

二次元音速ノズルからの乱流噴流に関する数値解析

(第2報、垂直平板との衝突)

檜村 秀男・宮里 義昭*1・松尾 一泰*1

Numerical Analysis of Turbulent Jet from Two-Dimensional Sonic Nozzle (2nd Report, Impingement to Perpendicular Plate)

Hideo KASHIMURA, Yoshiaki MIYAZATO and Kazuyasu MATSUO

Abstract

The numerical analysis of impinging turbulent jet from two-dimensional sonic nozzle was carried out using the compressible $k-\epsilon$ turbulence model and TVD scheme. The pressure ratio of sonic jet are settled from 1.893 to 6 in this study. The flow fields of impinging jet are visualized and compared with the sonic free jet. The plate shock wave and wall jet are observed in front of a perpendicular plate. The pressure distribution and pressure coefficient C_p on the perpendicular plate were determined. Finally, the equation shows the maximum pressure on the wall is proposed and verified.

Key words: Sonic nozzle, Under expanded jet, Two dimensional jet, Shock cell length, $k-\epsilon$ turbulence model, Numerical analysis

1. ま え が き

二次元音速噴流は航空工学分野における VSTOL⁽¹⁾⁽²⁾、鉄鋼材料分野における溶融亜鉛めっき工程のガスジェットワイピング⁽³⁾⁽⁴⁾などで利用されており、噴流の騒音問題などに関連した研究もなされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

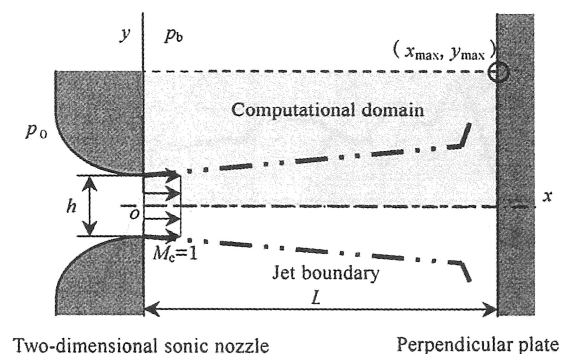
一方、衝突噴流に関する研究はレーザー切断⁽⁷⁾⁽⁸⁾やその他多くの工業技術と関連してこれまで多くなされているが、そのほとんどが軸対称噴流に関するものである⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。

本研究では第1報⁽¹³⁾において、二次元ノズルから発生する音速自由噴流に関して、圧縮性乱流モデルを考慮したナビエーストークス方程式の数値解析を行った。数値計算結果から得られた密度分布より流れ場の可視化画像を構築するとともに、二次元音速噴流の流れ場のモデル図を提案し、セル長さに関する定式化を行った。

本報においては垂直平板に衝突する二次元不足膨張噴流の特性を明らかにするため、噴流圧力比および垂直平板位置をそれぞれ $\phi=1.893\sim 6$ 、 $L/h=10$ として数値計算した。噴流の内部構造、プレート衝撃波の発生、垂直平板上の圧力分布について検討し、壁面圧力係数を定義して解析を行い、垂直平板上の最大圧力に対して定式化を行った。

2. 計算する流れ場および記号

本研究で用いた主な記号および計算領域を図1に示す。二次元音速ノズルの出口中心0を(x-y)座標の原点とし、噴流の下流方向にx、その垂直方向にy座標を考える。対象としている噴流は二次元であるから、紙面の奥行き方向には無限の厚みがある。ノズルの出口高さをh、ノズル出口から垂直平板までの距離をLとした。出口マッハ数 M_e は1である。また、背圧 p_b は大気圧、貯気圧力 p_0 と p_b の比を ϕ とした。計算に用いた基礎式および乱流モデルは既報⁽¹³⁾と同じである。計算の対象とした二次元音速ノズルはノズル出口高さ $h=1\text{mm}$ で、 $L/h=10$ の場合について計算を行った。



*1 北九州市立大学国際環境工学部
機械システム工学科 教授
(〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

