

大規模解析の計算コスト削減に寄与する「高速シミュレーションのためのモデル低次元化ツールのご紹介」

～Model Reduction inside Ansys(MRiA)～

Introduction of "model reduction tool for high-speed simulation"
to reduce the calculation cost of large-scale analysis

喜多 雅子

Masako Kita

サイバネットシステム株式会社 デジタルエンジニアリング事業本部エンジニアリング事業部 メカニカル技術部
(〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町3-5-7, E-mail: kita@cybernet.co.jp)

The following two methods are conceivable as "fast calculation of transient large-scale analysis". When the distribution of the entire model is required, parallel processing calculations are used, and when focusing on changes in the value of a certain evaluation point, the method of reducing the order of the model "Reduced Order Modeling (ROM)" is suitable. I will introduce the functions and examples of Model Reduction inside Ansys that can create this ROM model at high speed.

Key Words : ROM, Krylov Subspace method

1. はじめに

「過渡的な大規模解析を高速に計算する」手法としてどのような方法が考えられるでしょうか？高性能なPCを利用する、並列処理を利用する、低次元化モデルを利用するなどが考えられます。モデル全体の分布が必要な場合、ある評価ポイントの時間変化が知りたい場合など目的によってとる手段が異なります。前者の場合には、高性能PC/並列処理計算などを利用することで計算速度を向上させるのがよいでしょう。後者の場合は、モデルを低次元化して必要な結果のみを取り出す方法が適しています。この3DのFEM解析の精度を保ちながら低次元化する方法をReduced Order Modeling (ROM) もしくはModel Order Reduction (MOR) [1]といいます。3DモデルをROM化することで、3D解析で数時間掛かる過渡解析も1D-CAEツールを利用して数十秒程度で解析可能です。本セッションではROMモデルを超高速に作成できるツールであるModel Reduction inside Ansys(MRiA)をご紹介します。

2. MRiAの特徴について

MRiAはドイツのCADFEM社が開発したクリロフ部分空間法[2][3]による線形モデル低次元化ツールです。このツールの特徴はつぎの3つになります。

(1) Ansys Mechanicalにアドオンしたツール

Ansys Mechanicalの過渡伝熱解析・熱変位解析・構造時刻歴/周波数応答解析・圧電解析・音響解析など様々なデータをROM化することができます。メインは伝熱・熱変位解析でAnsysが作成するマトリクスを取り出し、クリロフ部分空間法にてベクトル列Vを作成して低次元化した

後、Ansys Twin Builder・MATLAB/Simulink・VHDL-AMS・Modelicaなどの形式ファイルを作成することができます(図-1参照)。構造・圧電・音響解析のROM化はコマンドを利用して低次元化可能です。

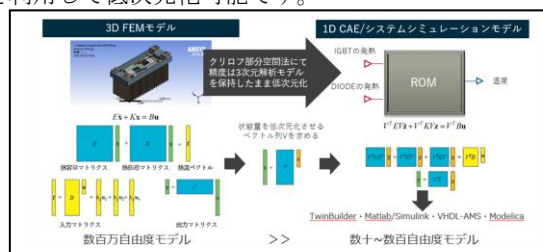


図-1 クリロフ部分空間法によるROM化イメージ

(2) 低次元化が超高速に実行できること

主によく使われる伝熱解析で説明します。

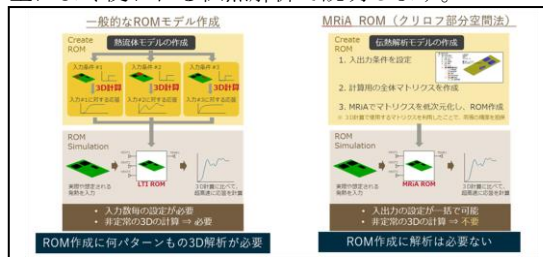


図-2 LTI ROM とクリロフ部分空間法の違い

線形・非定常ROMモデルを作成手法の一つとして線形時不変システム[4] (LTI-ROM) があります。この手法の場合、発熱体の数だけステップ荷重の3D FEMの過渡解析を実施し、その応答結果を利用して1個のROMモデルを作成します。MRiAはクリロフ部分空間法を利用しているた

