

密閉二相サーモサイフォン: シンプルなモデリング, 及び, シミュレーション *Plain Pipe Thermosiphon*

株式会社 ウェーブフロント

はじめに

C&R 社¹では, 参考文書[1] において, 密閉二相サーモサイフォンのシンプルなモデリング例, 及び, シミュレーション例を示しています. 本文書では, この文書の内容より一部を抜粋し, モデリングの基礎的な考え方, 及び, 計算例について説明しています.

1. 密閉二相サーモサイフォン

密閉二相サーモサイフォンの模式図を図 1.1 に示します. このタイプのサーモサイフォンは, 密閉容器, 及び, 作動流体より構成されます. 蒸発部の容器壁に対して入熱が行われ, その熱は, 作動流体 (液相) に到達します. 入熱により, 一部の流体は蒸発し, 蒸気流として上方へ向かいます (浮力). その後, 蒸気流は, 凝縮部の壁に到達し, 冷却されます. 冷却された蒸気は, 潜熱を放出し, 凝縮 (液化) します. 液化した作動流体は, 重力の作用により, 蒸発部へ向かいます (還流).

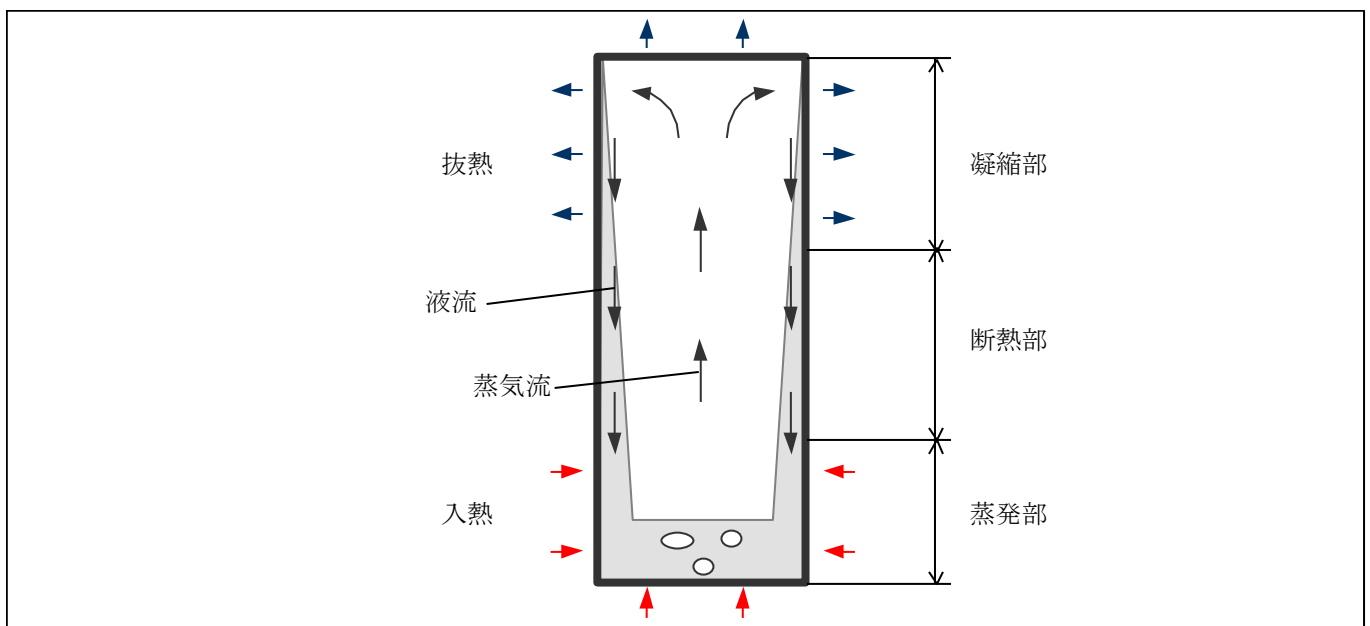


図 1.1 密閉二相サーモサイフォン

¹ C&R 社は, 流路網型熱流体解析 SINDA/FLUINT の開発元です(アメリカ コロラド州).

