

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05724

研究課題名（和文）密度限界へ遷移する非中性プラズマの時空間構造解明と大強度イオンビーム制御への応用

研究課題名（英文）Spatiotemporal Structure Elucidation of Non-Neutral Plasma Transitioning to Density Limit and Its Application to High-Intensity Ion Beam Control

研究代表者

曽我 之泰（Soga, Yukihiro）

金沢大学・数物科学系・助教

研究者番号：90525148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：重イオン慣性核融合のエネルギードライバーにおけるビーム圧縮過程を模擬するために、電子プラズマを用いた実験手法と計算コードの開発をおこなった。実験では、圧縮過程解析の基礎を確立するため、対抗する流れのある電子プラズマを対象とした新たなエネルギー分布計測法と解析手法を開発した。続いて外部電位操作により電子プラズマを圧縮し、その過程でのエネルギー変化を追跡した結果、ビームエミッタンス上昇に相当するプラズマ温度の有意な上昇を観測した。3次元多粒子計算では実験で観測されたエネルギー緩和過程を再現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人類の未来のエネルギー源として期待される核融合炉の有力な方式の一つに重イオン慣性核融合方式がある。この方式では核融合反応を起こすのに十分なパワーをもつパルス圧縮された重イオンビームをターゲットに照射する必要があるが、圧縮の際に空間電荷効果の影響でビーム品質が低下し、ターゲットへのエネルギー付与が阻害される。本研究では、実験検証が困難な重イオンビームに替えて物理的に等価である電子プラズマを対象とし、その緩和過程を追跡するための実験技術と計算コードの開発を行った。この成果は重イオンビームのパルス圧縮時に生じる物理現象を電子プラズマを用いて模擬するために有用であると考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to simulate the pulse compression process in the energy driver of heavy ion inertial fusion, an experimental method using electron plasma and a calculation code were developed. In the experiment, in order to establish the basis of the compression process analysis, a new energy distribution measurement method and analysis method for the electron plasma with the two-stream were developed. Next, the electron plasma was compressed by the external potential operation, and as a result of tracking the energy change in the process, the significant increase of the plasma temperature which is corresponding to the beam emittance was observed. The energy relaxation process observed in the experiment could be reproduced by the three-dimensional multiparticle calculation.

研究分野：プラズマ物理，電子管

キーワード：非中性プラズマ 軸方向エネルギー分布計測 電子加速 クーロン相互作用

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人類の未来のエネルギー源として期待される核融合炉の有力な方式の一つに重イオン慣性核融合方式がある[1],[2]。この方式では核融合反応を起こすのに十分なパワーをもつ重イオンビームをターゲットに照射する必要がある。重イオンビームはその生成過程において高い電流密度を確保することが難しいため、加速器から出射されたイオン群をターゲット照射前段で急激にパルス圧縮し大電流化する操作が必須である[3]。しかしパルス圧縮の際に空間電荷効果の増加に起因する非線形場の影響によりビーム品質が低下し、標的へのエネルギー付与が阻害される。エミッタンスの上昇を抑えた圧縮方法を検討することは重イオン慣性核融合実現に向けて必須とされる課題となっている。

しかし重イオンビームのパルス圧縮過程において、エミッタンスの時間発展を実験的に追跡することは容易ではない。重イオンビームの生成には大型の加速器が必要であるため非常にコストがかかる上、生成した重イオンビームのパルス圧縮操作時におけるエミッタンスの詳細な計測は現在の実験技術ではほぼ不可能である。

2. 研究の目的

本研究では、研究背景で挙げた困難を解決するため、重イオンビームの代替として生成・観測が容易な Malmberg-Penning トラップに閉じ込めた純電子プラズマを用いて、重イオンビームのパルス圧縮時に生じる物理現象を模擬することを最終目標とし、そのために必要な実験技術・計算シミュレーション手法を開発する。

3. 研究の方法

純電子プラズマは電子のみからなる集団であり、ソレノイドコイルによる一様磁場と、磁気軸に中心軸を合わせて配置したリング電極群に電位を印加することによって生成する井戸型ポテンシャルの組み合わせにより長時間閉じ込めることができる。この静電磁場配位を

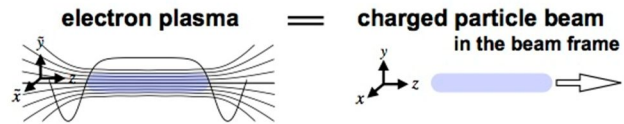


図1 純電子プラズマの閉じ込め(左)と荷電粒子ビーム(右)

