

OpenModelica を用いた 1 次元シミュレーション

1D-CAE using OpenModelica

○清水莉沙、平林誠之、大渕喜之、浦口史寛（国立天文台 先端技術センター）
(National Astronomical Observatory of Japan, Advanced Technology Center)

概要(Abstract)

1次元シミュレーション(1D-CAE)はシステム全体を理論式によってモデル化し、分野横断的にシステムを適正化する設計手法であり、設計プロセスの初期段階での適用が可能であることから開発のフロントローディングを推進する手段として注目されている。今回、1D-CAE に適したツールのひとつとして知られるフリーソフト OpenModelica を用い、赤外位置天文観測衛星 JASMINE の検出器ボックス概念検討フェーズにおける設計検討のための物理モデリングを行った。分野複合的なモデルには至らなかったが、各パラメータの影響評価を行うことで次フェーズの設計への足掛かりをつかむことができた。

1. 1次元シミュレーション

設計・開発のプロセスにおいては、機能・仕様を策定する概念設計フェーズからはじまり、構造・形状、寸法詳細など徐々に詳細を決定しながら進めていくことが一般的である。この設計プロセスの中で行った設計が要求を満たすか検証する手段として広く用いられているツールが、3D モデルをつくり解析ソフト上で設計を評価する 3D-CAE(3D-Computer Aided Engineering)である。3D-CAE は視覚的にわかりやすく、複雑な形状の計算も行うことができる。その一方で、モデルの修正や計算に時間がかかる、初期段階でモデルを作ってしまうと固定概念ができやすく設計の足枷になってしまうなどの理由から、設計情報が曖昧でイテレーションが多く生じる設計上流段階には適さないという問題があった。

近年、上流段階から適用できる設計支援ツールとして、1次元シミュレーション(1D-Computer Aided Engineering)が広まっている。1D-CAE は設計対象の価値、機能、現象を分野に関わらず、物事の本質をとらえて見通しのいい形でシステム全体をモデル化し、最適化する手法である。制約の少ない上流段階での適用が可能であり早期の問題検出が可能、モデルがシンプルなので計算時間が早く作業効率が上がる、分野横断的にシステムが可視化され無駄を排除できる、モデルの作成のために物理現象を理解しなければならぬため作業者の理解が深まるなどの利点がある。

2. Simulink と OpenModelica

1D-CAE を実現するツールの代表として、物理モデルシミュレーションの MATLAB/Simulink と OpenModelica がある。Simulink はモデルベースデザインのためのブロック線図環境であり、モデルベース開発ツールのデファクトスタンダードとなっている。OpenModelica は、複雑な物理モデリングのために開発された数式ベースのオブジェクト指向言語 Modelica のグラフィカルユーザーインターフェースである。この 2 つのツールの大きな違いとして因果モデルか非因果モデルかという観点がある。

Simulink に代表される因果モデルは入力と出力が決まっているモデルである．因果関係が明確に定義されるような制御モデルに適しているが，物理モデルを作る際には作用反作用の演算フローを考える必要があり，ひと手間かかってしまう．他方，Modelica は非因果モデルが主である．入力と出力が決まっていない物理モデルに適している．順序を考える必要がないので直観的なモデルの作成が可能な一方，計算順序を制御することができない．

その他の違いとしては，Simulink はユーザー数が多く情報が豊富，OpenModelica はオープンソースであり導入のハードルが低いことが挙げられる．

3. OpenModelica でのモデル作成の手順

OpenModelica を用いて，図 1(a)に示したような 1 自由度系のばねマスモデルの変位 x ，速度 v ，加速度 a を調べる Modelica で記述された物理モデルを作成する手順を示す．

(1) 求める変数と運動方程式を整理する

- 変位 x
- 速度 $v = \frac{dx}{dt}$
- 加速度 $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$
- 運動方程式 $m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = ma + kx = 0$

(2) パラメータを設定する

今回のモデルでは質量 $m=1$ kg，ばね定数 $k=1$ N/m，初期条件 $x|_{t=0}=1$ m とした．

(3) スクリプトを記述する

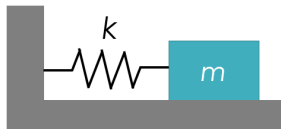
Modelica にはスクリプトは変数とパラメータを指定する領域と，方程式を記述する領域があり，連立方程式と同様に定義した変数の数だけ方程式を示す必要がある．スクリプトの例は図 1(b)に示す．

