

# 134 不足膨張噴流の構造とノズル形状との関係について

## Relation between Structure of Underexpanded Jet and Shape of Nozzle

○ 正 遠藤 正樹 (都立高専)      正 榊原 洋子 (東電大)      正 岩本 順二郎 (東電大)

Masaki ENDO, Tokyo Metropolitan College of Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo  
Yoko SAKAKIBARA Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama, Hiki, Saitama  
Junjiro IWAMOTO, Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-Nishikicho, Chiyoda-ku, Tokyo

**Keywords :** Underexpanded jet, Cell structure, Radial jet, 2D jet, Axial jet, Shadowgraph method

### 1. 序 論

超音速噴流はレーザー加工時の補助噴流として、また、熱強化ガラスの焼入れ工程における冷却噴流として工業的に用いられている。このような流れ場を解析するために、円形あるいは矩形のノズルより噴出する不足膨張噴流を対象とした研究が数多くなされてきた<sup>(1~3)</sup>。また近年、より複雑なノズルを対象とする研究が行われている<sup>(4,5)</sup>。いずれのノズルより噴出する噴流もその形状が異なるものの、不足膨張噴流固有のセル構造が形成され、ある条件下では噴流中にマッハディスクが形成される。超音速噴流の構造は流れが超音速であるため、それが噴出するノズルの形状の影響を大きく受ける。よって、ノズルの形状と噴流構造の関係を明らかにすることは、工業的に用いられる様々な形状のノズルから噴出する噴流の構造を解明する上で重要となる。

そこで、本研究では単純な二次元噴流と、他の形状のノズルより噴出する噴流との関係を調べるために、特に噴流のセル長さに注目し、可視化実験および数値シミュレーション<sup>(6)</sup>を行い考察した。

### 2. 実験装置および方法

本実験では、円形ノズルおよび湾曲したスリットノズルから噴出する不足膨張噴流を対象とする。本研究で用いた実験装置図を図1に示す。図は湾曲したスリットノズルから噴出する噴流を実験的に再現する装置である。圧縮空気は、サージタンクやエアードライヤーなどを経て防音室内の実験装置に供給される。各タンク内の空気はタンクに取り付けられたチューブ内を通過してスリットノズルへと進む。スリットノズルは内径  $D=10\text{mm}$ 、外径  $D_0=12\text{mm}$  の2本の円管が互いに向き合って構成されている。円管の端部同士の間には  $W_N=2\text{mm}$  の隙間があり、圧縮空気はこの隙間から放射状に大気中へと噴出する。また、スリットノズルと同様に円形ノズルを取り付けたタンクに乾燥した圧縮空気を供給し、ノズル端部より不足膨張噴流を噴出させる。ノズル出口径  $D_r=10\text{mm}$ 、ノズル先細部の曲率半径は  $20\text{mm}$  である。

スリットノズルおよび円形ノズルはノズル出口面で噴流の速度が音速に達するように設計・加工されている。また、完全膨張時の噴流マッハ数を  $M=1.22$ ,  $1.36$ ,  $1.47$  および  $1.56$  と変化させ、流れ場を可視化する。

### 3. 数値シミュレーション

数値計算では、実験で対象としているノズル以外に、二次元ノズルを対象とした。また、湾曲するスリットノズルについては、その曲率を変化させシミュレーションを行った。数値計算にはHarten-Yeeの風上型TVD法<sup>(6)</sup>を用い、基礎

