

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560207

研究課題名(和文) シンセティックジェットの推力特性に関する研究

研究課題名(英文) STUDY ON THE THRUST CHARACTERISTICS OF SYNTHETIC JETS

研究代表者

佐藤 光太郎 (SATO, KOTARO)

工学院大学・私立大学の部局等・教授

研究者番号：80252625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：これまでシンセティックジェットに関する研究は盛んに行われてきたが、シンセティックジェットの推力に関する研究例は少なく、詳細な推力発生機構や流体力と流れ場との関係などについては未だ不明な点が多く残されている。本研究ではシンセティックジェットのコアンダ効果についての解明が試みられ、さらにコアンダ効果を利用した推進器モデルが提案された。壁面近傍でのシンセティックジェットの挙動を実験と数値計算の両面から調べ、フローパターンがオフセット比に依存することを確認した。さらに、カプセル型推進器モデル周りの速度場、圧力場が示され、推進器に発生する推力特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Although there have recently been various studies on synthetic jets, many issues remain to be clarified, including details of the structure, Coanda effect and thrust characteristics. This study clarified the Coanda effect of synthetic jets. In addition, a thruster model using the Coanda effect of synthetic jets was proposed and thrust characteristics are evaluated. As the main results, the flow of a synthetic jet near a rigid boundary was visualized and the trajectory of a vortex pair is demonstrated. It was confirmed that the flow patterns of the synthetic jets near a rigid boundary depend on H/b_0 (offset ratio, normalized step height). The behavior of the asymmetric synthetic jets caused by the presence of the rigid wall was observed experimentally and the results were compared with numerical data. Furthermore, typical flow patterns around the proposed synthetic jet thruster and its thrust characteristics curves were shown.

研究分野：工学

キーワード：流体力学 噴流 流体力 非定常流れ

1. 研究開始当初の背景

シンセティックジェットに関する研究は盛んに行われており、シンセティックジェット・アクチュエータにはいくつかの方式が考案されている。アクチュエータはダイヤフラム、スピーカ、 piezo素子、プラズマアクチュエータ、放電気泡など回転部をもたない方式のものが多く、装置全体としても機械的駆動部分が少ないため小型化・軽量化に適している。駆動原理が多様であることはシンセティックジェットの大きな特徴であり、振動体があればシンセティックジェット生成が可能であることから、将来的には磁気やレーザーなどを用いて非接触でのエネルギー供給も可能になると思われる。このため流体制御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試みがなされている[1]–[9]。

しかし、シンセティックジェットの推力に関する研究例は少なく、詳細な推力発生機構や流体力と流れ場との関係などについては未だ不明な点が多く残され、そのため推進器としての最適形状に関する議論もなされていない。

2. 研究の目的

本研究はシンセティックジェットの推力を利用した自走式カプセル内視鏡やマイクロ飛行体の開発のための基礎的研究であり、シンセティックジェットのコアンダ効果について議論するとともに、コアンダ効果を利用したカプセル型推進器モデルを提案する。はじめに壁面近傍でのシンセティックジェットの挙動を可視化実験と数値計算の両面から調べ、両者を比較・検討する。また、カプセル型推進器モデル周りの速度場、圧力場について議論し、推進器に発生する推力特性の解明を試みる。

3. 研究の方法

(1) 推進器モデル及び実験装置・方法

本研究で提案するカプセル型推進器モデル概形並びに主な記号を図1に示す。吹き出しスロット($b_0=2\text{mm}$)は推進器のほぼ中央に設けられており、スロットは内部流路($b_1=b_2=8\text{mm}$)に対しほぼ 45° 傾いている。スロット出口近傍は曲面形状となっていることから、シンセティックジェット噴出時に流れはコアンダ効果によって円柱曲面噴流となる。ここでは噴出時に主に推進器後方から流出し、吸引時には前方、後方の両方から流入するため、時間平均すると推進器内部には一方向流れが形成されることになる。したがって、本モデルでは前方を吸入口、後方を噴出口とみなすことができる。本研究の可視化実験ではシンセティックジェット・アクチュエータにピストン駆動を適用し、作動流体を水としてアルミ粉法により水面の渦対の挙動を撮影した。一方、流体力計測においては空気で行い、上流下流での運動量並びに圧力から推力を算出した。

