

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340142

研究課題名(和文) 小型磁気ミラー閉じ込め装置による電子陽電子プラズマの実験研究

研究課題名(英文) Experimental study on electron-positron plasmas with a compact magnetic mirror trap

研究代表者

檜垣 浩之(Higaki, Hiroyuki)

広島大学・先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：10334046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低エネルギー電子陽電子プラズマを用いた実験研究を遂行するため、まず新規の小型磁気ミラー閉じ込め装置を開発しその特性を評価した。結果として、10の7乗個程度の電子と陽電子を閉じ込めれば実験可能であることが判明した。一方で、実験で必要となる低エネルギー陽電子蓄積装置も新たに構築しその最適化を行った。最終的に低エネルギー陽電子を磁気ミラー中に閉じ込めることに成功し、電子と陽電子の同時閉じ込めが可能になる段階まで研究を遂行することができた。また、関連する研究テーマとして、非中性プラズマにおける自動励起現象や位相空間分布の時間発展について新たな知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：For the experimental studies of low energy electron-positron plasmas, properties of a new compact magnetic mirror trap were investigated experimentally. It was suggested that the simultaneous confinement of 10 to 7th electrons and positrons would work for the purpose. Meanwhile, a low energy positron accumulator was also constructed and the parameters for the optimum operation were studied. As a result, positron confinement in the compact magnetic mirror trap was demonstrated. The simultaneous confinement of electrons and positrons are foreseen in the near future. New results were obtained in the related topics on non-neutral plasmas, which included the autoresonances and the evolutions of phase space distributions during vortex merging processes.

研究分野：数物系科学、プラズマ科学

キーワード：電子陽電子プラズマ 磁気ミラー閉じ込め 非線形波動 低エネルギー陽電子

## 1. 研究開始当初の背景

30年以上前から、磁気ミラー中に電子-陽電子プラズマを閉じ込めるというアイデアは存在しており(Comments Plasma Phys. Controlled Fusion 4 (1978) 91)、過去に陽電子を磁気ミラーに閉じ込める実験が試みられたことはあるが(Phys. Plasmas, 2 (1995) 4369)、陽電子温度が高く( $\sim 9\text{keV}$ )、密度が低かったため、実現には至らなかった。しかし、研究代表者らの実験結果(Phys. Rev. E 75 066401 (2007))は粒子温度が $1\text{eV}$ 以下であれば、電子-陽電子プラズマの実現は十分可能であることを示唆していた。低エネルギー陽電子の蓄積方法については、固体Ne減速材とバッファガス冷却による方法(Phys. Plasmas 4, 1528 (1997))が唯一 $10^7$ 個以上の陽電子を蓄積できているが、カリフォルニア大学サンディエゴ校(UCSD)の装置は一樣磁場しか用いていないため、異符号の荷電粒子を同時に閉じ込めることができず、陽電子プラズマと電子ビームの相互作用を観測しているものの(Phys. Rev. Lett. 75, 3846 (1995))、電子-陽電子プラズマの閉じ込めには至らなかった。同じく米国のコロンビア大学ではヘリカル磁場配位を用いて電子-陽電子プラズマの実現を目指しているが、その体積が大きいため粒子数や温度の面で不利であり、やはり電子-陽電子プラズマの実現は難しいと考えられた(現在も準備段階である)。

そこで、小型の軸対称単純磁気ミラー配位に改良を施し、低エネルギーの電子と陽電子を同時に閉じ込めるのが電子-陽電子プラズマを実現する最も簡便な方法であると考えられた。

## 2. 研究の目的

上記のような申請時の状況をもとに、本研究では $1\text{eV}$ 以下の低エネルギー電子-陽電子プラズマを生成し、その基礎特性を実験的に調べるため、研究代表者が新規に開発した静電バリア付き小型軸対称磁気ミラー閉じ込め装置の性能を評価したうえで、当該装置を用いてこれまで理論的にしか研究されてこなかった電子-陽電子プラズマの特性を実験的に研究することを目的とした。具体的には以下のような項目を順次評価しながら、研究開発を進めていき、最終的に低エネルギー電子-陽電子プラズマの実験研究をすることになる。

- (1) 小型磁気ミラー閉じ込め装置の特性評価
- (2) 低エネルギー陽電子蓄積装置の構築及び最適化
- (3) 小型磁気ミラー閉じ込め装置における低エネルギー陽電子閉じ込め実験

