

直管型蒸気発生器 3 次元熱流動解析コードTSG －水側解析モジュールのユーザーズマニュアル－

Straight Tube Steam Generator Three-dimensional Thermal-hydraulic Code TSG
- User's Manual of Water Side Simulation -

吉川 龍志 大島 宏之 田中 正暁 今井 康友

Ryuji YOSHIKAWA, Hiroyuki OHSHIMA, Masaaki TANAKA and Yasutomo IMAI

高速炉研究開発部門
次世代高速炉サイクル研究開発センター
高速炉計算工学技術開発部

Fast Reactor Computational Engineering Department
Advanced Fast Reactor Cycle System Research and Development Center
Sector of Fast Reactor Research and Development

March 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Data/Code

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

直管型蒸気発生器 3 次元熱流動解析コード TSG －水側解析モジュールのユーザーズマニュアル－

日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門
次世代高速炉サイクル研究開発センター 高速炉計算工学技術開発部
吉川 龍志、大島 宏之、田中 正暁、今井 康友*

(2014 年 12 月 25 日 受理)

高速増殖炉(FBR)直管型 2 重伝熱管蒸気発生器(SG)の熱流動を解析するための計算コードとして、TSG (Three-dimensional Thermal-hydraulics Analysis Code for Steam Generators) を開発した。

TSG コードは、直管型 SG ナトリウム側 3 次元解析と水側マルチチャンネル解析を連成した SG 熱流動解析システムである。ナトリウム側解析モジュールは汎用 CFD コード Fluent によるポーラスボディ解析モデルを採用した。水側の自作モジュールはドリフトフラックスモデルを採用して全チャンネルの二相流動を解析する。これらの二つの解析モジュールは伝熱管を介した熱交換を通信することでカップリングし、SG 全体の熱流動性能を評価する。

本報告書は、TSG の水側モジュールの使用説明書として、同モジュールで扱われる計算モデル、インプット、アウトプットについて取りまとめたものである。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

*(株) エヌデーター

**Straight Tube Steam Generator Three-dimensional Thermal-hydraulic Code TSG
- User's Manual of Water Side Simulation -**

Ryuji YOSHIKAWA, Hiroyuki OHSHIMA, Masaaki TANAKA and Yasutomo IMAI*

Fast Reactor Computational Engineering Department

Advanced Fast Reactor Cycle System Research and Development Center

Sector of Fast Reactor Research and Development

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 25, 2014)

TSG (Three-dimensional Thermal-hydraulics Analysis Code for Steam Generators) has been developed for analyses of thermal hydraulics in double wall straight tube steam generator (SG) of Fast Breeder Reactor (FBR).

TSG code is a thermal hydraulics simulation system for straight tube SG which couples the sodium side three dimensional simulation with water side multi-channel simulation. The three dimensional flow field in sodium side is simulated by FLUENT code with porous media model. The multi-channel two-phase flow is simulated by in-house code with drift-flux model. The sodium side simulation is coupled with water side simulation by the transmission of heat transfer rate through the heat transfer tube, and the thermal hydraulic characteristics of SG are evaluated.

This report presents a description of the computational models, input and output as the user's manual of TSG water side code.

Keywords: Steam Generator, Coupled Simulation, Multi-channel, Drift-flux

* NDD Corporation

目 次

| | |
|------------------------------|----|
| 1. はじめに ----- | 1 |
| 2. TSG の概要 ----- | 2 |
| 2.1 計算対象 ----- | 2 |
| 2.2 水側計算機能 ----- | 2 |
| 3. TSG 水側熱流動解析モデル ----- | 4 |
| 3.1 解析モデル ----- | 4 |
| 3.2 二相流動の基礎式 ----- | 4 |
| 3.3 離散化方法 ----- | 6 |
| 3.4 解法手順 ----- | 14 |
| 3.5 ボイド率の計算 ----- | 16 |
| 3.6 圧力損失の計算 ----- | 17 |
| 3.7 壁面熱伝達の計算 ----- | 17 |
| 3.8 伝熱管温度の計算 ----- | 18 |
| 3.9 物性関数 ----- | 20 |
| 3.9.1 水蒸気関数 ----- | 20 |
| 3.9.2 伝熱管材料 ----- | 21 |
| 3.10 相関式 ----- | 21 |
| 3.10.1 Fanning 摩擦係数相関式 ----- | 21 |
| 3.10.2 二相流摩擦損失増倍係数相関式 ----- | 22 |
| 3.10.3 ドリフト速度相関式 ----- | 27 |
| 3.10.4 热伝達相関式 ----- | 34 |
| 4. TSG 水側プログラムの構成 ----- | 38 |
| 5. TSG 水側モジュール入出力マニュアル ----- | 43 |
| 5.1 ファイル全体構成 ----- | 43 |
| 5.2 変数の共通ブロック説明 ----- | 44 |
| 5.3 入力ファイル ----- | 53 |
| 5.3.1 計算オプション ----- | 53 |
| 5.3.2 節点データ ----- | 55 |
| 5.3.3 初期条件としての熱流動データ ----- | 57 |
| 5.3.4 再スタート用の初期熱流動条件 ----- | 57 |
| 5.4 出力ファイル ----- | 57 |
| 5.4.1 時間割付けの熱流動データ ----- | 57 |
| 5.4.2 時間的変動の記録データ ----- | 59 |
| 5.4.3 再スタートための出力データ ----- | 59 |
| 6. TSG 水側モジュールの実行方法 ----- | 60 |

| | |
|------------------------------|----|
| 6.1 PC 機で実行方法 ----- | 60 |
| 6.2 PC クラスタで並列処理方法 ----- | 60 |
| 7. TSG 水側モジュールによる計算実行例 ----- | 62 |
| 7.1 解析条件 ----- | 62 |
| 7.2 1 本管解析 ----- | 63 |
| 7.3 2 本管流動安定性解析 ----- | 73 |
| 7.4 多チャンネル解析 ----- | 80 |
| 8. まとめ ----- | 82 |
| 参考文献 ----- | 83 |

Contents

| | | |
|----|------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Introduction ----- | 1 |
| 2. | Outline of TSG ----- | 2 |
| | 2.1 Object of Calculation ----- | 2 |
| | 2.2 Function of Water Side Calculation ----- | 2 |
| 3. | Simulation Models for Thermal Hydraulics of TSG Water Side ----- | 4 |
| | 3.1 Simulation Model ----- | 4 |
| | 3.2 Equations of Two-phase Flow ----- | 4 |
| | 3.3 The Difference Method ----- | 6 |
| | 3.4 Solution Procedure ----- | 14 |
| | 3.5 Calculation of Void ----- | 16 |
| | 3.6 Calculation of Pressure Loss ----- | 17 |
| | 3.7 Calculation of Heat Transfer Coefficient ----- | 17 |
| | 3.8 Temperature Calculation of Heat Transfer Tube ----- | 18 |
| | 3.9 Property Functions ----- | 20 |
| | 3.9.1 Property Functions of Water/Steam ----- | 20 |
| | 3.9.2 Material Property of Heat Transfer Tube ----- | 21 |
| | 3.10 Correlations ----- | 21 |
| | 3.10.1 Fanning Frictional Coefficient Correlations ----- | 21 |
| | 3.10.2 Two-phase Frictional Multiplier Correlations ----- | 22 |
| | 3.10.3 Drift Velocity Correlations ----- | 27 |
| | 3.10.4 Heat Transfer Coefficient Correlations ----- | 34 |
| 4. | Structure of TSG Water Side Program ----- | 38 |
| 5. | Input and Output Manual of TSG Water Side Code ----- | 43 |
| | 5.1 Structure of File ----- | 43 |
| | 5.2 Description of Variables in Common Blocks ----- | 44 |
| | 5.3 Input File ----- | 53 |
| | 5.3.1 Calculation Options ----- | 53 |
| | 5.3.2 Node Arrangement ----- | 55 |
| | 5.3.3 Data of Initial Conditions ----- | 57 |
| | 5.3.4 Data of Restart Conditions ----- | 57 |
| | 5.4 Output File ----- | 57 |
| | 5.4.1 Time Allocation Data of Thermal Hydraulics ----- | 57 |
| | 5.4.2 Data Recording with Temporal Variation ----- | 59 |
| | 5.4.3 Output Data for Restart ----- | 59 |
| 6. | Execution Method for TSG Water Side Code ----- | 60 |

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| 6.1 Execution Method on PC ----- | 60 |
| 6.2 Parallel Processing Method on PC Cluster ----- | 60 |
| 7. Simulation Examples by TSG Water Side Code ----- | 62 |
| 7.1 Simulation Conditions ----- | 62 |
| 7.2 Simulation of Flow in Single Channel ----- | 63 |
| 7.3 Simulation of Flow Instability in Two Tubes ----- | 73 |
| 7.4 Simulation of Flow in Multichannels ----- | 80 |
| 8. Concluding Remarks ----- | 82 |
| References ----- | 83 |

1. はじめに

高速増殖炉(FBR)実用化研究開発においては、ナトリウム–水反応を排除して蒸気発生器(SG)の信頼性を向上するため、蒸気発生器を直管型 2 重伝熱管方式とする検討が進められている。直管型 SG の成立性評価に向けた熱流動的な課題としては、SG の伝熱性能や構造健全性に影響を及ぼす因子である水側流動安定性評価とナトリウム側流動多次元性評価が重要な課題となる。水側流動安定性評価では、水側流動不安定性とナトリウム側温度分布不均一性の相互作用が安定限界を変化させることが予測され、信頼性の高い評価結果を得るにはナトリウム側と水側をカップリングした評価モデルが必要となる。また、ナトリウム側流動多次元性評価では、伝熱管・管板構造健全性の評価に向けて、ナトリウムの詳細な空間温度分布を把握する必要があるため、入口部における周方向流入の不均一性、伝熱管東部-SG 脊間ギャップの不均一性等の影響を考慮できる流動多次元性の評価モデルが必要となる。

以上のような熱流動的課題を一貫して評価するため、ナトリウム側 3 次元解析と水側マルチチャンネル解析を組み合わせた連成解析システム TSG (*Three-dimensional Thermal-hydraulics Analysis Code for Steam Generators*) を構築した。構築した SG 連成解析モデルでは、ナトリウム側多次元解析モジュールとして、汎用 CFD コード Fluent を採用した。数値解析アプローチとしては、計算コストの増大を避けるため、形状適合メッシュによる詳細解析モデルではなく、サブチャンネル型メッシュによるポーラスボディ解析モデルを採用した。SG 水側二相流動を対象としたマルチチャンネル解析モジュールはドリフトフラックスモデルを採用した。ナトリウム側多次元解析モジュールと水側マルチチャンネル解析モジュールの連成解析モデルとしては、伝熱管温度と伝熱管を介した熱交換量を定期的に通信する 2-way の連成解析モデルを採用した。

TSG の水側マルチチャンネル解析モジュールは伝熱管内二相流熱流動を解析するために、ドリフト速度相関式、二相流摩擦損失増倍係数相関式及び熱伝達相関式を組み込んだ。直管型蒸気発生器全チャンネル解析の機能を有し、高速化を目的として MPI による並列化実行もできる。

本報告書では、TSG で用いられている二相流熱流動解析モデルについて記述する。計算モジュールのインプットとアウトプットの詳細について記述する。また、多チャンネル計算の例を示す。

2. TSG の概要

TSG コードの計算対象及び水側の主要な計算機能について以下に示す。

2.1 計算対象

TSG コードの計算対象は直管型 2 重伝熱管 SG (図 2-1 に示す) である。ナトリウムは入口プレナムから流入し、管群に対する直交流から平行流に遷移し、バッフル板に整流されて、伝熱管を通じて熱交換をしながら出口から流出する。ナトリウム流れの特徴は単相乱流である。管群及びバッフル板の圧力損失、胴側バイパスフロー、伝熱管及び構造物との熱交換はナトリウム側の計算対象となる。

水は入口プレナムから各伝熱管に流入し、伝熱管の加熱により相変化を発生し、蒸気が出口プレナムから流出する。水/蒸気流の特徴はパラレルチャンネル二相流である。伝熱管内二相流のボイド率、圧力損失、伝熱管との熱交換は水側の計算対象となる。

2 重伝熱管はナトリウム側と水側の熱交換に対する重要なサブコンポーネントである。熱伝達の特徴は熱伝導と表面熱伝達率である。伝熱管温度は水側の計算対象になる。

TSG コードは SG ナトリウム側管群流れ、水側パラレルチャンネル二相流及び伝熱管伝熱過程を計算対象とした。

2.2 水側計算機能

(1) 過渡計算機能

TSG 水側の過渡計算機能とは、入口と出口プレナムの間に接続しているパラレルチャンネル内の二相流について、タイムステップを進めながら質量、運動量、エネルギー保存計算を実行し、二相流熱流動パラメータおよび伝熱管温度をユーザ指定するタイミングで出力する機能である。

また、定常状態を求める時には、あらかじめ十分長い時間の過渡計算を実行しその最終結果が定常状態に十分近づいていることを確認しておく必要がある。

(2) リスタート計算機能

TSG 水側から出力された計算結果（ある時刻における各伝熱管内の熱流動情報）を初期条件として、継続してシミュレーションを実施する機能である。リスタート計算では、入力ファイルではなく、リスタートファイルに含まれる熱流動データを読み込んで初期値として計算を開始する。この機能によって計算時間の短縮、計算ジョブの分割実行が可能となる。例えば、マルチチャンネルにおける不安定計算の場合、まず一つのチャンネルで初期データから定常状態を求め、その結果を全てのチャンネルの初期条件としてリスタート機能を利用して不安定計算を実施すれば、その所要時間は全てのチャンネルで初期データ

から不安定計算を実施することより短縮できる。

(3) 安定性

計算では半陰解法を用いている。収束基準としての CFL 条件を満たす時間刻みで安定な解析が可能となる。

(4) プログラミング言語

TSG 水側の全てのソースプログラムは、Fortran 言語によって記述されている。コンパイルにあたっては、Intel Visual Fortran 等の市販のコンパイラが利用可能である。

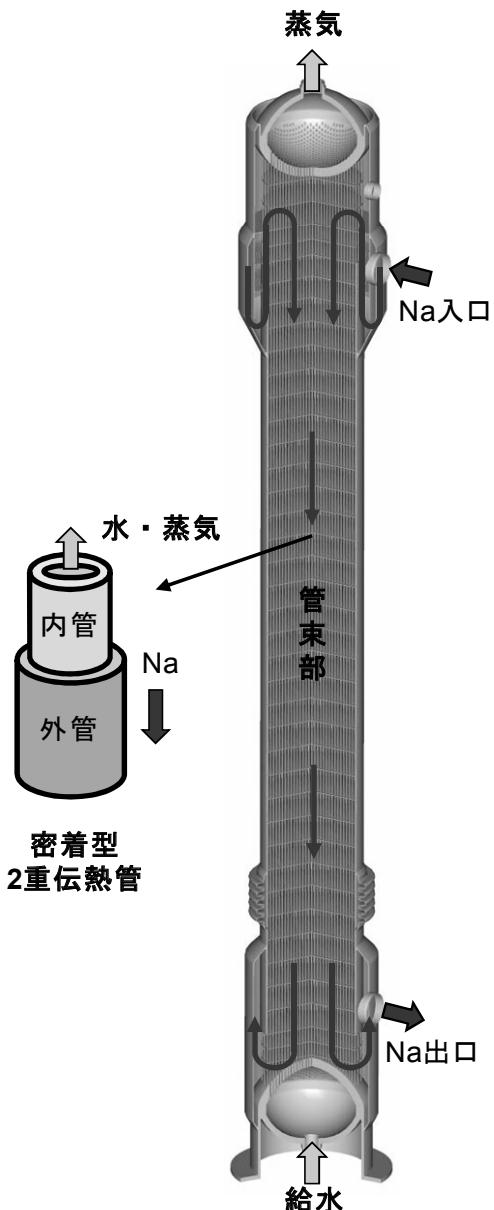


図 2-1 直管型 2 重伝熱管 SG

3. TSG 水側熱流動解析モデル

TSG 水側の計算対象は出入口プレナム、各伝熱管内二相流及び伝熱管温度である。以下に計算対象の基本解析モデルを示す。

3.1 解析モデル

水側多伝熱管熱流動解析モデルについては、図 3-1 に示すように、入口、出口プレナムの間で接続したパラレルチャンネルで構成される。境界条件は入口プレナムに流入する水の総流量 W 、温度 T_{in} 、出口プレナム圧力 p 及び壁面熱流束 q'' である。

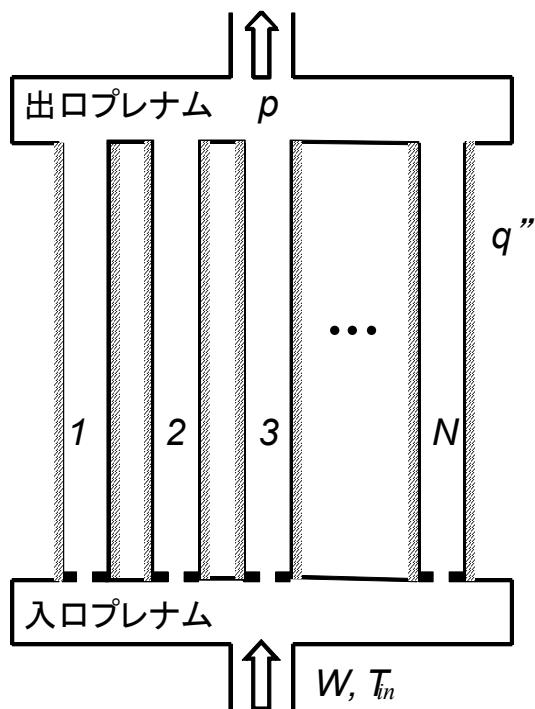


図 3-1 解析モデル

3.2 二相流動の基礎式

1 次元伝熱管内二相流動に対するドリフトフラックスモデルの基礎式¹⁻³⁾は以下の通りである。

- 混合物質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (A \rho V) = 0 \quad (3-1)$$

ここで

- A : 断面積 [m^2]
- t : 時間 [s]
- V : 速度 [m/s]、(次のページに記載)
- z : 空間座標 [m]
- ρ : 密度 [kg/m^3]、(次のページに記載)

である。

- 蒸気質量保存式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(A\alpha\rho_g V) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{A\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l V_r}{\rho} \right] = \Gamma \quad (3-2)$$

ここで

- α : 体積率
- Γ : 蒸気発生率 [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$]
- V_r : 気相、液相の相対速度 $V_g - V_l$ [m/s]

である。また、下付き文字は

- g : 気相
- l : 液相

である。

- 運動量保存式

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} [\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l V_r^2] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g + \frac{\tau}{\rho} = 0 \quad (3-3)$$

ここで

- p : 壓力 [N/m^2]
- g : 重力加速度 [m/s^2]
- τ : 壁面摩擦損失及び局部圧力損失 [Pa/m]

である。

- エネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(A\rho e V) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{A\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l V_r(e_g - e_l)}{\rho} \right] + \frac{p}{A} \frac{\partial}{\partial z}(AV) \\ + \frac{p}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{A\alpha(1-\alpha)V_r(\rho_l - \rho_g)}{\rho} \right] = q \end{aligned} \quad (3-4)$$

ここで

- e : 内部エネルギー [J/kg]
- q : 热発生率 [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]

である。

- その他の関係式

平均密度 :

$$\rho = \rho_l(1-\alpha) + \rho_g\alpha \quad (3-5)$$

平均速度 :

$$V = \frac{\alpha\rho_g V_g}{\rho} + \frac{(1-\alpha)\rho_l V_l}{\rho} \quad (3-6)$$

平均内部エネルギー :

$$e = \frac{\alpha\rho_g e_g}{\rho} + \frac{(1-\alpha)\rho_l e_l}{\rho} \quad (3-7)$$

図 3-1 に示す入口プレナムに対して、均質混合モデルを採用する。即ち、気相、液相熱平衡状態を仮定し、質量とエネルギー保存方程式により、圧力及び内部エネルギーを計算する。

- 入口プレナムの質量保存式

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{Vol} \sum_j W_j \quad (3-8)$$

ここで

Vol : 体積 [m^3]

W : 流量 [kg/s]

である。また、下付き文字は

j : チャンネル番号

である。

- 入口プレナムのエネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho e)}{dt} &= \frac{1}{Vol} \left[\sum_j W_j e_j + \sum_j \frac{A_j \alpha_j (1-\alpha_j) (\rho_l \rho_g)_j (e_g - e_l)_j (V_r)_j}{\rho_j} \right] \\ &+ \frac{1}{Vol} \left[p \sum_j A_j V_j + p \sum_j \frac{A_j \alpha_j (1-\alpha_j) (\rho_l - \rho_g)_j (V_r)_j}{\rho_j} \right] \end{aligned} \quad (3-9)$$

3.3 離散化方法

ドリフトフラックスモデルの基礎式に対して半陰解法²⁾を採用する。即ち、質量とエネルギー方程式の対流項、運動量方程式の圧力項を陰的に、他の項を陽的に取り扱う。空間差分は図 3-2 のスタガード格子(Staggered mesh)で行われる。基礎方程式を上記の方法によ

り差分化すると以下のようになる。(但し、これ以降の表記でベクトル量となる V について
は、便宜上、 $V_{i+\frac{1}{2}} \rightarrow V_{i+1}$ 、 $V_{i-\frac{1}{2}} \rightarrow V_i$ と示す。)

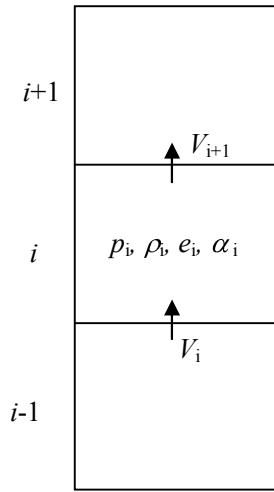


図 3-2 スタガード格子

- 混合物質量保存式

$$\frac{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n}{\Delta t} + \frac{(A\rho)_{i+\frac{1}{2}}^n V_{i+1}^{n+1} - (A\rho)_{i-\frac{1}{2}}^n V_i^{n+1}}{A_i \Delta z} = 0 \quad (3-10)$$

ここで上付き文字は

n : 時刻番号

である。また、下付き文字は

i : メッシュ番号

である。

- 蒸気質量保存式

$$\begin{aligned} & \frac{(\alpha\rho_g)_i^{n+1} - (\alpha\rho_g)_i^n}{\Delta t} + \frac{(A\alpha\rho_g)_{i+\frac{1}{2}}^n V_{i+1}^{n+1} - (A\alpha\rho_g)_{i-\frac{1}{2}}^n V_i^{n+1}}{A_i \Delta z} \\ & + \frac{1}{A_i \Delta z} \left\{ \left[\frac{A\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l}{\rho} \right]_{i+\frac{1}{2}}^n (V_r)_{i+1}^n - \left[\frac{A\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l}{\rho} \right]_{i-\frac{1}{2}}^n (V_r)_i^n \right\} = \Gamma_i \end{aligned} \quad (3-11)$$

- 運動量保存式

$$\begin{aligned} & \frac{V_i^{n+1} - V_i^n}{\Delta t} + V_i^n \frac{V_{i+\frac{1}{2}}^n - V_{i-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} + \frac{1}{\rho_{i-\frac{1}{2}}^n} \frac{p_i^{n+1} - p_{i-1}^{n+1}}{\Delta z} + g + \frac{\tau_i}{\rho_{i-\frac{1}{2}}^n} \\ & + \frac{1}{\rho_{i-\frac{1}{2}}^n \Delta z} \left\{ \left[\frac{\alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l}{\rho} \right]_i^n \left(V_r^2 \right)_{i+\frac{1}{2}}^n - \left[\frac{\alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l}{\rho} \right]_{i-1}^n \left(V_r^2 \right)_{i-\frac{1}{2}}^n \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3-12)$$

- エネルギー保存式

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho e)_i^{n+1} - (\rho e)_i^n}{\Delta t} + \frac{(A \rho e)_{i+\frac{1}{2}}^n V_{i+1}^{n+1} - (A \rho e)_{i-\frac{1}{2}}^n V_i^{n+1}}{A_i \Delta z} + \frac{p_i^{n+1}}{A_i \Delta z} \left(A_{i+\frac{1}{2}} V_{i+1}^{n+1} - A_{i-\frac{1}{2}} V_i^{n+1} \right) \\ & + \frac{1}{A_i \Delta z} \left\{ \left[\frac{A \alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l (e_g - e_l)}{\rho} \right]_{i+\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_{i+1}^n - \left[\frac{A \alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l (e_g - e_l)}{\rho} \right]_{i-\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_i^n \right\} \\ & + \frac{p_i^n}{A_i \Delta z} \left\{ \left[\frac{A \alpha (1-\alpha) (\rho_l - \rho_g)}{\rho} \right]_{i+\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_{i+1}^n - \left[\frac{A \alpha (1-\alpha) (\rho_l - \rho_g)}{\rho} \right]_{i-\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_i^n \right\} = q_i \end{aligned} \quad (3-13)$$

以上の差分式における対流項の物理量はドナーセル法により、

$$f_{i-\frac{1}{2}}^n = \begin{cases} f_{i-1}^n & (V_i^n > 0) \\ f_i^n & (V_i^n < 0) \end{cases} \quad (3-14)$$

と与えられる。

ここで

f : 任意変数

である。

また、運動量方程式の対流項もドナーセル法を用いて以下のように差分化される。

$$\frac{V_{i+\frac{1}{2}}^n - V_{i-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z_{i-\frac{1}{2}}} = \begin{cases} \frac{V_i^n - V_{i-1}^n}{\Delta z_{i-1}} & (V_i^n > 0) \\ \frac{V_{i+1}^n - V_i^n}{\Delta z_i} & (V_i^n < 0) \end{cases} \quad (3-15)$$

収束基準については、次の CFL 条件を満たす必要がある²⁾。

$$\frac{\Delta t}{\Delta z} V < 1 \quad (3-16)$$

また、入口プレナムの保存方程式の離散化式は以下の通りである。

- 入口プレナムの質量保存式

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\Delta t} = \frac{1}{Vol} \sum_j A_j \rho_j^n V_j^{n+1} \quad (3-17)$$

- 入口プレナムのエネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{(\rho e)^{n+1} - (\rho e)^n}{\Delta t} &= \frac{1}{Vol} \left[\sum_j A_j (\rho e)_j^n V_j^{n+1} + \sum_j \frac{A_j \alpha_j^n (1 - \alpha_j^n) (\rho_l \rho_g)_j^n (e_g - e_l)_j^n (V_r)_j^n}{\rho_j^n} \right] \\ &+ \frac{1}{Vol} \left[p_j^{n+1} \sum_j A_j V_j^{n+1} + p_j^n \sum_j \frac{A_j \alpha_j^n (1 - \alpha_j^n) (\rho_l - \rho_g)_j^n (V_r)_j^n}{\rho_j^n} \right] \end{aligned} \quad (3-18)$$

ボイド率 α , 壓力 p , 混合物平均速度 V 及び平均内部エネルギー e を独立変数として採用する。独立変数以外の未知変数を削除するために、物性関数及び関係式(3-5)-(3-7)に対して線形化手法を利用する。物性関数を線形化する際、気相を飽和状態と仮定する。線形化の参考基準点を波形符号“~”で表すと、以下のような線形化した形式が得られる。

