シンセティックジェットのコアンダ効果に関する研究

Numerical Study on Coanda Effect of Synthetic Jet

○正 西部 光一 (工学院大院) 学 中川 盟士 (工学院大院) 正 岡安 晋平 (工学院大院)
正 佐藤光太郎 (工学院大) 正 横田 和彦 (名工大)

Koichi NISHIBE, Graduate School of Engineering, Kogakuin University, Nishi-Shinjuku 1-24-2, Shinjuku-ku, Tokyo
Chikashi NAKAGAWA, Graduate School of Engineering, Kogakuin University
Shimpei OKAYASU, Graduate School of Engineering, Kogakuin University
Kotaro SATO, Kogakuin University
Kazuhiko YOKOTA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi

Key Words : Synthetic Jet, Coanda Effect, Momentum, Velocity Distribution, Reynolds Number, Stokes Number

1. 緒 論

流れ場の制御に噴流が利用されることがある⁽¹⁾。しかし、噴流生成にはコンプレッサなどを利用した流体供給が必要であることから、システム全体としては複雑になり、小型化・軽量化に適しているとは言いがたい。そこで最近では連続噴流に代えてシンセティックジェットを利用する流体制御が試みられている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。シンセティックジェットは吸引と噴出を交互に繰り返すことで、出口での時間平均速度・流量がゼロであるにもかかわらず、下流では渦対あるいは渦輪が形成され連続噴流同様の速度分布・実質流量が生成される流れである。アクチュエータにはプラズマ方式やピエゾ駆動型、スピーカー型などが考案されているが、いずれも回転部がないため小型化・軽量化に適している。シンセティックジェットの基本的特性についてはこれまでもいくつか報告がなされ⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾、平均噴流の発生条件や噴流構造などに関して一定の成果が得られている。しかし、詳細な発生機構や流動特性には未だ不明な点が多く残されており、なかでもコアンダ効果に代表されるようなシンセティックジェットと境界面と干渉について報告した例を著者らは確認していない。

そこで、本研究ではシンセティックジェットと境界面との干渉について着目し、固体壁面近傍での二次元シンセティックジェットの流動特性の解明を試みる。主として数値シミュレーションを用いてフローパターンに及ぼす K ($K=Re/S^2$ で定義⁽⁵⁾され無次元ストロークに相当するパラメータ) の影響並びに連続噴流とシンセティックジェットの噴流構造の同異について議論する。

2. 数値シミュレーションモデル

数値シミュレーションには、非構造格子系熱流体解析システム SCRYU/Tetra for Windows [(株)ソフトウェアクレイドル] を用いた。本研究では乱流モデルは用いずに、二次元非圧縮粘性流れを仮定して流れ場の解析を行った。

図1に、計算領域と境界条件の一例 ($H/b=20$ の場合) を示す。境界条件として噴流出口 (スロット) では流速を与え、

Fig.1 Numerical simulation domain and boundary condition

計算領域出口境界では圧力一定条件を与えた。固体壁面と反対側の外部境界位置はスロット中心より $380b$ とし、下流側出口位置は $420b$ とした。なお、本研究では図1の上壁、下壁位置がともに $380b$ の場合の計算結果を便宜上、無限遠での結果として採用した。また、本計算に用いたグリッド数は約 200,000 であり、スロット幅 $b=4\text{mm}$ として計算した。レイノルズ数 $Re=Ub/\nu$ は、代表速度として連続噴流では噴流速度 U_s 、シンセティックジェットでは吹き出し時の速度 (正の速度成分) のみを周期で時間平均した速度 $U_0=fL_0=A/\pi$ を与えた⁽⁶⁾。本研究では主に $Re=133$ の結果について報告する。

3. 結果及び考察

図2に無限遠における自由噴流の時間平均速度分布を示す。(a)は連続噴流で、(b)と(c)はシンセティックジェットの場合である。(b)と(c)では振動数のみが異なり、(b)は $K=2.4$ 、(c)は $K=1.0$ の計算結果である。ここで、 K は $K=2U_0b/\nu S^2$ で定義され、無次元ストロークに相当する。ただし、 $S=[2\pi f b^2/\nu]^{1/2}$ はストークス数とする⁽⁵⁾。本計算条件で(a)と(b)の下流側 $x/b>5$ では類似の速度分布を示している。しかし、 $x/b<5$ の場合、(a)の連続噴流では逆流が見られないのに対して、(b)のシンセティックジェットでは噴流近傍に明確な逆流域が形成され、一方で、噴流中心の最大流速は連続噴流に比較して大きくなっている様子が観察される。(c)の条件では同じ Re 数であっても(a)、(b)と同程度の実質流量は得られない。噴流幅については(a)、(b)と比べ急激に拡大していることがわかり、この傾向は他の研究者らによる報告とも一致している。ただし、本図で示す範囲では下流でも噴流の速度分布を形成している様子は確認できる。このことからシンセティックジェットの基本流動特性は K に大きく依存していることがわかる。

