

地球流体乱流の数値解析

木村 芳文

名古屋大学大学院多元数理科学研究科

地球流体の特徴は流体が薄い球殻内を自転と重力の影響の下に運動していることにある。本研究の目的は大規模数値シミュレーションを通してこの地球流体の持つ特徴を数理的に理解することにある。自転と重力の影響は流体にとっては流れの性質が鉛直・水平方向や回転軸方向に応じて異なるという力学的な異方性をもたらすと考えられる。そしてこの力学的異方性はこれまでに多く考察されてきた等方的な乱流とは大きく異なる描像を乱流統計にもたらすことが期待される。このような異方性乱流の統計的性質を明らかにすることが本研究の大きなテーマである。具体的に本年度は昨年度に引き続いて成層乱流のエネルギースペクトルの解析を行った。

成層乱流のエネルギースペクトルの特徴は k_{\perp} を水平方向の波数 ($=\sqrt{k_x^2+k_y^2}$) とするとき、 k_{\perp} がある波数より低波数側で k_{\perp}^{-3} 、高波数側で $k_{\perp}^{-5/3}$ という遷移をすることにある。このことは海洋や大気の観察では報告されていたが、それを裏付ける大規模な数値計算はこれまでになかった。我々は成層の効果を取り入れた Navier-Stokes 方程式を Boussinesq 近似の下で数的に解くことでこの問題を考察した。解析は速度場をトロイダル成分 (回転成分: ϕ_1) とポロイダル成分 (発散成分: ϕ_2) に分けて行なった。計算は 1024^3 の格子点を用いて擬スペクトル法を用いて行ない、並列化は領域を z 軸に垂直のスラブに等分し、MPI を用いて計算を行った。

Figure 1 はトロイダル成分 ϕ_1 (これはほぼ速度の水平方向成分に対応すると考えられる) のエネルギースペクトルを横軸を k_{\perp} として成層の強さを表す浮力振動数 (Brunt-Väisälä 振動数) $N^2 = 1, 10, 50, 100$ の場合に重ねたものである。低波数側では N の値に依らずにほぼ k_{\perp}^{-3} の特徴を示すのに対して高波数側では、傾きは $k_{\perp}^{-5/3}$ のように振るまうが、係数は N の値に応じて変化している事が観察される。このスペクトルの遷移を時間的に追ったのが次の Figure 2 である。最初に大きいスケールからの k_{\perp}^{-3} スペクトルが形成された後に小さいスケールの $k_{\perp}^{-5/3}$ スペクトルが持ち上がってきていることが分かる。

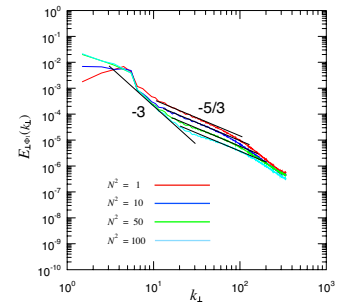


Figure 1: $N^2 = 1, 10, 50, 100$ における Φ_1 スペクトル

$N^2 = 100$ の場合についてその 3次元の波数に対応する全フラックス関数 (青線) と散逸を波数で積分したもの (赤線) を示したものが Figure 3 である。全フラックスは一樣等方性乱流の場合と同様に外力が与えられている波数付近で大きく値を変化させ、ある波数区間でほぼ一定値となり、高波数で 0 に戻っている。このフラックスが一定値をとる波数区間はコロモゴロフの慣性領域に対応するものであると言える。

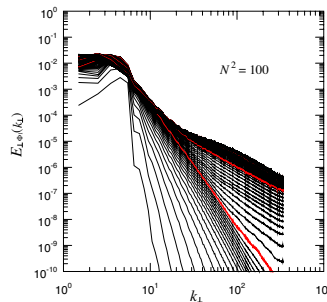


Figure 2: $N^2 = 100$ の時の Φ_1 スペクトルの時間変化

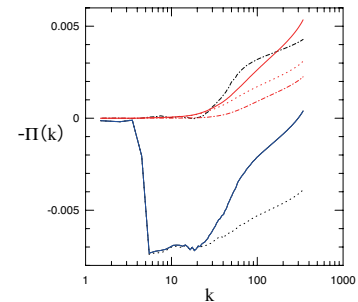


Figure 3: フラックス関数と散逸の波数積分

さらにフラックス関数を Φ_1 エネルギーと Φ_2 エネルギーに対応する部分に分けてみると、ほぼスペクトルの形が遷移する波数付近で Φ_2 に対応するフラックスが値を大きく変化させることが分かる。 Φ_2 エネルギーは乱流の重力波成分 (発散成分) であることを考えると、 $k_{\perp}^{-5/3}$ スペクトルに対応するのは重力波の破碎で生じた小スケールによるものであることが推測される。

参考文献: Y. Kimura and J. R. Herring, Energy spectra of stably stratified turbulence, accepted to *Journal of Fluid Mech.*