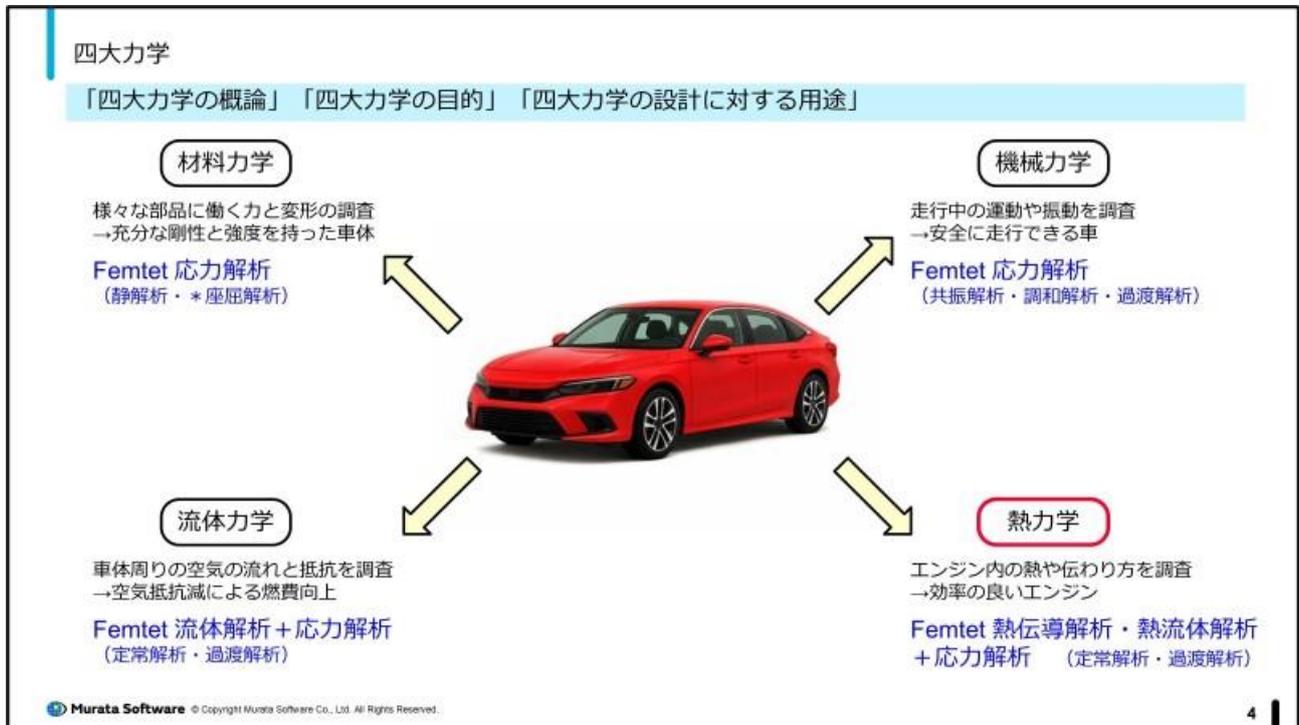


Femtet 応力解析入門 (熱力学編)

目次

1	四大力学	P. 3
2	熱は何者か	P. 4
3	熱とエネルギー	P. 5
4	気体の圧力、容積、温度との関係	P. 6
5	エンタルピー	P. 7
6	エントロピー	P. 8
7	熱の伝導、伝達、放射	P. 9
8	材料の熱膨張と熱応力	P.10
	・ Femtet 熱応力解析事例「材料組合せ違いによる Screen Protector の熱応力解析」	
9	①目的・概要	P. 11
10	②解析条件	P. 12
11	③材料組合せ違いによる Screen Protector の変位比較	P. 13
12	④材料組合せ違いによる Screen Protector 最大主応力比較	P. 14
13	⑤結論	P. 15
14	参考文献	P. 15

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

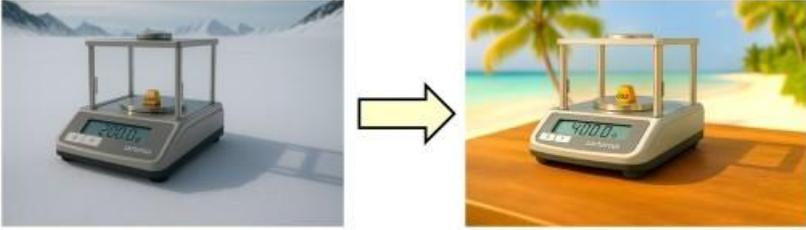
熱やエネルギーの状態変化、移動、仕事への変換について体系的に扱う学問です。物体間の「熱のやり取り」や、「エネルギー変換効率」などを数値で記述します。熱力学は大きく分けて次の分野があります。熱や仕事はエネルギーの形態変化として相互に変換される「熱力学第一法則」所謂、「エネルギー保存則」、熱は高温から低温に自然に移動し、エネルギー利用には*不可逆性が伴う「熱力学第二法則」、そして、熱がどのような経路と速度で移動するかを扱う「熱移動学」所謂、「伝熱学」があります。
*不可逆性とはエントロピ増大を意味します。

