

1次元気液二相流管路系解析シミュレータAdvance/FrontNet/TP

森田 秀利* 松原 聖** 菊池 愛子**

One-Dimensional Two-Phase Flow Analyzer in Pipeline Systems :
Advance/FrontNet/TP

Hidetoshi Morita*, Kiyoshi Matsubara** and Aiko Kikuchi**

当社では、気相、液相混合流体である気液二相流を解析するために、1次元気液二相流管路系解析シミュレータ Advance/FrontNet/TP の開発を進めてきた。Advance/FrontNet/TP は、ドリフトフラックスモデルに基づく気液二相流モデルを採用し、流体の基礎方程式を1次元の有限差分法で離散化した差分方程式を完全陰解法で解くようにしている。さらに、Advance/FrontNet/TP の大きな特徴として、流体構造連成機能を有していることであり、流体の差分方程式と強連成で解くようにしている。

本稿では、Advance/FrontNet/TP の解析手法と、Advance/FrontNet/TP の妥当性の検証のために実施した高温高圧水のブローダウン試験解析、圧力波の伝播解析、流体構造連成解析について紹介する。

Key word: 気液二相流管路系、過渡解析、水-水蒸気系、有限差分法、完全陰解法、流体構造連成、ブローダウン、圧力波伝播

1. はじめに

気液二相流は気体と液体が混合した混相流である。液体単体の流体である単相流とは違い気体と液体の速度も異なり、気体と液体の体積混合比によってもさまざまな流れとなる。また、気液間でのエネルギーの移動、圧縮、凝縮、膨張、蒸発など現象も考慮する必要がある。このように気液二相流は自由度が大きく複雑な流動現象である。

冷凍・空調機において配管内部冷媒の状態変化をとらえることは機械設計の上で重要になってくる。冷凍・空調機内の冷媒は気液二相流になっており開発した Advance/FrontNet/TP で解析を行うことが可能である。なお、本誌掲載「Advance/FrontNet/TP による冷凍機器シミュレーション」では Advance/FrontNet/TP で冷凍機を解析した結果を示しているので参照されたい。

近年ではコンピュータ性能の向上により 3次元

*アドバンスソフト株式会社 技術第4部

4th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 技術第5部

5th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

解析を手軽に行うことができるようになりつつある。しかし、原子力プラント、冷凍・空調などの大規模なプラント設計では解析モデルが膨大になる。このため、このような大規模なモデルに対して3次元で解析することは現在では大規模コンピュータを用いなければ解析できない。プラント内部の気相、液相の物性値の挙動を把握したい場合には3次元解析よりも1次元管路系プログラムを用いて解析した方が計算時間やコスト面からみても合理的になってくる。

そこで本稿では新たに開発した1次元気液二相流管路系解析シミュレータ Advance/FrontNet/TP の解析手法と解析事例を紹介する。

2. 物理モデル

2.1. 流体基礎方程式

管路系1次元流体計算で気液二相流の数学モデルは、気液速度の関係の取り扱いを中心に、気液が等速とする均質モデル、気液速度差を相関式で与えるドリフトフラックスモデル、気液運動を個別に計算する二流体モデルに分けることができる。

Advance /FrontNet/TP ではドリフトフラックスモデルを採用している。

以下にドリフトフラックスモデルで記述した基礎方程式を示す。

①質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

②気相の質量保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \rho_g \frac{G}{\rho_m} \right) \\ = \Gamma_g - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} V_{gj} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

③運動量保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{G^2}{\rho_m} + \frac{\rho_g \rho_l}{\rho_m} \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{gj}^2 \right\} \\ = - \frac{\partial P}{\partial z} - g \rho_m - F_w \end{aligned} \quad (3)$$

④エネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_m h_m}{\partial t} + \frac{\partial G h_m}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{G}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial z} \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) V_{gj} \right\} + q \end{aligned} \quad (4)$$

基礎方程式中の変数を表 1 に示す。添字の g と l はそれぞれ気相と液相を示し、 m は二相流の混合平均を表す。

気液二相流では液相、気相と二相流の各物質質量の関係が重要である。二相平均密度 ρ_m と質量流束 G は次のように定義される。

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

$$G = \alpha \rho_g u_g + (1-\alpha) \rho_l u_l \quad (6)$$

気液の速度差 u_r は次の通りである

$$u_r = u_g - u_l \quad (7)$$

これは次のドリフトフラックス関係式から得ることができる

$$u_g = C_0 j + V_{gj} \quad (8)$$

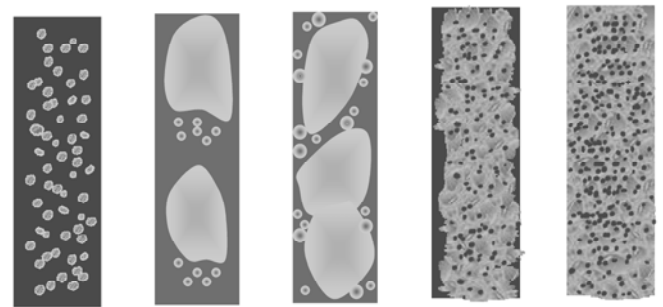
ここで C_0 は分布定数、と V_{gj} はドリフト速度である。この分布定数 C_0 とドリフト速度 V_{gj} は Ishii[1]

により図 1 に示す流動様式毎に評価式が与えられている。 j は二相体積流束と呼ばれ以下の式で与えられる。

$$j = \alpha u_g + (1-\alpha) u_l \quad (9)$$

表 1 流体方程式中の変数の意味

変数	単位	意味
ρ	$[kg/m^3]$	密度
α	$[-]$	ボイド率
G	$[kg/(s \cdot m^2)]$	質量流束
z	$[m]$	流れ方向の座標
t	$[s]$	時間
P	$[Pa]$	圧力
V_{gj}	$[m/s]$	ドリフト速度
F_w	$[kg/(m^2 \cdot s^2)]$	摩擦損失
h	$[J/kg]$	比エンタルピー
g	$[m/s^2]$	重力加速度
Γ_g	$[kg/(m^3 \cdot s)]$	単位体積当たりの蒸発速度
q	$[J]$	外部との熱交換



気泡流 スラグ流 チャーン流 環状噴霧流 噴霧流

図 1 垂直上昇流の流動様式[6]

2.2. 機能一覧

Advance/FrontNet/TP の機能一覧を以下の表に示した。

表 2 Advance/FrontNet/TP 一覧

項目	入力詳細
直管	(形状) 配管長、配管径 (材質) 粗度
境界条件 ・ 圧力指定 ・ 流量指定 ・ ボイド率指定	Dirichlet 条件 ・ 固定値または時系列情報 Neumann 条件
接続条件	直列、分岐、合流
局所抵抗	抵抗係数

2.3. 状態方程式

Advance/FrontNet/TP では使用可能な媒体として日本機械学会出版の蒸気表と米国のアメリカ国立標準技術研究所 (NIST : National Institute of Standards and Technology, USA) が開発したプログラム REFPROP のデータをもとに状態方程式を求めている。

2.4. 蒸発・凝縮

気液二相流シミュレーションにおいて液相から気相への蒸発、気相から液相への凝縮をモデル化することが重要になってくる。Advance/FrontNet/TP に組み込まれている蒸発・凝縮モデルは以下の 2 種類である。

①Akiyama モデル[6]

・蒸発・凝縮式

$$\Gamma_g = \rho_m \frac{X_e - X_s}{\tau} \quad (10)$$

②RELAP5 モデル[6]

・蒸発式

$$\Gamma_g = \rho_m \frac{A(G+3500)}{\rho_g} \sqrt{P}(X_s + 0.00001)(X_s - X_e) \quad (11)$$

・凝縮式

$$\Gamma_g = -1.0 \times 10^5 x(x - x_e) \rho_m \quad (12)$$

X_e : 平衡クオリティ

X_s : 静的クオリティ

τ : パラメータ (= 0.05s)

A : パラメータ (= 6.4517175×10^{-3})

3. 数値解法

3.1. 二相の質量保存の離散化と線形化

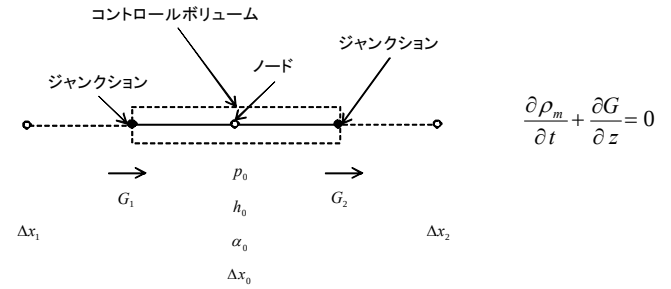


図 2 二相の質量保存の離散化

基礎方程式は(1)式で、これをコントロールボリュームで積分して、

$$f_p \equiv V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2) \frac{\rho_m - \rho_m^0}{\Delta t} + A(\Delta x_0, \Delta x_1) G_1 - A(\Delta x_0, \Delta x_2) G_2 = 0 \quad (11)$$