平均密度の線形化した形式 :

$$\rho - \tilde{\rho} = (\tilde{\alpha} - \alpha) \tilde{\rho}_l + (1 - \tilde{\alpha}) (\rho_l - \tilde{\rho}_l) + (\alpha - \tilde{\alpha}) \tilde{\rho}_g + \tilde{\alpha} (\rho_g - \tilde{\rho}_g) \quad (3-19)$$

ここで

~ : 線形化の参考基準点

である。

平均内部エネルギーの線形化した形式 :

$$\begin{aligned} &[(\tilde{\alpha} - \alpha) \tilde{\rho}_l + (1 - \tilde{\alpha}) (\rho_l - \tilde{\rho}_l) + (\alpha - \tilde{\alpha}) \tilde{\rho}_g + \tilde{\alpha} (\rho_g - \tilde{\rho}_g)] \tilde{e} + \tilde{\rho} (e - \tilde{e}) \\ &= (\tilde{\alpha} - \alpha) \tilde{\rho}_l \tilde{e}_l + (1 - \tilde{\alpha}) (\rho_l - \tilde{\rho}_l) \tilde{e}_l + (1 - \tilde{\alpha}) \tilde{\rho}_l (e_l - \tilde{e}_l) \\ &+ (\alpha - \tilde{\alpha}) \tilde{\rho}_g \tilde{e}_g + \tilde{\alpha} (\rho_g - \tilde{\rho}_g) \tilde{e}_g + \tilde{\alpha} \tilde{\rho}_g (e_g - \tilde{e}_g) \end{aligned} \quad (3-20)$$

物性関数の線形化した形式 :

$$\rho_l - \tilde{\rho}_l = \frac{\partial \rho_l}{\partial p} (p - \tilde{p}) + \frac{\partial \rho_l}{\partial e_l} (e_l - \tilde{e}_l) \quad (3-21)$$

$$\rho_g - \tilde{\rho}_g = \frac{d \rho_g}{dp} (p - \tilde{p}) \quad (3-22)$$

$$e_g - \tilde{e}_g = \frac{d e_g}{dp} (p - \tilde{p}) \quad (3-23)$$

基礎方程式の差分式(3-10)-(3-18)における、上つき記号“ $n+1$ ”を付けた新時刻の独立変数以外の未知変数を、上記の線形化した形式を利用して削除する。また、逐次代入の近似解法を述べるために、波形符号“~”で表す変数に対して上つき記号“ k ”を付け、新時刻の独立変数に対して上つき記号“ $k+1$ ”を付ける。最終的に以下のような線形化したドリフトフラックスモデルの方程式が得られる。

線形化した混合物質量保存式：

$$\begin{aligned} & \rho_i^k + \left[(\rho_g)_i^k - (\rho_l)_i^k \right] (\alpha_i^{k+1} - \alpha_i^k) \\ & + \frac{(\alpha_i^{k+1} - \alpha_i^k) \cdot \text{tmp1} + (p_i^{k+1} - p_i^k) \cdot \text{tmp2} - (e_i^{k+1} - e_i^k) \rho_i^k}{e_i^k - (e_l)_i^k - (\rho_l)_i^k / \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial e_l} \right)_i^k} \\ & + \alpha_i^k \left(\frac{d \rho_g}{d p} \right)_i^k (p_i^{k+1} - p_i^k) - \rho_i^n + \frac{\Delta t}{A_i \Delta z} \left[(A \rho)_{i+\frac{1}{2}}^n V_{i+1}^{k+1} - (A \rho)_{i-\frac{1}{2}}^n V_i^{k+1} \right] = 0 \end{aligned} \quad (3-24)$$

$$\text{tmp1} = \left[(\rho_l)_i^k - (\rho_g)_i^k \right] e_i^k + (\rho_g)_i^k (e_g)_i^k - (\rho_l)_i^k (e_l)_i^k \quad (3-25)$$

$$\text{tmp2} = \alpha_i^k \left(\frac{d \rho_g}{d p} \right)_i^k \left[(e_g)_i^k - e_i^k \right] + \alpha_i^k (\rho_g)_i^k \left(\frac{d e_g}{d p} \right)_i^k - (1 - \alpha_i^k) (\rho_l)_i^k \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial p} / \frac{\partial \rho_l}{\partial e_l} \right)_i^k \quad (3-26)$$

ここで

tmp1 : テンポラル変数

tmp2 : テンポラル変数

である。また、上付き文字は

k ：逐次代入法の記号

である。

線形化した蒸気質量保存式：

$$\begin{aligned} & \alpha_i^k \left(\frac{d \rho_g}{d p} \right)_i^k (p_i^{k+1} - p_i^k) + \alpha_i^{k+1} (\rho_g)_i^k - \alpha_i^n (\rho_g)_i^n \\ & + \frac{\Delta t}{A_i \Delta z} \left[(A \alpha \rho_g)_{i+\frac{1}{2}}^n V_{i+1}^{k+1} - (A \alpha \rho_g)_{i-\frac{1}{2}}^n V_i^{k+1} \right] \\ & + \frac{\Delta t}{A_i \Delta z} \left\{ \left[\frac{A \alpha \rho_g (1 - \alpha) \rho_l}{\rho} \right]_{i+\frac{1}{2}}^n (V_r)_{i+1}^n - \left[\frac{A \alpha \rho_g (1 - \alpha) \rho_l}{\rho} \right]_{i-\frac{1}{2}}^n (V_r)_i^n \right\} \\ & = \Delta t \cdot \Gamma_i \end{aligned} \quad (3-27)$$

線形化した運動量保存式 :

$$\begin{aligned} & \frac{V_i^{k+1} - V_i^n}{\Delta t} + V_i^n \frac{V_{i+\frac{1}{2}}^n - V_{i-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} + \frac{1}{\rho_{i-\frac{1}{2}}^n} \frac{p_i^{k+1} - p_{i-1}^{k+1}}{\Delta z} + g + \frac{\tau_i}{\rho_{i-\frac{1}{2}}^n} \\ & + \frac{1}{\rho_{i-\frac{1}{2}}^n \Delta z} \left\{ \left[\frac{\alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l}{\rho} \right]_i^n \left(V_r^2 \right)_{i+\frac{1}{2}}^n - \left[\frac{\alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l}{\rho} \right]_{i-1}^n \left(V_r^2 \right)_{i-\frac{1}{2}}^n \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3-28)$$

線形化したエネルギー保存式 :

$$\begin{aligned} & \rho_i^k e_i^{k+1} + (\alpha_i^{k+1} - \alpha_i^k) \left[(\rho_g)_i^k - (\rho_l)_i^k \right] e_i^k + e_i^k \alpha_i^k \left(\frac{d \rho_g}{dp} \right)_i^k (p_i^{k+1} - p_i^k) \\ & + e_i^k \cdot \frac{(\alpha_i^{k+1} - \alpha_i^k) \cdot tmp1 + (p_i^{k+1} - p_i^k) \cdot tmp2 - (e_i^{k+1} - e_i^k) \rho_i^k}{e_i^k - (e_l)_i^k - (\rho_l)_i^k / \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial e_l} \right)_i^k} \\ & - (\rho e)_i^n + \frac{\Delta t}{A_i \Delta z} \left[(A \rho e)_{i+\frac{1}{2}}^n V_{i+1}^{k+1} - (A \rho e)_{i-\frac{1}{2}}^n V_i^{k+1} \right] \\ & + \frac{\Delta t}{A_i \Delta z} \left\{ \left[\frac{A \alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l (e_g - e_l)}{\rho} \right]_{i+\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_{i+1}^n \right. \\ & \left. - \left[\frac{A \alpha \rho_g (1-\alpha) \rho_l (e_g - e_l)}{\rho} \right]_{i-\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_i^n \right\} \\ & + \frac{\Delta t}{A_i \Delta z} \left\{ p_i^k \left(A_{i+\frac{1}{2}} V_{i+1}^{k+1} - A_{i-\frac{1}{2}} V_i^{k+1} \right) + p_i^{k+1} \left(A_{i+\frac{1}{2}} V_{i+1}^k - A_{i-\frac{1}{2}} V_i^k \right) \right. \\ & \left. - p_i^k \left(A_{i+\frac{1}{2}} V_{i+1}^k - A_{i-\frac{1}{2}} V_i^k \right) \right\} \\ & + \frac{p_i^n \Delta t}{A_i \Delta z} \left\{ \left[\frac{A \alpha (1-\alpha) (\rho_l - \rho_g)}{\rho} \right]_{i+\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_{i+1}^n - \left[\frac{A \alpha (1-\alpha) (\rho_l - \rho_g)}{\rho} \right]_{i-\frac{1}{2}}^n \left(V_r \right)_i^n \right\} \\ & = \Delta t \cdot q_i \end{aligned} \quad (3-29)$$

以上のように線形化した方程式を全体のメッシュセルに展開すると、独立変数 (α, p, V, e) の線形代数方程式が得られる。入口プレナムに対しても同様な線形化を行って、以下のような線形化した方程式が得られる。

線形化した入口プレナムの質量保存式：

$$\rho^k + [(\rho_g)^k - (\rho_l)^k] [\alpha^{k+1} - \alpha^k] + \left[(1 - \alpha^k) \left(\frac{d\rho_{ls}}{dp} \right)^k + \alpha^k \left(\frac{d\rho_{gs}}{dp} \right)^k \right] (p^{k+1} - p^k) \\ - \rho^n = \frac{\Delta t}{Vol} \sum_j A_j \rho_j^n V_j^k \quad (3-30)$$

ここで下付き文字は

s : 飽和

である。

線形化した入口プレナムのエネルギー保存式：

$$\rho^k e^k + \rho^k (e^{k+1} - e^k) + e^k \left\{ [\alpha^{k+1} - \alpha^k] [(\rho_g)^k - (\rho_l)^k] \right. \\ \left. + (1 - \alpha^k) \left(\frac{d\rho_{ls}}{dp} \right)^k (p^{k+1} - p^k) + \alpha^k \left(\frac{d\rho_{gs}}{dp} \right)^k (p^{k+1} - p^k) \right\} - \rho^n e^n \\ = \frac{\Delta t}{Vol} \left(\sum_j A_j \rho_j^n e_j^n V_j^k + p^k \sum_j A_j V_j^k \right) \quad (3-31) \\ + \frac{\Delta t}{Vol} \left\{ \sum_j \frac{A_j \alpha_j^n (1 - \alpha_j^n) (\rho_l \rho_g)_j^n (e_g - e_l)_j^n (V_r)_j^n}{\rho_j^n} \right. \\ \left. + p^n \sum_j \frac{A_j \alpha_j^n (1 - \alpha_j^n) (\rho_l - \rho_g)_j^n (V_r)_j^n}{\rho_j^n} \right\}$$

また、入口プレナムに対する気相、液相熱平衡状態の仮定により、線形化した形式(3-19)、(3-20)に飽和状態の物性関数を加えて、以下のように線形化した関係式が得られる。

$$(\alpha^{k+1} - \alpha^k) [(\rho_g e)^k - (\rho_l e)^k + (\rho_l e_l)^k - (\rho_g e_g)^k] \\ + (p^{k+1} - p^k) \left\{ (1 - \alpha^k) \left(\frac{d\rho_{ls}}{dp} \right)^k [e^k - (e_l)^k] + \alpha^k \left(\frac{d\rho_{gs}}{dp} \right)^k [e^k - (e_g)^k] \right. \\ \left. - (1 - \alpha^k) (\rho_l)^k \left(\frac{de_{ls}}{dp} \right)^k - \alpha^k (\rho_g)^k \left(\frac{de_{gs}}{dp} \right)^k \right\} + (e^{k+1} - e^k) \rho^k = 0 \quad (3-32)$$

基礎方程式の差分式を線形化する際に物性の偏微分係数を導入した。ここで、IAPWS97の水/蒸気関数⁴⁾を採用する。等圧膨張係数 β 、等温圧縮係数 κ 、定圧比熱 C_p は水/蒸気関数から求められる。熱力学により、物性の偏微分係数と β 、 κ 、 C_p の間には以下のような関係

式が成り立つ：

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial e}\right)_p = \frac{-\beta\rho}{C_p - \beta p / \rho} \quad (3-33)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_e = \frac{\rho C_p \kappa - T \beta^2}{C_p - \beta p / \rho} \quad (3-34)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial e}\right)_p = \frac{1}{C_p - \beta p / \rho} \quad (3-35)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_e = \frac{T\beta - p\kappa}{\rho C_p - \beta p} \quad (3-36)$$

ここで

C_p ：定圧比熱 [J/(kg·K)]

T ：温度 [K]

β ：等圧膨張係数 [1/K]

κ ：等温圧縮係数 [1/Pa]

である。

また、飽和線上の微分係数 $\frac{d\rho_{ls}}{dp}$, $\frac{d\rho_{gs}}{dp}$, $\frac{dT_s}{dp}$ も水/蒸気関数から求められる。そして内部エネルギー関係式 $de = C_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$ により、飽和線上の微分係数 $\frac{de_{ls}}{dp}$, $\frac{de_{gs}}{dp}$ に対する以下のような関係式が存在する：

$$\frac{de_{ls}}{dp} = C_v \frac{dT_s}{dp} - \frac{1}{\rho_{ls}^2} \left(T_s \frac{\beta}{\kappa} - p \right) \frac{d\rho_{ls}}{dp} \quad (3-37)$$

$$\frac{de_{gs}}{dp} = C_v \frac{dT_s}{dp} - \frac{1}{\rho_{gs}^2} \left(T_s \frac{\beta}{\kappa} - p \right) \frac{d\rho_{gs}}{dp} \quad (3-38)$$

ここで

C_v ：定容比熱 [J/(kg·K)]

v ：比体積 [m^3/kg]

である。

以上のように、物性及び物性導関数を直接的に水/蒸気関数から求める。

3.4 解法手順

ドリフトフラックスモデルの基楚方程式を差分化、線形化した後、 α 、 p 、 V 及び e の線形代数方程式が得られた。線形代数方程式の簡易形式は以下の通りである。

$$CD1_i^k \alpha_i^{k+1} + CD2_i^k p_i^{k+1} + CD3_i^k e_i^{k+1} + CD4_i^n V_{i+1}^{k+1} + CD5_i^n V_i^{k+1} = CD6_i^k + CD7_i^n \quad (3-39)$$

$$CA1_i^k \alpha_i^{k+1} + CA2_i^k p_i^{k+1} + CA3_i^k e_i^{k+1} + CA4_i^n V_{i+1}^{k+1} + CA5_i^n V_i^{k+1} = CA6_i^k \quad (3-40)$$

$$V_i^{k+1} = CV1_i^n (p_i^{k+1} - p_{i-1}^{k+1}) + CV2_i^n + CV3_i^k \quad (3-41)$$

$$CE1_i^k \alpha_i^{k+1} + CE2_i^k p_i^{k+1} + CE3_i^k e_i^{k+1} + CE4_i^n V_{i+1}^{k+1} + CE5_i^n V_i^{k+1} = CE6_i^k + CE7_i^n \quad (3-42)$$

ここで

CA^* : CA1~CA6 はテンポラル変数

CD^* : CD1~CD7 はテンポラル変数

CE^* : CE1~CE7 はテンポラル変数

CV^* : CV1~CV3 はテンポラル変数

である。

V を消去すると α , p 及び e の線形代数方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & CD1_i^k \alpha_i^{k+1} + (CD2_i^k - CD4_i^n \cdot CV1_{i+1}^n + CD5_i^n \cdot CV1_i^n) p_i^{k+1} + CD3_i^k e_i^{k+1} \\ & + CD4_i^n \cdot CV1_{i+1}^n p_{i+1}^{k+1} - CD5_i^n CV1_i^n p_{i-1}^{k+1} \\ & = -CD4_i^n (CV2_{i+1}^n + CV3_{i+1}^k) - CD5_i^n (CV2_i^n + CV3_i^k) + CD6_i^k + CD7_i^n \end{aligned} \quad (3-43)$$

$$\begin{aligned} & CA1_i^k \alpha_i^{k+1} + (CA2_i^k - CA4_i^k \cdot CV1_{i+1}^n + CA5_i^k \cdot CV1_i^n) p_i^{k+1} + CA3_i^k e_i^{k+1} \\ & + CA4_i^k \cdot CV1_{i+1}^n p_{i+1}^{k+1} - CA5_i^k CV1_i^n p_{i-1}^{k+1} \\ & = -CA4_i^n (CV2_{i+1}^n + CV3_{i+1}^k) - CA5_i^n (CV2_i^n + CV3_i^k) + CA6_i^k \end{aligned} \quad (3-44)$$

$$\begin{aligned} & CE1_i^k \alpha_i^{k+1} + (CE2_i^k - CE4_i^k \cdot CV1_{i+1}^n + CE5_i^k \cdot CV1_i^n) p_i^{k+1} + CE3_i^k e_i^{k+1} \\ & + CE4_i^k \cdot CV1_{i+1}^n p_{i+1}^{k+1} - CE5_i^k CV1_i^n p_{i-1}^{k+1} \\ & = -CE4_i^n (CV2_{i+1}^n + CV3_{i+1}^k) - CE5_i^n (CV2_i^n + CV3_i^k) + CE6_i^k + CE7_i^n \end{aligned} \quad (3-45)$$

この線形化した方程式を全体のメッシュセルに展開する。その結果得られた Jacobi 方程式を図 3-3 に示す。この行列は 3×3 の小行列からなるブロック三重対角行列である。 d は線形代数方程式の定数行列である。

$$\left[\begin{array}{ccc|cc} \times & \times & \times & 0 & \times \\ \times & \times & \times & 0 & \times \\ \times & \times & \times & 0 & \times \\ \hline 0 & \times & 0 & \times & \times \\ 0 & \times & 0 & \times & \times \\ 0 & \times & 0 & \times & \times \\ \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{ccc|cc} 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ \hline 0 & \times & 0 & \times & \times \\ 0 & \times & 0 & \times & \times \\ 0 & \times & 0 & \times & \times \\ \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{ccc|cc} 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ \hline 0 & \times & 0 & \times & \times \\ 0 & \times & 0 & \times & \times \\ 0 & \times & 0 & \times & \times \\ \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \alpha_1 \\ p_1 \\ e_1 \\ \hline \alpha_2 \\ p_2 \\ e_2 \\ \hline \alpha_3 \\ p_3 \\ e_3 \\ \vdots \end{array} \right] = d$$

図 3-3 Jacobi 方程式の構造^{1,3)}
(×は 0 でない成分を表す。変数の添え字はメッシュの番号を示す。)

図 3-3 の Jacobi 方程式において、非対角の行列の第 2 列のみが 0 でないことは、圧力のみが空間的に結合していることを表している。NBGS (Newton Block Gauss Seidel) 法と呼ばれる解法がある^{1,2)}。NBGS 法では、圧力のみの方程式にしないで Jacobi 方程式を Block Gauss Seidel 反復法により解く。

詳しい解析手法のステップを以下に示す。

- (1) 記号 k で表す変数の値を仮定する (例えば n 時刻の値を利用する)。
- (2) 線形代数方程式の行列を計算する。
- (3) 線形代数方程式を解く。記号 $k+1$ で表す α_i^{k+1} 、 p_i^{k+1} 及び e_i^{k+1} が得られる。
- (4) 式(3-41)により V_i^{k+1} を求める。そして他の全ての変数の値を計算する。
- (5) 新たに計算した値により記号 k で表す変数の値を更新する。
- (6) ステップ(2)に返る。 $k \rightarrow k+1$ の反復計算が収束したら、 $n+1$ 時刻の値が得られ、ステップ(7)に進む。
- (7) 次の時間ステップに進む。

入口プレナムにおいて、式(3-30)、(3-31)と(3-32)により α^{k+1} 、 p^{k+1} 及び e^{k+1} が得られる。そして他の全ての変数の値を求めることができる。

数値計算の全体的な流れを図 3-4 に示す。

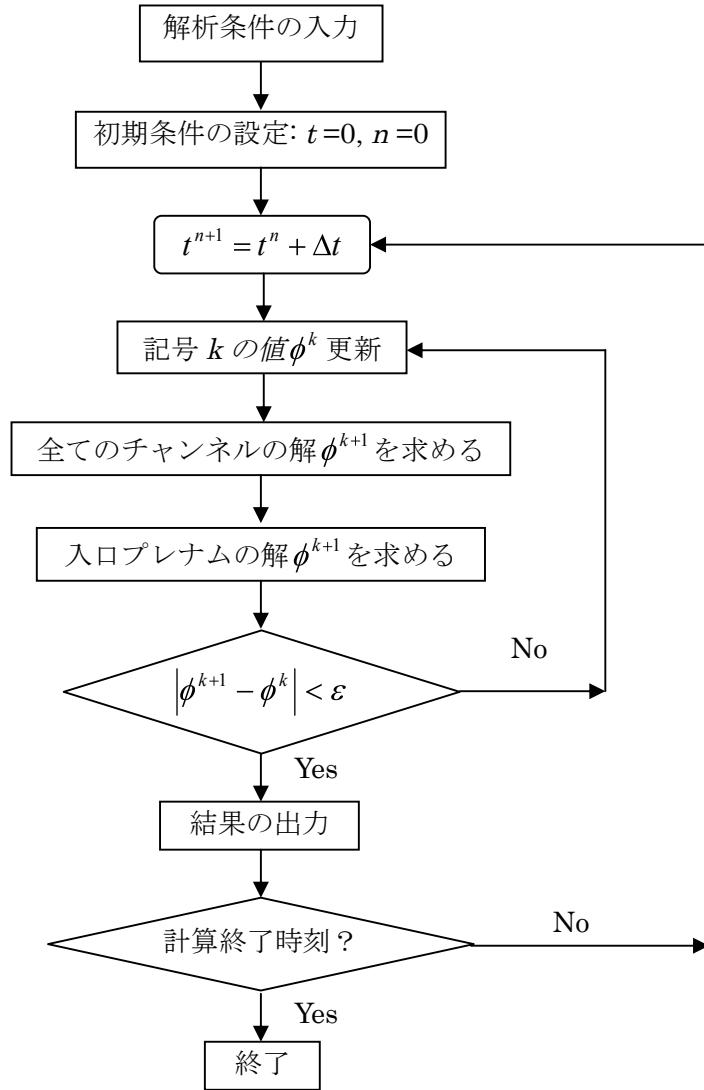


図 3-4 計算の全体的な流れ

3.5 ボイド率の計算

ドリフトフラックスモデルでは、ボイド率 α が全流体見掛け速度 j 、蒸気の見掛け速度 j_g 、分布定数 C_0 とドリフト速度 U_{gj} の関数である。沸騰により発生した蒸気量は j_g に含まれて、そして、二相の相対速度は U_{gj} に含まれている。

$$\alpha = \frac{j_g}{C_0 j + U_{gj}} \quad (3-46)$$

ここで

j : 体積流束 [m/s]

C_0 : 分布パラメータ

U_{gi} : ボイド率荷重平均ドリフト速度 [m/s]

である。

ドリフトフラックス相関式では、 C_0 と U_{gi} の計算式を提供する。そして、ドリフトフラックス相関式を利用して、ボイド率を式(3-46)により予測できる。

3.6 壓力損失の計算

二相流動摩擦圧力損失は管内総流量を液相単独の流れとみなす単相摩擦圧力損失及び二相流摩擦損失の増倍係数により表される。

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{TP} = \phi_{lo}^2 \frac{2}{D_e} f_l \frac{G^2}{\rho_l} \quad (3-47)$$

ここで

D_e : 水力直径 [m]

f : Fanning 摩擦係数

G : 質量流束 [kg/(m²s)]

ϕ_{lo}^2 : 二相流摩擦損失の増倍係数

である。

伝熱管入口、出口或はオリフィスの圧力損失は以下の式で表される。

$$\Delta p_k = C_k \frac{G^2}{2\rho} \quad (3-48)$$

ここで

C_k : 形状圧力損失係数

である。

3.7 壁面熱伝達の計算

熱伝達率の相関式は熱伝達モードにより使い分けている。ここで高クオリティー領域のバーンアウト現象を考えて、壁面熱伝達のモードを、(1) 液単相強制対流、(2) 核沸騰、(3) 膜沸騰、(4) 蒸気単相流に分けて取り扱う。そして、核沸騰から膜沸騰への遷移の判定構成式 (DNB クオリティー) が必要となる。

3.8 伝熱管温度の計算

伝熱管温度はメッシュ毎に伝熱管中心代表とする。軸方向の熱伝導を無視して、伝熱管温度と熱交換の関係式は以下のようになる。

$$\frac{d\langle T_w \rangle_i}{dt} = \frac{1}{\Delta z_i A_{wi} \rho_{wi} C p_{wi}} (\langle Q_{Na} \rangle_i - \langle Q_{H2O} \rangle_i) \quad (3-49)$$

ここで、

T_w : 伝熱管中心温度 [K]

t : 時間 [s]

Δz : 軸方向メッシュ長さ [m]

A_w : 伝熱管断面積 [m^2]

ρ_w : 伝熱管密度 [kg/m^3]

$C p_w$: 伝熱管比熱 [J/(kg·K)]

$\langle Q_{Na} \rangle$: 管外（ナトリウム側）熱交換量 [W]

$\langle Q_{H2O} \rangle$: 管内（水側）熱交換量 [W]

である。

反復計算中に $\langle Q_{H2O} \rangle^k$ を求めれば水側は陰解法になる。

図 3-5 に示すように、伝熱管肉厚中心基準でナトリウム側熱通過率 (h_{Na}) と水蒸気側熱通過率 (h_{H2O}) を計算する。

$$\frac{1}{h_{Na}} = \frac{D_c}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_o}{D_c} \right) + \frac{D_c}{D_o \alpha_{Na}} + R_{Na} \quad (3-50)$$

$$\frac{1}{h_{H2O}} = \frac{D_c}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_c}{D_i} \right) + \frac{D_c}{D_i \alpha_{H2O}} + R_{H2O} \quad (3-51)$$

$D_{io} \leq D_c$ のとき、

$$R_{H2O} = \frac{D_c}{D_i} H_{foul,H2O} + \frac{D_c}{D_{io}} H_{gap} \quad (3-52)$$

$$R_{Na} = \frac{D_c}{D_o} H_{foul,Na} \quad (3-53)$$

$D_{io} > D_c$ のとき、

$$R_{H2O} = \frac{D_c}{D_i} H_{foul,H2O} \quad (3-54)$$

$$R_{Na} = \frac{D_c}{D_o} H_{foul,Na} + \frac{D_c}{D_{io}} H_{gap} \quad (3-55)$$

ここで、

| | |
|------------------|-----------------------------------------|
| h_{Na} : | ナトリウム側熱通過率 [w/(m ² ·K)] |
| h_{H2O} : | 水蒸気側熱通過率 [w/(m ² ·K)] |
| α_{Na} : | ナトリウム側熱伝達率 [w/(m ² ·K)] |
| α_{H2O} : | 水側熱伝達率 [w/(m ² ·K)] |
| D_i : | 伝熱管内径 [m] |
| D_o : | 伝熱管外径 [m] |
| D_c : | 伝熱管肉厚中心位置の直径 [m]、 $D_c = (D_i + D_o)/2$ |
| D_{io} : | 2重管内管外径 [m] |
| $H_{foul,Na}$: | ナトリウム側汚れ係数 [m ² K/w] |
| $H_{foul,H2O}$: | 水側汚れ係数 [m ² K/w] |
| H_{gap} : | 2重管界面の接触熱抵抗 [m ² K/w] |
| λ : | 伝熱管熱伝導率 [w/(m·K)] |