2. 熱は何者か

熱は何者か

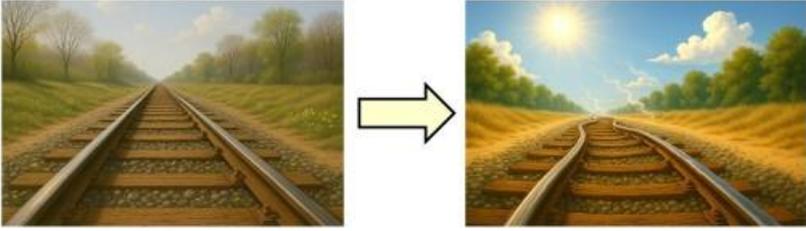
「熱は物質に宿るエネルギー」「熱は質量がない」「熱は物質を構成する原子の運動エネルギー」

熱による物体の変化：下図①と下図②は正しいでしょうか？

①  

✖ 誤り

もし金の質量が環境温度で変化したら、金の価値はたちまち暴落するであろう。

②  

○ 正しい

真夏の炎天下では、鉄道のレールが伸びて変形することがある。

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved. 5

物体に熱を加えると、温度が上昇し、膨張して長さや体積が増加します。逆に、放熱して温度が下がると、長さや体積は元の状態に戻ります。常温の状態では、物体の長さや体積を増加させるには、四方から引く力、つまり外部から機械的なエネルギーが必要です。この力を取り除く（除荷する）と、元に戻ります。この関係は、加熱と冷却による膨張・収縮と同様です。いずれの場合も質量は変化しません。

例えば、金は質量で取引されます。仮に、①のように環境温度の違いだけで質量が変化するならば、信頼性が失われ、取引されなくなるでしょう。しかし実際には、金の質量は温度によって変化することはありません。このことから、熱は物質ではなく、質量を持たないエネルギーであることが分かります。

一方で、②のように真夏の暑い日中には鉄道のレールが膨張し、波打つように曲がる場合があります。これは、温度上昇によって非常に大きな力とエネルギーが発生している証拠です。加熱によって材料の温度がある限界を超えたり、過剰な機械的力を加えたりすると、元の長さや体積に戻れなくなることがあります。これは、材料内部の結晶構造や分子構造が破壊されたためです。つまり、加えた熱エネルギーが機械的エネルギーに変換され、材料を変形・破壊するためのエネルギーとして消費されたことを意味します。

3. 熱とエネルギー

熱とエネルギー

熱エネルギー：「絶対温度で定義」「比熱が重要パラメータ（対する位置エネルギーは重力加速度）」

位置エネルギーと熱エネルギー（エネルギーを大きくする要因は質量と高さ： h や温度： T ）

The diagram is divided into two parts. The left part shows a small black circle (mass '小') on a low platform and a larger black circle (mass '大') on a higher platform. A vertical double-headed arrow between the platforms is labeled 'h'. Below this, the formula for potential energy is given as $E = mgh$ (重力加速度： g). The right part shows two thermometers. The left one has a small red bulb (temperature '小') and the right one has a large red bulb (temperature '大'). A vertical double-headed arrow between the bulb levels is labeled 'T'. Below this, the formula for thermal energy is given as $Q = cmT$ (比熱： c). At the top, a yellow arrow points from a small black circle to a larger one, labeled '質量 (m)'. At the bottom left, there is a copyright notice: 'Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved.' At the bottom right, there is a small number '6'.

位置エネルギー： $E = mgh$ （重力加速度： g ）

熱エネルギー： $Q = cmT$ （比熱： c ）

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

6

日常生活では「暑い」「寒い」を温度として表現していますが、身体が実際に感じているのは温度ではなく、物体から受け取る（あるいは奪われる）熱量です。しかし、熱量は物体間を移動する熱エネルギーであり、その絶対量を直接測定することはできません。そこで、熱量の大小を表す指標として温度が導入されました。熱量： Q と温度： T の間に比例関係 $Q \propto T$ を仮定し、温度という形で目盛りを付けて扱えるようにしたものです。

機械力学では、高さ： h にある質量： m の物体がもつ位置エネルギー E は、 $E = mgh$ で表されます。ここで、 g は重力加速度として定義された比例定数です。

また熱力学では、温度： T にある質量： m の物体がもつ熱エネルギー Q は、 $Q = cmT$ で表されます。ここで、 c は比熱として定義された比例定数です。

位置エネルギーは、物体が「より低い位置へ落下する」まではエネルギーとしての役割を果たしません。同様に、熱エネルギーも、物体がより低い温度へ向かって熱を放出するまではエネルギーとしての働きを示しません。熱エネルギーの放出は、温度の変化を通してのみ知覚できます。熱エネルギーは、物体内部を移動する熱伝導によって伝わり、また物体は周囲へ電磁波（熱放射）として熱エネルギーを放出することで温度が低下します。

4. 気体の圧力、容積、温度との関係

気体の圧力、容積、温度との関係

「ボイルの法則は単純だが気体の本質を表わす」「ボイルの法則とシャルルの法則を組み合わせると偉大」

ボイル・シャルルの法則 ($\frac{P \cdot V}{T} = \text{一定}$)

ボイルの法則

シャルルの法則

ボイルの法則 (温度一定)

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = P_3 \cdot V_3$$

$$P \cdot V = \text{一定}$$

+

シャルルの法則 (圧力一定)

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1} = \frac{V}{T} = \text{一定}$$

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved. 7

容積： V の容器内に封入された気体は、その圧力： P との間に $P \cdot V = \text{一定}$ の関係が成り立ちます。この関係式を「ボイルの法則」と呼びます。但し、この法則が成立するには温度： T が一定であることが条件です。

例えば、容器内の気体を急に圧縮すると、容積が小さくなると同時に内圧が増加し、気体の温度が上昇します。この状態では温度が変化している為、ボイルの法則は成立しません。しかし、暫くしてから周囲へ放熱して元の温度に戻ると、再びボイルの法則が成立します。

容積： V の容器内の気体を加熱すると、温度： T が上昇し、圧力： P や容積： V が変化します。

ここで、圧力を変化させないようにすると、温度： T と容積： V が連動して変化します。この温度と容積の関係を「シャルルの法則」と呼びます。シャルルの法則は温度上昇によって気体の分子の運動が活発になって体積が膨張することを示しています。尚、金属線のような固体が加熱されると伸びる現象は、温度上昇によって構成する原子の振動が激しくなり、原子間の距離が大きくなることで物体が膨張することを示しています。気体・固体・液体に関わらず、加熱されると、構成している分子あるいは原子の運動が活発になり、物体が膨張することを示しています。

ボイル・シャルルの法則は非常に単純な関係式ですが、これらが成立するためには温度： T を絶対温度 [K]で表す必要があります。絶対温度は物理的に基本的な意味をもつ尺度であり、 $T = 0$ [K]のとき、気体の圧力： P が0となる（分子運動が停止する）ことを示しています。

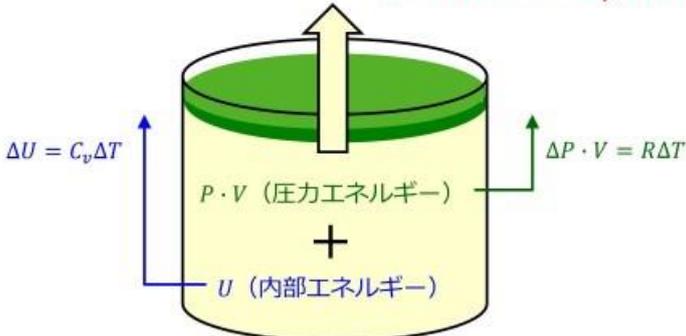
5. エンタルピー

気体の圧力、容積、温度との関係

エンタルピー：「気体の全エネルギー」「定圧比熱と温度との積」「高速気体流れの全エネルギー」

エンタルピー (h) は温度 (T) によって表されるエネルギーである

エンタルピー： $h = U + P \cdot V$ (エンタルピー： $\Delta h = C_p \Delta T$ 増)



エンタルピーの変化量： Δh
 単位質量1[kg]におけるエンタルピー：
 h [J/kg] は温度変化： ΔT によって、
 $\Delta h = \Delta u + \Delta(pv)$ となる。
 熱力学第一法則を適用すると、
 $\Delta q = \Delta u + p\Delta v = \Delta h - v\Delta p$ となる。

定圧比熱の定義
 エンタルピー： h で定圧比熱： C_p が
 定義され、以下の式になる。

$$C_p = \frac{dh}{dT}$$

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved. 8

イラストのように気体が容器内に入っている場合、気体の圧力は容器の大きさによって変化します。単位質量 (1 [kg]) の気体はその比容積： V を変化させると、ボイル・シャルルの法則が示すように、圧力： P と温度： T が変化します。そして、気体は圧力によって外部に仕事をすることができる為、「圧力によるエネルギー」を持つこととなります。即ち、容器内の気体が持つ全てのエネルギーは「温度によるエネルギー」と「圧力によるエネルギー」に分けることができます。

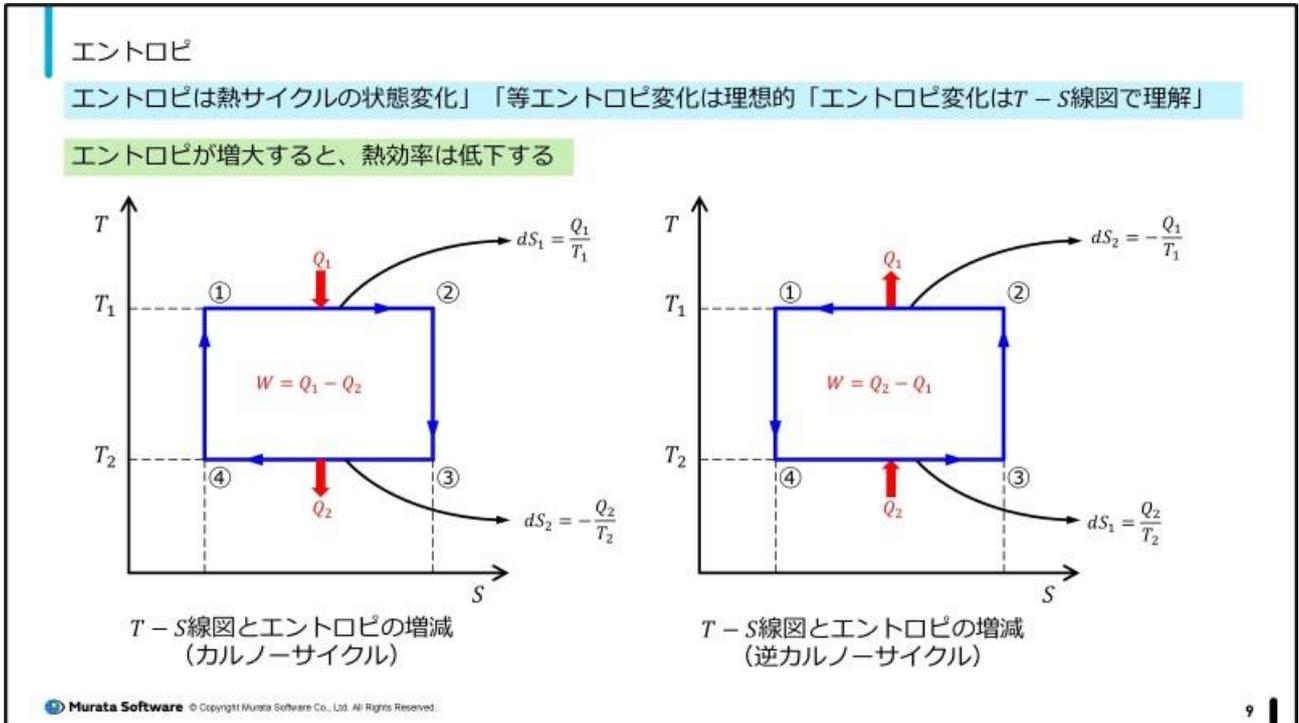
温度によるエネルギーは、内部エネルギー： U であり、圧力によるエネルギーは $P \cdot V$ で表されます。したがって、流れのない容器内気体が持つ全エネルギーは、 $U + P \cdot V$ で表すことができます。この全エネルギーはエンタルピーとして定義され、比エンタルピーは、 h [kJ / kg]で表されます。すなわち、 $h = U + P \cdot V$ [kJ / kg] (エンタルピー=気体分子の有する内部エネルギー+圧力エネルギー) になります。容器に入っている気体は温度が高くなると内部エネルギー： U を増加させ、同時に圧力を増加させて、圧力エネルギー： $P \cdot V$ を増加させます。この各エネルギーの和がエンタルピー： h として表されます。内部エネルギーは、 $U = C_v T$ 、圧力エネルギーは理想気体の状態方程式より、 $PV = RT$ と表すことができます。

以上から、エンタルピー： h は温度： T の関数として表すことができる為、次のように定義されます。

$$h = C_p T$$

尚、この式における比例定数： C_p は、気体を構成している分子の内部構造によって決まるものです。

6. エントロピ



可逆変化であるカルノーサイクルは、2つの等温変化と2つの断熱変化を組み合わせることで1サイクルを形成しています。断熱変化では外部との熱の授受がないため、熱効率： η に直接影響しません。一方、等温変化では高温熱源からの加熱量： Q_1 と低温熱源への放熱量： Q_2 が存在するため、熱効率は次式で表されます。

$$\eta = (\text{加熱量} \cdot \text{放熱量}) / \text{加熱量} = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_1$$

この関係式は、カルノーサイクルが次の熱平衡条件を満たすことと等価です。

$$Q_1/T_1 + (-Q_2/T_2) = 0$$

したがって、熱効率は $\eta = 1 - T_2/T_1$ で最大となることが分かります。

ここで注目すべき点は、各熱量と温度の比： Q/T が効率を議論する上で重要なパラメータとなっていることです。カルノーサイクルにおいては、微小熱量の比： dQ/T がエントロピ変化として、 $dS = dQ/T$ と定義されます。そして、カルノーサイクルが可逆であることから、サイクル全体のエントロピ変化は $dS = 0$ となります。

尚、この式における S はエントロピであり、 dS はサイクルにおけるエントロピ変化量 [J/K] を表しています。

7. 熱の伝導、伝達、放射

熱の伝導、伝達、放射

「固体内の熱伝導」「流体による熱伝達」「伝える物体を必要としない熱放射」

3種類の伝熱（熱伝導・熱伝達・熱放射）

伝熱タイプ	構成方程式
熱伝導	フーリエの法則
熱伝達	ニュートンの冷却法則
放射熱	ステファン・ボルツマンの法則

熱伝導 —

熱伝達 —

熱放射 —

強制対流 —

基板上的電子デバイスとヒートシンク

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved. 10

熱は物質そのものではなく、物体に蓄えられたエネルギーであり、物体同士が接触すると高温側から低温側へ移動します。これは、高いところの水が低いところへ流れるのと同様で、低温側から高温側へ自然に熱が移動することはありません。熱の伝わり方は以下の3種類に分類できます。

① 熱伝導 (Heat Conduction)

固体や静止した流体内部で、分子や電子の振動・衝突によって熱が移動する現象です。物質内部を通じて「高温側 → 低温側」へ直接熱が伝わります。

② 熱伝達 (Heat Transfer)

流体（液体・気体）の移動に伴って熱が運ばれる現象です。流体分子が動きながら、高温部の熱を低温部へ運びます。ニュートンの冷却則 (Newton's Law of Cooling) で表されます。

③ 熱放射 (Thermal Radiation)

高温の物体が電磁波（主に赤外線）を放射し、別の物体が吸収して熱として受け取る現象です。空気や真空中でも伝わる為、媒質を必要としません。

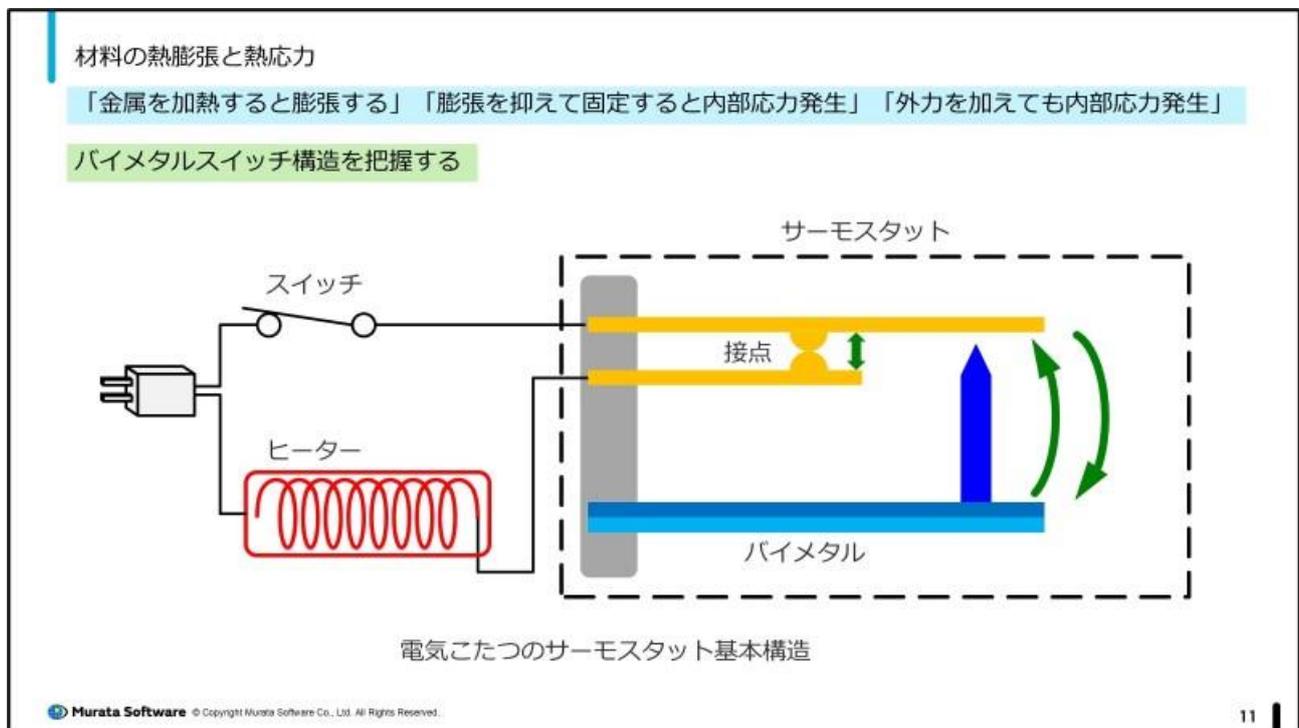
イラストは、ヒートシンクにおける熱伝導・熱伝達・熱放射の流れを示しています。発熱デバイス（例：パワー半導体、CPU、パワーモジュールなど）がヒートシンクに取り付けられている場合、熱は必ず① 熱伝導 → ② 熱伝達 → ③ 熱放射の順に外部へ逃げていきます。

① 熱伝導 (Heat Conduction) : デバイス → TIM → ヒートシンク (金属) への熱移動。

② 熱伝達 (Heat Transfer) : ヒートシンク表面 → 空気 の熱移動。

③ 熱放射 (Thermal Radiation) : ヒートシンク表面 → 周囲環境 への電磁波による放熱。

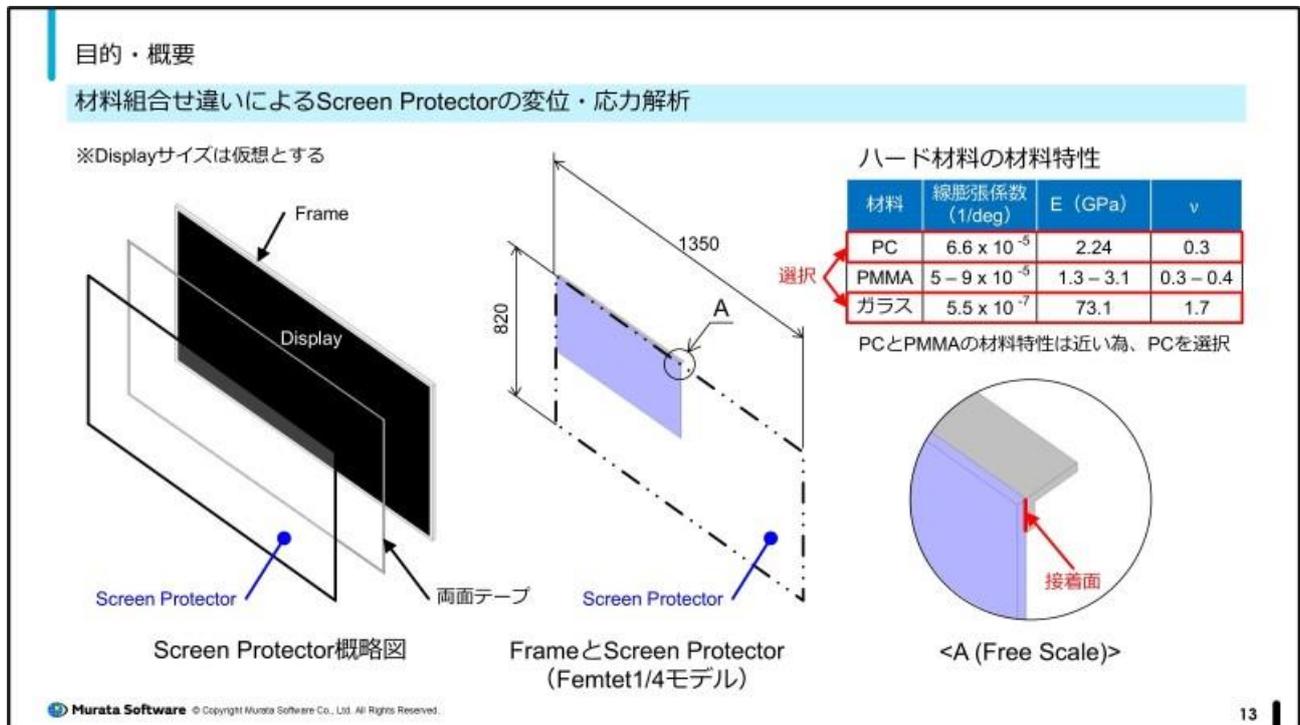
8. 材料の熱膨張と熱応力



直線状の金属丸棒をバーナーで加熱すると、長さが増加すると同時に直径もわずかに増加します。これは金属が熱を受け、温度上昇に伴って熱エネルギーを吸収した結果であり、熱膨張と呼ばれる現象です。金属が常温まで冷却されると、長さも直径も元の状態に戻ります。加熱された金属内部では、温度上昇によって原子の運動が活発になり、原子間の結合力よりも原子の熱運動が優勢になります。その為、原子間距離が広がり、結果として金属は膨張します。このとき、加えた熱量は内部エネルギーの増加と外部への仕事（膨張仕事）に変換されます。これは熱力学第一法則の内容と一致しており、膨張として現れる仕事量が加えた熱量の一部であることを示しています。冷却されて原子の熱運動が弱まると、原子間の結合力が再び勝り、元の距離に戻される為、金属の長さ・直径も元に戻ります。このような熱膨張による変形は、金属材料を機械的に引っ張って同じ長さだけ伸ばす場合に必要なエネルギーと密接に関係しています。（材料力学と深い関係あり）イラストは、バイメタルによる温度制御（サーモスタット構造）を示しています。電気コタツでは昔から、バイメタルの変形を利用して温度を調節するサーモスタットが使われています。温度が上昇すると、バイメタルが反って電気接点を押し上げ、接点が開くことで電流が止まり、ヒーターがオフになります。逆に温度が下がると反りが戻り、接点が再び閉じて電流が流れ、ヒーターがオンになります。構造は非常に単純ですが、信頼性の高い仕組みです。バイメタルとは、熱膨張率（温度上昇による膨張割合）が異なる2種類の金属板を貼り合わせたものです。熱膨張率の大きい金属の方がより大きく伸びる為、温度変化によってバイメタルは特有の反りが生じます。この反りを利用して、オン/オフ制御を実現しています。

9. Femtet 熱応力解析事例「材料組合せ違いによる Screen Protector の変位・応力解析」

① 目的・概要



最近、(液晶・有機 EL) テレビや(液晶・有機 EL) ディスプレイの保護する Screen Protector が販売されています。この製品の機能を以下に記します。

・基本機能

- ① 衝撃・破損防止
- ② 汚れ・指紋の付着防止 (掃除の手間を減らし、画面の劣化を防ぐ)
- ③ 視認性・視聴快適性の向上 (ブルーライトカット、反射防止：ノングレア)
- ④ 静電気・ホコリ対策

・二次機能

- ① ハードコート (キズ防止)
- ② 落書き防止

・主な使用材料

PC：ポリカーボネート、PMMA：アクリル、PET：ポリエステル、TPU：熱可塑性ポリウレタン、強化ガラス (Tempered Glass) 等。

当製品は、テレビやディスプレイ本体に接着するタイプが多く、環境温度変化の影響を受ける為、環境温度変化を考慮した材料組合せ違いによる熱応力解析を実行し、注意すべき点を考えます。尚、使用材料は、PC とガラスにしています。(理由：PMMA は PC と特性が近い為、PC を選択)

10. Femtet 熱応力解析事例「材料組合せ違いによる Screen Protector の変位・応力解析」

② 解析条件

解析条件

解析ソルバ：熱応力解析、解析タイプ（熱伝導）：過渡解析、モデル設定：1/4モデル（対称条件設定）
 Frame材料：ALとPC、Protector材料：石英ガラスとPC、拘束条件：Frame上面中心のX & Yを変位拘束、
 Frame側面中心のY & Zを変位拘束、熱荷重条件：温度プロファイルを参照のこと

材料組合せ

Type	Frame	Protector
a	AL	ガラス
b	AL	PC
c	PC	PC

温度プロファイル
 時刻-温度グラフ

解析モデル（1/4モデル）概略図

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

・解析条件

解析ソルバ：熱応力連成解析、解析タイプ（熱伝導）：過渡解析、材料組合せ：① ～ ③

① Type a : Frame : AL（アルミニウム）と Protector : ガラス

② Type b : Frame : AL（アルミニウム）と Protector : PC（ポリカーボネート）

③ Type c : Frame : PC と Protector : PC

・各材料の線膨張係数

【AL】 2.31×10^{-5} ($1/^\circ\text{C}$) 【ガラス】 5.5×10^{-7} ($1/^\circ\text{C}$) 【PC】 6.6×10^{-5} ($1/^\circ\text{C}$)

・E：ヤング率、 ν ：ポアソン比

【AL】 E : 68.5 (GPa) ν : 0.34 【ガラス】 E : 73.1 (GPa) ν : 0.17

【PC】 E : 2.24 (GPa) ν : 0.3

・板厚は、Frame : t2.5、Protector : t2.5

・熱荷重条件

CAE 初期検討で扱われる代表的なレンジである「 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ のヒートサイクル」とします。

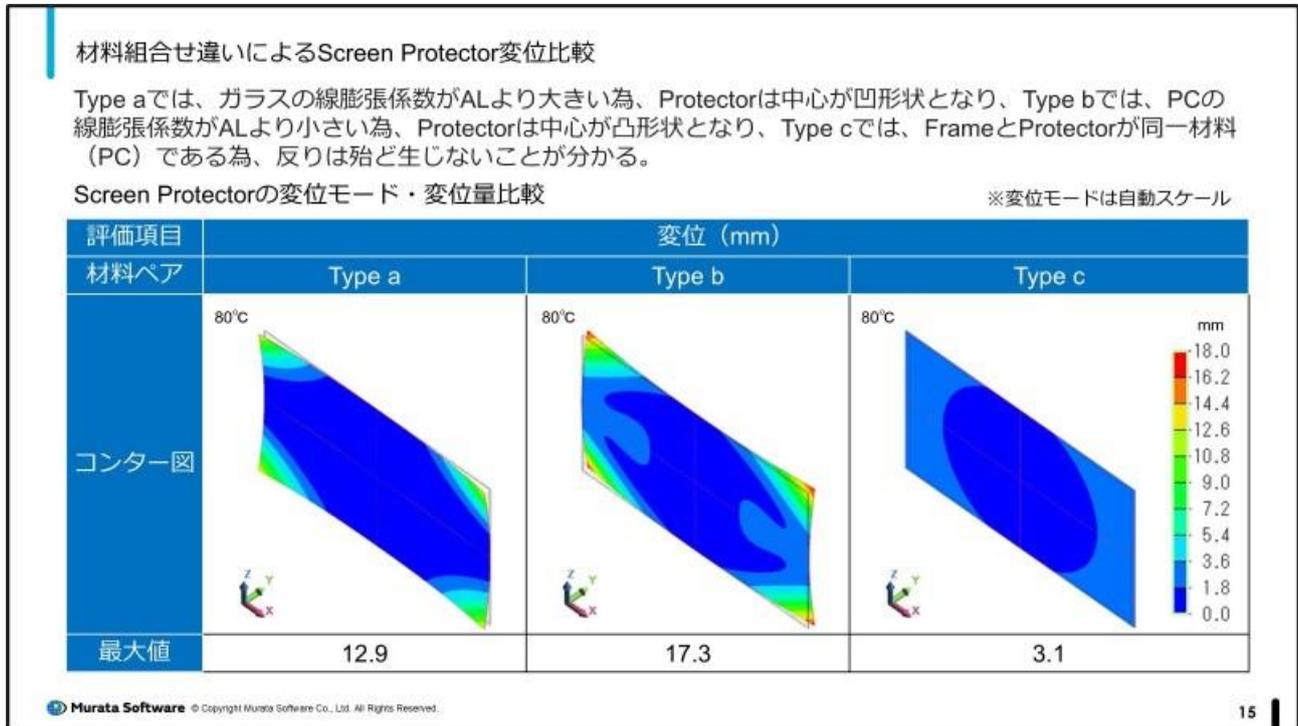
（詳細は温度プロファイルを参照のこと）

・拘束条件：Frame 上面中心の X、Y を変位拘束、Frame 側面中心の Y、Z を変位拘束とします。

・モデル設定：計算時間を短縮するため、基本モデルは 1/4 モデルとします。

11. Femtet 熱応力解析事例「材料組合せ違いによる Screen Protector の変位・応力解析」

③ 材料組合せ違いによる Screen Protector の変位比較



Type a では、ガラスの線膨張係数が AL より小さい為、Protector は中心が凹形状となります。

Type b では、PC の線膨張係数が AL より大きい為、Protector は中心が凸形状となります。

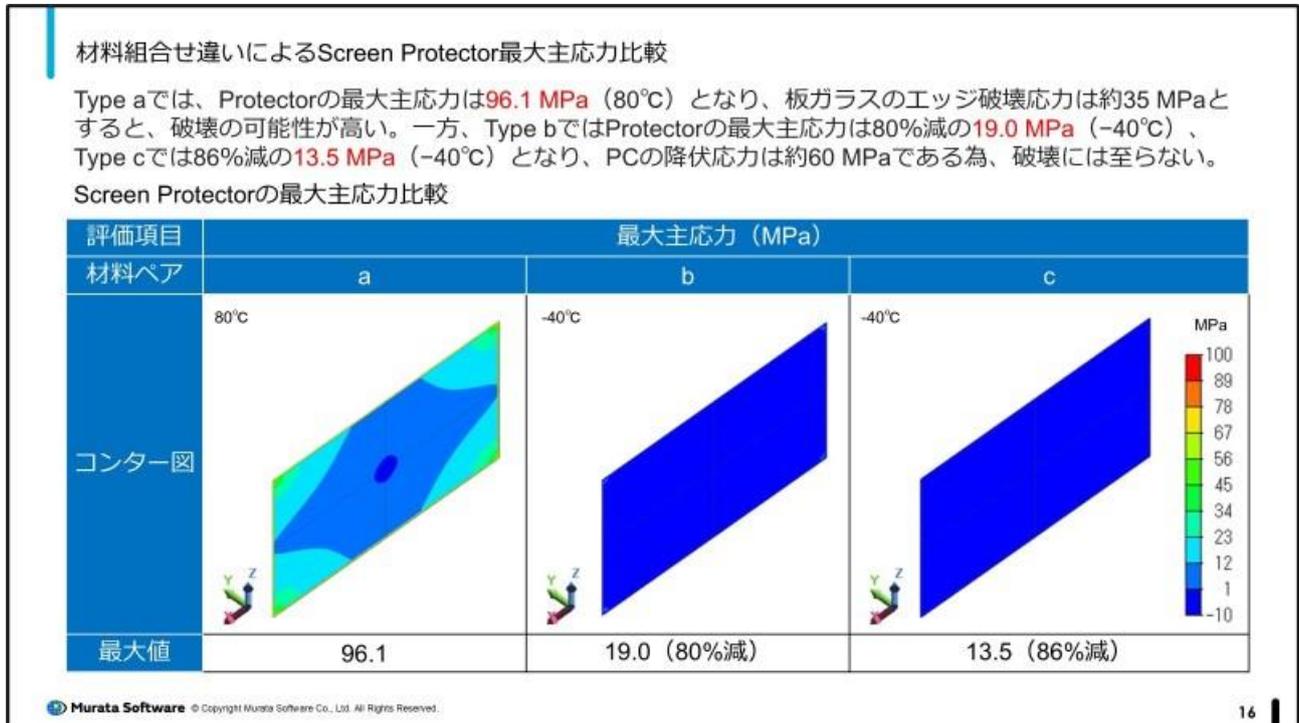
Type c では、Frame と Protector が同一材料（PC） の為、反りは殆ど生じないことが分かります。変位量の最大値は、Frame と Protector の線膨張係数の差に加え、ヤング率及びポアソン比の差によって決まります。

