

A simple subgrid-scale model for astrophysical turbulence

横井喜充(東京大学生産技術研究所)

利用カテゴリ XC-B

天文・宇宙物理学現象に現れる回転と密度変動を伴う乱流中での大規模構造形成と乱流輸送が示す非線型ダイナミクスの基本的性質について、高分解能直接数値計算 (direct numerical simulation: DNS) を用いて調べる。米Boulderの国立大気科学研究所 (National Center for Atmospheric Research: NCAR) で開発された GHOST (Geophysical High-Order Suit for Turbulence) コードをHC50用に最適化し、三次元流体・回転・不均一密度のボックス配位でのDNSを行った。三次元流体乱流で構造形成や輸送抑制が起きる条件を明らかにし、DNSの結果と比較することで、ヘリシティを通じて構造効果を組み入れた乱流モデルの妥当性を検証する。

GHOSTコードの最適化とフィルター操作の実装

前年度までの最適化作業の成果で、GHOSTコードをCfCAのHC50での使用するためのパラメータ設定などを決定し、GHOSTによる計算が実現可能になった。GHOSTコードのコア数に対するスケージングは図1の通り。また、全てのスケールの運動を解く直接数値計算とは違い、乱流モデルでは平均操作を用いて粗視化を行い、解像しないスケールの物理量を解像するスケールの物理量でモデル化する。したがって、乱流モデルを検証するために、DNSコードにフィルター操作を組み入れる。シャープカット・フィルター、Gaussフィルター、Lorenzフィルターなどを実装した。

乱流輸送を評価するモデルの検証

輸送促進 (乱流粘性や乱流拡散) が時と場所に応じて同じく乱流によって抑制されることが期待される。最近利用者は、不均一なヘリシティ (速度=渦度相関) が存在すると、絶対渦度 (回転角速度と相対渦度) と結びついて渦粘性の効果を打ち消し、輸送が抑制され大規模渦構造が生成されることを示した (図2-図4) [1]。この非一様ヘリシティ効果は、ラージ・エディ・シミュレーション (Large Eddy Simulation: LES) のサブグリッド・スケール (subgrid-scale: SGS) モデルに拡張することが可能である。通常の渦粘性の輸送促進効果に加えて、ヘリシティを通して構造効果を乱流モデルに組み入れるSGSモデルとして期待されている[2]。

回転と密度変動がある系では一般に (非一様な) ヘリシティが存在するので、三次元・回転・不均一密度乱流のDNSデータを粗視化して、GS (grid-scale) の物理量とSGSの乱流統計量 (エネルギー、ヘリシティなど) との関係性を調べることで、非一様ヘリシティを用いたSGSモデルの検証を行うことが可能となる。その比較のためのDNSデータをXC50を用いた三次元・回転・不均一密度乱流の直接数値計算で取得している (図2-4)。SGS応力と通常のSmagorinskyモデルとの相関を示したのが図5、SGSヘリシティの項も加えたヘリシティSGSモデルとの相関を示したのが図6である。ヘリシティSGSモデルの方が実際のSGS応力をよく表現することがわかる。DNSの分

解能, 外力のスケール, フィルターのスケールなど, 今後吟味すべき点は多いが, ヘリシティ効果をモデルに組み込むべきことは, この初期成果からも明らかである.

XC50を用いた以上の研究を通して, 天文・宇宙物理学で重要な役割を果たす三次元・回転・不均一密度乱流中での構造形成と輸送評価に基本的な貢献をする.

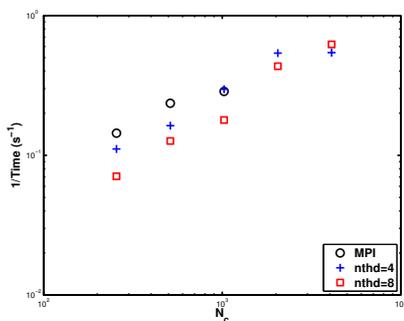


図1: GHOSTのコア数スケーリング

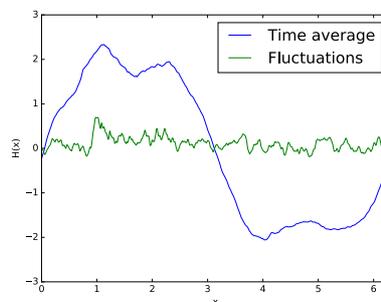


図2: 平均とゆらぎヘリシティの空間分布

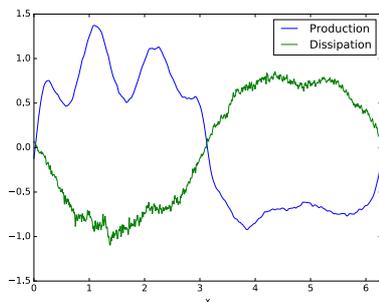


図3: ヘリシティ生成率と散逸率

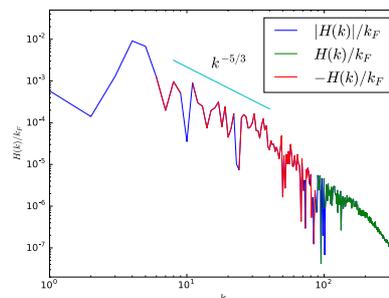


図4: ヘリシティのスペクトル

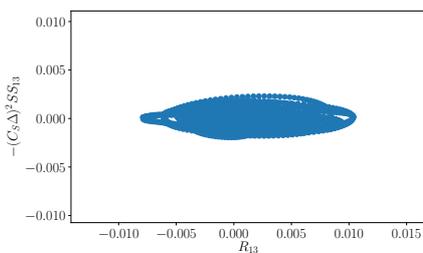


図5: SGS応力とSmagorinskyモデルの相関

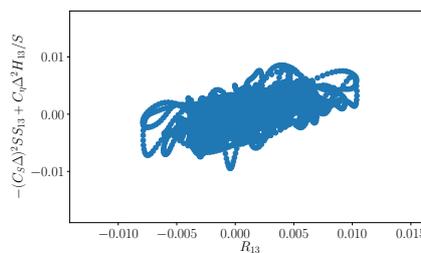


図6: SGS応力とヘリシティSGSモデルの相関

文献

- [1] Yokoi, N. & Brandenburg, A. “Large-scale flow generation by inhomogeneous helicity,” *Phys. Rev. E*, **93**, 033125-1-14 (2016).
- [2] Yokoi, N. & Yoshizawa, A. “Subgrid-scale model with structural effects incorporated through the helicity,” *Progress in Turbulence VII*, Springer Proceedings in Physics **196**, (2017) DOI 10.1007/978-3-319-57934-4_17.