

Prediction of Two-Phase Flow Redistribution Process Due to Diversion Cross-Flow between Subchannels

○正 佐田富 道雄 (熊本大) 正 川原 顕磨呂 (熊本大)
正 加野 敬子 (熊本大) 准 待鳥 真一 (東京エレクトロン九州)

Michio SADATOMI, Akimaro KAWAHARA, Keiko KANO, Kumamoto University, Kumamoto
Shinichi MACHIDORI, Tokyo Electron Kyusyu Ltd., Kumamoto

Key Words: Subchannel Analysis, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Diversion Cross-Flow, Flow Redistribution

1 緒言

この研究の最終目標は沸騰水型原子炉燃料集合体内冷却材の伝熱流動予測に使われる気液二相流用サブチャンネル解析の予測精度の向上である。その解析ではサブチャンネルごとの質量、運動量、エネルギーの保存式が、サブチャンネル間の流体移動(クロスフローと呼ばれ、乱流混合、ポイドドリフト、差圧移動の三機構からなる)による効果を考慮して、全サブチャンネルについて連立して解かれる⁽¹⁾。したがって、サブチャンネル間の流体移動の正確な把握が必要であり、その予測法の改善を含む様々な研究が今なお続けられている(例えば、文献2)。

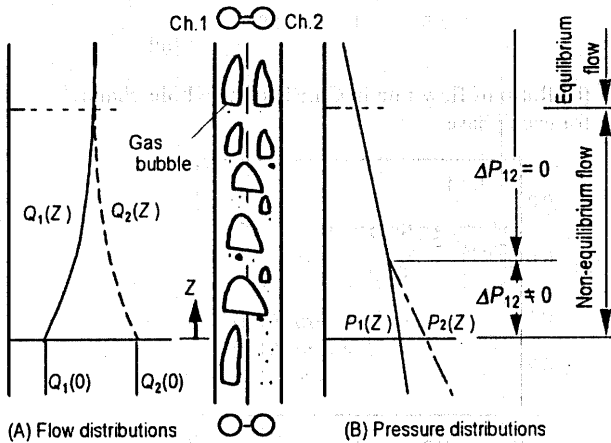


Fig.1 Schematic diagram of axial flow and pressure redistribution in a non-equilibrium two-phase subchannel flow⁽²⁾

Fig.1は二つの同一サブチャンネルからなる垂直流路における非加熱の水力学的非平衡流れの再配分過程を、各サブチャンネルの流量と圧力の管軸方向分布として示す⁽²⁾。流路の入口で各サブチャンネルに非一様に気液を導入すると、流れは一般的には管軸方向に(a)サブチャンネル間に圧力差のある非平衡流、(b)圧力差のない非平衡流、(c)平衡流の順に推移していく。このうち、(a)の流れでは、通常、サブチャンネル間で乱流混合、ポイドドリフト、差圧移動という三つの独立したクロスフローが生じており、それぞれの定式化が流れの再配分過程の予測において必須である。このような観点から、著者らは各クロスフローのモデル化とそのモデルを構成式として組み込んだ二流体モデルに基づくサブチャンネル解析コードの作成と検証を行ってきた(例えば、文献3)。さらに、最近、クロスフロー三成分のうち差圧移動が支配的な体系の実験を行い、差圧移動時の壁面液相間のクロスフロー抵抗係数と気液界面摩擦係数の実験式を導いた⁽⁴⁾。

本研究では上記のクロスフロー抵抗係数と界面摩擦係数の実験式を著者らのサブチャンネル解析コードに組み込み、差圧移動の効果が支配的な非平衡流れにおける流れの再配分過程の予測を試みた。そして著者らの既報の実験値⁽²⁾を用いてそのコードの妥当性を検証したので報告する。

2 流れの再配分過程の解析

二成分系非加熱定常二相流を対象とする著者らのポイドドリフトによる流れの再配分過程予測用解析コード⁽³⁾を差圧移動による再配分過程の予測が可能であるように書き換えた。

2.1 基礎式 基礎式は、サブチャンネル*i*と*j*(以下、Ch.*i*とCh.*j*と略記)に関する気、液(添字*k*は気相*G*、液相*L*)それぞれの連続の式(1)、(2)と管軸方向および横方向の運動量式である。

$$\frac{\partial G_{ki}}{\partial Z} + \sum \frac{(G_{kj})_{DC} S_{ij}}{A_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial G_{kj}}{\partial Z} - \sum \frac{(G_{ki})_{DC} S_{ij}}{A_j} = 0, \quad (2)$$

ここで、 G_{ki} と A_i はそれぞれCh.*i*における*k*相の質量流束と断面積であり、 $(G_{ki})_{DC}$ は差圧移動によるCh.*i*からCh.*j*への質量流束、 S_{ij} はサブチャンネル間の間隙寸法である。

次に、管軸方向運動量式は式(3)、(4)である。

$$\frac{dp_{ki}}{dZ} = -\frac{1}{\alpha_{ki}} \left[F_{wki} + F_{gki} + F_{iki} + M_{cross} + \frac{d}{dz} (G_{ki} u_{ki}^*) \right], \quad (3)$$

$$\frac{dp_{kj}}{dZ} = -\frac{1}{\alpha_{kj}} \left[F_{wkj} + F_{gkj} + F_{ikj} - M_{cross} + \frac{d}{dz} (G_{kj} u_{kj}^*) \right]. \quad (4)$$

ここで、 dp_{ki}/dZ 、 α_{ki} 、 u_{ki}^* は、Ch.*i*内*k*相の圧力勾配、体積率、管軸方向速度である。 F_{wki} 、 F_{gki} 、 F_{iki} は単位体積当りの壁面摩擦力、重力、界面摩擦力であり、そのうち F_{gki} は次式で計算した。

$$F_{gki} = \alpha_{ki} \rho_k g. \quad (5)$$

他方、 F_{wki} と F_{iki} は2.2節に示す式で計算した。さらに、式(3)の M_{cross} はクロスフローによる運動量変化であり、次式で計算した。

$$M_{cross} = \frac{S_{ij}}{A_j} \left\{ G'_{ki} (u_{ki}^* - u_{kj}^*) + (G_{kj})_{DC} u_k^* \right\}. \quad (6)$$

ここで、乱流混合による質量流束 G_{kij} は平衡流に達した点での実験値を代入し、差圧移動による質量流束 $(G_{ki})_{DC} (= \rho_k (v_{ki})_{DC})$ は本コードにより自動的に計算された。なお、代表速度 u_k^* は、 $(G_{kij})_{DC} > 0$ ならば $u_k^* = u_{ki}$ 、そうでなければ $u_k^* = u_{kj}$ とした。

気相、液相の横方向運動量式は、Fig.2の検査体積に対して次式となる。

$$\alpha_o \frac{P_i - P_j}{\Delta l} - F_{ij} = 0 \quad (7)$$

$$\alpha_l \frac{P_i - P_j}{\Delta l} + F_{ij} - F_{wli} = 0 \quad (8)$$

ここで、 α_G^* はサブチャンネル間の間隙部のポイド率で、 F_{lij} と F_{wLij} は単位体積当たりのクロスフローに関する気液界面摩擦力と液相壁面間の摩擦力である。これらの計算式は次節で述べる。

そのほか、体積率と気液界面摩擦力について、

$$\alpha_G + \alpha_L = 1, \quad \alpha_{Gj} + \alpha_{Lj} = 1, \quad \alpha_G^* + \alpha_L^* = 1, \quad (9)$$

$$F_{iGj} = -F_{wLj}, \quad F_{iLj} = -F_{wGj}, \quad (10)$$

が成立し、垂直流であるので次の一圧力モデルが成立する。

$$\frac{dp_{Gj}}{dZ} = \frac{dp_{Lj}}{dZ}, \quad \frac{dp_{Gj}}{dZ} = \frac{dp_{Lj}}{dZ} \quad (11)$$

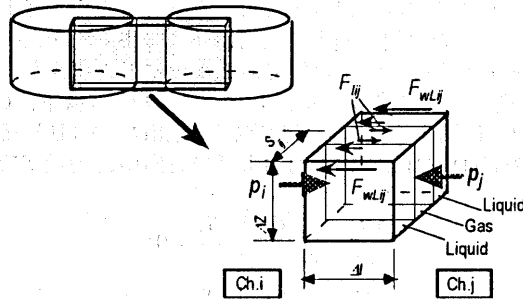


Fig. 2 Control volume for cross-flow momentum equation

2.2 構成式 管軸方向運動量式における液相壁面間の摩擦力 F_{wLj} は分離流モデルで計算し、気相のそれは、検証に使用した実験値の流動様式に噴霧流が含まれなかったため、ゼロとした。気液界面摩擦力 F_{iLj} はTRAC-PF1/MOD1⁽⁵⁾の諸式に加えて、環状流ではWallisの式⁽⁶⁾でも計算した。

クロスフローによる液相壁面間の摩擦力 F_{wLij} と気液界面摩擦力 F_{ij} は次式で求めた。

$$F_{wLj} = \zeta_L \frac{\rho_L (v_{Lj})_{DC}^2}{S_{ij}} \quad (12)$$

$$F_{ij} = \frac{1}{2} a_i f_i \rho_G \left\{ (v_{Gij})_{DC} - (v_{Lij})_{DC} \right\} \left\{ (v_{Gij})_{DC} - (v_{Lij})_{DC} \right\} \quad (13)$$

