分した画像 文献1より引用

モデル化および物性算出の例

日本で使われているすり板材のうち、銅含浸カーボンすり板、C/C複合材製すり板、銅系焼結合金すり板についてモデル化と物性算出を行った事例を紹介します。銅含浸カーボンは、多孔質の炭素基材に銅を含浸した材料です。C/C複合材製すり板は、炭素繊維で補強した炭素材 (C/C複合材) に銅チタン合金を含浸した材料で、図3のような二次元の炭素繊維シートを重ねたミルフィーユのような構造となっています。このため、炭素繊維シートの面方向と積層方向で物性が異なりますが本研究では積層

方向の物性のみ対象としました。銅系焼結合金は、銅粉に鉄粉や黒鉛を混ぜて焼き固めた材料です。これら三つの材料について、X線CT画像から、構成材料別に区分した画像を作成しました (図4)。これらの画像と実際の材料組織写真を並べたのが図5です。区分した画像には実組織の特徴が再現されていることが分かります。この区分した画像を基に有限要素モデルを作り (図6)、表1に示す各構成材料の物性値を用いて、縦弾性係数、熱伝導率、電気抵抗率をそれぞれ算出しました。

得られた物性値を、実測値および構成材料の

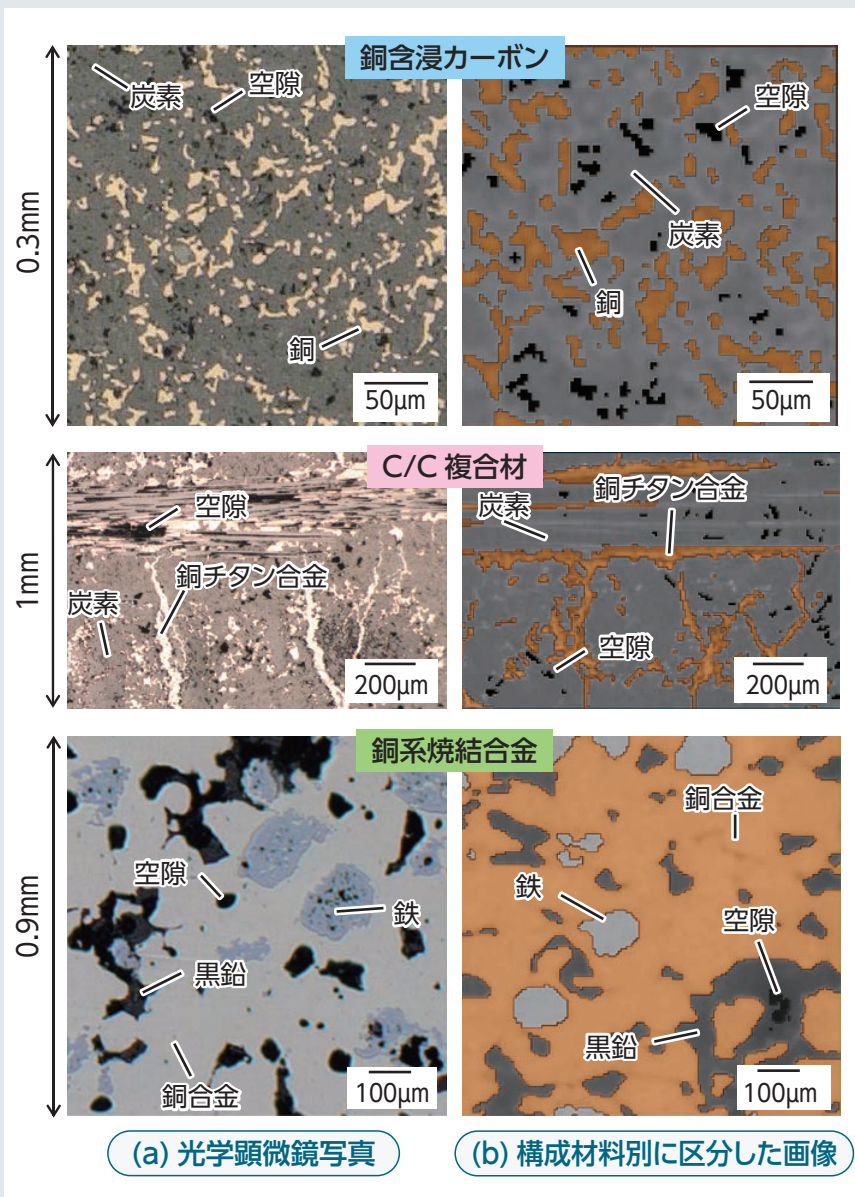


図5 光学顕微鏡写真と構成材料別に区分した画像 文献1より引用

体積分率のみから物性を推定する複合則による計算値と比較して図7に示します。本手法による物性値は、複合則による計算値に比べて実測値に近い値となりました。これは、均質化法では体積分率だけではなく、どこに何がどのように配置されているかまで考慮できるため、うまく物性を再現できたと考えられます。

モデルの応用例

すり板材の物性をおおむね再現するモデルができましたので、これらのモデルを材料開発や物性推定にどのように活用できるか検討しまし

た。ここでは、銅含浸カーボンのモデルを用いた応用例を二つ紹介します。

(事例1) 銅含浸カーボンの含浸金属を変更した場合の物性推定

銅の代わりに別の金属を含浸した材料の開発を想定して、図6のモデルを基に、炭素材への含浸金属として使われることのあるアンチモンとホワイトメタルをそれぞれ含浸した材料のモデルを作成し(図8)、物性を推定しました。併せて、実際にこれらの材料を試作して物性を実測し、解析値と比べました(図9)。その結果、アンチモン含浸材、ホワイトメタル含浸材とも、

