

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04916

研究課題名（和文）液体用小型テスラターボマシンの実現

研究課題名（英文）Realization of small Tesla turbomachine for liquids

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：液体用ポンプとしての利用を想定したテスラターボマシンの理論解析、CFD解析、実験を行った。最初にCFD解析と理論解析の結果を比較しつつ設計パラメタの検討を行い、ロータの設計指針を得た。次に、ポンプとしての効率改善を目的として、笠形ディスクのアイデアを新たに提案し、その設計指針と効率改善効果を検討した。その結果、特に高流量時に大きな効率改善が得られることを確認した。さらに、得られた設計指針に基づいて実験装置を新たに製作した。実験の結果、装置全体で最大約22%の圧縮効率及び、PIVを用いたディフューザースクロール内部の2次元流速場可視化計測を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究成果によって、液体用テスラポンプのロータの最適設計指針、笠形ディスク導入による効率改善、損失低減のカギを握るディフューザースクロール内部の流速場の可視化を達成した。これにより、テスラポンプの先行研究で問題となっていた、実機の効率の低さを解決するための足掛かりが得られたと言え、これらの成果は今後、より高効率なテスラポンプの実現に向けて、非常に有用であると期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, theoretical, numerical, and experimental investigations were carried out for a Tesla turbo machine utilized as a pump for liquid. First, we discuss the design parameters by comparing the results of theoretical and CFD analyses, and the design guideline of the rotor was obtained. Then, a new idea of conical discs was proposed to improve the pump efficiency, and its design guideline and efficiency improvement were discussed. The results showed that this new idea is more effective when the flow rate is high in its operation.

After that, a new experimental test rig was built depending on the obtained design guideline. In this experiment, the maximum efficiency reached about 22% and 2D velocity field in the diffuser and scroll was visualized by Particle Image Velocimetry.

研究分野：熱流体力学

キーワード：テスラポンプ マイクロポンプ 流体粘性 流体工学 ターボマシン

1. 研究開始当初の背景

近年、自然エネルギーの利用が促進されていく中、太陽光や風力の利用に比べて、太陽熱や地熱など熱エネルギーの利用は、それほど進んでいない。しかし、これらの自然エネルギーを利用した発電システムには、それぞれ一長一短があり、ひとつの方法が将来のエネルギー供給問題を解決することは困難である。そのため、エネルギー源と利用方法を多様化し、状況や環境に応じた発電手法を選択することが、将来の自然エネルギー利用において有効であると思われる。

これは、単に地上における発電のみならず、宇宙空間における発電においても同様である。これまでの宇宙機の発電システムは、大半が太陽電池か原子力電池を利用したものであり、熱エネルギーを利用したシステムは、あくまで試作レベルのものしか運用されてこなかった。しかし、太陽電池は宇宙で利用した場合に寿命が短く性能劣化が著しいことや出力あたりの重量が大きいことが欠点として挙げられている。将来の(特に有人)長期大型ミッションにおいては、ミッション自体の長期化と同時に必要とされる電力が大幅に増加することから、太陽熱を利用した発電システムが必要とされるものと考えられる。

上記のような要求に対して求められる熱システムは、いわゆる外燃機関と呼ばれるものである。すなわち、システムに加えられる熱源が、燃焼反応による発熱ではなく、システムの外部から加えられるものであり、一般的にはその熱量は内燃機関に比べて小さい。そうしたシステムとして期待されているもののひとつに、ランキンサイクルが挙げられる。これは、作動流体の相変化(液体と気体)を利用したシステムであり、作動流体を動作温度に応じて適切に選ぶことによって、高効率期待できるシステムである。

これまでのランキンサイクルのシステムは比較的大型の物が主流であるが、上記のような利用シーンにおいて、より広く使われるようになるためには、システムの小型化が有効であると考えられる。その場合に課題となるのが、各構成要素(ポンプ、タービン、蒸発器、凝縮器)の小型化である。そのなかでも、一般的にタービンやポンプとして広く使われているターボマシンは、小型化するにつれてその効率が低下することが知られていることから、小型でも高効率なポンプやタービンを実現することが、小型ランキンサイクルの実用化の鍵のひとつであると考えられる。

上記のような背景の下、テスラターボマシン(図1)をランキンサイクルに適用する試みが、近年見られるようになってきた。テスラターボマシンは、流体の粘性力を利用して流体を圧縮・膨張させるターボ機械である。これは、ポンプとして利用する場合、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流体デバイスである。タービンの場合はこの逆で、ディスク外周より、流体を周方向に吹きこむことによって、流体はディスク間を内周側に向かって流れ、その際にディスク表面に生じた粘性力によってディスクが回転する。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、テスラターボマシン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されている。