となる。上記のように、この式を f_p とおく。これを Newton-Raphson 法で線形化した場合に必要な項は、

$$\left(\frac{\partial f_p}{\partial G_1}, \frac{\partial f_p}{\partial G_2}, \frac{\partial f_p}{\partial p_0}, \frac{\partial f_p}{\partial h_0}, \frac{\partial f_p}{\partial \alpha_0}, \frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_0}, \frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_1}, \frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_2} \right)$$

である。これらの項は、以下のようになる。

$$\frac{\partial f_p}{\partial G_1} = A(\Delta x_0, \Delta x_1) \quad (12)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial G_2} = -A(\Delta x_0, \Delta x_2) \quad (13)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial p_0} = \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{\partial \rho_m}{\partial p_0} \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial h_0} = \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{\partial \rho_m}{\partial h_0} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial \alpha_0} = \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{\partial \rho_m}{\partial \alpha_0} \quad (16)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_0} = \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} \frac{\rho_m - \rho_m^0}{\Delta t} + \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_0} G_1 - \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} G_2 \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_1} = \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} \frac{\rho_m - \rho_m^0}{\Delta t} + \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_1} G_1 \quad (18)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_2} = \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \frac{\rho_m - \rho_m^0}{\Delta t} - \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} G_2 \quad (19)$$

これを係数行列の1行として、のちに示す手順にて全体の係数行列を作成し、線形化した方程式を解く。

3.2. 気相の質量保存の離散化と線形化

気相の質量保存の離散化と線形化について示す。まず、基礎方程式は次の通りであり、下図に示すコントロールボリュームで離散化する。

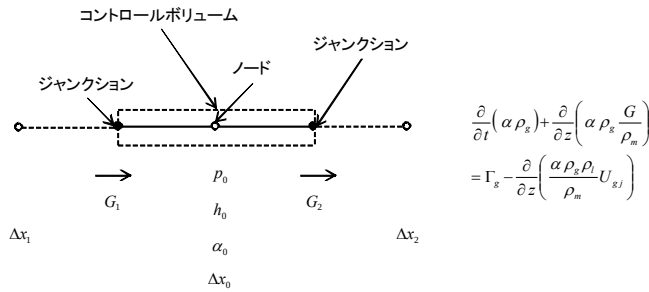


図3 気相の質量保存の離散化

基礎方程式は(2)式になり、これを、コントロールボリュームで積分して、

$$\begin{aligned} f_\alpha &\equiv V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2) \frac{\alpha_0 \rho_g - \alpha_0 \rho_g^0}{\Delta t} \\ &+ A(\Delta x_0, \Delta x_1) \alpha_0 \rho_g \frac{G_1}{\rho_m} \\ &- A(\Delta x_0, \Delta x_2) \alpha_0 \rho_g \frac{G_2}{\rho_m} \\ &- V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2) \Gamma_g \\ &- A(\Delta x_0, \Delta x_1) \frac{\alpha_0 \rho_g \rho_l}{\rho_m} U_{gj1} \\ &+ A(\Delta x_0, \Delta x_2) \frac{\alpha_0 \rho_g \rho_l}{\rho_m} U_{gj2} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

となる。上記のように、この式を f_α とおく。これをNewton-Raphson法で線形化した場合に必要項は、

$$\left(\frac{\partial f_\alpha}{\partial G_1}, \frac{\partial f_\alpha}{\partial G_2}, \frac{\partial f_\alpha}{\partial p_0}, \frac{\partial f_\alpha}{\partial h_0}, \frac{\partial f_\alpha}{\partial \alpha_0}, \frac{\partial f_\alpha}{\partial \Delta x_0}, \frac{\partial f_\alpha}{\partial \Delta x_1}, \frac{\partial f_\alpha}{\partial \Delta x_2} \right)$$

である。これらの項は、以下のようになる。

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial G_1} = A(\Delta x_0, \Delta x_1) \alpha_0 \rho_g \frac{1}{\rho_m} \quad (21)$$

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial G_2} = -A(\Delta x_0, \Delta x_2) \alpha_0 \rho_g \frac{1}{\rho_m} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial p_0} &= \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{\partial \rho_g}{\partial p_0} \\ &+ A(\Delta x_0, \Delta x_1) \alpha_0 G_1 \frac{\partial}{\partial p_0} \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right) \\ &- A(\Delta x_0, \Delta x_2) \alpha_0 G_2 \frac{\partial}{\partial p_0} \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial h_0} &= \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{\partial \rho_g}{\partial h_0} \\ &+ A(\Delta x_0, \Delta x_1) \alpha_0 G_1 \frac{\partial}{\partial h_0} \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right) \\ &- A(\Delta x_0, \Delta x_2) \alpha_0 G_2 \frac{\partial}{\partial h_0} \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \alpha_0} &= \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{\partial \rho_g}{\partial \alpha_0} \\ &+ A(\Delta x_0, \Delta x_1) \alpha_0 G_1 \frac{\partial}{\partial \alpha_0} \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right) \\ &- A(\Delta x_0, \Delta x_2) \alpha_0 G_2 \frac{\partial}{\partial \alpha_0} \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right) \\ &+ A(\Delta x_0, \Delta x_1) \rho_g \frac{G_1}{\rho_m} - A(\Delta x_0, \Delta x_2) \rho_g \frac{G_2}{\rho_m} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \Delta x_0} &= \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} \frac{\alpha_0 \rho_g - \alpha_0 \rho_g^0}{\Delta t} \\ &+ \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_0} \alpha_0 \rho_g \frac{G_1}{\rho_m} \\ &- \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} \alpha_0 \rho_g \frac{G_2}{\rho_m} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \Delta x_1} &= \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} \frac{\alpha_0 \rho_g - \alpha_0 \rho_g^0}{\Delta t} \\ &+ \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_1} \alpha_0 \rho_g \frac{G_1}{\rho_m} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial \Delta x_2} = \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \frac{\alpha_0 \rho_g - \alpha_0 \rho_g^0}{\Delta t} - \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \alpha_0 \rho_g \frac{G_2}{\rho_m} \quad (28)$$

これを係数行列の1行として、のちに示す手順にて全体の係数行列を作成し、線形化した方程式を解く。

3.3. 二相の運動量保存の離散化と線形化

二相の運動量保存の離散化と線形化について示す。まず、基礎方程式は次の通りであり、下図に示すコントロールボリュームで離散化する。

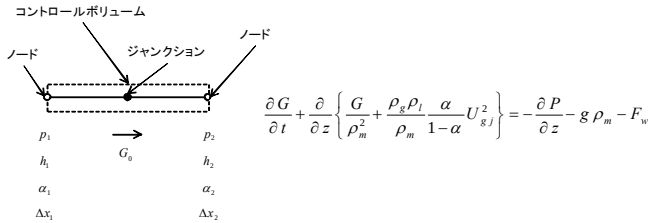


図4 二相の運動量保存の離散化

基礎方程式は(3)式で表わされる。

$$\begin{aligned} f_v &= V(\Delta x_1, \Delta x_2) \frac{G_0 - G^0}{\Delta t} \\ &+ A(\Delta x_1) \frac{G_0^2}{\rho_m(p_1, h_1, \alpha_1)} \\ &- A(\Delta x_2) \frac{G_0^2}{\rho_m(p_2, h_2, \alpha_2)} \\ &+ A(\Delta x_1) p_1 - A(\Delta x_2) p_2 + g \rho_m V(\Delta x_1, \Delta x_2) \\ &+ F_w(G_0) V(\Delta x_1, \Delta x_2) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

となる。上記のように、この式を f_v とおく。これをNewton-Raphsonで線形化した場合に必要な項は、

$$\left(\frac{\partial f_v}{\partial G_0}, \frac{\partial f_v}{\partial p_1}, \frac{\partial f_v}{\partial h_1}, \frac{\partial f_v}{\partial \alpha_1}, \frac{\partial f_v}{\partial p_2}, \frac{\partial f_v}{\partial h_2}, \frac{\partial f_v}{\partial \alpha_2}, \frac{\partial f_v}{\partial \Delta x_1}, \frac{\partial f_v}{\partial \Delta x_2} \right)$$