与える閉じ込め装置を Malmberg-Penning トラップと呼ぶ[4],[5]。このトラップに捕捉された純電子プラズマの xy 平面内の運動は、図1に示すように、四重極磁場でガイドされた荷電粒子ビームの重心系から見たそれと等価であることが理論研究で示されている[6]。すなわち、純電子プラズマと荷電粒子ビームの等価性により、純電子プラズマの位相空間の運動を追跡することは、磁場による閉じ込め効果および自己ポテンシャルによる空間電荷効果が同等である荷電粒子ビームのビームエミッタンスの時間発展を計測することと同じであると解釈できる。純電子プラズマで観測が可能な物理量は、軸方向に積分された径方向密度分布 $n(r)$ 、軸方向エネルギー E の分布関数 $F(E)$ 、軸方向温度 $T(r)$ 、そして径方向平均エネルギー $\langle E \rangle(r)$ であり、これらすべての時間発展を計測することができる。本研究では、Malmberg-Penning トラップに閉じ込めた電子プラズマのエネルギー分布を詳細に観測する手法を整備し、圧縮の有無を含む様々な条件下でのエネルギー緩和過程を測定した。

4. 研究成果

(1) 対向する流れのある純電子プラズマの緩和

純電子プラズマの軸方向圧縮による荷電粒子ビームのパルス圧縮模擬実験に入る前に、圧縮しない状態で対向した流れがある純電子プラズマに対して、エネルギー緩和過程を追跡した。Malmberg-Penning トラップ中の純電子プラズマは、電子源から電子ビームとして閉じ込め領域に導入される。閉じ込め初期の状態では、軸方向の磁力線に沿ってビーム速度で電位障壁間を往復運動しつつ対向流を形成し、その速度周りで熱拡がりを持つと予想される。しかし実験的には未検証であり解析方法も確立されていない。対向流がある状態からの緩和現象は、純電子プラズマの基礎物理として興味深い対象であるうえに、重イオンビームのパルス圧縮時には対向流が生じると予想されるため、その素過程として重要である。

トラップ領域での捕捉時間 20 msec、電子密度 $2.6 \times 10^{11} / \text{m}^3$ の紐状の純電子プラズマを対象とし、逃走電子数を障壁電位 ϕ_a の関数として計測した結果を図2に示す。入射エネルギーは 10, 20, 30 eV の3通りである。また、縦軸は規格化した逃走電子数 Q_{beam} を対数で表しており、障壁電位 ϕ_a がゼロで電子が全て排出される場合を1としている。全ての入射エネルギーの場合について、障壁エネルギー $e\phi_a$ が大きくなると逃走電子数は減少することが分かる。また入射エネルギーが大きいほど、高い障壁エネルギーでも逃走電子が存在することも確認できる。

電子ビーム入射により生成された純電子プラズマがドリフトエネルギー E_d の対向流を持ち、その周りに温度 kT の Maxwell 分布を持つ Drifting-Maxwellian にしたがうと仮定して、逃走電子数 Q_{beam} のデータ点に対して以下に示すモデル関数での解析を試みた。

$$Q_{\text{beam}}(q\phi_a) = 1 + \frac{1}{2} \left[\text{erf} \left(\frac{\sqrt{E_d} - \sqrt{q\phi_a}}{\sqrt{k_B T_{\parallel}}} \right) - \text{erf} \left(\frac{\sqrt{E_d} + \sqrt{q\phi_a}}{\sqrt{k_B T_{\parallel}}} \right) \right]$$

ここで erf は誤差関数である。すべての入射エネルギーの Q_{beam} のデータに対して、上式は非常によくフィットする。フィッティングパラメータ Ed, kT からエネルギー分布関数を描くと (図 2(b)参照), 入射エネルギーが高いほどエネルギーピークエネルギーが高く, かつ高エネルギー側にテールを引いているなど, 入射エネルギーから予測される依存性がよく現れている。

