鉛直管での気液対向流制限に対する流体物性値の影響*

Effects of Fluid Properties on Countercurrent Flow Limitation in Vertical Pipes

村瀬 道雄**
MURASE Michio

楠木 貴世志**
KUSUNOKI Takayoshi

山本 泰功***
YAMAMOTO Yasunori

合田 頼人†
GODA Raito

林 公祐†
HAYASHI Kosuke

細川 茂雄†
HOSOKAWA Shigeo

富山 明男†
TOMIYAMA Akio

Abstract To evaluate effects of the diameter on countercurrent flow limitation (CCFL) in vertical pipes, in our previous study, we classified CCFL into CCFL-L at the sharp-edged lower end, CCFL-U at the sharp-edged upper end, and CCFL-P inside the vertical pipe with round-edged upper and lower ends, and we found that the characteristic length in the Wallis parameter, $w = D^{(1-\beta)}L^\beta$ (where D and L respectively denote the diameter and the Laplace capillary length), is respectively $\beta = 0, 1$ and $\beta \approx 0.5$ for CCFL-L, CCFL-U and CCFL-P. In this study, we evaluated effects of fluid properties on CCFL in vertical pipes by using existing CCFL data. The most effective fluid properties is the liquid viscosity and we selected the viscosity ratio of gas and liquid (μ_G/μ_L) as a dimensionless parameter. From effects of μ_G/μ_L on the slope m and constant C in the Wallis correlation, we classified three regions of large positive interrelations of m and C with μ_G/μ_L for small μ_L (room-temperature to high-temperature water), small interrelations of m and C with μ_G/μ_L for medium μ_L (low-concentration glycerol water solution), and the large negative interrelation of m with μ_G/μ_L for large μ_L (high-concentration glycerol water solution). We obtained exponent functions of μ_G/μ_L for m and C in the case of the small μ_L (room-temperature to high-temperature water) for CCFL-L and CCFL-U except CCFL-P without high-temperature CCFL data.

Keywords: Countercurrent flow limitation, Vertical pipe, Fluid properties

1. 緒言

加圧水型原子炉 (PWR: Pressurized Water Reactor) の一次系では、通常運転時には液単相であるが、想定される事故条件では減圧沸騰や炉心での崩壊熱により蒸気が発生して気液二相になり、一次系の各所で気液対向流が生じる。一次系圧力が二次系圧力である約 7 MPa 以下になると、流路が狭い部分で対向流制限 (CCFL: Countercurrent Flow Limitation) を生じる場合がある。本研究では、一次系の一部である蒸気発生器の伝熱管と加圧器サージ管での CCFL を対象としてお

り、前者は逆U字管であり、後者は鉛直管、鉛直 90 度エルボ、複数のエルボを含む微傾斜管で構成されている。CCFL は、フラiddiing開始後の準定常状態での時間平均の気液体積流束 (J_G と J_L) の関係で定義している。

鉛直管での気液対向流に関しては多くの従来研究[1,2]があるが、管内でのフラiddiing開始に関する研究が多く、CCFL 特性に関する研究は少ない。本研究の対象である蒸気発生器の伝熱管は下端がシャープエッジであり、加圧器サージ管の鉛直管は上端がシャープエッジである。そこで、

* 2017.2.22 受付

** 株式会社 原子力安全システム研究所 〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田 64 号

TEL: (0770)37-9100 FAX: (0770)37-2009 E-mail: murase@inss.co.jp

*** 株式会社 原子力安全システム研究所 (現: 北海道大学) †神戸大学大学院工学研究科

シャープエッジ下端での CCFL (CCFL-L) を対象として空気・水実験を行い、Wallis 相関式において代表長さ w として直径 D を用いると CCFL 特性をよく整理できることを明らかにした[3]。また、蒸気・水実験[4]と凝縮実験[5]を行い、CCFL-L の相関式を導出した[5]。シャープエッジ上端での CCFL (CCFL-U) については、空気・水実験を行い w としてラプラス長さ L を用いるべきであることを明らかにし[6]、従来データ[7]を含めて CCFL-U の相関式を導出した[8]。また、前報[9]では、上端・下端ともラウンドエッジでの従来データを用いて管内での CCFL (CCFL-P) について検討し、 $w \approx D^{0.5}L^{0.5}$ で整理できることを明らかにして CCFL-P の相関式を導出した。これらにより鉛直管の直径が CCFL に及ぼす影響が明らかになったが、高温高压の蒸気・水系での CCFL データが少なく流体物性値の影響は明らかにされていない。最近、Ilyukhin ら[10]による $D = 20$ mm、圧力 $P = 0.6 \sim 4.1$ MPa での CCFL 測定に関する文献を入手した。

