

水門開放によって生じる重力流の3次元ラージ・エディ・シミュレーション 3-Dimensional Large Eddy Simulation of Lock-Exchange Gravity Current

○井上実

○Minoru INOUE

The sea breeze front is one of the typical examples of the gravity currents. The local heavy rain fall and the high levels of air pollution are caused by a passage of the sea breeze front, and it is also discussed a relation of the heat island phenomenon. The purpose of this study is to recognize the properties of the lock-exchange problem that is one of the basic models of the gravity currents. The large eddy simulations of the lock-exchange gravity currents are carried out to investigate the Reynolds number effects for a propagation of the gravity current and the three-dimensional structure.

1. はじめに

大気や海洋中の温度差や密度差によって生じる重力流は、我々の身の回りでごく一般的に見られる現象である。例えば、海上と陸上の温度差によって生じる海陸風が典型的な事例の1つであり、海風前線の通過に伴う局地的大雨や大気汚染物質の高濃度化、また、ヒートアイランド現象との関連なども議論されている(Simpson, 1997)。

このような重力流の基本的なモデルの1つに水門開放問題がある。水平な2次元チャンネルを鉛直な水門で仕切り、左右を密度の異なる流体で満たした上で、瞬時に水門を開放して重力流を発生させる。重い流体は軽い流体の下に潜り込むような形で進行し、界面でケルビン-ヘルムホルツ不安定による渦を生成しながら密度の混合が進むことが知られている。また、先端部ではローブ&クレフト構造と呼ばれるチャンネル幅方向に波打った3次元界面が形成される。これらの知見は食塩水を用いた多くの実験や理論解析から得られてきたが(例えば、Shin et al., 2004)、現実大気を模して温度差や水蒸気輸送まで考慮した研究は、実験室での再現が困難なためほとんど見られない。

数値流体力学はこのような現象を理解する有効な手段の1つである。本研究では熱や水蒸気の輸送を伴う重力流の数値解析により、海風前線の進行に対する水蒸気輸送の影響や、局地的大雨をもたらす可能性のある積雲の生成過程を明らかにすることを目指す。ここでは、まず重力流の基本的な性質の理解を目的とし、密度差だけを考慮した水門開放問題のラージ・エディ・シミュレーショ

ン(LES)により、重力流の進行に対するレイノルズ数影響や流れの3次元構造について調べる。

2. 計算方法

支配方程式は質量保存則、運動量保存則および密度の保存則であり、これらをチャンネルの水深 H 、浅水波の内部伝搬速度 $U = \sqrt{(\Delta\rho/\rho_0)gH}$ (ρ_0 : 密度の基準値、 g : 重力加速度)および初期の密度差 $\Delta\rho$ で無次元化する。無次元化した密度は $C = \rho/\Delta\rho$ ($\rho:\rho_0$ からのずれ)と定義する。このとき流体の運動はレイノルズ数 $Re = UH/\nu$ とシュミット数 $Sc = \nu/\alpha$ で特徴づけられる。ここで、 ν および α はそれぞれ流体の動粘性係数および溶質の拡散係数である。乱流モデルはこれまでに積雲対流の問題でその有効性を確認した CSM を用いる(井上, 2015)。本計算方法はこれらの支配方程式を有限体積法によって離散化する。

Table.1 に計算条件を示す。水深 H で無次元化した計算領域は、長さ 16、幅 2 および水深 1 の 2 次元チャンネルであり、幅方向には周期境界条件を

Table.1 Computational conditions.

計算領域	$L(x) \times B(y) \times H(z) = 16 \times 2 \times 1$
格子間隔	$\Delta x = 0.05, \Delta y \text{ \& } \Delta z = 0.025$
境界条件	幅方向：周期境界 壁面：no-slip or free-slip
時間増分	$\Delta t = 0.005$
積分時間	$t = 0 \sim 15$
シュミット数	$Sc = 1,000$
レイノルズ数	$Re = 4,000, 10,000, 40,000$

課す。その他の壁面は no-slip 条件と free-slip 条件の2つの場合を用いる。初期場はチャンネル中央の水門を開放した直後とし、左側を重い流体 $C=1.0$ 、右側を軽い流体 $C=0.0$ で満たす。このとき、初期攪乱として各速度成分に無次元値で $\pm 0.5 \times 10^{-3}$ の範囲の一様乱数を与えた。ここでは食塩水と清水の混合を想定して ($Sc=1,000$)、3つの Re でその違いが重力流の進行に及ぼす影響を調べた。

