

# ゴム材料を用いたペルチェモジュールの CAE 技術の開発

材料技術部 金属・物性科 工藤弘行  
繊維・高分子科 小林慶祐

応募企業が開発したペルチェモジュールは、従来セラミックス材料を使用した部位をゴム材料に代替し、折り曲げて使用できるようにした製品である。本研究では、製品の特長であるペルチェ効果やゼーバック効果など熱電現象に関する CAE 解析や、ゴム材料の大変形に関する CAE 解析技術の活用方法を検討した。

## 1. 緒言

応募企業が開発したペルチェモジュールは、一般的なモジュールが半導体及び配線部をセラミックス材料で挟んだ構造であるのに対し、図 1 に示すように、ペルチェ素子とゴム材料を組み合わせることで湾曲変形が可能なフレキシブルな製品としたことが特徴であり、これまでにない用途が期待される。

ペルチェモジュールでは、ペルチェ効果による吸熱、発熱だけでなく、素子に電流が流れることによるジュール発熱や、高温部から低温部への熱伝導もあり、熱の出入りは複雑である。これを計算する方法として熱回路網計算やコンピュータシミュレーション (CAE) があるがその利用は限定的である。

一方、ゴム材料の変形についても、CAE の活用が期待されるが、ゴム材料の大変形を扱うには、材料物性値の取得とソフトウェアへの入力に難しさがああり、あまり普及していない。

以上より、本研究では、ゴム材料を用いた開発品にとって重要な伝熱解析と変形解析について、有限要素解析ソフトウェア ANSYS Mechanical を用いて基本的な検討を行い有効な CAE 活用方法を検討した。

伝熱解析では、ANSYS の電気-伝熱要素を用いたペルチェ効果やゼーバック効果に関する解析手法を検討した。変形解析では、ゴム弾性を表現する超弾性モデルによる解析手法を検討した。

本報告では、ゴム材料の変形解析についてのみ記載する。



図 1 開発品の外観

## 2. 実験及び CAE 解析

### 2. 1. フィッティングによる材料特性の決定

提案企業が開発したペルチェモジュールは、ゴム材料を用いて、湾曲変形が可能であり、最大でφ50mmまでの円筒曲面での使用を謳っている。このようなゴム変形について設計に役立つ情報を得るため、様々な CAE 変形解析を行った。大変形の影響を知ることが主な目的である。

はじめに、CAE に入力する材料特性データを得るため、ペルチェモジュールを構成するゴム材料 A 材、B 材および比較材料 NBR (ニトリルゴム) について引張試験を行い、応力-ひずみ曲線 (S-S カーブ) を求めた。試験速度は 100mm/min. とした。

解析は、最も基本的な線形解析 (弾性解析) と、ゴム材料の非線形変形を表現できる非線形解析を検討した。CAE における材料物性値として、弾性解析の場合は、縦弾性率 (ヤング率) を入力する。一方、非線形解析では、材料モデル (材料構成式) の選定及びパラメータの同定が必要である。

多くの金属材料は最大でも 100%程度のひずみを生じる前に破断するのに対し、ゴム材料は破断まで数百 [%]程度のひずみを生じる。また、大変形を与えた後、荷重を取り除くと元の形状に戻る「弾性」を示す。有限要素解析では、一般に、このような「ゴム弾性」を「超弾性材料」として扱う。超弾性材料の数式的な定義は難解であるが、単純化すると、式 (1) のように表現できる。この式は、材料の変形の特徴を表現する、ひずみエネルギー関数  $W$  があり、 $W$  をひずみテンソル  $[E]$  で偏微分することで、応力テンソル  $[S]$  を求めることができることを意味する。

$$[S] = \frac{\partial W}{\partial [E]} \quad \dots \text{式(1)}$$

様々な高分子材料の計算のため、多くの研究者が独自の材料モデルを提唱しており、現在では 10 種類ほどのモデルが定着している。固体力学一般的には、

このような応力-ひずみ関係を規定する理論を材料構成則、その数式表現を材料構成式と呼ぶ。本研究で使用した ANSYS では、合計 15 種類ほどの超弾性モデル（材料構成式）の使用が可能である。

材料構成式の代表例として、Mooney-Rivlin 2 パラメータ・モデルを式（2）に示す。

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで、 $I$ 、 $J$  は不変量であり、 $C_{10}$ 、 $C_{01}$ 、 $d$  の 3 つが CAE に入力するパラメータである。ひずみエネルギー関数は使用されるパラメータは、概念的なものが多く理解が困難であり、かつ、試験で直接的に求められないものが多い。