本報では、著者らによる CCFL データ[3, 4, 6]と従来データ[1, 2, 7, 10, 11]を用いて流体物性値が鉛直管での CCFL に及ぼす影響について検討した。本研究では、PWR の一次系で CCFL が生じやすくなる 7 MPa 以下の蒸気・水系への適用を目標としており、特に蒸気発生器の伝熱管の下端での CCFL-L と加圧器サージ管の上端での CCFL-U を重視している。

2. 従来研究の概要

2.1 CCFL の一般式

原子力プラントの過渡・事故解析では、例えば一次元二流体モデルに基づいてフラクティング状態での落下水量を計算できるが、計算精度がよくないため、落下水量の計算には Wallis [1]による CCFL 相関式が広く使用されている。

$$H_G^{*1/2} + mH_L^{*1/2} = C \quad (1)$$

$$H_k^* = J_k \left\{ \frac{\rho_k}{gw(\rho_L - \rho_G)} \right\}^{1/2}, (k = G \text{ or } L) \quad (2)$$

ここで、 g [m/s²]は重力加速度、 J [m/s]は体積流束、 H^* [-]は無次元体積流束、 w [m]は代表長さ、 ρ [kg/m³]は密度であり、式(1)の勾配 m と定数 C は

実験により決定される。Bankoff ら[12]は、式(2)の代表長さ w を次式で表わしている。

$$w = D^{(1-\beta)}L^\beta, \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (3)$$

$$L = [\sigma / \{g(\rho_L - \rho_G)\}]^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 D [m]は直径、 L [m]はラプラス長さ、 σ [N/m]は表面張力である。式(2)の H_k^* は、 $\beta = 0$ で Wallis パラメータ J_k^* に、 $\beta = 1$ で Kutateladze パラメータ K_k^* になり、 J_k^* と K_k^* は無次元直径 D^* を用いて次式により相互に変換できる。

$$J_k^* = K_k^* / D^{*1/2}, \quad D^* = D/L, (k = G \text{ or } L) \quad (5)$$

2.2 制限位置ごとの CCFL 相関式

著者らは、蒸気発生器の伝熱管のシャープエッジ下端における CCFL を対象として、鉛直管での空気・水実験[3]と蒸気・水実験[4]および逆 U 字管での凝縮実験[5]を行い、CCFL-L の相関式を導出した[5]。

$$J_G^{*1/2} + 0.88J_L^{*1/2} = 0.76 \pm 0.05, \\ 5.6 < D^* < 19 \quad (6)$$

著者らは、加圧器サージ管の鉛直管のシャープエッジ上端における CCFL を対象として、 $D = 30, 45, 60$ mm の鉛直管を用いた空気・水実験[6]を行い、 $D = 19 \sim 140$ mm での空気・水実験データ[7]を含めて CCFL-U の相関式を導出した[8]。

$$K_G^{*1/2} + 0.90K_L^{*1/2} = 1.5 \pm 0.1, \\ 7 < D^* < 51 \quad (7)$$

著者らは、式(6)と式(7)を参照し、従来データを用いて CCFL-P の相関式を導出した[9]。

$$K_G^{*1/2} + 0.90K_L^{*1/2} = \min[(1.2 \pm 0.07)D^{*1/8}, 1.79], \\ 6.6 < D^* < 38 \quad (8)$$

式(6)の導出データには大気圧での蒸気・水実験[4]を含むが、式(7)と式(8)は空気・水データのみから導出されており、いずれも高温高压の蒸気・水系への適用性は明らかでない。

併記した D^* は相関式の導出に用いた実験条件

の範囲を示す。定数項の不確かさは実験ごとの相違の影響が大きい。シャープエッジでも条件により CCFL-P が生じる場合があり[6, 9]、式(8)とは勾配と定数が異なる[9]など、式(6)-(8)に包含されない CCFL データがある。

