

薄膜押し込み試験を用いた超弾性材料のエネルギー関数 同定についての研究

Energy function identification of hyperelastic materials using thin film indentation test

精密工学専攻 63号 宮本颯太
Miyamoto Ryuta

1. 緒言

人間や環境に優しい、人工筋肉に見られるソフトなアクチュエーターの開発には、ゴムの様な超弾性材料の変形挙動を詳しく知る必要がある。そのためには、2軸試験により、様々な変形と荷重の関係を求める必要がある。これまでに様々な超弾性材料に関するエネルギー関数が提案されて来ているが、それを使うためには実験によるパラメーターの決定が必要である。単軸引張試験によるパラメーターの決定は行われているが、このデータだけでは、複雑な変形挙動をシミュレーションすることは難しい。しかし、2軸の試験は特殊な装置が必要であることと、複数回の測定が必要であることから、通常は行われていない。そこで、簡単な装置で、1回の測定で2軸の試験と同等の測定ができ、簡便にエネルギー関数の測定ができないかという考えに至った。そこで、本研究では、薄い円板試験片の押し込みによる2軸試験を簡便に行う装置を作成し、その結果を用いて有限要素法を用いてエネルギー関数の同定を行う。

2. 基礎理論

2.1 2軸ストレッチ

超弾性体円盤の中心は等2軸引張、円周部は1軸拘束、1軸引張の状態となる。さらに、円盤の半径方向の位置において、様々な2軸状態をとる。この試験によって得られるプロファイルと荷重の情報は、等2軸、1軸拘束を含む様々な2軸に対する変形形状を含んでいる。この結果を用いることで、Ansysによる有限要素解析による超弾性体のエネルギー関数のパラメーターの同定解析を行い、エネルギー関数を求める

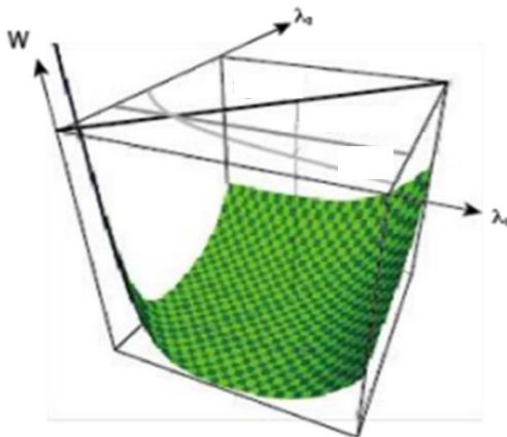


Fig1.energy function

2.2 エネルギー関数

超弾性材料の構成式はひずみエネルギー関数を用いて表現される。今回使用したひずみエネルギー関数を示す。

Neo-Hookean model

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (1)$$

Mooney-Rivlin model

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

Ogden model

$$W = \sum_{i=1}^3 \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) \quad (3)$$

Yeoh model

$$W = \sum_{i=1}^3 C_i (I_1 - 3)^3 \quad (4)$$

ここで、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は主ストレッチであり

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = (\lambda_1 \lambda_2)^2 + (\lambda_2 \lambda_3)^2 + (\lambda_3 \lambda_1)^2 \quad (5)$$

である。パラメーターの個数は、1,2,6,3である。これらのパラメーターを与えることで、有限要素法により、薄膜の押し込みの計算を行うことができる。

3. 押し込み試験

今回薄膜ゴム円盤を固定して押し込み試験を行うために円盤を固定する土台を作成した。土台の下面にプロファイル測定機を固定させるのだが、この固定する位置は可変式になっている。また、下面にあるこのプロファイル測定器を固定する台だが、つまみがついておりこれによってプロファイル測定器の位置を微調整を行うことが可能である。この縦横の位置を調整することによってプロファイル測定器からのレーザー光がしっかりと反射できるようになる。ここで、本実験ではゴム膜までの高さは、設置場所から455mmであり、レーザーの照射口からの高さがプロファイル測定器の基準高さの380mm近くとなっている。

