

## 6.9. ロケット用ゴム系材料の構造解析と試験 －IA の取り組み－

株式会社 IHI エアロスペース  
荒船 国之 氏



IA文書番号: 69A-M-2015-348

第13回試験技術ワークショップ

## ロケット用ゴム系材料の 構造解析と試験

—IAの取り組み—

2015年12月18日

IHI AeroSpace

株式会社IHIエアロスペース

基盤技術部 基盤技術室  
担当者 荒船

Copyright © 2014 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

1

### はじめに



固体ロケットには、推進薬をはじめ多くのゴム系材料(エラストマ)が使用されているが、エラストマは超弾性・粘弾性といった金属とは異なる構造的特徴を持つ。

そこでIAでは、エラストマに各種要素試験を行い、非線形領域も含めて試験結果と整合するFEM解析用モデルを構築、サブモデル解析・試験との比較に繋げている。

本発表では、上記に対するIAの取り組みについて紹介するとともに、エラストマ構造解析の今後の方向について示す。

## 目次



1. 固体ロケットにおけるゴム材料
2. ゴム(エラストマ)の構造的特徴
3. エラストマの構造解析と試験
  - エラストマの構造解析
  - 試験との比較
4. 今後の課題
5. まとめ



株式会社IHIエアロスペース

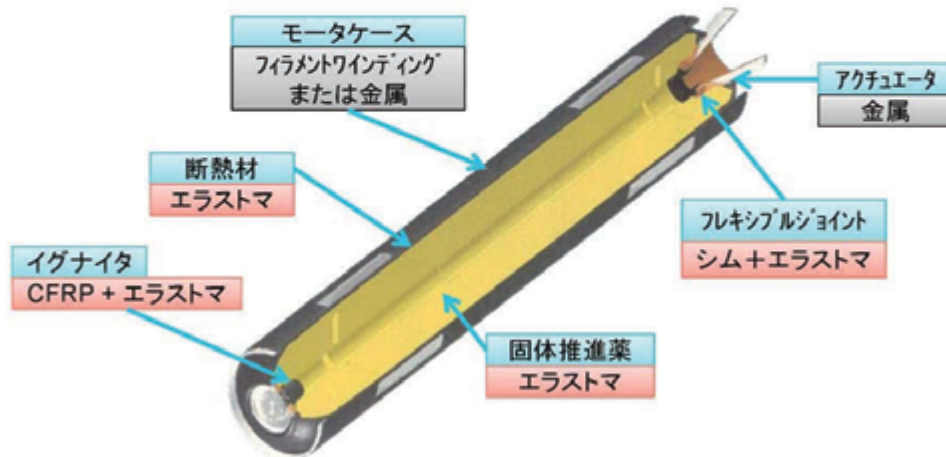


## 固体ロケットにおけるゴム系材料

## 固体ロケットにおけるゴム系材料



固体ロケットの主要部品は以下の通り。  
多くの部品が、ゴム(エラストマ : Elastomer : Elastic-Polymer)できている。



Copyright © 2015 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

5

IHI Aerospace

株式会社IHIエアロスペース



## エラストマの構造的特徴

Copyright © 2014 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

6

## エラストマの構造的特徴



エラストマは、金属と大きく異なる性質を持つ。

### 超弾性

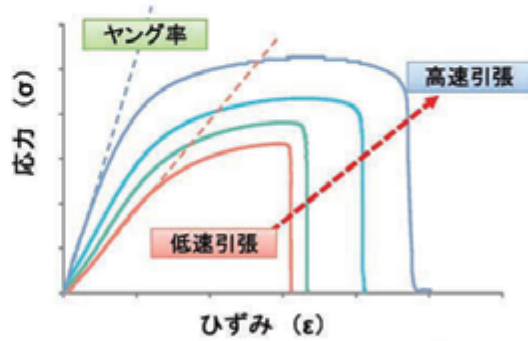
- 金属に比べて、高い破断伸びを持つ(数十%)。
- 応力・歪線図( $\sigma$ - $\epsilon$ 線図)が、非線形である。

