流動と粒子挙動の連成解析システムの開発

Development of coupling analysis system considering interaction between fluid flow and particle flow

川原　仁志[1)]，曹　国強[2)]，佐藤　暁拓[3)]
Hitoshi Kawahara, Cao Guo Qiang and Akihiro Satoh

1)博士（工学）　伊藤忠テクノソリューションズ株式会社　エネルギー･産業技術部（〒100-6080　東京都千代田区霞が関3-2-5, hitoshi.kawahara@ctc-g.co.jp）
2)工学博士　伊藤忠テクノソリューションズ株式会社　社会基盤ソリューション部（〒100-6080　東京都千代田区霞が関3-2-5, cao.guo.qiang@ctc-g.co.jp）
3)　伊藤忠テクノソリューションズ株式会社　エネルギー･産業技術部（〒100-6080　東京都千代田区霞が関3-2-5, akihiro.satoh@ctc-g.co.jp）

We developed a new coupling system in order to consider interaction between fluid flow and particle movement. Because the system is coupled by independent to CFD code and particle flow analysis code, we can use the each system efficiently. Furthermore, calculated results by using the system are fairly good compared with previous researches.

Key Words : CFD,simulation,DEM,particle,porous media

1.　はじめに

Cundall[1)]らによって提案された個別要素法（DEM）は粉粒体や粒状態の力学挙動の解析に広く利用されており、地盤や岩盤の破壊や亀裂の進展、崩壊といった非連続体挙動解析や大規模な崩壊・破壊および流動解析に数多く適用されている。また近年では、流体中の粒子挙動への適用として粒子群干渉沈降現象[2)]への適用やサイクロンセパレータ内の粒子挙動への適用がなされてきている。そのような現象においては流動と粒子挙動の相互作用の考慮が現象の予測には非常に重要となり、流体解析と粒子挙動解析を連成させて解く必要がある。しかし、これまで報告されている研究では解析専用にコード開発されたものが多く、一般的に利用できるものが少ない。今回我々は、汎用熱流体解析コードと汎用離散要素法コードを効率的に連成できるシステムを開発し、その有効性を確認した。本報では連成システムの概要と開発したシステムを用いた計算例について報告する。

2.　連成方法

粒子挙動専用あるいは熱流体解析専用の汎用コードは既に幾つも市販されているが、各々を連成させて計算できるものは数少ない。今回我々は、各々の汎用コードとは独立した連成用管理システムを開発することで、既存のシステムの機能を利用して連成計算を可能とした。システムの構成を Fig.1 に示す。当該システムでは、既存の解析コードに連成させる物理量を外部ファイルに書き出す機能と管理プロセスとの通信を行うソケット通信機能をユーザルーチンを用いて追加するだけで連成解析が可能となる。

管理プロセスでは各々のプロセスから計算時間を取得し、一方のプロセスが連成のタイミングに到達した場合には他方のプロセスがそのタイミングに到達するまで waiting の制御を行う。本システムでは各々のプロセスとは独立の管理プロセスを置くことと、ソケット通信によるデータの授受を行うことで、各々が異なる計算機であっても動作させることが可能である。

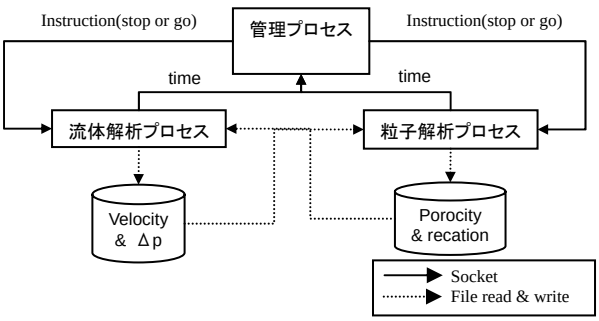


Fig.1 Outline of coupled system

粒子挙動解析と流体解析の連成としては、流体解析の速度と圧力勾配を粒子解析に渡し、粒子解析からは粒子の体積占有率と粒子反力を流体解析に渡す双方向の弱連成とした。

3.　数学モデル

流動解析と粒子挙動解析の数学モデルは以下を用いた。

1)　流動解析

流動の解析は、質量の保存則(1)と運動量の保存則(2)を有限体積法により離散化した自社製汎用コード

を用いた。

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho_f \varepsilon dV + \int_S \rho_f \varepsilon \vec{v}\cdot ds = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho_f \varepsilon \vec{v} dV + \int_S \rho_f \varepsilon \vec{v}\vec{v}\cdot ds = \int_S T\cdot ds + \int_V \vec{f}_b dV \qquad (2)$$

ここで、

$$T = \mu\left[\nabla\vec{v} + \left(\nabla\vec{v}\right)^T\right] - \frac{2}{3}\mu\left(\nabla\cdot\vec{v}\right)I - pI$$

