

# 固体推進薬の超弾性・粘弾性構造解析

○三上 晃, 荒船 国之 (株式会社IHIエアロスペース 基盤技術部)

Hyperelastic-viscoelastic structural analysis of solid propellants

Akira Mikami, Kuniyuki Arafune

(IHI AEROSPACE(IA) Co., Ltd. Technologies Development Department)

Key Words: Solid Propellant, Hyperelasticity, Viscoelasticity

## 1. 背景

固体推進薬はゴムとしての粘弾性特性を持つが、現状の有限要素モデルでは、荷重の変化時間から算出した線形な弾性率を、モデル全体に渡り一様として設計する[1]。しかし、振動場などでは各場所で運動状態が異なるので、弾性率を一律とするのは事実とやや異なるが、蓄積したデータや経験から差異を補っているのが現状である。そこで本研究では、より実現象に則した超弾性特性と粘弾性特性を考慮した材料モデルを適用して、構造解析を実施する。解析対象はHTPB系推進薬である。HTPBは基本的にはゴムの機械的特性を有するが、酸化剤や助燃剤などの粒子が混ぜ込んであるため、一般的なゴムとは特性がやや異なる部分もある。

## 2. 固体推進薬の構造的特徴

固体推進薬は、金属に比べて高い破断伸びを持つ超弾性特性を示す。すなわち、応力-ひずみ線図が非線形となる。また、時間に依って応力が緩和する粘弾性特性を持ち、剛性や強度がひずみ速度に依存する。更に温度-時間の等価性を持ち、温度変化を時間変化に換算できる。その他にも非圧縮性、マリネズ効果、永久ひずみといった様々な性質も併せ持つので、これらの性質が構造解析を極めて複雑なものにしている。

## 3. 従来手法と本手法の比較

### 3.1 従来手法

固体推進薬の構造設計では、まずは温度とひずみ速度をパラメータとした定ひずみ速度引張試験を実施し、応力-ひずみ線図を取得する。同データより、シフトファクタ・緩和弾性率・応力強度・ひずみ強度のマスターカーブを作成する。そして、緩和時間や換算ひずみ速度を元に、推進薬の場所に寄らず一意に等価弾性率を算出し、静的な構造解析を実施する。ここで、複数の荷重イベント（例えば熱荷重と圧力荷重）が存在する場合には、イベント毎にひず

み速度が異なるので弾性率が異なり、解の重ね合わせができない。そのため、荷重イベント毎に応力強度・ひずみ強度に対する安全余裕(MS)を算出し、MSを複合させて評価している。

### 3.2 本手法

本研究の構造解析では、汎用有限要素法ソフトABAQUSを使用する[2]。

固体推進薬が有する粘弾性特性は、粘性部分と弾性部分から成る。粘性特性は緩和弾性率マスターカーブをPRONY級数で近似してインプットする。また、時間-温度等価性があると見なせるのでシフトファクタをWilliams-Landel-Ferry (WLF)式で近似しインプットする。これは線形粘弾性の材料モデルとなる。弾性部分には超弾性特性を使用する。ABAQUSでは多項式形式、Mooney-Rivlin形式、Ogden形式など様々なものが用意されており、推進薬の応力・ひずみ線図のパターンにより、適切な形式を選択する必要がある。

従来手法は線形静解析である一方、本手法は非線形動解析であり、時々刻々の応力-ひずみ応答を計算するものである。

図3-1に粘性部分の従来手法のイメージを示す。線形弾性では、各時刻の応力増分は時間に対して減ることはない。これに対し本手法のイメージを図3-2に示す。粘弾性では、各時刻の応力増分は時間に対して減少し、ある時刻の応力は減少する応力増分の和である。

図3-3に弾性部分の従来手法と本手法のイメージを示す。従来手法では応力とひずみの関係が線形であるが、本手法は超弾性であり、その関係が非線形である。

## 4. 要素試験および同定結果

### 4.1 要素試験

固体推進薬の各種マスターカーブ取得のための定ひずみ速度引張試験について説明する[3][4]。図4-1に試験セットアップを示す。温度、引張速度をパ

ラメータとした試験データより図4-2(a)～(d)に示す各種マスターカーブを得る。弾性率と応力強度は、荷重負荷時間が短いほど（ひずみ速度が速いほど）高くなっていることがわかる。ひずみ強度は、ひずみ速度に対してやや複雑な挙動を示す。

