

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-32347  
(P2017-32347A)

(43) 公開日 平成29年2月9日(2017.2.9)

(51) Int.Cl.  
GO1N 25/18 (2006.01)

F I  
GO1N 25/18 L

テーマコード(参考)  
2GO40

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2015-150851 (P2015-150851)  
(22) 出願日 平成27年7月30日 (2015.7.30)

(71) 出願人 504133110  
国立大学法人電気通信大学  
東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1  
(72) 発明者 榎木 光治  
東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内  
(72) 発明者 宮田 一司  
福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内  
(72) 発明者 森 英夫  
福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内  
Fターム(参考) 2G040 AA01 AB08 BA02 BA24 HA16

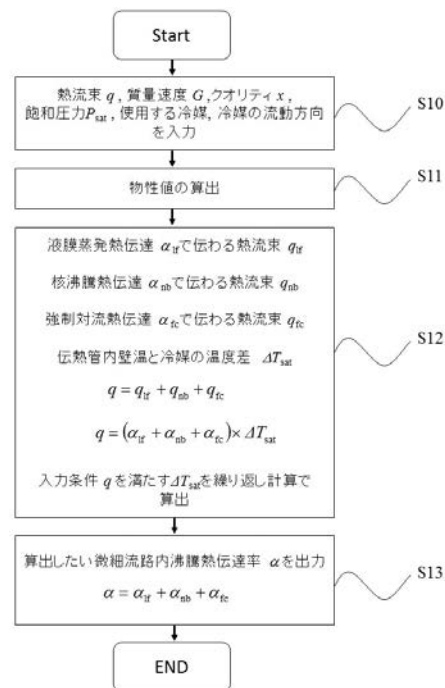
(54) 【発明の名称】 微細流路を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーション装置、およびプログラム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 微細流路内の沸騰熱伝達率を精度高く算出することができるシミュレーション装置を提供する。

【解決手段】 どのような条件における沸騰熱伝達率を算出したいのかを入力(S10)、入力された情報を基に計算に必要な冷媒の物性値を算出する(S11)。そして、各熱伝達成分  $\alpha_{lf}$ 、 $\alpha_{nb}$ 、 $\alpha_{fc}$  で伝わるそれぞれの熱流束  $q_{lf}$ 、 $q_{nb}$ 、 $q_{fc}$  の合計値  $q$  が S10 で入力した条件を満たすまで、繰り返し計算により、伝熱管内壁温と冷媒の温度差  $T_{sat}$  を算出する(S12)。得られた  $T_{sat}$  を基に、微細流路内の沸騰熱伝達率  $a$  を算出する(S13)。各熱伝達成分  $\alpha_{lf}$ 、 $\alpha_{nb}$ 、 $\alpha_{fc}$  の算出法については後述するが、本発明では、水平流における液膜蒸発熱伝達  $\alpha_{lf}$  と、核沸騰熱伝達  $\alpha_{nb}$  の見積る式を修正することで、より一般性の高い整理式とするだけでなく、予測精度を高めている。

【選択図】 図7



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

熱流束 $q$ 、質量速度 $G$ 、クオリティ $x$ 、飽和圧力 $P_{sat}$ 、使用する冷媒、冷媒の流動方向を基に物性値を算出する物性値算出モジュールと、  
前記物性値算出モジュールで算出された物性値および冷媒の流動方向の入力情報を取得して、液膜蒸発熱伝達 $h_{lf}$ で伝わる熱流束 $q_{lf}$ と、核沸騰熱伝達 $h_{nb}$ で伝わる熱流束 $q_{nb}$ と、強制対流熱伝達 $h_{fc}$ で伝わる熱流束 $q_{fc}$ と、伝熱管内壁温と冷媒の温度差 $T_{sat}$ を基に入力条件 $q$ を満たす $T_{sat}$ を繰り返し計算する繰り返し計算モジュールと、  
前記繰り返し計算モジュールで算出された数値を、 $q = q_{lf} + q_{nb} + q_{fc}$ に代入して微細流路内沸騰熱伝達率 $h_{nb}$ を算出する微細流路内沸騰熱伝達率算出モジュールと、  
を備えることを特徴とする微細流路を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーション装置。

10

## 【請求項 2】

熱流束 $q$ 、質量速度 $G$ 、クオリティ $x$ 、飽和圧力 $P_{sat}$ 、使用する冷媒、冷媒の流動方向を入力するステップと、  
前記入力された前記情報を基に計算に必要な冷媒の物性値を算出するステップと、  
各熱伝達成分 $h_{lf}$ 、 $h_{nb}$ 、 $h_{fc}$ で伝わるそれぞれの熱流束 $q_{lf}$ 、 $q_{nb}$ 、 $q_{fc}$ の合計値 $q$ が前記ステップで入力した条件を満たすまで、繰り返し計算により、伝熱管内壁温と冷媒の温度差 $T_{sat}$ を算出するステップと、  
前記ステップで得られた $T_{sat}$ を基に、微細流路内の沸騰熱伝達率 $h_{nb}$ を算出するステップと、  
を備えることを特徴とする微細流路を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーションプログラム。

20

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本開示は、内径が0.5 - 4 mm程度の円形流路伝熱管（以下、微細流路）を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーション装置、およびプログラムに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、円管内気液二相流の熱伝達を見積るには、核沸騰による熱伝達の寄与分と、強制対流による熱伝達の寄与分を足しあわせた形で表現できることが知られている。しかし発明者らが実施した微細流路の研究によって、微細流路には特有の液膜熱伝導蒸発による熱伝達が存在することが見いだされ、その寄与を考慮した精度の高い整理式を提案した（非特許文献1参照）。ここで液膜熱伝導蒸発とは、気体と液体が交互に流れる間欠的な流動様式、スラグ流における気体プラグ周囲の薄い液膜を通した熱伝導による蒸発熱伝達である。

30

## 【先行技術文献】

## 【非特許文献】

## 【0003】

【非特許文献 1】宮田一司，森英夫，濱本芳徳，微細流路内流沸騰熱伝達の整理式，日本冷凍空調学会論文集，Vol.28，No.2，pp.137-148，（2011）

【非特許文献 2】Enoki, K., Mori, H., Miyata, K., Kariya, K., Hamamoto, Y., Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of a Refrigerant Flowing in Small Horizontal Tubes, Proc. of the 3rd Int. Forum on Heat Transfer, Nagasaki, Japan (2012), IFHT2012-193.