材料構成式は、3～9 個のパラメータを持つことが多く、式中のパラメータの数値を決定するには単軸、二軸、純せん断など様々な変形様式の材料試験のうち、最低でも 2 つ以上の試験結果が必要であるが、ANSYS は、最も簡単な単軸試験 1 つの材料試験結果から、指定した材料構成式に当てはめ、構成則の数式中のパラメータを求める「カーブフィッティング」機能を持っている。個々の材料、試験データがどの材料構成式に当てはまるかは定まっておらず、複数の材料構成式でフィッティングを行い、最も妥当な近似となるものを選ぶのが一般的である。

製品を構成する A 材（熱伝導材）、B 材（断熱材）の物性値は社外秘であるため、本報告では、NBR 市販材のカーブフィッティング例を示す。

## 2. 2. 湾曲時の変形解析

前項で求めた材料物性値を用いて、現行製品を湾曲させた時の変形解析を行う。

前項で紹介したような超弾性材料などを用いた非線形解析は、単純な弾性解析に比べて計算時間が数倍から数十倍に増加することもあるため、解析モデルの対象範囲と材料構成則についてうまく折り合をつけて選択することが大事である。

はじめに、製品の基本的な特徴を調べるため、弾性解析を行った。弾性解析は解析時間が短くなるため、比較的大きなモデルでの計算に向く。製品の構造は配線部を除いて、4 分の 1 対称条件が成立しているため、図 2 に示す 4 分の 1 モデルを解析対象とした。このモデルの変形は製品全体の変形とほぼ等価である。実製品は、円筒面に接触させながら、湾曲されるという使用上の特徴があるため、図 3 に示すように、モジュールとともに円筒面もモデルし、接触解析を行った。弾性解析であるため、ゴム材料はヤング率で物性値を設定した。

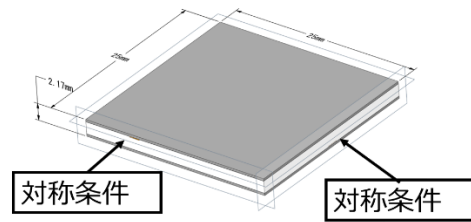


図 2 モジュール 1/4 モデル

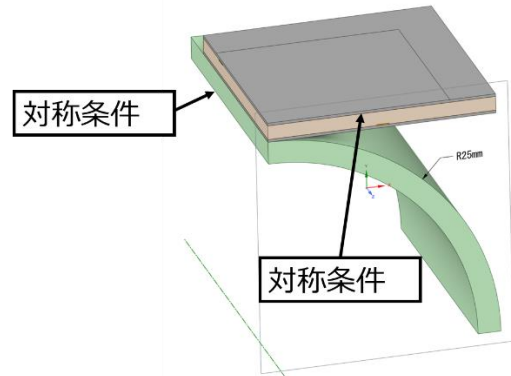


図 3 解析用モデル（1/4+円筒モデル）

## 2. 3. DIC 測定による妥当性検証

変形 CAE 解析の妥当性を確認するため、モジュールを湾曲させた時の変形の DIC 測定を行った。DIC は「デジタル画像相関法」の略称であり、物体表面に形成された白黒のランダムパターンを頼りに画像処理により、ひずみ、変位、形状などの測定を行う技術である。

図 4 に、画像処理用の白黒のランダム模様をスプレーにより塗布したペルチェモジュールを示す。

図 5 に示すように、2 台のカメラによる 3 次元測定を行なった。今回は、20 秒程度の時間で、φ 50mm 円筒体に沿って、ペルチェモジュールを手作業で湾曲させ、最終的に図 6 のようにテープで四辺を固定する状態とした過程を測定対象とした。

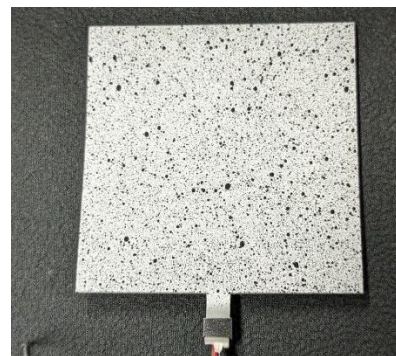


図 4 白黒ランダムスプレー塗布したモジュール



図5 DIC測定風景



図6 湾曲変形を与えたモジュール

### 3. 結果及び考察

#### 3. 1. フィッティングによる材料特性の決定

図7にNBR市販材の引張試験結果を応力-ひずみ曲線として示す。各試験は3本ずつ実施したが、ばらつきはそれほど大きくなかった。

カーブフィッティングの例として、NBR市販材に対して、Neo-HookeanおよびMooney-Rivlin 2パラメータでフィッティングした結果を図8および図9に示す。図中、点が引張試験結果、線がフィッティングカーブである。このうち、Mooney-Rivlin 2パラメータ・モデルが最も妥当な近似と判断した。