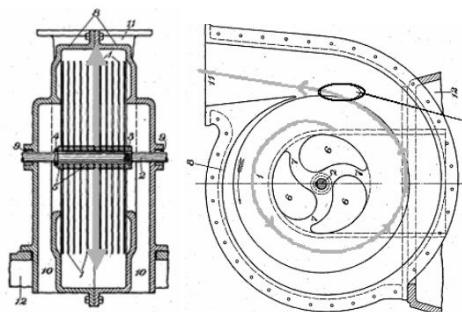


図1 テスラターボマシン

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

2. 研究の目的

これまでに申請者が行った先行研究の結果によると、テスラターボマシンをポンプとして利用する場合(以下、テスラポンプと呼ぶことにする)、高効率化のカギとなるのは、ロータ効率を高く保ちつつ、ロータを出た後のディフューザ及びスクロール内部の損失を抑えることである。また、ロータ部分の設計においては、エックマン数(以下 Ek 数)と呼ばれる無次元数を最適な値にすることがポイントである。しかし、ランキンサイクルにおけるポンプは液体が作動流体であるのに対して、先行研究では空気を作動流体として想定していたため、先行研究で得られた知見が、液体が作動流体の場合でも適用可能かどうかを確認する必要がある。

以上のことから本研究では、

- (1) 液体用テスラポンプのロータ最適設計指針の検討
- (2) ポンプ効率改善のための設計案の提案と効率改善の評価
- (3) 実験によるテスラポンプの性能試験及びディフューザスクロール内部の流れ場計測を目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、Ekman-Couette 流れ(回転円盤の表面上に形成される流れ場)に基づいた理論解析、CFD 解析、実験を組み合わせながら研究を進める。まず目的(1)においては、理論解析結果を CFD 解析結果に基づいて比較検証しつつ、設計指針を確認する。CFD 解析による検討は高い精度が期待できる反面、解析に時間がかかるため、広範囲なパラメトリックスタディが難しい。そのため、CFD 解析結果と理論解析結果を比較することによって、理論解析結果の妥当性を確認しつつ、各設計パラメタ及び作動条件が効率に与える影響を議論することにする。目的(2)においては、効率改善の方針を提案し、その改善効果を CFD 解析及び(1)で用いた理論解析手法を拡張した解析によって議論する。目的(3)においては、ポンプ性能の計測に加えて、ディフューザ及びスクロール内部の流速場を可視化計測できるような実験装置を製作し、その流速場計測を可能にするためのノウハウを得ることとした。

4. 研究成果

(1) 液体用テスラポンプのロータ最適設計指針の検討

まずロータ部分の最適設計を議論するために、Ekman-Couette 流れに基づいた理論解析手法による解析結果と CFD 解析結果を比較しつつ、設計パラメタの検討を行った。先行研究によると、テスラターボマシンのロータ効率は、流量係数、ディスクの内外径比、及び Ek 数と呼ばれる無次元数に依存しているとされている。ここで Ek 数とは、ディスク間に形成される流れ場が Ekman-Couette 流れであることを想定した場合の、ディスク間隔と速度境界層厚さの比率で定義される無次元数である。

ディスクの内外径比を固定し、作動流体を水と想定したうえで、理論解析手法を用いてパラメトリックスタディを行ったところ、いずれの流量係数においても、Ek 数が 1.1 付近となる条件下でロータ効率は最大となることが分かった。これは、先行研究において空気を作動流体とした場合と同じ結果であることから、この傾向に関しては作動流体が液体か気体かで違いは現れないことが分かった。

一方、CFD 解析と理論解析結果を比較したところ、流量係数が大きい(すなわちロータ流出角が大きい)場合に、理論解析結果と CFD 解析結果の乖離が大きくなることが分かった。加えて、この傾向は Ek 数が大きい場合に顕著になることが分かった(図2)。この傾向の理由としては、流れの助走区間の影響であることが推察された。すなわち、理論解析においては十分に発達した流れ場である Ekman-Couette 流れであることが前提とされているのに対して、実際のテスラターボマシンのロータ内部流れにおいては、ディスク入口付近において速度境界層が発達し始める部分、すなわち助走区間があり、流量係数が大きいほどその領域が占める割合が大きくなるため、結果的に理論解析で想定している流れ場との差が大きくなってしまいうことが理由であることが指摘された。とはいえ、ロータ効率が比較的高く保たれる流量係数(0.04 以下)及び流出角(5°以下)の条件下においては、Ek 数が 1.1 付近でロータ効率最大という前述の傾向には変わりがないことが確認できた。一方、流出角が 5°以上となる高流量係数の運転条件下では Ek 数の最適値が 1.5 付近になることが示されたが、その場合はロータ効率が 60%以下と低くなってしまったため、本研究では検討の対象外とすることとした。

