

## IB-LB-DEMによる粒子沈降解析

豊橋技術科学大学 学会会員 堀口 翔平

豊橋技術科学大学 正会員 松田 達也, 内藤 直人, 三浦 均也

## 1. はじめに

噴砂や流砂(洗掘)等のメカニズム解明は、これまで模型実験を主体として行われており、現象を記述する数式は実験結果に依存したパラメータ設定を行う必要があることから、物理的な意味が不明なものもある。そのため、数値解析を駆使してマイクロメカニクスに則った現象の分析ができれば、より高精度なメカニズム解明が可能となり、物理的な根拠が明確なパラメータ設定が可能となる。本研究では、粒子-流体の相互作用で生じる洗掘・侵食現象、浸透破壊による噴砂現象のメカニズムを詳細に分析するため、流体解析にLBM<sup>1)</sup>、粒子解析にDEM<sup>2)</sup>、粒子-流体のインタラクションにIBM<sup>3)</sup>を適用したIB-LB-DEM法を用いた。本稿では土粒子-流体連成問題の再現性確認を目的として実施した基礎的な検討結果を述べる。

## 2. LBM, IBM および DEM について

LBM(Lattice Boltzmann Method, 格子ボルツマン法)は、非圧縮流体を粒子のある程度の塊と捉え、仮想した塊の運動を分布関数によって数式1のとおり定義し、流体挙動を解析する手法である。

$$f_k(\mathbf{x} + \mathbf{c}_k \delta_t, t + \delta_t) = f_k(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau} (f_k(\mathbf{x}, t) - f_k^{eq}(\mathbf{x}, t)) \quad (1)$$

ここで、 $f_k(\mathbf{x} + \mathbf{c}_k \delta_t, t + \delta_t)$ は1時間ステップ後における分布関数、 $f_k(\mathbf{x}, t)$ は時間ステップ $t$ における分布関数、 $\tau$ は緩和時間、 $f_k^{eq}(\mathbf{x}, t)$ は時間ステップ $t$ における平衡分布関数である。

IBM(Immersed Boundary Method, 埋め込み境界法)は、図1のように粒子表面に設定された粒子壁を表現する格子点を定義し、その格子点を起点として、流体の計算を行うLBMの直交座標におけるある範囲内の計算節点を抽出し、粒子-流体連成計算を行う手法である。

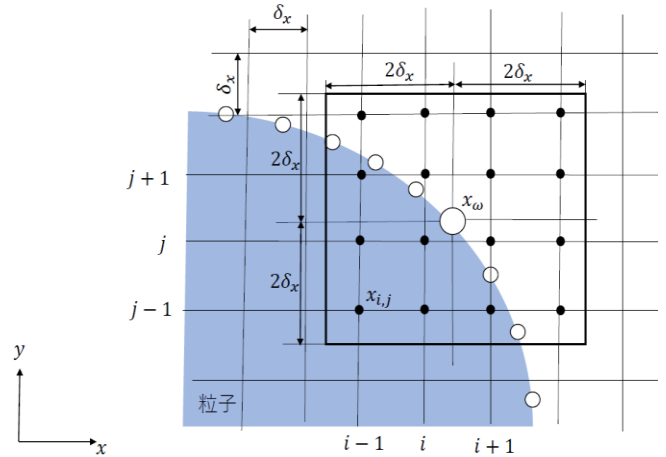


図1 IBMの概念図

IB-LBMでは数式2、数式3により粒子が受ける力 $G_p$ とトルク $T_p$ を計算し、粒子が受ける力 $G_p$ とトルク $T_p$ を用いて粒子の運動を計算する。

$$\mathbf{G}_p = \sum_n^N \mathbf{G}_\omega \Delta_s \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_p = \sum_n^N (\mathbf{x}_\omega - \mathbf{x}_p) \mathbf{G}_\omega \Delta_s \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{G}_\omega$ は粒子表面上の外力、 $\Delta_s$ は粒子表面の2点間の距離、 $N$ は格子点数、 $\mathbf{x}_p$ は粒子中心の位置である。

DEM(Distinct Element Method, 個別要素法)は、有限の大きさを持つ剛体を計算要素とし、要素同士の接触した時に働く接触力に基づいて各要素の運動を計算し、要素の集合体の運動を計算機上で再現する手法である。

本研究では、LBM、IB-LBM(IBM)およびIB-LBMとDEMの接触モデルを組み合わせたIB-LB-DEMによる解析を行った。

### 3. 解析結果

単粒子の気中落下現象，水中沈降現象を IB-LBM, IB-LB-DEM を用いて解析した。

IB-LBM は Glowinski らの方法に従い，粒子-境界の接触計算を行った<sup>4)</sup>。解析では，解析領域は 20mm×80mm とし，格子幅は 0.2mm とした。単粒子の粒径は 1.25mm とし，比重は 1.25 とした。

図 2 は，IB-LBM による気中落下時の粒子中心の鉛直座標値の経時変化を示している。Glowinski らの接触モデルでは，底面壁と衝突したのち，エネルギー保存則に反した粒子の跳ね返り挙動が見られ，粒子と境界壁の接触を適切に解析できないことが明らかになった。

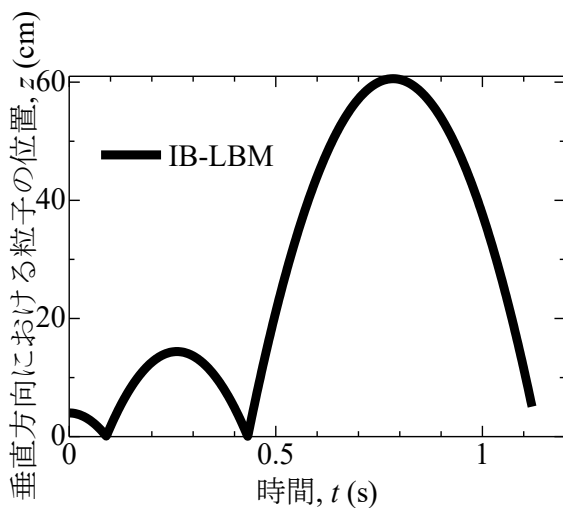


図 2 粒子の垂直方向市の時間変化 (IB-LBM)

図 3 は，IB-LB-DEM による解析結果を示している。図中の黒線は壁境界との接触時における減衰定数  $h=1$  の条件での気中落下による粒子中心の鉛直座標値を示している。先述の Glowinski らの接触モデルでの計算のような不自然な跳ね返りが見られず，適切に粒子の落下現象を解析できることが明らかになった。同手法を用いて粒子の水中沈降現象を解析したが (図 3 内の赤線)，例えば，Wan による数値解とよく一致しており，粒子-流体連成現象を再現できていることを確認した。

図 4 は，IB-LB-DEM による水中沈降現象の解析結果を可視化した図である (粒子を沈降させてから 154 ステップ後の様子)。図 4 では，粒子の沈降に伴う粒子周りの流れ場を詳細にみることも確認できた。

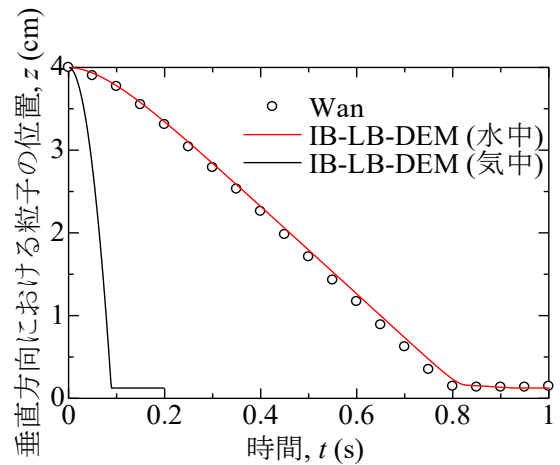


図 3 粒子の垂直方向位置の時間変化 (IB-LB-DEM)

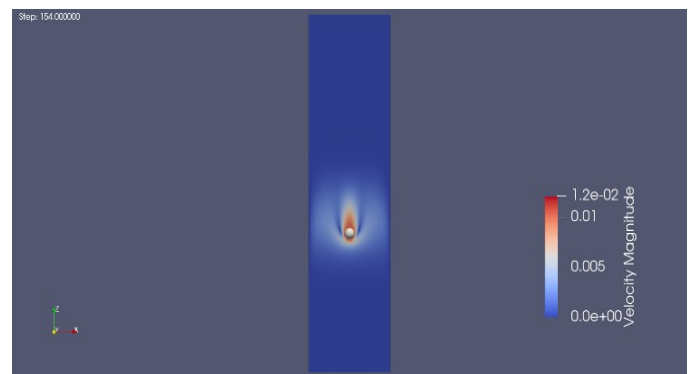


図 4 粒子の水中沈降現象の様子 (154 ステップ)

### 4. 結論

本研究では IB-LB-DEM を用いて，粒子の自由落下現象および水中沈降現象の解析を行った。その結果，粒子-壁境界の接触に DEM を導入することで，粒子の跳ね返り現象を適切に解析できることを示した。また，水中沈降現象の解析を通して，粒子-流体連成が適切に計算されていることを示した。

### 5. 参考文献

- 1) G.R.McNamara et al, Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata. Physics Review Letters, Vol.56, 1505,1988.
- 2) P.A.Cundall and O. D. L. Stract, A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, 29, No.1, 47-65, 1979.
- 3) Z.-G.Feng et al, a direct forcing method in the simulations of particulate flows, Journal of Computational Physics, Vol.202, 20, 2005.
- 4) 瀬田剛：格子ボルツマン法，森北出版，2021.