

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05807

研究課題名(和文) シンセティックジェットによる姿勢・流動制御に関する研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Posture and Flow Control by Synthetic Jets

研究代表者

佐藤 光太郎 (Sato, Kotaro)

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：80252625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：シンセティックジェットを用いた推進体周りの流動制御あるいは姿勢制御の基本技術確立するため、噴流構造に及ぼす振動特性およびスロット幾何形状の非対称性の影響が調べられた。特に流体力を決定するジェットベクタリングについて議論がなされた。本研究条件範囲では連続噴流の場合にはスロット非対称性は進行方向に明確な違いを生まないものの、シンセティックジェットの進行方向はスロットの非対称形状に依存し、同一の非対称スロットにおいてシンセティックジェットの偏向度は無次元周波数で調整可能であることなどが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The influence of the oscillation characteristics and the asymmetry of slot geometry on the jet structure were investigated to establish the fundamental technologies of the flow control or the attitude control for thrusters using synthetic jets. Especially, some discussions on the jet vectoring to determine the fluid force direction were made. It was clarified that the travel direction of the continuous jets did not drastically depend on asymmetric slot, and on the other hand, the degree of deflection of synthetic jets produced with asymmetric slot could be controlled by the dimensionless frequency under the present condition range.

研究分野：流体工学

キーワード：噴流 シンセティックジェット 流動特性 非対称性 周波数

1. 研究開始当初の背景

機械・航空宇宙工学だけでなく、化学、医学、原子力工学など様々な分野で噴流技術の発展を目的とするが、その背景には長い噴流研究の歴史がある。近年では噴流を利用した流れの制御に関する研究が盛んに行われ、噴流による境界層・失速制御、循環制御、抵抗低減などが試みられている。一方、この十数年の間に世界各国で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がなされるようになった。シンセティックジェットは噴出と吸引を交互に繰り返すことで、ノズル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、下流ではエンタ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。連続噴流のほとんどがターボ機械によって生成されるのと異なり、シンセティックジェットはアクチュエータの種類が豊富であることも大きな特徴である。すなわちジェット生成には一定条件を満足する体積変動が必要なだけで、基本的に振動原理には依存しない。シンセティックジェットの歴史は浅いにもかかわらず、アクチュエータとして既にプラズマ方式やダイアフラム式、ピエゾ駆動型、スピーカー型、気泡駆動型、ピストン型など様々な原理によるジェット生成機構が提案され、いずれも機械的駆動部分が少ないことから小型化・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医用流体機械である自走式カプセル内視鏡やマイクロ飛行体における推力・揚力生成などへの応用が期待される。さらに複雑な推進機構や昇圧機構は必要ないため、将来的には非接触でのエネルギー供給（例えばレーザーフォーカスによるエネルギー密度の周期的変化あるいは外部磁界変化による磁石振動など）も可能になると推察され、医用機械だけでなく原子炉内部の汚染水中で用いられる循環制御用ジェットポンプや自走式水中カメラなどへも適用可能と考えられる。すでにシンセティックジェットで推力生成が可能であることが明らかになっていたことから、次のステップとして推進器の姿勢制御方法に関する知見が必要であった。

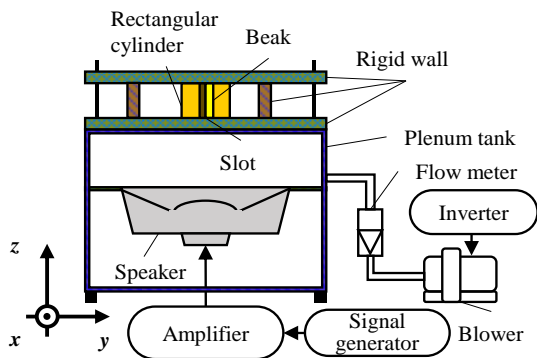


Fig. 1 Schematics of experimental equipment. (Front view)