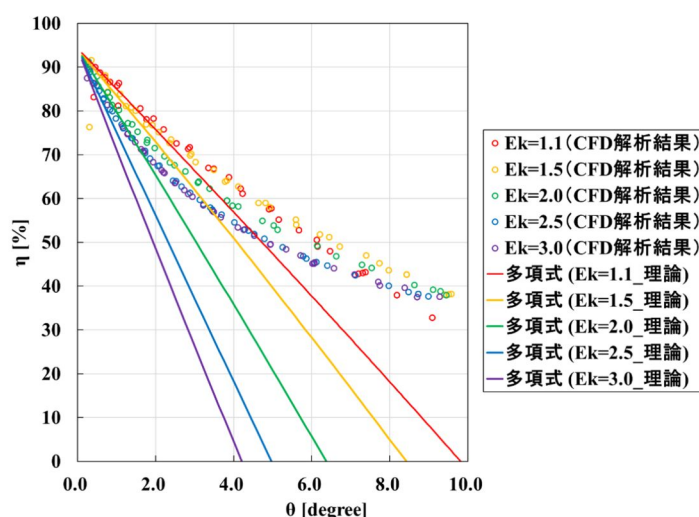


図2 ロータ効率と流出角, Ek 数の関係

(2) ポンプ効率改善のための設計案の提案と効率改善の評価

申請者の先行研究より、テスラポンプの効率改善において、ロータ効率改善とディフューザースクロール内損失抑制が相反することが分かっている。すなわち、ロータ効率を高く保つために

は流量係数を低く保つ、すなわちロータ流出角を小さく保つ必要がある一方、ロータ流出角が小さい場合にはディフューザースクロール内部での流線の長さが長くなるうえ 2 次流れが起きやすくなってしまいうために、粘性損失が大きくなってしまいうことが問題であり、これらは相反する傾向であるために、高効率維持できないという特性がある。

これを解決するために、申請者らはこれまでいくつかの改善案を提案してきたが、本研究ではロータディスク形状の変更を提案した。オリジナルのテスラポンプは平板状のディスクで構成されているが、今回の改善案では笠形のディスクを採用することによって、効率の改善を試みた(図3)。まず、ロータ設計の検討を行うにあたって、ディスク間隔が半径方向に変化することを考慮した理論解析手法を構築したうえで、各設計パラメタの影響を議論した。その結果、内外径比を固定した場合、ディスク外周部における Ek 数を 1.1 とした場合に最適であり、その場合に内径側のディスク間隔を外径側の 1.7 倍とすればよいことが分かった。そして、平板ディスクと比較したところ、高流量時において大きなロータ効率改善が得られることが分かった。

このようにして得られた設計形状を対象に、ディフューザースクロールまで含めた CFD 解析を行ったところ、平板ディスクの場合と比べて、高流量時のポンプ全体効率の改善が認められただけでなく、効率最大となる流量係数が増大し、ポンプ全体効率の最大値も増加したことが確認できた(図4)。

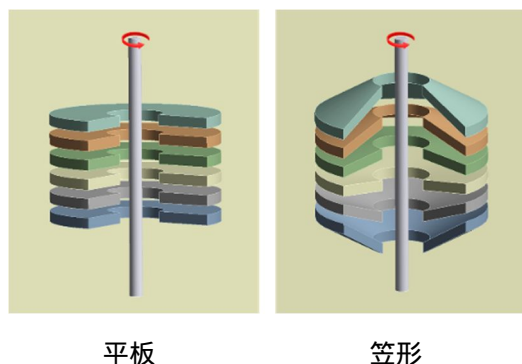


図3 平板ディスクと笠形ディスク

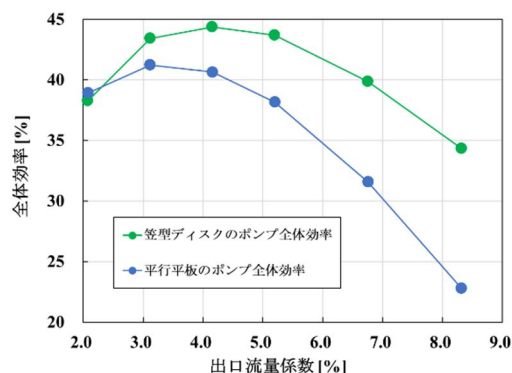


図4 笠形ディスクによるポンプ全体効率の改善

(3) 実験によるテスラポンプの性能試験及びディフューザースクロール内部の流れ場計測

本研究では、水を作動流体としたテスラポンプを作製し、その性能を評価することとした。加えて、先に述べたように、ディフューザースクロール内部における損失をいかに抑えるかが重要であることから、実験によってディフューザースクロール内部の流れ場を計測できるようにすることを旨とした。

まず、前述の解析によって得られた設計形状を参考にポンプ本体を設計した。作動流体を水としたため、全体として閉ループとなるような構成とし、流量や圧力、ロータの駆動トルクを計測して、ポンプ効率を算出できるようにした。さらに、ディフューザースクロール内部の計測手法として PIV (Particle Image Velocimetry) による流速計測を行うこととし、ロータ外周方向からレーザーシート光を入射させ、回転軸方向からハイスピードカメラで粒子の散乱光を撮影することとした(図5)。

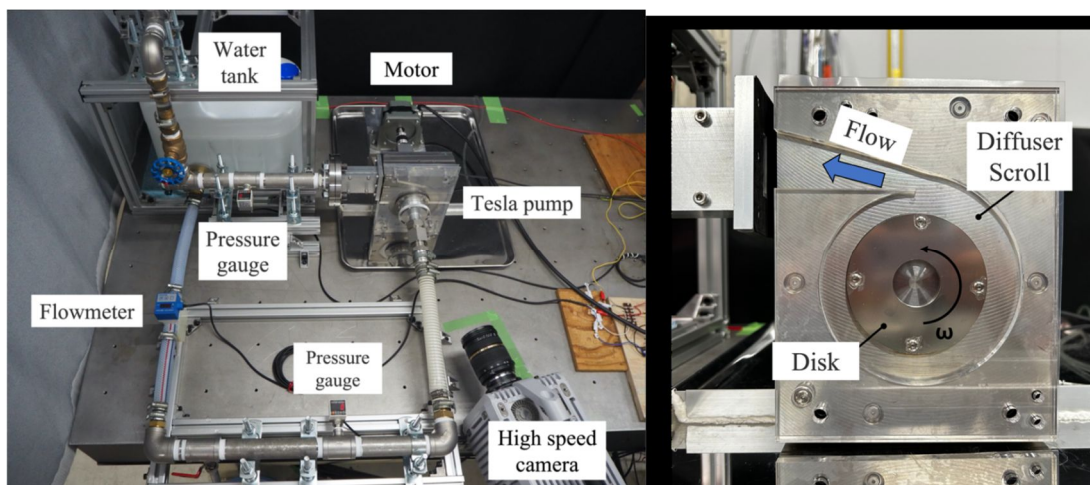


図5 テスラポンプ実験装置

まずポンプの作動特性を調べたところ、一般的なポンプと同様に流量と揚程及び軸動力の関係は線形な関係にあることが分かった。そして効率を計測したところ、前述の理論解析やCFD解析の結果と同様に、Ek数が1.1~1.2となる条件下で効率が最大値となることが確認された。また、流量係数との関係を見たところ、流量係数が0.4付近で効率最大となることが分かり、申請者の先行研究の解析結果と定性的に同じ傾向を示していることが確認された(図6)。

最後にPIVによるディフューザスクロール内部の流速場の計測を試みた。PIV計測においては、撮影条件を適切に設定することが計測の妥当性を確保するために重要である。当初、一般的に推奨されている撮影条件で計測を試みたが、2画像間の相関が取りづらく誤検出が多くなり、適切ではないことが分かった。そこで、通常よりもフレームレートを高くして、計測精度よりも検出率の高さを優先したところ、妥当と思われる流速場の計測が可能となった(図7)。これは、流れ場構造の3次元性に起因するものと推察された。また、計測された流速場を見ると、解析で予想されていた強い旋回流が発生していることが観察でき、これが従来の翼列機械との大きな違いとなっていることが実験的にも確認された。