2. 回路構成

図 2.1 に熱流体回路の構成を示します。

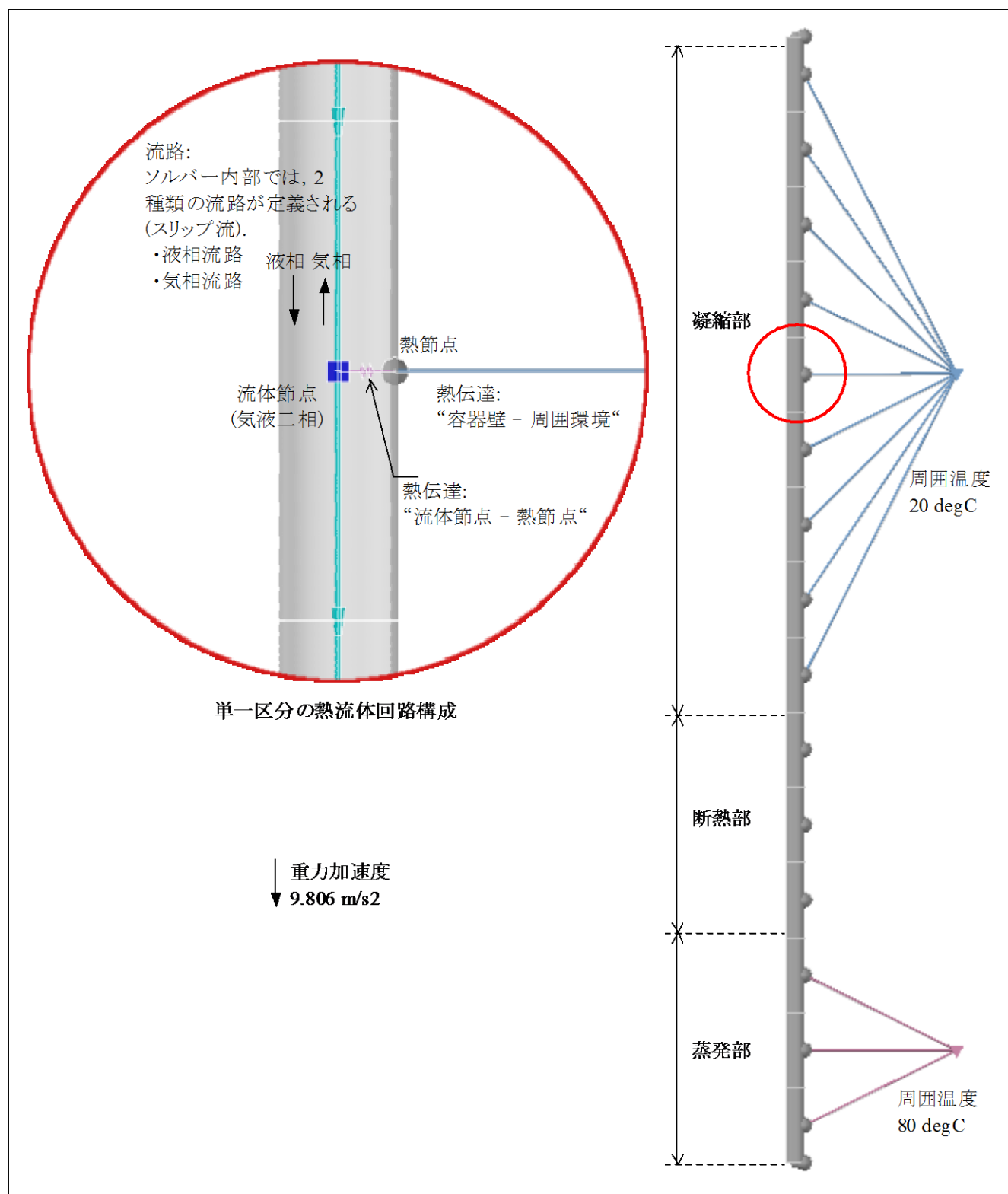


図 2.1 サーモサイフォン熱流体回路の例

各部位の仕様、及び、モデリングにおけるパラメーター等を以下に記します。

2.1. 密閉容器

サーモサイフオンの密閉容器は、円形の配管を想定します。

- 内径: 1.44526 cm
- 厚み: 0.07112 cm
- 長さ: 100 cm

モデリングにおいては、上記のような配管形状の容器を、軸方向 (長さ方向) に 15 分割します。各区分に、熱節²点²を一つ配置します。

2.2. 作動流体、及び、流路

作動流体は水とします。流体節点³を、各区分に一つ配置します。

流路は、各流体節点を接続し、流体の移動を模擬します。図 2.1 (GUI のキャプチャ画像) では、単一の流路として可視化されますが、ソルバー内部では、2 つの (平行) 流路が定義されます (スリップ流)：

- 液相流路 (重力による液の還流)
- 気相流路 (浮力による蒸気の上昇流)

流路の圧力損失は、次のように算出します：流動様式は環状流と想定し、Lockhart-Martinelli 相関をベースとして圧力損失を算出します。

2.3. “流体節点 – 容器壁” 間の熱伝達

本例では、次のようなシンプルなモデリングを試みます：

- 容器内の作動流体は、“沸騰” ではなく、“蒸発” において気化するものとする⁴ (つまり、“沸騰による熱伝達” は考慮しない)。
