

数値解析を活用した気液二相流分配評価技術の開発

Development of Numerical Simulation Method of Gas-Liquid Two-Phase Flow Distribution



(左)ビル用マルチ空調機



(右)ターボ冷凍機

左海 将之^{*1}
Masayuki Sakai

塩谷 篤^{*2}
Atsushi Enya

青木 泰高^{*3}
Yasutaka Aoki

三菱重工グループが取り扱う化学プラント、ボイラ、空調製品等で使用される熱交換器では、気体と液体が混在した流れ、いわゆる気液二相流がコーン型あるいはヘッダ型の分配器によって複数の伝熱管へと配分されている。この流量分配特性を予測するためには、分配器内の気液二相流の挙動だけでなく、下流側の伝熱管内における圧力損失についても考慮する必要がある。そこで、分配器内の流れを解く数値解析と伝熱管内の圧力損失に関する一次元モデルを連成させた流量分配予測手法を開発した。試験結果との比較による検証から、伝熱管での熱交換による相変化の有無に関係なく、液相分配比を実用的な精度で予測可能であることを示した。

1. はじめに

化学プラントや空調製品に使用される熱交換器では、気液二相の状態で作動流体がコーン型あるいはヘッダ型の分配器によって複数の伝熱管へと配分されている。この流量分配が著しく偏ると、一部の熱交換領域が有効に活用できずに熱交換器性能が低下したり、流量の少ない伝熱管が過度に加熱されて破損したりする恐れがある。そのため、熱交換器の性能や信頼性を確保する観点から流量分配特性を精度よく評価することが求められている。

一般に、複数の伝熱管への流量分配は分配器内の流動状況及びその下流側の伝熱管で生じる圧力損失の影響を受ける。そのため、流量分配を数値解析によって予測するためには、分配器だけでなく下流側の伝熱管まで含めた領域を一体でモデル化する必要がある。しかし、伝熱管内の気液二相流は流量や乾き度、熱負荷に応じて様々な流動様式をとり得るため、気液二相流の数値解析技術が発展してきた現在でも、その圧力損失を数値解析によって精度よく評価することは難しい。そこで、伝熱管内の圧力損失に関しては既に精度検証がなされている一次元評価式により算出することとし、分配器内部の気液二相流挙動を解くための非定常数値解析と連成させる新しい流量分配予測手法を開発した。本報では、その解析手法の概要を紹介するとともに、試験結果との比較によって精度検証を行った結果を示す。

2. 解析手法

開発した解析手法の概要を図1に示す。分配器内における気液二相流の挙動を三次元の非定常数値解析で解く一方で、下流側の伝熱管領域については流れ方向に要素分割したうえで一次元評価式によって交換熱量及び圧力損失を計算した。以下では、数値解析手法と一次元モデルの詳細及びその連成方法についてそれぞれ説明する。

