S055022

サイフンのようにして用いる金網とフィルムからなる表面張力を用いた微小 定流量給水装置の開発*

岩永正裕^{*1}, 高見治樹^{*2}, 山本巧^{*2}, 鎌水亮^{*2}

Development of Devices Consisting of Wire Netting Covered with Film to Supply Controlled very
Little Flow Rate of Water by Using Surface Tension Usable like Siphon

Masahiro IWANAGA^{*1}, Haruki TAKAMI, Takumi YAMAMOTO and Ryo YARIMIZU

^{*1} Kanagawa Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
1030 Shimo-ogino, Atsugi, Kanagawa, 243-0292 Japan

There were inventions to supply very little flow rate of liquid under control, but they needed electronic equipment for each. The purpose of this paper was to develop devices to supply very little flow rate of water under control with no electric equipment. We found the phenomena that water flew out from a tank through a wire net arch set over the tank wall, when the wire net arch was covered with a vinyl sheet and the meshes were filled with water. Water flew in the layer formed between wires and film. The pressure in the layer decreased by gravity and pressure loss, and surface tension maintained this negative pressure. The phenomena were expected applicable to supply very little flow rate of water under control. Their flow characteristics were studied experimentally. And it became clear that their characteristics could be estimated by computer simulation with simple models. So, these systems could be used to supply very little flow rate of water under control with no electric equipment like a siphon.

Key Words : Water, Surface Tension, Flow Characteristics, Wire-Netting, Thin Film, Very Little Flow Rate, Siphon

1. 結 言

微小流量を制御して供給する装置としては、チューブポンプやダイヤフラムポンプなどが市販されており、表面張力を用いて液体を循環させる装置としてはヒートパイプなどがある。本研究の目的は、電気機器を用いずに、安価に流量を制御しながら微小流量の水を供給する装置を構築することである。

水槽を水で満たして、その縁に細い針金で編まれた金網をアーチ状に掛けて、網目に水の膜を張りながらビニールシートで覆うと、継続的に水が水槽の外に流出することがわかった。この現象は針金とビニールシートの隙間にできた水の層を通して、継続的に水が流れ続けると考えられる。この水の層の中では重力ならびに水の粘性による圧力損失のために、負圧となるが、この負圧を支えているのは表面張力である。

この現象を利用してサイフンのようにして用いる微小流量供給装置を開発することを試みる。そのために、このシステムの流量特性を実験的に調べ、さらにその流量特性を予測できる理論モデルを構築する。

2. 実験方法及び実験装置

図1の実験装置の水槽に水を入れ、真鍮製の網を用いてアーチを作成して水槽のふちに設置した。金網の素線の直径は0.18mm、金網の目は1×1mmの正方形(40メッシュ)である。水槽内部で水に浸した幅110mm、長さ280mm、厚さ0.02mmのポリプロピレン製シートをアーチに沿って引き上げ、アーチの前後に垂らした。水槽内

^{*1} 正員, 神奈川工科大学 (〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030)

^{*2} 学生員, 神奈川工科大学 工学部

E-mail: iwanagao@me.kanagawa-it.ac.jp

のビニールシートの両端に錘をつけて、真鍮製の網に密着させるようにした。この操作で水は網の目に満たされ、水は連続的に水槽の外に排出される。この水は電子天秤の上に設置された器に受けられ、排出量は時々刻々とコンピュータに記録される。金網に親水性のスプレーを塗布して実験を行い、再現性のある結果を得た。アーチ頂上から水槽外部の網の下端の高低差 H_0 [mm] を 15mm～120mm の範囲で変化させて、流量の変化を調べた。なお網の幅はシートよりも広くとり 120mm とした。水はシートに覆われた部分だけを移動する。途中で水を加えて水位を元に戻すと、流量も元の値に戻ることを確認した。

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2 Flow rate and H

Fig.3 Relation between H_{limit} and H_0

Fig.5 Flow rate and X, where circles express calculated results and lines express experimental results

Fig.4 Schematic diagram of water level

Fig.6 Experimental result about relation between H and X

Fig.7 Wire and water layer

Fig.8 Calculation model

Fig.9 Calculation model of water layer

Fig.10 Limit Shape of water layer

Fig.11 Cross section area of water layer and radius of curvature

Fig.12 Equivalent diameter and radius of curvature

Fig.13 Friction coefficient and radius of curvature

Fig.14 Most suitable value of h and H0

3. 実験結果

図2は縦軸に幅1mあたりに1秒間に流出する質量流量 $Q[g/(ms)]$ をとり、横軸に網の頂点から水面までの高さ(山の高さ) $H[mm]$ をとった。 H の値がある値に達すると、流量がほとんどゼロになることがわかる。網の頂点から流量がほとんどゼロになったときの水面の高さ(限界高さ)を $H_{limit}[mm]$ とした。図3に H_{limit} を縦軸にとり、 H_0

