

シュリーレン法を用いたラバールノズルの性能評価

○長原一樹^{A)}、村瀬尊則^{A)}、柳原悠人^{A)}、岡田光司^{A)}、清水貴史^{A)}、中川翔^{A)}、
田上裕之^{A)}、小川国大^{A)B)}、清水昭博^{A)B)}、PAENTHONG Worathat^{B)}、磯部光孝^{A)B)C)}、
PROMPING Jiraporn^{D)}、KLAYWITTAPHAT Ponkris^{E)}、POOLYARAT Nopporn^{D)}

^{A)}核融合研、^{B)}総研大、^{C)}タイ・マハサラカム大、^{D)}タイ国家原子力技術研究所、^{E)}タイ・タクシン大

1.はじめに

1.1 経緯

タイ国家原子力技術研究所 (TINT) はかねてから整備を進めてきたトカマク型装置 Thailand Tokamak-1 (TT-1) による核融合プラズマ研究を 2023 年に開始した。我々は、核融合科学研究所と TINT が締結した国際学術交流協定に基づき、プラズマ計測を中心とした研究協力を実施している。TT-1 では現在、燃料ガス供給効率の向上を目的として、超音速分子ビーム入射 (SMBI) システムの導入を進めている。我々は、これまでに大型ヘリカル装置実験等において蓄積してきた同システムに関する知見・経験を基に、TT-1 における SMBI システムの導入にも協力している。この度、燃料ガスを超音速まで加速するために用いるラバールノズルの設計と評価を TINT と共同で実施した。本報告では、その評価方法および得られた結果について述べる。

1.2 SMBI とは

SMBI は、核融合プラズマ実験装置で生成するプラズマに対して、燃料を供給する装置の一種である。高圧の燃料ガスをラバールノズルから超音速で入射することにより、超音速未満でガスを入射する従来の方法と比較して、高効率な燃料供給が可能となる。

1.3 ラバールノズルとは

ラバールノズルは、上流から供給されたガスを超音速まで加速して射出するノズルである。模式図を図 1 に示す。ラバールノズルにより供給されたガスは、まずスロート部において加速・凝縮される。スロート通過後、ガスは断熱膨張するが、この際に発生する膨張波と圧縮波は、ノズル形状によって相殺される。これにより、ガスは超音速まで加速される。

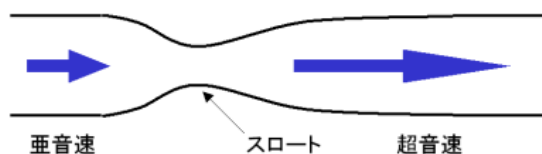


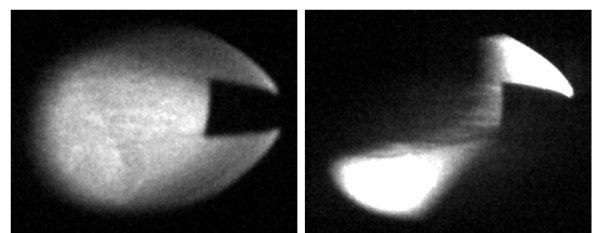
図 1 ラバールノズルの模式図

2.評価方法の検討

TINT と共同で設計したラバールノズルはマッハ数(M)=7 と M=10 の 2 種類であり、実機製作前に挙動が設計から大きく外れていないかを評価した。評価用のラバールノズルは 3D プリンタで製作した。評価指標として、射出ガスの発散角を用い、指向性を評価した。発散角を評価する手段として、射出ガスを光学的手法により可視化・撮影する方法を採用した。光学的手法には様々なものが存在するが、本報告ではシャドウグラフ法およびシュリーレン法について検討した。両手法はいずれも、気体あるいは液体の密度勾配に起因する光の偏向を、スクリーンやカメラ上に投影して観察する手法である^[1]。各手法の特徴を表 1 に示す。シャドウグラフ法では、密度勾配に対する検出感度が不十分であったため (図 2)、装置構成は若干複雑となるものの、感度向上が見込めるシュリーレン法を採用した。シュリーレン法における光学装置構成例を図 3 に示す。

