

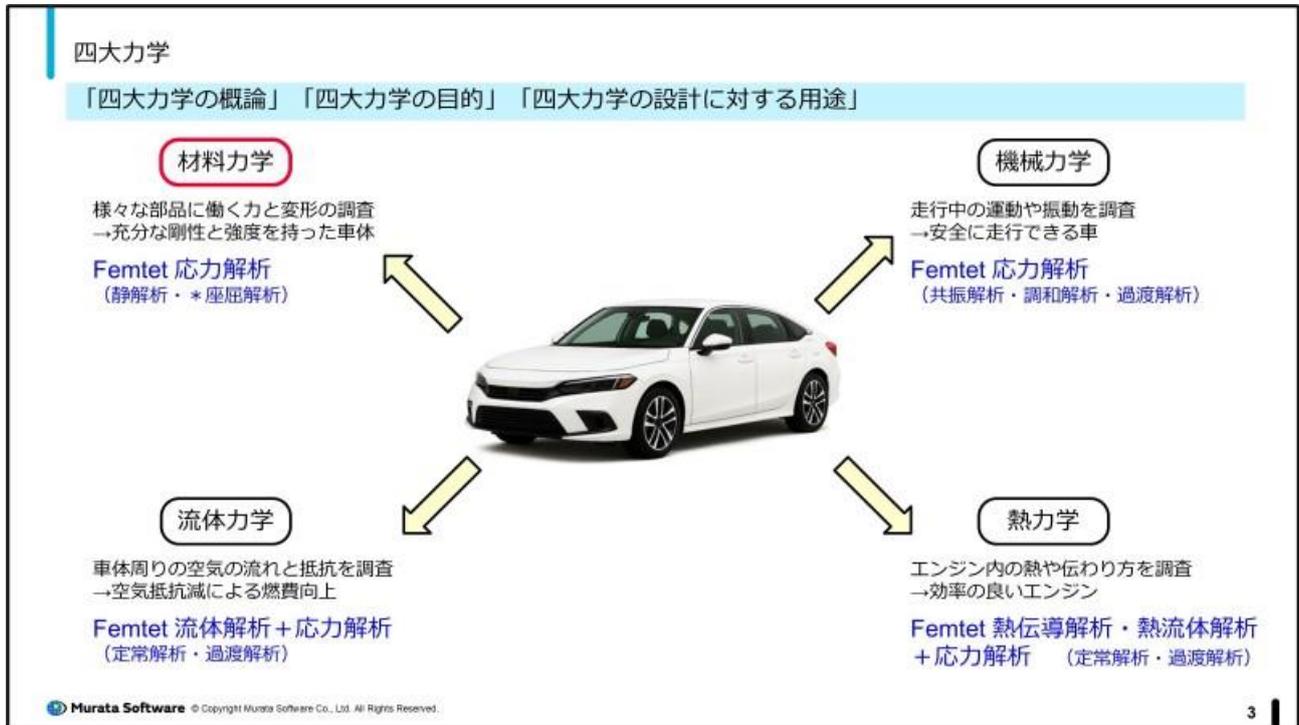
# Femtet 応力解析入門（材料力学編）

## 目次

### ・座学

1	四大力学	P. 3
2	構造物の剛性	P. 4
3	材料力学の全体像	P. 5
4	材料力学の一般的な適用範囲	P. 6
5	「SSカーブ（応力歪曲線）」から読み取れる加工現象（弾性回復・加工硬化等）	P. 7
6	設計における材料力学の活用事例	P. 8
	・Femtet 応力解析事例「LIBセルの缶底膨れ比較解析」	
7	①目的・概要	P. 9
8	②解析条件	P. 10
9	③底面形状違いによる LIB セル用缶の変位・最大主応力比較	P. 10 – P. 11
10	④パラメトリック解析	P. 11
11	結論	P. 12
12	参考文献	P. 12

## 1. 四大力学



機械工学は、力学分野のファミリーとして次の4つがあります。それは、「材料力学」「機械力学」「流体力学」「熱力学」です。

### ・材料力学

固体材料が外力を受けた際の変形や応力の状態を解析する学問です。部材の各部分にどのような力が作用し、どの程度の変形や破壊が生じるかを、理論と実験の両面から調べます。

