

# 機械学習によるゴム部品の性能予測技術

埴 勇太郎\*  
Yutaro Hanawa  
中谷浩司\*  
Koji Nakatani

Performance Prediction Technology for Rubber Parts Using Machine Learning

\*先端技術総合研究所

## 要旨

電機製品には種々のゴム部品が使用される。多種多様なゴム部品の中から製品に適用可能なものを見つけ出すには、複数の性能評価試験を行う必要があり、膨大な時間を要する。そこで、ゴム部品の性能評価試験の効率化を目的に、ゴム部品の性能と分析データとを機械学習させた回帰モデルによるゴム部品の性能予測技術を検討した<sup>(1)</sup>。今回の検討では、学習データ収集に有限要素法(Finite Element Method: FEM)解析を始めとするコンピューター上の仮想実験を活用することで、実験を繰り返した場合に比べて1/10の時間で学習データの収集を実現した。開発モデルの精度検証を行った結果、ゴム部品の非線形的な荷重と変位の関係を平均84%の精度で予測可能であった。

## 1. ま え が き

近年、機械学習の進展によって、高速かつ効率的な材料開発が実現されつつあり、今後はより高性能な材料が短期間で市販されるようになって予想される。三菱電機を始めとする材料ユーザーでは、自社製品に適用可能な材料を迅速に見つけ出して活用することが重要になる。そこで、当社では、プラスチックやゴムを始めとする樹脂材料及びそれを用いた部品の性能を機械学習によって予測する技術を開発中である。樹脂材料は、環境要因に対する劣化が早いといった欠点があるため、製品適用までには、膨大な時間を要する種々の性能評価試験が必要になる。材料や部品の性能を推定できれば、評価試験不合格による手戻り防止や評価対象の絞り込みが可能になり、性能評価試験の効率化に貢献できる。

本稿では、そのような性能評価の効率化に貢献する、ゴム部品の性能予測技術開発の概要について述べる。

## 2. 学習データ収集の効率化に向けた検討

この章では、学習データ収集の効率化に向けて行った検討の内容について述べる。

### 2.1 コンピューター上の仮想実験を駆使した学習データの収集

この開発の特徴は、機械学習に必要な学習データの収集を、コンピューター上の仮想実験によって行ったことである。概要を図1に示す。ゴム材料の性能には、補強材として混合されるカーボンブラックの分散度合いといったマイクロ構造が影響することが知られており<sup>(2)(3)</sup>、TEM(Transmission Electron Microscope)像から特徴量を抽出して説明変数とすることを検討した。しかし、材料の試作、性能評価及びTEM像取得には膨大な時間を要する。そこで、CADによってTEM像を模擬したモデルを作成し、このモデルからマイクロ構造に関する特徴量を抽出した。さらに、目的変数であるゴム部品の性能をFEM解析によって計算した。

#### 2.1.1 CADによるTEM像を模擬したモデルの作製と説明変数の抽出

CADによって作製した、TEM像を模擬したモデルの概要を図2に示す。カーボンブラックを模擬した円を平面状にランダムに描写することによってモデルを作成した。ゴム中に混合されたカーボンブラックとゴムの界面には、ゴムよりも高弾性な中間層が存在することが知られており<sup>(4)</sup>、この中間層についても同様にモデル化した。今回は円の数や直径がそれぞれ異なるモデルを100個作成し、それぞれのモデルからカーボンブラックの占める面積の割合などの特徴量を抽出した。