表 1 光学的手法の比較

	シャドウグラフ法	シュリーレン法
特徴	密度勾配の変化を可視化(2 次微分)	密度勾配を可視化(1 次微分)
装置構成	点光源、凹面鏡、カメラ	点光源、凹面鏡、カメラ、ナイフエッジ
長所	装置構成が比較的単純	検出感度比較的良い
短所	検出感度比較的悪い	装置構成が若干複雑



シャドウグラフ法

シュリーレン法

図 2 シャドウグラフ法とシュリーレン法の比較。大気圧中で 5 MPa の Ne を射出。

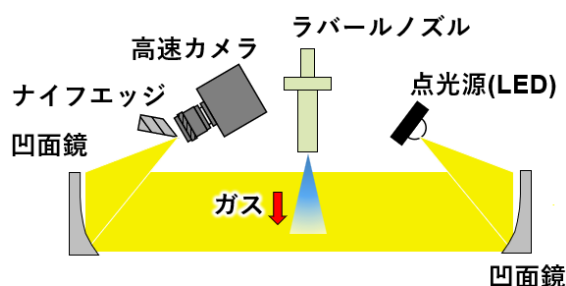


図 3 シュリーレン法の光学装置構成例

3.評価方法の詳細

3.1 実際の光学装置構成

実際に構築した光学装置の構成を図 4 に示す。

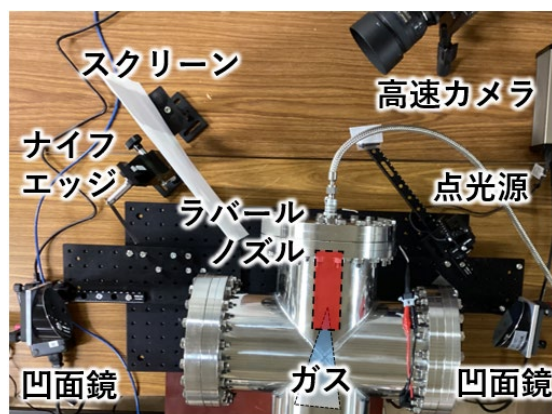


図 4 実際の光学装置構成

像の取得方法は検討の結果、紙をスクリーンとして像を投影し、その裏面側から高速カメラで撮影する方法とした。高速カメラは Photron 社の FASTCAM Mini AX50 を採用した。なお、ブレッドボードのサ

イズに制約があったため、ナイフエッジ、スクリーン、高速カメラは同一ブレッドボード上には配置していない。

3.2 光学装置の調整

密度勾配の検出感度を向上させるためには、光学装置の調整が重要である。詳細は参考文献^[1]に譲り、ここでは本報告において試行錯誤した調整項目について述べる。

点光源を用いることで感度向上が期待できる一方、光量不足が問題となる。このため、本報告ではピンホールの代わりに絞りを使用し、感度と光量のバランスが最も良好となる光源径を探索・調整した。さらに、調整のたびにガスを入射することは非効率であるため、調整時の観測対象には加熱したハンダゴテ周辺で発生する熱対流を用いた。

4.結果

4.1 シュリーレン法による可視化結果

M=7 と M=10 のラバールノズルについて、Ne を 5 MPa で射出した場合および H₂ を 0.5 MPa で射出した場合の可視化を試みた。チャンバー内圧力は、大気圧、50 kPa、20 kPa、および 10 kPa とした。シュリーレン法により可視化した画像（以下、シュリーレン画像）を、それぞれの条件について図 5 に示す。大気圧条件下では、いずれのノズルおよびガス条件においても、射出ガスを明瞭に可視化することができた。一方、真空条件下では、動画では射出ガ

	真空チャンバーの圧力			
	大気圧	50 kPa	20 kPa	10 kPa
M=10 ラバールノズル Ne 5 MPa				
M=10 ラバールノズル H ₂ 0.5 MPa				
M=7 ラバールノズル H ₂ 0.5 MPa				検出できず

図 5 各条件におけるシュリーレン画像

スの存在を視認できたものの、静止画では視認が困難であった。特に、 $M=7$ のノズルを用いた H_2 を 0.5 MPa で射出し、チャンバー内圧力を 10 kPa とした条件では、動画においても射出ガスを視認することができなかった。なお、図 5 に示す真空条件下の結果は、ガス入射時と非入射時の画像の差分として処理したものである。