### 粘弾性

- 歪速度によって、剛性が異なる。
- 時間によって、応力が緩和する。  
⇒クリープ



引張試験片



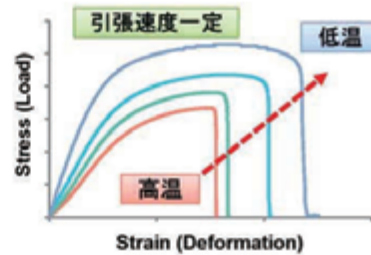
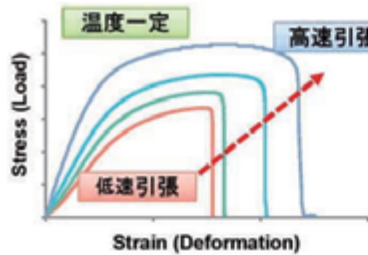
定ひずみ速度引張試験

## エラストマの構造的特徴



### 温度と時間の等価性

- 高分子では、高温短時間領域で観測される力学量が、低温長時間領域で観測されるそれと等価であることが現象的に認められる。



### 非圧縮性

- 体積変化が小さい(ポアソン比が0.5に近い)。

### マリンズ効果

### 永久ひずみ



## エラストマの構造解析と試験

Copyright © 2014 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

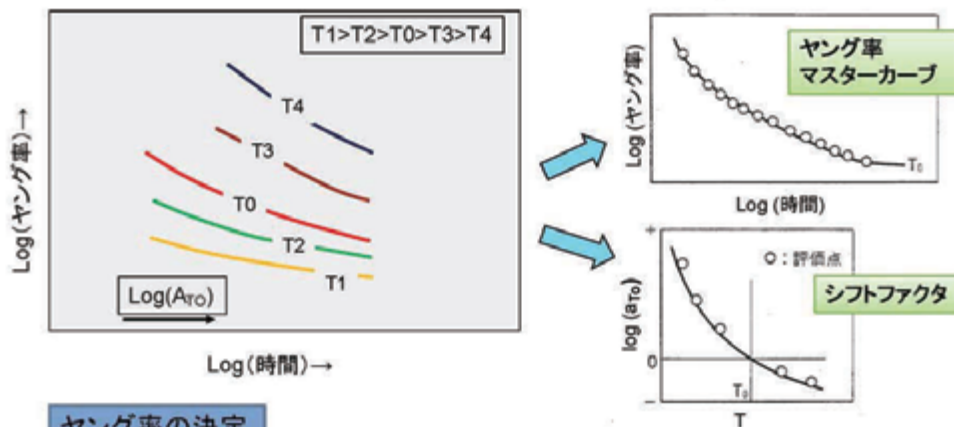
9

### エラストマの構造解析（従来手法）



#### 定はずみ速度引張試験の整理

- 温度と引張速度を変えた、数多くの引張試験を実施。
- 各温度について、（線形範囲で）時間（歪速度）vs ヤング率のグラフを作成。
- 異なる温度でのグラフをシフトさせると、基準温度のグラフと重なる。シフト量の算出。



#### ヤング率の決定

- 荷重イベントの速度や温度環境に合わせ、ヤング率を決定。

構造解析

Copyright © 2015 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

10

株式会社IHIエアロスペース



## エラストマの構造解析（超弾性+粘弾性 解析）



超弾性+粘弾性 解析  
構造特性を、FEMに直接入力する。

どうやって、入力するのか？

特性を「弾性部分」と「粘性部分」に分解

- 弾性部分: 荷重を除去すると元に戻る。
- 粘性部分: 元に戻らない。

「弾性部分」⇒超弾性の適用

- 線形弾性: ひずみ vs 応力  $\sigma = E \cdot \varepsilon$
- 超弾性: 偏差伸長比 vs 歪エネルギー

- ↓
- 多項式形式
  - Mooney-Rivlin形式
  - Neo-Hookean形式
  - Ogden形式、.....etc

剪断変化によるエネルギー

体積変化によるエネルギー

$U = \sum_{i=1}^N C_i (\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^e - 1)^{2i}$  多項式形式

