

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19340175

研究課題名（和文） 非中性プラズマを用いた、長距離力多粒子系における渦・乱流・秩序形成の制御実験

研究課題名（英文） Controlled Experiment on Dynamics of Vortex, Turbulence and Structure Formation in Long-range Force System Using Non-neutral Plasmas

研究代表者

際本 泰士 (KIWAMOTO YASUHI TO)

京都大学・大学院人間・環境学研究科・名誉教授

研究者番号：50018040

研究成果の概要(和文):クーロン力を介して長距離相互作用を行う非中性の純電子プラズマは、磁場と自己静電場に垂直な向きに流れを形成する。この流れの勾配(=渦度)に比例する密度分布には変形と揺らぎが生じて、様々な構造変化を示しつつ、平衡状態へと緩和する。この現象を理想的な孤立二次元流の緩和過程ととらえて、乱流と秩序の共存状態・熱平衡を特徴づける固有振動の特性等について、実験・理論の両面から種々の新局面を切り開いた。

研究成果の概要(英文): Pure electron non-neutral plasmas are employed to explore vortex dynamics, turbulence and occasional formation of highly ordered structures during multi-paths of relaxation in two-dimensional flow perpendicular both to externally applied magnetic field and to the electric self field. New aspects in the co-operative and competitive interactions between coherent vortices and turbulent fluctuations leading to highly ordered vortex arrays are discovered as well as frequency-shift in the eigen-mode oscillation characterizing eventual equilibrium distribution.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	5,900,000	1,770,000	7,670,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：非中性プラズマ、流れと揺らぎ、秩序構造形成、波数空間の動力学、平衡分布、固有振動

1. 研究開始当初の背景

平成10年度に開始した純電子プラズマを用いた渦運動の研究は、科研費の継続的支援を

受けて、高機能の実験装置を開発しつつ、長距離力多粒子系が渦・乱流状態を経て平衡分布に至る過程において支配的なダイナミクス

の諸局面を見出してきた。その緩和過程は単純に進むのではなく、途中で種々の高秩序配位を形成・維持することが見いだされた。また、高度な計測法の開発によって、理想状態における熱平衡状態に近い分布の形成も確認した。本計画では、代表者の定年退職を目前にして、博士課程院生の研究完結を重要視しつつ、これまでの多面的研究を統合することを目指した。

2. 研究の目的

(1) 一様磁場と矩形電位分布に捕捉された電子群は自己電場によって二次元の流れを作る。この流れの渦度は電子密度に比例する。つまり、高密度電子の糸状分布は渦紐と等価である。低密度・非一様の電子分布を背景渦とした強い渦紐群が急速に破壊されたり、高秩序配列を自発的に形成する過程は、設定条件の微妙な違いによって分岐する。この緩和と構造形成の時間展開に対する定量的解析を第1の課題とした。

(2) 非中性プラズマは、壁が無く、「一様磁場+放物型電位分布」の電磁環境内では、温度がゼロの極限で回転楕円体内に一様密度で分布する（これをPenning平衡と呼ぶ）ことが理論的に知られている。この分布に固有な振動（Dubin mode）の測定を通じて、平衡形状と温度を評価することが、反物質プラズマに対する非接触的計測法として、批判的な検討抜きに広く採用されて来た。本研究は、様々な仮定を排して、純実験的立場からその根拠を検証し、この計測法の信頼度を定量的に評価することを第2の課題とした。

(3) 上記の2課題に関連して、我々の実験に於いて不可避免的に観測されて来たのは、長寿命のマクロ構造とその周辺に於いて時々刻々変動する揺らぎ構造の共存であった。この2つの構造の果たす役割を、実験をベースとして定量的に表現することを第3の課題とした。

3. 研究の方法

1) 科研費の支援を受けて作成した高機能の純電子プラズマの電磁トラップを用いる。この装置では最大2.2Tの一様磁場に沿って、27個の円環電極が24mm間隔で並べられ、様々な形状の電位分布を時間の関数として制御・形成できる。37個の電子源配列を時間的空間的に選択動作させることにより、多様な初期分布を再現性良く形成できる。極めて保存性の高い電磁トラップのなかで、この初期分布から自発的緩和を行わせ、外的に設定した時間（ $1\mu\text{s} \sim 1000\text{s}$ ）を経過した後電位障壁を外して磁力線に沿って流出させ、5-7.5kVで加速の後、波長600nmで発光する蛍光面に捕集する。捕集電子数に比例した発光輝度分布は、CCDカメラで計測する。空間分解能は最高で $8\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、計測点数は 2048×2048 である。電子の総量は電流として決定できるため、各時刻の密度の3次元分布を精密に決定できる。