Fig.1 Symbols and computational domain

作動気体は常温空気で、噴流圧力比 ϕ は適正膨張の場合の 1.893 から 6 までとした。

計算領域は噴流中心軸を含む断面の片側で、 $y_{max}/h=10$ である。計算格子は軸近傍とノズル出口近傍に密な不等間隔直交格子とし、格子数は x 方向に 438 点、 y 方向に 70 点とした。ノズル出口では高さ方向に 30 点を与え、一次元等エントロピー流れの関係式から計算される圧力や密度などの状態値を一様流入条件として与えた。なお、流れ場の解析に際しては、時間平均値を用いた。

3. 自由噴流との比較

圧力比 $\phi=4$ 、垂直平板位置 $L/h=10$ の場合の等密度線図を自由噴流の場合とともに図 2 に示す。(a) は自由噴流、(b) は

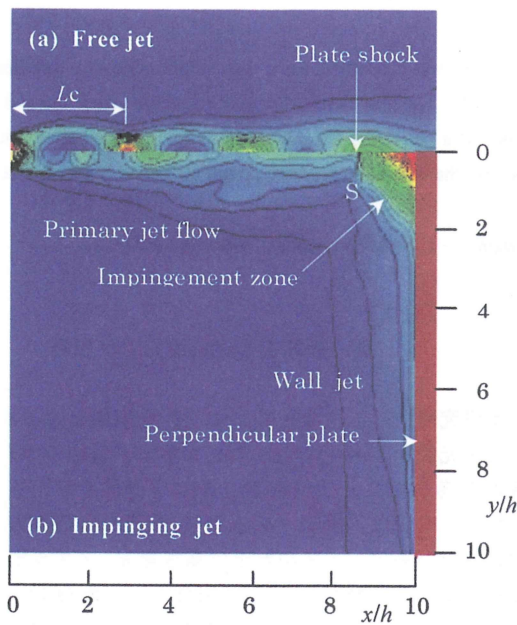


Fig.2 Comparison with free jet (density)

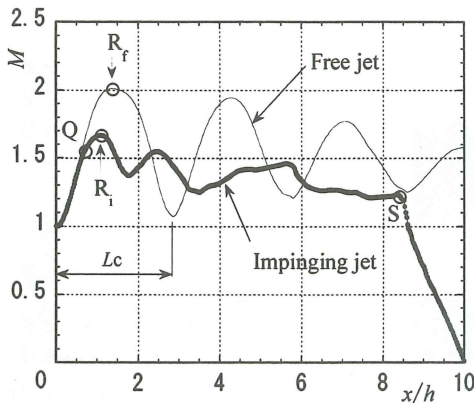


Fig.3 Comparison with free jet (Mach number)

は衝突噴流の場合を示し、図において L_c は自由噴流におけるセル長さである。衝突噴流の流れ場は Primary jet flow, Impingement zone, Wall Jet の 3 領域で分けられ⁽¹⁴⁾、S で表された Plate shock が $x/h=8.5$ の付近に発生する内部構造となっている。このときの噴流中心におけるマッハ数分布を図 3 に示す。図の横スケールの長さは図 2 に対応するように配置している。図において太い曲線が衝突噴流、細い曲線が自由噴流の場合である。自由噴流では規則的な周期性を保ってマッハ数が変化するのに対して、衝突噴流では不規則な変動を生じ、S で示すプレート衝撃波によって、流れが $M>1$ の超音速から $M=0$ まで急激に減速する。図において、 L_c は自由噴流におけるセル長さを表している。また図中の記号 Q は両噴流のマッハ数が 2% 以上の差異を生じる点、R は第 1 セル内のマッハ数の最大点で衝突噴流の場合は下添字 i、自由噴流の場合は下添字 f で表す。

点 Q で示される垂直平板の挿入による影響領域の変化を図 4 に示す。図より、圧力比 ϕ の増加とともに点 Q の位置は直線的に下流に移動することがわかる。参考のため、図中に