電子ビームとして入射された純電子プラズマを対象に, 捕捉時間 1 μsec から 1 msec まで, 軸方向エネルギー分布の時間発展を計測し, フィッティングパラメータのドリフトエネルギー Ed と軸方向温度 kT を見積もった。エネルギー 10 eV で入射した直後 1 μsec では Ed と入射エネルギーは一致した。その後, Ed は減少し kT は増加する。クーロン衝突による緩和時間は 1 msec 以下程度と見積もられるため, これらの緩和はクーロン衝突によるものであると考えられる。軸方向全エネルギーを Ed と kT から評価すると, 時間とともに減少していることが判明した。この純電子プラズマの系は保存系であるため, 軸方向エネルギーの減少分は半径方向エネルギーに移送されたと推測される。さらに, 純電子プラズマの密度を増加させると緩和が促進される実験結果が得られたことから, 対向する流れがある非平衡状態からの緩和の時間スケールはクーロン衝突に依存していることが示唆された。

(2) 純電子プラズマの軸方向圧縮による緩和

本実験の初期条件として用いた純電子プラズマは, 電子ビームを入射・保持したのち, 同じカソードから新たな電子ビームを入射して先の電子ビームに重畳して保持する過程を繰り返し, 累計 100 本程度の電子ビーム群により生成された電子集団を熱平衡状態に至るまで緩和させた状態にある。この初期状態に対して, 接地したリング電極に端から順番に負電位を印加していき, 閉じ込め領域を縮めていくことで, 純電子プラズマの軸方向への圧縮をおこなうことができる。この状況は, 重イオンビームに対して電極ギャップに印加した RF 電圧で速度変調を誘起し集群化させる過程になぞらえることができる。電子ビーム群の入射から 1 sec 保持し, 磁束密度 500 Gauss の一様磁場のもとで熱平衡状態達した純電子プラズマを初期状態として生成した。この純電子プラズマは, 軸方向長さ 200 mm, $1/e$ 半径 9.5 mm であり, 中心にピークがあり単調減少する密度分布をもつ。軸方向圧縮は初期状態から 2 msec のパルス幅でリング電極に -20 V の電圧を順次印加することでおこない, 軸方向長さは初期の 1/4 まで縮められる。径方向密度分布 $n(r)$ の時間発展を観測したところ, 圧縮中, 圧縮完了直後, 圧縮完了後 8 msec 後のいずれにおいても有意な差は認められなかった。この結果は, 本実験パラメータに合わせた 3 次元粒子シミュレーションの結果と一致した [7]。

さらに同圧縮過程において, 軸方向平均エネルギー $\langle E \rangle$, 軸方向温度 T , 径方向温度 T の時間発展を観測した (図 4 左参照)。軸方向圧縮操作直後の 2 msec で, 初期と比較していずれも上昇した。圧縮操作の時間スケールは電子の障壁間往復運動時間よりじゅうぶん遅いため断熱圧縮の条件が成り立っていると仮定すると, $\langle E \rangle$ の上昇は, 圧縮により上昇した自己ポテンシャル, つまり空間電荷が起源であると推測される。圧縮完了後, $\langle E \rangle$ と T

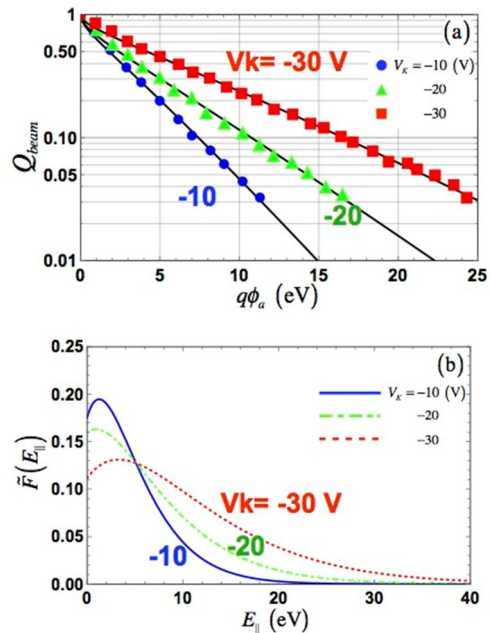


図 2 バリアエネルギーに対する逃走電子(a)とそれから導出したエネルギー分布関数(b)