である。

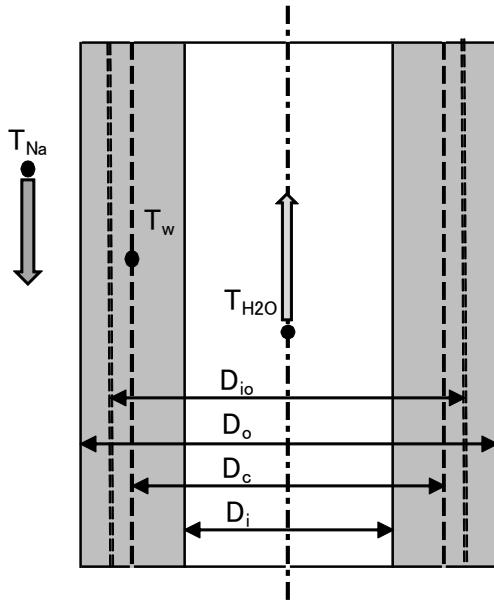


図 3-5 伝熱管温度計算モデル

伝熱管肉厚中心基準で熱通過率を計算するため、伝熱面積を伝熱管肉厚中心で補正して熱交換量を計算する。

$$Q_{Na} = h_{Na} (T_{Na} - T_w) \cdot \pi D_c \Delta z \cdot \eta_s \quad (3-56)$$

$$Q_{H2O} = h_{H2O} (T_w - T_{H2O}) \cdot \pi D_c \Delta z \cdot \eta_s \quad (3-57)$$

ここで、

- T_{Na} : ナトリウム温度 [K]
- T_{H2O} : 水/蒸気温度 [K]
- Q_{Na} : ナトリウム側から伝熱管への熱交換量 [w]
- Q_{H2O} : 伝熱管から水側への熱交換量 [w]
- η_s : 伝熱面積補正係数

である。

連成解析の時、ナトリウム側から水側へ通信データは Q_{Na} とする。

3.9 物性関数

3.9.1 水蒸気関数

蒸気表 IAPWS-IF97⁴⁾を使用する。蒸気表 IAPWS-IF97 には、圧力 16.5292MPa 以上の区域が Region 1, Region 2 及び Region 3 という三つの領域に分けられている（図 3-6）。それぞれの領域に水/蒸気関数が適用されているが、これらの関数はそれぞれの境界領域において不連続となる。この対応方法として、以下のやり方を採用した。

- ①圧力により Region 1 と Region 3、Region 3 と Region 2 の境界温度を求める。
- ②圧力と温度(P, T)により所属する領域を判断する。領域内であればその領域の関数を用いて水/蒸気物性値を求める。
- ③境界付近(境界温度±0.1K 以内)の場合は両領域の物性値を線形内挿することにより、水/蒸気物性値を平滑化する。

そして広い圧力範囲で水/蒸気物性値を連続的計算できる。

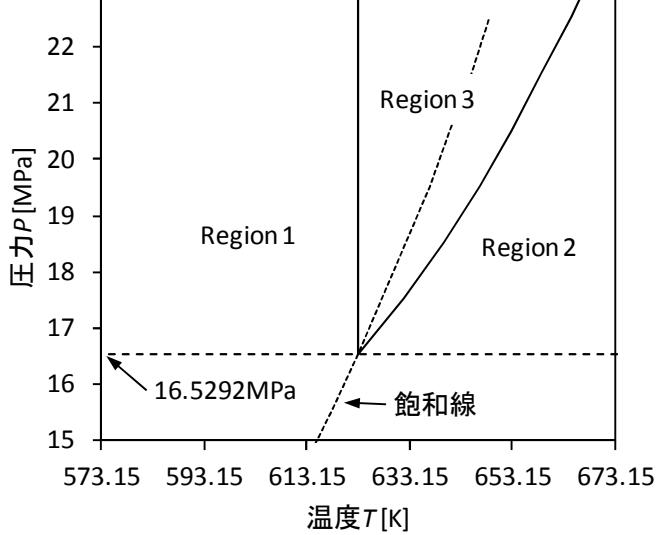


図 3-6 蒸気表 IAPWS-IF97 の領域分割⁴⁾

3.9.2 伝熱管材料

本コードに組込まれている管材質を表 3-1 に示す⁵⁾。

表 3-1 管材質

| Option | 管材質 |
|--------|-------------|
| 1 | SUS316 |
| 2 | SUS304 |
| 3 | 2·1/4Cr-1Mo |
| 4 | Mod9Cr-1Mo |

3.10 相関式

3.10.1 Fanning 摩擦係数相関式

(1) Churchill 相関式⁶⁾ :

Churchill モデルは Moody 図に対応する相関式であり、管内層流、遷移流、乱流の全範囲流動状態に広がる。

$$f = 2 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(a+b)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (3-58)$$

$$a = \left[2.457 \ln \frac{1}{(7/\text{Re})^{0.9} + (0.27 \varepsilon/D_e)} \right]^{1/16} \quad (3-59)$$

$$b = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{1/16} \quad (3-60)$$

$$\text{Re} = \frac{GD_e}{\mu} \quad (3-61)$$

ここで

Re : Reynolds 数

μ : 粘性 [kg/(m·s)]

ε : 管内壁粗さ [m]

である。

(2) Pfann 相関式⁷⁾ :

$\text{Re} \leq 2300$ のとき、

$$f = \frac{16}{\text{Re}} \quad (3-62)$$

$2300 < \text{Re} \leq \frac{60}{\xi^{1.111}}$ のとき、

$$f = \left(\frac{0.28}{\log \text{Re} - 0.82} \right)^2 \quad (3-63)$$

$\frac{60}{\xi^{1.111}} < \text{Re} < 424 \frac{0.87 - \log \xi}{\xi}$ のとき、

$$f = \left[\frac{0.25}{(3.393 - 0.8065g_1)g_1 - 2.477 - \log \xi} \right]^2 \quad (3-64)$$

$\text{Re} \geq 424 \frac{0.87 - \log \xi}{\xi}$ のとき、

$$f = \left(\frac{0.25}{0.87 - \log \xi} \right)^2 \quad (3-65)$$

ここで $\xi = \frac{2\varepsilon}{D_e}$ は管路内壁面の相対粗度、 $g_1 = \log(\text{Re} \frac{\xi}{0.87 - \log \xi})$ 、 $\text{Re} = \frac{\rho V D_e}{\mu} = \frac{G D_e}{\mu}$

である。

(3) ムーディ線図近似式⁸⁾

管摩擦損失係数 f は、以下のムーディ線図近似式により求められる。

$$f = 0.0055 \left[1 + \left(2 \times 10^4 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{1/3} \right] / 4 \quad (3-66)$$

Re 数が 2300 以下のは、

$$f = \frac{16}{\text{Re}} \quad (3-67)$$

とし、数値計算上の上限値として $f_{\max} = 0.1$ を与えている。

3.10.2 二相流摩擦損失増倍係数相関式

(1) Awad-Muzychka 相関式⁹⁾ :

$$f_m = 2 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}_m} \right)^{12} + \frac{1}{(a_m + b_m)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (3-68)$$

$$a_m = \left[2.457 \ln \frac{1}{(7/\text{Re}_m)^{0.9} + (0.27 \varepsilon/D_e)} \right]^{16} \quad (3-69)$$

$$b_m = \left(\frac{37530}{\text{Re}_m} \right)^{16} \quad (3-70)$$

$$\text{Re}_m = \frac{GD_e}{\mu_m} \quad (3-71)$$

$$f_{lo} = 2 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}_{lo}} \right)^{12} + \frac{1}{(a_{lo} + b_{lo})^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (3-72)$$

$$a_{lo} = \left[2.457 \ln \frac{1}{(7/\text{Re}_{lo})^{0.9} + (0.27 \varepsilon/D_e)} \right]^{16} \quad (3-73)$$

$$b_{lo} = \left(\frac{37530}{\text{Re}_{lo}} \right)^{16} \quad (3-74)$$

$$\text{Re}_{lo} = \frac{GD_e}{\mu_{lo}} \quad (3-75)$$

そして、二相流摩擦損失の増倍係数は以下の式になる。

$$\phi_{lo}^2 = \left(\frac{f_m}{f_{lo}} \right) \left(1 + x \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \quad (3-76)$$

ここで下付き文字は

lo : 液相のみ(総流量を液相単独の流れとみなす)

m : 二相流均一混合物

x : クオリティー

である。

(2) Modified Martinelli-Nelson 相関式¹⁾ :

$$\phi_{lo}^2 = \Omega(p, G) \left[1.2 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) x^{0.824} \right] + 1.0 \quad (3-77)$$

$$\Omega(p, G) = \begin{cases} 1.36 + 0.0005p + 0.1 \frac{G}{10^6} - 0.000714p \frac{G}{10^6} & \text{for } G < 7 \times 10^5 \\ 1.26 - 0.0004p + 0.119 \frac{10^6}{G} + 0.00028p \frac{10^6}{G} & \text{for } G \geq 7 \times 10^5 \end{cases} \quad (3-78)$$

ここで

p : 圧力 [psia], $1\text{Pa}=1.4504\times10^{-4}\text{psia}$

G : 質量流束 [$\text{lbm}/(\text{hr}\cdot\text{ft}^2)$], $1\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})=737.3244 \text{ lbm}/(\text{hr}\cdot\text{ft}^2)$

である。

(3) Martinelli-Nelson 線図¹⁰⁾ :

参考文献¹⁰⁾において、Martinelli-Nelson 相関式は経験的に、線図と表の方法で提出された。二相流摩擦損失増倍係数の計算方法は表の値から内挿により求めることである。

(4) Chisholm 相関式^{2,9,11)} :

Chisholm 二相流摩擦損失増倍係数相関式は以下の通りである。

$$\phi_{lo}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) \left[Bx^{(2-n)/2} (1-x)^{(2-n)/2} + x^{2-n} \right] \quad (3-79)$$

$$\Gamma = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{n/2} \quad (3-80)$$

$$n = 0.25 \quad (\text{by Blasius Equation}) \quad (3-81)$$

B 値を表 3-2 に記載する。

表 3-2 Chisholm 相関式に B の値

| Γ | $G [\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}]$ | B |
|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| $0 < \Gamma < 9.5$ | $G < 500$ | 4.8 |
| | $500 < G < 1900$ | $2400/G$ |
| | $G > 1900$ | $55/G^{0.5}$ |
| $9.5 < \Gamma < 28$ | $G < 600$ | $520/(\Gamma G^{0.5})$ |
| | $G > 600$ | $21/\Gamma$ |
| $\Gamma > 28$ | | $15000/(\Gamma^2 G^{0.5})$ |

ここで

B : Chisholm パラメータ

n : Blasius 因子

Γ : Chisholm 物性係数

である。

(5) Homogeneous (均質流)式¹⁾ :

$$\phi_{lo}^2 = \frac{f_m}{f_{lo}} \left[1 + x \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \right] \quad (3-82)$$

$$f_m = f(\text{Re}_m) \quad (3-83)$$

$$f_{lo} = f(\text{Re}_{lo}) \quad (3-84)$$

$$\text{Re}_m = \frac{GD_e}{\mu_m} \quad (3-85)$$

$$\text{Re}_{lo} = \frac{GD_e}{\mu_l} \quad (3-86)$$

$$\mu_m = \frac{1}{x/\mu_g + (1-x)/\mu_l} \quad (3-87)$$

ここで f は Fanning 摩擦係数である。

(6) Chisholm 相関式 1¹²⁾ :

$$\text{Re}_{tl} = \frac{60}{\xi^{1.111}} \quad (3-88)$$

$$S = \frac{V_g}{V_l} \quad (3-89)$$

$$C = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} + S \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (3-90)$$

$$\Gamma = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.5} \times \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{n/2} \quad (3-91)$$

$$B = \frac{C\Gamma - 2^{(2-n)} + 2}{\Gamma^2 - 1} \quad (3-92)$$

$$n = \begin{cases} 0.25, & \text{if } \text{Re} \leq \text{Re}_{tl} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3-93)$$

$$\phi_{lo}^2 = 1 + \left(\Gamma^2 - 1 \right) \left\{ B \cdot x^{(2-n)/2} (1-x)^{(2-n)/2} + x^{2-n} \right\} \quad (3-94)$$

ここで

C : Chisholm 定数

S : スリップ比

である。

(7) Friedel 相関式⁹⁾ :

$$\phi_{lo}^2 = E + \frac{3.24FH}{Fr^{0.045}We^{0.035}} \quad (3-95)$$

$$E = (1-x)^2 + x^2 \left(\frac{\rho_l f_{go}}{\rho_g f_{lo}} \right) \quad (3-96)$$

$$F = x^{0.78} (1-x)^{0.224} \quad (3-97)$$

$$H = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.7} \quad (3-98)$$

$$Fr = \frac{G^2}{gD_e \rho_m^2} \quad (3-99)$$

$$We = \frac{G^2 D_e}{\rho_m \sigma} \quad (3-100)$$

$$\rho_m = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1} \quad (3-101)$$

ここで

Fr : Froude 数

We : Weber 数

 σ : 表面張力 [N/m]

go : 気相のみ(総流量を気相単独の流れとみなす)

である。

(8) Reddy 相関式¹³⁾ :

$$\phi_{lo}^2 = 1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \cdot C \quad (3-102)$$

 $p < 4.14$ [MPa] のとき、

$$C = 0.357 [1 + 10 p / p_{crit}] x^{-0.175} G^{-0.45} \quad (3-103)$$

 $p \geq 4.14$ [MPa] のとき、

$$C = 1.02 x^{-0.175} G^{-0.45} \quad (3-104)$$

(9) Martinelli-Nelson 相関式⁸⁾

二相域では、 f, Re, ρ を飽和水として定義し、二相増倍係数 ϕ_{lo}^2 を乗じる。

$$\phi_{lo}^2 = \phi_0^2 (1-x)^{1.75} \quad (3-105)$$

$$\phi_0^2 = (1 + X_{tt}^{-0.636})^{2.75} \quad (3-106)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{\mu_{ls}}{\mu_{gs}} \right)^{0.143} \left(\frac{\rho_{gs}}{\rho_{ls}} \right)^{0.571} \frac{1-x}{x} \quad (3-107)$$

ここで、

x : クオリティー

μ : 粘性係数

ρ : 密度

である。また、下付き文字は

ls : 飽和水

gs : 飽和蒸気

である。

3.10.3 ドリフト速度相関式

(1) Chexal-Lellouche 相関式(上昇流)^{1,14)}

$$C_0 = \frac{L(\alpha)}{K_0 + (1 - K_0)\alpha'} \quad (3-108)$$

$$U_{gj} = 1.41 \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4} C_2 C_3 C_4 C_9 \quad (3-109)$$

$$L = \frac{1 - \exp(-C_1 \alpha)}{1 - \exp(-C_1)} \quad (3-110)$$

$$C_1 = \frac{4 p_{crt}^2}{p(p_{crt} - p)} \quad (3-111)$$

$$K_0 = B_1 + (1 - B_1) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/4} \quad (3-112)$$

$$r = \frac{1.0 + 1.57 \rho_g / \rho_l}{1 - B_1} \quad (3-113)$$

$$B_1 = \min\left(0.8, \frac{1}{1 + \exp(-\text{Re}/60000)}\right) \quad (3-114)$$

$$\text{Re} = \max(\text{Re}_l, \text{Re}_g) \quad (3-115)$$

$$\text{Re}_l = \frac{\rho_l (1 - \alpha) V_l D_e}{\mu_l} \quad (3-116)$$

$$\text{Re}_g = \frac{\rho_g \alpha V_g D_e}{\mu_g} \quad (3-117)$$

$$C_2 = \begin{cases} 0.4757 [\ln(\rho_l / \rho_g)]^{0.7} & \text{if } \rho_l / \rho_g \leq 18 \\ \begin{cases} 1 & \text{if } C_5 \geq 1 \\ \left[1 - \exp\left(\frac{-C_5}{1-C_5}\right)\right]^{-1} & \text{if } C_5 < 1 \end{cases} & \text{if } \rho_l / \rho_g > 18 \end{cases} \quad (3-118)$$

$$C_3 = \max[0.5, 2 \exp(-|\text{Re}_l|/60000)] \quad (3-119)$$

$$C_4 = \begin{cases} 1 & \text{if } C_7 \geq 1 \\ \left[1 - \exp\left(\frac{-C_7}{1-C_7}\right)\right]^{-1} & \text{if } C_7 < 1 \end{cases} \quad (3-120)$$

$$C_5 = \sqrt{150 \frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (3-121)$$

$$C_7 = \left(\frac{0.09144}{D_e} \right)^{0.6} \quad (3-122)$$

$$C_9 = (1 - \alpha)^{B_1} \quad (3-123)$$

ここで

$\Delta\rho$: 密度差 $\rho_l - \rho_g$ [kg/m³]

である。また、下付き文字は

crt : 臨界

である。

(2) 均質流モデル :

$$C_0 = 1.0 \quad (3-124)$$

$$U_{gj} = 0.0 \quad (3-125)$$

(3) Takeuchi 相関式¹⁴⁾ :

Takeuchi ドリフト速度相関式は以下の通りである。

$$C_0 = 1.11775 + 0.45881\alpha - 0.57656\alpha^2 \quad (3-126)$$

$$U_{gj} = k \frac{C_0(1-C_0\alpha)}{m^2 + C_0\alpha(\sqrt{\rho_g/\rho_l} - m^2)} \sqrt{\frac{gD_e\Delta\rho}{\rho_l}} \quad (3-127)$$

$$k = \sqrt{\frac{K_{D^*}^2}{D^*}} \quad (3-128)$$

$$m = 1.367 \quad (3-129)$$

$$K_{D^*} = \sqrt{D^* \min\left(\frac{1}{2.4}, \frac{10.24}{D^*}\right)} \quad (3-130)$$

$$D^* = D_e \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}} \quad (3-131)$$

(4) Zuber-Findlay 相関式¹⁴⁾ :

$$C_0 = \left(1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) [1 - \exp(-18\alpha)] \quad (3-132)$$

$$U_{gj} = 1.53 \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4} \quad (3-133)$$

(5) Dix 相関式¹⁴⁾ :

Dix ドリフト速度相関式は以下の通りである。

$$U_{gj} = 1.41 \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4} \quad (3-134)$$

$$C_0 = \beta \left[1 + \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^b \right] \quad (3-135)$$

$$b = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.1} \quad (3-136)$$

$$\beta = \frac{x}{x + (1-x) \frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (3-137)$$

(6) Lellouche-Zolotar 相関式¹⁾ :

Lellouche-Zolotar ドリフト速度相関式は以下の通りである。

$$C_0 = \frac{L(\alpha)}{K_1 + (1 - K_1)\alpha'} \quad (3-138)$$

$$U_{gj} = 1.41 \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4} (1 - \alpha)^{1/2} / (1 + \alpha) \quad (3-139)$$

$$K_1 = K_0 + (1 - K_0) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/4} \quad (3-140)$$

$$K_0 = \min(K_{01}, K_{02}) \quad (3-141)$$

$$K_{01} = \frac{1}{1 + \exp(-Re/100000)} \quad (3-142)$$

$$K_{02} = 0.71 \quad (3-143)$$

$$Re = \frac{(\rho_g j_g + \rho_l j_l) D_e}{\mu_l} \quad (3-144)$$

$$r = \frac{1.0 + 1.57 \rho_g / \rho_l}{1 - K_0} \quad (3-145)$$

$$L(\alpha) = \frac{1 - \exp(-C_1 \alpha)}{1 - \exp(-C_1)} \quad (3-146)$$

$$C_1 = \frac{4 p_{crt}^2}{p(p_{crt} - p)} \quad (3-147)$$

(7) 下降流に適用するドリフトフラックス相関式¹⁵⁻¹⁷⁾

ドリフト速度 U_{gj} は以下の通りである。

$$U_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4} \quad (3-148)$$

分布定数 C_0 は以下の通りである。

$$-20 \leq \langle j^* \rangle \leq 0 \text{ のとき、}$$

$$C_0 = \left(-0.0214 \langle j^* \rangle + 0.772 \right) + \left(0.0214 \langle j^* \rangle + 0.228 \right) \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (3-149)$$

$$\langle j^* \rangle \leq -20 \text{ のとき、}$$

$$C_0 = \left(0.2 e^{0.00848(\langle j^* \rangle + 20)} + 1.0 \right) - 0.2 e^{0.00848(\langle j^* \rangle + 20)} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (3-150)$$

ここで、

$$\langle j^* \rangle = \frac{\langle j \rangle}{U_{gj}} \quad (3-151)$$

$$j = j_g + j_l \quad (3-152)$$

$$j_g = \alpha V_g \quad (3-153)$$

$$j_l = (1 - \alpha) V_l \quad (3-154)$$

である。

適用範囲は以下の通りである。

二相流：空気一水、蒸気一水

管径 : $D_e = 16 \sim 102.3 \text{ mm}$

圧力 : $P = 0.1 \sim 1.5 \text{ MPa}$

体積流束 : $j = -0.45 \sim -24.6 \text{ m/s}$

(8) Chexal-Lellouche 相関式（上昇流、下降流）^{14, 18, 19)}

分布定数は以下の通りである。

$$\text{Re}_g \geq 0 \text{ のとき、}$$

$$C_0 = \frac{L(\alpha)}{K_0 + (1 - K_0)\alpha'} \quad (3-155)$$

$\text{Re}_g < 0$ のとき、

$$C_0 = \max \left\{ \frac{L(\alpha)}{K_0 + (1 - K_0)\alpha^r}, \frac{U_{gj}^0 (1 - \alpha)^{0.2}}{|j_l| + |j_g|} \right\} \quad (3-156)$$

ここで、

$$L = \frac{1 - \exp(-C_1 \alpha)}{1 - \exp(-C_1)} \quad (3-157)$$

$$C_1 = \frac{4 p_{crt}^2}{p(p_{crt} - p)} \quad (3-158)$$

$$K_0 = B_1 + (1 - B_1) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/4} \quad (3-159)$$

$$r = \frac{1.0 + 1.57 \rho_g / \rho_l}{1 - B_1} \quad (3-160)$$

$$B_1 = \min \left(0.8, \frac{1}{1 + \exp(-\text{Re}/60000)} \right) \quad (3-161)$$

$$\text{Re} = \begin{cases} \text{Re}_g & \text{if } \text{Re}_g > \text{Re}_l, \text{ or } \text{Re}_g < 0.0 \\ \text{Re}_l & \text{if } \text{Re}_g \leq \text{Re}_l \end{cases} \quad (3-162)$$

$$\text{Re}_l = \frac{\rho_l (1 - \alpha) V_l D_e}{\mu_l} \quad (3-163)$$

$$\text{Re}_g = \frac{\rho_g \alpha V_g D_e}{\mu_g} \quad (3-164)$$

である。

ドリフト速度は以下の通りである。

$$U_{gj} = U_{gj}^0 C_9 \quad (3-165)$$

$$U_{gj}^0 = 1.41 \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4} C_2 C_3 C_4 \quad (3-166)$$

ここで、

$$C_9 = \begin{cases} (1-\alpha)^{B_1} & \text{if } \text{Re}_g \geq 0 \\ \min[0.7, (1-\alpha)^{0.65}] & \text{if } \text{Re}_g < 0 \end{cases} \quad (3-167)$$

$$C_2 = \begin{cases} 0.4757 [\ln(\rho_l/\rho_g)]^{0.7} & \text{if } \rho_l/\rho_g \leq 18 \\ \begin{cases} 1 & \text{if } C_5 \geq 1 \\ \left[1 - \exp\left(\frac{-C_5}{1-C_5}\right) \right]^{-1} & \text{if } C_5 < 1 \end{cases} & \text{if } \rho_l/\rho_g > 18 \end{cases} \quad (3-168)$$

$$C_5 = \sqrt{150 \frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (3-169)$$

$$C_4 = \begin{cases} 1 & \text{if } C_7 \geq 1 \\ \left[1 - \exp\left(\frac{-C_7}{1-C_7}\right) \right]^{-1} & \text{if } C_7 < 1 \end{cases} \quad (3-170)$$

$$C_7 = \left(\frac{0.09144}{D_h} \right)^{0.6} \quad (3-171)$$

$$C_3 = \begin{cases} \max[0.5, 2 \exp(-|\text{Re}_l|/60000)], \text{ for 上昇流} (j_g > 0, j_l > 0) \\ 2 \left(\frac{C_{10}}{2} \right)^{B_2}, \text{ for 下降流} (j_g \leq 0, j_l \leq 0), \text{ or 対向流} (j_g > 0, j_l \leq 0) \end{cases} \quad (3-172)$$

$$C_{10} = 2 \exp \left[\frac{|\text{Re}_l|}{350000} \right]^{0.4} - 1.75 |\text{Re}_l|^{0.03} \exp \left[\frac{-|\text{Re}_l|}{50000} \left(\frac{0.0381}{D_e} \right)^2 \right] + \left(\frac{0.0381}{D_e} \right)^{0.25} |\text{Re}_l|^{0.001} \quad (3-173)$$

$$B_2 = \left[1 + 0.05 \frac{|\text{Re}_l|}{350000} \right]^{-0.4} \quad (3-174)$$

である。

3.10.4 热伝達相關式

(1) サブクール域（液单相流）²⁰⁾

a) Dittus-Boelter 相関式：

乱流強制対流の流動様式に対して、次の Dittus-Boelter 相関式を利用する。

$$Nu_l = 0.023 \text{Re}_l^{0.8} \text{Pr}_l^{0.4} \quad (3-175)$$

ここで、

$$\text{Re}_l = \frac{\rho_l V_l D_e}{\mu_l} \quad (3-176)$$

$$\text{Pr}_l = \frac{\mu_l C p_l}{\lambda_l} \quad (3-177)$$

$$Nu = \frac{h_l D_e}{\lambda_l} \quad (3-178)$$

である。

適用範囲は以下の通りである。

$$\text{Re} > 10000$$

$$0.7 < \text{Pr} < 100$$

ここで

λ ： 热伝導率 W/(m·K)

h ： 热伝達率 W/(m²·K)

である。

b) Colburn 相関式：

$$Nu = 0.023 \text{Re}_f^{0.8} \text{Pr}_f^{1/3} \quad (3-179)$$

式中の比熱 Cp 以外の物性には膜温度（添字 f ）を使う。

(2) 核沸騰域²⁰⁾

a) Thom 相関式：

Thom 相関式により壁面過熱度と熱流束の間に以下のような関係がある。

$$T_w - T_{sat} = 0.0225 \exp\left(\frac{-p}{86.9}\right) (q'')^{0.5} \quad (3-180)$$

上式により、熱流束は次の式

$$q'' = \left[\frac{1}{0.0225} \exp\left(\frac{p}{86.9}\right) \right]^2 (T_w - T_{sat})(T_w - T_{sat}) \quad (3-181)$$