### ・機械力学

材料を変形しない剛体として仮定し、機械構造や機構における力と運動の関係、振動や制御等の力学現象を解析する学問です。

### ・流体力学

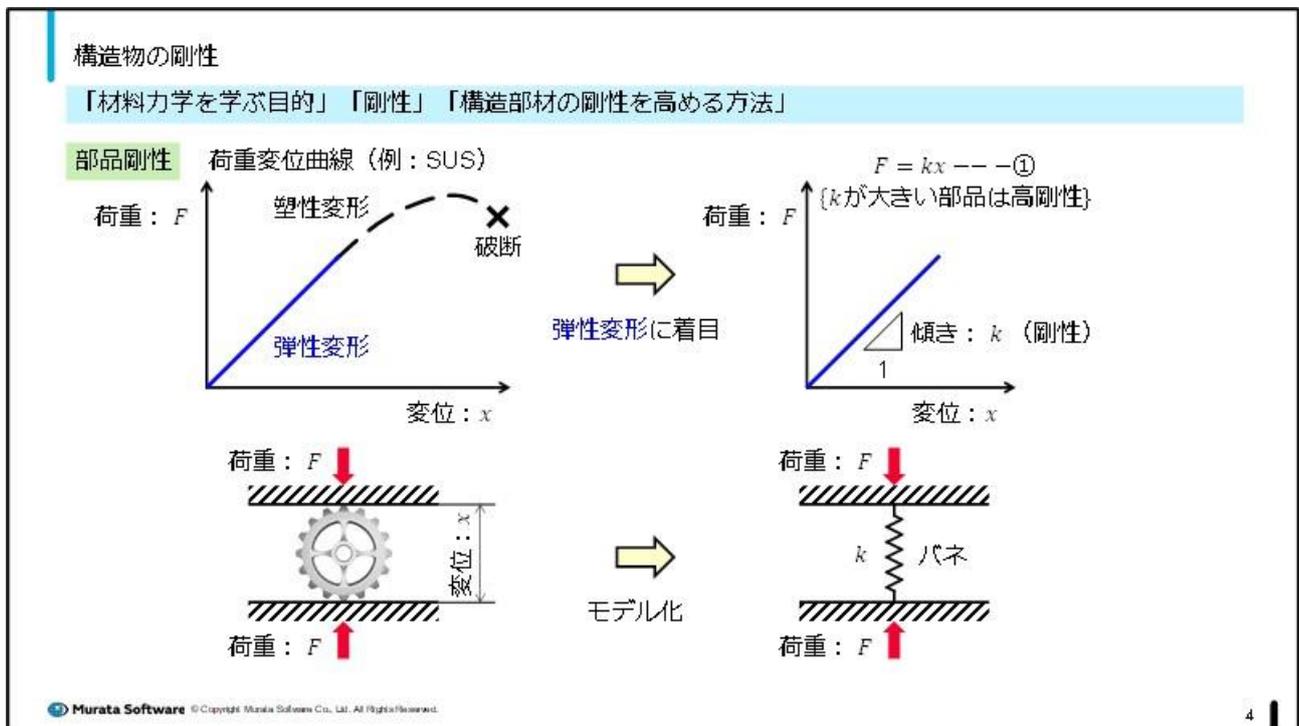
自由に変形する流体（液体や気体）の運動や流れを解析する学問です。流れに関する学問と管路・噴流・翼列といった流体機械設計に関わる応用技術までを体系的に扱います。

### ・熱力学

熱やエネルギーの状態変化、移動、仕事への変換について体系的に扱う学問です。物体間の「熱のやり取り」や、「エネルギー変換効率」などを数値で記述します。熱力学は大きく分けて次の分野があります。熱や仕事はエネルギーの形態変化として相互に変換される「熱力学第一法則」所謂、「エネルギー保存則」、熱は高温から低温に自然に移動し、エネルギー利用には\*不可逆性が伴う「熱力学第二法則」、そして、熱がどのような経路と速度で移動するかを扱う「熱移動学」所謂、「伝熱学」があります。

\*不可逆性とはエントロピー増大を意味します。

## 2. 構造物の剛性



材料力学を一言で言えば、「構造部材の剛性を解析するための道具」です。構造部材は外力が加わると必ず変形します。この外力（荷重）を $F$ 、変位量を $x$ とすると、材料の弾性域では次式が成立します。

$$F = kx \text{ --- ①}$$

この式は、荷重と変位量の間に関係があることを表しています。ここでの定数 $k$ が、構造部材の「剛性」を示します。

### ・バネの公式との類似

式①は、皆さんご存じのバネの公式と同じ形です。バネに外力 $F$ を加えたときの伸び量を $x$ とすると、 $k$ は「バネ定数」として定義され、同様の関係 ( $F = kx$ ) が成立します。つまり、剛性（バネ定数）が大きい構造ほど、同じ外力に対して変位量が小さいということです。

### ・弾性域内でのみ成立

ここで重要なのは、式①が成り立つのは弾性域内の場合だけです。弾性域であれば、外力を取り除くと部材は元の形状に戻ります。材料力学で取り扱う「剛性」とは、この弾性域での性質を指します。この点は非常に重要ですので、ぜひ覚えておいて下さい。