V：解析領域の体積、s：解析領域面積、ρ_f：流体密度、ε：(3)式で表される流体の体積占有率、

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_i V_{p,i}}{\Delta V_f} \qquad (3)$$

ΔV_f：流体計算セル体積、$V_{p,i}$：流体セルに含まれる粒子の体積、I：単位行列、p：圧力、μ：粘性係数、f_b：外力（粒子からの反力や重力加速度）である。

2） 粒子と流体の相互作用

流体と粒子の相互作用として以下を考慮した。

① 流体抗力

粒子と流体との相対速度によって生じる流体抵抗を以下の式により考慮した。

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2}\rho_f\left(\vec{u}-\vec{v}\right)\left|\vec{u}-\vec{v}\right|\cdot \pi r_p^{\ 2}\cdot C\cdot \varepsilon^{-\chi} \qquad (4)$$

ここで、χはDi Felice[3),5)]らによって流動床などのモデルに提案されている以下の式を用いた。

$$\chi = 3.7 - 0.65\exp\left(-\frac{\left(1.5-\log_{10}\left(\mathrm{Re}_p\right)\right)^2}{2}\right) \qquad (5)$$

ρ_f：流体の密度、$\vec{u}$：粒子速度、$\vec{v}$：粒子と流体の相対速度ベクトル、C_D：抗力係数。ここで、

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\mathrm{Re}_p}}\right)^2, \mathrm{Re}_p = \frac{2\rho_f r\left|\vec{u}-\vec{v}\right|}{\mu}$$

を用いた。

② 圧力勾配

粒子に作用する浮力や圧力勾配による影響の考慮として以下を与えた。

$$\vec{F}_p = \frac{4}{3}\pi r^3 \nabla p \qquad (6)$$

3） 粒子挙動

粒子挙動の計算にはCundall[1)]らが開発した汎用の個別要素法コード（ITASCA社製 PFC3D）を用いた。粒子に作用する流体力として式(4)と式(6)の和である以下を追加した。

$$\vec{F}_{fluid} = \vec{F}_0\varepsilon^{-\chi} + \frac{4}{3}\pi r^3\nabla p \qquad (7)$$

粒子の運動は式(7)を用いて、

$$\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} = \frac{\vec{F}_{mech} + \vec{F}_{fluid}}{m} + \vec{g} \qquad (8)$$

と表される。ここで、$\vec{F}_{mech}$：粒子間力、m： 粒子質量、g：重力加速度である。

4. 計算例

今回構築したシステムを用いて幾つかの計算を実施した。その結果を以下に示す。

1）単一球の自由落下問題

流体が静止していると仮定した場合の球形粒子の終末沈降速度は以下の式となる。

$$v_t = \sqrt{\frac{4gD_p\left(\rho_p-\rho_f\right)}{3\rho_f C_D}} \qquad (9)$$

ここで、各々の記号は前述のとおりである。本システムによる結果をFig.2に示す。

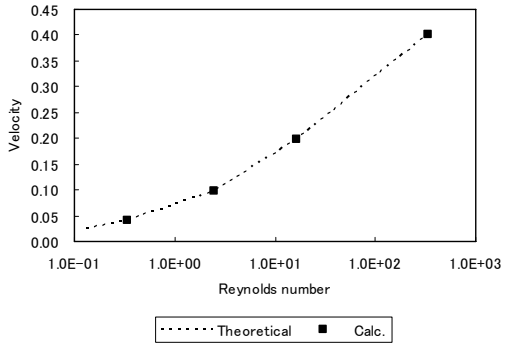


Fig.2 Calculated results

横軸は粒子径を代表長さにとったReynolds数であり、縦軸は終末速度である。破線は式(12)と式(7)を用いて算出された値であり、■は計算結果である。単一粒子の場合には流体との相互作用が小さいために式(9)の結果とほぼ一致した値となった。

2） 多孔質媒体を通過する流れ①

Fig.3に示す断面0.05m×0.05m長さ0.1mの領域に粒子径0.0025mの粒子を充填し、両端に圧力差を設けた場合の流速を計算した。解析体系に占める粒子の体積割合は0.476

とした。

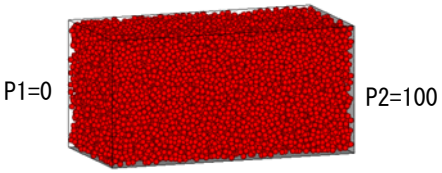


Fig. 3 Calculation model

また、流体は密度 1000kg/m³とし粘性を変えて計算した。本モデルにおける流速は、層流域ではKozeny-Carmanの式(10)や層流から乱流域までの圧力損失を表す実験式（Ergunの式）式(14)が知られている[4]。

$$\frac{\Delta P}{L_P} = k\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\mu \cdot S_V{}^2 \cdot U \qquad (10)$$

$$\frac{\Delta P}{L_P} = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\mu \cdot U}{(\phi \cdot d)^2} + 1.75\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\frac{\rho \cdot U^2}{\phi \cdot d} \qquad (11)$$

ここで、$S_V = 6/d$、d：粒子径、L_P：充填層長さ、k：Kozeny 定数（≈ 5）である。Fig.4 に計算結果と式(10),(11)の結果と合わせて示す。本システムによる計算は概ね式(10),(11)の結果と一致しており、実験的に確認されている多孔質媒体の圧力損失を再現し得るといえる。

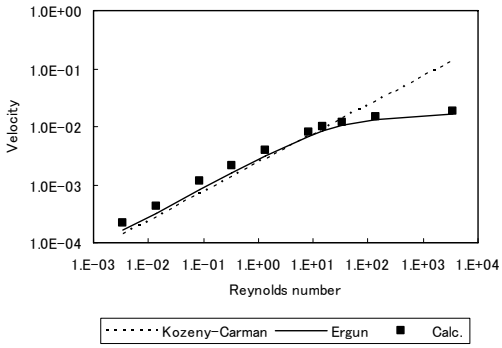


Fig. 4 Calculated results

3）多孔質媒体を通過する流れ②

Fig.3の体系の前後に助走路を設け、流速0.01m/sとしてε（空隙率）を変化させた計算を実施した。
Fig.4に本システムによる計算結果と式(10),(11)にて算出される値を合わせて示す。
εを変化させた場合においても式(10),(11)とよく一致しており、実験的に確認されている多孔質媒体の圧力損失を再現し得るといえる。

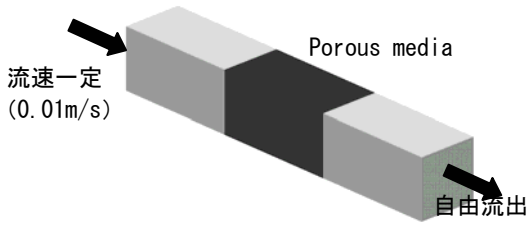


Fig. 4 Calculated model for porous media

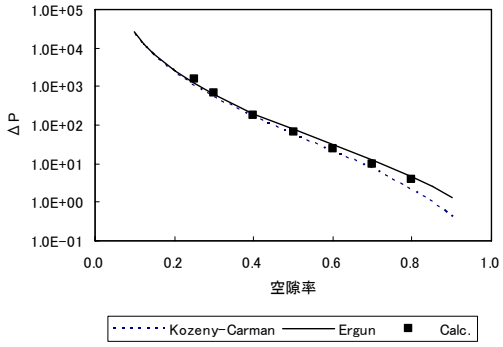


Fig. 5 Calculated results

4）粒子群干渉沈降現象①

粒子の濃度が高くなるにともない、粒子沈降によって誘起される流体の上向き速度によって沈降速度が低下することが知られており、Maude[6]らは沈降速度の近似式として以下の式を提案している。

$$u_t = u_{t0} \cdot \varepsilon^n \qquad (12)$$

ここで、u_{t0}：単一球の終末沈降速度、ε：流体の体積占有率、n：2.33～4.65の定数である。今回、縦×横×高=1m×1m×2mの体系で粒子群干渉沈降現象の計算を実施した。流体は密度を1000 $[kg/m^3]$とし、粘性係数は1.0 $[Pa \cdot s]$とした。計算は粒子密度を2500 $[kg/m^3]$、粒子半径は3cmとして粒子数を変えてεの値を変化させた。
Fig.6に計算結果を示す。本システムによる計算結果は式(15)において$n = 3.2$とした場合によく一致している。nはReynolds数によって変化する値であり、Fig.7の関係が示されている。本計算のReynolds数は約50程度であり、Fig.7から得られる値とよく一致している。

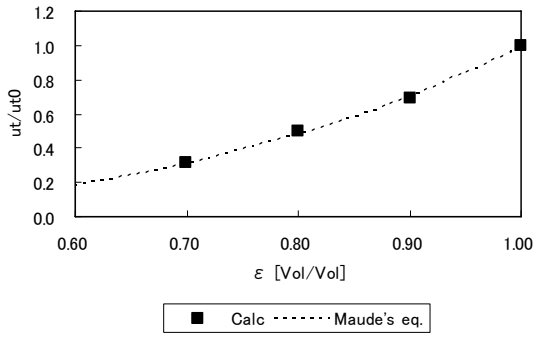


Fig. 6 Calculated results

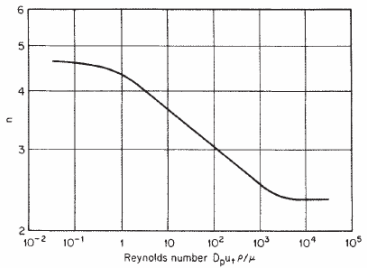


Fig.7 Relationship between Reynolds number and coefficient n

5) 粒子群干渉沈降現象②

粒子が流体中に局在している場合の沈降速度は一様に分布している場合とは異なる挙動を示す。
流体の密度を1000 $[kg/m^3]$、粘性係数を0.001 $[Pa \cdot s]$とし、粒子半径5mm～25mm（約1200個）、粒子密度2500 $[kg/m^3]$として、重力加速度（$9.8\,m/s^2$）による自由落下の計算を連成あり/なしで実施した。Fig.8に計算体系を示す。粒子の初期配置として、流体解析体系の中心上部 $x \times y \times z = 0.4 \times 0.4 \times 0.4m$ に設定した。

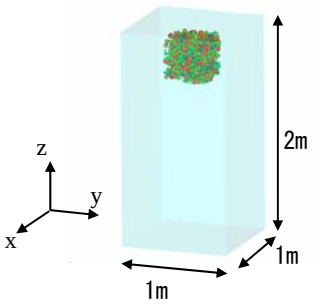


Fig.8 Calculated model for porous media

Fig.9に粒子半径A：～10mm、B：10mm～15mm、C：15mm～20mm、D：20mm～の平均沈降速度を示し、Fig.10には計算開始1秒後の粒子分布を示す。

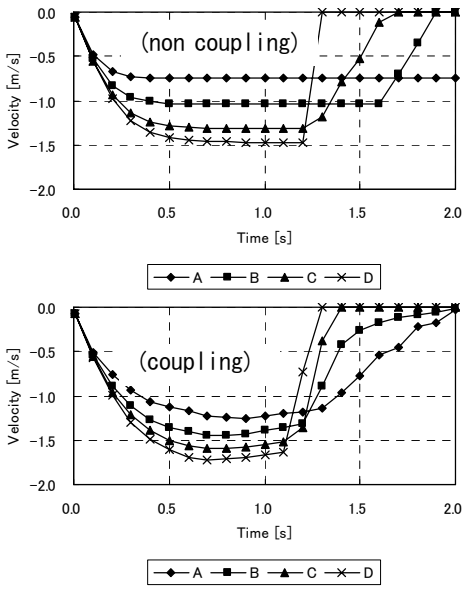
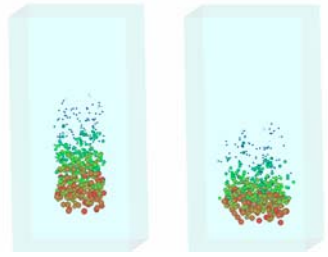


Fig.9 Sedimentation rate of particles



No coupling　　Coupling

Time = 1s

Fig.10 Distribution of particles

連成なしの場合、流体速度0の流体抵抗により沈降速度が決定されるのに対し、連成した場合には、粒子沈降によって誘起される下向き流動のため沈降速度が遅いものが加速され、速度のばらつきが小さくなり塊として沈降する。また、粒子沈降によって上向きの流れが誘起されるが、一様分布の場合には沈降速度を低下させる効果として作用するのに対して、局在化している場合には粒子が存在しない領域で生じるために沈降速度低下の効果は現れないと考えられる。

5. まとめ

汎用熱流体解析コードと個別要素法コードを容易に連成できるシステムを開発し、流動と粒子挙動の相互作用を考慮した計算を実施した。本システムによる結果は過去の知見とよく一致しており、本システムの計算は妥当性であることを示した。さらに粒子局在化の影響等、様々な問題に適用可能なことを示した。

参考文献

1) P.A.Cundall and O.D.Strack, ”The distinct element method as a tool for research in granular media part Ⅰ”, report to the national science foundation concerning NSF grant eng 76-20711,1978.11

2) 西浦ら, “離散要素法と直接数値計算法を用いる粒子群干渉沈降挙動のハイブリッドシミュレーション”, 化学工学論文集, 32, 4, pp. 331-340, 2006

3) Di Felice, R., ”The voidage function for fluid-particle interaction systems”, Int. J. Multiphase flow, 20, 153-159. 2004

4) Ergun, Sabri and A.A. Orning. “Fluid Flow Through Packed Columns”, Chemical Engineering Progress. Vol.48, pp.89-94. American Institute of Chemical Engineers: 1952, New York.

5) Z.Y.Zhou, D.Pinson et al, “Discrete particle simulation of gas-solid flow in a blast furnace “, Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 December 2003

6) Maude AD and Whitmore RL, Brit J Appl Phys, 9, 477-482, 1958