

非定常あるいは相変化を伴う気液二相流の 数値解析による評価技術の開発

Development of Numerical Simulation Methods for Unsteady
and Boiling Gas-liquid Two-phase Flow



(左上)CO₂回収プラント(アメリカ)
(左下)洋上LNG回収プラント
(カタル) (上)ビル用マルチ室外機

小室 吉輝*¹
Yoshiteru Komuro

左海 将之*¹
Masayuki Sakai

小田 拓央*¹
Takuo Oda

原 伸英*²
Nobuhide Hara

近藤 喜之*³
Yoshiyuki Kondo

三菱重工グループが取り扱うプラント配管や熱交換器においては、気体と液体が混在して流れる、いわゆる気液二相流という現象を考慮する必要がある。気液二相流は相変化や気液界面抗力といった单相流にはない物理現象を伴うため、その予測・評価は单相流に比べて非常に難しい。そこで、二流体モデルに基づく二相流解析技術を開発し、これらの製品の性能評価・設計指標評価を行っており、その概要を紹介する。

1. はじめに

化学プラントや石油生産設備の配管においては、管内を流れる気液二相流が配管を励振する現象が起こることが知られている⁽¹⁾。そのため、プラント配管の設計において、スラグ流における液スラグの衝突など、配管内気液二相流の非定常的な挙動を予測する必要がある。

一方、空調機の室内機、室外機に搭載される熱交換器では、コーン型の分配器やT字管、多連分岐管などの構造によって気液二相状態の冷媒を分配している。熱交換器の設計や性能予測においては、冷媒の分配特性を精度よく評価することが重要である。

さらに、二相流が関連する機器設計においては、急激な相変化が設計上の課題となる場合もあり、このような現象に対する解析手法の整備も重要である。

本報では、配管内気液二相流の非定常的な挙動と分岐管における二相流の分配に関して解析手法と解析事例を紹介する。また、急激な相変化を伴う減圧沸騰現象(フラッシング)への解析手法の適用に関する取り組みを紹介する。

2. 二相流解析手法

配管内のガススラグ・液スラグの再現や、分岐管内のガスと液の分配を評価するために、気相と液相を別々の方程式で扱う二流体モデルを採用する。汎用熱流動解析コード「ANSYS Fluent」をプラットフォームとし、二流体モデル解析に必要な構成式をユーザ定義関数として適用し、解析手法を構築した。二流体モデルの支配方程式と、抗力モデルなどの主な構成方程式については既稿⁽²⁾に述べた。支配方程式(質量保存、運動量保存、エネルギー保存)は次式のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{u}_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \bar{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{u}_k \cdot \bar{u}_k) \\ = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\tau}_k) + \alpha_k \rho_k \bar{g} + M_k \end{aligned} \quad (2)$$

*1 総合研究所 伝熱研究部

*2 総合研究所 伝熱研究部 技術士(機械)

*3 総合研究所 伝熱研究部 主席研究員 工博, 技術士(機械)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \cdot \bar{u}_k) \\ = -\nabla \cdot (\alpha_k q_k) + \Gamma_k (h_{ki} - h_k) + a_i \cdot \bar{q}_k \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 α_k は k 相の体積率、 Γ_k は k 相の質量生成項、 M_k は k 相の運動量生成項、 q_k は k 相の入熱量、 \bar{q}_k は気液界面の熱流束、 a_i は気液界面積濃度である。 $k=g$ は気相、 $k=f$ は液相を表す。

気液二相流の相間作用を図1に示す。単相流と異なり、気相と液相の速度差により運動量輸送が発生する。気液界面抗力 M_d は式(4)の構成方程式により計算する。ここで、気液界面積濃度 a_i は相関式によりボイド率 α_g と物性値等から計算される。代表的な式として、断熱気泡流に適用される式の一例⁽³⁾を式(5)に示す。式(5)において、 σ は表面張力、 $\Delta\rho$ は気液密度差、 g は重力加速度、 ε は乱流エネルギー散逸率、 ν_f は液相の動粘性係数を表す。

