

# ガス及び気液二相流パイプラインにおける 過渡現象解析技術の開発

## Analysis of Transient Phenomenon in Gas and Two-Phase Flow Pipeline

今井英貴<sup>\*(1)</sup> 野口重信<sup>\*(2)</sup>  
Hideki IMAI Shigenobu NOGUCHI

### 抄 録

天然ガスなどのパイプラインの設計及び操業計画を進める上で、運転開始・停止、緊急遮断時等過渡状態における管内流体挙動を把握することは重要である。そこで新日本製鐵はガス及び気液二相流のパイプライン輸送網を対象とする一次元過渡現象解析プログラムを開発した。このプログラムの機能、構成を紹介すると共に、実プラントを想定した事例における解析結果を報告した。

### Abstract

In designing pipelines for gases, such as natural gas, and planning the operation of such pipelines, an analysis of the behavior of the fluid in the pipe in the transient state, such as start and stop of operation and emergency stop, is indispensable. Nippon Steel Corporation has developed a one-dimensional transient phenomenon analysis program for gas and two-phase flow pipeline. The function and configuration of this program are described and the results of our analysis by this program are reported.

## 1. 緒 言

効率性、安全性、維持管理等を配慮したパイプラインの設計及び操業方法の検討を行うためには、運転開始・停止、緊急遮断や機器の操作等がパイプライン管内流体の熱流動状態に及ぼす過渡的な影響を事前に把握することが重要となってくる。特に、近年のパイプラインの大口径化、長距離化に伴って外乱時の熱流動挙動は複雑になっており、これらの現象を合理的かつ経済的に検討を進めるために、計算機を用いた解析技術に対する期待は大きい。

そこで、パイプラインにおける設計と操業の支援を目的として、ガス及び気液二相流のパイプライン輸送網を対象とする一次元過渡現象解析プログラムを開発した。本解析プログラムでガス及び気液二相流管路網の過渡時における熱流動挙動を解析することにより、基本設計段階での設備容量を合理的かつ経済的に設計できるのみではなく、操業時の制御パラメータや操業条件決定に有効な判断材料を供給することができる。

本報告は、プログラムの機能、構成を紹介し、ガス及び気液二相流の基本的な問題に適用した検証結果と、実際のプラントを想定したガス及び蒸気-水二相流系での熱流動解析適用事例について報告する。

## 2. 解析対象範囲

本解析プログラムで対象とする流動現象は、圧縮性を有する一成分系の流体の非定常一次元流れであり、気相-液相間の相変化についても考慮できる。又、流体と外界間の非定常な伝熱現象について

は、管材や保温材の過渡的な温度変化を含めて解析対象としている。基本的には、計算機主記憶容量の制約を受けない限り、任意の分岐、合流を有する管路網に適用でき、かつ、種々の制御系を有する系にも対応可能である(表1参照)。

## 3. 管路網のモデル化

解析対象の管路網のモデル化は、以下の手順で容易に行うことができる。

- (1) 管路網の系統構成をボリューム(VOLUME)とそれらをつなぐジャンクション(JUNCTION)からなる二つの基本ユニットで表現する。
- (2) 管路網の構成要素の機能に合わせてボリューム、ジャンクション各々に属性を与えるため、機能ユニット(VALVE, PIPE等)を指定し、各種パラメータを入力する。

表 1 解析プログラム概要

作業環境	EWS (Engineering Work Station)
入 力	フリーフォーマット形式
出 力	(1) 全ての物理量の過渡計算時のリスト出力 (2) 最大値・最小値出力 (3) 作図 (画面出力)
計 算	(1) 定常計算 (初期値計算) (2) 過渡計算 (3) リスタート計算 (任意の時間からのリスタート)

\*<sup>(1)</sup> 鉄構海洋事業部 エネルギーエンジニアリング部 掛長

\*<sup>(2)</sup> 鉄構海洋事業部 エネルギーエンジニアリング部

- (3)外界との伝熱については、ボリュームごとに構造材ユニット (SLAB) を指定し、各種パラメータを入力する。
- (4)制御系のループ毎に、構成要素の機能に合わせて制御ユニット (CNTMDL) を指定し、各種パラメータを入力する。
- (5)過渡現象解析のための管路網末端の境界条件や制御弁に対する外乱情報を設定する。