2. 研究の目的

シンセティックジェットとはノズル部において噴出と吸引を交互に繰り返すことで、渦対が生成され、噴流状の速度分布を形成する流れである。シンセティックジェットは離散的な渦対形成により実現されるため、局所領域で生成される渦強度を調整することで、流れ場全体を制御できると考えられる。本研究では非対称幾何形状ノズル並びに複数噴流により渦対の対称性を崩すことで、振動条件（例えば振動数）によるシンセティックジェットの方向制御を試みる。これに伴い物体に働く流力特性は大きく変化するはずである。振動条件を用いて自由にジェットの方向制御が可能になれば推進器の姿勢制御だけでなく、送風機、ポンプ、空調、循環冷却など幅広い分野で、画期的な技術革新が期待できる。ここでは自走式カプセル内視鏡の姿勢制御などへの応用を目指して、基礎的研究を展開する。

3. 研究の方法

連続噴流によって得られる推力であれば噴射角度や噴射位置を変える方法が一般的であるが、シンセティックジェットはそもそも渦対により生成される流れであることから、渦の対称性を破ることで従来の噴流とは特性の異なる流れが生成でき、姿勢制御にもつながると考えられる。なお、非対称渦によるシンセティックジェットは振幅、振動数、位相により流れの制御が可能であり、気体か液体かは問わない。

3-1 実験装置及び方法

図1に本研究で使用した実験装置の概略図を示す。矩形流路内にシンセティックジェット用スロット付角柱が配されている。角柱は上壁と下壁に挟まれており、さらに側壁を設けることで矩形流路を実現した。シンセティックジェットはシグナルジェネレータ(MCP LG1100D)で出力した波形をアンプ(Classic Pro V3000)で増幅し、スピーカー(DIECOOK DD-15L)を駆動させて生成した。作動流体は空気である。流速計測には熱線流速計(KANOMAX IHW100)およびトラバーサ(中央精機 ALS-230-C2P)を使用し、流れの可視化にはスモークワイヤ法を適用した。

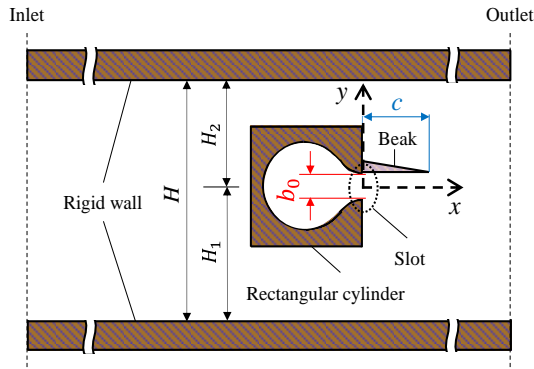


Fig. 2 Detail drawing of geometry of slot inside the duct. (Top view)

図 2 に試験部の拡大図および座標系を示す。スロットの非対称幾何形状としてくちばし形状を採用し、ここではスロット片側に三角柱を接着させることでくちばし形状非対称スロットを製作した。本研究での座標原点はスロット出口中心位置であり、主な記号としてスロット幅 b_0 、くちばし長さ c 、壁面間距離 H 、原点から下壁面までの距離 H_1 、原点から上壁面までの距離 H_2 とした。また、スロット幅に基づく無次元くちばし長さを $C=c/b_0$ と定義する。なお、本報告では $b_0=5\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$ 、 $U_0=7.5\text{m/s}$ ($Re=2480$)、角柱スパン $s=100\text{mm}$ で得られた結果について示す。ところで、噴流近傍に側壁が存在する場合、噴流はコアンダ効果により側壁に付着する。図 2 のように両側に側壁が存在する場合にはスロットー壁面間距離の近い方の側壁に付着することが知られている。本研究では、くちばし形状スロット (非対称スロット) の影響を明確に示すため角柱を流路の中央には設置せず、対称スロットにおける連続噴流の挙動は、図 2 中で常に上壁に付着するような環境 ($H_1=110\text{mm}$ 、 $H_2=90\text{mm}$) で実験を行った。なお、本実験で用いたスロットのアスペクト比は $s/b_0=20$ であることからここでは二次元流れとして扱う。なお、本研究では便宜上、図中側壁の左端を流路入口、右端を流路出口とし、入口から出口へ向かう流れを正 (流量 $Q>0$) と定義する。

