

熱解析事例－非定常熱伝導解析

Femap / Thermal

Femap ソリューション

熱解析事例－非定常熱伝導解析

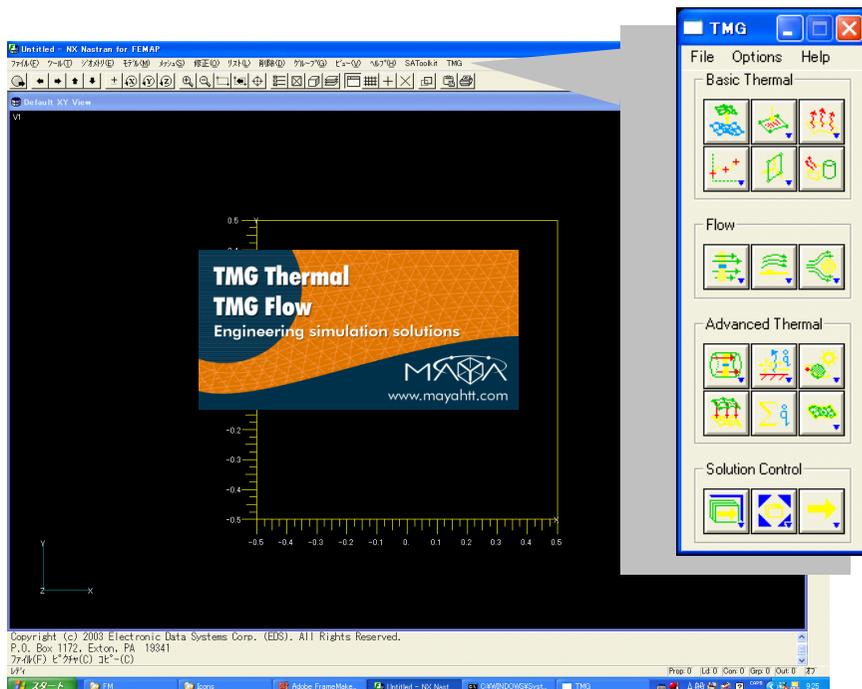
Femap/Thermal

Femap/Thermal は、**Femap** シリーズへの追加モジュールとしてアドオンされた汎用熱解析ソリューションです。**Femap/Thermal** は著名な熱解析プログラム **TMG** (Thermal Model Generator) のサブセットであり、その有限差分法解析ソルバー **TMG** を **Femap** と高度に連携した製品です。**Femap/Thermal** は、数値計算エンジンに超高速共役勾配法を用いており、**Femap** の使いやすさをそのままに、快適でスピーディーな作業環境を、Windows マシンにお届けします。

すでに有限要素法構造解析プログラムをお持ちの方は、**Femap/Thermal** によって従来困難であったような輻射や自然/強制対流を伴う高度な熱解析機能をきわめてリーズナブルな価格でご利用いただけます。また、熱のスペシャリストの方には、従来、視覚的表現が弱く、経験と勘に頼っていた熱数学モデルの作成を **Femap** の高度なビジュアル機能で一気に合理化します。そして複数の解析プログラムを連携させなければならなかったような複合的な解析もこれ一本で解決します。

Femap は 30 を超える解析プログラムとダイレクトにインターフェイスできます。過去の解析資産を再活用し、複数の解析プログラムへのフロントエンドとして、共通のモデリング/ポスト処理環境を利用することができるのです。

Femap/Thermal には、通常の **Femap** マニュアルの他に、当社オリジナル日本語マニュアルが標準で付属します。この中には要素や解析機能に関して日本語で詳しく説明しています。



Femap/Thermal の起動時画面

Femap / Thermal の構成

エントリクラスの **Femap / Thermal** と最先端機能を満載した **Femap/Advanced Thermal** の二つのオプションをご用意しました。

Femap/Thermal

熱解析エントリモジュール

Femap/Thermal は **TMG** の基本機能をコンパクトにまとめた製品です。

○ 熱伝導解析機能

固体熱伝導モデルを定常/非定常で解析できます。熱伝導率や比熱、密度などが温度依存でも定義できます。さらに相転移や直交異方性のある熱伝導材料を取り扱えます。

○ 熱輻射解析機能

散乱面のみであれば、形態係数を計算し熱輻射リンクを算出することができます。形態係数計算は、ヌッセルト半球投影法と遮蔽チェック計算によってシステムティックに行われます。熱輻射リンクの計算には、Oppenheim 法、Gebhardt 法が選択できます。

○ 熱結合機能

近接するメッシュ間に面積比例や距離を考慮した様々な熱結合リンクを自動的に生成し、熱コンダクタンスを計算することができます。熱結合計算はメッシュが不整合でも合理的に処理され、伝導、輻射、伝達で熱結合を生成することができます。