表 2 に構成要素に対応するユニットと、その入力パラメータの概要を示す。又、図 1 に本解析プログラムで適用可能な管路網末端境界条件を示す。

#### 4. 解析手法

##### 4.1 非定常熱流動解析

###### (1)基礎式

本解析の流動解析の基礎式は、以下に示す一次元圧縮性流体の保存式であり、均質熱的平衡モデルを採用する。

質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots(1)$$

運動量保存式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - Ku|u| - K_r u|u| - S_u \quad \dots\dots(2)$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u}{\partial x} = \frac{dP}{dt} + q - S_h \quad \dots\dots(3)$$

運動量保存式においては、流体に作用する力として圧力、重力による体積力、壁面からの摩擦力、及び流路拡大・縮小等の形状損失を考慮した。(2)式、(3)式の  $S_u$ 、 $S_h$  は二相流に対する流れの非均質性を表す項であり、ガス流動解析では省略される。

表 2 ユニット対応表

ユニット	分類	パラメータ	相当する構成要素
VOLUME	PIPE	管長, 等価直径, 管内面粗度, 傾斜角	配管
	SEPARATOR	気液の分離効率	セパレータ
	RESERVOIR	温度, 圧力, 乾き度 (飽和, 未飽和, 過飽和) を時間依存で入力	タンク, ホルダ, 圧力温度境界
JUNCTION	JUNCTION	順流, 逆流の形状損失係数 (入力, 内部計算), 流路面積	連結, 合流, 分岐, オリフィス
	VALVE	順流, 逆流の形状損失係数 (入力, 内部計算), 弁開度を時間依存で入力, 開度に対応する流量特性	手動弁, 調節弁, 遮断弁
	RESERVOIR	順流, 逆流の形状損失係数 (入力, 内部計算), 流量を時間依存で入力	コンプレッサ, ポンプ, 流量境界
SLAB	長さ, 熱的等価直径, 初期温度, 外気温度, 外気との熱伝達率, 構造材の熱容量, 熱伝導率, 発熱量	配管材, 保温材, ヒータ, クーラ	
CNTMDL	制御要素名, 制御パラメータ, 入力項目, 位置, 設定値, 出力項目, 位置, 設定値	PID 制御, 伝送動作遅れ, シーケンス制御	

熱的状態方程式については、ガス熱流動解析では圧縮係数  $z$  を考慮した次式を用いる。

ガスの熱的状態方程式

$$\frac{P}{\rho} = zRT \quad \dots\dots(4)$$

これに対して二相流に対する方程式は、状態方程式を圧力で微分した形の(5)式を用いる。

二相流の熱的状態方程式

$$\frac{d\rho}{dP} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \Big|_h + \frac{\partial \rho}{\partial h} \Big|_P \frac{dh}{dP} \quad \dots\dots(5)$$

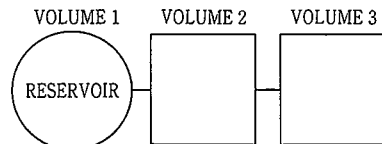
(5)式の偏微分項は、水-蒸気系の場合では熱力学的関係式と蒸気表 (日本機械学会発行の JSME STEAM TABLE 相当) から計算する。その他の一成分系については、ユーザーサブルーチンで任意に設定するものとした。

###### (2)スリップ速度モデル

二相流の気相-液相間のスリップ速度による運動量、エネルギーの散逸を表す項  $S_u$ 、 $S_h$  は、スリップ速度モデルより次のように表される。

$$S_u = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\alpha(1-\alpha)(\rho_l - \rho_g)}{\alpha \rho_g + (1-\alpha)\rho_l} u V_s \right\} \quad \dots\dots(6)$$

