

# 材料構成関係のカスタマイズ による固体力学解析

## Solid Mechanics Analysis by Customizing Material Constitutive Relation

米 大海<sup>1)</sup>, 橋口 真宜<sup>2)</sup>

Dahai Mi, Masanori Hashiguchi

1) 工博 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: midahai@kesco.co.jp)

2) 技術士(機械部門) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主席研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: hashiguchi@kesco.co.jp)

Numerical analysis technology based on physics is an important technology to support the future smart society, Society 5.0. In the numerical analysis of solid mechanics, whether or not the constitutive relation of materials can be set correctly is directly linked to the validity of the calculation. In this research, we considered to customize and freely set the constitutive relation of materials that are not implemented in the analysis software.

**Key Words** : Society 5.0, Constitutive Relation, COMSOL Multiphysics

### 1. はじめに

Society 5.0では、より多くの現実世界の情報をコンピューター上で表現することが重要である。現在、人と人のつながりをメインとするソーシャルネットワーク (SNS, Social Network Service) や、各種センサー情報のオンライン化及びハードワイヤのつながりを重視するIoT (Internet of Things) の研究開発及び社会実装は進んでいる。CAE

(Computer Aided Engineering) は数理方程式に基づいて現実現象をコンピューター上再現できる。さらに、CAEモデルをアプリにして配布することで、「誰でも・いつでも・どこでも」容易にユビキタスCAE環境にアクセスできる整備が徐々にできてきた[1]。今後のSociety 5.0の研究&開発をはじめ、製造プロセス、教育、日常生活まで支える重要な技術になりつつある。

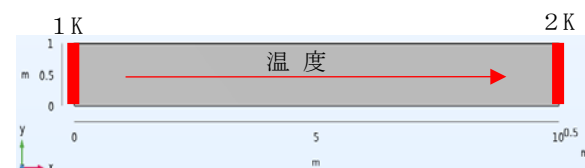
CAEでは、現実世界中の対象を正確にモデリングするために、材料の構成関係を正確に反映することが極めて重要。しかし、現実世界にある材料の種類が膨大であるため、全てを解析ソフトに実装することは難しい。そこで、既存の解析ソフトに実装されていない材料の構成関係を、ソフトのユーザ側が自由にカスタマイズできる技術は、このようなニーズをバックアップする重要な機能になる。

本稿では、材料構成関係の部分のみプログラミングして、それを.dllにコンパイルすることでソフトと簡単にリンクする方法を紹介する。固体力学及び伝熱のマルチフィジックス連成を用いて、材料構成関係カスタマイズの一例を示す。

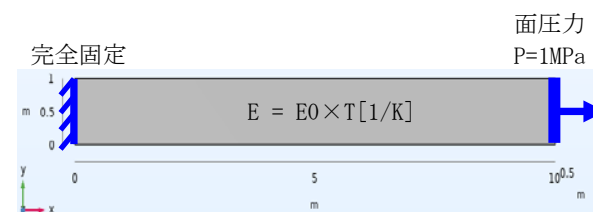
### 2. 問題定義

本稿では、汎用有限要素法ソフトウェアCOMSOL Multiphysicsの一般応力-歪み関係 (以後外部材料と称する) [2]を利用して、固体-伝熱マルチフィジックス連成問題に適用した。連成に関して、具体的には固体材料のヤング率を温度の関数として設定した。

検討対象のジオメトリ及び境界条件はFig.1に示す。長さ10m、断面1m×1mの直方体ビーム構造を考える。定常状態の伝熱及び固体力学計算を実施するため、正則化された伝熱の境界条件及び物性値を適用する。伝熱計算について、ビーム構造の左端に1K、右端に2Kのディリクレ条件を課す。固体力学計算について、左端完全固定、右端に1MPaの境界圧力を印加。



(a) ジオメトリ及び伝熱計算の境界条件



(b) ジオメトリ及び固体計算の境界条件

Fig.1 ジオメトリ及び伝熱、固体の境界条件

ここで、ヤング率 $E$ を $E0 \times T[1/K]$ に設定する。 $E0$ は基準ヤング率 $2e9Pa$ 、 $T$ は温度（単位：K）。他の材料物性に関して、密度を $8e3kg/m^3$ 、ポアソン比を $0.3$ 、熱伝導率を $1W/m/K$ 、定圧熱容量を $2J/kg/K$ に設定する。

### 3. 材料構成関係のカスタマイズと実装

#### (1) 全体流れ

外部材料によるカスタマイズの流れは以下になる。

- ① 材料構成関係を表現するプログラムをプログラミング言語cなどにて作成する
- ② 作成したプログラムをエディターによって.dllにコンパイルする
- ③ .dllをCOMSOL Multiphysicsに読み込んで、必要な変数をインプットとして入力する
- ④ 読み込んだ.dllを物理モデリングに適用して、計算実行する

今回実装時のインプット及びアウトプット設定、ヤング率の温度依存関数カスタマイズ設定部分のプログラムをFig.2に示す。

```
EXPORT int eval(double e[6], // Input: Green-Lagrange strain tensor
double s[6], // Output: Second Piola-Kirchhoff stress
double D[6][6], // Output: Jacobian of stress
int *nPar, // Input: Number of material parameters
double *par, // Input: par[0] = E, par[1] = nu
int *nStates, // Input: Number of states
double *states) { // States, nStates-vector

int i, j;
double E, nu, T;

// Check inputs
if (nPar[0] != 3) // only two parameters needed, E and nu
return 1; // error code 1 = "Wrong number of parameters"
if (nStates[0] != 0) // simple linear elastic, no states needed
return 2; // error code 2 = "Wrong number of states"

// Read input parameters from parameter vector
T = par[2];
E = par[0]*T;
nu = par[1];
```

Fig.2 インプット・アウトプット及びヤング率のカスタマイズ関数定義プログラム

#### (2) 外部材料によるマルチフィジックス連成

上記プログラムにインプットとして温度変数 $T$ を渡す際に、下記Fig.3に示すように、ソフトに読み込んだ外部材料.dllに対して、伝熱計算の変数 $comp1.T$ を直接記述するだけで実現できる。

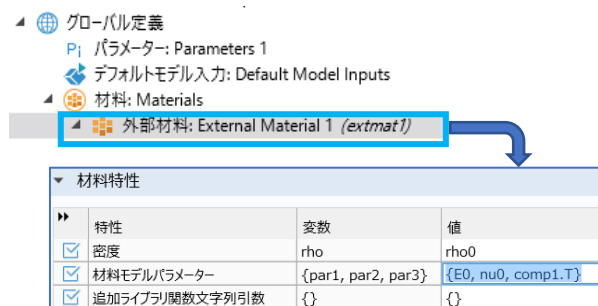


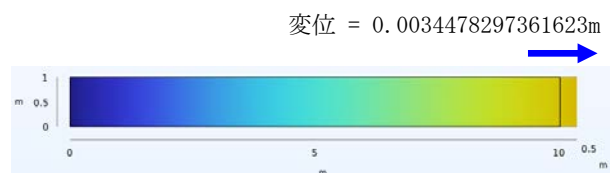
Fig.3 外部材料プログラムに温度変数を渡す

上記の設定によって、定常熱伝導計算の温度結果を固体力学計算のヤング率関数に適用でき、伝熱から固体力

学への一方向連成計算を実施できるようになる。

### 4. 結果とディスカッション

計算後の変位結果をFig.4に示します。Fig.4中の黒い枠線は変形する前の構造の形状を表す。サーフェスプロットはビーム表面の変位量分布を表す。直方体ビーム右端の最大変位は $0.0034478297361623m$ となり、ビーム全体長さの $10m$ よりはるかに小さいため、分布プロットは実際の変位より $100$ 倍拡大して分かりやすく表示している。



※変形拡大倍率：100 倍  
Fig.4 変位の計算結果

外部材料によるマルチフィジックス連成計算結果の妥当性を確認するために、COMSOL Multiphysicsの線形弾性の構成関係を利用して、検証計算を実施した。外部材料モデルと同じように、ヤング率 $E$ を温度の関数 $E0 \times T[1/K]$ のように定義して、伝熱と固体力学連成の比較モデルを作成した。結果として、外部材料によるマルチフィジックス連成モデルと同じ変位の結果が得られたため、今回の外部材料によるマルチフィジックス連成計算方法の妥当性を検証できた。

### 5. まとめ

本報では、汎用ソフトCOMSOL Multiphysicsの計算仕組みを利用して、材料構成関係をカスタマイズした固体力学モデルを作成し、伝熱とのマルチフィジックス連成計算を試みた。検証計算実施した結果、材料構成関係のカスタマイズ及びマルチフィジックス連成への拡張は実現可能であることが分かった。これらの検討結果によって、CAEツールの機能を構成関係のレベルで簡単に強化でき、研究開発だけではなく、Society 5.0における現実とバーチャル世界の融合にもCAEは更に貢献できると考えている。

これからは、このような自由度の高い機能を利用して、最新研究成果の実装による既存CAE解析の補強、作成した解析モデルのアプリ化による応用領域の拡大を検討して行き、CAEがSociety 5.0へどのように貢献できるかを模索して行きたい。

#### 参考文献

- [1] 橋口真宜, 倭立柱, 米大海, 次世代を担う人のマルチフィジックス有限要素解析, 近代科学社Digital (2022).
- [2] External Material Examples, Structural Mechanics, <https://www.comsol.jp/model/external-material-examples-structural-mechanics-32331> (2023年4月5日参照)