

## 引張試験による平角銅線の材料特性計測方法の検討

日大生産工(院) ○中尾 隆人      日大生産工 前田 将克  
日大生産工 鈴木 康介      元日大生産工 高橋 進

### 1. 緒言

現在、地球環境負荷低減のために自動車の走行時の二酸化炭素量削減を求められており、電気自動車の開発が積極的に進められている。電気自動車はバッテリーに蓄えた電力でモータを駆動するため、航続距離の向上が重要な課題となっている。課題を解決するためには、モータの高効率化が必要不可欠であり、モータコイルの形状変更が検討されている。近年の電気自動車では、モータの巻き線として断面形状が四角形の平角銅線が広く採用されており、占積率の大幅向上、モータの小型化、軽量化が可能となっている。しかし、平角銅線は、製品として曲げ加工する際に、被覆の損傷や割れなどが報告されており、問題に対する対策が必要になってきている。

本研究では、これらの加工時の被覆損傷メカニズム等を解明し、また様々な材料形状、材料物性、成形形状などに対応するため、成形シミュレーションの適用を検討した。そこで、成形シミュレーションを実施するための基礎検討として、被覆平角銅線の引張試験を実施し、引張特性や材料特性を計測する方法について検討を行った。また、計測結果から得られた材料物性値等を用いて、引張試験のシミュレーションを実施し、試験結果との比較を行ったので報告する。

### 2. 試験片

試験片の材質は、母材には導電性が高い無酸素銅、被覆には高い耐熱性と絶縁性を持つポリアミドイドを使用した。試験片はJIS C 3002\_1992より、全長400mm、標点距離250mmとした。断面形状は幅2.94mm、厚さ1.55mmとした。試験片の形状と平角銅線の断面図を図1、2にそれぞれ示す。

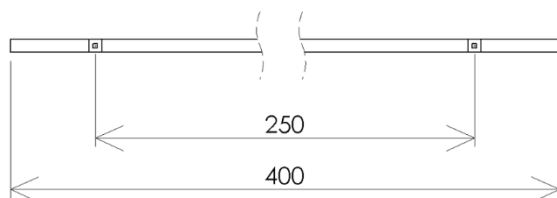


Fig. 1 Dimensions of test piece

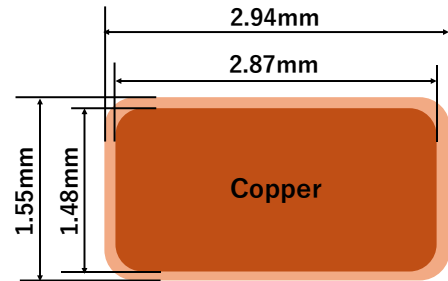


Fig. 2 Cross section of specimen

### 3. 引張試験方法

引張試験は、万能材料試験機を使用した。また、試験機に取り付けられたロードセルで、試験片に付加した荷重を測定する。試験速度は、JIS C 3002\_1992より、200mm/minとし、試験片のひずみを画像解析ソフトを用いて評点の変位からひずみの計測を行った。

### 4. 引張試験結果

実験により得られた試験片5本の応力－ひずみ線図を図3に示す。全試験片、同様な傾向が見られ、引張試験の高い再現性が確認できた。また、この結果を引張試験シミュレーションに材料特性として入力した。

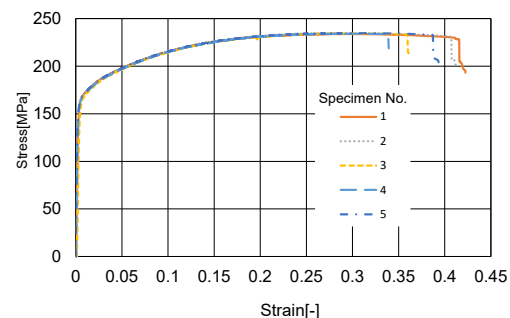


Fig. 3 Stress-strain curve of the experiment

### 5. 引張試験のシミュレーション

引張試験で計測した応力－ひずみの関係を用いて、引張試験シミュレーションを実施し材料データや解析モデルの整合性について確認した。また、本来は被覆層を解析上で再現するが、まずは被覆層も金属層とみなして、一体化したモデルで解析を行った。