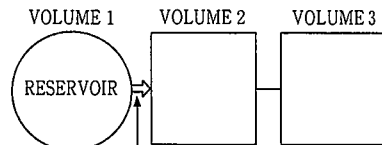
$$S_h = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h_g - h_l) \alpha(1-\alpha)(\rho_l - \rho_g) V_s \right\} - \frac{\alpha(1-\alpha)(\rho_l - \rho_g) V_s}{\alpha \rho_g + (1-\alpha)\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} \quad \dots\dots(7)$$



圧力・温度境界

圧力, 温度, 乾き度を設定する場合は, RESERVOIR に圧力, 温度, 乾き度を時間依存で入力

(a) 圧力, 温度, 乾き度境界

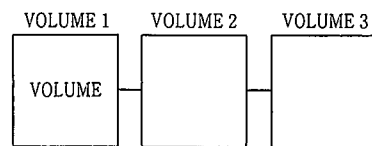


圧力・温度境界

流量境界 (JUNCTION)

流量を設定する場合は, RESERVOIR との間の JUNCTION に流量を時間依存で入力

(b) 流量境界



閉鎖境界を設定する場合は, VOLUME に初期の状態量のみを入力

(c) 閉鎖境界

図 1 境界条件

スリップ速度  $V_s$  は、気相及び液相の速度をそれぞれ  $V_g, V_l$  とすると、

$$V_s = V_g - V_l \quad \dots\dots(8)$$

であり、 $V_g, V_l$  は、ドリフトフラックスモデル<sup>1)</sup>によれば次のように表される。

$$V_g = C_0 J - V_{gj} \quad \dots\dots(9)$$

$$V_l = \frac{J - \alpha V_g}{1 - \alpha} \quad \dots\dots(10)$$

ここで、ボイド率  $\alpha$  は、 $\rho, \rho_g, \rho_l$  を平均密度、気相密度、液相密度とすると、

$$\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \quad \dots\dots(11)$$

の関係から求められる。 $\rho_g, \rho_l$  は流動計算より求めた圧力、エンタルピーを用いて気相及び液相の状態方程式から得ることができる。

$$\rho_g = \rho_g(P, h) \quad \dots\dots(12)$$

$$\rho_l = \rho_l(P, h) \quad \dots\dots(13)$$

ドリフト速度  $V_{gj}$  については、各流動様式に応じて垂直流と水平流の場合のドリフト速度モデルを使用した。

垂直流のドリフト速度モデルは、Ishii や Zuber らによって数多く提案されているが、垂直下降や大口径での精度が良い Hirano らのモデル<sup>2)</sup> (表3参照) を組み込むこととした。本解析では気泡流、スラグ流、フロス流が考慮される。

水平流では流動様式線図として図2に示す Mandhane らの線図<sup>3)</sup>を用いており、流動様式に用いるドリフト速度モデルは原子力工学の分野で使用されている表4に示すモデル<sup>4)</sup>を採用した。

(3)差分法及び時間積分法

質量、運動量、エネルギーの各保存式はコントロールボリューム法により離散化を行い、計算格子は図3に示すスタガードグリッドを採用した。又、対流項には上流差分法を適用した。

時間積分法は、オイラー半陰解法と SETS 法 (Stability Enhancing Two-Step Method)<sup>5)</sup> の2種類が選択できるものとした。

表3 垂直流のドリフト速度モデル

平均流速 j (m/s)	圧力 P (ata)	管径 D (m)	ドリフト速度 $V_{gj}$
$j \leq 0.24$	$P \leq 180$	$D \leq 0.61$	$a_1 \left[ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4}$
		$D \leq 0.05$	$a_1 \left[ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4}$
$j \geq 0.24$	$15 \leq P \leq 180$	$0.05 \leq D$	$a_2 \left[ \frac{g \cdot D \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{1/2}$
		$D \leq 0.02$	$P \leq 15 \text{ata}$ と同じ $V_{gj}^*$
		$0.02 \leq D \leq 0.24$	$V_{gj}^* + \left[ a_3 \left( \frac{0.24g(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{1/2} - a_1 \left[ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4} \right] \times a_4 \left[ \left( \frac{D}{0.02} \right)^{1/2} - 1 \right]$
		$0.24 \leq D \leq 0.46$	$a_3 \left[ \frac{g \cdot D \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{1/2}$