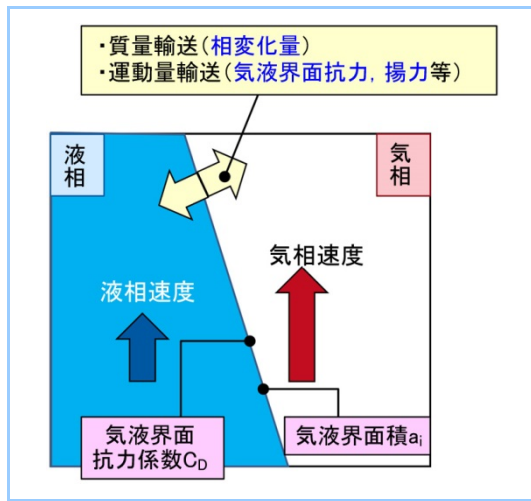


図1 二相流解析における気液相間作用

$$M_d = -a_i \cdot \frac{C_D}{2} \cdot \rho_f \cdot \bar{u}_r \cdot |u_r| \quad (4)$$

$$a_i = \frac{3.02}{L_o} \cdot \left(\frac{L_o}{D_H}\right)^{0.335} \cdot \alpha_g \cdot \left(\frac{\varepsilon^{1/3} L_o^{4/3}}{\nu_f}\right)^{0.239} \quad (5)$$

$$L_o = \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho g}} \quad (6)$$

式(4)の、 C_D は抗力係数であり、構成方程式により計算する。物性値や気泡の速度によって用いる式が異なるが、一例を式(7)に示す。ここで、 u_r は気液の相対速度、 D_b は気泡径、 ρ_f は液相の密度、 μ_m は二相平均粘性係数である。

$$C_D = \frac{24}{Re_b} (1 + 0.1 Re_b^{0.75}), \quad Re_b = \frac{\rho_f u_r D_b}{\mu_m} \quad (7)$$

気液二相流の非定常挙動を予測するため、流れと垂直な方向に速度勾配があることによって、気泡に作用する揚力 M_d^L を評価する構成式を組み込んだ。揚力は式(8)で計算され、揚力係数 C_L にはHibikiの式⁽⁴⁾を用いた。

$$M_d^L = -\alpha_g \cdot \rho_f \cdot C_L \cdot \bar{u}_r \times (\nabla \times \bar{u}_f) \quad (8)$$

3. 解析事例

解析事例として、配管内の気液二相流挙動、分岐管内の二相流分配挙動、フラッシング(減圧沸騰現象)の解析について紹介する。

3.1 配管内非定常二相流

解析に用いる試験体系⁽¹⁾を図2に示す。内径 52.5mm の配管で、鉛直部から 90° エルボを通過して水平な流れとなる。空気-水試験の試験条件の内、鉛直配管内がスラグ流となる条件を解析した。図3に示すボイド率コンター図(ある時刻の瞬時値)のとおり、配管内にスラグ気泡が再現されているのがわかる。解析結果のボイド率と圧力の時刻歴を用いて文献に記載の手法⁽¹⁾により、曲がり部に作用する励振力を評価した。解析から得られた励振力と、試験にて計測した励振力の比較として、周波数スペクトルの包絡線(外形線)を図4に示す。スラグ気泡に後続する液スラグの衝突による励振力のピーク周波数が5~10Hz にあり、解析は試験の傾向を再現している。同様に他の流速条件も検証し、二流体モデルによる解析手法の非定常二相流挙動への適用性を確認した。

