

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06942

研究課題名（和文）翼列複合による小型テスラタービンの高性能化

研究課題名（英文）Performance Enhancement of Tesla Turbine by Combining a Cascade

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） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：テスラタービンは小型タービンとして期待されている流体機械の一種であるが、過去に行われた実験で計測された効率が低いことから、実用化には至っていない。申請者は、テスラタービンの効率改善の一案として、ロータ内径部に小さな翼列を付加したロータを考案し、本研究ではその実証を目的とした数値解析と実験を行った。

数値解析では、翼列の設計指針およびロータの作動特性を議論し、翼列付加による効率改善効果を明らかにした。実験では、3Dプリンタを用いた翼列複合型テスラタービンを試作し、翼列無しの場合に比べて7%程度効率が改善することを確認した。

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、申請者が考案した翼列複合型テスラタービンが、従来のテスラタービンに比べて高い効率を達成できることが明らかになった。これによって、これまでテスラタービンの問題点として挙げられてきた実機効率の低さを改善することができ、実用化に向けて一歩前進したと見え、小型発電システム等の構築に貢献できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Tesla turbine is expected as a small turbine device, but it is not used for a practical application, due to its low efficiency in experiments. The applicant devised a new Tesla turbine concept, in which the rotor efficiency is enhanced by combining a small cascade with the rotor inner radius region. In this study, numerical and experimental investigations were carried out to demonstrate this new idea.

In the numerical investigation, the design and operating characteristics of the cascade combined rotor were discussed, and the efficiency enhancement by combined cascade were clarified. In the experiment, the test rig was built using a 3D printer, and around 7% enhancement was obtained compared to the Tesla turbine without a cascade.

研究分野：熱流体力学

キーワード：テスラタービン マイクロタービン マイクロガスタービン 流体粘性 流体工学 ターボマシン 3Dプリンタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、様々な機械が小型化するに伴い、そのエネルギー源についても小型高密度化が求められている。例えば日常生活においては、公共施設における非常用発電機や災害時に重宝される携帯型発電機、そして今や一般家庭にも広がりつつある分散小型発電システムなどが挙げられる。また、航空宇宙分野においては、急速に利用が拡大しつつあるドローンや災害時の情報収集を目的とした無人航空機の推進機関、旅客機の補助動力装置などが例として挙げられる。

このような小型エネルギー源として、バッテリーや燃料電池など、様々なデバイスが検討されているが、それぞれ一長一短があり、万能なものは存在しない。様々な選択肢の中で特に熱機関は、その出力密度(出力/本体重量)およびエネルギー密度(発電量/(本体重量+燃料重量))が大きいことから、特に小型軽量であることが求められる用途において有望である。

熱機関は主に、動力を得るデバイスとしてピストンを有するものとタービンを有するものに分けられるが、特にタービンを有するデバイスは、低振動低騒音といった利点を有しており、有力な候補となっている。タービンとして一般的に使用されている翼列タービンの効率は、ロータ直径のべき乗に比例していると言われている。これは、小型化に伴って粘性損失や熱損失が増大することが原因であり、翼列機械の宿命ともいえる。

一方、本研究の対象であるテスラタービンは、ドーナツ形状の多数の薄肉ディスクを、一定の間隔を空けてシャフトに締結したロータを持っている(図1)。その隙間に対して外側から円周方向に流体を吹き込むと、その流体がディスクの間を内側に向かってせん状に流れ、これに伴ってディスク表面に流体粘性によるせん断力が発生し、これによってディスクが回転して仕事を得る。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、テスラタービンは流体の粘性力を用いて流体から仕事を取り出すことから、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。実際に、これまで申請者が行ったロータ部分を対象にしたCFD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、最適な設計を行えば有意な効率低下が認められなかったことから、テスラタービンが小型流体機械として極めて有望であると結論付けた。

