

地形再現に向けた IB-LBM による密度流解析

東京都立大学 都市基盤環境学域 学生会員 ○笠原 豪
東京都立大学 都市基盤環境学域 正会員 新谷 哲也

1. はじめに

湖沼や沿岸域のような水域では水温や塩分に起因する密度成層が形成され、物質の輸送や混合過程に大きな影響を与えていると考えられていることから、その流動動態の解明が必要である。数値計算は水域全体の流動動態を解析する手法として有効な手段であるが、圧力のポアソン方程式を陰的に解く従来の手法では収束計算が必要である。特に水平方向に対して水深が小さい水域を効率的に解析するにあたり、扁平格子を用いる場合は収束性が悪化するなど計算負荷が増大する。そのため本研究では、陽的に非静水圧3次元流体解析が可能であり、並列化が容易な格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method: 以下 LBM とする)に着目して流体解析モデルの開発を行っており、扁平格子の導入などを行ってきたり。当該モデルは矩形格子を取り扱うため、斜面や曲線形状の境界を再現するためには階段形状に格子を配置する必要があるが、これは流れ場に影響を及ぼす可能性がある。任意の境界形状を滑らかに再現する方法としては境界適合格子や非構造格子の利用が考えられるが、これらは格子生成の方法が矩形格子よりも困難であり、また LBM における粒子の移流(並進)処理の点においても課題が生じる。

そこで本研究では扁平な矩形格子を採用する LBM に対して、比較的簡単に任意形状の境界を表現可能な埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method: IBM) を導入した IB-LBM を密度流解析に適用する。

2. IBM の概要

ここでは IBM の適用について説明する。IBM では任意形状の境界を点群によって表現し、各境界点において境界条件が満たされるように場の値を修正する。本研究では、速度場に対して、各境界点における流体速度が、固体の速度と等しくなるように境界点周りの流速を修正することで no-slip 条件 (Dirichlet 境界条件) を課す。また図-1 のように境界点前後に仮想点を設け、仮想点周りの場を修正することで

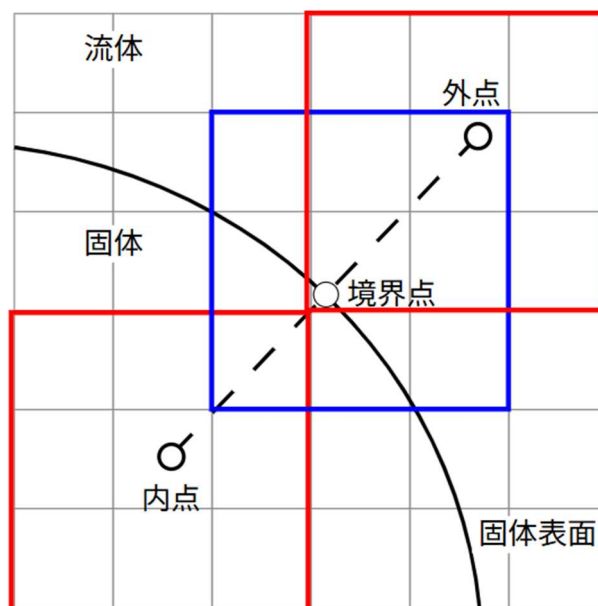


図-1 本研究における IBM の境界点・仮想点概要図

Neumann 境界条件を設定する。本研究では Neumann 境界条件を課す際に、図-1 に示す内点と境界点周りで修正を行うものとし、固体の外側に位置する計算格子の修正は行わないものとする。また IBM では各境界点や仮想点における値は周囲の計算格子から補間して求める。本研究では各点の最近傍計算格子を中心とした、2次元解析であれば図-1 中にそれぞれ赤枠や青枠で示される3×3の格子を、3次元解析であれば3×3×3の格子を用いて補間を行う。IBM を用いる場合の計算手順は仮の速度場を計算⇒IBM による修正⇒仮の速度場を計算...のように、基の計算手順に IBM による修正を加えたのみの構成となる。そのため LBM への導入が容易であり、比較的簡易に任意形状の境界を再現することが可能である。

3. 密度流への適用

次に、本研究で提案する IB-LBM による密度流解析として、Michallet & Ivey²⁾で行われた斜面上での内部波砕波実験の再現解析を実施する。本研究では文献中の experiment 12, 15(以降 ex. 12, ex. 15 とする)を対象とした。解析寸法の概要を図-2 に示す。図-2 中の赤枠は後述する図-3の描画範囲を、青枠は図-4の描画枠を示

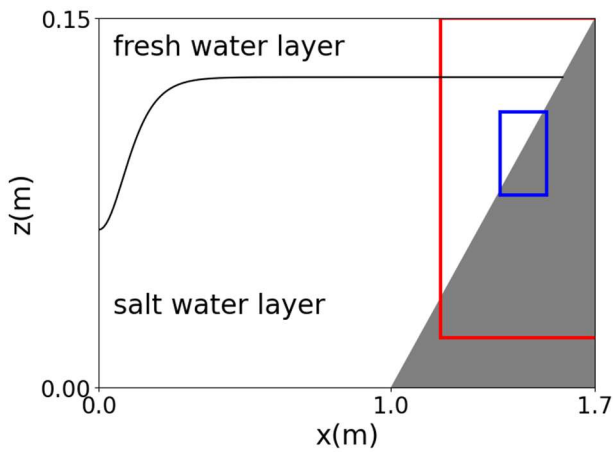


図-2 斜面を有する内部波解析の解析寸法

している。密度分布の初期条件は Lai et al.³⁾を参考に設定した。解析では格子アスペクト比を $\Delta x / \Delta z = 4$ に固定し、ex 12 では $\Delta z = 4\text{mm}$ 、ex 15 では $\Delta z = 1\text{mm}$ として解析を実施した。また ex 12 では、斜面を階段形状によって再現したケースの解析も実施する。

図-3 に ex 15 の再現解析における、各時刻での密度分布を示す。図-3 では IBM による点群を黒点で描画している。図-3 より Lai et al.³⁾に記載されている碎波形態を良好に再現できていることが確認できる。図-4 に ex 12 の再現解析における、 $t=29.5$ 秒での流線を示す。図-4 では本来の斜面境界を黒の点線で、また IBM を用いた解析の結果では斜面を表す IBM の点群を黒点で示している。図-4 より階段形状で斜面を再現した解析では斜面近傍の流線がやや蛇行しているのに対して、IBM で斜面を再現した解析では流線が斜面に平行かつ直線的になっていることが確認できる。

4. まとめ・今後の課題

本研究では IBM を導入することによって境界形状をより滑らかに再現し、内部波に関する実験の再現解析に適用した。その結果、解析では既往研究で見られたような内部波の碎波の様子を再現することができた。また、階段形状境界と IBM による境界の比較を行ったところ、IBM を用いた場合には斜面に沿った滑らかな流線が得られた。また、階段形状境界では斜面近傍で蛇行した流線が確認され、境界形状の表現方法が流れ場に影響を及ぼす可能性が示唆された。

REFERENCES

- 1) 笠原・新谷：土木学会論文集，Vol. 82，No. 16，25-

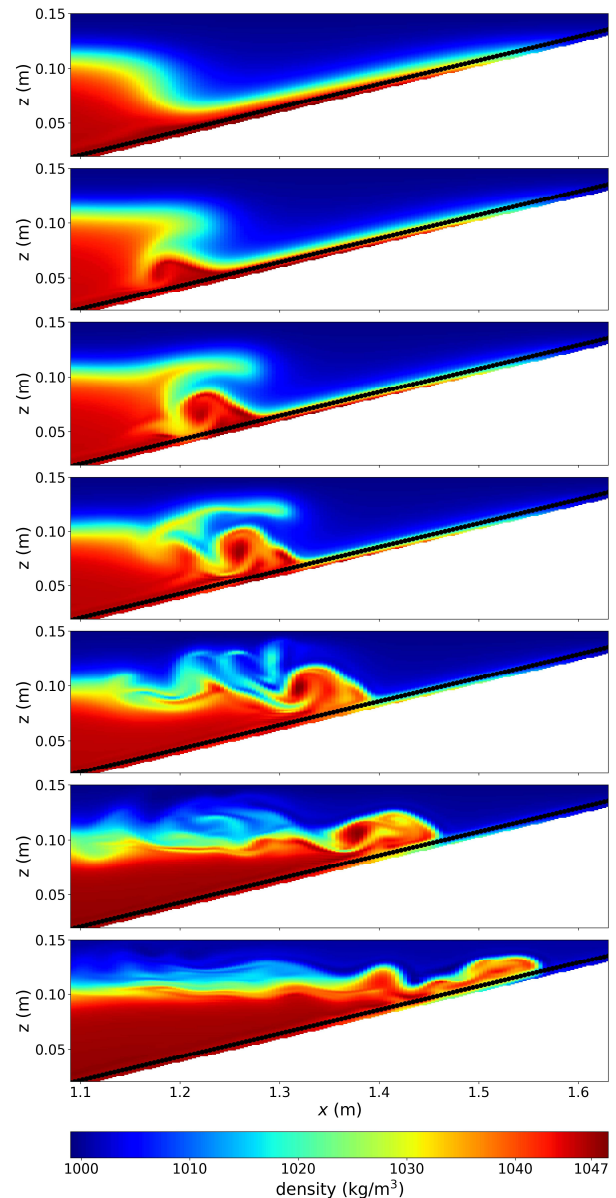


図-3 ex 15 における斜面付近での密度分布図

上から $t=12.5, 13.5, 24.5, 26.0, 27.5, 30.0$ 秒

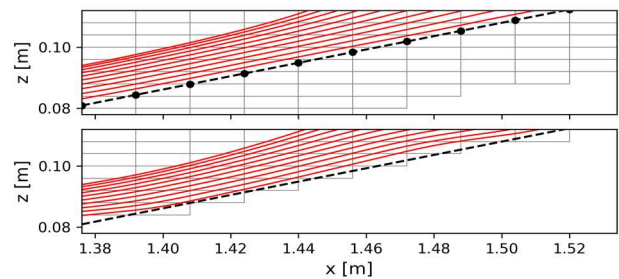


図-4 ex 12 の各解析における $t=29.5\text{s}$ における流線の比較 (上：IBM による再現，下：階段形状での再現)

16059, 2026.

- 2) Michallet & Ivey: *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 104, No. C6, pp. 13467-13477, 1999.
- 3) Lai et al.: *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 115, No. 11, pp. 1-23, 2010.