○ 自然対流熱伝達

テーブルや公式の形で対流境界条件を与えることができます。

Femap/Advanced Thermal

熱解析 Advanced モジュール

Advanced モジュールは **Femap/Thermal** の機能に高度な解析機能を追加した製品です。

○ 熱輻射解析機能

散乱面と規則反射面、および透過を考慮して双方向レイトレーシングや形態係数の計算を行い、熱輻射リンクを算出することができます。形態係数の計算にはヌッセルト半球投影法の他、先進の OpenGL アクセラレータのハードウェア機能を利用した非常に高速な Hemicube 法も利用できます。

○ 対流熱伝達機能

平板、球、円筒などの対流コリレーションを用いて自然対流を考慮することができます。一次元のフローネットワークを構築し、強制/自然対流熱伝達を計算できます。計算は水力学的手法と実験式を組み合わせ求めており、流体解析を行うわけではないので高速に処理できます。

○ 抵抗体発熱解析機能

材料特性に半導体特性を与えることで通電による発熱を模擬することができます。

○ モデルの縮退機能

- 日照解析機能
- 軌道熱解析機能
- 関節モデリング
- 外部プログラムインターフェイス

熱伝導のモデル化

TMG は、熱伝導の支配方程式を下式で表現します。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q$$

ここで、

ρ : 質量密度

C: 比熱

λ : 熱伝導率

T: 温度

t: 時間

q: 単位体積あたりの発熱密度

熱伝導率 λ が一様な場合は以下のように書き直すことができます。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho C} q$$

ここで、 $\lambda/\rho C$ は温度変化が伝わる速さを示すファクタになるので、温度伝導率 (温度拡散率) と呼ばれます。

TMG の熱伝導計算では、以下の事項を考慮することができます。

- 熱伝導率の温度依存性の定義
- 比熱、質量密度の温度依存性の定義
- 直交異方性熱伝導材料の定義
- 相転移特性の定義
- 軸対称解析
- 解析における放射熱流の考慮

解析事例—一次元非定常熱伝導解析

モデル化

Femap/Thermal を用いた簡単な一次元非定常熱伝導解析事例を紹介します。この例題は、例えば、厚さ 1.0 の大きな円柱形の熱伝導体を $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ に十分熱しておいて、その両端を $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ の氷水に急激につけたときの t 秒後の厚さ方向の温度分布について検討するものです。計算モデルを下図に示します。

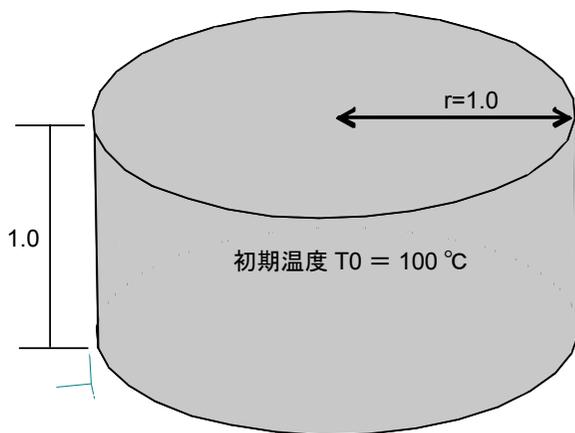


図 1-1 計算モデル

材料物性値は以下のとおりです。

○ 熱伝導体の物性値：(マテリアルタイプ：等方性)

熱伝導率： 1.0W/mK 質量密度： 1.0kgm/m^3 比熱： 1.0J/kgmK

任意の時間 t における厚さ方向の正規化した温度分布 $u(x,t)=T/100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、および本例題の境界条件は以下のように表されます。

$$\begin{aligned} \text{偏微分方程式} &: \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} & (0 < t, 0 < x < 1) \\ \text{初期条件} &: u(x,0) = 1 & (0 < x < 1) \\ \text{境界条件} &: u(0,t) = u(1,t) = 0 & (0 \leq t) \end{aligned}$$

本例題には解析解があります。

解析解

上式の解析解は次式で与えられます。

$$u(x,t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \exp\left[-(2k+1)^2 \pi^2 t\right] \sin\left[(2k+1)\pi x\right]$$

解析ケース

解析ケースと解析に用いたメッシュを下図に示す。Case1 のメッシュは、厚さ方向に等間隔に10分割しています。Case2 は、Case1 をベースに、境界付近（上下端）のメッシュを細かくしたものです。