40

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0004】

しかしながら、非特許文献 1 に記載の微細流路内の沸騰熱伝達率予測整理式に関して、（

50

1) 近年広く用いられている比較的高圧の冷媒に対して、整理式中で用いた核沸騰整理式の予測精度が良くないこと、(2) 最近得た水平流の低流量のデータ/非特許文献2に対して予測精度が低いことが明らかになった。そこで、本発明は、上記の事情に鑑みてなされたものであり、これら2点について以前提案した整理式を修正し、予測精度の改善を行った。新たに得られた整理式は、他研究者の実験データを含め、広範囲のデータに対して高い予測精度を示した。

【0005】

上述した課題に鑑み、本発明は、従来よりも予測精度の高い微細流路を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーション装置、およびプログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明者らは、先に、微細円形流路内の沸騰熱伝達率について、強制対流蒸発と核沸騰の寄与に加え、新たに微細流路に特有の液膜熱伝導蒸発の寄与を考慮した精度の高い整理式を提案した。液膜熱伝導蒸発は、主にスラグ流における気体プラグ周囲の薄液膜を通じた熱伝導による蒸発熱伝達である。しかしながら、近年広く用いられる比較的高圧の冷媒に対して整理式で用いた核沸騰整理式の予測精度が良くないこと、また、最近得た水平流の低流量のデータに対して整理式の予測精度が低いことが明らかになった。本研究では、この2点について以前に提案した整理式を修正し、予測精度の改善を行った。新たに得られた整理式は、発明者らのR410Aのデータのみならず、他研究者によるR32、R1234yfおよびH<sub>2</sub>OやCO<sub>2</sub>を含む広範囲のデータに対して、水平流の低流量の条件を含め、高い予測精度を示した。

本発明に係る微細流路を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーション装置は、熱流束 $q$ 、質量速度 $G$ 、クオリティ $x$ 、飽和圧力 $P_{sat}$ 、使用する冷媒、冷媒の流動方向を基に物性値を算出する物性値算出モジュールと、前記物性値算出モジュールで算出された物性値および冷媒の流動方向の入力情報を取得して、液膜蒸発熱伝達 $h_{lf}$ で伝わる熱流束 $q_{lf}$ と、核沸騰熱伝達 $h_{nb}$ で伝わる熱流束 $q_{nb}$ と、強制対流熱伝達 $h_{fc}$ で伝わる熱流束 $q_{fc}$ と、伝熱管内壁温と冷媒の温度差 $T_{sat}$ を基に入力条件 $q$ を満たす $T_{sat}$ を繰り返し計算する繰り返し計算モジュールと、前記繰り返し計算モジュールで算出された数値を、 $h = h_{lf} + h_{nb} + h_{fc}$ に代入して微細流路内沸騰熱伝達率 $h$ を算出する微細流路内沸騰熱伝達率算出モジュールと、を備えることを特徴とする。

本発明に係る微細流路を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーションプログラムは、熱流束 $q$ 、質量速度 $G$ 、クオリティ $x$ 、飽和圧力 $P_{sat}$ 、使用する冷媒、冷媒の流動方向を入力するステップと、前記入力された前記情報を基に計算に必要な冷媒の物性値を算出するステップと、各熱伝達成分 $h_{lf}$ 、 $h_{nb}$ 、 $h_{fc}$ で伝わるそれぞれの熱流束 $q_{lf}$ 、 $q_{nb}$ 、 $q_{fc}$ の合計値 $q$ が前記ステップで入力した条件を満たすまで、繰り返し計算により、伝熱管内壁温と冷媒の温度差 $T_{sat}$ を算出するステップと、前記ステップで得られた $T_{sat}$ を基に、微細流路内の沸騰熱伝達率 $h$ を算出するステップと、を備えることを特徴とする。

【発明の効果】

【0007】

本発明によれば、水平流における液膜蒸発熱伝達 $h_{lf}$ と、核沸騰熱伝達 $h_{nb}$ の見積る式を修正することにより、より予測精度の高い微細流路を用いた熱交換器の沸騰熱伝達性能シミュレーション装置、およびプログラムを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】本発明の実施の形態に係る核沸騰熱伝達支配条件下における発明者らの実験結果

と、核沸騰整理式であるStephan-Abdelsalamの式とJungらの式との比較図である。

【図2】本発明の実施の形態に係るキャピラリー数Caと、発明者らの水平流の実験結果（非特許文献2）から得られた相当液膜厚さと、相当液膜厚さの予測式との関係図である。

【図3】本発明の実施の形態に係る実験結果から得られた相当液膜厚さと、既存の液膜厚さの相関式（Aussilous-Quereの式）との比較図である。

【図4】本発明の実施の形態に係るデータベースの実験値と本発明による整理式から得られた予測値の比較図である。

【図5】本発明の実施の形態に係る発明者らが行った水平流の実験結果（非特許文献2）に対する、修正前の整理式（非特許文献1）と本特許整理式の予測精度の比較図である。

【図6】本発明の実施例に係る微細流路内沸騰熱伝達率算出シミュレーション装置の構成図である。

【図7】本発明の実施例に係る微細流路内沸騰熱伝達率算出シミュレーションの手順を示すフロー図である。

【発明を実施するための形態】

【0009】

以下、本発明の実施形態について具体的に説明する。

発明者らは、先に、微細円形流路を用いた新しい空調機用熱交換器の設計に適用可能な微細流路内沸騰熱伝達率の整理式を提案した。整理式では、従来径管にみられる強制対流蒸発熱伝達と核沸騰熱伝達の寄与に加え、新たに、微細流路に特有の寄与であるスラグ流の気体プラグ周囲の薄液膜を介した熱伝導による蒸発熱伝達を考慮して、従来の整理式よりも高い予測精度を得た。発明者らは、この微細流路特有の熱伝達を液膜熱伝導蒸発と呼んでいる。また、整理式は、他研究者の実験データも含めて、流動方向については垂直上昇、下降および水平流に、流体についてはフロン系冷媒、 $H_2O$ および $CO_2$ に適用可能である。本研究では、整理式の適用範囲を拡大し、あわせて一般性を高めるための修正を行った。

