

次世代空調細管の二相流数値解析

Numerical Analysis of Two-Phase Flow in Small Tubes of Next Generation Air Conditioner

湊 明彦 (電通大) 榎木 光治 (電通大) 齋藤 潔 (早大)
MINATO Akihiko ENOKI Koji SAITO Kiyoshi

Abstract A three-dimensional VOF computer program was used to simulate two-phase refrigerant flow in small circular tubes (ID 1.03mm). The comparison between the results and observations showed its capability to deal with flow patterns in vertical and horizontal directions.

Keywords: Gas-liquid two-phase flow, Flow pattern, Refrigerant, VOF method, Air conditioner

1. 緒言

中小型規模の冷凍空調機器へ導入される冷媒の低 GWP (Global Warming Potential) 化へ向けた研究開発が本格化している。次世代冷媒を導入する場合には、安全性や実運転性能が評価すべき最重要因子である。運転される温度帯や機能、運転方法が大きく異なる多様な機種を短期間で開発することが求められる。公平・公正に共有できる実用機レベルまでの性能評価手法や性能評価ツールの開発が強く望まれていた。

低 GWP 冷媒を導入した中小型規模の冷凍空調機器の性能を実用機レベルにおいてまで評価できる手法の確立を目的とする。実用機レベルの機器性能を高精度に数値解析するために、まずは、機器を構成する各種デバイスの数値モデル、数値解析手法を確立する。その基盤技術として二相流解析技術整備を進めている。

2. コードシステム

気液二相流の数値解析技術は対象とする多様な流動現象に対応する必要があり、解析技術は評価する目的により二流体モデルと界面追跡法があり、また圧縮性を考慮する必要の有無から圧縮性解法と非圧縮性解法に分けられる。冷凍空調機器の性能評価において気液二相流の関わる重要な課題として次の項目をあげることができる。

(1) 伝熱管内の流動様式

熱交換器伝熱管の熱伝達率や圧力損失に関わる

(2) 膨張弁の流量

膨張弁開度による流量制御に関わる

(3) 分岐管による二相流分配

伝熱管群への流量及びクオリティ分配に関わる

本報告は上記(1)の伝熱管内流動様式の評価を取り扱う。

3. VOF 法の基礎式と数値計算法

流動様式は界面が重要な役割を持つため、界面追跡法を用いた。ここでは VOF (Volume of Fraction) 法を採用した。相変化のない非圧縮性二相流を対象とし、連続の式を満たす。

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

ここで \mathbf{u} は気液混合速度 [m] である。水率 (水の占める体積比) H はこの速度で輸送される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla H \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

数値計算では界面形態輸送計算の精度を上げるため流れ方向の界面勾配を考慮する PLIC (Piece-wise Linear Interface Calculation) 法を用いた。運動方程式は

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla P = \mathbf{F} \quad (3)$$

ここで $\rho = (1 - H)\rho_g + H\rho_l$ は密度 [kg/m³]、 P は圧力 [Pa] である。外力 \mathbf{F} [N/m³] は粘性、壁摩擦、表面張力、重力が寄与する力から構成される。数値計算法は有限体積法による離散化に基づき SIMPLE (Semi-implicit Pressure Linked Equations) 法を二相流に拡張した [1]。VOXEL 格子を用いたが、格子サイズを変えることで複雑な流路形状にも対応できる。

4. 実験解析

4.1 実験の概要

近年、空調機用熱交換器の高性能化のために、冷媒の流路を細径化する傾向にあり、その最適設計のために榎木ら [2] は、微細管内における沸騰熱伝達と圧力損失の特性を明らかにする実験を実施した。微細円管流路における圧力 1.09MPa、温度 10°C の冷媒 R 410A の垂直上昇流と下降流さらに水平流の流動様相の観察を行い、流動様相と流動様式に及ぼす流路形状と流動方向の影響を検討した。試験部は外径 6mm のガラス円柱の中の直径 1.03mm 長さ 126mm の流路であり、流動様式の観察には高速度カメラを用い、定常状態を確認した後、2000 - 40000 fps の撮影速度でガラス管流路軸方向中央部を撮影した。

微細円管であるが多様な流動様式を観察することができた。物性で決まる特徴長さ L [m] を次のように仮定する。

$$L = \frac{\Delta \rho v_l^2}{\sigma} \quad (4)$$

$\Delta \rho$ は気液密度差 [kg/m³]、 v_l は液の動粘性係数 [m²/s]、 σ は表面張力 [N/m] である。この値は常温常圧の空気-水系では 1.09MPa の R 410A の蒸気-液系の約 6 倍である。この試験は水力的に空気-水系の内径 6mm 程度の配管の試験に対応する可能性がある。

4.2 解析条件

解析領域は直径 1.03mm の円形断面を持ち試験体より短い 20mm 長の円管流路とし、出口境界条件は圧力境界とした。入口境界では冷媒蒸気の一様流入とし流路壁から冷媒液の流入により冷媒の気液二相流を形成する。格子サイズは 50 μ m であり、全格子数は約 15 万である。タイムステップ幅は 0.25 μ s である。計算した流動現象の時間は約 0.1s である。解析結果のグラフィック表示にはレイトレーシング描画ソフト POV-ray [3] を用いた。

4.3 流動様式の解析結果と実験との比較

垂直上昇管および水平管における流動様式の高速度カメラ画像および数値計算結果のグラフィック表示の比較をそれぞれ Fig. 1 と Fig. 2 に示す。各流動様式の冷媒蒸気の体積速度 J_g [m/s] と液の体積速度 J_l [m/s] を図中に記入した。

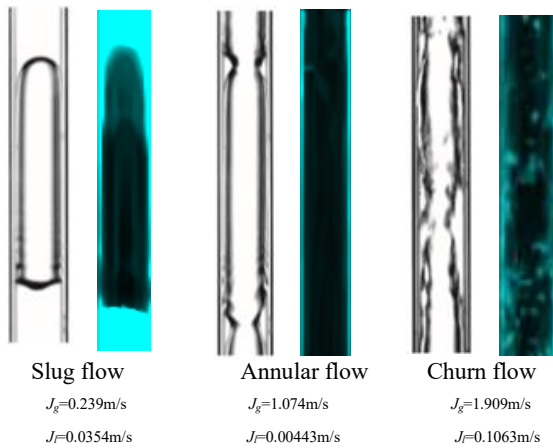


Fig. 1 Observed and calculated flow patterns in vertical channels (left: observed[2], right: calculated)

4.3.1 垂直上昇管の解析結果について

スラグ気泡が自然に形成されるのは長い発達区間が必要であるが、解析領域が短いため本解析では気液合わせた体積流量を保ちつつ間欠的に蒸気流量を供給した。環状流の条件では液流が蒸気流に押し流されて液膜が形成されにくいので、壁面上の薄膜は吸着のため液膜が移動しにくい設定とした。実験で観察された液膜波は計算できなかった。チャーン流の流動様式の解析結果は実験とよく対応しているが、浮遊する液滴のサイズは格子サイズとほとんど同じであり、解析の分解能について今後の検討を要する。

4.3.2 水平管の解析結果について

水平管の上下分離流から界面波が成長してスラグ化する過程を解析することができた。スラグの形状や連続的なスラグの形成について実験と解析とは相違があり課題を残している。他の流動様式と同様に、チャーン流、環状流について実験と解析との対応を定量的に示すことは困難である。複雑な流動様式を数値化する統計理論あるいは複雑系による標準的な評価手法の整備が望ましい。

4.4 今後の課題

本解析の解析領域と時間(流路長さ 20mm, 流動現象の時間 0.1s)は流動様式の発達や定常状態への到達という観点から十分ではない。今後さらに大規模な解析を実施し、実験との詳細な比較検討が必要である。実用的な意味ではボイド率や圧力損失および熱伝達などの予測の信頼性の確立が必要である。今回は対象としなかった矩形管や下降流などの流動様式の解析も手法の汎用性を確認する上で重要である。

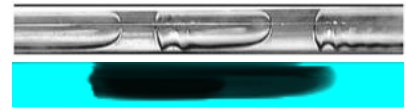
5. 結言

気液二相流の多様な流動様式は経験的によく知られているが、直接に数値解析で取り扱った例は従来極めて少ない。流動様式は複雑な界面や微細な気泡・液滴が関わるため、数値解析には多くの困難がともなう。また、スラッキングや環状流の形成が必ずしも力学的に明らかになっていないことも困難の原因である。

Slug flow

$$J_g=0.239\text{m/s}$$

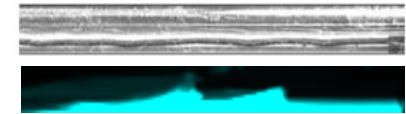
$$J_f=0.0354\text{m/s}$$



Stratified flow

$$J_g=1.074\text{m/s}$$

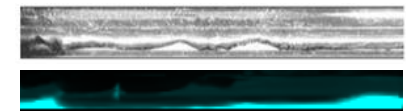
$$J_f=0.00443\text{m/s}$$



Wavy flow

$$J_g=1.193\text{m/s}$$

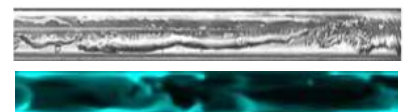
$$J_f=0.0443\text{m/s}$$



Churn flow

$$J_g=1.432\text{m/s}$$

$$J_f=0.124\text{m/s}$$



Annular flow

$$J_g=3.818\text{m/s}$$

$$J_f=0.0354\text{m/s}$$

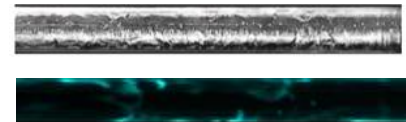


Fig. 2 Observed and calculated flow patterns in horizontal channels (above: observed[2], below: calculated)

本解析では特別なモデルを用いず、気液二相流の基礎式に基づいて流動様式の形成・発達を取り扱う試みを行った。冷媒は管内の流動抵抗を低減するため粘性と表面張力が小さく調整されており、本解析の対象とした微細管でも比較的大きな配管に似た多様な流動様式を示す。微細管であるため、格子数をそれほど大きくせず格子サイズを比較的小さい $50\mu\text{m}$ に設定することができた。冷媒の二相流の実験と解析は流動様式の研究に適しているといえることができる。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成をうけて実施したものである。

参考文献

- [1] 湊明彦, 石田直行, 高森和英: 非スタガード有限体積法による気液二相流の多次元解析(第1報), 改良 VOF 法による界面挙動の三次元解析, 日本機械学会論文集 B 編, 66 巻 647 号, pp.1675-1682 (2000)
- [2] 榎木光治, 森英夫, 宮田一司, 濱本 芳徳: 微細流路内気液二相流の流動様相, 日本冷凍空調学会論文集 Trans. of the JSRAE Vol.30, No. 2, pp.155-167 (2013)
- [3] <http://www.povray.org>