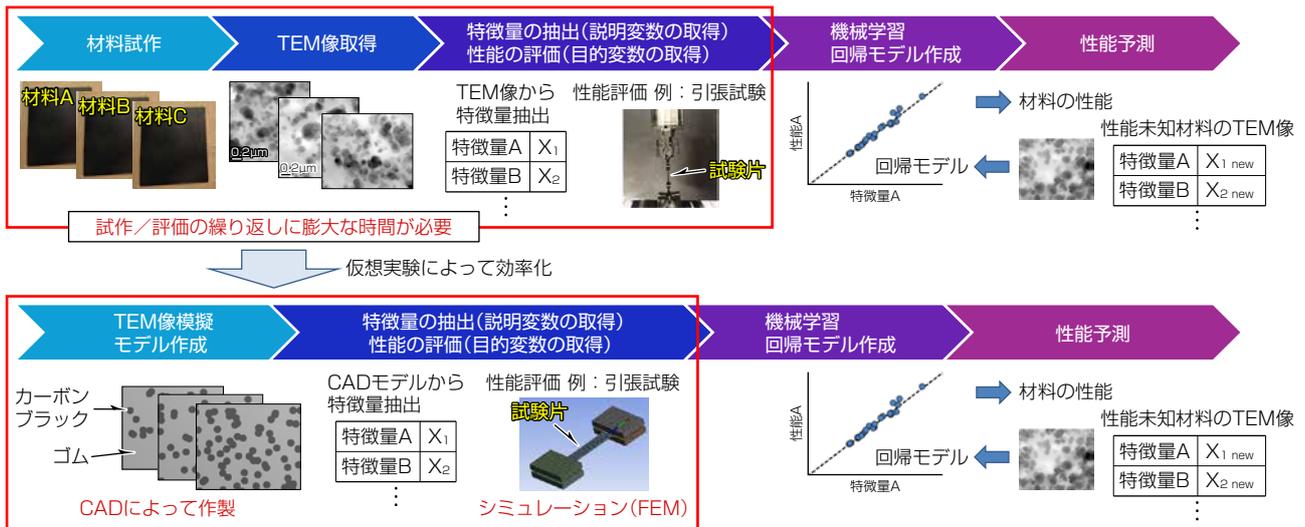


図1-ゴム部品の性能予測技術の概要

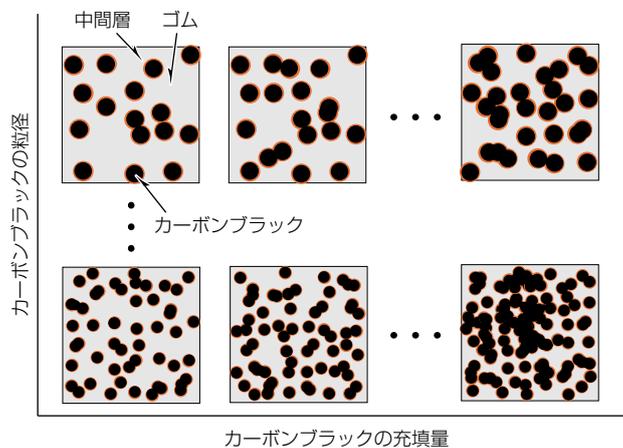


図2-TEM像を模擬したモデルの概要

### 2.1.2 FEMによる目的変数の取得

今回の検討では、目的変数に当たるゴム部品の性能をFEM解析によって収集した。FEM解析の概要を図3に示す。部品の性能としては、荷重と変位の関係、クリープ変形、シール性等があるが、本稿では、簡単な例として、短冊形状での荷重と変位の関係を予測した結果について述べる。カーボンブラックの分散度合いを始めとするマイクロ構造がマクロスケールの部品の性能に影響することから、スケールの異なる構造体双方の物性、挙動を連成させるマルチスケールシミュレーションを実施した。マルチスケールシミュレーションでは、短冊状の部品の荷重と変位の関係をFEM解析2で計算する。ここで材料パラメーターとして必要な応力とひずみの関係を、2.1.1項で作成したCADモデルのFEM解析1によって取得した。この方法によって、ゴムのマイクロ構造の違いで生じる材料特性の差異を、マクロな性能評価試験を模擬したFEM解析に反映させることができる。なお、FEM解析1で使用するゴム、カーボンブラック、中間層の弾性率値については、カーボンブラック未充填のゴムの試作と評価、SPM(Scanning Probe Microscopy)やAFM(Atomic Force Microscope)等の分析から推定した。

### 2.2 データの学習

2.1.1項及び2.1.2項の仮想実験によって収集した説明変数と目的変数を用いて機械学習を行い、予測モデルを構築した。実試験によって学習データを収集した場合、約50日の時間を要すると予想されるが、今回の検討では、約5日で完了した。すなわち、コンピューター上の仮想実験によって、学習データの収集を1/10に短縮させることができた。

