

小型熱回生機関のためのテスラタービン性能評価を目的とした機構設計

Design of a mechanism for performance evaluation of a Tesla turbine for small-scale thermal regenerative engines.

システム工学群機械系エネルギー工学専攻

材料革新サステナブルテクノロジー研究室 長尾 優輝

1. 緒言

我々人類は生活を豊かにするため、産業革命における蒸気機関の発明から今日に至るまで熱エネルギーを機械的仕事に変換し、利用してきた。しかし、人類は生活の利便性を向上させた一方、エネルギーを生成する過程で発生する有害物質、例えばガソリンを燃焼させることで発生する二酸化炭素などの影響で地球温暖化を進行させてしまうなど、地球環境に悪影響を及ぼしてしまった。人類の発展と地球環境の維持・改善を両立するためには、エネルギーロスを減らし、環境に配慮したエネルギー獲得手段の開発が必要不可欠になる。しかし、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センターの産業分野の排熱実態調査報告書⁽¹⁾によると、2015年度の第一種及び第二種エネルギー管理工場の全国推定未利用熱量は年間 743 ペタジュール (PJ/year) と推定されて、特に 200℃未満の排ガス熱量は全体の 75%近くを占めることが報告されて、低温度排熱の有効活用ができていないのが現状である。そこで本研究では工場などで発生する排熱とテスラタービンを組み合わせた新たな動力源の開発を目標に研究を行っている。本研究ではテスラタービンの円板の数と動作に必要な流量の関係を調べ、円板の数とトルクの関係について考察する。

2. 目的

本研究の最終目標は、テスラタービンを用いた小型排熱回生システムの構築である。先行研究⁽²⁾では、テスラタービンの筐体温度・導入流量・ミストの有無で回転速度の変化を調査した。しかし、テスラタービンの流入口の大きさや筐体・円板の大きさなど構造変化が回転速度に与える影響については十分に検討されていない。そこで本実験では、本体の筐体の長さを可変にして流入口の幅と回転速度の関係を調査することが目的とした。

3. テスラタービンとは

エネルギーを回収するための回転機構を開発するにあたり、ニコラ・テスラ氏が発明したテスラタービンに着目した。テスラタービンとは、円板を層状に組み合わせた構造を有するタービンであり、流体の粘性と円板との間に生じる摩擦力を利用して回転する仕組みとなっている。従来の翼を用いたタービンに比べ構成部品が少なくシンプルな構造であるため、製造やメンテナンスが容易であり小型化しやすいという特徴から、製造コストを抑えつつ工場の至る所で発生する排熱・排ガスを利用したエネルギー回収が期待できる。また蒸気、液体、気体と液体が混在する気液混相流など幅広い流体に対応できるため、様々なシチュエーションでの起用も見込める。

4. 装置構造について

本実験で製作した装置系全体を図1に、装置の断面を図2に示す。これらは先行研究⁽²⁾を参考に設計したものである。

製作した装置の構造について、部品ごとに説明する。まず、回転軸系は、ベアリングを固定するための金具、中心軸、円板、円板間の隙間を確保するためのワッシャーで構成されている。ベアリング部分は、ネジ切りされた軸とリングをネジで締結し、ベアリングを上下から挟むことで軸に固定する構造となっている。

円板の寸法は直径 46 mm、厚さ 1 mm であり、中央部には流体の排出口と軸穴が加工されている。材料はアルミニウム合金 A5052 を採用した。ワッシャーの詳細寸法は内径 10 mm、外径 12 mm、厚さ 0.5 mm である。

円板間の隙間を固定した状態で、円板の枚数と回転速度の関係を調査するため、流体供給用の筐体は複数のユニットを組み合わせて構成する仕様とした。この仕様により、構造変更はユニットのみでの入れ替えで対応可能となり、装置自体を交換する必要がない。

図3～図6は、本装置の各ユニットを示している。

図3に示すユニットは、排気口に円筒を設けており、パイプの接続が可能である。この構造により、排気口から排出される流体の流量測定が期待できる。

図4のユニットでは、外側に突出した円筒と、中心軸系の円板が収まる空間との間に、先行研究と同様に流体導入時に流入口が狭くなる構造を採用している。ただし、本研究の機構では、流出口の断面積が約 2.5 mm×15 mm と小さいため、軸系に対する流体の流入速度向上は、先行研究ほどは期待できないと考えられる。図5のユニットは、図4のユニットとほぼ同様の構造であり、筐体内の円板が収まる空間の高さを調整するためのものである。