2.3 流体物性値の影響

鉛直管でのフラッシング開始に対する流体物性値の影響に関する研究は多いが、CCFL に対する流体物性値の影響に関する研究は少ない。

Wallis [11]は、上端と下端がラウンドエッジの鉛直管 ($D = 19$ mm) で空気とグリセリン水溶液を用いた実験を行い、Fig. 1 に示す CCFL データを取得している。また、一部のデータに対して液相の逆粘性数 N_L (浮力と粘性力の比) を用いた次式を示している。

$$J_G^{*1/2} + 5.6(J_L^*/N_L)^{1/2} = 0.725 \quad (9)$$

$$N_L = [\rho_L(\rho_L - \rho_G)gD^3]^{1/2} / \mu_L \quad (10)$$

液相粘性 μ_L [Pa·s]の最大値は常温水の 3000 倍であり、Fig. 1 より液相粘性が CCFL 特性の勾配と定数に大きな影響を及ぼすことは明らかである。定義式(10)より $N_L \propto D^{1.5}$ であり、異なる D に対して N_L を用いて整理するのは適切でない[4]。

Fig. 1 Effects of liquid viscosity on CCFL [11], A: air, EG: ethylene glycol, G: glycerol, W: water.

Ilyukhin ら[10, 13]は、上端と下端がシャープエ

ッジの鉛直管 ($D = 20$ mm) で高温高压の蒸気と水 ($P = 0.6 \sim 4.1$ MPa) を用いた実験を行い、Fig. 2 に示す CCFL データを取得し[10]、式(11)を示している[13]。

$$K_G^{*1/2} + 1.25K_L^{*1/2} = 1.5D^{*1/8}(\rho_G/\rho_L)^{0.05}, \quad H/D \geq 20 \quad (11)$$

H [m]は鉛直管の高さである。式(11)は式(8)と同様に式(3)で $\beta = 0.5$ であるが、直径が大きくなると $\beta = 0.5$ を適用できない[9]。Fig. 2 に示すように、高 $K_G^{*1/2}$ では CCFL-L、中 $K_G^{*1/2}$ では CCFL-U が生じている (著者らが鉛直管内差圧[10]から判別)。圧力により境界値が若干異なりグラフ[10]で判別困難な測定点は表示していないため、CCFL-L と CCFL-U の間に測定点表示がなくなっている。蒸気・水系に対しては気液密度比 ρ_G/ρ_L を用いて形式的にデータ整理できるが、測定例が多い空気・水系を含めると ρ_G/ρ_L ではデータ整理できない (ρ_G/ρ_L は Fig. 1 データにも適用できない)。

Fig. 2 Effects of pressure on CCFL [10], $U_k^* = K_k^{*1/2} / [D^{*1/8}(\rho_G/\rho_L)^{0.05}]$, L: CCFL-L, U: CCFL-U.

Zapke and Kröger [14]は、下端がシャープエッジの鉛直管 ($D = 30$ mm) で空気とメタノール水溶液を用いた実験を行い、液相オーネソルゲ数 Oh_L を用いた次式を提案している。

$$J_G^{*1/2} + J_L^{*1/2} = 0.52/Oh_L^{0.05} \quad (12)$$

$$Oh_L = \mu_L / (\sigma \rho_L D)^{1/2} \quad (13)$$

Oh_L は蒸気・水系では約2.5 MPaで極小値を持ち高温高压の蒸気・水系には適用できない[4]。

著者らは、下端がシャープエッジの鉛直管を用いて、 $D = 20$ mmでの空気・水実験[3]と空気・グリセリン水溶液実験[4]および $D = 14, 20, 27$ mmでの蒸気・水実験[4]を行ない、Fig. 3に示すCCFLデータを取得し、気液粘性比 μ_G/μ_L を用いた式(14)を導出した[4]。 $J_L^{*1/2}$ の二次式を用いると極小値を有することから三次式にしている。

$$\frac{J_G^{*1/2}}{(\mu_G/\mu_L)^{0.07}} = (1.04 \pm 0.05) - 3.6 \left[\left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.1} J_L^{*1/2} \right] + 11 \left[\left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.1} J_L^{*1/2} \right]^2 - 16 \left[\left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.1} J_L^{*1/2} \right]^3 \quad (14)$$

Fig. 3 Effects of fluid properties on CCFL-L [4].
A: air, G: glycerol, S: steam, W: water.

