

研究種目：若手研究(B)

研究期間：平成 20 年度～21 年度

課題番号：20740324

研究課題名（和文） 外部強電場の影響下における水素プラズマの研究

研究課題名（英文） Study of hydrogen plasma affected by strong outer electric field

研究代表者

松本 新功 (MATSUMOTO YOSHIKATSU)

徳島文理大学・人間生活学部・講師

研究者番号：50441598

研究成果の概要（和文）：

2次元 Particle-In-Cell 法にて、負イオン源引き出し領域のポテンシャル計算を行った。結果、イオン源へのビーム引き出し電場がイオン源内のプラズマへ染み出す、実験と同様の傾向を確認した。さらにこの計算結果を参考にして、3次元 Monte Carlo 法による H⁻ の軌道計算を実施した。結果として、実験で得られた引き出し確率を非常に精度良く再現するモデルの構築に成功した。H⁻ の引き出しには、ビームに対して垂直方向のポテンシャル構造が、最も重要な要素となっていることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We calculate potential spatial structure at extraction region in a negative ion source with two dimensional Particle-In-Cell(PIC) method. It is confirmed that extraction electric field produced by high beam extraction voltage invades into the ion source plasma though a beam extraction hole. Besides, H⁻ extraction probability is calculated with H⁻ trajectory calculation in Monte Carlo method. Then, potential structure needed for the H⁻ extraction model is assumed by the calculation result of the PIC code. A calculation result with the extraction model is in good agreement with experimental result in H⁻ extraction probability. From some calculation results with the model, we conclude that potential structure for perpendicular direction to H⁻ beam axis is a key factor for H⁻ extraction from a negative ion source.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
21 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：プラズマ物理学

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：プラズマ加熱，イオン源，水素負イオン，輸送，ビーム引き出し

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの加熱及び電流駆動のため、負イオン源を用いた中性粒子入射加熱 (Neutral Beam Injection, NBI) が不可欠である。この用途のために、より高効率な水素負イオン源の実現が望まれている。負イオン源の高性能化には、イオン源プラズマ内での H 生成と H 引き出しメカニズムの理解が必要であるが、現状において、十分な知識が得られているとは言いがたい。

後者の H 引き出しに関して、これまで多くのモデルが提案されてきた。しかしながら、H 引き出しを詳細に議論できる実験的な H 計測手法が存在せず、モデルの検証の点で、決定打に欠ける状況であった。そこで我々は H 引き出しを詳細に計測しうる実験手法を新たに提案して、H 引き出し計測法へと発展させた。この実験から、イオン源からの H 引き出しには、引き出し孔近傍のプラズマ電位の空間構造が重要であることを、実験・計算によって明らかにした。また我々は、イオン源に印加される強いビーム引き出し電場が、ビーム引き出し孔を通じてイオン源内のプラズマへと染み出していることを実験的に初めて確認した。さらに、この影響が極めて大きな影響を与え、H 引き出し効率を大幅に増加させている事を見出した。つまり、負イオン源からの H 引き出しメカニズムを知り、その知見をもとに引き出し効率を高めるためには、ビーム引き出し電場の影響を受けた、引き出し孔近傍の水素プラズマの電位分布を正しく知らなければならない。その上で H 引き出しの物理を明らかにする事が必要になる。

2. 研究の目的

外部強電場にさらされた水素プラズマの電位の空間分布が、H 引き出しの効率を左右する最大の要因になっている。既に我々は、ラングミュアプローブでの実験によって、ポテンシャルの空間分布の計測を行っているが、実験はあくまで空間上の断片的なポテンシャルデータを与えるのみであり、プラズマの全領域を計測できるわけではない。特に、電極や引き出し孔の近傍における計測では、物理的な接触による破損や、ビーム引き出し用の高電圧印加に伴って、引き出し電極-プローブ間に放電が生じ、特に電源が破損する危険性があるため、計測が困難である。そこで、数値計算を用いて、実験でのパラメータを補間・補外する必要が出てくる。本研究の第一の目的として、(i) 外部電場に影響を受

けたイオン源内水素プラズマのポテンシャル分布を計算する。この計算結果を踏まえて、(ii) 負イオンビームの構成因子である H が、どのようにイオン源内プラズマ中にて輸送され、引き出されているのかを、H の軌道追跡に特化した計算コードを用いて議論する。信頼性の高い H 引き出しモデルを構築し、そのモデルを使って、H 引き出しメカニズムを明らかにすることを、第二の目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的 (i) と (ii) に対応して、それぞれに特化した数値計算コードを 2 種類作成し、計算研究を実施した。