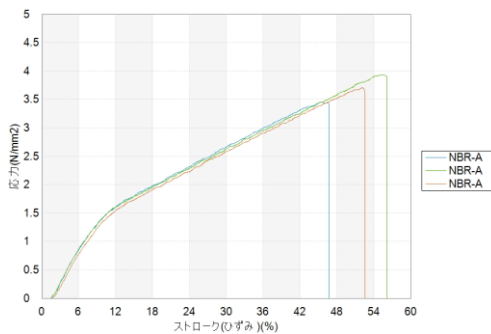


図7 NBR市販材の引張試験結果 (応力-ひずみ線図)

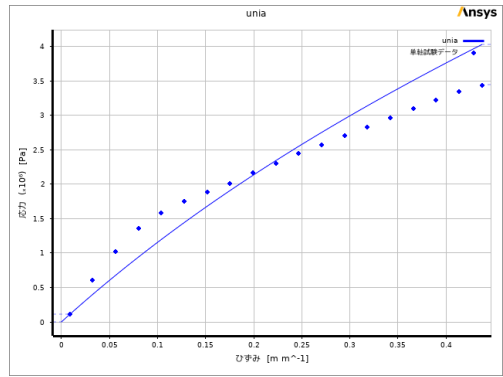


図8 Neo-Hookeanモデルのフィッティング例

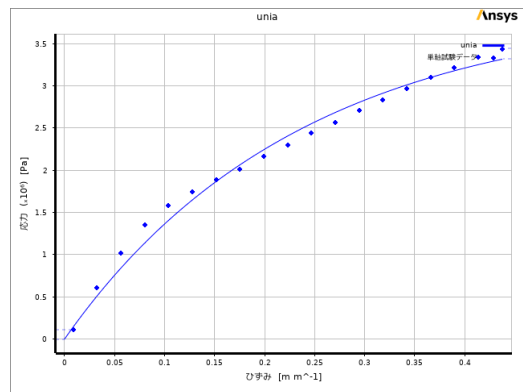


図9 Mooney-Rivlin 2パラメータモデルのフィッティング例

#### 3. 2. 湾曲時の変形解析

図10は、変形中盤と変形完了時の変位分布である。円筒面との接触条件と、最外端への上下方向変位を与えるのみで、円筒面を沿った湾曲変形を再現することが可能であった。本解析の計算時間は15分程度であった。

図11に相当弾性ひずみ分布を示す。ひずみが0.1の高い部分(図中緑色)と0.02と低い部分(図中青色)が交互に形成されることが特徴である。最大値は最外端であるが、境界条件を与えたというCAE解析の都合上の結果である。最大値は0.40ほどであるが、破断ひずみの大きいゴム材料では破壊に直結しないレベルである。

CAEでは、任意の断面を仮想的に切断して結果表示することが可能である。そこで、製品中の任意断面で仮想的に切断したひずみ分布を確認したところ、ひずみ大小が交互に繰り返される分布は、内部構造と関係があることを確認した。

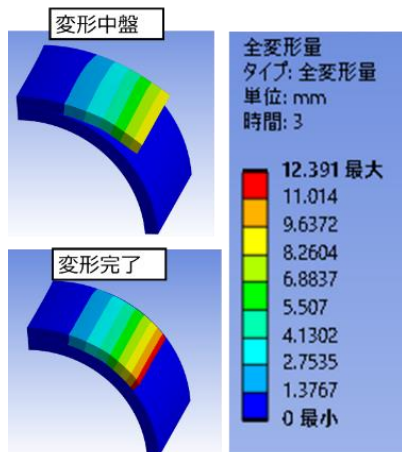


図 10 湾曲変形時の変位分布図

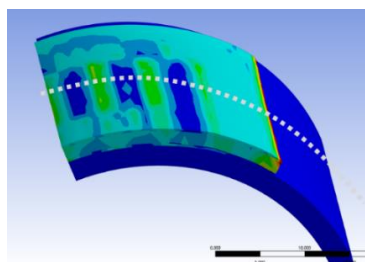


図 11 湾曲変形時のひずみ分布図

### 3. 3. DIC 測定による妥当性検証

本モジュールの DIC 測定では湾曲させることで画像処理マーカー用にスプレーで塗布した塗膜の割れ、剥がれが生じ、測定結果にノイズとして影響を及ぼしたため、全体的な傾向や定性的な特徴を記載する。