【0010】

まず、核沸騰の寄与分を見積もるのに用いたプール核沸騰のStephan-Abdelsalam式は、近年利用される低沸点の高圧フロン系冷媒に対して予測精度が悪く、先の整理式においても、高圧冷媒のR410Aに適用する際、修正係数を乗じる必要があった。ここでは、高圧フロン系冷媒に対して一般に適用できる整理式とするために、別の精度良い核沸騰整理式を採用する検討を行った。

【0011】

また、発明者らは、最近、内径1mmの水平円管とR410Aを用い、従来よりも低い流量条件までを対象とした実験を行っている。その結果、水平流では、特に低い流量条件で、液膜熱伝導蒸発による熱伝達が垂直流よりかなり良好であり、液膜熱伝導蒸発の寄与が大きい領域では、先の整理式は実験値を大幅に低く見積もることが明らかになった。そこで、本研究では、水平流における液膜熱伝導蒸発の寄与を改めて検討した。以下に、これらの結果を報告する。

【0012】

2. 整理式の修正に用いたデータベース

先の整理式作成に用いた微細円形流路を対象としたデータベースに、新たに発明者らのR410Aの水平流のデータとLiらのR32、R1234yfの水平流のデータを加えてデータベースを作成し、整理式の修正と予測精度の検討を行った。本研究で用いたデータベースの概要を表1に示す。

なお、各冷媒の物性値の算出にはREFPROPVer.9を用いた。

10

20

30

40

【表 1】

| Source                           | Fluid            | Saturation pressure<br>MPa (Temperature °C) | Inside diameter<br>mm | Flow<br>direction | Mass flux<br>kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | Heat flux<br>kW·m <sup>-2</sup> | N   |
|----------------------------------|------------------|---|-----------------------|-------------------|--|---------------------------------|-----|
| Lazarek and Black <sup>7)</sup>  | R 113            | 0.17 (64)                                   | 3.15                  | Upward            | 502  | 114, 178                        | 3   |
|                                  | R 113            | 0.17 (64)                                   | 3.15                  | Downward          | 502  | 64 - 178                        | 11  |
| Wambsganss et al. <sup>8)</sup>  | R 113            | 0.13 - 0.16 (55 - 62)                       | 2.92                  | Horizontal        | 50 - 300   | 8.8 - 90.8                      | 72  |
| Tran et al. <sup>9)</sup>        | R 12             | 0.83 (34)                                   | 2.46                  | Horizontal        | 66.3 - 300                                       | 7.5 - 59.4                      | 59  |
| Kew and Cornwell <sup>10)</sup>  | R 141b           | 0.10 (32)                                   | 2.87, 3.69            | Horizontal        | 188, 212   | 9.7 - 90                        | 67  |
| Bao et al. <sup>11)</sup>        | R 11             | 0.29 - 0.47 (57 - 76)                       | 1.95                  | Horizontal        | 167 - 560  | 52 - 125                        | 81  |
|                                  | R 123            | 0.35 - 0.51 (67 - 82)                       | 1.95                  | Horizontal        | 167 - 452  | 39 - 125                        | 80  |
| Kuwahara et al. <sup>12)</sup>   | R 134a           | 0.88 (35)                                   | 0.84                  | Horizontal        | 525  | 15.6                            | 15  |
| Sunith et al. <sup>13)</sup>     | H <sub>2</sub> O | 0.10 (100)                                  | 1.45                  | Upward            | 23.4 - 152.7                                     | 36 - 391                        | 65  |
| Saitoh et al. <sup>14)</sup>     | R 134a           | 0.41 (10)                                   | 0.51, 1.12, 3.1       | Horizontal        | 150, 300   | 12 - 29                         | 75  |
| Yamashita et al. <sup>15)</sup>  | CO <sub>2</sub>  | 5.00 (14)                                   | 1.02                  | Horizontal        | 300 - 1000                                       | 30 - 50                         | 62  |
| Miyata et al. <sup>16, 17)</sup> | R 410A           | 1.09 (10)                                   | 1.00                  | Upward            | 30 - 200   | 1 - 16                          | 170 |
|                                  | R 410A           | 1.09 (10)                                   | 1.00                  | Downward          | 30 - 200   | 1 - 16                          | 206 |
| Li et al. <sup>18)</sup>         | R 32             | 1.28 (15)                                   | 2.00                  | Horizontal        | 200  | 6 - 24                          | 44  |
|                                  | R 1234yf         | 0.51 (15)                                   | 2.00                  | Horizontal        | 100 - 400  | 6 - 24                          | 91  |
| Enoki et al. <sup>3)</sup>       | R 410A           | 1.09 (10)                                   | 1.00                  | Horizontal        | 30 - 400   | 2 - 24                          | 287 |

10

## 【 0 0 1 3 】

## 3 . 整理式の修正と予測精度

20

## 3 . 1 核沸騰寄与項の検討と修正

Jung らは、低沸点の高圧冷媒を含むフロン系冷媒に一般に適用可能なプール核沸騰熱伝達の整理式を新たに提案している。図 1 は、発明者らの R410A の核沸騰支配のデータを、Jung らの式および先に用いた Stephan-Abdelsalam の式と比較したもので、Jung らの式の予測が良いことが確認できる。そこで、フロン系冷媒に対する核沸騰寄与分の熱伝達率  $\alpha_{nb}$  については、Jung らの式を用いて見積もることとし、以下のように修正を行った。あわせて、核沸騰抑制係数  $S$  についても、実験値を再現するよう再検討を行った。

## 【 0 0 1 4 】

先の整理式と同様、核沸騰熱伝達の寄与  $\alpha_{nb}$  は、プール核沸騰熱伝達率の予測値  $\alpha_{pb}$  に核沸騰抑制係数  $S$  を乗じ、次式 (1) で見積もる。

30

## 【数 1】

$$\alpha_{nb} = S \times \alpha_{pb} \quad (1)$$

フロン系冷媒の  $\alpha_{pb}$  には、次式の Jung らの式を適用する。

## 【数 2】

$$\alpha_{pb} = 10 \frac{\lambda_L}{D_b} \left( \frac{q_{pb} D_b}{\lambda_L T_{sat}} \right)^n \left( \frac{P_{sat}}{P_{crit}} \right)^{0.1} \left( 1 - \frac{T_{sat}}{T_{crit}} \right)^{-1.4} Pr_L^{-0.25} \quad (2)$$