本解析結果から、変位量は Type b > Type a > Type c の順であることが分かります。

尚、-40°Cにおける変位モードは 80°Cの場合と反対となりますが、変位最大値は-40°Cと 80°Cで同一である為、ここでは-40°Cの結果を省略します。

12. Femtet 熱応力解析事例「材料組合せ違いによる Screen Protector の変位・応力解析」

④ 材料組合せ違いによる Screen Protector の最大主応力比較



Type a では Protector の最大主応力が 96.1 MPa (80°C) となります。一般的なフロート板ガラスはエッジ破壊応力が約 35 MPa、面内破壊応力が約 55 MPa である為、脆性破壊に至る可能性が高いと言えます。以上より、Protector 材料をガラスにする場合は、一般的なフロート板ガラスではなく、強化ガラスの採用やフッ酸処理等により、表面層のマイクロクラックを十分に除去する必要があると考えます。

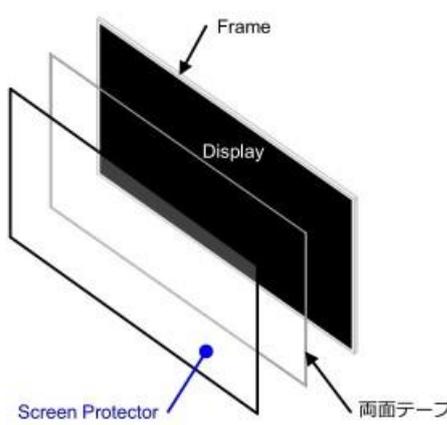
一方、Type b では Protector の最大主応力は 80%減の 19.0 MPa (-40°C)、Type c では 86%減の 13.5 MPa (-40°C) となります。PC の降伏応力は約 60 MPa であることから、いずれの条件においても延性破壊には至らないと判断できます。

尚、最大主応力については、-40°C時および 80°C時の解析結果のうち、最大値を採用しています。これは、降伏応力到達の可否および 0.2%耐力到達の可否を評価するためです。

13. 結論

結論

本解析結果から、FrameがAL（アルミニウム）やPC（ポリカーボネート）の場合、ProtectorはガラスよりPCの方が壊れ難い。又、FrameがALの場合、PC製Protectorでも変位が大きい為、軋み音の発生が懸念点となり得る。尚、今回はCAE初期検討で扱われる代表的な温度プロファイルであり、実使用条件ではない。



Screen Protector概略図

Protectorの最大変位量と最大主応力・ミーゼス相当応力

Type	環境温度 (°C)	最大変位量 (mm)	最大主応力 (MPa)	ミーゼス相当応力 (MPa)
a	-40	12.9	59.9	99.5
	80		96.1	
b	-40	17.3	19.0	14.6
	80		7.1	
c	-40	3.1	13.5	13.5
	80		2.7	

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved. 17

本解析結果から、FrameがAL（アルミニウム）またはPC（ポリカーボネート）の場合、ProtectorはガラスよりもPCの方が破壊しにくいことが分かります。

また、最大主応力はFrame材料とProtector材料の組合せによって温度依存性が異なります。

例えば、最大主応力については、Type Aでは80°C時の方が高いのに対し、Type BおよびType Cでは、-40°C時の方が高くなります。これは、FrameとProtectorの材料組合せが非常に重要であることを示しています。更に、FrameがALの場合には、PC製Protectorであっても変位が大きくなる為、軋み音発生への懸念が生じ得ます。

因みに、近年では材料特性の影響を受けにくくする為、固定しないタイプのScreen Protectorも市販されている点を付記しておきます。尚、本解析ではCAE初期検討で一般的に用いられる代表的な温度プロファイルを採用しており、実使用条件とは異なる可能性があることを記しておきます。

14. 参考文献

(独) 産業技術総合研究所の研究顧問 久保田浪之介先生著『トコトンやさしい熱力学の本』



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/>