## (4) 小型磁気ミラー閉じ込め装置における低エネルギー電子-陽電子閉じ込め実験

## 3. 研究の方法

本研究ではまず、軸対称単純磁気ミラーの外側に正負の電位を形成できるように改良した、静電バリア付き小型軸対称磁気ミラー閉じ込め装置(図1)を用いて、まず非中性電子プラズマを閉じ込めたうえでその基礎特性(閉じ込め時間、静電波振動、非線形振動(ソリトン波)、等)を実験で明らかにする。

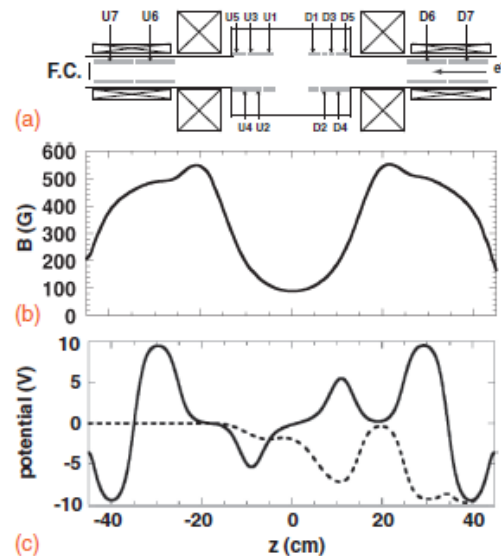


図1 (a) 実験装置模式図, (b) 中心軸上での磁束密度, (c) 中心軸上での電位の例

次に、現在では低エネルギー反水素生成や陽電子を用いた原子物理研究で十分な実績を持つ低エネルギー陽電子蓄積装置を新たに構築し、運転パラメータの最適化を行う。これは主にUCSDのグループによって開発されたもので、具体的には $^{22}\text{Na}$ 密封線源と固体ネオン減速材を用いた低エネルギー陽電子源、窒素バッファガス冷却のためのガスセル、回転電場を用いた低エネルギー陽電子蓄積部から構成される。ちなみに、研究費のほとんどはこの低エネルギー陽電子蓄積装置の整備のために使用された。

その上で、2つの装置を接続し陽電子蓄積装置からの低エネルギー陽電子を小型磁気ミラー装置に輸送し、閉じ込め特性の評価を行う。最終的には電子と陽電子を同時に閉じ込めて電子-陽電子プラズマ閉じ込めの原理実証実験を行うとともに、その基礎特性を実験で明らかにする。例えば、閉じ込め時間の電子陽電子数依存性、静電波振動周波数の密度、温度、電子陽電子数の比に対する依存性、非線形振動(ソリトン波)の励起、伝播の電子陽電子数の比に対する依存性、等の内容が挙げられる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 小型磁気ミラー閉じ込め装置の特性評価

広島大学で新たに開発した小型軸対称磁気ミラー装置(図 1)の特徴は磁気ミラーの内側と外側にリング電極を設置していることである。これにより磁気ミラー内部での調和ポテンシャルによる長時間閉じ込めや、閉じ込められた荷電粒子の操作(捕獲、排出)が可能となっている世界で唯一の磁気ミラー閉じ込め装置である。

小型磁気ミラー装置を用いて、単純磁気ミラーで閉じ込められた約  $2 \times 10^7$  個の電子からなる非中性電子プラズマにおいて、初めてそのプラズマ振動やソリトンの伝播を計測することに成功し、当該装置が電子-陽電子プラズマの実験研究に使用可能であることの原理実証実験に成功した(Appl. Phys. Express, 5, 2012, 106001)。図 2(a)は磁気ミラー中での電子数を閉じ込め時間の関数として測定したもので、約 40ms 程度の閉じ込め時間が確認できる。これは図 2(b)に示した数 MHz の軸方向静電波振動を測定するには十分な閉じ込め時間であり、本装置が電子-陽電子プラズマの実験研究に利用できることを示唆している。また、磁気ミラー中での調和ポテンシャルを用いた電子の閉じ込め時間測定では 140s 以上の値が確認されており、陽電子の多パルス入射を行うことも可能であると考えられる。

