

極小容積衝撃波管を用いた超音速噴流の挙動観察

福岡寛, 竹村凌平*, 矢尾匡永**, 中村篤人***, 廣和樹**, 榎真一****

Observation of Supersonic Jet using small volume High-Pressure Shock Tube

Hiroshi FUKUOKA, Ryohei TAKEMURA, Masanori YAO,
Shigeto NAKAMURA, Kazuki HIRO, Shinichi ENOKI

The unsteady supersonic jet and the shock wave injected by the small volume shock tube are discussed by experimental results. The experimental was carried out by the BOS(background oriented schlieren) method. The main parameters are the pressure ratio by the high pressure chamber/ a back pressure P_h/P_b and the length of high pressure chamber/diameter ratio L_h/D . The velocity of the shock wave and supersonic jet were estimated by the simplified background oriented schlieren method. It was found that the propagation velocity of the shock wave is almost the same with time. It was found that the propagation velocity of the jet reaches the peak value at first. Then the propagation velocity of the jet decays with the time. When the jet velocity decays in some degree, they are almost same value with time.

1. 緒 言

近年, 様々な溶射技術が厚膜形成に提案されている。溶射技術の1つとしてコールドスプレー法がある¹⁾。コールドスプレー法はラバルノズルによって加速された固体粉末を基板へ衝突させ成膜する溶射方法である。加速された粉末は300m/sから1200 m/sの速さで基板に衝突する²⁾。コールドスプレー法の利点は酸化や熱影響を抑制し, センチメートルオーダーの被膜を形成することである。このためコールドスプレー法は, 固体状態での成膜プロセスに効果的であると言える。しかしながらコールドスプレー法には, 粉末供給装置や粉末を温めるためのヒーターなど様々な装置が必要であり大規模なものになってしまう。また成膜技術の向上には, 装置の小型および簡易化が必要となる。このためコールドスプレー法は, 固体状態での成膜プロセスに効果的であると言える。しかしながらコールドスプレー法には, 粉末供給装置や粉末を温めるためのヒーターなど様々な装置が必要であり大規模なものになってしまう。また成膜技術の向上には, 装置の小型および簡易化が必要となる。

そこで私たちは, コールドスプレー法の代わりに極小容

積衝撃波管を使うことを提案した。衝撃波管は衝撃波やガス膨張の動態を明らかにするための基礎実験装置である。衝撃波管は高圧室と低圧室から構成されており隔膜によって仕切られている簡素な構造になっている。衝撃波管によって形成された衝撃波は通過後に高温領域を作ることが報告されている。私たちはこれらの特徴および特性に着目し被膜形成に応用することを考えた。また従来の衝撃波管は衝撃波管の直径と高圧室長さの比である直径比が大きいものであった。極小容積衝撃波管とは衝撃波管の原理を応用した高圧室長さを極めて小さくした衝撃波管のことである。本衝撃波管は数値計算により高温領域の生成が有効であることが報告されている³⁾。しかし, 極小容積衝撃波管を使った実験の報告は少ない。また本衝撃波管は, 高圧室長さを容易に変更できることも特徴である。高圧室長さを伸ばすことは噴流の持続時間を長くし, このことが成膜の場合に噴流が粉末を加圧する時間を長くすると期待している。そこで本研究は極小容積衝撃波管を用いた高圧室長ささと圧力比を変えた場合の噴流の挙動を調査する。