(2) 数値シミュレーション

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 $k-\epsilon$ モデルを用い、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に計算領域および境界条件を示す。境界条件として主流並びに推進器噴流出口(スロット)では流速を与え、計算領域出口境界では圧力一定条件を与えた。図2の上下壁面は slip 境界として計算を実行した。推進器モデルでは噴流速度 $U_{j0}=8.0[\text{m/s}]$ 、レイノルズ数 $Re=1058$ とし計算を行った。

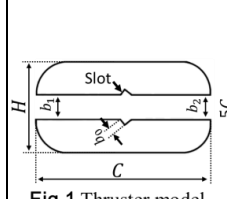


Fig.1 Thruster model diagram

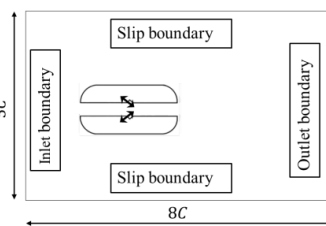


Fig.2 Numerical simulation domain and boundary condition

4. 研究成果

図4に $L_0=30$, $H/b_0=20$ に対す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。本図では $y/b_0=-20$ に固体壁が存在する。ただし、レイノルズ数は可視化実験では $Re=400$ 、数値計算では $Re=2430$ である。(a)はアルミ粉浮遊法による可視化実験結果、(b)は計算によって得られた速度ベクトル図、(c)は計算によって得られた渦度分布である。(i), (ii), (iii), (iv), (v)については、(i)スロット出口流速 u_{j0} が 0 ($t/T=0$)、(ii)最大噴出時 ($t/T=0.25$)、(iii) 出口流速 0 ($t/T=0.50$)、(iv) 最大吸引時 ($t/T=0.75$)、(v) 出口流速 0 ($t/T=1.00$) の場合である。なお、(c)の渦度のスケールは $-1000 \sim 1000 [1/s]$ で、レンジオーバーについては黒色および白色で表す。(a),(b)の一連の図から剛体壁近傍でのシンセティックジェットも自由噴流(壁が存在しない条件下でのシンセティックジェット)の場合同様、出口付近で渦対を生成しながら平均流を形成している様子が観察できる。(i)から(ii)の間でスロット付近に渦対が形成され、(ii)から(iii)では渦対は発達しながら下流へ移動する。(iv)は最大吸引時の様子であるが、吸引時でも渦対は下流側に進行し続けている。発達した渦対では互いの誘起速度が吸引速度を上回るため、渦対は常に下流側へ進行し続けることが可能となる。

さらに、(a)(iv)のベクトル図で噴流中心の速度を調べると、本条件では $x/b_0=4$ 付近より下流で噴流中心速度 u が常に正になっており、スロットでの吸引の影響は噴流中心速度を減速させるに留まっている。 $L_0=30$ の場合の

