光による付着噴流の制御†

堂 田 周治郎*・高 森 年**

Control of an Attached Jet by Light

Shujiro DOHTA* and Toshi TAKAMORI**

The switching of an attached jet by light was tested to develop a photofluidic interface. By applying an optical power to the supply nozzle edge of the device with aspect ratio of 2~3, an attached jet can be switched.

Key Words: fluidics, attached jet, photofluidic interface, laser beam

1. はじめに

光-流体変換素子は新しいタイプの流体素子であり、光信号を空気圧または油圧信号に変換する素子である。現在までに2種類の変換素子^{1),2)}が提案されているがいずれも層流比例素子を利用するものであり付着素子などのディジタル増幅素子を用いると小さな光パワーで比較的大きな流体パワーが得られ、耐環境性に優れた光直接駆動のオンオフ弁や方向制御弁の前段素子としての使用が期待できるがこれに関する報告はない。また液体の粘度を変えたり音波により付着噴流を制御する試みは鈴木ら³⁾や木村ら⁴⁾によって行われたが、光により付着噴流を切り換えた例はない。

そこで、本研究では付着形素子を利用した光-流体変換素子を開発することを目的とし、前報⁵⁾で明らかにされたアナログ方式²⁾の光-流体変換の動作原理を付着形素子に適用し光による噴流の切り換えを試みる。その結果、適当なアスペクト比をもつ付着形素子において光により付着噴流が制御できることを示す。

2. 光による噴流切り換えの原理

Fig. 1 に素子の構成を示す。これは(a)透明アクリル製のカバープレート、(b)ステンレス製の付着形素子、(c)カーボンブラックが塗布されたアルミ製の

Fig. 1 Construction of a tested device

ターゲット、(d)供給管などをもつアクリル製の底プレートからなる。この図を用いて動作流体が気体の場合について光による噴流切り換えの原理を述べる。レーザー光はカバープレートを通り素子の主ノズル内付着側に照射される。この光エネルギーはカーボンブラック層で熱エネルギーに変換され照射点近傍の流体の温度が上昇し流体粘度が局部的に高くなる。この粘度の変化および粘度勾配の発生により、噴流は流体抵抗の小さい非付着側へ偏向し反対側壁へ切り換わる。

現在、素子内3次元流れの数値実験⁶⁾による検討も行っており流体粘度が場所により変化することおよび粘度勾配を考慮した計算により、アスペクト比 $AR=1$ 、オフセット $D/bs=0.5$ 、側壁角度 $\alpha=0^\circ$ 、レイノルズ数 $Re=200$ で、主ノズル内付着側に照射した場合、付着距離が5%長くなるという結果を得ている。

3. 実験装置および方法

Fig. 2(a) に実験に用いた付着形素子の形状を示す。これはステンレス板を放電加工することにより製作され、主ノズル幅は $bs=0.2\text{ mm}$ である。オフセット $D/bs=0$ 、側壁角度 $\alpha=12.5^\circ$ 、ベント距離 $Lv/bs=6$ 、ベント幅 $bv/bs=2$ 、スプリッタ距離 $Ls/bs=9.4$ である。アスペクト比は $AR=0.5$ から5まで変えることができる。なお、制御口は本来不要であるがここでは噴流を元の側壁へ戻すために用いる。便宜上主流方向からみて左側を左出力口、右側を右出力口と呼ぶことにする。

† 第3回流体制御シンポジウムで発表 (1988・12)

* 岡山理科大学工学部 岡山市理大町 1-1

** 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町 1-1

* Faculty of Engineering, Okayama University of Science, Okayama

** Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe
(Received November 8, 1989)

(Revised January 26, 1990)

Fig. 2 Wall attachment fluidic device

実験装置は前報⁵⁾と同じである。動作流体は常温空気で bs を代表長さとしたレイノルズ数は $Re=150\sim 600$ であり素子内の流れは層流である。最大出力 50 mW の He-Ne レーザー光は、光パワー調整用フィルタおよび焦点距離 240 mm の凸レンズを通り素子に照射される。照射点での光のビームウエスト径は 0.084 mm である。

4. 実験結果および考察

4.1 結果の概要

Fig. 2(b) に示す素子の小さな制御口にレーザー光をステップ状に照射し空気の熱膨張による圧力上昇を利用した噴流の切換えも試みたができなかった。以下の実験はすべて Fig. 2(a) の素子を用いて行われた。

層流状態では素子のアスペクト比が小さくなると付着が弱くなるため供給圧を高くする必要がある。本素子形状の場合、双安定となる最低の供給圧は $AR=2, 3, 4, 5$ の場合それぞれ $Ps=1, 860, 300, 250, 205$ Pa であった。ただし、左右出力口には差圧変換器による切換え判定を行うための内径 2 mm、長さ約 30 cm のビニール管（終端を大気に解放）が接続されており無負荷に近い状態である。これらの素子の付着側主ノズル出口にレーザー光を照射し噴流の切換えを試みた結果、以下のことがわかった。 $AR=5$ と 4 の場合光を照射すると噴流は直進し分岐流れとなる。より高い供給圧では光による噴流の切換えは起こらない。これは素子が深いため流量が多く光による温度上昇が小さいためと考えられる。 $AR=3$ の場合左右双方向からの切換えができる。 $AR=2$ の場合右から左への切換えはできるが逆はできない。本素子は少し非対称性があり（右側の側壁角度が左側より約 1 度大きい）、0.1 mm 厚の素子を左右交互に積層して非対称性の影響を軽減しているが付着が弱い $AR=2$ の場合この影響が大きく現れる。

4.2 双方向への噴流の切換え

双方向への切換えが可能な $AR=3$ の素子について噴流の切換えに必要な光パワーと照射位置の関係を Fig. 3 に示す。供給圧は 340 Pa である。○印は右から左への切換え、△印は左から右への切換えを示し、記号が大きくなるほど低い光パワーで切り換わる。光をノズル幅の 1/4 の間隔で付着渦内を含めあらゆる場所に照射して調べた結果である。図より、噴流を効果的に切り換えるには付着している側の主ノズル出口端へ照射すればよいことがわかる。なお、同じ照射位置で右からでも左からでも切り換わるということではなかった。

噴流の切換えに必要な最小限の光パワー（最小光パワーと呼ぶことにする）と供給圧の関係を Fig. 4 に示す。光の照射位置は付着側主ノズル出口端である。○印は右から左、△印は左から右への切換えを示す。素子のわずかな非対称性のため、左から右への切換えのほうがより大きな光パワーを必要とするが、

Fig. 3 Minimum optical power for several focal points

Fig. 4 Minimum optical power vs. supply pressure

いずれの場合も供給圧と光パワーはほぼ比例している。

市販素子 (Corning 社の FF 素子) で供給圧 $P_s = 20$ kPa の場合, 供給圧と流量の積である供給パワーは 380 mW, 制御流による切換え流体パワーは 11 mW ゆえ供給パワーの 3% 程度となる。一方, 光による切換えで $P_s = 340$ Pa の場合供給パワーは 0.52 mW, 最小光パワーは 22 mW 程度ゆえ供給パワーの 42 倍となる。なお, 本素子の切換え制御流量を直接測定することができなかったが切換えに必要な制御圧の増分が 3 Pa 程度であることおよびノズルの圧力-流量特性から切り換え流体パワーを推定すると 10^{-5} mW 程度となりかなり小さい。一方, 素子の出力特性から得られた出力パワー 0.037 mW と最小光パワー 17 mW との比で変換効率を定義すると 0.2% となる。

このように効率は低い, 従来なされなかった光による付着噴流の切換えは実現したといえる。

4.3 単方向への噴流の切換え

双方向への切換えは理想的であるが前述のように本素子形状では切換え可能な供給圧が低く範囲もかなり狭い。したがって出力パワーも小さく変換効率も低い。そこで, 同じ光パワーに対し温度上昇の高い低アスペクト比素子における噴流の切換えについて述べる。

$AR=2$ の素子の出力口に $b_s=0.5$ mm の付着形素子の両制御口を接続した場合の供給圧と最小光パワーの関係を Fig. 5 に示す。右から左への切換えであり, 次段素子のアスペクト比は $AR=1, 1.5, 2$ である。ただし, 次段素子には流体を供給していない。これは次段素子の制御口にベントがあり前段素子の特性が次段素子の供給圧の大きさに影響されない場合を想

定しているためである。供給圧が高くなると最小光パワーも大きくなるがその割合であるグラフの傾きは負荷の減少とともに小さくなる。図には示していないが無負荷の場合, 傾きはきわめて小さく切換え可能な供給圧の範囲が広がる。最小光パワーが 0 となる横軸との交点は各負荷における双安定付着の限界供給圧である。出力特性から得られた最大出力パワーは 0.23 mW, Fig. 5 より切換え光パワーは 19 mW ゆえ変換効率は 1.2% となり前節の双方向への切換えに比べ高い。1 段目に $AR=2$ の素子 (供給圧 $P_s=2.7$ kPa), 2 段目に $b_s=0.5$ mm の付着形素子 ($P_s=4.2$ kPa) を接続し, 3 段目の乱流付着形素子 (Corning 社 FF 素子, $P_s=14$ kPa) の切換えを試みた。16.8 mW の最小光パワーですべての素子を切り換えることができ, 3 段目素子から 1.6 kPa の出力圧を得た。

他のアスペクト比素子については, $AR=1.5$ の場合供給圧は高くなるが同じような切換えが可能である。 $AR=1$ の場合, 本素子形状では双安定付着が起こらない。

このように, 低アスペクト比素子では噴流を元の付着側に戻す切換え方法に課題が残るが, 小さな光パワーで大きな流体パワーを得ることができる。

5. おわりに

レーザー光による付着噴流の切換えを試みた結果以下のことがわかった。

- 1) アナログ方式の光-流体変換の動作原理を付着形素子の切換えに適用することにより, 従来行われなかった光による付着噴流の切換えが実現できた。
- 2) アスペクト比が 3 程度の場合, 低い供給圧で双安定付着が得られるので比較的低いパワーの光により双方向へ噴流を切り換えることができる。
- 3) アスペクト比が 2 前後の場合, 単方向への噴流の切換えが可能であり低い光パワーで比較的高い流体パワーを得ることができる。

参考文献

- 1) J. O. Gurney, Jr.: Photofluidic Interface, Trans. ASME, Journal of D. S. M. C., **160**-3, 90/97 (1984)
- 2) B. Hockaday, et al.: A Novel Opto-Fluidic Interface, the Journal of Fluid Control, **16**-2-3, 17/25 (1986)
- 3) 鈴木, 内藤, 太田: 加熱制御素子による液体流の切替, 第 5 回純流体素子シンポジウム講演論文集, 167/170 (1970)
- 4) 木村, 米持, 小松: 音波による付着水噴流の挙動, 計測自動制御学会論文集, **18**-7, 95/100 (1982)
- 5) 堂田, 東海, 高森: 光-流体変換素子に関する研究, 計測自動制御学会論文集, **26**-7 掲載予定 (1990)
- 6) 堂田, 和田: 付着形素子内流れの数値実験, 第 1 回流体制御シンポジウム講演論文集, 7/12 (1986)

Fig. 5 Minimum optical power for several output loads