

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420808

研究課題名(和文) 層流摩擦ポンプの効率化に向けた設計検討とマイクロ化の実現

研究課題名(英文) Investigation of shear force pump design for efficiency improvement and its miniaturization

研究代表者

岡本 光司 (OKAMOTO, Koji)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：70376507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：層流摩擦ポンプは小型ポンプとして期待されているが、理論ロータ効率と実測効率の差が大きいことが問題となっている。本研究では、その原因と考えられているディフューザ及びスクロールの内部流動場に着目した実験及び数値解析を行った。また、性能低下を防ぐために回転絞り流路を導入し、その効果について議論した。試作機を使って内部流動場の可視化を行った結果、事前の数値解析で指摘されていた逆流が生じている様子が明らかになり、これを解決するために導入した回転絞り流路の有効性を確かめた。最後に、更なる小型化を目指して、3Dプリンタによって層流摩擦ポンプを試作し、目標回転数である60,000rpmでの運転を達成した。

研究成果の概要(英文)：A shear force pump is a candidate for a small pump system, but one of its problems is the gap between the rotor efficiency obtained by the theory and the measured efficiency. In this study, test runs were carried out including visualization to understand the internal flow dynamics in the diffuser and scroll, which are supposed to cause the efficiency drop. Also, a rotating convergent passage was introduced to prevent such efficiency drop and its effect was investigated. According to the results, a large scale recirculation was observed in the diffuser, which is supposed to be a reason for the efficiency drop, and it was confirmed to be suppressed by introducing the rotating convergent passage. Finally, targeting much smaller pump devices, a shear force pump was built by 3D printer and its test run at 60,000rpm succeeded.

研究分野：熱流体力学

キーワード：マイクロ流体機械 層流摩擦ポンプ テスラポンプ 流体工学 ターボマシン

1. 研究開始当初の背景

近年、様々な機器の小型化に伴い、小型エネルギー源に対する需要も高まってきている。例えば日常生活においては非常用携帯型発電機や分散発電システム、航空宇宙分野においては災害時の情報収集のための小型無人機の推進機関や旅客機の補助動力装置など、小型軽量で高出力のエネルギー源が期待される状況は至る所に存在する。熱機関は、バッテリーなどのエネルギー機器に比べて、単位体積あるいは単位重量あたりの出力及びエネルギー密度が極めて高いため、小型軽量であることが求められる用途において、その利用が期待されている。

しかし現状として、そのような小型熱機関には様々な問題がある。そのひとつとして、小型化に伴って熱損失や粘性損失等が増大し、要素効率が低下することが挙げられる。特に圧縮機やタービンについては、小型化に伴う効率低下が顕著であり、その解決が求められる。

これを解決する候補のひとつとして層流摩擦ポンプが挙げられる(図1)。これは、薄いドーナツ状のディスクを一定の間隔で並べた構造を持つロータを回転させると、ディスク間にある流体が粘性によって周方向に旋回し、これによって生じる遠心力によって半径方向にも流速が誘起された結果、流体を内径側から吸込み、外周側へと送り出すポンプとして作動するデバイスである。従来の翼列機械においては、流体粘性は損失を生むだけであるが、層流摩擦ポンプは粘性力を用いて流体の圧縮膨張を行うことから、適切な設計が得られれば、小型で高効率の流体機械を構築できると期待できる。理論的には、ディスク間の間隔を、回転円盤表面に発生する速度境界層の厚みに応じて定めれば、その効率はディスク直径に依存しないことが示されている。また、過去に行ったロータ部分を対象にした数値流体解析によると、ロータ直径を40mmから4mmに縮小した場合でも有意な効率低下が全く認められなかったことから、層流摩擦ポンプが小型流体機械として極めて有望であるといえる。