Fig. 1の実験では液相粘性を大きく変更しているが表面張力が変化し液相密度も若干変化しており、Fig. 2の実験では気相密度、液相粘性および表面張力の変化が大きい。したがって、特定の試験条件に対しては流体物性値に関する各種の無次元量を用いて測定値を整理できるが、著者らは液相粘性がCCFL特性に最も影響すると判断[4]している。液相粘性の無次元量に逆粘性数を用

いると直径に関して悪影響を及ぼすため、ここでは変化量が小さい気相粘性との比 μ_G/μ_L を用いて流体物性値の影響を評価する。

3. CCFL 特性の分類

ここでは、WallisによるCCFL相関式(1)における勾配 m と定数 C の特徴からCCFL特性を領域分けする。

3.1 気液粘性比の影響

直径の影響は制限位置によりCCFL-LとCCFL-UおよびCCFL-Pで異なるため、 $D = 18 \sim 20$ mmの範囲に限定して気液粘性比 μ_G/μ_L が式(1)の勾配 m と定数 C に及ぼす影響について検討した。 μ_G/μ_L と C および m との関係をFig. 4に示す。

Fig. 4 Effects of μ_G/μ_L on m and C ,
L: CCFL-L, U: CCFL-U, P: CCFL-P.

常温常圧の空気・水を境界にして μ_G/μ_L の影響が大きい領域と小さい領域に区分できる。空気・

グリセリン水溶液では、 μ_G/μ_L の C への影響が中程度の低濃度領域と m への影響が大きい高濃度領域に区分できる。つまり、水、低濃度グリセリン水溶液、高濃度グリセリン水溶液の3領域に区分できる。この結果より、特定領域での CCFL データを用いて異なる領域に外挿評価できないことが明らかである。

CCFL-P では蒸気・水データがなく水領域（常温水～高温水）で μ_G/μ_L の影響が一層大きくなるか否か不明である。また、CCFL-P の空気・水データでは Wallis [11] と Suzuki and Ueda [15] とで m の相違が大きく、実験ごとの相違が大きいことに留意する必要がある。

3.2 勾配と定数との関係

CCFL-L と CCFL-U に対する勾配と定数の関係を Fig. 5 に示す。Wallis パラメータでの整理を C_W で、Kutateladze パラメータでの整理を C_K で示す。CCFL-L に関しては、蒸気・水と空気・水とで m と C に明確な相関がある。CCFL-L は $D = 20$ mm

Fig. 5 Interrelation between m and C .

のみであるが、CCFL-U については $D = 19 \sim 140$ mm のデータを含んでおり、Ilyukhin ら[11]の蒸気・水条件を除いて空気・水条件である。Richter [7] と Doi ら[6]による空気・水データでは、Kutateladze パラメータで整理しているにもかかわらず m と C が一定値にならず、かつ m と C に明確な相関がある。この原因は明らかでないが、 m と C に対する補正項として D^* の影響を関数化するような明確な相関はない。Fig. 5 は、流体物性値で定数 C を補正する場合には、勾配 m も補正する必要があることを示している。

4. 高温高圧の蒸気・水系への外挿評価

4.1 シャープエッジ下端 CCFL

CCFL-L に対する μ_G/μ_L の m と C_W への影響を Fig. 6 に示す。空気・水条件を境界にして、最小二乗法を用いて m と C_W に対する μ_G/μ_L の指数関数を求めた。図中の $m1$ と $C1$ は水の領域、 $m2$ と $C2$ は低濃度グリセリン水溶液の領域である。

Fig. 6 Effects of μ_G/μ_L on m and C_W for CCFL-L.

Fig. 6 における m と C_W に対する μ_G/μ_L の指数を用いて整理した CCFL-L データおよび式(14)における m と C_W に対する μ_G/μ_L の指数を用いて整理した CCFL-L データを Fig. 7 に示す。式(14)における μ_G/μ_L の指数を用いると、Kusunoki ら[3, 4]の測定値（測定誤差は $J_G^{*1/2}$ 換算で ± 0.01 未満）と蒸気発生器伝熱管の実機条件での ROSA-IV/LSTF データ ($J_L^{*1/2}$ が小さい方から $P = 1, 3, 7$ MPa) [16] とは比較的良好に一致するが Ilyukhin ら [10] の測定値との一致が悪い。一方、Fig. 6 にお

