

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03862

研究課題名（和文）流体マニピュレータの開発に向けた励起噴流群による吸引流方向制御機能の創成

研究課題名（英文）Creation of suction flow direction control function by using excited jets for development of fluid manipulator

研究代表者

西部 光一（Nishibe, Koichi）

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：10707277

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：噴流と吸引を組合わせて、浮遊物の非接触操作する流体マニピュレート技術の開発に向けた課題である「指向性がない吸引流の方向制御の実現」を目指して、時間的に速度が変化する非対称サブスロットから生成された励起噴流を用いた遠隔吸引を試みた。その結果、励起噴流の一種であるハイブリッドシンセティックジェットや連続噴流によって、吸引範囲を限定するジェットパーテーションの生成に成功した。それにより、吸引スロットから離れた場所に設置した壁面近傍の速度が、吸引流のみの場合と比較して増加することが確認された。また、ジェットパーテーションの生成可能なスロットの幾何学的条件と励起噴流の振動数の関係について議論がなされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

吸引流は指向性がないため、掃除機や口腔外バキュームなど固形物を吸引する際には、被吸引物近傍にノズルやカバーなど追加構造物を設置する必要がある。そのため、システムとして小型化が難しいことからその応用範囲は限定的である。本研究で得られた成果を応用・発展することで、カバー等の追加構造物が不要な小型吸引システムの開発が進み、家電製品や航空機の失速制御に留まらず様々な分野の応用が進むと考えられる。例えば、ノズルの形状が一定のまま励起噴流の振動数を調整することで、固形物の非接触吸引が可能となり、より衛生的な環境が求められる医学や食品分野などへの応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：To develop a fluid manipulation technique for non-contact manipulation of floating objects by using jets and suction, we have attempted remote suction using excited jets generated from asymmetric subslots with time-varying velocity. As a result, we succeeded in generating a jet partition that limits the suction range by using a hybrid synthetic jet, which is a type of excitation jet, and a continuous jet. The velocity near the wall surface, which was located far from the suction slot, was increased compared to the case of suction flow by itself. The relationship between the geometrical conditions of the slot and the frequency of the excited jet was also discussed.

研究分野：流体工学

キーワード：吸引流 シンセティックジェット ハイブリッドシンセティックジェット 流体制御 非定常流 流体マニピュレータ

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

吸引流は古くから研究がなされ、得られた技術は航空宇宙・機械工学分野をはじめ様々な工業製品に応用されている。例えば、境界層の能動制御技術の1つとして、翼負圧面付近の流体を吸込み、剥離点を後退させる吸込翼や、身近な家電製品として集塵機・掃除機などがある。1990年代からは、噴出流の偏向システムの単純化・小型軽量化に向けた新しい噴流方向制御手法として、パドル等の可動式ステーターによる機械的噴流偏向の代わりに噴出ノズル出口近傍に定常吸引ノズルを設置し、噴出流の方向や噴流幅を制御する手法の提案がなされ、これまでに一定の成果が得られている^{例えば[1]}。また、複数の吸引流を干渉させた境界層制御の検討がなされ、同一投入エネルギー条件下では、小型軽量アクチュエータ（ピエゾ素子や小型スピーカ等）により生成される励起噴流の一種であるシンセティックジェットを利用した場合よりも、吸引流を利用した方が剥離点の後退に有効との結果も報告^[2]されている。一方、吸引流は場全体から流体を吸い込み、指向性が無い単純な流れであるため“吸引流そのもの”の方向制御を試みた例はこれまで殆ど見当たらなかったが、近年、森西らは吸引ノズルを公転させることにより生成された竜巻旋回流を用いた遠隔吸引技術の開発に取組み、吸引流に指向性を持たせることに成功している^[3]。