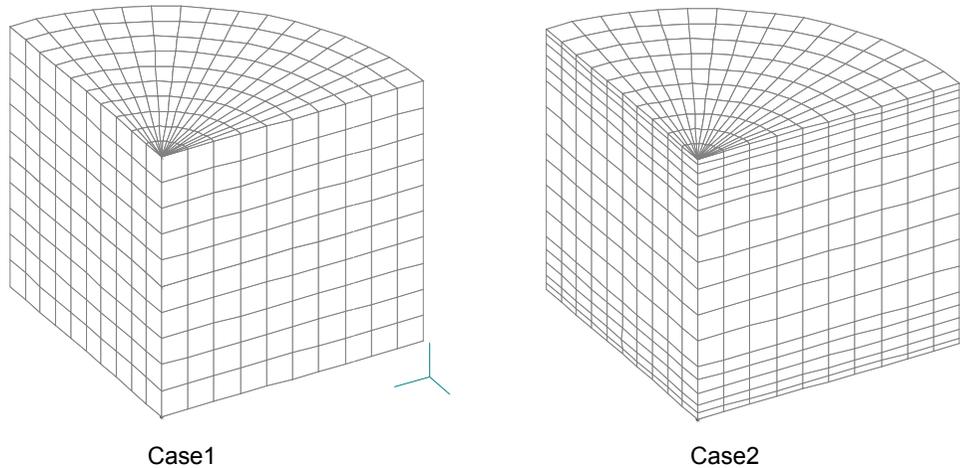


図 1-2 解析ケースとメッシュ図

解析結果

解析解と計算値の数値の比較を下表に示します。

表 1-1 解析解と計算値の数値比較 (t=0.001)

項目	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
解析解	0.000	0.975	1.000	1.000	1.000	1.000
Case1	-	0.875	1.004	1.000	1.000	1.000
Case2	-	0.945	0.999	1.000	1.000	1.000
Error_C1	-	-10.2	0.4	0.0	0.0	0.0
Error_C2	-	-3.1	-0.1	0.0	0.0	0.0

表 1-2 解析解と計算値の数値比較 (t=0.01)

項目	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
解析解	0.000	0.520	0.843	0.966	0.995	0.999
Case1	-	0.499	0.821	0.957	0.994	1.000
Case2	-	0.515	0.827	0.952	0.992	0.998
Error_C1	-	-4.1	-2.5	-1.0	-0.2	0.1
Error_C2	-	-1.0	-1.9	-1.4	-0.4	-0.1

$$Error = \frac{T_y - T_{\text{解析解}}}{T_{\text{解析解}}} \times 100$$

下図に解析解と計算値の温度分布の比較を示します。

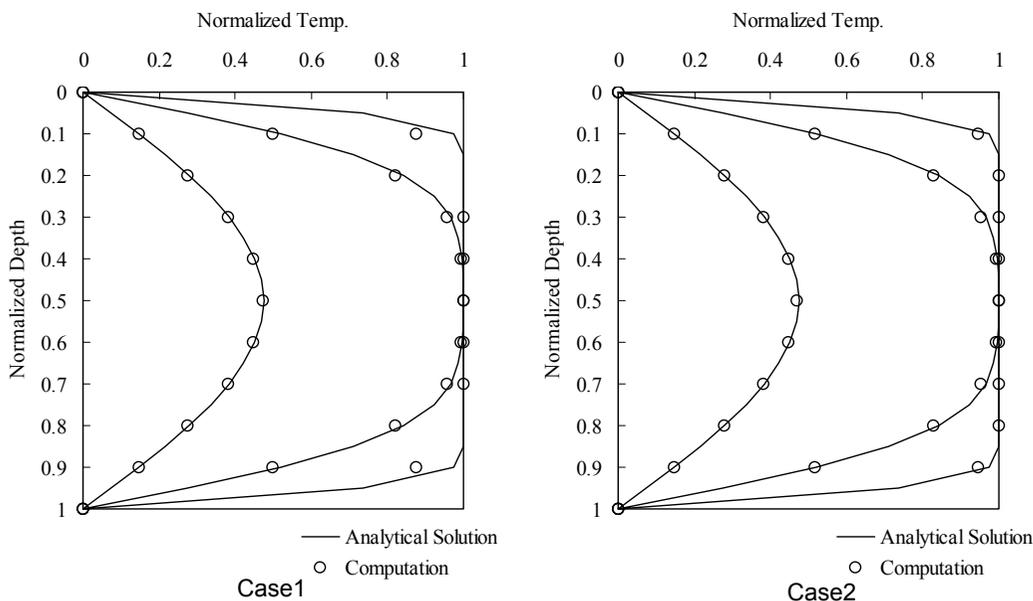


図 1-3 解析解と計算値の温度分布の比較

まとめ

解析解の温度分布を見てわかるように、経過時間が小さい段階で、境界付近の温度分布が急激に変化しています。時間 $t=0.001$ では、粗いメッシュ(Case1)で最大誤差 **-10.2%** となります。それに対して、境界付近のメッシュを細かく (Case2) すると最大誤差が **-3.1%** となり計算結果の精度が大幅に改善されます。また、時間 $t=0.01$ においても Case1 で最大誤差が **-4.1%**、Case2 で最大誤差が **-1.9%** となり同様に計算結果の精度が改善されます。

今回の例題のように、温度分布が急激に変化(温度勾配が大きい)する領域のメッシュを細かくすることで計算結果の精度を向上することができます。解析においてメッシュのサイズは、計算結果に影響を与えます。解析モデルの作成段階においては、解析対象の様子や条件などに十分注意し、メッシュサイズがあまり粗くならないようにする必要があります。

お問い合わせ：

Femap/Thermal： Tアシストコム株式会社

Tel : 03-5537-5751 Fax : 03-5537-5752 E-mail : info@it-ac.co.jp URL : <http://www.it-ac.co.jp>