- 容器全域に亘って飽和液の液膜が形成されているものとする。さらに各区分の液膜は、均一の厚みを持つものとし、“流体節点 – 壁” 間の伝熱は、この液膜を通過 (熱伝導) して行われるものと想定する。従って、熱伝達率は、この液膜厚さに基づいて算出する。

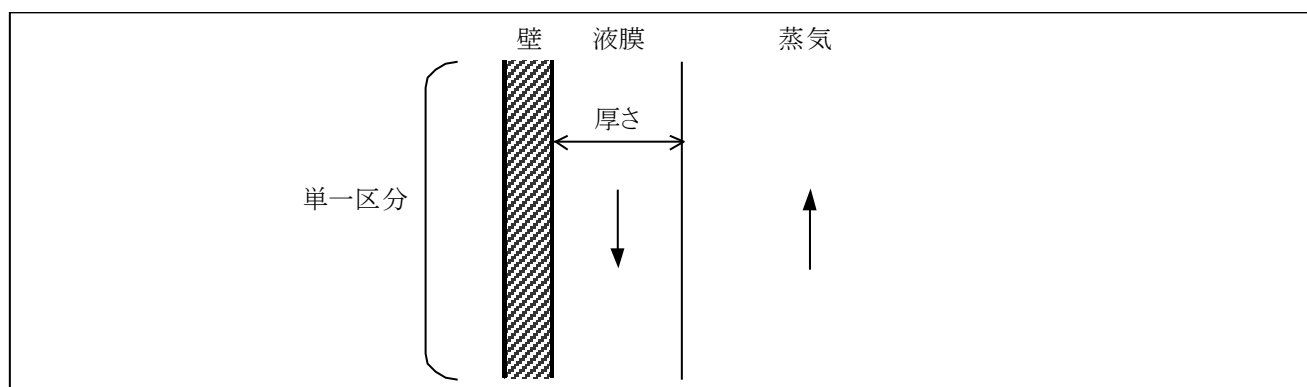


図 2.2 各区分の壁、液膜、及び、蒸気の模式図

² 構造物に関する熱節点です。エネルギーの蓄積、或いは、保存を模擬します。熱容量、及び、温度を格納します。

³ 有限の体積の流体を格納します。エネルギー・質量の経時的な蓄積・放出を模擬します。

⁴ FLUINT では、複数の沸騰、及び、凝縮熱伝達相関式を搭載しています (例: Chen 式, Rhosenow 式など)。従いまして、これらの活用を検討頂くことも可能です。また、ユーザーサブルーチンとして、熱伝達率算出式を設定することも可能です。

上記の想定を踏まえ、各区分における”流体節点 – 壁”間の熱伝達係数は、次のように算出します:

$$t_{liq} = \frac{(1.0 - \alpha) \times V}{A_{wall}}$$

$$h = \frac{\lambda_{liq}}{t_{liq}}$$

t_{liq} 液膜厚さ [m].
α ボイド率 [-].
V 流体節点の体積 [m ³].
A_{wall} “壁 – 液膜”間の伝熱面積 [m ²].
h 熱伝達係数 [W/(m ² -K)].

