衝突面位置制御形流体素子の研究*

小川 信夫^{*1}, 牧 博司^{*1}, 土方 邦夫^{*2}

Studies on an Impact Position Controlled Fluidic Device

Nobuo OGAWA, Hiroshi MAKI and Kunio HIJIKATA

The switching mechanisms in devices such as wall attachment fluid amplifiers, turbulence amplifiers and beam deflection amplifiers have excellent properties, and many investigations have been reported. In turbulent opposed jets, it is found that the impact position can be controlled by the turbulence in the jet center. In this paper, the performance of a new fluidic amplifier applied to the above mentioned phenomenon is described. The new fluidic amplifier consists of an outer pipe, two opposed nozzles, a small nozzle to generate control flows and a separator. The impact position generated by the opposed jets is controlled by the small control flow by way of the small nozzle. The new fluidic amplifier can be driven by small control flow, and as a result, is a useful component in a complex circuit.

Key Words: Fluidics, Jet, Turbulent Flow, Opposed Jet, Impact Position

1. 緒 言

側壁付着形流体素子は切換素子としての性能が優れており、最も良く研究されている流体素子の一つである^{(1)~(5)}。切換素子としては、側壁付着形素子のほかに乱流形素子、噴流偏向形素子などがあるが⁽⁶⁾、本研究では、これら従来の素子とは異なる動作原理による新しい切換素子を制作し、その基礎的な特性を調べ、従来の素子にはない優れた性能があることを見いだした。

2. 実験装置および新しい素子の動作原理

2.1 実験装置 図1に実験に用いた流体素子と装置の全体図を示す。本流体素子是对向するノズル1, 2(主ノズル), および主噴流中心軸と垂直の方向から主噴流中心近くに設置されたノズル31, 32より構成される。ノズル31, 32は仕切板を設けた外管に仕切板に対して対称となるように設置されている。今後、ノズル31, 32を制御ノズル、またその流量を制御流量と呼ぶ。

仕切板は図2に示すようなものを用いた。また、外管は直径 D_1 が30, 40, 50 mmのものを用いた。

制御ノズル31, 32直径は管摩擦を考慮してなるべく小さくなるようにノズル1, 2直径が $d=11.3, 9$ mmの場合は $d_3=2.2$ mmを、 $d=6.8, 4.5$ mmの場合は $d_3=1.2$ mmを用いた。制御ノズル31, 32とノズル1, 2間の距離 X_d は、それぞれノズル1, 2の直径 d に等しくしてある。制御ノズルと主噴流中心軸との距離 L_s はセットバックといい、本実験では $L_s=1, 2, 3, 4$ mmである。

ノズル1, 2にはヘッドタンクより流量計(ロータメータ)、流量調整バルブを介して水が供給される。制御ノズル31, 32には別のヘッドタンクより流量計(ロータメータ)、電磁バルブを介して水が供給される。ノズル1側の管路は、色素を注入できるようになっており、衝突面の位置の確認に用いた。外管出口近くには圧力孔が設けられており、外管出口での静圧の測定を行った。流量計を除く装置全体は、水中に設置されている。

2.2 新しい素子の動作原理と実験方法 著者らは、対向衝突乱流噴流において噴流中心の乱れを増加させると、その位置に衝突面が移動することを報告してきた^{(7)~(9)}。新しい流体素子はこの現象を応用したものである。図1において、ノズル1, 2より噴出した流

* 原稿受付 平成3年11月5日。

^{*1} 正員, 東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎2641)。

^{*2} 正員, 東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

体により作られる衝突面が、仕切板よりノズル2側に存在し、流体が主に外管出口2より流出している場合を状態1、制御ノズル31より制御流量 Q_{31} を添加して衝突面を仕切板よりノズル1側に移動させ、流体が主に外管出口1より流出している場合を状態2と呼ぶ。状態1から2へ変化する外管内での流れの様子は、図3に可視化写真およびスケッチで示す。流れの可視化はノズル1側の噴流を色素により着色して行った。流体素子は仕切板を境にして対称に作られているため、衝突面の移動の状態を逆にしても同様の流れの状態が生ずる。

外管内での流れが状態1から2へ変化するためには仕切板の穴径 D_2 がノズル1, 2直径に対してある一定の大きさであることが必要である。すなわち、状態1

図1 実験装置

図2 仕切板

では仕切板の位置において $P_2 \leq \frac{1}{2} \rho U_{1s}^2 + P_1$ の条件が必要である。ここで P_1 , P_2 はそれぞれノズル1, 2側の外管内静圧を、また、 U_{1s} は仕切板の位置でのノズル1側の噴流の平均流速である。 D_2 がその位置での噴流の広がり程度の大きさであればこの条件が満たされる流れ場が形成される。 D_2 の大きさが大きすぎると、ノズル2側へ流入したノズル1からの流体は、ノズル1側へ逆流してしまい明確な切換えはできなくなる。また、 D_2 が小さすぎるとノズル1からノズル2側へ流入する流体の量が少なくやはり明確な切換えはできない。制御ノズル31より制御流量 Q_{31} を添加して衝突面をノズル1側へ移動した状態2の場合も、状態1の場合と全く逆のことが生じ、状態1の場合と同じ D_2 の大きさが必要となる。外管直径 D_1 および外管出口直径は、ノズル1, 2から流入する流体が外管出口1, 2から流出するための流路が確保される大きさであれば

STATE 1

STATE 2

図3 切換機構

よく、切換性能に与える影響は少ない。

本素子は衝突面を制御しその機能を持つことから、今後、衝突面位置制御形素子と呼ぶ。

3. 実験方法

3・1 切換性能の測定 図1に示すような外管に、図2に示すような仕切板を取付け、ノズル1, 2の流量 Q_1, Q_2 を設定し衝突面を形成させる(状態1)。その場合のノズル1, 2側の外管内静圧を測定し、それぞれの側の外管出口流量 Q_{10}, Q_{20} を算出する。

次に制御ノズル31あるいは制御ノズル32より一定制御流量 Q_{31} あるいは Q_{32} を添加し、衝突面を仕切板を介して反対側へ移動させ、そのときのノズル1, 2側の外管内静圧を測定し、それぞれの側の外管出口流量 Q_{10}, Q_{20} を算出する。すなわち、状態1, 2における外管出口流量の変化をノズル1, 2流量と各仕切板について測定する。外管出口流量の比と外管内静圧の間には次式の関係が成り立つから、外管外静圧を P_0 とすれば、外管内静圧を測定することにより、外管出口流量の比を求めることができる。

$$Q_{10}/Q_{20} = \{(P_1 - P_0)/(P_2 - P_0)\}^{1/n} \dots\dots\dots (1)$$

ここで n は外管出口での抵抗により $1 \leq n < 2$ の範囲にあり、本実験では $n \div 2$ であった。

静圧の測定には水柱マノメータを、また、ノズル1, 2流量の測定にはロータメータを用いた。

3・2 切換周波数の測定 衝突面をノズル2側に形成させておき、制御ノズル31より Q_{31} を添加して衝突面をノズル1側へ移動させる。セットバックは $L_s = 2 \text{ mm}$ である。制御ノズル31の電磁バルブのスイッチをトリガとして、外管内静圧の変化を半導体圧力計(応答周波数範囲5 kHz以上)により測定し、ストレージスコープに記録する。その波形より時定数を求め、折点周波数を推算し、これをもって切換周波数とした。

3・3 制御ノズル31の噴流特性 図4に制御ノズル31の噴流の特性を示す。制御ノズルはノズル31, 32の二つのノズルより構成されるが、この二つのノズルは全く同じ構造に製作されているため、制御ノズル31の特性のみを述べる。図4に示すような位置関係で、水中に制御ノズル31と半導体圧力計を設置する。

制御ノズル31の噴流を半導体圧力計に衝突させる。

電磁バルブのスイッチをトリガに、半導体圧力計により制御ノズル31の噴流の全圧を測定し、それを流量に換算する。図4にその結果を示す。制御ノズル31と半導体圧力計の距離 l は、本実験で用いたセットバック L_s と同じ $l=1, 2, 3, 4 \text{ mm}$ とした。 l による差

は図4に示す結果に一定の時間遅れが加わるのみであった。この場合の時間遅れは、噴流がノズルより噴出して半導体圧力計に到達するまでの時間に相当する。

4. 仕切板の穴径と切換機能

衝突面位置制御形素子は、制御ノズル31, 22と仕切板により外管内の流れ場が状態1と状態2とに切換わることが動作原理であるから、2章で述べたように、仕切板の穴径 D_2 の大きさと、ノズル1, 2径の関係が最も重要な要素であると考えられる。図5~8に仕切板穴径 D_2 を変化させた場合の、外管出口流量 Q_{10}, Q_{20} の変化を示す。ノズル1, 2径は9 mmである。縦軸は外管より流出する流量 Q_{10}, Q_{20} を示す。 $Q_{10} < Q_{20}$ の場合、すなわち衝突面がノズル2側に存在する場合は Q_{20}/Q_{10} で、逆に $Q_{10} > Q_{20}$ の場合、すなわち、衝突面がノズル1側に存在する場合は Q_{10}/Q_{20} でその値を示し、それぞれ1を境に反転表示してある。また、横軸も左右対称となるように1を境に $Q_2/Q_1, Q_1/Q_2$ としてある。

図5~8中○で示した値は制御流 Q_{31} あるいは Q_{32} を添加しない場合を示し、●で示した値は制御流を添加した場合のそれを示す。すなわち、 $Q_1/Q_2 > 1$ で、衝突面がノズル2側に存在している場合の外管出口流量比は○で示され、その状態で制御流 Q_{31} を添加して衝突面をノズル1側へ移動させた場合の外管出口流量比は●で示される。この場合、制御流を $Q_{31} = 0$ とすると衝突面は元のノズル2側へ戻る。これと全く対照的に、

図4 ノズル31の噴流特性

$Q_2/Q_1 > 1$ で、衝突面が最初ノズル 1 側に存在する場合も同様に示される。

衝突面が制御流の添加とともに移動し、制御流がなくなると元の位置に衝突面が戻る場合と異なり、制御流がなくなっても、衝突面が移動したその位置に止まる場合が観測された。図 5～8 中 Bistable と表示した部分がその領域であり、色素による可視化によりこの現象は仕切板を境にして対称に生ずることが確認された。制御ノズル 31, 32 の流量は $Q_{31} = Q_{32} = 0.537 \text{ kg/min}$ 一定として実験を行った。

図 5 に示す仕切板のない場合および仕切板 1 の場合は外管内の流れ場が状態 1, 2 に明確に分離されず切換素子としての機能はない。

図 6, 7 に示す仕切板 2, 3 の場合はそれぞれ $D_2/d = 2.22, 1.67$ であり、外管出口流量 Q_{10}, Q_{20} の変化が大きく切換素子としての機能は大きい。

図 8 に示す仕切板 4 の場合は $D_2/d = 1.11$ であり、 Q_{10}, Q_{20} の変化は特異な特性を示し、素子としての機能は限定されるものと考えられる。いずれの場合もノズル 1, 2 の流量比 1 を境に対称の分布をしていることがわかる。

図 5 ノズル流量比と外管出口流量の変化
(仕切板のない場合と仕切板 1 の場合)

図 7 ノズル流量比と外管出口流量の変化
(仕切板 3 の場合)

図 6 ノズル流量比と外管出口流量の変化
(仕切板 2 の場合)

図 8 ノズル流量比と外管出口流量の変化
(仕切板 4 の場合)

5. 各パラメータと切換時間

本素子の切換時間を決めるうえで重要なパラメータは主噴流中心軸と制御ノズル 31, 32 の距離 (セットバック) L_s , ノズル 1, 2 間距離 L あるいは制御ノズル 31, 32 流量 (制御流量) Q_{31}, Q_{32} であると考えられる。

5・1 セットバックと切換時間 図 9 にノズル 1, 2 出口流量を一定とし、セットバック L_s をパラメータとした場合の、制御流量の大きさを示す Q_{31}/Q_1 と無次元切換時間 T との関係を示す。無次元切換時間は切換時間を $T_0 = L/U_2$ で無次元化したものであり、 U_2 はノズル 2 出口流速を示す。

セットバック $L_s = 1 \text{ mm}$ の場合は、制御流が主噴流軸へ到達する時間が最も短く、最小の切換時間が測定されるものと考えられたが、測定値からはむしろセットバック $L_s = 2 \text{ mm}$ の場合の切換時間が最小の値を示した。

制御流が主噴流軸へ及ぼす影響は、主噴流軸上の乱れを増加させるだけでなく、主噴流軸近傍の平均流の一部を偏向させることとなる。したがって、主噴流軸

を含むある一定の範囲に、制御流の影響が及ぶように制御ノズル 31 を設置すると衝突面の移動が効果的に行われ、切換時間が小さくなるものと考えられる。本実験においては、セットバック $L_s=2\text{ mm}$ の場合が最も小さな切換時間を示した。

セットバック $L_s=3, 4\text{ mm}$ の場合は、図 9 中破線で示した制御流量 Q_{31} の下限が大きくなり、切換時間も大きくなるため、素子としての性能は劣るものと考えられる。制御流量 Q_{31} の値が、この下限値以下であると切換機能は生じない。

$Q_{31}/Q_1 > 0.07$ の領域においては、セットバック L_s の大きさにかかわらず、無次元切換時間は $T \approx 0.8$ となる。制御ノズル 31 の噴流は、セットバック L_s の大きさにより主噴流軸へ到達する時間が異なることはもちろん、ノズル 1 の噴流により偏向する。したがって、セットバック L_s が大きな場合は、制御ノズル 31 の噴流が主噴流の中心へ到達するための時間は大きくなり、切換時間は大きくなるものと考えられる。

制御流量 Q_{31} が大きくなると、ノズル 1 の噴流による影響は相対的に小さくなり、無次元切換時間がセットバック L_s の小さな場合に近くなるものと考えられる。

5・2 ノズル 1, 2 間距離 L と切換時間 本素子の切換時間は衝突面の移動により実現されるわけであるから、ノズル間距離 L は切換時間に直接影響を与えるものと考えられる。図 10 にノズル間距離 L と無次元切換時間 T の関係を示す。仕切板穴径は 4 章の結果を参考にして $D_2/d=1.67$ とし、ノズル 1.2 直径 $d=4.5, 6.8, 9, 11.3\text{ mm}$ の 4 種類について実験を行った。ノズル 2 出口での噴流の流速は $U_2=3.26\text{ m/s}$ 一定とした。

切換時間 t が、噴流の流速 U_2 と $t \approx L/U_2$ の関係があるものとする、 U_2 は一定であるから無次元切換時間 $T=t/T_0$ は図 10 に示される測定結果のように

図 9 セットバックと無次元切換時間

$T \approx 0.83$ であり、切換時間 t が $T_0=L/U_2$ より小さいことを示している。

本実験においては、衝突面はノズル出口に付着しているのではなく、対向するノズルの間に存在しておりその移動距離はノズル間距離 L より小さい。また、本素子の切換機能は、衝突面が仕切板を通過すると同時に生ずるものであるから、この点からも $T < 1$ の関係は十分考えられる。

5・3 噴流の流速と切換時間 衝突面の移動は噴流の流速に大きく依存するものと考えられるため、切換時間が噴流の流速とどのような関係であるか調べる必要がある。図 11 にノズル 1, 2 流量比、ノズル 1, 2 間距離 L を一定として、ノズル 2 の流速を変化させた場合の無次元切換時間を示す。5・2 節でのべたノズル間距離 L との関係と同様に、無次元切換時間は $T \approx 0.83$ であり、 $T < 1$ である。

5・4 制御流量 Q_{31} , Q_{32} と切換時間 制御ノズル 31, 32 の流量は制御流量と呼ばれるものであり、素子の性能を示す重要なパラメータである。図 12 に制御流量 Q_{31} と切換周波数との関係を示す。本素子は仕切板を境にして対称形に作られているため、 Q_{31} と切換時間の関係のみを示した。セットバックは $L_s=2\text{ mm}$,

図 10 ノズル間距離と無次元切換時間

図 11 ノズル 2 流速と無次元切換時間

図 12 側壁付着形流体素子と本流体素子の切換周波数の比較

ノズル 1, 2 直径 $d=9\text{ mm}$ であり, 仕切板穴径との比は $D_2/d=1.67$ である。また, 比較のため側壁付着形素子の測定値も示してある⁽⁶⁾。本素子は側壁付着形素子とは構造が全く異なるため, 切換周波数をもって比較してある。なお, 側壁付着形素子の測定値は, 流路幅 1 mm, 主流のレイノルズ数 $Re=5\,000$, 動作流体は水の場合の切換周波数である。

本素子は, 切換周波数が制御流量 Q_{31} の増加にともない敏感に増加し, $Q_{31}/Q_1 \approx 0.05$ で飽和状態となる。 $Q_{31}/Q_1=0.05$ の位置においては, 本素子は切換周波数が側壁付着形素子の約 4.8 倍となり, 小さな制御流量で動作することがわかる。制御流量が小さくてよいということは, ファンアウトを大きくすることができ, 複雑な回路構成に有利である。したがって本素子は, 論理素子など従来形の切換素子が用いられていた箇所にはほとんど用いることができ, さらに切換時間が大

幅に改善されたことにより, 広範囲な応用が期待できる。

6. 結 論

対向乱流衝突噴流における, 噴流中心軸上の流れの特性を利用した, 衝突面位置制御形流体素子を新しく考案, 試作し, その基礎的性能を調べた結果以下の結論を得た。

(1) 本素子は側壁付着形素子と比較して非常に小さな制御流量で作動し, 切換素子として優れた性能を持ち, 充分実用化の可能性があることを確認した。

(2) 本素子は単安定と双安定の状態が可能であることがわかった。

文 献

- (1) 太田, 側壁付着形論理素子の諸特性, 計測と制御, 6-12 (1967), 33.
- (2) 林・松井・太田・小沢, 側壁付着形流体素子の動特性に関する一考察, 機論, 47-424, B (1981), 1611.
- (3) 林・松井・高田, 側壁付着形流体素子の静特性に関する実験的研究, 機論, 46-410, B (1980), 1241.
- (4) 林・小沢, 側壁付着形流体素子の切換時間について, 機論, 52-475, B (1986), 921.
- (5) Epstein, E., Theoretical Investigation of the Switching Mechanism in a Bistable Wall Attachment Fluid Amplifier, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, 93-1 (1971), 55.
- (6) 日本油空圧協会編, 油空圧便覧, (1975), 719, オーム社.
- (7) 小川・牧, 対向乱流噴流の研究 (中心軸上に置かれた物体の影響について), 機論, 52-473, B (1986), 318.
- (8) 牧・小川, 対向乱流噴流の研究 (衝突面の位置に影響を与える因子), 機論, 53-485, B (1987), 82.
- (9) 小川・牧・土方, 対向衝突乱流噴流の研究 (噴流中心の乱れと衝突面位置), 機論, 57-535, B (1991), 935.