

高濃度固気混相流の数値解析

Numerical Analysis of Dense Gas-Solid Flows

川口 寿裕*

*大阪大学工学研究科

Toshihiro Kawaguchi

*Osaka University

E-mail:kawa@mech. eng. osaka-u. ac. jp

1 はじめに

固気二相流では気流速度などの操作条件により様々な流動様式が現れることが知られているが、どの流動様式においても固体粒子が気流中に一様に分散して流れるようなことはほとんどなく、むしろ不均一なむらを形成しながら流れるのが一般的である。そのような不均一なむらは、管内高濃度空気輸送におけるプラグや流動層における気泡、クラスターなどの特徴的な構造となって現れる。これらの特徴的な構造は、粒子サイズなどのミクロスケールに比べれば大きく、容器サイズなどのマクロスケールに比べれば小さな中間的なスケールを持つことから、メゾスケール構造と呼ばれている¹⁾。

固気二相流の数値解析は、このメゾスケール構造を捉えることを主眼として行われることが多い。その場合、粒子間隙の流れのようなミクロスケールな運動を解く代わりに、空間的にもう少し広がりのある領域で平均化された速度や圧力を求めることで流体運動を解くことになる。ここでは、特に流動層に代表されるような高濃度な固気二相流に対して、メゾスケール構造の流動を捉えるための代表的な数値解析手法を紹介する。

2 局所相平均

固気二相流における“流体”は、固体粒子と固体粒子の隙間を流れる気体である。そのような気体の流れを計算しようとするとき、固体粒子表面をすべて境界条件とした、非常に複雑な流れを解かなければならない。しかし、粒子群が作るメゾスケール構造に着目した場合、そのようなマイクロな流れの代わりに、もう少し大きなスケールでの流れ場を捉えておけば十分であることが多い。

そこで、特に高濃度な固気二相流に対しては、空間的に平均化された基礎式が用いられる。以下に Anderson と Jackson²⁾により導かれた、局所相平均量に対する流体の連続の式および運動方程式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{\epsilon}{\rho_f}(\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \nabla p) + \mathbf{F}_p \quad (2)$$

ここで、 ϵ は空隙率、 \mathbf{u} は流体速度、 ρ_f は流体密度、 $\boldsymbol{\tau}$ はせん断応力テンソル、 p は圧力である。せん断応力 $\boldsymbol{\tau}$ の項については、高濃度な固気二相流に対して確立された表現は存在しない。固体粒子が高濃度に存在する場合には、その影響は小さいとしてこの項は無視されることが多いが、分子粘性のみを考慮した定式化が行われる場合もある。 \mathbf{F}_p は固気間の相互作用を表す項で、実験的に得られる適当な相関式が適用されている。

3 高濃度固気二相流の数値解析手法

高濃度固気二相流、特に流動層の数値解析は、二流体モデルによるものから始まった。これは、固体粒子相も連続体とみなし、固相に対しても式(1),(2)と同様の局所相平均量に対する質量・運動量保存式を立てて解くものである。固相の運動量保存式に現れる圧力やせん断応力に対する普遍的な構成式が存在しないため、当初はそれらに対して適当な経験的な表現が用いられていた³⁾⁻⁵⁾。この構成関係に関して、Jenkins と Savage⁶⁾などによる粒子流に対する kinetic theory を用いた定式化が試みられるようになり⁷⁾⁻⁹⁾、現在ではこの手法が主流になっている。二流体モデルによる数値解析結果は構成式の与え方に強く依存し、初期の計算結果では Fig.1(a)に示すような上部が尖った非現実的な気泡の発生が見られていた。最近では構成式が改良され、現実的な形状の気泡の発生を予測できるようになっている。しかし、固相の構成関係は粒径分布や粒子形状など多くのパラメータに左右され、さらには水分や静電気などの付加的な要因にも影響を受ける。したがって、固相の構成式に対して普遍的な表現を与えることは非常に難しく、この点が二流体モデルに常につきまとう問題である。

