

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21560187

研究課題名（和文） シンセティックジェットを利用した高揚力装置開発のための基礎的研究

研究課題名（英文） Fundamental Study on Flow Characteristics of Synthetic Jets for Development of Blown Flap

研究代表者

佐藤 光太郎 (SATO, Kotaro)

工学院大学・グローバルエンジニアリング学部・教授

研究者番号：80252625

研究成果の概要（和文）：

噴流技術は失速抑制など様々な流れの制御に用いられてきた。最近では連続噴流の代わりにシンセティックジェットを利用して流れを制御する研究も始まっている。本研究では高揚力装置の開発などで重要となる噴流のコアンダ効果に注目しながら剛体壁近傍における二次元シンセティックジェットの流動特性について、実験的並びに数值的に解明を試みた。スモークワイヤ法による可視化実験結果と数値計算結果から剛体壁近傍での連続噴流とシンセティックジェットのフローパターンを比較するとともに、シンセティックジェットのフローパターンに及ぼす無次元パラメータ K の影響について調べる。また、速度ベクトルおよび剛体壁面上の圧力分布から求められる噴流付着距離と K の関係を明らかにする。さらに、流線の時間変化により連続噴流とシンセティックジェットの流動特性の同異並びに噴流の安定性に及ぼす K の影響について議論する。

研究成果の概要（英文）：

The jet flows have been applied to various fields to control the flow separation. Over the last decade, several studies have investigated synthetic jets. However, there are still many clarifications needed, including details of the structure and Coanda effect of synthetic jets. The present study clarifies some fundamental flow characteristics of free synthetic jets and synthetic jets near a rigid boundary by conducting an experiment and numerical simulations. As the main results, it is found that the velocity distribution of free synthetic jets depends on $K = Re/S^2$ (the ratio of the Reynolds number to the square of the Stokes number) and can be identified by the maximum velocity at the centerline and the jet half-width. Flow visualization is carried out applying the smoke wire method. In addition, it is confirmed that the flow characteristics of the synthetic jet near a rigid boundary and re-attachment length of the synthetic jet are determined not only by H_1/b_0 (normalized step heights) but also K .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体機械， 数値流体力学， 噴流， 振動流， コアンダ効果， 非定常流れ

1. 研究開始当初の背景

噴流の応用範囲が急速に拡大している今日，流れの制御に二次元噴流を積極的に利用する研究が盛んである．なかでも噴流による境界層・失速制御に関する研究は数多く，実用化もされつつある．最近では循環制御翼（CCW：Circulation Control Wing）の開発や鈍等物体の抵抗軽減などの場面で噴流をより積極的に利用して流体力制御を行なう試みもなされている．一般に噴流生成には駆動源，羽根車，ケーシング等から構成される回転機械が用いられることが多く，したがってシステム全体としては複雑で小型化・軽量化に適しているとは言い難い．そこで最近では連続噴流の代わりにシンセティックジェットを利用する流体制御が提案されている．

2. 研究の目的

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，出口付近で渦対あるいは渦輪が形成され，下流ではエントレインメントにより連続噴流と類似の速度分布・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おり，いずれも回転部がないため小型化・軽量化に適している．そのためシンセティックジェットはマイクロ飛行体等の流体制御や高揚力装置への応用が期待される．これまでの研究では翼負圧面にシンセティックジェット・アクチュエータを取り付けて翼の失速制御が行なわれてきた他，シンセティックジェットの基本的流動特性の解明も始まっており，噴流構造や非定常特性などが議論されている．特に Holman らはシンセティックジェットの発生条件や生成メカニズムに言及している．

しかし，シンセティックジェットの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，連続噴流との同異についても十分な知見が得られていない．さらにコアンダ効果に代表されるシンセティックジェットと境界面の干渉問題に着目した研究報告例を著者らは確認していない．

