

配管破断時の超音速二相流解析*

湊 明彦
アドバンスソフト株式会社
第2事業部 主管研究員

*H. Utsuno, M. Akamatsu and T. Morii, H. Okada, A. Minato, "Application of Compressible Two-Fluid Model Code to Supersonic Two-Phase Jet Flow Analysis", The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Paper#N13P1368, Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, September 27-October 2, 2009.

背景:

軽水型原子炉冷却系の配管破断事故時に高温・高圧の冷却材が破断口から放出される。構造物へのジェット荷重の評価には、熱力学的な仮定とジェット形状の観察結果から導出された半経験式であるANSI/ANSモデルが用いられている。

本研究の内容:

機構論的な評価を目的とし、圧縮性二流体モデル解析コードを適用した。解析結果の妥当性は、ベンチマーク問題の解析と実験データとの比較で検証した。実機条件におけるジェット荷重の解析結果をANSI/ANSモデル及び原子力機構の実験式の評価値と比較した。

Basic Field Equations of Compressible Two-Fluid Model

- Mass conservation
$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = \Gamma_{k',k} - \Gamma_{k,k'}$$
- Momentum conservation
$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k + \alpha_k \nabla P = \mathbf{F}_{ik} + \mathbf{F}_{vk} + \mathbf{F}_{wk} + \nabla \varepsilon_k \alpha_k \rho_k \nabla \cdot \mathbf{u}_k + \Gamma_{k',k} \mathbf{u}_{k'} - \Gamma_{k,k'} \mathbf{u}_k$$
- Energy conservation
$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{u_k^2}{2} \right) + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \left(h_k + \frac{u_k^2}{2} \right) \mathbf{u}_k = \Gamma_{k',k} \left(h_{k'} + \frac{u_{k'}^2}{2} \right) - \Gamma_{k,k'} \left(h_k + \frac{u_k^2}{2} \right)$$

t: Time(s) , *u*: Velocity(m/s) , *P*: Pressure(Pa) , *F*: Force per unit volume (N/m³) ,
e: energy (J/kg) , *h*: Enthalpy (J/kg) , *α*: Volumetric fraction , *ρ*: Density(kg/m³) ,
ε: Momentum diffusivity(m²/s) , *Γ*: Phase change rate (kg/m³s)
(suffix) *k*: phase(gas/liquid) , *i*: interface , *v*: added mass , *w*: wall friction

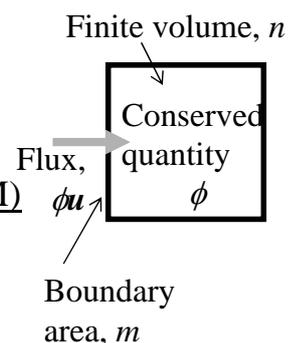
Numerical Method (Finite volume method)

- Generalized transport equation

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi_k + \nabla \cdot (\phi_k \mathbf{u}_k) = b_k$$

- Discretization by Finite Volume Method (FVM)

$$C_n \frac{d}{dt} \langle \phi_k \rangle_n + \sum_m (A_{nm} \phi_{k,nm} u_{k,nm}) = C_n \langle b_k \rangle_n$$



- Time integration by Euler Method

$$\langle \phi_k(t + \Delta t) \rangle_n = \langle \phi_k(t) \rangle_n + \frac{d \langle \phi_k(t) \rangle_n}{dt} \times \Delta t$$

φ: conserved quantity , *b*: source , *C*: finite volume capacity , *A*: boundary area ,
Δt: time step (suffix) *n*: finite volume number , *m*: boundary area number

Compressible Fluid Calculation

Compressible Single-phase theory

Riemann invariant

$$\Delta u \pm \frac{1}{\rho a} \Delta P = 0 \quad \text{along lines of characteristics}$$

a: sound speed (m/s)

Solution by method of characteristics

$$u_{i+1/2} = \frac{1}{2}(u_i + u_{i+1}) + \frac{1}{2\rho a}(P_i - P_{i+1})$$

$$P_{i+1/2} = \frac{1}{2}(P_i + P_{i+1}) + \frac{\rho a}{2}(u_i - u_{i+1})$$

Extension to two-phase flow*

u Volumetric velocity of two-phase mixture, j

$$j = \alpha_g u_g + \alpha_l u_l$$

a Sound speed in two-phase mixture, $a_{2\phi}$

*Minato, A., "Numerical Analysis of Gas-Liquid Two-Phase Flow by Using Compressible Two-Fluid Model," Kikai-Gakkai-Ronbunshu (JSME Journal), Ser. B, 68[673], pp. 2489-2495 (2002) (in Japanese)

