

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656061

研究課題名(和文)極超音速フリージェットによる極端紫外プラズマ光源の定常化への挑戦

研究課題名(英文)Challenge for continuous operation of extreme ultra-violet light source using hypersonic jet

研究代表者

堀岡 一彦(Horioka, Kazuhiko)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10126328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：真空中に定常で局在化させたガス層を形成する技術の確立を目指した。「極超音速ジェットを真空中に局在化させて形成し制御する技術」と「真空中に投入したジェットを高効率で回収する技術」を確立することを目標として研究を行った結果、以下の事を明らかにした。最小長さ(最大膨張)形状の衝撃波フリーノズルを用いることが重要であること、極超音速流の形成の際にはクラスター生成によって圧力特性が変化すること、クラスターの生成過程に影響する因子は、ガス流の淀み圧力、よどみ温度、およびノズル形状であること、定常流生成のためにはディフューザーによる高効率ガス回収が重要であること。

研究成果の概要(英文)：In order to make a controllable beam target, a hyper-sonic localized jet was formed quasi-continuously in vacuum. An apparatus composed of a miniature Laval nozzle, a gas target chamber, and a supersonic diffuser was constructed for studies on the gas target formation and the gas-dynamical study on the nozzle and diffuser flows. Results showed, for continuous operation of the free-jet flow, diffuser optimization is critically important. We measured static pressure profiles in the supersonic nozzle as a function of the stagnation pressure and the nozzle geometry, which indicated effects of non-equilibrium condensation on the pressure profiles. We proposed a semi-empirical method to predict the nucleation and cluster formation processes based on the nozzle flow experiments and a numerical model considering the condensation process. The model could characterize the supersaturated states and onset of the condensation from the pressure profiles of the non-equilibrium condensation flow.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：超音速ジェット プラズマ ディフューザー 衝撃波 デトネーション

1. 研究開始当初の背景

粒子ビームやレーザーと物質との相互作用を研究する際には真空容器中に設置した固体状のターゲットが用いられることが通常であり、相互作用させる物質の初期密度や分布をパラメータとして変化させることが難しい。また、希ガスをはじめとする常温でガス相の物質を用いるには極低温に冷却(凝縮)させるなどの工夫が必要であるうえに標的密度を制御できない。

本研究は Mach 数 6 以上の極超音速定常フリージェットを真空雰囲気中に局在させて形成、これを制御する技術とディフューザーで高効率回収する技術を確立することを目的とした。

2. 研究の目的

本研究は、密度と分布の制御が可能な極超音速定常ガス・ターゲットを真空中に形成および回収する技術を確立すること。また、形成されたガス標的にレーザー照射を行い、ガスとレーザー吸収領域との相互作用を明らかにすることを目的とした。

さらには、極端紫外光を定常的に発生できる高輝度プラズマ光源の定常化の可能性を検討することを目指した。

3. 研究の方法

極超音速に標的ガスを加速して真空中に投入することの利点は以下のとおりである。

真空中に投入されたガスは平均自由行程が代表長さより小さい場合は流体的に、大きい場合には分子運動論的に膨張あるいは拡散すると予想される。超音速ノズルを用いて加速・投入されたガスは、より局在化され制御可能である。

ノズル出口流速 V_e と熱速度 $V_m=(2T/m)^{1/2}$ の比を α とすると、 α はガスが比局在

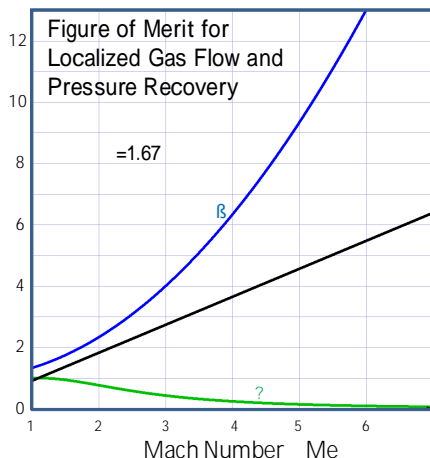


図1 超音速ジェットのマッハ数に対するガス標的の局在化と圧力回復の性能指標

化する目安であり、マッハ数 Me の関数とし、以下のように書ける。

$$\alpha = V_e/V_m = (\gamma/2)^{1/2} M_e$$

ここで、 α は動作ガスの比熱比である。また、同様にノズル出口でのガスの数密度と圧力との比を β 、超音速流の圧力回復率の目安を γ と定義すると、これらは同様にマッハ数の関数として解析的に導くことができる。ただし、ここでは超音速流の圧力回復率は垂直衝撃波によるものを指標として用いた。

図1にこれら(β , γ)の指標を示す。図に示すように超音速に加速された標的ガスジェットのマッハ数に対する性能指標は、マッハ数が増加するほどガスは局在化するが圧力回復は難しくなることがわかる。