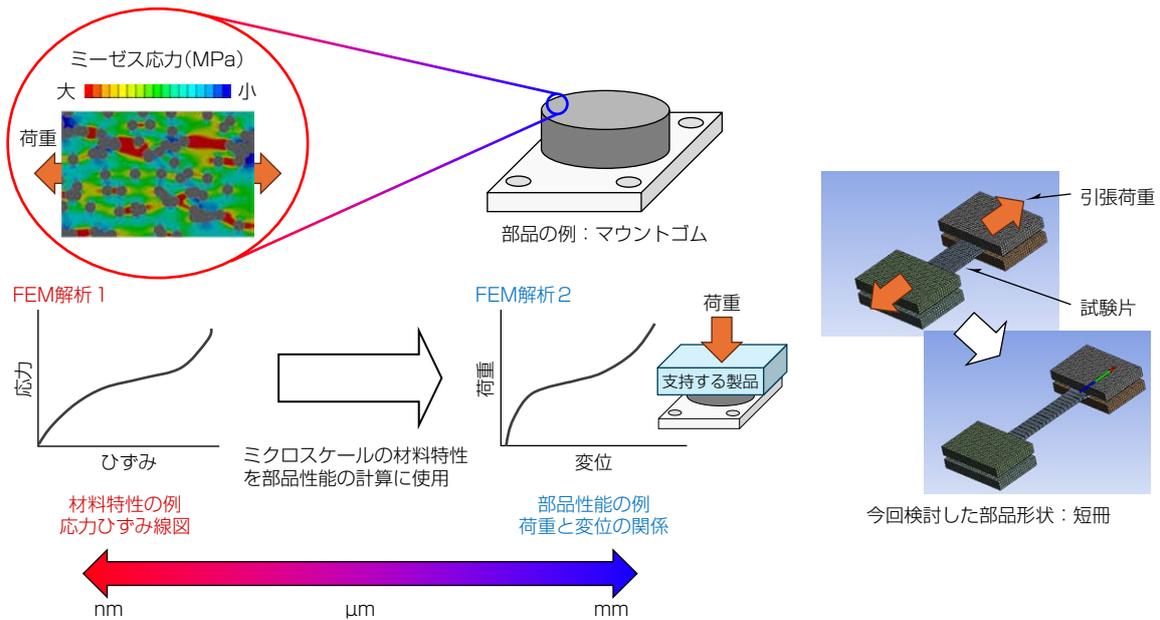


図3-マルチスケールシミュレーションの概要と今回検討した部品形状

### 3. 予測モデルの精度検証

2章で構築した予測モデルに対して、添加するカーボンブラックの粒径や量を変えたニトリルブタジエンゴム(NBR)のTEM像から抽出した特徴量を入力して、荷重と変位の関係を予測した。結果を図4に示す。今回検討した全12条件で、カーボンブラックの粒径や量に依(よ)らず、ゴム部品の荷重と変位の関係を平均84%の精度で予測可能であった。機械学習では、予測に加えて予測に対する各説明変数の寄与度を評価できる。寄与度を解析したところ、カーボンブラックの充填量の寄与度が最も高く、次いで、カーボンブラックを模擬した円の輪郭長さの標準偏差やカーボンブラックを模擬した円の重心位置の分散度合いの寄与度が高かった。これは、ゴム部品の変形にはカーボンブラックの充填量だけではなく、粒径分布や分散度合いも寄与することを示唆する結果であった。

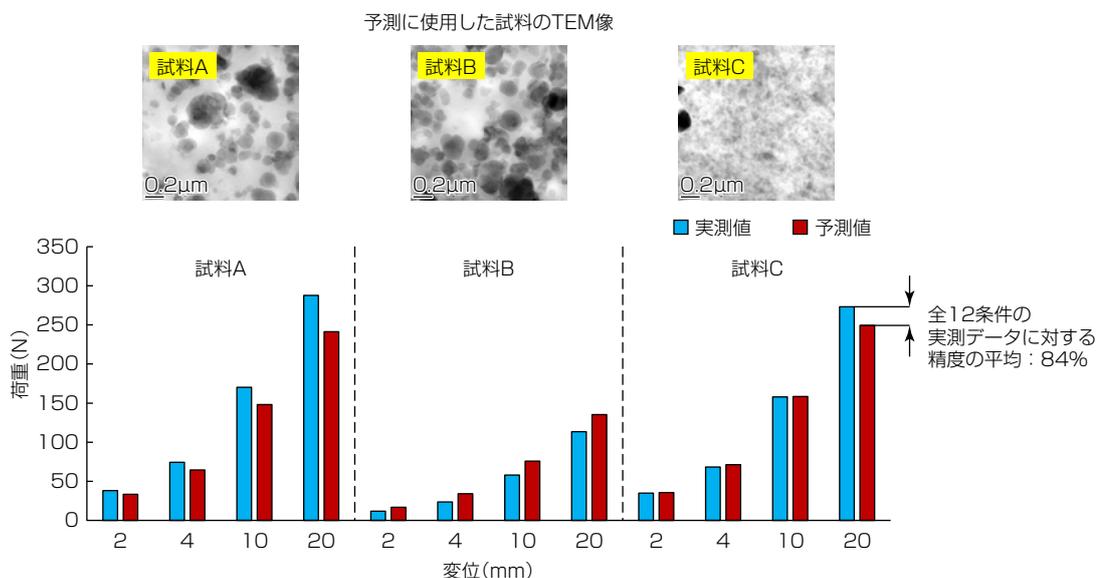


図4-予測モデルの精度検証結果

## 4. む す び

コンピューター上の仮想実験から収集した学習データを用いて、ゴム部品の荷重負荷時の変形量を予測する機械学習モデルを開発した。機械学習では、学習データの収集のコストの大きさが課題になる場合が多いが、今回の検討では、学習データの収集効率化を可能にするCADやFEMによる仮想実験の基礎技術を確立するとともに、その有効性を検証できた。

今後は、TEM像から抽出した情報だけでなく、配合に関する情報や赤外分光分析で得られたスペクトル画像などの画像情報を用いて、防振性能、シール性能、耐疲労性など、様々な性能の予測が可能なモデルの開発を検討する。

## 参 考 文 献

- (1) 埴 勇太郎：FEMと機械学習を活用したゴム材料の性能予測技術開発(2)，2023年日本ゴム協会年次大会，B-9 (2023)
- (2) 仲田俊夫：カーボンブラックーゴム補強性能を中心として，炭素材料学会誌，No.106，111～120 (1981)
- (3) 榊原明弘，ほか：カーボンブラックによるゴム物性の改良，日本ゴム協会誌，73，No.7，385～391 (2000)
- (4) 高野直樹，ほか：ナノ粒子分散材の3次元モルフォロジー分析と有限要素モデリング，材料，57，No.5，423～429 (2008)

