

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：32665

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20357

研究課題名（和文）負イオンビーム集束性向上に向けた位相空間構造評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of phase space analysis method toward well focused negative ion beam

研究代表者

波場 泰昭（HABA, Yasuaki）

日本大学・生産工学部・助手

研究者番号：60908789

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ピンホールアレイと検出器からなるエミッタンス計測器を用いて、ビーム径方向における速度分布の全貌を実験的に評価する手法が確立された。この成果は、アメリカ物理学協会の学術誌AIP Advancesで、Featured Articleとして出版された。また、ピンホールアレイの幾何構造による制限を受けて離散的に取得された速度分布に対して、カーネル密度推定法を適用することで、連続的に補完された位相空間構造が再構成された。速度分布関数及び再構成された位相空間構造に基づき、負イオンビームに内在する複数の速度分布成分に対する発散角、エミッタンス、含有率を定量的に評価できることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

純水素放電プラズマ領域に少量のセシウムが添加されたイオン源から静電加速された負イオンビームは、がん治療、素粒子実験、質量分析、及び核融合発電など広い分野で応用されている。これらの分野に共通して、発散角の小さな負イオンビームが要請されている。核融合発電の実用化に向けた高周波放電方式負イオン源から引き出されたビームの発散角は、日本も参画する国際プロジェクトITERの仕様に対して3倍程度大きく、その改善が喫緊の課題となっている。本研究で提示された径方向速度分布関数及び位相空間構造の再構成手法は、ビーム物理に関する新たな知見を与えると共に、今後のシミュレーション研究への展開・貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have demonstrated an analytical method for obtaining a full picture of the transverse velocity distribution of a single beam. This was achieved by utilizing an emittance meter comprised of a pinhole array and a detector. This achievement was published as a Featured Article in the academic journal AIP Advances by the American Institute of Physics. Furthermore, by employing kernel density estimation on the discretely acquired velocity distribution, which is limited by the geometric structure of the pinhole array, I successfully reconstructed a continuously interpolated phase space structure. Based on the transverse velocity distribution function and the reconstructed phase space structure, it has been confirmed that the divergence angle, emittance, and abundance ratio of the multiple components within the negative ion beam can be quantified experimentally.

研究分野：ビーム物理

キーワード：ビーム物理 負イオン源 位相空間構造 速度分布関数 集束性 表面生成 核融合発電

### 1. 研究開始当初の背景

負イオンを生成する装置である負イオン源から静電場により引き出された負イオンビームは、がん治療、素粒子実験、質量分析、及び核融合発電などの分野で広く応用されている。核融合発電は、海水から採取される重水素と三重水素を用いるため資源が実質的に無尽蔵であり、将来の基幹エネルギー源として有力な候補である。重水素と三重水素の核融合を起こすためには一億度以上の高温が必要となるため、核融合プラズマを磁場の籠で閉じ込める手法が広く用いられている。このような磁場閉じ込め型核融合プラズマを加熱するために、高速な中性粒子ビームを炉心プラズマに入射する場合、中性粒子ビームの前駆体として静電的に加速されたイオンビームが必要となる。負イオンビームは、正イオンビームに比べて 100 keV 以上の高エネルギー領域における中性化効率が格段に高いため、中性粒子ビーム入射加熱に必須となる。核融合発電の実用化に向けて、日本も参画する国際プロジェクト ITER では、水素負イオン源の開発研究が進められている。しかしながら、高周波放電方式の水素負イオン源から引き出されたビームの発散角は、仕様に対して三倍程度大きく、その改善が急務の課題となっている。負イオン源は、正イオン源にはない特徴が大きく二つある。第一に、負イオン源から負イオンと同伴して引き出される電子を除去するための磁場が必要であり、この磁場が負イオンビームの集束性に影響を与えることである。第二に、純水素放電プラズマ領域で生成される負イオンに加えて、セシウムが添加されたプラズマ電極の表面で生成される負イオンが存在することである。これにより、生成機構の異なる負イオンがビームに混在することになり、また負イオン生成領域とビーム引出界面とが近接することで複雑なビーム引出機構を有するビームが構成される。したがって、負イオン源から引き出されたビームは、正イオン源のそれとは全く異なる生成・引出機構を有する。しかしながら、負イオン源におけるビーム引出界面の形成に関する素過程を示す理論は確立されておらず、正イオン源におけるビーム引出界面の理論に基づいて負イオン源の開発研究が進められてきた。先行研究から、高周波放電方式と直流アーク放電方式に共通して空間的な非対称性を有する負イオンビームが観測されているが、その原因は明らかにされていない。一般的にビーム発散角はビームの実空間分布に対して単一のガウス分布を仮定して評価されているが、この手法では負イオンビームの集束性を評価し切れず、実際のビーム発散性が過小評価されている可能性が大いにある。このような状況のなか、負イオンビームの集束性を詳細に評価する手法の確立が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、がん治療や核融合発電などの分野で広く応用されているセシウム添加型水素負イオン源から引き出されたビームの集束性を、ビーム径方向の速度分布関数及び位相空間構造に基づいて実験的に評価する手法を確立することである。これにより、負イオンビームの生成・引出機構とビーム集束性の関係について理解を深めると共に、負イオンビーム発散角の改善に資する知見を提示する。