まず (i) では、2 次元 Particle-In-Cell (PIC) 法による計算コードを作成し、イオン源引き出し孔近傍のプラズマポテンシャル空間分布を計算した。計算領域を図 1 に示す。計算モデルとなる負イオン源は、我々が実験で用いている円筒形の装置を参考にしており、直径 9cm、高さは 11cm である。ただし、計算負荷軽減のため、イオン源の引き出し領域のみを計算対象とした。ゆえに、z 方向には、引き出し孔から 1cm 領域のみを切り出して計算領域としている。

コードは 2D3V モデルと呼ばれる、位置と速度に対して、それぞれ 2, 3 次元の空間を割り当てる手法を用いた。つまり、位置成分に関して、図中のフィルター磁場に平行な y 軸方向成分を省略している。グリッド数は x, z 方向にそれぞれ 100x100 としている。計算粒子種は H⁺, e, H の 3 種類を考慮している。計算に必要な磁場は、実際の装置の実測値を補間して使用している。計算結果はラングミュアプローブによるポテンシャルの実測結果と比較し、信頼性を検討した。

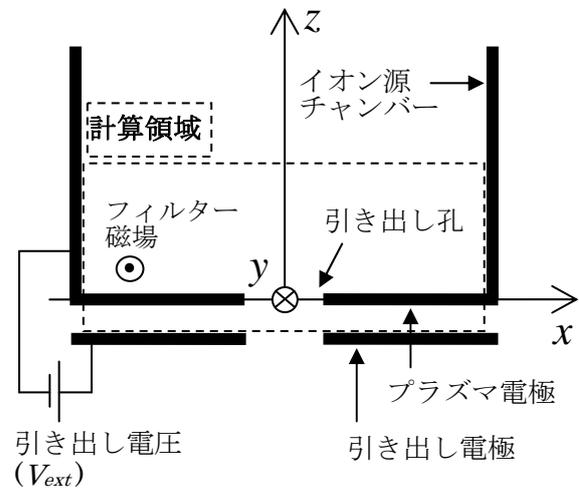


図 1 計算モデル概略図と座標設定

次に(ii)の計算コードとして、Monte Carlo法によるH軌道計算を行い、ビーム粒子であるHが、イオン源から引き出されるまでの軌道を追跡した。ここから、引き出し孔へ到達するHをカウントし、イオン源の任意のスタート点からのH引き出し確率を見積もった。モデル対象となるイオン源は、(i)と同様、我々が実際に使用している負イオン源である。本コードではHの挙動のみを計算するため、(i)よりも計算負荷は小さくて済む。ゆえに、こちらは3次元モデルとしている。

Hの軌道は運動方程式をRunge-Kutta法によりタイムステップ毎に解いて追跡する。計算に必要な電場は、実験結果と上記(i)のPIC計算結果を参考に仮定したポテンシャル空間分布をコードへ導入し、この差分から求めている。磁場は(i)と同様、実測値を使用している。Hは輸送プロセスの中で、プラズマ中の粒子との粒子間衝突を行うと考えられる。衝突対象と成り得る粒子種は H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 、 e 、 H 、 H_0 であり、衝突種としては、Hの破壊、運動量移行、クーロン衝突である。本コードでは、以上の衝突効果の中から、頻度の高いもののみ導入している。衝突後のH速度は二体衝突モデルにより計算する。クーロン衝突の効果は全時間ステップにて計算し、破壊と運動量移行に関しては、各衝突周波数から、確率的に衝突効果を導入した。また(i)のPIC計算と同様、計算結果は実験値との比較から、その信頼性を検討した。

4. 研究成果

(1) (i)のPICコードにより、プラズマポテンシャルの空間電位を計算した。図2は、 z 軸上のポテンシャル空間分布を示しており、50Vと1kVの二種類の引き出し電圧 V_{ext} での計算結果である。横軸にて、 $z=0\text{cm}$ が引き出し孔の位置に対応する。共に、引き出し電圧を印加すると、特に引き出し孔近傍において、高い電位を有する空間構造となることがわかる。これは、実験と同等の傾向であり、引き出し電圧のプラズマへの染み出しを、計算でも確認することができた。なお、 $V_{ext}=50\text{V}$ では、実験で計測される2~3V程度より若干高くなるものの、比較的、実験事実に近いプロファイルを得る事ができる。しかしながら、1kVでは全体が真空電位に引きずられ、プラズマ電位も100V程度まで上昇してしまう。このような高いポテンシャル値は実験では観測されない。つまり、実際のプラズマでは、外部からの電気力線に対して、より高い遮へい能力を有している事になる。現状のコードでは、この遮へい能力を正しく再現出来ていない。原因の一つとして、PICのグリッド幅が広すぎる可能性がある。そこで今後、まずは計算範囲を絞り、セルの幅を狭めた上で計