図 1 2 に、測定面全体を平均して作成した Y 方向ひずみの経時変化グラフを、各時刻におけるシートの姿勢の変化も併せて示した。ひずみは姿勢の変化に応じた増加を示し最終的に 0.046 ほどであった。

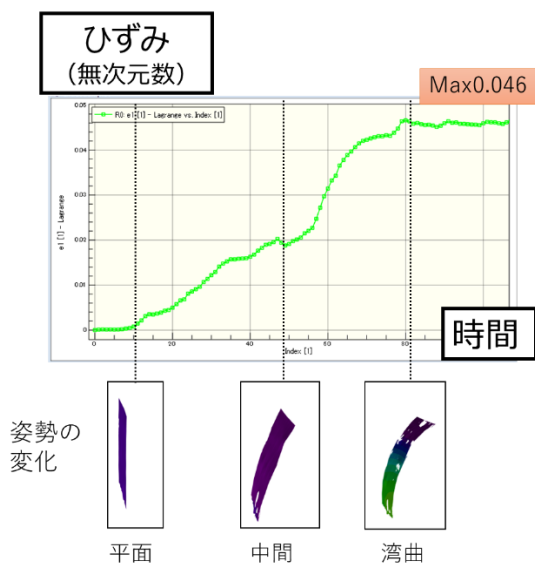


図 1 2 湾曲変形時の Y ひずみの経時変化

図 1 3 は、湾曲変形後の測定面のひずみ分布である。面全体の平均が 0.046 であるのに対して、比較的、局所的に高い部分と低い部分が見られた。また、ひずみ 0.1 を超える赤い部分とひずみ 0.02 程度の紫の部位が交互に生じている。

DIC と比較しやすいように、方向と評価範囲をそろえた CAE ひずみ分布結果を図 1 4 に示すが、CAE と DIC はほぼ同じような結果を示しており、CAE はおおむね妥当と考えてよい。

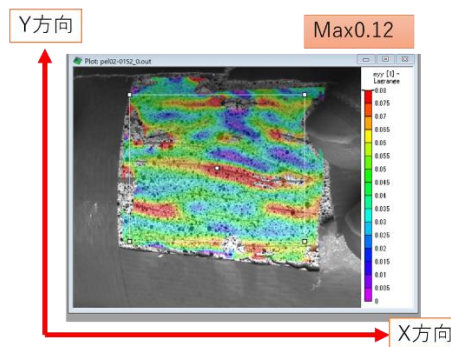


図 1 3 湾曲変形時のひずみ分布

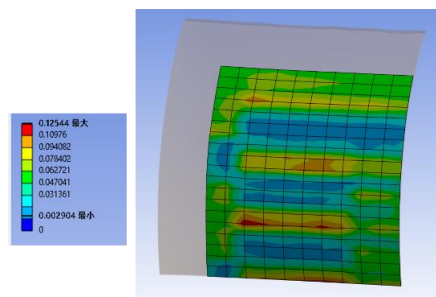


図 1 4 DIC 測定面のひずみ分布 (CAE 解析結果)

## 4. 結言

本事業では応募企業が開発したフレキシブル型ペルチェモジュールに関する CAE 解析として、伝熱解析と変形解析の活用法について検討を行い、以下の知見が得た。

- ① ゴム材料の変形を CAE 解析で表現するため、引張試験データからゴム材料の変形を表現する材料構成式をカーブフィッティングにより決定した。今回の NBR 材では、Mooney-Rivlin 2 パラメータ・モデルが最適な材料構成式であった。
- ② 製品を  $\phi 50 \text{ mm}$  ( $R=25 \text{ mm}$ ) の円筒曲面に接触した時の変形解析を行い、周期的なひずみ分布が生じることを確認した。
- ③ 製品を  $\phi 50 \text{ mm}$  ( $R=25 \text{ mm}$ ) の円筒曲面に接触した時の DIC 変形測定を行い、CAE 変形解析と合致することを確認した。