#### 4.2 同定結果

3項で述べた粘性特性のPRONY級数による近似や超弾性特性の多項式形式などによるひずみエネルギーポテンシャルの近似では、非常に多くの係数を決定しなければならない。これらの係数は、超弾性と粘弾性を用いた応力-ひずみ線図をExcel内で表現し、汎用最適化ソフトIsightに組み込んで、定ひずみ速度引張試験結果の応力-ひずみ線図との差分を最小にするよう決定した。

そして、同定した係数を用いて定ひずみ速度引張試験を模擬したFEM解析(ABAQUS)を実施し、解析と試験の応力-ひずみ線図を確認する。

同定結果の応力-ひずみ関係を図4-3(低温)、図4-4(常温)、図4-5(高温)に示す。

このように試験結果を高ひずみ領域までよく再現できる解析の材料モデルを獲得した。

#### 5. 強度評価手法

従来手法では、解析で得られた応力と、図4-2(c)、(d)に示した荷重イベントのひずみ速度に対する、応力強度マスターカーブとひずみ強度マスターカーブとの比較で評価する。一方、本手法の解析結果は時刻歴で得られるので、振動や衝撃の応答では応力が高い状態でひずみ速度がゼロになる瞬間がある。そのため、従来手法と同様な評価をすると、ひずみ速度が低く強度が小さい値に対して高い応力を評価することになり、容易に破壊するという結果が得られてしまう。これは事実と異なると思われる。そこで本手法では、図5-1に示すようにひずみエネルギー密度によって評価する。例は、実際の荷重イベント（昇温後に衝撃負荷など）を想定し、予ひずみを与えて緩和させた後に、定ひずみ速度で再び引張り破断させた結果である。図5-2は、ひずみエネルギー密度-最大真ひずみの関係を示す破断包絡線に、定ひずみ速度引張りによって予変位を与え、ある時間緩和させた後に破断まで再び定ひずみ速度で引張った結果を、重ねてプロットしたものである。本書での検討は常温のみのデータであるが、複雑な経路を辿る時刻歴応答も、ひずみエネルギー密度を用いた破断包絡線を用いて、評価できる目途が立った。

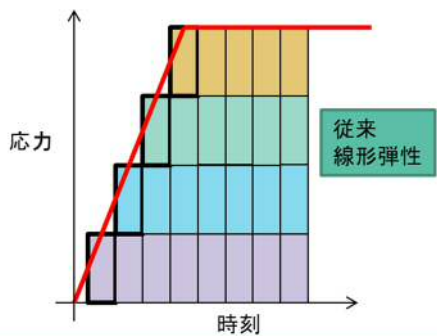
#### 6. まとめ

超弾性と粘弾性を、ひずみエネルギー・Prony級数・Williams-Landel-Ferry(WLF)式として材料モデルに導入し、実荷重イベント・実時間に沿った解析が可能なFEMモデルを獲得した。高ひずみ領域まで踏み込む合理的な設計に役立つと考える。

今後の課題は、ひずみエネルギー密度-最大真ひずみによる破断包絡線で強度評価が可能であるか、温度をパラメータとして検証し、強度評価手法を確立することである。

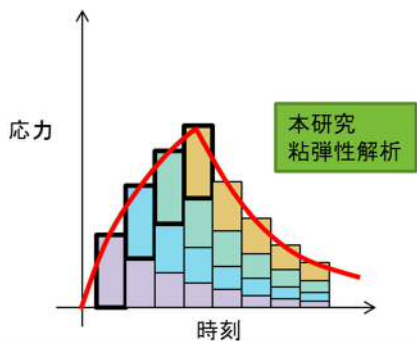
#### 7. 参考文献

- [1] Sutton, “Rocket Propulsion Element (8th Edition)”, 2010
- [2] Dassault Systèmes, “Abaqus 6.13 Documentation”, 2013
- [3] 火薬学会規格, “PT-007 単軸引張計測方法”
- [4] 火薬学会規格, “PT-008 単軸定ひずみ速度引張計測方法”