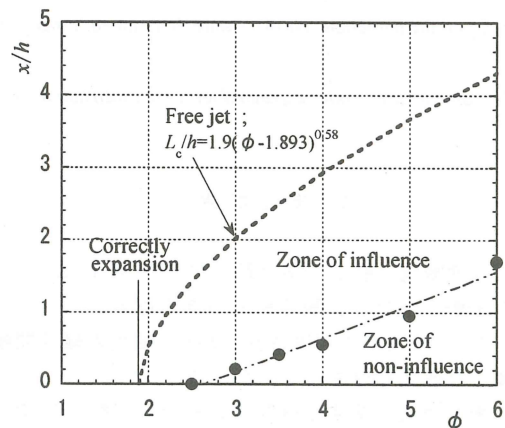


Fig.4 Influence region of perpendicular plate

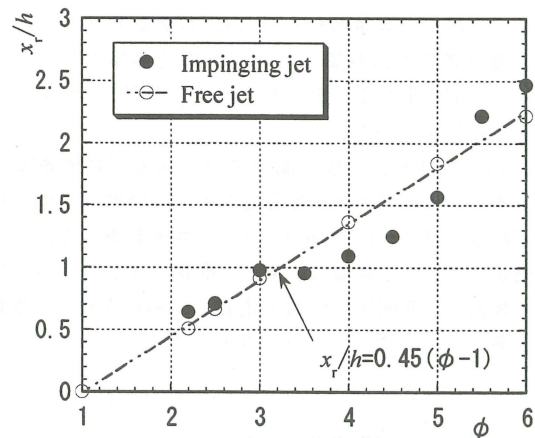


Fig.5 Location of maximum Mach number in first cell

は自由噴流の第1セルの長さ⁽¹³⁾を破線で示している。図より、圧力比 $\phi=6$ の場合、自由噴流のセル長さの約40%が、中心軸上のマッハ数に関して非影響領域となっている。

図5は、図3の点Rで示した到達する最大マッハ数位置の ϕ による変化を示したものである。図中の白丸は自由噴流の場合である。破線で示すように自由噴流では ϕ の増加とともに点Rは直線的に増大する。これに対し、衝突噴流では ϕ とともに増加する傾向にはあるものの、直線的ではない。これは、噴流の平板への衝突によって、その内部構造が図2(b)に示すように不規則に変化するためと考えられる。

図6で示すマッハ数の最高到達値に対しても、図5と同様な傾向を見ることができる。

4. プレート衝撃波

4.1 噴流中心上のマッハ数の変化

図7は圧力比 ϕ の変化に伴う噴流中心のマッハ数の変化を示している。 $\phi=1.893$ は適正膨張の場合でノズル出口での噴流圧力 p_e と背圧 p_b が等しい。この場合、噴流のマッ

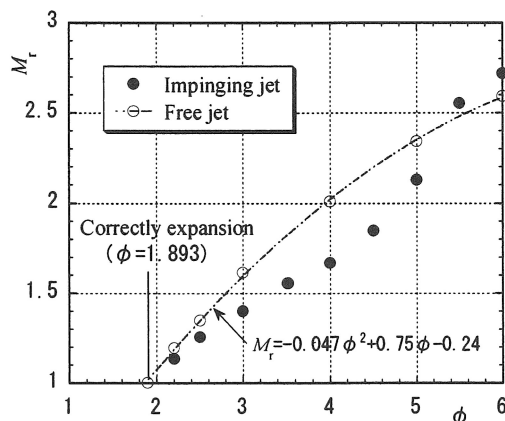


Fig.6 maximum Mach number in first cell

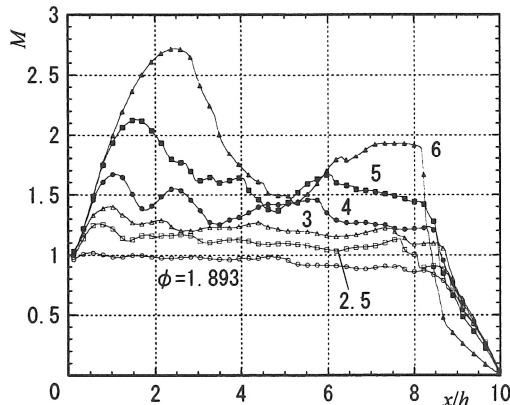


Fig.7 Mach number on center line

ハ数はノズル出口から大きく増大することなく、ポテンシャルコア内部で多少の変動は見られるものの、亜音速に減速する。 $\phi=6$ の場合、噴流の最大マッハ数は $x/h=2.5$ において約2.72で、その後、減少と増加を繰り返した後、 $x/h=8.2$ の位置で $M=1.9$ から急激な減速となる。