算を実施し、染み出しへの影響を調査する予定である。

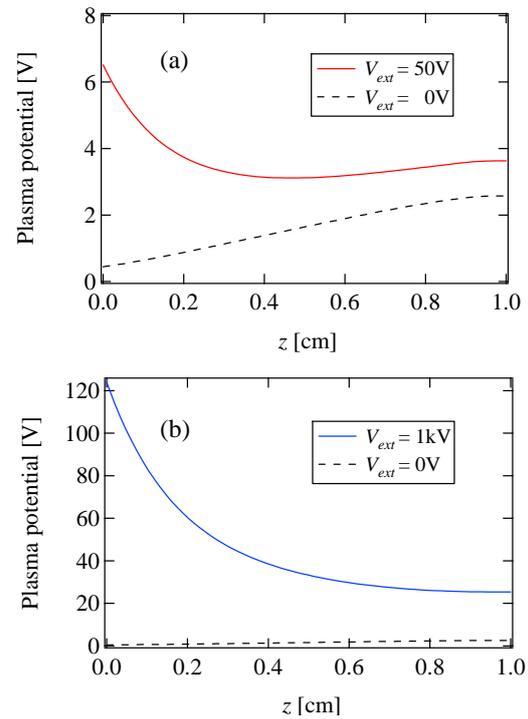


図2 PIC法によるポテンシャルの計算結果

(2) 引き出し孔にごく近い $z < 0.3\text{cm}$ 領域での、実験によるポテンシャル計測は、プローブ引き出し電極間の放電を誘起して装置の破損を招く危険性があるため、我々の現状の実験系では実施することができない。一方で、(i)のPIC計算の結果を参考に、この領域のポテンシャルを推測し、実験データを補外することは可能である。図2(a)より、ポテンシャルは z が小さくなる方向、イオン源奥から引き出し孔へ向かうほど、値が減少してゆき、ある程度孔へ近づくと、減少から増加へ転ずる事になる。つまり、ポテンシャルの空間分布は、 z 方向に対して、電位の鞍点を持ち、ここを境にして電場の向きが逆転すると考えられる。つまり、Hは引き出し孔より鞍点以上に離れている場合には、イオン源の奥へ押し返される。この電位障壁の存在は、我々の実験事実とも一致する。さらに、我々の実験では、Hのエネルギーは0.1eV以下である。つまり、この電位障壁はHのエネルギーと同等かそれ以上の高さを持ち、この電位障壁を克服することが、H引き出し確率を改善するための最大のテーマとなる。一方で、鞍点を超えると、逆にHは引き出し孔へ引き込まれる事が分かる。

以上により、実験のみでは得難い領域のポテンシャル情報を、計算にて推測し、補外する事が可能となった。この鞍点の信憑性については(3)にて議論を行う。

(3) 以上の PIC 計算結果と実験データを元にして、図 3 のようなポテンシャルの 3 次元構造を作成した。これを(ii)の Monte Carlo 法による 3 次元軌道計算コードへ導入して H 引き出し確率を計算し、実験結果との比較からモデルの信憑性を検討した。なお、図 4 として、図 3 に示した 3 次元ポテンシャルの、 z 軸上(イオン源中心軸上)における空間分布を示した。(2)で議論したように引き出し孔近傍領域に、 z 方向に沿って、ポテンシャルの鞍点が存在する可能性がある。そこで、鞍点が引き出しに与える影響を調べるために、図 4 のように鞍点を持つポテンシャルと持たないポテンシャルの二種類で計算を行い、それぞれ実験結果と比較した。

図 5 に引き出し確率の計算と実験結果を示す。実験では、レーザーを使用して引き出し確率を計測し、その値はレーザー領域からの平均値として見積もられる。計算値も実験にあわせて、同じ平均値としている。なお、点線は実験結果のフィッティングカーブを表す。計算の結果、鞍点が存在しない場合でも、うまく x, y 方向のポテンシャル構造を選んでやれば、図 5 のように実験と同程度の引き出し確率を得ることができる。しかしながら、引き出し確率の空間分布形状までは、鞍点なしのポテンシャルで、うまく再現することは困難である。一方で、鞍点を持つポテンシャルを使えば、実験の引き出し確率を、グラフの絶対値と分布形状ともに、極めて精度良く再現することができる。つまり、実際のイオン源では、(2)の PIC 計算から予測される、鞍点を持つポテンシャル構造が、引き出し孔近傍に形成されている可能性が高い。