各時刻の応力増分は、時間に対して減ることではない。

図3-1 粘性部分の従来手法のイメージ



各時刻の応力増分は、時間に対して減っていく。ある時刻の応力は、減少する応力増分の和である。

図3-2 粘性部分の本手法のイメージ

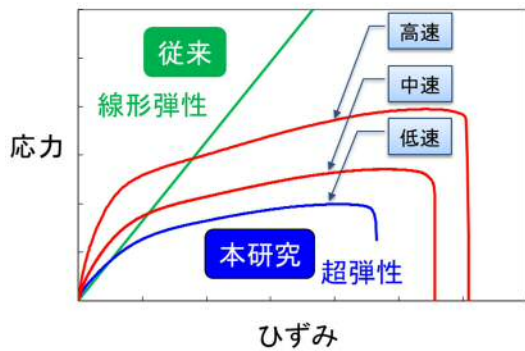


図3-3 弾性部分の従来手法と本手法のイメージ



図4-1 定ひずみ速度引張試験セットアップ

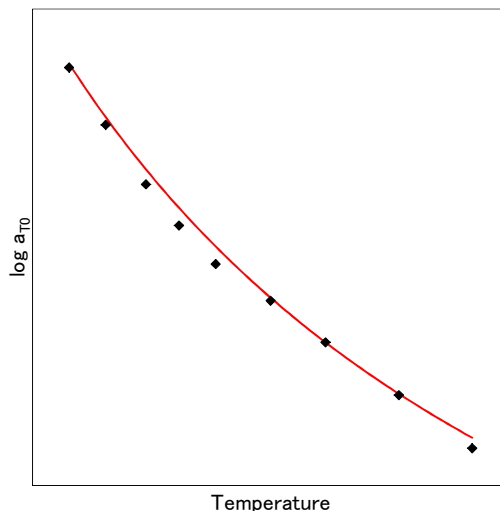


図4-2(a) シフトファクタマスターカーブ

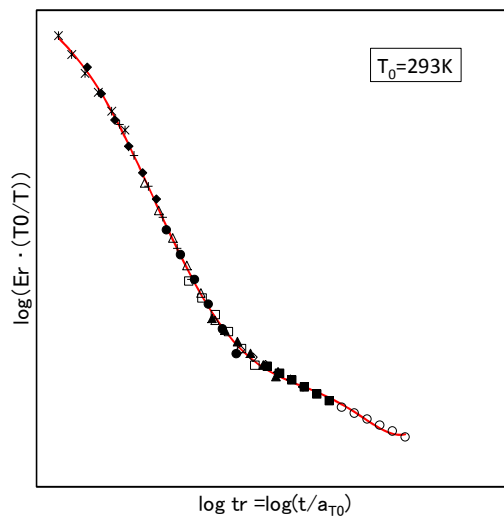


図4-2(b) 緩和弾性率マスターカーブ

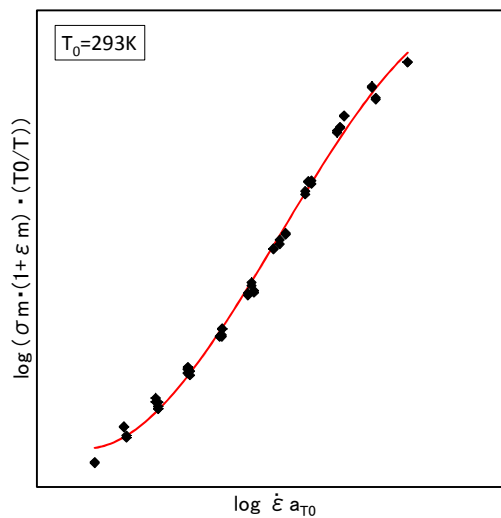


図4-2(c) 応力強度マスターカーブ

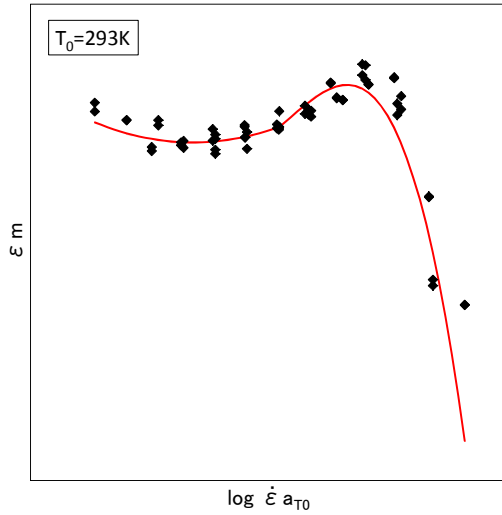


図4-2(d) ひずみ強度マスターカーブ