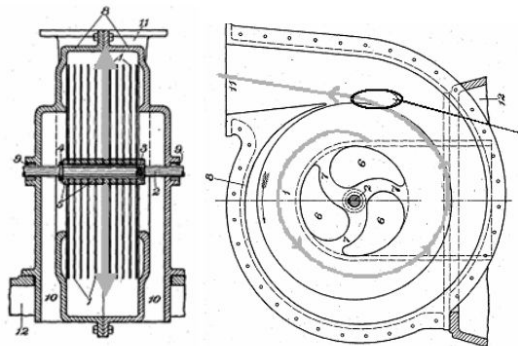


図1 層流摩擦ポンプ

(Tesla N., "Fluid Propulsion", US Patent, no. 1061142, 1913)

2. 研究の目的

層流摩擦ポンプの発明は1913年と古いものの、いまだ実用には至っていない。その原因のひとつは、理論から導き出されるロータ効率は80%以上であるのに対して、実際に実験で計測された効率は30%以下と低く、その原因について議論が不足していることが挙げられる。

そこで本研究では、層流摩擦ポンプの効率低下が起こる原因を特定し、それを解消する対策を導入しつつ、超小型ポンプとしての有用性を示すことを研究目的とする。

3. 研究の方法

事前に実施した数値流体解析の結果を参考に、ロータ直径80mmの層流摩擦ポンプを試作し、これを用いて実験を行う。そして、性能改善に効果があると考えられる回転絞り流路を導入し、オリジナル形状のものと比較しつつ、その効果を明らかにする。

最後に、さらに小型の層流摩擦ポンプを、3Dプリンタを利用して試作し、その可能性について検討する。

4. 研究成果

図2に、本研究で試作した層流摩擦ポンプのうち、オリジナル形状として設計したものを示す。ロータ外側の構造については、いくつか候補があったが、事前に行った数値流体解析の結果から、平行ディフューザとスクロールを組み合わせた構造を採用した。

この試作機形状について、事前の数値流体解析によって得られた結果を図3に示す。この図には、ロータのみを理想的な状態で運転した場合()、装置全体を解析した場合のロータ出口()、ディフューザ出口()、スクロール出口()での状態量を元に計算した効率を示している。この図を見ると分かる通り、ディフューザ内部で大きな損失が

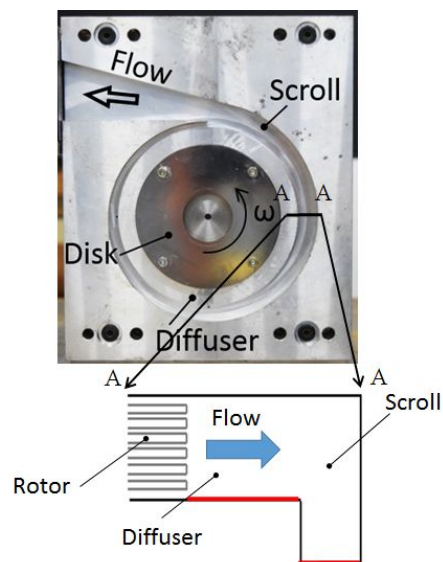


図2 試作機(オリジナル形状)

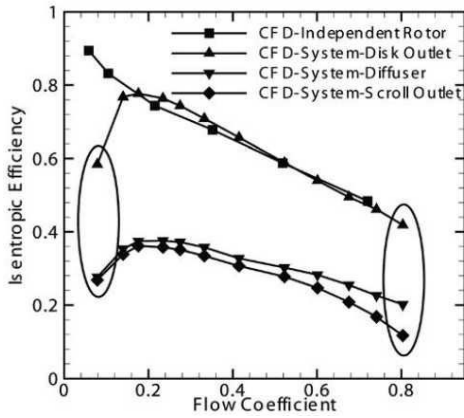


図3 各部効率 (数値解析結果)

