Generation Technique of Hypersonic Liquid Jets Using a Single-Stage Powder Gun and Its Application

○学 坂倉 徹 (名工大院) 正 施 紅輝 (名工大)
正 伊藤 基之 (名工大)

Toru SAKAKURA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466, Japan
Hong-Hui SHI, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466, Japan
Motoyuki ITOH, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466, Japan

Key Words : Hypersonic Liquid Jets, Single-Stage Powder Gun

1. 緒言

高速液体噴流の生成装置は多様な分野での応用が考えられる。例えば、固体面への液体の高速衝突現象の解明などには欠かすことができない。この現象は、雨滴の航空機への衝突や水滴による大型蒸気タービン翼表面の損傷などで問題となる。一方、ウォータージェット加工などでは、液体の高速衝突が積極的に利用され、材料の切断・加工技術として使われている。そこで本研究では、高速噴流の中でも数千m/sの噴流速度を得ることが可能なパルス噴流に着目し、その生成の方法あるい噴流構造を調べた。生成装置としては、単段式火薬銃を用いて飛翔体を高速発射し、ノズル内の静止液体に衝突させ、約3km/sの高速液体噴流を生成する。そして、飛翔体あるいはノズル形状が噴流生成に与える影響を調べると共に、ノズル内の流れについてTVD差分法を用いて数値解析を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図をFig.1に示す。装置は火薬銃本体、飛行管、観測部およびストップで構成され、装置の全長は約3.5 mである。火薬銃本体は容積37.5 mm³の火薬室および内径15 mm、長さ1.1 mの加速管で構成される。実験時には空気抵抗による飛翔体速度の低下防止と飛行の安定性を考え、加速管内および飛行管内は真空状態にした。また、噴流が生成される観測部内は大気圧とした。推進薬にはシングルベースの無煙火薬(NY500、日本油脂製)を用い、装薬量は6~12 gの間で変えて実験を行った。飛翔体は超高密度ポリエチレン製であり、直径15.15 mm、長さ20, 30, 40 mmの3種類を用いた。噴流生成部はステンレス製のノズル、シリンダ、スパーサーリングおよびそれらを固定するアウターシリンダで構成(Fig.2)され、飛行管と観測部の間のフランジに固定した。また、シリンダの前後をマイラー膜で仕切り、その内部に液体(約8cc)を満たした。実験で使ったノズルおよびシリンダの形状をFig.3に示す。

第一段階として装薬量と飛翔体速度、飛翔体速度と噴流速度の関係を明らかにするため、同一のノズル、シリンダを用い装薬量および飛翔体を変えて実験を行い、飛翔体および噴流の速度を測定した。次にノズル形状のみを変えて同様の実験を行った。また、噴流となる液体の粘性が噴流生成および噴流形状に与える影響を調べるため、濃度の異なるグリセリン水溶液を用いて実験を行った。さらに、ノズル出口から100 mm前方に厚さ4 mmの真鍮板を固定し、噴流との衝突実験を行った。

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

次に、噴流形状と噴流速度を知るために高速カメラ(超高速デジタルフレーミング/ストリークカメラ IMACON 468)により一定の時間間隔で6枚の映像を撮影した。1コマ当たりの露光時間は200 nsである。また、高速カメラでは噴流の影写真が得られるため、噴流の表面状態を見ることができない。そこで、噴流を一眼レフカメラにて瞬間写真撮影を行った。撮影時には暗室内に観測部およびシャッターが開放状態にされたカメラを設置し、噴流発生時にナノパルスライト(菅原研究所製 発光時間180 ns)を発光させ撮影した。

3. 数値計算

圧縮性流体の超音速流れは衝撃波を伴うので、圧力・密度の不連続面が発生する。そこで、数値解の空間的な変動量のtotal variationが時間進行に伴って増幅しないように理論的に許容できる制限を設け、有限な格子数で衝撃波のような不連続面が捕獲できるTVD法を用いる。本解析で用いた粘性を考慮に入れた非定常軸対称流れの無次元化支配方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial r} + \frac{\partial G_1}{\partial x} + \frac{\partial G_2}{\partial r} + \frac{H}{r} = 0$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \end{bmatrix}, F_1 = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \end{bmatrix},$$

$$G_1 = \frac{1}{Re_r} \begin{bmatrix} 0 \\ fr \\ -\tau \end{bmatrix}, G_2 = \frac{1}{Re_r} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau \\ fr \end{bmatrix}, H = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau / Re_r \\ \rho v^2 - \alpha / Re_r \end{bmatrix}$$

ここで、x、rは軸方向、半径方向を表し、u、v、ρ、pはそれぞれx方向の速度、r方向の速度、液体の密度、圧力を表す。なお、液体の状態方程式には次のTait式⁽²⁾を用いる。

$$p+B=(\rho/\rho_0)^n(p_0+B)$$

但し、 $B=C_0^2 \rho_0 n$ 、 $p_0=1013 \text{ kPa}$ 、 $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_0=1428 \text{ m/s}$ 、 $n=7.415$ である。

1: Nozzle 2: Outer cylinder 3: Inner cylinder 4: Liquid 5: Support
6: Spacer ring 7: Flange 8: Projectile 9: Magnet

Fig.2 Schematic of jet generating part

Fig.3 Schematic of cylinder and nozzles

4. 実験結果および考察

4.1 装薬量による飛翔体および噴流速度の変化

Fig. 4に装薬量による飛翔体速度の変化を示す。図中の実線は、内部弾道学⁽¹⁾による理論値を示す。実験結果は、理論値に対し全体的に下回った値をとっている。これは理論では飛翔体の加速過程において飛翔体と加速管内壁との摩擦が考慮されていないためと考えられる。また、飛翔体の質量の違いは、それほど飛翔体速度には影響を及ぼさないといえる。飛翔体と噴流の速度の関係を数値計算結果と合わせてFig. 5に示す。実験値は大きくばらつき、定性的にも理論値と一致していない。ここで、噴流生成の機構を考えてみると、衝突の際飛翔体と静止液面との接触面から発生する圧縮波が、シリンダーおよびノズル内で反射、干渉し、液柱の内部圧力を高める。この圧力により液柱先端は著しく加速され、高速噴流としてノズル孔から噴出する。よって、飛翔体の液柱への進入状態は噴流生成に大きな影響を与えると考えられる。実験後の飛翔体を観察すると、その変形の様子が個々に異なっていた。このことから、飛翔体の液柱内への進入と共に起こる変形が、同条件での実験においても異なり、それが液中内での圧縮波の挙動に影響を及ぼしたと考えられる。なお、本実験で使用した装置の性能を評価するための主パラメーターである飛翔体速度に対する噴流速度の比は、1.0~3.1であった。

4.2 ノズル形状が噴流速度に与える影響

ノズル出口に直線部分をそれぞれ5, 10, 15 mm設けたノズルを使用し、噴流速度に与える影響を調べた。結果をFig. 6に示す。同図より、同じ装薬量に対して、適切な直線部分を設けることでより効率よく噴流速度を高めることができることがわかる。また、直線部分を作ることによってノズル孔付近の強度が上がり、ノズル孔が広がるなどの変形が抑制できる。

Fig. 4 Variation of projectile velocity with smokeless powder mass

Fig. 6 Variation of jet velocity with straight length of nozzle
Powder mass : 10g Projectile : L=30mm

4.3 液体の粘性が噴流に与える影響

グリセリンの体積濃度がそれぞれ95, 90, 80%の3種類のグリセリン水溶液を用いて実験を行った。それぞれの粘度は室温(23°C)において、762, 236, 78 cPであった。液体の粘度と噴流速度の関係をFig. 7に示す。噴流となる液体に蒸留水を用いるより、蒸留水にグリセリンを混合させ適度に粘度を高くした液体を用いたときの方が、噴流速度が高くなっているのが分かる。また、液体の持つ粘度が高いほど噴出後における分裂が少なく、そのため噴流形状はより棒状に近いと考えられる。すなわち、噴流が持つエネルギーの拡散が少なく考えられる。これは、Fig. 8に示す真鍮板の損傷跡からも分かるように粘度が高いときには厚さ4 mmの真鍮板を貫通していることから伺い知ることができる。

4.4 噴流の形状

Fig. 9に高速度カメラにより捉えた噴流の連続写真を示す。生成された噴流は、ノズル噴出直後から噴流先端の急膨張によるキャビテーションや空気抵抗の影響により、微粒化の進行が激しく進行し、半径方向に大きく広がっている様子が分かる。さらに噴流先端においては、指状に分裂している。

5. 結言

- 1) 本実験で使用した装置の性能を評価するための主パラメーターである飛翔体速度に対する噴流速度の比は、最大で3.1を得た。
- 2) ノズル形状として、ノズル出口に適切な直線部分を設けると、より効率よく噴流速度を高めることができる。
- 3) 噴流に用いる液体の粘度を適度に高くすることによって噴流速度を高めることができると共に、噴流の分裂あるいは拡散をも抑制することができる。

参考文献

- (1) 工業火薬協会編, 工業火薬ハンドブック, 共立出版, (1966), 435-448
- (2) 能見基彦 ほか3名, 機論, 57-535, B(1991), 914-921
- (3) 高山和喜編, 衝撃波ハンドブック, シュプリンガーフェアラーク東京, (1995), 515

Fig. 5 Variation of jet velocity with projectile velocity

Fig. 7 Variation of jet velocity with viscosity of liquid jet
Powder mass : 10g Projectile : L=30mm Nozzle : 1

Fig. 8 Damage of 4mm thick brass plate caused by the impact of liquid jet

Fig. 9 Photographs of water jet