で表れる。そして熱伝達率は次の式

$$h_{wa} = 44.44 \exp\left(\frac{p}{86.9}\right) (q'')^{0.5} \quad (3-182)$$

で計算される。

ここで

h_{wa} : 热伝達率 [W/m²K]

p : 壓力[bar]

q'' : 热流束[W/m²]

である。また、下付き文字は

sat : 饱和

である。

b) Jens-Lottes 相関式:

Jens-Lottes 相関式により壁面過熱度と熱流束の間に以下のようないかだがある。

$$T_w - T_{sat} = 25 \exp\left(\frac{-p}{62}\right) (q'')^{0.25} \quad (3-183)$$

ここで p は bar 単位の圧力、 q'' は MW/m² 単位の熱流束である。

上式により、熱流束は次の式

$$q'' = \left[\frac{1}{25} \exp\left(\frac{p}{62}\right) \right]^4 (T_w - T_{sat})^3 (T_w - T_{sat}) \quad (3-184)$$

で表れる。そして熱伝達率は次の式

$$h_{wa} = 1.2649 (q''_{wa})^{0.75} \exp\left(\frac{p}{62}\right) \quad (3-185)$$

で計算される。

ここで

h_{wa} : 热伝達率 [W/m²K]

p : 壓力[bar]

q'' : 热流束[W/m²]

である。

(3) DNB クオリティー^{21,22)}

a) Levitan 相関式 :

$$x_{DNB} = F(p) \cdot \left(\frac{G}{1000} \right)^{-0.5} \cdot \left(\frac{D_e}{0.008} \right)^{-0.15} \quad (3-186)$$

$$F(p) = 0.39 + 1.57 \left(\frac{p}{98} \right) - 2.04 \left(\frac{p}{98} \right)^2 + 0.68 \left(\frac{p}{98} \right)^3 \quad (3-187)$$

ここで

p : 壓力 [bar]

D_e : 伝熱管 [m]

G : 質量速度 [kg/m²s]

である。

b) Roko 相関式:

$$\frac{1-x_{DNB}}{x_{DNB}} = (12.04P_{c,r}^2 - 5.628P_{c,r} + 0.8623) \cdot \left(\frac{G}{1000} \right)^{1.2} \quad (3-188)$$

$$P_{c,r} = \frac{p}{225.56} \quad (3-189)$$

ここで

p : 壓力 [kgf/cm²]

G : 質量速度 [kg/m²s]

である。

c) Hwang, Waszink and Efferding 相関式

$$x_{DNB} = \frac{467.25}{h_{fg} (G/10^6)^{0.445}} \cdot \left[0.061567 \left(\frac{p}{10^3} \right)^{-1.05} - 35.404 D_i^{1.2} \left(\frac{q''}{10^6} \right) \right] \quad (3-190)$$

ここで

h_{fg} : 潜熱 [kcal/kg]

G : 質量速度 [kg/m²hr]

p : 壓力 [kgf/cm²]

q'' : 熱流束 [kcal/m²hr]

である。

(4) 膜沸騰域^{21,22)}

以下の Bishop 相関式を利用する。

$$Nu = 0.0193 \text{Re}_f^{0.8} \text{Pr}_f^{1.23} \left[x + (1-x) \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{0.68} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.068} \quad (3-191)$$

ここで、

$$\text{Re}_f = \frac{GD_e}{\mu_f} \quad (3-192)$$

$$\text{Pr}_f = \frac{\mu_f Cp_f}{\lambda_f} \quad (3-193)$$

$$Nu = \frac{hD_e}{\lambda_f} \quad (3-194)$$

である。下付き文字 f は蒸気膜温度の意味である。

(5) 過熱域（蒸気単相流）^{21,22)}

以下の Bishop 相関式を利用する。

$$Nu = 0.0073 \text{Re}_f^{0.886} \text{Pr}_f^{0.61} \quad (3-195)$$

ここで、

$$\text{Re}_f = \frac{GD_e}{\mu_f} \quad (3-196)$$

$$\text{Pr}_f = \frac{\mu_f Cp_f}{\lambda_f} \quad (3-197)$$

$$Nu = \frac{hD_e}{\lambda_f} \quad (3-198)$$

である。下付き文字 f は蒸気膜温度の意味である。

4. TSG 水側プログラムの構成

TSG 水側プログラム構成について、表 4-1 にサブルーチンツリーを示す。また、表 4-2 にサブルーチンリストを示す。

表 4-1(1/2) TSG 水側サブルーチンツリー

| TSG 水側サブルーチンツリー | ファイル | | |
|-----------------------------------------------------------------|------|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| --Main | | | |
| --mcmp_mpi_init | | | |
| --INPUT | | | |
| --mcmp_partition_tubes | | | |
| --INITIAL | | | |
| --SATTEM, PLIQUID, PVAPOR | | | |
| --RESTART | | | |
| --SATTEM, PLIQUID, PVAPOR | | | |
| --THERMOP | | | |
| --SATDER, PARDERL, PARDERG, viscos, surftens, conduc, PVAPOR_IT | | | |
| --MATPROPERTY, | | | |
| --INTERPOLATION | | | |
| --COPYN | | | |
| --COPYK | | | |
| --PRESSURELOSS | | | |
| --FANNING | | | |
| --FANNING1, FANNING2, FANNING3 | | | |
| --MULTIPLIER | | | |
| --MULTIPLIER1, MULTIPLIER2 | | | |
| --MULTIPLIER3 | | | |
| --PFANN | | | |
| --FIFO2 | | | |
| --MULTIPLIER4, MULTIPLIER5, MULTIPLIER6, MULTIPLIER7 | | | |
| --MULTIPLIER8, MULTIPLIER9, MULTIPLIER10, MULTIPLIER11 | | | |
| --MULTIPLIER12 | | | |
| --SGPROP | | | |
| --HEATBOUNDARY | | | |
| --HEATSOURCENA | | | |
| --HEATSOURCEWATER | | | |
| --HTCOVERALL | | | |
| --CALDNB | | | |
| --HTCSUBCOOL | | | |
| --HTCNUCLEATE | | | |
| --HTCFILMBOIL | | | |
| --HTCSUPERHEAT | | | |
| --SETTW | | | |
| --SETQV | | | |

表 4-1(2/2) TSG 水側サブルーチンツリー

| TSG 水側サブルーチンツリー | ファイル | SEMI-multi-v6.F IAPWS-IF97-v1.F mod_mcnp_mpi_comm.f90 mod_time_diagnostic.f90 | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| --HISTORY --mcnp_mpi_allgather | | | |
| --OUTPUT --mcnp_mpi_barrier | | | |
| --DTCAL --mcnp_mpi_min | | | |
| --BACKUPDATA | | | |
| --DISTURBANCE | | | |
| --TUBETEMPERATURE | | | |
| --PLUGTUBETEMPERATURE | | | |
| --TIERODTEMPERATURE | | | |
| --INPLENUM --mcnp_mpi_sum | | | |
| --OUTPLENUM --mcnp_mpi_sum | | | |
| --TUBES --CALCV --CALCD --CALCA --VAPORRATE --CALCA4 --CALCE --MATRIX --NBGS | | | |
| --FLOWP --SATTEM, PLIQUID_IT, PVAPOR_IT, DENTEMG1, DENTEML1 --CALDRIFT --CALDRIFT1, CALDRIFT2, CALDRIFT3, CALDRIFT4, --CALDRIFT5, CALDRIFT6, CALDRIFT7, CALDRIFT8 | | | |
| --DELTP --mcnp_mpi_deltp | | | |
| --mcnp_mpi_max | | | |
| --mcnp_mpi_fin | | | |
| --tm_print | | | |

表 4-2(1/3) TSG 水側サブルーチンリスト

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| TSG 水側サブルーチンリスト | ファイル | SEMI-multi-v6.F IAPWS-IF97-v1.F mod_mcnp_mpi_comm.f90 mod_time_diagnostic.f90 |
| Subroutine (Function) 名称 | 説明 | |
| BACKUPDATA | SEMI_MULT.BAK に再スタートためのデータを出力。 | |
| CALCA | 離散化した蒸気質量保存式（熱平衡仮定）の各係数の計算。 | |
| CALCA4 | 離散化した蒸気質量保存式（非熱平衡仮定）の各係数の計算。 | |
| CALCD | 離散化した質量保存式の各係数の計算。 | |
| CALCE | 離散化したエネルギー保存式の各係数の計算。 | |
| CALCV | 離散化した運動量保存式の各係数の計算。 | |
| CALDNB | DNB クオリティーの計算。 | |
| CALDRIFT | 相関式により分布定数 C_0 とドリフト速度 U_g の計算。 | |
| CALDRIFT1~CALDRIFT8 | 各ドリフトフラックス相関式。 | |
| conduc | 熱伝導率の計算。 | |
| COPYK | k 時刻データの記憶。 | |
| COPYN | n 時刻データの記憶。 | |
| DELTP | 反復計算の最大圧力誤差の計算。 | |
| DENTEMG1 | 偏微係数を利用して、気相の圧力と内部エネルギーから密度と温度を求める。 | |
| DENTEML1 | 偏微係数を利用して、液相の圧力と内部エネルギーから密度と温度を求める。 | |
| DISTURBANCE | 不安定解析の初期外乱の計算。 | |
| DTCAL | 時間ステップの計算 | |
| FANNING | Fanning 摩擦係数の計算。 | |
| FANNING1~FANNING3 | 各 Fanning 摩擦係数相関式。 | |
| FIFO2 | Martinelli-Nelson 二相流増倍係数表。 | |
| FLOWP | 独立変数 α, p, e 及び V から他の全ての変数の値を求める。 | |
| HEATBOUNDARY | 伝熱管における境界条件の設定。 | |
| HEATSOURCENA | Na 側の熱交換量をもたらす。 | |
| HEATSOURCEWATER | 水側で伝熱管と熱交換量の計算。 | |
| HISTORY | SEMI_MULT.HIS に時間的変動の記録データを出力。 | |
| HTCFILMBOIL | 膜沸騰領域熱伝達率の計算。 | |
| HTCNUCLEATE | 核沸騰領域熱伝達率の計算。 | |
| HTCOVERALL | 水側熱通過率の計算。 | |

表 4-2(2/3) TSG 水側サブルーチンリスト

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| TSG 水側サブルーチンリスト | ファイル | SEMI-multi-v6.F IAPWS-IF97-v1.F mod_mcnp_mpi_comm.f90 mod_time_diagnostic.f90 |
| Subroutine (Function) 名称 | 説明 | |
| HTCSUBCOOL | サブクール領域熱伝達率の計算。 | |
| HTCSUPERHEAT | 過熱蒸気領域熱伝達率の計算。 | |
| INITIAL | 初期条件の計算。 | |
| INPLENUM | 入口プレナム状態の計算。 | |
| INPUT | 入力データファイル SEMI_MULT.MSH、SEMI_MULT.INI からデータを読み込む。 | |
| INTERPOLATION | 線形内挿法。 | |
| MATPROPERTY | 伝熱管物性値。 | |
| MATRIX | Jacobi 方程式の各係数の計算。 | |
| mcnp_mpi_allgather | (並列計算) 各プロセスからデータを収集。 | |
| mcnp_mpi_barrier | (並列計算) 各プロセス同期。 | |
| mcnp_mpi_deltap | (並列計算) 各プロセスの圧力誤差最大値の計算。 | |
| mcnp_mpi_fin | (並列計算) MPI 並列化終了。 | |
| mcnp_mpi_init | (並列計算) MPI 並列化開始。 | |
| mcnp_mpi_max | (並列計算) 各プロセスの最大値の計算。 | |
| mcnp_mpi_min | (並列計算) 各プロセスの最小値の計算。 | |
| mcnp_mpi_sum | (並列計算) 各プロセスの総和。 | |
| mcnp_partition_tubes | (並列計算) 伝熱管を各プロセッサに配分。 | |
| MULTIPLIER | 二相流摩擦損失増倍係数の計算。 | |
| MULTIPLIER1~MULTIPLIER12 | Fanning 摩擦係数相関式と二相流増倍係数相関式の組み合わせ。 | |
| NBGS | NBGS 反復法により Jacobi 方程式を解く。 | |
| OUTPLENUM | 出口プレナム状態の計算。 | |
| OUTPUT | SEMI_MULT.OUT に時間割付けの熱流動データを出力。 | |
| PARDERG | 気相偏微係数の計算。 | |
| PARDERL | 液相偏微係数の計算。 | |
| PFANN | Fanning 摩擦係数の Pfann 相関式。 | |
| PLIQUID | 圧力と温度により液相物性の計算。 | |
| PLIQUID_IT | 液相物性の反復計算法。 | |
| PLUGTUBETEMPERATURE | プラグ管温度の計算。 | |
| PRESSURELOSS | 摩擦損失、形状損失の計算。 | |

表 4-2(3/3) TSG 水側サブルーチンリスト

| | | |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| TSG 水側サブルーチンリスト | ファイル | SEMI-multi-v6.F IAPWS-IF97-v1.F mod_mcnp_mpi_comm.f90 mod_time_diagnostic.f90 |
| Subroutine (Function) 名称 | 説明 | |
| PVAPOR | 圧力と温度により気相物性の計算。 | |
| PVAPOR_IT | 気相物性の反復計算法。 | |
| RESTART | SEMI_MULT.RES から再スタート用の初期熱流動条件を読み込む。 | |
| SATDER | 飽和線における偏微係数の計算。 | |
| SATTEM | 圧力により飽和温度の計算。 | |
| SETQV | 伝熱管からの熱発生率境界条件の設定。 | |
| SETTW | 伝熱管中心温度境界条件の設定。 | |
| SGPROP | SG 性能（伝熱管流量、平均温度、水/蒸気バルク温度）の計算。 | |
| surf_tens | 表面張力係数の計算。 | |
| THERMOP | 物性値、偏微係数の計算。 | |
| TIERODTEMPERATURE | タイロッド温度の計算。 | |
| tm_print | 計算時間情報の出力。 | |
| TUBES | 各伝熱管熱流動解析。 | |
| TUBETEMPERATURE | 伝熱管温度の計算。 | |
| VAPORRATE | 蒸気生成率の計算。 | |
| viscos | 粘度の計算。 | |

5. TSG 水側モジュール入出力マニュアル

5.1 ファイル全体構成

(1) ソースコード

TSG 水側ソースコードを表 5-1 に示す。ソースプログラムは全て Fortran 言語で記述され、計算機ハードウェア、オペレーティングシステムに依存しない汎用的なものとなって いる。

表 5-1 ソースコード

| ファイル名 | 説明 | 備考 |
|-------------------------|-------------|-------------------|
| PARAM.F | パラメータ変数設定 | 主プログラムに取り込まれるファイル |
| VARIABLES.F | 変数の共通ブロック | 主プログラムに取り込まれるファイル |
| SEMI-multi-v6.F | 主プログラム | |
| IAPWS-IF97-v1.F | 水蒸気関数 | |
| mod_mcnp_mpi_comm.f90 | MPI 通信モジュール | |
| mod_time_diagnostic.f90 | 時間診断ユーティリティ | |

(2) 入力ファイル

TSG 水側コードの入力ファイルを表 5-2 に示す。入力データファイルは全てテキスト形式であり、半角の英数字で記述する。

表 5-2 入力ファイル

| ファイル名 | 説明 | 備考 |
|---------------|----------------|------------------------|
| SEMI_MULT.INP | 計算オプション | |
| SEMI_MULT.MSH | 節点データ | |
| SEMI_MULT.INI | 初期条件としての熱流動データ | |
| SEMI_MULT.RES | 再スタート用の初期熱流動条件 | 例えば、不安定計算の初期条件として利用する。 |

(3) 出力ファイル

TSG 水側コードの出力ファイルを表 5-3 に示す。出力データファイルは全てテキスト形式である。入力データで指定する時間間隔で主要なデータの空間分布等を出力ファイルに出力する。

表 5-3 出力ファイル

| ファイル名 | 説明 | 備考 |
|---------------|---------------|---------------------------------|
| SEMI_MULT.OUT | 時間割付けの熱流動データ | |
| SEMI_MULT.HIS | 時間的変動の記録データ | 例：入口流量時間的変動データ。時間的変動図を書く時に利用する。 |
| SEMI_MULT.BAK | 再スタートための出力データ | 詳細な流れデータが一定の時間間隔で出力する。 |

(4) パラメータ変数設定

水側解析の規模に応じてファイル PARAM.F におけるパラメータ変数の設定が必要である。変数 M > チャンネル軸方向メッシュ分割数+1、及び N > 伝熱管+プラグ伝熱管+タイロッド数の条件を満たさなければならない。

表 5-4 パラメータ変数

| パラメータ変数 | | ファイル名 : PARAM.F |
|---------|--------------------------------|-----------------|
| 変数名 | 意味 | 設定 |
| M | > チャンネル軸方向メッシュ分割数+1 の最大値 | 場合によって再設定必要 |
| N | > チャンネル(伝熱管+プラグ伝熱管+タイロッド)数の最大値 | 場合によって再設定必要 |

5.2 変数の共通ブロック説明

ファイル VARIABLES.F に変数の共通ブロックを記述している。表 5-5 に変数の意味を説明する。

表 5-5(1/34) 変数の共通ブロック説明

| 変数名 | コモン変数 | コモン名 | LIQD |
|-----------|-----------|-------------------|----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| EL(M,N) | 液相内部エネルギー | J/kg | e_l |
| DENL(M,N) | 液相密度 | Kg/m ³ | ρ_l |
| TL(M,N) | 液相温度 | K | T_l |
| VL(M,N) | 液相速度 | m/s | V_l |
| HL(M,N) | 液相エンタルピー | J/kg | h_l |

表 5-5(2/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | VAPR |
|-----------|-----------|-------------------|----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| EG(M,N) | 気相内部エネルギー | J/kg | e_g |
| DENG(M,N) | 気相密度 | Kg/m ³ | ρ_g |
| TG(M,N) | 気相温度 | K | T_g |
| VG(M,N) | 気相速度 | m/s | V_g |
| HG(M,N) | 気相エンタルピー | J/kg | h_g |

表 5-5(3/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | AVER |
|-----------|------------|-------------------|----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| P(M,N) | 圧力 | Pa | P |
| ALF(M,N) | ボイド率 | | α |
| X(M,N) | クオリティー | | X |
| E(M,N) | 平均内部エネルギー | J/kg | E |
| DEN(M,N) | 平均密度 | Kg/m ³ | ρ |
| V(M,N) | 平均速度 | m/s | V |
| H(M,N) | 平均エンタルピー | J/kg | H |
| XDNB(M,N) | DNB クオリティー | | |

表 5-5(4/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | SATU |
|------------|-------------|-------------------|-------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| ELS(M,N) | 液相飽和内部エネルギー | J/kg | e_{ls} |
| EGS(M,N) | 気相飽和内部エネルギー | J/kg | e_{gs} |
| TS(M,N) | 飽和温度 | K | T_s |
| DENLS(M,N) | 液相飽和密度 | Kg/m ³ | ρ_{ls} |
| DENGs(M,N) | 気相飽和密度 | Kg/m ³ | ρ_{gs} |
| HLS(M,N) | 液相飽和エンタルピー | J/kg | h_{ls} |
| HGS(M,N) | 気相飽和エンタルピー | J/kg | h_{gs} |

表 5-5(5/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | SOUR |
|-----------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| GAM(M,N) | 蒸気発生率 | kg/(m ³ s) | Γ |
| DPF(M,N) | 摩擦圧力損失 | Pa/m | Δp_f |
| DPK(M,N) | 局部圧力損失 | Pa | Δp_k |
| QV(M,N) | 熱発生率 | J/(m ³ s) | Q''' |
| QANA(M,N) | Na 側熱流束(Dwc で定義) | w/m ² | Q''_{na} 、Na 側→水側 : + |
| QAW(M,N) | 水側熱流束(Dwc で定義) | w/m ² | Q''_w |
| TW(M,N) | 伝熱管壁面(中心)温度 | K | T_w |
| TWNA(M,N) | 伝熱管壁面(Na 側)温度 | K | T_{wNa} |
| TWW(M,N) | 伝熱管壁面(水側)温度 | K | T_{ww} |
| QNA(M,N) | Na 側から伝熱管へ熱交換量 | W | Q_{Na} 、Na 側→水側 : + |
| QH2O(M,N) | 伝熱管から水側へ熱交換量 | W | Q_{H2O} |

表 5-5(6/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | PLEI |
|--------|------------------|-------------------|--------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| ELPI | 入口プレナム、液相内部エネルギー | J/kg | e_{lpi} |
| DENLPI | 入口プレナム、液相密度 | Kg/m ³ | ρ_{lpi} |
| TLPI | 入口プレナム、液相温度 | K | T_{lpi} |
| HLPI | 入口プレナム、液相エンタルピー | J/kg | h_{lpi} |
| EGPI | 入口プレナム、気相内部エネルギー | J/kg | e_{gpi} |
| DENGPI | 入口プレナム、気相密度 | Kg/m ³ | ρ_{gpi} |
| TGPI | 入口プレナム、気相温度 | K | T_{gpi} |
| HGPI | 入口プレナム、気相エンタルピー | J/kg | h_{gpi} |

表 5-5(7/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | AVPI |
|-------|------------------|-------------------|---------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| PPI | 入口プレナム、圧力 | Pa | P_{pi} |
| ALFPI | 入口プレナム、ボイド率 | | α_{pi} |
| XPI | 入口プレナム、クオリティー | | x_{pi} |
| EPI | 入口プレナム、平均内部エネルギー | J/kg | e_{pi} |
| DENPI | 入口プレナム、平均密度 | Kg/m ³ | ρ_{pi} |
| HPI | 入口プレナム、平均エンタルピー | J/kg | h_{pi} |

表 5-5(8/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | SAPI |
|----------|--------------------|-------------------|---------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| ELSPI | 入口プレナム、液相飽和内部エネルギー | J/kg | e_{lspi} |
| EGSPI | 入口プレナム、気相飽和内部エネルギー | J/kg | e_{gspi} |
| TSPI | 入口プレナム、飽和温度 | K | T_{spi} |
| DENLSPPI | 入口プレナム、液相飽和密度 | Kg/m ³ | ρ_{lspi} |
| DENGSPPI | 入口プレナム、気相飽和密度 | Kg/m ³ | ρ_{gspi} |
| HLSPI | 入口プレナム、液相飽和エンタルピー | J/kg | h_{lspi} |
| HGSPI | 入口プレナム、気相飽和エンタルピー | J/kg | h_{gspi} |

表 5-5(9/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | PLEO~SAP0 |
|------------------|-----------------------------|---------|-----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| ~P0 (最後二つ文字は P0) | 出口プレナムの変数 (意味は入口プレナムと同じ) | ~PI と同じ | |

表 5-5(10/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | BDR1 |
|-------|----------------------|-------------------|------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| WF | 入口プレナムに流入する境界流量 | Kg/s | W_F |
| HF | 入口プレナムに流入する境界エンタルピー | J/kg | h_F |
| EF | 入口プレナムに流入する境界内部エネルギー | J/kg | e_F |
| DENF | 入口プレナムに流入する境界密度 | Kg/m ³ | ρ_F |
| VOLPI | 入口プレナム体積 | m ³ | VOL_{pi} |

表 5-5(11/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | BDR0 |
|---------|------------------------|-------------------|---------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| PB | 出口プレナムの境界圧力 | Pa | P_B |
| AB | 出口プレナムから流出する境界面積 | m ² | A_B |
| CKB | 出口プレナムから流出する境界局部圧力損失係数 | | C_{KB} |
| WBLOW | 出口プレナムに流入する流量 | Kg/s | W_{BLOW} |
| EBLOW | 出口プレナムに流入する内部エネルギー | J/kg | e_{BLOW} |
| DENBLOW | 出口プレナムに流入する密度 | Kg/m ³ | ρ_{BLOW} |
| VOLPO | 出口プレナム体積 | m ³ | VOL_{po} |

表 5-5(12/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | BDRW |
|------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| BDRH(M,N) | 水側へ熱境界条件(固定熱発生率或いは伝熱管中心温度) | W/m ³ , or K | IBDRH=1 の場合、任意値 |
| QVMAX(M,N) | 水側へ固定熱発生率 | W/m ³ | Q'''_{max} |
| TWMAX(M,N) | 水側へ固定伝熱管温度 | K | T_{wmax} |
| TWO(M,N) | 0 時刻伝熱管温度 | K | T_{w0} |

表 5-5(13/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | GRID |
|-----------|-----------|--------------------|-----------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| DWI(M,N) | 伝熱管内径 | m | D_{wi} |
| A(M,N) | 伝熱管内流路断面積 | m ² | A |
| EPSD(M,N) | 管内壁相対粗さ | | ε/D |
| CK(M,N) | 局部圧力損失係数 | | C_K |
| HFWA(N) | 伝熱管水側汚れ係数 | m ² K/W | h_{fwa} |
| DZ(M,N) | メッシュサイズ | m | Δz |
| Z(M,N) | 軸方向座標 | m | z |
| DT | 時間ステップ | s | Δt |
| NGRID(N) | 軸方向メッシュ数 | | N_{grid} |
| NTUBE | 伝熱管数 | | N_{tube} |
| NPLUG | プラグ伝熱管数 | | N_{plug} |
| NTIEROD | タイロッド数 | | N_{tierod} |

表 5-5(14/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | DRIFT |
|----------|----------------|------|----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| CO(M,N) | 分布定数 | | C_0 |
| UGJ(M,N) | ボイド率荷重平均ドリフト速度 | m/s | U_{gj} |
| VGJ(M,N) | 気相ドリフト速度 | m/s | V_{gj} |

表 5-5(15/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | PARTD |
|-------------|------------------------------------------|------|-------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| DDLDEP(M,N) | 物性導関数 $(\partial \rho_l / \partial e)_p$ | SI | |
| DDGDEP(M,N) | 物性導関数 $(\partial \rho_g / \partial e)_p$ | SI | |
| DDLDPE(M,N) | 物性導関数 $(\partial \rho_l / \partial p)_e$ | SI | |
| DDGDPE(M,N) | 物性導関数 $(\partial \rho_g / \partial p)_e$ | SI | |
| DTLDEP(M,N) | 物性導関数 $(\partial T_l / \partial e)_p$ | SI | |
| DTGDEP(M,N) | 物性導関数 $(\partial T_g / \partial e)_p$ | SI | |
| DTLDPE(M,N) | 物性導関数 $(\partial T_l / \partial p)_e$ | SI | |
| DTGDPE(M,N) | 物性導関数 $(\partial T_g / \partial p)_e$ | SI | |
| DTDPS(M,N) | 物性導関数 dT_{sat} / dp_{sat} | SI | |
| DDLDPS(M,N) | 物性導関数 $d\rho_{lsat} / dp_{sat}$ | SI | |
| DDGDPS(M,N) | 物性導関数 $d\rho_{gsat} / dp_{sat}$ | SI | |
| DELDPS(M,N) | 物性導関数 de_{lsat} / dp_{sat} | SI | |
| DEGDPS(M,N) | 物性導関数 de_{gsat} / dp_{sat} | SI | |

表 5-5(16/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | PARPI~ PARPO |
|------------------|--------------|------|-----------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| ~PI (最後二つ文字は PI) | 入口プレナムの物性導関数 | SI | |
| ~PO (最後二つ文字は PO) | 出口プレナムの物性導関数 | SI | |