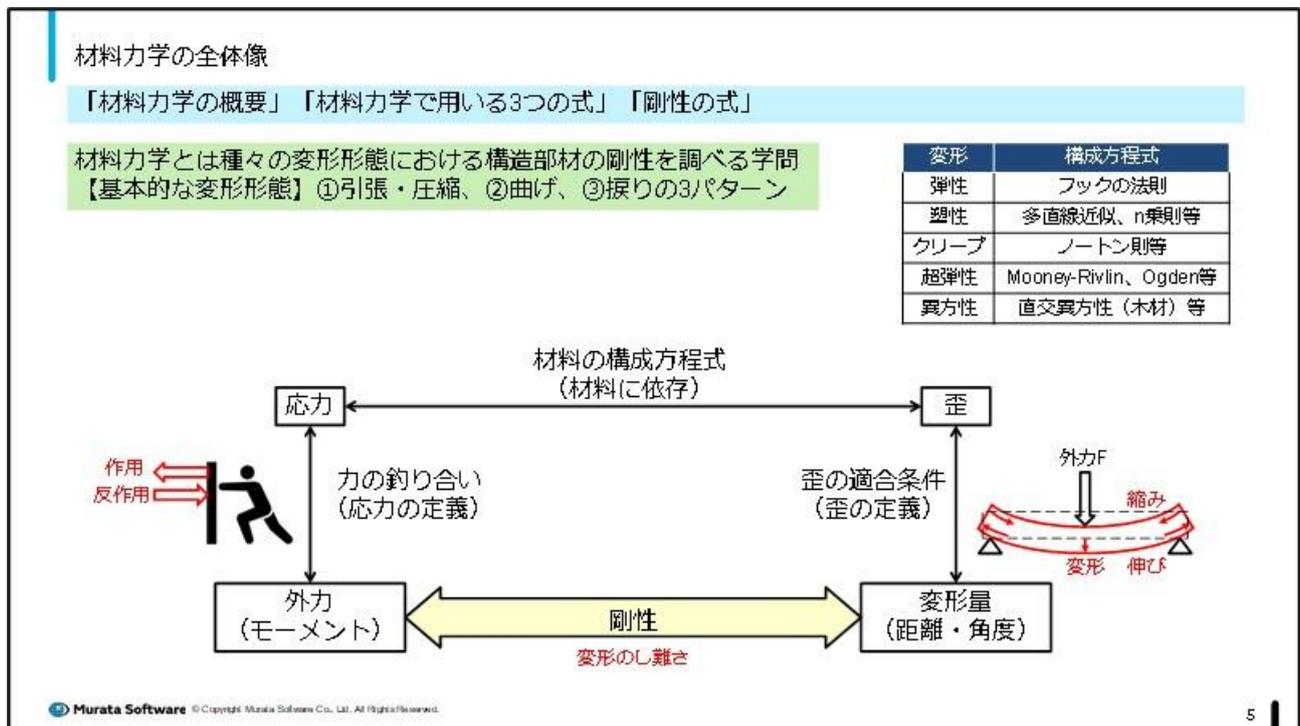
### ・現代設計における剛性の考え方

近年、性能向上や省資源の為、軽量化が強く求められています。少ない材料で、変形しづらい構造を実現することが設計の鍵です。そのためには、

- (1) 材料特性からのアプローチ（曲がりにくい材料の選定）
- (2) 形状からのアプローチ（断面形状や構造レイアウトの工夫）

の両面が必要となります。これを実現する設計者には、材料力学の確かな理解と応用力が不可欠です。

### 3. 材料力学の全体像



材料力学の全体像は、ここで示す図の通りです。実は、これだけが材料力学の基本構造なのです。材料力学とは、「あらゆる変形形態における構造部材の剛性を調べるための道具」です。設計者が高剛性の構造部材を作り出すために不可欠な知識であり、解析手法でもあります。構造部材の変形形態は、基本的に次の3パターンしかありません。

- (1) 引張・圧縮
- (2) 曲げ
- (3) 振り（ねじり）

複雑な負荷による変形もこの3つの組み合わせで表せます。要は、3変形について理解すれば、構造部材の剛性全てを解析できるわけです。よって、材料力学で扱う剛性は次の3種類になります。

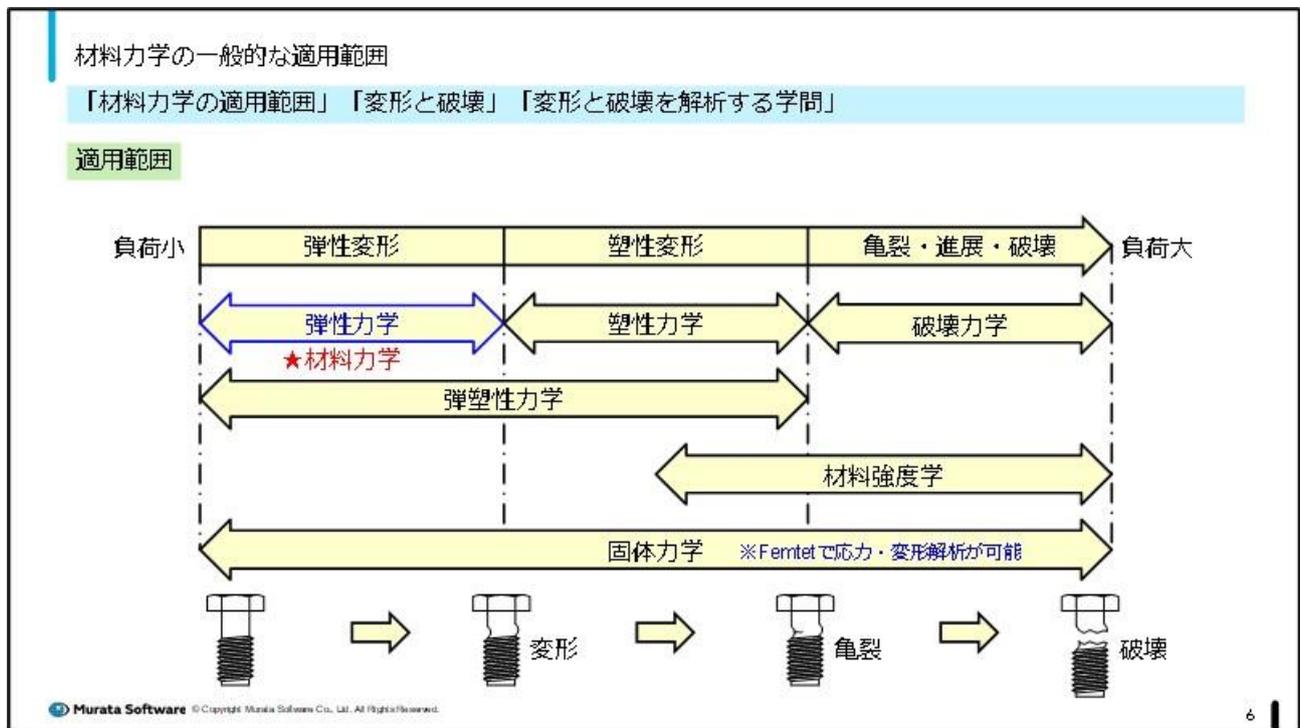
- (1) 引張・圧縮剛性
- (2) 曲げ剛性
- (3) 振り剛性

これらは、CAEシミュレーションを行う場合でも必須の基礎知識です。剛性とは、外力と構造部材の変形量の関係です。外力に対してどれだけ変形するかが分かれば、部材の剛性を評価出来ます。つまり、「外力→変形量→剛性」という流れを理解することが重要なのです。