$U$ : 参照単位体積あたりの歪エネルギー  
 $N$ : 材料パラメータ  
 $C_i$ : 温度に依存する材料パラメータ  
 $D_i$ : 温度に依存する材料パラメータ

$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$   
 $\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{-2} + \bar{\lambda}_2^{-2} + \bar{\lambda}_3^{-2}$

$\bar{\lambda}_i = J^{-1/3} \lambda_i$ : 偏差伸長比  
 $J$ : 全体積比  
 $J^e = \frac{J}{J^{\alpha}}$ : 弾性体積比  
 $J^{\alpha} = (1 + c^{\alpha})$ : 熱膨張による体積比  
 $c^{\alpha}$ : 線形熱膨張歪

## エラストマの構造解析（超弾性+粘弾性 解析）



「粘性部分」⇒Prony級数とシフトファクタで表す。

**基礎式**

剪断変化による  
応力

体積変化による  
応力

$$\sigma(t) = 2 \cdot \int_0^t G(t-t') \cdot \dot{\varepsilon} \cdot dt' + I \cdot \int_0^t K(t-t') \cdot \dot{\phi} \cdot dt'$$

応力=「弾性率×歪速度×時間増分」の積分

弾性率が時刻変化する

**Prony級数**

$$G(t) = G_0 \cdot g_R(t)$$

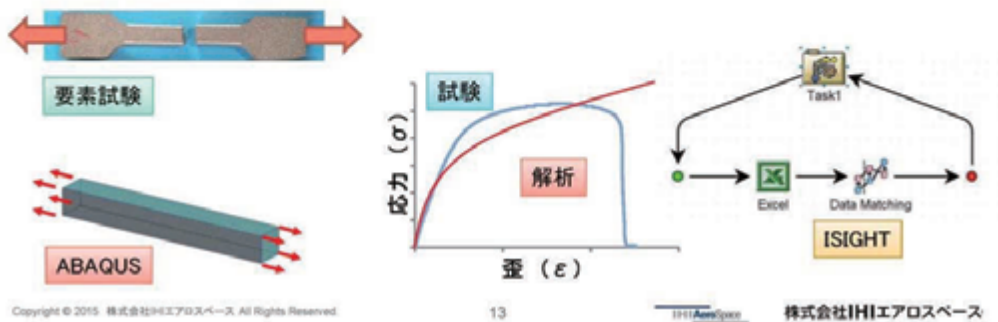
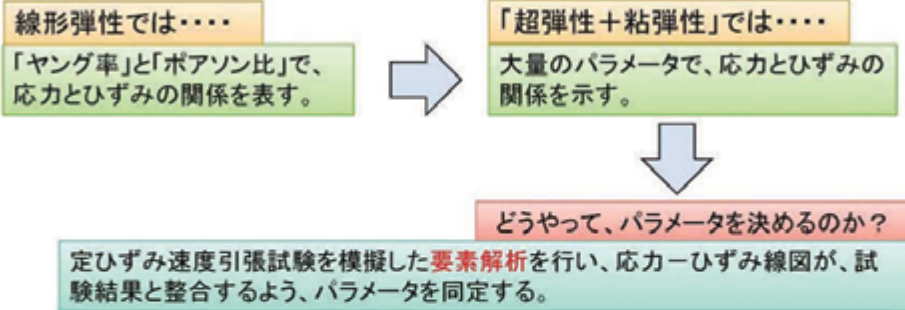
$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N \bar{g}_i^p \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i^G}} \right)$$