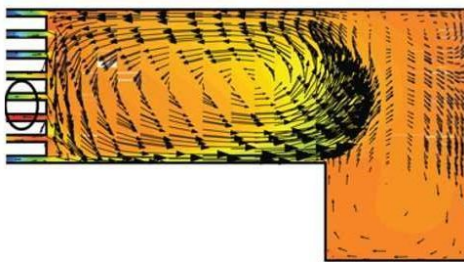


図4 ディフューザ部流れ場例

発生している。また、ロータの効率は、流量係数が0.2以上の条件下では、理想的な状態とほぼ同じ効率であることが分かる。その一方で、本来であれば高いロータ効率が期待される低流量係数での運転の場合、装置全体の解析結果ではディフューザでの損失が大きだけでなく、ロータ効率も下がることが示唆されている。これは、流量係数が低い場合は、ロータ出口での流出角がほとんど接線方向に向いているため、ディフューザが適切に機能せず、大規模な循環領域を伴う逆流が発生し、その影響がロータにまで及んでいるためであると考えられた(図4)。

そこで本研究では、低流量時のロータ出口流出角を半径方向に向けることによって、ディフューザの作動を改善できると考え、回転絞り流路を導入することにした(図5)。これは、ロータと共に回転する流路であり、流路幅を絞ることによって、ロータ半径方向流速を高め、流出方向を外側に向けることを意図したものである。なお、回転絞り流路を備えたものは、平行ディフューザは備えず、直接スクロールに流出する構造とした。なお、この場合のスクロールについては、回転絞り流路によって理想的に半径方向速度が加速したと仮定し、その速度変化に応じて設計した。

以上のようにして設計した試作機について、まず作動特性として圧力係数と流量係数を計測した結果を図6に示す。これを見ると分かるように、流量係数0.4を境に、流量係数が小さい条件では、回転絞り流路を装着したほうが高い圧力係数を達成している。これ

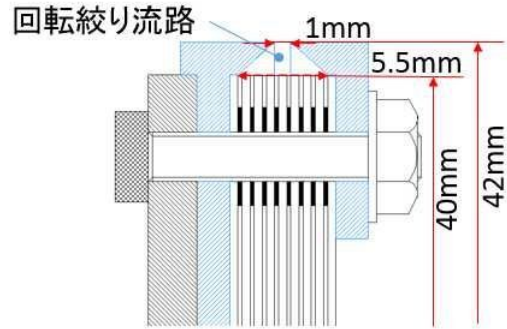


図5 回転絞り流路

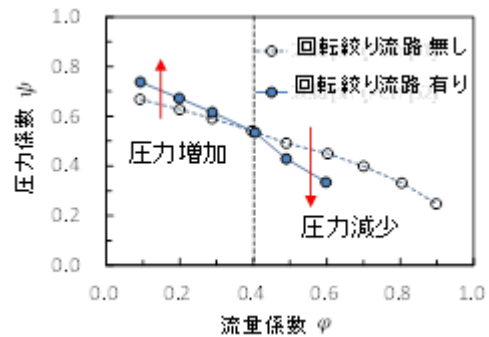


図6 作動特性 (流量係数 - 圧力係数)

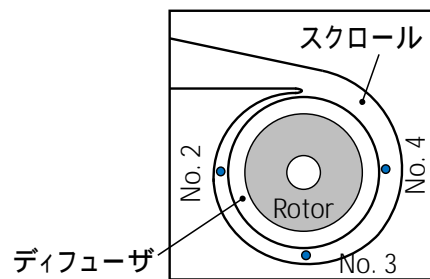


図7 タフト法計測位置

は、流量係数が低い場合には、流出角改善の効果及び回転絞り流路そのものも仕事することによって、高い圧力係数となっていると考えられる。逆に高流量係数の場合は、回転絞り流路によって加速したことによる摩擦損失の増大が原因となって、圧力係数が低くなったと考えられる。これについては、事前に行った数値流体解析からも、同様の傾向が得られている。