2.4. 周囲温度、及び、周囲への熱伝達

蒸発部では、”高温の環境”を想定し、周囲温度を 80 degC とします。凝縮部では、”低温の環境”を想定し、周囲温度を 20 degC とします。

また、”容器外表面 – 周囲環境”の熱伝達係数は、FLUINT 搭載の自然対流熱伝達相関式 (垂直円柱) を設定します。

3. 非定常計算

3.1. 初期条件

密閉容器、及び、作動流体の初期条件は、次のような値としました:

- 容器温度: 74 degC.
- 流体温度: 74 degC.
- ボイド率: 0.999 [-].
- 流体圧力: 3.74e4 [Pa] (上記の温度における飽和蒸気圧).

3.2. 計算結果

非定常計算を実施しました。容器温度の経時変化を図 3.1 に示します。100 秒後には、おおよそ、定常的な状態となっているのがわかります。図 3.2 では、環境から蒸発部への入熱量、及び、凝縮部から環境への抜熱量の経時変化を示しています。おおよそ 80 秒後には、両者はほぼ一致し、その値は約 16[W]となっています。この値より、ここでは、このサーモサイフォン試作モデルの熱抵抗を次のように算出します:

$$\text{熱抵抗} = \frac{\text{高温側の環境温度} - \text{低温側の環境温度}}{\text{移動熱量}} = \frac{80 - 20}{16} = 3.75[\text{deg C} / \text{W}]$$

図 3.4(の右側)は、ボイド率分布を示しています。容器内は、全域に亘って、気液二相の状態にあることがわかります。従って、温度、及び、圧力は、それぞれ、飽和温度、及び、飽和圧力を示していることとなります(図 3.3 の右側、及び、図 3.4 の左側)。

