## 日本流体力学会年会2004講演論文集 **C 323**

# 稠密管群熱交換器内における二次元流動特性

### Two-dimensional Flow Structure in a Heat Exchanger with Tight Tube Bundle

○森 敏昭(阪大工),大川富雄(阪大工),片岡 勲(阪大工),白方芳典(三菱重工)

Toshiaki MORI\*, Tomio OKAWA\*, Isao KATAOKA\*, Yoshinori SHIRAKATA\*\* \*Dept. of Mech. Eng., Osaka University, Suita-shi, Osaka 565-0581, Japan \*\*Mitsubishi Heavy Industries., Nishikasugai-gun, Aichi 452-8561, Japan

A shell-and-tube heat exchanger is widely used in various engineering applications including air-conditioning systems. The geometry and arrangement of heat exchanger tubes is closely related to the performance of heat exchanger. In this type of heat exchangers, boiling occurs outside the heat exchanger tubes and consequently the bubble behavior and void fraction distribution in tube bundles should be understood sufficiently in order to achieve high performance design. The purpose of this study is to elucidate complicated two-phase flow structure in tube bundles through numerical simulations and to estimate desirable tube arrangement patterns. We calculated the two-dimensional void distributions for three patterns of tube arrangement. It was shown that heat transfer characteristics may be improved if tube free areas and downward flow sections are included in the tube bundles.

## 1. 緒言

大型冷凍機などに搭載されている熱交換器の形態に,多管 円筒型熱交換器がある.これは,低温冷媒中に水平に円筒管 群を配置し,管内に高温流体を流入させることにより管外部 の冷媒を沸騰させ,熱交換を行うものである.その際,熱交 換によって蒸発した冷媒気泡は管群ピッチ内を上昇してゆ くが,特に上昇速度がきわめて遅い場合や気泡分布に大きな 空間的偏りが存在する場合には,局所的なボイド率の増大に より伝熱管外面でドライアウトが生じ,熱交換性能の低下を 引き起こす可能性がある.したがって,本熱交換器において 熱交換性能のさらなる向上を図るためには,管群内における 気泡の挙動を理解し,これに引き続く二相流の発達様相を予 測することがきわめて重要となる.

高い熱交換性能を達成可能な管群配置実現のため、数多く の実験を実施することが考えられるが、数値解析により熱交 換器内部の伝熱流動場を予測することができれば、熱交換器 の性能向上をより効率的に検討することができるものと期 待できる.本研究では、管群内部における気液二相流の流動 状況を多次元二流体モデルにより数値的に検討する.また、 3 種類の管群配置を対象とした計算結果を比較検討すること により、熱交換性能のさらなる向上の可能性について考察す る.

#### 2. 解析モデル及び解析条件

#### 2.1 解析モデル

多次元二流体モデルを用いて3種類の伝熱管配置を対象に 解析を実施した.熱交換器胴部の内径は 543mm であり、伝 熱管は外径 20mm, ピッチ 23.2mm で Fig.1 に示すような三角 配列とする.二次元的な流動特性を検討するため、解析領域 の厚みは 3mm で前後の面を対称面とした. 基準となるタイ プ1の伝熱管配置では、伝熱管を熱交換器内部に均一に配置 する. タイプ2では管群を3領域に分割し,領域間に伝熱管 の存在しない空間(抜き列)を設ける.これは、抜き列を通 って気泡が上部に流出することにより,管群内のボイド率が 低下し,この結果熱交換性能が向上することを期待したもの である.タイプ3では、抜き列の両側面にさらに整流用の高 さ 200mm, 厚さ 2mm の鉛直壁を設ける. これは, 鉛直壁の 間隙に下降流が形成されることにより管群部の上向き流速 が増大し、ボイド率が低下することを狙ったものである. タ イプ3における伝熱管配置を Fig.2 に示す. タイプ2ではこ れより鉛直壁が削除される. タイプ1ではさらに抜き列部に 伝熱管が設けられる. 伝熱管の総数は, タイプ1で181本, タイプ2,3では151本である. ここで,熱交換器内部におけ る気液二相流の多次元流動構造を調べるため,バンドル部を Fig.1,2 に模式的に示すように93 個の領域に分割し,各領域 におけるボイド率および気液の上向き流速の空間平均値を 計算結果より導出した.