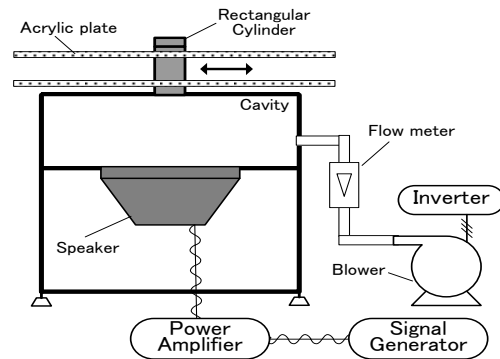
本研究ではシンセティックジェットのコアンダ効果に主眼を置きながら，自由噴流での基本流動特性並びに固体壁面近傍における二次元シンセティックジェットの流動特性について実験と数値解析の両面から解明を試みる．特にシンセティックジェットの振動特性，壁

面存在位置の影響に着目し，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を調べる．主として速度分布と K ($K=Re/S^2$ で定義され無次元ストロークに相当するパラメータである．ここで， S はストークス数 $S=[2\pi fb^2/\nu]^{1/2}$ ， f は周波数， ν は動粘性係数を表す) の関係並びに連続噴流とシンセティックジェットの流動特性の同異について議論する．また，壁面近傍でのシンセティックジェットのフローパターンについて可視化実験と数値計算で比較検討し，さらに壁面上の圧力分布計測から振動特性と噴流付着距離との関係を調べた．

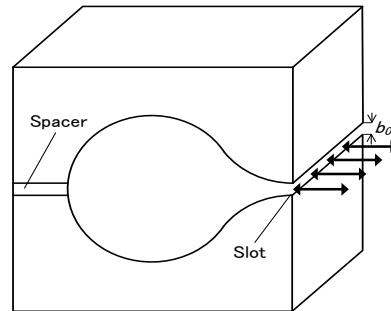
3. 研究の方法

(1) 実験方法

本実験の流速計測にはピトー管並びに熱線流速計(KANOMAX IHW100)を使用した．熱線流速計のプローブは I 型プローブ (0251R-T5) を使用し，トラバーサー(中央精機 ALS-230-C2P) にプローブサポート (7A0103) を取り付けることで任意の位置での流速計測を行った．なお，本研究では y 方向速度 v [m/s] は x 方向速度 u [m/s] に対して小さいとして $v \approx 0$ と仮定し，便宜上 $u=|u|$ とした．したがって，大規模渦や逆流が発生



(a) Speaker-driven synthetic jet actuator



(b) Nozzle configuration

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

した場合には速度の絶対値を u と解釈することはできず、時間平均をした場合には誤差が生じる。一方、噴流の挙動観察にはスモークワイヤ法による可視化実験を行った。可視化実験ではスロット出口から下流側に 25mm すなわち $x/b_0=5$ 、スパン方向中央の位置にワイヤを設置し、煙を発生させた。スモークワイヤには直径 0.35mm のニクロム線を使用し、発煙物質には流動パラフィンを用いた。なお、撮影には 300fps のデジタルカメラ (CASIO EX-F1) を使用し、測定部下流に光源 (PHOTRON HVC-SL) を配した。ただし、可視化実験では流線の画質を確保するためにレイノルズ数を $Re_{u_0} \approx 990$ 、 $Re_T \approx 1980$ としている。

(2) 数値計算モデル

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に $k-\epsilon$ モデルを採用し、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 2 に計算領域と計算条件の例を示す。境界条件として噴流出口には流速規定条件を計算領域出口境界 ($x=420b_0$) では圧力一定条件を与えた。なお、本研究では図 1 の上側境界 ($y=380b_0$) 並びに下壁境界 ($y=-380b_0$) で一定流速、それぞれ $v_w = -0.01U_{s0}$ 、 $v_w = 0.01U_{s0}$ を与え、こ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 である。

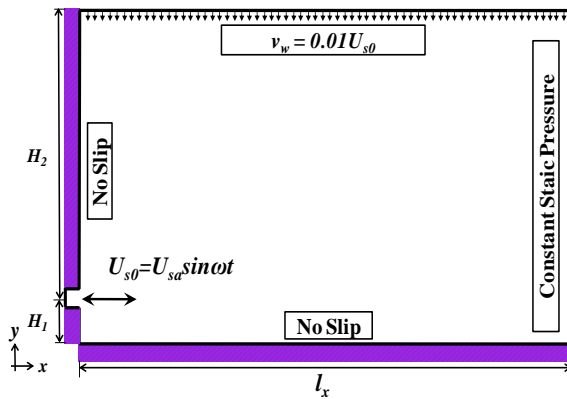


Fig. 2 Numerical simulation domain and boundary conditions

4. 研究成果

図 4、図 5 に $K=9.55$ の場合における壁面近傍でのシンセティックジェット の挙動観察例を示す。図 4 は $H_1/b_0=\infty$ の場合、すなわち自由噴流 (シンセティックジェット) の挙動であり、図 5 は $H_1/b_0=20$ の壁面近傍でのシンセティックジェットの様子である。

