

安定密度成層乱流の超大規模構造の生成機構の解明

課題責任者

渡邊 智昭

名古屋大学大学院工学研究科

著者

渡邊 智昭*¹, 長田 孝二*¹, 大西 領*², 古田 作*¹, 赤尾 拓海*¹, 中村 浩太郎*¹, 銭 紹祥*³, 胡 希東*^{2,3}, 安田 勇輝*², 守田 拓哉*⁴, 寺田 崇志*⁴*¹名古屋大学大学院工学研究科, *²東京工業大学学術国際情報センター, *³日揮グローバル (株) EN テクノロジーセンター, *⁴東京工業大学工学院機械系

キーワード: 安定密度成層, 乱流, 混合層, プラント, 熱拡散, 微気象シミュレーション

1. 緒論

安定密度成層下の乱流は海洋や大気など地球規模の流体現象において重要な役割を果たすことが知られている。海中混合層のモデルとして研究がなされる安定密度成層中の乱流混合層において、水平方向に異常に長い超大規模構造が発達することが近年確認された[1]。また、LNGプラントの熱交換器からの排熱においても、同様の水平方向に長い高温流体塊が特定の気象条件下で現れる[2]。この高温流体塊は、排熱が別の熱交換器に再び吸気されることで熱交換器性能の低下を引き起こす Hot Air Recirculation (HAR) 現象の要因となっている可能性がある。

本研究では非等方的な超大規模構造を伴う流れ場の数値解析を実施し、構造の生成要因や乱流拡散現象に及ぼす影響を調査したほか、熱交換器からの排熱拡散を MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) を用いた微気象シミュレーションにより予測する手法について検討した。本報告では超大規模構造の生成要因解明を目的として実施した数値解析結果[3, 4]について述べる。

2. 壁面間に発達する乱流混合層および安定密度成層中の乱流混合層の数値解析

上述した超大規模構造に類似した構造が乱流境界層などの壁乱流においても現れる。壁近傍では壁により、安定密度成層下では浮力により鉛直方向の乱流運動が抑制される。鉛直方向の流体運動が抑制される環境下で平均速度せん断が働くことが超大規模構造の発生要因であるとの仮説に基づき、平行平板間に発達する乱流混合層 (Wall-confined shear layer: WSL) および安定密度成層中の乱流混合層 (Stably stratified shear layer: SSSL) のラージエディシミュレーション (LES) や直接数値計算 (DNS) を実施した。また、比較のため壁の影響を受けない自由乱流混合層 (Free shear layer: FSL) の解析も合わせて実施した。

図 1 に各流れの概略を示す。いずれも時間発展型乱流混合層を計算対象とし、流れ方向 (x) およびスパン方向 (z) に周期境界条件を課した。図中には初期速度分布が示されており、初期混合層厚さを h_0 、速度差を U_0 と表記する。層上下の流体が x 方向に $\pm U_0/2$ の速度で流れている。FSL および SSSL では鉛直方向境界を混合層から十分離れた位置に設定する。WSL では計算領域の高さを h_0 の 10 倍とし、 $\pm U_0/2$ の速度で移動する滑り無し壁を鉛直方向

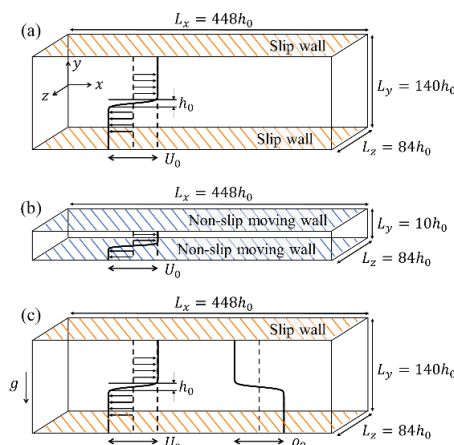


図 1 計算領域 (a)FSL, (b)WSL, (c)SSSL [3]

の境界条件として与えた。各流れの速度や SSSL における密度の初期分布を \tanh 関数により与えた。

支配方程式は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式であり、SSSL ではブシネスク近似を仮定した。計算には部分段階法に基づく内製計算コードを用いた。時間積分には三次精度ルンゲクッタ法が、水平・鉛直方向の空間離散化にはそれぞれ四次・二次精度の中心差分法が適用される。LES では十次精度ローパスフィルタに基づく陰的モデルをサブグリッドスケールモデルとして用いた。レイノルズ数 $Re = U_0 h_0 / \nu$ を 900~3600 とした解析を実施した。計算格子数は最大で 300 億点程度である。以下には、 $Re = 2000$ に対して実施された LES の結果[3]を記載する。

3. 計算結果

図 2 に乱流混合層中心の水平断面内における x 方向速度の分布を示す。図中には混合層厚さ δ_u が矢印により示されている。 u が正・負の値を持つ領域の長さ δ_u の比較から、WSL および SSSL では δ_u に対して x 方向に長い超大規模構造が存在していることが確認できる。一方、FSL における速度場の長さスケールは混合層厚さと同程度である。

乱流の大スケール速度変動に対する平均速度せん断の影響を調査するため、平均速度せん断と乱流の時間スケールの解析を実施した。これらの時間スケール比により定義されるせん断パラメータ S_B^* は平均速度せん断の相対的な強さを表す[5]。図 3 に S_B^* の時間変化を示す。FSL で

