

## ガスターゲットレーザーイオン源開発のための軸流型空力窓特性の検討

### STUDY ON CHARACTERIZATION OF COAXIAL TYPE AERODYNAMIC WINDOW FOR DEVELOPMENT OF GAS-TARGET LASER ION SOURCE

高橋一匡<sup>#</sup>, 佐々木徹, 菊池崇志

Kazumasa Takahashi<sup>#</sup>, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi

Nagaoka University of Technology

#### Abstract

We have investigated the characteristics of a coaxial type aerodynamic window for using as a gas target of laser ion sources. The estimation of pressure and mass flow rate were carried out assuming one-dimensional supersonic flow in a nozzle. The results indicated that the pressure ratio of vacuum chamber to atmosphere can be increased with increasing the Mach number of supersonic flow and mass flow rate has the maximum value as a function of Mach number. Also, an experimental investigation of characteristics was performed. The results show that the experimental results for the pressure characteristics corresponds to the estimation using the one-dimensional model qualitatively.

#### 1. はじめに

レーザーイオン源は高フラックスの重イオンビームの発生のために利用されてきているが[1]、一方で供給できるイオン種はレーザーのターゲットが金属や炭素など室温で固体の元素にもものに限られてきた。一方で、室温で気体の元素についても気体からクラスターを生成し、それをターゲットとしたレーザーイオン源なども検討されている[2]。この方法の課題として高密度の気体を真空容器に供給しつつイオンビームが輸送できるよう圧力の上昇を抑制する必要がある。気体を真空容器に供給しつつ真空を保つには通常、差動排気を利用されるが、保持すべき圧力差が大きくなると必要となる差動排気も多段にする必要があり、要求される真空ポンプの数も増加するためシステムが肥大化する。そこで本研究では超音速流による気体力学的な窓を大気と真空容器の間に形成し、それ自身をレーザーの標的とすることで真空と接した状態で気体標的を定常的に形成できる可能性のある空力窓について検討を行う。

流体は流れ方向の圧力(動圧)とそれに垂直な方向の圧力(静圧)が異なるため、真空に対しては流れ方向と垂直に接するようにし、高圧の気体とは流れに対するようにノズルを配置することにより、真空と高圧気体の圧力差を保持することができる。この技術は、固体の窓では熱負荷に耐えられないハイパワーレーザーの窓などの利用を目的として研究が行われてきた[3, 4]。本研究では大気圧と真空の圧力差を保持するため、Figure 1 に示すように同軸円筒型の超音速ノズルを真空容器から大気に向けて設置し、軸流型の超音速流による空力窓を形成する。その際に供給する気体の圧力や構造に対する圧力保持や気体流量などの特性について調べ、空力窓の特性について検討を行う。

#### 2. 一次元流モデルによる空力窓特性

本研究では空力窓が保持可能な大気と真空容器内の圧力比や必要となる気体の流量などを見積もるため、軸流型の空力窓について流路断面内で一様な流れを仮定したモデルにより気体力学的な特性の検討を行った。まず、貯気槽の圧力を  $P_0$ 、真空容器の圧力は超音速ノズル出口の静圧  $P_1$  に等しいとすると Mach 数  $M$  に対する圧力比は下記のように与えられる[5]。

$$\frac{P_0}{P_1} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma$  は気体の比熱比である。このとき、Mach 数  $M$  と流路断面積  $A$  のスロート断面積  $A^*$  に対する比との関係は

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[ \frac{(\gamma - 1)M^2 + 2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (2)$$

であり、境界層や断熱膨張時の冷却による凝縮などの影響を無視すれば、Mach 数はノズル形状、ノズル内の位置のみに依存する。(1)式より Mach 数が大

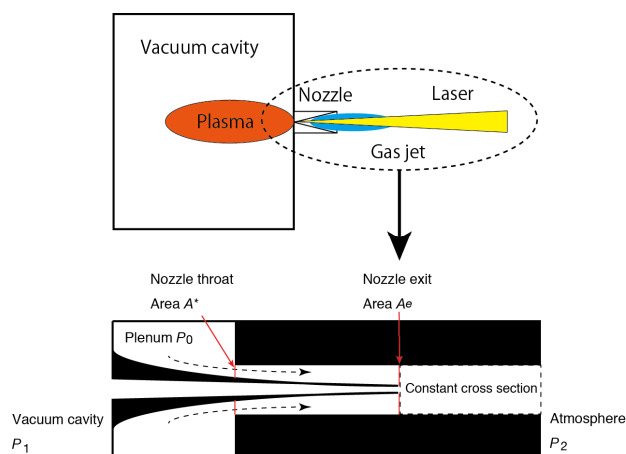


Figure 1: Concept design of gas target laser ion source.