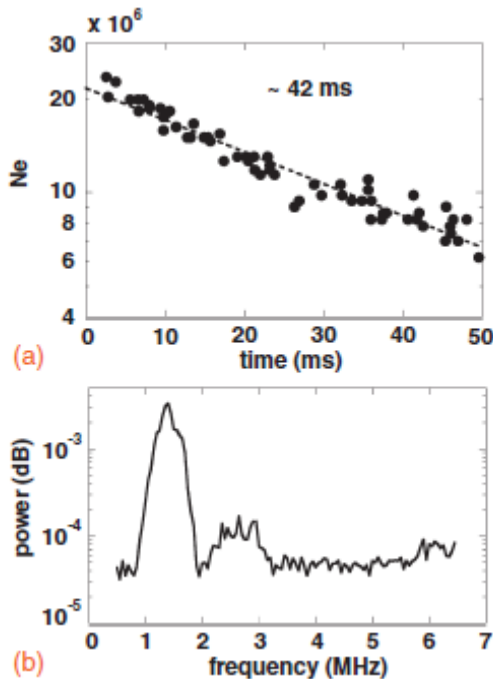


図 2 (a)磁気ミラーでの閉じ込め時間測定, (b) 計測された軸方向の静電波振動( $t=10$ ms)

##### (2) 低エネルギー陽電子蓄積装置の構築及び最適化

図 3 に示したのは本研究で新たに構築した低エネルギー陽電子蓄積装置である。5mCi  $^{22}\text{Na}$  密封線源と固体ネオン減速材を用いて、 $3 \times 10^5$  slow e+/s の低エネルギー陽電子が得られている。また、図 4 は陽電子源から約 40eV の陽電子を蓄積領域に入射して蓄積された陽電子数を蓄積時間の関数として測定したものである。これまでのところ回転電場を用いて 30s で  $1 \times 10^6$  個、120s で  $2 \times 10^6$  個の陽電子の蓄積に成功した (AIP Conf. Proc. 掲載確定)。これは想定していた陽電子数( $\sim 8 \times 10^6$ )の 1/4 となっているが、これは主に陽電子源側の問題であると考えられる。今後も随時種々のパラメーターサーベイを進め蓄積数の改善を図りつつ実験を進める予定である。

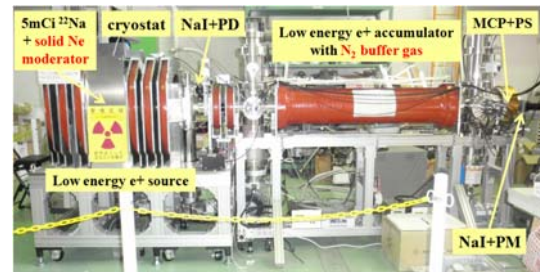


図 3 低エネルギー陽電子蓄積装置

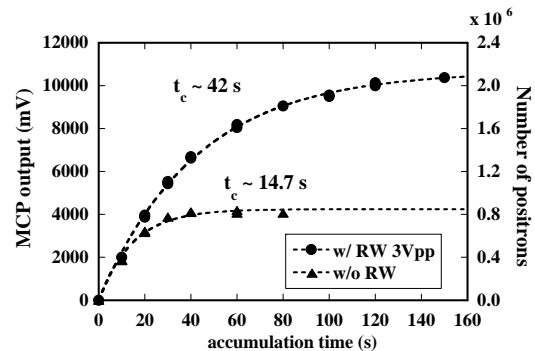


図 4 回転電場を用いた陽電子蓄積

##### (3) 小型磁気ミラー閉じ込め装置における低エネルギー陽電子閉じ込め実験

上記の低エネルギー陽電子蓄積装置と磁気ミラー装置を接続し、実際に低エネルギー陽電子を前者から後者に輸送し、閉じ込め特性の評価を行った。結果として、陽電子蓄積装置からの陽電子パルスのエネルギーは数 eV であること、磁気ミラー中の調和ポテンシャルによる閉じ込め時間は現状 50s 程度であること、磁気ミラー外側の電極を使った電位閉じ込めでは閉じ込め時間が約 700ms 程度であることが確認できた。また、図 5 に示したのは陽電子蓄積装置からの陽電子を磁気ミラー装置に入射して磁気ミラー閉じ込

めをした際の陽電子数を蓄積時間の関数として測定したものである。自己場の影響がない状況において、磁気ミラー中での陽電子の閉じ込め時間が 100ms 程度あることが確認された。これらの結果から、これまで実現されていない電子と陽電子の同時閉じ込めが可能であると推測され、今後蓄積陽電子数の最大化を進めると共に電子-陽電子プラズマ実験に向けて研究を進めていく予定である。

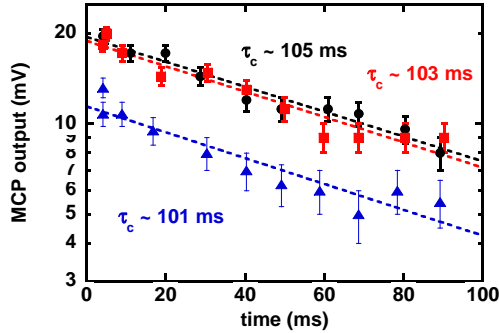


図5 磁気ミラー中の陽電子閉じ込め

(4) 減衰項のある自動共鳴現象

自動共鳴(autoresonance)は非線形振動において、その振幅が外場の周波数によって制御されるようになる位相固定現象である。種々の非線形現象で発現することから、加速器、原子物理、プラズマ物理、等様々な分野で研究がされてきたが、減衰項を含む場合についてはあまり研究例がない。標準的な自動共鳴の基礎方程式は次式で減衰率 $\gamma=0$ として与えられ、自動共鳴が発現する閾値振幅  $V_{th}$  が  $V_{th} \propto \alpha^{3/4}$  ( $\alpha$ :周波数掃引率)で与えられることが知られている。

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 \sin x = \varepsilon \cos(\omega_0 t - \alpha t^2 / 2)$$

本研究では $\gamma \neq 0$ の場合について図6(a), (b)に示したような数値計算とそのFFTスペクトル(図6(c), (d))を調べることによって、新た

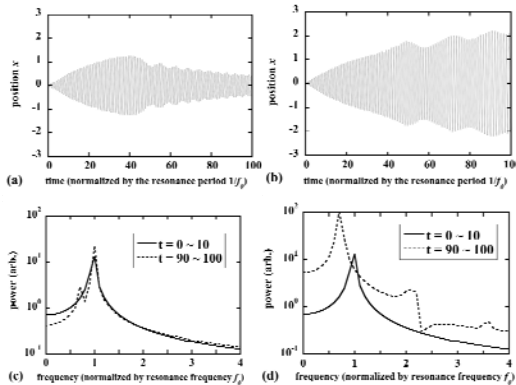


図6 (a)  $\varepsilon < V_{th}$ , (b)  $\varepsilon > V_{th}$ での振動の様子, (c) (a)のFFTスペクトル( $\varepsilon < V_{th}$ ), (d) (b)のFFTスペクトル( $\varepsilon > V_{th}$ )

な知見を得ることができた。具体的には図7に示したように、減衰項を含む自動共鳴においてはその閾値振幅の $\alpha$ に対する依存性が $\gamma=0$ の場合からずれ、 $\alpha$ の小さいところで定数に近づくことが明らかになった。

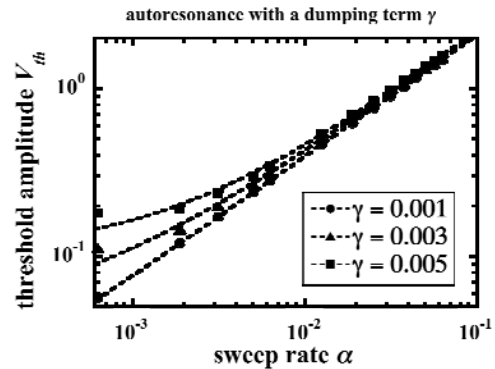


図7 減衰項を含む自動共鳴における閾値振幅の振る舞い(数値計算)

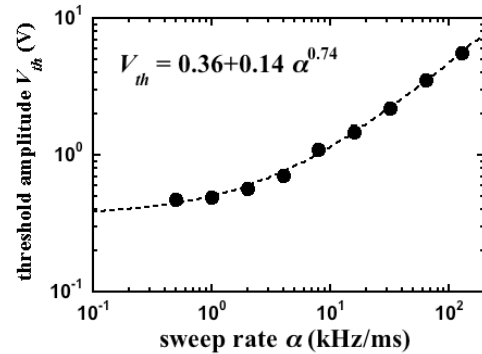


図8  $m = 2$  diocotron 振動の自動共鳴における閾値振幅と周波数掃引率の関係(実験)

一様磁場中の非中性電子プラズマを用いた実験では、 $m=2$  diocotron 振動の自動共鳴において減衰項を含む自動共鳴の数値計算と同様の閾値の振る舞いを初めて計測することができた(図8)。この自動共鳴現象は一見磁気ミラー閉じ込めとは無関係に見えるが、磁気ミラー中の磁力線に沿った荷電粒子の運動は先の微分方程式で近似できることが知られており、磁気ミラー中での荷電粒子の運動を制御できる可能性を示唆している。これらの結果は2014年12月に開催された第11回非中性プラズマ国際会議で報告した(AIP Conf. Proc. 掲載確定)。現在、詳細な内容を報告するため投稿論文を準備中である。

(5) 非中性電子プラズマの構造変化における位相空間分布の時間発展

一様磁場中の非中性電子プラズマは特定の条件下では2次元 Euler 流体と等価であるとされている。実験的には点渦系で近似される場合は等価性が成り立つが、そうでない場合、例えば円環状の分布が diocotron 不安定性を通じて分布が時間発展する場合は、大域的な粘性が生じて等価性が成り立っていない



と考えられている。そこで本研究では図9に示したような電子密度(渦度)分布の時間発展について渦度の強度分布(ヒストグラム)と流体要素が位相空間で占める体積(または面積)について実験的に調べた。

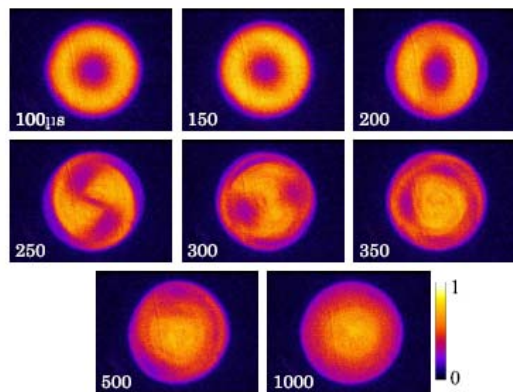


図9  $m = 2$  diocotron 不安定性を伴った密度分布の時間発展

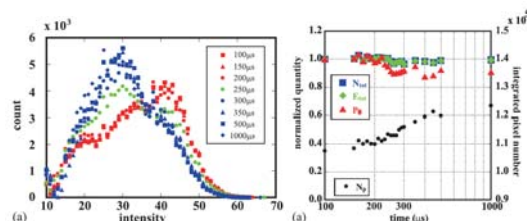


図10 (左) 渦度分布の時間発展に伴う渦度の強度分布, (右) 位相空間における面積(●)

図10左に示したのが渦度の強度分布で、渦の合体前(赤)と合体後(青)で強度分布が大きく変化するのに伴って流体要素が位相空間で占める面積も増加していることが確認できた(図10右黒●)。実際には渦穴が外側に排出される過程でも同様の傾向がみられ、粘性を伴った散逸過程により2次元 Euler 流体との等価性が失われている可能性を支持する結果が得られた(Plasma Fusion Res, 10, 2015, 1201004)。

また、この過程の密度依存性について調べた結果を2014年12月に開催された第11回非中性プラズマ国際会議で報告した(AIP Conf. Proc. 掲載確定)。

電子と陽電子の同時閉じ込めは異なる符号(回転方向)の渦度を3次的に相互作用させることに相当するため引き続き計算機シミュレーションも駆使して詳細を研究していく必要があると考えている。

#### (6) 第11回非中性プラズマ国際会議開催

(2014年12月1日~4日於:香川県高松市 11<sup>th</sup> International Workshop on Non-Neutral Plasmas)

このworkshopは1988年以来10回にわたり欧米で開催されてきた非中性プラズマの国際会議であるが、前回2012年8月に

ドイツで開催された際、アジアで初開催することが決定された。今回は研究代表者が LOC chair として会議を主催すると共に(科研費の一部を会場代として使用した)、初の試みとして、6th International Conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics との joint session を設けた。実際のトピックスは confinement and dynamics of non-neutral plasmas, antiparticle plasmas and antimatter, strongly coupled plasmas, ion trapping physics including quantum information, accelerator physics, dusty plasmas と非常に多岐にわたり、分野横断的な議論を可能にするものである。各分野で世界的に知られた研究者が一堂に会して議論をすることから研究を促進する新たなアイデアや共同研究が派生することが期待できる。今回は国内での開催であったため大学院生も含めて我々の研究内容を広く海外の研究者に発信できたと考えている。