4.2 プレート衝撃波の形成位置

噴流中心のマッハ数 M が1の点、すなわち流れが超音速 $M>1$ から亜音速 $M<1$ に減速する位置を圧力比 ϕ に対して示したものが図8である。圧力比が $\phi>3$ では垂直平板の前面に形成するプレート衝撃波によって流れが超音速から亜音速に減速するものと考えられ、この領域は $M=1$ の位置を細い実線で結んでいる。実線の区間では多少の変動はあるものの、計算条件の範囲内ではおおむね $x/L=0.85$ であるといえる。

5. 壁面圧力

5.1 壁面に沿う圧力の変化

図9は背圧 p_b で無次元化した平板上の圧力 p_w を y/h に対して示している。図1に示すように、 $y=0$ は噴流の中心である。本計算の範囲内では噴流の中心 $y=0$ が最も高い圧力を示している。しかし、軸対称噴流については、平板の位置や圧力比によっては必ずしもそうとは言えず⁽¹⁴⁾、二次元噴流についても検討する必要がある。図9より噴流圧力比が高い場合には、平板の衝突ゾーンの外周部で圧力が大気圧よりも低い部分が発生していることがわかる。すなわち、 $\phi=6$ の場合、最低圧力は $y/h=3.5$ における $p_w/p_b=0.7$ で、その後、壁面噴流によって大気圧 $p_w/p_b=1$ まで圧力が回復している。

図10は図9の結果を用いて、壁面圧力 p_w をノズル出口圧力 p_e で無次元化して示したものである。適正膨張噴流の $\phi=1.893$ では背圧 p_b が p_e に等しいので、噴流は $p_w/p_e=1$ に向けて漸近するが、それ以外の噴流ではいずれも漸近値は1よりも小さな値である。

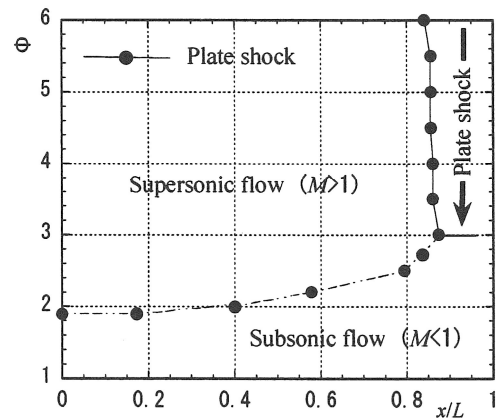


Fig.8 Location of plate shock wave

5. 2 壁面における最大圧力

図11は次式で定義される圧力係数⁽¹⁵⁾の壁面に沿う変化を噴流圧力比に対して示したものである。 $p=p_b$ の時 $C_p=0$ 、

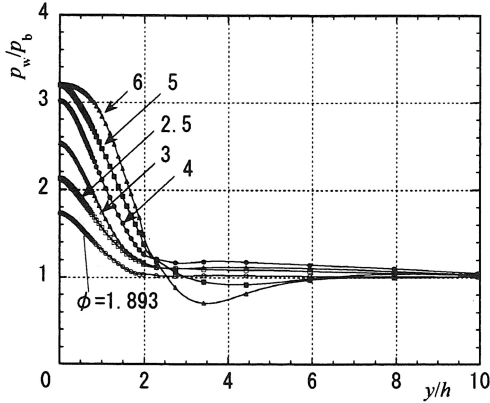


Fig.9 Dimensionless wall pressure p_w/p_b

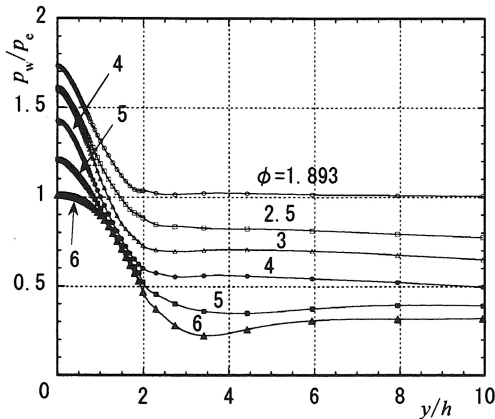


Fig.10 Dimensionless wall pressure p_w/p_e

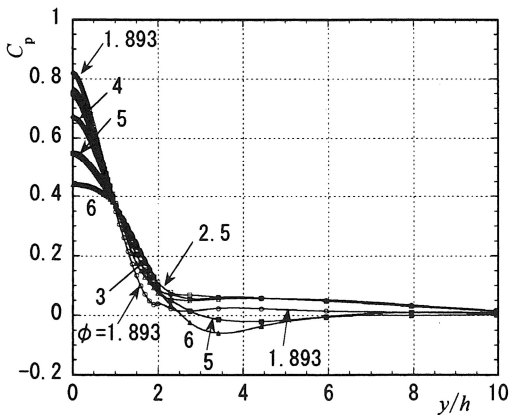


Fig.11 Pressure coefficient C_p

$p=p_0$ の時 $C_p=1$ である。

$$C_p = \frac{p - p_b}{p_0 - p_b} \quad \dots (1)$$

計算の範囲内では噴流中心における壁面上の C_p は ϕ の増加とともに減少する傾向にある。これは、図9に示す p_w/p_b とは逆である。いずれの ϕ の場合も噴流の外側に行くほど C_p は1に漸近している。

壁面の最大圧力を $p_{w,max}$ とし、 p_b による無次元値の変化を図12に示す。図中には参考のため、 $p_{w,max}=p_0$ 、 $p_{w,max}=p^*$ の関係も記入している。 $p_{w,max}/p_b$ は ϕ の増加とともに増大し、計算の範囲では3.3に漸近することがわかる。

図13は ϕ の変化による表面圧力係数の減少傾向を示したものである。適正膨張において C_p は約0.82であるが、 ϕ の増加とともに次式で示される直線に漸近することがわかる。よって、垂直平板の表面における最大圧力を求めるには、 $\phi > 3$ で式(3)を近似的に用いることができる。また、式(3)は $\phi=1$ で $C_p=1$ となる。

$$C_{p,max} = -0.114(\phi - 1) + 1 \quad (\phi \geq 3) \quad \dots (2)$$

よって、壁面における最大圧力は式(1)の p を $p_{w,max}$ 、 C_p を $C_{p,max}$ と置いて式(2)に代入した後、変形することによって次のように求めることができる。

$$\frac{p_{w,max}}{p_b} = -0.114(\phi - 1)^2 + \phi \quad \dots (3)$$

式(3)を用いて $p_{w,max}/p_b$ を計算し、図12の数値計算結果と改めて比較した図が図14である。

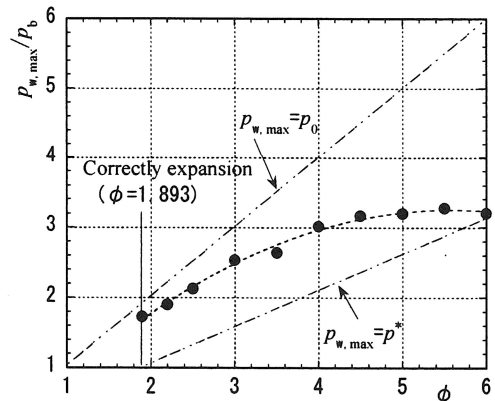


Fig.12 Maximum pressure on perpendicular plate

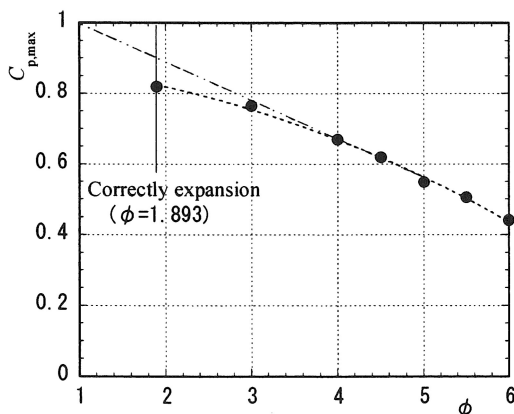


Fig.13 Maximum pressure coefficient $C_{p,max}$

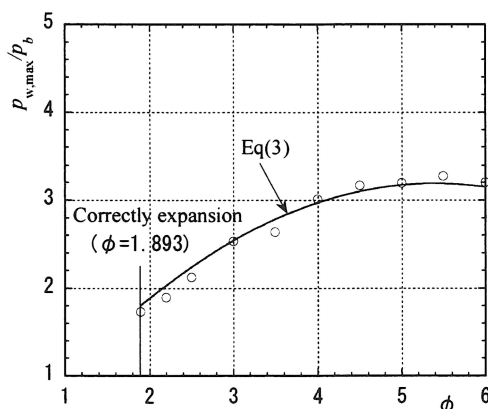


Fig.14 Estimation of equation (3)

