

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656151

研究課題名(和文)新しい揚水原理に基づく超音波マイクロポンプの開発

研究課題名(英文) A Novel Pumping Mechanism of Using Ultrasound Induced Pressure and Cavitations for Micro-Pump Development

研究代表者

中西 為雄 (Nakanishi, Tameo)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10235799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：超音波定在波による圧力変動とマイクロキャビテーションの負圧制限機能を利用した新しい揚水方式を考案した。具体的に、kHz 帯の超音波放射手段を用いて、液体中にキャビテーションの発生しきい値を超える強度の超音波定在波を形成させ、この定在波の最大圧力変動点付近に超音波の波長より十分に小さい内径の揚水管の導入口を設置すると液体が連続的に揚水される。実験によりこの揚水方式のメカニズムを解明し、最適な運用条件を特定した。単一揚水管を用いた場合、23kPa超の揚水圧力、10ml/min の吐出量を得た。集合揚水管を用いることで吐出量を増やすことができた。これを利用したパルプレスマイクロポンプの試作をした。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new pumping method of using ultrasound induced pressure differences and cavitations. An ultrasonic vibrating surface is fabricated at the bottom of a water tank. Standing waves of half wavelength are formed between the vibrating surface and the water surface. A vertical rising pipe of small inner diameter of 0.37mm is inserted in the water in a depth of 1/4 wavelength. Micro-bubble cloud is formed around the rising pipe inlet, which suppresses the negative pressure in the vibrating cycle and results in continuous pumping of water. The mechanisms and fundamental characteristics have been explored by experimental investigations. A pumping pressure of over 23kPa and a maximum flow rate of 10 ml/min were achieved. A prototype of micro-pump has been developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：超音波ポンプ 揚水メカニズム キャビテーション雲

1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロポンプ技術は機械や化学、バイオ・医療の諸分野の基盤技術の1つであり、研究・開発が盛んに行われている。これらの分野で使用されるマイクロポンプは、駆動液体を選ばない、超小型化、高精度、静粛性、長寿命が要求される。

(2) これまで様々なマイクロポンプが提案されてきているが、実用化に成功したのは主に圧電ポンプに代表される容積型ポンプである。しかし、容積型ポンプは逆止弁を必要とするため、可動部の摩擦や振動が問題になる。最近、ノズル・ディフューザ内の流れの非対称性を利用したバルブレスマイクロポンプ①や圧電アクチュエータを用いた進行波型バルブレスマイクロポンプ②が提案されているが、構造や制御が複雑である一方、達成できる揚水圧力および吐出量が小さく、実用性に乏しい。

(3) 一方、液中に浸した管に超音波振動を与え、揚水する超音波ポンプ③が提案されている。しかし、その場合の吐出圧が1 kPa程度である。管の先に平板または振動面を配置し、10 μm 程度の隙間を設けると吐出圧を20kPa 程度上げることができるが、組立に高い精度が要求され、また、不純物による目詰まりの場合、処置が困難である。

① 石田暢久, 他 2 名: 双方向バルブレスマイクロポンプ, Konica Minolta Technology Report, Vol.1, 51-54(2004).

② 鈴木孝明, 他 4 名: 圧電アクチュエータを用いた進行波型バルブレスマイクロポンプの開発, 日本 AEM 学会誌, Vol.13, No.4, 310-315(2005).

③ Takeshi Hasegawa, et al.: A miniature ultrasonic pump using a bending disk transducer and a gap, ULTRASONICS, Vol. 44, 575-579 (2006).

