21021 振動する不足膨張平板衝突噴流の数値解析

Numerical Simulation of Oscillatory Phenomena of Underexpanded Jet Impinging on Plate

○ 狐塚諒太(東電大院) 正 榊原洋子(東電大)
正 遠藤正樹(産技高専) 正 岩本順二郎(東電大)

Ryouta KOZUKA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama, Saitama 350-0394

Yoko SAKAKIBARA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama, Saitama 350-0394

Masaki ENDO, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011

Junjiro IWAMOTO, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama, Saitama 350-0394

Oscillatory phenomena of an underexpanded jet which impinges on a flat plate are discussed in this paper. We focus the effect of the oscillation on the motion of the separation bubble which is formed near the plate. In this study, the flow field is visualized by the shadowgraph method and the frequency of the oscillation is measured. Three dimensional Euler equations are solved using symmetric TVD scheme. A comparatively strong shock (plate shock) is experimentally and numerically visualized in front of the plate. The location and the configuration of the shock are found to affect the flow condition in the region between the plate shock and the plate. In addition, the details of the motion of the plate shock are numerically analyzed. As a result, it is found that the separation bubble is generated under certain conditions and the oscillation of the jet causes the transformation of the separation bubble.

Key Words: Impinging Jet, Shock Wave, Numerical Simulation, Oscillation, Visualization

1. 序 論

先細ノズルより空気を噴出させる際に、ノズル前後の圧力比が臨界圧力比よりも大きいとき、噴流は不足膨張の状態となる。不足膨張噴流はロケットのジェットエンジンからの排気噴流⁽¹⁾、レーザー加工の際のアシストガス⁽²⁾、熱強化ガラス製造時の風冷工程に使う冷却噴流⁽³⁾など、工業上様々な場面で利用されている。また、下流に垂直に置かれた平板への衝突噴流はこうした流れ場の簡単なモデルとして捉えることができ、これまでも多くの研究がなされてきた。ノズル圧力比やノズル平板間距離を変えることにより流れ場全体に発生する振動に関する研究もその一つであり、特に Powell⁽⁴⁾によって提唱された流れ場におけるじょう乱のフィードバック機構はよく知られている。

本研究では、衝突領域中にはく離泡と呼ばれる渦の発生する条件下での噴流に焦点を絞り、シャドウグラフ法を用いた流れ場の可視化および三次元の TVD 法による数値シミュレーションにより、噴流の振動とはく離泡の挙動との関係について明らかにすることを目的としている。

2. 実験装置

実験装置概略図を図 1 に示す。コンプレッサにより圧縮された空気は、サージタンクで脈動成分を取り除き、エアドライヤ、エアクリーナを経て防音室内の高圧タンクに供給される。高圧タンクには直径 $D=10\text{mm}$ 、曲率半径 20mm の円形先細ノズルが取り付けられており、そこから不足膨張の状態で大気中に放出される。

噴流は、圧力比 $p_0/p_a=3.0$ (p_0 : タンク内よどみ点圧力, p_a : 大気圧)で放出され、下流に垂直に置かれた円形平板(直径 200mm)に衝突する。ノズル平板間距離 $L/D=1.0$ から 2.0 の間で、 0.1 ずつ変えながら流れ場の可視化を行う。

3. 数値解析法

数値解析には Yee⁽⁵⁾の対称型 TVD 法(時間、空間共に 2 次精度)を用い、基礎式に三次元のオイラー方程式を適用する。図 2 は、本研究で用いた計算モデルを示している。

空気は直径 D のノズルから右側に向かって流れ、距離 L の所に置かれた直径 $D_{co}/D=12$ の円形平板に衝突している。また、本研究では O 型計算格子を使用するため、流れ場中心に直径 D_{ci} の円柱状の境界が発生する。この境界を固体壁面として扱うことで衝突噴流は中心軸上に直径 $D_{ci}/D=0.01$ の円柱を有する流れ場となっている。