その計算過程では3つの式が必要になります。

- (1) 作用・反作用の法則による力の釣り合い
- (2) 歪の適合条件と呼ばれている部材内部の総変形量と部材全体の変形量の釣り合い
- (3) 材料の構成方程式と呼ばれる応力と歪の関係式

#### 4. 材料力学の一般的な適用範囲



材料力学は、構造部材の設計において万能な道具なのでしょうか？実は、そうではありません。どのような学問や理論にも適用範囲があります。材料力学は「材料の変形が弾性域内である」という条件の下で成り立つ学問です。外力が非常に大きく、負荷を取り除いても元に戻らない塑性変形が生じる場合、材料力学は適用出来ません。

・材料力学の外側にある分野

(1) 塑性力学 (2) 破壊力学 (3) 弾塑性力学 (4) 材料強度学 (5) 固体力学

いずれも材料の変形や破壊を扱う学問ですが、それぞれ適用範囲が異なります。

・変形から破壊へのプロセス

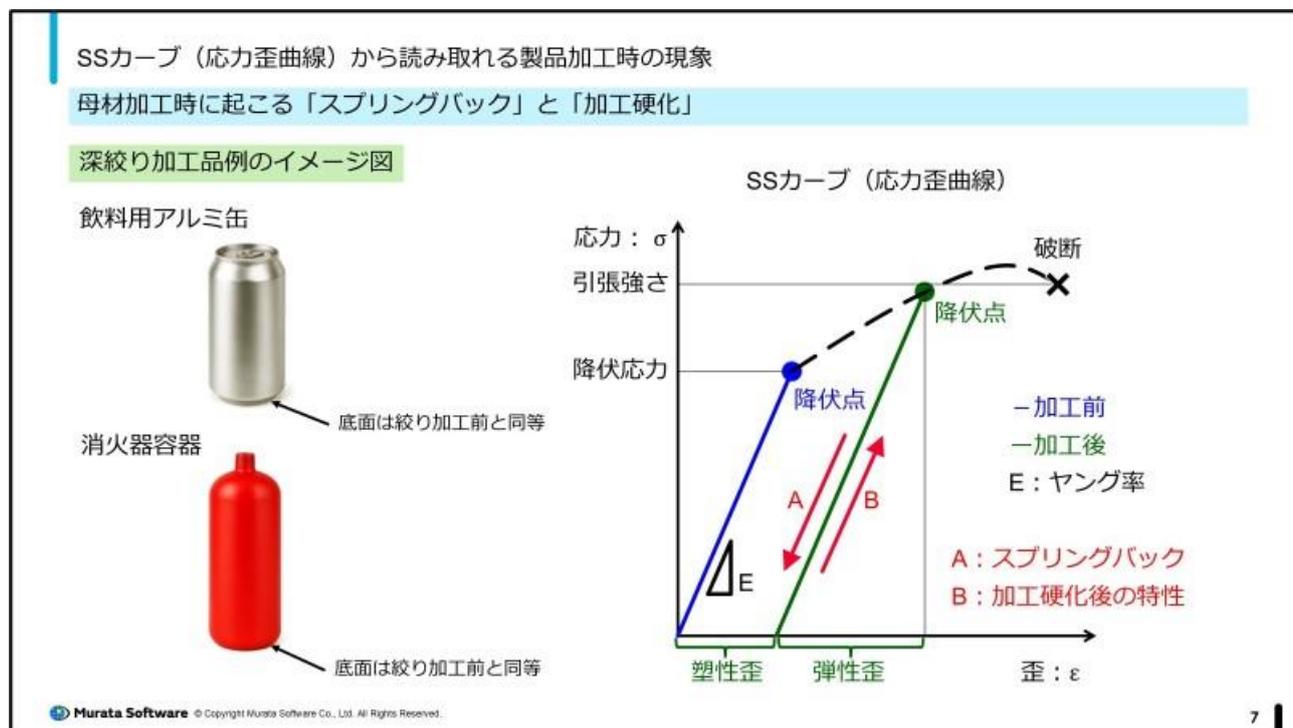
構造部材に外力を加え、その荷重を徐々に大きくしていく場合を考えてみましょう。

- (1) 負荷が小さい初期 → 弾性変形
- (2) 負荷が増す → 塑性変形 (座屈を含む場合あり)
- (3) 負荷がさらに増す → 亀裂の発生と進展
- (4) 最終段階 → 破壊

このプロセスに応じて、解析に使う「道具＝学問」は変わります。

- (1) 弾性変形を解析するのが 材料力学
- (2) 塑性変形を解析するのが 塑性力学 (塑性工学)
- (3) 破壊を解析するのが 破壊力学
- (4) 変形と破壊の理論を包括的に扱うのが 固体力学

5. 「SS カーブ（応力歪曲線）」から読み取れる製品加工時の現象



SS カーブ（応力歪曲線）から得られる材料の主なパラメータは、弾性率（ヤング率）・降伏応力・引張強さ・破断歪の4つです。弾性率は、材料力学において必須のパラメータで、材料がどれほど変形しにくいかを表します。降伏応力は、塑性変形が始まる応力の値です。設計者は、構造部材のあらゆる部分が外力によってこの値を超えないように設計する必要があります。一方で、自動車の燃料タンク・エンジンカバーや車体パネルのように、敢えて材料に降伏応力を超える荷重を加えて塑性変形させ、製品形状を作る技術があります。これを塑性加工と呼びます。

SS カーブグラフのAで示した位置、即ち塑性変形後に除荷すると、弾性変形分の歪は戻ります。この現象を弾性回復（スプリングバック）と呼びます。次にBで示すように再び負荷をかけると、除荷時の曲線に沿って応力が増加し、塑性変形が起こる前よりも降伏応力が高くなります。これを加工硬化と呼びます。加工硬化した材料は降伏応力が高くなり、硬度も増す反面、延性が低下し、より小さな歪で破断します。

例えば、深絞り加工品である「飲料用アルミ缶」や「消火器容器」のような部品は、絞りや曲げを施した部分で降伏応力が変化し、材料が局所的に硬く変質します。その為、CAEシミュレーション結果と実験結果を比較・検証する際には、加工硬化影響を十分に考慮することが非常に重要です。但し、破断歪が小さい材料では、加工硬化も少なくなる為、比較・検証時の影響は限定的になるということも記憶に留めておいて下さい。

## 6. 設計で活用される材料力学

設計で活用される材料力学

「材料力学は棒の力学」「材料力学修得のメリット」「計測にも役立つのが材料力学」

歪ゲージ・変位センサーの利用 <イメージ図>

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved.

8

極論を言えば、材料力学は、1本の棒に働く力によって、棒の変形を解析する「棒の力学」です。もちろん、現実の構造部材は複雑な形状をしており、材料力学だけで正確な答えが出せない場合もあります。しかし、剛性を左右する主要なパラメータについては、この「棒の力学」で導かれた基礎式によって解析が可能です。

・材料力学で出来ること

- (1) どのパラメータを変えれば剛性を高められるのか
- (2) 剛性を一定に保ちながら重さを最小にするための材料選定

・複雑形状の場合

形状が複雑な構造部材の変形挙動については、CAEシミュレーション技術を活用すれば容易に答えを得ることができます。但し、シミュレーションに用いる各パラメータ（荷重条件、拘束条件等）は人間が設定する為、材料力学の知識を持つ技術者が実施することをお勧めします。

・実測と材料力学

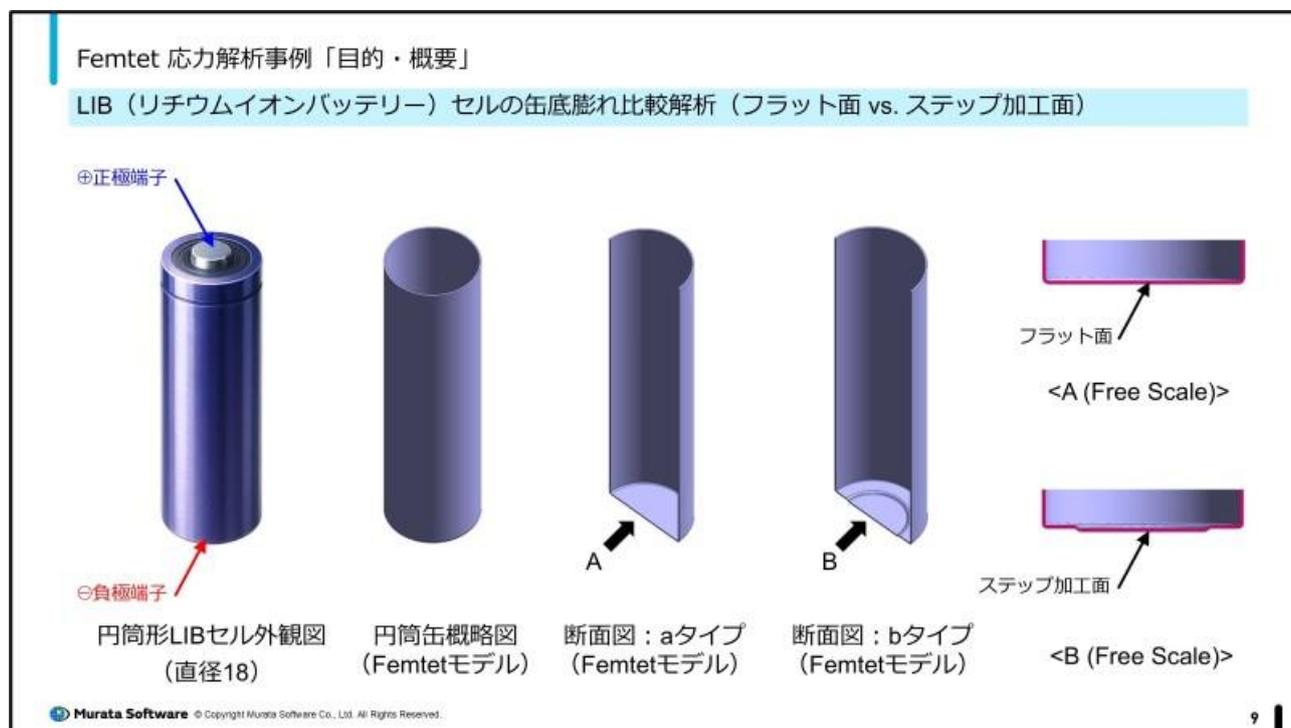
材料力学は、応力や歪の計測にも役立ちます。ここに示す図は、航空機載荷試験と自動車ボディの振り剛性測定のイメージ図です。実測結果をCAEシミュレーションと結びつける際にも、材料力学は有効な道具となります。

・ホワイトボディ試験

自動車ボディの振り剛性測定は、「ホワイトボディ」と呼ばれる状態で行われます。ホワイトボディとは、車体構造を構成する全ての部品を溶接で組み付けた、塗装前の車体のことです。

## 7. Femtet 応力解析事例「LIB セルの缶底膨れ比較解析」

### ①目的・概要



円筒形 LIB (リチウムイオンバッテリー) セルの製造ラインには、充放電工程があります。この工程には、次の 2 つの重要な目的があります。

- (1) \*SEI (Solid Electrolyte Interphase) 層形成による安全性確保
- (2) 性能の安定化と品質保証

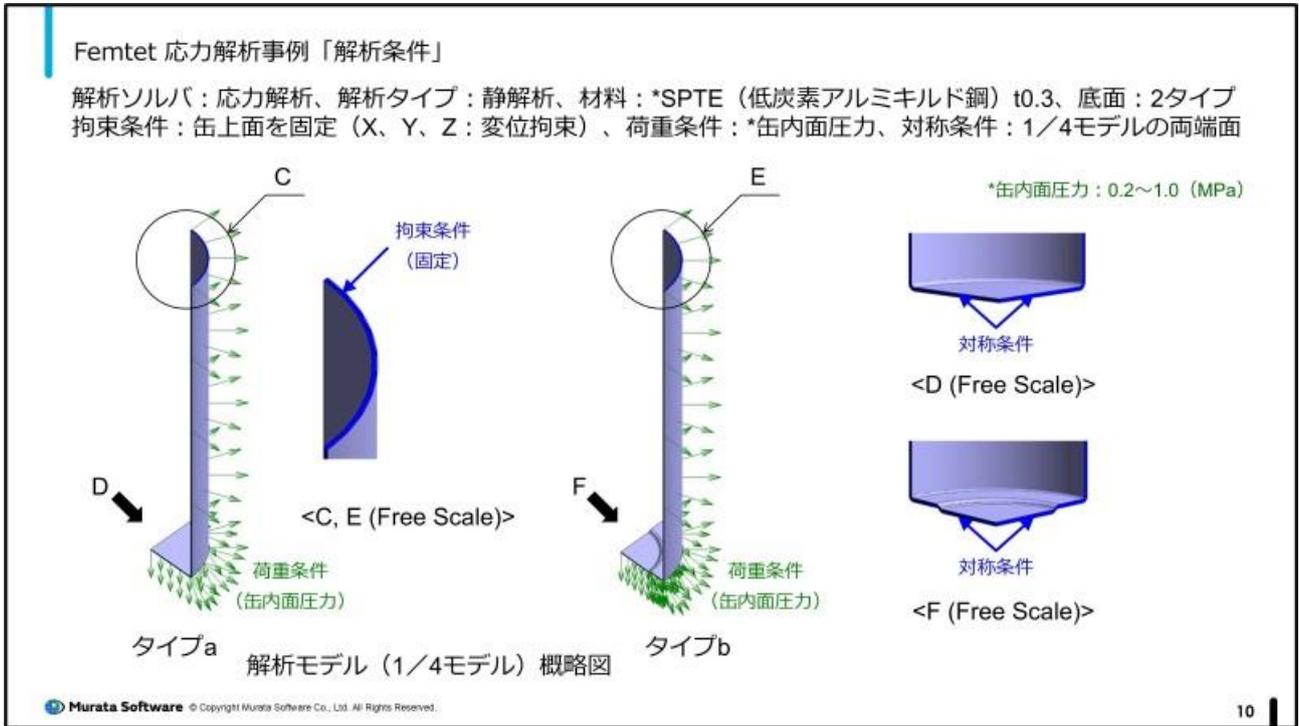
この工程を省略すると、電池の寿命・安全性・信頼性が大きく損なわれます。一般的に、充放電工程では、電解液や電極自身が酸化・還元されて分解することで、セル内部のガスが増加し、その結果缶底が膨らむ現象が発生します。満充電時に、缶底の膨らみが塑性変形するほど大きくなり、QC (品質管理) 検査工程や出荷前検査工程で正常な検査ができなくなった場合、重大な問題に発展する可能性があります。そこで、以下 2 通りの缶底形状における解析を行い、変位量や変位モードの違いを把握することで、缶、缶支持治具・検査治具等の設計構想や工程検査プロセスに反映することを目的とします。

- (1) フラット面
- (2) ステップ加工面

注) \*SEI 層 (Solid Electrolyte Interphase) は、「リチウムイオン電池の負極表面に形成される固体電解質界面層」です。この層は、電池の初期充放電時に電解液と負極材料 (通常はグラファイトなど) が反応して生成されます。SEI 層は、電池の内部反応を安定化させ、安全性や寿命を大きく左右する機能を持っています。

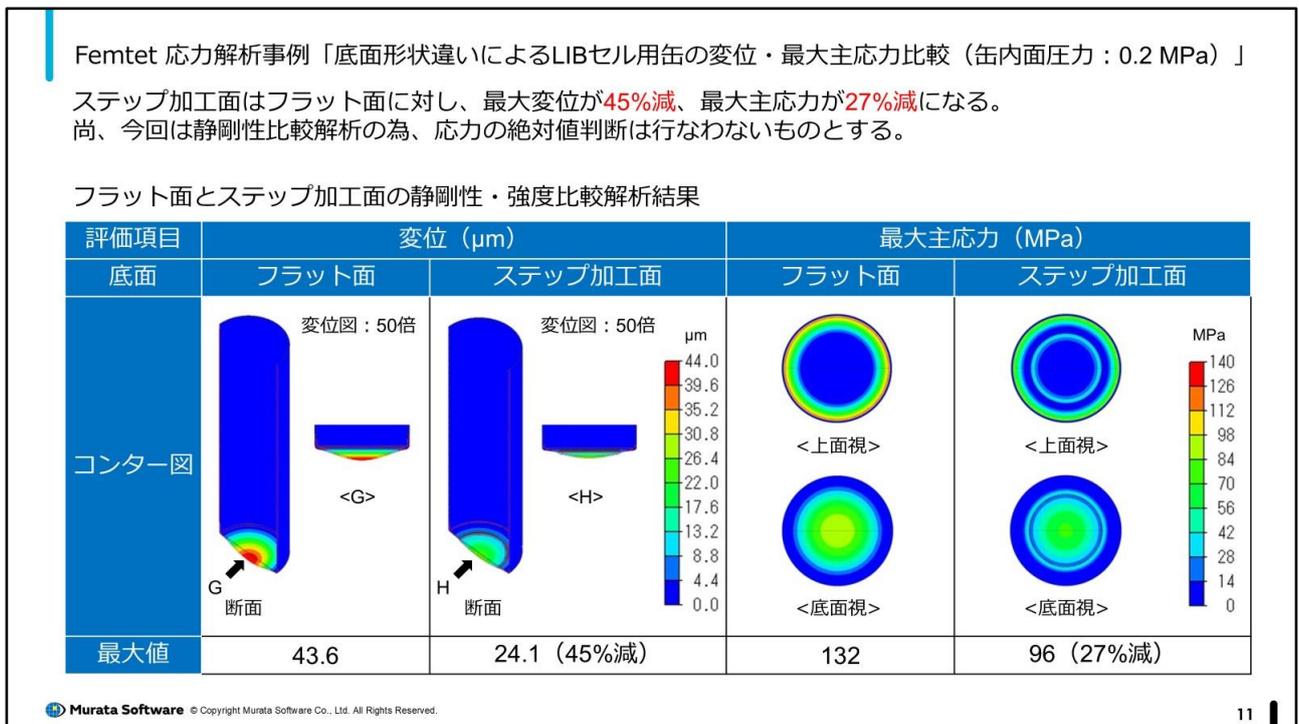
8. Femtet 応力解析事例「LIB セルの缶底膨れ比較解析」

②解析条件



9. Femtet 応力解析事例「LIB セルの缶底膨れ比較解析」

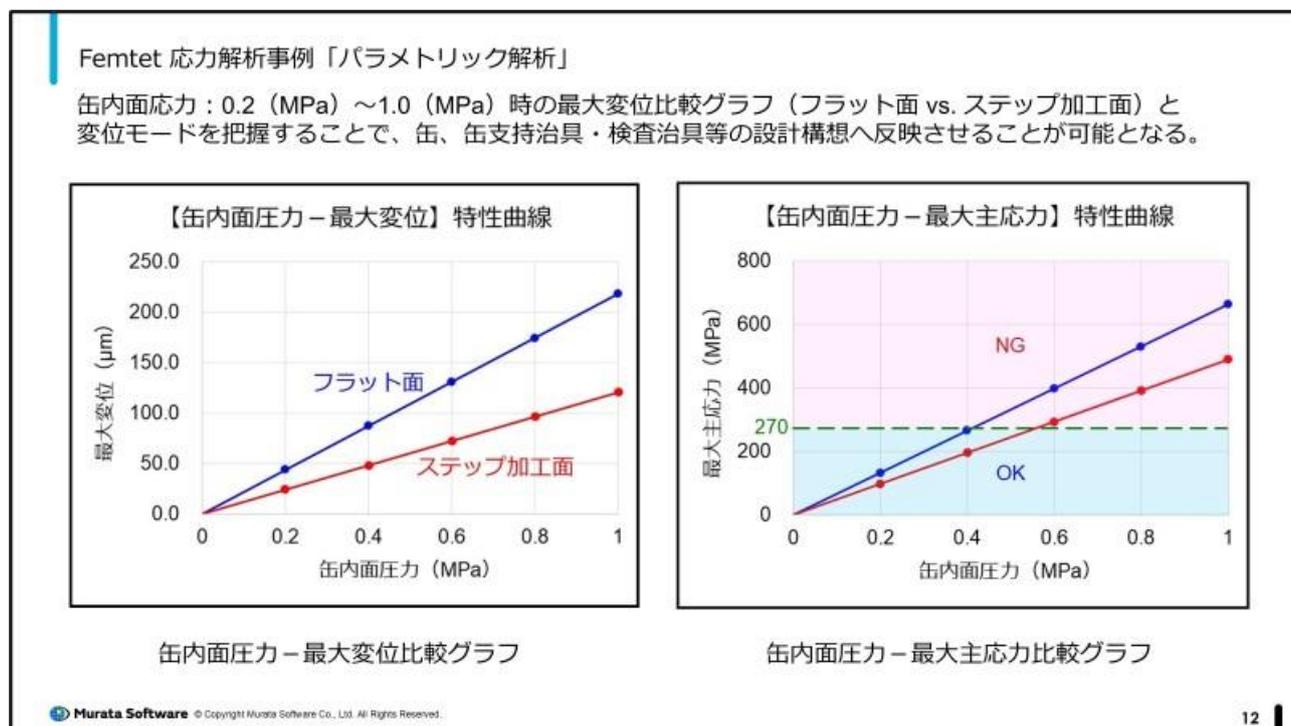
③底面形状違いによる LIB セル用缶の変位・最大主応力比較



ステップ加工面はフラット面に対して、変位は **45%**少なく、最大主応力:**27%**低いことが分かります。  
これは、ステップ加工によって静剛性が約 **1.8** 倍に向上することを意味しています。

