

有限ベータプラズマにおけるドリフト波乱流の飽和機構
Saturation mechanism of drift-wave turbulence in finite-beta plasmas

増井英陽, 石澤明宏, 今寺賢志, 岸本泰明, 中村祐司
 Hideaki Masui, Akihiro Ishizawa, Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, and Yuji Nakamura

京都大学エネルギー科学研究科
 Graduate School of Energy Science, Kyoto University

JT-60SAにおけるトカマク実験に代表されるように、経済的な核融合炉実現のためにトカマクの高ベータ化が目指されている。ここでベータ($\beta=8\pi p/B^2$)は規格化された圧力である。有限ベータのトラスプラズマにおけるドリフト波乱流は異常輸送の原因として、局所近似を用いたジャイロ運動論シミュレーションによって精力的に調べられてきた。しかし、これらのシミュレーションでは、有限ベータにおいて、しばしば乱流の飽和状態を得られない。この乱流が飽和しない現象(runaway/nonzonal transition)はゾーナル流が磁場揺動の影響を受けて、成長しないため起きるものとして理解されている。その結果有限ベータにおけるイオン温度勾配(ITG)乱流及び運動論的バルーニングモード(KBM)乱流は十分に理解されていない。一方、近年の研究で、大域的電磁ジャイロ運動論シミュレーションでは有限ベータプラズマにおいても乱流の飽和状態が得られることが明らかとなった[1]。

そこで、本研究では、大域的電磁ジャイロ運動論シミュレーションコードGKNET[2]を用いて、Cyclone Base Case 状のトカマクプラズマにおいて大域的電磁ドリフト波乱流の飽和が得られる物理的機構を調べる。我々は高ベータで不安定化するKBM乱流と、低ベータで不安定化しこれまでの先行研究で帯状流により飽和することが知られているITG乱流の非線形シミュレーションを行い、比較・解析することで飽和メカニズムを調べた。解析においては、非線形モードカップリングを非線形エントロピー移送に基づき評価すると共にシミュレーションの大域性にも留意した。

トロイダル波数空間内の非線形エントロピー移送を解析した結果(図1)、有限 β のKBMはITGと同様、主にゾーナル成分($n=0$; トロイダルモード数)を静電的な応力で生成することによって飽和することが新たに示された。また、初期飽和においては、ITG, KBM共に不安定なモードから $n=1,2$ 等の線形安定な低波数へのエントロピー移送も飽和に寄与することが示された。さらに、KBMによって生成されたゾーナルモードの中でゾーナル圧力による準線形安定化効果が重要で

あることも分かった。

局所近似で飽和しない有限 β において、大局シミュレーションで飽和が得られる最も大きな要因は、大域的ゾーナルモードの生成であることが明らかとなった。このゾーナルモードへのエントロピー移送は、動径方向に広がった不安定性のモード構造のピークでなくその脇で起こる(図2)。その結果、モードのピーク位置で生じる強い磁場揺動の影響を受けにくく、効率よく大域的なゾーナルモードが生成される。

本研究は、有限 β における乱流の飽和が、大域的なゾーナルモード生成により起こることを明らかにした。

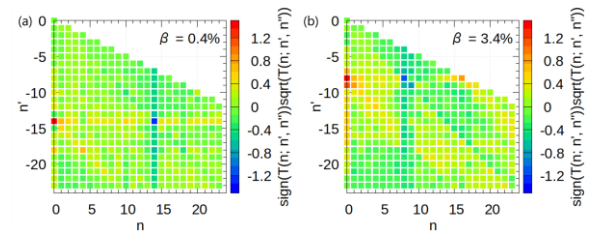


図1.(a) ITG 乱流($\beta = 0.4\%$)および(b) KBM 乱流($\beta = 3.4\%$)のトロイダル波数空間における非線形エントロピー移送 $T(n; n', n'')$ (振幅は平方根)の時間積分。 $n+n'+n''=0$ を満たすトロイダルモード数 n', n'' のモードの相互作用により n のモードへエントロピーが移送される。

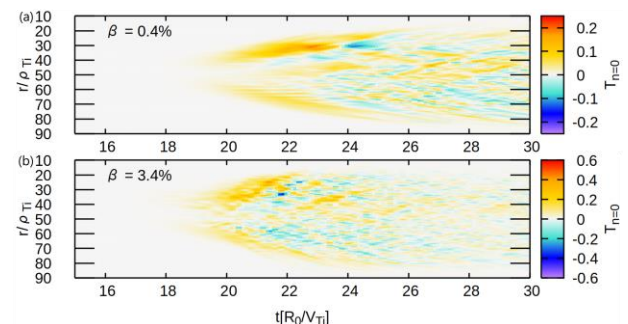


図2.(a)ITG 乱流($\beta = 0.4\%$)および(b)KBM 乱流($\beta = 3.4\%$)の $n=0$ モードへのエントロピー移送の動径方向分布の時間発展。

- [1] A. Ishizawa, K. Imadera, Y. Nakamura, and Y. Kishimoto, Phys. Plasmas **26**, 082301 (2019).
 [2] K. Imadera, Y. Kishimoto, K. Obrejan, T. Kobiki, and J. Q. Li, IAEA-FEC (2014).