SCEJ 75th Annual Meeting (Kagoshima, 2010)

Virtual Force Term を考慮した気液混相流動シミュレータの提案

F209

（阪大院基礎工）○（正）上山惟一

緒言　気液混相流動において気泡のランダム運動に基づく拡散効果が注目されるようになり、Euler-Euler 型２相流モデル方程式に分散力が導入された(Lahey 1993、Bertodano 1994)。しかしながら、拡散現象は物質移動の一様態ではあるが、そのために新たな力が生じるわけではなく、シミュレータに局所ホールドアップの勾配に比例する項を導入する根拠としては認め難い。ここでは、最近得られた２流体モデルの相互作用力項に関する知見に基づいて、局所ホールドアップの勾配に比例する項が virtual force terms として自然に導入されることを示すと共に、気泡のランダム運動の効果を取り入れた新しい気液混相流動シミュレータを提案する。

1. ２流体モデル方程式の相互作用力項　半径 R の球形気泡からなる混相流動場において、空間中に気泡より十分小さい参照体積を想定し、その中に現れる気泡表面に働く力を時間平均し、得られた数式表現から参照体積ゼロの極限値を求めることによって、単位体積当りの界面作用力（相互作用力）項が次式のように求められた(Ueyama 2009)。

$$\overline{\mathbf{F}_{\mathrm{R,S}}}^{\Lambda}(\mathbf{X}_0) = -\frac{1}{\Lambda}\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} d\theta \left[\sin\theta\,\mathbf{n}(\mathbf{X}_0{:}\theta,\phi)\cdot\overline{\mathbf{T}_c}^{\lambda_R(\mathbf{X}_0 - R\,\mathbf{n}(\mathbf{X}_0:\theta,\phi))}(\mathbf{X}_0 - R\,\mathbf{n}(\mathbf{X}_0{:}\theta,\phi){:}R,\theta,\phi)\,\lambda_R(\mathbf{X}_0 - R\,\mathbf{n}(\mathbf{X}_0{:}\theta,\phi))R^2\right] \quad (1)$$

ここで、$(\mathbf{X}:R,\theta,\phi)$ は点 $\mathbf{X}$ に原点がある球座標系における空間位置、$\overline{\mathbf{T}_c}$ は次式で与えられるような気泡表面に働く静圧と剪断応力で構成されるテンソルである。

$$\overline{\mathbf{T}_c}^{\lambda_R(\mathbf{X})}(\mathbf{X}:R,\theta,\phi) = \overline{P_c}^{\lambda_R(\mathbf{X})}(\mathbf{X}:R,\theta,\phi)\mathbf{I} + \overline{\boldsymbol{\tau}_c}^{\lambda_R(\mathbf{X})}(\mathbf{X}:R,\theta,\phi) \quad (2)$$

ただし、λ_R は単位体積あたりに半径 R の球形気泡の中心が存在する時間長さであり、$\overline{}^{\lambda_R}$ は時間長さ λ_R 当りの時間平均値を意味する。Λ は時間平均した全時間長さである。(1) 式右辺は点 $\mathbf{X}_0$ に中心がある半径 R の球面上の積分であるが被積分関数の値は球面上ではなく点 $(\mathbf{X}_0 - R\,\mathbf{n}(\mathbf{X}_0{:}\theta,\phi){:}R,\theta,\phi)$ すなわち中心点 $\mathbf{X}_0$ において与えられている。これが２流体モデル方程式の相互作用力項の本質であり、点 $\mathbf{X}_0$ に中心がある気泡表面に働く力とは異なる。

2. 時間平均に基づく２流体モデル方程式　(1) 式右辺は、半径 R の球面上で定義された物理量で書き直して単一分散滴表面に働く力をくくり出すことが出来、その際に数式変形により生じる項、virtual force terms、が導入される。混相流動に対して時間平均された Navier-Stokes 式(Ueyama & Miyauchi 1976)に(1) 式の結果を代入すると、virtual force terms を含む２流体モデル方程式が得られるが、紙面の都合上割愛する。

3. 混相流動シミュレータ　通常、単一分散的に働く力は分散滴の移動速度と周囲流体の速度場との関係式として与えられるので、一般的に次式のように表現できる。

$$\overline{\mathbf{f}_{R,S}} = \mathbf{H}\left(\overline{\mathbf{u}_p}^{\Lambda}, \overline{\mathbf{u}_c}^{c}\right) \quad (3)$$

ただし、$\overline{\mathbf{f}_{R,S}}$ は単一気泡に働く力であり、既往の抗力、揚力等の知見が適用できる。$\overline{\mathbf{u}_p}^{\Lambda}$ および $\overline{\mathbf{u}_c}^{c}$ は、その場所における分散滴の平均移動速度および連続相の平均速度である。混相流動の場での気泡の運動は絶えず揺らいでおり、気泡の存在割合に空間分布があれば必ず気泡相の拡散現象が付随する。

$$\varepsilon\left(\overline{\mathbf{u}_d}^{d} - \overline{\mathbf{u}_p}^{\Lambda}\right) = -D_\varepsilon(\nabla\varepsilon)\,\overline{\mathbf{u}_p}^{\Lambda} \quad (4)$$

ここで、$\overline{\mathbf{u}_d}^{d}$ はその場所における連続相の時間平均速度、D_ε は気泡相の拡散係数である。(4) 式と混相に対して時間平均された連続の式から次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t}\varepsilon + \nabla\cdot\left(\varepsilon\,\overline{\mathbf{u}_p}^{\Lambda}\right) = \nabla\cdot\{D_\varepsilon(\nabla\varepsilon)\} \quad (5)$$

2 節で求めた２流体モデル方程式と (3) 式および(5) 式から Euler-Euler 型シミュレータが構成される。

Euler-Lagrange 型シミュレータは、(5) 式の替わりに、分散滴の平均移動速度に適当な変動速度成分を上乗せして次の時間ステップにおける各気泡位置を決めることで構築出来る。

結言　最近の成果に基づいて従来の２流体モデル方程式における相互作用力項の取り扱いの不備と、virtual force terms 導入の必然性を概説した。気泡のランダム運動の効果を取り入れた混相流動シミュレータを提案した。

引用文献

Bertodano, M. L., R. T. Lahey and O. C. Jones, *Int. J. Multiphase Flow*, **20**, 805-818 (1994)

Lahey, R. T., M. L. Bortodano and O. C. Jones, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.141, , pp177-201(1993)

Ueyama, K., submitted to *Int. J. Multiphase Flow*

Ueyama, K.and T. Miyauchi, *Kagakukogaku Ronbunsyu*, **2**, 595-601(1976)

*e-mail: ueyama@cc.kogakuin.ac.jp