<sup>#</sup> kazumasa@vos.nagaokaut.ac.jp

きいほど貯気槽とチャンバー内の圧力比が大きくなることわかる。しかし、ノズル内で超音速流を保つためには Mach 数が大きいほど流れの背圧に対して、より大きな貯気槽圧力が要求される。超音速流は減速する際に衝撃波を形成するが、流路内で超音速流を維持するためには衝撃波後流の圧力を背圧よりも高くする必要があり、ノズル後流から大気中に噴出するまでの一定断面流路内で衝撃波により圧力が上昇すると仮定すると貯気槽の全圧に対する衝撃波背後の全圧  $P_2$  の比は以下の式で求めることができる。

$$\frac{P_2}{P_0} = \left[ \frac{(\gamma+1)M^2}{(\gamma-1)M^2 + 2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[ \frac{\gamma+1}{2\gamma M^2 - (\gamma-1)} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3)$$

一定断面積流路で超音速流を維持するためには、各 Mach 数において背圧である大気圧に対して  $P_0/P_2$  倍以上の圧力の気体を貯気槽に供給する必要がある。アルゴンを用いた際の空力窓特性について見積もると Figure 2 のようになる。

次に貯気槽圧力  $P_0$  に対するチャンバー圧力  $P_1$  の変化を検討するため、 $P_0$  に対する  $P_1/P_0$  の変化を Mach 数毎に計算した結果を Figure 3 に示す。それぞれの圧力比  $P_1/P_0$  は動作条件が満たされる領域のみが示されており、 $M < 1$  の亜音速では音速に達しない条件、 $M = 1$  以降では超音速流が形成される始動条件を満たす領域のみが示されている。この結果より、Mach 数を固定した時、つまり、ノズル形状を固定した時に  $P_1/P_0$  は一定のため、始動する範囲で最も低い  $P_0$  を供給した際にチャンバー圧力も最小となることがわかる。また、図に示される通り、Mach 数を大きくすると、始動に必要な貯気槽圧力が高くなるが、そのうちの最小の圧力の気体を供給することにより、チャンバー内の圧力をより低く抑えることが可能であることが示された。

また、各 Mach 数で  $P_1$  を最小とするために必要な  $P_0$  を供給した場合の流量を検討する。亜音速流及び超音速流の場合の質量流量はそれぞれ以下の式で見積もられる。

$$\dot{m} = \frac{P_0 A^*}{\sqrt{RT_0}} M \sqrt{\gamma} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (4)$$

$$\dot{m} = \frac{P_0 A^*}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\gamma} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \quad (5)$$

ここで、 $T_0$  は貯気槽の温度、 $R$  は気体定数を示している。ここで、一定断面流路の面積  $A$  を固定し、Mach 数と流路断面積の比の関係である(2)式を満たすようスロート面積  $A^*$  を小さくする条件で(1)式に基づいて Mach 数を変化させた時の質量流量を求めた。その結果、Figure 4 に示されるように流量は Mach 数に対して極大値を持つことが示された。また、超音速流の領域では Mach 数を大きくする際に流量が小さくなることが明らかになった。