は乱流混合層の発達により δ_u が単調増加する。WSL では壁により乱流混合層の鉛直方向への発達が阻害されるため、 $\delta_u \approx 10h_0$ は時間によらずほぼ一定となる。また、SSSL においては浮力により大スケールの鉛直方向乱流拡散が抑制されることで、 δ_u は時間に対して非常に緩やかに増加する。平均速度せん断の時間スケール δ_u/U_0 は、FSL では時間とともに増加、WSL・SSSL では時間よらずほぼ一定となる。また、乱流の時間スケールは混合層発達により大きくなる。そのため、 S_B^* はFSL において時間によらずほぼ一定となるのに対し、WSL や SSSL では時間とともに増加する。これは、WSL や SSSL では平均速度せん断が乱流場に与える影響が時間とともに強くなることを意味している。

一様せん断乱流の急激変形理論やDNS では、せん断パラメータが大きい場合、せん断により一方向に引き伸ばされた長い構造が形成されることが示されている[6]。本研究においても、 S_B^* が大きくせん断の影響が強いWSL や SSSL において超大規模構造が見られた。また、一様せん断乱流に類似したレイノルズ応力テンソルの非等方的な振る舞いをWSL や SSSL において確認した。これらの結果は、WSL や SSSL における超大規模構造の発達が鉛直方向乱流運動の抑制により強められた平均速度せん断の影響に関連していることを示唆している。

4. 結論および今後の展望

壁や浮力により鉛直方向運動の束縛を受ける乱流混合層の数値解析を実施し、超大規模構造の生成要因について調査した。平均速度せん断の相対的な強さや乱流統計量を一様せん断乱流と比較した結果、鉛直方向乱流運動の抑制が平均速度せん断の影響を強めたことが超大規模構造の生成要因となっている可能性が示唆された。また、安定密度成層下であっても、平均速度せん断の無い流れ場ではこうした構造が現れず、既存の乱流理論によりその発達を予測できることを確認した[7]。さらに、超大規模構造を含有できない小さな計算領域を用いた解析結果と比較することで、超大規模構造が乱流拡散に関するモデルパラメータに及ぼす影響を調査した。超大規模構造が乱流運動エネルギーの大部分を含有していることから、乱流の大スケール特性と小スケール特性を結びつけるモデルに超大規模構造が影響を与えることを明らかにした。

また、プラント熱交換器からの排熱拡散に関するDNS・LES を実施した。実プラントにおける観測結果を基に、横風中に高温流体を噴出させる流れ場を解析対象とした。排熱流れが旋回を伴う場合、鉛直方向の乱流拡散が著しく抑制されることが確認された[8]。また、本数値解析と同様の流れが都市ビルに設置されている熱交換器により生成されることを微気象観測実験により確認した。現在、旋回流が引き起こす鉛直方向乱流拡散の抑制と超大規模構造の発達の関連について調査を進めている。さらに、マルチスケール気象モデルMSSGを用いた数値計算を実施し、DNS と同様の結果がMSSGにより得られることを確認した[9]。これは、現実気象下でのプラント排熱拡散のMSSG

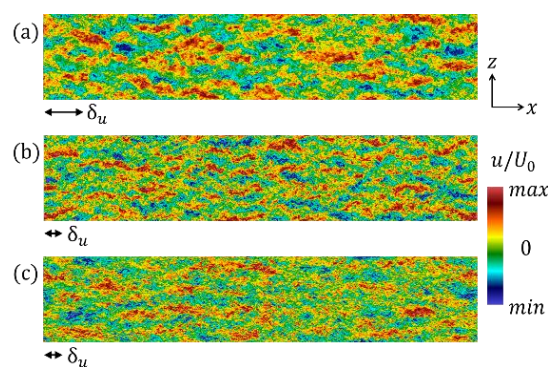


図2 x方向速度分布: (a)FSL, (b)WSL, (c)SSSL [3]

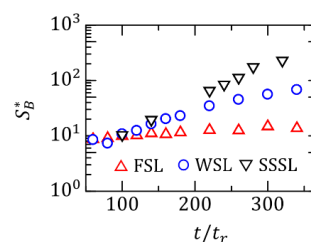


図3 せん断パラメータ S_B^* の時間変化($t_r = h_0/U_0$) [3]

による解析により、実プラントにおけるHAR発生メカニズムの解明や予測が可能であることを示唆している[10]。

文献

- [1] Watanabe, T. et al. “Hairpin vortices and highly elongated flow structures in a stably stratified shear layer”, *J. Fluid Mech.* (878), 37-61, (2019).
- [2] Kubota, K. “Hot air recirculation phenomenon in an air cooled LNG plant”, *日揮技術ジャーナル* (3), 1-8, (2014).
- [3] Akao, T. et al. “Vertical confinement effects on a fully developed turbulent shear layer”, *Phys. Fluids* (34), 055129, (2022).
- [4] Akao, T. et al. “The characteristics of elongated large-scale structures in a wall-confined shear layer”, *ICFD2022*, pp. 1-3, Sendai, Japan (2022).
- [5] Pope, S. B., “*Turbulent Flows*”, Cambridge University Press, (2000).
- [6] Lee, M. J. et al. “Structure of turbulence at high shear rate”, *J. Fluid Mech.* (216), 561-583, (1990).
- [7] Watanabe, T. et al. “The decay of stably stratified grid turbulence in a viscosity-affected stratified flow regime”, *J. Fluid Mech.* (949), A29, (2022).
- [8] Furuta, T. et al. “Direct numerical simulation of turbulent mixing in a heated swirling jet issued into a cross-flow”, *WCCM-APCOM 2022*, p. 1, Online, Japan (2022).
- [9] Hu, X. et al. “Model intercomparison study of jet in cross flow for prediction of hot air recirculation”, *WCCM-APCOM 2022*, p. 1, Online, Japan (2022).
- [10] Qian, S. et al. “Sensitivity study of turbulence models and mesh size for CFD simulations of jet in cross flow for prediction of hot air recirculation”, *WCCM-APCOM 2022*, p. 1, Online, Japan (2022).