4.2 発散角の評価結果

4.1 の結果からは射出ガスの発散角を評価できなかったため、 $M=7$ のノズルで H_2 を 0.5 MPa ・チャンバー内圧力 90 kPa の条件で可視化を試みた。その結果、限定的ではあるが射出ガスの視認は可能であった (図 6)。このシュリーレン画像を用いて射出ガスの発散角を算出した。得られた評価結果を図 7 に示す。発散角は 11.53° であり、指向性は概ね良好であった。このことは、少なくとも当該条件下では設計と大きく矛盾しない挙動であることを示唆する。

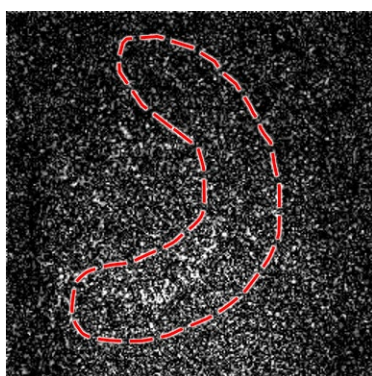


図 6 $M=7$ のラバールノズルから H_2 を射出した時のシュリーレン画像。チャンバー内圧力は 90 kPa 。画像は差分処理したもの。

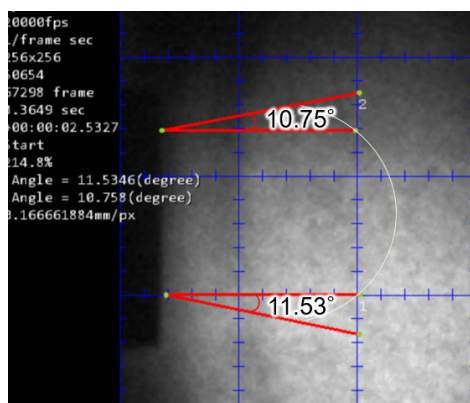


図 7 $M=7$ のラバールノズルから H_2 を射出した時の発散角。チャンバー内圧力は 90 kPa 。

5.考察

本報告では、真空条件下においてシュリーレン画像のコントラストが低く、静止画での明瞭な可視化が困難となった。要因として、以下の 4 点が支配的であったと考える。

5.1 真空条件における密度勾配の低下

真空中では周囲の気体が少ないため、射出ガスの内側と外側の密度差が小さくなる。その結果、シュリーレン画像の明暗差が弱まると考える。

5.2 スクリーンを介した間接撮影による感度低下

本報告の光学装置 (3.1) では、スクリーンに投影した像を高速カメラで撮影している。スクリーンを経由すると、光の拡散や反射により細かな明暗が弱まりやすいと考える。なお、像を高速カメラに直接取り込む方法も検討したが、現状の光学機器の調整条件では実現には至らなかった。

5.3 露光条件による時間平均化の影響

射出ガスの内部構造は時間的に揺らぐため、露光時間が相対的に長い場合、明暗の差が時間平均化され、輪郭の不鮮明化につながると推測する。本評価では 2~3 秒間連続で撮影していた。

5.4 光学機器の調整不足

ナイフエッジ、スクリーン、高速カメラを同一ブレッドボード上に配置できなかったことから、光軸調整が十分ではなかったと考える。

6.結論

本報告では、 $M=7$ および $M=10$ のラバールノズルの性能評価を目的として、シュリーレン法による射出ガスの可視化を実施した。真空条件では静止画での可視化が困難であった一方、一部の条件では視認が可能であり、発散角の評価に到達できた。真空条件での可視化が難しかった主因は、(1) 真空条件での密度勾配の低下、(2) スクリーンを介した間接撮影による感度低下、(3) 露光条件による時間平均化の影響、(4) 光学機器の調整不足であると考えられる。今後は、これらの改善により、真空条件下における可視化の改善を図る。

参考文献

[1] 流れの可視化学会編、新版流れの可視化ハンドブック、朝倉書店、308-318、(1986)。