6. 結 論

無次元位置 $L/h=10$ に置かれた垂直平板に衝突する二次元噴流について、噴流圧力比 $\phi=1.893$ から 6 の間で数値計算を行い、噴流中のプレート衝撃波と壁面圧力に着目して考察を行った。

得られた結果を要約すると、以下の通りである。

- (1) 第一セル内の最大到達マッハ数およびその位置と噴流圧力比 ϕ との関係を図 5 および図 6 のように求め、自由噴流の場合と比較した。
- (2) $\phi > 3$ において垂直平板の前面にプレート衝撃波が形成し、その位置は ϕ によってほとんど変化せず、概ね $x/L=0.85$ である。
- (3) 垂直平板上には背圧より低い負圧部分が発生し、その傾向は ϕ の増加とともに顕著になる。
- (4) 式(1)で定義される圧力係数の垂直平板上の最大値は ϕ の増加とともにほぼ直線的に減少し、その値は式(2)で与えられる。
- (5) 計算の範囲内では垂直平板の圧力は噴流中心上が最

も高く、その値は噴流圧力比 ϕ の関数として式(3)で与えられる。

参 考 文 献

- (1) A. Krothapalli, et. al., The Role of Screech Tones in Mixing of an Underexpanded Rectangular Jet, J. of Sound and Vibration, No. 160(1), (1986), p. 119-143.
- (2) C. K. W. Tam, The Shock-Cell Structures and Screech Tone Frequencies of Rectangular and Non-Axisymmetric Supersonic Jets, J. of Sound Vibration, No. 121(1), (1988), p. 135-147.
- (3) 武石・青木、連続溶融めっきガスワイピングジェットの特性、鉄と鋼、81 巻、2 号 (1995), p. 47-52.
- (4) D. Lacanette, et. al., Numerical Simulation of Gas-Jet Wiping in Steel Strip Galvanizing Process, ISIJ International, Vol. 45, No. 2 (2005), p. 214-220.
- (5) E. Gutmark, et. al., Near Acoustic Field and Shock Structure of Rectangular Supersonic Jets, AIAA J., Vol. 28, No. 7(1990), p. 1163-1170.
- (6) S. Beltaos, et. al., Plane Turbulent Impinging Jets, J. of Hydraulic Research, Vol. 11, No. 3(1973), p. 29-59.
- (7) H. C. Man et. al., Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting, Optics and Laser Technology, 30(1998), p. 497-509.
- (8) C. C. Mai et. al., Flow structure around an inclined substratesubjected to a supersonic impinging jet in laser cutting, Optics and Laser Technology, 34(2002), p. 479-486.
- (9) G. T. Kalghatgi et. al., The occurrence of stagnation bubbles in supersonic jet impingement flows, Aeronautical Quarterly, (1976), p. 169-185.
- (10) A. Powell, The sound-producing oscillations of round underexpanded jets impinging on normal plates, J. Acoust. Soc. Am., 83, 2(1988), p. 515-533.
- (11) 坪井他、平板に衝突する超音速噴流に関する数値解析及び実験、日本航空宇宙学会誌、46 巻、536 号(1998)、p. 485-496.
- (12) M. A. Woodmansee et. al., Nonintrusive pressure and temperature measurements in an underexpanded sonic jet flowfields, AIAA J., Vol. 42, No. 6(2004), p. 1170-1180.
- (13) 櫻村・宮里・松尾、二次元音速ノズルからの乱流噴流に関する数値解析(第 1 報、噴流構造)、北九州工業高等専門学校研究報告、第 42 号 (平成 21)、p31-38.
- (14) F. S. Alvi et. al., Experimental and Computational Investigation of Supersonic Impinging Jets, AIAA J., Vol. 40, No. 4(2002), p. 599-609.
- (15) K. A. Phalnikar et. al., Experimentts on free and impinging supersonic microjets, Exp Fluids, No. 44(2008), p. 819-830.