押し込み試験の概要としては、Fig2のように薄膜ゴム(超弾性体)の円板の円周を固定し、万能試験機に取り付けた押し込み棒で中央部を押し込む。さらに、ロードセルにより押し込み荷重を測定する。円板下部からライン型のレーザ変位計(LJ-X84000, キーエンス)により、円板底面の形状を計測する。押し込んだとき、円板の中心は等2軸引張、円周部は1軸拘束、1軸引張、すなわち単純せん断の状態となる。

また、円盤の半径方向の位置においては、単純引張を含む様々な2軸状態をとる。これによって、この試験によって得られる変形形状と荷重の結果は、等2軸、1軸拘束を含む様々な2軸に対する変形形状を含んでいる。板厚2mmのゴム試験片の外周を直径50mmの穴の開いた厚さ10mmのアルミ板の上にのせ、その上部から、リング状のアクリルの挟み具により外周を固定している。そして、直径14.6mmの球形の圧子により、ストロークスピード10mm/minで押し込み試験を行っている。

Fig3に、押し込み量と荷重との関係を示す。実線で負荷時を、点線で除荷時の結果を示してある。図より、除荷時の荷重は、負荷時に比べかなり小さくなっている。これより、使用しているゴム材料は、顕著な粘弾性効果を示すことがわかる。

Fig4に、種々の押し込み量に対する試験片下部から測定した変形形状を示す。最初の負荷時における種々の荷重に対する変形形状を示してある。これらのデータから超弾性材料と考えたときのエネルギー関数のパラメーターを同定する。

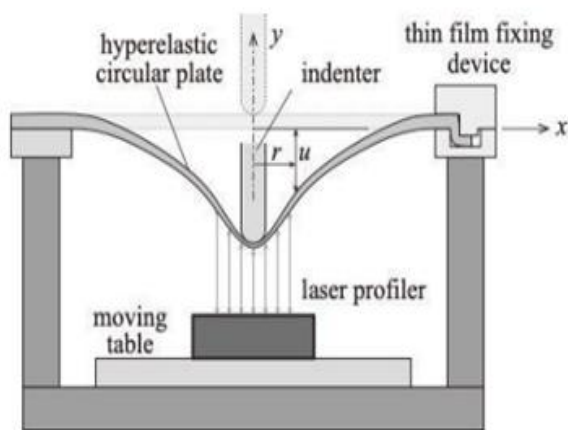


Fig2. Indentation tester

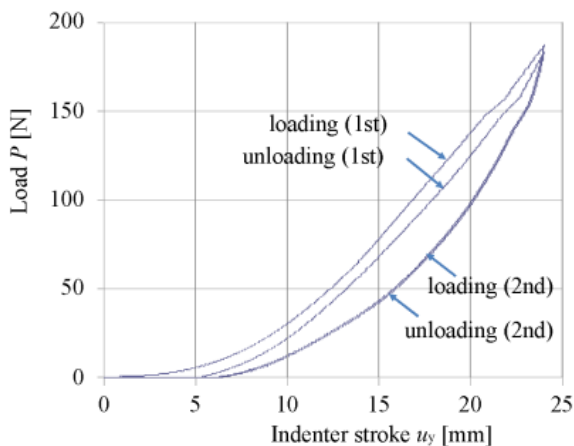


Fig3. Relationship between applied stroke and load P

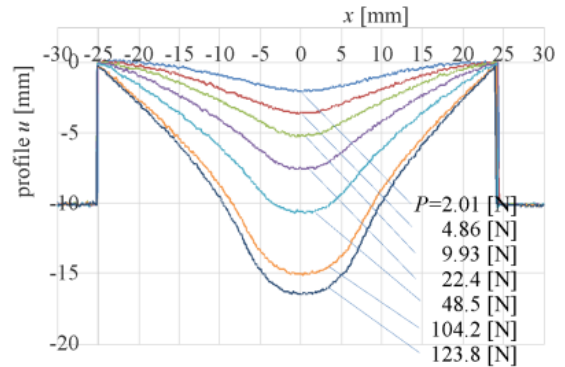


Fig4. Measured profiles with various applied load P

4. 薄膜押し込みシミュレーション

まず、今回の押し込み試験で使用した円盤側面はリング状の溝に、突起のある円形リングをはめ込むことで固定している。溝へのはめ込みにより、円盤試験片は半径方向に引張を受けている。そこで、有効半径より8mmながい円盤モデルを制作し余分な部分の下面の垂直方向変位を固定し、円盤側面に半径方向外向きにわずかな初期変位をあたえた。このモデルを使用して2で示したひずみエネルギー関数を使用することで計算を行った。通常の押し込み試験では、押し込み量と荷重の関係のみしか測定されないためパラメータ同定に円盤下面のプロファイルの測定値を反映させるために初期位置と押し込み荷重の関係をフィティングポイントにした。これを使用し測定データとシミュレーション値をフィッティングさせた。

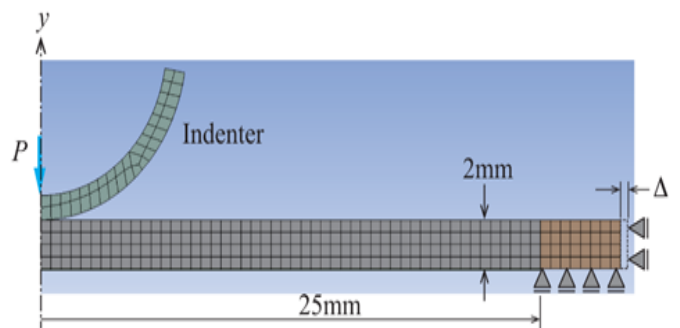


Fig5.FEM model

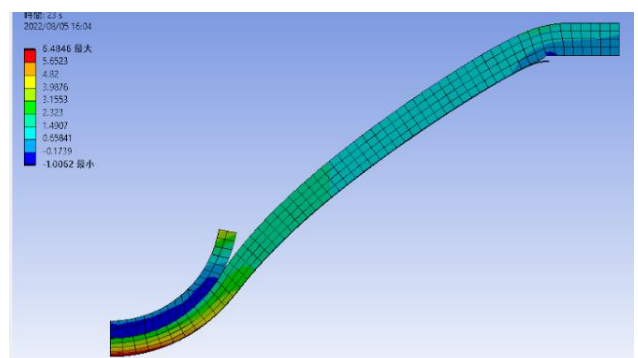


Fig6.stress distribution

Fig6 から最大応力の生じる箇所は、押し込み部分の下端に集中していることがわかる。

5. 材料定数の同定

プロファイルの測定データとシミュレーション値の二乗平均差 S を最小にするようにひずみエネルギー関数のパラメータ同定を行った。二乗平均差が最小になるような最適化をルーティンを組むことで材料パラメータ同定をした。今回使用したひずみエネルギー関数については2.基礎理論で述べた4つの関数であり、それぞれ材料パラメータの数も異なっている。

Fig5 で示されている Δ に関してはシミュレーションを行う際に円盤側面に半径方向外向きに初期変位を与えることでより押し込み試験の環境に近づけるように与えた。以下に結果を示す。

Table1. Determined parameters

Neo-hookean		Mooney-Rivlin	
C_{10} [MPa]	1.038	C_{10} [MPa]	0.7612
-	-	C_{01} [MPa]	0.2176
S_{error}	0.3955	S_{error}	0.3889

Table1 からパラメータ数が多いエネルギー関数のほうが S の値が小さくなっていることがわかる。

次に、Ogden Model について以下に示す。

Table2. Determined parameters (Ogden model)

Ogden	
μ_1 [MPa]	0.9710
α_1	3.5711
μ_2 [MPa]	0.005917
α_2	12.58
μ_3 [MPa]	-0.05350
α_3	-4.321
S_{error}	0.3772

また、Yeoh model についても同様に材料パラメータを示す。

Table3. Determined parameters (Yeoh model)

Yeoh	
C_{10} [MPa]	0.1817
C_{20} [MPa]	-0.002585
C_{30} [MPa]	0.0003782
S_{error}	0.3812

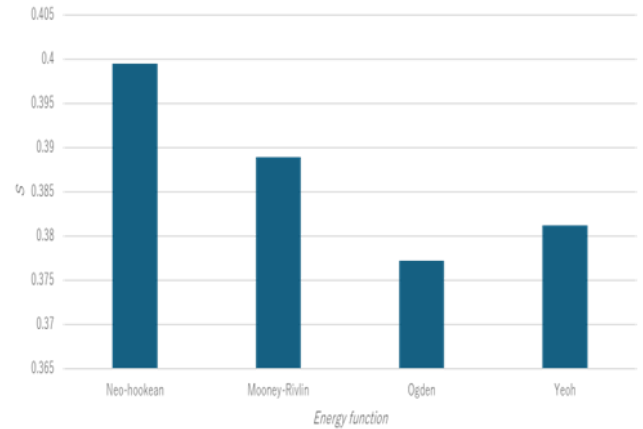


Fig8.LSM

以上の結果より Neo-hookean → Mooney-Rivlin → Yeoh → Ogden の順にパラメータが多くなるにしたがって S の値が小さくなっていることがわかる。これによりこの順番で精度がよいエネルギー関数が求められていることがわかった。

次に、通常の押し込み試験では、押し込み量と荷重の関係しか測定されない。パラメータ同定に円板下面のプロファイルの測定値を反映させるために、中心からの距離 $r=0, 5, 7.5, 10, 15, 20$ [mm] の6箇所における、円板プロファイル、すなわち、下面から測定した初期位置からの距離 u と、押し込み荷重 P との関係性をフィティングポイントとする。

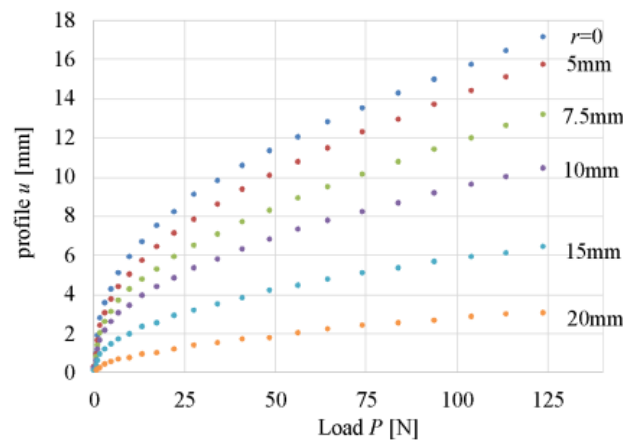


Fig9. Relationship between load P and profile u at the fitting points.

この下面から測定した初期位置からの距離 u と押し込み荷重 P との関係と上記で示したエネルギー関数の同定結果をフィッティングさせた図を以下に示す。

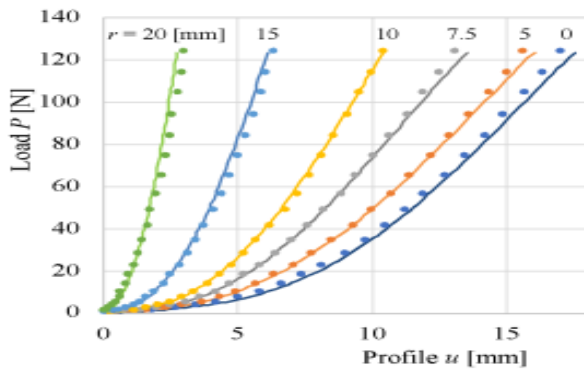


Fig9.(a) Neo-Hookean model

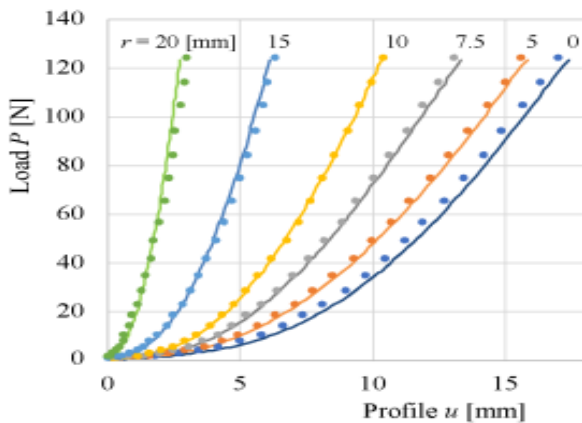


Fig9.(b) Moony-Rivlin model

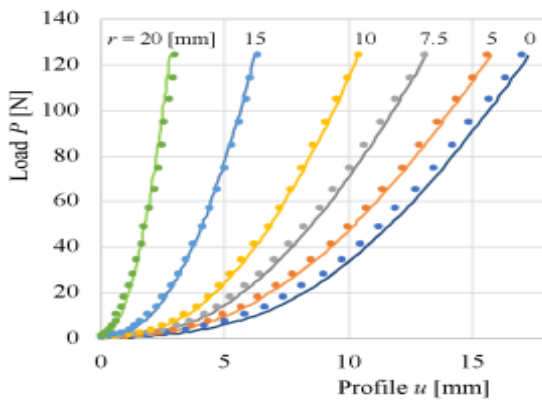


Fig9.(c) Ogden model

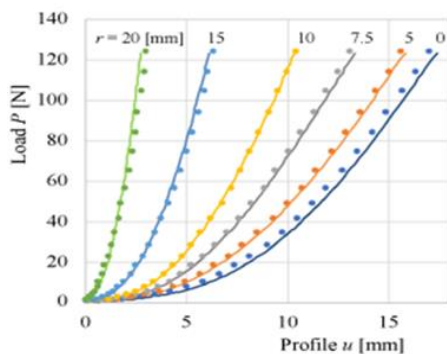


Fig9.(d)Yeoh model

結果を見てみるとそれぞれのエネルギー関数のモデルに対して同定したパラメーターを用いて計算して得られた値を図の実線で示している。同定値より得られた値とフィティングポイントはほぼ一致していることがわかった。Ogden model に関してはほかのエネルギー関数の同定値に比べて高い荷重のところで測定値に近づいている。

6. 結言

今回押し込み試験機を使用して等2軸引張状態の変形形状を計測した。またこの試験によってプロファイルの情報を得ることができた。この結果をもとに有限要素シミュレーションを行うことで超弾性材料のエネルギー関数同定を行った。エネルギー関数の同定では測定値と有限要素法のシミュレーション結果の差の二乗平均差を最小にすることで4種類のエネルギー関数のパラメータの同定を行った。これによりこの4つのエネルギー関数の中で最もパラメータの数が多いOgden modelが最も精度が良いエネルギー関数だと同定することができた。

参考文献

- (1) 栗山正太郎, ゴムの伸長結晶化による長寿命化に関する研究
- (2) Pan, G.; Chen, M.; Wang, Y.; Zhang, J.; Liu, L.; Zhang, L.; Li, F. Hyper-Pseudo-Viscoelastic Model and Parameter Identification for Describing Tensile Recovery Stress-Strain Responses of Rubber Components in TBR. *Polymers* (2023), 15, 76.
- (3) David Roucou, Julie Diani, Mathias Brieu, Armel Mbiakop-Ngassa Springer Media B.V. (2019)