そこで、本研究代表者らは小型かつ固定式吸引ノズルによって、同遠隔吸引技術のように吸引流に指向性を持たせ、その方向制御が実現されれば、将来的には噴出・吸引流の両方を利用した浮遊物の非接触操作（流体マニピュレータ）技術の開発に繋がり、流体制御に留まらず、医学分野（例えば、水中内視鏡手術において、患者負担の更なる軽減や水中内の特定物質の回収）など多分野での応用が期待できると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、流体マニピュレータ開発の第一歩として、非対称スロット（スロット片端部に突起物を設置）により偏向可能な励起噴流を用いた新しい吸引流の方向制御技術の創成を試みるものである。具体的には、吸引メインスロットの両端部から同メインスロットと反対方向に偏向する非対称サブスロットから投入される励起噴流の偏向角度を、同流の「時間特性（振動数および速度変動振幅）」を調整し、非対称サブスロットから周期的に放出される「渦対の挙動」を制御することで、流れで空間を仕切るジェットパーテーションを生成し、吸引空間を任意の大きさ及び方向に制御することが本研究の目的である。主に、励起噴流3種（シンセティックジェット、ハイブリッドシンセティックジェット、脈動噴流）^[4]の偏向を実現するための検討を行い、同検討で得られた偏向励起噴流を用いた吸引流の方向制御について、実験（粒子画像流速測定法（PIV: particle image velocimetry）および熱線流速計による速度場計測）と数値シミュレーションの両面から進められた。また、非対称スロットでの偏向が困難である連続噴流をサブジェットとした結果との比較・検討も行った。本報では、吸引流および被吸引壁面が存在せずに、サブジェット間の干渉（引寄せ合い）のみが作用する条件下で非対称スロットから生成される連続噴流、励起噴流3種の挙動の調査結果を示す。また、吸引流量一定条件下で被吸引壁面近傍速度の増加に寄与するジェットパーテーションを生成可能な幾何学的条件（吸引スロット-サブスロット間距離、吸引スロット-被吸引壁面距離）と運動力学的条件（吸引速度、励起噴流の振動数）の関係に関する実験結果について報告する。

3. 研究の方法

図1に実験装置概略図およびスロット近傍の拡大図を示す。本実験装置は小型遠心ファン、小型スピーカ、プレナムタンク、吸引メインスロット、ジェットパーテーション生成向け非対称サブスロット（メインスロット両端にそれぞれ設置）から構成される。吸引メインスロット（幅 $b_m = 10\text{mm}$ ）と非対称サブスロット（幅 $b_s = 5\text{mm}$ 一定、非対称スロット段差 $c = 10\text{mm}$ 一定）はスロット間距離 h で設置されており、このメイン・サブスロットおよびスロット下流の供試流路（ $400\text{mm} \times 500\text{mm}$ ）のwは 100mm 一定である。そのため、メインおよびサブスロットのアスペクト比（ w/b ）はそれぞれ10と20となり、その上下部がアクリル板で保持されていること