図3は $H/b=20$ に対する固体壁面近傍での噴流の時間平均速度分布である。(b)は $K=2.4$ 、(c)は $K=1.0$ の結果である。(a)と(b)では噴流出口付近を除き概ね同じ速度分布を示し、ともに噴流はコアンダ効果により壁面側に引き寄せられるいわゆる付着噴流となっている。ただし、例えば $x/b \approx 40$ 以降において(a)ではなお流速に分布が見られるのに対して(b)では確認が困難になる。一方、(c)では図2(c)同様、実質流量が小さく運動量も小さくなるため、壁面との距離が相対的に大きい場合に相当するものと思われる。ここでは噴流中心位置 (最大速度を示す位置) は壁側にやや移動するものの噴流幅が広がり $x/b>20$ では明確な噴流構造は観察できない。図4は壁面が存在する $H/b=20$ で $K=0.4$ の場合の時間平均ベクトル図である。 $K=0.4$ の条件ではシンセティックジェット形成は見られず、自由噴流における時間平均速度の発生条件 $K>1$

Fig.2 Time-averaged velocity field ($H/b=\infty$, $Re=133$)

Fig.3 Time-averaged velocity field ($H/b=20$, $Re=133$)

Fig.4 Time-averaged velocity field ($K=0.4$, $H/b=20$, $Re=133$)

としている Holman ら⁽⁶⁾の結果とも対応する。

図 5 は噴流下流での流量変化であり、横軸は x/b 、縦軸は連続噴流とシンセティックジェットを比較するため有次元の二次元流量 $Q[m^2/s]$ で示した。(a)には図 2 に対応する無限遠での自由噴流、(b)には $H/b=20$ の壁面近傍での噴流の結果を示す。なお、本図の流量計算並びに図 6 の運動量計算での y 方向積分範囲は簡単のため $-20 < y/b < 10$ とした。図 5 (a)ではすべての条件で流れが下流側に進むにつれてエントレインメントにより流量がほぼ直線的に増加していることがわかる。 $K=1.0$ で平均流は発生しているものの形成される平均流量は小さい。 $K=2.4$ の流量変化の勾配は連続噴流の場合と比較しても大きく、 $x/b > 15$ では $K=2.4$ の流量が連続噴流を上回っている。また、シンセティックジェットのそれぞれの K について壁面の有無で比較すると、壁面が存在する場合の流量増加率は存在しない場合に比べ、小さくなっている。特に(b)の $K=1.0$ では、 $x/b > 15$ で流量の増加はほとんど見られない。

図 6 に運動量変化を有次元で示す。(a)は無限遠での自由噴流、(b)は $H/b=20$ の壁面近傍での結果である。いずれの場合も Re 数がそれほど大きくない本条件下では一定にはなっておらず、下流にいくにしたがってわずかに減少している。(a)の自由噴流では3者ともほぼ同じ傾きを有しているのに対して、壁面が存在する(b)では $K=2.4$ の場合は他に比較して減衰率が大きいことがわかる。 $K=2.4$ の場合は再循環領域に連続噴流の場合よりも強い渦を形成するため、大きなせん断力が働くものと推察される。また、これらのことから自由噴流の場合には Re 数と下流の任意の検査面での運動量を合わせれば、すなわち連続噴流の運動量と等しくなる K の条件を見つ

Fig.5 The variation of Q with x/b ($U_f=0.5$ m/s, $U_0=0.5$ m/s)

Fig.6 The variation of M with x/b ($U_f=0.5$ m/s, $U_0=0.5$ m/s)

け連続噴流とシンセティックジェットを比較することは妥当であるが、壁面が存在する場合にはそれらの比較には工夫が必要であることを示唆している。なお、図 6 においてスロット出口でのシンセティックジェットの運動量 M_0 は Tensi らの定義⁽⁴⁾によれば $M_0 \approx 0.006$ である。吹き出し時の運動量のみを考慮し、時間平均した場合でも $M_0 \approx 0.003$ であり、本計算から外挿される値の2倍程度になっている。したがって、シンセティックジェットの運動量の定義については今後、さらなる議論が必要である。

4. 結 論

本研究では固体壁面近傍での二次元シンセティックジェットの流動特性を調べた。 $Re=133$ の条件下で数値シミュレーションを行った。主な結論を以下に示す。

1. シンセティックジェットの速度分布は K に大きく依存するため、噴流が壁面に付着するか否かは K に依存する。
2. シンセティックジェットの流量増加率は K と壁面の有無に依存する。
3. 運動量の変化について、自由噴流では連続噴流、シンセティックジェットともほぼ同じ勾配であるのに対して、壁面が存在する場合は減衰率が K に依存する。

本研究を遂行するにあたり、三重大学 社河内敏彦教授、九州大学 高曾徹准教授から貴重なご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) Duvalgneau, R. et al., Journal of Fluid Engineering, Vol.129 (2007), pp.825-833
- (2) Whitehead, J. and Gursul, I., AIAA Journal, Vol. 44, No.8 (2006), pp.1753-1766
- (3) M. Amitay et al AIAA Journal, Vol. 39, No.3 (2001), pp.361-370
- (4) Tensi, J. et al, Journal of Visualization, Vol.5, No.1 (2002), pp.37-44
- (5) Holman, R. et al., AIAA Journal, Vol. 43, No.10 (2005), pp.2110-2116
- (6) Zhang, P.F. and Wang, J.J., AIAA Journal, Vol. 45, No.5 (2007), pp.1058-1065
- (7) Shuster, J.M. and Smith, D.R., Physics of Fluids, Vol. 19-045109 (2007), 1-21