### 3. 研究の方法

負イオンビーム集束性をビーム径方向の速度分布関数及び位相空間構造に基づいて実験的に評価する手法を確立するために、以下に記す二つの方法を相補的に併用することで本研究を遂行した。

- (1) 自然科学研究機構核融合科学研究所の研究開発用負イオン源から引き出された負イオンビームに対して、位相空間構造計測器を用いて、ビーム径方向の速度分布関数及び位相空間構造の評価を行う。代表者は核融合科学研究所でのビーム計測器の開発、ビーム引出実験を行う。また、独自に開発したソフトウェアを用いて、当該実験で取得した実験データの解析を行う。当該実験で取得した位相空間構造は、ビーム軌道の時間反転数値計算における入力値を与える。これにより、ビーム引出界面における負イオン密度分布のパラメータ依存性を明らかにする。
- (2) 日本大学生産工学研究所において、単孔を有する負イオン源とビームラインで構成された小型負イオンビーム実験装置の開発を行う。当該装置を用いることで、(1)に記述したような大型装置では走査が困難となるビーム加速器電極系の幾何構造やセシウム添加量に対する負イオンビーム集束性の評価を行う。ビームラインにはビーム径方向の速度分布関数及び位相空間構造を取得するためのビーム計測器を構築する。代表者は、当該実験装置の構築に必要なすべてのハードウェアの設計を行うと共に、プラズマ生成とビーム引出実験を行う。

#### 4. 研究成果

- (1) 核融合科学研究所のセシウム添加型負イオン源から引き出された負イオンビームは、異なる3つの速度分布成分から構成されることが明らかにされた。図1に示すように、ビーム径方向( $x, y$ )における速度分布( $x', y'$ )の全貌を実験的に観測することに世界に先駆けて成功した。これにより、各速度分布成分のビーム発散角、速度分布関数、及び含有率を定量的に評価することが可能となった。これら3つの速度分布成分はすべてビームコア成分であるが、電子偏向磁場の方向( $y$ )に対して垂直な方向( $x$ )に分離している。また、各速度分布成分の発散角、速度分布関数、含有率には特徴がみられる。ビーム中心部に位置する成分は、含有率20%程度で最も小さい。その外縁部に位置する2つの速度分布成分は発散角、速度分布関数、及び含有率において顕著な類似性を有している。この原因を同定することは今後の課題として残されているが、負イオンの生成・引出機構と密接に関係している可能性がある。含有率は、初段電極であるプラズマ電極より下流領域における静電レンズ効果の影響を受けないため、各速度分布成分の起源を解明するための重要なパラメータとなる。当該実験で得られた知見は、アメリカ物理学協会の学術誌 AIP Advances で報告され、Featured Article に選出された (Y. Haba et al AIP Adv. 12 035223 (2022))。

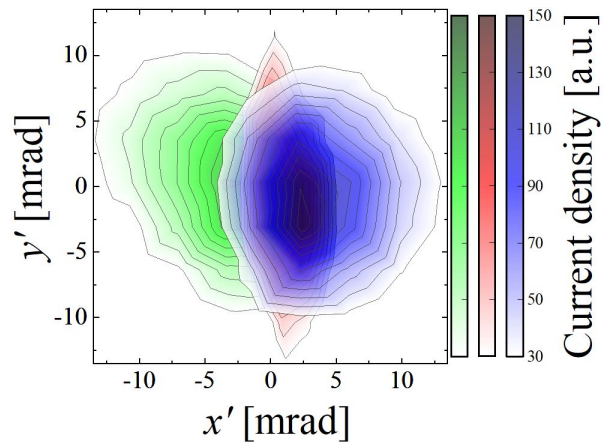


図1 負イオンビームの径方向における速度分布

- (2) 研究成果(1)に立脚して、セシウム添加型負イオン源から引き出された負イオンビームに内在する複数速度分布成分の起源を同定するために、日本大学生産工学研究所において小型負イオンビーム実験装置の設計・開発を行った。図2に示すように、当該装置は負イオン源及びビームラインとから構成される。当該装置に必須となる窒素パージ導入系統、水素ガス発生装置を用いた水素ガス導入系統、ロータリポンプ及びターボ分子ポンプを用いた真空排気系統、バラトロン真空計と電離真空計を用いた圧力測定系統、フィラメント・アーク放電系統、プラズマ生成用の電源系統、ビーム加速器電極系統、ビーム引出・加速用の電源系統、及び絶縁トランスの構築を完了した。また、ビームラインに導入する三種類のビーム計測器の設計を行った。第一に、アルミナ蛍光板を用いたビームの実空間分布計測器である。この計測器を用いることでパラメータ走査をしながら継続的にビームを観測することが可能となった。第二に、ビーム電流分布計測用ファラデー・カップである。単一チャンネルのファラデー・カップに対してビーム上流側に可動式マスク板を取り付けることで、単孔から引き出されたビームに対する電流分布計測が可能となる。第三に、高い角度分解能を有する位相空間構造計測器である。研究成果(1)に示した先行研究では角度分解能2.4 mradの位相空間構造計測器を用いていたが、新たに開発した計測器は直径50  $\mu\text{m}$ のピンホールアレイを検出器の上流100 mmに置くことで従前より高い角度分解能0.5 mradを有しており、ビームの位相空間構造をより詳細に評価することが可能となる。これらのビーム計測器を大気開放に制限されることなく真空容器内で変換式に用いることで、実空間分布、速度空間分布、及び位相空間構造に基づいてビームの集束特性を評価することが可能となる。また、SIMIONを用いたビーム軌道のシミュレーションを行うための準備を行った。これにより、ビーム引出実験で取得したデータと数値計算で取得したデータとを比較することが可能となる。当該装置を用いて、既に純水素放電プラズマの生成及び負イオンビームの引出に成功した。現在のところ放電電流1 A、引出電流3 mAまで達成した。当該装置を用いて、大型装置では走査が困難となるビーム加速器電極系の幾何構造やセシウム添加量などに対する径方向速度分布関数や位相空間構造の変化を調査するための準備が完了した。

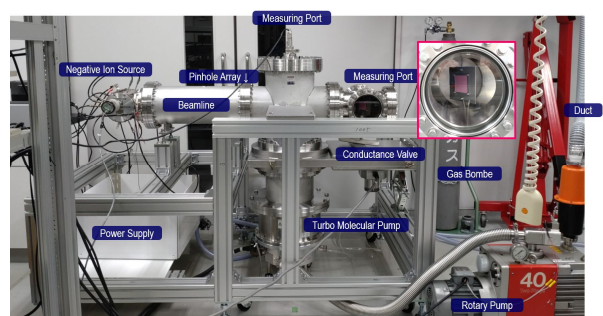


図2 日本大学生産工学研究所で開発された負イオン源及びビームライン

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Haba, M. Aramaki, K. Tsumori, M. Osakabe, K. Ikeda, H. Nakano, and K. Nagaoka	4. 巻 12
2. 論文標題 Abundance ratio of multiple velocity distribution components in a single negative ion beamlet produced by a cesium-seeded negative ion source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 35223
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0083300	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 M. Kasaki, K. Nagaoka, J. Slief, Y. Haba, R. Nakamoto, K. Tsumori, H. Nakano, K. Ikeda, M. Osakabe	4. 巻 62
2. 論文標題 Nonuniform plasma meniscus modelling based on backward calculation of negative ion beamlet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac8604	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 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 波場泰昭
2. 発表標題 表面生成負イオンのビーム集束性制御に向けた小型負イオン源開発
3. 学会等名 日本大学生産工学部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Haba
2. 発表標題 Development of a compact negative ion source toward further understanding of velocity distributions for single negative ion beam
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 波場泰昭
2. 発表標題 位相空間構造に基づく負イオンビーム集束性に向けた小型負イオン源開発
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Haba
2. 発表標題 Works for improving negative ion beam focusing at Nihon University and at NIFS
3. 学会等名 International Workshop on High Energy Science and Related Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Haba
2. 発表標題 Experimental study on focusing of a negative ion beam aimed at fusion plasma heating
3. 学会等名 ISPlasma 2022 / IC-PLANTS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Haba
2. 発表標題 Behavior of multiple Gaussian beam components in a single negative ion beam aimed at fusion plasma heating
3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Conference, American Physical Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Haba
2. 発表標題 First observation of two-dimensional velocity distribution functions of multiple velocity components in a single isolated negative ion beamlet aimed at fusion plasma heating
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Haba
2. 発表標題 速度分布関数に基づくビーム集束性の評価
3. 学会等名 日本大学生産工学部学術講演会
4. 発表年 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関