流体の挙動を調査するためには流体の可視化を行う必要がある。高速流体を可視化する手法として, シュリーレン法が一般的に知られている。シュリーレン法の原理

* 機械制御工学専攻2年 ** 奈良高専機械工学科

*** 奈良高専電子制御工学科 **** 大阪産業大学工学部機械工学科

は密度変化により生じる光の屈折を利用している。しかし、シュリーレン法は複雑な光学系を必要とすることや、可視化範囲がレンズやミラーの直径に依存してしまう欠点がある。Meierは、シュリーレン法の欠点を改善した Background Oriented Schlieren (BOS) 法と呼ばれる可視手法を提案している。この原理はシュリーレン法と同様に密度変化によって生じる屈折率の変化を利用したものである。従来のシュリーレン法は、平行光束を作り出すための凹面鏡、ピンホールおよびナイフエッジなど複数の光学装置が必要であった。一方、BOS法ではシュリーレン法で必要となる光学装置が必要なく、適当な光源、背景画像およびカメラのみの非常に簡素な撮影系で計測を行うことができる。またBOS法は、可視化範囲がレンズやミラーの直径に依存しないため大型の計測対象に対しても安価に適用することができる。さらにこの手法は、適当な画像処理を行って撮影された背景画像のずれ量を求めることにより、密度情報を定量的に求めることが可能である⁴⁾。最近では太田らによって高精度な密度画像を作る手法が提案されている⁵⁾。この手法はカラーグリッド背景パターンが使われており、一般のBOS法と比較してより定量的に密度計測ができると期待されている。しかしBOS法は可視化手法としては確立されていないことが問題とされている。

本研究では簡易なBOS法を用い高圧室長さと圧力比が噴流の速度に与える影響を調査することが目的である。

2. 実験装置および方法

2.1 Background Oriented Schlieren (BOS) 法

図2にBOS法の計測原理の概要を示す。構成要素は背景画像、密度変化領域およびカメラである。密度勾配が存在しない場合の光の経路を実線で示す。密度勾配がある場合、光が通過すると密度変化に伴った屈折率変化によって通過光が屈折する。この光の経路を破線で示す。この2つの光の経路のずれ量を Δh とする。 Δh は屈折率勾配の積分量と、背景画像と密度勾配までの距離 L_b 、密度勾配からカメラまでの距離 L_c およびカメラの焦点距離 f により式(1)のように表される⁷⁾。また、屈折率と密度の関係は式(2)で表される。ここで n, ρ, G および r はそれぞれ屈折率、密度、Gladstone-Dale定数および背景画像のストライプと垂直な方向の座標である。

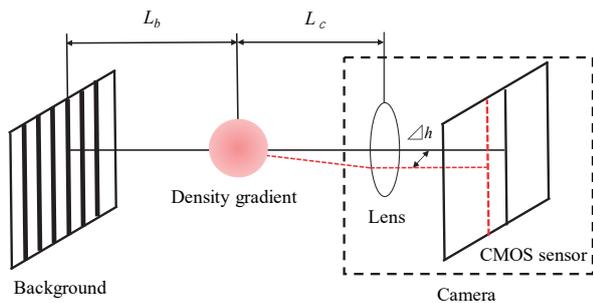


Fig.2 Measurement principle of background oriented schlieren

$$\Delta h = \frac{l_b f}{(l_b + l_c - f)n_0} \int_{l_b - \Delta l_b}^{l_b + \Delta l_b} \frac{\partial n}{\partial r} dl \quad (1)$$

$$G = \frac{n-1}{\rho} \quad (2)$$

2.2 簡易 BOS 法

BOS法で Δh を算出するためには画像処理を用いる必要がある。しかしながら、可視化画像のみを即時に得ようとする場合、BOS法は画像処理を経ずに密度勾配を可視化することができる。他の手法と言い分けるために画像処理なしのBOS法を簡易BOS法と呼称する。本実験の衝撃波および噴流の挙動観察はこの手法を用いた。衝撃波および噴流の伝播速度は二つの画像の衝撃波および噴流の伝播距離を比較し移動距離を算出することで求めることができる。

2.3 実験方法

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は極小容積衝撃波管および可視化装置で構成されている。高圧空気はボンベからレギュレータで減圧調整し、衝撃波管に充填する。高圧室および低圧室は隔膜によって仕切られており、隔膜を破ることによって高圧室に充填された高圧ガスが低圧室に流れ込む。そして高圧ガスは低圧室の開口端から噴流となり撮影領域に噴射される。衝撃波管の直径および低圧室長さはそれぞれ $D=10\text{mm}$ $L_f=12\text{mm}$ である。隔膜にはルミラーフィルムを用いた。パラメーターは高圧長さ $L_h/D=1, 10$ および圧力比 $P_h/P_b=10.9-50.8$ とした。 P_h および P_b はそれぞれ高圧室の圧力および大気圧である。隔

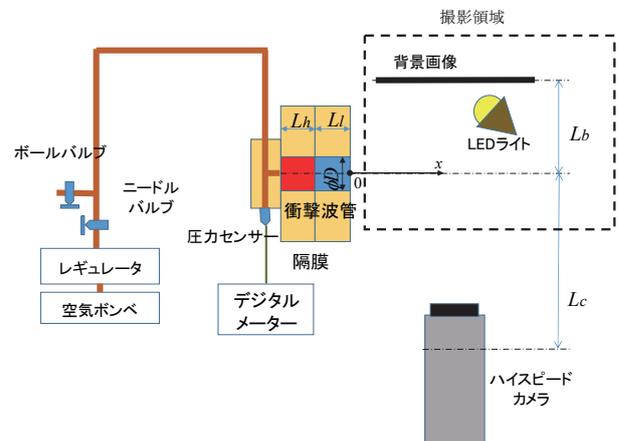


Fig.1 Experimental apparatus

膜厚さは圧力比を変えるために $T_f=25, 50, 75, 100 \mu\text{m}$ をそれぞれ使用した。圧力比は調節するために、隔膜厚さを $T_f=25, 50, 75, 100 \mu\text{m}$ に変更し $P_h/P_b=10.9-11.0, 23.8-24.7, 35.4-38.0, 50.6-50.8$ にそれぞれ対応している。

撮影領域に噴射された噴流は簡易BOS法を用いて可視化映像を撮影した。簡易BOS法で使用した実験装置は背景パターンを印刷した紙、発光ダイオード(連続光)および高速カメラ(Phantom v7.3)を使い構築した。衝撃波および噴流の伝播速度は時系列ごとに撮影した画像と参照画像のずれによって算出される。ゆえに衝撃波と

噴流の伝搬速度は画像処理なしで簡素に算出することができる。撮影条件はレンズの焦点距離 200mm, F 値 22, シャッタースピード $16\mu\text{s}$ (62500fps), 露光時間 $14\mu\text{s}$, 解像度 $320 \times 104\text{pixel}$, 背景画像と撮影対象物の距離 $L_b=500\text{mm}$ および撮影対象物とハイスピードカメラの距離 $L_c=3000\text{mm}$ とした。背景パターンは Sin 波 (幅 2 mm) の背景パターンを使う。

3. 結果および考察

3. 1 代表的な流れ場

図 4 (a) ~ (f) は $L_h/D=1$ および $P_h/P_b=50.2$ の場合の撮影領域における背景画像を示している。図 4 において、噴流が開口端から噴射した直後の画像の 1 フレーム前の写真を $t=0\mu\text{s}$ とした。また衝撃波管の開口端および開口端中心をそれぞれ $x/D=0$ および $y/D=0$ とした。図 4 (b) ~ (f) は図 4 (a) と比較すると背景画像にゆがみを確認することができる。このゆがみは密度勾配によって光線が屈折することで作られる。このゆがみを噴流とし、 $y/D=0$ における x/D 軸上のゆがみの先頭を噴流の先頭とする。図 2 (b) および (c) より、噴流の先頭はそれぞれ $x/D=2.07$ および 3.76 に達している。また、図 4 (c) より出口角から噴流境界やバレル衝撃波の形成が確認でき、瞬間的に不足膨張噴流の流れ場に似た状態となっている。このことから簡易 BOS 法は衝撃波管から噴射された噴流を可視化することができたと言える。図 4 (d) および (e) より噴流の先頭は、それぞれ $x/D=5.20$ および 6.29 に達している。このことから、図 4 (d) から (e) の間における噴流の伝搬距離は、図 4 (b) から (c) の間における噴流の伝搬距離と比べると短くなっていることがわかる。つまり噴流の伝播速度が、時間経過ごとに減衰していると考えられる。これは高圧室の容積が小さいため、噴流の持続時間が短いからである。

上述より噴流の伝播速度は時間経過ごとに減速していることがわかった。同じ条件における衝撃波および噴流の挙動をより詳細に調べるために、図 5 に BOS 画像の時空間断面画像を示す。図 5 は図 4 の $y/D=0$ における横軸上を切り取り撮影順に積み重ねた画像である。図 5 は $\Delta t=16\mu\text{s}$ の画像を 27 枚重ねている。縦軸および横軸はそれぞれ時間および x/D である。衝撃波および噴流はそれぞれ $t=208$ および $384\mu\text{s}$ の間において $x/D=8$ に達している。図 5 において、衝撃波は直線状に伝搬していることが確認できる。一方噴流の先頭は、 $t=224\mu\text{s}$ まで曲線状に伝搬し、 $t=224\mu\text{s}$ から直線状に伝搬していることがわかる。定量的にこれらの現象を調べるために、図 6 に衝撃波、噴流の伝搬速度および x/D の関係を示す。図中○および●はそれぞれ衝撃波および噴流の伝搬速度を示している。図 6 中 $x/D=2.0, 2.2$ および 6.9 を除くと衝撃波の伝搬速度は 377 から 410m/s で伝搬していることがわかる。このことから衝撃波の伝搬速度はほとんど一定で伝搬していることがわかる。また噴流の伝搬速度は $x/D=0.77$ で最大値 431m/s の値をとる。噴流の伝搬速度は $x/D=1.4\sim 5.6$ の間で時間経過ごとに減速している。また噴流の伝搬速度は $x/D=5.6$ で

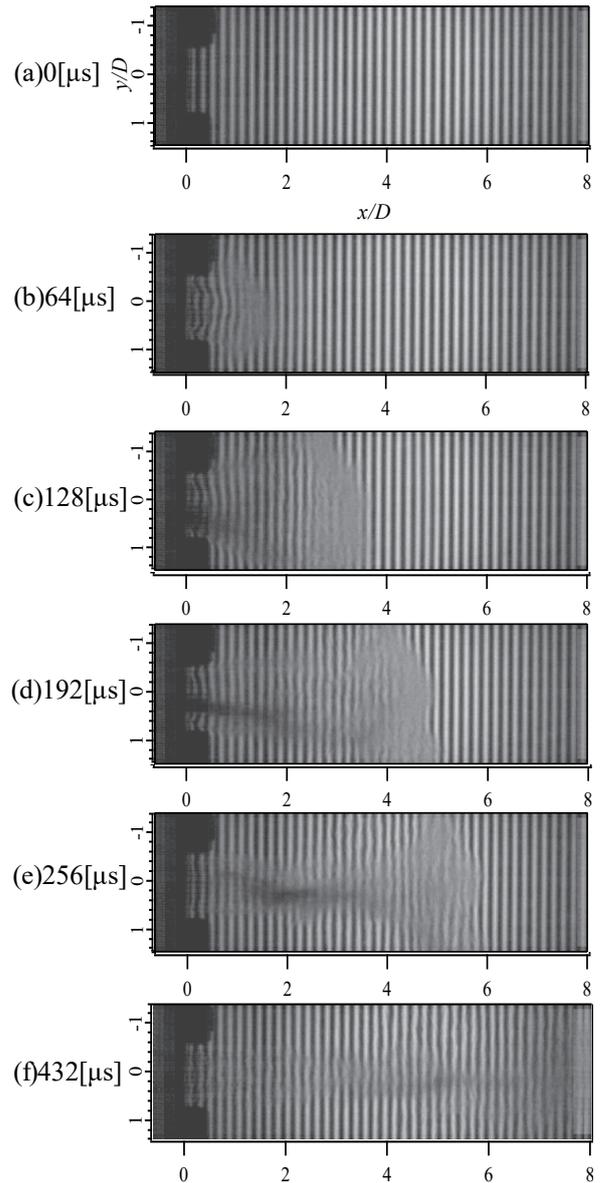


Fig.4 Typical flow fields for $L_h/D=1, P_h/P_b=50.2$

161m/s まで減衰する。そして $x/D=5.6$ から 8.3 の間において、噴流の伝搬速度はおよそ 161m/s である。つまり $x/D=5.6$ から 8.3 の間において噴流の伝搬速度はほぼ一定の値をとる。

3. 2 高圧室長さが流れ場に与える影響

前節より高圧室長さ $L_h/D=1$ および圧力比 $P_h/P_b=50.2$ における衝撃波の伝播速度はほとんど一定であることがわかった。一方噴流の伝播速度は最大値の値をとる、そして時間経過ごとに減速することがわかった。従来の衝撃波管は高圧室長さを伸ばせば噴流の噴射時間は長くなることがわかっている。これは高圧室内部の気体容量が大きくなるためである。そのため、極小容積衝撃波管の場合においても高圧室長さを長くすれば噴射時間が長くなると考えられる。そこで本節では、高圧室長さ L_h/D が衝撃波および噴流に与える影響を調べるために、図 7 に $L_h/D=10$ および $P_h/P_b=53.0$ における時空間断面画像を示す。縦軸

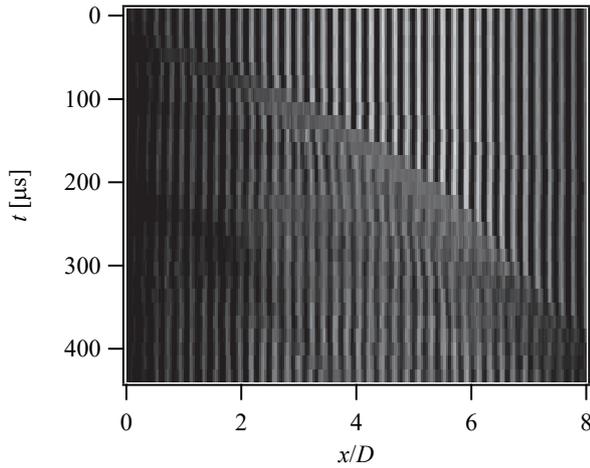


Fig.5 Time dependence of BOS photographs for $L_h/D=1, P_h/P_b=50.2$

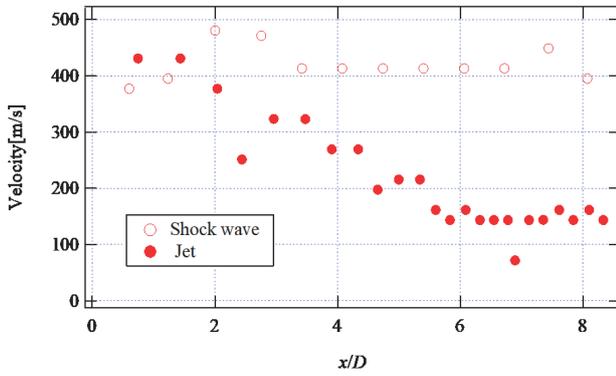


Fig.6 Relation between velocity and x/D for $L_h/D=1, P_h/P_b=50.2$

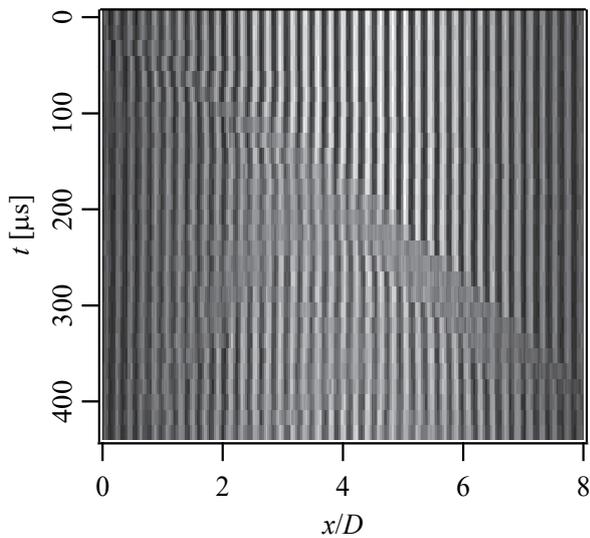


Fig.7 Time dependence of BOS photographs for $L_h/D=10, P_h/P_b=53.0$

および横軸はそれぞれ時間および x/D である。衝撃波および噴流の先頭が $x/D=8$ に到達した時間はそれぞれ $t=192$ および $384 \mu\text{s}$ である。図 7 において、図 5 同様に衝撃波は直線状に伝搬していることが確認できる。また噴流の先頭は、 $t=208 \mu\text{s}$ まで曲線状に伝搬し、 $t=208 \mu\text{s}$ から直線状に伝搬していることがわかる。

高圧室長さ L_h/D が衝撃波および噴流に与える影響を定量的に調べるために、図 8 には高圧室長さ $L_h/D=1$ および 10 における衝撃波および噴流の伝搬速度と x/D の関係を示す。図中丸および四角はそれぞれ高圧室長さ $L_h/D=1$ および 10 を示す。また白抜きおよび塗りつぶされたシンボルはそれぞれ衝撃波および噴流を示す。図 8 の縦軸および横軸は衝撃波および噴流の伝搬速度および x/D を示している。図 8 中 $x/D=4.7$ および 5.4 を除くと高圧室長さ $L_h/D=10$ における衝撃波の伝搬速度は 468 から 500m/s で伝搬していることがわかる。 $L_h/D=1$ および 10 における衝撃波の伝搬速度はほとんど一定で伝搬していることがわかる。高圧室長さ $L_h/D=10$ における噴流の伝搬速度は $x/D=1.4\sim 3.9$ の間で時間経過ごとに減速し、 $x/D=3.9$ から 7.0 の間においてほぼ等速である。また最大速度および等速の速度はそれぞれ 404 および 184m/s である。また、高圧室長さ $L_h/D=10$ における噴流の伝搬速度は $L_h/D=1$ に比べて等速の速度が小さいことがわかる。これは高圧室を伸ばすことにより高圧室の気体質量が増加したため、噴流の噴き出す量が増えたためだと考えられる。

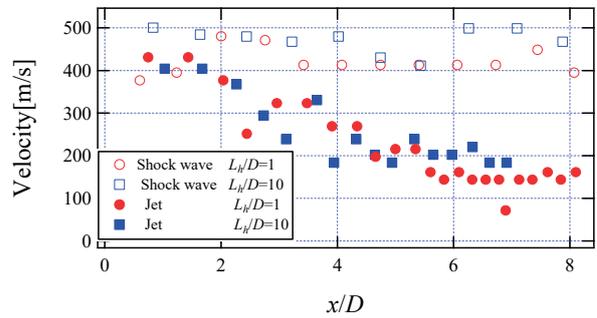


Fig.8 Relation between velocity and x/D for $L_h/D=1$ and $10, P_h/P_b=50.2$ and 53.0

3. 3 圧力比が流れ場に与える影響

次に圧力比 P_h/P_b が噴流の最大伝搬速度に与える影響を調べるために、図 7 に $L_h/D=10$ における噴流の最大伝搬速度および圧力比 P_h/P_b の関係を示す。図中●は圧力比 $P_h/P_b=10.9\sim 11.0$, ○は圧力比 $P_h/P_b=23.8\sim 24.7$, ■は圧力比 $P_h/P_b=50.2\sim 53.0$ を示す。

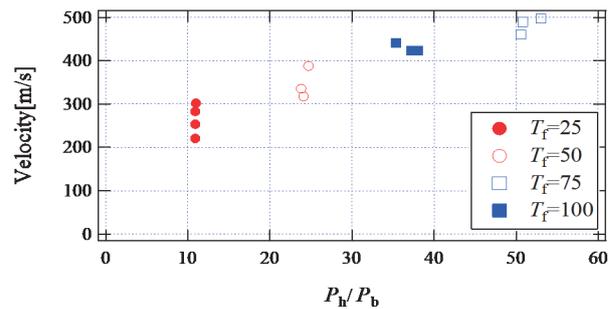


Fig.9 Relation between maximum jet velocity and P_h/P_b for $L_h/D=10$

$/P_b = 35.4 \sim 38.0$, □は圧力比 $P_h/P_b = 50.6 \sim 53.0$ を示している.
 図9より, 圧力比 $P_h/P_b = 10.9 \sim 11.0, 23.8 \sim 24.7, 35.4 \sim 38.0$
 および $50.6 \sim 53.0$ において噴流の最大速度は $220.5 \sim 302.1,$
 $317.6 \sim 388.2, 423.5 \sim 441.2$ および $460 \sim 497.6 \text{ m/s}$ の値をとる.
 つまり最大伝搬速度は圧力比 P_h/P_b が大きくなるにつれて
 大きくなっていることがわかる.

4. 結 言

簡易 BOS 法を用いて極小容積衝撃波管の高圧室長さおよび圧力比を変化させたときの流れ場の挙動に与える影響について実験を行い調査した. 本研究により得られた結論は以下のとおりである.

1. 簡易 BOS 法は噴流および衝撃波を可視化することが出来た.
2. 高圧室長さ $L_h/D=1$ および, 衝撃波は伝搬速度がほとんど一定であることがわかった.
3. 高圧室長さ $L_h/D=1$ および 10 において噴流の伝播速度はピーク値から時間経過ごとに減速し, その後一定の値をとった.
4. 圧力比 $P_h/P_b = 10.9 \sim 53.0$ の間で P_h/P_b を大きくしていくと噴流の最大伝搬速度が大きくなることがわかった.

References

- (1) Karthikeyan, J, Cold spray technology, International status and USA efforts. 44203 (2004): 1-14.
- (2) A. Moridi, S. M. Hassani-Gangaraj and M. Guagliano, Cold spray coating: review of material systems and future perspectives, Surface Engineering, 30.6, 369-395, 2014.
- (3) H. Fukuoka, M. Yaga and T. Takiya, Small High-Pressure Chamber Shock Tube, ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference, 4, 53-58, 2012.
- (4) G. E. A. Meier, Computerized background oriented schlieren, Exp Fluids, 33, 181-187, 2002.
- (5) M. Ota, H. Kato and K. Maeno, Improvements of spatial resolution of colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique by introducing tele centric optical system and reconstruction of density field, Proceedings of 15th international symposium on flow visualization, ISFV15-077, 2012.
- (6) F. Leopold, F. Jagusinski, C. Demeautis, D. Klatt, Increase of accuracy for CBOS by background projection, Proceedings of 15th international symposium on flow visualization, ISFV15-087, 2012.
- (7) 太田 匡 則, 濱 田 健 太, 前 野 一 夫, Colored grid background oriented schlieren (CGBOS) 法による軸対称物体まわりの超音速流れ場に対する CT 密度計測, 可視化情報学会論文集, 31, 51-56, 2011.