*1 総合研究所伝熱研究部

*2 総合研究所伝熱研究部 主席研究員 工博

*3 総合研究所伝熱研究部 主席研究員

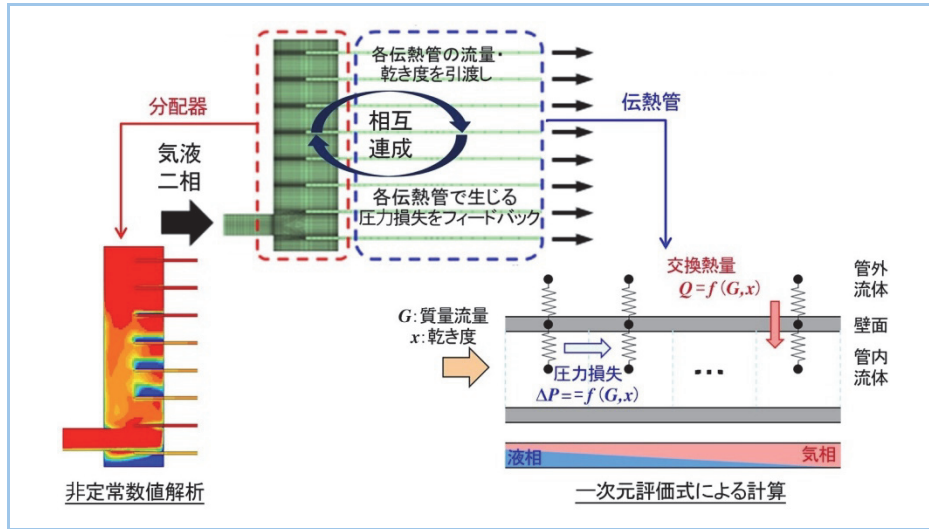


図1 解析手法概要

2.1 数値解析手法

分配器内の流動様式や重力による気液分離作用を評価する必要があるため、二相流モデル化手法には気相と液相を別々の方程式で扱う二流体モデルを採用した。ソルバーには、汎用熱流動解析ソフトウェア“ANSYS Fluent”を用いた。二流体モデルの支配方程式(質量保存, 運動量保存, エネルギー保存)は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) = \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q \vec{u}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{\tau}_q) + \alpha_q \rho_q \vec{g} + M_q + \vec{F}_q \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = -\alpha_q \frac{dp}{dt} + \vec{\tau}_q \cdot \nabla \vec{u}_q + Q_q + \dot{m}_{pq} h_{pq} \quad (3)$$

ここで、 α_q は q 相の体積率、 \dot{m}_{pq} は p 相から q 相への相変化量、 M_q は q 相の運動量生成項、 \vec{F}_q は q 相に作用する外力項、 Q_q は q 相への入熱量である。式(1)~(3)は $p = f, q = g$ とすると気相の支配方程式を表し、 $p = g, q = f$ とすると液相の支配方程式を表す。

気相と液相の速度差によって生じる運動量輸送項としては、気液界面抗力 M_d と気泡に作用する揚力 M_L を考慮し、それぞれ式(4)、式(5)によって計算した。ここで、 a_i, C_D, C_L はそれぞれ気液界面積濃度、抗力係数、揚力係数であり、物性値やボイド率、流速等によって流動様式を判定し、適用する構成方程式を使い分けた。詳細に関しては、既稿⁽¹⁾⁽²⁾を参照のこと。

$$\vec{M}_d = \frac{1}{8} C_D \cdot a_i \cdot \rho_f (\vec{u}_g - \vec{u}_f) \cdot |\vec{u}_g - \vec{u}_f| \quad (4)$$

$$\vec{M}_L = -C_L \rho_f \alpha_g (\vec{u}_f - \vec{u}_g) \times (\nabla \times \vec{u}_f) \quad (5)$$

2.2 伝熱管内の一次元モデル

伝熱管を流れ方向に沿った複数の要素に分割し、一次元評価式によって要素ごとに圧力損失を算出した。圧力損失は流量だけでなく乾き度によっても変化するため、ここでは管外流体との熱交換によって生じる気液の相変化についても考慮した。

伝熱管内における気液二相流の摩擦損失に関しては、Lockhart-Martinelliの相関⁽³⁾に基づいた次式で与えた。

$$\Delta P_{tp} = \Delta P_f \phi_f^2 \quad (6)$$

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2} \quad (7)$$

ここで、 χ は Lockhart-Martinelli パラメータ、 C は Chisholm パラメータ、 ΔP_f は液相のみが流れるときの圧力損失である。このうち、Chisholm パラメータ C に関しては対象製品の伝熱管サイズや流路形状に応じて算出式を使い分けることとし、ミニチャンネルに対しては Li-Hibiki の式⁽⁴⁾を適用した。

2.3 数値解析と一次元モデルの連成

伝熱管内における熱交換や圧力損失を算出する一次元評価式をユーザ定義関数 (UDF: User Defined Functions) として ANSYS Fluent に組み込むことで、分配器部の数値解析と伝熱管部の一次元モデルを連成させた。一次元評価式 UDF とソルバーとの間で受け渡す情報の流れを図2に示す。ソルバー側が持つ流速やボイド率、物性値等の情報を参照して一次元評価式から交換熱量や圧力損失を計算し、それぞれ式(1)中の相変化量 \dot{m}_{pq} 、式(2)中の外力項 \vec{F}_q としてソルバー側へ戻した。