である。これらの項は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_v}{\partial G_0} &= V(\Delta x_1, \Delta x_2) \frac{1}{\Delta t} \\ &+ 2A(\Delta x_1) \frac{G_0}{\rho_m(p_1, h_1, \alpha_1)} \\ &- 2A(\Delta x_2) \frac{G_0}{\rho_m(p_2, h_2, \alpha_2)} \\ &+ \frac{\partial F_w(G_0)}{\partial G_0} V(\Delta x_1, \Delta x_2) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\frac{\partial f_v}{\partial p_1} = -A(\Delta x_1) \frac{G_0^2}{\rho_m^2(p_1, h_1, \alpha_1)} \frac{\partial \rho_m}{\partial p_1} + A(\Delta x_1) \quad (31)$$

$$\frac{\partial f_v}{\partial p_2} = A(\Delta x_2) \frac{G_0^2}{\rho_m^2(p_2, h_2, \alpha_2)} \frac{\partial \rho_m}{\partial p_2} - A(\Delta x_2) \quad (32)$$

$$\frac{\partial f_v}{\partial h_1} = -A(\Delta x_1) \frac{G_0^2}{\rho_m^2(p_1, h_1, \alpha_1)} \frac{\partial \rho_m}{\partial h_1} + A(\Delta x_1) \quad (33)$$

$$\frac{\partial f_v}{\partial h_2} = A(\Delta x_2) \frac{G_0^2}{\rho_m^2(p_2, h_2, \alpha_2)} \frac{\partial \rho_m}{\partial h_2} - A(\Delta x_2) \quad (34)$$

$$\frac{\partial f_v}{\partial \alpha_1} = -A(\Delta x_1) \frac{G_0^2}{\rho_m^2(p_1, h_1, \alpha_1)} \frac{\partial \rho_m}{\partial \alpha_1} + A(\Delta x_1) \quad (35)$$

$$\frac{\partial f_v}{\partial \alpha_2} = A(\Delta x_2) \frac{G_0^2}{\rho_m^2(p_2, h_2, \alpha_2)} \frac{\partial \rho_m}{\partial \alpha_2} - A(\Delta x_2) \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_v}{\partial \Delta x_1} &= \frac{\partial V(\Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} \frac{G_0^2 - G^0}{\Delta t} \\ &+ \frac{\partial A(\Delta x_1)}{\partial \Delta x_1} \frac{G_0^2}{\rho_m(p_1, h_1, \alpha_1)} + \frac{\partial A(\Delta x_1)}{\partial \Delta x_1} p_1 \\ &+ g \rho_m \frac{\partial V(\Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} + g V(\Delta x_1, \Delta x_2) \frac{\partial \rho_m}{\partial \Delta x_1} \\ &+ F_w(G_0) \frac{\partial V(\Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_v}{\partial \Delta x_2} &= \frac{\partial V(\Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \frac{G_0^2 - G^2}{\Delta t} \\
&- \frac{\partial A(\Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \frac{G_0^2}{\rho_m(p_2, h_2, \alpha_2)} - \frac{\partial A(\Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} p_2 \\
&+ g \rho_m \frac{\partial V(\Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} + g V(\Delta x_1, \Delta x_2) \frac{\partial \rho_m}{\partial \Delta x_2} \\
&+ F_w(G_0) \frac{\partial V(\Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2}
\end{aligned} \quad (38)$$

これを係数行列の1行として、のちに示す手順にて全体の係数行列を作成し、線形化した方程式を解く。

3.4. 二相のエネルギー保存の離散化と線形化

二相のエネルギーの離散化と線形化について示す。まず、基礎方程式は次の通りであり、下図に示すコントロールボリュームで離散化する。

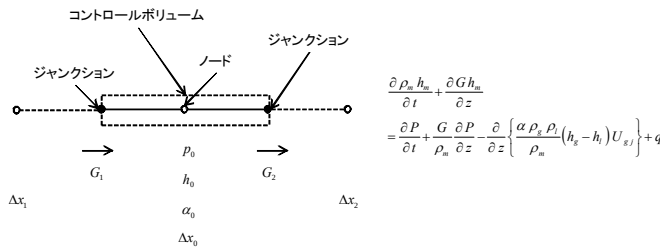


図5 二相のエネルギー保存の離散化

基礎方程式は(4)式で表わされる。これを、コントロールボリュームで積分して、

$$\begin{aligned}
f_h &\equiv V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2) \frac{\rho_m h_m - \rho_m^0 h_m^0}{\Delta t} \\
&+ A(\Delta x_0, \Delta x_1) G_1 h_0 - A(\Delta x_0, \Delta x_2) G_2 h_0 \\
&- V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2) \frac{P - P^0}{\Delta t} \\
&- \frac{G_1}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_1) P_0 + \frac{G_2}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_2) P_0 \\
&+ V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2) q = 0
\end{aligned} \quad (39)$$

となる。上記のように、この式を f_h とおく。これを Newton-Raphson 法で線形化した場合に必要項は、

$$\left(\frac{\partial f_h}{\partial G_1}, \frac{\partial f_h}{\partial G_2}, \frac{\partial f_h}{\partial p_0}, \frac{\partial f_h}{\partial h_0}, \frac{\partial f_h}{\partial \alpha_0}, \frac{\partial f_h}{\partial \Delta x_0}, \frac{\partial f_h}{\partial \Delta x_1}, \frac{\partial f_h}{\partial \Delta x_2} \right)$$

である。これらの項は、以下のようになる。

$$\frac{\partial f_h}{\partial G_1} = A(\Delta x_0, \Delta x_1) h_0 - \frac{1}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_1) P_0 \quad (40)$$

$$\frac{\partial f_h}{\partial G_2} = A(\Delta x_0, \Delta x_2) h_0 - \frac{1}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_2) P_0 \quad (41)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_p}{\partial p_0} &= V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2) \frac{h_m}{\Delta t} \frac{\partial \rho_m}{\partial p_0} \\
&- \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \\
&- \frac{G_1}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_1) + \frac{G_2}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_2)
\end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_p}{\partial h_0} &= \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{h_m}{\Delta t} \frac{\partial \rho_m}{\partial h_0} \\
&+ A(\Delta x_0, \Delta x_1) G_1 - A(\Delta x_0, \Delta x_2) G \\
&+ \frac{G_1}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_1) P_0 \frac{\partial \rho_m}{\partial h_0} \\
&- \frac{G_2}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_2) P_0 \frac{\partial \rho_m}{\partial h_0}
\end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_p}{\partial \alpha_0} &= \frac{V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\Delta t} \frac{h_m}{\Delta t} \frac{\partial \rho_m}{\partial \alpha_0} \\
&+ \frac{G_1}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_1) P_0 \frac{\partial \rho_m}{\partial \alpha_0} \\
&- \frac{G_2}{\rho_{m0}} A(\Delta x_0, \Delta x_2) P_0 \frac{\partial \rho_m}{\partial \alpha_0}
\end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_0} = & \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} \frac{\rho_m h_m - \rho_m^0 h_m^0}{\Delta t} \\
& + \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_0} G_1 h_0 - \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} G_2 h_0 \\
& - \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} \frac{P - P^0}{\Delta t} \\
& - \frac{G_1}{\rho_{m0}} \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_0} P_0 + \frac{G_2}{\rho_{m0}} \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} P_0 \\
& + \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_0} q
\end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_1} = & \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} \frac{\rho_m - \rho_m^0}{\Delta t} \\
& + \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_1} G \\
& + \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} \frac{\rho_m h_m - \rho_m^0 h_m^0}{\Delta t} \\
& + \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_1} G_1 h_0 \\
& - \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} \frac{P - P^0}{\Delta t} \\
& - \frac{G_1}{\rho_{m0}} \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_1)}{\partial \Delta x_1} P_0 \\
& + \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_1} q_1
\end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_p}{\partial \Delta x_2} = & \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \frac{\rho_m - \rho_m^0}{\Delta t} \\
& - \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} G_2 \\
& + \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \frac{\rho_m h_m - \rho_m^0 h_m^0}{\Delta t} \\
& - \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} G_2 h_0 \\
& - \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} \frac{P - P^0}{\Delta t} \\
& + \frac{G_2}{\rho_{m0}} \frac{\partial A(\Delta x_0, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} P_0 \\
& + \frac{\partial V(\Delta x_0, \Delta x_1, \Delta x_2)}{\partial \Delta x_2} q
\end{aligned} \quad (47)$$