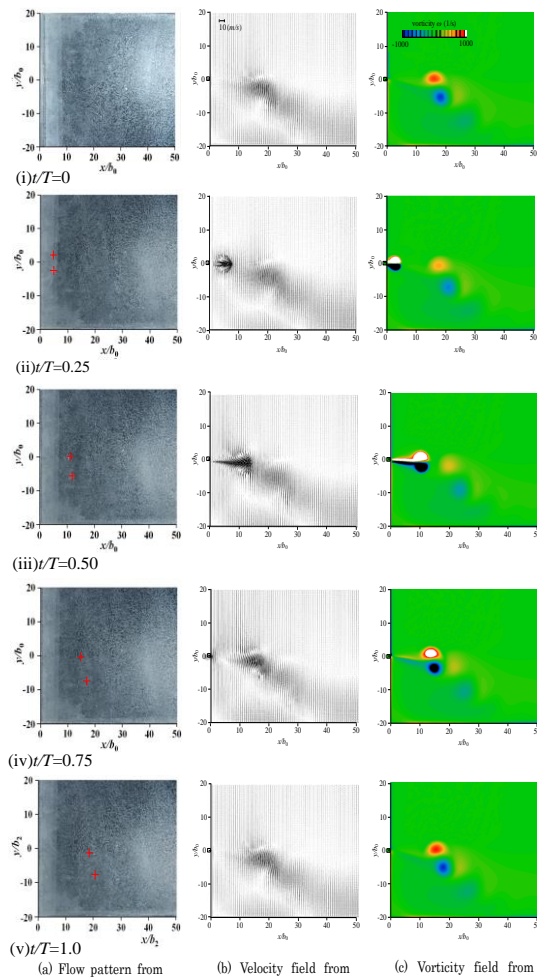


Fig. 4 Flow pattern synthetic jet by experiment

自由噴流のシンセティックジェットと剛体壁近傍でのシンセティックジェットを比較すると、自由噴流では対称の渦対が互いの誘起速度により直線的に並進運動するのに対して、剛体壁近傍では蛇行しながら剛体壁面に引き寄せられている。(b)の渦度分布を見ると、渦対の存在は明確であるが、反時計回りの正の渦中心(例えば図(ii)中、 $x_1/b_0=3$ あるいは $x_1/b_0=19$ 付近に見られる2組の渦対の上側の渦で、白色の部分)の渦度絶対値が時計回りの負の渦中心(例えば図(ii)中、 $x_1/b_0=3$ 、 $x_1/b_0=21$ 付近に見られる渦対の下側の渦で、それぞれ黒色と青色の部分)の渦度絶対値よりも大きくなっている。下側(壁面側)では壁面存在という幾何学的制限から速度せん断層の巻き上がりが抑制されることが、渦強さに差が生じる原因のひとつとして考えられる。これにより互いの誘起速度のバランスが崩れ、下側の時計回りの渦(青)は上側の反時計回りの渦(赤)よりも大きな誘起速度が与えられ、反時計回りの渦(赤)より先行して下流に進んでいく。剛体壁近傍のシンセティックジェットは渦対の対称性が崩れて蛇行運動するものの、本条件では平均流が比較的早い段階で形成され、連続噴流と類似の速度分布になることから、噴流中心はコアンダ効果によって壁面側へ引き寄せられる。ただし、非定常特性に関しては、連続噴流の場

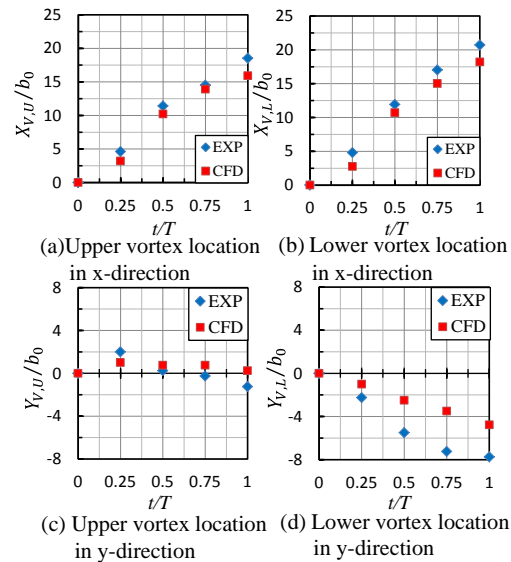


Fig. 5 Trajectory of vortex pair

($L_0=30$)