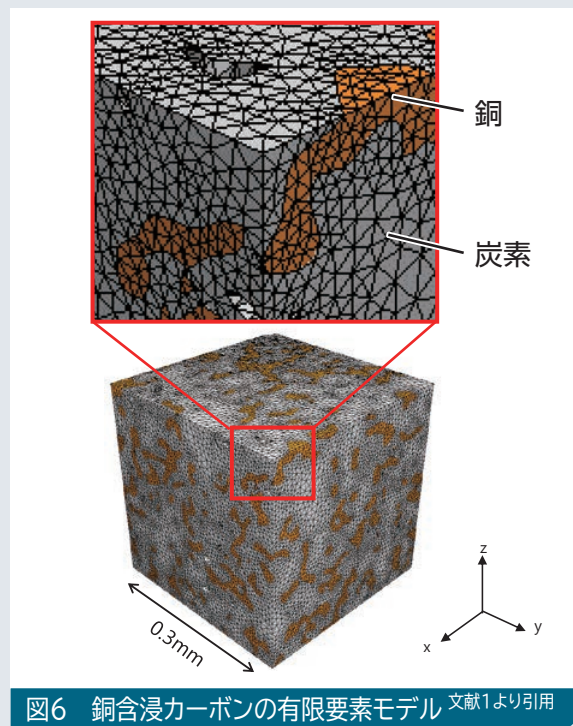
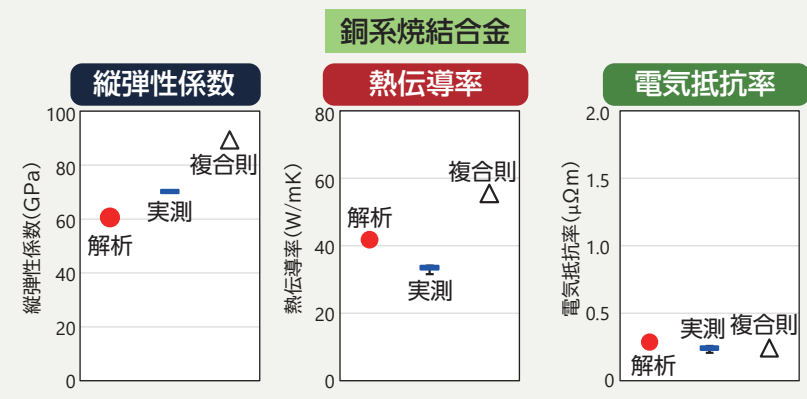
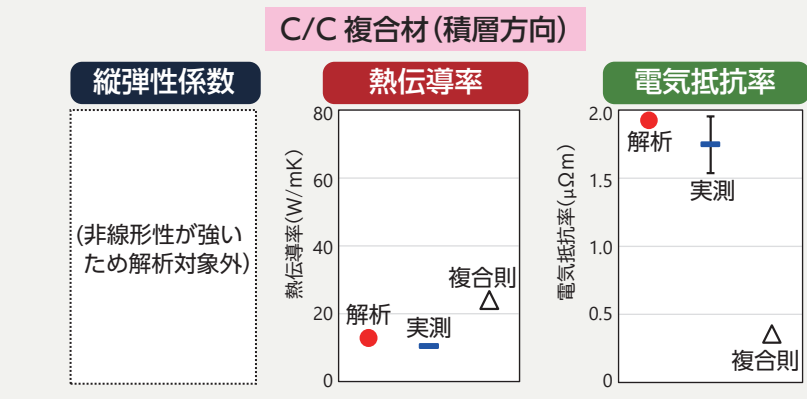
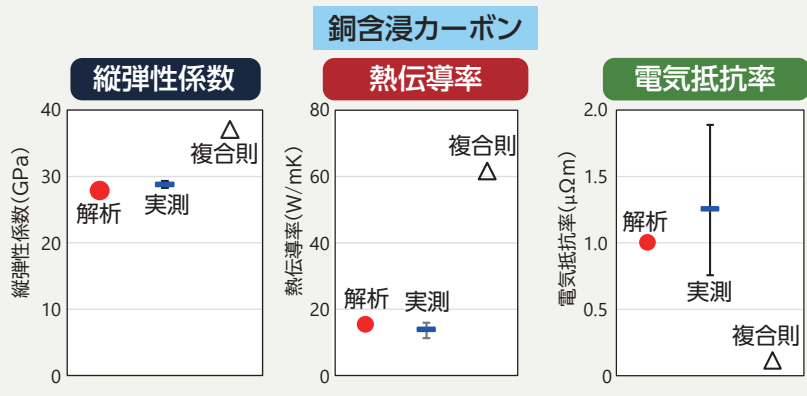


図6 銅含浸カーボンの有限要素モデル 文献1より引用

表1 解析に用いた各構成材料の物性 文献1より引用

すり板材	構成材料	縦弾性係数 (GPa)	熱伝導率 (W/mK)	電気抵抗率 ($\mu\Omega\text{m}$)
銅含浸カーボン	炭素	24	3.8	38.5
	銅	118	391	0.0171
C/C 複合材	炭素	—	6.3	27.8
	銅チタン合金	—	118	0.0575
銅系焼結合金	銅合金(母材)	94.6	44.4	0.230
	鉄	206.3	73.3	0.101
	黒鉛	5.6	162	7.5