表 5-5(17/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | VISCO |
|------------------|---------------|------|------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| AMUL(M,N) | 液相粘度 | Pa·s | μ_l |
| AMUG(M,N) | 気相粘度 | Pa·s | μ_g |
| AMULS(M,N) | 液相飽和点粘度 | Pa·s | μ_{ls} |
| AMUGS(M,N) | 気相飽和点粘度 | Pa·s | μ_{gs} |
| ~PI (最後二つ文字は PI) | 入口プレナムの水/蒸気粘度 | Pa·s | |
| ~PO (最後二つ文字は PO) | 出口プレナムの水/蒸気粘度 | Pa·s | |
| SURT(M,N) | 表面張力係数 | N/m | σ |

表 5-5(18/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | CONDU |
|------------------|-----------------|---------|----------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| ALMDL(M,N) | 液相熱伝導率 | W/(m·K) | λ_l |
| ALMDG(M,N) | 気相熱伝導率 | W/(m·K) | λ_g |
| ALMDLS(M,N) | 液相飽和点熱伝導率 | W/(m·K) | λ_{ls} |
| ALMDGS(M,N) | 気相飽和点熱伝導率 | W/(m·K) | λ_{gs} |
| ~PI (最後二つ文字は PI) | 入口プレナムの水/蒸気熱伝導率 | W/(m·K) | |
| ~PO (最後二つ文字は PO) | 出口プレナムの水/蒸気熱伝導率 | W/(m·K) | |

表 5-5(19/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | CAPAC |
|------------------|-----------------|----------|-----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| CPL(M,N) | 液相定圧比熱 | J/(kg·K) | C_{pl} |
| CPG(M,N) | 気相定圧比熱 | J/(kg·K) | C_{pg} |
| CPLS(M,N) | 液相飽和点定圧比熱 | J/(kg·K) | C_{pls} |
| CPGS(M,N) | 気相飽和点定圧比熱 | J/(kg·K) | C_{pgs} |
| ~PI (最後二つ文字は PI) | 入口プレナムの水/蒸気定圧比熱 | J/(kg·K) | |
| ~PO (最後二つ文字は PO) | 出口プレナムの水/蒸気定圧比熱 | J/(kg·K) | |

表 5-5(20/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | CAPAV |
|------------------|-----------------|----------|-----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| CVL(M,N) | 液相定積比熱 | J/(kg·K) | C_{vl} |
| CVG(M,N) | 気相定積比熱 | J/(kg·K) | C_{vg} |
| CVLS(M,N) | 液相飽和点定積比熱 | J/(kg·K) | C_{vls} |
| CVGS(M,N) | 気相飽和点定積比熱 | J/(kg·K) | C_{vgs} |
| ~PI (最後二つ文字は PI) | 入口プレナムの水/蒸気定積比熱 | J/(kg·K) | |
| ~PO (最後二つ文字は PO) | 出口プレナムの水/蒸気定積比熱 | J/(kg·K) | |

表 5-5(21/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | CTRL |
|---------|----------------------------------|------------------|-------------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| TIME | 開始時間 | s | t |
| DTMX | 時間ステップ上限 | s | Δt_{max} |
| TMAX | 終了時間 | s | t_{max} |
| DTOUT | SEMI_MULT.OUT に出力時間間隔 | s | Δt_{out} |
| DTPLT | SEMI_MULT.HIS に時間変動出力間隔 | s | Δt_{plt} |
| DTREST | Restart データ出力間隔 | s | Δt_{rest} |
| TLOAD | 固定熱発生率或いは固定伝熱管温度を線形的に投入するための設定時間 | s | IBDRH=1 の場合、任意値 |
| CFL | CFL 条件 | | 0<CFL<1 |
| THETA | パラメータ (0~1) | | THETA = 1.0 に限定 |
| EPSILON | 反復計算圧力収束判定値 | | |
| GRAV | 重力加速度 | m/s ² | $g = 9.80665$ |

表 5-5(22/34) 変数の共通ブロック説明

| 変数名 | コモン変数 意味 | コモン名 | OPT11 備考 |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------|
| IBETA | 風上、中心差分選択パラメータ 0: 中心差分 1: 風上差分 | | IBETA =1 に 限定 |
| ISTART | 計算開始選択パラメータ 0: 初期条件データから計算開始 1: 再スタートデータから計算再開 | | 流動安定性 計算に活用 |
| IRESTART | Restart データ出力要否判断 0: 出力しない 1: 出力 | | |
| IDISTURB | 外乱使用パラメータ 0: 不使用 1: 使用 | | 流動安定性 計算に活用 |
| IFRICTION | 摩擦係数+二相流増倍係数相関式選択パラメータ 1: Churchill 式+ Awad-Muzychka 相関式 2: Churchill 式+Modified Martinelli-Nelson 相関式 3: Pfann 式+ Martinelli-Nelson 線図 4: Churchill 式+ Martinelli-Nelson 線図 5: Churchill 式+ Chisholm 相関式 2 6: Pfann 式+ Homogeneous 式 7: Pfann 式+ Chisholm 相関式 1 8: Pfann 式+Modified Martinelli-Nelson 相関式 9: Pfann 式+Chisholm 相関式 2 10: Pfann 式+Friedel 相関式 11: Pfann 式+Reddy 相関式 12: ムーディ線図近似式+ Martinelli-Nelson 相関式 | | |
| IDRIFT | ドリフトフラックス相関式選択パラメータ 1: Chexal-Lellouche 式(上昇流) 2: Homogeneous 式 (均質流) 3: Takeuchi 式 4: Zuber-Findlay 式 5: Dix 式 6: Lellouche-Zolotar 式 7: Downward flow 式 8: Chexal-Lellouche 式(上昇流、下降流) | | |
| ISUBCOOL | サブクール熱伝達率相関式選択パラメータ 1: Dittus-Boelter 式 2: Colburn 式 | | |
| INUCLEATE | 核沸騰熱伝達率相関式選択パラメータ 1: Thom 式 2: Jens-Lottes 式 3: Chen 式 4: Shah 式 | | |
| IXDNB | DNB クオリティー計算選択パラメータ 0: 計算しない、初期値 XDNBIN(N)を利用する。 1: 相関式で計算する。 | | |
| IDNB | DNB クオリティー相関式選択パラメータ 1: Lebitan 式 | | |

表 5-5(22/34) 変数の共通ブロック説明（続き）

| コモン変数 | | コモン名 | OPT11 |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| | 2: Roko 式 3: Hwang, Waszink and Efferding 式 other: 初期値 XDNBIN(N)を利用する。 | | |
| ITUBEP | 伝熱管材料物性選択パラメータ 1: SUS316 2: SUS304 3: 2*1/4Cr-1Mo 4: Mod 9Cr-1Mo | | |
| ITIERODP | タイロッド材料物性選択パラメータ | | 同 ITUBEP |
| IHOMO | 熱平衡選択 1: 热平衡 2: 热非平衡 | | |
| IBDRH | 熱境界条件選択 1: Na 側から熱交換量を使用 2: 伝熱管中心温度 Tw を使用 3: 水側熱発生率 Qv を使用 | | Na 側と連成解析する際、IBDRH=1 |

表 5-5(23/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | OPT12 |
|-----------|--------------------------------|------|----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| NPLTMX | SEMI_MULT.HIS に出力するチャンネル数 | | 最大 20 |
| JPLT(20) | SEMI_MULT.HIS に出力するチャンネル番号 | | |
| NOUTMX | SEMI_MULT.OUT に出力するチャンネル数 | | 最大 100 |
| JOUT(100) | SEMI_MULT.OUT に出力するチャンネル番号 | | タイロッドも含む |
| NOINTV | SEMI_MULT.OUT に軸方向 (I 方向) 出力間隔 | | |

表 5-5(24/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | CTRL1 |
|-----------|---------------|------|--------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| XDNBIN(N) | DNB クオリティー初期値 | | |
| ANUMAX | Nu 数最大限値 | | 1.0E20 |
| ANUMIN | Nu 数最小限値 | | 5.0 |

表 5-5(25/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | MOMEN |
|-----------|-------------------|------|-------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| CV1K~CV3K | 運動量方程式を求める時に臨時の変数 | | |

表 5-5(26/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | MASS |
|-----------|------------------|------|------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| CD1K~CD7K | 質量保存式を求める時に臨時の変数 | | |

表 5-5(27/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | VAPOR |
|-----------|-------------------|------|-------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| CA1K~CA6K | 体積率保存式を求める時に臨時の変数 | | |

表 5-5(28/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | ENERG |
|-----------|---------------------|------|-------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| CE1K~CE7K | エネルギー保存式を求める時に臨時の変数 | | |

表 5-5(29/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | BDRNA |
|-----------|----------------------------------------------|-------------------------------|------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| DWO(M,N) | 伝熱管(タイロッド)外径 | m | D_{wo} |
| DWIO(M,N) | 2重管内管外径 | m | D_{wio} |
| DWC(M,N) | 伝熱管肉厚中心位置の直径 | m | D_{wc} |
| GEO1(M,N) | 管径 Parameter : D_{wc}/D_{wo} | | |
| GEO2(M,N) | 管径 Parameter : $D_{wc}/2*\ln(D_{wo}/D_{wc})$ | | |
| GEO3(M,N) | 管径 Parameter : D_{wc}/D_{wi} | | |
| GEO4(M,N) | 管径 Parameter : $D_{wc}/2*\ln(D_{wc}/D_{wi})$ | | |
| HFNA(N) | Na 側汚れ係数 | $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ | h_{jna} |
| HGAP(N) | 2重管界面の接触熱抵抗 | $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ | h_{gap} |
| RNA(M,N) | Na 側熱抵抗 (汚れ係数 + 接触熱抵抗) | $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ | R_{Na} |
| FACTS | 伝熱面積補正係数 | | 伝熱管肉厚中心で定義 |

表 5-5(30/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | TUBEW |
|------------|-----------|-------------------------------------|-------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| DENW(M,N) | 伝熱管壁の密度 | kg/m^3 | ρ_w |
| CPW(M,N) | 伝熱管壁の比熱 | $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | C_{pw} |
| AW(M,N) | 伝熱管壁の断面積 | m^2 | A_w |
| ALMDW(M,N) | 伝熱管壁の熱伝導率 | $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | λ_w |

表 5-5(31/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | FILM |
|--------------|-------------|-------------------------------------|------------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| DENFILM(M,N) | 水側壁面蒸気膜密度 | kg/m^3 | ρ_{film} |
| TFILM(M,N) | 水側壁面蒸気膜温度 | K | T_{film} |
| AMUF(M,N) | 水側壁面蒸気膜粘度 | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ | μ_{film} |
| ALMDF(M,N) | 水側壁面蒸気膜熱伝導率 | $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | λ_{film} |
| CPF(M,N) | 水側壁面蒸気膜比熱 | $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | C_{pfilm} |

表 5-5(32/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | PARAM |
|---------|-----------|-----------------------|-------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| GIN(N) | 伝熱管入口質量流束 | Kg/(m ² s) | $G=\rho V$ |
| TWA(N) | 伝熱管平均温度 | K | |
| WIN(N) | 伝熱管入口流量 | Kg/s | $W=\rho VA$ |
| WOUT(N) | 伝熱管出口流量 | Kg/s | $W=\rho VA$ |

表 5-5(33/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | H20PA |
|-------------|----------------------------------------|-----------------------|-----------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| TH20(M,N) | 伝熱管から水側へ熱交換量 Q_{H2O} を求め るための水側温度 | K | |
| HH20(M,N) | 水側熱通過率 | W/(m ² ·K) | |
| RH20(M,N) | 水側熱抵抗 (汚れ係数+接触熱抵抗) | m ² K/W | R_{H2O} |
| ALFH20(M,N) | 水側熱伝達率 | W/(m ² ·K) | 出力用 |
| BTH20(M,N) | 水側 bulk 温度 | K | 出力用 |
| PRH20(M,N) | 水側 Pr 数 | | 出力用 |
| ANUH20(M,N) | 水側 Nu 数 | | 出力用 |

表 5-5(34/34) 変数の共通ブロック説明

| コモン変数 | | コモン名 | ~N ~K |
|-------------------|------------|------|-------------------------------------------------------------|
| 変数名 | 意味 | 単位 | 備考 |
| 後ろ N 付いた変数: ~N | ~の前時刻の値 | ~と同じ | ~N : 前時刻 ϕ^n ~ : 現在 ϕ^{n+1} (or ϕ^{k+1}) |
| 後ろ K 付いた変数: ~K | 反復計算時~臨時の値 | ~と同じ | ~K : 臨時 ϕ^k |

5.3 入力ファイル

以下、表 5-2 に示す入力ファイルについて入力データの作成方法を説明する。

5.3.1 計算オプション

ファイル SEMI_MULT.INP における計算オプションの作成例を表 5-6 に示す。

表 5-6(1/2) 計算オプション

| 入力ファイル | SEMI_MULT.INP |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| データ | 説明 |
| &IDATA NTUBE= 2, NPLUG= 2, NTIEROD= 2 &END | 伝熱管数 プラグした伝熱管数 タイロッド数 |
| &ODATA NPLTMX= 2, JP LT(1)= 1,2, NOUTMX= 4, JOUT(1)= 1,2,4,6 NOINTV= 1 &END | SEMI_MULT.HIS に出力する伝熱管数 (最大 20) SEMI_MULT.HIS に出力する伝熱管番号 SEMI_MULT.OUT に出力する伝熱管数 (最大 100) SEMI_MULT.OUT に出力する伝熱管番号 SEMI_MULT.OUT に軸方向 (I 方向) 出力間隔 |
| &GENER TIME = 0.0, DTMX = 0.0025, TMAX = 100.0, DTOUT = 5.0, DTPLT= 0.1, DTREST= 5.0, TLOAD= 10.0, CFL = 0.8, THETA= 1.0, EPSLON= 0.1, GRAV = 9.80665 &END | 開始時間 時間ステップ上限 終了時間 SEMI_MULT.OUT に出力時間間隔 SEMI_MULT.HIS に時間変動出力間隔 Restart データ出力間隔 固定熱発生率(或いは伝熱管中心温度)を線形的に投入するための設定時間 CFL 条件 パラメータ (THETA=1.0 に限定) 反複計算圧力収束判定値 重力加速度 |
| &OPT11 IBETA = 1, ISTART = 0, IRESTART= 1, IDISTURB = 0, IFRICTION= 4, IDRIFT = 2, ISUBCOOL= 2, INUCLAE= 2, IXDNB =1, IDNB = 3, ITUBEP = 4, ITIERODP= 4, IHOMO =1, IBDRH =1 &END | 風上、中心差分選択(IBETA=1 に限定) 0: 初期条件データから計算開始; 1: 再スタートデータから計算再開 Restart データ出力要否判断(0: 出力しない; 1: 出力) 外乱使用パラメータ (0: 不使用; 1: 使用) 摩擦係数と二相流増倍係数相關式選択 ドリフトフラックス相關式選択 サブクール域熱伝達率相關式選択 核沸騰熱伝達率相關式選択 DNB クオリティー計算選択パラメータ DNB クオリティー相關式選択 伝熱管材料物性選択 タイロッド材料物性選択 二相流熱平衡選択(1: 热平衡; other: 热非平衡) 伝熱管壁面熱境界条件選択(Na 側と連成計算する際、IBDRH=1) |
| &OPT12 HFWA(1)=4*2.86615D-5, HFNA(1)= 6*0.0, HGAP(1)=4*2.149613D-5, | 水側汚れ係数 Na 側汚れ係数 2 重管界面の接触熱抵抗 |

表 5-6(2/2) 計算オプション

| 入力ファイル | SEMI_MULT.INP |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| データ | 説明 |
| XDNBIN(1)=4*0.556, ANUMAX= 1.0E20, ANUMIN= 5.0, FACTS = 0.87 &END | DNB クオリティー初期値 Nu 数最大限値 Nu 数最小限値 伝熱面積補正係数 |
| &INLET WF = 0.204365, HF = 1039966.409747, EF = 1016804.348681, DENF = 828.941774, VOLPI = 0.05 &END | 入口プレナムに流入する境界流量 入口プレナムに流入する境界エンタルピー 入口プレナムに流入する境界内部エネルギー 入口プレナムに流入する境界密度 入口プレナム体積 注 : HF は利用されないので、何の値でもよい。 |
| &OUTLT PB = 1.92E+07, AB = 1.0E-03, CKB = .200, WBLOW= 0.000000E+00, EBLOW= 1016804.348681, DENBLOW = 828.941774, VOLPO = 0.005 &END | 出口プレナムの境界圧力 出口プレナムから流出する境界面積 出口プレナムから流出する境界局部圧力損失係数 出口プレナムに流入する流量 出口プレナムに流入する内部エネルギー 出口プレナムに流入する密度 出口プレナム体積 注 : AB, CKB, WBLOW, EBLOW, DENBLOW は利用されないので、何の値でもよい。 |
| TUB 1 4 200 END | NPID JJS JJ E NGRD (伝熱管設定カード) NPID : 3 文字キーワードで伝熱管を設定する。 “TUB” : 伝熱管 “END” or “end” : 設定終了。(※最後に必須) JJS : 開始番号 JJ E : 終了番号 NGRD : メッシュ数 設定は上の段から順次行われる。書式は特に指定がなく、一つ以上のスペースで区切ること。 |
| TRD 5 6 200 END | NPID JJS JJ E NGRD (タイロッド設定カード) NPID : 3 文字キーワードでタイロッドを設定する。 “TRD” : タイロッド “END” or “end” : 設定終了。(※最後に必須) JJS : 開始番号 JJ E : 終了番号 NGRD : メッシュ数 設定は上の段から順次行われる。書式は特に指定がなく、一つ以上のスペースで区切ること。 |

5.3.2 節点データ

ファイル SEMI_MULT.MSH における節点の定義を図 5-1 に示す。圧力 p 等をセール中心に定義する。速度 V 、形状圧損係数 C_k 及び座標 z をセール境界で定義する。節点データの順番を表 5-7 に示す。

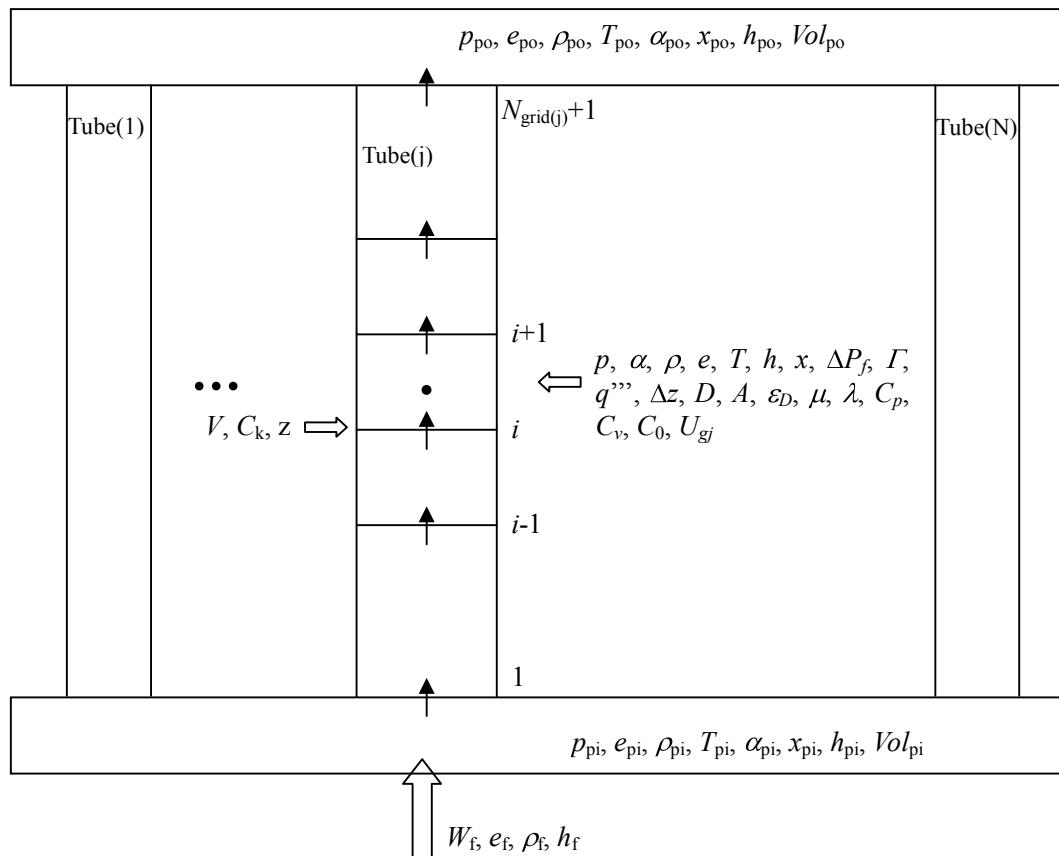


図 5-1 節点定義

表 5-7 節点データ

| 入力ファイル データ | SEMI_MULT.MSH 説明 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| MESH SETTING FOR TUBE FROM JJS TO JJE, MESH NUMBER= NGRD DZ ₁ DWI ₁ DWI0 ₁ DWO ₁ EPSD ₁ CK ₁ BDRH ₁ DZ ₂ DWI ₂ DWI0 ₂ DWO ₂ EPSD ₂ CK ₂ BDRH ₂ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ DZ _{NGRD} DWI _{NGRD} DWI0 _{NGRD} DWO _{NGRD} EPSD _{NGRD} CK _{NGRD} BDRH _{NGRD} CK _{NGRD+1} | 240 文字以内の伝熱管説明文 JJS : 開始番号 JJE : 終了番号 NGRD : メッシュ数 変数は変数説明に参照 段数は設定カードに対応する。 |
| MESH SETTING FOR TIEROD FROM JJS TO JJE, MESH NUMBER= NGRD DZ ₁ DWI ₁ DWO ₁ DZ ₂ DWI ₂ DWO ₂ ↓ ↓ ↓ DZ _{NGRD} DWI _{NGRD} DWO _{NGRD} | 240 文字以内のタイロッド説明文 JJS : 開始番号 JJE : 終了番号 NGRD : メッシュ数 変数は変数説明に参照 段数は設定カードに対応する。 |

5.3.3 初期条件としての熱流動データ

ファイル SEMI_MULT.INI における初期条件としての熱流動データの順番を表 5-8 に示す。

表 5-8 初期条件データ

| 入力ファイル データ | SEMI_MULT.INI 説明 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| INITIAL CONDITION FOR TUBE FROM JJS TO JJE, MESH NUMBER= NGRD $P_1 \quad ALF_1 \quad VL_1 \quad VG_1 \quad TL_1 \quad TG_1 \quad TW_1$ $P_2 \quad ALF_2 \quad VL_2 \quad VG_2 \quad TL_2 \quad TG_2 \quad TW_2$ $\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$ $P_{NGRD} \quad ALF_{NGRD} \quad VL_{NGRD} \quad VG_{NGRD} \quad TL_{NGRD} \quad TG_{NGRD} \quad TW_{NGRD}$ $VL_{NGRD+1} \quad VG_{NGRD+1}$ | 240 文字以内の伝熱管説明文 JJS : 開始番号 JJE : 終了番号 NGRD : メッシュ数 変数は変数説明に参照 段数は設定カードに対応する。 |
| INITIAL DONDITION FOR INLET PLENUM AND OUTLET PLENUM $PPI \quad ALFPI \quad XPI \quad EPI \quad DENPI$ $PP0 \quad ALFP0 \quad XPO \quad EP0 \quad DENPO$ | 240 文字以内のプレナム説明文 入口プレナム 出口プレナム 変数は変数説明に参照 |
| INITIAL CONDITION FOR TIEROD FROM JJS TO JJE, MESH NUMBER= NGRD TW_1 TW_2 \downarrow TW_{NGRD} | 240 文字以内のタイロッド説明文 JJS : 開始番号 JJE : 終了番号 NGRD : メッシュ数 変数は変数説明に参照 段数は設定カードに対応する。 |

5.3.4 再スタート用の初期熱流動条件

ファイル SEMI_MULT.RES における再スタート用の初期熱流動データは再スタートための出力データファイル SEMI_MULT.BAK と同じである。5.4.3 項に参照する。

5.4 出力ファイル

以下、表 5-3 に示す出力ファイルについて出力データの意味を説明する。

5.4.1 時間割付けの熱流動データ

ファイル SEMI_MULT.OUT における時間割付けの熱流動データの意味を表 5-9 に示す。

表 5-9 時間割付けの熱流動データ

| 出力ファイル | SEMI_MULT.OUT |
|-------------------------------|----------------------------------------|
| データ | 意味 |
| NTUBE, NPLUG, NTIEROD | 伝熱管数, プラグした伝熱管数, タイロッド数 |
| NPLTMX | SEMI_MULT.HIS に出力する伝熱管数 |
| NOUTMX, NOINTV | SEMI_MULT.OUT に出力する伝熱管数, 軸方向出力間隔 |
| JPLT | SEMI_MULT.HIS に出力する伝熱管番号 |
| JOUT | SEMI_MULT.OUT に出力する伝熱管番号 |
| TIME, DTMX, TMAX | 開始時間, 時間ステップ上限, 終了時間 |
| DTOUT | SEMI_MULT.OUT に出力時間間隔 |
| DTPLT, DTREST | SEMI_MULT.HIS に出力時間間隔, Restart データ出力間隔 |
| TLOAD | 固定熱発生率(伝熱管中心温度)投入の設定時間 |
| CFL, THETA | CFL 条件, パラメータ (THETA=1.0 に限定) |
| EPSILON, GRAV | 反復計算圧力収束判定値, 重力加速度 |
| IBETA, ISTART | 風上、中心差分選択, 計算開始選択パラメータ |
| IRESTART, IDISTURB | Restart データ出力要否判断, 外乱使用パラメータ |
| IFRICTION, | 摩擦係数と二相流増倍係数相関式選択 |
| IDRIFT | ドリフトフラックス相関式選択 |
| ISUBCOOL | サブクール域熱伝達率相関式選択 |
| INUCLEATE | 核沸騰熱伝達率相関式選択 |
| IXDNB | DNB クオリティー計算選択パラメータ |
| IDNB | DNB クオリティー相関式選択 |
| ITUBEP, ITIERODP | 伝熱管材料物性選択, タイロッド材料物性選択 |
| IHOMO, IBDRH | 二相流熱平衡選択, 伝熱管壁面熱境界条件選択 |
| HFWA(J), HFNA(J), HGAP(J) | 水側汚れ係数, Na 側汚れ係数, 2 重管界面の接触熱抵抗 |
| XDNBIN(J) | DNB クオリティー初期値 |
| ANUMAX, ANUMIN, FACTS | Nu 数最大限値, Nu 数最小限値, 伝熱面積補正係数 |
| WF, HF, | 入口プレナムに流入する境界流量, エンタルピー, |
| EF, DENF, VOLPI | 内部エネルギー, 密度, 入口プレナム体積 |
| PB, | 出口プレナムの境界圧力, |
| AB, CKB | 出口プレナムから流出する境界面積, 局部圧力損失係数, |
| WBLOW, EBLLOW, | 出口プレナムに流入する流量, 内部エネルギー, |
| DENBLOW, VOLPO | 密度, 出口プレナム体積 |
| Time[s] | 時刻 |
| 数字, Z[m], P[Pa] | 伝熱管番号、軸方向座標、圧力 |
| DenL[kg/m3], DenG[kg/m3] | 液相密度、気相密度 |
| TemL[K], TemG[K], VL[m/s] | 液相温度、気相温度、液相速度 |
| VG[m/s], Void, X, Xdnb | 気相速度、ボイド率、クオリティー、DNB クオリティー |
| Tw[K], Tbulk[K], Alt[W/m2K] | 伝熱管肉厚中心温度、水蒸気バルク温度、壁面熱伝達率 |
| Qflux[W/m2], Tfilm[K] | 熱流束、蒸気膜温度 |
| MUf[Pa*s], LMDf[W/m*K] | 蒸気膜粘性係数、蒸気膜熱伝導率 |
| CPf[J/kgK], Pr, NU | 蒸気膜比熱、Pr 数、Nu 数 |
| PPI, DENLPI, DENGPI, TLPI, | 入口プレナムの圧力、液相密度、気相密度、液相温度、 |
| TGPI, ALFPPI, XPI, EPI, DENPI | 気相温度、ボイド率、クオリティー、内部エネルギー、密度 |
| PPO, DENLPO, DENGPO, TLPO, | 出口プレナムの圧力、液相密度、気相密度、液相温度、 |
| TGPO, ALFPPO, XPO, EPO, | 気相温度、ボイド率、クオリティー、内部エネルギー、 |
| DENPO | 密度 |
| Tube No, Av.Tem[K], | 伝熱管番号、伝熱管平均温度 |
| Win[kg/s], Wout[kg/s], | 入口流量、出口流量 |
| Gin[kg/m2s], Vin[m/s] | 入口質量流束、入口速度 |