#### 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5件)

- 1) H. Higaki, Y. Abo, K. Ito, H. Okamoto, and K. Gomberoff  
 “Autoresonances with a Damping Force”  
 AIP Conference Proceedings, 査読有, accepted for publication (6pages)
- 2) H. Higaki, C. Kaga, K. Nagayasu, H. Okamoto, Y. Nagata, Y. Kanai, and Y. Yamazaki  
 “A Low Energy Positron Accumulator for the Plasma Confinement in a Compact Magnetic Mirror Trap”  
 AIP Conference Proceedings, 査読有, accepted for publication (6pages)
- 3) C. Kaga, K. Ito, H. Higaki, and H. Okamoto  
 “Annular Vortex Merging Processes in Non-Neutral Electron Plasmas”,  
 AIP Conference Proceedings, 査読有, accepted for publication (5pages)
- 4) C. Kaga, Y. Soga, K. Ito, H. Higaki, and H. Okamoto  
 “Annular Vortex Merging Processes in Non-Neutral Electron Plasmas”,  
 Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.10, 2015, 1201004-1~1201004-3
- 5) H. Higaki, S. Sakurai, K. Ito, and H. Okamoto  
 “Nonneutral Electron Plasmas Confined in a Compact Magnetic Mirror Trap”  
 Applied Physics Express, 査読有, Vol.5, 2012, 106001-1~106001-3

[学会発表] (計10件)

- 1) 加賀千翔人、檜垣浩之、他「非中性電子プラズマを用いた 2 次元渦の合体過程に対する PIC シミュレーション」、日本物理学会第 70 回年次大会  
2015 年 3 月 22 日、  
早稲田大学(東京都新宿区)
- 2) 檜垣浩之、他「小型磁気ミラートラップによる低エネルギー陽電子閉じ込め」、日本物理学会第 70 回年次大会  
2015 年 3 月 22 日、  
早稲田大学(東京都新宿区)
- 3) H.Higaki, et al., “A Low Energy Positron Accumulator for the Plasma Confinement in a Compact Magnetic Mirror Trap” (oral)  
11<sup>th</sup> International Workshop on Non - Neutral Plasmas  
2014 年 12 月 4 日、  
サンポートホール高松 (香川県高松市)
- 4) C. Kaga, H.Higaki, et al., “On Vortex Merging Processes in Non-Neutral Electron Plasmas” (poster)  
11<sup>th</sup> International Workshop on Non - Neutral Plasmas  
2014 年 12 月 1 日、  
サンポートホール高松 (香川県高松市)
- 5) Y. Abo, H.Higaki, et al., “Autoresonances with a Damping Force” (poster)  
11<sup>th</sup> International Workshop on Non - Neutral Plasmas  
2014 年 12 月 1 日、  
サンポートホール高松 (香川県高松市)
- 6) 檜垣浩之、他「電子・陽電子プラズマ実験のための低エネルギー陽電子蓄積器」、日本物理学会第 69 回年次大会  
2014 年 3 月 27 日、  
東海大学(神奈川県平塚市)
- 7) 加賀千翔人、檜垣浩之、他「非中性電子プラズマを用いた 2 次元渦の位相空間分布計測 II」、日本物理学会第 69 回年次大会  
2014 年 3 月 27 日、  
東海大学(神奈川県平塚市)
- 8) 檜垣浩之、他「非中性電子プラズマにおける autoresonance の実験」  
プラズマ核融合学会第 30 回年会  
2013 年 12 月 3 日、  
東京工業大学(東京都目黒区大岡山)
- 9) 加賀千翔人、檜垣浩之、他「非中性電子プラズマを用いた 2 次元渦の位相空間分布計測」、日本物理学会第 68 回年次大会  
2012 年 3 月 27 日、  
広島大学(広島県東広島市)
- 10) 檜垣浩之、他「小型磁気ミラー装置による非中性電子プラズマの閉じ込め」  
プラズマ核融合学会第 29 回年会

2012 年 11 月 28 日、  
クローバープラザ(福岡県春日市)

[その他]  
ホームページ等  
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/hhigaki/jindex.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

**檜垣 浩之 (HIGAKI HIROYUKI)**

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：10334046

##### (2) 研究分担者

( )

##### (3) 連携研究者

**大島 永康 (OSHIMA NAGAYASU)**

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・研究員

研究者番号：00391889

**山崎 泰規 (YAMAZAKI YASUNORI)**

独立行政法人理化学研究所・基幹研究所・  
上席研究員

研究者番号：30114903