平均速度 j (m/s)	分布パラメータ $C_0$
$j \leq -3.5$	$a_5 - a_6 \rho_g / \rho_l$
$-3.5 \leq j \leq -2.5$	$a_7 + a_8 \rho_g / \rho_l - 0.3(1 - \rho_g / \rho_l)(2.5 + j)$
$-2.5 \leq j \leq 0$	$a_7 + a_8 \rho_g / \rho_l$
$0 \leq j$	$a_5 - a_6 \rho_g / \rho_l$

$\sigma$ : 表面張力  
 $V_{gj}^*$ :  $P \leq 15 \text{ata}$  の時の  $V_{gj}$   
 $a_1 \sim a_8$ : 定数

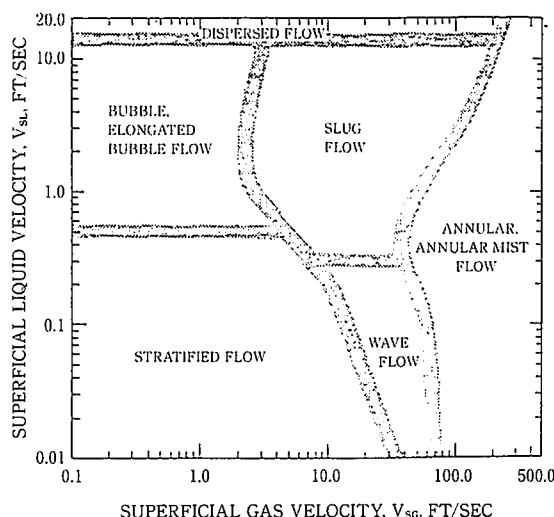
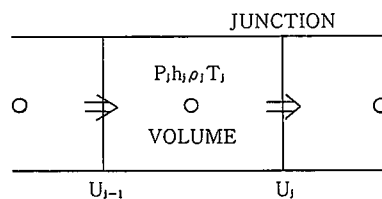


図2 Mandhane らの流動様式線図

表4 水平流のドリフト速度モデル

流動様式	分布パラメータ $C_0$	ドリフト速度 $V_{gj}$
気泡流	$C_0 = b_1 - b_2 \rho_g / \rho_l \times (1 - e^{-100})$	$V_{gj} = 0$
スラグ流	$C_0 = b_3$	$V_{gj} = b_4 g \Delta \rho D / \rho_l$
環状流 環状噴霧流	$C_0 = 1 + \frac{(1 - \alpha)(1 - E_d)}{\alpha + 4 \rho_g / \rho_l}$	$V_{gj} = 0$
層状流 波状流	$C_0 = \frac{1}{\alpha (\rho_g / \rho_l)^{4/9} (\mu_g / \mu_l)^{1/9} g (\alpha)^{10/9}}$ $g(\alpha)$ は次式の逆関数 $\alpha = f(Y)$ $= 1 - \left( 1 - \frac{21}{Y} + \frac{1}{Y^2} \right)^{-0.5}$ $Y$ : Lockhart-Martinelli のパラメータ	$V_{gj} = 0$

$E_d$ : 液滴流量比  
 $b_1 \sim b_4$ : 定数



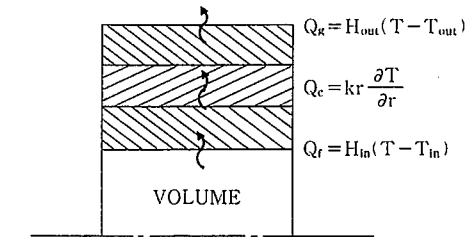
$P_j, h_j, \rho_j, T_j$ : j 番目 VOLUME での圧力, エンタルピー, 密度, 温度  
 $U_j, U_{j-1}$ : j 番目, j-1 番目 JUNCTION での速度

図3 スタガードグリッド

オイラー半陰解法は、基本的には繰り返し計算が不要な陽解法であるが、運動量保存式の圧力項、質量保存式、エネルギー保存式の対流項を陰的に処理する方法である。この手法では時間刻み幅はクーラン安定条件に制限される。

