

成層せん断乱流の空間構造

課題責任者

花崎 秀史 京都大学大学院工学研究科

著者

花崎 秀史^{*1}

^{*1} 京都大学大学院工学研究科

キーワード：成層流体、せん断乱流、空間構造、空間スペクトル

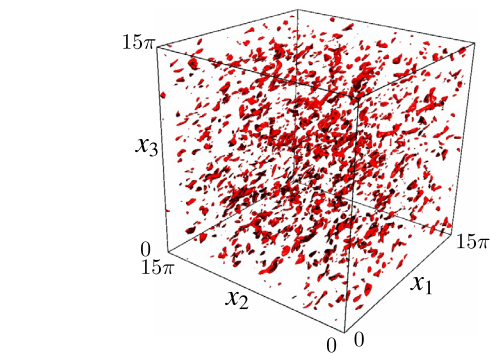
1. 成層せん断乱流の実空間構造

海洋や大気は基本的に密度成層流体であり、その中で「乱流」については、これまで室内実験、数値計算、理論解析により研究されてきた。しかし、乱流の基礎研究としての直接数値計算（あるいはLarge Eddy Simulation）の多くは、主流のせん断（速度勾配、特に、水平な主流の鉛直速度勾配）がない場合を対象に行われてきた[1], [2]。現実の流れではせん断があるのが普通であるにもかかわらず、これまで成層せん断乱流の研究が少ないのは、成層乱流という系が、せん断がなくとも十分複雑であることによる。

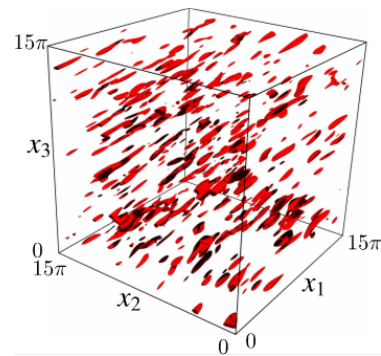
本研究では、水平な主流の速度が鉛直方向に変化する（速度勾配を持つ）成層せん断乱流について直接数値シミュレーションを行った。また、その結果を線形近似理論であるRDT(Rapid Distortion Theory)の結果[3]と比較することにより、成層、及び、せん断の効果を調べた。計算領域は、3 方向に周期境界条件を持つ立方体領域である。本研究では、計算機の問題により、逆数が成層を形成する物質の拡散係数の大きさを表すプラントル数は $Pr=1$ に固定した。これは、塩分の700に比べてかなり小さいが、まずその場合について調べることとした。

図1は、せん断の強さを表すシア数 $Sh=1$ 、逆数が成層の強さを表すフルード数 $Fr=1$ 、プラントル数 $Pr=1$ のときの計算結果である。運動エネルギー($KE=(1/2)u_i^2$, $i=1, 2, 3$)の空間分布の時間変化を等値面で表している。初期条件として等方性の乱れを与えているため、無次元時刻 $t=Ut/L$ (U :初期速度のrms, L :初期積分長)が、(a)のように小さい($t=2$)の時には、等方的な構造をしているが、時間とともに棒状の構造が現れる。棒状構造が水平面となす角は、時間と共に小さくなるが、その角度は、せん断で決まり、成層の強さによらない。すなわち、大まかな構造は、成層のないせん断乱流と同じである。ただし、棒がより扁平である点に成層の効果が表れている。ポテンシャルエネルギーも同様の空間分布となる。

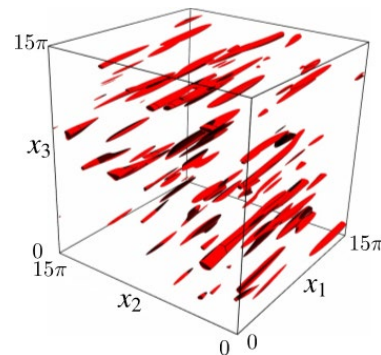
棒状構造が水平面となす角度がせん断のみで決まることを示したのが図2である。これは、図1のような構造の鉛直断面(x_1-x_3)を、異なる Sh , Fr について示したものである。(a)~(c)は、全て $t=2$ の時の結果であるが、 Sh , Fr が異なるため、それらで定義されるせん断時間： $t_s=Sh \times t$ 、及び、浮力時間： $t_b=t/Fr$ 、が異なる。



(a) $t=2$



(b) $t=10$



(c) $t=20$

図1 運動エネルギー($KE=(1/2)u_i^2$)の空間分布の時間変化($Sh=1$, $Fr=1$, $Pr=1$)。初期条件は等方で小さい丸い構造の集まりだが、時間と共に棒状の構造となる。