め、入出力条件と次元の大きさを設定するのみで、3D過渡解析を実施することなくROM作成可能です(図-2参照)。つまり、基板上にIGBTなどのチップが多々配置されているPCU・ECUなどの場合、ROM作成時間の差は歴然です。

(3) 動的に変化するマトリクスを作成できること

ROMモデルは状態空間形式に出力されます。 1D-CAE ツールで状態空間モデルを取り込み、解析を実施しますが、温度・時間などで熱伝達に変化する現象も取り入れることが可能です。通常の熱伝導方程式を式(1)のように表記することが可能です。

$$E\dot{T} + \left(K_0 + (h - h_0)K_h\right)T = f(h_0)\left(\frac{h}{h_0}\right)T_{bulk} \tag{1}$$

- ここで：
- E ：熱容量マトリクス
- K_0 ：基準熱伝達における熱伝導マトリクス
- K_h ：熱伝達ダイナミック熱伝導マトリクス
- h_0 ：基準熱伝達率
- h ：熱伝達率
- T_{bulk} ：雰囲気温度
- $f(h_0)$ ：基準熱伝達率時の熱流ベクトル
- T ：温度ベクトル

ROMモデル作成時に利用した熱伝達を基準熱伝達とし、MRiAを利用してEマトリクス、 K_0 マトリクス、 K_h マトリクスに加えて、入力マトリクス、出力マトリクスを作成します。 h と h_0 の差分をダイナミック熱伝導マトリクスに掛け合わせることで時間変化する熱伝達を表現します。

3. 熱変位解析事例

ここでは図-3に示す工作機械モデルの熱変位解析例を紹介します。モータの発熱や切削時摩擦熱により長時間利用していると工具先端が変位します。入力にはモータ発熱・摩擦発熱・その他温度固定などで、出力は発熱体の温度および工具先端の変位量です。

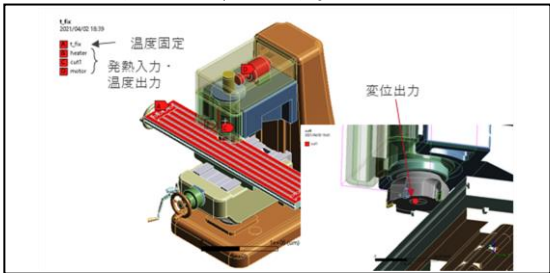


図-3 工作機械モデル入出力

過渡熱解析と静的構造解析の連成事例であり、直接連成場要素を利用したAnsysとROMモデルで同条件の解析を30,000[s]まで計算しました。ROM化したモデルの1Dシ