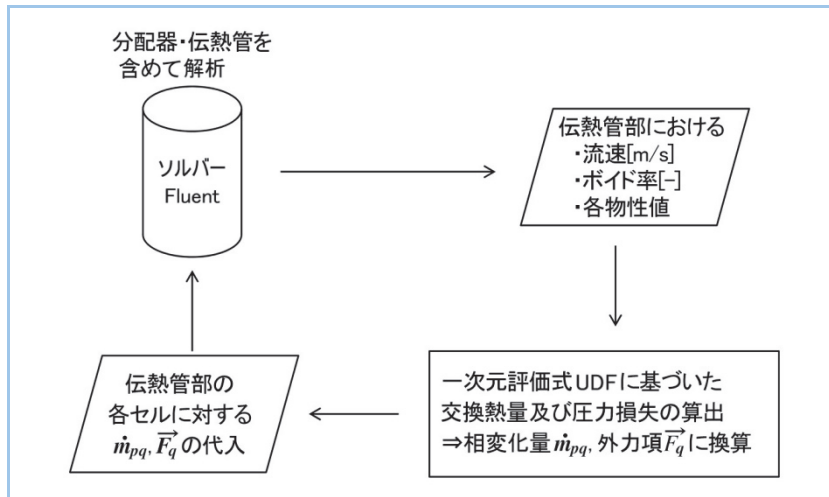


図2 一次元評価式 UDF とソルバーの情報のやり取り

3. 検証解析

本章では、カーエアコン等の空調製品に搭載されるマルチフロー熱交換器のヘッダ型分配器を対象とした解析事例について紹介する。

解析対象を図3に示す。鉛直方向に延びる2本のヘッダと複数の扁平伝熱管、フィンから構成されており、管内流体とフィン間を通過する空気との間で熱交換が行われる。扁平伝熱管はヘッダのおおよそ中央部まで挿入されており、流入側ヘッダの下部から流入した気液二相流が各伝熱管へと分配される。今回の検証では、条件①: 空気-水を作動流体とした非加熱条件と、条件②: 実機で用いられるフロン冷媒を作動流体とした伝熱管内での相変化を含む加熱条件の2条件で解析を行い、各伝熱管への流量分配を予測した。

解析で得られた液相の流量分配比を図4に示す。なお、条件②に関しては、今回の開発手法である伝熱管内の一次元モデルとの連成を行わない場合の解析結果についても併記した。今回の開発手法を適用すると、両条件とも試験結果の流量分配傾向をよく再現している。式(8)で定義される流量分配予測精度 ε を導入すると、条件①: $\varepsilon = 18\%$ 、条件②: $\varepsilon = 27\%$ (開発手法適用前は $\varepsilon = 67\%$)となり、各伝熱管へ流入する液相流量を $\pm 30\%$ 以内で予測可能となったことを確認した。

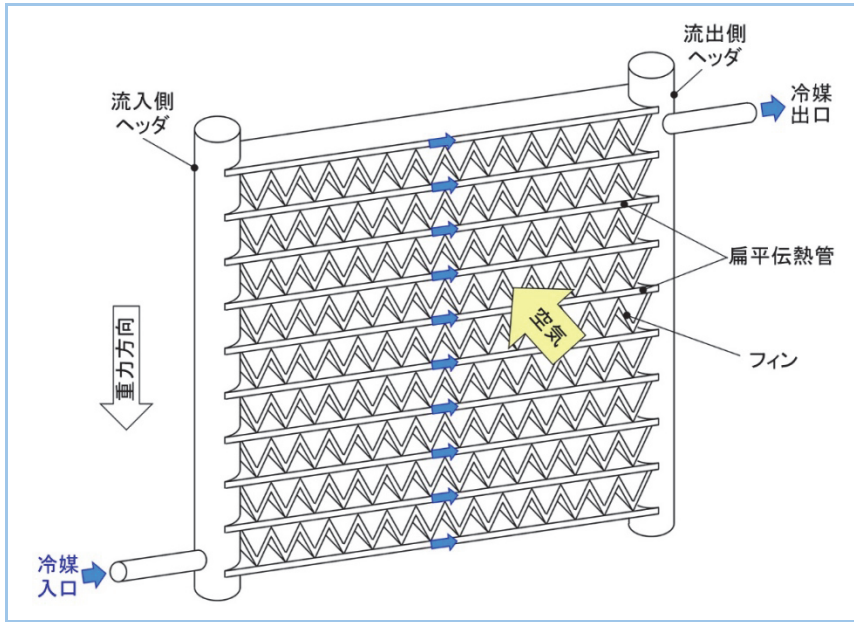


図3 解析対象

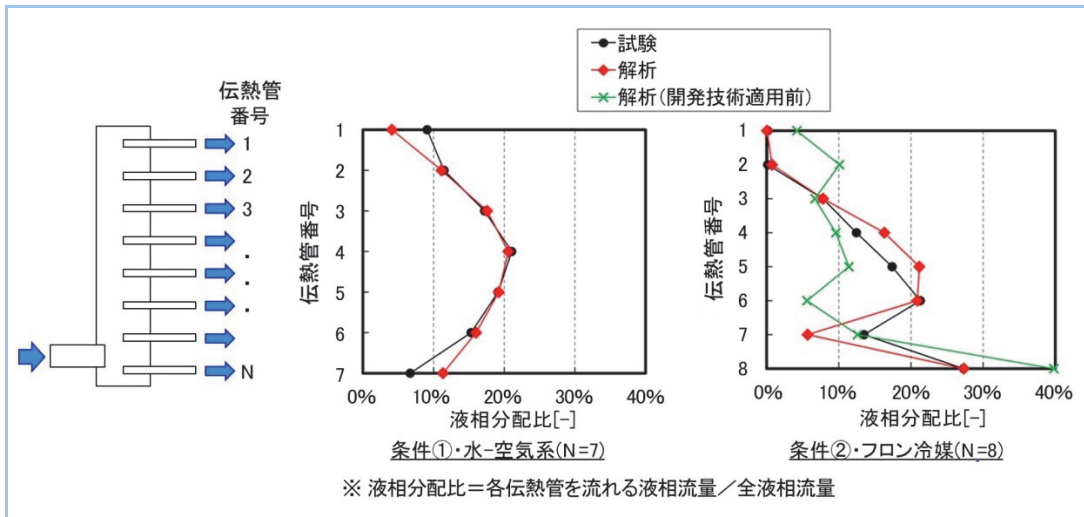


図4 液相分配比の比較

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (G_{exp,i} - G_{cal,i})^2}}{\bar{G}} \tag{8}$$

(N : 伝熱管本数, \bar{G} : 伝熱管一本あたりの平均液相流量,

G_i : 伝熱管 i の液相流量[exp:試験, cal:解析])

また、図5に条件②におけるヘッダ内可視化写真(試験)とボイド率コンター図(解析)を、図6に条件②における熱交換器の出入口間における冷媒圧力損失を示す。気液の流動状況や重力、気液界面抗力等によって定まるヘッダ内のボイド率分布と伝熱管における圧力損失の両者が試験結果とよく一致しており、数値解析と一次元モデルを連成させた狙いが実現されていることが分かる。これによって、流入管付近のボイド率が高くなることでNo.7の伝熱管への液相流入量が少なくなる、ヘッダ中段にボイド率の低い領域が形成されるためにNo.4~6の伝熱管への液相流入量が増加する、といった重力の影響だけでは説明し難い流量分配特性を予測することが可能となっている。

以上より、開発した流量分配予測手法をマルチフロー熱交換器のヘッダ型分配器に適用することで、気液二相流の流量分配が実用的な精度で予測できることを確認した。これにより、流量条件が異なる場合や分配器形状を変更した場合の流量分配特性を定量予測でき、流量分配を適

正化するための分配器形状検討が可能となる。

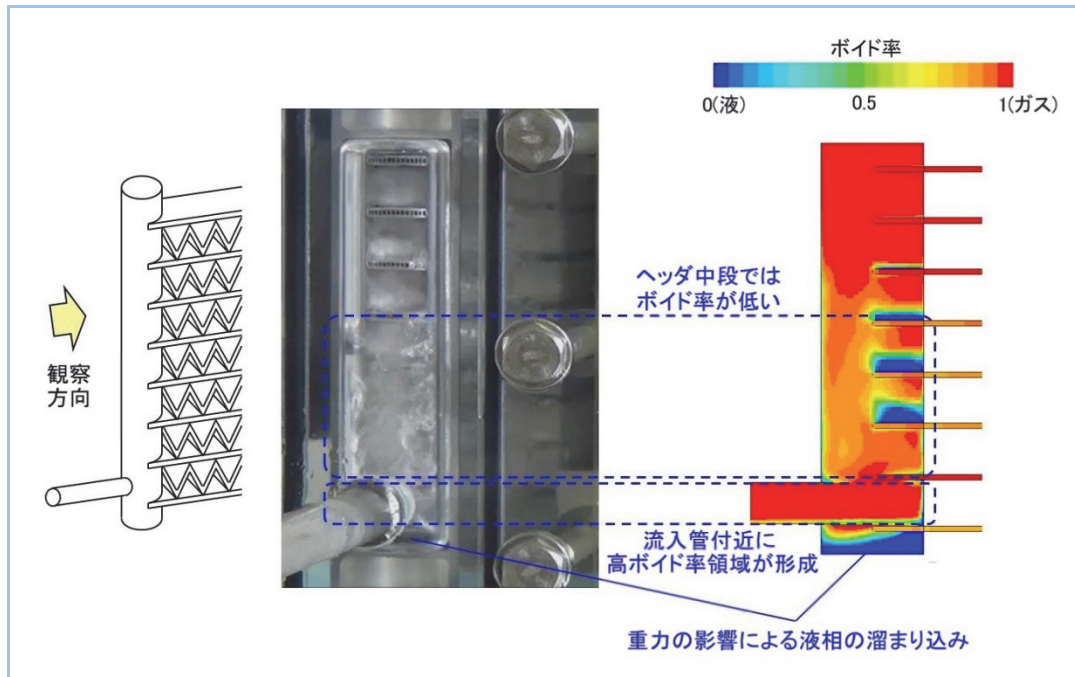


図5 ヘッダ内流動状況の比較

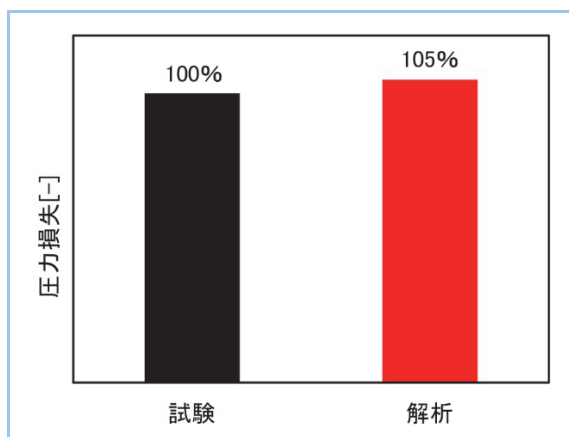


図6 熱交換器における圧力損失の比較

4. まとめ

分配器内における気液二相流の挙動を評価するための数値解析と伝熱管内の圧力損失に関する一次元評価式を連成させることで、熱交換器における気液二相流の分配を予測する手法を構築した。空調製品に搭載されるマルチフロー熱交換器を例題とした検証を行い、本解析手法によって各伝熱管への流量分配を精度よく予測できることを確認した。今後、本手法を活用して熱交換器の改良設計や分配器の形状最適化に取り組み、熱交換器の性能向上や信頼性向上へと繋げていく。

参考文献

- (1) 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
- (2) 小室吉輝ほか, 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, 三菱重工技報, Vol.56 No.1 (2019), p.1~5
- (3) Lockhart, R. W. et al., Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, Trans. ASME, Vol.66No.2 (1945), p.39~48
- (4) Li, X. et al., Frictional pressure drop correlation for two-phase flows in mini and micro multi-channels, Applied Thermal Engineering, Vol.116 (2017), p.316~328