超音速流中では、境界層の成長、衝撃波の発生、およびそれらの相互作用によって流体のエネルギーの散逸が増大し、圧力回復率が低下するとともに定常動作のための動力が飛躍的に大きくなる。したがって、超音速ジェットの形成と圧力回復に際しては、境界層の成長はできるだけ抑制することと超音速ノズルの内部では衝撃波を発生させないことが不可欠である。また、圧力回復に際してはディフューザー形状を注意深く設計することが重要と予測された。

一方、超音速流中にレーザー照射を行うと吸収領域とこれによって形成される衝撃波の進展は通常の場合とは異なることが予想される。レーザーと超音速流との相互作用も重要な研究課題である。

以上の研究背景を基に、本研究では研究期間内に明らかにする課題として、以下を設定した。

- (1) 特性曲線法を用いて衝撃波フリーで最小長さ、極超音速までガスを加速できるノズルの最適形状を決めること
- (2) 真空中のフリー・ジェットの密度分布を制御する技術を確立すること
- (3) 超音速ジェットの圧力回復率に対する Mach 数とレイノルズ数依存性を明らかにすること
- (4) 定常動作のために圧力回復されたガスの回収・循環技術を確立すること
- (5) レーザーとガス標的との相互作用を調べる
- (6) 最適密度に制御された標的ガスにレーザー照射、レーザーとガスとの相互作用を明らかにし、極端紫外光の発生条件を調べる

また、これらの研究によって開発された要素技術を統合して、最終的には極端紫外線を

定常に発生させる技術を確立することを目指した。

図2に本研究のために試作した試験装置とガスジェットとレーザーとの相互作用実験の概念を示す。試験装置はガスを加速するための軸対称の超音速ラバールノズル、レーザー照射領域を模擬したキャビティー、超音速フリージェットを圧力回復させるためのディフューザーで構成した。なお、背圧を変化させてディフューザーによる限界回復圧力値を測定するために、模擬キャビティーの圧力を真空ポンプとバルブで調整した。

ノズル壁面での境界層成長の影響を小さくするために、特性曲線法で求めた最小長さ形状の(ミニチュア)ラバールノズルを用いて動作ガスを加速した。加速されたガスは真空容器中でフリージェットを形成した。

一年目に極超音速ノズルと形状可変ディフューザーの設計製作を行い、超音速ジェットの形成過程と基本的な圧力回復特性を実験的に調べた。次年度にはジェットのマッハ数とディフューザー形状をパラメータにして圧力分布と有効マッハ数を測定し、ディフューザーによる圧力回復特性を明らかにした。アルゴンとヘリウムを超音速流を形成して圧力特性を比較し、超音速形成過程での非平衡凝縮過程の影響を評価した。

最終年度には CO₂ レーザーを用いて、ガス標的中に形成される衝撃波とレーザープラズマとの相互作用を調べた。

最終的にはガス・ターゲットに CO₂ レーザーを照射し、極端紫外光の発生に最適な密度を得るための条件とこれを定常的に動作させるための条件を空力的に明らかにすることを目指した。

また、光源プラズマ源としてはキセノンガスや Sn (すず) などの金属蒸気を媒体とするジェットを動作気体に用いることが想定されるが、定常動作条件の確立後はレーザー・ターゲットとしての動作領域を拡大するため、凝縮性のガスや錫などの金属蒸気を用いてクラスター形成過程についても検討することとした。

極超音速ガスジェットと定常EUV源の概念図

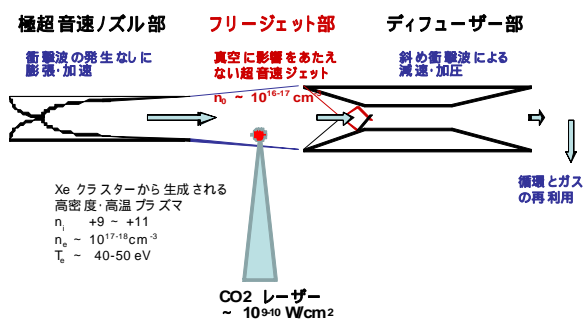


図 2 極超音速定常ジェット形成とレーザー相互作用実験の概念

4. 研究成果

超音速ミニチュア・ラバールノズル、真空容器、およびディフューザーで構成される試験装置を製作して、極超音速フリージェットの形成実験を行い、ラバールノズルやディフューザー形状に対する有効マッハ数と圧力回復特性の変化を明らかにした。

得られた圧力特性と凝縮過程を考慮した超音速非平衡凝縮流の数値シミュレーション結果との比較から凝縮過程を解析できる半実験的モデルを提案した。

また、CO₂ レーザーを用いて、 μ 秒級のパルス照射によって駆動される衝撃波とレーザー吸収領域との相互作用を調べた。その結果、CO₂ レーザー駆動によって駆動されるガス標的は常にデトネーション状態(衝撃波とレーザーエネルギーの吸収領域とが相互作用を行いながら吸収領域が高速に移動する状態)となること、さらにはレーザー吸収領域と金属標的とが共存すると、吸収領域は通常の衝撃波では説明できない速度でレーザー照射方向に移動することなどが明らかになった。