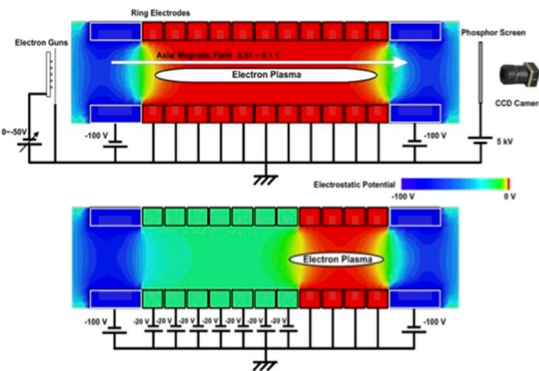


図 3 閉じ込め電位操作による軸方向圧縮の方法

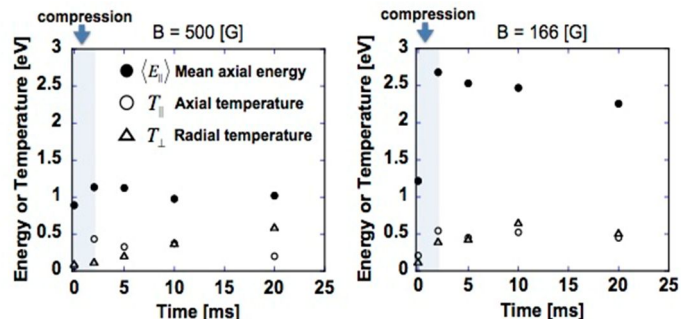


図 4 強磁場下(左)と弱磁場下(右)での圧縮過程における平均エネルギー

(), 軸方向温度(), 径方向温度()の時間発展

は、クーロン衝突時間に相当する msec の時間スケールで緩やかに減少するのに対し、 T は単調に増加している。この系は、圧縮操作の後は保存系であるため、クーロン衝突により $\langle E \rangle$ が T へ輸送されていると解釈できる。

純電子プラズマ自身の空間電荷によるエネルギー輸送の効果を検証するため、磁束密度を 166 Gauss と下げ、他の条件は揃えて同様の観測をおこなった (図 4 右参照)。その結果、強磁場のときと比べて圧縮直後の $\langle E \rangle$ の上昇が増大し、 T にも上昇が認められた。これらの観測結果は、圧縮による空間電荷効果により、純電子プラズマの自己ポテンシャルから軸方向運動エネルギーへの変換が促進されること、および自己ポテンシャルから径方向エネルギーへクーロン衝突を介せず直接の変換が生じることを明確に示している。

圧縮前後における温度上昇を閉じ込め磁場強度の関数として解析した結果をもとに、ビームエミッタンスとの関連について記述する。磁場が最小のとき、軸および径方向を合わせた全方向温度上昇の合計は最大となった。この結果は、空間電荷効果が大きいとエミッタンス上昇が増大することを示唆している。磁場が強くなるに従って基本的に温度上昇、すなわちエミッタンス上昇は抑えられるが、最大磁場 500 Gauss の点では軸方向温度上昇が顕著に増加し全方向温度上昇の抑制に限界が見られる。この原因は明らかになっていない。全方向温度上昇における径方向温度上昇の割合に注目すると、圧縮時にビームエミッタンスを抑える方針は以下ようになる。磁場が 500 Gauss と強く空間電荷効果が小さいときは、径方向エミッタンス上昇は起こらないため、軸方向エミッタンス上昇をいかに抑えるかが課題となる。逆に、磁場が 320 Gauss 以下で空間電荷効果がある程度以上働く状況になると、径方向エミッタンス上昇と軸方向エミッタンス上昇の割合はほぼ一定であり、両者をバランスよく抑える圧縮手法を開発する必要があるだろう。純電子プラズマを用いて荷電粒子ビームを模擬した本基礎実験により、荷電粒子ビームのパルス圧縮過程で生じる空間電荷効果に起因するビームエミッタンス変化を定量評価する手法が確立できたといえる。しかし純電子プラズマの物理量から荷電粒子ビームのパラメータへのスケール変換に関する詳しい検討については進行中の課題である [8]。とりわけ荷電粒子ビームの空間電荷効果を表す指標である tune depression への正確な変換方法の確立は、重イオンビームのパルス圧縮方法の開発には必須であるため、引き続き実験と粒子シミュレーションの両面から検討を続ける予定である。