を横軸にとってその関係を調べた。H₀ が 15mm～60mm の範囲では H_{limit} = H₀ - 7mm の関係になることが分かった。しかし H₀ が 60mm を越えると H_{limit} の増加率が急に小さくなり、H_{limit} は六十数 mm 程度が限界のように見受けられる。

図 4 に H₀, H, H_{lim} の関係を図示した。水位が H のとき、これ以上水が流出しない限界水位 H_{limit} までの水面下の長さを X[mm] とおく。すなわち X = H_{limit} - H である。図 5 は X を横軸にとり、縦軸に Q[g/(ms)] を取った。実線が実験値を表す。図 6 は、横軸は図 5 と同じで、縦軸に図 5 の各実験点に対応する H の値をとった。図 6 の鎖線はアーチ部の半径と同じ 14mm を示している。図 6 においてこの鎖線よりも H の値が小さな実験点は図 5 において、急に流量が増加することがわかる。図 6 の鎖線よりも H の値が大きな実験点は図 5 において、H₀ の値によらずほぼ 1 本の曲線に分布している。この曲線の実験式は、単位幅当たりの質量流量 Q[g/(m・s)] と X[mm] の関係式として次式となる。

$$Q = X^{1.8} / 1000 \quad (1)$$

式(1)はあくまで供試システムに関する実験式であり、針金の径やメッシュが変われば係数や指数が変化する可能性が大きい。しかし水面がアーチの半円よりも下にあれば、Q と X の関係がほぼ 1 本の曲線上にのことは興味深く、流量制御に役立つと思われる。

4. 理論モデル

金網とその上に張ったフィルムの系で、水がタンク水面より上昇して流れることができるのは、次のように考えることができる。図 7 のように金網とフィルムの間に表面が凹面状の水の薄い層が形成されて、表面張力により層内部の圧力が大気圧よりも低い値に耐えられるようになる。タンク水面から上昇することによる圧力降下と内部に水が流れることにより発生する摩擦損失による圧力降下により、表面の凹面の曲率半径 R は変化しながら、外部の大気圧との圧力差を調整していると考えられる。

網は縦の針金と横の針金が組み合わされており、1 つの升目をみると、針金とフィルムの間隔は 0 から針金の直径分の距離まで変化するが、図 8 のように縦の針金だけを考え、フィルムはその針金と一定距離 h だけ離れた状態で保持されているとする。この h の値は、実験結果と一致するように後に定める。このとき針金とフィルムの間に形成される水の層を流路と考えて、その断面を図 9 に示す。親水性スプレーを塗布してあるので、接触角は 0 となる。針金の半径を r、針金底面とフィルムの距離を h、凹面の曲率半径を R として、角度 θ を図のようにとる。このようにして形成された水路の断面積を S、周の長さを L、相当直径を de とする。図 11, 図 12 は横軸に R/r をとり、縦軸に S/r² と de/r をそれぞれとった。h/r の値によって色を変えてある。このような断面を流れる層流の管摩擦係数 λ は λ = C/Re で整理できる。この C の値を求めるために、連続の式とストークスの運動方程式を差分法で解いて、R を変化させながら C の値を求めた。境界条件はフィルムと針金に接している部分では速度 0、水の表面ではせん断応力 0 とした。図 13 は縦軸に C = λ・Re を横軸に R/r をとって計算結果を示したもので、h/r の値によって色を変えてある。

曲率半径 R の値には下限 R_{limit} がある。これは図 10 のように R がこの値以下になると、液膜を維持することができなくなるためであり、R_{limit} は次式で与えられる。

$$R_{limit} = 2r + h - \sqrt{2rh + 4r^2}$$

h が大きくなるにしたがって、R_{limit} は増加する。1 つの升目の中で h は実際には 0 から 2r まで変化するの、h = 2r のときの R_{limit} を求めると R_{limit} = 1.17r となる。σ/R_{limit} = ρgH_{limit} より、到達できる最高点の水位 H_{limit} を求めることができる。σ = 0.0712N/m, r = 0.09mm を代入して H_{limit} を求めると約 69mm となり、図 5 の実験結果とほぼ一致する。