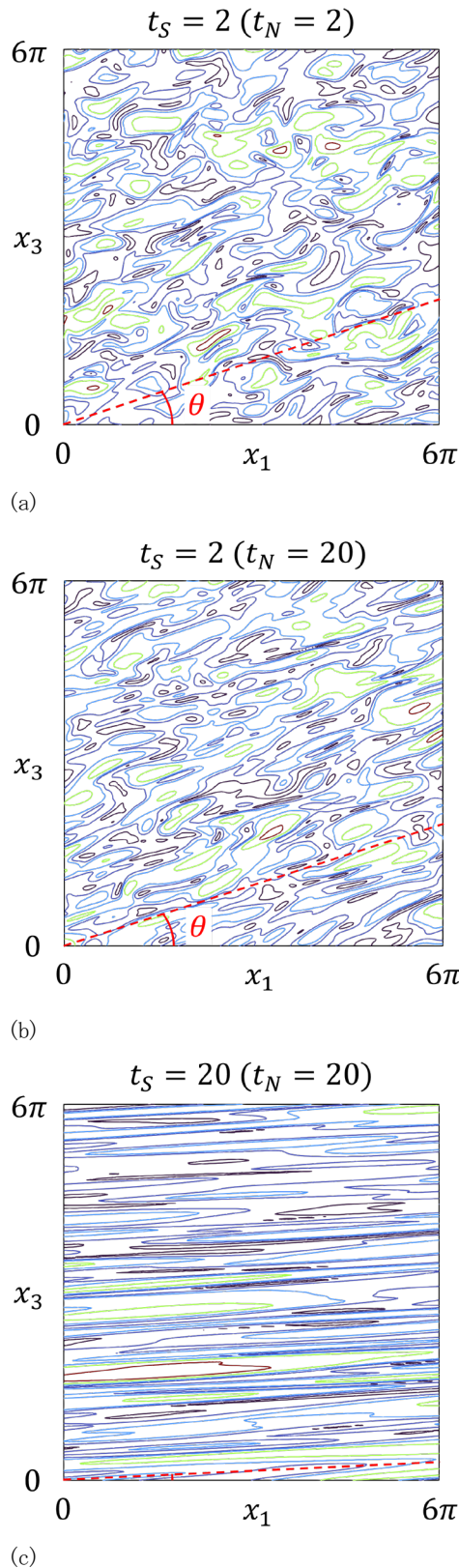


図2 運動エネルギーの鉛直断面内の分布($t=2$)。棒状構造が水平面となす角 θ は、せん断時間： $t_s=Sh \times t$ で決まり、浮力時間： $t_N=t/Fr$ に依らない。すなわち、せん断だけで決まり、成層の強さには依存しない。

2. 成層せん断乱流の空間スペクトル

成層及びせん断の強さが、流れの空間構造のどのスケールに影響を与えているかを調べるため、図3に、時刻 $t=1.5$ における、運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの空間スペクトル $E_K(k)$, $E_P(k)$ を示した。実線が直接数値シミュレーション(DNS)の結果、破線が線形理論(RDT)の結果である。低波数領域($k < k_0$ 及び $k < k_c$)では、DNSとRDTはよく一致している。ここで、 k_0 はOzmidov波数、 k_c はCorrsin波数と呼ばれる波数であり、Ozmidov波数以下の低波数領域では(すなわち、より大きいスケールでは)成層効果が強く、Corrsin波数以下では、せん断効果が強くなる。低波数(大スケール)では、成層及びせん断効果が強い結果、相対的に線形効果が卓越する。そのため、DNSとRDTの結果がよく一致すると考えられる。

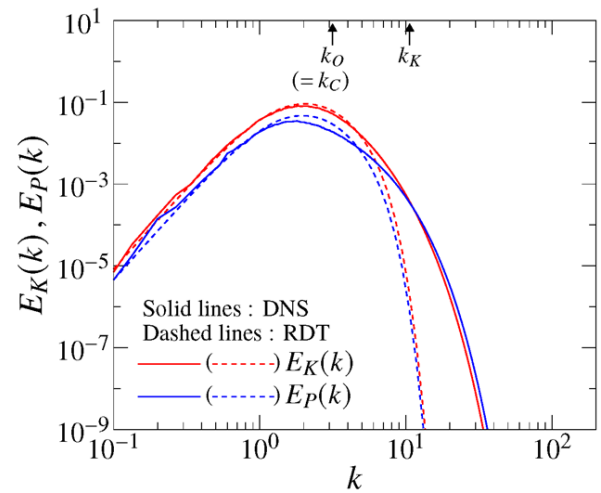


図3 運動エネルギースペクトル $E_K(k)$ とポテンシャルエネルギースペクトル $E_P(k)$ ($t=1.5$)。実線が直接数値シミュレーション(DNS)、破線が線形理論(RDT)。低波数ではDNSとRDTが一致している。

謝辞

本研究成果は令和7年度地球シミュレータ公募課題により、海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用して得られたものである。

文献

- [1] T. Gerz, U. Schumann and S. E. Elghobashi, "Direct numerical simulation of stratified homogeneous turbulent shear flows," J. Fluid Mech. 200, pp. 563-594, 1989.
- [2] F. G. Jacobitz, S. Sarker & C. W. Van Atta, "Direct numerical simulations of the turbulence evolution in a uniformly sheared and stably stratified flow," J. Fluid Mech. 342, pp. 231-261, 1997.
- [3] H. Hanazaki and J. C. R. Hunt, "Structure of unsteady stably stratified turbulence with mean shear," J. Fluid Mech. 507, pp. 1-42, 2004.