5.4.2 時間的変動の記録データ

ファイル SEMI_MULT.HIS における時間的変動の記録データの意味を表 5-10 に示す。

表 5-10 時間的変動の記録データ

| 出力ファイル | SEMI_MULT.HIS |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| データ | 意味 |
| TIME, WIN _{1~NPLTMX} , WOUT _{1~NPLTMX} , PPI, ELPI, DENLPI, TLPI | 時刻, 入口流量 _{1~NPLTMX} , 出口流量 _{1~NPLTMX} , 入口プレナム圧力、 内部エネルギー、密度、温度 |

5.4.3 再スタートための出力データ

ファイル SEMI_MULT.BAK における再スタートのための出力データの意味を表 5-11 に示す。

表 5-11 再スタートのための出力データ

| 出力ファイル | SEMI_MULT.BAK |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| データ | 意味 |
| TIME | 時刻 |
| NGRID | メッシュ分割数 |
| V VL VG P ALF X E DEN EL DENL TL EG DENG TG TW QANA QAW TWNA TWW | 速度、液相速度、気相速度、圧力、ボイド率、クオリティー、 内部エネルギー、密度、液相内部エネルギー、液相密度、 液相温度、気相内部エネルギー、気相密度、気相温度、 伝熱管肉厚中心温度、Na 側熱流束、水側熱流束、 Na 側伝熱管表面温度、水側伝熱管表面温度 |
| PPI, ALFPPI, XPI, EPI, DENPI, ELPI, DENLPI, TLPI, EGPI, DENGPI, TGPI PPO, ALFPO, XPO, EPO, DENPO, ELPO, DENLPO, TLPO, EGPO, DENGPO, TGPO | 入口プレナム圧力、ボイド率、クオリティー、内部エネルギー、 密度、液相内部エネルギー、液相密度、液相温度、 気相内部エネルギー、気相密度、気相温度 出口プレナム圧力、ボイド率、クオリティー、内部エネルギー、 密度、液相内部エネルギー、液相密度、液相温度、 気相内部エネルギー、気相密度、気相温度 |
| NGRID TW QANA QAW TWNA TWW | メッシュ分割数 (プラグ管及びタイロッド) 肉厚中心温度、Na 側熱流束、水側熱流束、 Na 側伝熱管表面温度、水側伝熱管表面温度 |

6. TSG 水側モジュールの実行方法

TSG 水側モジュールは Microsoft Windows、Linux 等、Fortran プログラムが動作可能な計算機環境で動作する。以下に実行例を紹介する。

6.1 PC 機で実行方法

PC 機で並列計算を実行しない場合、MPI 通信モジュール「mod_mcmm_mpi_comm.f90」には MPI 通信処理をコメントとすることで機能を無効化する。

Intel Visual Fortran Composer を利用して、表 5-1 のソースコードをコンパイルして実行形式ファイル（例えば、SEMI_MULT.EXE）を生成する。実行形式ファイルと入力ファイルを同じフォルダに置いて実行できる。計算に要する時間は、CPU 性能等の計算機環境の他、主にタイムステップの設定や節点個数によって影響を受ける。計算の実行途中及び終了後に出力ファイルが生成される。

解析方式は表 6-1 に示す。再スタートデータから計算再開の場合、入力データファイル SEMI_MULT.RES は前の解析に得られた SEMI_MULT.BAK をコピーして、名前を変更して使用する。ただし、開始時間 TIME を再修正する必要がある。

表 6-1 解析方式選択

| 解析方式： | ①初期条件データから計算 | ②再スタートデータから計算再開 |
|-----------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 入力ファイル： | SEMI_MULT.INP SEMI_MULT.MSH SEMI_MULT.INI | SEMI_MULT.INP SEMI_MULT.MSH SEMI_MULT.RES |
| 主要なオプション： | ISTART=0 | ISTART=1 |
| 出力ファイル： | SEMI_MULT.HIS、SEMI_MULT.OUT と SEMI_MULT.BAK | |

解析結果から定常流動状態の判断方法について、出力ファイル SEMI_MULT.HIS によりチャンネルの出口流量は入口流量と一致し、また時間的に変動しない場合、定常流動状態として判断することが一つの方法である。

6.2 PC クラスタで並列処理方法

PC クラスタで並列計算を実行する場合、MPI 通信モジュール「mod_mcmm_mpi_comm.f90」には MPI 通信処理機能を有効化する。

図 6-1 に Makefile 文を示す。Make コマンドで表 5-1 のソースコードをコンパイルして実行形式ファイルを生成する。プロセッサ数を指定して実行する。

```
PROGRAM    = semi_multi_parallel
FC        = mpiifort -c -r8
CC        = mpicc -c
LD        = mpiifort

OBJECTS = \
    mod_time_diagnostic.o      \
    mod_mcnp_mpi_comm.o       \
    IAPWS-IF97-v1.o  \
    SEMI-multi-v6.o  \

.SUFFIXES:
.SUFFIXES: .o .f90 .F .c

.f90.o:; $(FC) -c $(FFLAGS) $<
.F.o:; $(FC) -c $(FFLAGS) $<

.f.o:
    @echo "  Compiling $(PROGRAM) Fortran source files"
    $(FC) $(FFLAGS) $<

.c.o:
    @echo "  Compiling $(PROGRAM) C source files"
    $(CC) $(CFLAGS) $<

$(PROGRAM): $(OBJECTS)
    $(LD) $(LFLAGS) -o $(PROGRAM) $(OBJECTS)

#compile: $(OBJECTS)
```

図 6-1 PC クラスタでの Makefile 文

7. TSG 水側モジュールによる計算実行例

本章では TSG 水側モジュールを用いたパラレルチャンネルにおける不安定流動試験の再現解析例を示す。

解析手順として、まず 1 本管で解析を実施して定常流動状態のデータを得る。次に定常流動状態の解析結果を初期条件として利用し、パラレルチャンネルにおける非定常の不安定流動解析を実施する。更に多チャンネル解析の場合に並列処理を示す。出力データファイルによる図形化も紹介する。

7.1 解析条件

再現解析の対象として、参考文献^{23,24)}に記載されている 2 本管パラレルチャンネルにおける不安定流動の実験を選んだ。

図 7-1 に示すように、解析体系は入口プレナム、出口プレナム、及びその間の 2 本管パラレルチャンネルとする。解析の境界条件は入口プレナムに流入する水総流量、水温度、出口プレナムの圧力、ヒーターの熱流束となる。メッシュ分割については、蒸発開始点付近で $\Delta z = 0.0025\text{m}$ 、他の場所では $\Delta z = 0.01\sim0.05\text{m}$ として、メッシュ総数は 47 分割である。

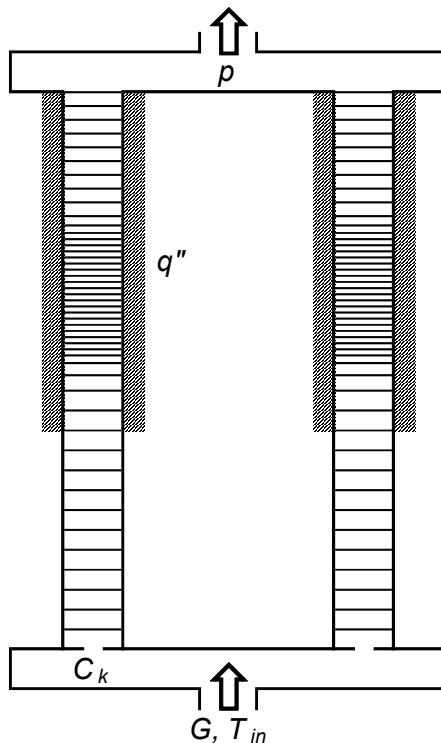


図 7-1 解析体系及びメッシュ分割略図（2 本管）

7.2 1本管解析

2本管パラレルチャンネルにおける不安定流動解析の初期条件を得るために、まず、1本管で解析を実施し、定常流動状態を得る。

表 7-1 に入力ファイル SEMI_MULT.INP を示す。表 7-2 に入力メッシュファイル SEMI_MULT.MSH を示す。表 7-3 に入力初期条件ファイル SEMI_MULT.INI を示す。最初に温度 368K の単相水がチャンネル内に満たされているものとし、入口境界条件として 1 本管に流入する水の平均流量を与える。入口圧力損失形状係数を固定し、チャンネル内が定常流動状態になるまで計算する。

表 7-1 1本管解析入力ファイル SEMI_MULT.INP

```

&IDATA
  NTUBE= 1, NPLUG= 0, NTIEROD= 0
&END
&ODATA
  NPLTMX= 1, JPLT= 1
  NOUTMX= 1, JOUT= 1
  NOINTV= 1
&END
&GENER
  TIME = 0.0, DTMX = 0.005, TMAX = 50.0,
  DTOUT = 10.0, DTPLT= 0.1, DTREST= 10.0, TLLOAD= 5.0,
  CFL = 0.125, THETA= 1.0, EPSLON= 0.0002, GRAV = 9.80665
&END
&OPT11
  IBETA = 1, ISTART = 0, IRESTART = 1, IDISTURB = 0, IFRICTION= 4,
  IDRIFT = 2, ISUBCOOL = 2, INUCLEATE= 1, IXDNB = 1, IDNB = 3,
  ITUBEP = 4, ITIERODP = 4, IHOMO = 1, IBDRH = 3
&END
&OPT12
  HFWA(1)=1*2.86615E-5, HFNA(1)=1*0.0, HGAP(1)=1*2.149613E-5,
  XDNBIN(1)=1*0.556,
  ANUMAX= 1.0E20, ANUMIN= 5.0, FACTS = 1.0
&END
&INLET
  WF = 8.03552546E-3,
  HF = 3.97413959E+05,
  EF = 3.97289220E+05,
  DENF = 962.008123
  VOLPI = 0.01
&END
&OUTLT
  PB = 1.20000000E+05,
  AB = 4.90873877E-04,
  CKB = 0.200,
  WBLOW = 0.00000000E+00,
  EBLOW = 3.97289220E+05,
  DENBLOW = 962.008123,
  VOLPO = 0.01
&END
TUB 1 1 47
END
END

```

表 7-2 1本管解析入力ファイル SEMI_MULT.MSH

表 7-3 1本管解析入力ファイル SEMI_MULT.INI

表 7-4 に出力ファイル SEMI_MULT.OUT を示す。表 7-5 に出力ファイル SEMI_MULT.HIS を示す。表 7-6 に出力ファイル SEMI_MULT.BAK を示す。

表 7-4(1/2) 1 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.OUT

表 7-4(2/2) 1 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.OUT

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------------|------------|------------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.717500 | 1.22204662E+05 | 9.55257E+02 | 7.11223E-01 | 377.409 | 378.422 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.5256E+03 | 8.6505E+04 | 388.062 | 1.2814E-02 | 2.0620E-02 | 2.6030E-02 | 2.0620E-02 | 1.6756E-01 | 4.3296E+01 |
| 0.720000 | 1.2220278E+05 | 9.51555E+02 | 7.11093E-01 | 377.548 | 378.417 | 0.231626 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3241E+03 | 8.6505E+04 | 388.132 | 1.2817E-02 | 2.0617E-02 | 2.6033E-02 | 2.0617E-02 | 1.6732E+00 | 4.3275E+01 |
| 0.722500 | 1.2198898E+05 | 9.5052E+02 | 7.10833E-01 | 377.824 | 378.405 | 0.231650 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.132 | 1.2817E-02 | 2.0617E-02 | 2.6033E-02 | 2.0617E-02 | 1.6708E+00 | 4.3255E+01 |
| 0.725000 | 1.2197506E+05 | 9.54956E+02 | 7.10833E+02 | 377.962 | 378.400 | 0.231700 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.273 | 1.2820E-02 | 2.0620E-02 | 2.6045E+02 | 2.0620E-02 | 1.6613E+03 | 4.3224E+01 |
| 0.727500 | 1.2195124E+05 | 9.54898E+02 | 7.10573E+02 | 377.100 | 378.394 | 0.231725 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.343 | 1.2822E-02 | 2.0622E-02 | 2.6045E+02 | 2.0622E-02 | 1.6684E+03 | 4.3224E+01 |
| 0.730000 | 1.2192974E+05 | 9.54745E+02 | 7.10443E+02 | 378.238 | 378.388 | 0.231750 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.732500 | 1.21919035E+05 | 9.54643E+02 | 7.10443E+01 | 378.337 | 378.383 | 0.231775 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.735000 | 1.2187974E+05 | 9.54540E+02 | 7.10313E+01 | 378.378 | 378.378 | 0.231799 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.737500 | 1.2185894E+05 | 9.54539E+02 | 7.1020E+01 | 378.370 | 378.370 | 0.231822 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.740000 | 1.2182827E+05 | 9.54544E+02 | 7.10122E+01 | 378.370 | 378.370 | 0.231845 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.742500 | 1.2179702E+05 | 9.54556E+02 | 7.10062E+02 | 378.363 | 378.363 | 0.231862 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.745000 | 1.2178787E+05 | 9.54555E+02 | 7.09938E+01 | 378.356 | 378.356 | 0.231876 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.747500 | 1.2171746E+05 | 9.54559E+02 | 7.09536E+02 | 378.350 | 378.344 | 0.231890 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.750000 | 1.2171545E+05 | 9.54564E+02 | 7.09417E+01 | 378.344 | 378.338 | 0.231914 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.752500 | 1.2168897E+05 | 9.54569E+02 | 7.09270E+01 | 378.339 | 378.339 | 0.231938 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.755000 | 1.2168540E+05 | 9.54575E+02 | 7.09082E+02 | 378.339 | 378.339 | 0.231962 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.757500 | 1.2168240E+05 | 9.54586E+02 | 7.08722E+02 | 378.331 | 378.314 | 0.231985 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.760000 | 1.2167972E+05 | 9.54586E+02 | 7.08625E+02 | 378.329 | 378.314 | 0.232009 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.770000 | 1.2167016E+05 | 9.54607E+02 | 7.08407E+02 | 378.326 | 378.315 | 0.232033 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.775000 | 1.2167187E+05 | 9.54635E+02 | 7.07171E+01 | 378.248 | 378.248 | 0.232057 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.780000 | 1.2161494E+05 | 9.54664E+02 | 7.06333E+01 | 378.209 | 378.199 | 0.232081 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.830000 | 1.2098301E+05 | 9.54683E+02 | 7.05424E+01 | 378.169 | 378.169 | 0.232105 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.850000 | 1.2081981E+05 | 9.54724E+02 | 7.04491E+01 | 378.128 | 378.128 | 0.232130 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.870000 | 1.2083616E+05 | 9.54747E+02 | 7.03532E+02 | 378.086 | 378.086 | 0.232154 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.890000 | 1.2084559E+05 | 9.54820E+02 | 7.02547E+02 | 378.043 | 378.043 | 0.232178 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.910000 | 1.2083997E+05 | 9.54820E+02 | 7.01532E+02 | 377.999 | 377.999 | 0.232202 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.930000 | 1.2007850E+05 | 9.54854E+02 | 7.00495E+01 | 377.953 | 377.953 | 0.232226 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| 0.950000 | 1.20000000E+05 | 9.61554E+02 | 7.00082E+01 | 377.909 | 377.909 | 0.232250 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 4.3229E+03 | 8.6505E+04 | 388.444 | 1.2823E+00 | 2.0623E+00 | 2.6045E+02 | 2.0623E+02 | 1.6613E+03 | 4.3193E+01 |
| Time [s] | Channel 1 | 1 | Channel 1 | 1 | Pin [Pa] | Pin [Pa] | EIn [J/kg] | EIn [J/kg] | DENin [kg/m^3] | Tin [K] | | | | | | | | | |
| 0.00000000 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 0.00000000E+00 | 1.20000000E+00 | 1.20000000E+00 | 3.9728922000E+00 | 3.9728922000E+00 | 9.6200812300E+02 | 3.680000001E+02 | | | | | | | | | |
| 0.10015467 | 1.074085634E-02 | 1.074085634E-02 | 1.074085634E-02 | 1.074085634E-02 | 1.3282497809E-02 | 1.3282497809E-02 | 3.9728922078E+00 | 3.9728922078E+00 | 9.6200813464E+02 | 3.68000084285E+02 | | | | | | | | | |
| 0.20036146 | 6.7919379654E-03 | 6.7919379654E-03 | 6.7919379654E-03 | 6.7919379654E-03 | 7.1057407817E-03 | 7.1057407817E-03 | 3.12813414328E+05 | 3.12813414328E+05 | 9.6200813464E+02 | 3.68000084285E+02 | | | | | | | | | |
| 0.30036930 | 8.6015179448E-03 | 8.6015179448E-03 | 8.6015179448E-03 | 8.6015179448E-03 | 8.6095641163E-03 | 8.6095641163E-03 | 3.1293814978019E+05 | 3.1293814978019E+05 | 9.6200813464E+02 | 3.68000084285E+02 | | | | | | | | | |
| 0.40076149 | 7.7780950212E-03 | 7.7780950212E-03 | 7.7780950212E-03 | 7.7780950212E-03 | 7.7867949940E-03 | 7.7867949940E-03 | 3.1294437230E+05 | 3.1294437230E+05 | 9.6200813464E+02 | 3.68000084285E+02 | | | | | | | | | |
| 0.50003934 | 8.1511087983E-03 | 8.1511087983E-03 | 8.1511087983E-03 | 8.1511087983E-03 | 8.1623725841E-03 | 8.1623725841E-03 | 3.1294437230E+05 | 3.1294437230E+05 | 9.6200813464E+02 | 3.68000084285E+02 | | | | | | | | | |
| 0.60042669 | 7.983302502E-03 | 7.983302502E-03 | 7.983302502E-03 | 7.983302502E-03 | 7.9960218267 | | | | | | | | | | | | | | |

表 7-5(2/3) 1 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.HIS

| | | | | | | |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1.50106785 | 8.0355830660E-03 | 8.058730963E-03 | 1.2937817592E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202914E+02 | 3.6800061636E+02 |
| 1.60000033 | 8.03553361727E-03 | 8.0585361884E-03 | 1.2937754975E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202888E+02 | 3.6800061632E+02 |
| 1.70027148 | 8.03555592174E-03 | 8.05839308929E-03 | 1.2937692296E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202862E+02 | 3.6800061627E+02 |
| 1.80052590 | 8.0355488895E-03 | 8.0592201213E-03 | 1.2937628312E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202835E+02 | 3.6800061623E+02 |
| 1.90076558 | 8.0355540017E-03 | 8.0594647524E-03 | 1.2937563302E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202808E+02 | 3.6800061619E+02 |
| 2.00098450 | 8.03555621477E-03 | 8.0596547193E-03 | 1.2937498038E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202781E+02 | 3.6800061615E+02 |
| 2.10118863 | 8.0355531975E-03 | 8.0598099200E-03 | 1.2937432097E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202754E+02 | 3.6800061610E+02 |
| 2.2002219 | 8.0355529511E-03 | 8.0595333448E-03 | 1.2937366818E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202712E+02 | 3.6800061606E+02 |
| 2.30019293 | 8.0355532357E-03 | 8.06003730826E-03 | 1.2937300297E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202699E+02 | 3.6800061602E+02 |
| 2.40034683 | 8.0355532580E-03 | 8.06011240118E-03 | 1.2937233569E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202671E+02 | 3.6800061597E+02 |
| 2.50048386 | 8.0355533720E-03 | 8.06011989003E-03 | 1.2937166634E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202643E+02 | 3.6800061593E+02 |
| 2.60060401 | 8.0355534143E-03 | 8.0602648661E-03 | 1.2937099545E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202615E+02 | 3.6800061588E+02 |
| 2.70070726 | 8.0355534912E-03 | 8.06032438387E-03 | 1.2937032309E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202587E+02 | 3.6800061584E+02 |
| 2.80079558 | 8.0355535282E-03 | 8.0603793277E-03 | 1.293664952E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202594E+02 | 3.6800061580E+02 |
| 2.90086297 | 8.0355535687E-03 | 8.0604309754E-03 | 1.2937166634E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202531E+02 | 3.6800061575E+02 |
| 3.00091539 | 8.0355536396E-03 | 8.0604803134E-03 | 1.2936829899E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202513E+02 | 3.6800061571E+02 |
| 3.10095083 | 8.0355536824E-03 | 8.0605279918E-03 | 1.2936762219E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202475E+02 | 3.6800061566E+02 |
| 3.20110230 | 8.0075269306E-03 | 1.6485404845E-02 | 1.2963319175E+05 | 3.9728922060E+05 | 9.6201213536E+02 | 3.6800061531E+02 |
| 3.30108858 | 8.08/0574592E-03 | 1.5778607594E-02 | 1.2957672116E+05 | 3.9728922060E+05 | 9.6201211184E+02 | 3.6800062940E+02 |
| 3.401110672 | 8.0370514328E-03 | 1.4587332677E-02 | 1.2965660956E+05 | 3.9728922060E+05 | 9.6201214511E+02 | 3.6800063465E+02 |
| 3.50098408 | 7.9716269373E-03 | 1.1895833409E-02 | 1.2950209989E+05 | 3.9728922059E+05 | 9.6201208076E+02 | 3.6800062450E+02 |
| 3.60086456 | 8.0842568433E-03 | 1.1680968031E-02 | 1.2932948503E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201200886E+02 | 3.6800061316E+02 |
| 3.70084156 | 7.9837990305E-03 | 1.3268377257E-02 | 1.2944627856E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201205709E+02 | 3.6800062077E+02 |
| 3.80013619 | 7.99808517E-03 | 1.0759690932E-02 | 1.2951838573E+05 | 3.9728922059E+05 | 9.6201208754E+02 | 3.6800062557E+02 |
| 3.90073778 | 8.0699195929E-03 | 1.2120829923E-02 | 1.2936845756E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202590E+02 | 3.6800061572E+02 |
| 4.00039924 | 8.0306226608E-03 | 1.0585024744E-02 | 1.2957676143E+05 | 3.9728922060E+05 | 9.6201211185E+02 | 3.6800062941E+02 |
| 4.10059884 | 8.0424009813E-03 | 1.1785719980E-02 | 1.2934323217E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201204381E+02 | 3.6800061406E+02 |
| 4.20003240 | 8.0003626207E-03 | 9.5712901584E-03 | 1.2925944317E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201197969E+02 | 3.6800060855E+02 |
| 4.30065833 | 8.0654008408E-03 | 1.1836254035E-02 | 1.2958527694E+05 | 3.9728922060E+05 | 9.6201208713E+02 | 3.6800061154E+02 |
| 4.4005889 | 8.0354423263E-03 | 1.0842825084E-02 | 1.2927563563E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201206477E+02 | 3.6800062198E+02 |
| 4.50044486 | 8.0474203494E-03 | 9.66328291068E-03 | 1.2947892167E+05 | 3.9728922059E+05 | 9.620120703E+02 | 3.6800061867E+02 |
| 4.60016813 | 8.0320845340E-03 | 1.1266854016E-02 | 1.295215894E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.620120887E+02 | 3.6800062578E+02 |
| 4.70040375 | 8.0479660558E-03 | 9.8022871975E-03 | 1.292867932E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201199103E+02 | 3.6800061034E+02 |
| 4.80000431 | 8.0078824078E-03 | 8.9278458310E-03 | 1.2929019385E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201199250E+02 | 3.6800061058E+02 |
| 4.90008681 | 8.0657974937E-03 | 9.8833452689E-03 | 1.2946372338E+05 | 3.9728922059E+05 | 9.6201206477E+02 | 3.6800062198E+02 |
| 5.00042869 | 8.0193574974E-03 | 9.2339085732E-03 | 1.2941339524E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201204381E+02 | 3.6800061518E+02 |
| 5.10024549 | 8.0578655579E-03 | 9.2772297384E-03 | 1.2941172729E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201204312E+02 | 3.6800061856E+02 |
| 5.20033774 | 8.0423174267E-03 | 9.0690546262E-03 | 1.2946734656E+05 | 3.9728922059E+05 | 9.6201206628E+02 | 3.6800062222E+02 |
| 5.30017507 | 8.0232703781E-03 | 8.9779587524E-03 | 1.2936915909E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202539E+02 | 3.6800061576E+02 |
| 5.40014030 | 8.0357780850E-03 | 8.8621709083E-03 | 1.2936025506E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201202168E+02 | 3.6800061518E+02 |
| 5.50012823 | 8.0352675572E-03 | 8.7098928308E-03 | 1.2934465680E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201201518E+02 | 3.6800061415E+02 |
| 5.60003122 | 8.0401491366E-03 | 8.5322094721E-03 | 1.2931818249E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201200415E+02 | 3.6800061241E+02 |
| 5.70009593 | 8.0346793519E-03 | 8.4408421411E-03 | 1.29286969334E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201199229E+02 | 3.6800061054E+02 |
| 5.80009067 | 8.0344423317E-03 | 8.3071514951E-03 | 1.2926599592E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201198159E+02 | 3.6800060885E+02 |
| 5.90013363 | 8.0371560951E-03 | 8.2696747645E-03 | 1.2925045346E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201197594E+02 | 3.6800060796E+02 |