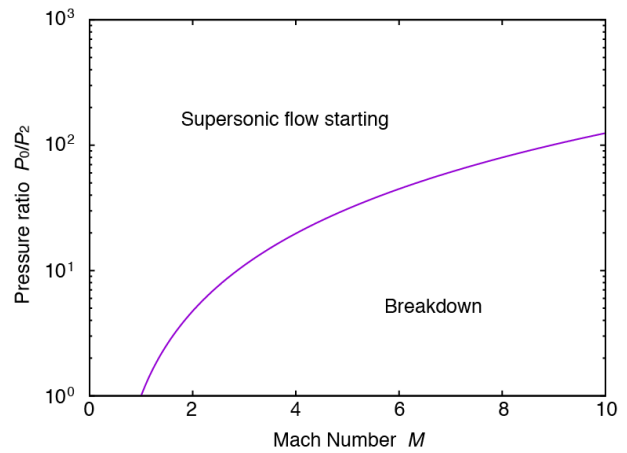


Figure 2: Required pressure ratio  $P_0/P_2$  for starting supersonic flow in the nozzle as a function of Mach number.

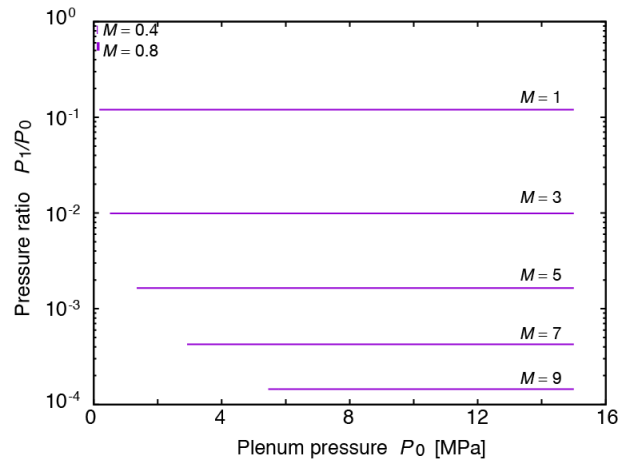


Figure 3: Dependence of pressure ratio  $P_1/P_0$  on plenum pressure  $P_0$  for various Mach number.

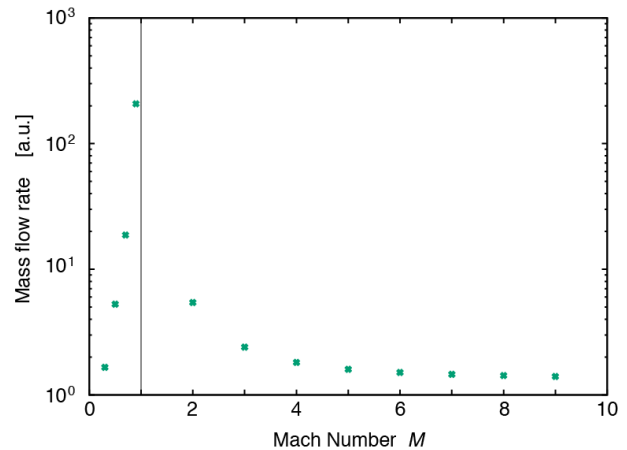
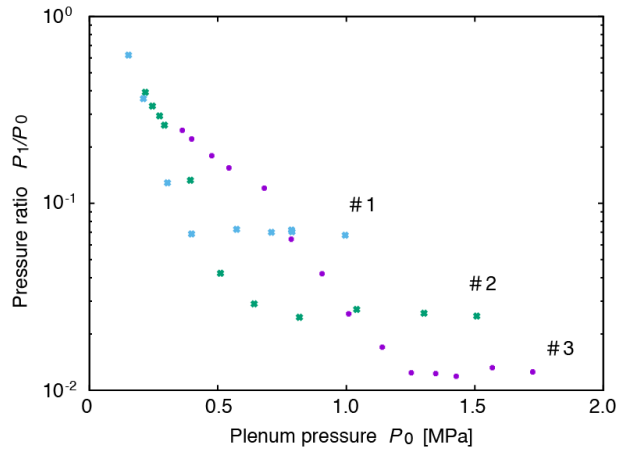