以上のように、電位構造を詳細化することで、極めて再現性の高い H 引き出しモデルの構築に成功した。この信頼性の高い H 引き出しモデルによる計算結果を解析すれば、イオン源からの H 引き出しの物理を、高い信憑性のもと、議論する事ができる。

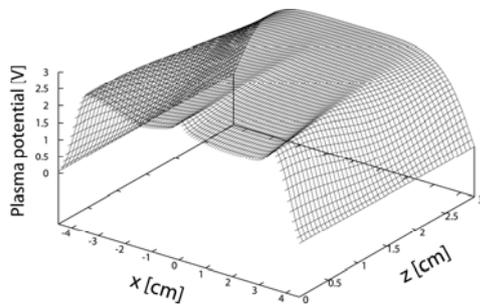


図 3 3次元ポテンシャル

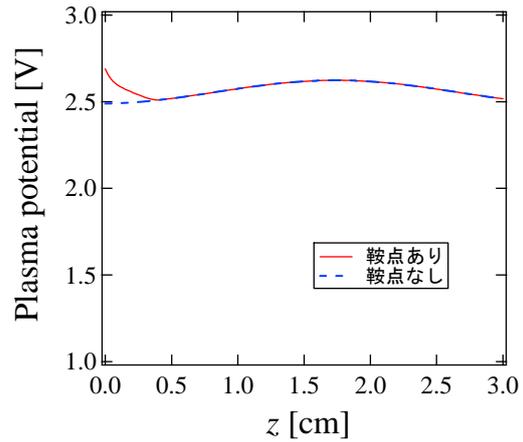


図 4 z 軸上のポテンシャル分布

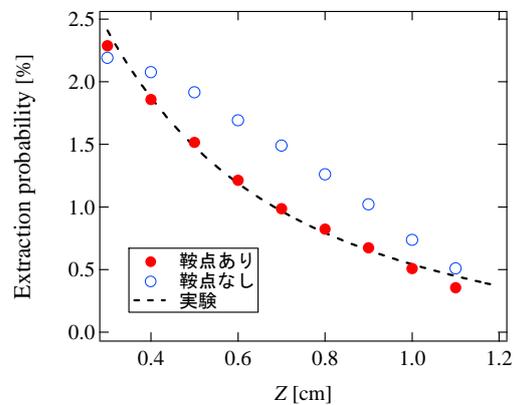


図 5 引き出し確率の計算・実験結果の比較

(4) ポテンシャル空間構造のうち、イオンビーム軸に平行な z 方向成分と、垂直な x, y 方向成分の、どちらが H 引き出しに重要な役割を果たしているかを調べるために、二種類のポテンシャルを(3)のモデルに導入して計算した。使用したポテンシャルは、① z 方向のみに図 4 のような空間構造を持ち、 x, y 方向は構造を持たず一様な、「一次元的」ポテンシャル(ただし鞍点あり)、②上記(3)と同じ 3 次元ポテンシャル(鞍点なし)の 2 種類のポテンシャルである。つまり①は z 方向成分、②は x, y 方向成分が、それぞれ H 引き出しに主体的な役割を果たすような、ポテンシャル構造となっている。

計算結果を図 6 に示す。①はポテンシャルの鞍点を持ち、H を直接引き出し孔へ引き込む電位構造をしている。ゆえに、引き出し孔に近い領域のみ、大きな引き出し確率を得る事ができる。一方で、引き出し孔より離れた鞍点より外側の領域からは、ほとんど H の引き出しは起こらない。

②の 3 次元ポテンシャルは、鞍点を持たず、電位障壁の存在によって、H 引き出しには不利な条件である。しかしながら、全体的

に高い引き出し確率を得る事ができる。これは、図3のように、イオン源の中心に頂点を持つポテンシャル丘が、x方向に形成されていることに起因する。イオン源の中心からx方向に少し離れた位置に存在するHは、x方向、つまりイオン源の中心方向に輸送される際、ポテンシャル丘からエネルギーの補給を受けることができる。Hはこの補給したエネルギーを利用して、z方向の電位障壁を上り、引き出し孔へ到達することが可能となる。つまり、ビームに垂直な方向のポテンシャル成分が、高いH引き出しの要因となっている。