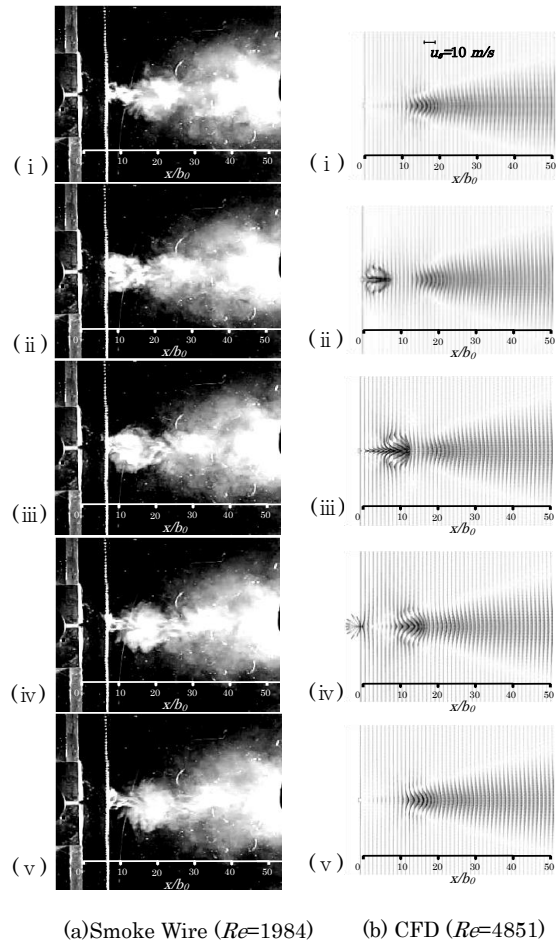
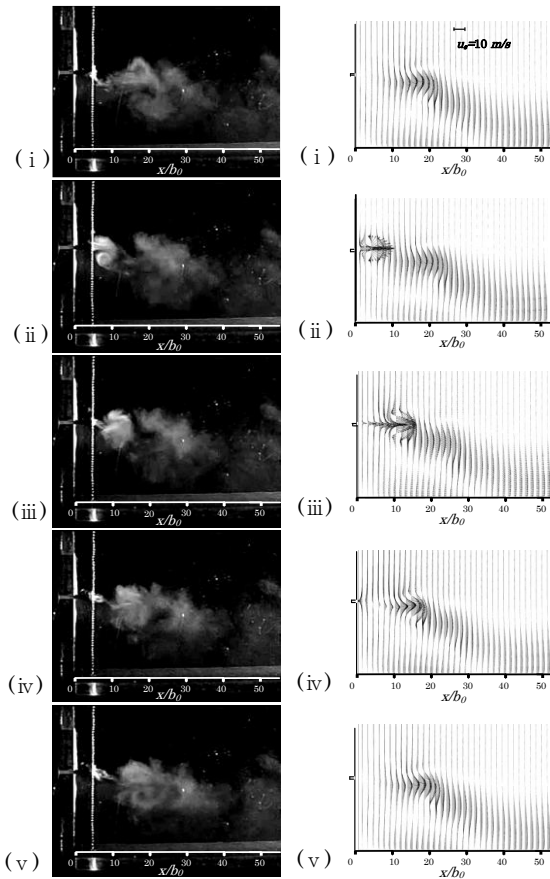


Fig. 4 Flow Pattern of Synthetic Jet for comparison between CFD and EXP results ($K=9.55$, $H_1/b_0=\infty$)
 (i) $t/T=0$, $u_{s0}=0$ m/s (ii) $t/T=0.25$, $u_{s0}=23.5$ m/s
 (iii) $t/T=0.50$, $u_{s0}=0$ m/s (iv) $t/T=0.75$, $u_{s0}=-23.5$ m/s
 (v) $t/T=1.0$, $u_{s0}=0$ m/s