これらを総合して流量 q の水が 1 本の針金を伝って水面から垂直に上昇して、半円状の山を越えて垂直に下降する間に発生する圧力損失の和を求めて、次式により凹面状の層表面の曲率半径 R を算出する⁽¹⁾。

$$\frac{\sigma}{R} = \rho g z + \sum_{Re} \frac{C}{de} \frac{4x p u^2}{2} \quad (2)$$

ここに

$$u = \frac{q}{S}, Re = \frac{\rho u d e}{\mu} \quad (3)$$

であり、 S , d_e , C は h と R の関数である。 H , アーチの半円の半径, ρ , μ , r , h , q は初期条件として与えられて、計算中一定であるので、式(2), 式(3)の未知数は R だけである。水面から計算を始めるが、水面近傍では式(2)の右辺第2項はほとんど寄与しない。ある場所の R がわかれば、式(3)により流速 u , レイノルズ数 Re を求めて、式(2)から Δx 下流の点の曲率半径 R を求める。これを繰り返して計算して、半円状のアーチ頂上を越えて下降して水面下となり、

$$0 = \rho g z + \sum \frac{C}{Re} \frac{\Delta x}{d_e} \frac{\rho u^2}{2}$$

となるまで計算を続ける。このとき z の値は負となり、実験結果整理に用いた X の値と $X = -z$ の関係があると考えられる。計算過程で $R < 1.2r$ になる場合は、この流量では流れが維持されないものと判断する。

この計算を、金網とフィルムの間隔 h , 網の頂点の水面からの高さ H , 流量 q を変化させて行い、多くの計算結果を集めた。特に q については、微少量ずつ細かく変化させて、最終の z の値を求めておく。 H_0 の網について図3より対応する H_{limi} が求まる。蓄えた計算結果から $H - z = H_{limi}$ となるものを選び出して、そのときの流量 q に $1m$ あたりの針金の本数を掛けて、単位幅あたりの流量 Q を求めた。図5は縦軸にこの Q をとり、横軸に X をとった。色は網の H_0 の値で変えてある。実線が実験値、丸印が計算結果を表す。この計算で使用した h の値は図14のようになり、網の H_0 が $50mm$ までは $h = 1.2r$ とするとよく実験結果と一致する計算結果がえられ、網の H_0 が $50mm$ を越えると h の値を $1.7r$ まで徐々に大きくすることにより実験結果と比較的良好一致する計算結果がえられることがわかった。以上の計算はVBでプログラムを作成して行い、実験条件に合わせて r を $0.09mm$, $1m$ 当たりの縦の針金の数を 1000 本、アーチ頂上の半円の半径を $14mm$ として計算を行った。

以上のことから、必要な微小流量の値が与えられれば、それを実現する系をコンピュータシミュレーションによって設計することが可能となり、電子機器が不要な微小流量供給装置を構築することができた。

5. 結 言

真鍮製の金網でアーチを作成して水槽の淵にかけ、網目に水を満たしながらプラスチックフィルムで覆うと、連続的に水が流れる現象が起こることがわかり、金網に親水性のスプレーを塗布することで流量特性の再現性を得ることができた。実際の流れは複雑であるが、計算モデルとして一本の針金とそれに一定の間隔をおいて被されたフィルムを考えて、その隙間に形成される水の層の中を水が流れると考えた。水の層の表面が凹面となることによって、表面張力により内部の圧力を大気圧よりも小さく保持できて、タンク水面から上昇することによる圧力の減少と圧力損失によって生じる圧力の減少に耐えることができて、水を流し続けることができると考えた。このモデルを用いて流量特性を計算すると、実験結果とよく一致することがわかった。

以上により、金網とフィルムを用いた微小流量給水装置は、針金の太さ、メッシュ、アーチの半径、アーチ頂上から水槽外に垂らした金網の長さ、水位を決めれば流量をシミュレーションにより予測することができる。これによって必要な流量に対する装置の諸元を決めることができて、電子機器の助けを借りずに、安価に流量を制御しながら微小流量を供給する装置を構築することができた。

謝辞

実験データ収集に関して当時神奈川工科大学4年卒業研究生 久保田朗広、八幡透快、杉本是正、林幸宏、藤巻浩志、立花倫太郎、須永頼匡、高橋恒志、山崎将英、小宮武士、郷間一宏、樋口順紀、平山力也、野尻宗良、田口航、西谷孝之、近藤亜沙美の諸氏の協力を得た。特に樋口順紀氏は金網を伝って水が流れる現象をご報告くださった。神奈川工科大学工学部機械工学科助手川崎祐二氏は、装置製作にご尽力くださった。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小野周, 表面張力(1980), p.12, 共立出版