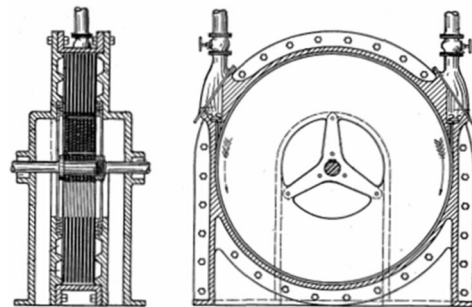


図1 テスラタービン

(Tesla, N., "Turbine", United States Patent, no. 1061206, 1913)

さらに、テスラタービンのロータ部分を対象にCFD解析を進めたところ、ロータ外径側では効率よく仕事を取り出すことができているのに対して、ロータ内径側ではうまく仕事を取り出すことができず、損失が大きいことが分かった。これは、外径側では流れの向きが円周方向に向いているため、その粘性力も円周方向に向いており、軸トルクへの寄与が大きいのに対し、内径側では必然的に流れの向きが中心方向に向かうため、流速の半径方向成分が増加し、摩擦損失ばかりが増え、軸トルクへの寄与が減ることが原因であることが分かった。そこで、この内径側の効率低下を抑えることができれば、さらに高効率のテスラタービンを実現することが可能になると考え、申請者は新たに翼列複合型テスラタービンを考案した(図2)。これは、効率の良い外周部は従来のテスラタービンと同様のディスク構造としたうえで、内径側の領域に翼列を設けることにより、効率が低下する内径側では翼列を用いて流体から仕事を取り出すことを意図したものである。

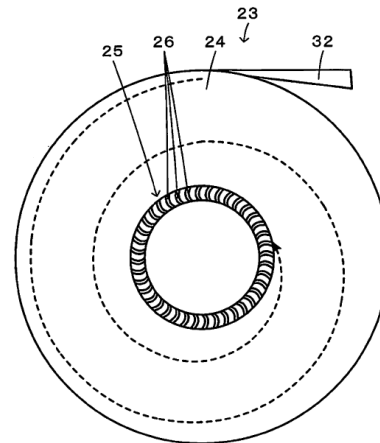


図2 翼列複合型テスラタービン

(特願 2014-042612)

2. 研究の目的

申請者が独自に考案した翼列複合型テスラタービンは、コンセプト的には効率改善が期待されるものの、未だ実物を製作・試験した例はなく、またその設計手法も不明である。そこで本研究では、翼列複合型テスラタービンの設計指針を明らかにし、翼列複合の効果を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、CFD解析と実験の両面から研究を進める。まずCFD解析においては、これまでの知見に基づいて翼形状の初期設計を行い、翼列を複合することによってロータ効率が改善することを確認する。さらに、翼枚数やコード長の影響を議論し、翼列部分の設計指針を得る。その後、ロータ入口条件によって、効率改善がどのように変化するかを調べ、翼列複合型テスラタービン

の作動特性を明らかにする．その後，翼形状の最適化に取り組む．

一方，実験においては，上記 CFD 解析によって得られ知見に基づいて設計した翼列複合ディスクを製造・運転試験を実施し，翼列無しの場合と比較することによって，翼列複合の効果を確認する．また，CFD 解析と同様に，翼枚数とコード長の影響を実験的にも明らかにする．本実験では，様々な設計の翼列複合ディスクを手軽に素早く準備するために，3D プリントを用いてディスクを製造することにした．

4．研究成果

(1) 翼形状の初期設計の検討

効率がロータ直径に依存しないというテスラタービンの利点を極力失わないために，翼列を加えることによるディスク部分の流れ場の変化を最小限にとどめることを，初期設計の基本方針とした．これは，翼列付加によって本来のテスラタービンの流れ場が大きく変化してしまうと，小型化に適しているという長所を失う可能性が高いためである．

衝動型タービンの翼形状を参考にしうえで，翼列無しの場合のテスラタービンの内部流動の解析結果に基づき，図 3 に示すような翼形状を初期設計として採用した．この設計では，仮にコード長を 2.5 mm としたうえで，翼前縁位置での流れの向きに合わせたキャンパーラインを定め，腹側背側の曲線は円錐曲線を採用した．