Constitutive Relationships

Interface friction (Andersen's model*)

$$F_{ik} = \alpha_g \alpha_l \frac{g(\rho_l - \rho_g) |u_k - u_{k'}|}{\bar{V}_{gj}^2} (u_k - u_{k'})$$

Phase change rate

Evaporation $\Gamma_{l,g} = \rho_m \frac{x_{eq} - x}{\tau}$ for $x < x_{eq}$

Condensation $\Gamma_{g,l} = \rho_m \frac{x - x_{eq}}{\tau}$ for $x > x_{eq}$

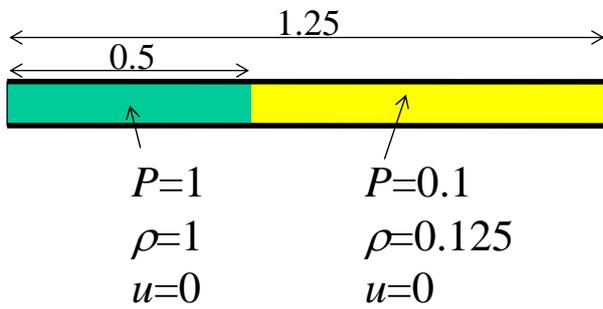
\bar{V}_{gj} : drift velocity, x : quality, τ : time constant of evaporation

*Andersen, J.G.M., "Interface Shear Model of Two-Fluid Model," Transactions of American Nuclear Society, 41, pp.669-671 (1982)

Benchmark Problem

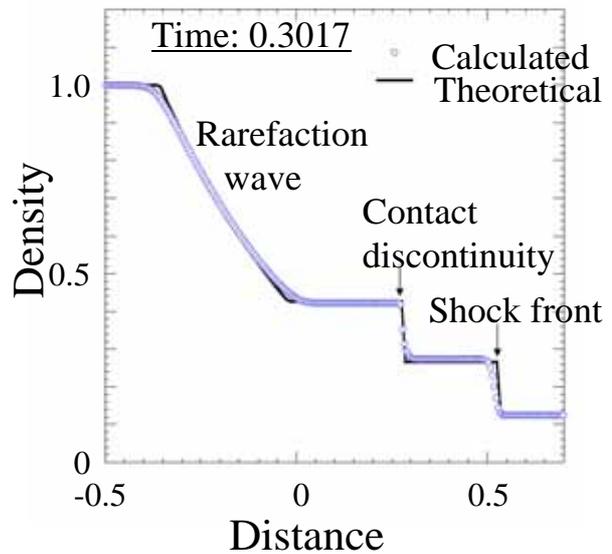
(Sod's shock tube)

Initial state



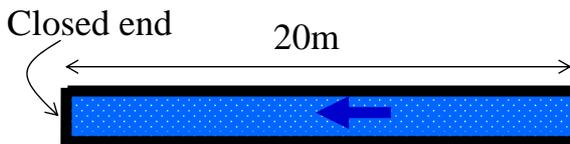
Time step : $\Delta t=1.0 \times 10^{-3}$

Number of finite volumes: 200



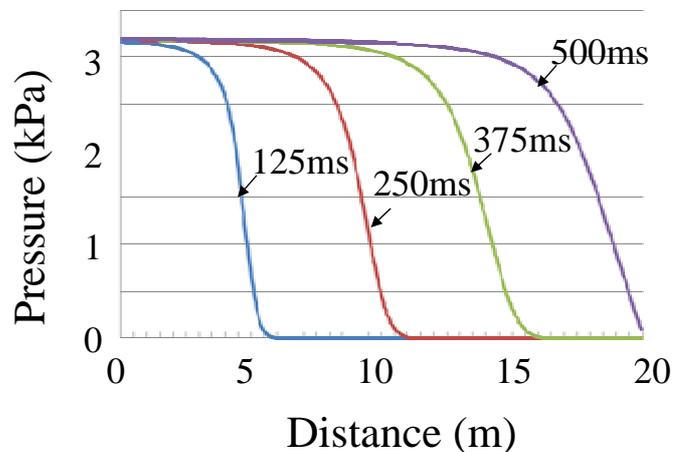
Benchmark Problem

(Hydraulic hammer in two-phase flow)