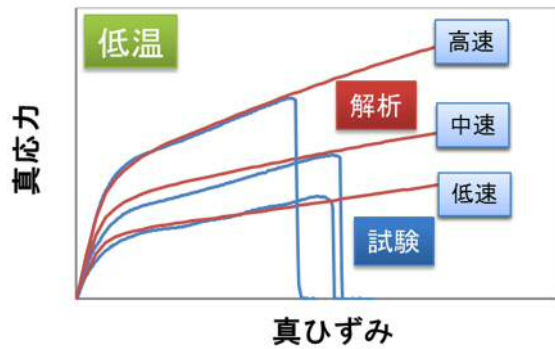


図4-3 低温での応力-ひずみ関係

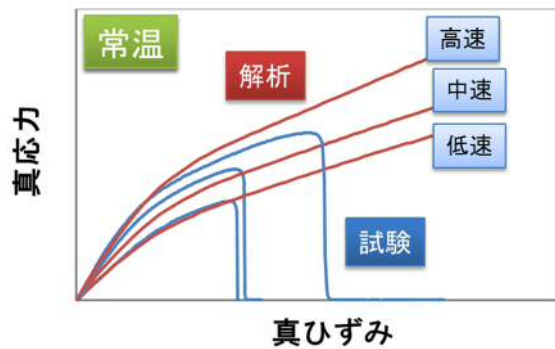


図4-4 常温での応力-ひずみ関係

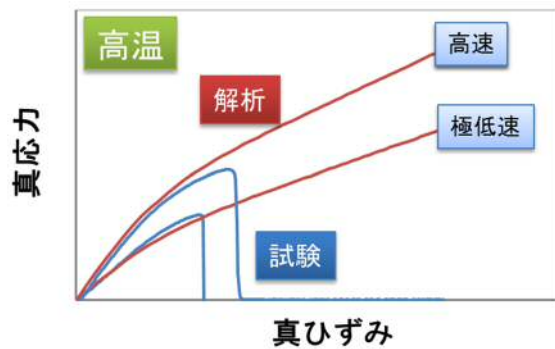


図4-5 高温での応力-ひずみ関係

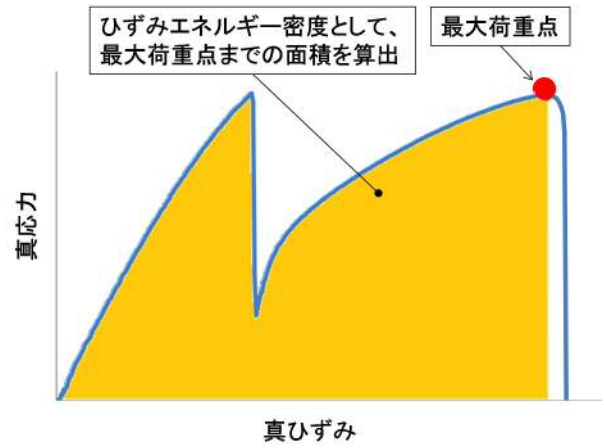
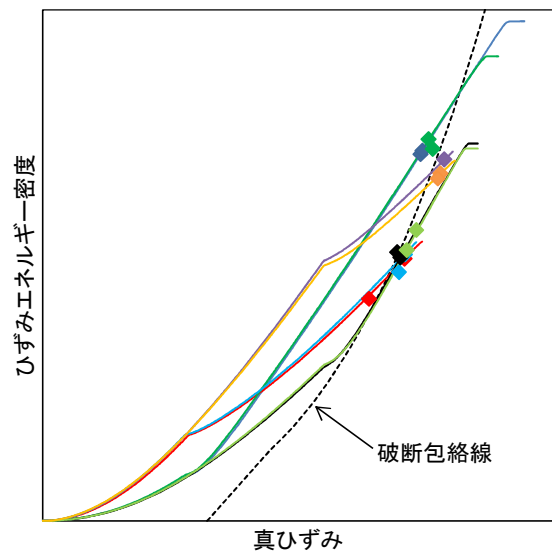


図5-1 ひずみエネルギー密度の算出



- ◆予ひずみ：小、保持時間：短、低速→高速
- ◆予ひずみ：小、保持時間：短、高速→低速
- ◆予ひずみ：小、保持時間：長、低速→高速
- ◆予ひずみ：小、保持時間：長、高速→低速
- ◆予ひずみ：大、保持時間：短、低速→高速
- ◆予ひずみ：大、保持時間：短、高速→低速
- ◆予ひずみ：大、保持時間：長、低速→高速
- ◆予ひずみ：大、保持時間：長、高速→低速

図5-2 ひずみエネルギー密度-最大真ひずみの破断包絡線の試験結果（常温）