ミュレーションを図-4に示します。また図-5は工具先端の変位量の比較結果となります。AnsysとROMモデル結果は完全に一致していることがわかります。

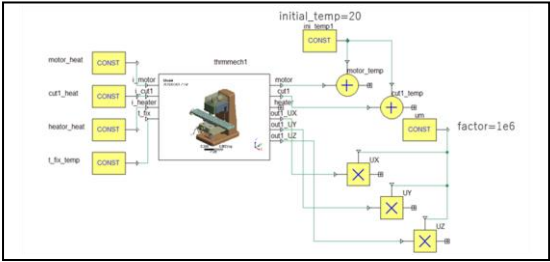


図-4 Ansys Twin Builder での 1D シミュレーション

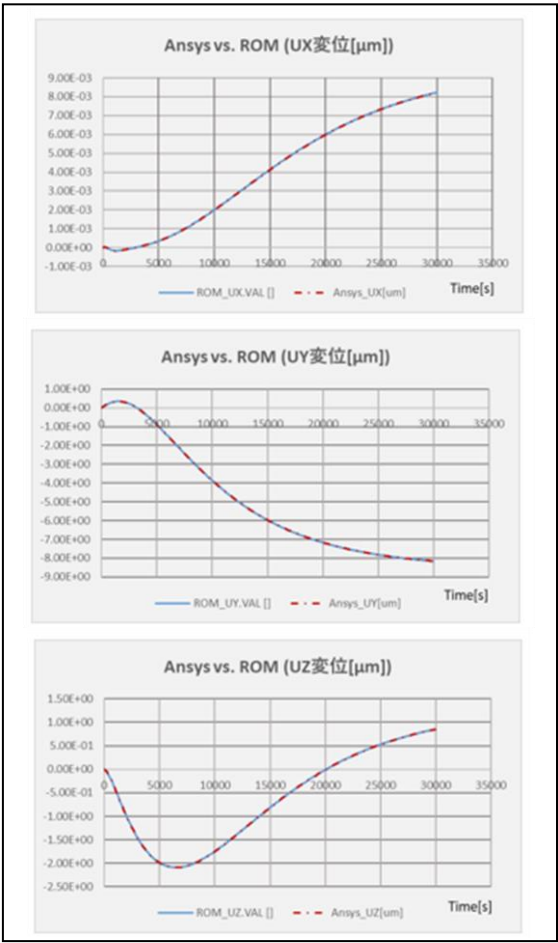


図-5 工具先端変位の結果比較

表-1 計算時間比較表

	Ansys	ROM
マトリクス サイズ	約170万	140
使用コア数	16	ROM作成：4 1D計算：1
計算時間 Δt：100[s]	2時間30分	2秒
ROM作成時間	-	8分30秒

モデル規模・計算時間などについては表-1を参照ください。Ansysモデルは節点数約425,000節点であり、各方向の

変位自由度と温度自由度を持つため、約1,700,000自由度モデル（マトリクスの大きさ）となります。それに対してROMモデルは次元数140（マトリクスの大きさ）で表現することができます。ROMモデルでの1Dシミュレーションは2秒ですが、一番の注目はROMモデルを約9分で作成できることです。

4. 伝熱解析事例

(1) 大規模解析の高速化

図-6に示す6個のIGBTおよびダイオードが並んだ電子機器の熱解析事例です。強制対流によってヒートシンクは冷却されます。図-7に示す位相差を含む発熱を考慮した解析を実施するためには、時間積分間隔をこの波形が表現できるだけの微小な Δt に設定し、解析を実施します。

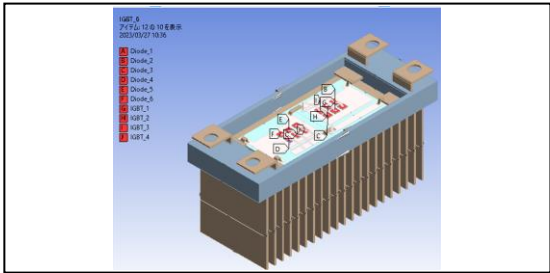


図-6 電子機器モデル図

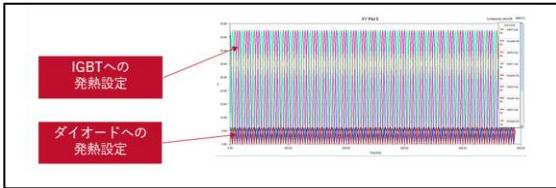


図-7 Time vs. IGBT・ダイオードの発熱

この解析では、12個の発熱体の損失を入力とし、発熱体の平均温度を出力として、MRiAでVHDL-AMS形式ファイルのROMモデルを作成し、図-8に示すようにAnsys Twin Builderにて1Dシミュレーションを実施しました。