Uniform air-water mixture

Air-water
 Void fraction 10%
 Velocity 0.1m/s

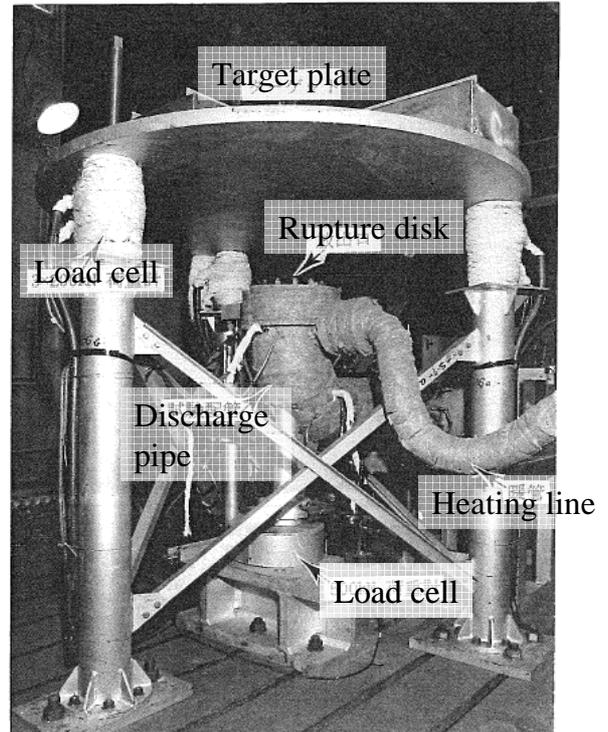
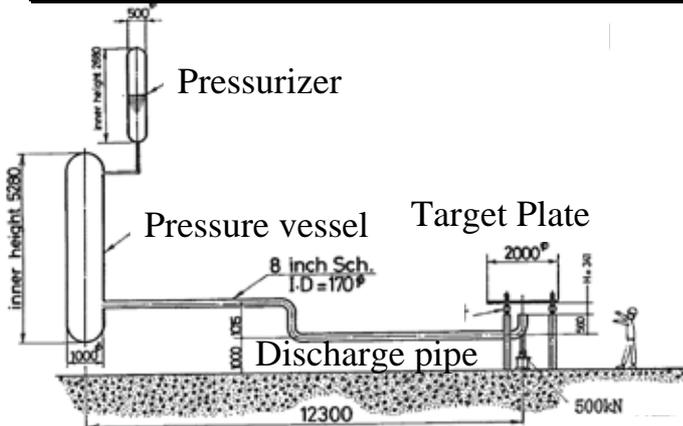


	Theoretical	Calculated
Wave propagation velocity (m/s)	35.3	36.4
Pressure rise (kPa)	3.18	3.20

Two-Phase Jet Experimental Facility of JAERI*

Experimental conditions

Reactor type		BWR	PWR
Water	Pressure (MPa)	6.8	15.5
	Temperature ()	285	325
Pipe diameter, D (mm)		90-190	
Distance to target, H/D		1, 2, 5, 18	



*Isozaki, T., Miyazono, S., "Experimental Study of Jet Discharge Test Results under BWR/PWR Loss of Coolant Accident Conditions," Nucl. Eng. Design, 96, pp.1-9 (1988)

解析結果

当日のセミナーにてご紹介いたします。

結 言

- (1) 圧縮性二流体モデル解析プログラムをSod衝撃波管及び二相流水撃のベンチマーク問題の解析により検証した。ジェット荷重圧力分布の解析結果は原子力機構の実験式とよく一致した。
- (2) BWR及びPWR条件における破断口からの自由ジェットを解析した。二流体モデルによるジェット荷重評価はANSI/ANSモデル及び原子力機構の実験式の評価値と同程度であった。
- (3) ジェット圧力分布およびその影響半径に関する二流体モデルANSI/ANSモデル及び原子力機構の実験式による評価は相互に類似した結果を得た。異なる手法の評価結果が一致したことは、これらの評価が妥当かつ信頼性のあることを示す。



「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」