

## 付録 F

### 熱伝導解析の詳細

## F.1. 基礎式

本解析では、式(F.1.1)に示すように温度分布は半径方向のみに依存する球座標系の熱伝導方程式を用いた。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{F.1.1})$$

ここで用いている記号は以下に示す通りである。

r : 鋼球中心からの半径方向位置 [m]	T : 温度 [°C]
t : 時間 [s]	κ : 熱拡散率 [m <sup>2</sup> /s]

また、温度を以下のように定義する。

$$T(r) = \begin{cases} T_s(r) & (0 < r < R) \\ T_v(r) & (R < r < R + \delta) \\ T_l(r) & (R + \delta < r) \end{cases} \quad (\text{F.1.2})$$

ここで用いている記号は以下に示す通りである。

T <sub>s</sub> (r) : 鋼球内温度分布 [°C]	R : 鋼球半径 [m]
T <sub>v</sub> (r) : 蒸気膜内温度分布 [°C]	δ : 蒸気膜厚さ [m]
T <sub>l</sub> (r) : 液相内温度分布 [°C]	

である。

図 F.1.1 に計算メッシュ構造を示す。式(F.1.1)を鋼球内に対して完全陰解差分表示すると

$$-\kappa_s \gamma \left( 1 - \frac{1}{i-1} \right) T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2\kappa_s \gamma) T_i^{n+1} + \kappa_s \gamma \left( 1 + \frac{1}{i-1} \right) T_{i+1}^{n+1} = T_i^n \quad (i=1, 2, \dots, m_s) \quad (\text{F.1.3})$$

ここで、 $\gamma = \Delta t / \Delta h_s^2$ 、 $T_{m_s} = T_w$  である。液相に対して完全陰解差分表示すると

$$\begin{aligned} -\kappa_l \xi_l \left( \frac{1}{\Delta h_l} - \frac{1}{(i-1)\Delta h_l + R + \delta} \right) T_{i-1}^{n+1} + \left( 1 + \frac{2\kappa_l \xi_l}{\Delta h_l} \right) T_i^{n+1} \\ + \kappa_l \xi_l \left( \frac{1}{\Delta h_l} + \frac{1}{(i-1)\Delta h_l + R + \delta} \right) T_{i+1}^{n+1} = T_i^n \end{aligned} \quad (i=1, 2, \dots, m_l) \quad (\text{F.1.4})$$

ここで、 $\xi_l = \Delta t / \Delta h_l$ 、 $T_1 = T_l$ 、 $T_{m_l} = T_i$  である。蒸気膜に対して完全陰解差分表示すると、

$$\begin{aligned} -\kappa_v \xi_v \left( \frac{1}{\Delta h_v} - \frac{1}{(i-1)\Delta h_v + R} \right) T_{i-1}^{n+1} + \left( 1 + \frac{2\kappa_v \xi_v}{\Delta h_v} \right) T_i^{n+1} \\ + \kappa_v \xi_v \left( \frac{1}{\Delta h_v} + \frac{1}{(i-1)\Delta h_v + R} \right) T_{i+1}^{n+1} = T_i^n \end{aligned} \quad (i=1, 2, \dots, m_v) \quad (\text{F.1.5})$$

ここで、 $\xi_v = \Delta t / \Delta h_v$ 、 $T_1 = T_w$ 、 $T_{m_v} = T_i$  である。これらの式で用いられた記号は以下に示す通りである。

Δh <sub>s</sub> : 鋼球内メッシュ幅 [m]	t : 時間 [s]
Δh <sub>v</sub> : 蒸気膜メッシュ幅 [m]	T <sub>l</sub> : 界面温度 [°C]
Δh <sub>l</sub> : 液相内分割メッシュ幅 [m]	T <sub>l</sub> : 水温 (測定値) [°C]

I	: ノード番号	[-]	$T_w$	: 鋼球表面温度 (測定値)	[°C]
N	: 時間番号	[-]	$\kappa_s$	: 鋼球の熱拡散率	[m <sup>2</sup> /s]
R	: 鋼球半径	[m]	$\kappa_v$	: 蒸気の熱拡散率	[m <sup>2</sup> /s]
R	: 半径方向位置	[m]	$\kappa_l$	: 液相の熱拡散率	[m <sup>2</sup> /s]
T	: 温度	[°C]			

図F.1.2に各相をメッシュ分割した図を示す。鋼球内、蒸気膜内、および液相内は各々領域を500分割して計算を行った。

## F.2. 鋼球内温度分布

式(F.1.3)の  $T_{i-1}^{n+1}$ 、 $T_i^{n+1}$ 、 $T_{i+1}^{n+1}$  の係数を以下のように置く。

$$a_i = \kappa \gamma \left( 1 - \frac{1}{i-1} \right) \quad (F.2.1)$$

$$b_i = 1 + 2\kappa \gamma \quad (F.2.2)$$

$$c_i = \kappa \gamma \left( 1 + \frac{1}{i-1} \right) \quad (F.2.3)$$

$$d_i = T_i^n \quad (F.2.4)$$

Gauss の消去法を用いて解くと、時間レベル  $n+1$  における鋼球内温度分布は、

$$\alpha_2 = b_2 \quad ; \quad \alpha_i = b_i - \frac{a_i}{\alpha_{i-1}} \cdot c_{i-1} \quad (F.2.5)$$

$$s_2 = d_2 \quad ; \quad s_i = d_i + \frac{a_i}{\alpha_{i-1}} \cdot s_{i-1} \quad (i = 3, \dots, m_s + 1) \quad (F.2.6)$$

$$T_{m_s+1} = \frac{s_{m_s+1}}{\alpha_{m_s+1}} \quad ; \quad T_i = \frac{1}{\alpha_i} (s_i + c_i T_{i+1}) \quad (i = m_s, m_s - 1, \dots, 1) \quad (F.2.7)$$

この温度分布から、鋼球表面における熱流束  $q_s$  [W/m<sup>2</sup>] が求められ、

$$q_s = -\lambda_s \frac{T_{m_s+1} - T_{m_s}}{\Delta h_s} \quad (F.2.8)$$

となる。ここで、 $\lambda_s$  [W/m<sup>2</sup>K] は鋼球の熱伝導率である。

## F.3. 液相内温度分布

式(F.1.4)の  $T_{i-1}^{n+1}$ 、 $T_i^{n+1}$ 、 $T_{i+1}^{n+1}$  の係数を以下のように置く。

$$a_i = \kappa_l \xi_1 \left( \frac{1}{\Delta h_1} - \frac{1}{(i-1)\Delta h_1 + R} \right) \quad (F.3.1)$$

$$b_i = 1 + \frac{2\kappa_i \xi_i}{\Delta h_i} \quad (\text{F.3.2})$$

$$c_i = \kappa_i \xi_i \left( \frac{1}{\Delta h_i} + \frac{1}{(i-1)\Delta h_i + R} \right) \quad (\text{F.3.3})$$

$$d_i = T_i^n \quad (\text{F.3.4})$$

両端において、

$$T_1 = T_i \quad (\text{F.3.5})$$

$$T_{m_i} = T_1 \quad (\text{F.3.6})$$

という境界条件が与えられているので SOR 法を用いて解く。反復回数(k+1)回目における温度分布は、

$$rV^{(k+1)} = d_i - a_i \cdot T_{i-1}^{(k+1)} - (b_i \cdot T_i^{(k)} + a_i \cdot T_{i+1}^{(k)}) \quad (\text{F.3.7})$$

$$T_i^{(k+1)} = T_i^{(k)} + \frac{\omega \cdot rV^{(k+1)}}{b_i} \quad (\text{F.3.8})$$

ここで $\omega$ は加速係数であり、通常 1~2 の間の値を取る。また式(F.3.7)において、 $T_{i-1}^{(k+1)}$ は直前に求めた値を代入することになる。このようにして、 $rV^{(k+1)}$ がある値より小さくなるまで反復させ、時間レベル n+1 における液相内温度分布を求める。

この温度分布から、気液界面における熱流束  $q_l$  [W/m<sup>2</sup>]が求められ、

$$q_l = -\lambda_l \frac{T_2 - T_1}{\Delta h_l} \quad (\text{F.3.9})$$

となる。ここで、 $\lambda_l$  [W/m<sup>2</sup>K]は水の熱伝導率である。

#### F.4. 蒸気膜内温度分布

蒸気膜内温度分布も液相内温度分布と同様に両端において、

$$T_1 = T_i \quad (\text{F.4.1})$$

$$T_{m_v} = T_1 \quad (\text{F.4.2})$$

という境界条件が与えられているので SOR 法を用いて式(F.1.5)を解く。解法は液相内温度分布の場合と同様である。

#### F.5. 初期条件

図 F.5.1 に初期温度分布の概念図を示す。初期温度分布は、以下のようにして求めた。まず初めに鋼球内温度は一定、蒸気膜内温度は鋼球表面温度から界面温度まで線形的に降下、液相内温度も界面温度から液相温度まで線形的に降下するという条件を与えた。そしてこの条件に圧力波を

加えずに鋼球表面温度を一定速度で降下させた時の表面温度履歴データから、熱伝導方程式を各相について解くことにより求めた。この時、膜厚および液相温度は変化しないものとした。

## F.6. 物性値

鋼球、蒸気、水の物性値は温度によって変化する物性値であり、その効果も解析中に含める必要がある。

今回実験で用いた鋼球は SUS304 であり、その物性値は「日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第4版」の付表にあるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304(18Cr-8Ni)の物性値データを基に温度の関数として最小二乗法で近似した式を用いた。

$$\text{熱伝導率} : \lambda_s(T) = 7.92427 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 4.04302 \times 10^{-3} \cdot T + 13.8674 \quad [\text{W/mK}] \quad (\text{F.6.1})$$

$$\text{熱拡散率} : \kappa_s(T) = 1.69270 \times 10^{-12} \cdot T^2 - 5.11301 \times 10^{-10} \cdot T + 4.04529 \times 10^{-6} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{F.6.2})$$

水の圧力は 0.1[MPa]であると仮定し、その熱拡散率および熱伝導率を温度の関数として最小二乗法で近似した式を用いた。なお、物性値データは「日本機械学会 1980年 蒸気表」の物性値データを用いた。

$$\text{熱伝導率} : \lambda_l(T) = -5.8197 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 1.6568 \times 10^{-3} \cdot T + 0.57273 \quad [\text{W/mK}] \quad (\text{F.6.3})$$

$$\text{熱拡散率} : \kappa_l(T) = -1.36 \times 10^{-12} \cdot T^2 + 4.6456 \times 10^{-10} \cdot T + 1.3752 \times 10^{-7} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{F.6.4})$$

$$\text{比熱} : C_{pl} = 4.2161 \quad (\text{F.6.5})$$

$$\begin{aligned} & -2.7781 \times 10^{-3} \cdot T + 7.0677 \times 10^{-5} \cdot T^2 \\ & -8.2072 \times 10^{-7} \cdot T^3 + 5.4395 \times 10^{-9} \cdot T^4 \\ & -1.7385 \times 10^{-11} \cdot T^5 + 2.2443 \times 10^{-14} \cdot T^6 \end{aligned} \quad [\text{kJ/kgK}]$$

蒸気の圧力も水の場合と同様に 0.1[MPa]であると仮定し、その物性値を温度の関数として最小二乗法で近似した式を用いた。なお、物性値データは「日本機械学会 1980年 蒸気表」の物性値データを用いた。

$$\text{熱伝導率} : \lambda_v(T) = 1.54146 \times 10^{-8} \cdot T^2 + 6.4497 \times 10^{-5} \cdot T - 2.045 \times 10^{-3} \quad [\text{W/mK}] \quad (\text{F.6.6})$$

$$\text{熱拡散率} : \kappa_v(T) = 1.3895 \times 10^{-10} \cdot T^2 + 0.49658 \times 10^{-7} \cdot T - 0.028166 \times 10^{-4} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{F.6.7})$$

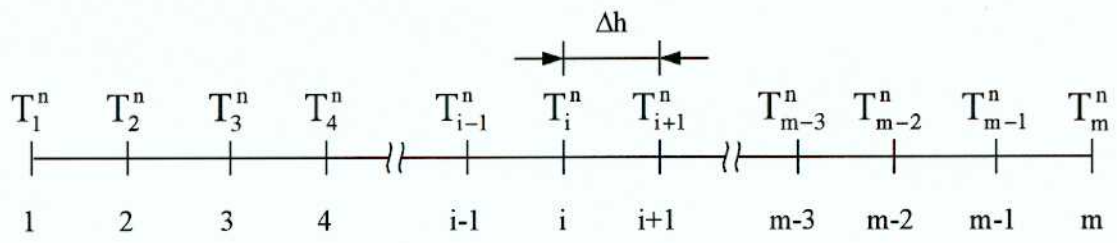


Fig. A.1.1 Numbering in radius direction

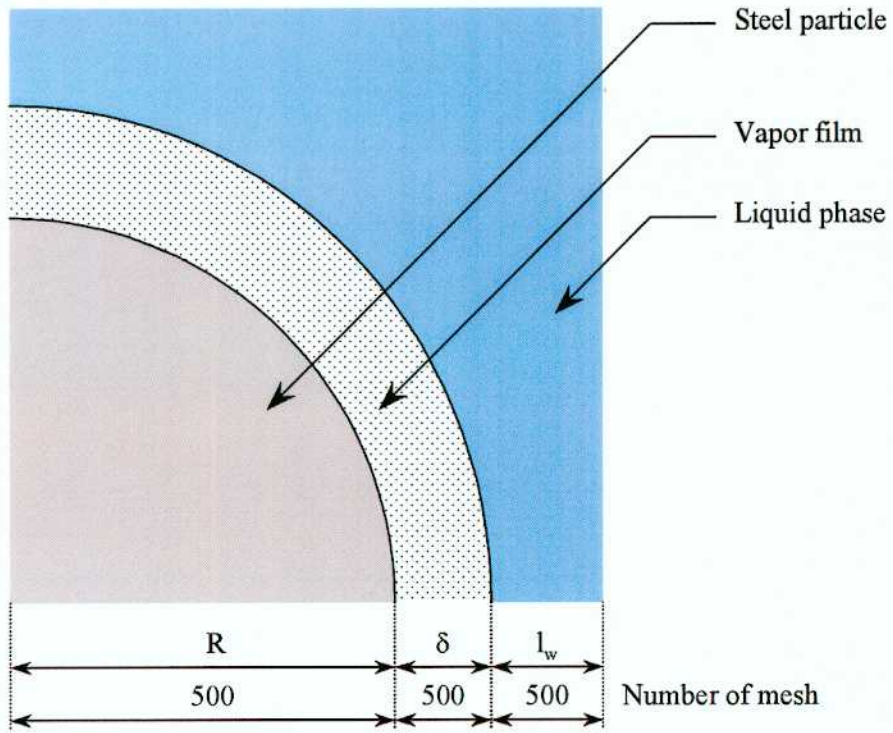
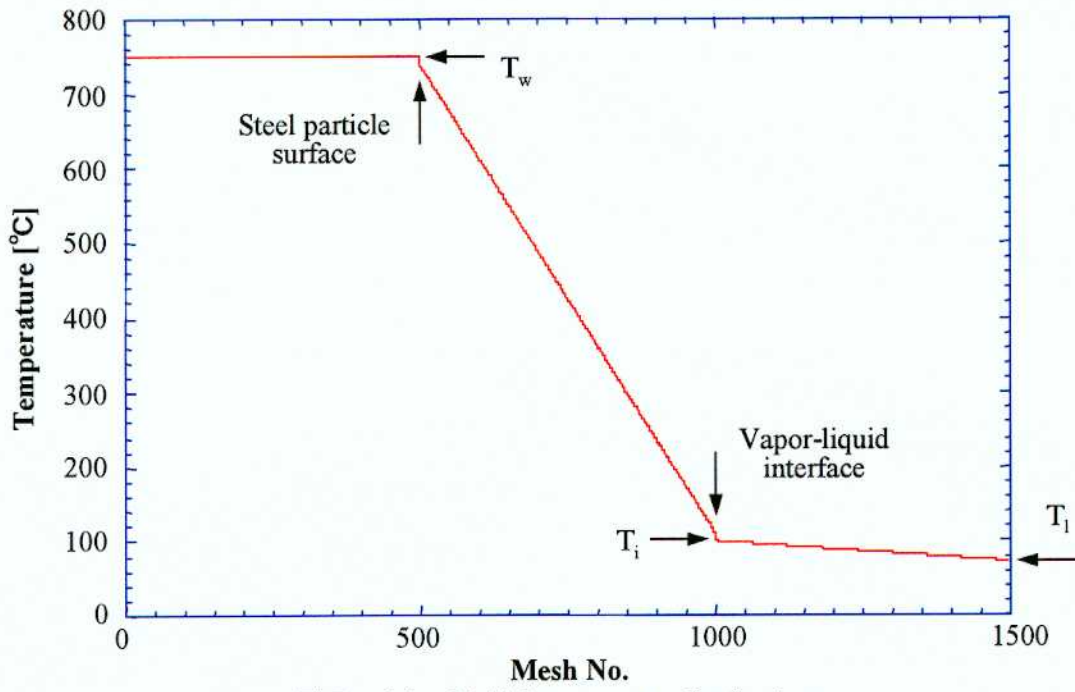
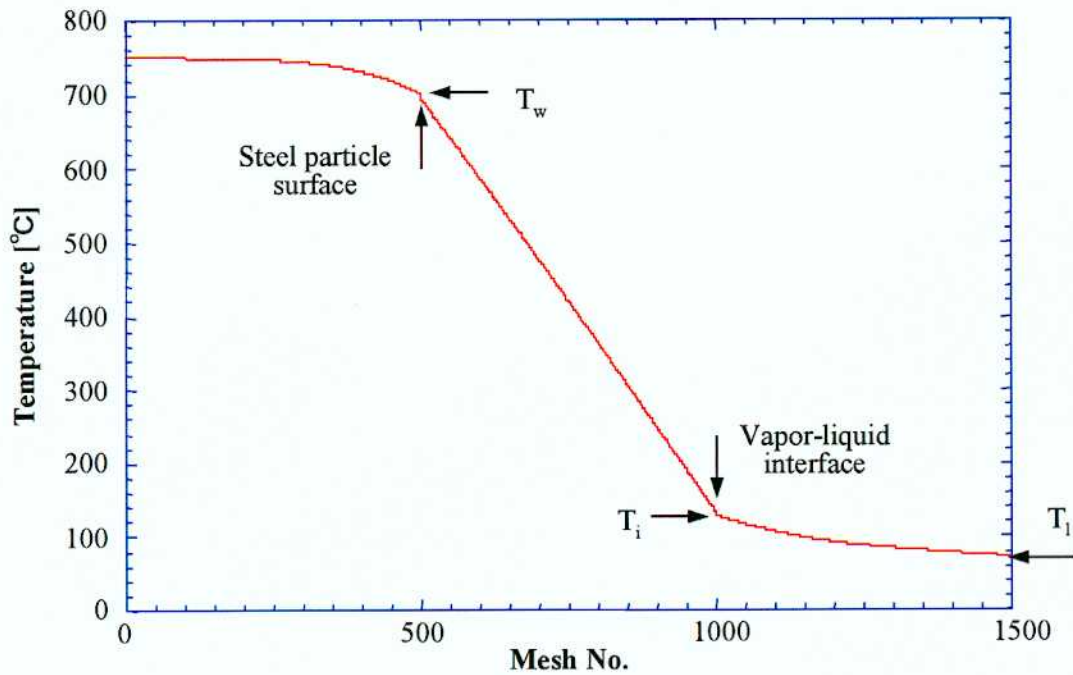
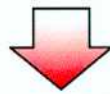


Fig. A.1.2 Division of computational region



(F) Provisional initial temperature distribution



(b) After initial condition calculation

Fig. A.5.1 Initial condition setting