$N, \bar{g}_i^p, \tau_i^G$ : 材料定数  
 $G_0$ : 瞬間剪断弾性率  
 $G$ : 剪断緩和弾性率

**シフトファクタ**

$$\log(a_{T_i}) = -\frac{C_1(\theta - \theta_0)}{C_2 + (\theta - \theta_0)}$$

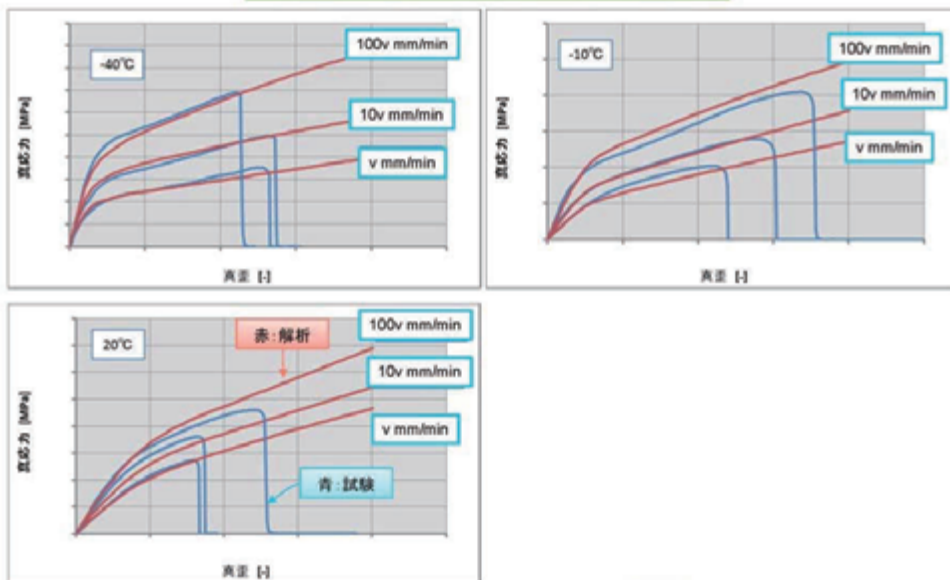
### エラストマの構造解析（超弾性+粘弾性 解析）



### エラストマの構造解析（超弾性+粘弾性 解析）



#### 定歪速度引張 試験結果と解析結果の比較





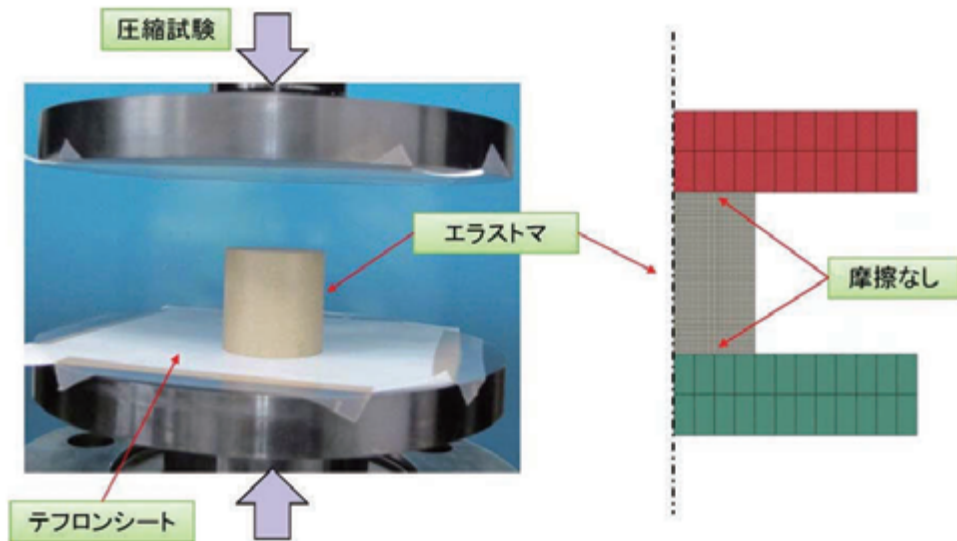
## 試験との比較

Copyright © 2014 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

15

