

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。上述の自転と重力影響は流体にとっては方向に応じて流れの性質が異なる異方性をもたらすと考えられ、この異方性はこれまでに一般的に考察されてきた等方的な乱流とは大きく異なる描像をその統計にもたらすことが期待される。このような異方性をもつ乱流の統計的な性質について考察することが本研究の大きなテーマであると言える。具体的には以下のような内容を考察することを研究計画に挙げた。

[1] 回転成層乱流の2次元性 / 3次元性とエネルギー輸送

[2] 大気および海洋における拡散、混合、輸送問題

このうちまず最初に [1] の問題の特に成層乱流の特徴としてそのエネルギースペクトルの問題を考察した。以下にその要約を述べる。

成層乱流のエネルギースペクトルについてはその特徴として 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} で高波数側で $k_{\perp}^{-5/3}$ という遷移をすることが海洋や大気の観測で報告されていたが、それを裏付ける大規模な数値計算はこれまでになされていなかった。我々は成層の効果を取り入れた Navier-Stokes 方程式を Boussinesq 近似の下で数値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 z 軸を等分し、MPI で行なった。

右図はトロイダル成分 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。ここでは次のようなガイドラインを用いてエネルギースペクトルのスケールングを行なった。(1) 低波数のスケールングは N に依らない、(2) Kolmogorov 係数は異方性をもつ乱流でも普遍的である。これらの2つの仮定より以下のスケールングを考察した。

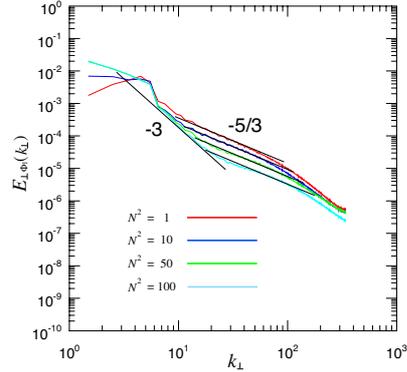


Figure 1: ϕ_1 spectra as a function of k_{\perp} for $N^2 = 1, 10, 50, 100$

$$E_{\perp\phi_1}(k_{\perp}) = \begin{cases} \alpha \eta_{\perp\phi_1}^{2/3} k_{\perp}^{-3} & (k_{\perp} < k_c) \\ C_K \varepsilon_{\perp\phi_1}^{2/3} k_{\perp}^{-5/3} & (k_{\perp} > k_c) \end{cases}, \quad (1)$$

ここで

$$\varepsilon_{\perp\phi_i} = 2\nu \int_0^{\infty} k_{\perp}^2 E_{\perp\phi_i}(k_{\perp}) dk_{\perp} \quad \eta_{\perp\phi_i} = 2\nu \int_0^{\infty} k_{\perp}^4 E_{\perp\phi_i}(k_{\perp}) dk_{\perp} \quad (i = 1, 2). \quad (2)$$

である。

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