多分岐切換用ロータリ型マイクロバルブチップ* (第2報, ソレノイドを利用した自動切換え機構の提案)

長谷川 忠大^{*1}, 中嶋 健一郎^{*2}
尾松 史之^{*3}, 生田 幸士^{*4}

Multi-directional Switching Valve Chip with the Rotary Mechanism (2nd Report, Proposal of Automatic Switching Mechanism Using the Solenoid)

Tadahiro HASEGAWA^{*5}, Kenichiro NAKASHIMA,
Fumiyuki OMATSU and Koji IKUTA

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Osaka Institute of Technology,
5-16-1 Omiya, Asahi-ku, Osaka-shi, Osaka, 535-8585 Japan

We have developed the 10-way micro switching valve chip for micro dispenser system. This chip succeeded to switch ten outlets from one inlet without dead volume under high leakage pressure (> 700 kPa). The valve was operated manually to confirm the switching principle with the rotary mechanism. As the next step, the micro solenoid drive switching valve chip was developed for simple and quick operation. Positioning and detection of present location at the outlet were achieved with the latch mechanism without necessity of positioning. To build the solenoid into the chip, the valve design parameters (the height of the silicon rubber ring and the compression force to the rotor) affecting the valve performance (the leakage pressure and the rotation force of the rotor) were optimized.

Key Words: 10-way Micro Switching Valve, Automatic Switch, Rotary Mechanism, Biochemical IC Family, Micro-TAS

1. 緒 論

著者らは、生田により概念提案されたモジュール型マイクロ化学デバイス「化学 IC」の研究開発を行ってきた^{(1)~(8)}。化学 IC はシステム全体を小形化することにより、ウェアラブル/ポータブル・マイクロ化学デバイスへの応用を目指している。そのため、外部装置ではなくチップ内でサンプルを高精度に切分ける多分岐に輸送するマイクロデバイスの開発が課題の一つである。

これまでマイクロ流体制御デバイスとしてマイクロ分注システムを提案し、主要要素であるマイクロ多分岐切換バルブの開発を行ってきた⁽⁸⁾。この切換バルブはロータリ機構を採用し、省デッドボリュームかつ 10 個の流出口を切換えることが可能である。さらに、700 kPa 以上の耐圧性能を示し、ロータリ機構を利用した切換原理の有効性を実証した。しかし、ロータを

利用した流路切換原理を証明することを主目的にしたバルブチップであったため、ダイヤル付ロータをジョグダイヤルのように手動回転させ流路を切換える構造であった。そこで本論文では、第 1 報の切換原理証明用マイクロ多分岐切換バルブチップのシンプルで効果的な機構を維持したままで、アクチュエータ駆動により流出口を自動的に切換えるマイクロ多分岐切換バルブチップを開発した。

また、本切換バルブはアクチュエータとして外部設置のマイクロソレノイドを利用するが、最終的にはアクチュエータ内蔵形を目指している。このため、高耐圧を維持したままで発生力が 1 N 以下のマイクロアクチュエータを使用しても流路切換えが可能になるバルブの最適設計についても検証した。

2. 切換原理証明用マイクロ多分岐切換バルブ⁽⁸⁾

これまで世界で研究されてきたマイクロ能動バルブとは抜本的に異なるロータリ機構を実現することにより、10 個の流出口の切換えが可能なマイクロ多分岐切換バルブを開発してきた。図 1 に示すように、本切換バルブはロータとハウジングから構成されている。ハウジング中央には流入口、その円周上に流出口が配置され、ダイヤル付ロータを手動回転させることにより、

* 原稿受付 2006 年 7 月 20 日。

^{*1} 正員、大阪工業大学機械工学科(☎ 535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)。