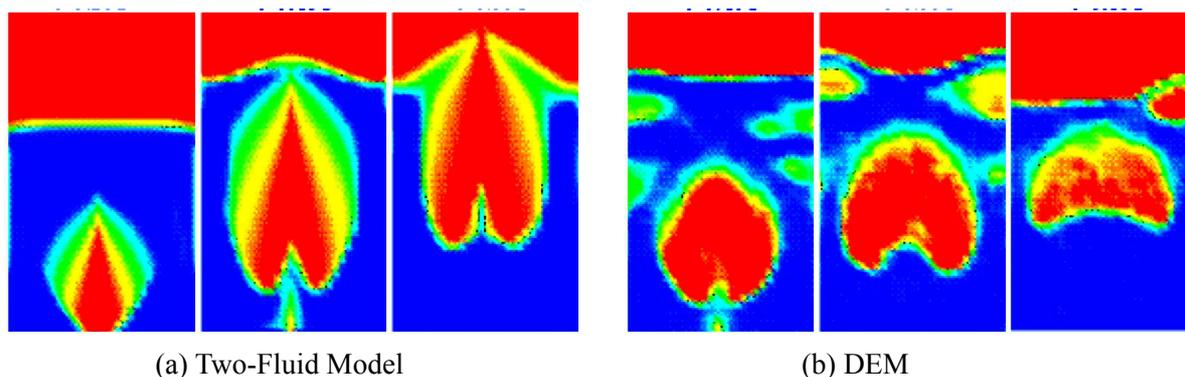


Fig.1 Bubble formation¹⁰⁾

一方、土木工学の分野で発展してきた離散要素法 (DEM)¹¹⁾が粉体流¹²⁾⁻¹⁴⁾や水平管内プラグ流¹⁵⁾にも適用されるようになり、その現象予測能力の高さが認識されたことで、川口ら¹⁶⁾は DEM を流動層内流動解析に適用することを試みた。流体運動は二流体モデルにおける局所相平均化された基礎式を解き、固相に関しては個々の粒子運動を DEM で求めた。この手法により、気流速度に伴う流動パターンの変化や、気泡発生周期などに関して、実験と定量的に一致する結果が容易に得られることが示され、多くの研究者がこの手法に興味を持つよう

なった¹⁷⁾⁻¹⁹⁾. この手法では固相に対する構成式は不要で, 特別なパラメータ調整なしに自然な形状の気泡を形成できる (Fig.1(b)). さらに, 付着力などの付加的な力の影響についても, その素過程を表現するモデルさえ作れば, 簡単に DEM に組み込むことが可能であり, 拡張性の高さもこの手法の特徴である.

固体粒子の運動に関して, DEM の代わりに剛体球モデルを用いた手法も試みられている²⁰⁾⁻²²⁾. 剛体球モデルでは二体衝突が基本となるので, 多体接触を取り扱う DEM に比べて計算負荷が軽減できるメリットがある. ただし, 粒子が高濃度で存在する流動層のような現象の場合, 多体接触を取り扱う DEM によるモデル化の方が自然ではある. McNamara ら²³⁾は粒子運動を MD で計算したが, 彼らの計算では流体運動の基礎式において慣性項を無視することで計算の簡略化を試みている点でも興味深い.

また, 局所相平均化された基礎式を用いない数値解析手法として, Ichiki と Hayakawa²⁴⁾がストークス動力学法を流動層内粒子運動に適用したものや, van Wachem ら²⁵⁾が格子ガス法を用いたものなどがある.

4 DEM-CFD 法による解析例

前節で紹介した数値解析手法のうち, 粒子運動を DEM で, 流体運動を局所相平均化された基礎式を解く手法により得られた結果の例を示す.