ける μ_G/μ_L の指数を用いると、Kusunoki ら[3, 4]の測定値と Ilyukihin ら[10]の測定値とはよく一致するが ROSA-IV/LSTF データ [16]との一致が悪い。

Fig. 7 に示す測定値を用いて最小二乗法で CCFL 相関式を求めると、次式になる。

$$J_G^{*1/2} + 2.26(\mu_G/\mu_L)^{0.29} J_L^{*1/2} = (1.2 \pm 0.05) \cdot (\mu_G/\mu_L)^{0.14} \quad (15)$$

式(15)を用いて圧力 7 MPa での CCFL-L を計算した結果を Fig. 8 に示す。計算値では 0.1 MPa と 4.1 MPa との相違は大きいが、4.1 MPa と 7 MPa との相違は小さい。この結果は、低圧と中圧での

Fig. 7 CCFL-L adjusted by exponent function of μ_G/μ_L .

Fig. 8 Effects of pressure on CCFL-L.

測定値から高圧条件を外挿すれば比較的精度よく推定できることを示唆している。Fig. 7 から推察されるように、7 MPa での測定値[16]と計算値との相違は比較的大きい。

蒸気発生器の伝熱管での CCFL-L を評価する場合には ROSA-IV/LSTF データ [16]を重視して式(14)を使用することを推奨する (Wallis 型の線形式は文献[5]を参照)。一般的な鉛直管での CCFL-L を評価する場合には、より多くの測定値に基づく式(15)を使用することを推奨する。

4.2 シャープエッジ上端 CCFL

CCFL-U に対する μ_G/μ_L の m と C_K への影響を Fig. 9 に示す。 μ_G/μ_L が一定値である空気・水実験でも図中に最大値と最小値の範囲を示すように m と C_K が大きく変化している (Fig. 5 参照)。

Fig. 9 Effects of μ_G/μ_L on m and C_K for CCFL-U.

このため、Fig. 9 では空気・水条件に対する m と C_K の平均値を用いて μ_G/μ_L の指数関数を求めた。CCFL-U での指数は Fig. 6 に示した CCFL-L での指数より小さくなっている。

Fig. 9 における m と C_K に対する μ_G/μ_L の指数を用いて整理した CCFL-U データを Fig. 10 に示す。空気・水では m および C_K の実験ごとの相違が大きい (Fig. 5 参照)、Fig. 10 では実験ごとの測

定点の中 $K_G^{*1/2}$ で相互に交差するため大きなバラツキにはなっていない。

Fig. 10 に示す測定値を用いて最小二乗法で CCFL 相関式を求めると、次式になる。

$$\begin{aligned} K_G^{*1/2} + 2.13(\mu_G/\mu_L)^{0.21} K_L^{*1/2} \\ = (1.98 \pm 0.19) \cdot (\mu_G/\mu_L)^{0.07} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)では定数 C_K の不確かさ ± 0.19 (10%) が式(15)での不確かさ ± 0.05 (約 4%) より大きい。式(16)では $D = 19 \sim 140$ mm での広範囲のデータ群を対象にしていることによる。

式(16)を用いて圧力 7 MPa での CCFL-U を計算した結果を Fig. 11 に示す。計算値では 0.1 MPa 空気・水と 4.1 MPa 蒸気・水との相違は大きい、4.1 MPa と 7 MPa との相違は小さい。100℃の水の μ_L は常温水と高温水 ($P = 0.6 \sim 4.1$ MPa) との中間 (Fig. 6 参照) にあり、Fig. 9 において低圧の蒸気・水データを追加すれば式(16)の改良もしくは信頼性向上が期待される。

4.3 両端ラウンドエッジでの管内 CCFL

CCFL-P に対する μ_G/μ_L の m と $C_{0.5}$ (式(3)で $\beta \approx 0.5$) への影響を Fig. 12 に示す。CCFL-P では蒸気・水データがなく、Fig. 4 と Fig. 6 の空気・グリセリン水溶液の範囲であり、低濃度グリセリン水溶液 ($m2$ と $C2$) と高濃度グリセリン水溶液 ($m3$ と $C3$) の領域になる。そこで、ここでは低濃度グリセリン水溶液での測定値から高温高圧の蒸気・水系への外挿性について検討する。