3-2 数値計算方法

図 3 に数値計算領域およびその境界条件のモデル図を示す。数値解析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。ここでは二次元非圧縮粘性流れを仮定して、乱流モデルには $k-\varepsilon$ モデルを適用して流れ場の解析を行った。数値計算領域は実験と対応 ($b_0=5\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$ 、 $H_1=110\text{mm}$ 、 $H_2=90\text{mm}$ 、 $U_0=7.5\text{m/s}$ 、 $Re=2480$) している。また、境界条件として、スロットには流速規定条件 ($u_0=U_a \sin \omega t$)、入口・出口境界には表面圧力一定条件 ($P=0[\text{Pa}]$)、角柱表面、スロットくちばし部並びに側壁にはすべり無し条件を課した。計算メッシュ数はおよそ 120,000~130,000 点である。

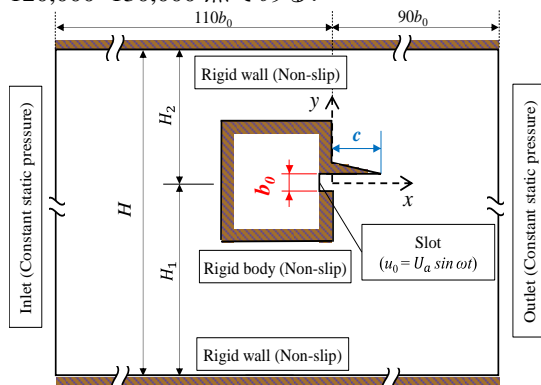


Fig. 3 Numerical simulation domain and boundary conditions.

4. 研究成果

本論文では $H=200\text{mm}$ 、 $H_1=110\text{mm}$ 、 $H_2=90\text{mm}$ 、 $U_0=7.5\text{m/s}$ 、 $Re=2480$ の条件で得られた結果について報告する。図 4 はスモークワイヤ法により得られたスロット付角柱周りの流れの可視化観察例である。(a) に対称スロット ($C=0$)、(b) にくちばし形状の非対称スロット ($C=5$) で得られた実験結果を示す。(i), (ii), (iii), (iv), (v) はそれぞれシンセティックジェットの振動周期に基づく無次元時間 $t/T=0.00$ ($u_0=0$)、0.25 (最大噴出時)、0.50 ($u_0=0$)、0.75 (最大吸引時)、1.00 ($u_0=0$) の結果であり、同図には煙粒子を目視で追った軌跡を矢印で記す。(a) 対称スロットでは、矩形流路内の流量は正 (本図右向き流れ) となり、噴流に着目すると角柱ー上壁間距離が角柱ー下壁間距離よりも小さい本条件下では、時間経過とともにシンセティックジェットは上壁側へ引き寄せられるものの出口側へ向かっていることがわかる。静止画像では鮮明とは言えないが、動画観察からは矩形流路内で明白な右向きの平均流れが確認できる。すなわち、スロットでの正味の流量がゼロであるにも関わらずジェットポンプ同様の流路内流れが形成されている。このことから角柱には本図左向きの推力が発生しているものと考えられる。一方、本条件下の (b) 非対称スロットではシンセティックジェットは時計回りに湾曲し、流路入口側に進行する。また、矩形流路内の流量も負 (本図左向き流れ) を示す平均流を形成している。ところで本条件では、角柱にモーメントが生じ、推力についても逆噴射同様の負の力 (本図右向きの力) が発生していることが推察される。ただし、非対称スロットにおけるシンセティックジェットの進行方向決定機構にはヒステリシスが存在することを付記する。ヒステリシスについては系統的なデータ収集が必要であることから、更なる検討が必要である。

