

氏名（本籍）	村上 信博（秋田県）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	工博甲第228号
学位授与の日付	平成28年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学資源学研究科・生産・建設工学専攻
学位論文題名	スパイラルマグナス風車におけるフィン付回転円柱翼のメカニズム解明と性能向上に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 中村雅英 (副査) 教授 田子 真 (副査) 教授 三島 望 (副査) 教授 足立高弘 (副査) 学外審査委員 長谷川裕晃

論文内容の要旨

マグナス風車は、広く実用化されているプロペラ型風車と比較して、得られる発電効率の高さから、非常に注目されている。事業性としても小型で高性能及び静粛性に利点があり居住区域の近くなど広範囲に建設が可能になり送電やメンテナンスにも優位性がある。マグナス風車は、通常の翼の代わりに回転円柱を配置し、それを回転（自転）させ発生する揚力によりロータを回転（公転）させ発電する風車である。しかし、円柱を回転させるための自己消費電力（総発電量の約8%）が必要となることから、より空力性能を向上させ、風車の性能が向上できれば、自然エネルギーの有効利用が大きく加速することになる。マグナス風車は、風車の翼が円柱形状であり、その揚力が大きいほど発電性能は高くなる。2004年に、その翼にあたる円柱にスパイラル状のフィンを付加することで大幅に性能向上する発明がなされ、特許を申請後、製品化及び事業化を進めてきている。スパイラルマグナス風車は、翼が低風速域から高揚力を得られることと、脈動などの急速な風速変動下でも安定的な出力特性を持ち「受風面積 200 m²未満」の小型風車でも比較的高い累積発電量を得られることが発電実績として示されている。2003年から、スパイラルマグナス風車の開発をはじめ、2007年に実用化した。2011年に秋田県に納入した「秋田マリーナ機」の2012年度の発電量は、当初の計画通りの正味総発電量を記録しており、発電実績を実証公開している。

しかし、事業化を加速するためには、もう一段の性能向上が望ましい。そのためには、

スパイラル円柱翼周りで主流とスパイラル円柱翼の間で発生する流れのメカニズムの解明が重要である。これまで、モデルや実機の風洞及びフィールド試験やコンピュータシミュレーションによる研究等により、発電能力が高くなるように風車の翼としての最適化の研究が進められてきた。しかし、フィン付回転円柱周りの流れ場のメカニズムの解明は実施されておらず、性能改善の可能性が多く残っている。

本研究では、その流れ場を調べ発生する流体力との関係を調べた。流れ場の測定には粒子画像流速測定法（PIV : particle image velocimetry）を使用し、空間の速度場を求めた。さらに、回転円柱に作用する流体力は天秤を使用し、回転角ごとの力を計測することで非定常流体力の評価を行った。その結果、スパイラルフィン付円柱は、ストレートフィン付円柱に比べ高い揚力を示した。これは、2D の PIV 処理の結果から見ると、ストレートフィン付円柱は、その回転角により流れ場が断続的に変化し、流速変動の範囲も円柱から比較的遠い領域まで達している。一方スパイラルフィン付円柱は、流れ場の変化が連続的であり、円柱に近い領域で大きな速度差が発生することが示された。また、フィン先端から発生する前縁渦の挙動が、マグナス風車の特徴である回転円柱（自転）による揚力発生に重要な役割を担っていることを明らかにしている。そこで、フィンの先端形状の異なる供試円柱を複数製作し、風洞試験でフィン周りの流れ場を評価し、前縁渦の違いを調べた。このなかで、周速比と前縁渦挙動の関係から、前縁渦の生成を促進させるフィン先端形状の優位性が明らかになり、の特許を出願した。一方、スパイラルフィン付回転円柱周り流れ場において揚力が増加するのは、Y 軸方向の流れの存在が影響しているといえる。そこでスパイラルフィンによる 3D 効果を明らかにすることを目的としステレオ PIV による 3D 空間の流れ場を調べた。その結果、スパイラルフィンにおいては Y 軸方向の流れの影響を受けた後、合流した流れが吹き降ろしに移行する特徴が明らかになった。

今後の課題

回転円柱まわりの流れ場の解明を進めてきた中でフィンの働きが明らかになった。しかし、風力発電機として最大の発電性能を引き出すフィン形状は未解明である。そのためには、スパイラルフィンの高さ・幅・巻き角度・形状・巻条数等を系統立てて、空間の流れ場と流体力の両面から解明するとともにフィン回りの前縁渦挙動が揚力向上に寄与していることが解ったので、その非定常三次元渦構造を解明し更なる性能向上に取り組む。また、回転円柱の公転時に生じる、公転軸中心からの距離の違いで生じる周速比の違いを考慮した最適なフィン形状を提案し、風洞試験で性能取得を行う。その結果をもとに、実用化に向けた 3D 設計データを構築していく。