低濃度グリセリン水溶液の領域で勾配 m に対する指数 -0.02 が負になっているが、Fig. 6 では指数 0.02 であり、使用したデータ群による評価誤差と判断して m に対する μ_G/μ_L の影響はないと近似して CCFL-P データを整理した。

Fig. 12 における $C_{0.5}$ に対する μ_G/μ_L の指数 0.07 を用いて整理した CCFL-P データを Fig. 13 に示す (m に対する μ_G/μ_L の指数は 0 と近似)。Fig. 1 の測定値から対象外の高濃度グリセリン水溶液を除いている。各測定値[11, 15, 17, 18, 19]の直径は 19 mm、18 mm、25.4 mm、32 mm、50.8 mm である。

Fig. 13 に示す測定値を用いて最小二乗法で CCFL 相関式を求めると、次式になる。

Fig. 10 CCFL-U adjusted by exponent function of μ_G/μ_L .

Fig. 11 Effects of pressure on CCFL-U.

$$J_G^{*1/2} + 0.90J_L^{*1/2} \\ = (1.58 \pm 0.15) \cdot (\mu_G/\mu_L)^{0.07} / D^{*1/8} \quad (17)$$

式(17)では定数 $C_{0.5}$ の不確かさ ± 0.15 (10%) が、式(16)と同様に、式(15)での不確かさ ± 0.05 (約4%) より大きい。

式(17)は低濃度グリセリン水溶液の領域に対する相関式であり、高温高压の蒸気・水系への外挿使用は困難と推察される。そこで、CCFL-P では

Fig. 12 Effects of μ_G/μ_L on m and $C_{0.5}$ for CCFL-P.

Fig. 13 CCFL-P adjusted by exponent function of μ_G/μ_L , A: air, EG: ethylene glycol, G: glycerol, W: water.

式(3)で $\beta \approx 0.5$ であることから、式(15)と式(16)における m と C に対する μ_G/μ_L の指数の平均値 0.25 と 0.10 を使用し、空気・水系で式(17)の m と C に一致する係数を求め、次の参考式を導出した。

$$J_G^{*1/2} + 2.45(\mu_G/\mu_L)^{0.25} J_L^{*1/2} \\ = 1.78(\mu_G/\mu_L)^{0.10} / D^{*1/8} \quad (17a)$$

上式は、式(17)との比較を目的として、 m と C に対する μ_G/μ_L の指数を仮定したことから式番を (17a)とした。

式(17)と式(17a)を用いて圧力 7 MPa の CCFL-P を計算した結果を Fig. 14 に示す。大気圧の空気・水に対しては式(17)と式(17a)による計算値は一致する。0.1 MPa の蒸気・水に対する計算値の相違は小さいが、7 MPa の蒸気・水に対する計算値の相違は大きい。したがって、CCFL-P 評価の信頼性を向上するには、蒸気・水実験を行い流体物性値の影響について確認する必要がある。

Fig. 14 Effects of pressure on CCFL-P (A-W: air-water, Others: steam-water).

5. 考 察

本報での検討結果をまとめて Table 1 に示す。鉛直管での CCFL は、発生位置により 3 種類に分類され、液相粘性により特性が 3 領域に区別される。領域の境界値は隣接する領域で m もしくは C

Table 1 Effects of liquid viscosity on m and C .

Liquid	Water	Low concentration glycerol	High concentration glycerol
CCFL-L ($\beta = 0$) $5.6 < D^* < 19$	$m = 2.26(\mu_G/\mu_L)^{0.29}$ $C_W = (1.2 \pm 0.05)(\mu_G/\mu_L)^{0.14}$	$m = 0.74(\mu_G/\mu_L)^{0.02}$ $C_W = 0.78(\mu_G/\mu_L)^{0.03}$	N/A
CCFL-U ($\beta = 1$) $7 < D^* < 51$	$m = 2.13(\mu_G/\mu_L)^{0.21}$ $C_K = (1.98 \pm 0.19)(\mu_G/\mu_L)^{0.07}$	N/A	N/A
CCFL-P ($\beta \approx 0.5$) $6.6 < D^* < 38$	N/A	$m = 0.90$ $C_{0.5} = (1.58 \pm 0.15)(\mu_G/\mu_L)^{0.07}$	$m = 0.11(\mu_G/\mu_L)^{-0.27}$ $C_{0.5} = 0.87$