一方 SETS 法は、半陰解法の前後に各保存式の安定化式を解くところに特徴があり、クーラン安定条件の制限を越えた時間刻み幅での計算が可能で、かつ、解析の安定性は良好である。この SETS 法の採用により計算時間の大幅な短縮が可能となった。

なお本プログラムは自動時間刻み幅設定機能を有し、適切な時間刻み幅を自動的に計算することができる。



$Q_R, Q_r$ : 管外側表面, 管内側面を通過する熱量  
 $Q_c$ : 管構造材内部を通過する熱量  
 $H_{out}, H_{in}$ : 管外側表面, 管内側面での熱伝達係数  
 $T_{out}, T_{in}$ : 管外側, 管内側の温度

図 4 構造材の熱伝達

#### 4.2 流体—外界間の非定常熱解析

流体—外界間の非定常熱現象については、図4に示すように境界における熱伝達と構造材（管材、保温材、土壌等）内部の熱伝導を組み合わせた解析を行うものとする。構造材の形状、温度分布共に軸対象とし、温度は軸方向に独立と仮定すると、構造材内部の半径方向の一次元非定常熱伝導方程式は次の通りである。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad \dots\dots(14)$$

次に、流体側（流体—構造材間）の境界条件は次式を用いた。

流体側境界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = H_{in}(T - T_{in}) \quad \dots\dots(15)$$

ここで、熱伝達係数  $H_{in}$  は、ガスについては円管内強制対流乱流熱伝達の式を用いて求めるものとし、水—蒸気系の気液二相流では流動状態や加熱状態で各種の沸騰状態を考慮した WREM の評価モデル<sup>6)</sup>により与えるものとした。その他の一成分系の二相流についてはユーザーサブルーチンによって任意に定義することができる。

一方、外界側（構造材—外界間）の境界条件については、必要な外界側の熱伝達係数  $H_{out}$  を入力で与えた一定値とした。

外界側境界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = H_{out}(T - T_{out}) \quad \dots\dots(16)$$

#### 4.3 制御系モデル

制御系のモデル化を行うため制御ユニットを組み込んだ。なお制御要素の構成は以下に示す各要素から成り立ち、入力で自由に与えられる。

一次遅れ要素	二次遅れ要素	進み遅れ要素
積分要素	微分要素	PID 要素
加算要素	乗算要素	最大値要素
トリップユニット要素	最小値要素	非線形要素
トリップディレイ要素		

#### 4.4 臨界流モデル

ガスの流動解析では、臨界圧力比の式より臨界流量が得られる。二相流においては、流路での蒸発や凝縮、気液のスリップ速度の影響等によりガスの理論は適用できない。水—蒸気系では流路の形状や流動状態によって様々なモデルが構築されているが、ここでは原子力解析で広く用いられている均質平衡モデル (HEM モデル)<sup>7)</sup>を用いた。

その他の二相流ではユーザーサブルーチンで任意にモデル化できる。

#### 4.5 初期値設定機能

本プログラムでは自動初期値設定機能を有しており、時間項を省略した質量、運動量及びエネルギーの三つの保存式を Newton 法による反復法を用いて解き、圧力、速度、密度、エンタルピー等の初期値を設定することができる。又、同時に制御弁開度も自動設定される。これによって過渡計算を行う際の初期値設定作業の負荷軽減が図れた。

### 5. 解析プログラムの検証

本解析プログラムによる解析結果が妥当であることを確認するための検証を、実験結果あるいは数値解析結果との比較により実施した。

一次元ガスの検証は、1) 衝撃波管 (Shock Tube) の解析解との比較、2) 公開コード Topaz<sup>8)</sup> の結果との比較によって行ったが、全体にわたり良好な結果が得られた。

二次元二相流については、1) Edward's Pipe 問題<sup>9)</sup> の実験結果との比較、2) 水平管沸騰問題の PHOENICS コードとの比較、3) 垂直管のサブクール水による蒸気除去問題の他コードとの比較を行った。水平管沸騰問題の PHOENICS コードとの比較についてモデルと検証結果を図5に示す。