## 10. Femtet 応力解析事例「LIB セルの缶底膨れ比較解析」

### ④パラメトリック解析



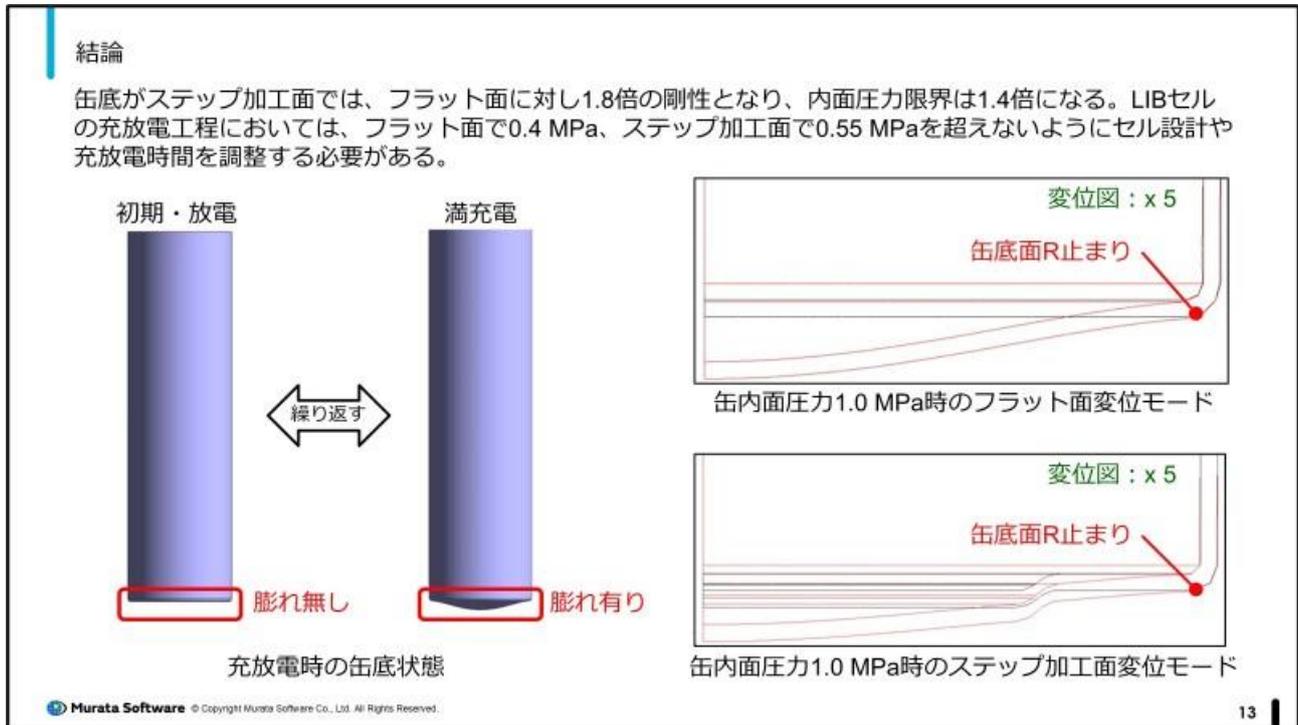
「缶内面圧力-最大変位」及び「缶内面圧力-最大主応力」の関係はフラット面・ステップ加工面ともに比例関係にあります。

ステップ加工面はフラット面に対して、剛性：約 **1.8** 倍、缶内面圧力限度：約 **1.4** 倍となります。  
尚、缶材料を **SPTE**、降伏応力を **270 MPa** と仮定した場合、缶内面圧力限度値は以下の通りです。

- (1) フラット面：0.40 MPa
- (2) ステップ加工面：0.55 MPa

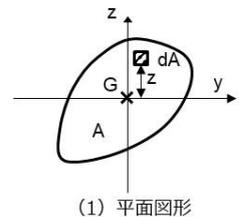
これらの数値は、充放電工程における缶の製品保証値（内面圧力限度値）となります。

## 11. 結論



本解析結果（項目 10 を参照）から、ステップ加工面はフラット面に比べて約 1.8 倍の剛性を有し、内面圧力限度は約 1.4 倍であることが分かりました。内面圧力限度値は、フラット面で 0.40 MPa、ステップ加工面で 0.55 MPa です。充放電工程では、この内面圧力限度値を超えないよう管理することが重要になります。もし工程時間短縮などにより限度値を超える場合は、缶板厚の増加などの対策が必要となります。

尚、ステップ加工面の剛性が高い理由は、断面二次モーメント： $I = \int_A Z^2 dA$  の  $z$ （断面係数）が、フラット面より大きいからです。（断面二次モーメントは右図を参照のこと）



また、変位モードについては、缶底面 R 止まりを支点として膨らむ挙動が確認されました。

このことから、缶の支持位置は缶底面 R 止まりより外側を推奨します。但し、一般的な缶製造工程では缶底面 R 形状のばらつきが大きいため、以下の対応を検討する必要があります。

- (1) 缶底面 R の補正工程を追加する
- (2) セル製造工程において、缶支え位置を缶側面 R 止まりに変更する

## 12. 参考文献：茨城大学准教授 西野創一郎先生著『図解 道具としての材料力学入門』



ムラタソフトウェア株式会社

*muRata*

試用版は弊社のホームページからお申込みいただけます。

<https://www.muratasoftware.com/trial/starter/>