

SV-3

位相空間乱流と乱流プラズマ理論の新展開

伊藤 公孝^{1,2}、伊藤 早苗^{2,3}

Kimitaka ITOH^{1,2}, Sanae-I. ITOH^{2,3}

¹核融合科学研、²九大伊藤極限プラズマ研究連携センター、³九大応力研

¹NIFS, ²Itoh Research Center for Plasma Turbulence, Kyushu Univ., ³RIAM, Kyushu Univ.,

1. はじめに

近年、プラズマ乱流研究に格段の進展があり、マイクロ揺動がプラズマ勾配によって励起され定常乱流を作る、という従来の描像に代わり、マイクロな乱流とともにメソスケール・マクロスケール揺動が非線形不安定化によって励起され、多くのスケールの乱流と構造が共存する、乱流構造で記述する描像へと発展している。多スケール乱流の理論構造[1,2]、帯状流を含む揺動の実験[3,4]、その非線形過程の定量的計測[4]、長距離走間揺動の実測[5]などについて成果が取りまとめられている。

これらの進展は、中性流体乱流や宇宙天体の乱流現象の理解にも波及するもので乱流構造形成の普遍的な側面を描くものである。その一方、プラズマに特有な、粒子運動と場の非線形相互作用の研究、即ち位相空間乱流の研究が今後 10-20 年のプラズマ物理の大きなチャレンジとなるだろう。この講演では、位相空間の granulation と輸送現象、位相空間ダイナミクスと圧力勾配乱流の相互作用、などの課題を例として選び研究展望を述べる。

2. 位相空間の granulation と輸送現象

分布関数を $f = \langle f \rangle + \delta f$ の様に平均と摂動に区分し、摂動 δf を coherent な成分 f^c と統計的乱雑成分 (granulation) に分ける: $\delta f = f^c + \tilde{f}$ 。従来、coherent な成分 f^c を取りその非線形効果を研究するのが主であったが、統計的乱雑成分 \tilde{f} が重要な働きをするので、今後その項を考慮した乱流物理の構築が急務である[7]。

位相空間の近い二点 (x_1, v_1) 、 (x_2, v_2) 間の差座標 $(x, v) = (x_2 - x_1, v_2 - v_1)$ を考えると、その二転間での揺動の相関が

$$\langle \delta f(1) \delta f(2) \rangle \sim \ln(x), \ln(v)$$

という対数的増大する ($x, v \rightarrow 0$ での発散は粒子衝突でカットオフ) 事が分かっている[6]。coherent な成分は $x, v \rightarrow 0$ でも regular であり、singular な振る舞いは統計的乱雑成分 \tilde{f} があるためである。ポテンシャル揺動があれば、非線形効果の結果統計的乱雑成分 \tilde{f} が発生する。この統計的乱雑成分 \tilde{f} によって励起される揺動ポテンシャルは、分散関係を満たさない (non-mode)。 (通常考えられている) 分散関係を満たすモード成分と、この non-mode 成分の双方を考慮する事によって、平均分布関数の発展方程式が、拡散と減速の双方を含んで定式化され、緩和を適切に表現する事が出来る[6] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle f \rangle = \frac{\partial}{\partial v} D_{qt} \frac{\partial}{\partial v} \langle f \rangle - \frac{\partial}{\partial v} \langle E \tilde{f} \rangle$$

右辺の第二項が統計的乱雑成分 granulation の寄与であり、従来取り扱ってきた拡散校とは異なる輸送項が現れ、輸送現象・緩和現象に大きな影響を持つ。具体的な課題に対する研究も進展している。本学会でも、[7]等で成果が報告されている。

3. 位相空間ダイナミクスと圧力勾配乱流の相互作用

核融合を目指したプラズマ閉じ込め研究では、ドリフト波などのように圧力勾配不安定

性やその乱流が重要と考えられている。「圧力」は、速度変数を平均した実空間で観測される物理量なので、圧力勾配不安定性やその乱流の解析では、粒子運動と場の非線形相互作用は散逸係数などに繰り込まれるのが普通のアプローチである。しかし、高周波加熱のような外部からの加熱入力の変動が、プラズマ輸送時間より極端に短い時間で（圧力勾配などの巨視的変数の変化なしに）乱流強度や輸送流を変化させる事が観測され[8]、圧力勾配などの従来から考えられている **control parameter** 以外に、新しい駆動パラメタを把握する必要を示している。プラズマ輸送時間より極端に短い時間で乱流強度や輸送流を変化させる機構として、位相空間ダイナミクスと圧力勾配乱流の相互作用が着想されている[9]。

プラズマの分布関数の発展を記述する方程式では、位相空間でのソース項（粒子源やエネルギー源に対応する）を考えるが、そのソース項 $S[f; \mathbf{v}, x, t]$ は、分布関数に揺動 $f = f_0 + \tilde{f}$ が存在すると、揺動成分を含む事になる。その結果、kinetic equation は

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla + \frac{e_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} \right) \tilde{f} = - \frac{e_s}{m_s} \tilde{\mathbf{E}} \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f_0 + \frac{\delta S[f_0; \mathbf{v}, x, t]}{\delta f_0} \tilde{f} + \tilde{\mathcal{C}}$$

右辺第一項は不均一性による励起や共鳴などを含み、第二項が、新しく指摘された勾配駆動乱流と位相空間ダイナミクスの結合を示す項である。第三項は、粒子衝突による緩和を示している。結合項 $(\delta S[f_0; \mathbf{v}, x, t] / \delta f_0) \tilde{f}$ を $\gamma_{\text{heat}}(\mathbf{p}) \tilde{f}$ のようにあらわすと、位相空間の変化率を示す係数 $\gamma_{\text{heat}}(\mathbf{p})$ は加熱の on/off に応じて、瞬時に応答する。

この効果によって、補足粒子不安定性などの不安定性の成長率が瞬時に変化する事が示されている[10]。nonlocal 輸送現象にも関連する、（非線形過程で励起される）長距離相関揺動への影響も解析されている。結合項 $(\delta S[f_0; \mathbf{v}, x, t] / \delta f_0) \tilde{f}$ を速度空間でメントを取り、係数 $\gamma_h = \partial \left(\int d^3 \mathbf{v} \mathbf{v}^2 S \right) / \partial \left(\int d^3 \mathbf{v} \mathbf{v}^2 f \right)$ を用いて加熱入力のコヒーレントな変動項を $\gamma_h \tilde{p}$ と表現する。長距離相関揺動の非線形緩和率 Γ_1 は今考えている結合過程によって $2\Gamma_1 = \chi_0 k_{\perp}^2 - \gamma_h$ となる。その結果、揺動強度は

$$\langle \varphi_1 \varphi_1 \rangle = \frac{1}{1 - \gamma_h \chi_0^{-1} k_{\perp}^2} \langle \varphi_1 \varphi_1 \rangle_0$$

となり、加熱の影響のない場合 $\langle \varphi_1 \varphi_1 \rangle_0$ と比較して増大する事が分かる。加熱が印可されたときに γ_h が増加する事から分かるように、揺動強度の増加は、巨視的変数の変化がなくとも加熱が印可されたときに起きうる。

謝辞： 本研究発表の準備に於いて、P.H. Diamond, 福山淳, M. Lesur, Y. Kosuga, 稲垣滋, 藤澤彰英, 居田克巳他の方々との議論に感謝します。科学研究費基盤研究(21224014, 23244113)、核融合科学研究所共同研究及び九州大学応用力学研究所共同研究の援助を受けました。

- [1] Itoh, S.-I. & Itoh, K., *Plasma Phys. Control. Fusion* **43**, 1055-1102 (2001).
- [2] P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh, T.S. Hahm, *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** R35-R161 (2005).
- [3] A. Fujisawa: *Nucl. Fusion* **49** (2009) 013001
- [4] S.-I. Itoh: *J. Plasma Fusion Res.* **86** (2010) 334-370
- [5] S. Inagaki *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **107** 115001 (2011).
- [6] P. H. Diamond, S.-I. Itoh and K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010) .
- [7] M. Lesur, et al., this conference (29aB02)
- [8] S. Inagaki, et al.: 24th IAEA Fusion Energy Conference (2012), IAEA CN-197/EX/10-1
- [9] S.-I. Itoh and K. Itoh: *Sci. Rep.* in press (2012)
- [10] S.-I. Itoh and K. Itoh: 24th IAEA Fusion Energy Conference (2012), IAEA CN-197/PD/P8-11