論文審査結果の要旨

スパイラルマグナス風車は、通常の翼の代わりに回転円柱を配置し、それを回転（自転）させ発生する揚力によりロータを回転（公転）させ発電する風車である。2004 年に、その

翼にあたる円柱にスパイラル状のフィンを付加することで大幅に性能向上する発明がなされ、製品化及び事業化が進められている。スパイラルマグナス風車は、翼が低風速域から高揚力を得られることと、脈動などの急速な風速変動下でも安定的な出力特性を持ち「受風面積 200 m²未満」の小型風車でも比較的高い累積発電量を得られることが発電実績として示されている。しかし、事業化を加速するためには、もう一段の性能向上が望ましい。そのためには、スパイラル円柱翼周りで主流とスパイラル円柱翼の間で発生する流れのメカニズムの解明が重要である。スパイラル円柱翼周りの流れ場において、高い揚力が生み出されているが、そのメカニズムの解明は十分ではなく、本研究で流体力と可視化の両面からメカニズムを明らかにした。

第 1 章では、風力発電の現状とスパイラルマグナス風車の位置づけ及び本研究の目的について述べられた。

第 2 章では、マグナス風車用フィン付回転円柱の揚力増加メカニズムを明らかにするため、その流れ場を調べ発生する流体力との関係について説明された。流れ場の測定には粒子画像流速測定法 (PIV : **particle image velocimetry**) を使用し、空間の速度場を求めた。さらに、回転円柱に作用する流体力は天秤を使用し、回転角ごとの力を計測することで非定常流体力の評価を行った。その結果、スパイラルフィン付円柱は、ストレートフィン付円柱に比べ高い揚力を示した。これは、2D の PIV 処理の結果から見ると、ストレートフィンは、その回転角により流れ場が断続的に変化し、流速変動の範囲も円柱から比較的遠い領域まで達している。一方スパイラルフィンは、流れ場の変化が連続的であり、円柱に近い領域で大きな速度差が発生することが示された。

第 3 章では、ストレートフィン付回転円柱翼の前縁渦の利用について示された。フィン先端から発生する前縁渦の挙動が、マグナス風車の特徴である回転円柱 (自転) による揚力発生に重要な役割を担っていることを明らかにしている。そこで、フィンの先端形状の異なる供試円柱を複数製作し、風洞試験で、フィン周りの流れ場を評価し、前縁渦の違いを調べた。このなかで、周速比と前縁渦挙動の関係から、各周速比範囲でのフィン先端形状の優位性が明らかになり、前縁渦の生成を促進させる形状の特許出願がなされている。

第 4 章では、スパイラルフィン周りの流れ場を 3 次元的な全体像を見極めることを目的としている。始めに 2 次元断面 Y - Z 平面の構成を考察し、続いて X - Z 平面の構成について考察した。その後 3D 空間の考察へ議論を進めている。スパイラルフィン付回転円柱周り流れ場において揚力が増加するのは、Y 軸方向の流れの存在が影響していることがステレオ PIV による 2D3C (2 次元 3 成分) の計算結果から明らかになった。主流とスパイラルフィンが接近した際にスパン方向流れが生成される。スパイラルフィン付円柱の回転に伴い、一連の流れがスパン方向に連続的に移動する。スパイラルフィン付き回転円柱翼の後方に生成される合流と吹き降ろしが円柱に近い領域で大きな速度差を発生させる主因であり揚力向上に寄与している。この研究によりスパイラル回転円柱周りの流れ場が解明され、同時にスパイラルフィン付回転円柱が高い揚力を発生させるメカニズムが明らかにな

った。

博士論文審査・公聴会において、博士論文の内容についての口頭発表および質疑応答を行った。(審査委員全員出席) 口頭発表の内容は、スパイラルマグナス風車におけるフィン付回転円柱翼のメカニズム解明と性能向上に関する研究についてであり、従来のプロペラ型翼に比べて高い揚力を発生させるフィン付回転円柱のメカニズムを 3 種類のモデルにおける流体力計測と PIV による流れ場の可視化を考察することで、高揚力発生メカニズムを明らかにした。また、前縁渦の生成を促進させることで揚力が向上することを突き止め風車の性能向上の方向性を示し、その内容について特許を出願していることを確認した。従来の翼の流体力学に対しスパイラル回転円柱はその形状が 3 次元形状で複雑であるが、高い揚力を得られるメカニズムが明らかにしフィン付回転円柱翼の基礎を築いたといえる。口頭発表の内容を受けて質疑がなされ、データと根拠を説明したうえで、適切に回答がなされた。以上より、学位論文の内容およびその関連分野に関する知識は十分であり、大学院博士課程修了者として、博士(工学)の学位を授与するに十分であると判断した。