

ケルビンヘルムホルツ乱流における流れ脈動過程の特異値分解解析 Singular value decomposition analysis on Flow Pulsation in Kelvin-Helmholtz turbulence

佐々木真^{1,2,3}, 小林達哉⁴, R. O. Dendy^{2,3,5}, 河内裕一⁶, 荒川弘之⁷, 稲垣滋^{1,2}
M. Sasaki^{1,2,3}, T. Kobayashi⁴, R. O. Dendy^{2,3,5}, Y. Kawachi⁶, H. Arakawa⁷, S. Inagaki^{1,2}

九大応力研¹, 九大極限プラズマ研究連携セ², ウォリック大³,
核融合研⁴, カラム研⁵, 九大総理工⁶, 島根大⁷

RIAM Kyushu Univ.¹, RCPT Kyushu Univ.², Warwick Univ.³, NIFS⁴,
CCFE⁵, IGSES Kyushu Univ.⁶, Shimane Univ.⁷

プラズマには普遍的に流れが存在し、流れの空間不均一性はケルビンヘルムホルツ (Kelvin-Helmholtz, KH) 不安定性を駆動する。例えば、地球磁気圏近傍ではKH不安定性による渦によって磁気圏にプラズマが輸送され、オーロラや磁気嵐が起こる[1]。磁場閉じ込めプラズマにも自発的に/外部運動量印加により強い流れが存在する。乱流が自発励起する帯状流によるKH不安定性によって帯状流の飽和レベルが規定される機構が提案されており[2]、KH乱流の特性がプラズマの閉じ込め性能を規定している可能性がある。基礎プラズマ実験ではシーす条件を満たすように強い周方向流れが存在するため、KHが本質的な乱流源となり得るとの研究もある[3]。近年では、ダイナミックなKH乱流がシミュレーションで発見され[4, 5]、アバランチ状の輸送を駆動することから、KH乱流の非線形ダイナミクスの理解が喫緊の課題となっている。

本研究では、KH乱流のダイナミクスを理解すべく、円筒磁化プラズマにおける大域的乱流シミュレーションを行った。長谷川・若谷方程式に平行流が結合した簡約流体モデルに基づき、電子密度・静電ポテンシャル・平行流れ場の3場の発展を計算した。KH乱流が支配的となるよう、粒子ソースはドリフト波が安定な程度に抑え、渦度ソースを導入することでKH乱流を実現した。揺動が磁場方向に対称な、KH不安定性の特徴を持つ揺動場の非線形状態が得られた。渦度ソースの強度をパラメタとして、強度を変えたシミュレーションを行ったところ、ソース強度の小さい場合は定常的な乱流状態が、ソース強度の大きな場合はリミットサイクル的な自励振動が得られた[5]。この自励振動は、KH乱流の周期よりも長いサイクルを持ち、背景流れ場の脈動を伴うことが分かった。得られたデータに

特異値分解を適用したところ、背景プラズマ流の脈動・コヒーレントKH揺動・帯状流・間欠的揺動の4つの「構造」に分類できる事が指摘された。さらに、渦度方程式に基づき、各「構造」間のエネルギー移送の定式化を行い、その挙動を抽出することに成功した。エネルギー移送の解析から、間欠揺動がコヒーレント揺動と帯状流の結合によって生まれていること、駆動された間欠的揺動がリミットサイクル振動の維持に本質的な役割を担っていることが分かった。

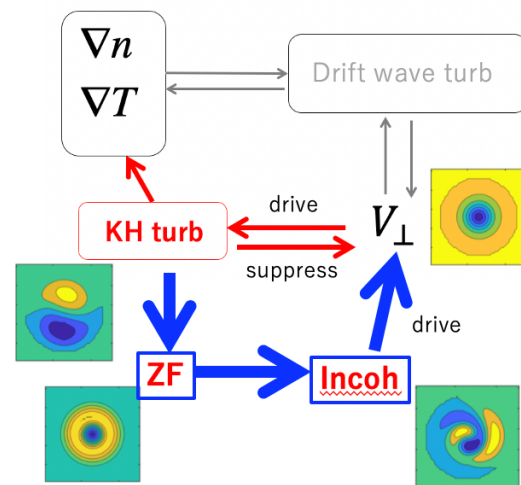


図1: 特異値分解で抽出されたリミットサイクル振動を伴うKH乱流の本質的「構造」。

References

- [1] H. Hasegawa, et. al., Nature, **430**, 755 (2004).
- [2] E. J. Kim, et. al., Phys. Plasmas, **9**, 4530 (2002).
- [3] B. N. Roger, P. Ricci, Phys. Rev. Lett., **104**, 225002 (2010).
- [4] Y. Lang, et. al., Phys. Rev. E, **100**, 033212 (2019).
- [5] M. Sasaki, et. al, Phys. Plasmas, **26**, 042305 (2019).
- [6] M. Sasaki, et. al., submitted to Plasma Phys. Control. Fusion (2020).