次に、ディフューザ及びスクロール内部の流れを観察した。まず、流れの向きの計測が

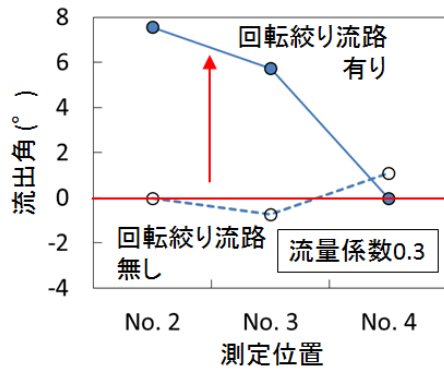


図8 タフト法計測結果
(流路幅方向平均値)

重要であることから、タフト法を用いて、図7に示す3箇所計測を行った。まずオリジナル形状について計測を行ったところ、流路幅方向について、流れが流出方向を向いている部分と、ロータに戻る逆流方向を向いている部分が存在していることが分かり、定量的には異なるものの、数値解析結果で示唆されているように、大規模な循環構造が生じていることが読み取れた。そして、流路幅方向の平均流出角について、回転絞り流路を備えたものと比較したところ、計測位置 No.2 と 3 においては、流出角が改善したことが確認されたのに対し、No.4 においては、ほとんど効果が得られていないことが分かった(図8)。

タフト法では、上記3箇所での計測しか実施できなかったため、上記のような結果が生じた理由について知ることはできない。そこで、油膜法及び湯点法での流れ場可視化を追加で行い、壁付近の情報のみではあるものの、周方向にどのような流動構造になっているのかを詳細に観察することにした。

まずオリジナル形状について油膜法で可視化したところ、ディフューザ下面においては、全周にわたって逆流が生じていることが分かり、先のタフト法で得られた結果と一致していることが確認された(図9)。

一方、回転絞り流路有りの場合について、油点法の結果を見ると、写真上向きを0度として反時計回りに角度を定めた場合、0-270度の範囲においては、わずかに外向きの流れ方向を維持しているのに対して、270度を超えると流れが逆流方向に向き(図10, A部)、その後、壁から剥離している様子が見て取れた(図10, B部)。また同様に、180度以降において、ロータに近い側の油点列では速度が速く、外側においては速度が非常に遅いことも観察された。以上のことから、流量係数が小さい場合においても、スクロール部での逆流は防止できているものの、スクロールが適切に機能していないことが示唆された。

ロータ単体で流出角を計測した場合は、回転絞り流路で流路面積を絞ったことによって幾何学的に予想される流出角になることが、別途確かめられている。このことから、

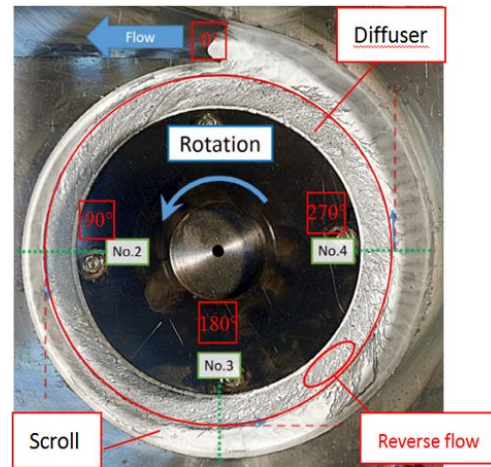


図9 油膜法結果
(オリジナル形状, 流量係数 0.1)

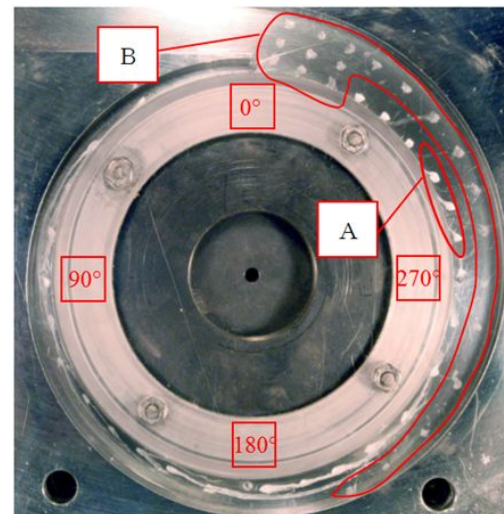


図10 油点法結果
(回転絞り流路有り, 流量係数 0.1)

上記のような流れ場になったのは、スクロールと回転絞り流路の設計が、うまく適合していないことが原因と考えられる。スクロールの設計は、従来の遠心圧縮機に使われるスクロールの設計法を参考に行ったが、通常の遠心圧縮機に比べて、流出角が極めて接線方向に近いため、従来の設計法では適切に作動しないことが示唆された。また、舌部周辺の流れ場についても影響があることが示唆された。

とはいえ、オリジナル形状である平行ディフューザとスクロールの組み合わせに比べると、回転絞り流路の導入によって、ロータを出た後の流れ場における逆流が抑制されていることは確かであることから、一定の効果が期待できると結論付けられる。

最後に、さらに小型の層流摩擦ポンプの実

用化に向けた検討を行った。更なる小型化に伴い、薄肉ディスクをこれまでのように一枚ずつ組み立てていくことは、精度を保つ観点からも困難であることから、3D プリンタを用いてロータ全体を一体成形することを試みた。

上記直径 80mm ロータの設計諸元を元に、各種設計パラメタを極力そろえつつ、プリンタの積層ピッチや駆動に使うスピンドルの回転数制限などを考慮し、ロータ直径 27mm、目標回転数を 60,000rpm とした(図 11)。材質については、積層ピッチや表面精度など、3D プリンタの製造特性を考慮して、アクリル系の光硬化樹脂を選択した。

このロータについて回転試験を行い、目標回転数である 60,000rpm での運転に成功し、強度などの点で問題ないことを確認した。しかし、製造の過程において、サポート材除去の際に生じる、薄肉円盤構造部分の変形の影響が大きく、ディスク隙間を均一に保つためには、製造工程の改善が必要であることが明らかとなった。

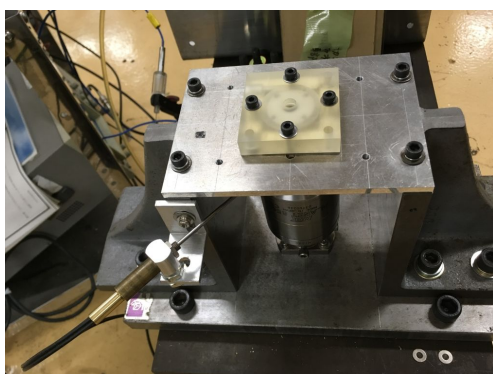
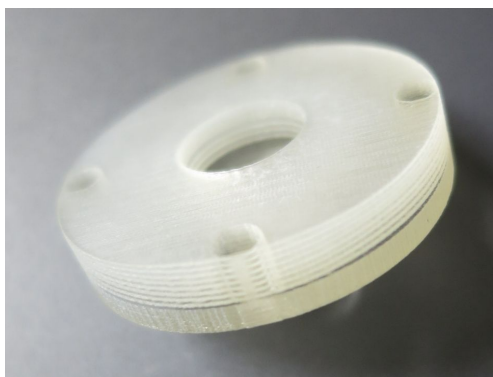


図 11 3D プリンタで製造した層流摩擦ポンプ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) 王欣, 岡本光司, 山口和夫, 寺本進(東大), “回転絞り流路が層流摩擦ポンプ内部流動に与える影響”, JSASS-2017-0081, 日本航空宇宙学会第 57 回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, 沖縄県那覇市, 2017 年 3 月 10 日
- (2) 久村太一, 岡本光司, 山口和夫, 寺本進(東大), “回転絞り流路を用いた層流摩擦ポンプの作動特性”, JSASS-2015-0050, 日本航空宇宙学会第 55 回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, 富山県富山市, 2015 年 3 月 10 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.thermo.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 光司 (OKAMOTO Koji)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：70376507

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし