

応力・熱伝導解析入門セミナー Femtet2021版

講義編



Femtet
Computer Aided Engineering System
Murata Software Co., Ltd.

- 当セミナーではFemtetの応力解析や熱伝導解析で解析可能な事例とその解析を実施するための設定ポイントをご紹介します。
- 難解な理論式の説明は必要最小限とし、Femtetで解析できる物理現象のイメージを理解していただくことを優先します。
- Femtetヘルプに記載の機能説明は避けて概要のみとし解析事例の紹介を優先します。
- 材料力学や熱伝導理論は基礎知識のごく最小限の紹介にとどめます。

応力解析

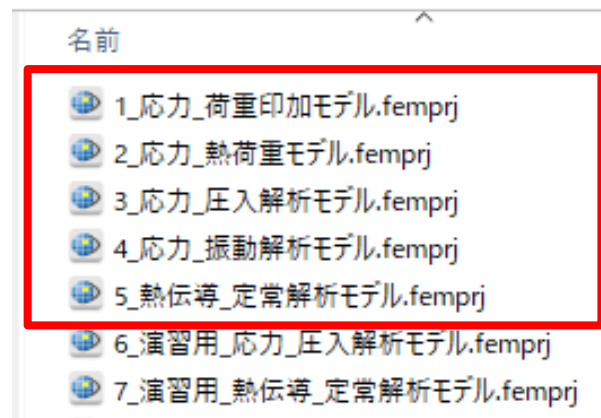
応力解析の概要

解析事例

熱伝導解析

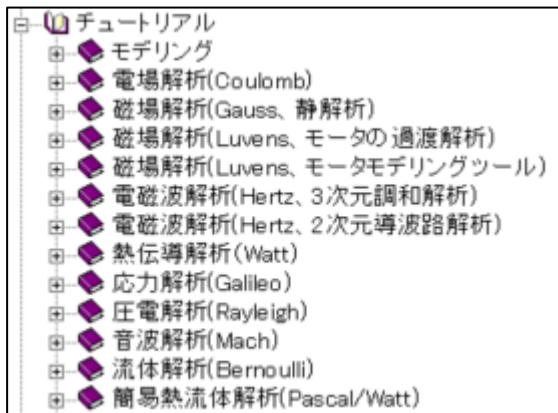
熱伝導解析の概要

解析事例



事前配布したプロジェクトの最初の5つを解析事例として紹介します。

- Femtetでは解析の種類にかかわらず以下のような流れで解析を行います。大まかな流れはFemtetヘルプのチュートリアルで習得可能です。



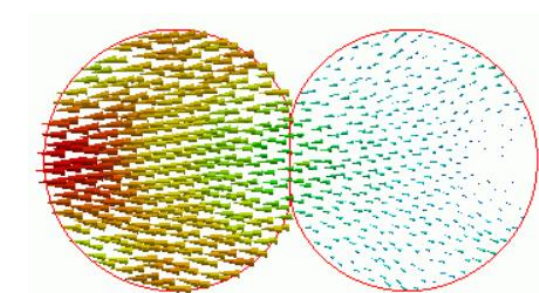
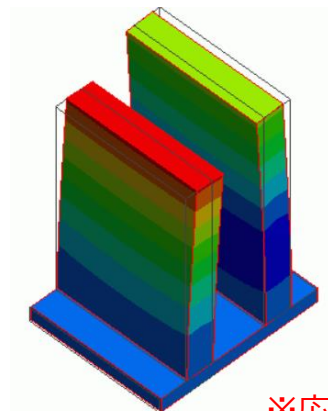
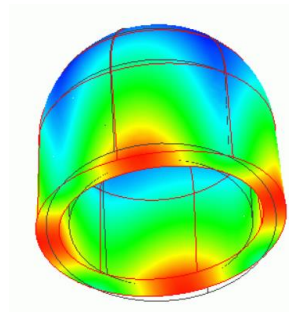
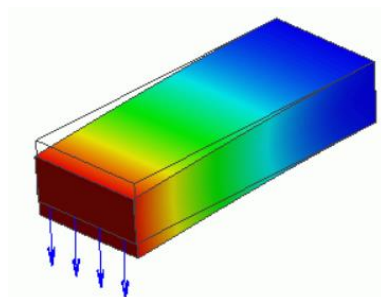
ステップ	項目
1	モデルを形状を作成、またはインポート
2	解析条件を設定
3	材料定数、ボディ属性、境界条件を設定
4	メッシュサイズを設定
5	解析を実行
6	結果を分析、検証

応力解析

解析の種類

- 静解析
- 共振解析
- 調和解析
- 座屈解析
- 過渡解析

解析の種類	何を解いているか？
静解析	力のつりあい状態
共振解析	共振モード、共振周波数
調和解析	周期的振動や荷重を与えたときの応答
過渡解析※	運動方程式（変位、速度、加速度）



※応力過渡解析は応力拡張オプション機能です

応力解析の概要（機械的な境界条件）

機械

境界条件の種類

変位

垂直変位

回転変位

加速度

集中荷重(点)

分布荷重(線)

分布荷重(面)

圧力

トルク荷重

ジョイント荷重

接触

簡易接触

接触表面

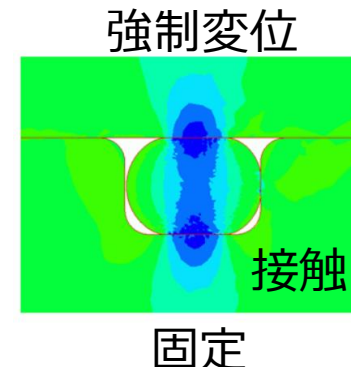
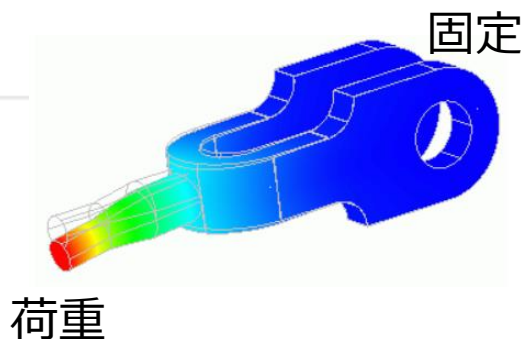
ばね接続

リモート荷重

変位

荷重

種類	用途
変位	固定、強制変位、振動振幅
荷重	力を加える
接触	モノ同士の接触を考慮



応力解析の概要（その他の設定項目）

解析条件

解析条件の設定

ソルバの選択
応力解析

メッシュ
共振解析
調和解析
過渡解析
ステップ熱荷重
加速度
角速度
一定温度
高度な設定
結果インポート
説明

応力解析

解析の種類

- 静解析
- 共振解析
- 調和解析
- 座屈解析
- 過渡解析

2次元近似

- 平面ひずみ
- 平面応力

大変形

- 大変位
- 大ひずみ

オプション

- 加速度 熱荷重
- 角速度 初期応力(結果インポート)
- シェル自由度の拘束条件を使用
- 質量、慣性モーメントを計算する

※必要に応じてオプションを設定します

境界条件

境界条件の編集 [外部境界条件]

機械

対称/不連続

説明

境界条件の種類

- 変位
- 集中荷重(点)
- 簡易接触
- 音響インピーダンス
- 垂直変位
- 分布荷重(線)
- 接触表面
- 開放境界
- 回転変位
- 分布荷重(面)
- ばね接続
- 拘束なし
- 加速度
- 圧力
- リモート荷重
- トルク荷重
- ジョイント荷重

時間依存重み関数 ON/OFF設定

等変位 ON/OFFリスト

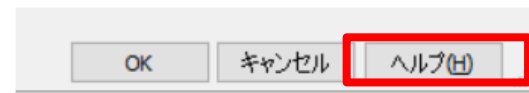
UX 分布取込

UY 分布データ

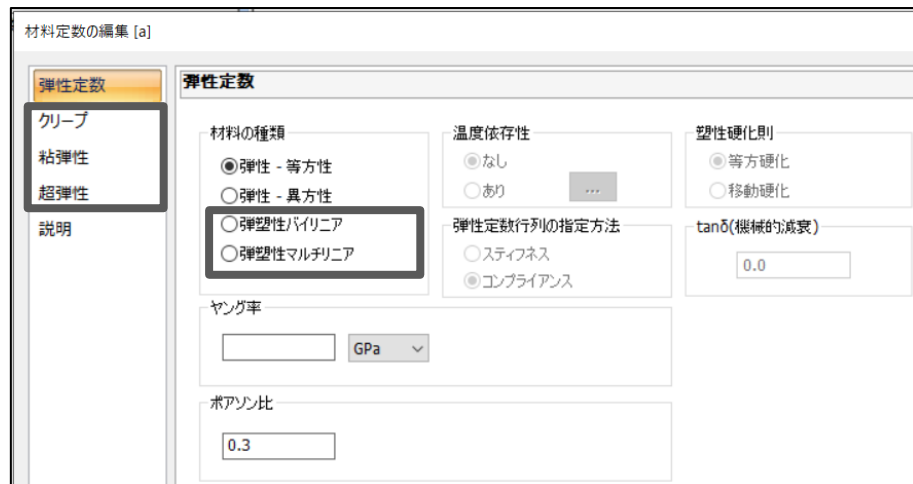
UZ 結果インポート

※境界条件の高度な設定も可能です

他にも多くの設定項目があります。
詳しくはダイアログ右下の「ヘルプ」ボタンを
押してください



材料定数

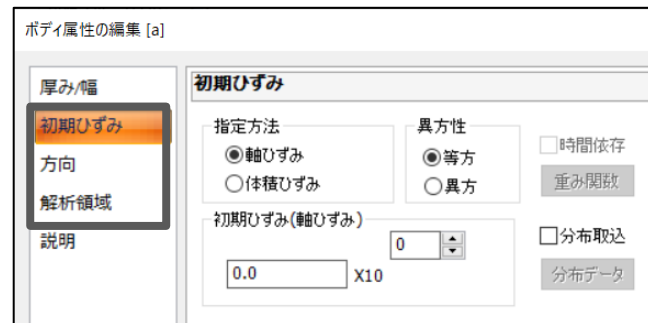


※弾性材料以外の以下の非線形材料を扱えます。

- 弾塑性材料
- 弾塑性クリープ材料
- 粘弾性材料
- 超弾性材料

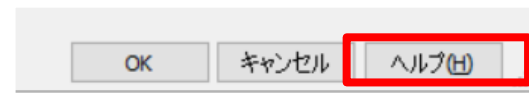
※非線形材料は応力拡張オプション機能です

ボディ属性



※材料以外の属性として初期ひずみや方向や解析領域を設定します

他にも多くの設定項目があります。
詳しくはダイアログ右下の「ヘルプ」
ボタンを押してください



- 以下のような基礎知識があると結果を理解するうえで有効です。

項目	説明
主応力、主ひずみ	ベクトルとは見方が異なります
ポアソン効果	ポアソン比と関連します
いろいろなひずみ	応力にリンクするのは弾性ひずみです
熱ひずみ	温度変化にともなう膨張収縮
最大主応力	脆性材料の破壊強度と関連
ミーゼス相当応力	塑性変形と関連

Web検索すると詳しい説明の記事がヒットします

解析の種類	解析事例イメージ	解析事例モデル
静解析	荷重印加による変形	荷重印加モデル 
静解析	温度変化による反り解析	熱荷重モデル 
静解析	圧入を伴う接触解析	圧入解析モデル 
共振解析	固有振動周波数の解析	振動解析モデル 
調和解析	周波数をスイープした周期的振動解析	
過渡解析	任意波形の振動解析	

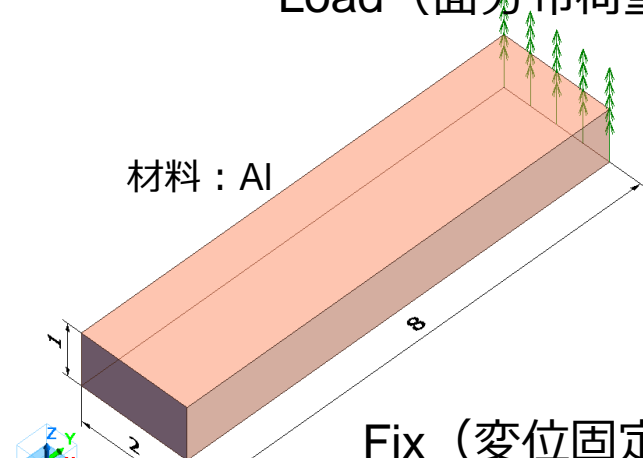
解析事例 荷重印加モデル

解析条件（応力解析）

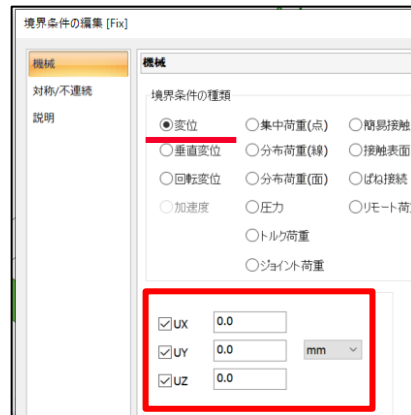
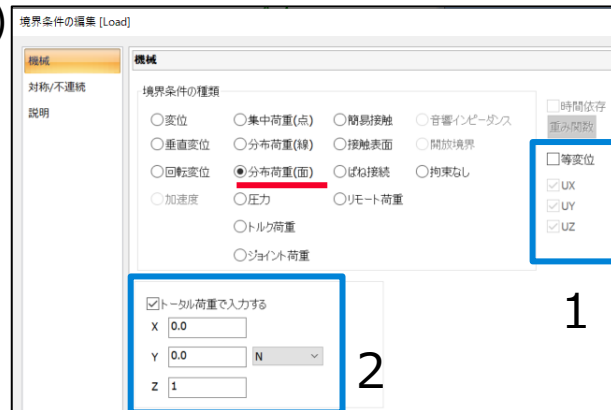


Load（面分布荷重）

材料：Al



Fix（変位固定）



- 1 等変位UYのオンオフ
 - 2 荷重の大小
 - 3 大変位のオンオフ
- による結果への影響を検証します。

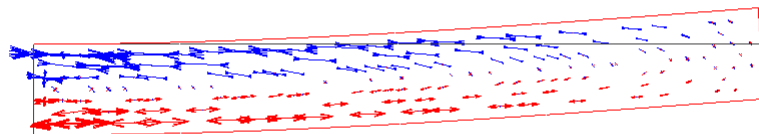
解析結果 荷重印加モデル (等変位設定)

変位図: 27.192 倍

荷重 1 [N]
等変位UYオフ

- 等変位
- UX
- UY
- UZ

MPa
Max 18.284
Min -18.271

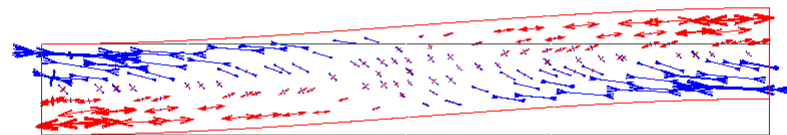


変位図: 104.799 倍

荷重 1 [N]
等変位UYオン

- 等変位
- UX
- UY
- UZ

MPa
Max 8.934
Min -8.925




Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力
全体寸法 : 8 mm


Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力
全体寸法 : 8 mm

固定部にのみ応力が集中して発生
青→圧縮応力 赤→引張応力

等変位設定によって荷重境界面の
回転が抑制されて対称的な応力分布となる

(参考) 変位図の倍率設定について



タイプ	説明
実スケール	変位を強調せず実際のスケールで表示
自動スケール	変位が微小な場合に変位を自動的に算出した倍率で強調して表示 倍率は結果画面の左上に表記される

※Femtet2021から変位図の倍率設定の仕様が改善されました。

※Femtet2020まではこの変位強調のことを「補正」と表現していました

解析結果 荷重印加モデル（荷重を大きく）

変位図: 実スケール

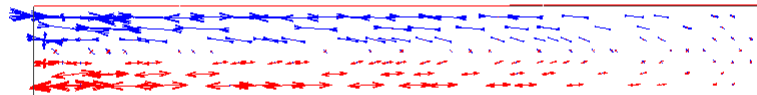
荷重 1 [N]

MPa
Max 18.284
Min -18.271

変位図: 実スケール

荷重 1 0 0 [N] 大変位オフ

GPa
Max 1.828
Min -1.827



トータル荷重で入力する

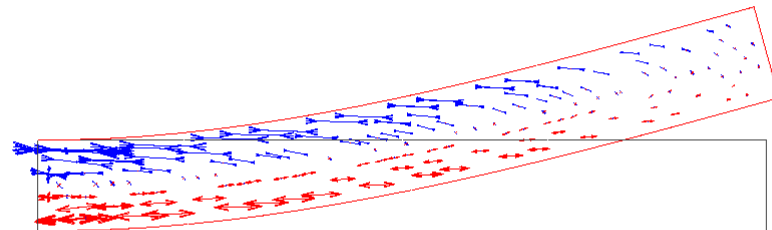
X

Y N

Z

ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力

全体寸法 : 8 mm



トータル荷重で入力する

X

Y N

Z

ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力

全体寸法 : 8 mm

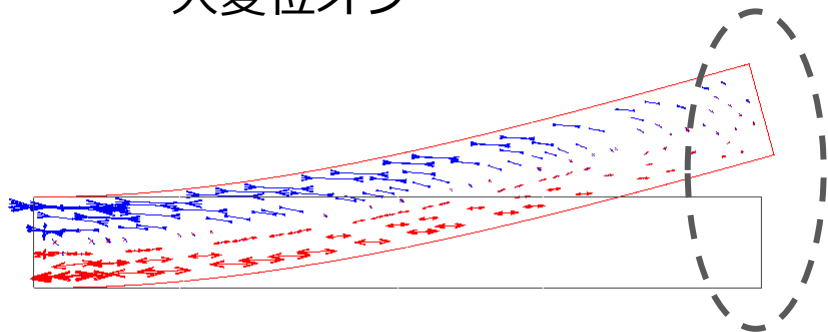
荷重が 1 0 0 倍となったため応力の値も 1 0 0 倍となり、
変位量も増大しているが、変位図がやや不自然

解析結果 荷重印加モデル（大変位オン）

変位図：実スケール

荷重 1 0 0 [N]
大変位オフ

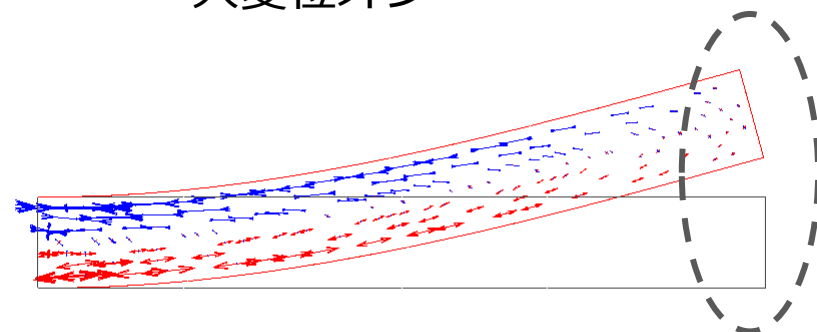
MPa
Max 1.828
Min -1.827



変位図：実スケール

荷重 1 0 0 [N]
大変位オン

MPa
Max 1.841
Min -1.743




Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力

全体寸法 : 8 mm


Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

ソルバ : 応力解析
モード : 7: 1[Step]
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力

全体寸法 : 8 mm

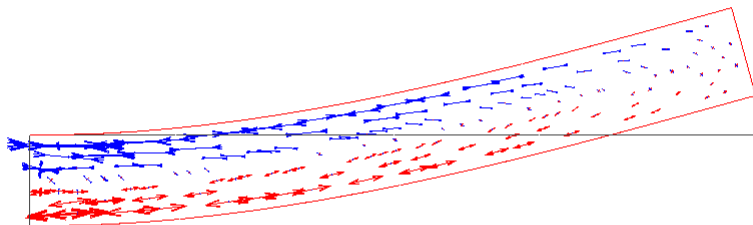
大変位オンとすることで回転変形が正確に計算され
自然な結果が得られている（幾何学非線形が考慮される）

(参考) 応力の最大値最小値の差について

変位図: 実スケール

主応力ベクトル表示

GPa
Max: 1.841
Min: -1.743



主応力ベクトルでは要素の重心の応力が表示される

ソルバ : 応力解析
モード : 7: 1[Step]
フィールド : 応力[Pa]
成分 : 主応力

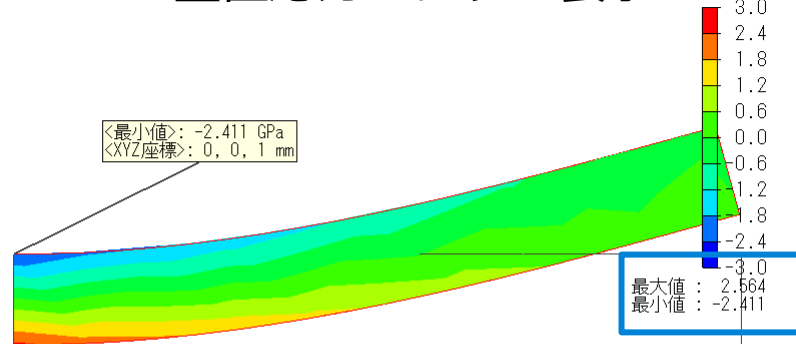
全体寸法 : 8 mm

変位図: 実スケール

Y垂直応力コンター表示

GPa

<最小値>: -2.411 GPa
<XYZ座標>: 0, 0, 1 mm



最大値 : 2.564
最小値 : -2.411

<最大値>: 2.564 GPa
<XYZ座標>: 2, 0, 0 mm

応力コンター図では要素内の応力分布が補間表示される

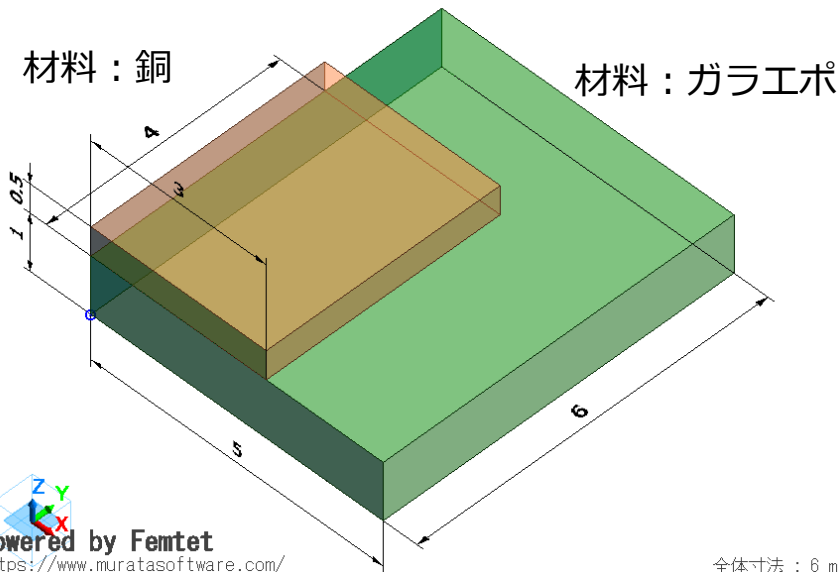
ソルバ : 応力解析
モード : 7: 1[Step]
フィールド : 応力[Pa]
成分 : Y垂直応力
スケール : Linear

全体寸法 : 8 mm

メッシュサイズが粗い場合や局所的に応力集中のあるモデルにおいては、応力の最大値最小値の差が大きくなる。

解析事例 熱荷重モデル（解析条件）

1/4対称モデル



Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

熱荷重オプションをチェックして、熱荷重タブで基準温度と到達温度をそれぞれ25度と100度に設定

解析条件の設定

解析条件（応力解析）

ソルバの選択

応力解析

メッシュ

共振解析

調和解析

過渡解析

ステップ/熱荷重

加速度

角速度

解析の種類

静解析

共振解析

調和解析

座屈解析

過渡解析

2次元近似

平面ひずみ

平面応力

大変形

大変位

大ひずみ

オプション

加速度

角速度

熱荷重

初期応力(結果イン)

解析条件の設定

解析条件（ステップ/熱荷重）

ソルバの選択

応力解析

メッシュ

共振解析

調和解析

過渡解析

ステップ/熱荷重

加速度

角速度

ステップ/熱荷重

ステップ設定

熱荷重解析

多段階熱荷重解析

時刻設定

設定しない

設定する

基準温度(無応力温度)

25 [deg]

ステップ/到達温度設定

ス	到達
1	100

到達温度オプション

分布取込

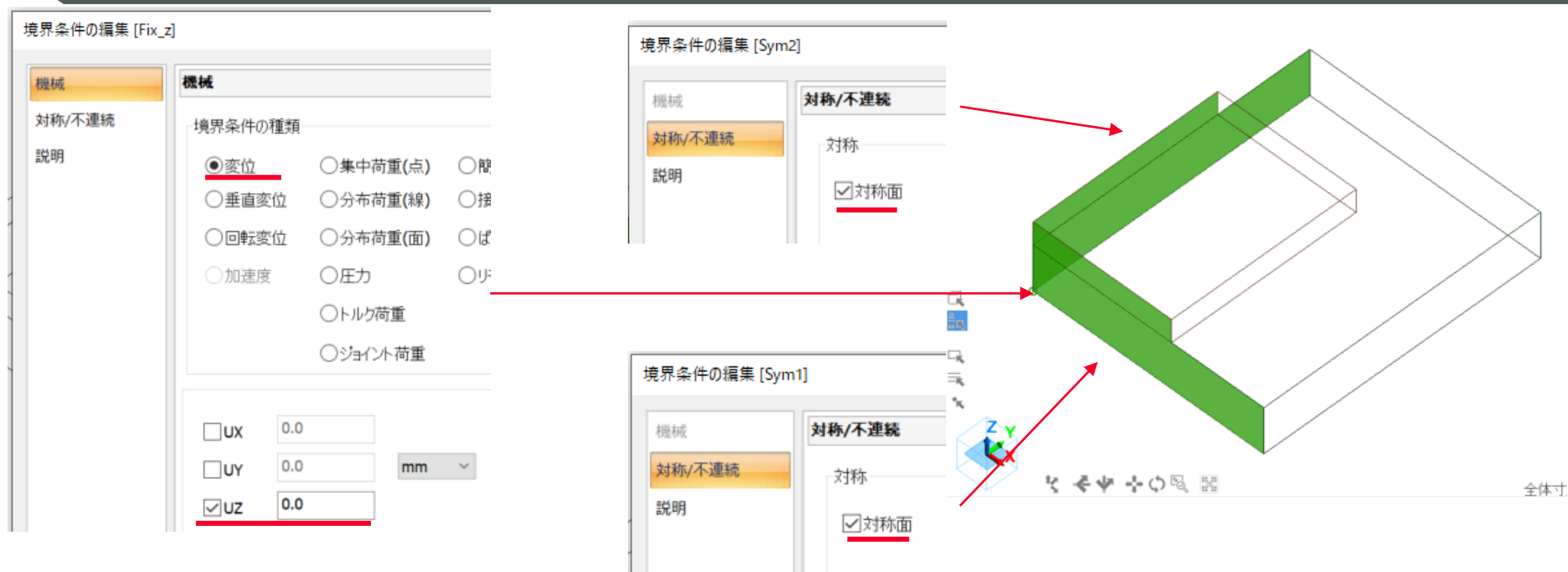
結果インポート

非線形解析オプション

分割ステップ

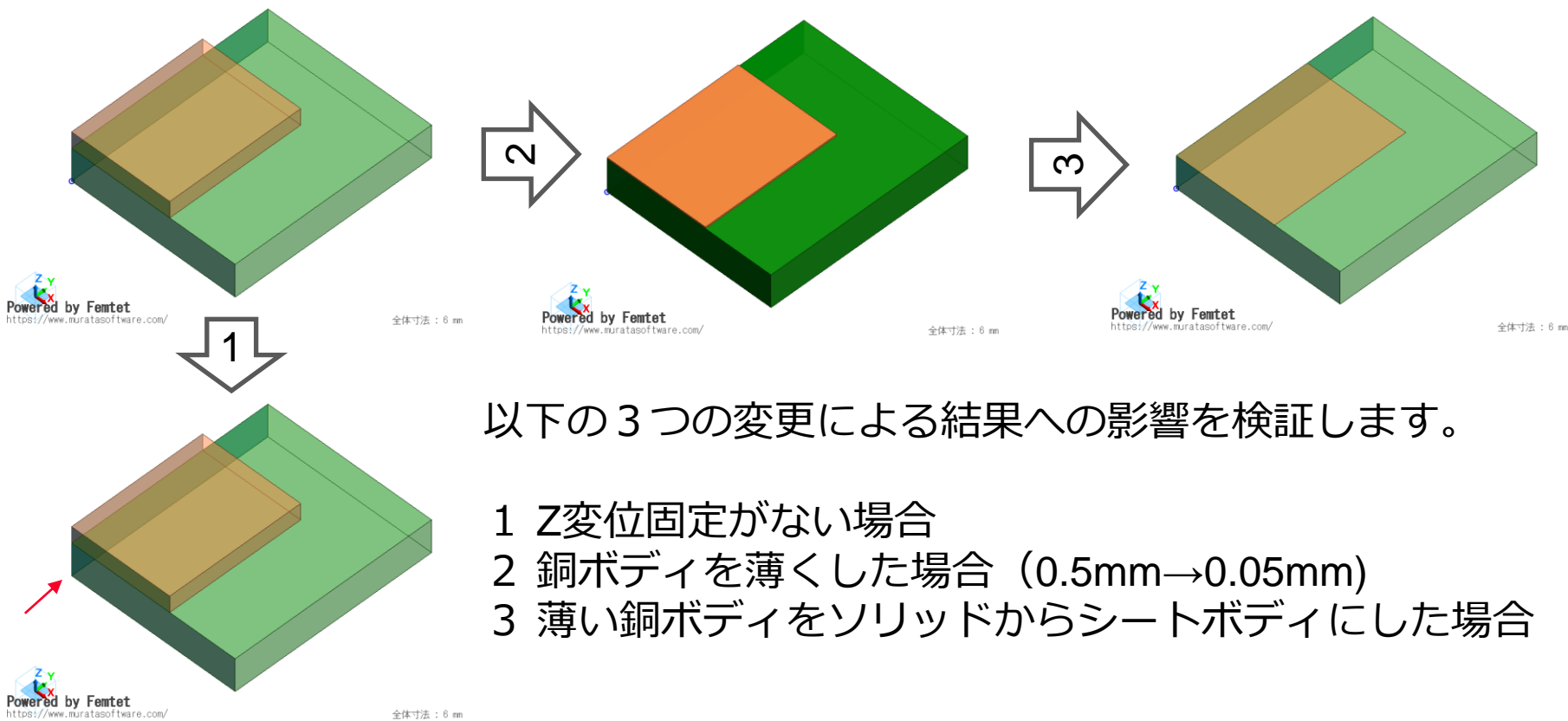
結果インポート

解析事例 熱荷重モデル（境界条件）



2つの対称面にはそれぞれ対称面境界条件を設定
基板の原点のZ変位を固定（基板端部の反り変位評価のため）

解析事例 熱荷重モデル（4つのモデル）



以下の3つの変更による結果への影響を検証します。

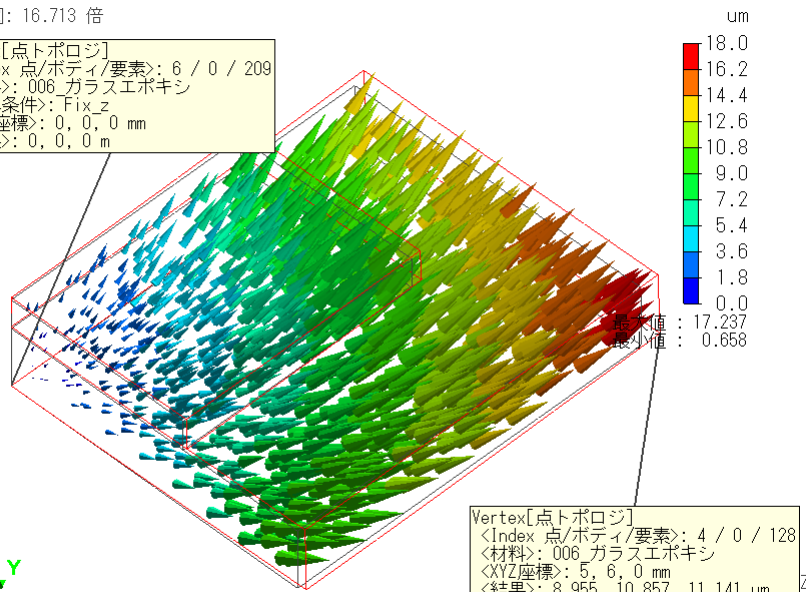
- 1 Z変位固定がない場合
- 2 銅ボディを薄くした場合 (0.5mm→0.05mm)
- 3 薄い銅ボディをソリッドからシートボディにした場合

解析結果 (Z変位固定の有無 変位ベクトル)

Z変位固定あり

変位図: 16.713 倍

Vertex[点トポロジ]
<Index 点/ボディ/要素>: 6 / 0 / 209
<材料>: 006 ガラスエポキシ
<境界条件>: Fix_z
<XYZ座標>: 0, 0, 0 mm
<結果>: 0, 0, 0 m



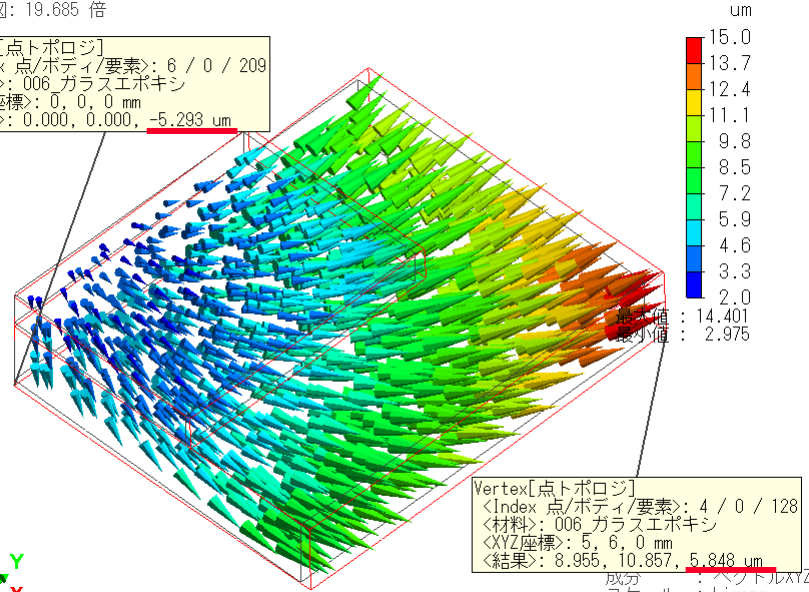
Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

全体寸法 : 6 mm

Z変位固定なし

変位図: 19.685 倍

Vertex[点トポロジ]
<Index 点/ボディ/要素>: 6 / 0 / 209
<材料>: 006 ガラスエポキシ
<XYZ座標>: 0, 0, 0 mm
<結果>: 0.000, 0.000, -5.293 um



Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

全体寸法 : 6 mm

Z変位固定なしの場合、モデル全体が移動するため反り量を求めるには基準点と基板端部のZ変位の引き算が必要になる (基準を固定すると引き算は不要)

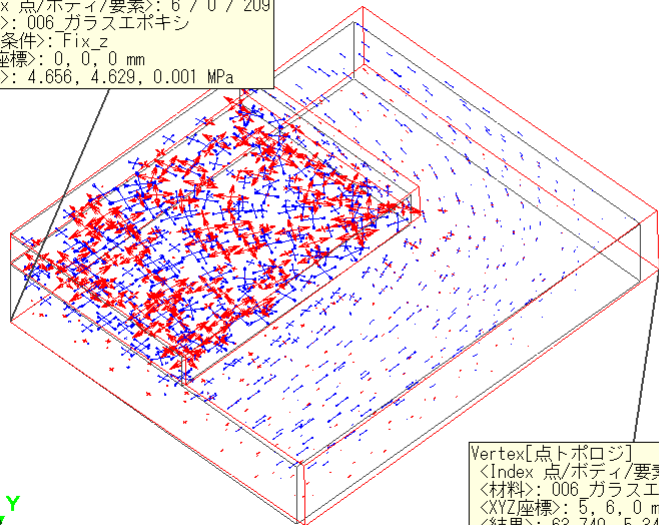
解析結果 (Z変位固定の有無 主応力ベクトル)

Z変位固定あり

変位図: 16.713 倍

Vertex[点トポロジ]
<Index 点/ボディ/要素>: 6 / 0 / 209
<材料>: 006 ガラスエポキシ
<境界条件>: Fix_z
<XYZ座標>: 0, 0, 0 mm
<結果>: 4.656, 4.629, 0.001 MPa

MPa
Max 24.898
Min -11.135



Vertex[点トポロジ]
<Index 点/ボディ/要素>: 4 / 0 / 128
<材料>: 006 ガラスエポキシ
<XYZ座標>: 5, 6, 0 mm
<結果>: 63.749, 5.344, -28.984 kPa

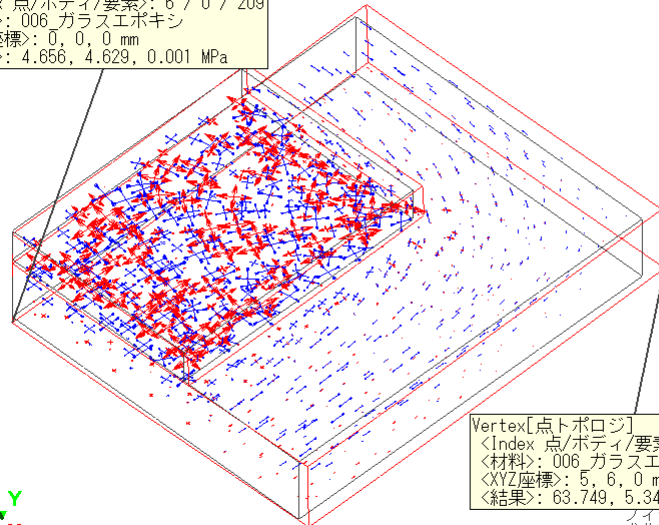
全体寸法 : 6 mm

Z変位固定なし

変位図: 19.685 倍

Vertex[点トポロジ]
<Index 点/ボディ/要素>: 6 / 0 / 209
<材料>: 006 ガラスエポキシ
<XYZ座標>: 0, 0, 0 mm
<結果>: 4.656, 4.629, 0.001 MPa

MPa
Max 24.898
Min -11.135



Vertex[点トポロジ]
<Index 点/ボディ/要素>: 4 / 0 / 128
<材料>: 006 ガラスエポキシ
<XYZ座標>: 5, 6, 0 mm
<結果>: 63.749, 5.344, -28.984 kPa

フィールド: 主応力
成分 : 主応力

全体寸法 : 6 mm

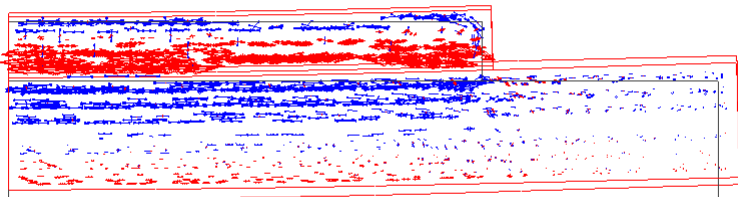
変形を抑制するような変位固定ではないため、応力分布には影響しない。
応力のみ知りたい場合は変位の基準点の変位固定境界は不要。

解析結果（銅ボディの厚み変更 主応力ベクトル）

変更前

変位図: 16.713 倍

MPa
Max 24.898
Min -11.135



ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力

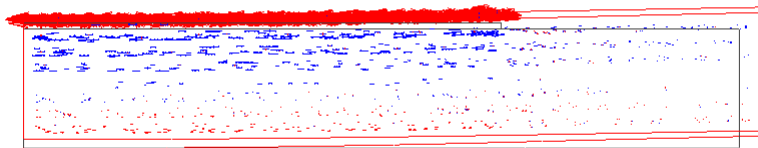
全体寸法 : 6 mm

Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

変更後

変位図: 18.745 倍

MPa
Max 50.544
Min -7.107



ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力

全体寸法 : 6 mm

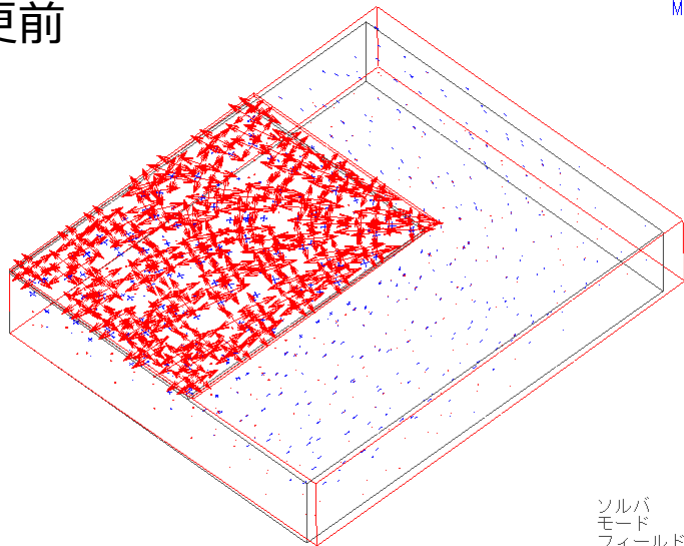
Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

銅ボディが厚い場合、曲げ剛性によって圧縮と引張の応力が混在していたが薄くなると曲げ剛性が弱くなって引張応力のみとなる。薄いソリッドボディの面方向の剛性が応力を決定づける。

解析結果（銅ボディをシートボディへ 主応力ベクトル）

変位図: 18.745 倍

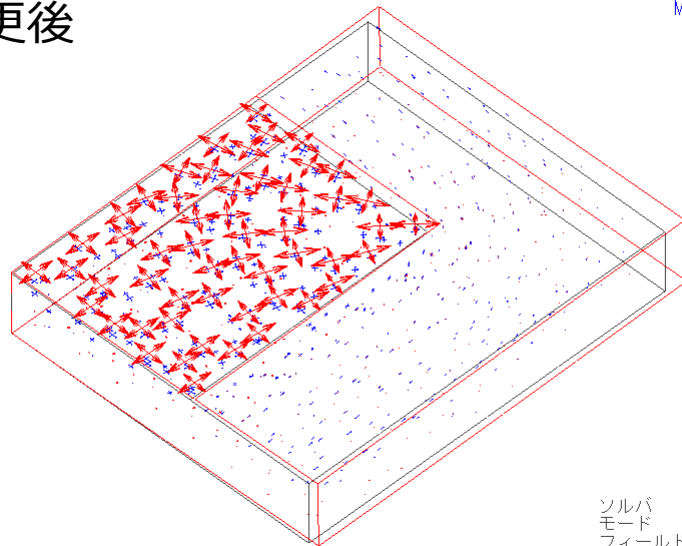
変更前



MPa
Max 50.544
Min -7.107

変位図: 18.811 倍

変更後



MPa
Max 51.553
Min -7.516


Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力
全体寸法 : 6 mm


Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

ソルバ : 応力解析
モード : 0: 静解析
フィールド: 応力[Pa]
成分 : 主応力
全体寸法 : 6 mm

ほぼ同等の応力分布の結果が得られている。
薄いソリッドボディはシートボディに変更することで計算を軽量化できる。

(注意) シートボディの厚み設定

ボディ属性の編集 [ボディ属性_002]

厚み/幅

熱荷重

初期ひずみ

方向

解析領域

説明

厚み/幅

シートボディの厚み

0

0.05 X10 [mm]

ワイヤボディの断面積

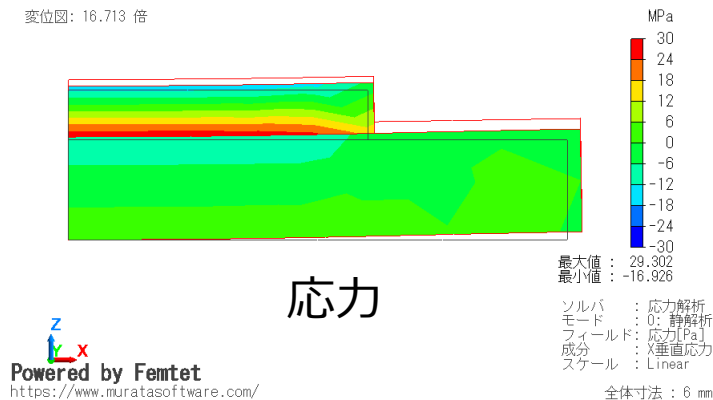
-6

1.0 X10 [mm²]

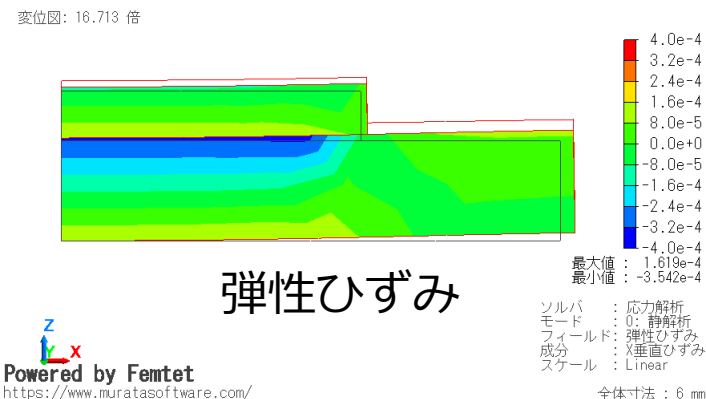
シートボディの面方向の剛性は厚み設定によって決定する。
想定している厚みを設定する必要がある。

(参考) 熱荷重によって発生する応力

線膨張係数の違いによって温度上昇によってガラエポが銅よりも膨張する。ガラエポと銅の界面ではガラエポが銅を引っ張る方向の膨張が発生するため、ガラエポ側では圧縮応力が発生し、銅側では引張応力が発生する。



応力



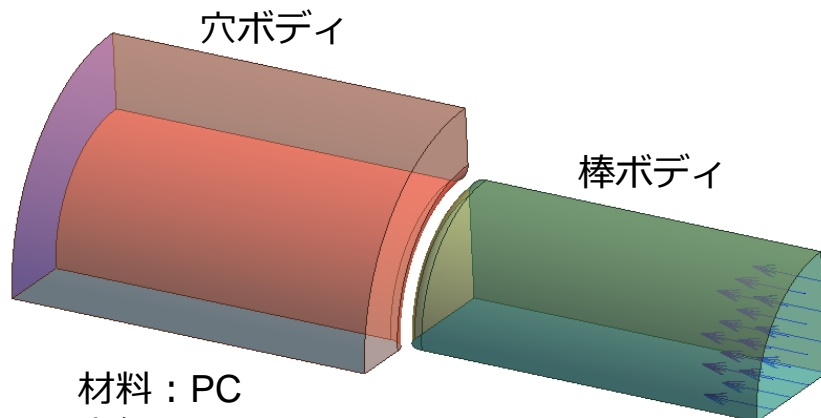
弾性ひずみ

膨張収縮は初期ひずみ（熱）として考慮され以下の関係から応力に寄与する弾性ひずみが算出される
弾性ひずみ = トータルひずみ - 初期ひずみ（熱）

一切の拘束のないモデルではトータルひずみ = 初期ひずみ（熱）となり弾性ひずみはゼロとなり応力は発生しないが、本モデルでは異なる線膨張係数が接合されている部分が拘束となり応力が発生する。

解析事例 圧入解析（解析条件）

1/4対称モデル



材料 : PC
穴径 : 6.0mm

材料 : ステンレス
棒径 : 6.4mm

全体寸法 : 20 mm

Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

大変位と接触境界によって非線形解析と判定される
分割ステップはデフォルト値の20とする

解析条件の設定 解析条件（応力解析）

ソルバの選択

- 応力解析
- メッシュ
- 共振解析
- 調和解析
- 過渡解析

応力解析

解析の種類

- 静解析
- 共振解析
- 調和解析
- 座屈解析
- 過渡解析

2次元近似

- 平面ひずみ
- 平面応力

大変形

- 大変位
- 大ひずみ

解析条件の設定 解析条件（ステップ/熱荷重）

ソルバの選択

- 応力解析
- メッシュ
- 共振解析
- 調和解析
- 過渡解析
- ステップ/熱荷重

ステップ/熱荷重

ステップ設定

- 単一ステップ
- 複数ステップ

時刻設定

- 設定しない
- 設定する

ステップ/到達温度設定

ス...	分割...
1	20

解析事例 圧入解析モデル（境界条件1）

The diagram illustrates a mechanical part with boundary conditions. The top surface is labeled "強制変位" (Forced Displacement) and the bottom surface is labeled "変位固定" (Displacement Fixation). The part is shown in a green color with blue arrows indicating forces. The software interface shows the boundary condition settings for Sym1, Sym2, and Fix.

境界条件の編集 [Sym1]

機械
対称/不連続
対称/不連続
説明
 対称面

境界条件の編集 [Sym2]

機械
対称/不連続
対称/不連続
説明
 対称面

強制変位

変位固定

境界条件の編集 [Move]

機械
対称/不連続
説明
境界条件の種類
 変位
 集中荷重(点)
 垂直変位
 分布荷重(線)
 回転変位
 分布荷重(面)
 加速度
 圧力
 トルク荷重
 ジョイント荷重

UX 0.0
 UY 0.0 mm
 UZ -5

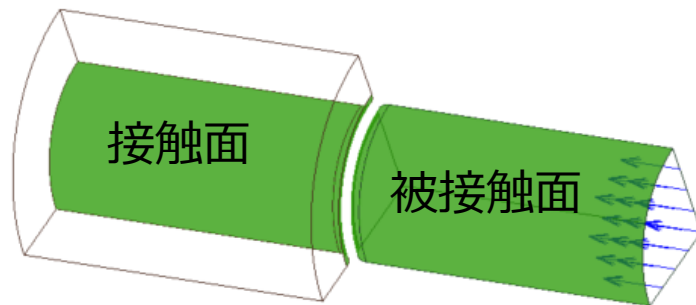
境界条件の編集 [Fix]

機械
対称/不連続
説明
境界条件の種類
 変位
 垂直変位
 回転変位
 加速度
 圧力
 トルク荷重
 ジョイント荷重

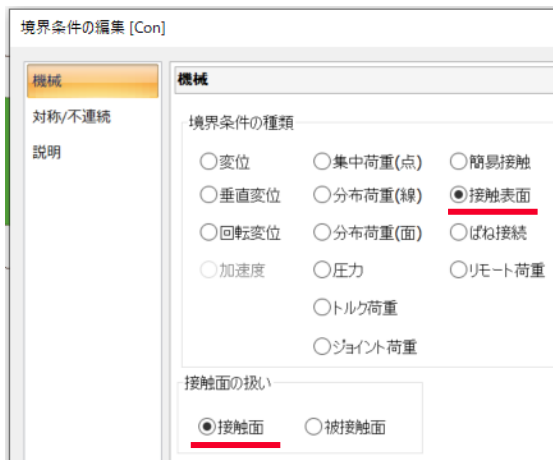
UX 0.0
 UY 0.0 mm
 UZ 0.0

対称面には対称境界、固定面と押し込む面に変位境界を設定しています。

解析事例 圧入解析モデル（境界条件2）



圧入によって接触が予測される面に接触面および被接触面の境界条件を設定し、両者のペア設定で摩擦係数を設定します

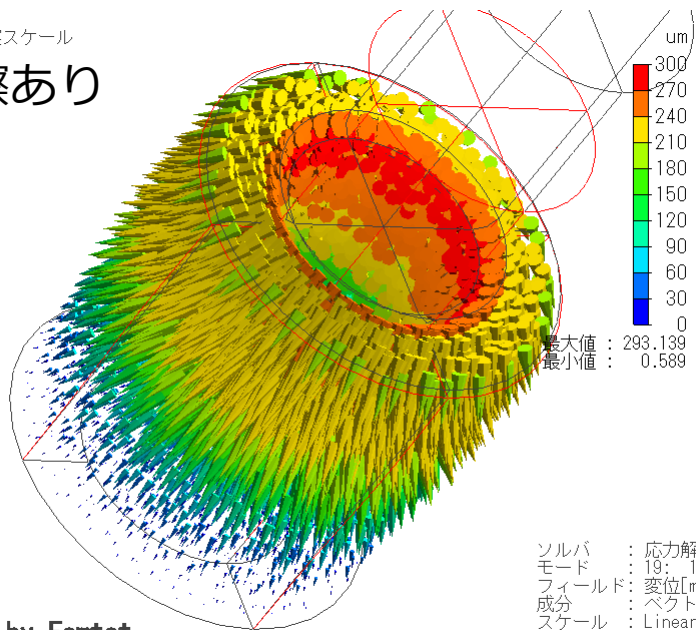


摩擦係数 0 の場合と比較する

解析結果1 圧入解析モデル（変位ベクトル）

変位図：実スケール

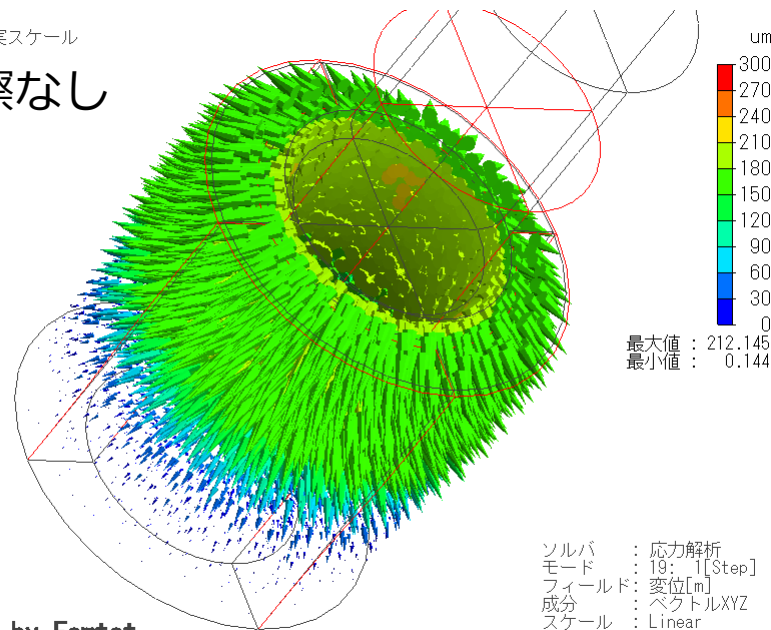
摩擦あり



Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

変位図：実スケール

摩擦なし



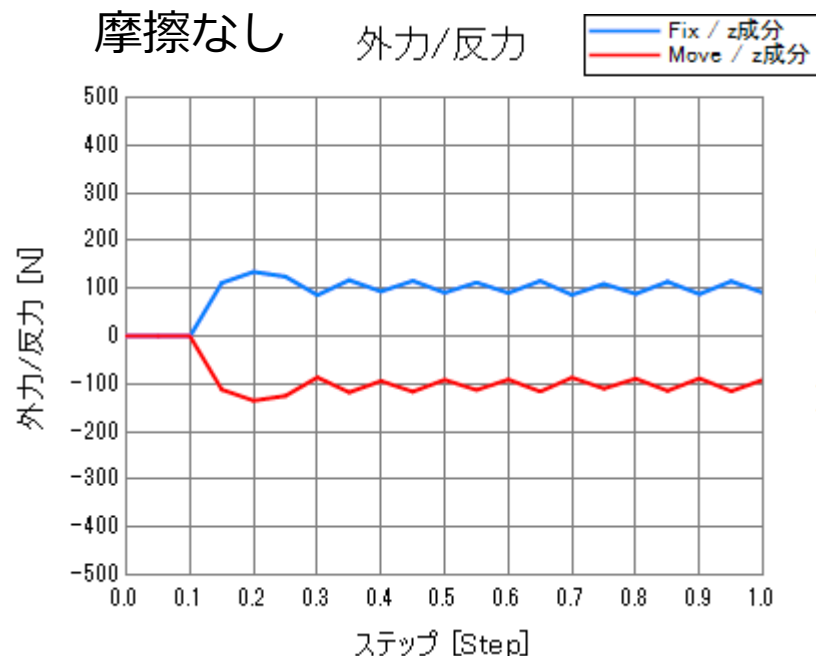
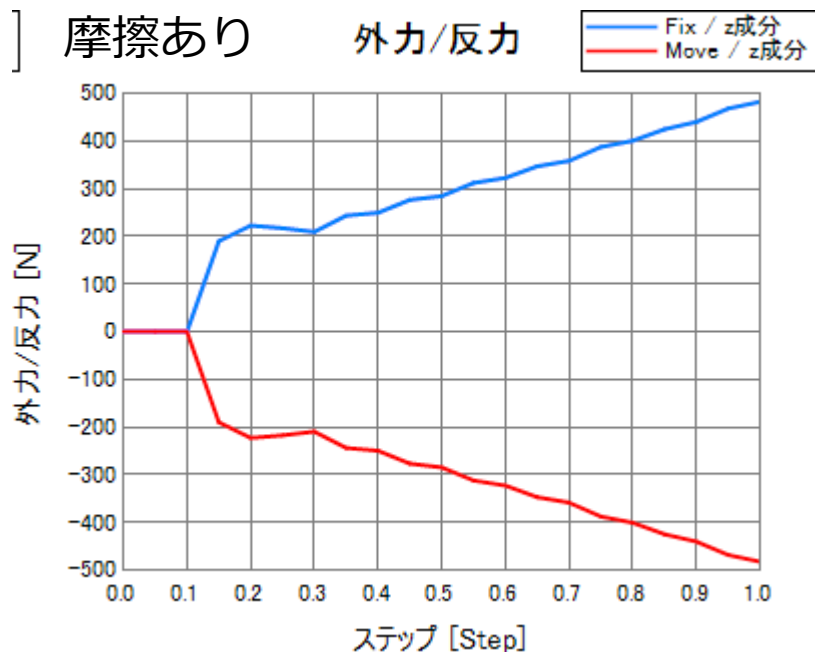
Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

全体寸法 : 20 mm

摩擦の有無によって穴ボディの変位が異なる。
摩擦を考慮することでZ軸マイナス方向への変位が大きくなる。

※棒ボディの変位は非表示
※フルモデル表示

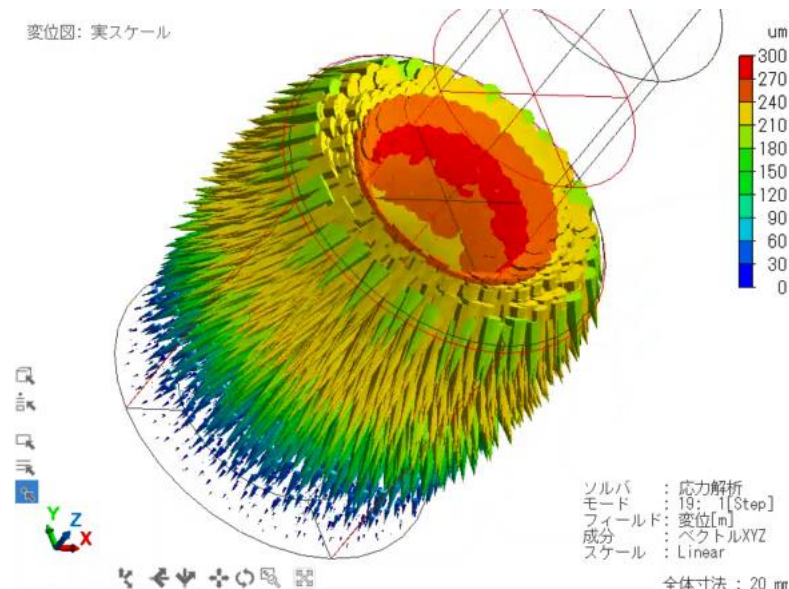
解析結果2 圧入解析モデル（挿入力）



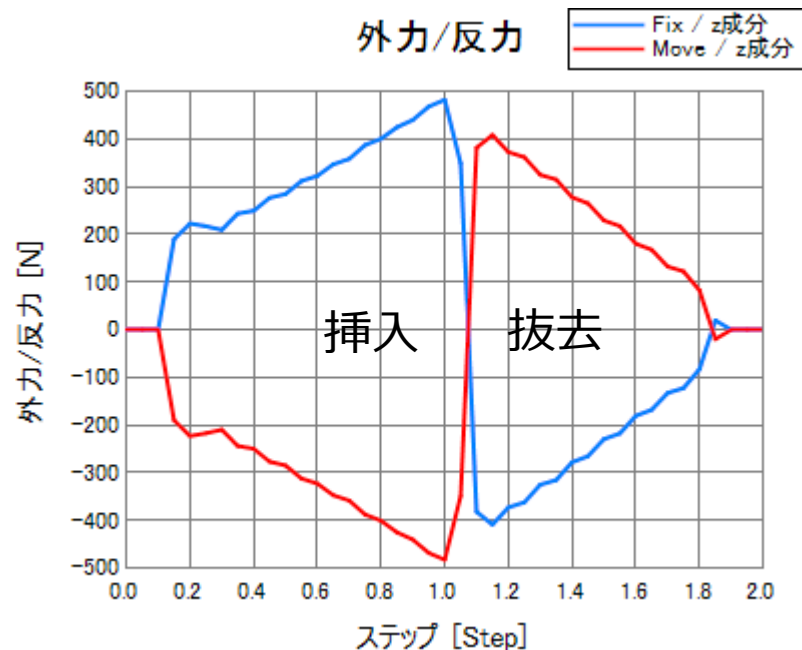
摩擦ありの場合、挿入量が増加するとともに接触力（挿入力）が増大するが、摩擦なしの場合は挿入開始以降の接触力（挿入力）は一定

(参考) 挿入抜去解析

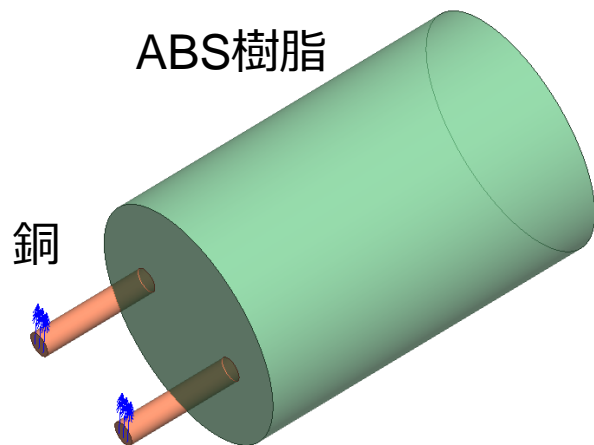
挿入後に抜去するステップを追加することで挿入抜去の挙動を解析できます。



変位ベクトルアニメーション



反カグラフ




Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

全体寸法 :

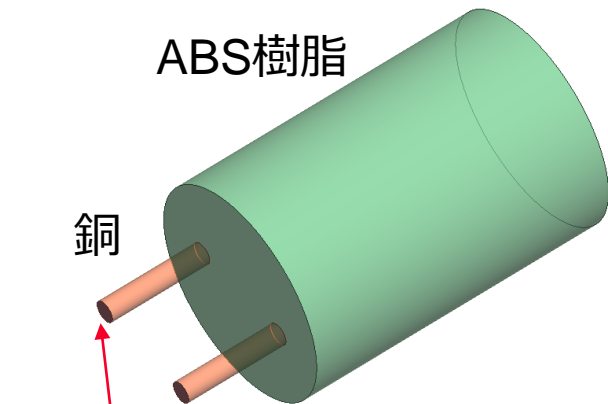
2本の端子をもつリード部品の根本に振動変位が印加された場合の解析事例を示します。

振動変位のタイプに応じて調和解析、過渡解析を実施します。いずれの場合もあらかじめ共振解析でモデルの共振周波数を把握します。

解析の種類	目的、用途
共振解析	共振周波数や共振モードの確認 調和解析のスweep設定、過渡解析の時間ステップ設定の参考とする
調和解析	正弦振動の解析
過渡解析※	任意波形振動の解析

※応力拡張オプション機能です。

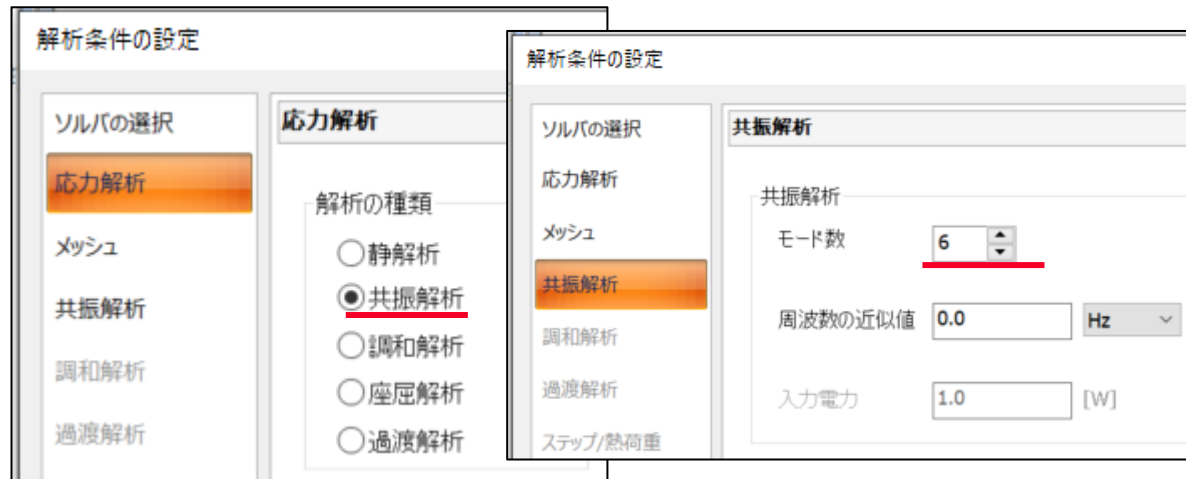
解析事例 振動解析モデル（共振解析モデル）



Powered by Femtet
<https://www.muratsoftware.com/>

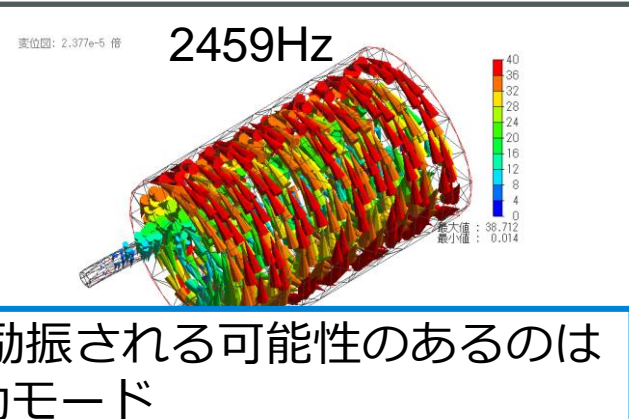
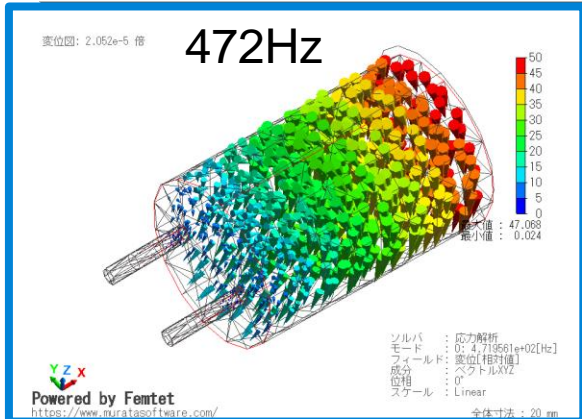
全体寸法：20 mm

変位固定
(変位ゼロ)

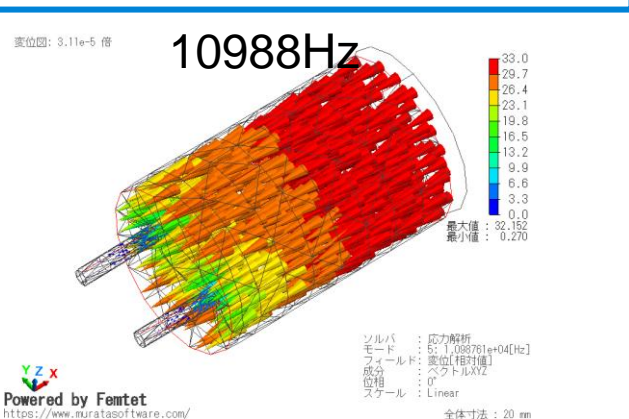
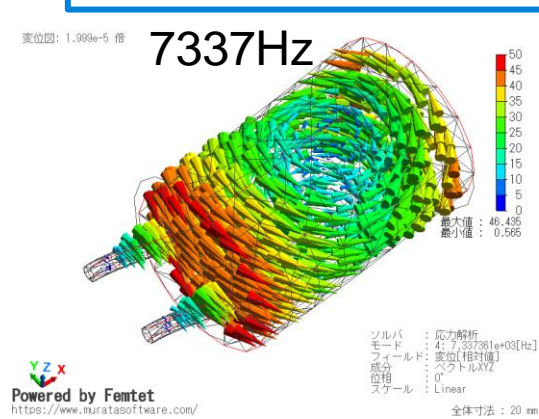
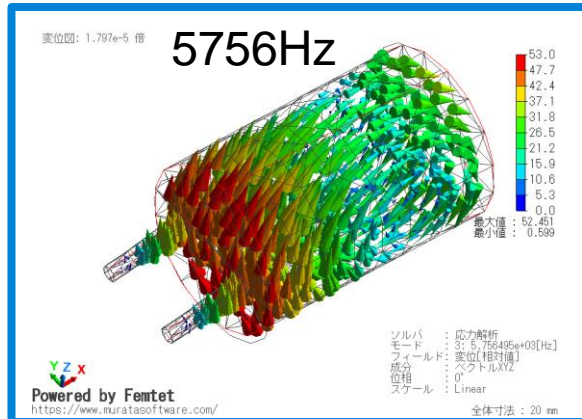


振動変位によって発生する振動モードの高次モードまで把握するため共振解析のモード数をデフォルトの3から6へ変更

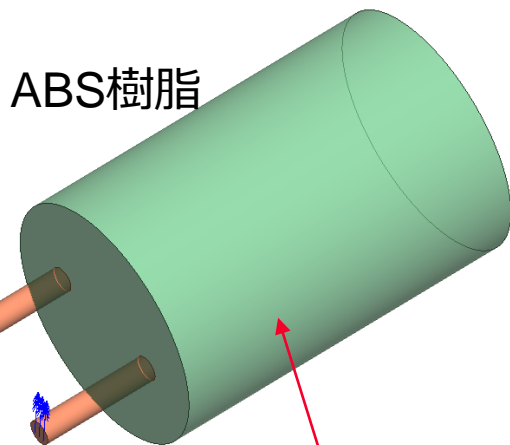
解析結果 振動解析モデル（共振解析モデル）



Z軸方向の振動変位で励振される可能性のあるのは
472Hzと5756Hzの振動モード



解析事例 振動解析モデル（調和解析モデル）



Powered by Featet
<https://www.murata-software.com/>

全体寸法：20 mm

振動変位
0.1mm

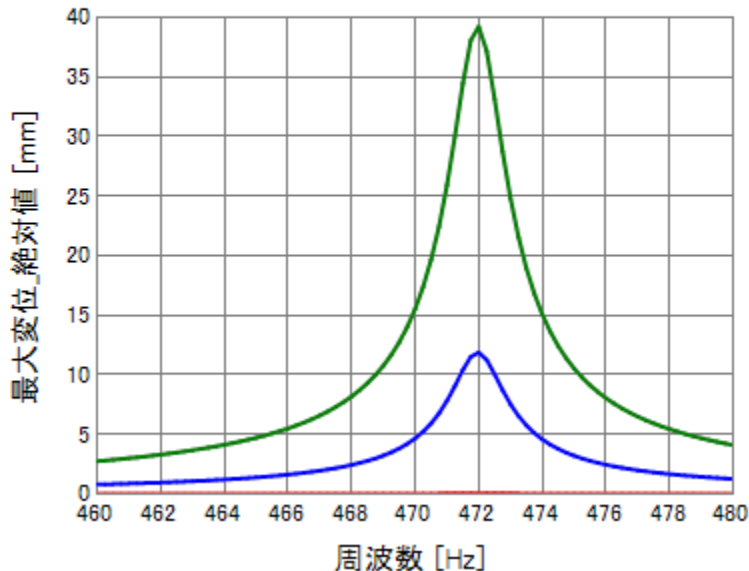


共振周波数の近傍において振動変位が急激に変化するため、周波数スイープ設定では共振周波数前後を細かく刻む。

損失がゼロの場合は共振点の振動変位は無量大となるため、損失を設定する。

— 最大変位 / x成分 / 絶対値
— 最大変位 / y成分 / 絶対値
— 最大変位 / z成分 / 絶対値

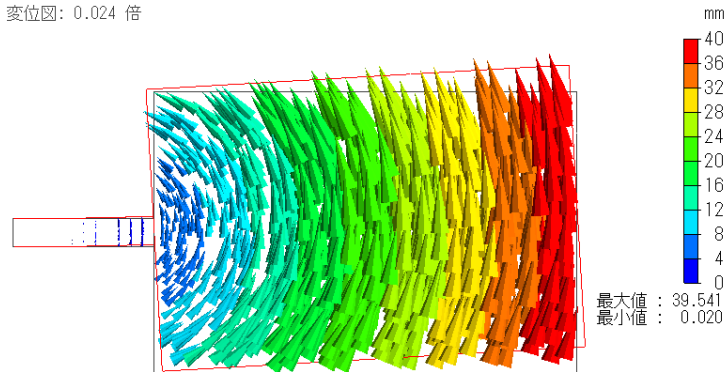
最大変位_絶対値



損失が小さいほど鋭いピークとなる

472Hzの結果

変位図: 0.024 倍



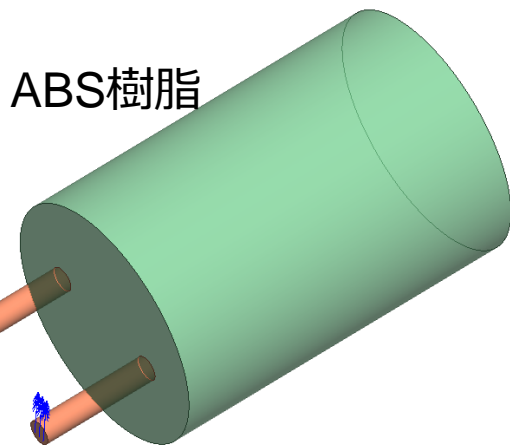
ソルバ : 応力解析
モード : 48: 4.720000e+02[Hz]
フィールド: 変位[m]
成分 : ベクトルXYZ
位相 : 90°
スケール : Linear

全体寸法 : 20 mm

Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

共振周波数では、強制振動変位よりもはるかに大きい振動変位が発生する。

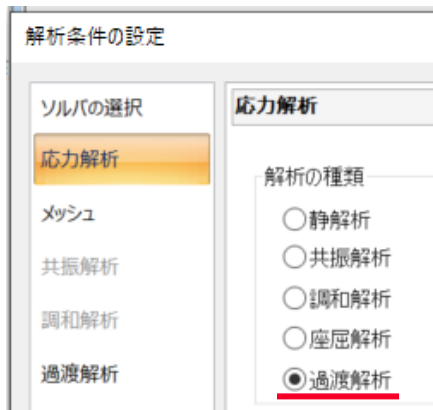
解析事例 振動解析モデル（過渡解析モデル）



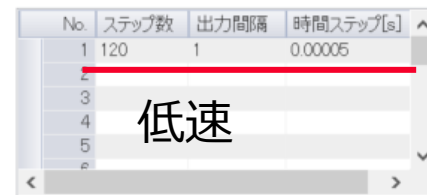
Powered by Femtet
<https://www.murat software.com/>

振動変位
(時間重み設定)
任意波形の設定可

全体寸法：20 mm



リード端子の振動速度が
高速と低速の場合の2条件間
で結果を比較します。



解析事例 振動解析モデル (過渡解析モデル)

境界条件の編集 [move]

機械

対称/不連続
説明

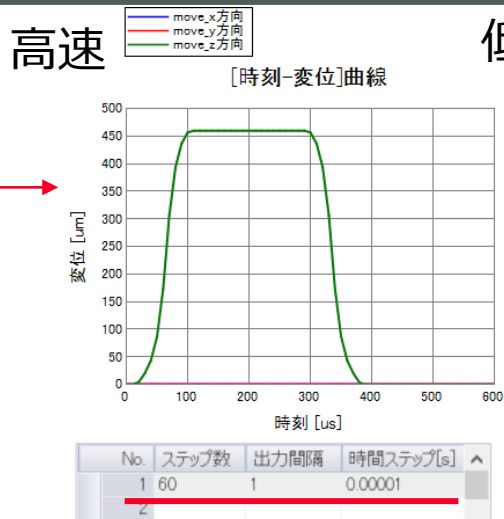
境界条件の種類

- 変位
- 集中荷重(点)
- 簡易接触
- 音響インピーダンス
- 垂直変位
- 分布荷重(線)
- 接触表面
- 開放境界
- 回転変位
- 分布荷重(面)
- ばね接続
- 拘束なし
- 加速度
- 圧力
- リモート荷重
- トルク荷重
- ジョイント荷重

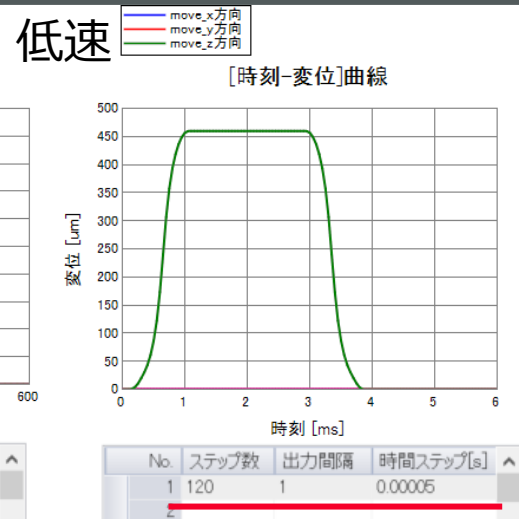
時間依存
 重み関数
 等変位

UX
 UY
 UZ

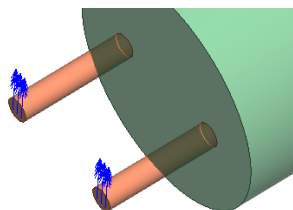
UX 0.0
 UY 0.0 mm
 UZ 0.2



600usを10us刻み

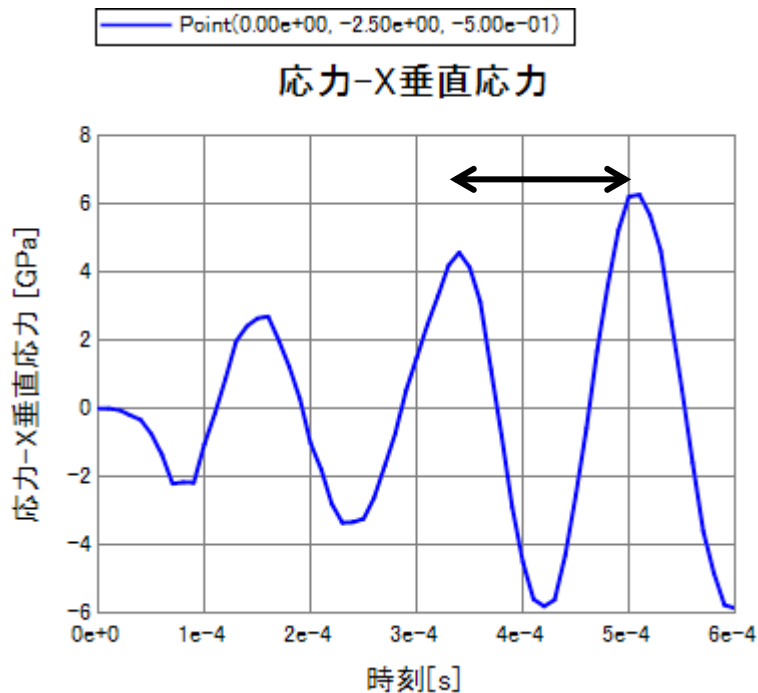


6msを50us刻み



以下の2つの条件で結果を比較します。
(高速) 100usオーダーで振動する変位条件
(低速) 1msオーダーで振動する変位条件
過渡解析の時間ステップは各条件に応じて調整します