### 6. 解析事例

ここでは、本解析プログラムを用いて実プラントを想定した解析事例を紹介する。

#### 6.1 一次元ガス事例

ガスを対象とした一例として、ここでは、天然ガスの長距離パイプラインにおける過渡現象解析例を示す。モデル構成と解析条件を図6に示す。

(1) モデルの特徴及び解析条件

(i) 天然ガスは生産基地 (CPP) より供給され、約420km 先の発電所

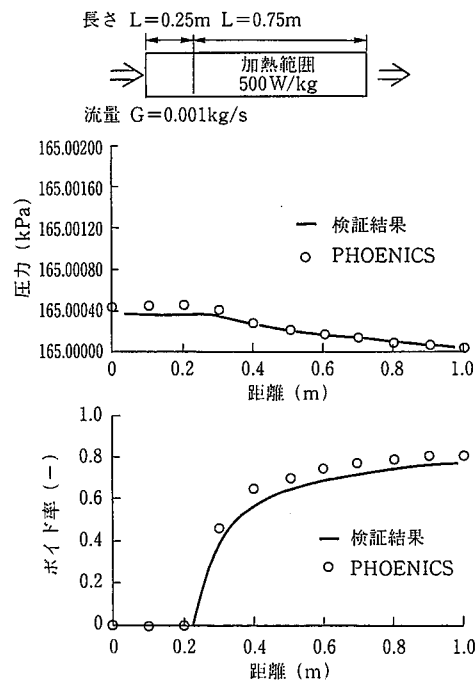


図 5 モデル及び検証結果

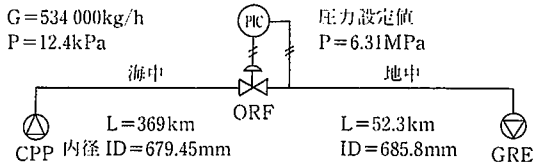


図 6 一次元ガス解析モデル

(GRE) まで輸送される。

- (ii) 上流側生産基地からの供給流量は常時一定である。
- (iii) 下流側は発電所であり、昼夜間の消費流量変動が大きい。
- (iv) パイプラインの途中のステーション (OPF) には、下流側の設計圧力を下げる目的で、流量制御ではなく下流圧力制御を行うための制御弁が設置されている。ここでは、発電所での天然ガス消費流量を12時間周期で約±5%の二段階に変動させ、パイプライン上流・下流圧力への影響及びステーションの制御弁 (ORF) の動作について解析した。

(2) 過渡計算結果

初期定常状態でのパイプラインの圧力分布を図7に示す。

又、過渡解析結果として、図8に各地点での流量変化、圧力変化、及びステーションでの制御弁開度の変化を示す。

この解析結果より次のことがわかる。

- (i) 消費側の流量変動に対し、パイプライン上流での圧力変動はほとんどない。
- (ii) 圧力制御弁の下流圧力は設定値以上には上がらない。

下流側の流量が急激に負荷増大しても、パイプライン自体がタンクの役目を果たすため、途中の圧力制御弁は下流の圧力を設定値に制御しながらゆっくりと開き、最終的に全開に達する。その後、制御弁下流圧力は設定値以下になる。次に下流側流量が負荷減少すると、圧力制御バルブは下流側が設定圧力になるまで全開であるが、設定値以上になると弁が急激に絞られ、下流圧力は制御されている。

以上より、このモデルでは敷設距離が非常に長いいため、パイプライン自体が十分なバッファタンクとしての役割を果たしており、流量変化に対する圧力変化は小さく、圧力調節弁によって設計圧力の変更 (クラスブレイク) をした場合でも問題ないことがわかった。