これを係数行列の1行として、のちに示す手順にて全体の係数行列を作成し、線形化した方程式を解く。

3.5. 行列解法

2.1 節の流体基礎方程式により変数 G, α, p, h は二相流の方程式にしたがう。二相流の方程式を差分化し以下の行列を解くことになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_G}{\partial G} & \frac{\partial f_G}{\partial p} & \frac{\partial f_G}{\partial h} & \frac{\partial f_G}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial f_p}{\partial G} & \frac{\partial f_p}{\partial p} & \frac{\partial f_p}{\partial h} & \frac{\partial f_p}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial G}{\partial G} & \frac{\partial G}{\partial p} & \frac{\partial G}{\partial h} & \frac{\partial G}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial f_h}{\partial G} & \frac{\partial f_h}{\partial p} & \frac{\partial f_h}{\partial h} & \frac{\partial f_h}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial G}{\partial G} & \frac{\partial G}{\partial p} & \frac{\partial G}{\partial h} & \frac{\partial G}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial f_\alpha}{\partial G} & \frac{\partial f_\alpha}{\partial p} & \frac{\partial f_\alpha}{\partial h} & \frac{\partial f_\alpha}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial G}{\partial G} & \frac{\partial G}{\partial p} & \frac{\partial G}{\partial h} & \frac{\partial G}{\partial \alpha} \end{pmatrix}$$

この行列を疎行列用の直接法で解く。これをひとつのタイムステップ内で収束するまで繰り返す。

$$\begin{array}{c} \delta G_1 \quad \delta G_m \quad \delta p_1 \delta h_1 \delta \alpha_1 \quad \delta p_n \delta h_n \delta \alpha_n \end{array}
\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} \circ \\ \circ \\ \circ \\ \circ \\ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \\ \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} \circ \circ \circ \\ \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \circ \circ \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \circ \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \circ \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \circ \circ \circ \circ \end{array} & \begin{array}{c} \circ \circ \circ \end{array} \\ \hline \end{array}
\begin{array}{|c|} \hline \delta G_1 \\ \hline \delta G_m \\ \hline \delta p_1 \\ \delta h_1 \\ \delta \alpha_1 \\ \hline \delta p_n \\ \delta h_n \\ \delta \alpha_n \\ \hline \end{array}
=
\begin{array}{|c|} \hline -f_{p_1} \\ \hline -f_{p_m} \\ \hline -f_{p_1} \\ -f_{h_1} \\ -f_{\alpha_1} \\ \hline -f_{p_n} \\ -f_{h_n} \\ -f_{\alpha_n} \\ \hline \end{array}$$

図6 全体の係数行列（流体方程式）

3.6. 流体構造連成基礎方程式

流体構造連成計算モデルを図7に示す。図の左側のコンポーネント類が流体側の領域で、右側の構造物が構造側の領域に相当する。このモデル図をパラメータ化したものが図8になる。

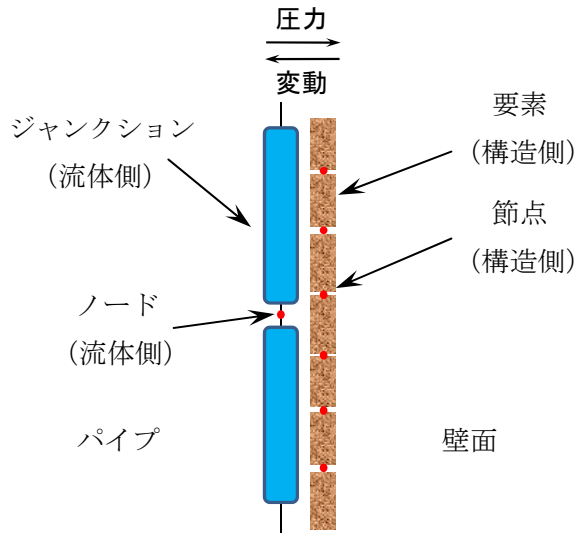


図7 流体構造連成モデル

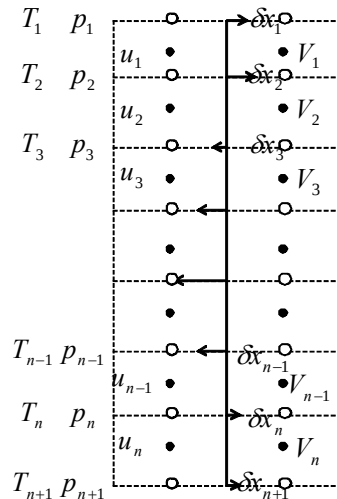


図8 隔壁モデルの概念図

(u :速度、 V :体積、 P :圧力、 T :温度、 δx :変位)

新しい変数として隔壁の変位を導入する。2.1の流体基礎方程式により変数 G, α, p, h は二相流の方程式にしたがう。その方程式には体積が含まれている。二相流の方程式中の V が Δx に依存する。

流体構造連成計算では流体の基礎方程式[(1)~(4)]に以下の方程式が加わる。

$$[M]\{\Delta \ddot{x}\} + [C]\{\Delta \dot{x}\} + [K]\{\Delta x\} = \Delta f(p) \quad (48)$$

3.7. 隔壁の運動方程式の離散化と線形化

隔壁の運動方程式の離散化と線形化について示す。まず、基礎方程式は次の通りであり、図9に示

すコントロールボリュームで離散化する。

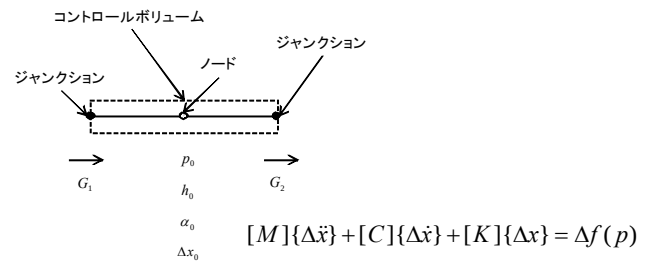


図9 隔壁の運動方程式の離散化

基礎方程式は(48)式で表され、この方程式は線形であり、また、次の節で示す手順により、

$$[A]\{\Delta x\} = \Delta f(p) + b \quad (49)$$

となったとして離散化する。さらに、最も簡単なモデルで、変位の定義された点がバネでつながれている場合には、

$$k(\Delta x_1 - \Delta x_0) + k(\Delta x_2 - \Delta x_0) = p_0 A_0^w + b_0 \quad (50)$$

となる。前節と同じ手順で

$$f_x \equiv k(\Delta x_1 - \Delta x_0) + k(\Delta x_2 - \Delta x_0) - p_0 A_0^w - b_0 = 0 \quad (51)$$

とすると、(線形化した方程式であるが) 線形化した定式化で示すと、必要な項は、

$$\left(\frac{\partial f_x}{\partial x_0}, \frac{\partial f_x}{\partial \Delta x_1}, \frac{\partial f_x}{\partial \Delta x_2}, \frac{\partial f_x}{\partial p_0} \right)$$

の4つの項のみであり、

$$\frac{\partial f_x}{\partial x_0} = 2k \quad (52)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \Delta x_1} = -k \quad (53)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \Delta x_2} = -k \quad (54)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial p_0} = A_0^w \quad (55)$$

である。これを係数行列の1行として、のちに示す手順にて全体の係数行列を作成し、線形化した方程式を解く。

隔壁の係数をまとめると次の行列を解くことになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_G}{\partial G} & \frac{\partial f_G}{\partial p} & \frac{\partial f_G}{\partial h} & \frac{\partial f_G}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_G}{\partial \Delta x} \\ \frac{\partial f_p}{\partial G} & \frac{\partial f_p}{\partial p} & \frac{\partial f_p}{\partial h} & \frac{\partial f_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_p}{\partial \Delta x} \\ \frac{\partial f_h}{\partial G} & \frac{\partial f_h}{\partial p} & \frac{\partial f_h}{\partial h} & \frac{\partial f_h}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_h}{\partial \Delta x} \\ \frac{\partial f_\alpha}{\partial G} & \frac{\partial f_\alpha}{\partial p} & \frac{\partial f_\alpha}{\partial h} & \frac{\partial f_\alpha}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_\alpha}{\partial \Delta x} \\ \frac{\partial f_{\Delta x}}{\partial G} & \frac{\partial f_{\Delta x}}{\partial p} & \frac{\partial f_{\Delta x}}{\partial h} & \frac{\partial f_{\Delta x}}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_{\Delta x}}{\partial \Delta x} \end{pmatrix}$$

この行列を疎行列用の直接法で解く。図 10 の網がかかっていない白い部分が流体のみの差分で得られた係数を表している。一方の網掛けの灰色の部分が、構造関係式を差分した結果得られた係数を表している。流体方程式のマトリックスに変位部分の係数が加えられていることになる。流体方程式のときと同じように、これを 1 つのタイムステップ内で収束するまで繰り返す。