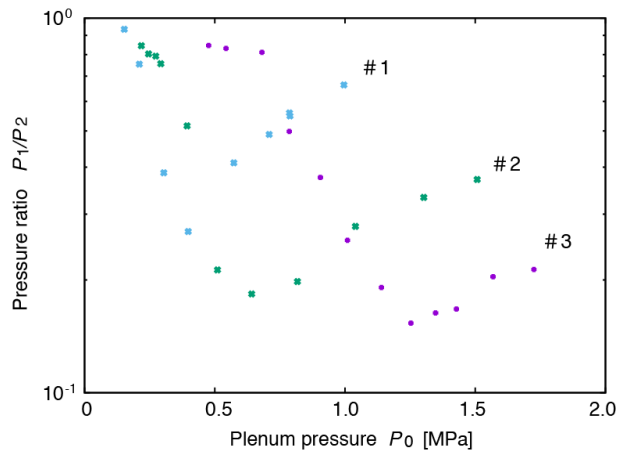
Figure 4: Dependence of mass flow rate on Mach number.

Table 1: Nozzle Parameters

Nozzle	#1	#2	#3
Diameter at constant cross section [mm]	3.1	2.6	2.3
Mach number at nozzle exit	2.0	2.6	4.3



(a)



(b)

Figure 5: (a) Dependence of pressure ratio  $P_1/P_0$  and (b)  $P_1/P_2$  on plenum pressure for various nozzles obtained by experiments.

### 3. 実験と考察

前章の見積もりを基に直径 1 mm のアルゴンによる空力窓を構築し、貯気槽及びチャンバーの圧力測定によりその圧力特性について評価を行った。実験には異なる 3 種類の一定流路断面を持つノズルを用い、それ

ぞれの特性については Table 1 に示す。

各ノズルにおいて貯気槽圧力  $P_0$  に対するチャンバーと貯気槽の圧力比  $P_1/P_0$  について調べた結果を Figure 5(a)に示す。いずれのノズルでも  $P_0$  が上昇すると  $P_1/P_0$  は下がっていき、ある値から一定になることが示された。この一定の圧力比となった領域でノズル内が超音速流になっている、すなわち、Figure 2 における始動状態になっていると考えられる。

また、同様に各ノズルにおける貯気槽圧力に対する圧力比  $P_1/P_2$  の関係を調べた結果を Figure 5(b)に示す。それぞれの圧力比には極小値があり、それは圧力比が一定となり始める始動圧力に一致する。結果より、Mach 数が高いほど始動圧力が高く、またチャンバー圧力の最小値が小さくなることが示され、一次元モデルによる見積もりと実験の圧力特性の傾向が一致することが確認された。これらの結果より超音速ノズル形状を固定した場合に圧力比を最小化する貯気槽圧力が存在することが示された。

### 4. まとめ

空力窓が保持可能な大気と真空容器内の圧力比や必要となる気体流量などを見積もるため、軸流型の空力窓について流路断面内で一様な流れを仮定したモデルにより気体力学的な特性の評価を行い、実験との比較を行った。その結果、Mach 数を大きくし、流路内で超音速流が保たれる最小限の圧力の気体を供給することにより、保持可能な圧力比を増加させることが可能であり、その際に超音速流の範囲では Mach 数を上げるほど流量を小さくできることが示された。これらの結果より、軸流型空力窓の圧力特性及び圧力比を改善するための指針が得られた。

### 参考文献

- [1] M. Okamura *et al.*, "PERFORMANCE OF THE LOW CHARGE STATE LASER ION SOURCE IN BNL", pp. 49-53, Proceedings of NAPAC2016, Chicago, IL, USA (2016).
- [2] P. Fournier, H. Haseroth, H. Kugler, N. Lisi, R. Scrivens, and F. Varela Rodriguez, "Novel laser ion sources", Rev. Sci. Instrum. 71, 1405 (2000).
- [3] E.M. PARMENTIER and R.A. GREENBERG. "Supersonic Flow Aerodynamic Windows for High-Power Lasers", AIAA Journal, Vol. 11, No. 7, pp. 943-949 (1973).
- [4] J. F. Reilly, "Window concepts for gas lasers", in Gas Flow and Chemical Lasers (A. S. Kaye and A. C. Walker, eds.), Institute of Physics Conference Series, 72, Adam Hilger, Bristol, England (1984).
- [5] H.W. Liepmann, A. Roshko, "Elements of Gasdynamics", Dover Publications, New York, (1956).