両図とも (a) はスモークワイヤ法により可視化された実験結果 ($Re=1984$)、(b) は数値計算で得られたベクトル図 ($Re=4851$) であり、いずれも (i) ~ (v) はノズル出口速度変化の一周期に対応したフローパターンの時間的変化を見たものである。図 4 の無限遠の場合には (a) 実験、(b) 数値計算の両図から (ii) においてノズル近傍に渦対を形成し、その後 (iii)、(iv)、(v) で渦対が下流側 (本図では右方向) に対称性を保ちながら進んでいる様子が観察できる。ただし、(a) はスモークワイヤ法による可視化であるため渦対は煙の流体塊として捉えられる。(iv) は出口流速が $u_{s0}=-23.5$ (負) の場合であり、吸引時にもかかわらず渦対は下流側に進行し続けることが確認できる。さらに、(b) (iv) のベクトル図からはノズル近傍を除く広い領域で x 方向速度 u が正となっていることが見て取れる。なお、噴流中心線上 $y=0$ での速度 u に着目すると $K=9.55$ では



(a)Smoke Wire ($Re=1984$) (b) CFD ($Re=4851$)

Fig.5 Flow Pattern of Synthetic Jet for comparison between CFD and EXP results ($K=9.55$, $H_1/b_0=20$)
 (i) $t/T=0$, $u_{s0}=0$ m/s (ii) $t/T=0.25$, $u_{s0}=23.5$ m/s
 (iii) $t/T=0.50$, $u_{s0}=0$ m/s (iv) $t/T=0.75$, $u_{s0}=-23.5$ m/s
 (v) $t/T=1.0$, $u_{s0}=0$ m/s

$x/b_0 > 3$ で常に流速 u が正になっており、 $x/b_0=3$ 付近で脈動を伴う連続噴流が形成されたと言える。図 5 の壁面近傍におけるシンセティックジェットの挙動では(a), (b)ともに噴流は渦形成を伴い蛇行しながら壁面側に引き寄せられており、実験結果と数値計算結果とは定性的に一致していることがわかる。図 5 では壁面が存在するため流れ場が非対称となっており図 4 と比べて渦輪の対称性は早い段階で崩れている。それに伴い噴流構造も非対称になり、蛇行するものと考えられる。一方、 $K=9.55$ では $x/b_0=3$ 付近で脈動を伴う連続噴流が形成されることから $x/b_0 > 3$ では連続噴流同様、コアンダ効果により噴流が壁面に引き寄せられる

図 6 は噴流近傍に設けられた壁面表面上の圧力分布である。(a)は $H_1/b_0=5$ 、(b)は $H_1/b_0=20$ の場合で、パラメータは K である。中実のプロット点は実験値、中空のプロット点が計算値を表す。また、本図には比較のため連続噴流の結果も併せて示す。実験結果

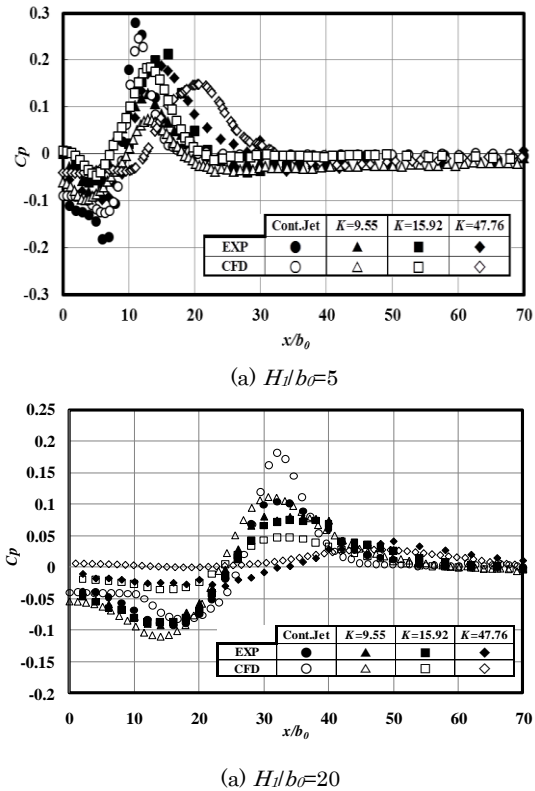


Fig. 6 Pressure distribution on a rigid wall($Re=4851$)