図 5 に図 4 の実験条件と同条件 ($b_0=5\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$ 、 $H_1=110\text{mm}$ 、 $H_2=90\text{mm}$ 、 $U_0=7.5\text{m/s}$ 、 $Re=2480$) で解かれた数値計算による角柱周りの時間平均ベクトルおよび流線を示す。(a) は対称スロット ($C=0$)、(b) はくちばし形状の非対称スロット ($C=5$) の場合の計算結果である。図 4 の実験結果同様、(a) 対称スロットで生成されるシンセティックジェットは上壁側へ引き寄せられながら出口方向 (右方向) に流れ、(b) 非対称スロットで生成されるシンセティックジェットは時計回りの渦を伴って偏向し、角柱ー下壁間を通過し入口方向 (左方向) に進んでいく様子が観察できる。これに伴い本条件での矩形流路内平均流れは、(a) では右向き、(b) では左向きに形成される。このことからくちばしの有無により、流れ場全体が大きく変化することがわかる。前述の通り二次元シンセティックジェットでは噴出時にスロット付近に渦対が生成され、吸引時にも互いの渦からの誘起速度が吸引速度を上回ることから渦対の並進運動が持

続され、これを繰り返すことで渦列となりエントレインメントによって実質流量を伴う噴流構造は形成される。ところが、スロット形状が非対称な場合には、生成される2つの渦の x 方向位置が異なるため単純な並進運動とはならず、さらに吸引過程ではスロットに近い渦がより大きく引き戻されることから、例えば図4(b)、図5(b)ではスロット近傍に時計方向の渦領域を形成することとなり、シンセティックジェットが上流側へ発達することになると考えられる。したがって、スロットの非対称性に起因する図4(b)、図5(b)における入口側へ向かう噴流形成は、連続噴流では発生することのないシンセティックジェット特有の現象であることが推察される。

図6に流路内上流($x/b_0=-30$)における z 方向中央断面での x 方向時間平均速度分布を示す。横軸はスロット幅に基づく無次元座標 y/b_0 、縦軸はシンセティックジェットの代表速度に基づく無次元速度 u/U_0 である。中実丸が実験値、中空菱形が計算値であり、青色が対称スロット($C=0$)、赤色がくちばし形状非対称スロット($C=5$)の結果を表している。なお、熱線流速計では流れの方向の特定が困難であることから、流れ方向の決定にはタフト法を用いた。ただし、流れの向きの変化が激しく方向判別が難しい $y/b_0=-3.4\sim-5.4$ 間について

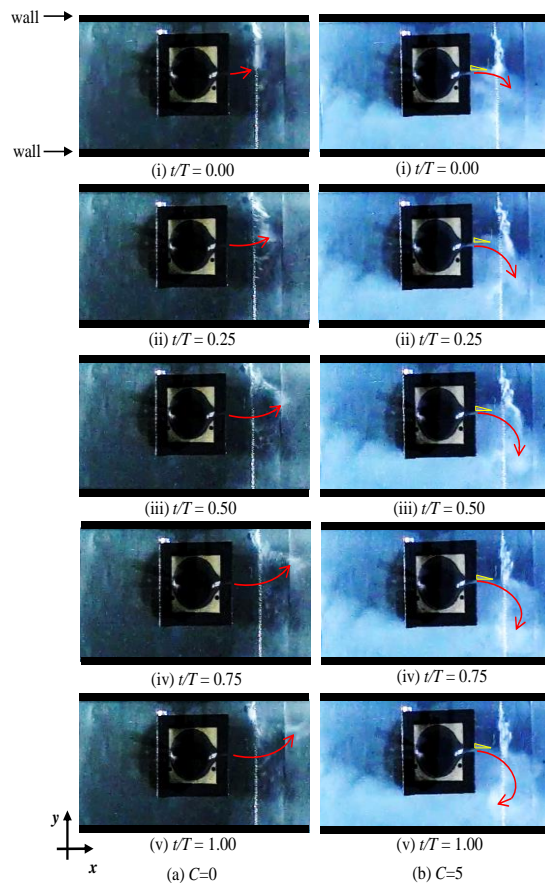


Fig 4 Flow visualization by the smoke wire method.

($Re=2480$, $L_0=30$, $U_0=7.5$ [m/s], $H/b_0=40$,
 $H_1/b_0=22$, $H_2/b_0=18$)

ては図から実験点を除外した。 $C=0$ における実験結果と数値計算結果は $y/b_0>5$ の領域を除き、概ね良好な一致を示している。一方、 $C=5$ については $y/b_0<7$ の領域で実験、数値計算ともに角柱下壁間で $u<0$ となる逆流が生じ、定性的な一致が見られるものの、 $y/b_0>7$ の領域においては定性的な違いが見受けられる。この差異の主な原因としては本条件($C=5$ の条件)では流れが入口側へ向かう逆流が発生することから、 $x/b_0=-30$ において角柱の死水領域が含まれる複雑な非常流れになっているため、実験での流れの方向判別が十分でないこと、 u が0に近い場合には z 方向速度が無視できなくなること、計算コストの都合上、計算メッシュ数を出来る限り少なくしたことなどが考えられる。ところで、矩形流路を通過する流量に目を向ければ実験、数値計算ともに $C=0$ では $Q>0$ 、 $C=5$ では $Q<0$ となっており、シンセティックジェットではスロット部くちばしの有無が流れ場の決定に大きく関わっていることを示している。このことはスロットの非対称性を利用してシンセティックジェットの挙動を制御できることを意味しており、シンセティックジェット推進器の姿勢制御などへの応用が可能であることを示唆している。

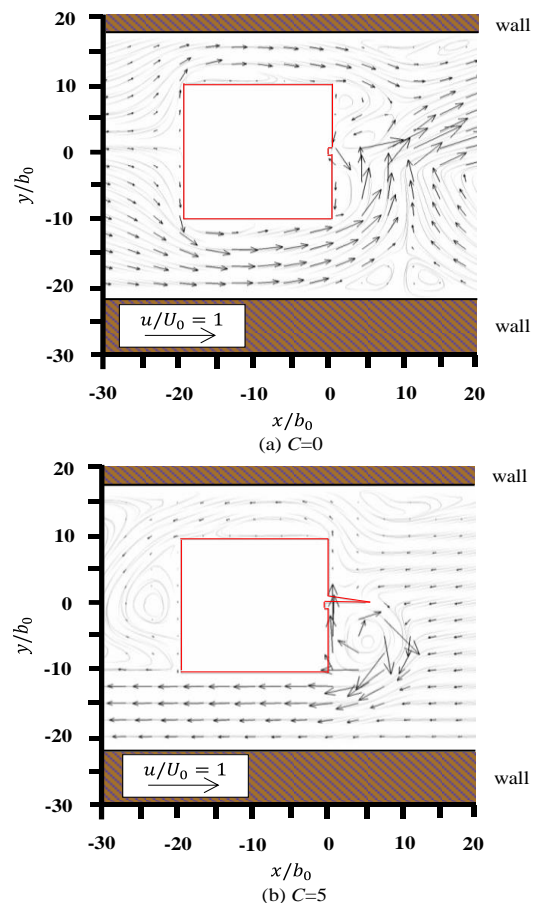


Fig. 5 Calculated time-averaged velocity fields of synthetic jets.

($Re=2480$, $L_0=30$, $U_0=7.5$ [m/s], $H/b_0=40$,
 $H_1/b_0=22$, $H_2/b_0=18$)

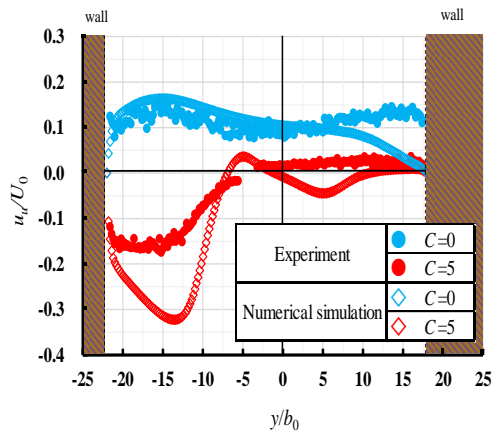


Fig. 6 Velocity distributions at upstream of duct obtained by experiment and numerical simulation

($Re=2480$, $L_0=30$, $U_0=7.5$ [m/s], $x/b_0=-30$,
 $H/b_0=40$, $H_1/b_0=22$, $H_2/b_0=18$)

本研究では矩形流路内に置かれた角柱のスロット部から発せられる二次元シンセティックジェットの流動特性について解明を試みた。ここではスモークワイヤ法による流れの可視化および数値計算により、スロットの非対称性とシンセティックジェットの進行方向との関係を示すとともに、矩形流路入口側 $x/b_0=-30$ での速度分布についても議論した。

<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. Holman, R. et al., AIAA Journal, Vol. 43, No.10 (2005), pp.2110-2116
4. Nishibe, K., Fujita, Y., Sato, K., Yokota, K., and Koso, T., "Experimental and numerical study on the flow characteristics of synthetic jets", Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6, No. 4 (2011), pp. 425-436
5. Yusuke WATABE, Kotaro SATO, Koichi NISHIBE and Kazuhiko YOKOTA, "Influence of an Asymmetric Slot on the Flow Characteristics of Synthetic Jets", ICJWSF 2015, (2015)
6. 熊田・馬淵・親川, 機論, 39-312, 第二部

(1973), pp.920-929

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 11 件)

- ① Ryota Kobayashi, Koichi Nishibe, Yusuke Watabe, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota, Vector control of synthetic jets using an asymmetric slot, ASME Journal of Fluids Engineering, 140 (5) : 051102-051102-11 [DOI: 10.1115/1.4038660] 2018.5 (In press)
- ② Tomita, Y. and Sato, K., Pulsed jets driven by two interacting cavitation bubbles produced at different times, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 819, May 2017, pp. 465-493 [DOI: 10.1017/jfm.2017.185] Published online: 27 April 2017
- ③ 姜東赫, 西部光一, 佐藤光太郎, 横田和彦, 渦法によるシンセティックジェットの流動特性に関する研究, 日本機械学会論文集, 第 82 巻, 第 839 号, pp.1-12, [DOI: 10.1299/transjsme.16-00163] 2016.7.

[学会発表] (計 47 件)

- ① Atsushi Fujii, Donghyuk Kang, Kotaro Sato and Kazuhiko Yokota, The Flow around a Circular Cylinder with Tangential Blowing between Two Plane Plates, Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows , ICJWSF-2017, October 9-12, 2017, Cincinnati, Ohio USA
- ② Hiroaki Terakado, Koichi Nisibe, Donghyuk Kan, Kazuhiko Yokota, and Kotaro Sato, BEHAVIOR OF SYNTHETIC JETS IN AN ASYMMETRIC FLOW FIELD, Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2017, October 9-12, 2017, Cincinnati, Ohio USA
- ③ Y. ISHIKAWA, Y. NOMURA, T.SAYAMA, K.NISHIBE, H. OHUE and K.SATO , Investigation of Flow characteristic of Synthetic Jet on Circular Cylinder, The 27th International Symposium on Transport Phenomena, September, 2016, Hawaii, USA
- ④ Ryota Kobayashi, Koichi Nishibe, Yusuke Watabe, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota, VECTOR CONTROL OF SYNTHETIC JETS USING AN ASYMMETRIC SLOT, Proceedings of the ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2016, July 10-14, 2016, Washington D.C., USA [DOI:10.1115/FEDSM2016-7648]
- ⑤ Nobuhiro Kobayashi, Koichi Nishibe, Yusuke Watabe, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota, FLOW AROUND A RECTANGULAR CYLINDER WITH AN ASYMMETRIC SLOT FOR SYNTHETIC

JETS, Proceedings of the ASME 2016
Fluids Engineering Division Summer
Meeting, FEDSM2016, July 10-14, 2016,
Washington D.C., USA
[DOI:10.1115/FEDSM2016-7647]

- ⑥ Konosuke SASAKI, Koichi NISHIBE,
Tamio FUJIWARA, Hiroshi OHUE &
Kotaro SATO, INFLUENCE OF
OSCILLATION CHARACTERISTICS ON
SYNTHETIC JET STRUCTURE, INT.
CONF. ON JETS, WAKES AND
SEPARATED FLOWS, JUNE 16-18, 2015,
KTH MECHANICS, STOCKHOLM,
SWEDEN

〔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

<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・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