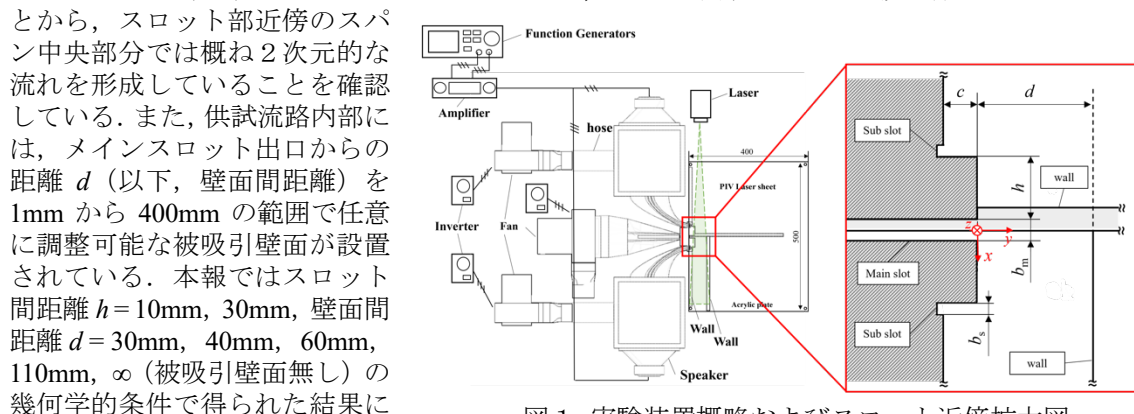


図1 実験装置概略およびスロット近傍拡大図

ついて報告する。作動流体は空気であり、吸引流は小型遠心ファンにより生成され、ファン回転数をインバータで制御することで吸引質量流量 M (ファン出口部にノズルを設け、ノズル出口速度と面積、空気密度の積から算出) を調整した。脈動噴流、ハイブリッドシンセティックジェットおよびシンセティックジェットは、小型遠心ファンで生成された連続噴流を小型スピーカ一付きプレナムタンクに流入し、同スピーカの振動数 f と振動振幅をファンクションジェネレーターとアンプで調整することで生成した。なお、ファンを停止してスピーカのみ駆動させた場合に、シンセティックジェットが生成される。非対称サブスロット出口速度の計測には、I型熱線流速計 (Kanomax 7000Ser., サンプル周波数 10kHz, データ長 5s) を用いた。なお、励起噴流の代表速度 U_s の算出はスロット出口中心速度の振動 1 周期あたりに生成される運動量に基づき算出^[5]し、本報では $U_s \approx 5.9\text{m/s}$ 一定で得られた結果を報告する。

また、PIV による流れの可視化実験を行い、ジェットパーテーション生成可否の判断および吸引速度を計測した。厚さ 1mm のレーザーシート (Kato Koken G4000) を流路スパン中央の x - y 平面の位置に図 1 に示すように入射し、 $+$ z 方向からハイスピードカメラ (Kato Koken k6) によって撮影した。また、トレーサ粒子である煙 (煙発生装置: Kanomax Model 8304, 粒子径 0.3~1 μm) はサブスロットに接続されたプレナムタンクに投入され、連続噴流または励起噴流と共にサブノズルから供試流路に供給される。画像処理には PIV 解析システム (Kato Koken, FlowExpert2D2C) を採用し、直接相互相関法を用いた。なお、吸引メインスロット中心線上で対称な流れ場となっていることを可視化実験から確認しているため、メインスロット中心線上にアクリル板を設置して実験装置片側半分部分について PIV 解析を実施した。

4. 研究成果

(1) 非対称サブスロットから生成される流れの挙動

図 2 に吸引流なし ($M=0\text{kg/s}$), $d=\infty$ (被吸引壁面無し), $h=30\text{mm}$ の条件下で PIV 解析により得られた正規化した時間平均速度ベクトル分布を示す。パネル(a)-(d)はそれぞれ連続噴流、脈動噴流 ($f=100\text{Hz}$, 速度振幅比 $\alpha = U_{sa}/U_0 = 1.0$ (ここで、速度変動振幅 U_{sa} /連続噴流投入速度 U_0)), ハイブリッドシンセティックジェットの $f=50\text{Hz}$ および $f=100\text{Hz}$ の結果である。図 2 (a) 連続噴流の結果に着目すると、非対称サブスロットから供給された連続噴流が、コアンダ効果によってメインスロット中心線上に置かれた壁面 (メインスロット) 方向に偏向し、同壁面に付着して流れる壁面噴流が形成されていることがわかる。また、図 2 (b)脈動噴流は図 2 (a)連続噴流と比較して脈動による影響で噴流幅が増加するため、よりメインスロット近傍で同壁面に付着するものの、速度が大きい噴流中心部分は概ね直進している様子が伺える。しかし、本可視化範囲よりも下流 ($y/b > 36$) で壁面噴流を形成していることを確認している。図 2 (c)-(d)ハイブリッドシンセティックジェットでは、図 2 (c) $f=50\text{Hz}$ の場合は図 2 (b)脈動噴流と類似の流れ場が形成され、下流で壁面噴流を形成していることを確認している。一方で図 2 (d) $f=100\text{Hz}$ の場合は、速度の大きい噴流中心部分がメインノズルと反対側に偏向し、 $y/b > 36$ においても明確な壁面噴流の発達は確認されなかった。これは、局所的な非対称性を有するサブスロットによって偏向した形成流が、メインスロット中心線上に設置された壁面 (大規模な非対称性) によるコアンダ効果が作用しているにも関わらず、同壁面に引寄せられなかったためであると考えられる。

以上の結果より、被吸着壁面および吸引流が存在しない条件においては、非対称サブスロットから投入され連続噴流および脈動噴流はお互いが引き寄せ合い一体化した平均流を形成することが確認された。一方で、ハイブリッドシンセティックジェットの場合にはその振動数を調整することで、吸引メインノズル近傍でのサブジェット同士の一体化を防ぐことが可能であり、吸引

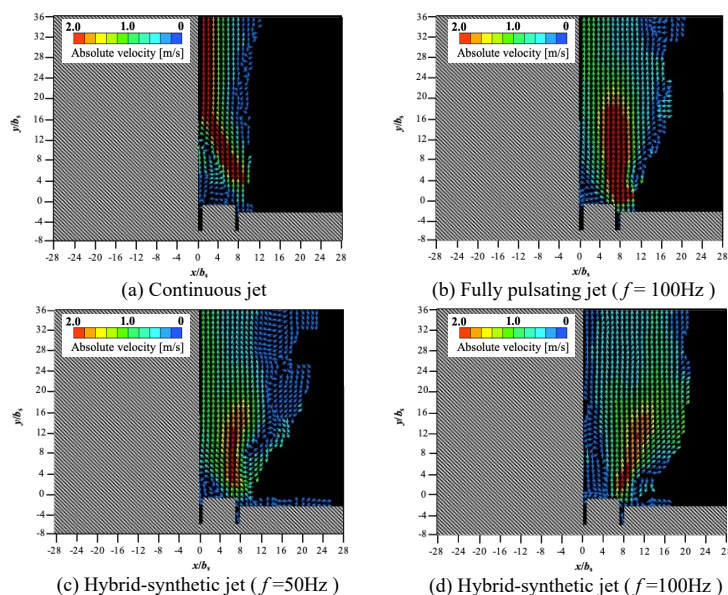


図 2 正規化された時間平均速度ベクトル図 ($M = 0\text{kg/s}$, $d = \infty$, $h = 30\text{mm}$)

範囲を限定するジェットパーテーションを形成可能であることが示唆された。なお、正味の流量がゼロであるシンセティックジェットをサブジェットとした場合においても、ハイブリッドシンセティックジェットと概ね同傾向であることを確認している。

(2) 壁面間距離がジェットパーテーションの生成と吸引速度に及ぼす影響

図3に吸引流量 $M = 0.0030 \text{ kg/s}$ 、スロット間距離 $h = 30 \text{ mm}$ の条件下で、(i) 連続噴流と(ii) ハイブリッドシンセティックジェット ($f = 100 \text{ Hz}$) の正規化した時間平均速度ベクトル分布を示す。パネル(a)は $d = 60 \text{ mm}$ 、(b)は $d = 110 \text{ mm}$ の結果である。連続噴流で壁面間距離が小さい場合(図3(i)(a))、非対称サブスロットから付加された連続噴流は、メインスロットに直接吸引されずに概ね直進して被吸引壁面に衝突し、吸引メインスロット方向(図中方向、 $-x$ 方向)とその反対側(図中右方向、 $+x$ 方向)に分岐し、吸引範囲を限定するジェットパーテーションの生成に成功している様子が伺える。また、 $-x$ 方向の流れはメインスロット中心線上に配した壁面に沿って一定の速度を保ちながら、メインスロットに吸引されていることが確認できる。一方、壁面間距離より大きい場合(図3(i)(b))では、サブジェットが被吸引壁面・吸引流無しの場合(図2(a))と同様に、メインスロット中心線上に配した壁面に引き寄せられて衝突し、メインノズル方向($-y$ 方向)と被吸引壁面方向($+y$ 方向)に分岐し、その一部が直接吸引されてしまう様子が伺える。図3(ii)ハイブリッドシンセティックジェットの場合は、本検討範囲においては壁面間距離に関係なく、サブジェットが被吸引壁面に衝突して、 $\pm x$ 方向に分岐する流れを生成するジェットパーテーションの生成に成功していることがわかる。したがって、サブスロット出口の代表速度が等しい条件下では、連続噴流よりもハイブリッドシンセティックジェットの方がより壁面間距離 d が大きい範囲で同パーテーションの生成が可能であることが明らかとなった。なお、吸引流のみの場合ではPIVによる可視化が難しいため、熱線流速計を用いて被吸引壁面速度の計測を試みたが測定可能な速度域下限(0.2 m/s 程度)よりも小さく測定できていないことを確認しており、本技術の優位性を確認している。