解析: 均質化法による解析値
 実測: 実測平均値。エラーバーは最大・最小値を示す。
 複合則: 体積分率による簡易な複合則による計算値

図7 すり板材の物性の解析値と実測値の比較 文献1より引用

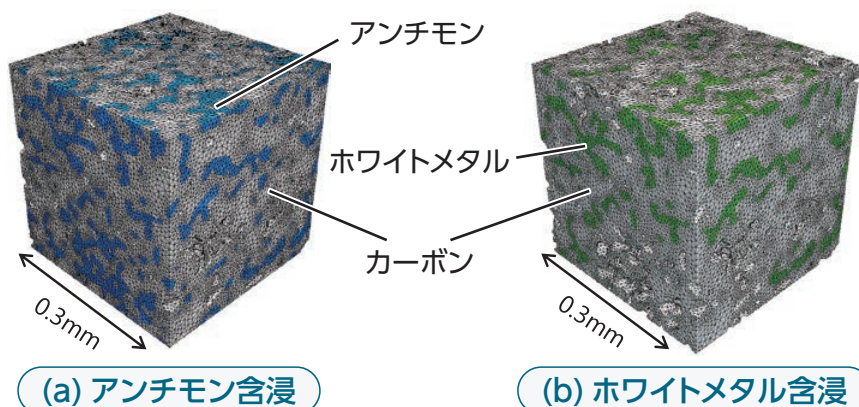


図8 金属含浸カーボンのモデル 文献1より引用

解析により推定した物性値は実測値に近い値でした。

(事例2) 銅含浸カーボンすり板の銅溶出が電気抵抗率に及ぼす影響の推定

銅含浸カーボンすり板は、使用中に発生する摩擦熱やアーク放電により、摩擦面近傍の銅が溶け出ることがあります(図10)。銅は電気を通しやすい材料であるため、その割合が減ると電気抵抗率が上昇すると考えられます。これにより、トロリー線とすり板の接触部が高温となることで、すり板の摩耗が進みやすくなったり、トロリー線の強度が低下したりする可能性があります。このため、銅の溶出に伴う電気抵抗率の変化を把握することは重要です。そこで、銅の体積分率を変えたモデルを複数作り、銅の体積分率と電気抵抗率の関係を推定しました(図11)。その結果、銅の体積分率の減少とともに電気抵抗率の解析値が増加しました。たとえば図10に示した銅溶出領域の銅の体積分率は約6%で、もとの組織(約15%)の5分の2ですが、この場合の電気抵抗率は約20 $\mu\Omega\text{m}$ と推定され、溶出していない領域(約1.3 $\mu\Omega\text{m}$)に比べ大幅に高くなることが推定されます。モデルを用いた検討の結果、これは溶出に伴い銅のネットワーク構造が

分断されるためと考えられました。

さらに、今後、含浸金属を変更した場合を想定し、銅の5倍および10倍の電気抵抗率を持つ金属を含浸した場合についても、電気抵抗率への金属の体積分率の影響を推定しました(図12)。このようにモデルを使うことで、新規材の物性推定のみならず、その後の劣化に伴う物性変化も推定できる可能性があります。

おわりに

本稿では実際のパンタグラフすり板材を対象にX線CTを用いて材料組織を再現した有限要素モデルを作成し、シミュレーションにより物性を算出する手法について紹介しました。応用事例で示したように、モデルを活用することで、構成材料の種類と割合を変えた場合の物性や劣化時の物性変化を予測できます。

この手法を材料開発や現象解明に役立てられるよう、パンタグラフすり板以外の材料についてもモデル化および物性推定に取り組んでいく予定です。RRR

文 献

- 1) 森本文子, 久保田喜雄: X線CT画像を用いたパンタグラフすり板材のモデル化と均質化法による物性計算, 電気学会論文誌A, Vol.145, No.9, pp.275-282, 2025