4. 結果および考察

4.1 解析結果 図 3 に実験で撮影したシャドウグラフ写真と数値解析によって得られた流れ場の等密度線図との比較を示す。噴流は図の左から右に向かって流れており、下流に垂直におかれた平板に衝突している。いずれの結果に

Fig.1 Experimental Apparatus

Fig.2 Computational Model

Fig.3 Comparison of Experiment with Calculation

においても、平板の前方に発生したプレート衝撃波が見られ、その発生位置および形状に関して良い一致が得られている。また、解析の結果、平坦な形のプレート衝撃波が発生している $L/D=1.0$ (図 3(a)) のとき、流れ場は比較的安定した状態であり、ノズルから噴出する主噴流も衝突領域内の流れもともにほぼ定常な状態であることが分かった。

一方、 $L/D=1.3$ (図 3(b)) の結果では、プレート衝撃波の形状は弓形となり、衝突領域内の密度分布はより複雑なものとなっており、平板中心における圧力履歴からこのとき噴流は約 17kHz の周波数でほぼ周期的な振動をしていることが確認された。

4.2 振動によるはく離泡の変化 図 4 は、 $L/D=1.3$ のときの衝突領域内における平板上の圧力分布、図 5 は速度ベクトルをそれぞれ示している。前述のように、このとき噴流は周期性を持った振動をしており、プレート衝撃波の位置のわずかな変化によって平板中心での圧力は増減を繰り返す。図 4(a) および図 5(a) は、プレート衝撃波が平板に近付き、圧力が極大値となったときの状態、図 4(b) および図 5(b) は逆にプレート衝撃波が平板から離れ、圧力が極小値となったときの状態をそれぞれ示している。図 4 において、どちらの場合においても平板中心の圧力がその周囲よりも低く、それにより図 5 に見られるように、平板に沿って周囲から中心へ向かう流れが発生することが分かる。これらの逆流ははく離泡の一部となり、渦を形成する。平板中心での圧力の高い図 5(a) では、比較的軸対称な分布をしており、はく離泡とその周囲の流れとの境界に当たる速度がゼ

Fig.4 Pressure Contours on Plate ($L/D=1.3$) Fig.5 Velocity Vectors on Plate ($L/D=1.3$)

ロとなる領域もまた円形に近い分布となっている。一方、圧力が低い場合の図 5(b) ではその対称性はくずれ、境界の領域は変形している。噴流の振動によりこれら 2 つの状態のはく離泡が交互に現れていることがわかった。

5. 結 論

超音速平板衝突噴流の流れ場に発生する振動を解析するために、シャドウグラフ法を用いた可視化および実験と同条件の流れ場に対し数値解析を行なった。その結果、以下の 3 点の結論が得られた。

- 1) ある条件下においてプレート衝撃波は弓形となり、衝突領域にはく離泡が発生する。
- 2) 噴流の周期的な振動によりプレート衝撃波と平板との距離が変化し、平板中心での圧力に影響する。
- 3) 平板中心での圧力の変動によりはく離泡の形状もまた周期的に変化する。

6. 参考文献

- (1) N.Chauvet et.al, Numerical Study of Mixing Enhancement in a Supersonic Round Jet, AIAA J., Vol. 45, No. 7, July 2007.
- (2) W.Matsuda and T.Nakamura, A Feasibility Study on Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Annular Impinging Jets for Assisting Laser Cutting, Proc. LAMP'92, (1992), 613-618.
- (3) S. Aratani and N. Ojima, Effect of shock waves on fracture and quenching in tempered glass, Proc. 8th Int. Sym. Shock Waves, (1991), 1277-1282.
- (4) A.Powell, The sound-producing oscillations of round underexpanded jets impinging on normal plate, J.Acoust. Soc. Am. 83-2(1988), 515-533.
- (5) H.C.Yee, Construction of Explicit and Implicit Symmetric TVD-Schemes and Their Applications, Comput. Phys., 68, (1987), 151-179.