図6のユニットも、図5と同様に円板の収まる空間の高さの調整用のユニットであるが、このユニットには円板の収まる空間がなく、軸が通る穴のみが設けられている。

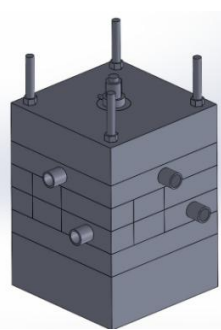


Fig.1 Entire device system

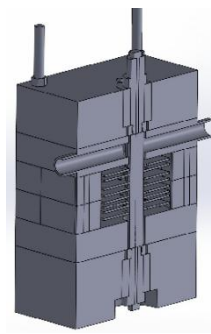


Fig.2 Cross-sectional view of the device system

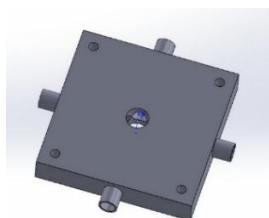


Fig.3 outlet unit

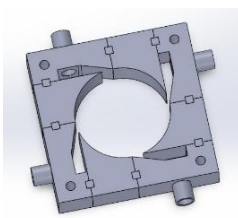


Fig.4 inlet unit

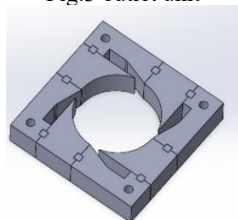


Fig.5 unit with space of disks

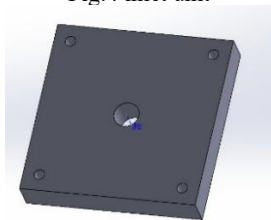


Fig.6 unit without space of disks

5. 実験方法・実験条件

ガス流入口の幅に対して回転速度がどのように変化するか調査した。流体はコンプレッサで圧縮した空気を流量計にて 20 L/min に調節し、装置内に導入した。流体の供給口は 4 つ備えられている(図 4)が、その内の 1 つだけを用いて実験を行った。他の 3 カ所の供給口は、装置内に流入した流体が逆流しない様に栓をした。回転速度を測定する実験では、市販のカメラ(SONY DSC-RX100M4)の HFR モード(960 fps)にて、1 回転あたりのフレーム数から回転速度を算出した。また、回転速度の測定直後、に 4 つある排気口のうち 3 つを塞いで残り 1 つの排気口を流量計に接続して排気口から流出した流量を測定した。

回転速度を測定する実験では、HFR(ハイレームレート)モードにて、プログラムで角速度の算出を行った。

本実験における実験系を図 7 に示す。



Fig.7 Experimental system

6. 実験結果

流入口の幅と角速度の関係を図 8 に示す。流入口の幅が 2.4 mm の時、円板の角速度は 40 rad/s であり、流入口の幅が 2.0 mm では、71 rad/s、流入口の幅が 1.6 mm では、86 rad/s と、流入口の幅を狭めていくに従い、回転速度が上昇している様子が分かる。一方、流入口の幅を 1.6~0.8 mm に狭めても、円板の回転速度はほとんど変化が見られなかった。また、流入口の幅が 0.4 mm になると、20 rad/s と急激に回転速度の低下が確認された。また、流入口の幅と排気口から出る流体の流量の関係は流入口の幅に関係なく 3 L/min 前後でほとんど変化が無かったが、流量の測定時には、円板の回転速度が明らかに低下していることを目視により確認した。

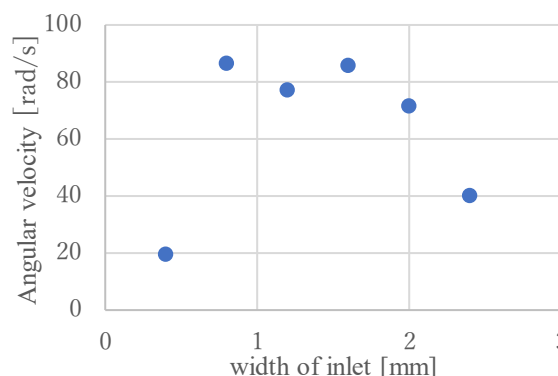


Fig.8 The relationship between the width of the inlet and the angular velocity of the disk

7. 考察

結果を纏めると、流入口の幅を狭くするに従い、回転速度の上昇が確認されるが、ある一定値を超えるとそれほど回転速度は一定となり、最終的には急激に低下するところが判った。まず、流入口の幅を狭くするに従い、回転速度の上昇が確認されるのは、勿論、供給口から流入する流量は一定であるため、流入口の幅が狭くなるほど、円板に供給される流速が速くなり、それに伴い、流体から円板に与えられる力が強くなり、回転速度が増加する。一方、ある一定値をこえると回転速度が低下したり、一定になるのは、流入口の幅が小さすぎると、流入口付近で圧力の損失が激しくなり、筐体の隙間からガスが流出するため、円板の回転速度が遅くなったと考えられる。今後は筐体の仕様を見直し、流体が漏れない様にガスケットなどを配置するなどの工夫を凝らす。また、実際にガス供給ラインと装置側の接続部からもガス漏れを確認しているため、接続方法の改善なども検討する必要がある。

8. 結言

本研究では、テスラタービンの流入口の幅と円板の回転速度の関係に関する調査として、軸系に流体を導入する流入口の流入口の幅を調整し、回転速度がどのように変化するか調査した。その結果、流入口の幅が小さいほど回転速度は大きくなるが、流入口の幅が小さすぎると回転速度が小さくなることが分かった。このうち、流入口の幅が小さすぎると回転速度が低くなるのは、流体が筐体の隙間から流出してしまうことが主要因であり、供給した流体が漏れないように装置構造を改良する必要がある事が分かった。また、円板の直径がトルクに及ぼす影響に関しても調査を行う予定である。

参考文献

- (1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター“産業分野の排熱実態調査報告書”国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2019)
- (2) 岡田裕明 “低温排熱を利用した熱エネルギー回生システムの機構設計に関する研究” 高知工科大学 修士論文(2024)
- (3) 荒木穂孝, “ライデンフロストを用いた熱エネルギー回生システムの制御基板とプログラムの作成”, 高知工科大学, 修士論文(2025)
- (4) 東京大学 寺本/岡本研究室 “テスラタービン” <http://www.thermo.t.u-tokyo.ac.jp/tesla/> (2025 年 3 月 9 日 アクセス)
- (5) 田上遼, “熱エネルギー回生を目的とした回転体に対し、機材構造と流体の物性が与える影響”, 高知工科大学, 卒業論文(2023)