表 7-5(3/3) 1 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.HIS

| | | | | | | |
|-------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|
| 6.00033001 | 8.03688666116E-03 | 8.2012556567E-03 | 1.29233911896E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.620119712E+02 | 3.6800060722E+02 |
| 6.10035342 | 8.0356144024E-03 | 8.1470138279E-03 | 1.2922744491E+05 | 3.9728922058E+05 | 9.6201196636E+02 | 3.6800060645E+02 |
| 6.20025506 | 8.0355784001E-03 | 8.1104626230E-03 | 1.2921852906E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201196265E+02 | 3.6800060587E+02 |
| 6.30006973 | 8.0358117467E-03 | 8.0863119683E-03 | 1.2921337749E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201196067E+02 | 3.6800060555E+02 |
| 6.40023470 | 8.0356850436E-03 | 8.0701376113E-03 | 1.2921081532E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195924E+02 | 3.6800060536E+02 |
| 6.50035589 | 8.0355616835E-03 | 8.0592250105E-03 | 1.2920847192E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195846E+02 | 3.6800060521E+02 |
| 6.60003467 | 8.0355686056E-03 | 8.0518116591E-03 | 1.292066866067E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195779E+02 | 3.6800060510E+02 |
| 6.70010415 | 8.0355741339E-03 | 8.0467039969E-03 | 1.29205686483E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195737E+02 | 3.6800060503E+02 |
| 6.80015893 | 8.0355512252E-03 | 8.0431967168E-03 | 1.2920517380E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.620119579E+02 | 3.6800060499E+02 |
| 6.90020359 | 8.0355383334E-03 | 8.04078669679E-03 | 1.29204667798E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195688E+02 | 3.6800060496E+02 |
| 7.00024130 | 8.0355370425E-03 | 8.0391307082E-03 | 1.2920432594E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195673E+02 | 3.6800060493E+02 |
| 7.10027424 | 8.0355346609E-03 | 8.0379833330E-03 | 1.2920409980E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195664E+02 | 3.6800060492E+02 |
| 7.20030393 | 8.0355308462E-03 | 8.0372133491E-03 | 1.2920394263E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195657E+02 | 3.6800060491E+02 |
| 7.30033139 | 8.0355287614E-03 | 8.0366788979E-03 | 1.2920383220E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195653E+02 | 3.6800060490E+02 |
| 7.40035733 | 8.0355280984E-03 | 8.0363129706E-03 | 1.2920375744E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195650E+02 | 3.6800060490E+02 |
| 7.50038224 | 8.0355273773E-03 | 8.0360626617E-03 | 1.292037195E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6200060489E+02 | 3.6800060489E+02 |
| 7.60040645 | 8.0355266128E-03 | 8.0358915779E-03 | 1.2920367244E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195646E+02 | 3.6800060489E+02 |
| 7.70001856 | 8.0355262535E-03 | 8.0357750507E-03 | 1.2920364849E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195645E+02 | 3.6800060489E+02 |
| 7.80004197 | 8.0355260412E-03 | 8.0356951341E-03 | 1.2920363230E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195644E+02 | 3.6800060489E+02 |
| 7.90006515 | 8.0355258431E-03 | 8.0356407314E-03 | 1.2920362128E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195644E+02 | 3.6800060489E+02 |
| 8.00008819 | 8.0355257135E-03 | 8.0356037349E-03 | 1.2920361373E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195644E+02 | 3.6800060489E+02 |
| (省略) | | | | | | |
| 48.50023423 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 48.60025694 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254603E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 48.70027966 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254603E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 48.80030238 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254603E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 48.90032510 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.00034782 | 8.0355254604E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.10037054 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254603E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.20039325 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254603E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.30004536 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254603E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.40002708 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.50004979 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.60007251 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254603E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.70009523 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.80011795 | 8.0355254603E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |
| 49.90014067 | 8.0355254604E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.2920359782E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 |

表 7-6(1/3) 1 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.BAK

表 7-6(23) 1 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.BAK

| | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 3.7699494895E+02 | 2.5122339052E+06 | 7.1161265708E-01 | 3.7843939846E+02 | 4.0181028726E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9722162178E+02 |
| 2.3155132080E-01 | 2.3122273208E+06 | 7.114233427E+01 | 3.7843934427E+02 | 4.0195663525E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9740801874E+02 |
| 3.7713313583E+02 | 2.5122075649E+06 | 7.114233427E+01 | 3.7843934427E+02 | 4.0195663525E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9740801874E+02 |
| 2.3157602426E-01 | 2.3157602426E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.2207047622E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.3637586912E+05 | 9.5535899230E+05 |
| 3.7722131656E+02 | 2.512207380E+06 | 7.1135262208E-01 | 3.7842808977E+02 | 4.0210300336E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9755440558E+02 |
| 2.3160075289E-01 | 2.3160075289E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.2204662467E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.3585925156E+05 | 9.5525689308E+05 |
| 3.7740949113E+02 | 2.5122141507E+06 | 7.1122262307E-01 | 3.7842243497E+02 | 4.0224936159E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.977078301E+02 |
| 2.3162550671E-01 | 2.3162550671E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.2202277568E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.3754263398E+05 | 9.5515471183E+05 |
| 3.7754765953E+02 | 2.5122075649E+06 | 7.1109263639E-01 | 3.7841677987E+02 | 4.02395799E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9784715030E+02 |
| 2.3165028572E-01 | 2.3165028572E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.219982928E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.38112601639E+05 | 9.5505244862E+02 |
| 3.7768582173E+02 | 2.5122090978E+06 | 7.1098266260E-01 | 3.7841112446E+02 | 4.025420836E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.979350763E+02 |
| 2.3167508990E-01 | 2.3167508990E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.2179508541E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.387093879E+05 | 9.5495010350E+02 |
| 3.7782397774E+02 | 2.5122141507E+06 | 7.108327009E-01 | 3.7840546875E+02 | 4.026883769E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.981398516E+02 |
| 2.3169991928E-01 | 2.3169991928E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.2195124412E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.3929278118E+05 | 9.5484767653E+02 |
| 3.77796212753E+02 | 2.5122172477384E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.21972477384E-01 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.3987616356E+05 | 9.5474516776E+05 |
| 3.7810027110E+02 | 2.51221812168E+06 | 7.1057281324E-01 | 3.78339415642E+02 | 4.029810422E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9843252036E+02 |
| 2.3179465359E-01 | 2.3179465359E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.21930356925E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.4045854592E+05 | 9.5464257724E+02 |
| 3.7822840842E+02 | 2.51221746285E+06 | 7.1044288839E-01 | 3.7833849980E+02 | 4.0312730300E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9857883807E+02 |
| 2.3177455953E-01 | 2.3177455953E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.2187973568E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.4104292282E+05 | 9.5453990504E+02 |
| 3.7837653949E+02 | 2.5121660398E+06 | 7.1031297594E-01 | 3.783382288E+02 | 4.029748894E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.984636384E+02 |
| 2.3179848866E-01 | 2.3179848866E-01 | 0.0000000000E+00 | 1.2185894237E+05 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.41582161461E-04 | 9.5453882694E+02 |
| 3.78377906835E+02 | 2.5121622905E+06 | 7.1019963406E-01 | 3.78337906833E+02 | 4.0167529292E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9712663996E+02 |
| 3.7837037107E+02 | 2.5121535131E+06 | 7.1002662620E-01 | 3.78337037107E-02 | 3.9975533702E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9526046798E+02 |
| 3.9742598008E-01 | 3.9742598008E-01 | 3.9742598008E-01 | 3.9742598008E-01 | 5.2015797781E-01 | 8.0549454697E-04 | 4.4265498108E+05 | 4.5840230934E+02 | 4.4098667420E+05 |
| 3.7836321393E+02 | 2.512145764E+06 | 7.098823429E-01 | 3.7836321393E+02 | 3.9817269696E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.93625137E+02 |
| 4.8268051311E-01 | 4.8268051311E-01 | 4.8268051311E-01 | 4.8268051311E-01 | 5.9214862917E-05 | 1.078298368E-03 | 4.4319157894E+05 | 3.8973670520E+02 | 4.4095822894E+05 |
| 3.7835647625E+02 | 2.5121373281E+06 | 7.0970771505E-01 | 3.7835647625E+02 | 3.9697280923E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9242350197E+02 |
| 5.6772138849E-01 | 5.6772138849E-01 | 5.6772138849E-01 | 5.6772138849E-01 | 6.4530262908E-01 | 1.3505312832E-03 | 4.427826099E+05 | 3.3903762285E+02 | 4.4093104223E+05 |
| 3.783503739E+02 | 2.5121288279E+06 | 7.0955997580E-01 | 3.7835037395E+02 | 3.9594836312E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.919888487E+02 |
| 6.5261742939E-01 | 6.5261742939E-01 | 6.5261742939E-01 | 6.5261742939E-01 | 6.861617675478E-01 | 1.6223420729E-03 | 4.4426501092E+05 | 3.0005118982E+02 | 4.4090478715E+05 |
| 3.7834381911E+02 | 2.5121225841E+06 | 7.094713124E-01 | 3.7834381911E+02 | 3.950288149E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.9051326171E+02 |
| 7.37413273E-01 | 7.37413273E-01 | 7.37413273E-01 | 7.37413273E-01 | 7.952766923E+05 | 1.077766923E+01 | 4.4480180930E+04 | 3.9242350197E+02 | 4.4093858743E+02 |
| 3.7833778842E+02 | 2.51211552075E-01 | 7.0927852075E-01 | 3.7833778842E+02 | 3.9411617234E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8956693844E+02 |
| 8.22140144681E-01 | 8.22140144681E-01 | 8.22140144681E-01 | 8.22140144681E-01 | 8.22140144681E-01 | 2.4300981176E-03 | 4.4587657559E+05 | 1.1114211107E+02 | 4.4084320476E+05 |
| 3.7822923333E+02 | 2.5121055926E+06 | 7.0908277930E-01 | 3.7822923333E+02 | 3.9274647163E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.88119645678E+02 |
| 9.8851440300E-01 | 9.8851440300E-01 | 9.8851440300E-01 | 9.8851440300E-01 | 9.8851440300E-01 | 3.4997046337E-03 | 4.4802958723E+05 | 1.671702814E+02 | 4.4077761444E+05 |
| 3.78313638821E+02 | 2.5120874941E+06 | 7.0872661362E-01 | 3.78313638821E+02 | 3.9081087958E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8626053874E+02 |
| 1.3235720133E+00 | 1.3235720133E+00 | 1.3235720133E+00 | 1.3235720133E+00 | 1.2174016317E+05 | 8.8422883369E-01 | 5.6333772833E-03 | 4.5232745486E+05 | 1.1114211107E+02 |
| 3.7822548762E+02 | 2.5120546261E+06 | 7.0808021596E-01 | 3.78228548762E+02 | 3.89489895738E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8494841289E+02 |
| 1.9908013421E+00 | 1.9908013421E+00 | 1.9908013421E+00 | 1.9908013421E+00 | 1.2131187364E+05 | 9.1371981089E-01 | 7.7843677027E-03 | 4.5626475381E+05 | 8.3012310471E+05 |
| 3.7824778967E+02 | 2.512016990E+06 | 7.072171864E-01 | 3.7824778967E+02 | 3.8942187806E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8481130254E+02 |
| 2.6654102342E+00 | 2.6654102342E+00 | 2.6654102342E+00 | 2.6654102342E+00 | 2.1149437307E+05 | 9.3134249829E-01 | 9.9368589959E-03 | 4.60329172564E+01 | 6.62017253361E+05 |
| 3.7820906187E+02 | 2.51196255634E+06 | 7.0633145943E-01 | 3.7820906187E+02 | 3.8938313681E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8483257473E+02 |
| 3.3422370794E+00 | 3.3422370794E+00 | 3.3422370794E+00 | 3.3422370794E+00 | 1.2098300829E+05 | 9.43069353819E-01 | 1.2090764759E-02 | 4.6522178596E-02 | 5.5022123374E+01 |

表 7-6(3) 1 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.BAK

| | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 3.7816933779E+02 | 2.5119192641E+06 | 7.054238967E-01 | 3.7816933779E+02 | 3.893343945E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8479285065E+02 |
| 4.0213253929E+00 | 4.0213253929E+00 | 4.0213253929E+00 | 1.2081196256E+05 | 9.5142239533E-01 | 1.4246345477E-02 | 4.6951223272E+05 | 4.7048457031E+01 | 4.3999557079E+05 |
| 3.7812846470E+02 | 2.5118716164E+06 | 7.0449106132E-01 | 3.7812846470E+02 | 3.8930257328E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8475197756E+02 |
| 4.7028505472E+00 | 4.7028505472E+00 | 4.7028505472E+00 | 1.2063615314E+05 | 9.576832994E-01 | 1.6403650049E+02 | 4.7380643546E+05 | 4.1073931997E+01 | 4.39811799746E+05 |
| 3.7808640850E+02 | 2.5118225762E+06 | 7.0353216886E-01 | 3.7808640350E+02 | 3.8926051919E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8470991636E+02 |
| 5.3869169845E+00 | 5.3869169845E+00 | 5.3869169845E+00 | 1.2045550498E+05 | 9.6255316841E-01 | 1.8562695583E-02 | 4.7809976124E+05 | 3.642998064E+01 | 9.5478682493E+02 |
| 3.7804313192E+02 | 2.5117721167E+06 | 7.0254678100E-01 | 3.7804313192E+02 | 3.8927125494E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8466664478E+02 |
| 6.0736201751E+00 | 6.0736201751E+00 | 6.0736201751E+00 | 1.2028996588E+05 | 9.664454075E-01 | 2.0723488901E-02 | 4.8239277863E+05 | 3.2716264635E+01 | 9.5481975164E+02 |
| 3.7799863305E+02 | 2.5117202177E+06 | 7.0153462161E-01 | 3.7799863305E+02 | 3.8917276360E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8462214592E+02 |
| 6.7630539234E+00 | 6.7630539234E+00 | 6.7630539234E+00 | 1.2007949562E+05 | 9.6962969372E-01 | 2.2886031714E-02 | 4.8668365668E+05 | 2.9678417111E+01 | 4.3925435840E+05 |
| 3.7796289254E+02 | 2.511666867E+06 | 7.0045645679E-01 | 3.7795289254E+02 | 3.8912703083E+02 | 8.6504521740E+04 | 8.6504521740E+04 | 3.6800000000E+02 | 3.8457640540E+02 |
| 7.4553120898E+00 | 7.4553120898E+00 | 7.4553120898E+00 | 1.2920359782E+05 | 0.0000000000E+00 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195643E+02 | 3.6800060488E+02 | 2.5141382015E+06 |
| 3.8007974622E+02 | 0.0000000000E+00 | 0.0000000000E+00 | 4.0003005812E+05 | 9.6155421278E+02 | 4.0003005812E+05 | 9.6155421278E+02 | 3.6865093204E+02 | 2.5116445695E+06 |
| 1.2000000000E+05 | 1.2000000000E+05 | 1.2000000000E+05 | 3.7793378434E+02 | | | | | 7.0006171440E-01 |

出力ファイル SEMI_MULT.HIS における入口と出口流量の時間変化を図 7-2 に示す。安定した時点での入口と出口流量が一致することにより、定常流動状態が確認された。

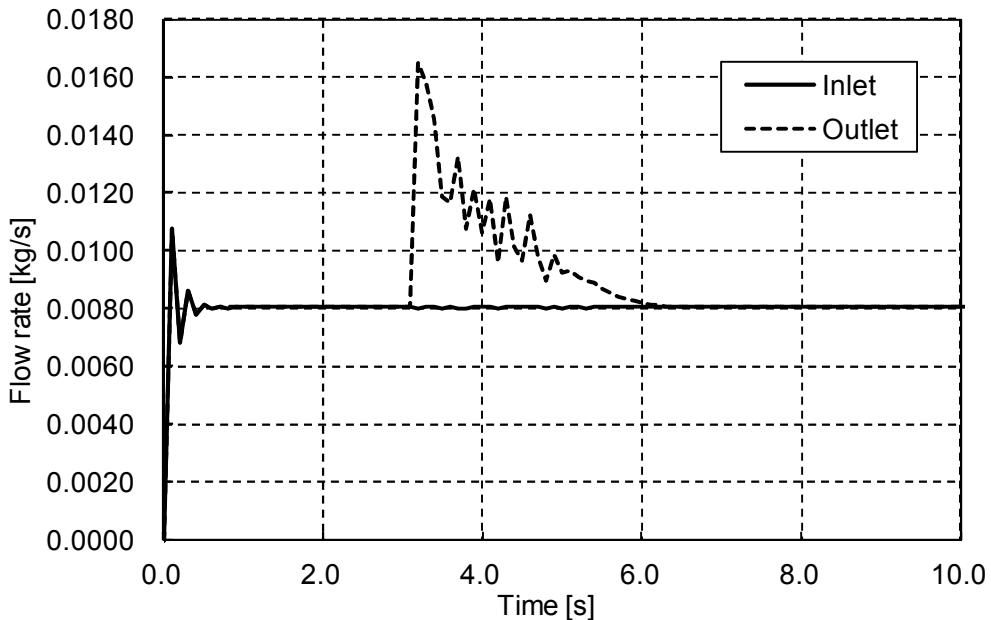


図 7-2 1 本管解析の流量変化

7.3 2 本管流動安定性解析

第 7.2 節の 1 本管での定常流動状態の解析結果を初期条件として利用し、2 本管パラレルチャンネルにおける非定常流動の解析を実施する。

表 7-7 に 2 本管の入力ファイル SEMI_MULT.INP を示す。再スタートデータからの計算なので、ISTART=1、IDISTURB = 1 を設定する。入口流量は 2 本管の流量に修正する。表 7-8 に入力メッシュファイル SEMI_MULT.MSH を示す。不安定的な流量振動を得るために管入口圧力損失形状係数は 8.1551 の値を採用する。再スタートの初期条件入力ファイル SEMI_MULT.RES は表 7-6 に示す 1 本管解析に得られた SEMI_MULT.BAK をコピーして、名前を SEMI_MULT.RES に変更して使用する。ただし、開始時間 TIME を 0.0 の値に修正する。以上三つの入力ファイルを利用して、不定常流動解析を実施する。

表 7-7 2本管解析入力ファイル SEMI_MULT.INP

```

&IDATA
  NTUBE= 2, NPLUG= 0, NTIEROD= 0
&END
&ODATA
  NPLTMX= 2, JPLT= 1,2
  NOUTMX= 2, JOUT= 1,2
  NOINTV= 1
&END
&GENER
  TIME = 0.0, DTMX = 0.005, TMAX = 50.0,
  DTOUT = 10.0, DTPLT= 0.1, DTREST= 10.0, TLOAD= 5.0,
  CFL = 0.4, THETA= 1.0,
  EPSLON= 0.0002, GRAV = 9.80665
&END
&OPT11
  IBETA = 1, ISTART = 1,IRESTART= 1, IDISTURB = 1,
  IFRICITION= 4, IDRIFT = 2, ISUBCOOL= 2, INUCLEATE= 1,
  IXDNB = 1, IDNB = 3, ITUBEP = 4, ITIERODP = 4,
  IHOMO = 1, IBDRH = 3
&END
&OPT12
  HFWA(1)=1*2.86615E-5, HFNA(1)=1*0.0, HGAP(1)=1*2.149613E-5,
  XDNBIN(1)=1*0.556,
  ANUMAX= 1.0E20, ANUMIN= 5.0, FACTS = 1.0
&END
&INLET
  WF = 1.607105092E-2,
  HF = 3.97413959E+05,
  EF = 3.97289220E+05,
  DENF = 962.008123
  VOLPI = 0.01
&END
&OUTLT
  PB = 1.20000000E+05,
  AB = 4.90873877E-04,
  CKB = 0.200,
  WBLOW = 0.00000000E+00,
  EBLOW = 3.97289220E+05,
  DENBLOW = 962.008123,
  VOLPO = 0.01
&END
TUB 1 2 47
END
END

```

表 7-8 2本管解析入力ファイル SEMI_MULT.MSH

表 7-9 に出力ファイル SEMI_MULT.OUT を示す。表 7-10 に出力ファイル SEMI_MULT.HIS を示す。表 7-11 に出力ファイル SEMI_MULT.BAK を示す。

表 7-9(1/2) 2 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.OUT

| | | | | | |
|--------------|-------------------|--------------|-----------------|-------------|------------------------------|
| NTUBE= | 2 | NPLUG= | 0 | NTER00= | 0 |
| NPLUX= | 2 | NUOTW= | 1 | | |
| JPL= | 1 | | | | |
| JOUT= | 2 | | | | |
| 1 | 2 | 0.0000000[s] | DTWY= | 50.00000[s] | TWAW= |
| CF= | 0.400 | THEA= | 1.000 | EPSLON= | 0.000230 |
| IBET= | 1 | ISTART= | 1 | IESTART= | 1 |
| HFWA(J)= | | | | | |
| 2.86615E-05 | 0.000000E+00 | | | | |
| HFIA(J)= | | | | | |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | | | | |
| HGAP(J)= | | | | | |
| XDNB(N,J)= | | | | | |
| 2.1496 E-05 | 0.000000E+00 | | | | |
| ANIMAX= | 1.000E+20 | ANIMIN= | 5.000E+00 | FACTS= | 1.0000 |
| WF= | 1.607105092E-02 | IF= | 3.974139590E+05 | EF= | 962.00812300 VOLP= |
| PB= | 1.2000000E+05 | AB= | 4.906738770E-04 | CKB= | 0.2000 WBLOW= 0.00000000E+00 |
| ELOW= | 3.972892200E+05 | DENBLW= | 962.00812300 | VOLP= | 0.0100 |
| Time= | 0.0000000[s] | | | | |
| Time= | (省略) | | | | |
| Time= | 10.001100691[s] | | | | |
| Time= | 20.00027551[s] | | | | |
| Time= | 30.000669671[s] | | | | |
| Time= | 40.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1 Z[in] | | | | |
| Time= | (省略) | | | | |
| Time= | 20.00027551[s] | | | | |
| Time= | 30.000669671[s] | | | | |
| Time= | 40.000410591[s] | | | | |
| Time= | 50.000410591[s] | | | | |
| Time= | 60.000410591[s] | | | | |
| Time= | 70.000410591[s] | | | | |
| Time= | 80.000410591[s] | | | | |
| Time= | 90.000410591[s] | | | | |
| Time= | 100.000410591[s] | | | | |
| Time= | 110.000410591[s] | | | | |
| Time= | 120.000410591[s] | | | | |
| Time= | 130.000410591[s] | | | | |
| Time= | 140.000410591[s] | | | | |
| Time= | 150.000410591[s] | | | | |
| Time= | 160.000410591[s] | | | | |
| Time= | 170.000410591[s] | | | | |
| Time= | 180.000410591[s] | | | | |
| Time= | 190.000410591[s] | | | | |
| Time= | 200.000410591[s] | | | | |
| Time= | 210.000410591[s] | | | | |
| Time= | 220.000410591[s] | | | | |
| Time= | 230.000410591[s] | | | | |
| Time= | 240.000410591[s] | | | | |
| Time= | 250.000410591[s] | | | | |
| Time= | 260.000410591[s] | | | | |
| Time= | 270.000410591[s] | | | | |
| Time= | 280.000410591[s] | | | | |
| Time= | 290.000410591[s] | | | | |
| Time= | 300.000410591[s] | | | | |
| Time= | 310.000410591[s] | | | | |
| Time= | 320.000410591[s] | | | | |
| Time= | 330.000410591[s] | | | | |
| Time= | 340.000410591[s] | | | | |
| Time= | 350.000410591[s] | | | | |
| Time= | 360.000410591[s] | | | | |
| Time= | 370.000410591[s] | | | | |
| Time= | 380.000410591[s] | | | | |
| Time= | 390.000410591[s] | | | | |
| Time= | 400.000410591[s] | | | | |
| Time= | 410.000410591[s] | | | | |
| Time= | 420.000410591[s] | | | | |
| Time= | 430.000410591[s] | | | | |
| Time= | 440.000410591[s] | | | | |
| Time= | 450.000410591[s] | | | | |
| Time= | 460.000410591[s] | | | | |
| Time= | 470.000410591[s] | | | | |
| Time= | 480.000410591[s] | | | | |
| Time= | 490.000410591[s] | | | | |
| Time= | 500.000410591[s] | | | | |
| Time= | 510.000410591[s] | | | | |
| Time= | 520.000410591[s] | | | | |
| Time= | 530.000410591[s] | | | | |
| Time= | 540.000410591[s] | | | | |
| Time= | 550.000410591[s] | | | | |
| Time= | 560.000410591[s] | | | | |
| Time= | 570.000410591[s] | | | | |
| Time= | 580.000410591[s] | | | | |
| Time= | 590.000410591[s] | | | | |
| Time= | 600.000410591[s] | | | | |
| Time= | 610.000410591[s] | | | | |
| Time= | 620.000410591[s] | | | | |
| Time= | 630.000410591[s] | | | | |
| Time= | 640.000410591[s] | | | | |
| Time= | 650.000410591[s] | | | | |
| Time= | 660.000410591[s] | | | | |
| Time= | 670.000410591[s] | | | | |
| Time= | 680.000410591[s] | | | | |
| Time= | 690.000410591[s] | | | | |
| Time= | 700.000410591[s] | | | | |
| Time= | 710.000410591[s] | | | | |
| Time= | 720.000410591[s] | | | | |
| Time= | 730.000410591[s] | | | | |
| Time= | 740.000410591[s] | | | | |
| Time= | 750.000410591[s] | | | | |
| Time= | 760.000410591[s] | | | | |
| Time= | 770.000410591[s] | | | | |
| Time= | 780.000410591[s] | | | | |
| Time= | 790.000410591[s] | | | | |
| Time= | 800.000410591[s] | | | | |
| Time= | 810.000410591[s] | | | | |
| Time= | 820.000410591[s] | | | | |
| Time= | 830.000410591[s] | | | | |
| Time= | 840.000410591[s] | | | | |
| Time= | 850.000410591[s] | | | | |
| Time= | 860.000410591[s] | | | | |
| Time= | 870.000410591[s] | | | | |
| Time= | 880.000410591[s] | | | | |
| Time= | 890.000410591[s] | | | | |
| Time= | 900.000410591[s] | | | | |
| Time= | 910.000410591[s] | | | | |
| Time= | 920.000410591[s] | | | | |
| Time= | 930.000410591[s] | | | | |
| Time= | 940.000410591[s] | | | | |
| Time= | 950.000410591[s] | | | | |
| Time= | 960.000410591[s] | | | | |
| Time= | 970.000410591[s] | | | | |
| Time= | 980.000410591[s] | | | | |
| Time= | 990.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1000.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1010.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1020.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1030.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1040.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1050.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1060.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1070.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1080.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1090.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1100.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1110.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1120.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1130.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1140.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1150.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1160.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1170.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1180.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1190.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1200.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1210.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1220.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1230.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1240.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1250.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1260.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1270.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1280.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1290.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1300.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1310.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1320.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1330.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1340.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1350.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1360.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1370.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1380.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1390.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1400.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1410.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1420.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1430.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1440.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1450.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1460.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1470.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1480.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1490.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1500.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1510.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1520.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1530.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1540.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1550.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1560.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1570.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1580.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1590.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1600.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1610.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1620.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1630.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1640.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1650.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1660.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1670.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1680.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1690.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1700.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1710.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1720.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1730.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1740.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1750.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1760.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1770.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1780.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1790.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1800.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1810.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1820.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1830.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1840.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1850.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1860.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1870.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1880.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1890.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1900.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1910.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1920.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1930.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1940.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1950.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1960.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1970.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1980.000410591[s] | | | | |
| Time= | 1990.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2000.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2010.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2020.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2030.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2040.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2050.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2060.000410591[s] | | | | |
| Time= | 2070.000410591[s] | | | | |