が等しくなる μ_G/μ_L である。 β は式(3)の代表長さに関する指標であり、無次元直径 D^* は本報で扱った実験条件の範囲であり式(6)-(8)と同じである。定数に不確かさを記述しているものは式(15)-(17)と同じであり、不確かさを記述していないものは Fig. 6 および Fig. 12 と同じである (但し、 $C_{0.5} = 0.87$ は一定値にしており Fig. 12 と異なる)。

実験の多くが空気・水系であり、高温高压の蒸気・水データは $D = 20$ mm ($D^* = 7.3 \sim 12.5$) に限られている。例えば加圧器サージ管の鉛直管上端 CCFL-U では約 $D^* = 100 \sim 150$ になる。したがって、原子炉の事故を想定した安全解析では、直径と圧力に対して外挿計算することになる。予想される不確かさに対して感度解析を行ない、不確かさの影響が大きい場合には実験により不確かさを小さくして信頼性を向上することが望まれる。

CCFL 実験では、流路形状だけでなく流体の供給方法や落水量の測定方法によっても測定値が大きく異なる場合がある。CCFL 実験データを取得する際には、Table 1 の 3 分類 (CCFL-L、CCFL-U、CCFL-P) と 3 領域 (液相粘性が小、中、大) を参照して取得データの妥当性を確認する、もしくは従来データとの相違の原因を明確にすることが望まれる。

6. 結 言

本報では、鉛直管における CCFL を対象として、従来データを用いて流体物性値が CCFL 特性に及ぼす影響について検討し、気液粘性比 μ_G/μ_L を影響因子に選定し、Wallis 相関式の補正項として勾配 m と定数 C を μ_G/μ_L の指数関数で表わし、以下の結論を得た。

- (1) μ_G/μ_L による m と C への影響度は 3 領域 (高温水～常温水、常温水～低濃度グリセリン水溶液、高濃度グリセリン水溶液) に区分される。影響度が異なる領域への CCFL 相関式の外挿使用はできない。
- (2) m と C には強い相関があり、流体物性値の補正を行う場合には m と C の両方を補正する必要がある。
- (3) 低 μ_L (高温水～常温水) では m と C は μ_G/μ_L と強い正の相関があり、中 μ_L (常温水～低濃度グリセリン水溶液) では m と C は μ_G/μ_L との相関が弱く、高 μ_L (高濃度グリセリン水溶液) では m は μ_G/μ_L と強い負の相関がある。
- (4) シャープエッジ下端での CCFL-L とシャープエッジ上端での CCFL-U については μ_G/μ_L で補正した Wallis 相関式を用いて 7 MPa までの蒸気・水系に外挿評価できるが、両端がラウンドエッジの管内での CCFL-P については蒸気・水データが見当たらず Wallis 相関式を高温高压の蒸気・水系に外挿評価することが困難である。

鉛直管での気液対向流に関する研究は多いが、CCFL データは限られており、特に大口径データや高温高压の蒸気・水データは極めて少ない。本報で示したデータ不足領域を参照して CCFL データを蓄積し、CCFL 相関式の信頼性を向上することが期待される。

Nomenclature

C	: CCFL constant	[-]
D	: diameter	[m]

D^*	: dimensionless diameter	[-]
g	: gravitational acceleration	[m/s ²]
H^*	: dimensionless velocity	[-]
J	: volumetric flux	[m/s]
J^*	: Wallis parameter	[-]
K^*	: Kutateladze parameter	[-]
L	: Laplace capillary length	[m]
m	: slope in CCFL correlation	[-]
P	: pressure	[Pa]
w	: characteristic length	[m]

Greek letters

β	: exponent in Eq. (3)	[-]
ρ	: density	[kg/m ³]
μ	: viscosity	[Pa·s]
σ	: surface tension	[N/m]