まず，この設計方針が適切かどうかを確かめるために，CFD 解析によって，翼列有り無しの場合の流れ場の比較を行った．その結果，翼列を付加した部分以外の領域における圧力分布及び速度分布は，両者は完全に一致することが確認でき，上記の設計指針が，翼列複合型テスラタービンの設計指針として適切であることを確認した (図 4) ．

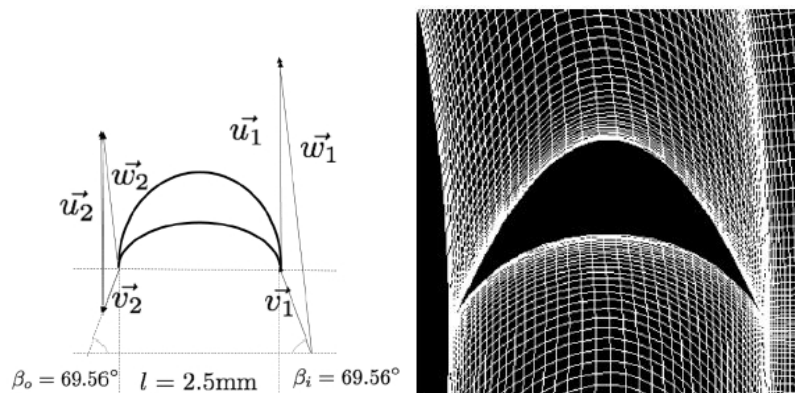


図 3 翼形状の初期設計

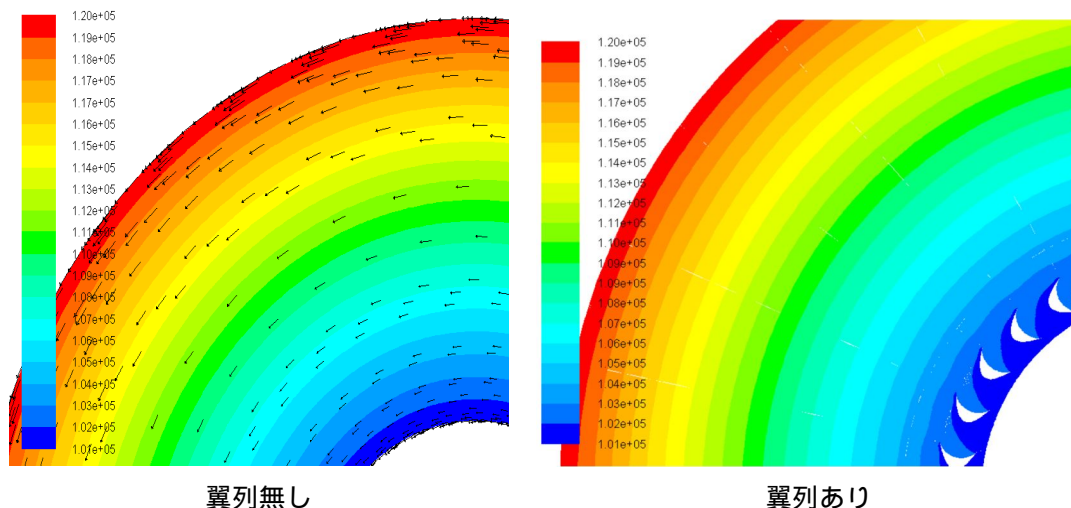


図 4 翼列の有無による内部流動の比較 (圧力分布)

(2) 翼枚数とコード長の影響について

(1) で得た翼形状の設計指針に基づいて，翼枚数とコード長の影響を，CFD 解析によって議論した．まず翼枚数について，15 枚から 60 枚の範囲で解析したところ，いずれの場合においても，翼列無しの場合に比べてロータ効率 (等エントロピー効率) に改善が見られた (図 5) ．これをさらに詳しく見ていくと，翼枚数が 30 枚程度までは効率改善が大きく見られるものの，40 枚以

上に増やしても、あまり改善が見られないことが分かった。流れ場を見る限り、流体が翼表面に沿って適切に転向しているのは翼枚数60枚の場合であるが、翼列部分で発生する粘性損失が大きくなってしまったために、タービン仕事の増加と相殺してしまっていることが理由であることが明らかとなった。

次に、コード長の影響について、2.5 mmから10 mmの範囲で解析したところ、いずれの場合も翼列無しの場合に比べてロータ効率が改善していることが分かった(図6)。ただし、ここでも、翼コード長が5 mm程度までは大きな改善がみられるものの、それ以上長くしてもほとんど改善が見られないことが分かった。この原因としては、現在の翼形状の設計手法を用いると、コード長が長くなっていくにつれてスロート部の面積が小さくなってしまい、流速が増加してしまうことによって粘性損失が増加してしまい、タービン仕事の増大と相殺してしまうことが原因であることが分かった。

以上をまとめると、

翼列複合型テスラタービンは、翼列無しの場合に比べて、一定のロータ効率改善が得られる。翼枚数及びコード長の影響については、ある程度までは効率改善が得られるものの、一定の値以上に増やしても効率の改善は得にくくなる。これらを適切に決めるには、タービン仕事の増加と翼列領域の粘性損失の増加のバランスを考慮する必要がある。

ということが分かった。特に については、スケール効果が表れると考えられることから、現在のロータ直径(80 mm)と異なる場合には、注意する必要があることが示唆された。

(3) 運転状態の影響

次に、入口条件が設計点状態から変化した場合に、翼列複合型テスラタービンがどのような特性を示すかについて、CFD 解析によって議論した。ここでは特に、流量係数の影響に注目し、解析を行った。その結果、最大効率そのものは、従来のテスラタービンと同様に、流量係数が低い時に得られるものの、翼列付加による効率の改善は、流量係数が大きい時に大きく得られることが分かった。これは、ロータ全体の効率としては、ディスク部分の影響が支配的であること、そして流量係数が大きくなると、従来のテスラタービンでは吸収できない半径方向の運動量が大きくなるために、翼列付加によって、より多くのタービン仕事を得られることが原因と考えられた。

(4) 翼形状の最適化について

(1)に示した翼形状の初期設計においては、衝動型タービンの翼設計を参考に、翼の初期形状を得たが、(2)の結果を見ると、流体の運動エネルギーを最大限取り出せているとは言い難かった。これは、衝動型タービンは一般的に軸流型であるのに対して、本研究のロータは遠心型であることが原因であると推察された。そこで翼形状の設計を再検討したところ、衝動型ではなく増速型の翼形状を採用した場合、流体がより大きく増速して、さらに多くのタービン仕事を得られることが分かった(図7)。また、ロータ効率としては、衝動型に比べて1.7%程度改善することが確認された。

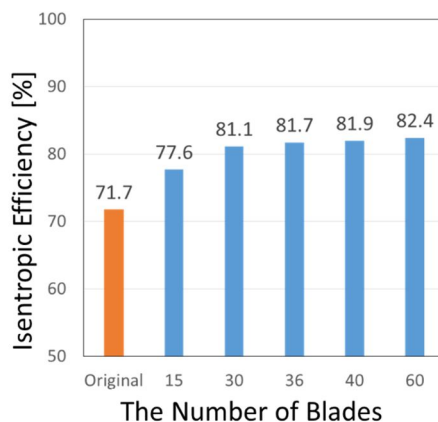


図5 ロータ効率(翼枚数の影響)

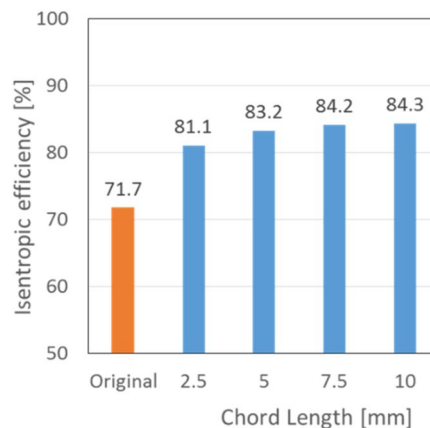


図6 ロータ効率(コード長の影響)

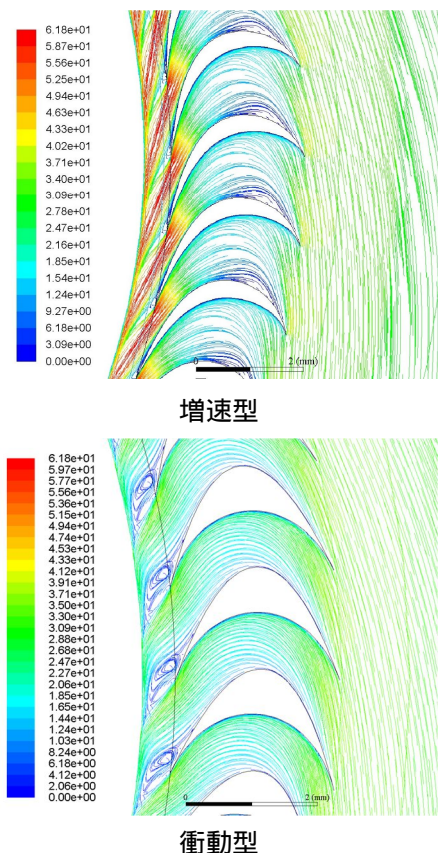


図7 翼形状の影響(相対流速分布)

(5)実験

実験においては、これまで試験を行ってきたテスラタービン試験機を用いて、翼列複合型テスラタービンの作動試験を行い、従来型に対してどの程度効率が改善するかを調べた。ここでは、様々な翼列を試験するために、3Dプリンタを用いてディスクを製造した(図8)。そして、翼列無しのディスクに加えて、翼枚数と翼コード長の異なる6種類のディスクを製造し、運転試験を行った。なお、実験で計測される効率は装置全体の効率であるため、数値解析で評価しているロータ効率とは異なるものであることに留意する必要がある。

まず異なる翼枚数の場合について比較したところ、同一の圧力比の運転条件下において、いずれの場合も、翼列無しの場合に対して3 - 6%程度の効率改善が確認された(図9)。また、翼枚数については30枚の場合が最も効率が高く、45枚の場合は30枚の場合よりも効率が低下することが分かった。一方、コード長の影響についてみてみると、同様にいずれの場合も、翼列無しの場合に比べて高い効率を示しており、コード長5mmの場合に最大7%程度の効率改善が確認された。また、コード長7.5mmの場合は、5mmの場合とほぼ同じ効率を示しており、改善の効果が得られていないことも分かった。

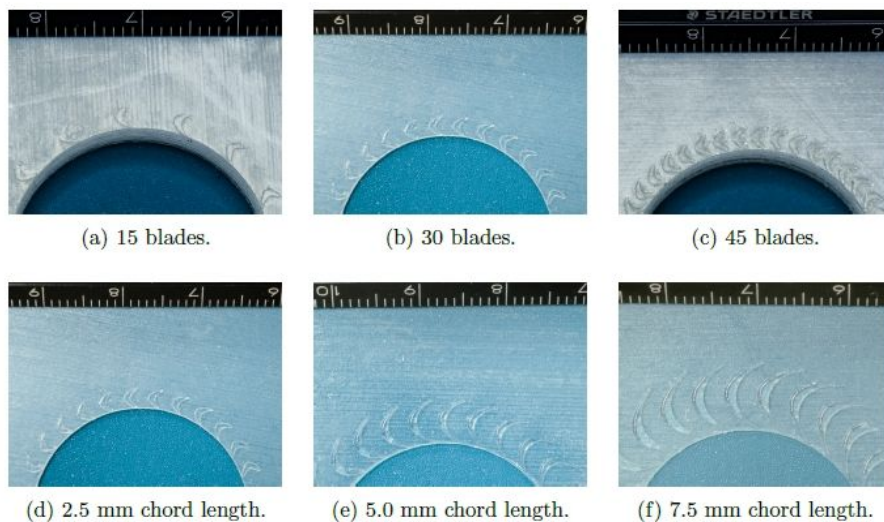


図8 3Dプリンタ製翼列複合テスラタービンディスク

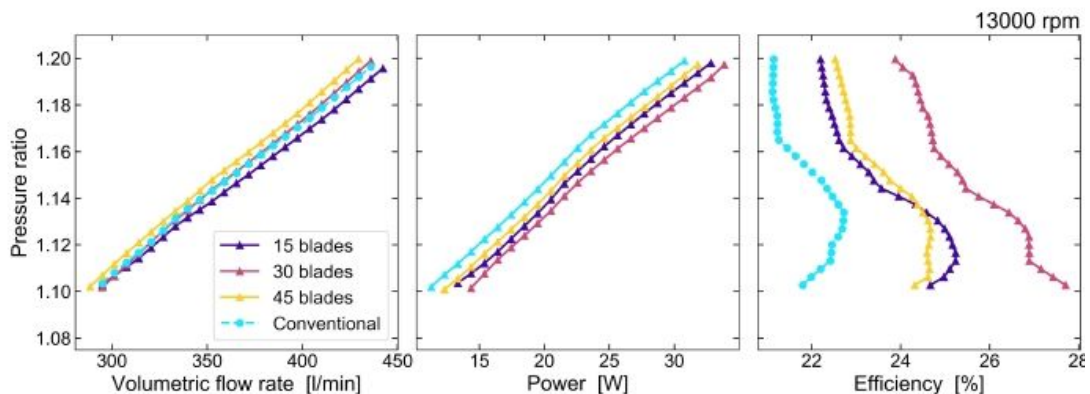


図9 テスラタービン効率(実験)

(6)まとめ

本研究では、申請者が考案した翼列複合型テスラタービンを対象に、CFD解析と実験の両面から、設計指針の検討と、その効率改善効果を確認した。CFD解析の結果により、翼列部分の設計指針と効率改善の効果についての知見を得ることができた。次に、その知見に基づいて設計したテスラタービンを、3Dプリンタを用いて製造し、翼列複合による効率改善を実験的にも確認した。これらの結果より、申請者が考案した翼列複合のアイデアは、テスラタービンに効率改善をもたらすことが確認でき、テスラタービンの実用化と高性能化に貢献できることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Okamoto, K., Nishimura, S., Teramoto, S., and Yamaguchi, K.
2. 発表標題 Investigation on Performance Improvement of a Tesla Turbine combined with a Cascade
3. 学会等名 International Symposium on Air Breathing Engine 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okamoto, K., Miyanabe, K., Teramoto, S.
2. 発表標題 Improvement of Tesla Turbine Rotor Efficiency by Combining a Cascade
3. 学会等名 Sustainable PolyEnergy generation and HaRvesting Conference '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田圭一郎, 岡本光司, 寺本進
2. 発表標題 翼列複合型テスラタービンの翼列形状検討に関する数値解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第59回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okamoto, K., Goto, K., Teramoto, S., and Yamaguchi, K.
2. 発表標題 Experimental Investigation of Inflow Condition Effects on Tesla Turbine Performance
3. 学会等名 International Symposium on Air Breathing Engine 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nishimura, S., Okamoto, K., Teramoto, S.
2. 発表標題 Numerical Investigation of Novel Tesla Turbine Concept Combined with a Cascade
3. 学会等名 Asian Joint Conference on Propulsion & Power 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----