6.2 一次元二相流事例

一次元二相流の一例として、タンクからの熱水放出 (ブローダウン) 時における下流配管内の過渡流動解析を取り挙げる。解析モデルを図9に示す。

(1) モデルの特徴及び解析条件

- (i) 上流側タンクと熱水輸送配管の間には、瞬時に開く放出弁が設けられている。
- (ii) 上流側のタンクには高圧の熱水が封じ込まれ、放出弁より下流側

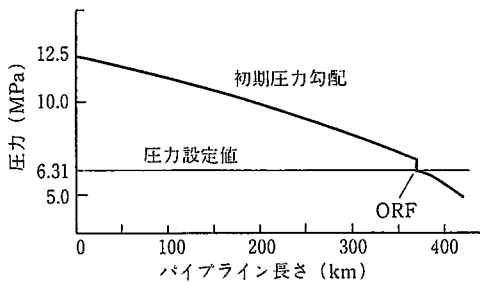
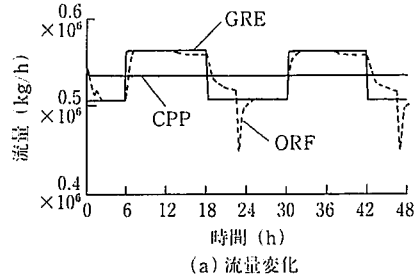
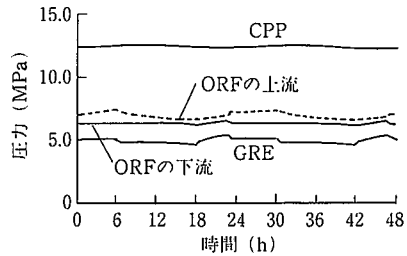


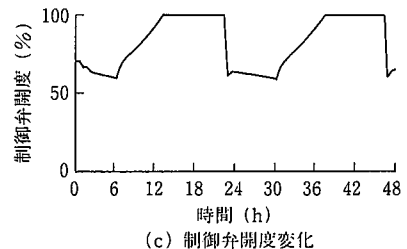
図 7 初期圧力分布



(a) 流量変化



(b) 圧力変化



(c) 制御弁開度変化

図 8 ガス解析事例の結果

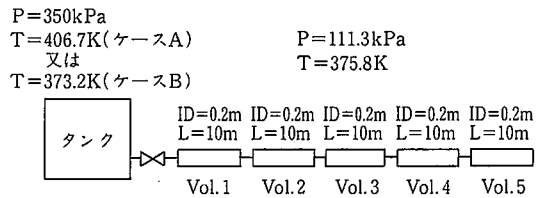


図 9 一次元二相流解析モデル

には大気圧下で飽和水の状態にある水が満たされている。

- (iii) 弁を急激に開くことによってタンクの熱水が解放されて流れ出し、下流配管中の流体の急激な流動状態変化が起こる。

ここでは、圧力350kPaの上流側タンク内の熱水温度条件が、A: 406.7K (放出後蒸気発生あり) の場合と、B: 373.2K (放出後蒸気発生なし) の場合の2ケースについて、放出弁を開いた場合の熱水輸送管内流動状態を解析する。

(2) 過渡計算結果

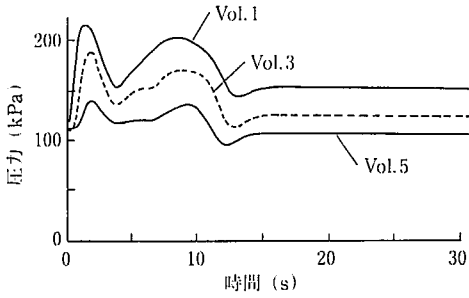
図10にそれぞれケースA及びケースBの各部における圧力過渡変化を示す。図11にはケースA及びケースBでの弁下流の流量過渡変化を示す。

この解析結果より次のことがわかる。

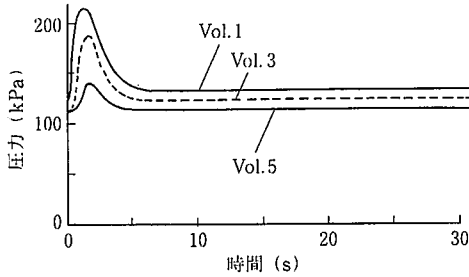
- (i) ケースAでは、急激な熱水の放出によって放出弁下流側で蒸気が発生し、気液二相流となって複雑な圧力及び流量変化を見せている。
- (ii) ケースBでは、熱水の放出後の放出弁下流における圧力及び流量変化は単純であり、早期に定常状態に到達している。