## 試験との比較（圧縮試験）

引張試験で同定したパラメータが、圧縮試験でも整合するか？



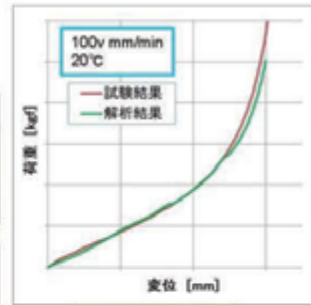
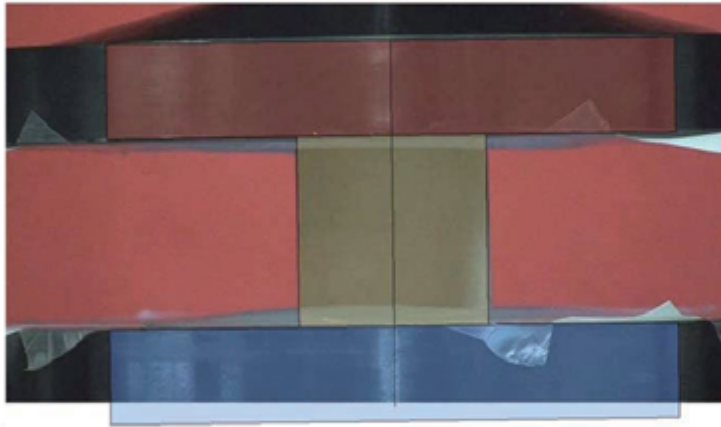
Copyright © 2015 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

16

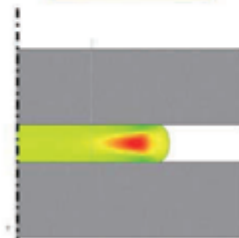
IHI AeroSpace

株式会社IHIエアロスペース

### 構造解析と試験（圧縮試験）



変位 vs 荷重

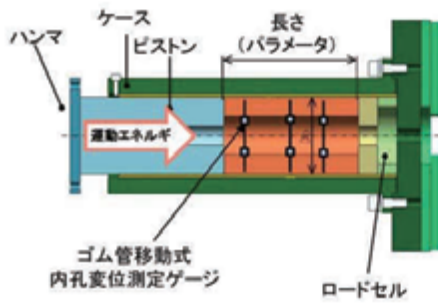


最大主ひずみ分布

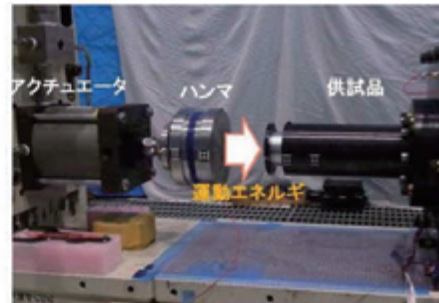
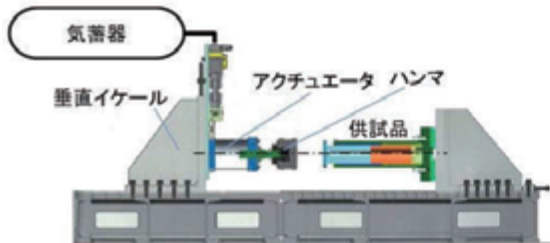
### 試験との比較（大ひずみ試験）



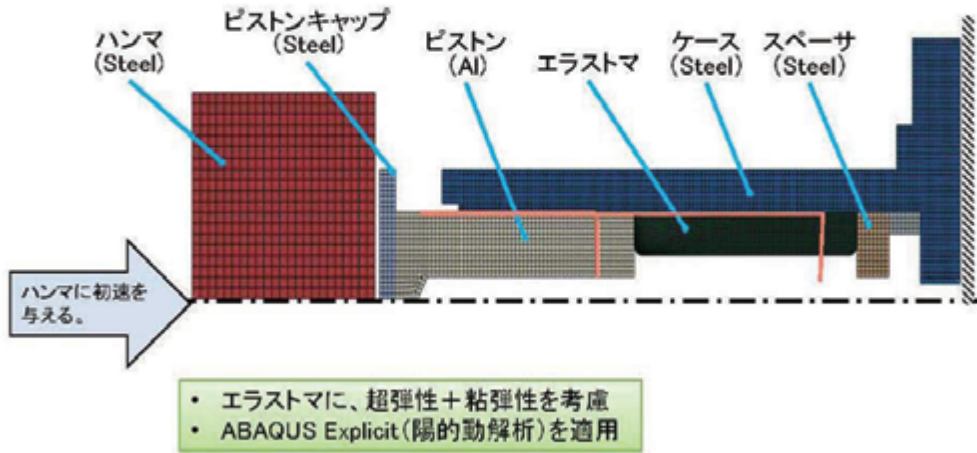
エラストマに、衝撃的大ひずみ与える。



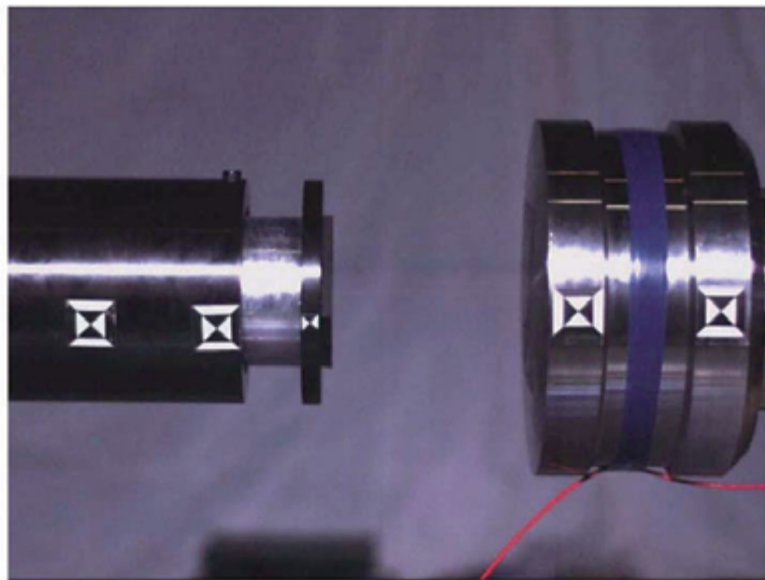
エラストマ



### 試験との比較（大ひずみ試験）



### 試験との比較（大ひずみ試験）

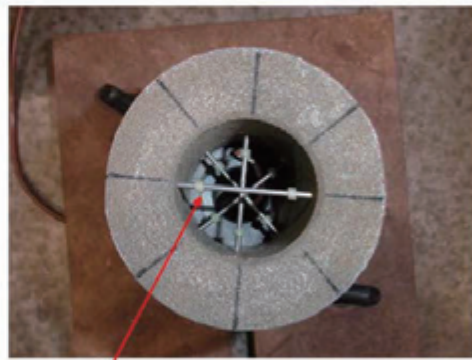
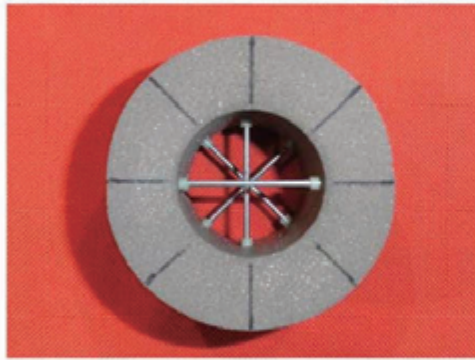


### 試験との比較（大ひずみ試験）



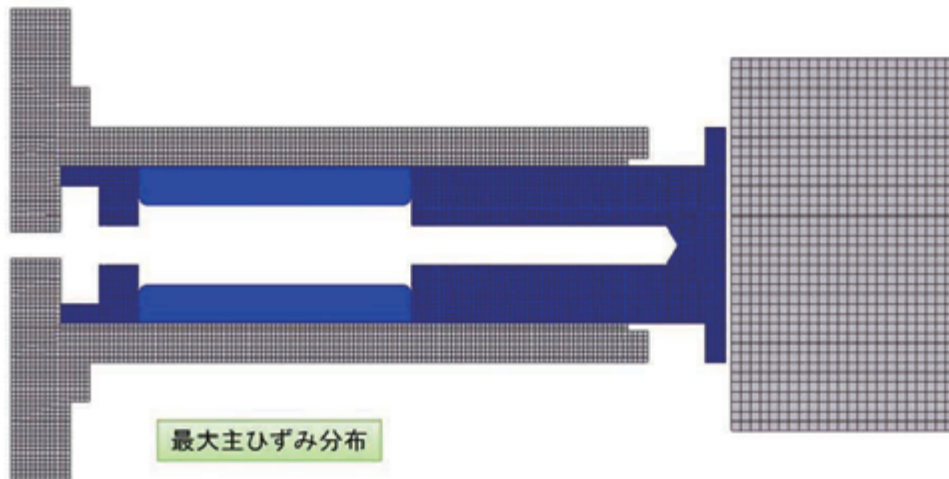
試験前

試験後



ゴム管の移動量で、内孔の最大変位量が計測できた。

### 試験との比較（大ひずみ試験）

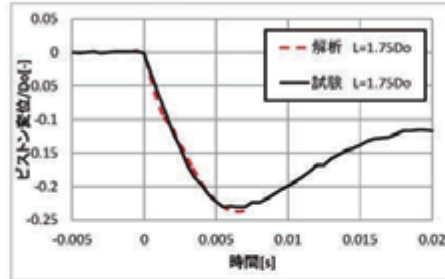




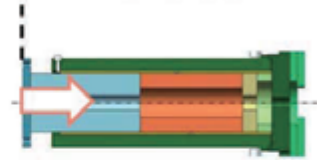
試験との比較 (大ひずみ試験)



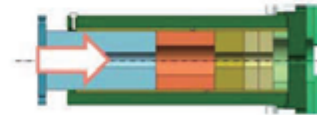
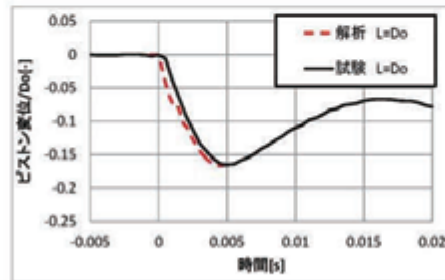
L=1.75Do



ピストン機軸方向変位



L=Do

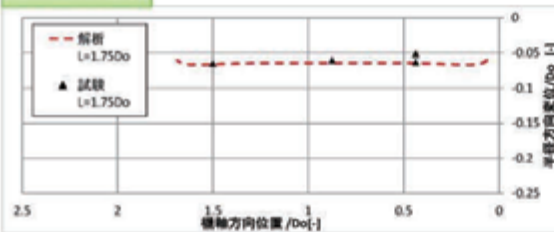


ピストンの機軸方向変位履歴 : 各供試品についてよく一致した。

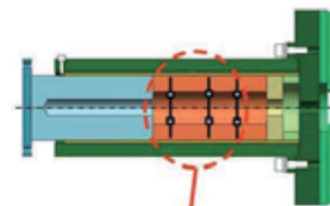
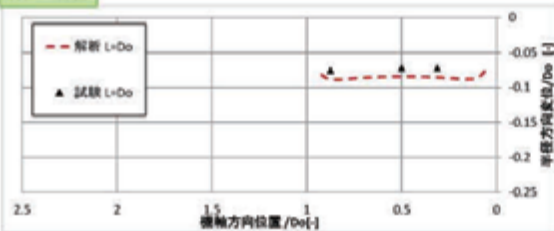
試験との比較 (大ひずみ試験)



L=1.75Do



L=Do



内孔部半径方向最大変位

内孔部半径方向変位 : 解析結果の方が若干大きめ



# —今後の課題—

Copyright © 2014 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

25

## 今後の課題

材料パラメータ値には、どのような物理的意味があるのか？



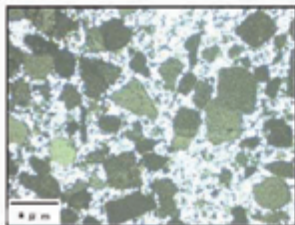
物理的意味は不明(無し)。ただ試験と解析を合わせただけ。



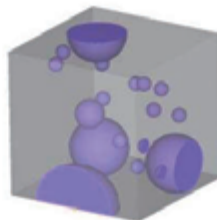
### マルチスケールモデリング

- 固体推進薬では、粒子と燃料の剥離が $\sigma - \epsilon$ 線図の非線形を生むと考えられる。
- 粒子と燃料の剥離をモデル化し(マイクロ解析)、全体モデルの剛性に反映(マクロ解析)。

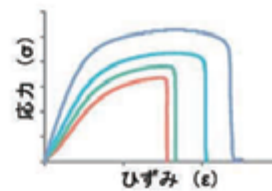
### マイクロ現象



### マイクロ解析



### マクロ解析



Copyright © 2015 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

26

## まとめ

Copyright © 2014 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

27

## まとめ

ロケット用ゴム系材料(主に固体推進薬)の構造解析と試験について、IAでの取り組みを紹介した。

### ・今までの構造解析

定ひずみ速度引張試験結果から求めた、ヤング率マスタカーブとシフトファクタより、粘弾性評価を実施。⇒ただし線形静解析である。

### ・現在の取り組み

定ひずみ速度引張試験結果( $\sigma - \varepsilon$ 線図)と整合する、超弾性・粘弾性特性を同定し、FEMに直接インプット。⇒非線形動解析の適用。

サブモデル試験を行い、試験結果と解析結果が整合することを確認した。

### ・今後の課題

マルチスケールモデリングを用いて、マイクロ解析とマクロ解析を融合し、超弾性特性の物理的意味を探る。

Copyright © 2015 株式会社IHIエアロスペース All Rights Reserved.

28

ご清聴ありがとうございました



## 質疑応答

### 質問者① JAXA 宇宙輸送技術統括 宇治野様

基本的なところをご説明頂いたが、御発表内容がどのような問題に今後役に立っていくのか、実際の応用先をご紹介頂きたい。

### 発表者

宇宙用の固体ロケットではそれほど使用環境が厳しくない為、線形解析の範囲でも十分だと考える。他のロケットでは環境が厳しいものもあり、非線形の解析を行わなければあわせ込ができないので、そのような所に適用していく予定。

### 質問者② JAXA 環境試験技術ユニット 施様

推進薬は歪速度によって剛性特性が変わる。ロケットの場合、推進薬があるため、共振周波数が高ければ高いほど特性が変わっていく。固体ロケット全体の剛性は歪速度によってモデルを修正したり、試験をやり直したりすることはあるのか。

### 発表者

従来のやり方では、まずヤング率を仮定して固有振動数を算出し、その時間からマスターカーブを使ってヤング率を再算出する。これを何回か行って、固有振動数を収束させる。一方、超弾性と粘弾性の材料特性を直接 FEM に入れると、複素固有値解析をすることができる。何例かやってみたところ、両者でおおよそ同じような値が得られた。