3. 計算結果

Fig.1は $Re=10,000$ で重力流が進行する様子を中央断面の密度分布で示した図である。水門開放直後に密度が異なる流体の上下方向の交換が始まり、時間とともに重い流体が右側へ進行していく。先端は不連続な界面を保ち、背後に形成される水平渦によって密度の混合が進む様子が捉えられている。Fig.2は時間とともに重力流の先端が進む距離を Re で比較した図である。併せて点線で理論値、破線で free-slip 条件を課した場合 ($Re=10,000$) の結果を示した。 Re が大きいほど進行速度が速く、理論値に近づくことがわかる。free-slip 条件の場合は理論値とよく一致していることから、重力流の進行速度に壁面摩擦が影響していることが考えられる。Fig.3は進行する重力流の密度の等値面 ($C=0.5$ 、 $t=15$ 、 $Re=10,000$) である。先端部にローブ&クレフト構造が見られ、背後の水平渦は大きく崩れている。その後方には縦筋構造も見られる。free-slip 条件の場合には顕著なローブ&クレフト構造は見られないが、一方、後方の縦筋構造は形成されることから、重力流の先端と後方で異なる不安定性が3次元構造の発達に寄与していると思われる。

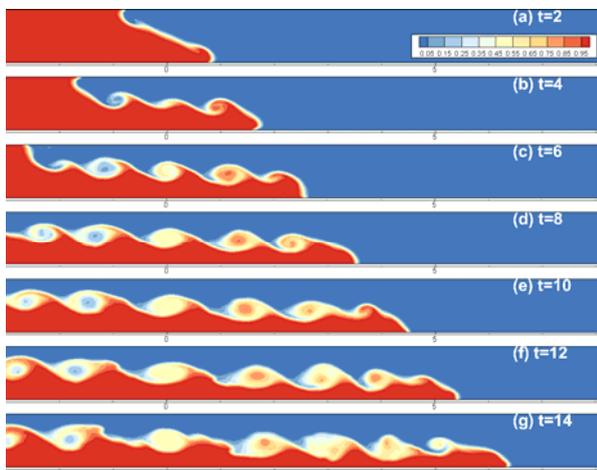


Fig.1 Contour maps of fluid density at $t=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$ and $Re=10,000$ with no-slip condition ($y=1$).

4. おわりに

水門開放による重力流の LES を実施し、重力流の進行に対する Re 数影響や3次元構造を調べた。その結果、 Re 数によって重力流の進行速度が異なることや、重力流の先端と後方で異なる3次元不安定が生じている可能性が示された。今後は進行する海風前線の問題に LES を適用し、水蒸気輸送の影響や積雲の生成過程について調査を進める。

参考文献

- (1) Simpson, J. E. (1997) : Gravity currents : in the environment and the laboratory, 2nd edn, Cambridge University Press
- (2) Shin, J.O., et al. (2004) : Gravity currents produced by lock exchange, J. Fluid Mech., 521, pp.1-24
- (3) 井上実(2015): コヒーレント構造 Smagorinsky モデルを用いた微気象場の数値計算手法, 水文・水資源学会 2015 年度研究発表会要旨集, pp.22-23

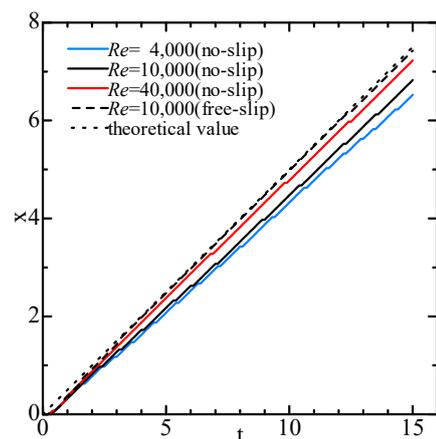


Fig.2 The positions of the gravity current fronts.

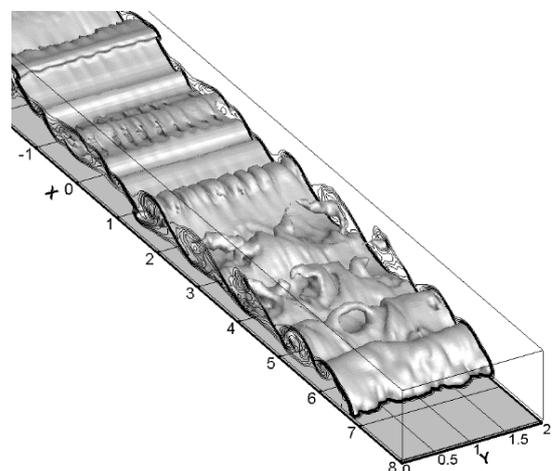


Fig.3 Iso-surface of fluid density for $C=0.5$ at $t=15$ and $Re=10,000$ with no-slip condition.