40

ここに、

## 【数 3】

$$D_b = 0.51 \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)} \right]^{0.5} \quad (3)$$

50

【数 4】

$$n = 0.855 \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.309} \left( \frac{P_{\text{sat}}}{P_{\text{crit}}} \right)^{-0.437} \quad (4)$$

【0015】

ここで、式(2)中、 $q_{pb}$ は核沸騰により伝熱面から流体に伝わる熱流束成分で、全熱流束 $q$ の一部である。プール核沸騰熱伝達率 $\alpha_{pb}$ は、熱伝達率の定義である式(5)より、流体の飽和温度に対する壁面過熱度 $T_{\text{sat}}$ を介して、式(6)のように書き直すことができる。 10

【数 5】

$$\alpha_{pb} = \frac{q_{pb}}{\Delta T_{\text{sat}}} \quad (5)$$

【数 6】

$$\alpha_{pb} = C^{1-n} \times \Delta T_{\text{sat}}^{\frac{n}{1-n}} \quad (6) \quad 20$$

ここで、

【数 7】

$$C = 10 \frac{\lambda_L}{D_b} \left( \frac{D_b}{\lambda_L T_{\text{sat}}} \right)^n \left( \frac{P_{\text{sat}}}{P_{\text{crit}}} \right)^{0.1} \left( 1 - \frac{T_{\text{sat}}}{T_{\text{crit}}} \right)^{-1.4} Pr_L^{-0.25} \quad (7) \quad 30$$

【0016】

核沸騰抑制係数 $S$ については、再度 $H_2O$ と $CO_2$ を含む全データを用いて検討し、新しい $S$ 式を、式(8)の通り、作成した。本整理式では、熱流束の影響を、Jungらの式やStephan-Abdelsalamの式で用いられている無次元数 $q \cdot D_b \cdot (\mu_L \cdot T_{\text{sat}})^{-1}$ を導入して、考慮している。

【数 8】

$$S = \frac{1}{1 + \left[ \frac{G(1-x)D}{\mu_L} \times F^{1.25} \times \left( \frac{qD_b}{\lambda_L T_{\text{sat}}} \right)^{-1.4} \times 10^{-4.4} \right]} \quad (8) \quad 40$$

【0017】

ここで、 $q$ は、核沸騰による熱流束成分 $q_{nb}$ ではなく、伝熱面から流体に伝わる全熱流束である。また $F$ は、二相流強制対流増倍係数であり、先の整理式と同じ、後述の表2中の式(19)を用いる。 50

なお、 $H_2O$  と  $CO_2$  に対して、プール沸騰熱伝達率は先の整理式の通り Stephan-Abdelsalam 式で見積もるが、核沸騰抑制係数  $S$  は、ここで新たに作成した式 (8) を適用する。

【0018】

### 3.2 水平流に対する液膜熱伝導蒸発熱伝達の寄与項の検討と修正

液膜熱伝導蒸発熱伝達の寄与分  $\alpha_{if}$  は、先の整理式と同様、スラグ流における気泡プラグ周囲液膜の熱伝導による蒸発の熱抵抗を代表する相当液膜厚さ  $\delta_e$  を用い、気泡プラグの流れる時間割合を考慮して、次式のように表す。

【数9】

$$\alpha_{if} = \frac{\lambda_L \beta}{\delta_e} \quad (9)$$

10

ここで、 $\beta$  は後述の表2の式(18)で表される気相体積流量比、 $\lambda_L$  は液膜の熱伝導率である。発明者らのR410Aの水平流のデータのうち、核沸騰と強制対流の寄与がともに十分小さい熱流束  $2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  の低流量あるいは低クオリティのデータを用いて、先の整理式と同じ方法で、無次元相当液膜厚さ  $\delta_e \cdot D^{-1}$  を求めた。得られた  $\delta_e \cdot D^{-1}$  を、粘性力と表面張力の比であるキャピラリー数  $Ca$  に対してプロットして、図2に示す。図中、先に提案した上昇流と下降流の整理式(後述の表2の式(14)と式(15))による計算値を、それぞれ細い実線と破線で示している。図に示すように、両整理式の計算値と水平流のデータとの一致はよくない。先の報告では、上昇流の式が水平流にも適用可能としていたが、これは水平流のデータが少なかったためと考えられる。ここでは、以下に示すように、新たに、水平流に対する無次元相当液膜厚さ  $\delta_e \cdot D^{-1}$  の式を検討した。

20

【0019】

垂直流に比べて水平流の液膜熱伝導蒸発が良好なことに対応して、図2に示すように、水平流の無次元相当液膜厚さ  $\delta_e \cdot D^{-1}$  は全般に垂直流の計算値に比して薄くなっている。また、低キャピラリー数域では、上昇流や下降流ではみられなかった質量速度  $G$  の影響がみられ、さらに高質量速度ほど相当液膜厚さは厚くなって垂直流の計算値に近づく傾向を示している。これは、水平流の気体プラグ周囲液膜が、低流量では浮力の影響により管頂側で薄く、管底側で厚いものに対して、流量が増大すると垂直流と同様に液膜が均一化されることに対応しているものと考えられる。また、水平流においては、キャピラリー数がおおよそ0.02以上で、キャピラリー数の増加に伴い相当液膜厚さが急激に厚くなる傾向が認められるが、スラグ流から他の流動様式に遷移する領域とほぼ一致しており、垂直流との熱伝達の差異が小さくなる境界に相当する。

30

【0020】

以上の特性に基づき、水平流の相当液膜厚さの整理式を、次式のように、作成した。

【数10】

$$\frac{\delta_e}{D} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0.12 \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.18} Ca^{0.14} Fr^{0.2} \\ 36 Ca^{1.8} \end{array} \right. \quad (10)$$

40

ここで、 $Fr$  は次式に示すフルード数で、質量速度が小さいほど重力の効果が相対的に大きくなることを表している。

【数 1 1】

$$Fr = \frac{G^2}{\rho_L(\rho_L - \rho_V)gD} \quad (11)$$

【0 0 2 1】

図 2 には、式 (10) による計算値を太い各線で示しており、流量の影響を含め、実験値の示す傾向を良く再現していることが確認できる。なお、吉永らは、内径0.5、1.0、2.0 mm のガラス円管を水平に流れるスラグ流の気体プラグ周囲液膜厚さをレーザー共焦点変位計を用いて直接計測し、既存の液膜厚さの相関式と比較して、Aussilous-Quere の式が実験値を良く再現すると報告している。図 3 に、発明者らの研究で得られた無次元相当液膜厚さ  $\delta^* \cdot D^{-1}$  と Aussilous-Quere の式による予測値の比較結果を示す。Aussilous-Quere の式は、垂直流では本研究の無次元相当厚さより幾分低めの値を示すが、相当液膜厚さが小さく算出される水平流の場合は比較的良い一致を示している。

10

【0 0 2 2】

### 3.3 新整理式の予測精度

先の整理式から変更しない部分も含めて、最終的に得られた微細流路内沸騰熱伝達率の整理式を、表 2 に示す。表 1 に示したデータベースに対する本整理式の予測精度を、実験値と計算値の関係で図 4 に示す。また、本整理式の予測精度を Zhang らの式、Saitoh らの式および先の整理式と比較した結果を表 3 に示す。Zhang らの式と Saitoh らの式については、他に提案されている整理式と比べて、微細流路の実験データに対する予測精度が比較的高いことが確認されている。表中の N は検討に用いたデータ数、SD は式 (12) に示す実験値に対する予測値の標準偏差、R20 と R30 はそれぞれ予測値の偏差が  $\pm 20\%$  と  $\pm 30\%$  に入るデータ数の全データ数に対する比率である。

20

【数 1 2】

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{\alpha_{cal} - \alpha_{exp}}{\alpha_{exp}} \right)^2} \quad (12)$$

30

【0 0 2 3】

これらの結果から明らかなように、本整理式の予測精度は良好で、他整理式と比較して最も良い。また、先の整理式と比べ、水平流低流量条件の発明者らのデータ、低沸点高圧冷媒 R32 の Li らのデータの予測精度が大幅に改善されている。発明者らの水平流の実験データに対する本整理式と先の整理式の予測精度の比較を、図 5 に示す。図中、観察された流動様式の範囲を記載している。

【0 0 2 4】

先に提案した微細円形流路の沸騰熱伝達率の整理式について、前報のデータベースに新たな実験データを加えて再検討し、液膜熱伝導蒸発と核沸騰の寄与を見積もる式を一部修正して、より一般性の高い整理式を得た。本整理式は、高圧のフロン冷媒にも広く適用でき、水平流の低流量条件に対して良好な予測精度を示す。

40

【0 0 2 5】



【表 2】

| Correlation   |      | $\alpha = \alpha_{if} + \alpha_{fc} + \alpha_{nb} = \frac{\lambda_k \beta}{\delta_k} + F\alpha_L + SC^{1-n} \Delta T_{sat}^{\frac{n}{1-n}}$ | (13) |
|---|------|---|------|
| <b>Thin liquid film evaporation heat transfer</b>   |      |   |      |
| <b>for horizontal flow</b>  |      |   |      |
| $\frac{\delta_k}{D} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0.12 \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.18} Ca^{0.14} Fr^{0.2} \\ 36 Ca^{1.8} \end{array} \right.$   | (10) |   |      |
| <b>for vertical upward flow</b>   |      |   |      |
| $\frac{\delta_k}{D} = 1.14 \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.25} Ca^{0.41}$   | (14) |   |      |
| <b>for vertical downward flow</b>   |      |   |      |
| $\frac{\delta_k}{D} = 2.7 Ca^{0.82}$  | (15) |   |      |
| $Ca = \frac{\mu_L J_T}{\sigma}$   | (16) |   |      |
| $J_T = G \left( \frac{x}{\rho_V} + \frac{1-x}{\rho_L} \right)$  | (17) |   |      |
| $Fr = \frac{G^2}{\rho_L (\rho_L - \rho_V) g D}$   | (11) |   |      |
| $\beta = \frac{x}{x + \frac{\rho_V}{\rho_L} (1-x)}$   | (18) |   |      |
| <b>Forced convection heat transfer</b>  |      |   |      |
| $F = 1 + \left( \frac{1}{\lambda_n} \right)^{1.1}$  | (19) |   |      |
| $\lambda_n = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_L}{\mu_V} \right)^{0.1}$  | (20) |   |      |
| $\alpha_L = 0.023 \frac{\lambda_k}{D} \left[ \frac{G(1-x)D}{\mu_L} \right]^{-0.25} Pr_L^{0.4}$  | (21) |   |      |
| <b>Nucleate boiling heat transfer</b>   |      |   |      |
| $S = \frac{1}{1 + \left[ \frac{G(1-x)D}{\mu_L} \times Fr^{1.25} \times \left( \frac{q D_b}{\lambda_L T_{sat}} \right)^{-1.4} \times 10^{-4.4} \right]}$   | (8)  |   |      |
| where $q$ is the total heat flux  |      |   |      |
| <b>for Freon</b>  |      |   |      |
| $C = 10 \frac{\lambda_k}{D_b} \left( \frac{D_b}{\lambda_L T_{sat}} \right)^n \left( \frac{Pr_{sat}}{Pr_{crit}} \right)^{0.1} \left( 1 - \frac{T_{sat}}{T_{crit}} \right)^{-1.4} Pr_L^{-0.25}$   | (7)  |   |      |
| $D_b = 0.51 \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)} \right]^{-0.5}$   | (3)  |   |      |
| $n = 0.855 \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.309} \left( \frac{Pr_{sat}}{Pr_{crit}} \right)^{-0.437}$   | (4)  |   |      |
| <b>for H<sub>2</sub>O</b>   |      |   |      |
| $C = 0.246 \times 10^7 \frac{\lambda_k}{D_b} \left( \frac{D_b}{\lambda_L T_{sat}} \right)^n \left( \frac{c_{pL} T_{sat} D_b^2}{\alpha_L^2} \right)^{1.26} \times \left( \frac{D_b^2 dh_c}{\alpha_L^2} \right)^{-1.58} \left( \frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_L} \right)^{1.22}$ | (22) |   |      |
| $D_b = 0.66 \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)} \right]^{-0.5}$   | (23) |   |      |
| $n = 0.673$   | (24) |   |      |
| <b>for CO<sub>2</sub></b>   |      |   |      |
| $C = 207 \frac{\lambda_k}{D_b} \left( \frac{D_b}{\lambda_L T_{sat}} \right)^n \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.581} Pr_L^{0.533}$  | (25) |   |      |
| $D_b = 0.51 \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)} \right]^{-0.5}$   | (3)  |   |      |
| $n = 0.745$   | (26) |   |      |

10

20

30

【表 3】

| Source                      | N    | %          | Zhang <sup>22)</sup> | Saitoh <sup>23)</sup> | Miyata <sup>1)</sup> | Present |
|-----------------------------|------|------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------|
| Lazarek <sup>7)</sup>       |      | <i>SD</i>  | 31.4                 | 9.7                   | 7.2                  | 21.3    |
| 3.15 mm                     | 3    | <i>R20</i> | 0.0                  | 100.0                 | 100.0                | 33.3    |
| Upward, R 113               |      | <i>R30</i> | 33.3                 | 100.0                 | 100.0                | 100.0   |
| Lazarek <sup>7)</sup>       |      | <i>SD</i>  | 21.3                 | 15.1                  | 6.6                  | 15.6    |
| 3.15 mm                     | 11   | <i>R20</i> | 36.4                 | 72.7                  | 100.0                | 90.9    |
| Downward, R 113             |      | <i>R30</i> | 100.0                | 100.0                 | 100.0                | 100.0   |
| Wambsganss <sup>8)</sup>    |      | <i>SD</i>  | 21.1                 | 27.0                  | 24.2                 | 17.7    |
| 2.92 mm                     | 72   | <i>R20</i> | 55.6                 | 55.6                  | 58.3                 | 69.4    |
| Horizontal, R 113           |      | <i>R30</i> | 83.3                 | 75.0                  | 75.0                 | 94.4    |
| Tran <sup>9)</sup>          |      | <i>SD</i>  | 17.0                 | 17.1                  | 16.7                 | 6.2     |
| 2.46 mm                     | 59   | <i>R20</i> | 71.2                 | 66.1                  | 72.9                 | 100.0   |
| Horizontal, R 12            |      | <i>R30</i> | 96.6                 | 98.3                  | 100.0                | 100.0   |
| Kew <sup>10)</sup>          |      | <i>SD</i>  | 32.7                 | 22.8                  | 13.7                 | 15.6    |
| 2.87 - 3.69 mm              | 67   | <i>R20</i> | 35.8                 | 62.7                  | 86.6                 | 82.1    |
| Horizontal, R 141b          |      | <i>R30</i> | 56.7                 | 82.1                  | 97.0                 | 98.5    |
| Bao <sup>11)</sup>          |      | <i>SD</i>  | 25.1                 | 21.0                  | 22.0                 | 15.7    |
| 1.95 mm                     | 81   | <i>R20</i> | 32.1                 | 48.1                  | 37.0                 | 79.0    |
| Horizontal, R 11            |      | <i>R30</i> | 72.8                 | 91.4                  | 95.1                 | 100.0   |
| Bao <sup>11)</sup>          |      | <i>SD</i>  | 27.6                 | 15.1                  | 14.4                 | 16.7    |
| 1.95 mm                     | 80   | <i>R20</i> | 25.0                 | 86.3                  | 91.3                 | 71.3    |
| Horizontal, R 123           |      | <i>R30</i> | 67.5                 | 96.3                  | 100.0                | 100.0   |
| Kuwahara <sup>12)</sup>     |      | <i>SD</i>  | 24.4                 | 27.2                  | 33.5                 | 23.4    |
| 0.84 mm                     | 15   | <i>R20</i> | 53.3                 | 33.3                  | 0.0                  | 26.7    |
| Horizontal, R 134a          |      | <i>R30</i> | 73.3                 | 80.0                  | 40.0                 | 93.3    |
| Sumith <sup>13)</sup>       |      | <i>SD</i>  | 35.8                 | 35.5                  | 16.4                 | 17.4    |
| 1.45 mm                     | 65   | <i>R20</i> | 26.2                 | 43.1                  | 76.9                 | 73.8    |
| Upward, H <sub>2</sub> O    |      | <i>R30</i> | 46.2                 | 52.3                  | 90.8                 | 90.8    |
| Saitoh <sup>14)</sup>       |      | <i>SD</i>  | 18.7                 | 18.9                  | 11.3                 | 10.9    |
| 0.51 - 3.1 mm               | 75   | <i>R20</i> | 73.3                 | 76.0                  | 92.0                 | 93.3    |
| Horizontal, R 134a          |      | <i>R30</i> | 85.3                 | 89.3                  | 100.0                | 100.0   |
| Yamashita <sup>15)</sup>    |      | <i>SD</i>  | 16.0                 | 13.7                  | 12.6                 | 12.3    |
| 1.02 mm                     | 62   | <i>R20</i> | 72.6                 | 87.1                  | 91.9                 | 90.3    |
| Horizontal, CO <sub>2</sub> |      | <i>R30</i> | 95.2                 | 96.8                  | 98.4                 | 96.8    |
| Miyata <sup>16)</sup>       |      | <i>SD</i>  | 20.6                 | 22.4                  | 7.8                  | 8.3     |
| 1.00 mm                     | 170  | <i>R20</i> | 54.1                 | 57.1                  | 98.2                 | 97.1    |
| Upward, R 410A              |      | <i>R30</i> | 90.0                 | 79.4                  | 100.0                | 100.0   |
| Miyata <sup>17)</sup>       |      | <i>SD</i>  | 26.1                 | 26.8                  | 15.9                 | 11.2    |
| 1.00 mm                     | 206  | <i>R20</i> | 50.5                 | 57.8                  | 84.0                 | 90.3    |
| Downward, R 410A            |      | <i>R30</i> | 77.7                 | 75.7                  | 92.7                 | 98.1    |
| Li <sup>18)</sup>           |      | <i>SD</i>  | 22.7                 | 35.5                  | 23.6                 | 14.6    |
| 2.00 mm                     | 44   | <i>R20</i> | 59.1                 | 40.9                  | 63.6                 | 90.9    |
| Horizontal, R 32            |      | <i>R30</i> | 81.8                 | 52.3                  | 72.7                 | 93.2    |
| Li <sup>18)</sup>           |      | <i>SD</i>  | 19.1                 | 22.7                  | 12.0                 | 11.7    |
| 2.00 mm                     | 91   | <i>R20</i> | 65.9                 | 70.3                  | 92.3                 | 92.3    |
| Horizontal, R 1234yf        |      | <i>R30</i> | 85.7                 | 79.1                  | 100.0                | 100.0   |
| Enoki <sup>5)</sup>         |      | <i>SD</i>  | 34.9                 | 28.5                  | 20.3                 | 9.3     |
| 1.00 mm                     | 287  | <i>R20</i> | 22.3                 | 58.2                  | 78.4                 | 97.2    |
| Horizontal, R 410A          |      | <i>R30</i> | 50.5                 | 70.0                  | 82.9                 | 99.7    |
|                             |      | <i>SD</i>  | 26.7                 | 24.9                  | 17.0                 | 12.5    |
| Total                       | 1388 | <i>R20</i> | 45.2                 | 61.2                  | 80.2                 | 88.5    |
|                             |      | <i>R30</i> | 73.2                 | 78.7                  | 91.6                 | 98.4    |