表 7-9(2/2) 2 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.OUT

表 7-10 2 本管解析出力ファイル SEMI_MULT.HIS

| Time [s] | Channel 1 | Channel 2 | Channel 1 | Channel 2 | Pin[Pa] | En[Pa] | Tin[K] |
|-------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 0.0000000 | 8.0355254604E-03 | 8.0355254604E-03 | 8.0355254602E-03 | 8.0355254602E-03 | 1.29203597782E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060488E+02 |
| 0.10014905 | 8.0454782243E-03 | 8.0278015466E-03 | 8.0239570546E-03 | 8.0111614321E-03 | 1.2915850303E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060192E+02 |
| 0.2005120 | 8.0711902328E-03 | 7.9882244196E-03 | 8.0249136893E-03 | 8.02671590E-03 | 1.2918518836E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060367E+02 |
| 0.30063298 | 8.1119564182E-03 | 7.9684636047E-03 | 8.0312056828E-03 | 7.9944107222E-03 | 1.2920364129E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060489E+02 |
| 0.40093749 | 8.1601422532E-03 | 7.9098734674E-03 | 8.0384732895E-03 | 7.9883402943E-03 | 1.2922260519E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060113E+02 |
| 0.50114715 | 8.2217673040E-03 | 7.8484298634E-03 | 8.0438262905E-03 | 7.9938846730E-03 | 1.2924400887E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060754E+02 |
| 0.60093485 | 8.2798860588E-03 | 7.7916977643E-03 | 8.0702852596E-03 | 8.0467989329E-03 | 1.2923573191E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060770E+02 |
| 0.70089173 | 8.2994316075E-03 | 7.7262387403E-03 | 8.0704988174E-03 | 8.0363524914E-03 | 1.2921406597E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060557E+02 |
| 0.80008740 | 8.2667283174E-03 | 7.8049571943E-03 | 8.1029574994E-03 | 8.0036381094E-03 | 1.2919616379E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060440E+02 |
| 0.90001965 | 8.2098014909E-03 | 7.8618483388E-03 | 8.1252573801E-03 | 8.0285183515E-03 | 1.2918106610E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060340E+02 |
| 1.00043575 | 8.1431593134E-03 | 7.9288365561E-03 | 8.1281722837E-03 | 8.0147199396E-03 | 1.2915927338E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060197E+02 |
| 1.10016598 | 8.0603820577E-03 | 8.0103816244E-03 | 8.1255262905E-03 | 7.9610510000E-03 | 1.2915133863E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060145E+02 |
| 1.20055807 | 7.9795981005E-03 | 8.09113046850E-03 | 8.1306753457E-03 | 7.9288555001E-03 | 1.2914834356E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060125E+02 |
| 1.30037560 | 7.9081992856E-03 | 8.1634742631E-03 | 8.1251235314E-03 | 7.9029792398E-03 | 1.2914772329E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060121E+02 |
| 1.40063156 | 7.84626502448E-03 | 8.2246502448E-03 | 8.17110107443E-03 | 7.9368973987E-03 | 1.2915556885E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060173E+02 |
| 1.50104274 | 7.7946898473E-03 | 8.2767651148E-03 | 8.1524074854E-03 | 7.9258549150E-03 | 1.2915008564E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060137E+02 |
| 1.6010323 | 7.7671378899E-03 | 8.1071249177E-03 | 7.92614544114E-03 | 7.92614544114E-03 | 1.2914938798E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060132E+02 |
| 1.70107683 | 7.7622298755E-03 | 8.3091254882E-03 | 8.1234886708E-03 | 7.9799367502E-03 | 1.2915338594E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060160E+02 |
| 1.80096921 | 7.7809227627E-03 | 8.2892453925E-03 | 8.05658804393E-03 | 7.9784806139E-03 | 1.2914869037E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060128E+02 |
| 1.90091121 | 7.8272213274E-03 | 8.2436414467E-03 | 8.0534403466E-03 | 8.0513250794E-03 | 1.2915368829E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060174E+02 |
| (省略) | | | | | | | |
| 47.00041473 | 9.02568625554E-03 | 7.0320082694E-03 | 7.0370949681E-03 | 8.7497889033E-03 | 1.2907915176E+05 | 3.9728922056E+05 | 9.6201190460E+02 |
| 47.10045804 | 9.4578177196E-03 | 6.6234081689E-03 | 7.0653230921E-03 | 8.6653566332E-03 | 1.2914624291E+05 | 3.9728922056E+05 | 9.6201193262E+02 |
| 47.20016695 | 9.8110911487E-03 | 6.792167651045E-03 | 7.1240718404E-03 | 8.7548149288E-03 | 1.2916793678E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800060254E+02 |
| 47.30099884 | 1.0041324084E-02 | 6.0399941249E-03 | 7.3703723929E-03 | 8.6179611634E-03 | 1.2918690703E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201194948E+02 |
| 47.40081636 | 1.0074712329E-02 | 6.0026975355E-03 | 7.6473367362E-03 | 8.6179611634E-03 | 1.2919154304E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201195141E+02 |
| 47.50058749 | 9.8844933688E-03 | 6.1986438813E-03 | 8.3730375778E-03 | 7.921258018E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201196176E+02 | |
| 47.60021962 | 9.5236506691E-03 | 6.5518611122E-03 | 8.2654542129E-03 | 8.0751296276E-03 | 1.2912591991E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800060002E+02 |
| 47.70022136 | 9.0103977971E-03 | 6.7682877350E-03 | 8.1627133998E-03 | 7.7494131522E-03 | 1.2913747923E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800060054E+02 |
| 47.80040193 | 8.4426456112E-03 | 7.6289842208E-03 | 8.66119447799E-03 | 7.42650696321E-03 | 1.29099638321E+05 | 3.9728922056E+05 | 9.6201191196E+02 |
| 47.90023383 | 7.8782236309E-03 | 8.6756176015E-03 | 8.4814004698E-03 | 7.2508354263E-03 | 1.2902705389E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800059646E+02 |
| 48.00042904 | 7.3956285333E-03 | 9.1645459063E-03 | 8.6687317018E-03 | 7.1057302439E-03 | 1.2909277639E+05 | 3.9728922056E+05 | 9.620119102E+02 |
| 48.10014661 | 6.9252385633E-03 | 9.4095345951E-03 | 7.97329362331E-03 | 8.4320344774E-03 | 1.2909526584E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800060396E+02 |
| 48.20059268 | 6.5053494666E-03 | 9.5429436632E-03 | 7.8722816492E-03 | 7.0895417308E-03 | 1.2913514707E+05 | 3.9728922056E+05 | 9.6201192792E+02 |
| 48.30031311 | 6.1829041923E-03 | 9.882441102E-03 | 8.9286489071E-03 | 7.220871937E-03 | 1.2918074049E+05 | 3.9728922056E+05 | 9.6201194691E+02 |
| 48.40097542 | 6.0063120759E-03 | 1.0069578025E-02 | 8.7620664479E-03 | 7.4593663013E-03 | 1.2920326304E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.62011951231E+02 |
| 48.50009608 | 6.030298471E-03 | 1.0048029147E-02 | 8.5705682264E-03 | 7.7406172813E-03 | 1.2921166413E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800059679E+02 |
| 48.60009157 | 6.2585440303E-03 | 9.8031556159E-03 | 7.0597751797E-03 | 8.1203924977E-03 | 1.2920922056E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800059686E+02 |
| 48.70025628 | 6.6645040409E-03 | 9.4095345951E-03 | 7.2911871294E-03 | 8.4320344774E-03 | 1.2918339598E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201194801E+02 |
| 48.80002891 | 7.1999077293E-03 | 8.8722756004E-03 | 7.6781437903E-03 | 8.6229897632E-03 | 1.2911608576E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.68000595933E+02 |
| 48.90067010 | 7.77568820051E-03 | 8.2971928816E-03 | 7.3918117978E-03 | 8.6841105974E-03 | 1.29099767198E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201191231E+02 |
| 48.99998634 | 8.3268859040E-03 | 7.7445627481E-03 | 7.2054627481E-03 | 8.6745572156E-03 | 1.290844367E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.68000596341E+02 |
| 49.10002380 | 8.8007940854E-03 | 7.2661343137E-03 | 7.0625387763E-03 | 8.5195537961E-03 | 1.2904556796E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800059450E+02 |
| 49.20020378 | 9.2520032242E-03 | 6.7975104450E-03 | 7.043747704E-03 | 8.5871920873E-03 | 1.2911245445E+05 | 3.9728922056E+05 | 9.6201191847E+02 |
| 49.30038041 | 9.6494828284E-03 | 6.4187483222E-03 | 7.0973594036E-03 | 8.7568070128E-03 | 1.2911191287E-05 | 3.9728922056E+05 | 3.68000595933E+02 |
| 49.40046916 | 9.9465817041E-03 | 6.1123373842E-03 | 7.2556347020E-03 | 8.8156719213E-03 | 1.2917827255E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201194538E+02 |
| 49.50021302 | 1.0083126844E-02 | 5.9827908222E-03 | 7.5042633398E-03 | 8.7307451837E-03 | 1.2920911069E+05 | 3.9728922057E+05 | 3.6800060322E+02 |
| 49.60059349 | 1.000211654E-02 | 6.0631471076E-03 | 7.8383103498E-03 | 8.5148241049E-03 | 1.2921574477E+05 | 3.9728922057E+05 | 9.6201196149E+02 |
| 49.70015765 | 9.2980648666E-03 | 6.3500395059E-03 | 8.2223485452E-03 | 8.246868629E-03 | 1.291516376E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800060170E+02 |
| 49.80036508 | 9.2753572373E-03 | 6.7904224531E-03 | 8.5590918049E-03 | 7.9121200639E-03 | 1.2915330521E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800060158E+02 |
| 49.90023454 | 8.7313516150E-03 | 7.3460285179E-03 | 8.6293416951E-03 | 7.5567883450E-03 | 1.2911049115E+05 | 3.9728922056E+05 | 3.6800059876E+02 |

表7-11 2本管解析出力ファイル SEMI_MULT.BAK

出力ファイル SEMI_MULT.HIS における 2 本管入口流量の時間変化を図 7-3 に示す。流量振動の振幅が徐々に大きくなっており、不安定流動の発生が確認できる。

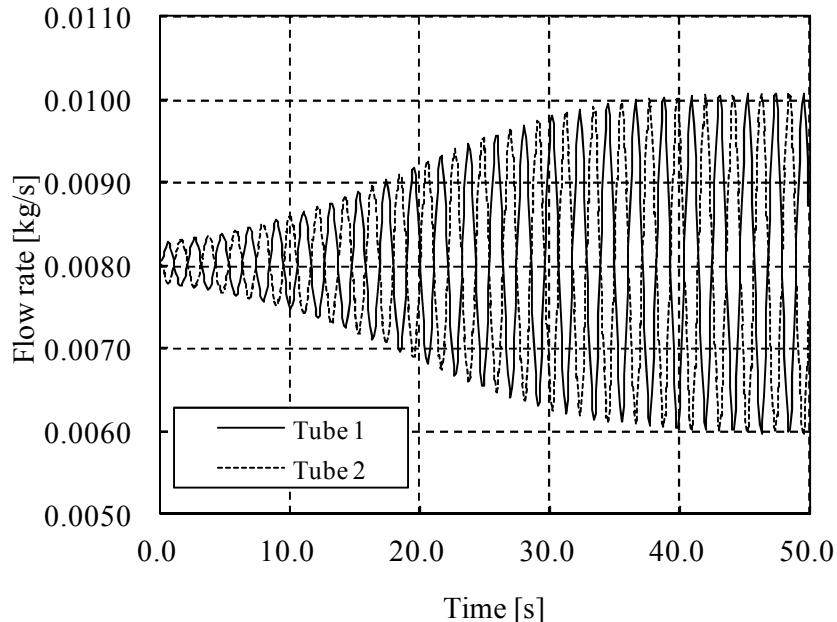


図 7-3 2 本管流量振動解析の結果

7.4 多チャンネル解析

第 7.2 節の 1 本管での定常流動状態の解析結果を初期条件として利用し、16 本管パラレルチャンネルにおける非定常流動の解析を実施する。

表 7-12 に 16 本管の入力ファイル SEMI_MULT.INP を示す。再スタートデータからの計算なので、ISTART=1、IDISTURB = 1 を設定する。入口流量は 16 本管の流量に修正する。入力メッシュファイル SEMI_MULT.MSH は表 7-8 と同じである。再スタートの初期条件入力ファイル SEMI_MULT.RES は第 7.3 節の 2 本管解析と同じである。以上三つの入力ファイルを利用して、不定常流動解析を実施する。解析の実行に際しては、PC クラスタで 4 プロセッサを指定して並列計算を実行した。

表 7-12 16 本管解析入力ファイル SEMI_MULT.INP

```

&IDATA
  NTUBE= 16, NPLUG= 0, NTIEROD= 0
&END
&ODATA
  NPLTMX= 3, JPLT= 1,8,16
  NOUTMX= 16, JOUT= 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16
  NOINTV= 1
&END
&GENER
  TIME = 0.0, DTMX = 0.005, TMAX = 50.0,
  DTOUT = 20.0, DTPLT= 0.1, DTREST= 10.0, TLOAD= 5.0,
  CFL = 0.4, THETA= 1.0,
  EPSLON= 0.0002, GRAV = 9.80665
&END
&OPT11
  IBETA = 1, ISTART = 1, IRESTART= 1, IDISTURB = 1,
  IFRICITION= 4, IDRIFT = 2, ISUBCOOL= 2, INUCLEATE= 1,
  IXDNB = 1, IDNB = 3, ITUBEP = 4, ITIERODP = 4,
  IHOMO = 1, IBDRH = 3
&END
&OPT12
  HFWA(1)=1*2.86615E-5, HFNA(1)=1*0.0, HGAP(1)=1*2.149613E-5,
  XDNBIN(1)=1*0.556,
  ANUMAX= 1.0E20, ANUMIN= 5.0, FACTS = 1.0
&END
&INLET
  WF = 0.12856841,
  HF = 3.97413959E+05,
  EF = 3.97289220E+05,
  DENF = 962.008123
  VOLPI = 0.1
&END
&OUTLT
  PB = 1.2000000E+05,
  AB = 4.90873877E-04,
  CKB = 0.200,
  WBLOW = 0.0000000E+00,
  EBLOW = 3.97289220E+05,
  DENBLOW = 962.008123,
  VOLPO = 0.1
&END
TUB 1 16 47
END
END

```

出力ファイル SEMI_MULT.OUT、SEMI_MULT.HIS 及び SEMI_MULT.BAK を省略する。出力ファイル SEMI_MULT.HIS における第 1 本、第 8 本及び第 16 本管入口流量の時間変化を図 7-4 に示す。流量振動の振幅が徐々に大きくなっており、不安定流動の発生が確認できる。

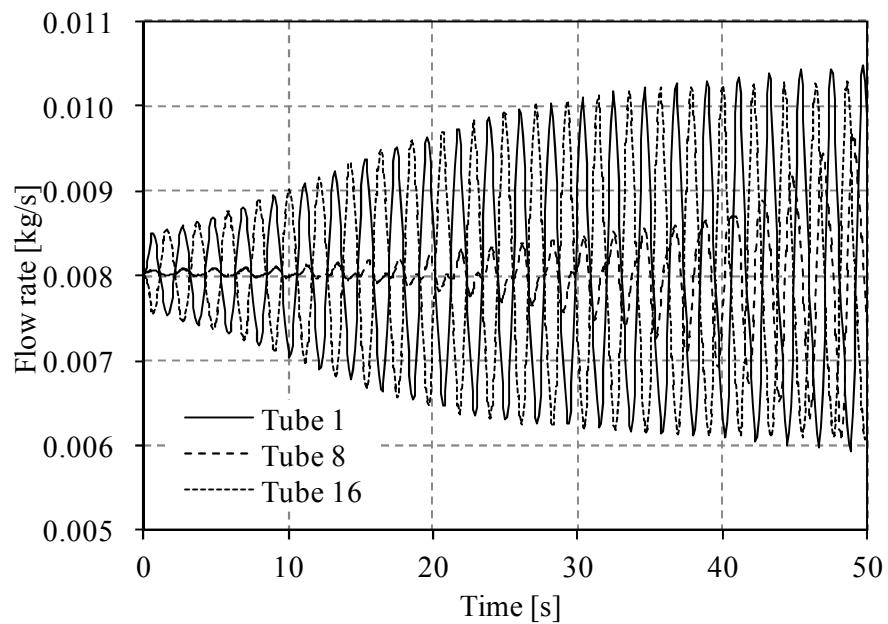


図 7-4 16 本管流量振動解析の結果

8.まとめ

高速炉直管型蒸気発生器 3 次元熱流動解析コード TSG の整備を進めている。TSG 水側モジュールの使用マニュアルとして、本報告書を作成した。

今後の予定として、給水配管モデル、蒸気配管モデル、プレナム多ボリューム分割機能を追加するとともに、解析モジュールの V&V を実施する。

参考文献

- 1) 日本原子力学会熱流動部会編：“気液二相流の数値解析”，朝倉書店，東京，pp. 15-53 (1993).
- 2) D. R. Liles and W. H. Reed: “A semi-implicit method for two-phase fluid dynamics”, J. Comput. Phys., 26, pp. 390-407 (1978).
- 3) 吉川龍志，大島宏之：“SG 水側熱流動評価コードの開発及び不安定流動解析”，JAEA-Research 2010-007 (2010), 44p.
- 4) R. Fernandez-Prini and R. B. Dooley: “Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam”, Erlangen, Germany, September. (1997), (online), available from <http://www.iapws.org/> (accessed 2007-04-27).
- 5) 木村英隆，菅谷全，吉田英一，和田雄作：“FBR 構造材料の物性値測定（その 1）各種圧延鋼板の物性値測定”，PNC TN9410 90-094 (1990), 71p.
- 6) S. W. Churchill, “Friction factor equations spans all fluid-flow regimes”, Chem. Eng., 84, 24, pp. 91-92 (1977).
- 7) J. Pfann, “A new description of liquid metal heat transfer in closed conduits”, Nucl. Eng. Design, 41, pp. 149-163 (1977).
- 8) 戸田信一，吉川信治，渡辺収，岸田雅子，桶谷和浩：“もんじゅ蒸発器内部熱流動解析用 MSG コードの改良-水・蒸気側逆流解析機能の追加およびポスト処理機能の強化-”，JNC TN4400 2003-005 (2003), 106p.
- 9) M. M. Awad and Y. S. Muzychka: “A simple two-phase frictional multiplier calculation method”, Proc. of International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, October 4-8, (2004).
- 10) J. G. Collier and J. R. Thome: “Convective Boiling and Condensation”, Oxford, pp. 54-57 (1996).
- 11) D. Chisholm: “A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow”, Int. J. Heat Mass Transfer, 10, 12, pp. 1767-1778 (1967).
- 12) D. Chisholm, “Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels”, Int. J. Heat Mass Transfer, 16, 2, pp. 347-358 (1973).
- 13) D. G. Reddy, S. R. Sreepada and A. N. Nahavandi, “Two-phase multiplier correlation for high-pressure steam water flow”, EPRI Report NP-2522 (1982).
- 14) P. Coddington and R. Macian: “A study of the performance of void fraction correlations used in the context of drift-flux two-phase flow models”, Nucl. Eng. Design, 215, pp.199-216 (2002).
- 15) T. Hibiki, H. Goda, S. Kim. Ishii, J. Uhle, “One-dimensional drift-flux model for

- downward two-phase flow”, Proceedings of 11th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan, April 20-23, Paper No. ICONE11-36015 (2003).
- 16) H. Goda, T. Hibiki, S. Kim, M. Ishii, J. Uhle, “Drift-flux model for downward two-phase flow”, Int. J. Heat and Mass Transfer, 46, 25, pp. 4835-4844 (2003).
 - 17) T. Hibiki, H. Gada, S. Kim, M. Ishii, J. Uhle, “Structure of vertical downward bubbly flow”, Int. J. Heat and Mass Transfer 47, 8-9, pp. 1847-1862 (2004).
 - 18) B. Chexal, J. Horowitz and G. S. Lellouche: “An assessment of eight void fraction models”, Nucl. Eng. Design, 126, pp. 71-88 (1991).
 - 19) B. Chexal, G. Lellouche, J. Horowitz and J. Healzer: “A void fraction correlation for generalized applications”, Progress in Nuclear Energy, 27, 4, pp. 255-295 (1992).
 - 20) N. E. Todreas and M. S. Kazimi, “NUCLEAR SYSTEMS I Thermal Hydraulic Fundamentals”, Hemisphere Publishing Corporation, (1993), 704p.
 - 21) 木曾原直之, 仲井悟, 佐藤博之, 谷田部敏男：“高信頼性 2 重管蒸気発生器の開発 - 高質量流速域における伝熱流動試験 -”, JNC TN9400 2001-093 (2001), 88p.
 - 22) J. Y. Hwang, T. E. Fewell, L. E. Efferding and R. P. Waszink, "Thermal/Hydraulics Design and Performance of An LMFBR Double Wall Tube Seven Tube Steam Generator Model", ASME Winter Annual Meeting, USA, 81-WA/NE-7 (1981).
 - 23) M. Aritomi, S. Aoki and A. Inoue: “Instabilities in parallel channel of forced-convection boiling upflow system, (I) Mathematical model”, J. Nucl. Sci. Technol., 14, 1, pp. 22-30 (1977).
 - 24) M. Aritomi, S. Aoki and A. Inoue: “Instabilities in parallel channel of forced-convection boiling upflow system, (II) Experimental results”, J. Nucl. Sci. Technol., 14, 2, pp. 88-96 (1977).

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|-------|---------|-----|
| | 名称 | 記号 |
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 基本単位 | |
|------------------------|--------------|--------------------|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | m ² |
| 体積 | 立方メートル | m ³ |
| 速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | m/s ² |
| 波数 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| 密度、質量密度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | kg/m ² |
| 比體積 | 立方メートル毎キログラム | m ³ /kg |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | A/m ² |
| 磁界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量濃度 ^(a) 、濃度 | モル毎立方メートル | mol/m ³ |
| 質量濃度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m ² |
| 屈折率 ^(b) | (数字の) 1 | 1 |
| 比透磁率 ^(b) | (数字の) 1 | 1 |

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|----------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン ^(b) | rad | 1 ^(b) m/m m ² m ² s ⁻¹ |
| 立体角 | ステラジアン ^(b) | sr ^(c) | 1 ^(b) Hz |
| 周波数 | ヘルツ ^(d) | | N |
| 力 | ニュートン | | m kg s ⁻² |
| 圧力、応力 | パスカル | Pa | N/m ² m ⁻¹ kg s ⁻² |
| エネルギー、仕事、熱量 | ジュール | J | N m m ² kg s ⁻² |
| 仕事率、工率、放射束 | ワット | W | J/s m ² kg s ⁻³ |
| 電荷、電気量 | クーロン | C | s A |
| 電位差(電圧)、起電力 | ボルト | V | W/A m ² kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 静電容量 | ファラード | F | C/V m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A m ² kg s ⁻³ A ⁻² |
| コンダクタンス | ジーメンス | S | A/V m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 磁束密度 | ウェーバ | Wb | Vs m ² kg s ⁻² A ⁻¹ |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² kg s ⁻² A ⁻¹ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A m ² kg s ⁻² A ⁻² |
| セルシウス温度 | セルシウス度 ^(e) | °C | K |
| 光照度 | ルーメン | lm | cd sr ^(c) lm/m ² m ² cd s ⁻¹ |
| 放射性核種の放射能 ^(f) | ベクレル ^(d) | Bq | lm ⁻¹ |
| 吸収線量、比エネルギー分与、カーマ | グレイ | Gy | J/kg m ² s ⁻² |
| 線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量 | シーベルト ^(g) | Sv | J/kg m ² s ⁻² |
| 酸素活性 | カタール | kat | s ⁻¹ mol |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同じである。したがって、温度差や温度間隔を表す數値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| | 名称 | 記号 | SI 基本単位による表し方 |
| 粘度 | パスカル秒 | Pa s | m ¹ kg s ⁻¹ |
| 力のモーメント | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ² |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹ |
| 角加速度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻² |
| 熱流密度、放射照度 | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 熱容量、エンントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 比熱容量、比エンントロピー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 熱伝導率 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 体積エネルギー | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ¹ kg s ⁻² |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電荷密度 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ³ sA |
| 表面電荷密度 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ² sA |
| 電束密度、電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ² sA |
| 誘電率 | ファラード毎メートル | F/m | m ³ kg s ⁻⁴ A ² |
| 透磁率 | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ² |
| モルエネルギー | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ¹ |
| モルエントロピー、モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ¹ |
| 照射線量(X線及びγ線) | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ sA |
| 吸収線量 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ⁻¹ s ⁻³ |
| 放射強度 | ワット毎メートル | W/sr | m ² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m ² sr) | m ² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | カタール毎立方メートル | kat/m ³ | m ⁻³ s ⁻¹ mol |

表5. SI接頭語

| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 ²⁴ | ヨタ | Y | 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ²¹ | ゼタ | Z | 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ¹⁸ | エクサ | E | 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P | 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ¹² | テラ | T | 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁹ | ギガ | G | 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁶ | メガ | M | 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ³ | キロ | k | 10 ⁻¹⁸ | アト | a |
| 10 ² | ヘクト | h | 10 ⁻²¹ | ゼット | z |
| 10 ¹ | デカ | da | 10 ⁻²⁴ | ヨクト | y |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI 単位による値 |
|-------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1h=60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ' | 1'=1(60)'=(π/10800) rad |
| 秒 | " | 1"=(1/60)"=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | 1ha=1hm ² =10 ⁴ m ² |
| リットル | L | 1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1t=10 ³ kg |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|----------|----|--------------------------------------------|
| 電子ボルト | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J |
| ダルトン | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da |
| 天文単位 | ua | 1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| バール | bar | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バーン | b | 1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ² |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネバール | Np | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。 |
| デジベル | dB | |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|
| エルグ | erg | 1 erg=10 ⁻⁷ J |
| ダイーン | dyn | 1 dyn=10 ⁻⁵ N |
| ボアズ | P | 1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s |
| ストークス | St | 1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹ |
| スチルブ | sb | 1 sb=1cd m ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻² |
| フォート | ph | 1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx |
| ガル | Gal | 1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² |
| マックスウェル | Mx | 1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb |
| ガウス | G | 1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T |
| エルステッド(c) | Oe | 1 Oe△(10 ³ /4n)A m ⁻¹ |

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------|------|--------------------------------------------|
| キュリ | Ci | 1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq |
| レントゲン | R | 1 R=2.58×10 ⁴ C/kg |
| ラド | rad | 1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy |
| レム | rem | 1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv |
| ガンマ | γ | 1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T |
| フェルミ | fm | 1 fm=1 fm=10 ⁻¹⁵ m |
| メートル系カラット | Torr | 1 Torr=(101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm=101 325 Pa |
| カロリ | cal | 1 cal=4.1858J (15°Cカロリー), 4.1868J (ITカロリー) |
| ミクログラム | μ | 1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m |