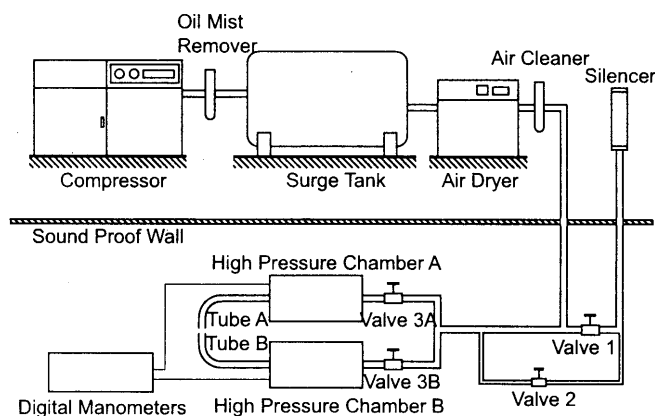


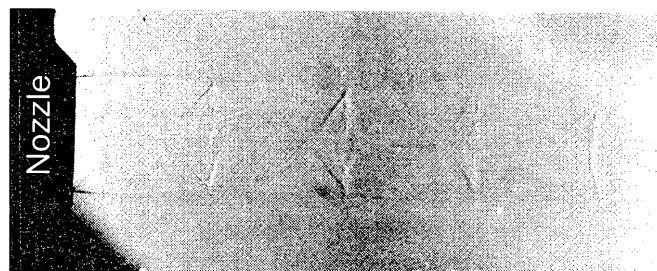
Fig. 1 Schematic View of Apparatus

式には軸対称のオイラー方程式を適用した。スリットノズルの場合、ノズルを構成する円管の中心軸に対して流れ場全体が軸対称で、且つ、円管の中心軸に直交する面に対して対称な面対称噴流を仮定している。一方、円形ノズルおよび二次元ノズルの場合は、噴流の中心軸に対して流れ場が軸対称であると仮定した。いずれの計算においてもノズル出口面において流れが音速となる境界条件を用いている。

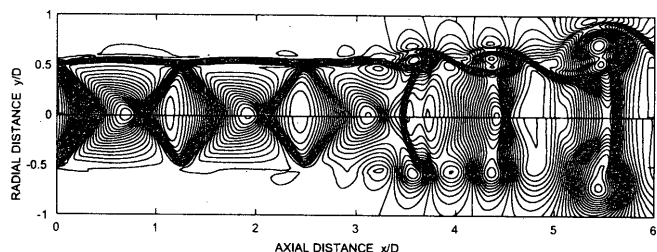
### 4. 結果および考察

**4.1 円形ノズルからの噴流** 図2(a)は円形ノズルから噴出する噴流 ( $M=1.36$ ) のシャドウグラフ写真である。セル状の噴流構造と斜め衝撃波が確認できる。下流に進むにつれてセルの長さが若干小さくなるものの第四セルまで確認できる。図2(b)にシミュレーション結果を示す。図の上側は等密度線を下側は等圧力線を示している。セル構造を良くシミュレートしているが第三セルまでしか確認することができない。

**4.2 湾曲したスリットノズルからの噴流** 図3(a)は円管の無次元外径  $D_0/W_N=6$  の湾曲したスリットノズルから噴出する噴流 ( $M=1.56$ ) のシャドウグラフ写真である。左に側面の像を右に正面の像を示す。左右の図において黒い帯状の部分はスリットノズルを構成する円管であり、側面図において、不足膨張噴流の第一セルが確認できる。また、正面図においては、セルの節が衝撃波リングとして捉えられている。これらの間隔は下流に行くに従って小さくなっており、第二衝撃波リングまでは完全に確認できる。図3(b)に実験と同条件の  $D_0/W_N=6$  における、図3(c)に  $D_0/W_N=60$  におけるシミュレーション結果を示す。また、図3(c)に二次元噴流のシミュレーション結果を示す。図の上側は等密度線を下側は等圧力線を示している。図に示すように、スリット



(a) Shadowgraph Picture



(b) Computer Simulation

Fig. 2 Jet from Round Nozzle

ノズルを構成している円管の外径が小さい場合は、流れ場の放射状に広がる影響が大きくなるため第一セルの長さが短くなっている。また、円管の外径が大きい場合は、放射状の影響が小さくなり、セルの形が二次元噴流のそれに近づいている。

**4.3 セル長さと噴流マッハ数の関係** 図4に第一セルの長さとマッハ数の関係を示す。横軸は完全膨張時の噴流マッハ数であり、縦軸はノズル幅あるいはノズル直径で無次元化した第一セルの長さである。湾曲したノズルについては円管の無次元外径  $D_0/W_N=6$  の結果である。また、次式のTamによる理論解析の結果<sup>(4)</sup>を一点鎖線で示す。

$$L = \alpha(M^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

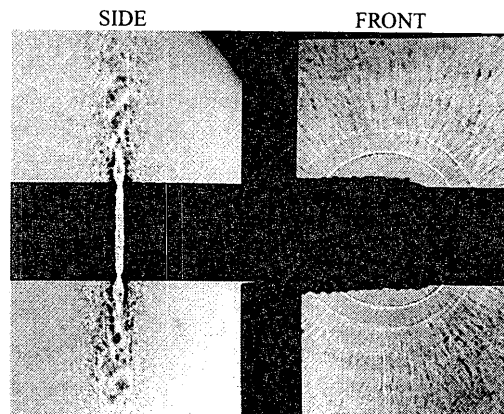
二次元噴流の場合は  $\alpha = 2.0$ 、円形ノズルからの噴流の場合は  $\alpha = 1.31$  であり、実験および数値計算と良い一致を示している。また、式(1)における  $\alpha$  の値を変化させることにより湾曲したスリットノズルへも適用可能であることが分かる。

#### 4. 結 論

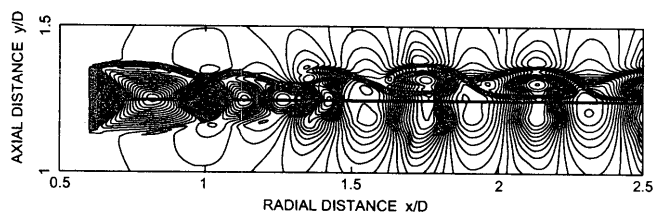
二次元噴流および円形ノズルより噴出する噴流の構造とマッハ数との関係をTamの理論解析結果と比較し、比較的噴流マッハ数が小さい領域では良い一致を示した。また、湾曲したスリットノズルから噴出する噴流に対しては、式(1)における  $\alpha$  の値を変更することによる噴流形状を予測し得ることが分かった。

#### 参 考 文 献

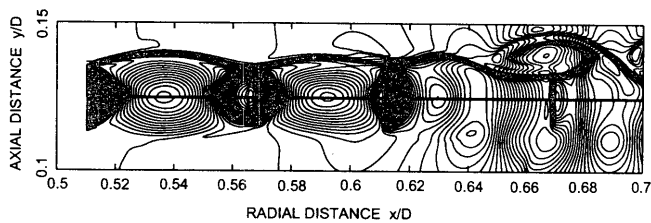
- (1) G. Raman and E. J. Rice, Physics of Fluids, **6** (1994), pp. 3999-4008.
- (2) Y. Sakakibara and J. Iwamoto, J. Fluids Eng., **120** (1998), pp. 477-481.
- (3) J. Panda, J. Fluid Mech., **363** (1998), pp. 1739-198.
- (4) C. K. W. Tam, J. Sound and Vibration, **121** (1988), pp. 135-147.
- (5) M. Endo, Y. Sakakibara and J. Iwamoto, Proc. 9th Int. Symp., **406**(2000).
- (6) H. Yee, NASA TM **89464** (1987).



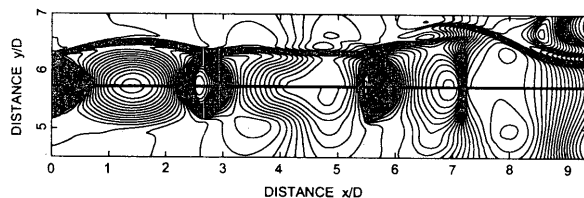
(a) Shadowgraph Picture



(b) Computer Simulation at  $D_0/W_N = 6$



(c) Computer Simulation at  $D_0/W_N = 60$



(d) Computer Simulation

Fig. 3 Jet from Slit-Shaped Nozzle

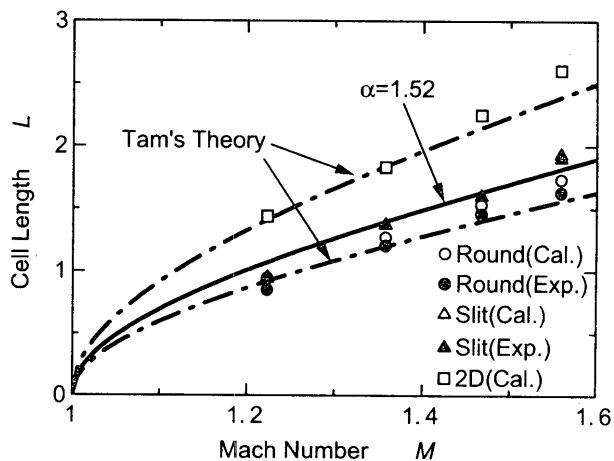


Fig. 4 Cell Length