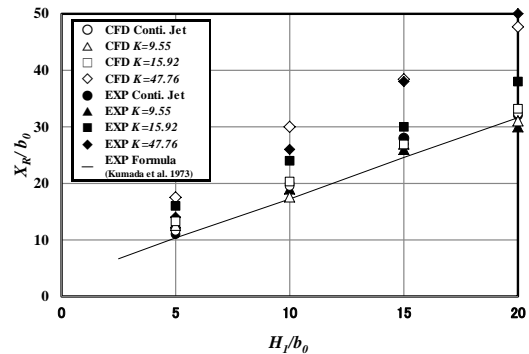


Fig. 7 Stagnation points on the rigid wall ($Re=4851$)

と数値計算結果とは概ね一致しており、両者とも再循環領域で圧力低下が見られ、噴流付着位置のよどみ点付近で圧力上昇がみられる。連続噴流の場合、広い Re 数範囲で無次元噴流付着距離 x_R/b_0 は無次元スロット高さ H_1/b_0 のみで決まることが知られており⁽⁷⁾、本研究においては実験、計算ともに $x_R/b_0 \approx 33$ となっている。一方、シンセティックジェットの場合、 x_R/b_0 は K に依存しており、噴流付着点を示す圧力係数最大値も K の値によって異なっている。

図 7 に無次元スロット高さ H_1/b_0 と無次元噴流付着点距離 x_R/b_0 の関係を示す。パラメータは K であり、中実のプロット点は実験値、中空のプロット点は計算値を表す。また、実

線は熊田ら⁽⁷⁾による実験式である。実験結果と計算結果は定性的に一致しており、 x_R/b_0 は H_I/b_0 にほぼ比例している。さらに本図から x_R/b_0 は K の増加とともに大きくなることも読み取れる。この原因として K の増加とともに平均噴流の形成位置が下流側に移動すること、さらに K の増加とともに噴流付着位置の変動振幅が増加して連続噴流の付着位置と比べて変動量が大きくなると時間平均した圧力最大値が下流側へ移動するためなどが考えられるが、これらは更なる検討が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 西部光一, 藤田祐樹, 佐藤光太郎, 横田和彦, シンセティックジェットの基本流動特性に関する研究 (第一報, 自由噴流の挙動について), 日本機械学会論文集 (B 編), 第 77 巻, 783 号 (2011), 2093-2104 頁
- ② Koichi Nishibe, Yuki Fujita, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota and Toru Koso, Study on the Flow Structure of the Synthetic Jet, JSME Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6 (2011), No.4, pp.425-436
- ③ Koichi Nishibe, Kotaro Sato, Yoshinobu Tsujimoto and Haruo Yoshiki, Experimental and Numerical Study on the Control of Flow Instabilities Downstream of Radial Inlet Guide Vanes JSME Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6 (2011), No.4, pp.651-661

[学会発表] (計33件)

- ① Ryota Tsunoda, Koichi Nishibe, Yuki Fujita, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota and Toru Koso, Study on the Flow Characteristics of Synthetic Jets near a Rigid Plane Boundary, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 9th Symposium on Fundamental Issues and Perspectives in Fluid Mechanics
- ② 廣瀬夏穂, 紙谷祐樹, 佐藤光太郎, 横田和彦, 循環制御翼周りの流れに関する研究, 日本機械学会東海支部第 61 期総会講演会論文集 (名古屋) (2011)
- ③ 田中雄貴, 根本篤, 西部光一, 佐藤光太郎, 武沢英樹, 気泡の運動により生成されるシンセティックジェットの構造について, 日本機械学会東海支部第 61 期総会講演会論文集 (名古屋) (2011)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 光太郎 (SATO, Kotaro)
工学院大学・グローバルエンジニアリング
学部・教授
研究者番号: 80252625

(2) 研究分担者

横田 和彦 (YOKOTA, Kazuhiko)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 70260635

(3) 連携研究者

()

研究者番号: