

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420121

研究課題名(和文)共振駆動による進行波を利用した燃料電池用改質水ポンプの開発

研究課題名(英文) Development of an oscillating plate pump driven by the resonance phenomena for fuel cell reforming water

研究代表者

南川 久人 (Minagawa, Hisato)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：60190691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二つの正弦波状の定在波間に生成される進行波状の移動空間を利用する振動平板ポンプを製作し、流量や揚程、ポンプ効率等のポンプ性能を評価した。なお、共振現象を用いるのは困難であるため、強制振動を用いて搬送原理を実現した。

その結果、最大流量時に効率的に流量を出すには最低28rpmが必要であることがわかった。一方、最大揚程を出すには60rpmが必要であることがわかった。また、回転数を大きくするにしたがってポンプ効率が良くなり、最大効率は回転数60rpm、流量46ml/minのときに得られることがわかった。さらに、本研究では本装置の改善に利用できる微小間隔流路の可視化手法の開発も行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to realize the oscillating plate pump driven by the traveling waves which is generated by standing sine waves, and to evaluate the performance of the pump such as the flow rate, the total head and the efficiency. Due to the difficulty of utilizing the resonance phenomenon, the conveyance principle was realized by the forced oscillation mechanism.

As a result, it was found that when the pump is driven in maximum flow rate, the condition of revolution number, N , requires more than $N=28\text{rpm}$. On the other hand, the pump is driven in maximum head, N is required 60rpm. With the increase of N the efficiency becomes high, and the maximum efficiency is obtained in the case of $N=60\text{rpm}$ and $Q=46\text{ml/min}$. Furthermore, in this study, in order to improve the oscillating plate pump, we developed the visualization system of the flow which flows through the narrow channel.

研究分野：流体工学、混相流工学

キーワード：振動平板ポンプ ポンプ効率 流量 揚程

1. 研究開始当初の背景

(1)ターボ型や容積型など種々のポンプが発明されてきた。この中で、微細粒子が混入した液体を輸送するポンプの代表として血液ポンプに着目する。このポンプは、弾性チューブをローラーで潰しながら、内部の流体を絞り出す形式である。しかし、弾性チューブを押し潰すことから、チューブの疲労損傷が早く、チューブを頻繁に交換する必要がある。このように、微細粒子が混入した液体を輸送する従来型ポンプにおいては、未だ改良の余地が大きい。

(2)研究分担者の松村が発明した技術「共振駆動による進行波ポンプ、進行波搬送装置」は、隙間を設けて対向させた2枚の弾性平板が定在波を形成すると、その隙間が進行波状に移動していくという単純な原理に基づく。進行波状の移動空間が生成された状態で平板の端面を密閉すると、隙間内にある流体が搬送されるポンプとなり得る。このような新型ポンプの誕生をサポートしていくことは、学術的にも重要である。

(3)家庭用燃料電池の主流とされる SOFC 形式を採用した ENE・FARM 内で改質水を輸送するポンプでは、セラミックの微細粒子が改質水の中に必然的に混入し、これが非常に硬いことから、改質水ポンプの金属間摺動部に傷をつけ、機能低下を引き起こす。本ポンプは「異物押し出し機能」を有することから、セラミックス微細粒子をポンプ内にため込まずに排除できる可能性が高い。また、ポンプ機構部の金属間摺動部と内部流体の接触を防ぐような設計が可能であることから、セラミックス微細粒子が金属間摺動部に挟まることによる機能低下を回避できる。異物押し出し機能を最大限に活用しつつ、揚程と定量供給性能も確保できれば、改質水ポンプに利用可能なポンプとなり得ると判断した。

2. 研究の目的

本研究では、1.(3)で触れた家庭用燃料電池の改質水ポンプを、特許「共振駆動による進行波ポンプ、進行波搬送装置」の原理に基づいて実現する技術を確立する。

改質水ポンプの全揚程は最大流量(0.02 L/min)運転時で150kPaとされる。また、SOFC形式では純水を定量循環させる必要がある。改質水ポンプの仕様として、定量供給も重要となる。提案する新種のポンプには設計ノウハウが全く存在しないため、これらの性能を達成する手段として、流体-構造連成解析を導入する。また、各条件下で平板間の微小間隔流路内の流れ場を可視化する実験方法も確立する。これらの解析・実験技術の開発により、この新型ポンプの理解を深めて設計法に昇華させる。この設計法に基づき、仕様を達成するポンプを設計・製作し、性能目標が満足されることを実証するまでを、研究期間内に達成することを目指す。

3. 研究の方法

(1)まず、「共振駆動による進行波ポンプ、進行波搬送装置」の原理に基づいた改質水ポンプの設計と性能測定実験装置の製作を行う。設計情報を得るために流体-構造連成解析によるポンプ内流動解析を行う必要がある。ただし、市販の流体-構造連成解析ソフトウェアは不完全であり、適用は難しい。このため、個別要素法による流体-構造連成解析を用いてポンプのシミュレーションを行う。これによって、必要となる概略の寸法値や用いる素材の概要が決まると考えている。シミュレーション結果と、これまでの送風機等に対する設計ノウハウと、流体工学のノウハウを結集して、この原理をポンプとして利用するための設計変更点・改良点を洗い出し、それを加味した設計を行う。

(2)ポンピング時の液体挙動、液体からの反力による構造側挙動などを可視化し、その輸送メカニズムを解明するための試作ポンプの内部流れの可視化を行うための実験手法を整備する。高速度ビデオシステムを購入し、既存のレーザー・シート光源で可視化し、既存のPIVソフトウェアを用いた計測の準備を行う。可視化には誘起蛍光を発する特殊な可視化粒子も用いる。可視化実験で得られた結果は、流体-構造連成解析のパラメータ設定と精度検証に用いるだけでなく、解析だけでは不明確な輸送メカニズムの解明にも利用する。

(3)(1)の設計に基づき、ポンプの試作を行う。これまで送風機に対して同様の作業を行ってきた経験があるので、設計さえできておれば、大きな問題なく作業を遂行できると考えている。

(4)もう一つの重要なポイントは、ポンプ性能に関する実験データの取得である。実験は、共振平板の材質と厚さ、および幅を変更しながら、測定を行っていく。被測定パラメータは、流量(時間平均流量と、変動値)、吐出圧力(時間平均値と変動値)、そしてポンプ内部流れの流動状況である。

(5)実際、ポンプの設計と試作を行った結果、この原理をポンプに用いようとするとき、共振駆動は難しいことが判明した。理由としては、液体搬送時には、液体が平板の振動を減衰させる効果により、平板を大振幅で共振させることは難しいためと考えられる。そこでこの搬送原理を利用しつつ、共振駆動を行わないタイプの振動平板ポンプを試作し、その性能を評価する。搬送原理の中でも、二つの正弦波状定在波で進行波状の移動空間を作る点は維持するが、定在波の形成には共振を用いないこととした。平板を強制的に定在波状に振動させる装置とする。

4. 研究成果

(1)平板上に強制的に定在波を生成して搬送原理を実現するように設計され、試作したポンプを図1に示す。弾性平板には厚さ0.5mm、

長さ 600mm, 幅 40mm のリン青銅板 (C5210) を用いた。本研究では 5 つの腹を有する正弦波状定在波を模して生成したため, この定在波の波長 λ は 240mm であり, 弾性平板 2 は弾性平板 1 に対して x 方向に $\lambda/4=60\text{mm}$ ずらした位置に設置した。また, 正弦波状定在波の振幅 A は 18mm とした。

実験装置で工夫した点を述べる。平板同士の密着度を高くするために, 弾性平板表面に厚さ 6mm の polyflex 製樹脂平板を貼り付け, この樹脂平板を押し潰しながら駆動させた。上面には平板の挙動を可視化するためにアクリル製のサイドプレートを設置し, ボルトによって下板と固定した。搬送物としては液体の中で最も一般的な水を用い, 実験を行うときは内径 6mm の EPM 製チューブを平板間に挟み, チューブ内に水を流した。

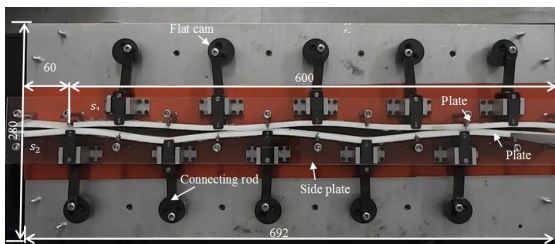


図 1 試作したポンプ

(2)ポンプの性能評価を行った。性能評価方法として, まずチューブ(外径 6mm, 内径 4mm)にシリンジで水を入れ, チューブ内を水で満たしておき, 水で満たしたタンク(バケツ)内にチューブを入れる。ポンプを駆動させると, 給水タンクから吸い上げられた水はポンプの平板間を通った後, 圧力計, ボールバルブ, チェックバルブ, 流量計の順に通る, 排水タンクへ流れる。圧力, 流量のデータは AD 変換ボードで AD 変換した後, パソコンに取り込みデータ処理した。サンプリングレートは 500Hz で 20 秒間データを採取した。モーターの回転数は 10, 16, 28, 40, 60rpm の 5 種類とし, ボールバルブで圧力を 7 種類変化させ実験を行った。

(3)圧力を変化させたときの回転数ごとの平均圧力 P と平均流量 Q の関係 (P - Q 特性)を 図 2 に示す。図より, 圧力を大きくすると流量は小さくなるのがわかる。また, 回転数が大きくなるにつれて流量, 圧力が共に大きくなっている。特に, 10, 16rpm の低回転数では流量, 圧力がほとんど出ていないことがわかる。

(4)図 3 に 10, 28, 60rpm のそれぞれの回転数での流量の時間変化を示す。各グラフには実験流量と理論流量を理論流量の最大値 Q_0 で割って無次元化した Q/Q_0 を示している。図より, すべての条件において実験で得られた流量波形は理論のような正弦波ではなく, 一周期の間に 2~4 の複数の波形が生じた形となっていることがわかる。特に 10rpm ではどの圧力でも水が流れない領域ができ, パルス状の波形となっている。これは, ピストンに

より直接力が作用していないところが接触点となるときの接触圧が弱いので, 平板間のチューブ内で水が逆流しているためと考えられる。最大流量時では回転数が大きくなるにつれて水が連続的に流れていることがわかる。これは, 回転数が大きくなると空間の移動速度が大きくなるため, 水の慣性力が大きくなり, さらに, 接触圧が大きくなる周期も短くなるため逆流しにくくなっていることによると考えられる。

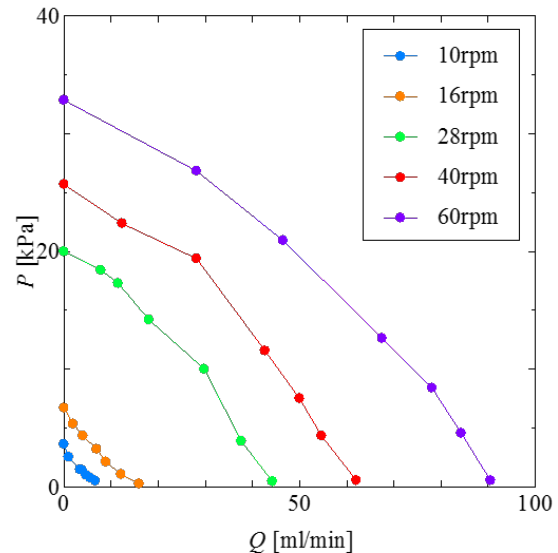
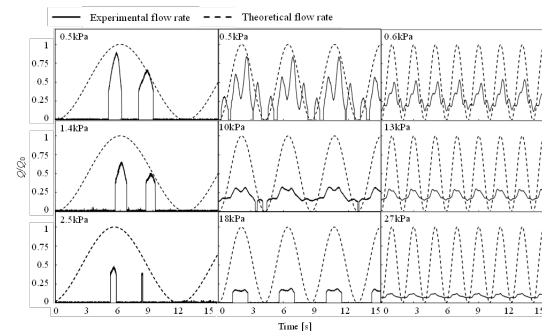


図 2 平均圧力 P と平均流量 Q の関係



(a) 10rpm (b) 28rpm (c) 60rpm

図 3 流量の時間変化

(5)最大流量時に着目してポンプ特性を調べる。図 4 に回転数 N と Q , および N と Q を N で規格化した Q/N との関係を示す。図より N の増加とともに Q も増加しており, 最大平均流量は $N=60\text{rpm}$ で $Q=90\text{ml/min}$ である。 Q/N は $N=10\sim 28\text{rpm}$ では増加しており, $N=28\text{rpm}$ 以降ではほぼ一定となっている。以上の結果より, 本研究で用いたポンプでは効率的に流量を出すには最低 $N=28\text{rpm}$ 必要であることがわかった。

(6)次に最大揚程の評価を行う。図 5 に回転数と最大平均圧力および最大平均圧力をモーターのトルク T で規格化した p/T を示す。図より回転数の増加とともに p が増加しており, 最大揚程は 60rpm で 3.3m である。また, 本

研究で用いたモーターは回転数によらずトルクがほぼ一定なので、 p/T の傾向も p と同じである。以上の結果より、本研究で用いた装置では最大回転数である $N=60\text{rpm}$ で効率的に揚程を出せることがわかる。

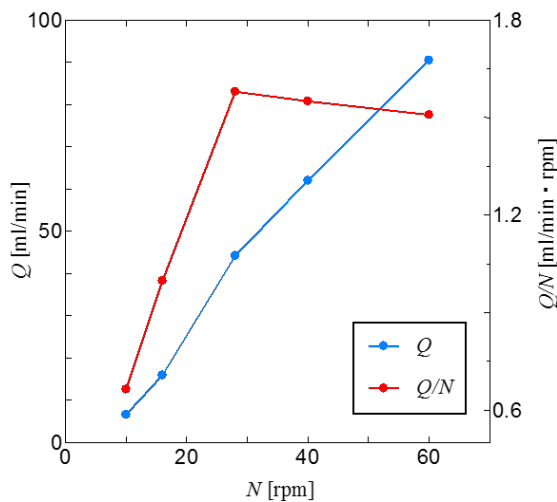


図4 N と Q および Q/N との関係

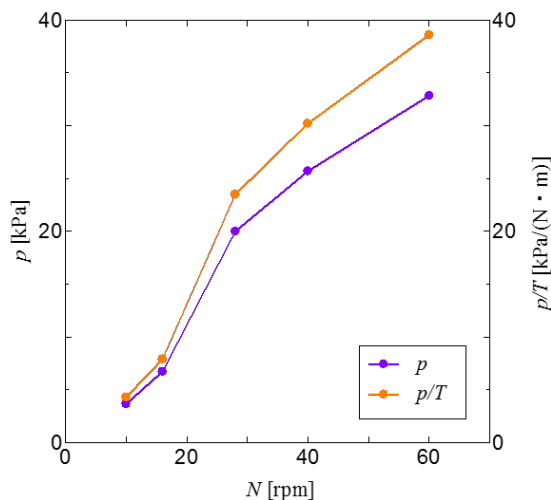


図5 N と p および p/T との関係

(7)最も効率の良いポンプ条件を求めるために図6に回転数ごとのポンプ効率を示す。横軸は平均流量、縦軸はポンプ効率 η (圧力×流量)/(トルク×回転数)をそれぞれ示している。図より $N=10, 16\text{rpm}$ は効率が特に悪く、回転数が大きくなるにつれて最大効率が高くなっていることがわかる。この要因はポンプ効率 $(PQ)/(TN)$ は図4の Q/N と図5の p/T を掛けたものであり、 $N=16\text{rpm}$ までは Q/N および p/T の両方が回転数に比例して増加し、 $N=28\sim 60\text{rpm}$ では p/T のみが回転数に比例して増加するためと考えられる。本研究で行った条件で最も良いのは、 $N=60\text{rpm}$ で $Q=46\text{ml/min}$ のときで最大効率 $\eta=0.013$ であることがわかる。本研究では、平板幅40mmに対し内径6mmのチューブを用いているため、チューブの本数を増やすことで効率を増やすことが

できると考えられる。さらに効率を増加させるためには、モーターの回転数を増加させることや、逆流を防ぐよう装置を改良する必要がある。

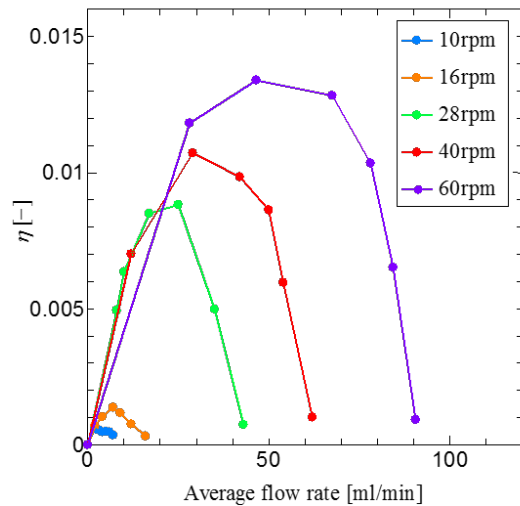


図6 ポンプ効率

(8)微小間隔流路可視化法の開発については、可視化を行うための回流水槽実験装置を製作し、微小間隔流路とレーザーシート光による照明、微細粒子の投入、高速度ビデオ装置による撮影、ならびにPIVソフトによる解析を行った。その結果、以下のことが確認できた。

平行平板間流れについて、層流域では流路幅が3mmと5mmで時間平均速度分布が定性的、定量的に捉えられた。

乱流域では流路幅が1~15mmの全ての流路幅で時間平均速度分布、乱れ分布ともに定性的に捉えられたが、定量的には特に壁面付近で差が見られた。

バックステップ流れについて、流路幅が15mmであれば、本可視化手法で時間平均速度分布、乱れ分布ともに定性的、定量的に捉えられることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

國井 敬佑, 松村 雄一, 古屋 耕平, 南川 久人, 安田 孝宏, 堀井 宏祐, 二枚の振動平板間に生成される移動空間を利用したポンプ, 日本機械学会東海支部第65期総会・講演会講演論文集('16. 3. 17 - 18) No.163 - 1

國井 敬佑, 松村 雄一, 古屋 耕平, 安田 孝宏, 南川 久人, 二枚の共振平板間に生成される移動空間を利用したポンプの開発, 日本機械学会, 機械力学・計測制御講演論文集 2014, 602-1-602-12.

6. 研究組織

(1)研究代表者

南川 久人 (MINAGAWA, Hisato)
滋賀県立大学工学部教授

研究者番号：60190691

(2)研究分担者

安田 孝宏 (YASUDA, Takahiro)

滋賀県立大学工学部准教授

研究者番号：60347432

松村 雄一 (MATSUMURA, Yuichi)

岐阜大学工学部教授

研究者番号：20315922

堀井 宏祐 (HORII, Hirosuke)

山梨大学総合研究部助教

研究者番号：00447715

(3)連携研究者

高木 賢太郎 (TAKAGI, Kentaro)

名古屋大学工学研究科 (研究院) 講師

研究者番号：60392007