^{*2} 大阪工業大学大学院工学研究科。

^{*3} 准員、大阪工業大学大学院工学研究科。

^{*4} 正員、名古屋大学工学研究科(☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。

E-mail: hasegawa@med.oit.ac.jp

(a) Upper surface on the finger (b) Basic design

Fig. 1 10-way micro switching valve chip with rotary mechanism⁽⁹⁾

(a) Schematic diagram of over-exposure (b) Surface of housing

Fig. 2 Ruggedness by over-exposure on surface of housing

円周上の別の流出口へ流路を切換える構造である。また、ロータとハウジング間の液漏れのためのシール材や流出口の自動位置決め機構を開発してきた。

そこで次のステップとして、アクチュエータ駆動による流出口の自動切換えを目的とした。また、図2のように自由液面法を利用したハイブリッド・マイクロ光造形法⁽⁴⁾で上層を下層と結合させる際の過露光により、ハウジングのロータしゅう動面の表面状態が悪く耐圧性能のばらつきが大きくなる特性があった。さらに、位置決め用スプリングの形状に起因し、ロータが一方方向にしか回転できなかった。このため、ラッチ機構によるオーバーローテーションの際の位置修正に失敗する課題が明確になったため、これらも解決する。

3. アクチュエータ駆動による流路切換原理

第1報までの切換原理証明用マイクロ多分岐切換バルブの特長を維持したままでアクチュエータ駆動を行う場合、次の二つの問題点があった。

- (1) アクチュエータ駆動の際の流出口の位置決め
- (2) 流出口の現在位置の検出

図3に示すように、上記の問題を解決するソレノイドを用いた駆動原理を考案した。

(a) Switching (b) Positioning

Fig. 3 Operation principle of automatic switch

(ステップ1) ロータをソレノイドで回転させるため、流出口に対応したギアをロータに作製した。

(ステップ2) ソレノイドに接続したプッシュロッドでギア部を押込みロータを回転させ流出口を切換える。このとき、流出口が一致する際に、次のギアの歯がプッシュロッドをギヤから外れる方向へずらし解放する。つまり、制御を行わなくともギヤからプッシュロッドを解放できる。これにより、ロータはつねに一定角度の回転となり、1回のストロークで次の流出口への切換えが可能になる。

(ステップ3) 流出口の位置決めを確実に防止するため、スチールボールを利用したラッチ機構を導入した。これは、ロータに埋込まれたシリコンバースプリングがスチールボールをハウジング側壁面へつねに押付け、スチールボールとハウジング側の谷間がかみあい流路が確実に一致する。

(ステップ4) ラッチ機構による流出口の自動位置決めを行っており、プッシュロッドでギヤを押込んだ回数で、現在の流出口の位置を判断できる。

以上の駆動原理により、センサや精密な制御を用いずに10個の流出口の自動切換えを実現する。

4. 設計指針

3章で考案したアクチュエータ駆動流路切換原理を基にマイクロ多分岐切換バルブを設計した。第1報の切換バルブと同様にロータしゅう動面での液漏れ防止、ロータの滑らかな回転、流出口の位置決め機構が必要である。また、ラッチ機構による流出口の位置修正を確実にするためロータの位置決め機構を双方向へ対応させる。さらに、バルブの耐圧性能のばらつきを軽減するためロータしゅう動面状態を改善する。今回、ロータを手動回転させる必要がなくなったため、ロータを小形化しハウジング内へ内蔵することで完全

一括製作を実現する。

以下に、設計指針をまとめる。

- (1) 液漏れ防止シールの導入
- (2) ロータの滑らかな回転機構の導入
- (3) 流出口の位置決め機構の導入
- (4) ロータの双方向への回転
- (5) ロータしゅう動面状態の向上
- (6) ハイブリッド構造で完全一括製作

図4にアクチュエータ駆動マイクロ多分岐切換バルブの断面図を示す。(1)については、第1報の切換バルブと同様にハウジング側の流路にシール材としてシリコンラバーリングを埋め込む。また、ロータ上部に埋め込まれた加圧用ばねにより、ロータをハウジングに押し込み密着性を高め液漏れを防止した。

(2)についても第1報と同様にロータを滑らかに回転させるため、ロータ上部とハウジング間にスチールボールを配置した。これにより、ロータの回転中心を保持すると同時に、ハウジングとロータ間の摩擦を低減し滑らかな回転を可能とした。また、切換バルブの完全一括製作のためのロータの小形化に伴い、加圧用ばねを小形化した。材料は厚さ0.2mmのばね鋼で、切換原理証明用バルブのときに加工していた加圧用ばねのばね定数と同程度の $14.2 \pm 0.7 \text{ N/mm}$ で大きさが約30%小さくなるよう再設計した。

(3)の流出口の位置決め機構は、新たにシリコンパースプリングとスチールボールを組合わせた。これにより、より滑らかな切換動作と(4)の双方向の回転を実現しオーバ/アンダローテーションに対応した位置決めを可能とした。

(5)のロータしゅう動面の表面状態の向上については、改善方法として造形ごとに厳密に造形条件を設定する方法もあるが、条件出しにかなりの時間が必要となる。このため、装置の条件設定による改善ではなく滑らかな表面状態を確保できるハイブリッド方法を考

案した。これは、図5のようにしゅう動面をあらかじめ別に造形しておき、シリコンラバーリングを挿入した状態でハウジング内にハイブリッドする方法である。これにより、自由液面法においても中空面の表面状態を滑らかにできた。(6)については5章で詳しく説明する。

Holes for silicone rubber rings

(a) Mounter for silicone rubber ring

(b) Special hybrid method for the housing (c) Surface of rotation in housing

Fig. 5 Improvement of ruggedness on surface of rotation in housing

(a) Upper surface (b) Schematic design of upper surface

Fig. 4 Cross sectional view of the switching valve chip

(c) Lower surface (d) Schematic design of lower surface

Fig. 6 10-way micro switching valve chip with the actuator drive rotary mechanism

5. アクチュエータ駆動多分岐切換バルブチップ

アクチュエータ駆動多分岐切換バルブチップを図6に示す。本バルブチップは直径14 mmの八角形状で

Fig.7 Fabrication sequence of switching valve in hybrid microlithography

ある。また、スチールボール封入口とプッシュロッド挿入口を、それぞれハウジング上面と側面に設けている。これにより、ソレノイドに接続したプッシュロッドをチップ内で駆動させることにより、10個の流出口の切換えが可能である。また、本バルブはロータを手動回転させる必要がないため、ロータ径の大幅な小形化が可能となった。これにより、名古屋大学生田研究室で開発したハイブリッド・マイクロ光造形法 (Hybrid-IH process)⁽⁴⁾を用いてハウジングの造形途中にロータが組込まれ一括製作を実現した。このとき、切換バルブはスチールボールとシリコンラバースプリングによるラッチ機構になっているため、ハイブリッドする際にスチールボールをロータに押込んだ状態でハウジング内へ組込む必要がある。図7にハウジングの造形途中にロータとロータしゅう動面を組込む手順を説明する。

はじめに、ハイブリッド・マイクロ光造形法を利用してロータを製作し、シリコンラバースプリングを組込んだ後にガイド内へ挿入する [図7(a)]。次に、ガイド側面のスチールボール組込み穴より径1.0 mmのスチールボールを挿入し、細い棒等を使用して加圧した状態でロータを回転させる。これにより、スチールボールがシリコンラバースプリングによりガイド壁面へ押付けられた状態になるように組込む。これを3回繰返し、すべてのスチールボールを組込む [図7(b)]。この状態のガイドを造形途中のハウジングへマウントし [図7(c)]、丸棒等によりロータのみを押込みハウジング内へ組付ける [図7(d)]。最後に、ガイド、丸棒の順に取外した後、造形を再開してロータの組込みが完了する [図7(e)(f)]。

その後、4章で説明したロータしゅう動面のハイブリッド造形を行う [図7(g)(h)]。さらに、バルブの洗浄後、スプリング加圧用のスチールボール($d=1.5$ mm)をハウジング上面に設けた封入口から封入し完成する。また、本チップのロータ加圧力は設計上4 N、ロータのしゅう動力は0.8 Nであった。

6. 駆動実験

図8にソレノイドを利用した駆動実験のようすを示す。流路切換の様子はCCD顕微鏡で撮影した。マイクロソレノイド(新電元メカトロニクス(株)小型プッシュ/プルソレノイド4 LC-6 V)に面内方向にのみ屈曲するプッシュロッドを接続し、チップ側面の挿入口に設置している。以下に、駆動実験について説明する。

a) 流路は流出口1に接続 [図8(a)]。

Fig. 8 Sequential photographs of automatic switching

- b) ソレノイドを ON 状態にして、プッシュロッドでギヤを押込む。ロータが回転し、流出口 1 から流出口 2 へ切換え [図 8(b)]。このとき、プッシュロッドが次のギヤの歯によりロータから解放され、流路が確実に位置決めされている。
- c) ソレノイドを OFF 状態にすることにより、プッシュロッドは定位置へ戻る [図 8(c)]。
- d) b), c) を繰り返すことにより、流出口 2 から流出口 3 へ切換え [図 8(d)]。

以上の結果から、10 個の流出口がスムーズに切換えられることを確認した。

7. 設計パラメータの最適化

切換バルブの設計を最適化するために、バルブ性能に影響を与える設計パラメータについて検討する。本切換バルブは内蔵したマイクロアクチュエータによる流路切換えを最終目標としているため、高耐圧かつロータの低しゅう動力が要求される。これらは、ロータへの加圧力とシリコンラバーリングの突出量に起因する。このことから、この二つの設計パラメータとバルブの耐圧、ロータのしゅう動力との関係を測定調査した。

測定実験ではロータへの加圧力とシリコンラバーリングの突出量の組合せを変えて測定する必要がある。しかし、切換バルブチップは完全一括製作であるため、設計パラメータを正確に計測することは難しい。また、おのおのに対応した切換バルブチップを製作して測定するのは非効率である。そのため、図 9 に示す測

Fig. 9 Experimental setup

定実験モジュールを製作した。

本モジュールはスプリングカバー、スプリング、キャストホルダ、キャスト、実験用ロータ、実験用ハウジング、チップホルダから構成されている。加圧力の変更は、スプリングの変更またはスプリングカバーとチップホルダ間にシムを挟み調整できる。また、ロータ上部での摩擦力を低減するため、ボールキャストを用いてロータを加圧している。さらに、シリコンラバーリングの突出量が異なる 2 種類 ($A=184\pm37\mu\text{m}$, $B=330\pm12\mu\text{m}$) の実験用ハウジングを用意し必要に応じて交換した。このシリコンラバーリングの突出量はキーエンス製レーザフォーカス変位計システム LT-9500 を利用して、リングごとに 8 点を測定した計 88 点を平均した。このように、実験用ハウジングは上方からシリコンラバーリングに、側面よりロータのギヤ部にもアクセス可能で容易に突出量としゅう動力の測定ができる。

また、圧力測定の場合は、シリンジ、圧力センサ、実験用モジュールを真ちゅう製の T 型分岐を用いて接続し、圧縮試験機によりシリンジを押し流体を加圧した。これにより、圧力センサで得た測定データを A/D 変換ボードを経由してコンピュータにより数値化した。圧力センサは 0~1 MPa の測定が可能な集積化センサ(フジクラ XFPMC-001 MPa)を用いた。T 型分岐はシリンジ、センサ、実験用モジュールを内径 0.5 mm のステンレスパイプを用いて接続し、ろう付けおよびエポキシ系接着剤で固定した。また、実験用ハウジングの側面に配置された流出口はステンレスパイプを接着しはんだによりステンレスパイプをふさぎ、リークはロータとハウジング間のみになるようにした。

次に、ロータのしゅう動力測定の場合は、ロータを回転させたときの最大しゅう動力を計測した。プッシュプルテストの先に細いロッドを取り付け、側面よりロータと平行にロッドを挿入し X-Y ステージを平行移動させた。最大しゅう動力は回転の始まる瞬間の

最大静止摩擦力であるため、ロータが回転を始めるしゅう動力を測定した。

図10にロータへの圧縮力に対するバルブの耐圧を示す。また、図11にロータへの圧縮力に対するロータのしゅう動力を示す。これらのグラフから次のことがわかる。

- (1) ロータへの加圧力に対応してバルブの耐圧、ロータのしゅう動力共に増加
- (2) シリコンラバーリングの突出量が増加するとバルブの耐圧も対応して増加するが、ロータのしゅう動力は減少

ただし、シリコンラバーリングの突出量を300 μm 以上にするとリング自体がロータの回転により変形することがあった。また、名古屋大学生田研究室で2001年に行った限外汙過膜を用いた濃縮実験⁽⁷⁾においては、約200 kPaの加圧が必要であった。生化学の分析や合成においてさまざまなプロセスが存在するが、本方式のような濃縮は比較的高い圧力を必要とする部類に属する。このことから、200 kPaをバルブ耐圧と考

Fig. 10 Leakage test for compression force to the rotor

Fig. 11 Rotation force for different compression force to the rotor

える。実現の際には、2倍以上の安全率を取り、バルブの耐圧を500 kPa程度とする。

これらを考慮した最適設計パラメータを推定すると、シリコンラバーリングの突出量300 μm 、ロータへの加圧力3 N、バルブの耐圧500 kPa、ロータのしゅう動力0.8 Nとなる。つまり、0.8 N程度の発生力があるマイクロソレノイドを内蔵することにより、耐圧500 kPaで10個の流出口を切換え可能な多分岐切換バルブチップを実現できる。

8. おわりに

切換原理証明用切換バルブチップの次のステップとして、ソレノイド駆動マイクロ多分岐切換バルブチップを試作し、流出口切換えの自動化を実現した。また、ソレノイドを利用した駆動原理とスチールボールを用いたラッチ機構により、センサや精密な制御を用いずに流出口の位置決めと現在位置の検出に成功した。さらに、前モデルのようにロータを手動回転させる必要がなくロータ径の大幅な小形化が可能になり、主要部品の一括製作にも成功した。これにより、チップのさらなる薄形化やワンチップ内に複数のバルブの内蔵が可能になる。

本切換バルブチップの特長を整理する。

- (1) 10個の流出口の切換えが可能
- (2) ロータリ機構の採用
- (3) 高耐圧下においても気密性が高い
- (4) アクチュエータに依存しない耐圧性能
- (5) 切換部の省デッドボリューム
- (6) センサ不要で流出口の位置決めが可能
- (7) センサ不要で現在の流路位置の検出が可能
- (8) 完全ハイブリッド構造

また、本バルブの設計パラメータであるシリコンラバーリングの突出量とロータへの加圧力に対するバルブの耐圧とロータしゅう動力の測定結果から、マイクロアクチュエータ内蔵形多分岐切換バルブが実現できることも実証した。

本研究の成果は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CRESTタイプ)、文部省科学研究費補助金若手研究(B)17760219の助成を受けて行われた。

文 献

- (1) Ikuta, K. et al., Three Dimensional Micro Integrated Fluid Systems Fabricated by Micro Stereo Lithography, *Proceedings of 7th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS '94)*, (1994-1), pp. 1-6.

- (2) Ikuta, K., Plenary Talk Paper, 3D Micro Integrated Fluid Fystem Toward Living LSI, *Proceedings of Fifth International Conference on Artificial Life (A-life V)*, MIT Press, No. 17 (1996-6), pp. 17-23.
- (3) Ikuta, K. et al., Biochemical IC Chip Toward Cell Free DNA Protein Synthesis, *Proceedings of 11th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS '98)*, (1998-1), pp. 131-136.
- (4) Ikuta, K. et al., Micro Concentrator with Opto-sense Micro Reactor for Biochemical IC Chip Family—3D Composite Structure and Experimental Verification—, *Proceedings of 12th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS '99)*, (1999-1), pp. 376-381.
- (5) Ikuta, K. et al., Biochemical IC Family for General Micro Chemical Systems—Development of Multiple Concentrator, Reactor and Valve Chips, *Proceedings of The 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99)*, (1999-6), pp. 1046-1049.
- (6) Ikuta, K. et al., Fluid Drive Chips Containing Multiple Pumps and Switching Valves for Biochemical IC Family—Development of SMA 3D Micro Pumps and Valves in Leak-free Polymer Package—, *Proceedings of 13th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS '00)*, (2000-1), pp. 739-744.
- (7) Ikuta, K. et al., In-chip Cell-free Protein Synthesis from DNA by Using Biochemical IC Chips, *Proceedings of 14th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS '01)*, (2001-1), pp. 455-458.
- (8) Hasegawa, T. et al., Multi-directional Switching Valve Chip with the Rotary Mechanism (1st Report) Verification of Multiple-directional Switching Principle Using the Rotary Mechanism, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 727 (2007), pp. 163-168 (in Japanese).