過去のH引き出しモデルは、このx方向のポテンシャル構造を無視したものが多く、H引き出しは、単にポテンシャルの鞍点に依存するものであった。つまり、引き出し孔-鞍点の間に存在するHのみが、電場によって引き出し孔へ引き込まれて、ビームとして引き出されるとされ、鞍点の位置がH引き出しを決定すると長く信じられてきた。しかしながら、鞍点のみに依存した従来のモデルでは、図6の計算結果のように、実験結果を正しく再現することはできず、モデルとして適切ではない事が明らかになった。これは、ポテンシャルの鞍点はH引き出しの最重要要素ではないことを意味し、むしろx,y方向の、ビームに垂直な方向のポテンシャル成分が、H引き出しに対して、大きな役割を果たしていることがここから明らかになった。これは負イオン源の高効率化に、大きな役割を果たす新たな知見であると考えられる。

さらにH引き出しに対して、次元を落とし、簡略化したモデルでの研究が多く報告されている。しかしながら本計算結果より、この種のモデルは、正しい結論を与えない可能性が高い。H引き出しモデルは、3次元モデルとして構築する必要があると考えられる。

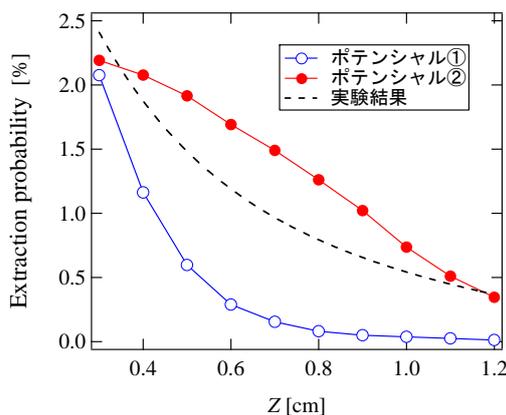


図6 2種類のポテンシャルでのH引き出し確率の比較

(5) 上記のポテンシャル効果は、Hがポテンシャルに束縛される事によって起こる。そこで、Hの初期エネルギーを変えることでHの場への束縛状態を変化させ、そのときの引き出し確率の違いを計算で調べた。なお、この引き出し確率はレーザー領域からの平均値ではなく、ある1点からの確率値である。結果を図7に示す。Hのエネルギーが上昇するほどに、H引き出し確率が減少する。つまり、Hのエネルギーが低く、ポテンシャルにトラップされやすいほど、ポテンシャル効果が大きく、高い引き出し確率を得られる事が明らかになった。つまり、イオン源の高効率化を図るためには、ある程度Hのエネルギーが低い方が望ましいことが分かった。

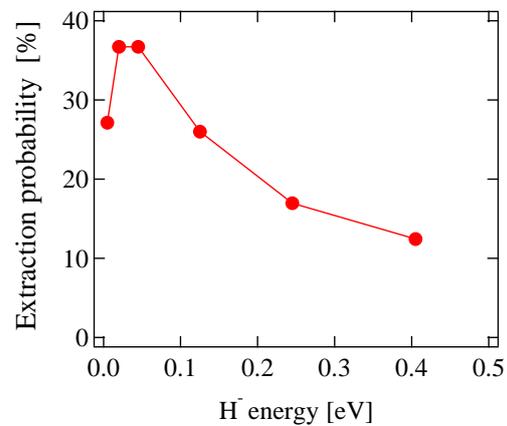


図7 引き出し確率のHエネルギー依存性

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1件)

- ① Y. Matsumoto, M. Nishiura, M. Sasao, H. Yamaoka, K. Shinto and M. Wada, "Influence of H⁻ velocity on H⁻ extraction probability from a negative ion source", Review Scientific Instrument, 81, 2010, 02B701

[学会発表] (計3件)

- ① 松本新功, 西浦正樹, 山岡人志, 神藤勝啓, 笹尾真実子, 和田元, 「H⁻イオン源におけるH⁻引き出しモデルの精密化」, 日本物理学会第65回年次大会, 2010 3/20-23, 岡山大学 津島キャンパス
- ② Y. Matsumoto, M. Nishiura, M. Sasao, H. Yamaoka, K. Shinto and M. Wada, "Dependence of H⁻ Velocity Distribution

in Ion Source Plasma upon Extracted H
Beam Current” ,
13th International Conference on Ion
Source, September 21-25 2009,
Gatlinburg Tennessee USA

- ③松本新功, 西浦正樹, 山岡人志, 神藤勝啓,
笹尾真実子, 和田元, 「Hイオン源プラズマ
内での H 輸送と電位構造の相関」, 日本物
理学会 第 64 回年次大会, 2009 3/27-30,
立教大学 池袋キャンパス

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 新功 (MATSUMOTO YOSHIKATSU)
徳島文理大学・人間生活学部・講師
研究者番号 : 50441598

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :