光-流体変換素子に関する研究[†]

堂 田 周治郎*・東 海 正 明**・高 森 年***

Studies on Photofluidic Interface

Shujiro DOHTA*, Masaaki TOKAI** and Toshi TAKAMORI***

A photofluidic interface is a new fluidic device which transduces optical control signals to pneumatic or hydraulic control signals. Up to now two kinds of device have been proposed and one of them was developed by B. Hockaday, et al. in 1983. Although this device has the advantage of producing a larger response than the other, the principle of its operation is not fully understood.

In this paper, the static and dynamic characteristics of this type of interface were investigated experimentally and theoretically. A He-Ne laser beam of 5~40 mW was focused into the flow in the supply nozzle edge of the device. The following results were obtained: 1. By the experiment with air or water as a working fluid, the measurement of the temperature change at and around a focal point, and the analytical flow model, it was made clear that the heat generated by light changed the fluid viscosity locally, and this caused a difference in output pressure. 2. The proposed analytical model can make reliable predictions about the effects of focal point, nozzle width, and splitter distance on the relation between optical power and output differential pressure. 3. The frequency response of the interface was measured and the band width was 150 Hz.

Key Words: fluidic device, photofluidic interface, laser beam, transducer

1. 緒 言

現在の光ファイバ制御システムは、光信号をフォトダイオードなどを用いて電気信号に変換し、増幅器や電気-油圧サーボ弁を介してモータや油圧シリンダなどのアクチュエータを制御する。しかし、航空機の飛行制御にみられるように周囲温度が激しく変化したり、放射線や落雷などが存在する環境ではフォトダイオードが機能しなくなったり破壊されたりする。すなわち、このシステムは環境の障害に弱いという欠点をもつ。そこでは光アクチュエータ¹⁾や光サーボ弁²⁾の開発が望まれている。中島³⁾は 54 W 高出力のレーザー光によるワックスの熱膨張を利用したアクチュエータを考案している。中田ら⁴⁾は PLZT 素子を利用した光直接駆動の油圧制御弁の開発をめざしており、現在 75 W の水銀放電光により約 1.5 μm の変位、480 秒の時定数が得られたところであり、変位、速応性ともに改善する必要がある。一方、1980 年米国において、流体制御技術と光制御技術を結合した光-流体制御システムが考えられた⁵⁾。これは、光信号を電気信号を介さずに直接流体信号に変換し増幅して流体アクチュエータを制御するシステムで、耐環境性に優れたフルイデックスに光の高速性を付加した「フォトフルイデックス」とでも呼べる新しい制御技術である。

光-流体制御システムにおいて基本となる要素は、光信号を流体信号に変換する光-流体変換素子であり、現在、二つの方式が提案されている。一つは、米国 HDL の J. O. Gurney が考案したもので、底面にカーボンブラックを塗布した層流比例形素子の制御口に約 1,400 Hz のパルス状レーザー光を照射する方法である^{5), 6)}。照射された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、制御口内の流体層を膨張、収縮させる。この光音響効果により出力口から同一周波数の圧力パルスが得られこれを整流する方法で、デジタル方式と呼ぶことができる。

[†] 第3回流体制御シンポジウムで一部発表 (1988・12)

* 岡山理科大学工学部 岡山市理大町 1-1

** 太陽鉄工(株) 大阪市東淀川区北江口 1-1-1

*** 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

** TAIYO Ltd., Osaka

*** Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe
(Received November 6, 1989)
(Revised February 15, 1990)

他は米国の B. Hockaday らが考案したもので、層流比例形素子の制御口を取り除いた素子の供給ノズル端にレーザー光を照射する方法である⁷⁾。素子の底板に用いた黒色のグラファイトエポキシ樹脂からの発生熱によりノズル出口の噴流に影響を与え、光パワーに正比例した出力差圧を得る方法であり、アナログ方式と呼ぶことができる。アナログ方式は、デジタル方式に比べて変調する必要がなく応答も速い（バンド幅 140 Hz）という利点をもっているが、現在のところ動作原理すら明らかでなく特性解析も行われていない。

そこで、本研究では、アナログ方式の光-流体変換素子を設計するための基礎的な実験および理論解析を行うことを目的とする。まず、試作した素子を用いてアナログ方式による光-流体変換の動作原理を空気や水を用いた実験および解析モデルにより検討し、動作原理が光照射発生熱による流体粘度変化で説明できることを示す。つぎに、この動作原理に基づいて変換素子の静特性の理論解析を行う。そして、特性解析結果を実験結果と比較するとともに静特性に及ぼす素子形状など諸要因の影響を明らかにする。最後に素子の動特性について調べ、光照射時、しゃ断時ともに応答が速くバンド幅 150 Hz が得られたことを示す。

2. 素子構造と動作原理

実験に用いた変換素子の流路形状を Fig. 1 に示す。素子形状は、噴流偏向形素子や層流比例形素子に関する資料をもとに決定した。基本素子のノズル幅 $b_s = 0.2 \text{ mm}$ 、アスペクト比 $AR = 0.5$ 、スプリッタ距離 $L_s/b_s = 6$ 、出力口幅 $b_o/b_s = 2$ である。

Fig. 2 に素子構成図を示す。これは、透明アクリル製のカバープレート、放電加工されたステンレス製の素子、カーボンブラック（すす）が塗布されたアル

Fig. 1 Configuration of a tested device

Fig. 2 Construction of a tested photofluidic interface

ミ製のターゲット、接続管などをもつアクリル製の底プレートから構成されている。厚さはそれぞれ 1, 0.1, 0.5, 5 mm で大きさはすべて $34 \times 30 \text{ mm}$ である。

素子構成図を用いて、アナログ方式による光-流体変換の動作原理について述べる。なお、この動作原理に至った理由はあとで述べる。レーザー光はカバープレートを通して素子内に入る。レーザー光による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、ターゲット材の温度が上昇する。すると近傍の流体の温度が上昇し、局部的に流体粘度が変わり粘度勾配が発生する。この粘度変化と粘度勾配の発生により素子内の流れがノズル軸に対し非対称となり、噴流は偏向し出力圧力に差が生じる。

3. 特性解析

素子内の流れは層流であり、動作原理に基づいて流体粘度の変化および粘度勾配を考慮した流れの数値実験により素子内流れを解析することも可能である。現在この方面からも検討しているが、ここでは比較的簡単な解析モデルを用いた特性解析を行う。

Fig. 3 に解析モデルを示す。主流方向に x 軸、それに垂直な方向に y 軸をとり、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。ノズルに平行な細長い光ビームを照射した場合について考える（実験では光をスポット状に照射してい

Fig. 3 Analytical flow model

るので、その影響はあとで述べる定数 k に含めることにする。ノズル内の流れを平行平板間の流れとみなし、粘度 μ を y だけの関数とすると x 方向の運動方程式は次式で表わされる。

$$\mu(y) \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d\mu}{dy} \frac{du}{dy} = \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

ここで、 u は x 方向の流速成分、 p は圧力である。圧力勾配 dp/dx はノズル平均流速（または流れのレイノルズ数）を与えれば決まる。

ノズル内の照射中心点周りの流体粘度分布を光強度分布と同じようにガウス分布とみなすと、

$$\mu(y) = (\mu_m - \mu_0) \exp\left(-\frac{(y - y_m)^2}{2\sigma_T^2}\right) + \mu_0 \quad (2)$$

を得る。ただし、 y_m は照射中心点の y 座標、 μ_m は照射後の中心点粘度、 μ_0 は照射前の一様粘度である。

ここで、中心点の光強度 I_m と中心点温度の上昇 ΔT_m の関係を、

$$\begin{aligned} \Delta T_m &\equiv T_m - T_0 \\ &= k \cdot I_m \end{aligned} \quad (3)$$

とする。ただし、 T_0 は光照射前の流体温度、 k は光吸収率、比熱などを含む定数であり実験により定めらる。

照射中心点から距離 r 離れたところの光強度 I_0 および温度上昇 ΔT は次式で表わされる。

$$I_0(r) = I_m \cdot \exp(-r^2/2\sigma_L^2) \quad (4)$$

$$\Delta T(r) = \Delta T_m \cdot \exp(-r^2/2\sigma_T^2) \quad (5)$$

ただし、 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ である。また、 σ_L 、 σ_T はそれぞれ光強度分布、温度分布の拡がりを表わす標準偏差であり、 $\sigma_T = \beta \sigma_L$ ($\beta > 1$) と考え β を実験により定めらる。

(4)、(5)式を x 、 y 方向について積分すると全光パワー I と全温度上昇 ΔT_i はつぎのようになる。

$$I = 2\pi I_m \sigma_L^2 \quad (6)$$

$$\Delta T_i = 2\pi \Delta T_m \sigma_T^2 \quad (7)$$

ここで、測定直径 D の放射温度計で照射点近傍の温度を計測することを考え、 D ($\gg 6\sigma_T$) 内の平均温度上昇 ΔT_a を求めておく。(3)、(6)、(7)式より、

$$\Delta T_a = 4\beta^2 k I / \pi D^2 \quad (8)$$

となる。

レーザー光のビームウエスト径 W_L (強度が中心点強度の e^{-2} になるビーム径) は $4\sigma_L$ ゆえ、(3)、(6)式より照射中心点の温度が次式で与えられる。

$$T_m = T_0 + \frac{8k}{\pi \cdot W_L^2} I \quad (9)$$

中心点粘度 μ_m は温度 T_m の関数⁹⁾であるので、照射位置 y_m と光パワー I を与えると(2)式から $\mu(y)$ 、

(1)式からノズル内の流速分布を知ることができる。

つぎに、ノズル出口の流速分布が非対称な場合、噴流の最大流速点の位置がノズル中心軸から次第にずれていくという報告⁹⁾およびノズル出口端に光を照射すると最も大きな出力差圧を得るという5.1節の実験結果より、前節の動作原理で述べたように噴流が偏向すると考えられる。ノズル出口での噴流の偏向がノズル軸に対し左側と右側の運動量 J_{SL} 、 J_{SR} の差に関係すると仮定すると噴流の偏向角 δ は、

$$\delta = \gamma \cdot \tan^{-1} \frac{J_{SL} - J_{SR}}{J_{SL} + J_{SR}} \quad (10)$$

となる。ここで γ は係数であり流れの数値実験¹⁰⁾によれば $\gamma = 0.5$ 程度である。これより出力口入口での素子中心軸と噴流中心線とのずれ y_s は、

$$y_s = L_s \cdot \tan \delta \quad (11)$$

となる。 L_s はスプリッタ距離である。

最後に出力差圧 ΔP_o を求める。出力口全閉時の差圧 ΔP_o が出力口入口での運動量の差によるとし、アスペクト比が小さいことを考慮して、上下拘束壁による摩擦損失を考慮に入れると次式が得られる。

$$\Delta P_o = (J_{OL} - J_{OR})(1 - c_f \sqrt{L_s/b_s})/b_o \quad (12)$$

ここで、 b_o は出力口幅、 J_{OL} 、 J_{OR} は左右の出力口に入る噴流の運動量であり出力口入口での流速分布を積分することにより得られる。なお、噴流モデルは八田らの層流モデル¹¹⁾を用いることにする。また c_f は摩擦損失係数でありアスペクト比やレイノルズ数により異なるが、流れの数値実験によれば $AR = 0.5$ のとき $c_f = 0.3$ 程度である。

4. 実験装置および方法

動作流体として常温空気を用いた場合の実験装置を Fig. 4 に示す。最大出力 50 mW の He-Ne レーザー (日本電気 GLS5800) から出た光は ND フィルタとパワーメータにより希望の出力に調整され、焦点距離 240 mm の凸レンズを通り素子に照射される。照射位置はTVカメラによりモニタに拡大して基準位置を定め、素子を取り付けた微動装置およびダイヤルゲージで設定する。動作流体である圧縮空気はタンクから供給口に入り、出力圧力は差圧変換器とアンプを介してオシロスコープで、流量はシャボン玉式流量計で測定する。ノズル幅を代表長さ、ノズル出口平均流速を代表流速とした流れのレイノルズ数は $Re = 200 \sim 800$ である。

動作流体として水を用いる場合、レーザー光は光ファイバを通り水槽内の素子に照射される。オーバフロータンクからの水は供給口に入り、供給圧は水銀柱マ

①Air tank, ②Rotameter, ③Manometer, ④Dial gauge, ⑤Fine adjustment, ⑥Fluidic device, ⑦Power meter, ⑧Lens, ⑨ND filter, ⑩He-Ne laser, ⑪Pressure transducer, ⑫DC amp., ⑬Oscilloscope, ⑭TV camera, ⑮Monitor TV

Fig. 4 Experimental setup

ノメータ，流量はメスシリンダで測定する。

以下に述べるステップ応答および周波数応答実験を行い素子の動特性を調べる。ND フィルタとレンズの間に置かれた切りかき円板をサーボモータにより回転させパルス列状あるいは正弦波状の光入力信号を得る。この光信号はフォトダイオードを介してデジタルオシロスコープで記録する。出力圧力信号は出力口出口に直接半導体圧力変換器（豊田工機 PMS-5）を取り付けデジタルオシロスコープで記録する。

5. 結果および考察

5.1 基礎実験結果

まず，ビームウエスト径 W_L と係数 $\beta^2 k$ の値を決める。波長 λ ，ビーム直径 W_0 のレーザー光が焦点距離 f のレンズを通過したときの焦点位置におけるビームウエスト径 W_L は次式で与えられる。

$$W_L = 4\lambda f / (\pi W_0) \quad (13)$$

したがって， $\lambda = 0.6328 \times 10^{-3} \text{ mm}$ (He-Ne レーザー)， $W_0 = 2.3 \text{ mm}$ ゆえ $f = 240 \text{ mm}$ の凸レンズの場合ビームウエスト径は， $W_L = 0.084 \text{ mm}$ となる。

(8)式の係数 $\beta^2 k$ を決めるために放射温度計（ミノルタカメラ IR-0506 C，測定直径 $D = 2 \text{ mm}$ ）を用いて種々のターゲット材の表面上の温度を測定した。ただし，ターゲット近傍には流体が流れていない。ターゲット材料を変えた場合の光パワーと温度変化の関係を Fig. 5 に示す。(8)式からもわかるように温度は光パワー I に正比例する(注1)。図より $\beta^2 k$ が決定され，カーボンブラックの場合 $\beta^2 k = 8.12 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$

Fig. 5 Measured temperature change without flow

である。図より PMMA (アクリル) が最も温度が高くなることがわかる。

つぎに，動作流体が気体と液体の場合について比較する。レーザー光を $x/b_s = 0$, $y/b_s = -0.375$ の位置に照射した場合の光パワー I と出力差圧 ΔP_O ($\equiv P_{OL} - P_{OR}$) の関係を Fig. 6 に示す。○, △は動作流体として空気，●は水を用いた場合である。いずれの場合も光パワーに対して出力差圧が正比例している。さらに水と空気では逆の傾向を示している。これは動作原理より空気の場合は温度が上昇すると粘度が高くなるが，水の場合，粘度が小さくなるからである。実線は○の計算値で $\beta = 2.6$, $\gamma = 0.5$, $c_J = 0.31$, k は Fig. 5

Fig. 6 Relation between optical power and output differential pressure

(注1) 図中の○印の場合， $I > 25 \text{ mW}$ で正比例していない。これはカーボンブラックをアルミ板に塗布しているため光パワーが大きくなるとカーボンブラックがはじかれるためであり，理想的な状態で測定すればこの場合も温度は光パワーに正比例すると考えられる。

で得られた値の 1/10 としたとき、実験値とよく一致する。 k の値が小さくなる理由としてつぎのことが考えられる。 Fig. 5 では照射点周りの流体が流れていないため温度上昇が大きくなり k を大きく見積る。さらに解析モデルでは細長いビームを想定しており実験で用いたスポット状のビームに比べ流れに与える光照射の影響が大きく評価される。以下の計算ではすべてこれらの値を用いた。以下の実験結果はすべて動作流体として空気を用いた場合である。

照射位置を y 方向に変えた場合の出力差圧を Fig. 7 に示す。 $P_s=4.39$ kPa, $I=25$ mW, $x/b_s=-0.5, 0, 0.5, 1$ の場合である。いずれも $y/b_s=-0.3$ 付近で最大値になり, $y/b_s=0.3$ 付近で最小値になる。図において $y<0$ すなわちノズルの右側にレーザー光を照射した場合、右側の流体温度が上昇し、空気の場合粘度が高くなる。したがって右側に流れにくくなり噴流が左側へ偏向するため、出力圧 P_{OL} が P_{OR} より高くなり ΔP_o の値が正となる。また、提案したモデルではノズル出口からの距離 x/b_s の影響は検討できないが、 $x/b_s=0$ すなわち照射位置がノズル出口端のとき最も大きな差圧が得られ下流になると差圧は低くなる。実線は○△に相当する計算結果であり実験結果とほぼ一致している。また、素子を水平または上下逆に取付けた場合も同じ結果を得たため重力や浮力の影響はないと考えられる。

以上のことより、アナログ方式の光-流体変換の動作原理が光照射発生熱による流体粘度の変化および粘度勾配の発生で説明できることがわかる。

Fig. 7 Effects of focal point on output differential pressure

5.2 静特性に及ぼす諸要因の影響

ターゲット材料を変えた場合の光パワーと出力差圧の関係を図. 8 に示す。 $P_s=13.3$ kPa, $x/b_s=0$ の場合である。○がカーボンブラック、△が耐熱塗料、●が CFRP (東レのトレカ)、▲が PMMA (黒色のアクリル) である。 Fig. 5 ではアクリルの温度上昇が最も大きい、 Fig. 8 ではアルミ板にカーボンブラックを塗布した場合の出力差圧が最も高い。これは、アクリルの熱伝導率がアルミに比べて小さいため光照射点周り全体の温度が高くなり粘度勾配が大きくなりからである。図より熱伝導率の高い板にカーボンブラックを塗布したターゲット材が最適であると考えられる。ただし、動作流体として液体を用いる場合、カーボンブラックがはがれることがあるので CFRP のほうが実用的であろう。なお、▲のアクリルの場合、10 mW 以上のレーザー光ではアクリルが熱変形する。

つぎに、レイノルズ数を一定 ($Re=400$) にしたときのノズル幅、アスペクト比、スプリッタ距離、出力口幅などの素子形状パラメータが光パワーと出力差圧の関係に及ぼす影響について述べる。 Fig. 9 にノズル幅 b_s を変えた場合の出力差圧を示す。これよりノズル幅が小さいほうが ΔP_o は高くなっており、実線である計算値も同じ傾向を示している。図中に (1) 式における粘度勾配 $d\mu/dy=0$ とした場合の計算結果も示しているが差圧を 30% 程度低く見積ることがわかる。

Fig. 10 にアスペクト比を変えた場合の出力差圧を示す。これよりアスペクト比の小さいほうが ΔP_o が高くなっている。これは、同じ光パワーに対し素子深さが大きい場合、流体の温度上昇が低いからである。

Fig. 8 Output differential pressure for several kinds of target

 Fig. 9 Effect of nozzle width on ΔP_0

 Fig. 11 Effect of splitter distance on ΔP_0

 Fig. 10 Effect of aspect ratio on ΔP_0

 Fig. 12 Effect of outlet width on ΔP_0

解析モデルにはアスペクト比の影響は考慮されていないので計算値と比較することはできない。

Fig. 11 にスプリッタ距離を変えた場合の出力差圧を示す。スプリッタ距離が長くなると噴流偏向によるずれが大きくなるが、同時に上下拘束壁の摩擦損失や噴流幅も大きくなるので出力差圧が高くなるとは限らない。図の実線は計算値である。(12)式で上下拘束壁の影響を考慮しており実験値とほぼ一致している。

Fig. 12 に出力口幅 b_o を変えた場合の出力差圧を示す。図の実線は計算値であり、実験値とよく一致している。出力口幅の狭いほうが高い値を示すのは(12)式より明らかである。

以上の結果、試作素子の中では、ノズル幅、アスペクト比、出力口幅が小さい、 $b_s = 0.2 \text{ mm}$, $AR = 0.5$, $L_s = 6b_s$, $b_o = b_s$ が最も高い出力差圧を得る素子であ

ることがわかった。

5.3 動特性

レーザー光をパルス状に照射したときの光入力と左側出力圧力の時間変化の一例およびそのときの圧力変換器の取り付け状態を Fig. 13 に示す。素子深さが 0.1 mm と薄いため圧力測定孔の容積 50 mm^3 は出力流路容積の 40 倍となりかなり大きい。出力圧力の変化を見ると典型的なむだ時間と 1 次遅れを含む要素の応答を示しており、光照射時、シャ断時ともに同程度の遅れである。圧力測定孔を含む出力流路容量系の時定数は $\tau = V_o R_o / p_a$ で与えられる。ここで V_o は出力口入口から圧力変換器受圧面までの容積 ($5.13 \times 10^{-8} \text{ m}^3$), R_o は出力口の流路抵抗 ($2.62 \times 10^9 \text{ Pa/m}^3$), p_a は大気圧である。上式で計算される時定数 $\tau = 1.37 \text{ ms}$ が実験値にほぼ一致するので、光が照射されてからノズル出口の流れが非対称になりその影響が出力口入

Fig. 13 Example of a step response and installation of pressure transducer

口(スプリッタ先端)に現れ始めるまでの時間がむだ時間、圧力測定孔を含む出力口内の圧力が上昇する過程が1次遅れ部分であると考えられる。素子形状や供給圧を変えると、むだ時間は0.23~0.31 ms、時定数は1.2~1.6 msの範囲で変わり、光パワーを変えると、むだ時間は同程度変わるが時定数はほとんど変わらない。

入力光信号の周波数を10~1,000 Hzまで変えたときの出力圧力の周波数特性をボード線図でFig. 14に示す。供給圧 $P_s=13.3 \text{ kPa}$ 、光パワー $I=25 \text{ mW}$ の場合である。図から得られるバンド幅は約150 Hzとなる。しかし、上で述べたように圧力測定孔が大きな負荷容量となっているのでこれを除いて $V_o=1.3 \text{ mm}^3$ とした場合の推定時定数は0.03 ms程度となりバンド幅も大きくなる。

以上のことより試作した光-流体変換素子の応答はかなり速いといえる。

Fig. 14 Frequency characteristic of a tested photofluidic interface

6. 結 言

アナログ方式の光-流体変換素子に関する基礎的な実験および理論解析を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) 動作流体として気体、液体を用いた実験、照射位置を変えた実験、温度上昇の測定および解析モデルにより、従来明らかでなかったアナログ方式による光-流体変換の動作原理が光照射発生熱による流体粘度の変化および粘度勾配の発生で説明できることがわかった。
- 2) 動作原理に基づいて静特性解析モデルを作成し解析を行った結果、光パワーと出力差圧の関係を予測することができ、照射位置、ノズル幅、出力口幅、スプリッタ距離が出力差圧に及ぼす影響を十分説明することができた。この解析モデルには、素子アスペクト比や x 方向の照射位置の影響は考慮されていない。
- 3) 周波数応答実験により得られた素子のバンド幅は150 Hzであり、この変換素子の応答は速いといえる。

参 考 文 献

- 1) 森川滝太郎：光アクチュエータ，計測と制御，**24**-9，827/831 (1985)
- 2) 吉田 稔：航空機用光油圧アクチュエータ技術，油圧と空気圧，**15**-2，95/101 (1984)
- 3) 中島 成：アクチュエータ，公開特許公報 (A)，昭 60-65901 (1985)
- 4) 中田 林，戸田：光-油圧サーボ系の研究，第28回 SICE 学術講演会予稿集，JS61-2，613/614 (1989)
- 5) J.O. Gurney, Jr.: Photofluidic Interface, Trans. ASME, Journal of D.S.M.C., **160**-3, 90/97 (1984)
- 6) 山本，梅田：光音響効果を利用した光-流体変換素子，第2回流体制御合同シンポジウム講演論文集，73/78 (1987)
- 7) B. Hockaday, et al.: A Novel Opto-Fluidic Interface, the Journal of Fluid Control, **16**-2-3, 17/25 (1986)
- 8) 日本機械学会編：機械工学便覧，A5-7 (1987)
- 9) 須藤，高見，島田，檜原：90°曲がったノズルからの噴流 (第2報，ノズルの曲率の影響)，日本機械学会論文集 (B編)，**55**-512, 1078/1084 (1989)
- 10) 堂田，逢坂：流体素子内3次元流れの数値実験，岡山理科大学紀要，**17**, 57/74 (1981)
- 11) 八田，野崎：有限幅ノズルから流出する二次元噴流，日本機械学会論文集，**38**-314, 2593/2599 (1972)