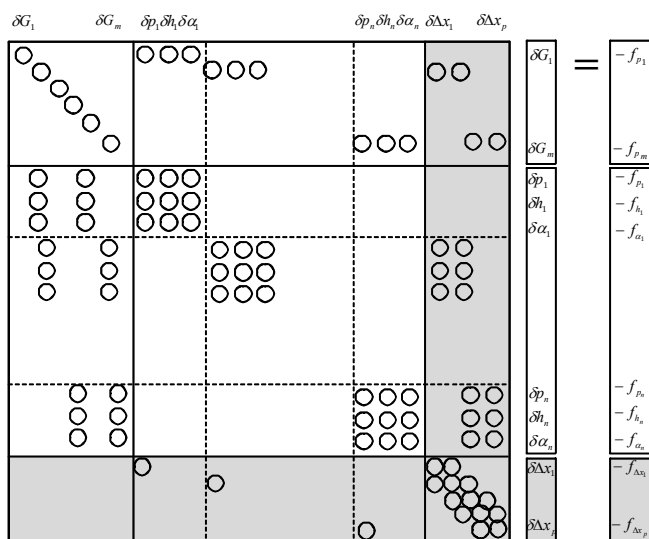


図 10 全体の係数行列（流体構造連成）

4. 解析事例

4.1. Edward's Pipe ブローダウン解析

4.1.1. 解析モデル

開発した Advance/FrontNet/TP の圧縮性混相流解析への適用性を検討するため、Edward's pipe blow down 問題[2]の検証解析を実施した。

Edward's pipe 問題は水平配管内に高温、高圧水を封入し、一端を瞬時破断させたときの内部挙動を

追跡した実験であり、臨界状態を含めた圧縮性混相流の検証問題として適している。

4.1.2. 解析条件

図 12 に実験体系及び計測位置（GS1～ GS3）を示す。実験は内径 7.32cm、長さ 4.1m の水平断熱円管に 502K、6.996MPa の高温高圧水を封入し、一端（図 12 右側）を瞬時破断させ各位置での圧力、温度、気相体積率を測定している。

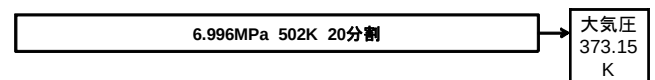


図 11 Edward's pipe 解析体系

表 3 Edward's pipe 解析条件

初期条件 温度 圧力	502 [K] 6.996 [MPa]
数値解析条件 メッシュ分割 時間刻み 解析時間	20 10 [ms] 500 [ms]
蒸発・凝縮モデル	Akiyama モデル RELAP5 モデル

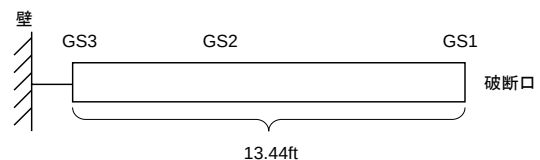


図 12 Edwards 実験体系[2]

4.1.3. 解析結果

図 13～図 15 に破断直後から破断初期（～15ms）の計測位置 GS1～GS3 における圧力挙動の実験結果と解析結果の比較を示した。GS3 の Dead End 部分の実測値では破断直後に 1.5MPa まで圧力値が下がり、その後 2.8MPa の飽和圧力まで上昇後、飽和圧力値を保つ挙動をみることができる。この現象に対して、両モデルはこの圧力挙動を再現することはできなかった。飽和圧力で一定になるが、この値に関しては Akiyama モデルが良い一致を示している。一方の RELAP5 モデルは圧力値が実測値よ

りも下回ることが分かった。パイプ中ほどのGS2付近では圧力は両モデルとも若干下回るが13ms付近でRELAP5モデルの方が減少する時間が早いことが判明した。破断付近(GS1)ではAkiyamaモデルが圧力一定を保つが、RELAP5モデルは減少した後には上昇する傾向が見られた。

4.1.4. 考察

図16～18に破断直後から漏えいがほぼ終了する時間(～500ms)までの圧力挙動の比較を行った。破断付近(GS1)ではRELAP5モデルが50msから急激に減少しているのに対してAkiyamaモデルでは実測値と良い一致を示していることが分かった。また、他の場所(GS2, GS3)でも両モデルとも良い一致を示していた。

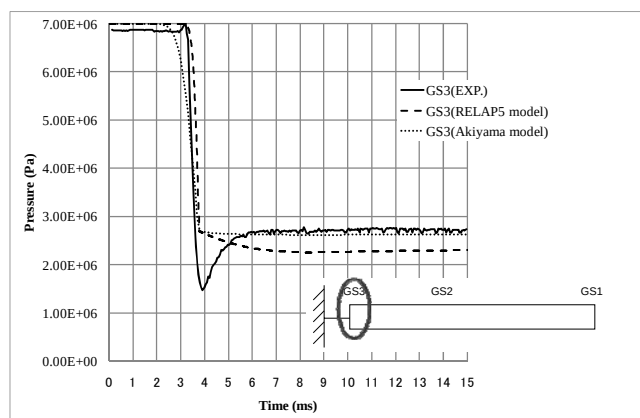


図13 GS3での圧力変化(～15ms)

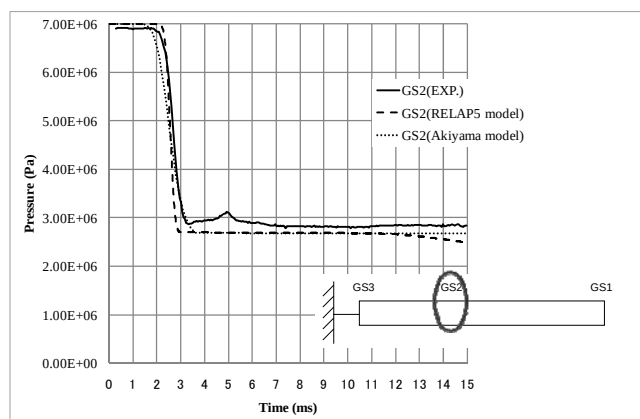


図14 GS2での圧力変化(～15ms)

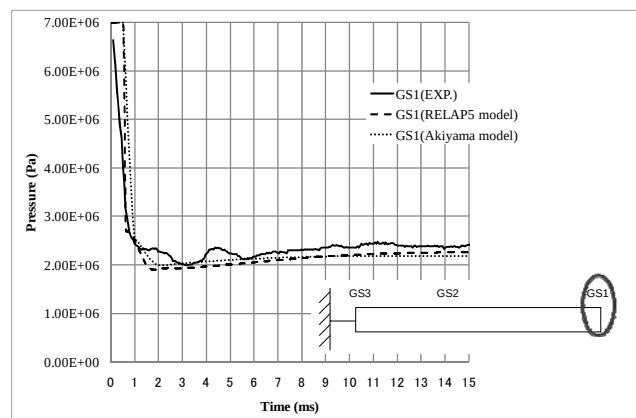


図15 GS1での圧力変化(～15ms)

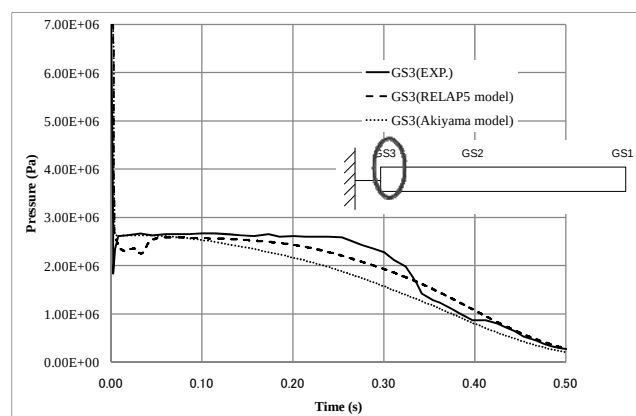


図16 GS3での圧力変化(～500ms)

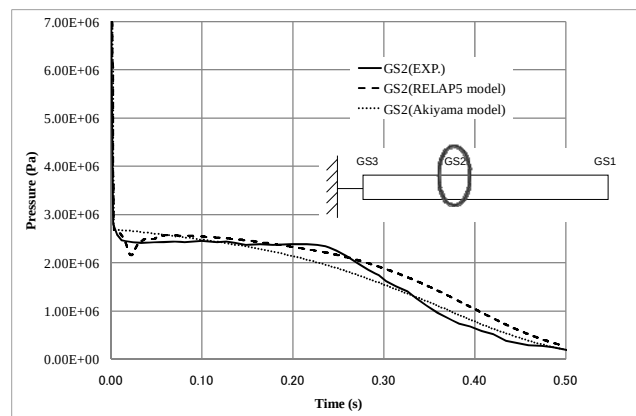


図17 GS2での圧力変化(～500ms)