(iii) 液単相の流れとなるケースBの流量に比べ、気液二相流となるケースAの流量は少ない。

ケースAは流動様式が変化し、二相流となることによって圧力変



(a) ケースA：圧力変化



(b) ケースB：圧力変化

図 10 二相流解析事例の結果

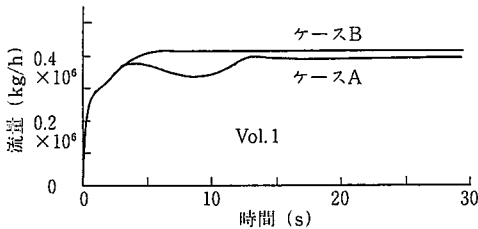


図 11 ケースA及びケースBの弁下流の流量

動が大きくなっている。急激な圧力変動は管形状によっては配管の振動を招く原因となるため留意する必要がある。

## 7. 結 言

ガス及び気液二相流管路網の過渡時の熱流動解析を目的として次元過渡解析プログラムの開発を行い、ガス及び気液二相流の基本的な問題の解析結果から本プログラムの有効性が確認された。又、実プラントを想定したガス及び蒸気-水二相流系での熱流動解析適用例を報告した。

今後は、本解析プログラムの積極的なプロジェクトへの適用を図ると共に、更に解析対象範囲の拡大及び解析精度の向上に努力していきたいと考えている。

最後に、本論文執筆にあたり、多大な御協力をいただいた(株)富士総合研究所 三橋利玄氏、石井克正氏に謝意を表します。

## 記 号

- $t$  : 時刻 (s)
- $x$  : 座標 (m)
- $\rho$  : 流体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $u$  : 流速 (m/s)
- $P$  : 流体圧力 (Pa)
- $z$  : 圧縮係数 (—)
- $K$  : 形状による損失係数 (1/m)
- $K_f$  : 壁面摩擦による損失係数 (1/m)
- $g \cos\theta$  : 重力による体積力 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
- $h$  : 流体エンタルピー ( $\text{J}/\text{kg}$ )
- $q$  : 発熱量 ( $\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ )
- $S_u, S_h$  : スリップ速度による運動量又はエネルギーの変化量
- $r$  : 半径座標 (m)
- $T$  : 温度 (K)
- $R$  : ガス定数 ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )
- $C$  : 比熱 ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{s}$ )
- $k$  : 熱伝導度 ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )
- $H$  : 熱伝達係数 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )
- $Q$  : 単位体積あたり発熱量 ( $\text{W}/\text{m}^3$ )
- $R1$  : 構造材内径 (m)
- $R2$  : 構造材外径 (m)
- $\alpha$  : ボイド率 (—)
- $V$  : 速度 (m/s)
- $V_s$  : スリップ速度 (m/s)
- $J$  : 体積流速 (m/s)
- $C_o$  : 分布パラメータ (—)
- $V_{gj}$  : ドリフト速度 (m/s)
- $f$  : 液相の添字
- $g$  : 気相の添字

## 参考文献

- 1) Ishii, M. : Two-Phase Flows and Heat Transfer. NATO Adv. Study Inst. Two Phase Flows Heat Transfer, Istanbul, 1976-8
- 2) Hirano, Y. et al. : 2nd Intern. Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Tokyo, 1986-4
- 3) Mandhane, J. M. et al. : J. Petroleum Technol. 29 (10), 1348 (1977)
- 4) 日本原子力学会 : 原子炉における熱流動数値解析の現状(III). 1988
- 5) Mahaffy, J. M. : J. Computational Physics. 46 (3), 329 (1982)
- 6) 田部文也 ほか : WREM-J2 : 原研改良版軽水炉安全性評価コードシステム. JAERI-M9285, 1981
- 7) Moody, F. J. : Maximum Discharge Rate of Liquid-Vapor Mixtures from Vessel, NEDO-21052, 1975
- 8) Winters, W. S. : TOPAZ-The Transient One Dimensional Pipe Flow Analyzer : Code Validation and Sample Problems. SAND85-8236. U. S. Department of Energy, 1985, p.102
- 9) Edwards, A. R. et al. : J. the British Nuclear Energy Society. 9 (2), 125 (1970)