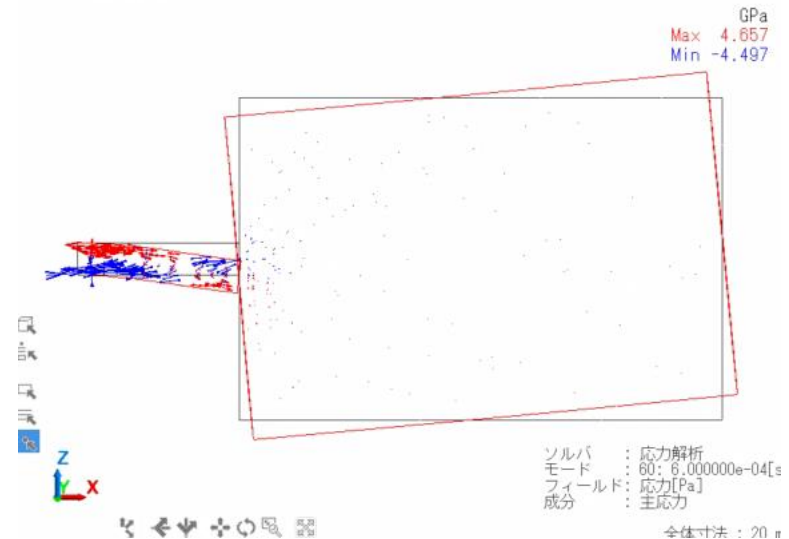




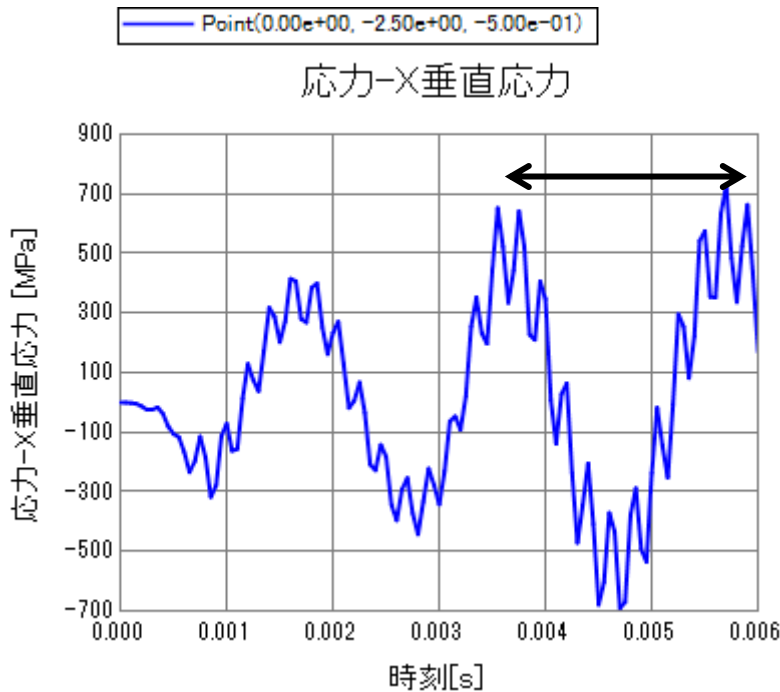
端子根本の応力の振動周期は
5.8kHzの周期0.172msによく一致

主応力ベクトルアニメーション

変位図: 実スケール



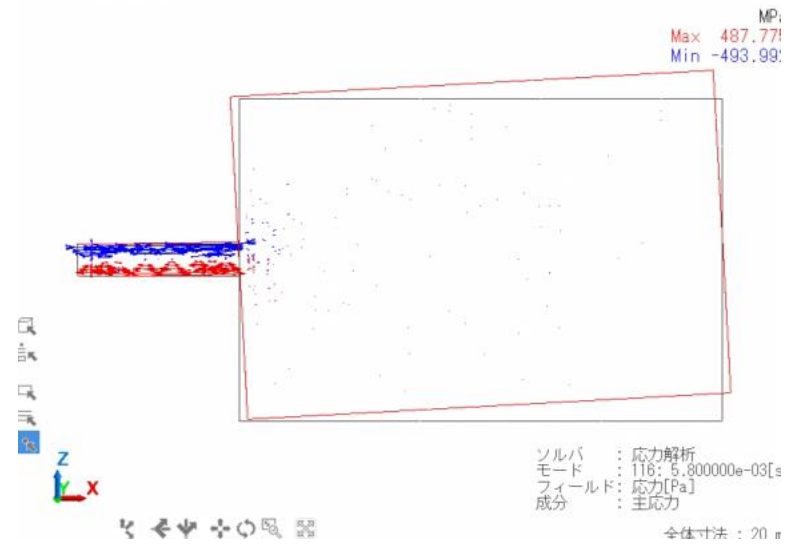
変位速度が高速であるため高次モードの
5.8kHzの振動が発生している



端子根本の応力の振動周期は
472Hzの周期2.1msによく一致
※高次モード5.8kHzの振動の混入も見られる

主応力ベクトルアニメーション

変位図: 実スケール



変位速度が低速であるため低次モードの
472Hzの振動が発生している

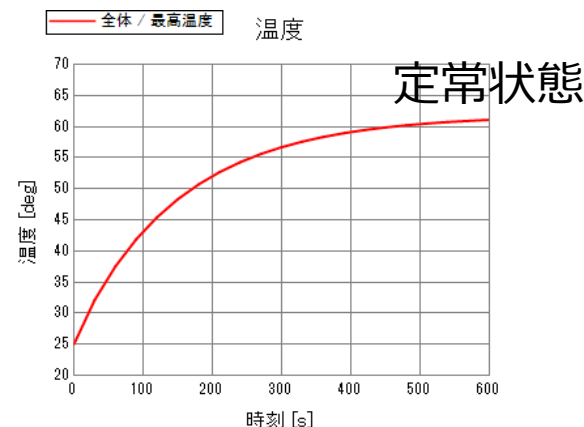
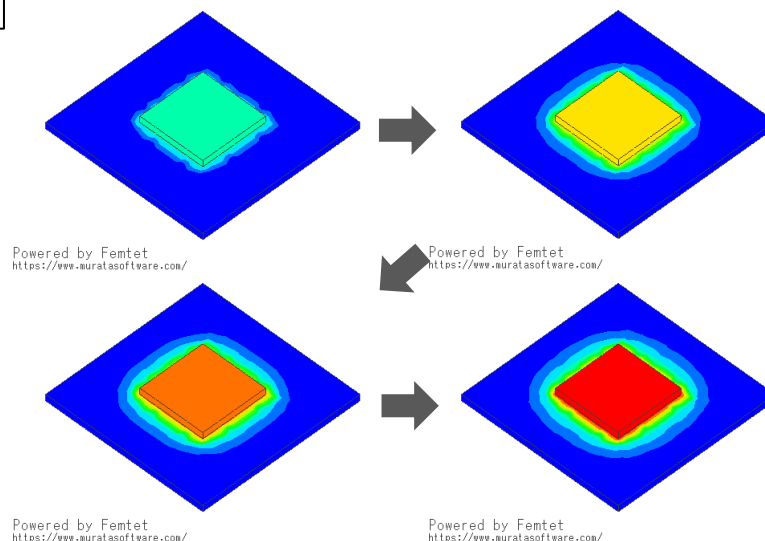
項目	コツ
対称モデル	対称性のあるモデルは対称部位のみ切り取った対称モデルの解析をすることで解析を軽量化できる。 解析結果はフルモデル表示も対称モデル表示も可能。
接触解析	接触解析を安定して解くには可能な限り変位を拘束することが有効。特に対称モデル化は極めて有効。 接触面と被接触面の設定のコツはヘルプにも記載。
共振解析	調和解析や過渡解析で振動を解く場合は最初に共振解析を実施して共振周波数や共振モードを把握することで周波数スイープや時間ステップの設定に活かすことができる。
過渡解析	解析対象モデルの速度に応じて時間ステップの調整を行うと時間軸上でスムーズに推移する結果を得やすい。

熱伝導解析

解析の種類

- 定常解析
- 過渡解析

解析の種類	何を解いているか？
定常解析	熱伝導方程式（時間依存なし）
過渡解析	熱伝導方程式（時間依存考慮）



時間経過が分かる過渡解析
定常状態が分かる定常解析

熱伝導解析の概要（熱的な境界条件）

熱

境界条件の種類

温度 熱抵抗

熱流束 測定端子

熱伝達・対流 断熱(設定なし)

輻射の設定

なし

個別設定

等温度

種類	用途
温度、熱流束	温度や熱の流入を数値で指定する
熱抵抗	ボディ間の界面に熱抵抗を設定する
熱伝達／対流	周囲の空気の流れによる放熱を設定する
輻射	電磁波（赤外線）による放熱を設定する

※

※解析事例で物理イメージと設定例を示します。

熱伝導解析の概要（その他の設定項目）

解析条件

解析条件の設定

ソルバの選択

熱伝導解析

メッシュ

過渡解析

高度な設定

モニタリング

結果インポート

説明

熱伝導解析

解析の種類

定常解析

過渡解析

環境温度 [deg]

輻射の設定 ...

輻射のまとめ設定テーブル

まとめ設定テーブル

輻射の設定

ボディ属性	表面の境界条件	一括設定	輻射の種類	輻射率			材料
				指定方法	温度依存	値	
VOL2	外部境界条件	<input type="checkbox"/>	なし			001_アルミナ	
VOL1	外部境界条件	<input type="checkbox"/>	なし			006_ガラスエポキシ	

デフォルト値

外部境界条件設定

環境(速度重視)

個別設定 ...

輻射率

値を反映

輻射の外部境界

- 他のボディと接していない固体表面
- 流体材料ボディと接している固体表面

※ 境界条件が設定されている面は除く

ボディ属性に設定されている境界条件をすべて表示する

設定保存 キャンセル ヘルプ

Femtet2021から解析条件に以下のUIが追加されています。

- ・モニタリング
- ・輻射のまとめ設定

詳細はダイアログ右下のヘルプボタンで表示されるヘルプを参照してください。

OK キャンセル ヘルプ(H)

熱伝導解析の概要（その他の設定項目）

材料定数

材料定数の編集 [001_アルミナ]

固体/流体

比熱
密度
熱伝導率
説明

熱伝導率

異方性
 等方
 異方

温度依存性
 なし
 あり

熱伝導率
33 W/m/deg

※熱伝導率、密度、比熱が参照されます。
(密度と比熱は過渡解析の場合のみ)

ボディ属性

ボディ属性の編集 [VOL2]

厚み/幅

初期温度
発熱量
熱表面
方向
解析領域
説明

発熱量

指定方法
 総発熱量
 発熱密度

温度依存性
 なし
 あり

時間依存
重み関数

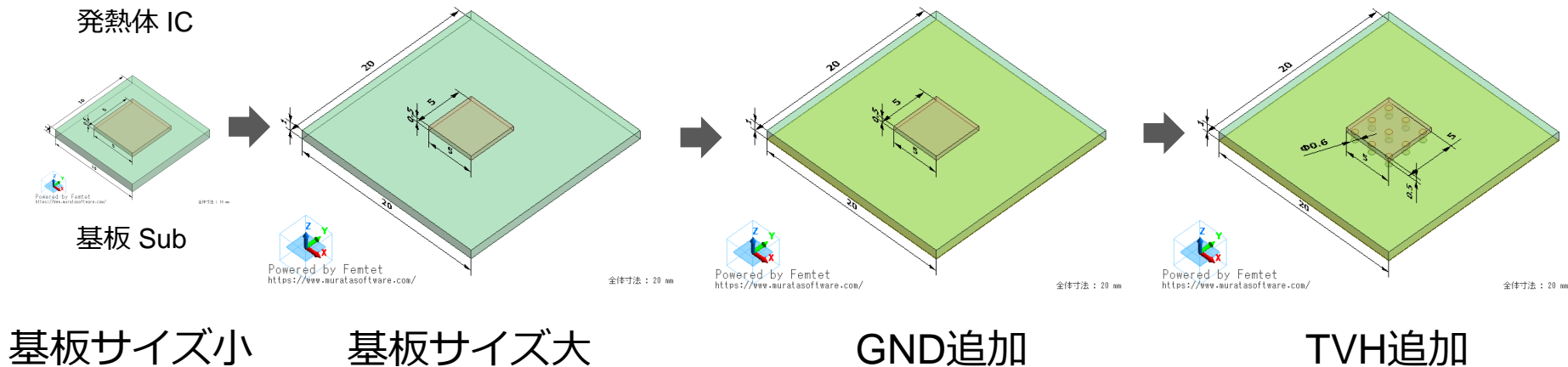
総発熱量
1 W
 分布取込
分布データ

※初期温度（過渡解析）、発熱量、熱表面（輻射率）
などを設定します。

他にも多くの設定項目があります。

詳しくはダイアログ右下の「ヘルプ」ボタンを押してください

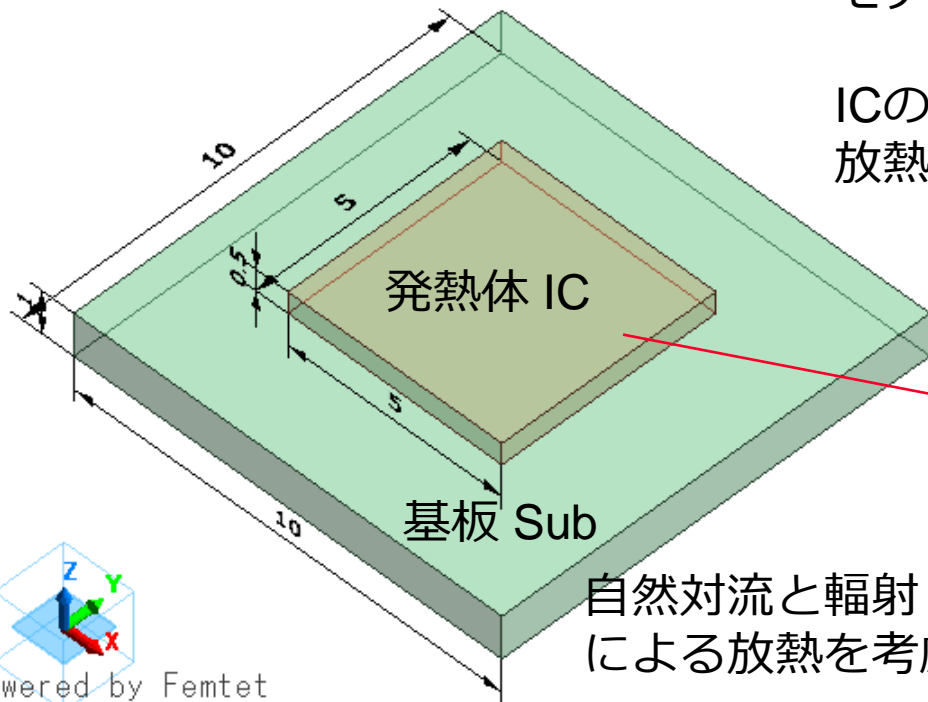
OK キャンセル ヘルプ(H)



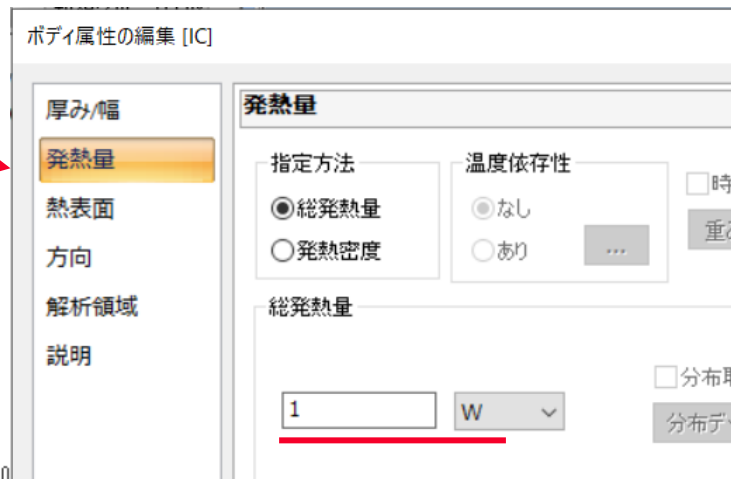
基板Subに発熱体ICが実装されているモデルをベースに段階的に放熱改善策を施して結果に対する変化を検証します。

基板にIC (発熱体) が実装されているモデルで定常解析を行った事例です。

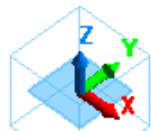
ICの発熱量は 1 Wを設定
放熱条件として自然対流と輻射を考慮します。



自然対流と輻射
による放熱を考慮

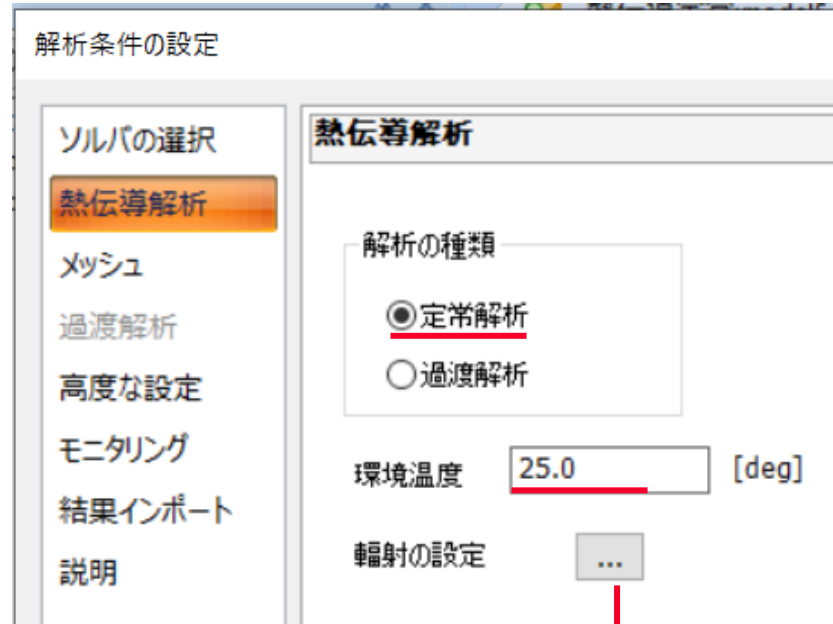
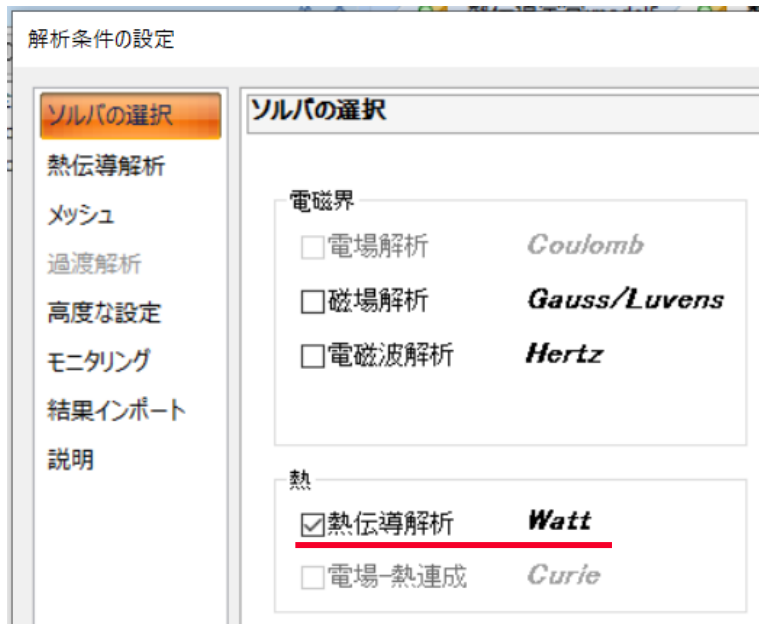


全体寸法 : 10



Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

解析事例 定常解析モデル 1 (解析条件)



スライド (輻射設定) へ

解析事例 定常解析モデル 1 (外部境界条件)

境界条件の編集 [外部境界条件]

熱

対称/不連続
説明

境界条件の種類

温度 熱抵抗
 熱流束 測定端子
 熱伝達・対流 断熱(設定なし)

熱伝達・対流の種類

熱伝達係数指定
 自然対流(係数自動計算)
 自然対流(係数直接指定)
 強制対流

輻射の設定

環境(速度重視) ▼
 個別設定 ...

室温(环境温度)

解析条件の环境温度を使用する ▼
25.0 [deg] ⓘ

時間依存 分布取込
重み開放 分布データ

放熱条件として
自然対流と環境輻射の両者
を考慮します。

外部境界条件に放熱条件
を設定することで個別の
面への設定は不要となります。

解析事例 定常解析モデル 1 (輻射設定)

まとめ設定テーブル

輻射の設定

ボディ属性	表面の境界条件	一括設定	輻射の種類	輻射率			材料
				指定方法	温度依存	値	
IC	外部境界条件	<input type="checkbox"/>	環境(速度重視)	デフォルト値	なし	0.8	002_ポリカーボネート(PC)
Sub	外部境界条件	<input type="checkbox"/>	環境(速度重視)	デフォルト値	なし	0.8	006_ガラスエポキシ

デフォルト値

外部境界条件設定

環境(速度重視) ▼

個別設定

...

輻射率

0.8

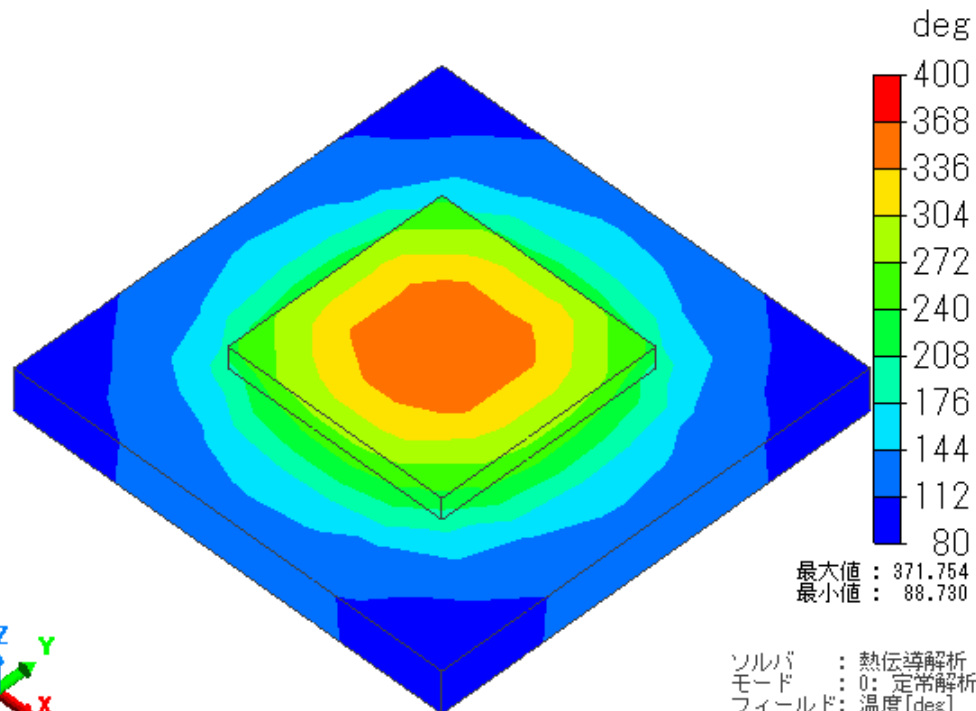
値を反映

輻射の外部境界

- ・他のボディと接していない固体表面
 - ・流体材料ボディと接している固体表面
- ※ 境界条件が設定されている面は除く

ボディ属性に設定されている境界条件をすべて表示する

解析結果 定常解析モデル 1 (温度分布)



最高温度 371.8度
最低温度 88.7度

最大値 : 371.754
最小値 : 88.730

ソルバ : 熱伝導解析
モード : 0: 定常解析
フィールド: 温度[deg]
スケール : Linear

全体寸法 : 10 mm

解析結果 定常解析モデル1 (熱収支)

テーブル

収束状況 | 温度[deg] | 境界温度[deg] | 熱収支[W] | 熱流量[W] | 熱抵抗[deg/W] | ジャンクション熱抵抗[deg/W] | 有限要素法情報

	発熱量	熱伝導(in)	対流(in)	輻射(in)	その他(in)	熱伝導(out)	対流(out)	輻射(out)	その他(out)
Sub	0	6.109e-1	0	0	0	1.003e-3	0.338	0.272	0
IC	<u>1</u>	1.003e-3	0	0	0	<u>6.109e-1</u>	<u>0.225</u>	<u>0.165</u>	0
全体	1	0.000e+0	0	0	0	0.000e+0	0.563	0.437	0

対流 0.225W、輻射 0.165W

発熱 1 W

熱伝導 0.61W

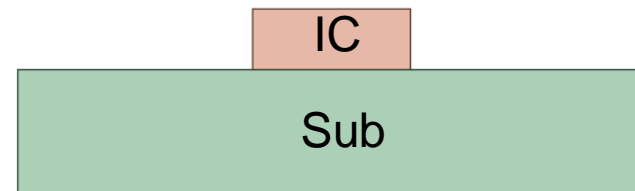
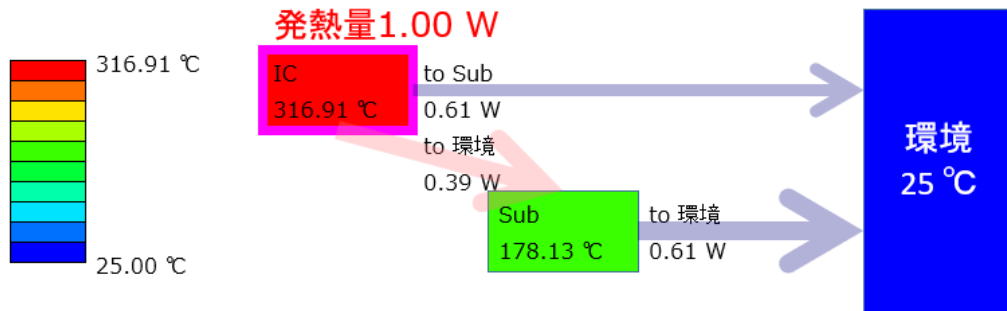
対流 0.338W、輻射 0.272W

熱収支テーブルから
周囲空間への放熱量や
ボディ間の熱伝導の
内訳が分かる。

放熱量全体の39%はICから、
61%は基板から周囲空間へ
放熱している。

熱経路可視化（モデル1）

『model1』



放熱ルートは2つ

IC→Sub→環境 (0.61W)
IC→環境 (0.39W)

Femtetの結果表示機能だけでは、熱の大まかな流れを把握するのが困難です。

温度コンタ表示: 熱流は可視化していないので熱の移動経路が分からない
熱流束ベクトル表示: 流れの方向は分かるが、具体的な熱流量が分からない
熱収支、熱流量、熱抵抗等のテーブル表示: 熱の流れを把握するには、データの中身を理解して整理する必要があり、難易度が高い

これらの課題を解決するため、熱の流れを可視化するExcelツールを用意しました。

例: 例題22「例題22 半導体パッケージのジャンクション熱抵抗測定」の解析モデル1

JUNCTION(発熱体)の熱が最終的に環境に放出されますがそれまでの経路として、チップ、モールド、インターポザー、はんだ、基板を通して環境に到達の様子を確認することができます。矢印の太さが熱流量の大きさを示すため、太い矢印に着目すれば、おおよかな熱の流れを把握することができます。主に、JUNCTION(発熱体)⇒インターポザー⇒はんだ⇒基板⇒環境という経路で熱が流れていくことが分かります。

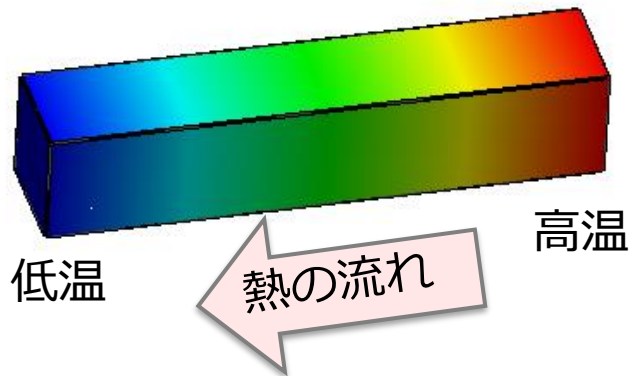
『model_1』

From	To	Power (W)
JUNCTION (48.44 °C)	CHIP (25.00 °C)	2.00 W
JUNCTION	to CHIP	1.94 W
JUNCTION	to MOLD	0.06 W
JUNCTION	to INTERPOSER_LAYER	0.06 W

詳細は関連するヘルプに記載

エクセルマクロをダウンロード可能

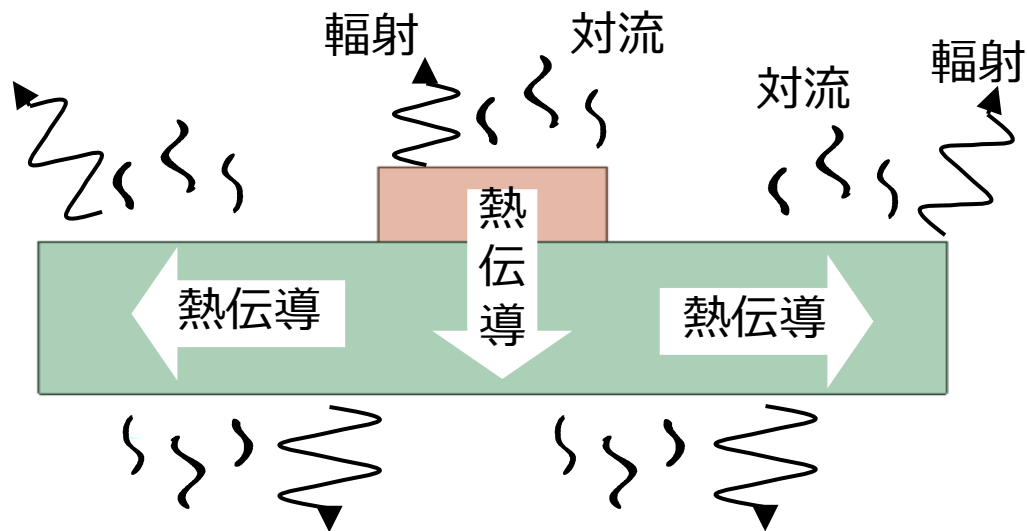
熱伝導体内部を原子の熱振動（絶縁体）や自由電子（金属）を介して熱が伝わる現象
温度が高い部位から低い部位に向かって熱が伝わる（フーリエの法則）



$$\text{熱流束} = -\text{熱伝導率} \times \text{温度勾配}$$

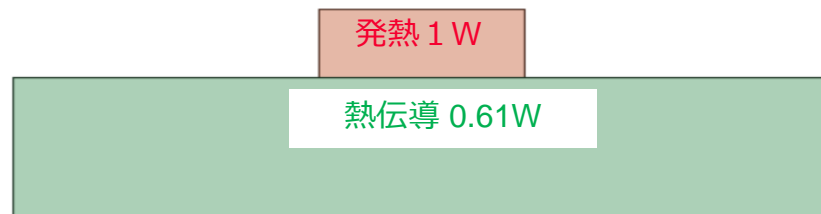
↑
単位面積あたりの熱流量

物体表面から周囲の空気などの流体へ熱が伝わる現象は熱伝達と呼ぶ。
熱伝導と熱伝達は異なる物理現象である。



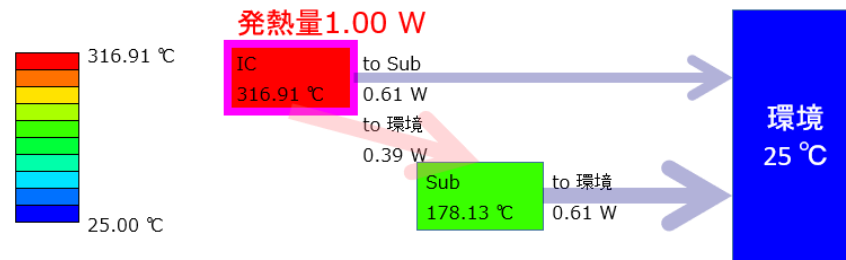
モデル1の結果

対流 0.225W、輻射 0.165W



対流 0.338W、輻射 0.272W

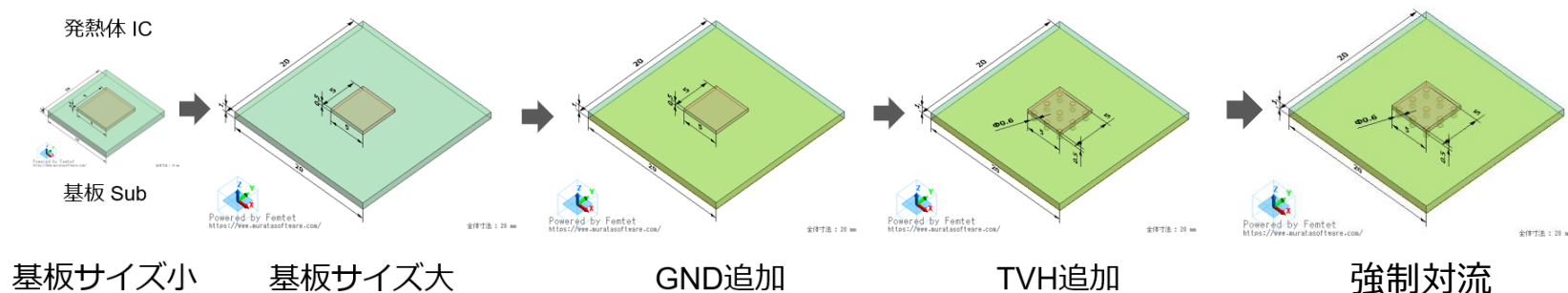
『model1』



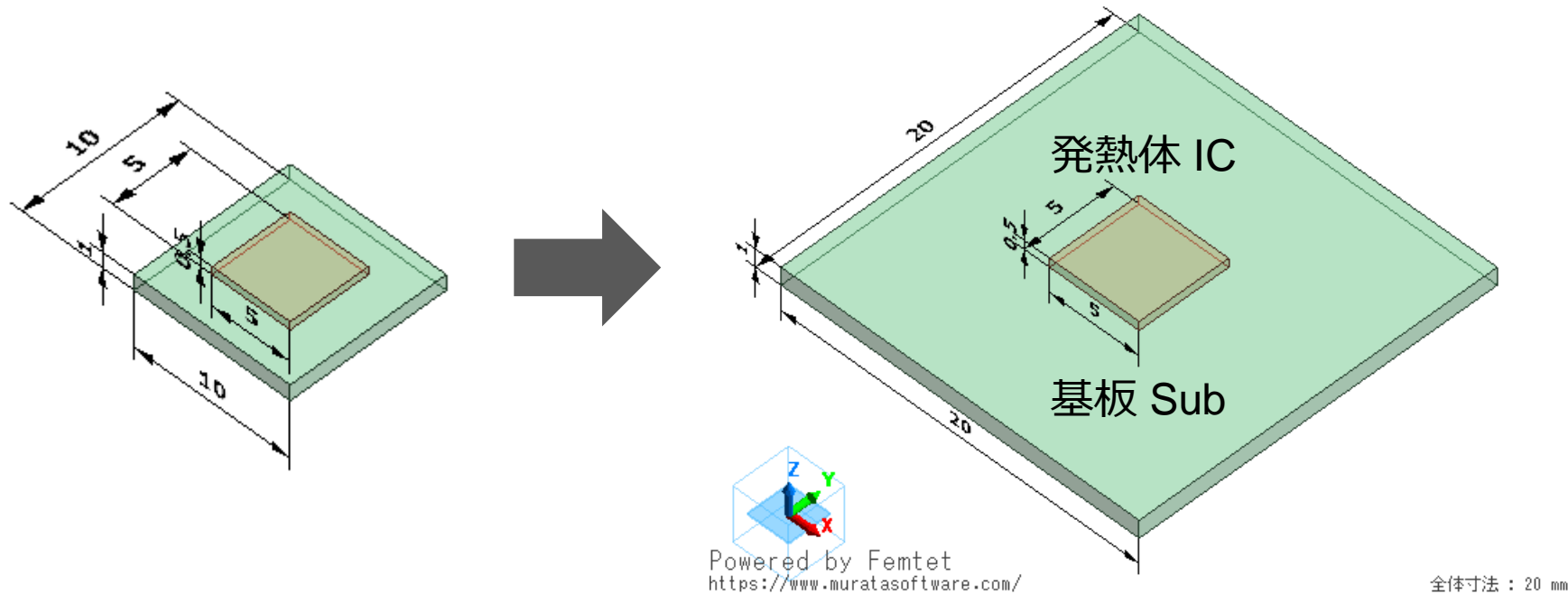
種類	概要	熱流束の計算式イメージ
自然対流	無風の空気中における放熱 空気が熱を奪う 係数(h')自動計算機能あり	$h' \times (\theta - \theta_a)^{1.25}$ 係数h'は形状や寸法に依存
強制対流	風のある空気中における放熱 空気が熱を奪う 係数は風速vと代表長さLに依存	$3.86\sqrt{v/L} \times (\theta - \theta_a)$ 環境温度と表面温度の差に比例
輻射	電磁波（赤外線）による放熱 真空中でも放熱する 対流と同時に考慮可能	$k \cdot \sigma (\theta^4 - \theta_a^4)$ 絶対 温度の4乗の差に比例する K:輻射係数、 σ :ステファンボルツマン定数

※いずれの放熱も環境温度と表面温度の差が大きいほど放熱量は大きくなる
表面温度 > 環境温度の場合に放熱となる（逆の場合は吸熱となる）

モデル名	条件	放熱改善効果
モデル1	基板10mm□ (GNDなし)	
モデル2	基板20mm□ (GNDなし)	?
モデル3	基板にGNDシートの追加	?
モデル4	ICとGND間へビアホールを追加	?
モデル5	自然対流を強制対流に変更	?



解析事例 定常解析モデル2 (モデル図)



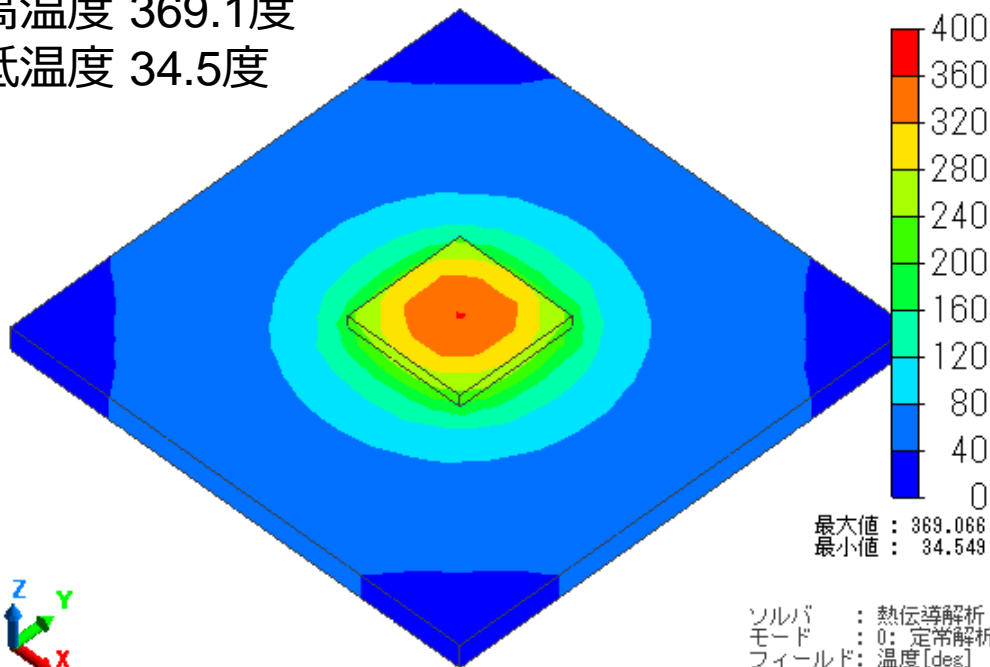
基板サイズを2倍×2倍とする

解析結果 定常解析モデル2 (温度分布)

モデル2

最高温度 369.1度

最低温度 34.5度



最大値 : 369.066
最小値 : 34.549

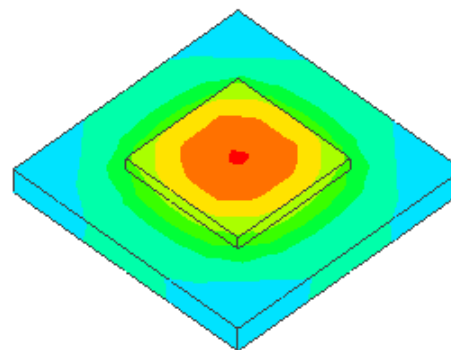
ソルバ : 熱伝導解析
モード : 0: 定常解析
フィールド: 温度[deg]
スケール : Linear

全体寸法 : 20 mm

モデル1

最高温度 371.8度

最低温度 88.7度



最大値 : 371.754
最小値 : 88.730

最高温度は2.7度のみ低下
基板 (ガラエポ) の熱伝導が低く
放熱改善効果は見られない



Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

解析結果 定常解析モデル2 (熱収支)

テーブル

収束状況	温度[deg]	境界温度[deg]	熱収支[W]	熱流量[W]	熱抵抗[deg/W]	ジャンクション熱抵抗[deg/W]	有限要素法情報				
			発熱量	熱伝導(in)	対流(in)	輻射(in)	その他(in)	熱伝導(out)	対流(out)	輻射(out)	
			Sub	0	6.209e-1	0	0	0	9.381e-4	0.304	0.316
			IC	1	9.381e-4	0	0	0	6.209e-1	0.219	0.161
			全体	1	0.000e+0	0	0	0	0.000e+0	0.523	0.477

対流 0.219W、輻射 0.161W

発熱 1 W

熱伝導 0.62W

対流 0.304W、輻射 0.316W

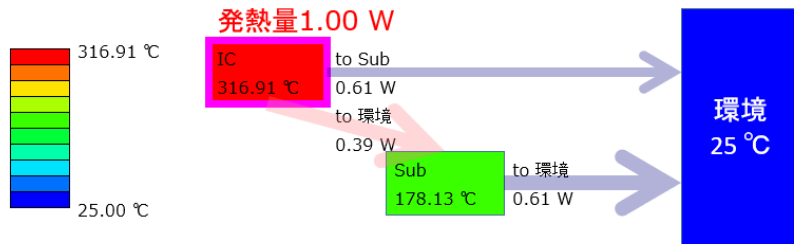
基板を介する放熱量は
ほとんど変化していない

モデル1 0.61W

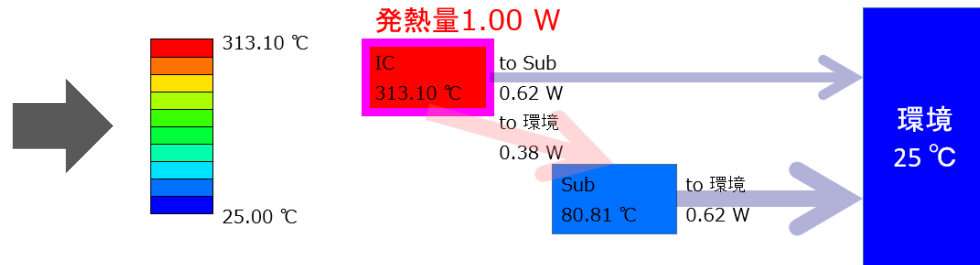
モデル2 0.62W

熱経路可視化（モデル2）

『model1』



『model2』

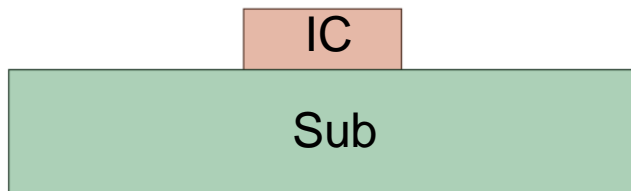


放熱ルートは2つ

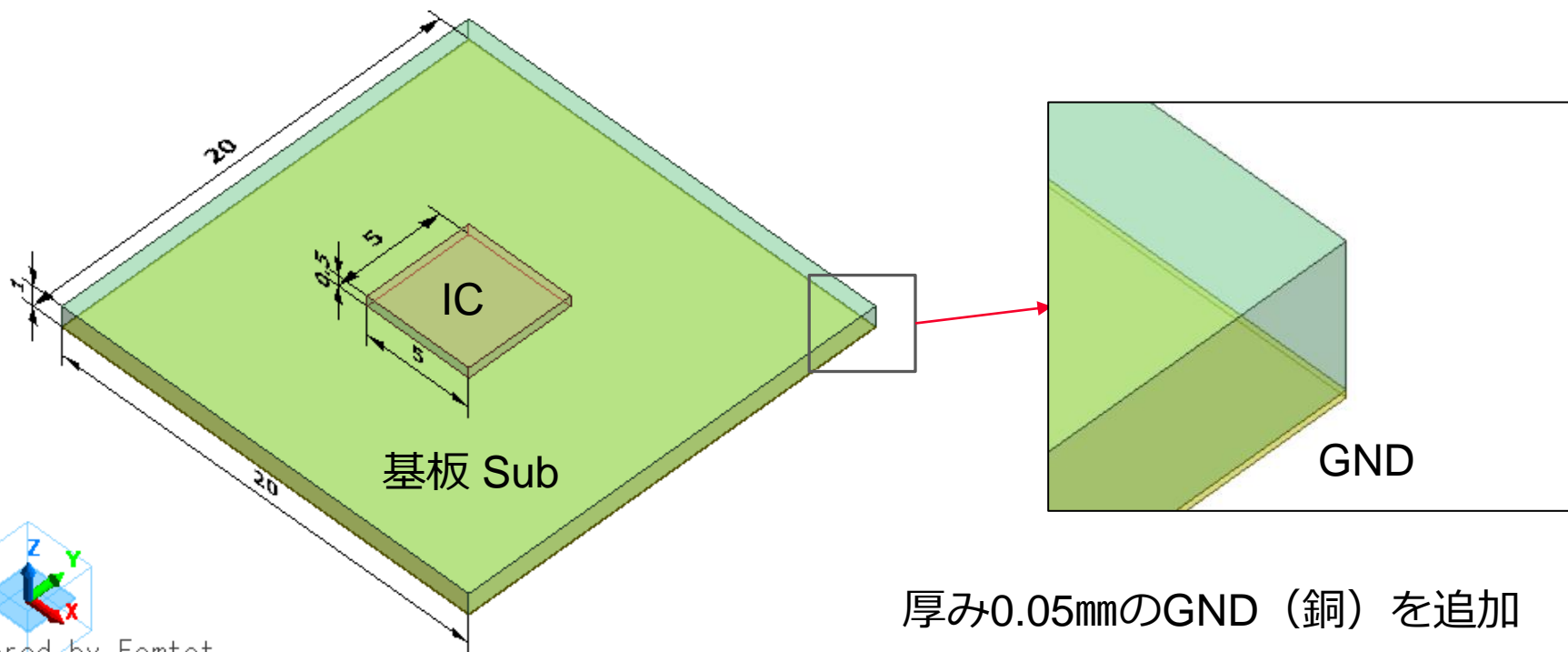
IC→Sub→環境 (0.62W)

IC→環境 (0.38W)

モデル1 と放熱バランスはほぼ同じ

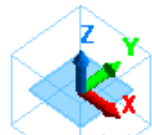


解析事例 定常解析モデル3 (モデル図)



厚み0.05mmのGND (銅) を追加

全体寸法 : 20 mm



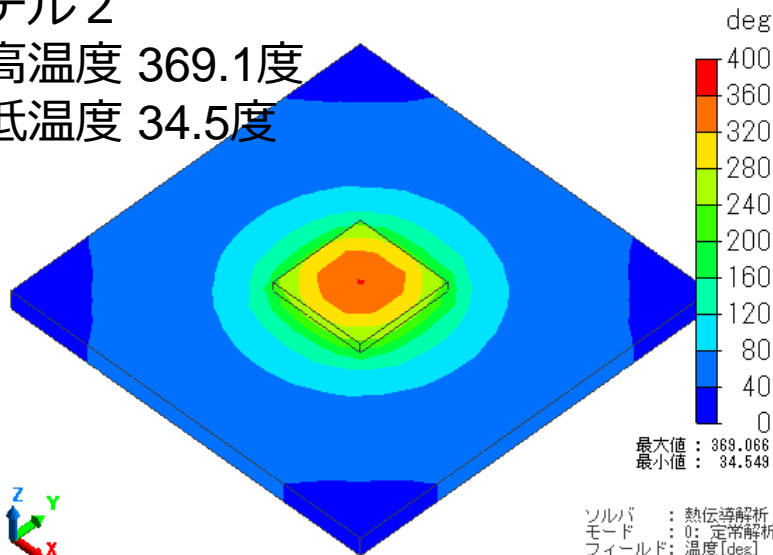
Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

解析結果 定常解析モデル3 (温度分布)

モデル2

最高温度 369.1度

最低温度 34.5度



最大値 : 369.066
最小値 : 34.549

ソルバ : 熱伝導解析
モード : 0: 定常解析
フィールド : 温度[deg]
スケール : Linear

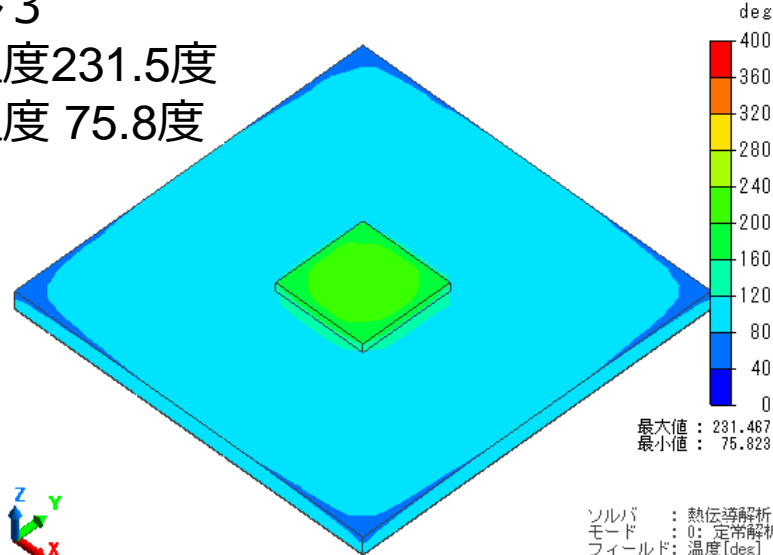
全体寸法 : 20 mm

Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

モデル3

最高温度231.5度

最低温度 75.8度



最大値 : 231.467
最小値 : 75.823

ソルバ : 熱伝導解析
モード : 0: 定常解析
フィールド : 温度[deg]
スケール : Linear

全体寸法 : 20 mm

Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

最高温度は138度低下

GNDによって熱が拡散されて放熱効果が改善されている

解析結果 定常解析モデル3 (熱収支)

テーブル

収束状況 | 温度[deg] | 境界温度[deg] | 熱収支[W] | 熱流量[W] | 熱抵抗[deg/W] | ジャンクション熱抵抗[deg/W] | 有限要素法情報

	発熱量	熱伝導(in)	対流(in)	輻射(in)	その他(in)	熱伝導(out)	対流(out)	輻射(out)
Sub	0	1.234e+0	0	0	0	0.730	0.328	1.764e-1
IC	1	2.705e-4	0	0	0	0.808	0.125	6.759e-2
Gnd	0	7.294e-1	0	0	0	0.426	0.137	1.666e-1
全体	1	0.000e+0	0	0	0	0.000	0.589	4.106e-1

対流 0.125W、輻射 0.068W

発熱 1 W

対流 0.328W、輻射 0.176W

ICよりSubへ熱伝導 0.808W

SubからGNDへ熱伝導 0.730W

GNDからSubへ熱伝導 0.426W

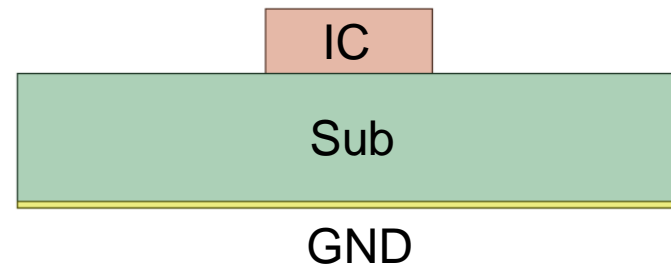
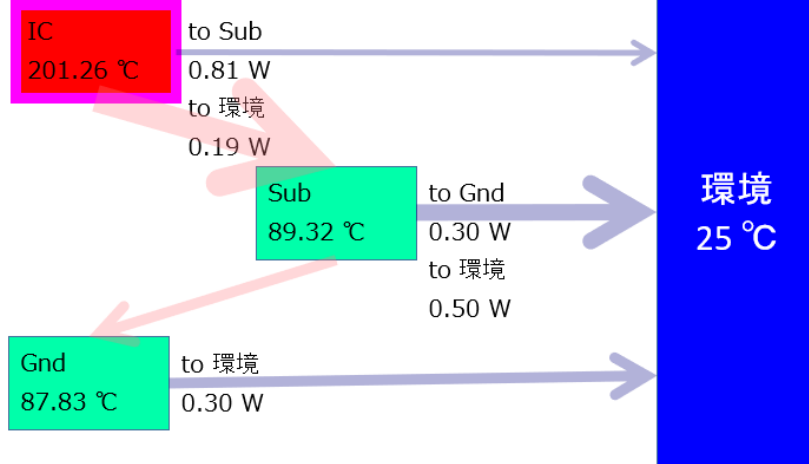
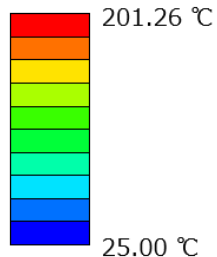
対流 0.137W、輻射 0.167W

GNDを介して熱が拡散されて基板SubやGNDからの放熱量が0.808Wとなった (モデル2は0.62W)

熱経路可視化（モデル3）

『model3』

発熱量1.00 W



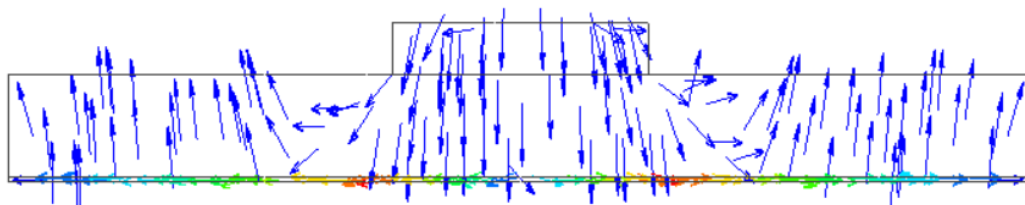
放熱ルートは3つ

- IC→Sub→環境
- IC→Sub→GND→環境
- IC→環境

実際には以下の経路もある

- IC→Sub※1→GND→Sub※2→環境
- ※1 Sub中央部位
- ※2 Sub周辺部位

Z方向異方性ズーム2倍で断面表示



熱流束の向きをたどると

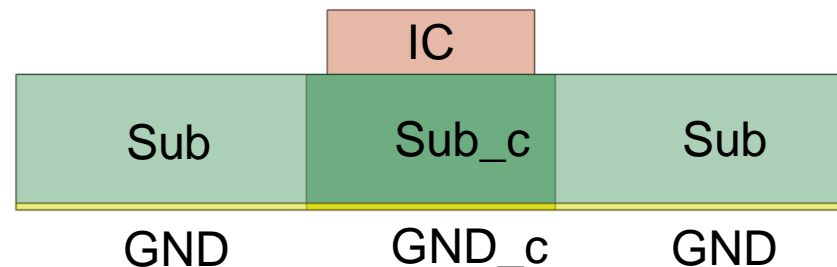
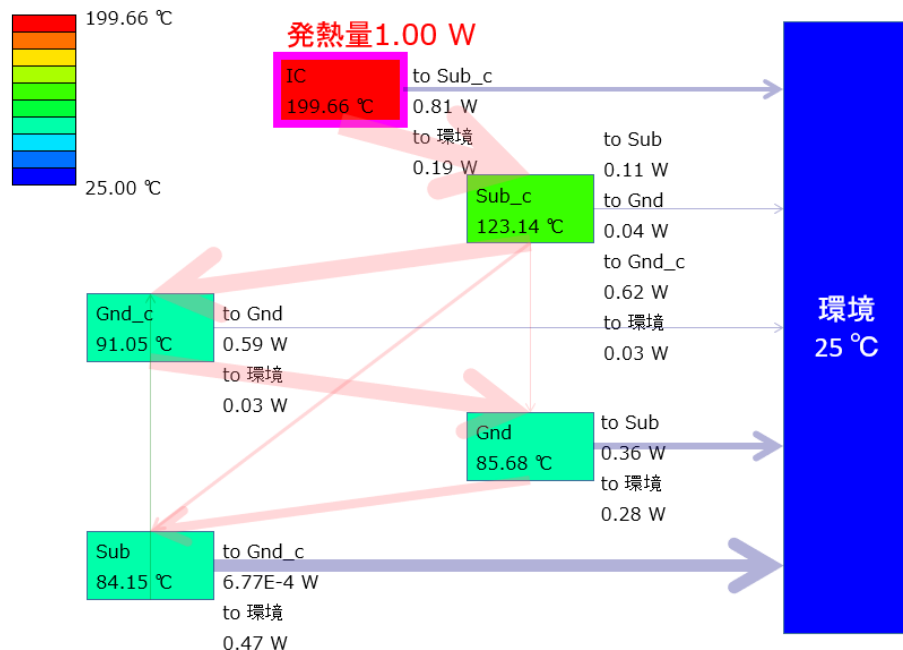
IC→基板中央部→GND中央部
→GND周辺部→基板周辺部

の熱経路が分かる

基板とGNDを中央部と周辺部でボディ分割し、別のボディ属性名を設定すると上記経路が可視化ツールからも分かりやすくなる。

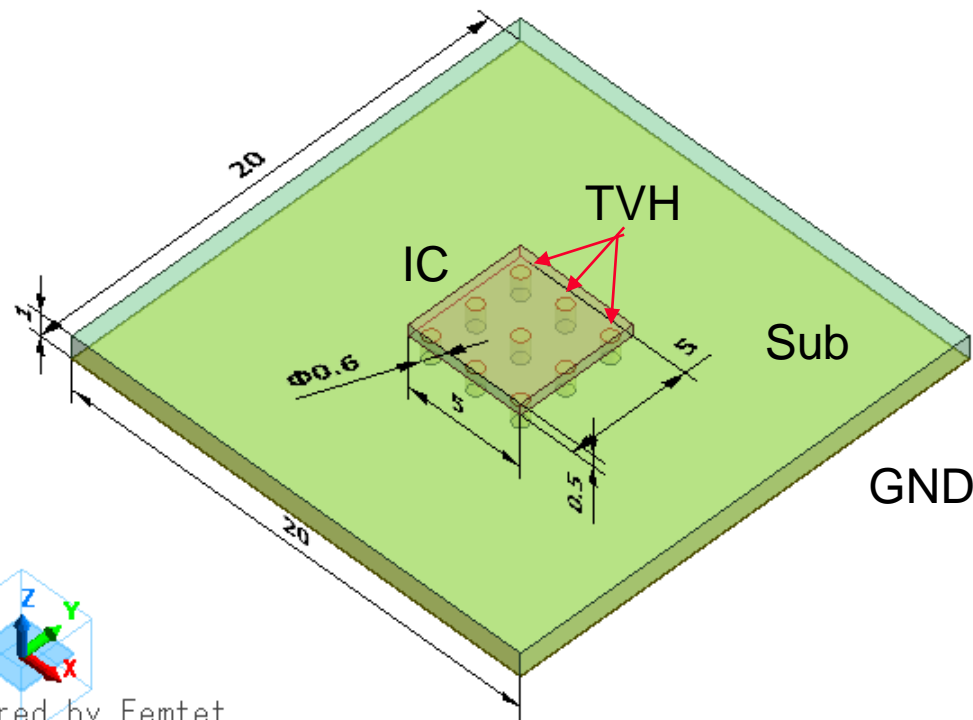
熱経路可視化（モデル3 分割版）

『model3 div』

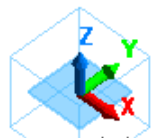


主な放熱ルートは以下の3つ

- IC→Sub_c→Gnd_c→GND→Sub→環境
- IC→Sub_c→Gnd_c→GND→環境
- IC→環境



ICとGNDの間に直径0.6mmの
ビアホールTVHを9本を追加



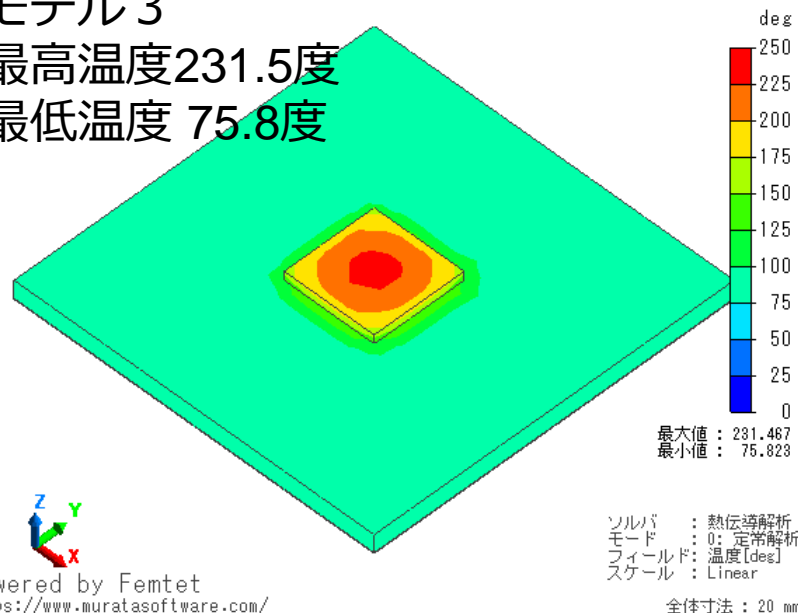
Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

全体寸法 : 20 mm

解析結果 定常解析モデル4 (温度分布)

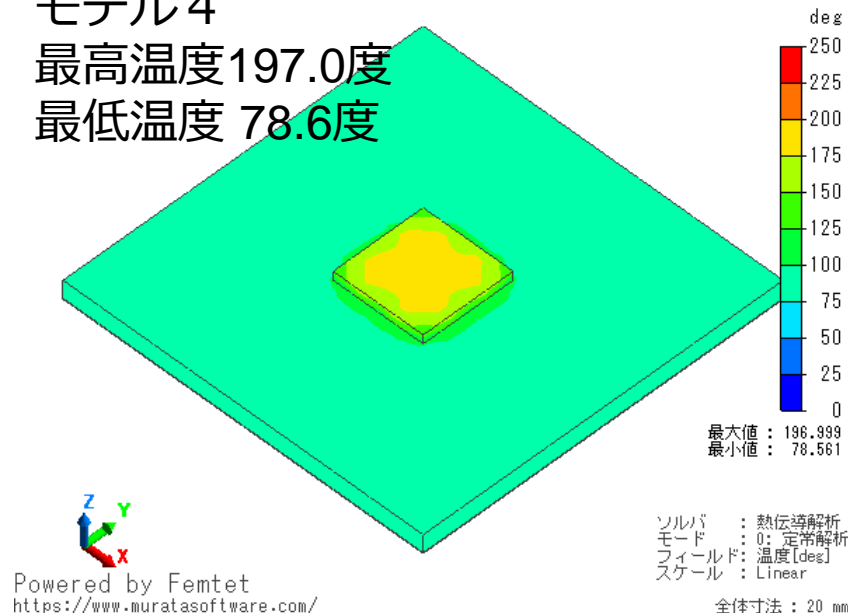
モデル3

最高温度231.5度
最低温度 75.8度



モデル4

最高温度197.0度
最低温度 78.6度



最高温度は35度低下
ビアホールによってGNDへ熱が拡散されて
放熱効果が改善されている

解析結果 定常解析モデル4 (熱収支)

テーブル

収束状況 | 温度[deg] | 境界温度[deg] | 熱収支[W] | 熱流量[W] | 熱抵抗[deg/W] | ジャンクション熱抵抗[deg/W] | 有限要素法情報

	発熱量	熱伝導(in)	対流(in)	輻射(in)	その他(in)	熱伝導(out)	対流(out)	輻射(out)
Sub	0	1.110e+0	0	0	0	0.580	3.446e-1	1.851e-1
IC	<u>1</u>	5.865e-4	0	0	0	0.856	9.667e-2	4.796e-2
Gnd	0	9.118e-1	0	0	0	0.586	1.464e-1	1.792e-1
TVH	0	6.777e-1	0	0	0	0.678	0.000e+0	0.000e+0
全体	1	0.000e+0	0	0	0	0.000	5.877e-1	4.123e-1

対流 0.097W、輻射 0.048W

発熱 1 W

対流 0.345W、輻射 0.185W

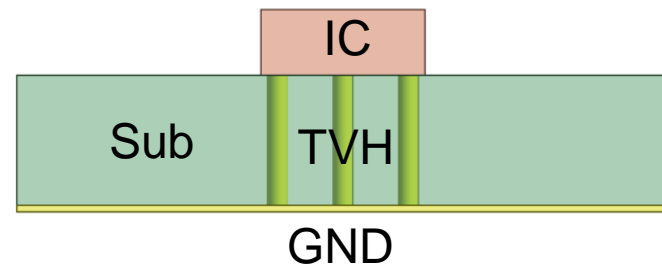
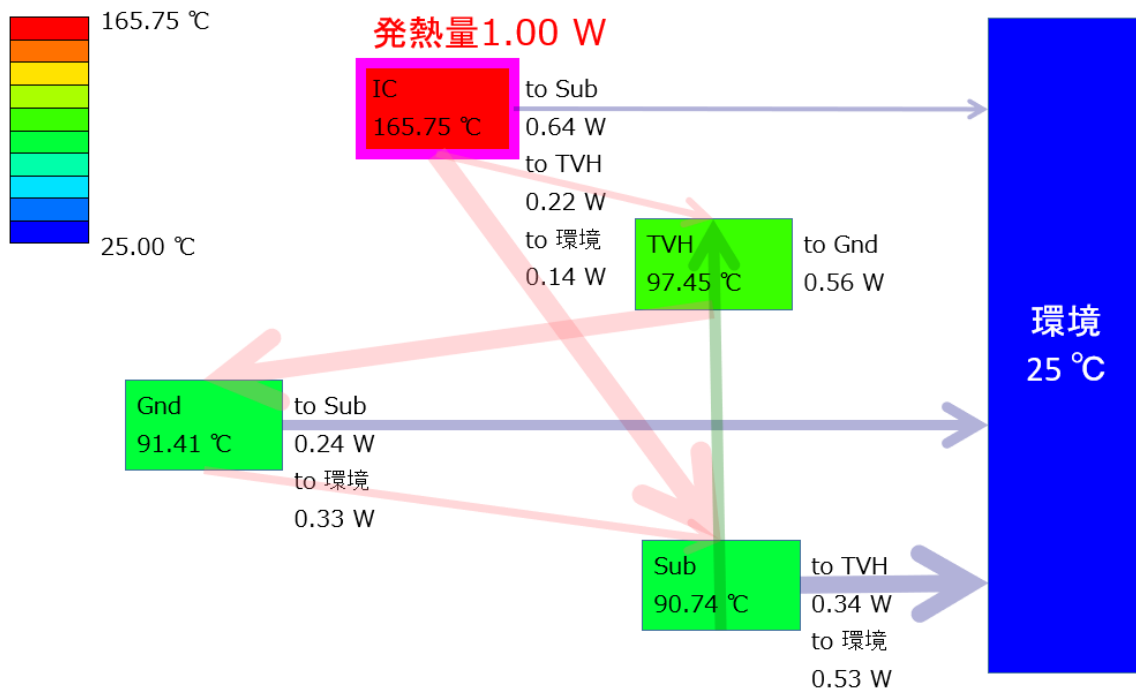
熱伝導の経路の詳細
は次スライド

TVHを介してGNDへ熱が拡散
されて基板やGNDからの
放熱量が0.855Wに増加
(モデル3は0.808W)

対流 0.146W、輻射 0.179W

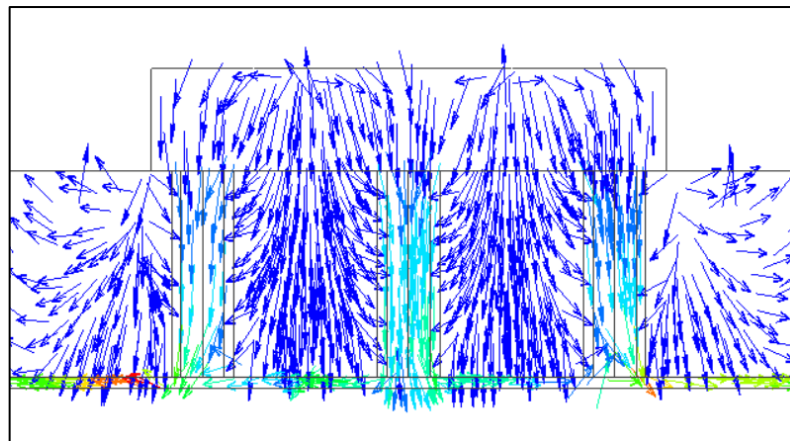
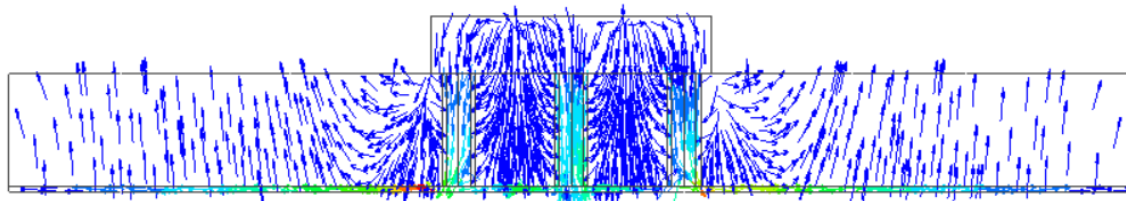
熱経路可視化（モデル4）

『model4』



放熱ルートは5つ

- IC→Sub→環境
- IC→Sub→TVH→GND→環境
- IC→TVH→GND→環境
- IC→TVH→GND→Sub→環境
- IC→環境



Z方向異方性ズーム2倍で断面表示

熱流束の向きをたどると
ICからGND中央部で以下の3つの経路が存在し、

IC→TVH→GND中央部

IC→基板中央部→TVH→GND中央部

IC→基板中央部→GND中央部

GND中央部からは以下の2つの経路で放熱していることが分かる。

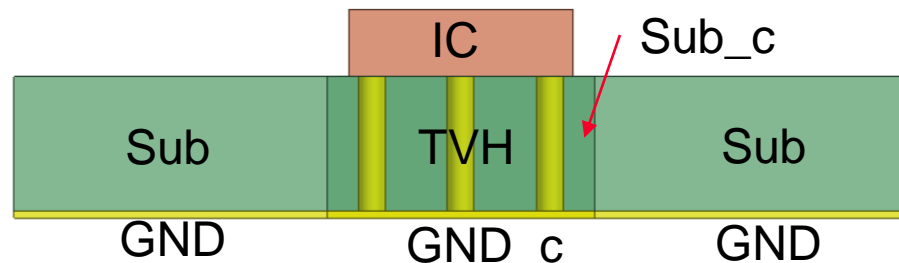
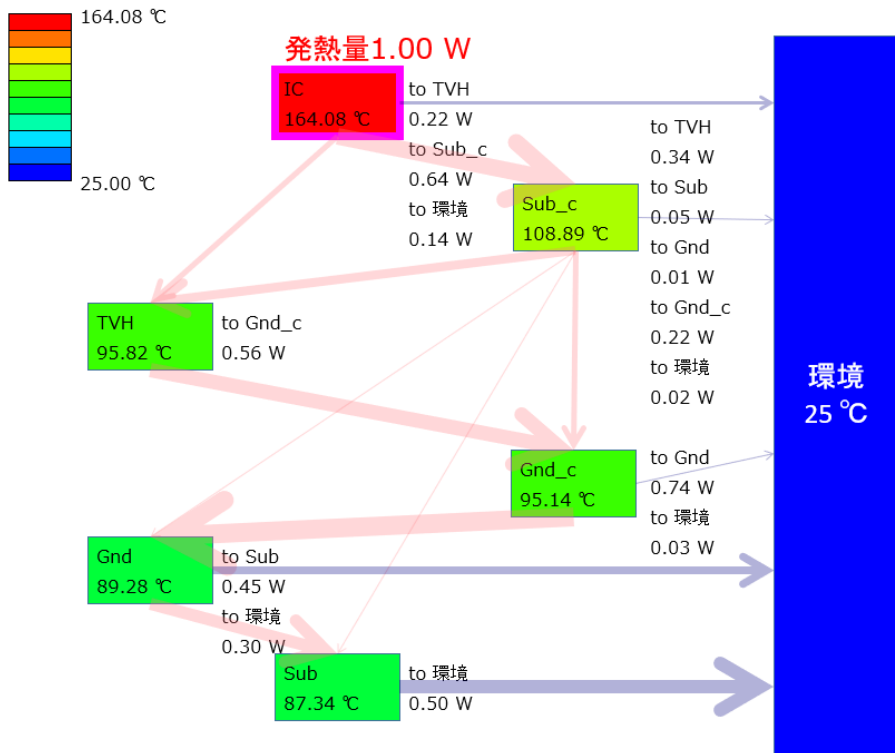
GND中央部→

GND周辺部→基板周辺部→環境

GND中央部→GND周辺部→環境

熱経路可視化（モデル4分割）

『model4 div』



主な放熱ルートは以下の3つ

IC→Sub_c→TVH→GND_c→GND→Sub→環境
0.50W

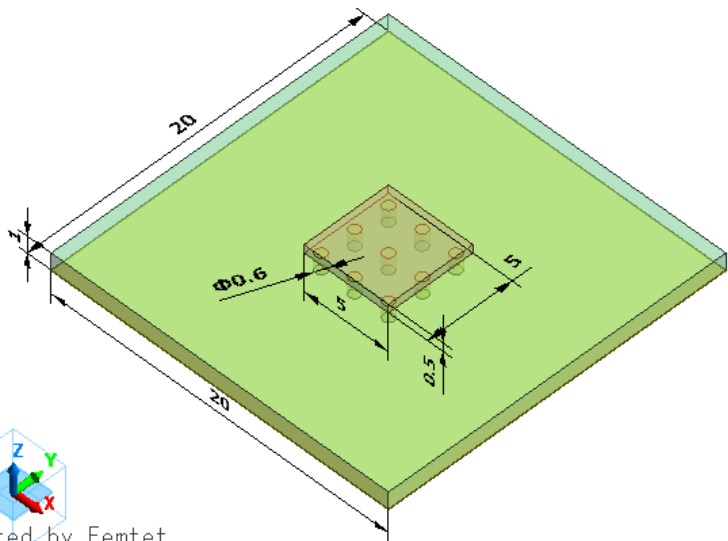
IC→Sub_c→TVH→GND_c→GND→環境
0.30W

IC→環境
0.14W

※ICからGND_cの経路は他にもある

解析事例 定常解析モデル5 (モデル図と境界条件)

自然対流を強制対流に変更して
風速 v を 1 ~ 4 [m/s] でパラメトリック解析



全体寸法 : 20 mm

境界条件の編集 [外部境界条件]

熱

対称/不連続
説明

境界条件の種類

- 温度
- 熱抵抗
- 熱流束
- 測定端子
- 熱伝達・対流
- 断熱(設定なし)

熱伝達・対流の種類

- 熱伝達係数指定
- 自然対流(係数自動計算)
- 自然対流(係数直接指定)
- 強制対流

輻射の設定

環境(速度重視)

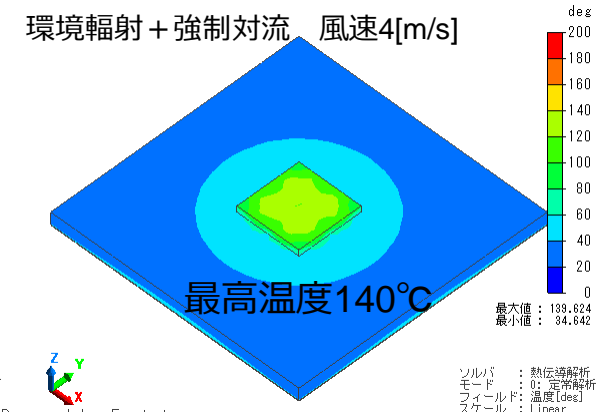
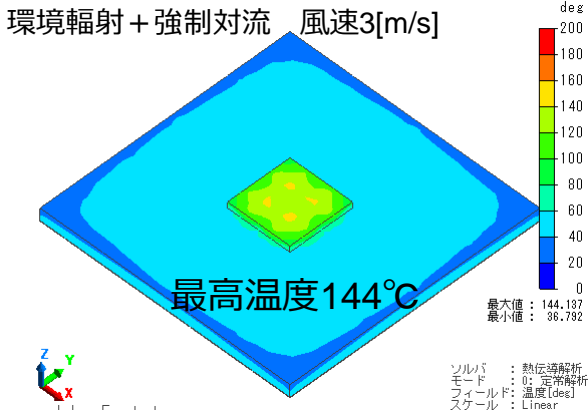
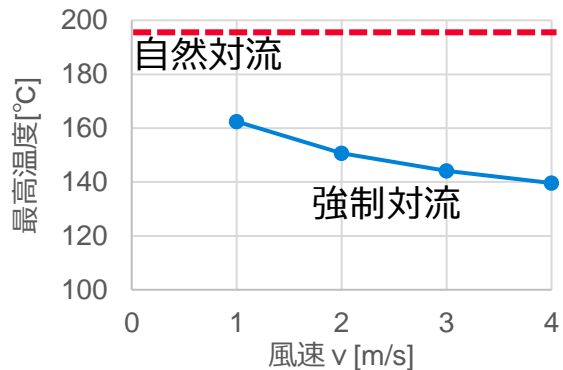
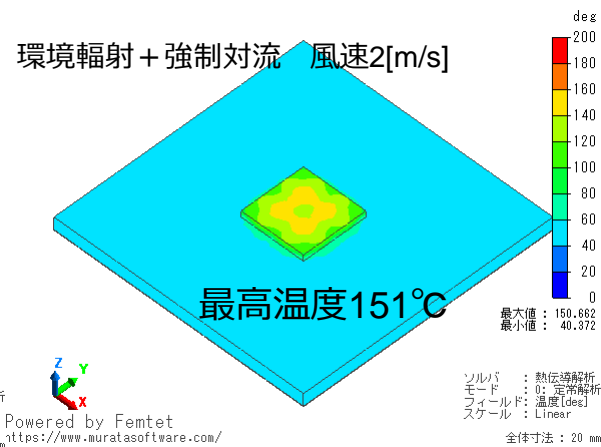
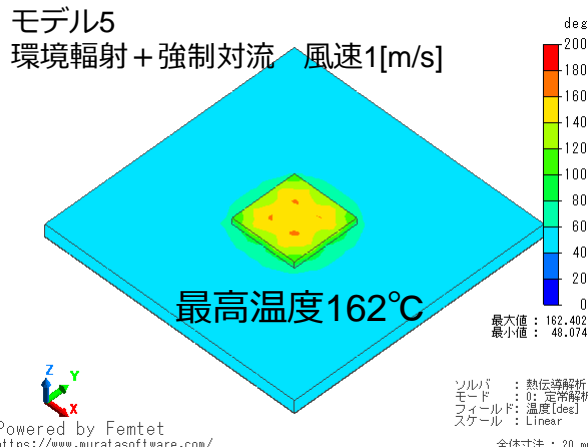
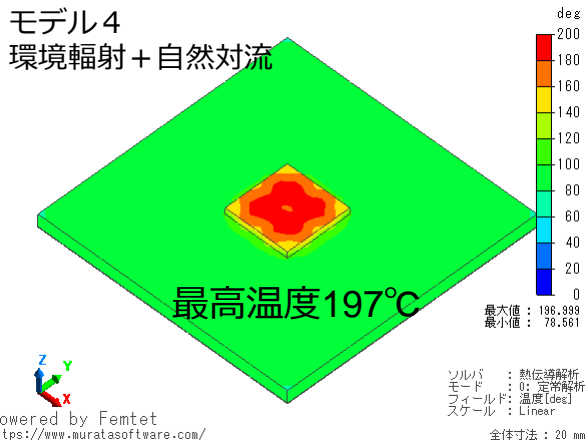
個別設定

強制対流の係数

風速 x10 [m/s] $V = 1 \sim 4$

代表長さ x10 [m] $W = 20$

解析結果 定常解析モデル5 (温度分布)



放熱改善検証の結果

ジャンクション熱抵抗からも放熱改善を定量的に比較できる。

モデル名	条件	ジャンクション熱抵抗[deg/W]	改善効果
モデル1	基板10mm□ (GNDなし)	347	
モデル2	基板20mm□ (GNDなし)	344	×
モデル3	基板にGNDシートの追加	206	◎
モデル4	ICとGND間へビアホール追加	172	○
モデル5	自然対流を強制対流に変更	115~137	○

テーブル モデル5 風速 4 [m/s]の場合

収束状況	温度[deg]	境界温度[deg]	熱収支[W]	熱流量[W]	熱抵抗[deg/W]	ジャンクション熱抵抗[deg/W]	
IC 環境					114.624	139.624	25.000

項目	ポイント
熱収支と熱経路可視化	放熱効率を改善して最高温度を下げるには熱収支テーブルや熱経路可視化ツールを活用して環境までの放熱ルート of 熱抵抗を下げるのが有効。
過渡解析のメリット	過渡解析では温度が定常状態に至る時間変化を知ることができるが、発熱や環境温度が時間軸で変化する解析も可能。

- 以下のような基礎知識があると結果を理解するうえで有効です。

項目	説明
フーリエの法則	熱伝導の基本法則
熱流束	単位面積あたりの熱流
対流	空気の流れを介する放熱
輻射	電磁波（赤外線）による放熱

本セミナー資料内で少し触れていますが、詳しく知りたい方はネット検索してみてください。

応力解析
圧入解析を軸対称モデルで解析

熱伝導解析
定常解析から過渡解析へ条件変更して解析