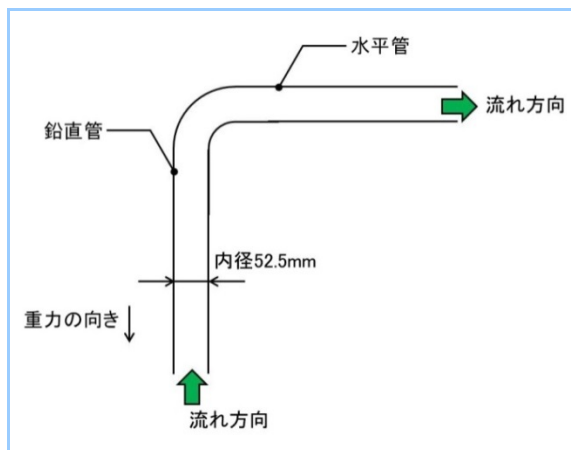


図2 試験装置概略図

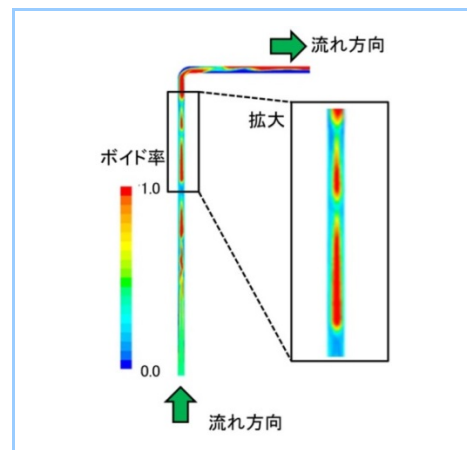


図3 解析結果ボイド率コンター(瞬時値)

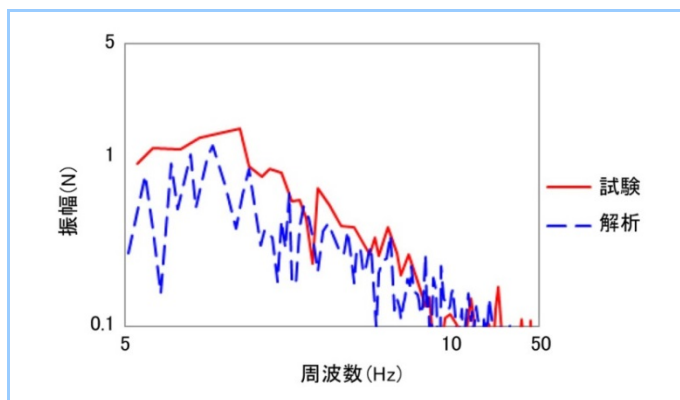


図4 周波数スペクトルの比較

3.2 多連分岐管内の二相流挙動

複数の枝管を有する多連分岐管を対象とした非定常二相流解析を実施し、各枝管への流量分配割合の予測精度について評価した。解析対象を図5に示す。比較対象とする試験に合わせ、解析対象は主管内径約8mm、枝管内径約4mm×4本の体系とした。主管入口の気液質量流量条件について、気液の質量流量の和を一定とし、ガスの質量割合が異なる2つの条件で解析を行った。

解析で得られた流量分配割合を図6に示す。分岐管3に液相の流入が他の管より少ない点、入口のガス割合が大きいほど慣性力が大きくなり、下流の分岐管における液相流入割合が大きくなる点などの傾向が再現できている。これらの結果から、二流体モデルによる非定常二相流解析が分岐を伴う体系に対して適用可能であることを確認した。

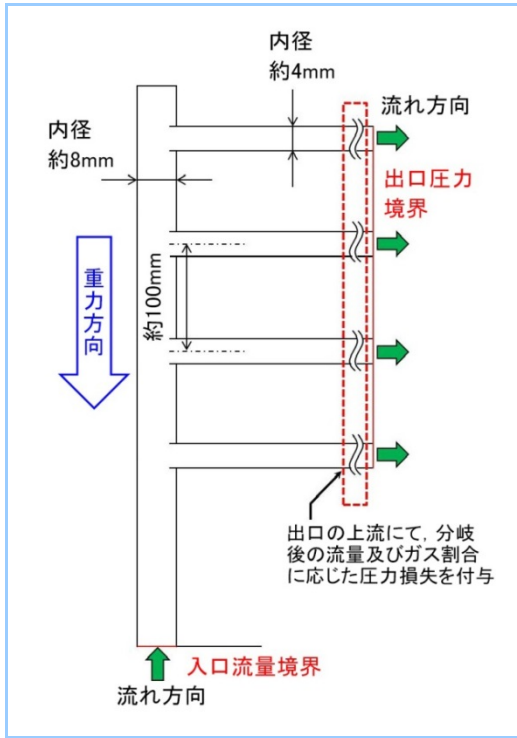


図5 試験体系概略図

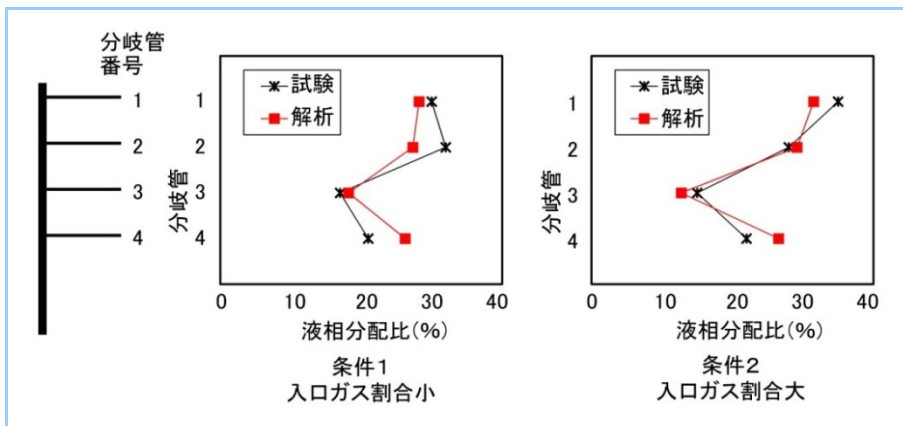


図6 液相分配比の比較

3.3 フラッシング

試験装置^⑤の形状を再現した解析体系の概要図を図7に示す。供試部の入口からは水単相が流入し、供試部の絞り部分で減圧する。その際、静圧が飽和圧力以下になると、フラッシングと呼ばれる減圧沸騰現象が発生する。解析体系は、入口・出口はともに圧力及び温度境界とし、管壁はすべて断熱境界とした。本計算では、飽和蒸気圧は一定値(400kPa)を用いて解析を実施した。図8に示すとおり、この体系における質量流量を約 15%の予測誤差で評価できた。ただし、検証例が限定的であり、製品適用に向けては検証事例の拡張が必要である。また、流れ方向のボイド率分布について、試験と解析の比較を図9に示す。軸方向の断面平均ボイド率の分布はおおむね試験結果を再現している。

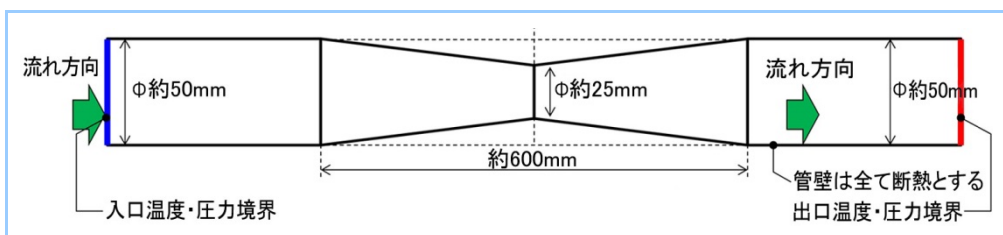


図7 解析体系概略図

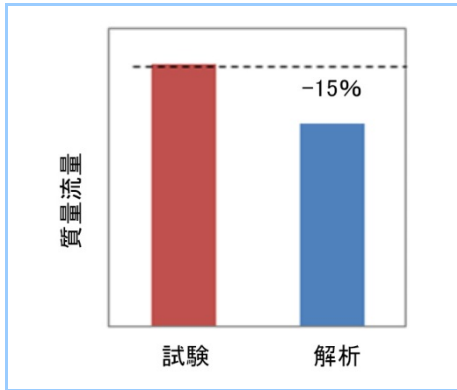


図8 減圧沸騰流解析と試験の質量流量の比較

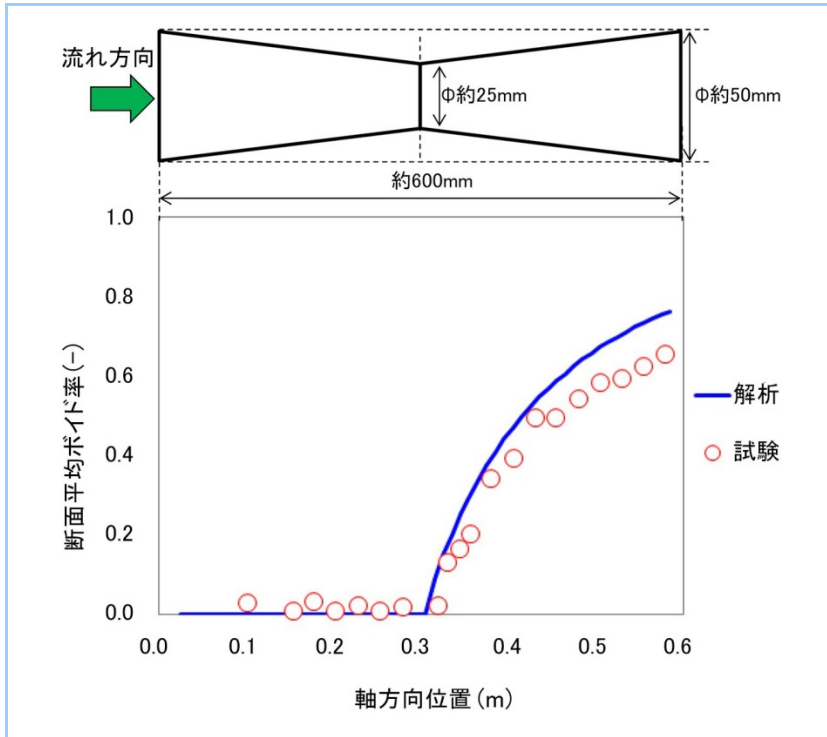


図9 減圧沸騰流解析と試験の圧力・ボイド率の比較

4. まとめ

二流体モデルに基づく、非定常二相流の解析手法を構築した。配管内の気液二相流挙動、分岐管内の二相流分配挙動、減圧沸騰現象(フラッシング)を解析し、試験結果との比較を行うことで解析手法の検証を行い、これらの現象の予測に適用できることを確認した。これらの解析手法を用いて、配管設計の信頼性向上、熱交換器の性能向上等に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 三輪修一郎ほか, 配管エルボー内における気液二相流励振力に関する研究(第一報, 垂直管内二相流における励振力評価), 日本機械学会論文集, Vol.80, No.809 (2014), p.1~11
- (2) 近藤喜之ほか, 沸騰を伴う熱交換器伝熱管群の気液二相流の数値解析による性能予測技術の開発, 三菱重工技報, Vol.55 No.2 (2018), p.1~5
- (3) Takashi Hibiki, et al., Interfacial Area Concentration in Boiling Bubbly Flow Systems, Chemical Engineering Science, 61, (2006), p. 7979~7990
- (4) Hibiki T. et al., Lift force in bubbly flow systems, Chemical Engineering Science, 62 (2007), p.6457~6474
- (5) N.Abuaf, A Study of nonequilibrium flashing of water in a converging-diverging nozzle. Volume 1 experimental, (1980)