ここで、ジェットパーテーションを生成し、吸引範囲の限定に成功している(i)連続噴流と(ii)ハイブリッドシンセティックジェットの(a) $d = 60 \text{ mm}$ における非吸引壁面近傍およびメインスロット中心線上壁面近傍の速度を比較すると、(i)連続噴流の場合の方が大きいことが見てとれる。したがって、応用時には壁面距離 d の大きさによって、連続噴流とハイブリッドシンセティックジェットを使い分けることが有効であると予想される。なお、他実験によって、同一代表速度条件下では、ハイブリッドシンセティックジェットの方がシンセティックジェットよりも被吸引壁面近傍の吸引方向速度が大きいことを確認している。

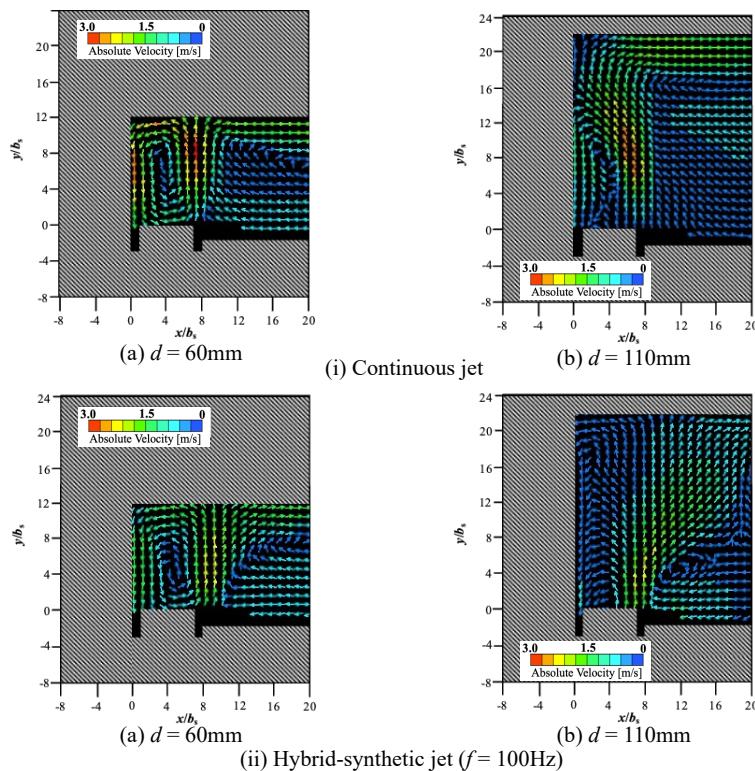


図3 正規化された時間平均速度ベクトル図 ($M = 0.0030 \text{ kg/s}$, $h = 30 \text{ mm}$)

(3) スロット間距離がジェットパーテーションの生成と吸引速度に及ぼす影響

図4にスロット間距離 $h = 10 \text{ mm}$ における正規化された時間平均速度ベクトル図を示す。(i)および(ii)は図3と同様であり、(a)と(b)はそれぞれ $d = 30 \text{ mm}$ と 40 mm の結果である。連続噴流の結果に着目すると、 $h = 30 \text{ mm}$ (図3(i)(a))の場合では、 $d = 60 \text{ mm}$ においてもジェットパーテ-

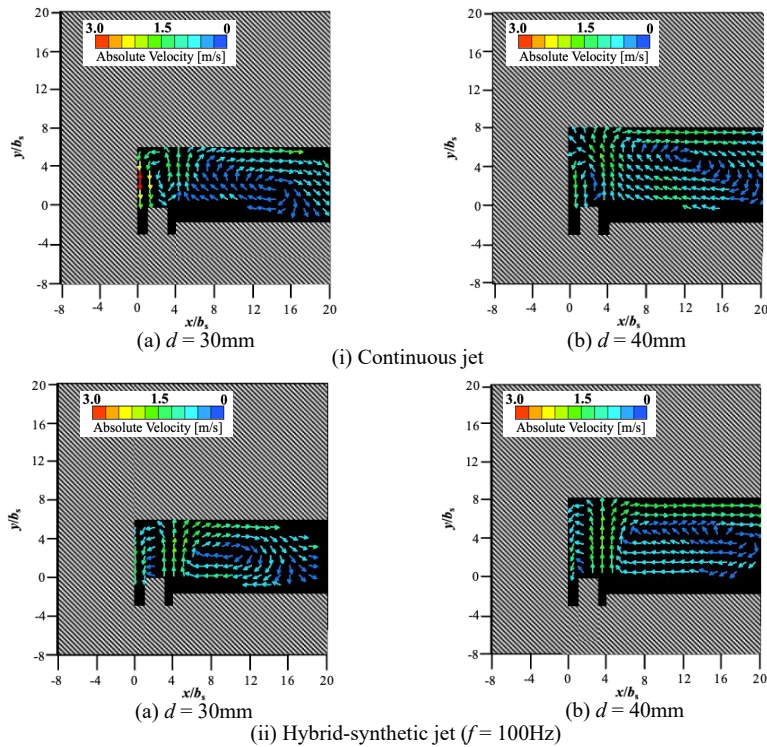


図4 正規化された時間平均速度ベクトル図 ($M = 0.0030\text{kg/s}$, $h = 10\text{mm}$)

ションの形成に成功し、被吸引壁面近傍およびメインスロット中心線上に配した壁面近傍の吸引速度が増加している。対して、図3(i)よりも小さい $h = 10\text{mm}$ の場合には、 $d = 40\text{mm}$ (図4(i)(b)) で、すでにサブジェットが図3(i)(b) ($h = 30\text{mm}$, $d = 110\text{mm}$) の場合と同様に、メインスロット中心線上に配した壁面に衝突して $\pm y$ 方向に分岐し、その一部が直接吸引されている様子が伺える。一方で、(ii)ハイブリッドシンセティックジェットの場合は、(a) $d = 30\text{mm}$ および(b) $d = 40\text{mm}$ の両条件でメインスロット中心線上に配した壁面には明確な淀み点を確認されず、形成流が被吸引壁面に衝突して、ジェットパーテーションを形成することで、吸引範囲の限定に成功している。したがって、壁面間距離 d に加えてスロット間距離 h もジェットパーテーションの生成可否および吸引速度の大きさに関係があることが確認された。また、本条件範囲ではスロット間距離 h が小さい場合においても、連続噴流や脈動噴流よりもハイブリッドシンセティックジェットの方がより大きな壁面間距離 d までジェットパーテーションの生成可能であることが明らかとなった。ただし、 h が小さい場合では吸引速度の顕著な増加が確認できないため、スロット間距離 h と非対称スロット段差 c や振動数 f との関係についてより系統的な検討が必要である。

(4) まとめ

本研究では、流体マニピュレータ開発の第一歩として、吸引スロット近傍に設置した励起噴流の振動数および速度変動振幅を調整し、吸引領域を限定するジェットパーテーションを生成することによる吸引流の方向制御技術の創成を試みた。主な結果として、非対称サブスロットから生成される連続噴流および偏向励起噴流を用いて、吸引範囲の限定を可能とするジェットパーテーションの生成に成功し、吸引流のみの場合では確認されなかった被吸引壁面近傍で吸引メインスロット方向の速度が確認された。また、本研究範囲では、ジェットパーテーションの生成および吸引速度増加を実現する運動学的条件(励起噴流の振動数)と幾何学的条件(壁面間距離およびスロット間距離)の関係が存在することが確認された。今後、より系統的な調査を行うことで、最適な関係が明らかになると予想される。さらに、本技術の応用時は、同一吸引流量およびスロット間距離の場合では、壁面距離の長さに応じて、連続噴流とハイブリッドシンセティックジェットの使い分けが有効であることが明らかとなった。

<引用文献>

- [1] Gillgrist, R. D., Forliti, D. J., and Strykowski, P. J., On the Mechanisms Affecting Fluidic Vectoring Using Suction, ASME. Journal of Fluids Engineering, 2007, Vol. 129, No.1, p. 91–99.
- [2] Wen-Li Chen, Yong Cao, Hui Li, Hui Hu, Numerical investigation of steady suction control of flow around a circular cylinder, Journal of Fluids and Structures, 2015, 59, p. 22-36.
- [3] 森西洋平, 玉野真司, 本郷理博, 吸引装置および駆動装置, 特許第 6694633 号, 2020-4-22.
- [4] TESAR, Václav; HUNG, Chuan-Hsiang; ZIMMERMAN, William B. No-moving-part hybrid-synthetic jet actuator. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, Vol. 125, No. .2, p. 159-169.
- [5] Zhang, Q., Tamanoi, Y., Kang, D., Nishibe, K., Yokota, K. and Sato, K., Influence of Amplitude of Excited Secondary Flow on the Direction of Jets, Transactions of The Japan Society for aeronautical and Space Sciences, Aeronautical and Space Sciences, 2023, Vol. 66, No. 2, p. 37-45.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Koichi NISHIBE, Gaku YAMASAKI, Taisei SUZUOKA, Kotaro SATO	4. 巻 19(3)
2. 論文標題 Jet vectoring using active switching	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JFST0023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2024jfst0023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Michiya YASUMIBA, Koichi NISHIBE, Donghyuk KANG, Kotaro SATO	4. 巻 7
2. 論文標題 Flow characteristics of two-dimensional impinging synthetic jets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Energy Systems	6. 最初と最後の頁 327 ~ 338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.30521/jes.1316559	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 山崎岳, 姜東赫, 佐藤光太郎, 大上浩, 西部光一
2. 発表標題 能動的スイッチングを用いた噴流の方向制御の研究
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Ito, Y. Miyachi, K. Nishibe, K. Sato
2. 発表標題 INFLUENCE OF RECTANGULAR PROTRUSION-SHAPED SLOT ON FLOW CHARACTERISTICS OF SYNTHETIC JETS
3. 学会等名 The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Ito, K. Nishibe, K. Sato, D. Kang
2 . 発表標題 INFLUENCE OF ASYMMETRIC PROTRUSION-SHAPED SLOT ON SYNTHETIC JET
3 . 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Nakagawa, Y. Tamanoi, K. Nishibe, K. Sato
2 . 発表標題 JET DIRECTION CONTROL USING SECONDARY FLOW GENERATED BY MULTIPLE SLOTS ON A COANDA SURFACE
3 . 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Mori, N. Ajino, K. Nishibe, K. Sato
2 . 発表標題 INFLUENCE OF THE MOMENTUM RATIO BETWEEN SYNTHETIC JETS AND CONTINUOUS JETS ON FLOW FIELDS
3 . 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Yasumiba, K. Nishibe, D. Kang, K. Sato
2 . 発表標題 Generation limit of synthetic jets impinging on walls
3 . 学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Takano, K. Nishibe, D. Kang, K. Sato
2. 発表標題 Jet flow control using velocity distribution change with time at slot
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Okuma, K. Nishibe, D. Kang, K. Sato
2. 発表標題 Jet flow control using a circular cylinder with multiple tangential blowing slots
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 光太郎 (Saro Kotaro) (80252625)	工学院大学・工学部・教授 (32613)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------