(2) 軸方向に配列された円環電極のいくつかは周方向に分割されていて、電子密度の変動はこれら電極に誘導される鏡像電荷として計測される。これを境界条件として、トラップ内の電位分布を無矛盾かつ一意的に決定するための数値的処理アルゴリズムは開発済みである。逆に軸方向・周方向に分割された各導体壁に、位相差をつけて交流電圧を与えることで、電子群の制御も可能である。

4. 研究成果

(1) 二次元乱流の構造解析：

① 初期分布として、中空円筒状の密度（渦度）分布を設定すると、周方向の流速の伴う半径方向勾配（シア）によって不安定となる。この密度の変形の成長は、線形理論に従うモード数の微小変形からは数 μs のうちに乖離して、数本の紐状の密度分布に分裂し、すぐに紐間の合体が始まる。この合体に伴って、高密度の紐状分布の数は時間と共に減数し、最

後には中央に頂点を持つ一本の紐分布に至る。この非線形過程において、図1左に示す如く、高密度の紐状分布間の減数合体に伴って、低密度のフィラメント放出され、回転差により引き延ばされつつ、吸収と放出を受けて、逐次微細化と乱雑度を高める。[発表論文⑨]

② このダイナミクスを流体の乱流状態と見て、系全体をFourier分解して、波数空間のエネルギースペクトル $E(k)$ として表すと、時間と共にエネルギー分布の重心は長波長側に移動し、スペクトルの尾部は短波長側に広がる。この方向性は二次元乱流の理論予測と一致している。しかしながら、波数空間におけるエネルギースペクトルに関して、理論的には波数 k に対して $E(k)=k^{-\alpha}$ と表され、定常乱流に対して指数は $\alpha=3$ となるはずであるが、実験的には $\alpha=5$ となる。この現象は、緩和過程を時間的に追う数値シミュレーションでも既に発見されており、長寿命の(coherent)渦成分へのエネルギー蓄積の寄与であると解釈されていた。このcoherent成分を恣意性なしに分離することが課題となった。[発表論文⑨]

③ 観測データは、coherent/incoherent成分が空間的に棲み分けていることを示した。その解析には空間分解能とFourier分析を両立させることが有力である。そこで、Wavelet展開を適用することを試みた。[発表論文⑦]

この解析法による解析例を図1に示す。左側は(機器ノイズを除去したあとの)生データの時間変化(縦方向)を表し、各行の右側は順に細かくしていったスケールに属する密度分布を表す。各スケールの密度分布を加え合わせると左側の元データを再現する。大まかには、 $j=3, 4$ ($j=5, 6$)のスケールがcoherent (incoherent)成分に属する。これらを全て加え合わせると、各時刻のエネルギースペクトル $E(k)$ は②に述べたフーリエ解析と同じ結果に導かれる。

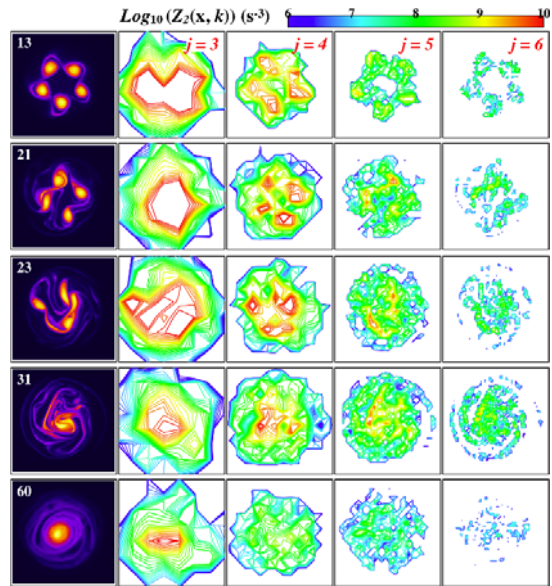


図1 [発表論文①, ⑦より]

④ coherent成分の振分けは次のように行った。まず全てのスケール、及び全ての実空間位置の構造を表すwavelet展開係数の二乗を、大きさの順に並べて(cumulative enstrophy)、始めの n 項をcoherent成分とみなす。そして、このように区分した2成分をそれぞれ、波数空間のエネルギースペクトルで表すと、それを特徴付ける指数 α は n の増加とともに変化する。incoherent成分に対する α は3.4から1.2まで連続的に減少する一方で、coherent成分は当初は緩やかに減少するが、 $n=350$ の時に不連続的な減少を示す。この特徴的な区分点においてincoherent成分は $\alpha=3$ となり、定常乱流を特徴づける指標に一致する。このように仕分けられた乱流成分は、理論モデルの予測を多面的に再現することが判った。

(2) 強渦と弱渦との相互作用による秩序構造の形成:

① 成果(1)に述べた不安定性により発現する分布は、coherent成分と言えども維持時間は長くない($10 \mu s$ 程度)。そこで、初期条件として、coherent成分の集約度を更に高めた高密度の糸状電子分布複数個を非平衡な配列

に再現性良く並べ、糸状配列を囲む背景分布の密度を様々なレベルに設定した場合について、この孤立した複合渦系の緩和を追跡した。[発表論文⑧]

② 元々非平衡分布におかれた渦糸群は約1ms程度の時間スケールで、偶々近接した場合に合体し、次第に減数して行く。この減数とともに合体の起きる時間間隔は増加する。しかし観測によれば、この合体過程は減数間隔の間に様な時間スケールで徐々に起きるのではない。当初の非平衡状態においては渦糸群の位置関係は乱雑に変動するが、ある時期に渦糸群は対称性の高い配列（以後渦結晶と呼ぶ）を形成し、次の合体が発生するまでは準定常的に維持される。しかも、減数した後の結晶配列においては、殆どの場合 (>95%) に高い秩序状態で観測される。つまり、一旦渦結晶が形成されるとその状態は長く維持されるが、どこかで準平衡状態が破壊されて渦糸が乱雑に動き回る動乱状態が始まると、短時間の間に合体と新配列が完了し、次の結晶状態に移ると解釈される。この時間経過を追跡すると、この減数過程は高度に統計的である。1本ずつ減数するとは限らず、一つの動乱状態の中で数本が消滅することもある。

③ 渦結晶の形成に対する背景渦の寄与について発見したことは次のとおりである。背景密度が高いほど最初の渦結晶が生まれるまでの時間は短く、一次結晶を構成する渦糸の数は多い。言い換えると、背景密度を減らすほど、渦結晶を構成するまでに多くの渦糸が破壊され背景渦となり、生き残った渦糸の結晶形成に寄与する。それでは、背景密度は渦結晶の維持に貢献するかと問うと、観測結果は肯定的では無い。背景渦は強い渦の結晶化を促進するが、一旦形成された配列の寿命は背景密度が高いほど短縮する。強い渦糸の初期配列を固定して背景密度の高さを変えた実験

において渦結晶を構成する渦糸の数を経過時間に対して記述したデータを図2に示す。わずかの揺らぎに応じて緩和過程が大きく変動するが、統計的に観ると、結晶渦の数は経過時間に対して対数的に減少する。また減少の勾配は背景密度が高いほど急峻となる。

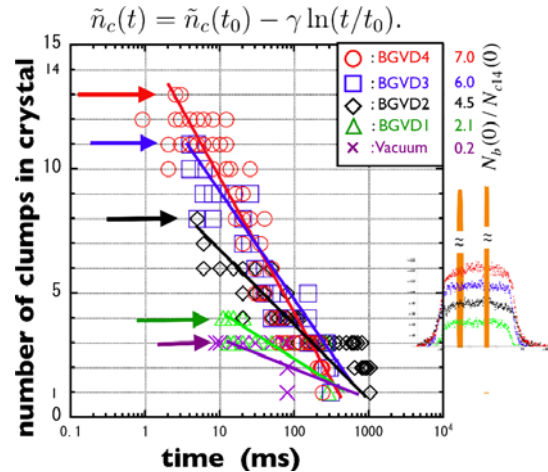


図2 [発表論文①⑧より]

④ 結晶形成を伴わない場合、渦糸の数は時間の冪（ほぼ-1乗）に比例して急速に減少する。これは結晶状態の逐次形成を繋ぐ動乱時期の渦運動に対応していると理解される。発表論文①で述べたことであるが、渦紐（更に拵げると coherent成分）の自己保存力は周囲の渦が作る流れ場による変形作用に対して閉じた流れを作る自己場の強さに依存する。流れ場は距離に依存するから、渦紐の広がり小さく密度が高いほど保存性は高くなる。両者の競合の結果として、渦紐の周囲に密度の凹み（vortex hole）が形成され、渦紐は対称性の高い位置関係に落ち着くことは既に我々によって観測されている。（Phys. Plasmas, Vol.10, 2003, pp.3922-3926, Phys. Rev. E, Vol.68, 2003, pp.016404.1-6.）今回の研究成果 (1)+(2) はこれらを統合的に理解する大きなステップとなった。[発表論文①]

(3) 平衡密度分布形成時の非中性プラズマの固有振動 [発表論文②]

① 一様磁場と放物面状電位で構成される Penning trapにおいて、導体壁が無い場合は、温度がゼロの極限に於いて、非中性プラズマの分布は回転楕円体の一様密度となることが理論的に予測され、その妥当性が我々の実験でも確認されている。(Phys. of Plasmas, Vol.13, 2006, 112109) このPenning平衡分布を特徴づける密度と楕円度を与えると、一意的に決まる固有振動 (Dubin mode) の存在が予言され、固有振動の非破壊的観測から、密度や分布形状の見積りが陽電子や反陽子などの計測に適用されてきた。更に分布形状が別途得られた場合には、固有振動の実験値・理論値間の差がプラズマ温度によると解釈されて来た。本研究の注目点は、我々の持つ高性能の計測技術と解析手法を組み合わせ、上記(1)+(2)の二次元分布を拡張して、三次元分布の構造形成を見直すことにある。

② 我々の実験によれば、計測された分布形状より Penning 平衡パラメータを決定し、これより決まる Dubin mode frequency の固有値を観測値と比べると、その差は温度の計測値から評価される周波数シフトに比べて10倍ほど大きなものとなった。

③ その違いの原因として、(a) 密度分布半径の3倍ほどの位置にある導体壁に誘起される鏡像電荷とプラズマ分布全体の相互作用 (Phys. Plasmas, 102106 (2007)), (b) 導体壁の存在によってコアとなる密度分布の赤道面の周辺を囲む低密度のハロー部形成 (Phys. Plasmas, 112109 (2006)) に伴う付加力、(c) Fitting の対象たる一様密度分布からの歪みの中で強く影響する未確定要素の同定、の3候補を、超伝導強磁場トラップを用いて従来の実験より更に細密な制御を加えて詳細に計測し、これに理論計算・数値シミュレーション等を追加して検討した。

④ 検討の結果としては単純明快な結論に至っていない。(a) 導体壁の鏡像電荷効果については、振動周波数に対しては引き下げる効果を持つことが判ったため、直接の原因としては除外される。(b) のハロー効果については、その寄与は観測と矛盾しない方向ではあるが、定量的な説明に足るかどうかは確定していない。(c) の議論の中には(a)も(b)も含み得る。

⑤ これまでの検討から言い得るのは次の通りである。現実のトラップにおいて形成される非中性プラズマの固有振動を基点として、Dubin mode を満たす分布 (壁無し、回転楕円形) を求めると、実観測から導出した分布に比べて、細長くかつ高密度にシフトした形状が要請される。従って、固有振動より非接触的に密度分布を評価する直裁的なロジックを、より具体的な分散関係を通じて作り出す必要がある。これは更なる検討の糸口となる。

(4) 純電子プラズマの中に展開する2次元渦・乱流運動を統合的に捉えた報告を学会発表①において報告し、論文①にまとめた。更に、純電子プラズマ中に伝播する波動は global な構造を有する。この解析手法を筑波大学との共同研究において、ドリフト波の構造解析に適用し、特有の構造を見いだした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Y.Kiwamoto, Y.Kawai, Y.Soga, J.Aoki, "Turbulence and structure formation associated with vortex dynamics in a non-neutral plasma flow", Plasma and Fusion Research, Special Issue (ITC 19), 7pages (2010.12刊). 査読有
- ② K.Kawai, J.Aoki, Y.Kiwamoto, "Axisymmetric eigenmodes of spheroidal pure electron plasmas", Plasma and Fusion Res,

Special Issue (ITC19), 4pages (2010.12刊)
査読有

- ③ Y. Kawai and Y. Kiwamoto, "Elementary processes of free-decaying two-dimensional turbulence in magnetized pure electron plasmas", Plasma and Fusion Research, SERIES 8, pp.0944-0949 (2009). 査読有,
- ④ Y. Kawai, Y. Kiwamoto, Y. Soga, and J. Aoki, "Turbulent Cascade in Vortex Dynamics of Magnetized Pure electron Plasmas", Non- Neutral Plasma Physics VII (AIP Conference Proc. 1114), pp. 108-113 (2009). 査読有
- ⑤ Y. Kiwamoto, J. Aoki, Y. Soga, M. Nakano and Y. Kawai, "Isolated Confinement and Control of Non-Neutral Plasma and Application to Anti-Particle Physics and Atom-Technology", Proc. of International Interdisciplinary –Sym. on Gaseous and Liquid Plasmas, pp.15-20 (2008). 査読有
- ⑥ Y. Kawai and Y. Kiwamoto, "Wavelet analysis of turbulent structures in a magnetized pure electron plasma", Physical Review E, Vol.78, 036401-1~8 (2008). 査読有
- ⑦ Y. Kawai, Y. Kiwamoto, Y. Soga and J. Aoki, "Propagation of axisymmetric Trivelpiece-Gould mode along vortex columns generated by diocotron instability", Physics of Plasmas, Vol.14, No.10, pp.102106-1~5 (2007). 査読有
- ⑧ Y. Kiwamoto, N. Hashizume, Y. Soga, J. Aoki, and Y. Kawai, "Formation and Relaxation of Two-dimensional Vortex Crystals in a Magnetized Pure Electron Plasma ", Physical Rev. Lett, Vol.99, pp.115002-1~4 (2007). 査読有
- ⑨ Y. Kawai, Y. Kiwamoto, Y. Soga and J. Aoki, "Turbulent cascade in vortex dynamics of magnetized pure electron plasmas", Physical Rev. E, Vol.75, No.6, 066404-1~6 (2007). 査読有

[学会発表] (計 19 件)

- ① Y. Kiwamoto, "Turbulence and structure formation associated with vortex dynamics in a non-neutral plasma flow", Plenary paper at the 19th International Toki Conference, Dec. 8, 2009 at Toki in Gifu-ken.
- ② Y. Kawai and Y. Kiwamoto, "Elementary processes of free-decaying two-dimensional turbulence in magnetized pure electron plasmas", The 14th International Congress on Plasma Physics, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, September 8-12, 2008.
- ③ Y. Kawai, Y. Kiwamoto, Y. Soga, J. Aoki, "Cascade process of two-dimensional turbulence observed in magnetized pure electron plasmas", at the 9th International Workshop on Non-Neutral Plasmas held at Columbia University, New York, USA on June 16-20, 2008.

[その他]
河井洋輔 (研究協力者: 際本・阪上指導下の大学院生) が渦・乱流・構造形成の研究に対して, 第3回 日本物理学会若手奨励賞受賞, (2009.3)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

際本 泰士 (KIWAMOTO YASUHIITO)
京都大学・大学院人間・環境学研究科・名誉教授
研究者番号: 50018040

(2) 研究分担者

阪上 雅昭 (SAKAGAMI MASAOKI)
京都大学・大学院人間・環境学研究科・教授
研究者番号: 70202083
木下 俊哉 (KINOSHITA TOSHIYA)
京都大学・大学院人間・環境学研究科・准教授
研究者番号: 80452259
市村 真 (ICHIMURA MAKOTO)
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授
研究者番号: 10151482

(3) 研究協力者

河井 洋輔 (KAWAI YOSUKE)
京都大学・大学院人間・環境学研究科・大学院博士後期課程 (H. 22. 3. 学位取得卒業)