10

20

30

40

【表 4】

|                         |  |   |    |
|-------------------------|--|---|----|
| $F$                     | 二相流強制対流増倍係数                                | -   |    |
| $G$                     | 質量速度                                       | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ |    |
| $\Delta h_v$            | 蒸発潜熱                                       | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$                   |    |
| $g$                     | 重力加速度                                      | $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$                    |    |
| $j_t$                   | 気液混合の平均流速                                  | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$                    |    |
| $N$                     | データ数                                       | -   |    |
| $P_{\text{crit}}$       | 臨界圧力                                       | Pa  |    |
| $P_{\text{sat}}$        | 飽和圧力                                       | Pa  | 10 |
| $Pr$                    | プラントル数                                     | -   |    |
| $q$                     | 熱流束  | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$                    |    |
| $S$                     | 核沸騰抑制係数                                    | -   |    |
| $T_{\text{crit}}$       | 臨界温度                                       | K   |    |
| $T_{\text{sat}}$        | 飽和温度                                       | K   |    |
| $\Delta T_{\text{sat}}$ | 壁面過熱度                                      | K   |    |
| $x$                     | 乾き度  | -   |    |
| $\alpha$                | 熱伝達率                                       | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  |    |
| $\beta$                 | 気相体積流量比                                    | -   | 20 |
| $\mu$                   | 粘性係数                                       | $\text{Pa}\cdot\text{s}$                        |    |
| $\chi_{\text{tt}}$      | 気液各相が共に乱流の場合の<br>Lockhart-Martinelli パラメータ | -   |    |
| $\delta_e$              | 熱伝導抵抗を代表する液膜厚さ                             | m   |    |
| $\lambda$               | 熱伝導率                                       | $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  |    |
| $\rho$                  | 密度   | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$                   |    |
| $\sigma$                | 表面張力                                       | $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$                    |    |
| 添字                      |  |   |    |
| $a$                     | 熱拡散率                                       | $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$                  | 30 |
| $Ca$                    | キャピラリー数                                    | -   |    |
| $c_p$                   | 定圧比熱                                       | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |    |
| $D$                     | 管内径  | m   |    |
| fc                      | 強制対流蒸発寄与分                                  |   |    |
| lf                      | 液膜熱伝導蒸発寄与分                                 |   |    |
| nb                      | 核沸騰寄与分                                     |   |    |
| cal                     | 計算値  |   |    |
| exp                     | 実験値  |   | 40 |
| L                       | 飽和液  |   |    |
| V                       | 乾き飽和蒸気                                     |   |    |

## 【0026】

図を用いて本発明の一実施例を説明する。図6は、本発明の実施例に係る微細流路内沸騰熱伝達率算出シミュレーション装置10の構成図である。

微細流路内沸騰熱伝達率算出シミュレーション装置10は、CPU11と、入力部15と、出力部16と、記憶装置17を少なくとも備えるコンピュータ等の電子計算機である。入力部16は、例えばキーボードやマウス等の入力装置であり、出力部16は、ディスプレイ等の出力装置である。また記憶装置17は、例えばROM、RAM、HDDに代表さ

れる記憶装置である。

CPU 11は、物性値算出モジュール12と、繰り返し計算モジュール13と、微細流路内沸騰熱伝達率算出モジュール14を少なくとも備えている。

物性値算出モジュール12は、入力部15を介して、熱流束 $q$ 、質量速度 $G$ 、クオリティ $x$ 、飽和圧力 $P_{sat}$ 、使用する冷媒が入力された数値を基に物性値（但し、物性値算出には冷媒の流動方向は関係ない）を算出する機能部である。

繰り返し計算モジュール13は、次の3つの熱流束と温度差  $T_{sat}$ を基に入力条件 $q$ を満たす  $T_{sat}$ を繰り返し計算して算出する機能部である。具体的に3つの熱流束とは、液膜蒸発熱伝達  $h_{lf}$ で伝わる熱流束 $q_{lf}$ と、核沸騰熱伝達  $h_{nb}$ で伝わる熱流束 $q_{nb}$ と、強制対流熱伝達  $h_{fc}$ で伝わる熱流束 $q_{fc}$ である。ここで冷媒の流動方向は、液膜蒸発熱伝達  $h_{lf}$ のみに影響するので、入力部15での冷媒の流動方向情報を基に、適切な  $h_{lf}$ 式を用いるようになっている。また温度差  $T_{sat}$ とは、伝熱管内壁温と冷媒の温度差のことである。そしてこれら数値を次に示す数式に代入することで入力条件 $q$ を算出する。

$$q = q_{lf} + q_{nb} + q_{fc}$$

$$q = (h_{lf} + h_{nb} + h_{fc}) \times T_{sat}$$

次に微細流路内沸騰熱伝達率算出モジュール14は、繰り返し計算モジュール13で算出された数値を、次に示す式に代入して微細流路内沸騰熱伝達率  $h_{total}$ を算出する機能部である。

$$h_{total} = h_{lf} + h_{nb} + h_{fc}$$

尚、これら機能部は例えばプログラム化されており、予め記憶装置17に記憶されている。そして本発明のシミュレーション装置を実行させると、CPUが記憶装置17に記憶されているプログラムを読み込み、所定の処理実行を行うことで、微細流路内沸騰熱伝達率が求められる。

#### 【0027】

図7は、本発明の実施例に係る微細流路内沸騰熱伝達率算出シミュレーションの手順を示すフロー図である。CPU 11の物性値算出モジュール12は、熱流束 $q$ 、質量速度 $G$ 、クオリティ $x$ 、飽和圧力 $P_{sat}$ 、使用する冷媒、冷媒の流動方向が入力されるまで待機している（ステップS10）。これら数値が入力されると物性値を算出する（ステップS11）。繰り返し計算モジュール13は、ステップS11で算出された物性値を取得すると、次の数値と共に次式を用いて入力条件 $q$ を満たす  $T_{sat}$ を繰り返し計算して算出する。ここで数値とは、液膜蒸発熱伝達  $h_{lf}$ で伝わる熱流束 $q_{lf}$ と、核沸騰熱伝達  $h_{nb}$ で伝わる熱流束 $q_{nb}$ と、強制対流熱伝達  $h_{fc}$ で伝わる熱流束 $q_{fc}$ であり、前述の式とは、 $q = q_{lf} + q_{nb} + q_{fc}$ と、 $q = (h_{lf} + h_{nb} + h_{fc}) \times T_{sat}$ である（ステップS12）。続いて微細流路内沸騰熱伝達率算出モジュール14は、ステップS12で算出された温度差  $T_{sat}$ を取得して、 $h_{total} = h_{lf} + h_{nb} + h_{fc}$ を用いて微細流路内沸騰熱伝達率  $h_{total}$ を算出する（ステップS13）。以上の処理手順により微細流路内沸騰熱伝達率  $h_{total}$ を算出することができる。

#### 【符号の説明】

#### 【0028】

- 10 微細流路内沸騰熱伝達率算出シミュレーション装置
- 11 CPU
- 12 物性値算出モジュール
- 13 繰り返し計算モジュール
- 14 微細流路内沸騰熱伝達率算出モジュール
- 15 入力部
- 16 出力部
- 17 記憶装置

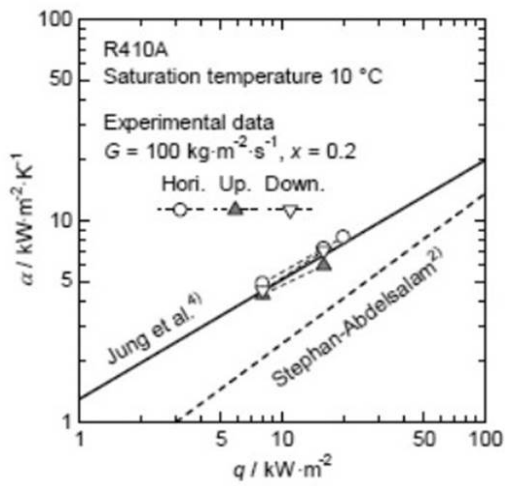
10

20

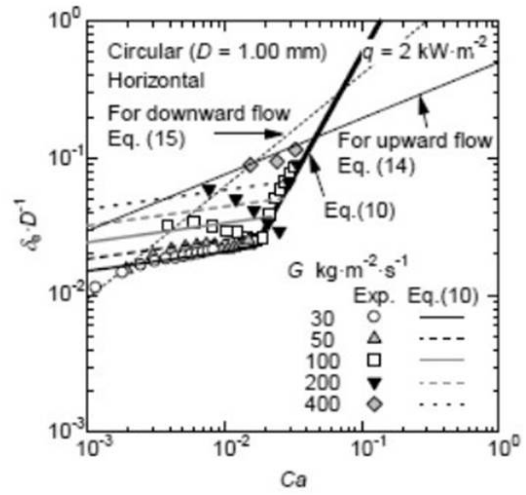
30

40

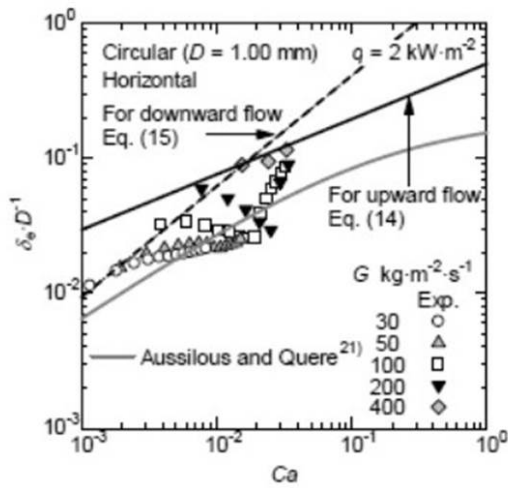
【 図 1 】



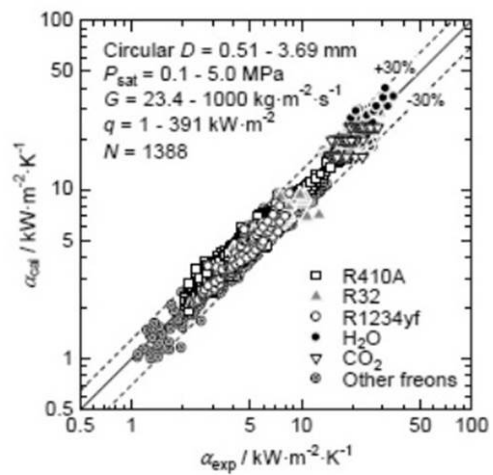
【 図 2 】



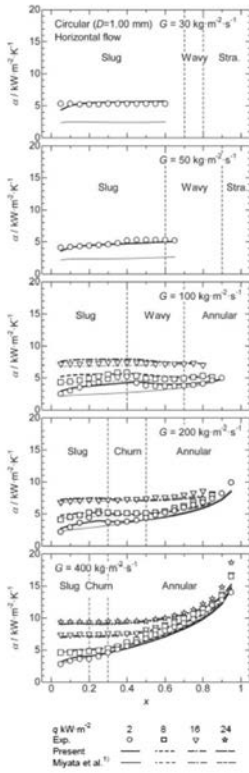
【 図 3 】



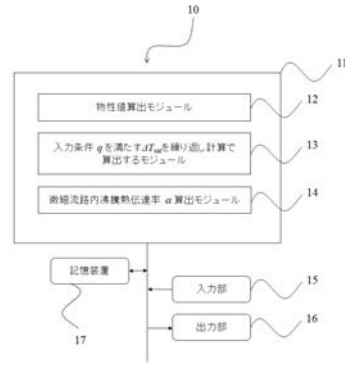
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



【 図 7 】