(4) 解析を行う

計算回数と計算時間を設定し，解析を実行する．

計算回数 500 回， $t=0 \sim 10$ s と設定した場合の変位，速度，加速度の計算結果を図 2 に示す．変位は青，速度は緑，加速度は赤線である．計算結果は X 軸には設定した経過時間として，変数として設定した値がグラフにプロットされる．図 1 (a)のマスの運動方程式を解くと変位 x は $\sin(t + \frac{\pi}{2})$ で示され， $x|_{t=0}=1$ m， $T=6.28$ s の正弦波となるが，図 2 の解析結果を参照すると変位のグラフである青線も同じ式で表される正弦波となっている．速度，加速度もそれぞれ $v = -\cos(t + \frac{\pi}{2})$ ， $a = -\sin(t + \frac{\pi}{2})$ であり，理論式と一致している．これより，正しくモデル化ができていることが確かめられた．解析結果は CSV ファイルとして出力することもできる．

また，OpenModelica のライブラリから参照したコンポーネントを線でつなぎ合わせることでモデルを作ることも可能である．図 3 に図 1 (a)と同じ 1 自由度系ばねマスモデルを作成した場合のダイアグラムビューを示す．ダイアグラムを作成すると，スクリプトの領域にプログラムが自動的に入力される．あとはパラメータと計算回数および計算時間を記入すれば，図 2 と同じ計算結果が得られる．ライブラリを使用することで短時間でのモデル生成かつシステムの可視化が可能となる．



(a) :ばねマスモデル

```

1 model TEST
2   Real x(start = 1.0); 変位x 初期値
3   Real v(start = 0.0); 速度v
4   Real a;               加速度a
5   parameter Real m (quantity = "Mass", unit = "kg")= 1.0;
6   parameter Real k (quantity = "Spring constant", unit = "N/m")= 1.0;
7   equation
8     v = der(x); 速度vに関する方程式
9     a = der(v); 加速度aに関する方程式
10    m*a+k*x=0;   運動方程式
11 end TEST;

```

変数(実数)

パラメータ(実数)

方程式.

(b) :スクリプト

図 1 : OpenModelica を用いた 1 自由度系ばねマスモデル

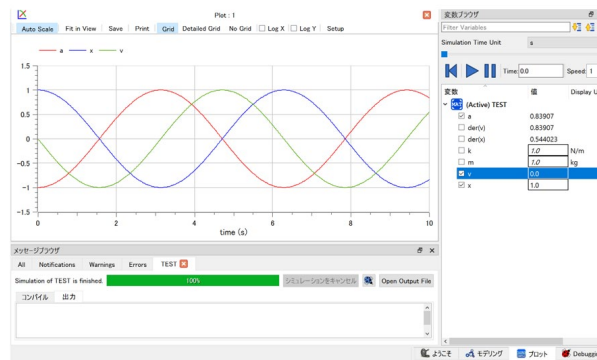


図 2 : 1 自由度系ばねマスモデルを表現した Modelica の解析結果

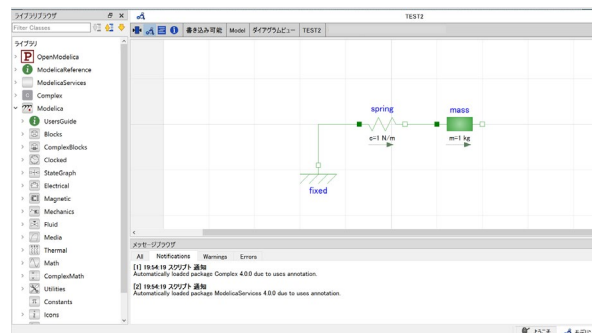


図 3 : OpenModelica のライブラリを用いたモデルの作成

4. 業務における OpenModelica を用いたモデルの作成

赤外線位置天文観測衛星 JASMINE ミッション部検出器ボックスの概念検討フェーズにおいて、熱や構造に関する制約がある中で設計解が存在するかどうかを検証する必要があるため、OpenModelica を用いて熱モデルおよび構造モデルの作成を行い、解析を行った。

(1) 熱モデルの作成

JASMINE 検出器ボックスの概略図を図 4(a)に示す。検出器が置かれるコールドプレートの温度が 173 K 以下、サーマルアンカーへの熱流量が 12 W 以下の制約を満たす寸法を調べるためのモデルを作成する。最初のステップとして、温度を調べたい箇所にノードを定め、輻射熱、伝導熱、発熱による熱の流れを可視化したサーマルフローを作成した。次に、サーマルフローに基づき OpenModelica のライブラリを用いてノードおよび輻射と熱伝導、発熱のコンポーネントを配置・接続し、それぞれパラメータを入力することで熱モデルを作成した。図 4(b)に OpenModelica を用いて作成した熱モデルのダイアグラムを示す。

(2) 構造モデルの作成

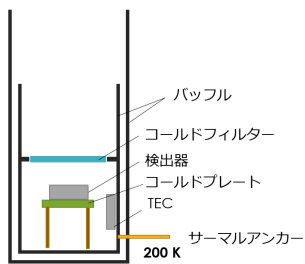
検出器ボックスにおいては熱に関する要求と同時に一次固有振動数が 150 Hz 以上であるという制約をクリアする必要がある。これを調べるため、ばねマスモデル化を行い運動方程式および質量・剛性マトリクスを作成した。しかしながら、OpenModelica で固有周波数を求めることができる良い手段が検討できず、Python と Numpy を用いて固有値計算を行い、バッフルや断熱材などの構造の寸法の制約を確認した。

5. 計算結果

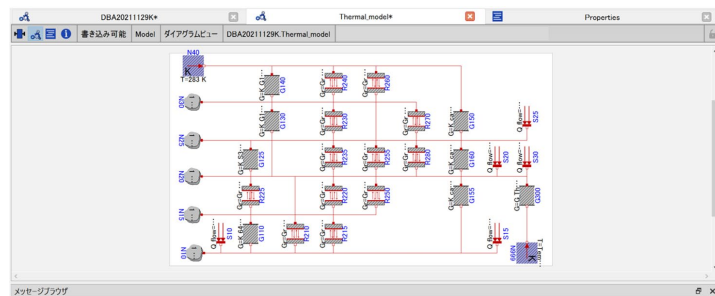
OpenModelica で作成した熱モデルを用い、コールドフィルターの面を基準に外側のバッフルの長さを 150 mm, 300 mm, 450 mm とした場合において、内側のバッフルの長さを変えた場合の各構造の温度と熱の流れの変化を調べた。解析結果として、コールドプレートの温度を図 5(a), コールドフィルターの温度を図 5(b), サーマルアンカーの熱流量を図 5(c)に示す。内側のバッフルが長いと輻射が遮られコールドプレートやフィルターの温度が低く保たれる一方、面積の増加によりバッフルが望遠鏡から受ける輻射の熱が増えてしまいサーマルアンカーへの熱流量への制約にかかってしまうことが分かった。この結果より、各部寸法が断熱・冷却性能に及ぼす影響を定性的に把握し、次のフェーズの設計に向けた検討ができた。

6. おわりに

本稿では、設計プロセスの上流段階で用いることができる設計手段である 1D-CAE と、1D-CAE を実現するツールのひとつとして OpenModelica を紹介した。OpenModelica を用いて作成した JASMINE 検出器ボックスの設計検討モデルでは 1D-CAE らしい分野複合的なモデルには至らなかったが、物理モデリングが簡易に行えることを確認した。今後も設計の一助として活用していきたい。

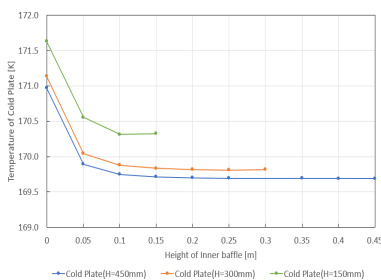


(a) :概略図

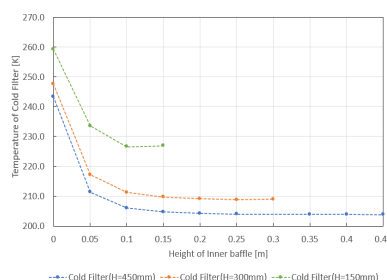


(b) : 熱モデルのダイアグラム

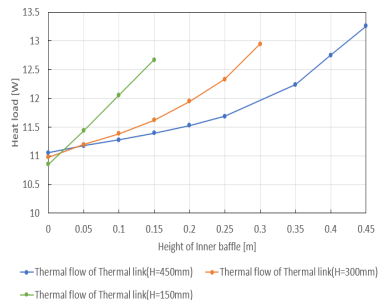
図 4 : JASMINE 検出器ボックスのモデル作成



(a) コールドプレートの温度



(b) コールドフィルターの温度



(c) サーマルアンカーの熱流量

図 5 : OpenModelica を用いて作成した JASMINE 熱モデルのバッフル感度解析結果