Fig. 1 Triangular arrangement of heat transfer tubes



Fig. 2 Tube arrangement in the type 3 heat exchanger

### 2.2 解析条件

数値解析には商用コードの一つである CFX-5.6 を使用した.流体は常温・常圧の水および空気とし、初期水位は熱交換器胴部の中心から 20mm 上部(最上段管群中心から 49mm)とした.計算セルは代表サイズ 1mm の非構造格子とし、約96万点の格子点により計算領域を分割した.伝熱管表面より空気が均一に流出するものとし、伝熱管表面のボイド率は0.1,空気流速は伝熱管表面と垂直の方向に 0.01m/s または0.02m/s とした.気泡径は 3mm とした.また、流体中に誘起

される乱れの影響によりボイド率が空間的に拡散的な振る 舞いを見せることが知られているが, 簡単のため本計算では 乱流の影響は考慮していない.

## 3. 解析結果

#### 3.1 ボイド率

解析結果の一例として, Fig.3 にタイプ 2 において伝熱管 表面における空気流速を 0.02m/s としたときのボイド率分布 の計算結果を示す.本図より,気泡の抜き列への移動は主に 管群上部で見られることがわかる.まず,抜き列および整流 壁の効果について検討するため,伝熱管間隙部における空間 平均ボイド率を排出空気流量に対してプロットした結果を Fig.4 に示す.図より,タイプ 2,3 ではタイプ 1 と比較して ボイド率が低減していることがわかる.これより,抜き列を 設置することによりドライアウトによる熱交換性能低下の 可能性を低減できるものと考えられる.



Fig.3 Void fraction at low gas velocity ( $V_{G0}=0.02$ m/s)



Fig.4 Void fraction in calculating area

#### 3.2 気相流速

タイプ1~3 における気相流速の比較を Fig.5(a)に示す.こ の図からタイプ3の方が抜き列域での速度勾配が大きく,管 群部においても気相速度が大きいことがわかる.一方タイプ 2の場合は管群域端部では気泡の抜き列への移動が見られる ため、上向きの気泡速度は減少している.また、抜き列と熱 交換器端部に見られる液相の下降流の影響により、抜き列へ 移動した気泡が一箇所に停滞する場所も見られた.

#### 3.3 液相流速

それぞれの管群配置についての液相流速比較を Fig.5(b)に示す. 図より, タイプ2 での下降流生成は抜き列域の広い範

囲に見られるのに対し、タイプ3では整流用鉛直壁間隙部に のみ生成され、その流速もおよそ2倍となる.管群域につい ては、左右の管群域では液相流速の大きな差は見られないが、 中心管群域では整流用鉛直壁設置による液相流速の増加が 見てとれる.液相流速の増加によって管群に接する液相温度 の低下が見込まれ、熱伝達効率の改善に寄与するものと思わ れる.また、管群域端部における液相流速増加は顕著で、管 群域抜き列周囲での熱伝達効率改善に寄与するものと思わ れる.



(a) Gas phase



(b) Liquid phase

Fig.5 Vertical upward velocity at two geometry patterns

#### 4. 結言及び今後の展望

本研究では、多管円筒型熱交換器を模擬した流動領域モデ ルを作成し、管群での熱交換による沸騰現象を各管群からの 一定の空気排出によって模擬し、その気泡の流動挙動と液相 の流動を3つの管群配置パターンについて解析した.その結 果を以下に示す、

- (1) 抜き列を設けることにより伝熱管間隙部ボイド率は減 少し,気泡挙動は改善される.
- (2) 整流用鉛直壁の設置により液相流速が増加し、安定した流動が得られる.

また,熱交換器評価手法の高度化のため,今後気泡の乱流 による影響評価および実験による解析結果の精度検証が必 要と考えられる.