2. 研究の目的

(1) 筆者は、超音波を利用した揚水のメカニズムを、従来の研究と異なる視点から考察し、超音波定在波による圧力変動とマイクロキャビテーションの負圧制限機能を利用した新しい揚水方式を見出した。具体的に、kHz帯の超音波放射手段を用いて、液体中にキャビテーションの発生しきい値を超える強度の超音波定在波を形成させ、この定在波の最大圧力変動点付近に超音波の波長より十分に小さい内径の揚水管の導入口を設置すると、液体が連続的に揚水される。これを応用することで構造が極めて簡単で実用的なバルブレスマイクロポンプを作成することが見込まれる。

(2) 本研究の目的は、①実験により新しい揚水方式のメカニズムを解明し、最適な運用

条件を特定する。②これを利用したバルブレスマイクロポンプ技術の基礎を確立することである。

3. 研究の方法

(1) 新しい揚水メカニズムの詳細および特性を解明するための実験システムを構築し、可視化実験により揚水管先端で発生するキャビテーション雲の構造と揚水メカニズムへの寄与を明らかにする。透明アクリル製容器の底面中心部に40kHzのランジュバン型振動子を取り付けた計測用開放型実験装置を製作し、ファンクションジェネレータ、電力増幅器(高速バイポーラ電源)、変圧器を使用し、振動子に任意波形・大きさの電圧を印加できるようにする。高速度ビデオカメラにより、キャビテーション雲を可視化し、その構造を解明する。キャビテーション雲がどのように揚水メカニズムに寄与しているかを明らかにする。

(2) 異なる条件での超音波定在波の圧力分布、揚水管先端で発生するキャビテーション雲のパターン等を調査し、これらが揚水特性に与える影響を明らかにする。印加電圧の波形・振幅、水深および揚水管先端位置を変化させ、超音波定在波の圧力分布、揚水管先端で発生するキャビテーション雲のパターンを調べ、これらを整理・分類し、それぞれが揚水特性に与える影響を明らかにする。異なる内径、外径、長さおよび先端形状の揚水管について実験を行い、揚程、流量に対する最適な揚水管形状を特定する。静粛性、長時間運転の場合の温度特性を検証する。集合揚水管を用いる場合の流量改善の特性を明らかにする。

(3) マイクロポンプの原型となる透明な密閉型実験装置を試作する。ランジュバン型振動子ではなく、薄板状の超音波振動子を設計・使用し、ポンプの小型化を図る。この実験装置の揚水特性を明らかにする。開放型装置との特性の相違を検証する。ポンプのさらなる小型化を目指して、より高い周波数(100kHz~200kHz)での運用の可能性を検証する。

4. 研究成果

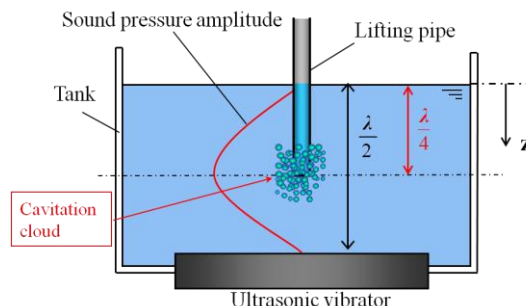


図1 新しい超音波ポンプの原理図

(1) 図1に新しい超音波ポンプの原理を示す。タンク底に超音波振動子を設置し、超音波を液中に印加している。液中超音波の波長を λ として、最大発振効果を得るために、水面から振動面までの水深が $\lambda/2$ となるように調節し、内径が1mm以下の揚水管の先端を最大圧力変動点 ($z=\lambda/4$) の位置まで鉛直に挿入する。超音波の出力をあるレベル以上に高めると、揚水管の先端で気泡雲 (キャビテーション) が発生する。

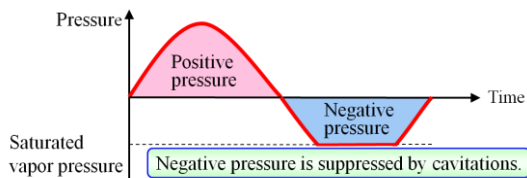


図2 超音波による一周期の圧力変動

図2に超音波による一周期の圧力変動を示す。負の半周期では、液中でキャビテーションが発生し、最大負圧が制限される。一方、正の半周期ではこのような制限が無い。その結果、1周期で正の平均圧力が得られ、液体が揚水される。

f が超音波の周波数、 p_a が大気圧であるとして、最大圧力変動点 ($z=\lambda/4$) での圧力は式(1)で表される。

$$\frac{p}{p_a} = A \sin 2\pi ft \quad (1)$$

$A > 1$ の場合、室温での液体(水)の飽和蒸気圧を無視すると、一周期における平均圧力 \bar{p} は式(2)で表される。

$$\frac{\bar{p}}{p_a} = \frac{1}{2} + \frac{\sin^{-1}\left(\frac{1}{2}\right) + \sqrt{A^2 - 1}}{\pi} \quad (2)$$

例えば、 $A=2$ で $\bar{p}/p_a=0.218$ となり、水の場合、理論上約 2.18m の揚程が得られる。

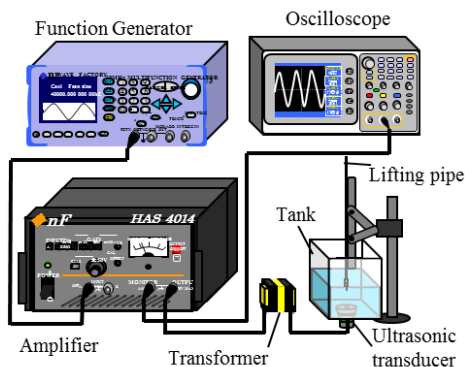
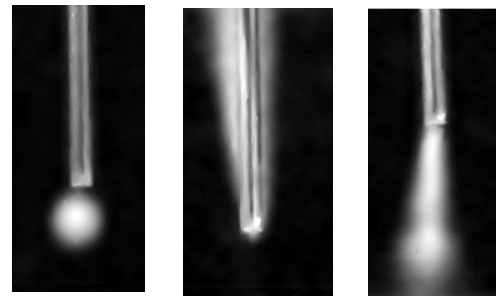


図3 開放型実験装置および計測システム

(2) 平成 24 年度では、新しい揚水メカニズムの詳細・特性を解明するための開放型実験装置および計測システム (図3) を構築し、

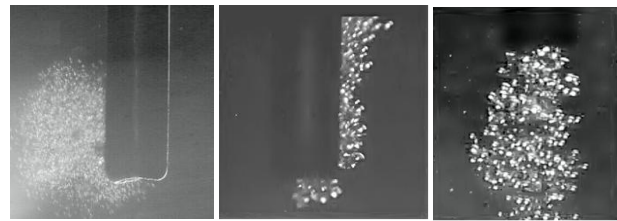
可視化実験により細管先端で発生するキャビテーション雲の構造および揚水メカニズムへの寄与を明らかにした。

具体的に、透明アクリル製容器の底面中心部に 40kHz の BLT 型振動子を取り付けた計測用開放型実験装置を製作し、振動子に任意波形・大きさの電圧を印加できるようにした。高速度ビデオカメラによるキャビテーション雲の可視化実験 (図5) を行い、揚水管先端と振動子表面距離の違いにより、下向き型、上向き型および丸型のキャビテーション雲 (図4) が観察され、効率的に揚水に寄与するのは、上向き型のキャビテーション雲であることを特定した。



(a) Round (b) Upward (c) Downward

図4 キャビテーション雲の分類 (shutter speed=1/4 s)



(a) Round (b) Upward (c) Downward

図5 高速度ビデオカメラによるキャビテーション雲の様子 (shutter speed=1/100000s)

印加電圧の波形・振幅、水深および細管先端位置を変化させ、超音波定在波の圧力分布、細管先端で発生するキャビテーション雲のパターンを整理・分類し、それぞれが揚水特性に与える影響を明らかにした (図6, 7, 8)。

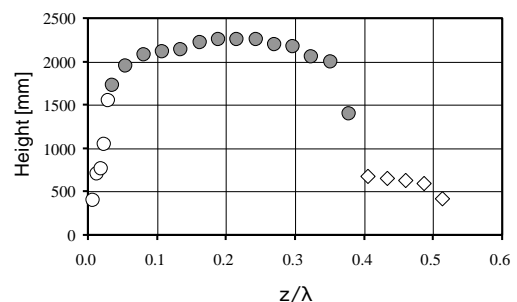


図6 揚水管先端位置と最大揚程との関係(78vpp)

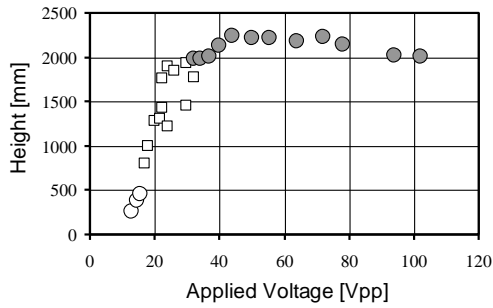


図7 超音波振動子への印加電圧と最大揚程との関係 (Vpp 20~35 ので round 型の気泡雲が発生し、最大揚程に履歴効果が表れる。)

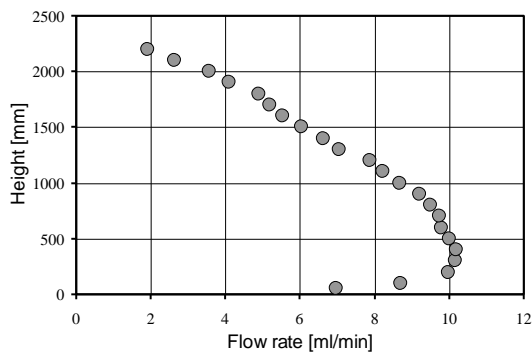


図8 単一揚水管による流量特性(78 Vpp)

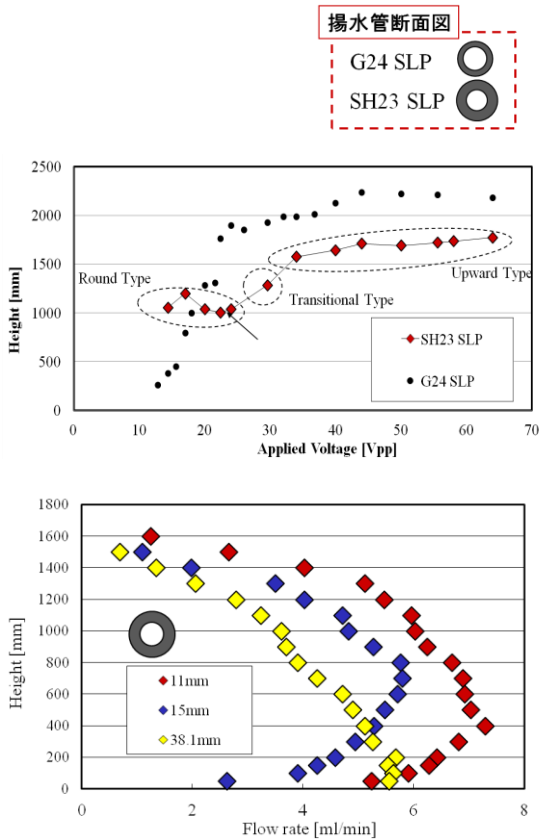


図9 異なる形状の揚水管による実験結果

異なる内径、外径、長さ、先端形状の細管について実験 (図9) し、最適な細管形状を特定した。開放型実験装置で単一揚水管を用いた場合の最大揚程は 2236[mm]、最大流量は 10[ml/min]であった。

(3) 平成 25 年度では、前年度研究の問題点を系統的に整理・改良した。水を煮沸脱気することで、揚水効果が高まることを新たに見出した。ポンプの原型となる直径 85mm、厚さ 25mm の密閉型実験装置を試作した。小型化のため、最適化した円盤型圧電振動子を設計・使用した。最大揚程は 1450mm、最大流量は 8.47ml/min であった。さらなる小型化を目指して、100kHz~200kHz の振動子による実験もしたが、逆にキャビテーション雲の強度が弱くなり、揚水用に向かないことがわかった。

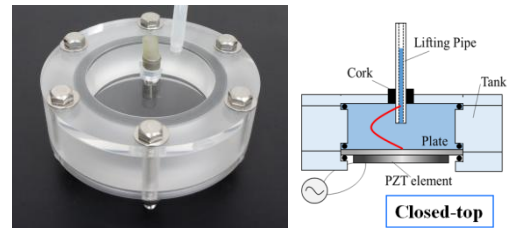


図10 試作したマイクロポンプの原型となる密閉型実験装置

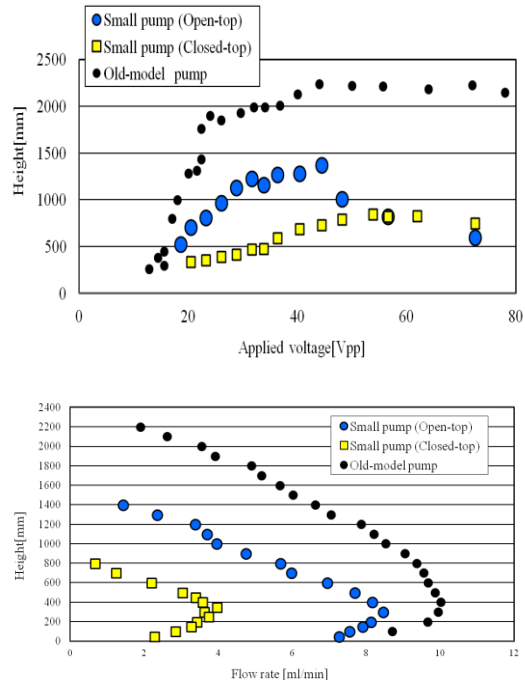


図11 試作したマイクロポンプの原型となる密閉型実験装置とそれによる実験結果

(4) 流量とポンプ効率を高めるために、集合揚水管を用いる構成を検証した (図12)。揚水管本数が増えるにつれ、流量とポンプ効率も増加するが、4 本程度で頭打ちの傾向が見られた。

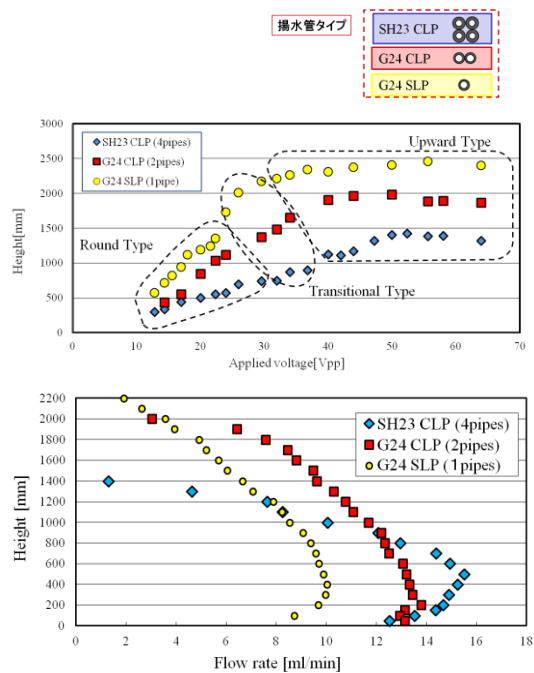


図 1.2 単一と集合揚水管の揚水特性の比較

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

- (1) Tameo Nakanishi, Yuki Numazawa, A Novel Pumping Mechanism of Using Ultrasound Induced Pressure and Cavitations, Proc. 10th Int. Conf. on Fluid Dynamics, Sendai, (2013), 154-155.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中西 為雄 (NAKANISHI, Tameo)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：10235799