Subscripts

G	: gas phase
L	: liquid phase

参考文献

- [1] Wallis, G. B., One-Dimensional Two-Phase Flow, McGraw Hill, New York, 336-345 (1969).
- [2] Bankoff, S. G. and Lee, S. C., A Critical Review of the Flooding Literature, NUREG/CR-3060, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C. (1983).
- [3] Kusunoki, T., Doi, T., Fujii, Y., Tsuji, T., Murase, M. and Tomiyama, A., Air-Water Tests on Counter-Current Flow Limitation at Lower End of Vertical Pipes Simulating Lower Part of Steam Generator U-tube, Japanese J. Multiphase Flow (in Japanese), Vol. 28(1), 62-70 (2014).
- [4] Kusunoki, T., Murase, M., Fujii, Y., Nozue, T., Hayashi, K., Hosokawa, S. and Tomiyama, A., Effects of Fluid Properties on CCFL Characteristics at a Vertical Pipe Lower End, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 52(6), 887-896 (2015).
- [5] Kusunoki, T., Nozue, T., Hayashi, K., Hosokawa, S., Tomiyama, A. and Murase, M., Condensation Experiments for Counter-Current Flow Limitation in an Inverted U-Tube, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 53(4), 486-495 (2016).
- [6] Doi, T., Futatsugi, T., Murase, M., Hayashi, K., Hosokawa, S. and Tomiyama, A., Countercurrent Flow Limitation at the Junction between the Surge Line and the Pressurizer of a PWR, Sci. Technol. Nucl. Installations, Vol. 2012, Article ID 754724 (2012).
- [7] Richter, H. J., Flooding in Tubes and Annuli, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 7(6), 647-658 (1981).
- [8] Murase, M., Kusunoki, T., Yamamoto, Y., Mori, K. and Tomiyama, A., Countercurrent Flow Limitation in Vertical Pipes with the Sharp-Edged Upper End, 11th Int. Topical Mtg. on Nucl. Reactor Thermal hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-11), N11P0014, Gyeongju, Korea, October 9-13 (2016).
- [9] Yamamoto, Y., Murase, M., Hayashi, K., Hosokawa, S. and Tomiyama, A., Counter-Current Flow Limitation inside Vertical Pipes, Japanese J. Multiphase Flow (in Japanese), Vol. 30(4), 392-401 (2016).
- [10] Ilyukhin, Yu. N., Balunov, B. F., Smirnov, E. L. and Gotovskii, M. A., Hydrodynamic Characteristics of Two-Phase Annular Flow in Vertical Channels (translated by authors), Teplofiz. Vys. Temp. (in Russian), Vol. 26(5), 923-931 (1988).
- [11] Wallis, G. B., Rept. 62GL123, General Electric Co., Schenectady, N.Y. (1962) from Ref. [1].
- [12] Bankoff, S. G., Tankin, R. S., Yuen, M. C. and Hsieh, C. L., Countercurrent Flow of Air/Water and Steam/Water through a Horizontal Perforated Plate, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 24(8), 1381-1395 (1981).
- [13] Ilyukhin, Yu. N., Svetlov, S. V., Alekseev, S. B., Kukhevich, V. O. and Sidorov, V. G., The Hydraulic Characteristics of the Process of "Flooding" under Conditions of Countercurrent Flow of Steam and Water in Vertical Tubes, High Temperature, Vol. 37(3), 463-469 (1999).
- [14] Zapke, A. and Kröger, D. G., The Influence of Fluid Properties and Inlet Geometry on Flooding in Vertical and Inclined Tubes, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, 461-472 (1996).
- [15] Suzuki, S. and Ueda, T., Behaviour of Liquid Films and Flooding in Counter-Current Two-Phase Flow: 1st Report, Flow in Circular Tubes, Transactions of the JSME [2] (in Japanese), Vol. 44(377), 164-173 (1978).
- [16] Yonomoto, T., Anoda, Y., Kukita, Y. and Peng, Y., CCFL Characteristics of PWR Steam Generator U-tubes, Proc. the Int. Topical Mtg. on Safety of Thermal Reactor, 522-529 (1991).
- [17] Nichlin, D. J. and Davidson, J. F., The Onset of Instability in Two-Phase Slug Flow, Proc. Symp. Two-Phase Fluid, No.4, Inst. Mechanical Engineers, London (1962).
- [18] Clift, R., Pritchard, C. L. and Nedderman, R. M., The Effect of Viscosity on the Flooding Conditions Wetted Wall Columns, Chem. Eng. Sci., Vol. 21, 87-95 (1966).
- [19] Dukler, A. E. and Smith, L., Two-Phase Interactions in Counter Current Flow: Studies of the Flooding Mechanism, NUREG/CR-0619, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC (1979).