本研究によって得られた結果は以下のように要約できる。

(1) ラバールノズル上流の淀み点圧力をパラメータにして、ノズル壁面と模擬キャビティー部で測定された圧力分布と有効マッハ数を評価した結果、キャビティー部の圧力はディフューザー背圧の関数であり、背圧が限界圧力を超えると下流の圧力に比例してキャビティー圧力の上昇が観測された。

(2) ディフューザーによって回復されるフリージェットの圧力は、超音速流の圧力回復基準として通常用いられる垂直衝撃波の回復圧力の 20%程度であることが明らかになった。

(3) ミニチュアノズルの壁面に静圧孔を設置し、超音速凝縮流の圧力特性を測定し、ガスの非平衡凝縮の影響による特徴的な圧力分布を観測した。

(4) 圧力特性と凝縮を考慮した流体シミュレーションの比較から非平衡凝縮過程を半実験的に明らかにする手法を確立した。

(5) アルゴン・ガスをを用いて超音速ノズル内部の非平衡凝縮流の振舞いを調べ、凝縮過程は、ノズルの膨張率、淀み圧、および淀み温度の関数であることを明らかにした。

(6) 上記の解析手法は、超音速ノズル内のクラスター形成過程の評価に有効であり、凝縮型クラスターのサイズ分布や高フラックス化の見積もりに有効であることを示した。

(7) μ 秒級のパルス幅を持つCO₂レーザーで相互作用実験を行い、 μ 秒 - J級のCO₂レーザーで照射されたガス標的は、常にレーザー駆動のデトネーション波を伴って進展することがわかった。

(8) レーザーとガス標的との相互作用領域に金属標的が存在すると、吸収領域の進展速度は高くなり、フロント部の進展速度は約10⁴m/秒に達すること。また、このように高速の吸収領域の移動は、通常の衝撃波とレーザー吸収領域との相互作用では説明できないことを示した。

以上、本研究で得られた成果によって、定常あるいは高速の繰り返しでレーザープラズマを生成させるための指針が得た。また、超音速膨張流によって形成される凝縮型クラスタのサイズやフラックスを制御するための手法を提案した。

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 4件)

1. K.Takahashi, M.Nakajima, J.Hasegawa, K.Horioka, "Cluster Caractrization in Supersonic Nozzles using Simi-empirical Modeling of Non-equilibrium Condensation Flow", Journal of Applied Physics, Vol.113, 024502-1-6 (2013) (査読有)

2.Yujin Ogata, Mitsuo Nakajima, Kazuhiko Horioka, et.al., "Laser target using continuous supersonic jet in vacuum", IFSA 2011 Seventh International Conference on Inertail Fusion Science and Applications, EPJ Web of Conferences, 59, 18005 (2013) (査読有)

3. K.Takahashi, Y.Ogata, M.Nakajima, K.Horioka, "Cluster Formation in Hypersonic Miniature Nozzle", 18th International Symposium on Heavy Ion Fusion, Annual Report Contribution of the High Energy Density Research Community, GSI-2011-2, p.86, (2012) (査読無)

4. Y.Ogata, K.Takahashi, H.Kuwabara, M.Nakajima, K.Horioka, "Laser Target using Continuous Supersonic Jet", NIFS研究会, NIFS-PROC-90, pp.22-25 (2012) (査読無)

[学会発表](計 2件)

1. 米澤 健, 中島充夫, 堀岡一彦, "極超音速ジェットとレーザー生成衝撃波との相互作用実験", NIFS(核融合科学研究所)研究会「パルスパワー応用技術の最前線」, 平成26年1月8日, 核融合科学研究所会議室 (2014)

2. K.Horioka, M.Nakajima, et.al., "Jaspanese Program Overview on HIF and Related Research Activities", Proc. 19th Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, 12-17 August 2012, Berkeley, California, US (2012)

[図書](計 0件)

[産業財産権]
出願状況(計 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 1件)

名称:
L P P方式のE U V光源とその発生方法
発明者: 桑原 一, 堀岡一彦
権利者: 株式会社I H I, 東京工業大学
種類: 特許
番号: 1422286
取得年月日: 2014年1月1日
国内外の別: 国外(台湾)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者
堀岡一彦 (Horioka, Kazuhiko)
東京工業大学・総合理工学研究科・教授
研究者番号: 10126328

(2)研究分担者
()
研究者番号:

(3)連携研究者
中島 充夫 (Nakajima, Mitsuo)
東京工業大学・総合理工学研究科・助教

研究者番号: 30198098