参考文献

- [1] 堀岡一彦：「パルスパワー技術に基づいた高エネルギー密度科学の展開」, 日本物理学会誌, Vol. 67, No. 4, p.252 (2012)
- [2] M. Reiser : “ Theory and Design of Charged Particle Beams ”, Wiley, New York (1994)
- [3] 堀岡一彦：「重イオン慣性核融合のためのエネルギードライバー開発の進展」, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 89, No. 2, p.87 (2013)
- [4] J.H. Malmberg, J.S. deGrassie: “ Properties of Nonneutral Plasma ”, Phys. Rev. Lett. 35, 577 (1975)
- [5] Y. Soga et al.: “ Mechanisms of $E \times B$ Drift Rotation of a Vortex String in a Pure Electron Plasma ”, Plasma and Fusion Research, Vol. 8, 2401034 (2013)
- [6] H. Okamoto and H. Tanaka : “ Proposed experiments for the study of beam halo formation ”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 437, p.178-187 (1999)
- [7] T. Sato: “ Numerical analysis of applied magnetic field dependence in Malmberg-Penning trap for compact simulator of energy driver in heavy ion fusion ”, Journal of Physics: Conference Series, 717, 012100 (2016)
- [8] 菊池崇志, 曾我之泰, 堀岡一彦: 「重イオン慣性核融合の大電流ビーム圧縮のための電子ビームシミュレータ」, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 93, No. 8, p.345 (2017)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Suzutani Nozomi, Park Youngsoo, Soga Yukihiro, Takahashi Kazumasa, Sasaki Toru, Kikuchi Takashi	4. 巻 May
2. 論文標題 Numerical Analysis of Relaxation Process with Fast Particle Generation in Malmberg-Penning Trap Experiment for Ion Beam Inertial Fusion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100828 ~ 100828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100828	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nozomi Suzutani, Youngsoo Park, Yukihiro Soga, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi	4. 巻 12
2. 論文標題 Study on Softening Parameter for Multi-Particle Simulation in Malmberg-Penning Trap Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 15 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.12.15	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Youngsoo PARK, Yukihiro SOGA, Masayuki SATO, Nozomi SUZUTANI and Takashi KIKUCHI	4. 巻 14
2. 論文標題 A Single-Shot Method for Measuring the Energy Spectra of Pure Electron Plasma Driven by E x B Rotation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research: Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 pp1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1201046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 菊池崇志, 曾我之泰, 堀岡一彦	4. 巻 93
2. 論文標題 重イオン慣性核融合の大電流ビーム圧縮のための電子ビームシミュレータ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Plasma Fusion Res.	6. 最初と最後の頁 345-352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 菊池崇志, 鈴谷のぞみ, 朴英樹, 曾我之泰, 高橋一匡, 佐々木徹
2. 発表標題 軸方向磁場印加空間へ入射した電子群緩和過程での軸方向端静電ポテンシャルの影響
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池崇志, 鈴谷のぞみ, 朴英樹, 石井宏, 曾我之泰, 高橋一匡, 佐々木徹
2. 発表標題 軸方向磁場印加空間へ入射した電子群緩和過程への軸方向端静電ポテンシャル分布の影響
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山村泰昭, 曾我之泰, 朴英樹, 上田隼也, 佐藤政行
2. 発表標題 ビーム速度を有する純電子プラズマの早い緩和機構の検討
3. 学会等名 2019年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井宏, 曾我之泰, 朴英樹, 菊池崇志, 鈴谷のぞみ
2. 発表標題 ビーム入射で生成された純電子プラズマの早い緩和過程に対する閉じこめ電位の影響
3. 学会等名 2019年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田隼也, 朴英樹, 曾我之泰
2. 発表標題 1shot 画像計測による純電子プラズマのエネルギー分布関数の導出
3. 学会等名 2019年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomi Suzutani, Takashi Kikuchi, Youngsoo Park, Yukihiro Soga, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki
2. 発表標題 Numerical Analysis of Relaxation Process with Fast Particle Generation in Malmberg-Penning Trap Experiment for Ion Beam Inertial Fusion
3. 学会等名 11th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Kikuchi, Yukihiro Soga, Yosuke Yuri, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Kazuhiko Horioka, Ken Takayama
2. 発表標題 Simultaneous Multi-Bunch Irradiation System with Longitudinal Pulse Compression in Quantum Beam Inertial Fusion
3. 学会等名 11th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukihiro Soga, Youngsoo Park, Keisuke Sugimoto, Takashi Kikuchi
2. 発表標題 Experimental study on axially compressed electron plasma for a simulator of space-charge dominated beam
3. 学会等名 22nd International Symposium on Heavy Ion Fusion and Beam-Driven High Energy Density Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 曾我之泰, 朴英樹, 杉本啓介, 菊池崇志
2. 発表標題 ビーム速度成分を有する純電子プラズマの磁場方向エネルギー分布計測
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菊池 崇志 (Kikuchi Takashi) (30375521)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	