上式において、 $(v_{Gij})_{DC}$ と $(v_{Lij})_{DC}$ および ρ_G と ρ_L は、気相と液相のサブチャンネル間の間隙部における横方向速度および密度である。界面積濃度 a_i は簡単のため $2/S_{ij}$ とし、クロスフロー抵抗係数 ζ_L と界面摩擦係数 f_i は次式⁽⁴⁾で求めた。

$$\zeta_L = 0.039 (v_{Lj})_{DC} / u_L (1 - \alpha)^{-0.411} + 0.006 \quad (14)$$

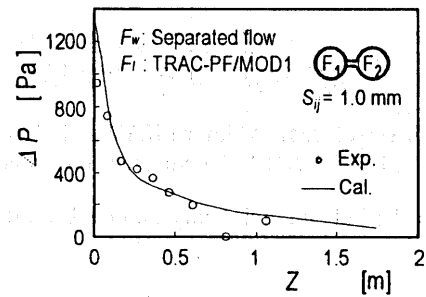
$$f_i = 4.76 \times 10^3 (\text{Re})_{DC}^{-1.39}, \quad (\text{Re})_{DC} = \frac{2S_{ij} \rho_G \left\{ (v_{Gij})_{DC} - (v_{Lij})_{DC} \right\}}{\mu_G} \quad (15)$$

ここで、 u_L は管軸方向の液相速度(両サブチャンネルの平均値)、 α は両サブチャンネルの平均ポイド率、 μ_G は気相の密度である。

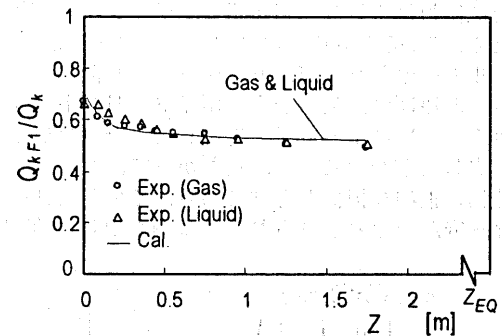
3 解析法の実験値による検証

本報で提案した解析法の検証を、差圧移動の効果が支配的な体系で得られた非平衡流れにおける流れの再配分過程の実験値(液単相流4条件、気液二相流8条件)⁽²⁾を用いて行なった。結果の一例をFig.3示す。この実験値は内径16 mmの二つのサブチャンネルを持つ流路(間隙寸法は $S_{ij} = 1 \text{ mm}$)において、流路全体での液相と気相の容積流速が $j_L = 1.0 \text{ m/s}$ と $j_G = 8.0 \text{ m/s}$ のチャーン流について、流路入口におけるCh.F1への流量配分比を液相 $Q_{LF1}(0)/Q_L = 0.7$ 、気相 $Q_{GF1}(0)/Q_G = 0.7$ として得られている。サブチャンネル間の圧力差 $\Delta p (= p_1 - p_2)$ 、Ch.F1への各相の流量配分比 Q_{kF1}/Q_k 、各サブチャンネルのポイド率 α_j の管軸方向への変化過程について、計算値は実験値と良く合っている。その他

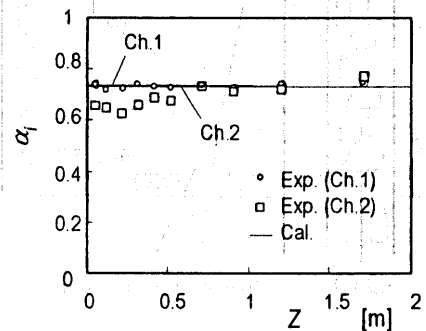
の条件における比較も総合して、ポイドドリフトの効果が無視できない $Z < 0.5 \text{ m}$ の領域を除き、本解析コードは精度の良い予測値を与えることが分かった。なお、環状流の界面摩擦力の計算にはWallisの式のほうがより適することが分かった。



(a) Pressure difference between subchannels



(b) Ratio of flow rate in Ch.F1 to the whole channel for each phase



(c) Void fraction in each subchannel

Fig.3 Examination against two-phase flow data at $j_L = 1.0 \text{ m/s}$, $j_G = 8.0 \text{ m/s}$, $Q_{LF1}(0)/Q_L = 0.7$, $Q_{GF1}(0)/Q_G = 0.7$ (Churn flow)

4 結言

差圧移動の効果が支配的な非平衡流れにおける流れの再配分過程を予測するサブチャンネル解析コードを提案し、その妥当性を検証した。ポイドドリフトの影響を考慮するようにコードを改良することが次の課題の一つである。

最後に、平野浩史君と林竜一君による本研究への協力、およびエネルギー総合工学研究所による研究支援に感謝する。

文献 (1) Ninokata, H. et al., *Proc. 4th International Seminar on Subchannel Analysis*, Tokyo, Japan, (1997), pp.231-265. (2) Sadatomi, M. et al, *ibidem*, pp.87-104. (3) Kawahara, A. et al., *Proc. Second Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety NTHAS2*, Fukuoka, Japan, (2000), pp.719-725. (4) Kano, K. et al., *Proc. Compact Heat Exchangers, A Festschrift on the 60th Birthday of Ramesh K. Shah*, Grenoble, France, (2002), pp.419-424. (5) Lies, D.R. et al., *TRAC-PF1/MOD1 Correlations and Models*, NUREG/GR-5069, (1988), LA-11208-MS. (6) Wallis, G.B., *One-Dimensional Two-Phase Flow*, (1969), McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.