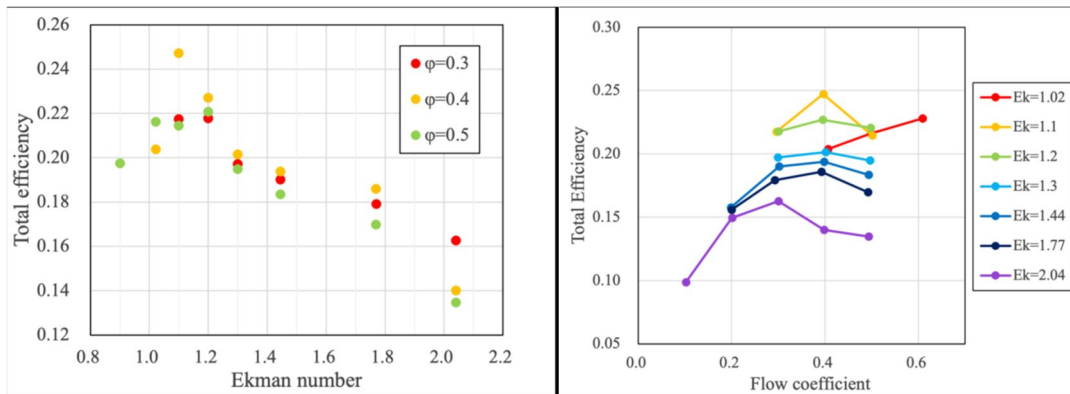


図6 計測結果 (左: Ek 数と効率の関係, 右: 流量係数と効率の関係)

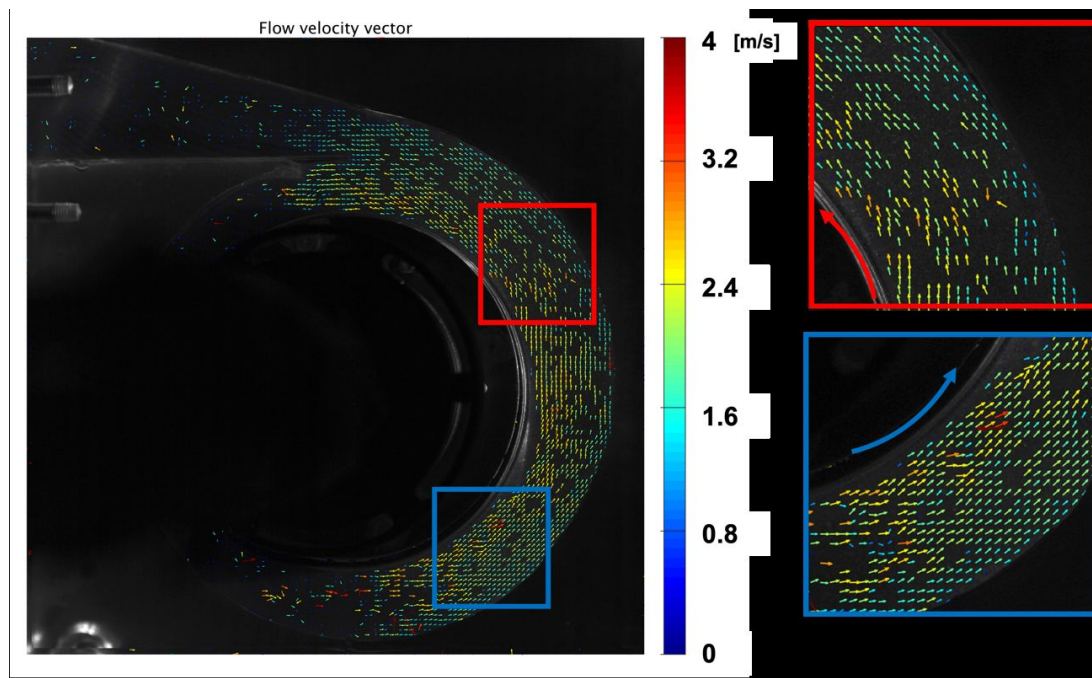


図7 PIV 計測結果

(4) まとめ

本研究では、液体用テスラポンプを対象に、まずロータ部の設計検討を、理論解析とCFD解析を組み合わせて実施し、その最適設計の指針を得た。次に、テスラポンプの効率改善の方策として笠形ディスクの採用を提案し、その効率改善効果を、拡張した理論解析手法とCFD解析を用いて確認した。最後に、実験によるテスラポンプ性能試験及びディフューザスクロール内部のPIV計測を実施した。ポンプ効率が前述の解析結果と整合性のある傾向を示していることを確認し、さらにPIV計測によってディフューザスクロール内部の流速場の特徴が捉えられていることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Sugimoto, H., Xie, Z., Okamoto, K., and Teramoto, S.
2. 発表標題 Experimental study on the operating characteristics of Tesla pump designed for liquid
3. 学会等名 Asian Joint Conference on Propulsion & Power 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okamoto K., Nakamura, J., Yamaguchi, K., and Teramoto, S.
2. 発表標題 Experimental Study on Efficiency Enhancement of Tesla Turbine by Cascade Addition
3. 学会等名 International Symposium on Air Breathing Engine 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉田彩司, 岡本光司, 寺本進
2. 発表標題 笠型ディスクを用いたテスラポンプに関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------