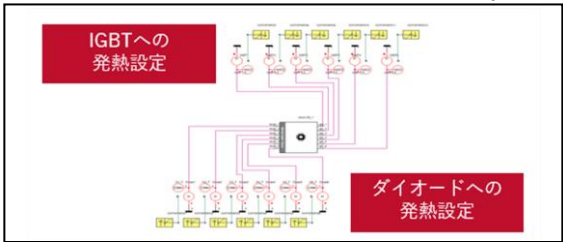


図-8 電子機器伝熱 1D シミュレーション

IGBT1の温度変化をAnsys Mechanicalと比較し、結果の精度および計算時間等を検証します。図-9には、IGBT1

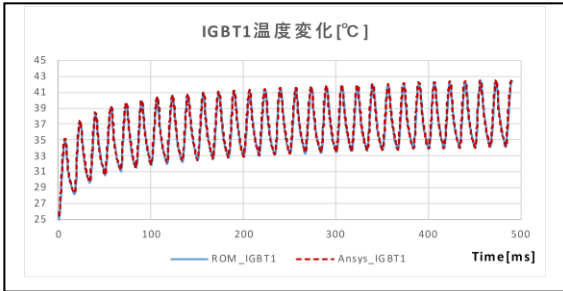


図-9 IGBT1 の温度結果比較

の温度結果を比較していますが、Ansysの伝熱解析結果と1Dシミュレーション結果が一致していることを確認できます。また、モデル規模・計算時間などについては表-2を参照ください。ROMモデル作成・計算時間が圧倒的に速いことが確認できます。

表-2 計算時間比較表

	Ansys	ROM
マトリクス サイズ	約20万	480
使用コア数	4	ROM作成：4 1D計算：1
計算時間0.49[s] $\Delta t : 0.5[\text{ms}]$	2時間50分	15秒
ROM作成時間	-	2分55秒

(2) 1Dモデルによる熱伝達・質量流量の時間変化

ここでは強制対流のファン特性が変化した場合を想定した1Dシミュレーションを実行してみました。Ansys伝熱解析機能には、熱流体パイプ要素(Fluid116)が存在し、シンプルな流路に対しては空気の流れおよび上流節点の温度、ヒートシンク壁面の熱伝達を利用して空気と固体間の熱の授受を表現することができます。熱伝達率および流体の質量流量を可変パラメータとするROMモデルを利用して作成することで、時間依存のROMパラメータを設定することが可能です。

このモデルでは、図-10に示すようにヒートシンク間に22本のパイプ要素群（Fluid）を用意しました。

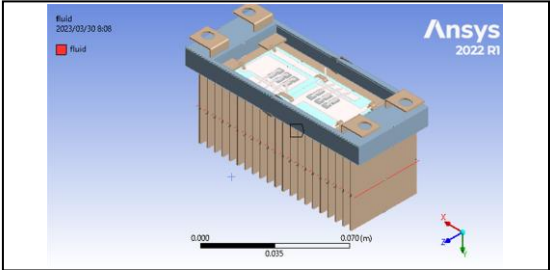


図-10 熱流体パイプ要素

このモデルの可変パラメータを含めた式は式(2)のように表現されます。フィン間の断面積は同じであるため、設定する質量流量も等しくなり、熱流体パイプ要素に対してまとめて1つの質量流量入力ピンを用意しました。ヒートシンクの熱伝達に関してはFluidの近傍節点の温度が雰囲気温度となる1つの熱伝達入力ピンを用意します。ダイナミック熱伝導マトリクスの係数値（ Δh および Δm ）が1Dシミュレーションでの入力値です。

この解析では、MRiAでModelica形式のROMモデルを作成し、図-12に示すようにAnsys Twin Builderにてブロック線図による1Dシミュレーションモデルを作成しています。図-11に示すような熱伝達・質量流量グラフと基準値の差分を入力に加えてIGBT/ダイオード毎に同じ発熱履歴を

設定しました。初期温度0℃として計算後、初期温度分オフセットして、IGBT・ダイオードにおける平均温度を出力しました。

$$E\dot{T} + \left(K_0 + \Delta h \cdot K_h + \Delta m \cdot K_m \right) T = Bu \tag{2}$$

ここで：

- K_0 ：基準熱伝達・基準質量流量における熱伝導マトリクス
- K_h ：熱伝達ダイナミック熱伝導マトリクス
- Δh ：基準熱伝達率との差分
- K_m ：質量流量ダイナミック熱伝導マトリクス
- Δm ：基準質量流量との差分
- B ：入力マトリクス
- u ：IGBT・ダイオードの発熱入力ベクトル

図-13にAnsysとの結果を比較しました。ここでは2つの素子の温度比較を実施しています。計算結果はほぼ一致していることが確認できます。

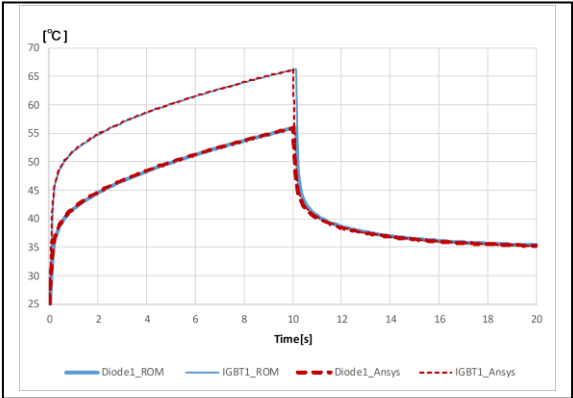


図-13 IGBT1・ダイオード1の温度結果比較

5. 最後に

本セッションでは、熱解析および熱変位問題におけるROMモデル作成および、1Dシミュレーションによる計算高速化についてご紹介しました。MRiAのROMモデル作成が高速なため、形状変更・材料変更のROMモデルも簡単に作成でき、1D解析による高速パラメータスタディが可能です。ROMモデルを活用することで、解析時間短縮・ハードリソースの削減など解析効率を大幅に改善することが可能となります。

また、本セッションではご紹介しませんでした。制御とともに利用してデジタルツインのバーチャルセンサの役割を果たすことも可能です。

参考文献

- [1] Wilhelmus H.A.Schilders, etc, Model Order Reduction, Springer
- [2] T.Bechtold, etc, Fast Simulation of Electro-Thermal MEMS, Springer
- [3] Athanasios C.Antoulas, Approximation of Large-Scale Dynamical System, SIAM
- [4] 足立修一著,MATLABによる制御工学,東京電機大学出版局

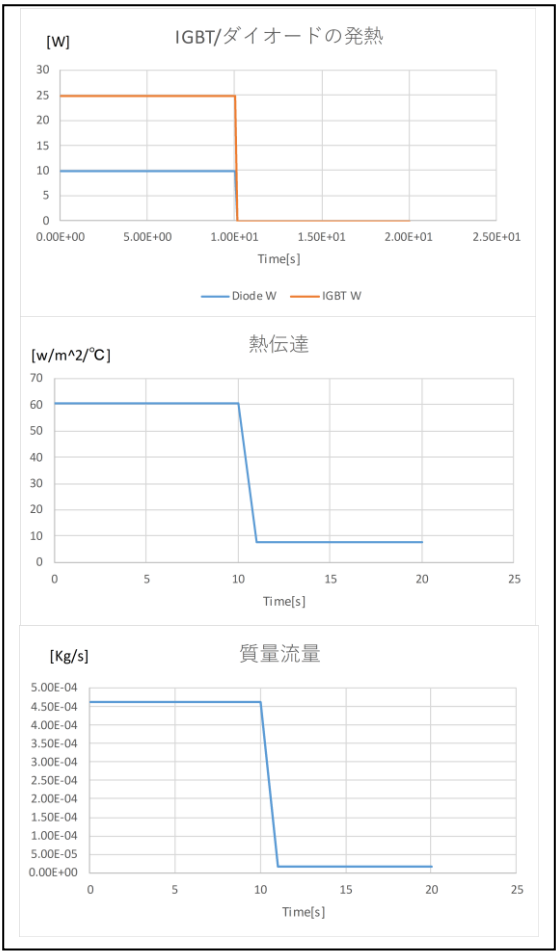


図-11 各種境界条件

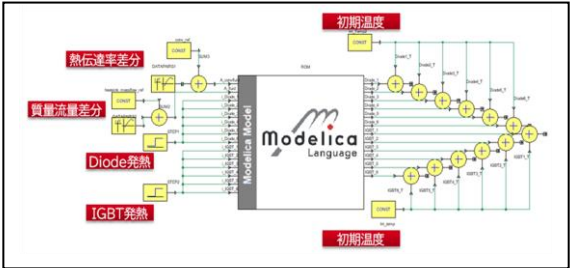


図-12 電子機器伝熱 1D シミュレーション