合にはほぼ定常流となるのに対して、シンセティックジェットの場合は渦が時間進行することでフローパターンが時間変化する非定常流となる。

図5にスロット部で形成される渦中心位置の時間的変化を示す。本図の条件は図4に対応しており、 $L_0=30$ 、 $H/b_0=20$ の場合である。(a)、(b)、(c)、(d)はそれぞれ上側(反壁面側)渦中心の x 座標時間的変化、下側(壁面側) x 座標時間的変化、上側(反壁面側)渦中心の y 座標時間的変化、下側(壁面側) y 座標時間的変化であり、青色の菱形は実験結果、赤色の四角は数値計算結果を表す。(a)、(b)から渦は時間とともに下流側へ進行することがわかる。詳細に見ると $t/T=0\sim 0.5$ の噴出過程でも $t/T=0.25\sim 0.5$ の渦の進行速度は $t/T=0\sim 0.25$ の進行速度よりも大きく、 $t/T=0.25\sim 0.5$ では渦が発達したことで互いの誘起速度が大きくなったものと考えられる。その後、 $t/T=0.5\sim 1.0$ の吸い込み過程でも渦は概ね一定速度で進行する様子が見え、これはスロット出口速度よりも互いの誘起速度の影響が大きいことを示している。また、(a)と(b)を比較すると下側(壁面側)の渦は上側(反壁面側)渦よりも先行する傾向にある。また、(a)、(b)で示される x 座標の時間的変化においては実験結果、数値計算結果に定性的相違は認められない。次に y 座標の時間的変化について見ると、渦形成後一周に制限すれば(c)の上側(反壁面側)渦は時間的変化が小さいのに対して、(d)下側(壁面側)渦の変化量は大きく、壁面側への移動が顕著である。このことから、噴流中心が壁面側へ移動していることは明らかである。 y 座標の時間的変化において、実験結果と数値計算結果に定量的な差は見られるものの定性的には一致している。

図4、5の結果からシンセティックジェットのような非定常流であっても、流れの制御にコアンダ効果が有効であることがわか

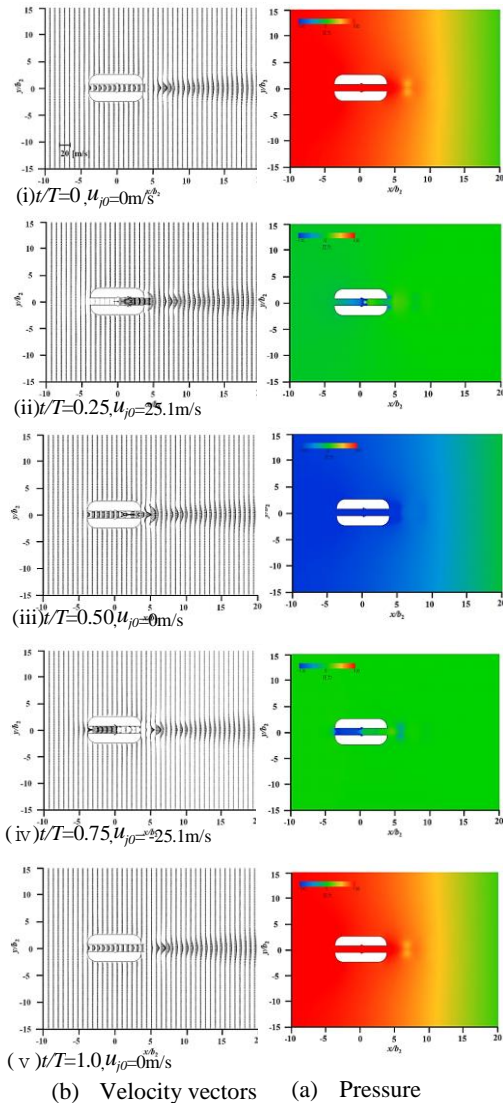


Fig. 6 Flow patterns of Synthetic jet ($L_0=30$, $U/U_{j0}=0.25$)

る。

図6に本研究で提案するシンセティックジェット推進器モデル周りのフローパターンを示す。主流とシンセティックジェットの速度比 $U/U_{j0}=0.25$ の条件下で得られた数値計算結果である。無次元ストローク $L_0=30$, (i), (ii), (iii), (iv), (v)については、(i)スロット出口流速 u_{j0} が 0 ($t/T=0$), (ii)最大噴出時 ($t/T=0.25$), (iii) 出口流速 0 ($t/T=0.50$), (iv) 最大吸引時 ($t/T=0.75$), (v) 出口流速 0 ($t/T=1.00$) の場合である。通常のシンセティックジェットは噴出口と吸入口は同一であるが、本モデルでは推進器中央にあるスロットでは噴出と吸引を繰り返すものの、推進器としては前方の吸入口と後方の噴出口に分かれることになる。なお、無次元ストロークの異なる場合でもフローパターンに定性的な違いは見当たらないことを付記する。(a)ベクトル図では推進器下流に噴流構造が形成され、同時に推進器内部流路には下流へ向かうほぼ一方向流れが認められる。(b)の圧力分

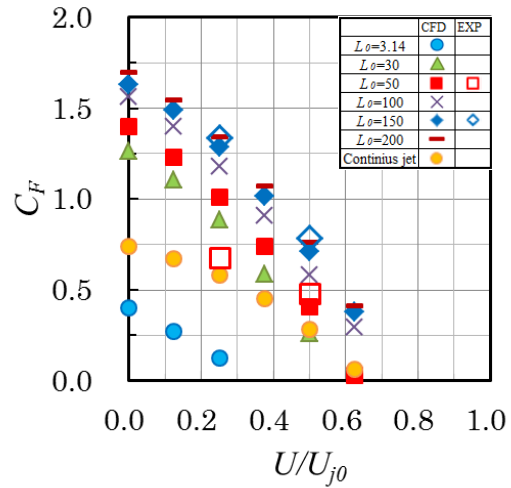


Fig. 7 Thrust characteristics diagram (EXP&CFD)

布においても下流で圧力一定条件を課していることから上流側圧力の時間変化が観察される。 $L_0=30$ の場合には $x/b_0 \geq 10$ 程度から概ね定常の噴流構造となる。シンセティックジェット利用推進器の下流においても連続噴流と類似の速度分布を示す噴流構造が形成されることから、相応の推力生成が期待できる。

図7に推力特性を示す。横軸は無次元主流速度 U/U_{j0} 、縦軸はシンセティックジェットの運動量に基づく推力係数 $C_F=F/2\rho b_0 U_{j0}^2$ であり、パラメータは無次元ストローク L_0 であり、中実のプロット点が数値計算結果、中空プロット点が実験結果を表している。推進器に働く推力は数値計算では運動量方程式により求めた。一方、実験での推力評価に上式を適用するのは困難であることから、本研究では、 $x/b_0=300$ の位置で時間平均速度分布と時間平均圧力を計測し、実験値を定常流れの運動量方程式に代入することで得られた値を便宜上の推力とした。なお、参考のために連続噴流での推力特性も同図に示す。いずれの場合も右下がりの特性を有していること、シンセティックジェットの推力特性曲線は無次元ストローク L_0 に依存し、同一 U/U_{j0} に対しては L_0 が大きくなるにしたがって推力係数 C_F が大きくなる傾向にあることがわかる。また、 $L_0=3.14$ と $L_0=30, 50$ の一部を除いて、シンセティックジェットの C_F が連続噴流の C_F よりも大きな値を示すことがわかる。数値計算結果と実験結果とを比較すると $L_0=50$, $U/U_{j0}=0.25$ の値に大きな差異 (35%程度) が認められるものの、定性的には良好な一致が見られる。

本研究ではコアンダ効果を利用したカプセル型推進器モデルを提案し、流動特性および推力特性を明らかにするため数値計算並びに実験を行った。主な結果を以下に示す。
(1) 壁面近傍でのシンセティックジェットの挙動観察からシンセティックジェットの流動制御にコアンダ効果が有効で

あることを示した。

- (2) 壁面近傍でのシンセティックジェット
の可視化実験結果と数値計算結果を比較・
検討し、両者が定性的に一致すること
を示した。
- (3) カプセル型推進器モデルを提案し、
推進器周りのフローパターンを示した。
シンセティックジェットの推力特性を示
した。

<引用文献>

- [1] Whitehead, J. and Gursul, I., AIAA Journal, Vol. 44, No.8 (2006), pp.1753-1766
- [2] M. Amitay et.al AIAA Journal, Vol. 39, No.3 (2001), pp.361-370
- [3] Tensi, J. et al, Journal of Visualization, Vol.5, No.1 (2002), pp.37-44
- [4] Duvigneau, R. et al., ASME J. Fluids Engineer., 2007, 129, 825-833.
- [5] You, D. and Moin, P., Annual Research Briefs 2007, Center for Turbulence Research, 311-321.
- [6] Smith, B. L. and Glezer, A., 1998, 10(9), 2281-2297.
- [7] Holman, R. and Utturkar, Y., AIAA Journal, 2005, 43, pp.2110-2116, 2005.
- [8] Koichi, et al. Journal of Fluid Science and Technology 6(4), 425-436, 2011
- [9] 西部光一, 藤田祐樹, 佐藤光太郎, 横田和彦, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 77 巻, 783 号 (2011), 2093-2104 頁

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 Koichi NISHIBE, Tamio FUJIWARA, Hiroshi OHUE, Hideaki TAKEZAWA, Kotaro SATO and Kazuhiko YOKOTA, Synthetic jet actuator using bubbles produced by electric discharge, Bulletin of the JSME, Journal of fluid science and technology, Vol.9, No.3, [DOI: 10.1299/jfst.2014jfst003 3], 2014.9, pp1-12, 査読有
- ② Koichi NISHIBE, Yuki FUJITA, Kotaro SATO and Kazuhiko YOKOTA, Study on the fundamental flow characteristics of synthetic jets (Behavior of free synthetic jets), Bulletin of the JSME, Journal of fluid science and technology, Vol.9, No.1, [DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0007], 2014.5, pp1-12, 査読有

[学会発表] (計 59 件)

- ① N. TAKAHASHI, K. NISHIBE, T. FUJIWARA, H. OHUE, K. SATO, Influence of the Characteristics of Velocity

Oscillation at the Exit on the Flow Structure of Synthetic Jets, 16th International Symposium on Flow Visualization, June 24-28, 2014, Okinawa, Japan

- ② Shinsaku Nakamura, Masayuki Takahashi, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota, Influence of an Upstream Obstacle on the Flow Characteristics of Axial-flow Fans, Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting and 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, FEDSM2014, August 3-7, 2014, Chicago, Illinois, USA
- ③ Takanori Nakazawa, Masanori Kudo, Koichi Nishibe, Kotaro Sato, FLOW CHARACTERISTICS DOWNSTREAM OF SWIRL FLOW GENERATORS, Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting and 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, FEDSM2014, August 3-7, 2014, Chicago, Illinois, USA
- ④ Takahiro Iwasaki, Koichi Nishibe, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota, Donghyuk Kang, A Study on the Coanda Effect and the Thrust Characteristics of Synthetic Jets, Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting and 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, FEDSM2014, August 3-7, 2014, Chicago, Illinois, USA
- ⑤ 石澤知明, 岩崎高宏, 西部光一, 佐藤光太郎, 横田和彦, シンセティックジェットを利用した流体機械の開発, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2014 (札幌)

[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：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等
<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1038/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 光太郎 (SATO, Kotaro)
工学院大学・先進工学部・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：