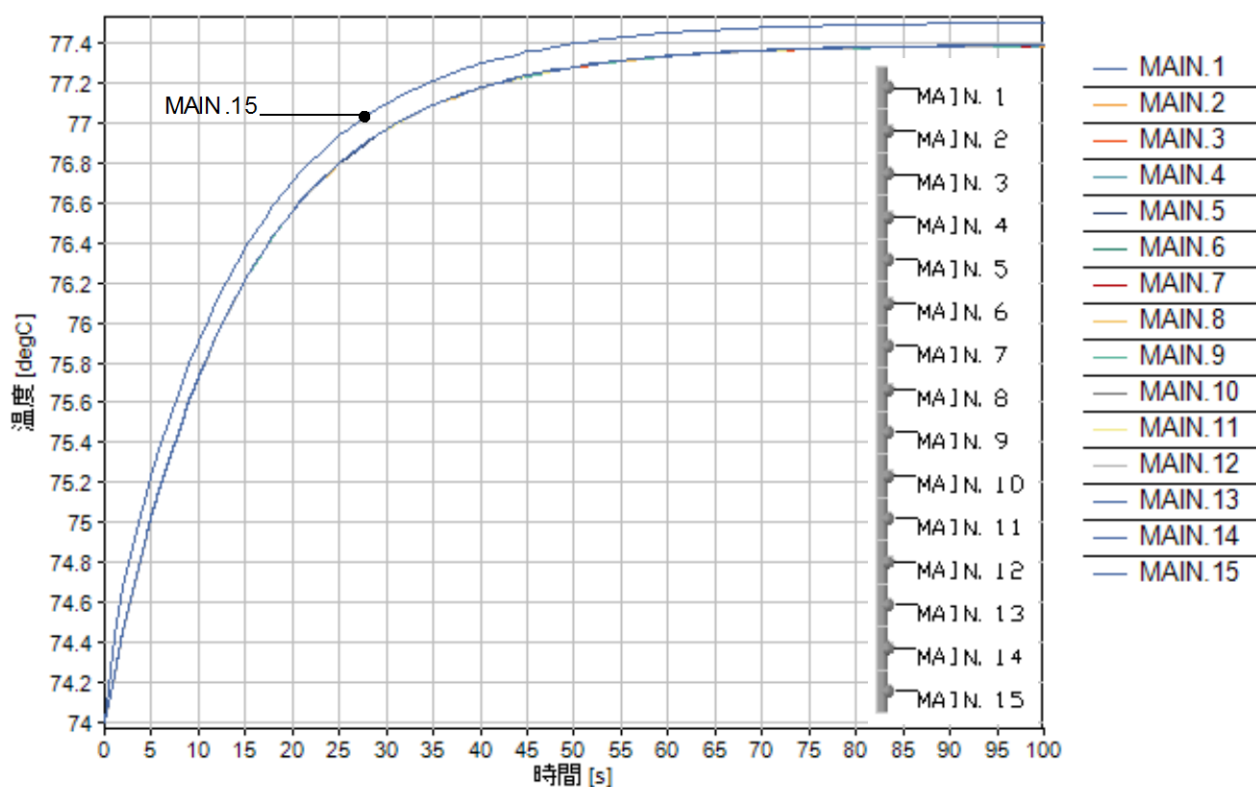


図 3.1 容器温度の経時変化

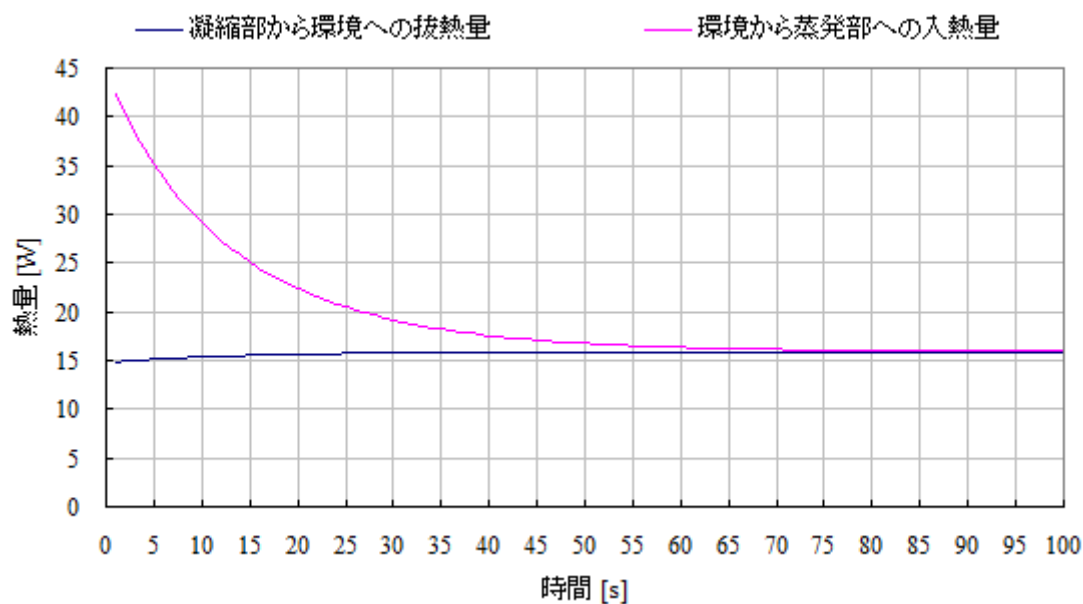


図 3.2 入熱量, 及び, 抜熱量の経時変化

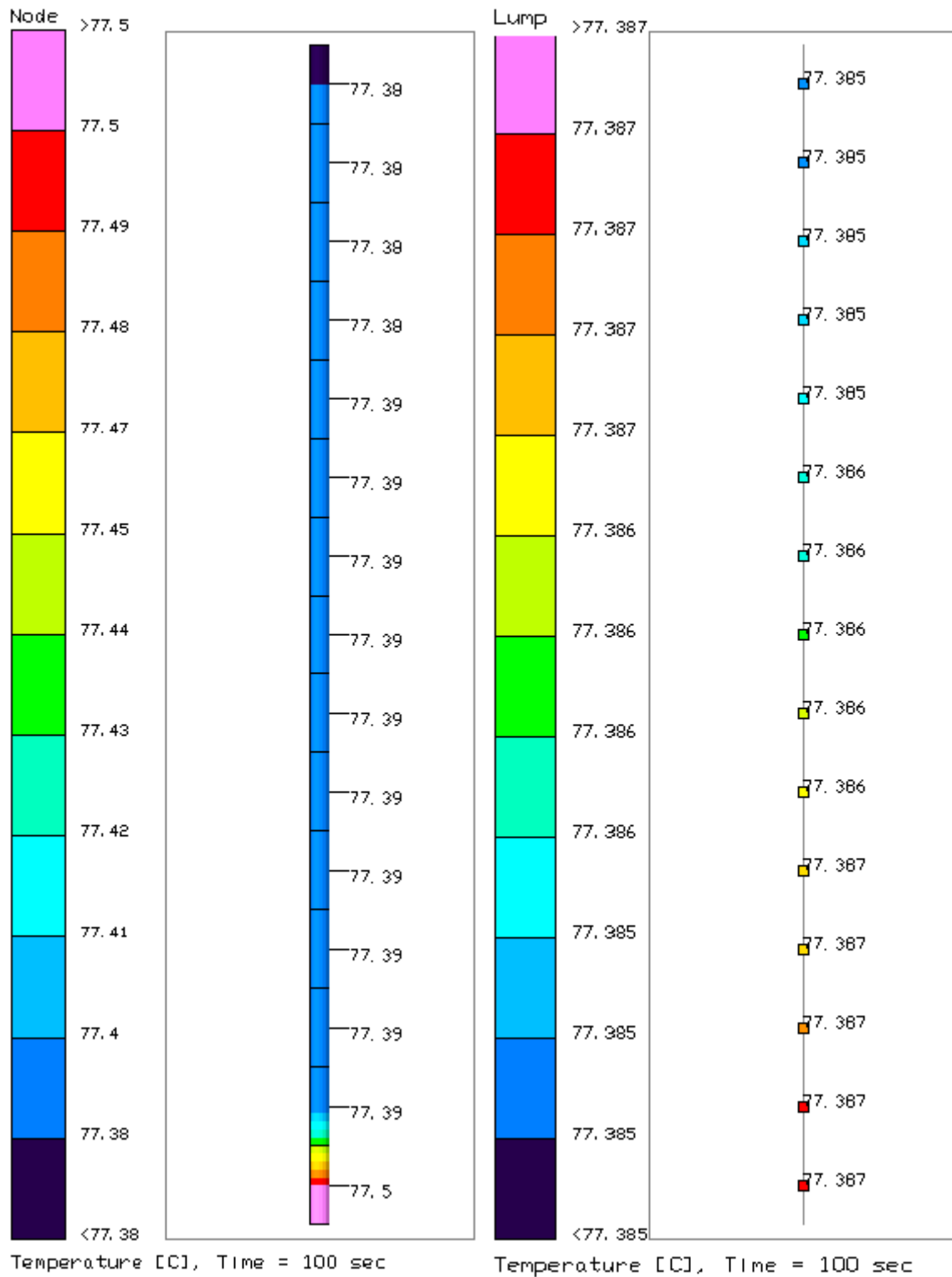


図 3.3 容器壁温度 (左), 及び, 流体温度 (右)

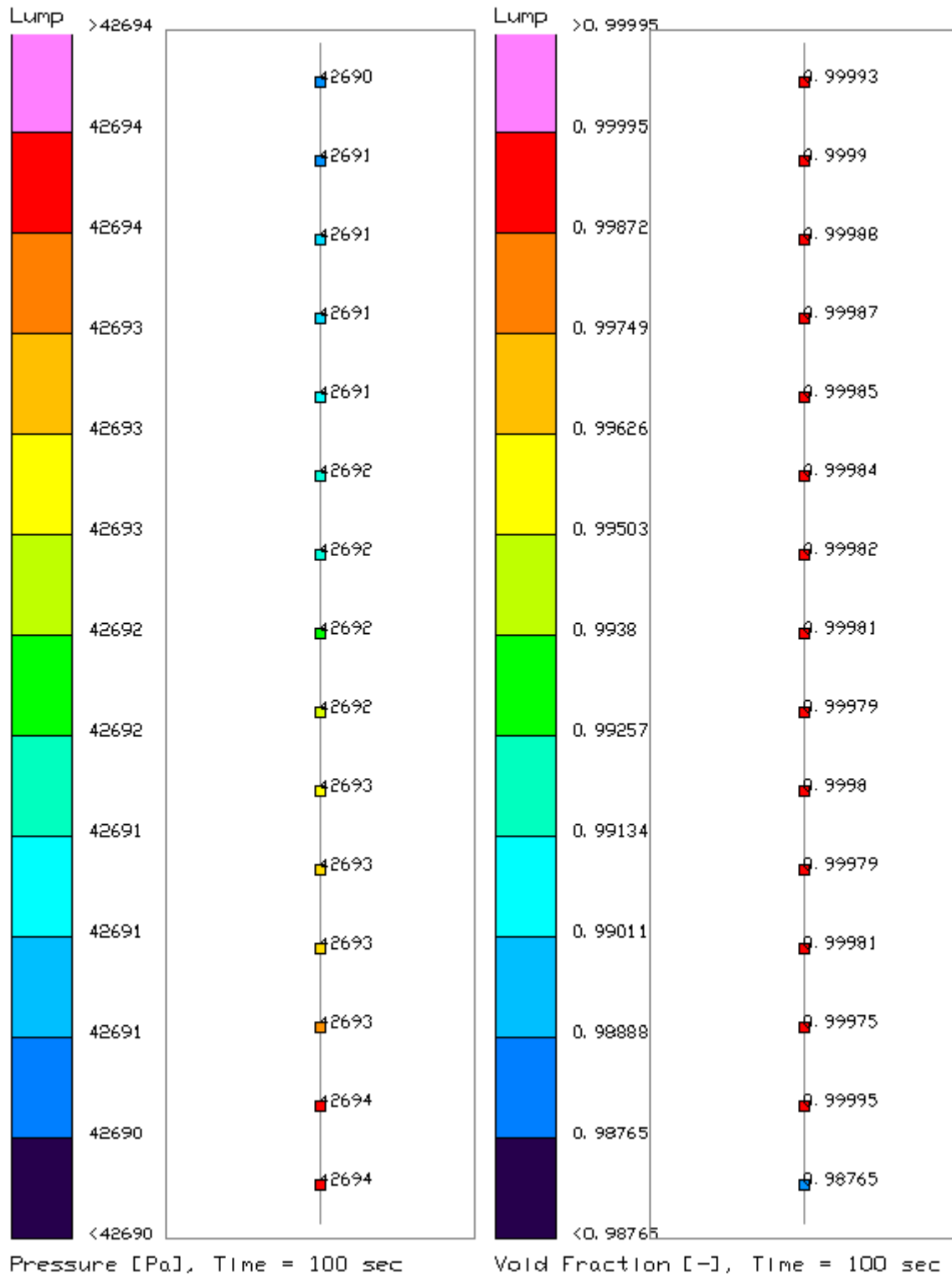


図 3.4 流体圧力 (左), 及び, ボイド率 (右)

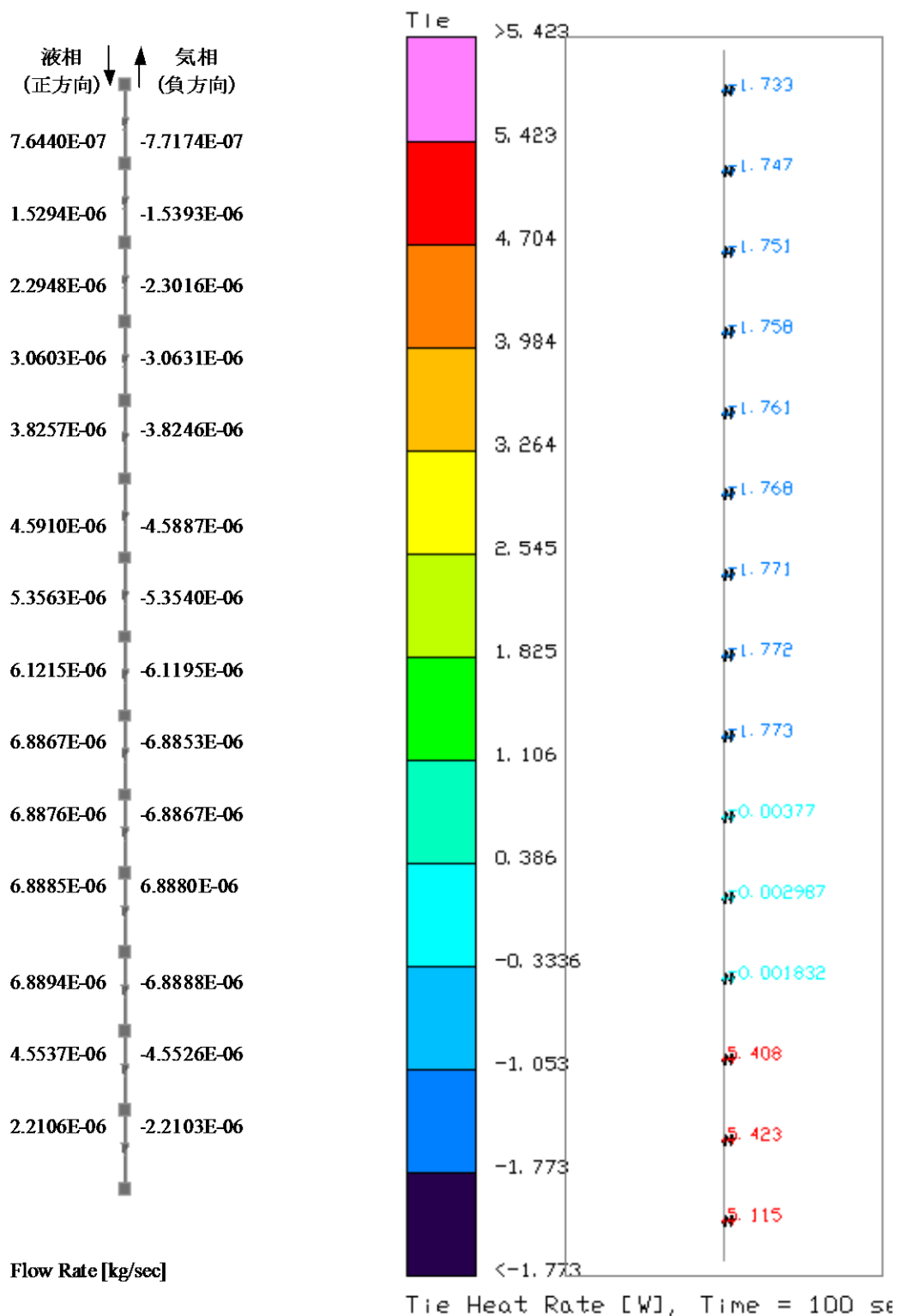


図 3.5 流量 (左), 及び, 熱伝達伝熱量 (右)

4. まとめ

本例では、密閉二相サーモサイフオンのシンプルな試作、及び、シミュレーション例を示しました。非定常計算を実施し、100 秒後には、おおよそ、定常状態に到達するのを確認しました。また、その定常状態における熱抵抗の算出、及び、状態量の可視化例を示しました。

ソフトウェアのユーザーにおきましては、この試作を出発点とし、次のような項目について、実環境への適用、及び、実機向けシミュレータ作成をご検討頂ければと思います。

- 各種の条件 (境界温度, 熱伝達係数の算出式など)
- 作動流体
- 容器の寸法

参考文献

- [1] C&R Technology, Plain Pipe Thermosiphon, (2014).
- [2] C&R Technology, SINDA/FLUINT V5.7 User's Manual, (2014).