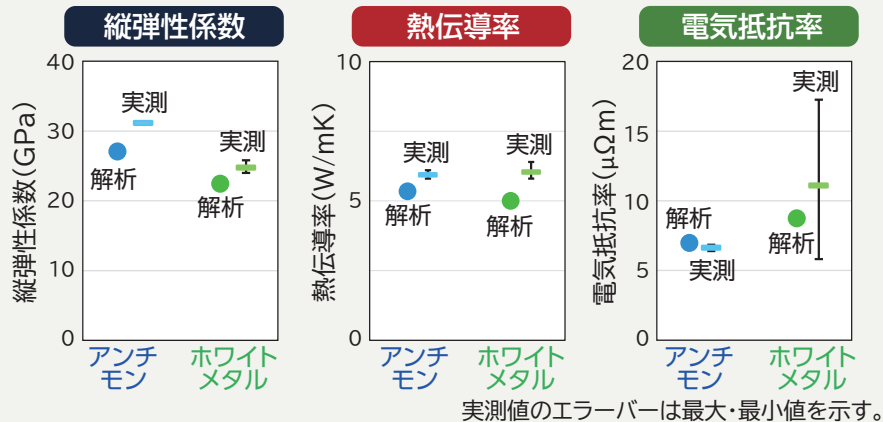


図9 金属含浸カーボンの物性の解析値と実測値の比較 文献1より引用

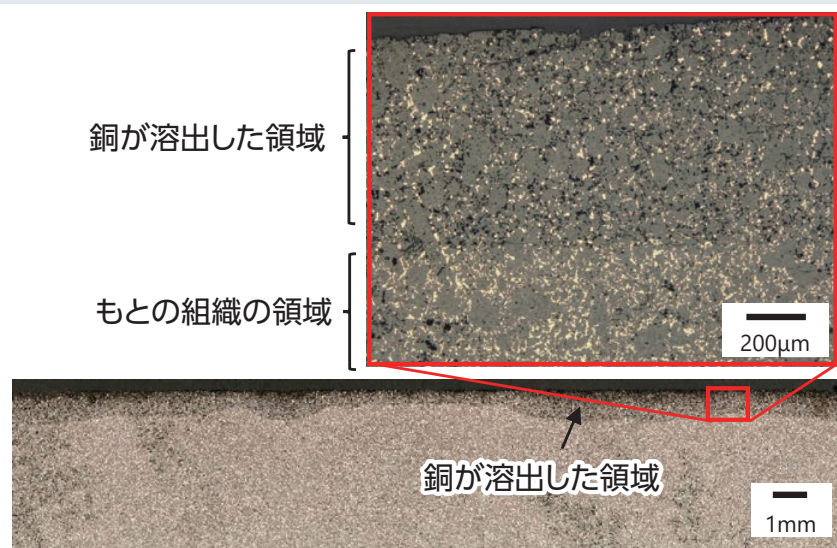


図10 銅含浸カーボンの摩擦面近傍の断面

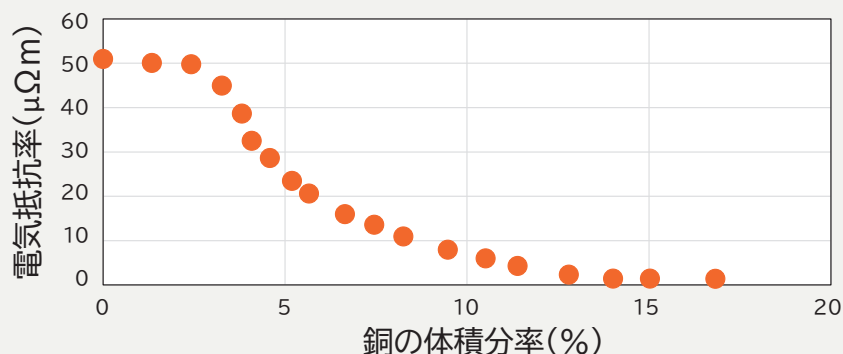


図11 銅の体積分率と電気抵抗率の関係 文献1より引用

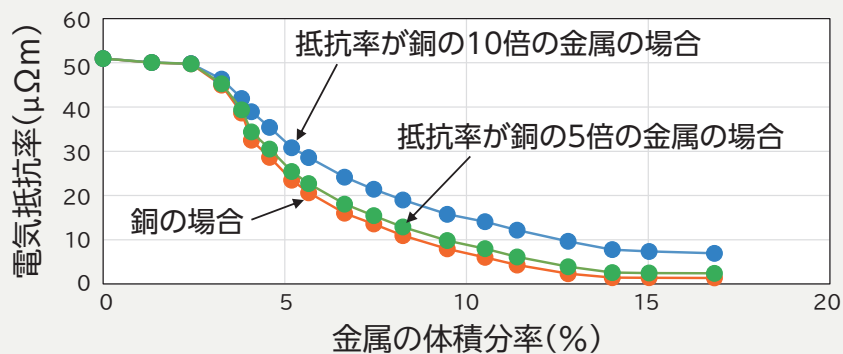


図12 金属含浸カーボンの電気抵抗率に及ぼす金属の電気抵抗率の影響 文献1より引用