Fig.2 は幅 150mm, 容器に直径 600 μ m の球形ガラス粒子を充填した 2 次元流動層に対して, 実験と計算における流動パターンを比較したものである²⁶⁾. ここでは, 気流を底部から一様に流入させる目的で粒子層底部に設置される分散板の抵抗を変化させた場合の結果を比較しており, それぞれ左図が実験による粒子流動パターン, 中図が計算で得られた空隙率分布, 右図が計算による気体速度分布である. 分散板の抵抗が十分に大きい場合 (Fig.2(a)) には, 気流が層底部から一様に流入し, 底部付近では比較的小さな気泡が発生している. これに対し, 分散板に十分な抵抗が与えられない場合 (Fig.2(b)) には, 気流が集中して吹き込む部分ができ, ほとんど流動化していない領域ができてしまう傾向がある. このような点に関して, 計算と実験とで結果がよく一致していることが確認できる.

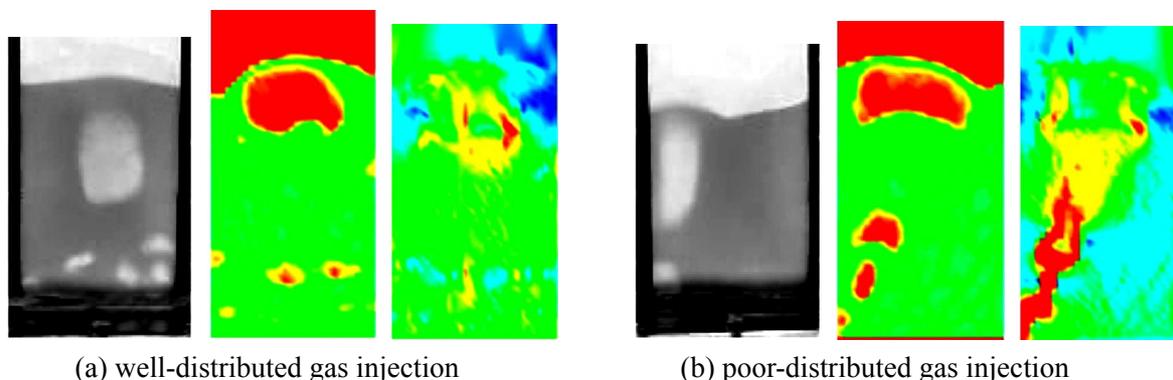


Fig.2 Flow pattern in two-dimensional fluidized bed
(Left: experiment, Center: calculation, Right: calculated gas velocity)

Fig.3 はこの手法を 3 次元に拡張した結果である²⁷⁾。一辺 150mm の正方形断面を持つ矩形容器内に、直径 4mm のアルミ粒子を充填した 3 次元流動層内の粒子流動パターンを実験と計算で比較した。気流速度を変えた場合の結果をそれぞれ示している。 $U = 2.0\text{m/s}$ の場合 (Fig.3(a)) には、粒子層が 1 次元的に持ち上げられ、周期的に上下運動するだけで粒子はほとんど混合しない。これに対して $U = 2.4\text{m/s}$ の場合 (Fig.3(b)) には、気流は空隙率の高い容器角部に集中してその部分の粒子を吹き上げ、粒子が激しく混合される。本計算手法は 3 次元の流動に対しても実際の流動をよく予測できることが確認できる。

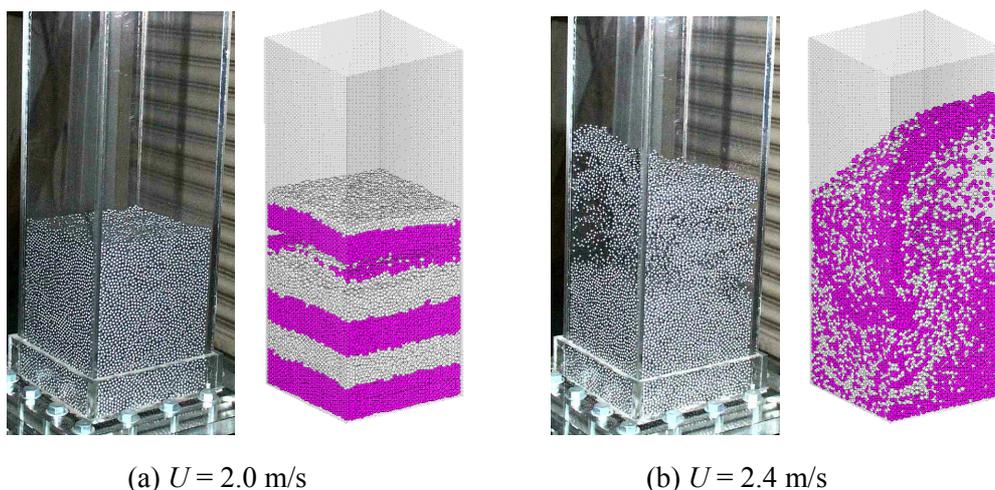


Fig.3 Flow pattern in three-dimensional fluidized bed
(Left: experiment, Right: calculation)

5 おわりに

現在、様々な流体計算用の商用コードで二相流解析を行えるようになっており、固気二相流の数値解析も一般的なものに、また実用的なものになってきたと言える。しかし、二流体モデルにおいて普遍的な構成式の構築は非常に困難な問題として立ちはだかり続けると考えられる。また、DEM を用いた解析は二流体モデルよりも手軽に高精度な結果を得られるが、現在でも取り扱う粒子数は数百万個程度が実用的な限界であり、大規模化へのハードルは二流体モデルよりも高そうである。さらに、粒径分布がある場合の流体抵抗モデル、粒子形状の影響、乱流や熱の影響など、実用化に向けて微視的な観点からのモデルの精密化への要求も高くなると予想される。このように、高濃度固気二相流の数値解析には依然として多くの課題が残されており、継続的な研究によるさらなる発展が期待される。

参考文献

- 1) 田中敏嗣, “粒子のつくるメゾスケール構造とその数値予測”, *ながれ*, **21-3** (2002), 250-259.
- 2) Anderson, T.B. and Jackson, R., “A fluid mechanical description of fluidized bed”, *I&EC Fundamentals*, **6-4**, (1967), 527-539.
- 3) Pritchett, J.W., Blake, T.R. and Garg, S.K., “A numerical model of gas fluidized beds”, *AICHE*

- Symposium Series, **176-74**, (1978), 134-148.
- 4) Gidaspow, D., Ettehadieh, B. and Bouillard, J., “Hydrodynamics of fluidization: Bubbles and gas compositions in the U-GAS process”, AICHE Symposium Series, **241-80**, (1985), 57-64.
 - 5) Kuipers, J.A.M., Prins, W. and van Swaaij, W.P.M., “Theoretical and experimental bubble formation at a single orifice in a two-dimensional gas-fluidized bed”, Chemical Engineering Science, **46-11**, (1991), 2881-2894.
 - 6) Jenkins, J.T. and Savage, S.B., “A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic spherical particles”, Journal of Fluid Mechanics, **130**, (1983), 187-202.
 - 7) Ding, J. and Gidaspow, D., “A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow”, AICHE Journal, **36-4**, (1990), 523-538.
 - 8) Boemer, A., Qi, H. and Renz, U., “Eulerian simulation of bubble formation at a jet in a two-dimensional fluidized bed”, International Journal of Multiphase Flow, **23-5**, (1997), 927-944.
 - 9) Peirano, E., Delloume, V., Johnsson, F., Leckner, B. and Simonin, O., “Numerical simulation of the fluid dynamics of a freely bubbling fluidized bed: influence of the air supply system”, Powder Technology, **122**, (2002), 69-82.
 - 10) Gera, D., Gautam, M. Tsuji, Y., Kawaguchi, T. and Tanaka, T., “Computer simulation of bubbles in large-particle fluidized beds”, Powder Technology, **98**, (1998), 38-47.
 - 11) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L., “Discrete numerical model for granular assemblies”, Geotechnique, **29-1**, (1979), 47-65.
 - 12) 日高重助, 金星直彦, 三輪茂雄, “粉体層剪断過程におけるアコースティック・エミッションについて”, 粉体工学会誌, **26-2**, (1989), 77-84.
 - 13) Langston, P.A., Tüzün, U. and Heyes, D.M., “Continuous potential discrete particle simulations of stress and velocity fields in hoppers: transition from fluid to granular flow”, Chemical Engineering Science, **49-8**, (1994), 1259-1275.
 - 14) 六車嘉貢, 田中敏嗣, 川竹 了, 辻 裕, “離散要素法による固定翼付き容器回転型混合機の数値シミュレーション”, 日本機械学会論文集 (B 編), **62-601**, (1996), 3335-3340.
 - 15) 田中敏嗣, 石田俊哉, 辻 裕, “水平管内粒状体プラグ流の直接数値シミュレーション (付着力がない場合)”, 日本機械学会論文集 (B 編), **57-534**, (1991), 456-463.
 - 16) 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻 裕, “離散要素法による流動層の数値シミュレーション (噴流層の場合)”, 日本機械学会論文集 (B 編), **58-551**, (1992), 2119-2125.
 - 17) Xu, B.H. and Yu, A.B., “Numerical simulation of the gas-solid flow in a fluidized bed by combining discrete particle method with computational fluid dynamics”, Chemical Engineering Science, **52-16**, (1997), 2785-2809.
 - 18) Mikami, T., Kamiya, H. and Horio, M., “Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed”, Chemical Engineering Science, **53-10**, (1998), 1927-1940.
 - 19) Yuu, S., Umekage, T. and Johnno, Y., “Numerical simulation of air and particle motions in bubbling fluidized bed of small particles”, Powder Technology, **110**, (2000), 158-168.
 - 20) Hoomans, B.P.B., Kuipers, J.A.M., Briels, W.J. and van Swaaij, W.P.M., “Discrete particle

- simulation of bubble and slug formation in a two-dimensional gas-fluidized bed; a hard-sphere approach”, *Chemical Engineering Science*, **51**-1, (1996), 99-118.
- 21) 湯 晋一, 野原浩樹, 梅景俊彦, “粗大粒子からなる乱流流動層中の気流と粒子の運動の数値シミュレーション”, *日本機械学会論文集 (B 編)*, **62**-601, (1996), 3300-3308.
- 22) Ouyang, J. and Li, J., “Particle-motion-resolved discrete model for simulating gas-solid fluidization”, *Chemical Engineering Science*, **54**, (1999), 2077-2083.
- 23) McNamara, S., Flekkøy, E.G. and Måløy, K.J., “Grains and gas flow: Molecular dynamics with hydrodynamic interactions”, *Physical Review E*, **61**-4, (2000), 4054-4059.
- 24) Ichiki, K. and Hayakawa, H., “Dynamical simulation of fluidized beds: Hydrodynamically interacting granular particles”, *Physical Review E*, **52**-1, (1995), 658-670.
- 25) Van Wachem, B.G.M., Bakker, A.F., Schouten, J.C., Heemels, M.W. and de Leeuw, S.W., “Simulation of fluidized beds with Lattice Gas Cellular Automata”, *Journal of Computational Physics*, **135**, (1997), 1-7.
- 26) 水島祐之輔, 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻 裕, “空気分散器の圧力損失が流動層内流動におよぼす影響について (DEM 解析と実験の比較)”, *日本機械学会関西支部第 78 期定時総会講演論文集*, (2003), (14-37)-(14-38).
- 27) 梶山 聡, 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻 裕, “流動層の 3 次元 DEM 解析”, *日本混相流学会年会講演会 2001 講演論文集*, (2001), 261-262.