## 5.1 シミュレーション条件

解析ソフトとしては、金属材料の変形・工具への負荷状態などの加工現象をコンピュータ上で解析できる製造系CAEソフトウェアであるDEFORMを用いた。また、その中でも塑性加工全般を取り扱うことが出来る、DEFORM-3Dを採用した。平角銅線は弾性と塑性の両方を示すため、材料特性を正確に反映する目的でシミュレーションモデルを弾塑性体と設定した。解析で用いた条件を表1に示す。また試験片の形状や荷重条件に対して応力やひずみの分布が対称的であることを利用し、計算負荷を軽減しつつ、精度の両立を図るために、図4に示すように試験片の厚さ、幅、長さをすべて1/2にした、1/8モデルでの解析を行った。解析モデルの対称面には対称境界条件を設定し、法線方向の変位を固定して変形の対称性を保持した。また、引張方向の端面には一定速度を付加し、実試験と同等の引張条件を再現した。材料データの弾性率、熱膨張係数およびポアソン比は代表的な文献および標準的な物性データを用いた。<sup>1)</sup>

Table 1 Analysis conditions

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| Number of meshes              | 3200       |
| Mesh shape                    | hexahedron |
| Operating speed[mm/s]         | 1.666      |
| Young's modulus[MPa]          | 53903      |
| Poisson's ratio               | 0.33       |
| Thermal expansion coefficient | 1.77E-05   |

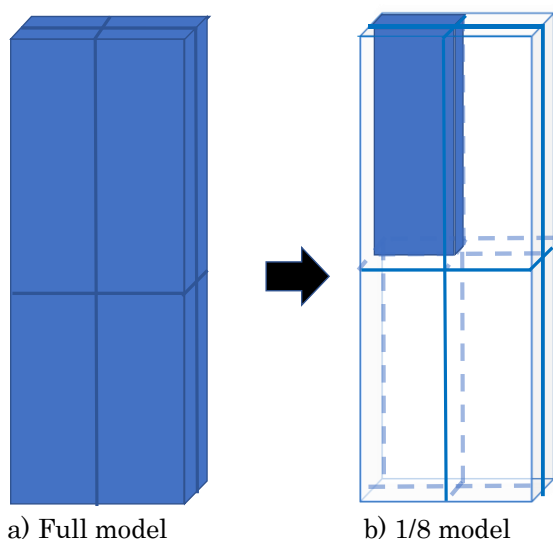


Fig. 4 Schematic diagram of the model of specimen

## 5.2 シミュレーション結果

図5に引張試験とシミュレーションの応力-ひずみ線図を示す。変形初期の弾性領域から降伏、引張強さに至るまで、二つの結果は良く一致していることが確認できた。引張強度以降では、シミュレーション結果が著しく低下しており、引張試験と乖離しているのが確認された。これは、シミュレーションに用いた材料データが弾性域以降は、塑性域の引張強度のデータまでを入れているためと考えられる。引張強度以降のシミュレーション結果は解析ソフト上で自動補完したもので、実際の試験結果を考慮したものではないため、引張試験結果と乖離が発生したと推測される。この結果より、DEFORM-3Dによるシミュレーション解析では、試験開始から引張強度までの範囲において引張試験結果を十分に再現できていると考える。

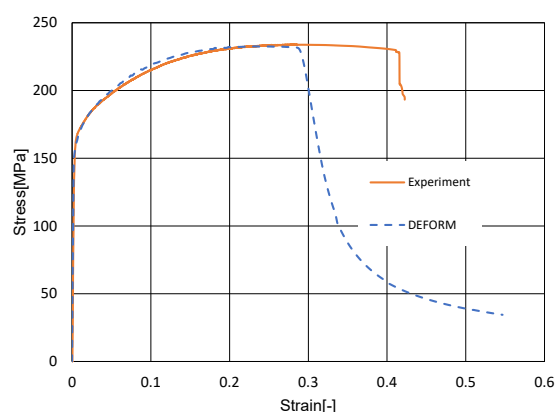


Fig. 5 Experimental and analytical stress-strain diagrams

## 6. 結言

本研究では、平角銅線を用いた引張試験および引張試験のシミュレーションを実施し、以下のような知見を得ることが出来た。

- 1) 引張試験とシミュレーション結果の比較から、引張強度まで整合性のある結果を得ることができた。
- 2) 引張試験解析結果と応力-ひずみ線図を用いて引張試験結果の比較を行い、引張強度までの高い一致を確認することができた。

## 参考文献

- 1) 三菱マテリアル株式会社「MOFC®-HR 無酸素銅の物理的特性資料」, (2025-7)  
[https://www.mitsubishi-copper.com/en/assets/pdf/MOFC-HR\\_EN.pdf](https://www.mitsubishi-copper.com/en/assets/pdf/MOFC-HR_EN.pdf)  
(参照日時 2025 年 8 月 9 日)