

安定密度成層乱流における大スケール構造間の相互作用の解明

研究代表者：渡邊智昭（名古屋大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻）

密度成層乱流は大気境界層や海中に発達する混合層など様々な環境中に存在する。安定密度成層乱流には様々な流れ構造が存在し、各構造間の境界領域の重要性が指摘されている。また、内部重力波の放射が乱流の発展に大きな影響を与えることも予想されている。本研究では、安定密度成層下で発達する乱流場における内部重力波・乱流間の相互作用を解明することを目的とした直接数値計算(DNS)を行った。

本計算では安定密度成層中で発達する時間発展型混合層を計算対象とし、Boussinesq 近似された非圧縮性 Navier–Stokes 方程式を支配方程式として用いた。 U_0 を混合層上部と下部の速度差、 h_0 を混合層の初期厚さ、 ν を動粘度、 N を Brunt–Väisälä 周波数とし、Reynolds 数 $Re = U_0 h_0 / \nu$ を 2000、Froude 数 $Fr = 2U_0 / h_0 N$ を 10, 20 とした DNS を行った。計算領域を平均流れ方向(x)に $48h_0$ 、スパン方向(y)に $28h_0$ 、鉛直方向(z)に $80h_0$ とし、それぞれの方向に 1200, 1500, 800 点の格子点を用いた。数値計算コードは部分段階法に基づいており、時間進行には三次 Runge-Kutta 法を、空間離散化には四次精度(x, y 方向)と二次精度(z 方向)の完全保存型中心差分を用いた。同計算ではスーパーコンピュータ CX2 を用いた。

図 1(a)に x - z 平面でのエンストロフィ分布を示す。混合層の中心付近では小スケール乱流構造が生成されており、混合層外部には内部重力波により生成された大きいスケールの構造が見られる。また図中には乱流領域と外部領域の境界部分を拡大して示している。本研究では内部重力波の影響を直接受けないポテンシャル渦を用いて流れ場から乱流領域を検出し、図のように境界を原点とする座標系 ζ_I で統計量を算出した。図 1(b)には運動エネルギーの鉛直方向への輸送フラックスの平均値 $\langle pw \rangle_I$ を ζ_I に対して示した(p : 圧力, w : 鉛直方向速度)。 $\langle pw \rangle_I$ は内部重力波によるエネルギー輸送量に関連している。なお、比較のためフラックスは乱流内部での運動エネルギー散逸率 $\langle \epsilon \rangle_V$ で正規化されている。境界面上 ($\zeta_I = 0$) で $\langle pw \rangle_I / \langle \epsilon \rangle_V \approx 3$ であり、乱流から外部へ放出される内部重力波が乱流内部のエネルギー収支に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。また、乱流と外部流体を分ける境界領域 ($\zeta_I \approx 0$) を通過する流体の運動の特性について明らかにした (発表論文 1)。

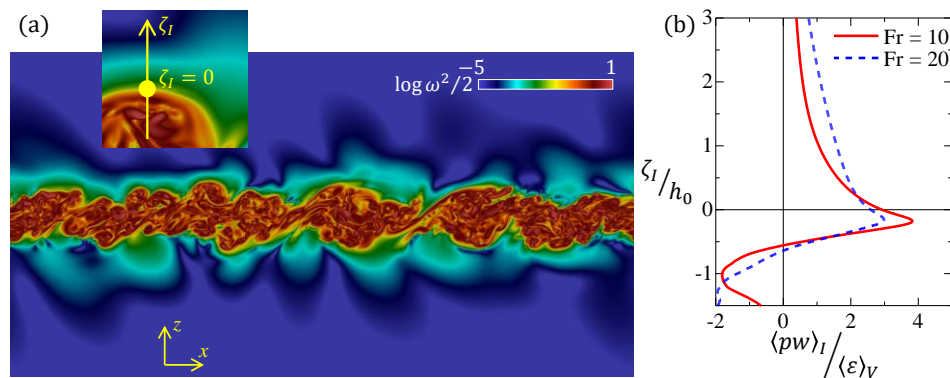


図 1 (a) x - z 平面でのエンストロフィ分布 ($Re = 2000, Fr = 10$); (b) 鉛直方向の運動エネルギーフラックス。

発表論文 1: T. Watanabe, C. B. da Silva, K. Nagata, Multi-particle dispersion during entrainment in turbulent free-shear flows, J. Fluid Mech. Vol. 805 R1 (2016), pp.1-12.