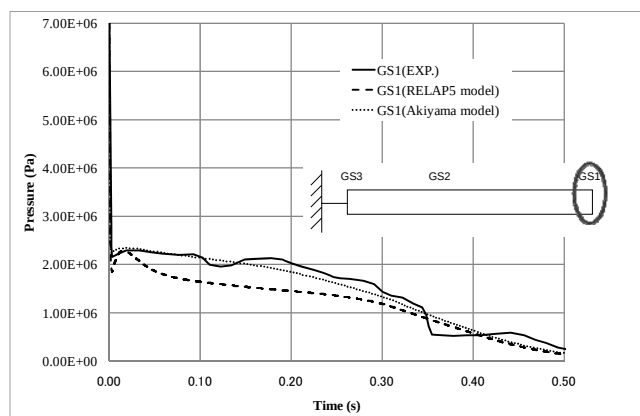


図 18 GS1 での圧力変化(~500ms)

図 19 には GS2 でのボイド率変化を示した。実測値と解析結果を比較すると、気相体積率に関しては、実験では破断直後に体積率が急激に 20%近くまで上昇し 150ms まで維持した後、再び上昇している。これに対して解析結果では、100ms までは両モデルともボイド率は上昇していないが、100ms を過ぎたところから急激に上昇している。100ms 以降の挙動は実測値と解析結果は良く一致している。

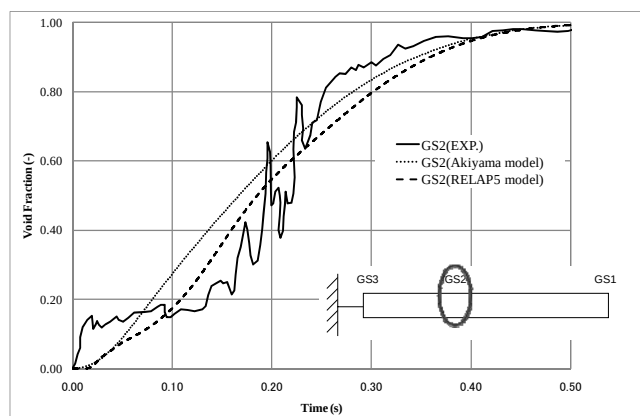


図 19 GS2 でのボイド率変化(~500ms)

次に Edward's pipe 解析においてこれまで配管内部の温度を一定値(502K)に設定して解析を行ってきたが、実際の実験では Dead End 部分(GS3)では温度勾配があると考えられる。そこで、今度は Dead End 部分にかけて温度勾配を設定して Edward's pipe 解析を試みた。解析条件を以下の表に示した。

表 4 Edward's pipe 解析条件(温度勾配あり)

初期条件 温度	502 [K] Dead End 部分を 472[K]
圧力	6.996 [MPa]
数値解析条件 メッシュ分割 時間刻み 解析時間	20 10 [ms] 500 [ms]
圧縮・凝縮モデル	Akiyama モデル

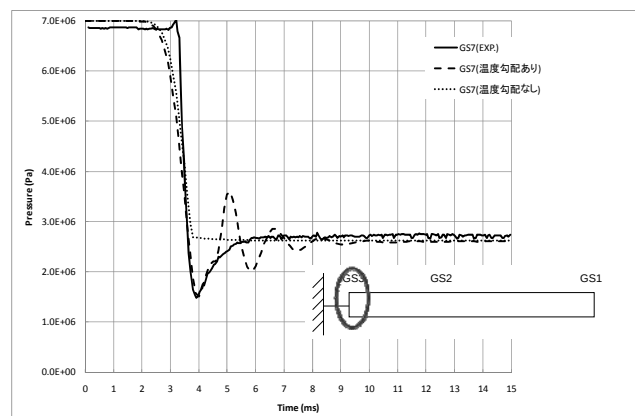


図 20 GS3 での圧力変化(~15ms)

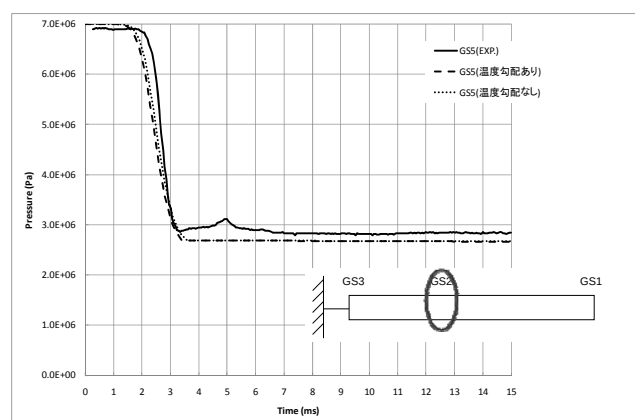


図 21 GS2 での圧力変化(~15ms)

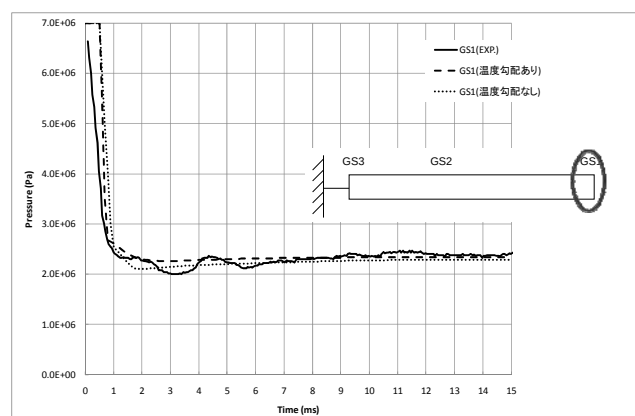


図 22 GS1 での圧力変化(~15ms)

Dead End(GS3)部分に温度勾配をかけると液相の飽和温度が下がるので、結果として図中の破線のように GS3 では温度勾配なしの解析結果よりも圧力が下がる結果となった。これは実験結果と同じように圧力が一度下がり圧力が上昇する傾向を再現している。しかし、そのあとは飽和圧力の周りで圧力値が振動する結果となっている。この現象は実験値では見られない結果であった。圧力値が飽和圧力値の周りを振動する現象は Dead End で温度勾配が付いている部分(6ft)で圧力波が反復していることに由来していると考えられている。

4.2. 圧力波伝播解析(RELAP5 との比較)

開発した Advance/FrontNet/TP と 1 次元流体解析プログラムとして有名な RELAP5 の比較を行った。問題として圧力波伝播問題を検討した。

RELAP(Reactor Excursion and Leak Analysis Program)は INL(Idaho National Laboratory)で開発が続けられてきた原子炉過渡事象解析プログラムで完全な二流体モデルを用い、半陰解法を採用している 1 次元二相流解析プログラムである。[4], [5]

4.2.1. 解析条件

図 4.13、4.14 に 2 種類の解析モデルを示した。図にはパイプ半分からメッシュの面積を 1/5 にしたパイプを示した。(モデル A)もう一方の解析モデルは上のモデルの左右を逆にしたモデルである。(モデル B)この 2 種類の解析モデルに対して番号が 1 番のセルから圧力波を入射し圧力伝播を Advance/FrontNet/TP と RELAP5 で比較検討を行った。

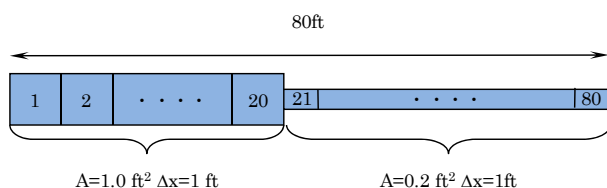


図 23 縮小管モデル(モデル A)

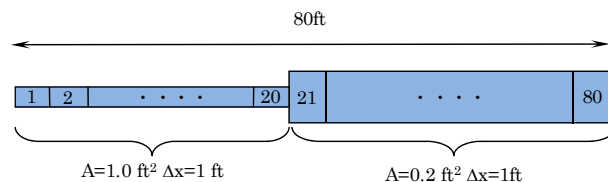


図 24 縮小管モデル(モデル B)

モデル A とモデル B の解析条件を以下の表に示した。入射した圧力波は 0.0012[s]の矩形の圧力波である。

表 5 縮小管モデル解析条件

初期条件 圧力波	1000 [psia] ($0s < t < 0.01s$) 1100 [psia] ($0.01s < t < 0.0112s$) 1000 [psia] ($0.0112s < t < 0.05s$)
数値解析条件	
メッシュ分割	80
メッシュ幅	1 [ft]
時間刻み	2×10^{-5} [s] 2×10^{-6} [s]
解析時間	500 [ms]

4.2.2. 解析結果

モデル A の圧力挙動を RELAP5 による解析結果を図 25～図 26 に示した。また、Advance/FrontNet/TP の解析結果を図 27～図 28 に示した。図中の波形は左側から入口部、入口から 5ft 部、入口から 10ft 部、入口から 15ft 部での圧力挙動を示している。

0.015s 後の圧力波はモデル A 図においてノード番号 20 で管面積が細くなっていることによる反射派と考えられる。RELAP5 による解析結果の中の青線で示した圧力波は波形がなまり入射時の矩形を維持できていないことが分かった。一方の Advance/FrontNet/TP では矩形の入射は崩れていないことが分かった。Advance/FrontNet/TP、RELAP5 双方の解析結果では解析が進むにつれて波形がなまり圧力波は初期状態を維持できていないことが分かる。

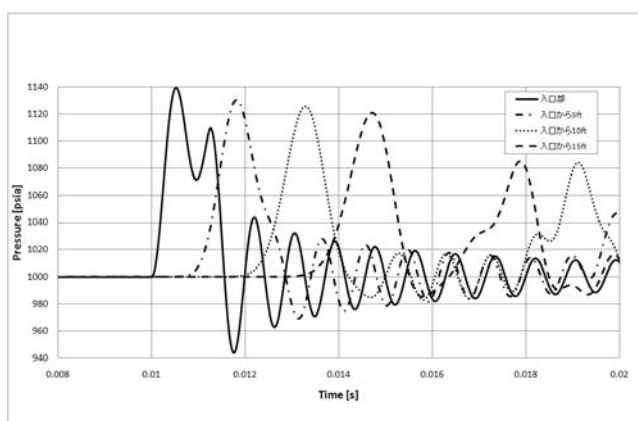


図 25 モデル A の圧力伝播
[RELAP5 : $\Delta t = 2 \times 10^{-6} \text{s}$]

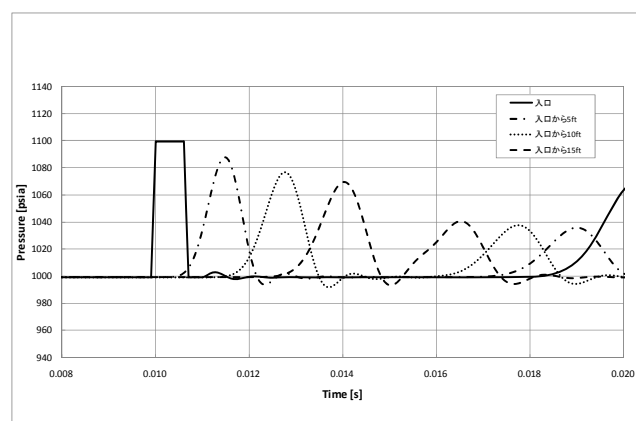


図 28 モデル A の圧力伝播
[Advance/FrontNet/TP : $\Delta t = 2 \times 10^{-5} \text{s}$]

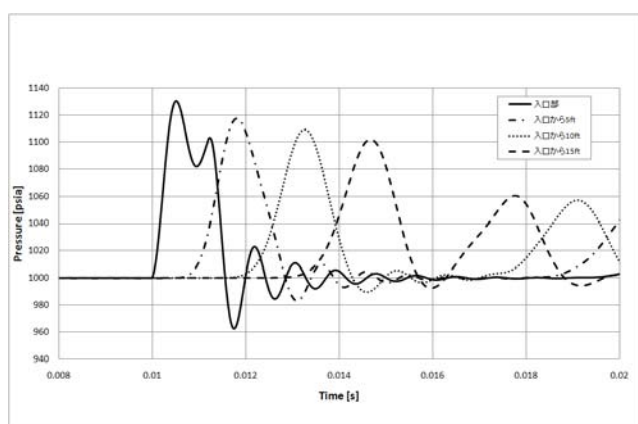


図 26 モデル A の圧力伝播
[RELAP5 : $\Delta t = 2 \times 10^{-5} \text{s}$]

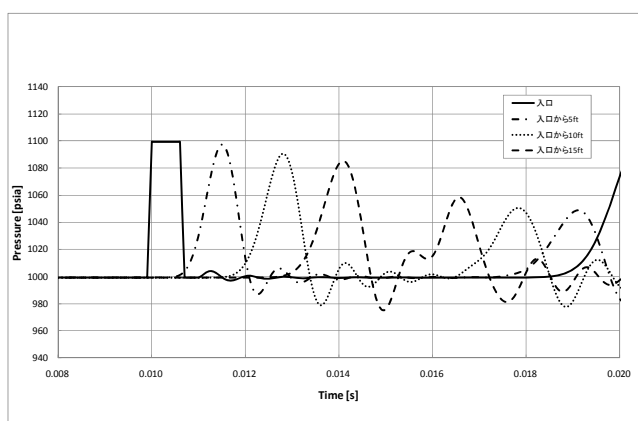


図 27 モデル A の圧力伝播
[Advance/FrontNet/TP : $\Delta t = 2 \times 10^{-6} \text{s}$]

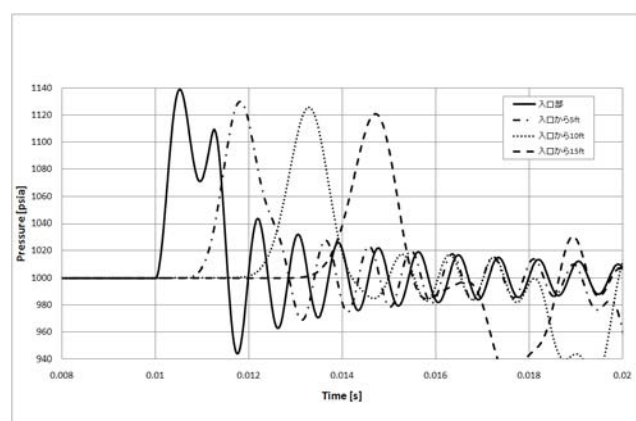


図 29 モデル B の圧力伝播
[RELAP5 : $\Delta t = 2 \times 10^{-6} \text{s}$]

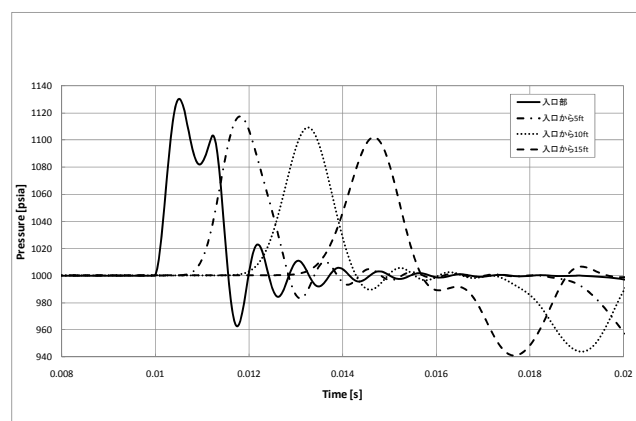


図 30 モデル B の圧力伝播
[RELAP5 : $\Delta t = 2 \times 10^{-5} \text{s}$]

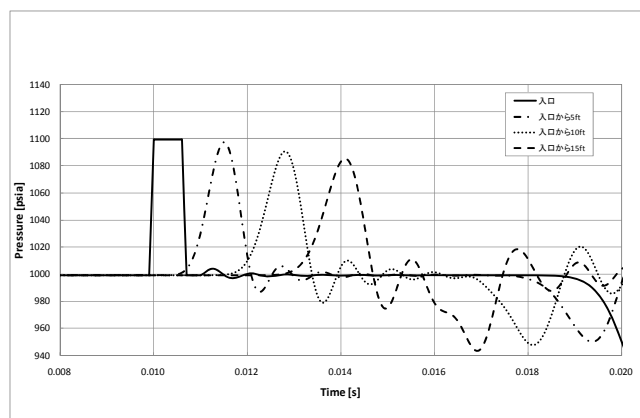


図 31 モデル B の圧力伝播
[Advance/FrontNet/TP : $\Delta t = 2 \times 10^{-6} \text{s}$]

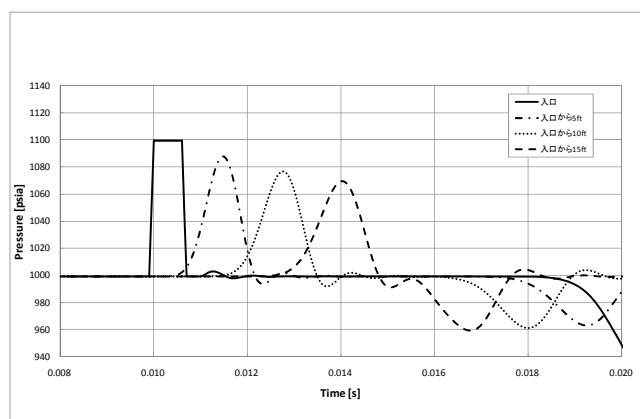


図 32 モデル B の圧力伝播
[Advance/FrontNet/TP : $\Delta t = 2 \times 10^{-5} \text{s}$]

モデル B について、Advance/FrontNet/TP、RELAP5 の解析結果を図 4.19～4.22 に示した。Advance/FrontNet/TP と RELAP5 の解析結果はモデル A と同様に同じ傾向を示していた。モデル A とモデル B の結果を比較すると 0.015s 後の反射波はモデル A では、入射波と同じ位相が返ってきているが、モデル B では入射波と位相が逆の反射波が来ていることが分かった。これはモデル A (面積が減少) が自由端、モデル B (面積が増加) が固定端の様相を示している。

4.2.3. 考察

モデル B でもモデル A と同じように Advance/FrontNet/TP、RELAP5 双方の解析結果では解析が進むにつれて波形がなまり圧力波は初期状態を維

持できていないことが分かった。また、RELAP5 よりも Advance/FrontNet/TP の方が波のなまりが小さいことが判明した。

4.3. 流体構造連成解析

4.3.1. 解析モデル

流体－構造連成プログラムの検証問題として図に示したモデルを作成した。このモデルは配管の入口と出口付近で配管が板を挟んだモデルである。図中の ST-#(structure)は構造物、##(volume)は流体コンポーネントを示している。流体コンポーネント番号 38 番から圧力波を入射して構造物の有無で圧力波にどのような影響を及ぼすかを検証した。

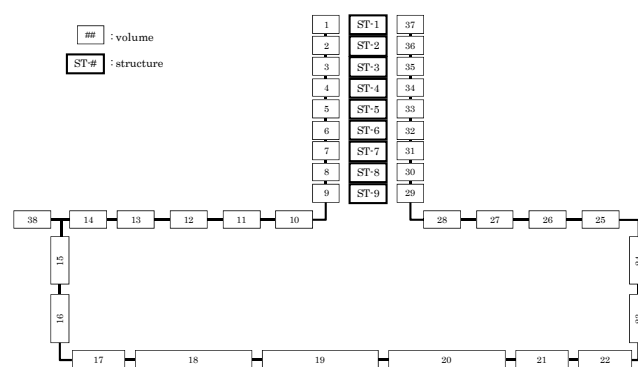


図 33 流体－構造連成解析モデル

4.3.2. 解析条件

圧力波は三角形波形を用いていて表のような時間変化の三角波を入射した。

表 6 流体－構造連成解析条件

初期条件 圧力	2.0 [MPa]
圧力波	2.0 [MPa] (初期) 4.0 [MPa] (最大) 詳細な形状は図 34 参照
数値解析条件 メッシュ分割 時間刻み 解析時間	187 2.0 × 10 ⁻⁶ [s] 8 [ms]

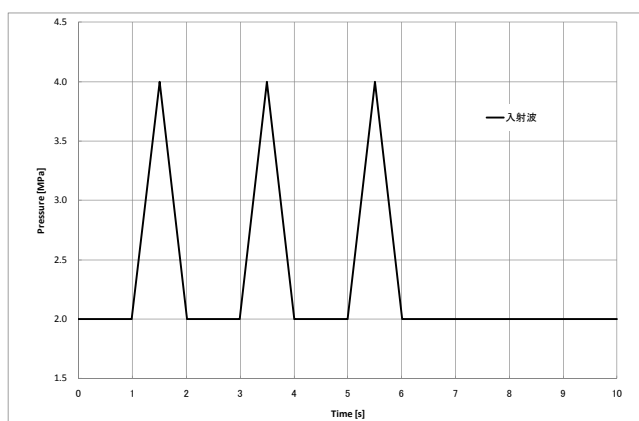


図 34 圧力入射波

4.3.3. 解析結果

図 35 に流体のみの解析、図 36 に流体構造連成解析結果を示した。図中の解析結果は流体－構造連成解析モデルの Volume 5、24、33 の位置での圧力挙動変化を示した。

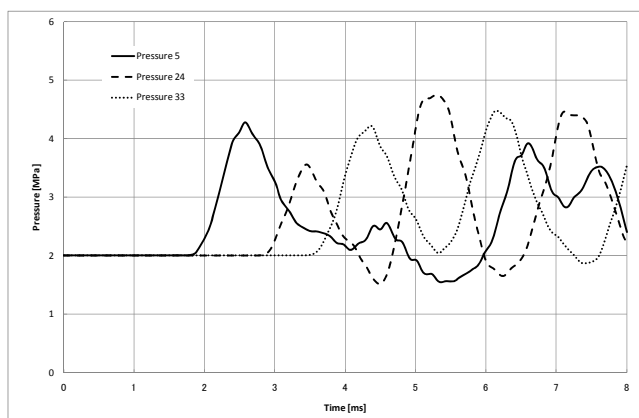


図 35 流体解析結果

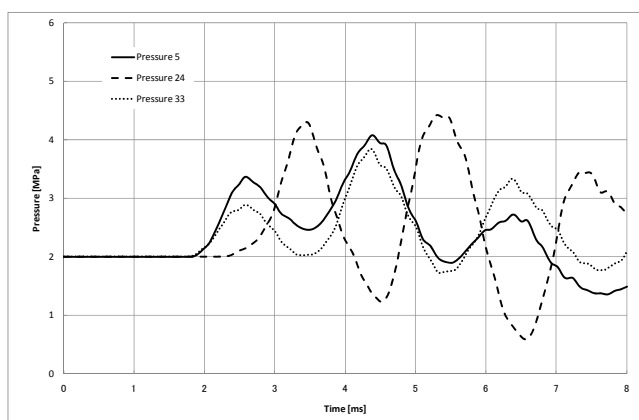


図 36 流体－構造連成解析結果

流体単体の解析結果では三角形波形が Volume 5

ー 24－33 という順番で伝播している様子が分かる。一方の流体－構造連成解析結果をみると Volume 5 と 33 は同じ圧力挙動を示しており 24 だけ遅れて圧力が伝播していることが分かる。

4.3.4. 考察

このことは、構造物を通して Volume 5 から 33 に圧力が伝播している結果である。このように Advance/FrontNet/TP プログラムを用いることにより流体単体の計算と流体構造連成解析の両方で解析することが可能である。

5. まとめ

今回、Advance/FrontNet/TP の開発結果として圧縮性混相流解析問題として有名な Edward's pipe blow down 問題を例に挙げ解析することができた。そして、実験値と良い一致を示すことができた。1 次元二相流プログラムコードで有名な RELAP5 と比較した結果 RELAP5 の圧力伝播挙動は圧力波が時間経過とともに振動するのに対して、開発した Advance/FrontNet/TP は圧力波の振動はほとんどみられなかった。このことから RELAP5 よりも安定した解が得られることが判明した。更なる機能として Advance/FrontNet/TP は構造解析と連成することにより、構造物の変位挙動を再現しながら圧力伝播を解くことが可能になった。

今後、コンポーネントを充実させることによって解析範囲を広げていくことが課題である。プログラムとしても高速化を計画している。

参考文献

- [1] Ishii, M., One-Dimensional Drift Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes, ANL-77-47 (1977)
- [2] A. R. Edwards and T. P. O' Brien : "Studies of phenomena connected with the repressurization of water reactors", Journal of British Nuclear Energy Society, Vol. 9, p. 125-135(1970)

- [3] 蒸気表, 日本機械学会(1999), 丸善
- [4] RELAP5/MOD3 CODE MANUAL VOLUME
I: CODE STRUCTURE, SYSTEM MODELS,
AND SOLUTION METHODS, Idaho
National Engineering Laboratory Lockheed
Idaho Technologies Company Idaho Falls
June 1995
- [5] RELAP5/MOD3 CODE MANUAL VOLUME
V: USER'S GUIDELINES, Idaho National
Engineering Laboratory Lockheed Idaho
Technologies Company Idaho Falls June
1995
- [6] 気液二相流の数値解析, 日本原子力学会, 熱流
動部会編, 朝倉書店, 1993