

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561031

研究課題名(和文)低重心風車の最適ローター構造の探索研究

研究課題名(英文)Quest for optimum rotor structure of low-center-of-gravity wind turbine

研究代表者

原 豊 (HARA, Yutaka)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60242822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、小型垂直軸風車の低コスト化および高性能化を目的に、アームレスでシンプルな構造を持つ低重心風車およびその派生形として考案したバタフライ風車の最適なローター構造および翼型を、実験と数値解析の両面から研究した。翼弦長対ローター半径比(c/R)が大きい場合には、対称翼に比べて、キャンパー翼が最大出力において優れることを示した。アルミ押出で製作した円形翼を有するバタフライ風車の実証実験を行い、低コストの小型風車実現への足掛かりを得た。

研究成果の概要(英文)：The optimal rotor structure and blade section of low-center-of gravity wind turbines and its derivative butterfly wind turbines, which were characterized by simple structure without arms, had been studied by experimental and numerical analyses in order to reduce the cost and to improve the performance of small-sized vertical axis wind turbines. In the cases of large chord-to-radius ratio (c/R), cambered blade section was superior to symmetrical blade section in terms of the maximum power. Experiments of circular-blade butterfly wind turbine, whose blades had been made by aluminum extrusion, were carried out and the foothold for practical reduction in cost of small wind turbines was obtained.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、エネルギー学

キーワード：低重心風車 風力発電 再生可能エネルギー 対称翼 キャンパー翼 バタフライ風車 二重翼 アルミ押出

1. 研究開始当初の背景

小型風車は分散型電源として将来期待されるクリーンな再生可能エネルギーの1つであるが、導入コストが高いこと、騒音発生、高速回転による安全性の問題などがあり、普及するまでには至っていない。小型風車の問題点を解決し、真に普及させることを最終目標として、本研究代表者は、構造がシンプルであり、空力的にも理にかなった小型垂直軸風車である「低重心風車」を考案した。低重心風車は翼の弦長がローターの上端では短く、下端に向かうにしたがって非線形かつ連続的に増加するテーパ翼を特徴とし、直線翼の場合に必須なアームを必要としない(アームレス)などの特徴を持つ。この低重心風車の理論(翼素運動量理論)に基づく当初の性能予測では、既存の対称翼(NACA 0018)の空力データ(揚力係数・抗力係数)を用いていたが、起動性の向上やさらなる出力向上を図るためには、非対称翼(キャンバー翼)の採用や翼形状などを様々に検討する必要があった。また低重心風車の特性も実験や数値シミュレーションによって明らかにし、期待通りの特性を有するかを確認する必要があった。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、低コストで、安全かつ高性能な小型風車を開発し、小型風力発電の真の普及実現に貢献することである。そのために、風車のローター構造に着目し、シンプルで性能が高い形を数値的および実験的に探索し、最適なローター形状を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 数値流体力学(CFD)計算ソフトによって翼型の空力データベースを構築し、そのデータベースを用いて様々な形状を持つ低重心垂直軸風車の特性を、翼素運動量理論に基づく自作計算プログラムによって予測し、最適な風車ローター形状を探索する。

(2) 数種類の垂直軸風車モデルを製作し、風洞実験によって翼型およびローター形状の差異が風車特性に与える影響を明らかにする。

(3) ビニロンなどの安価で軽量かつ強靱な複合材料などを垂直軸風車の翼材料として適用し、翼および風車システム全体のコスト低減の可能性を探る。

4. 研究成果

(1) 数値流体力学(CFD)による翼型特性計算の準備として、最初に文献値が存在する対称翼型の NACA 0018 を計算対象とし、レイノルズ数条件： $Re = 1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^7$ 、および迎角範囲： 0° から 180° で空力データ(揚力係数・抗力係数)の計算を実施した(図 1 参照)。計算は汎用 CFD ソフトウェア STAR-CCM+ を使

用し、RANS(レイノルズ平均ナビエ-ストークス方程式)を基礎式として 2 次元定常計算を行った。結果として、2 次元定常計算のような比較的低コストの計算でも、 $Re = 1.6 \times 10^5$ 以下の低レイノルズ数領域において、ある程度の精度で翼型空力データの計算が可能であることが分かった。また、風車性能予測を行う翼素運動量理論プログラムの入力データとして本研究で得られた空力データを使用した場合に、文献値を使用した場合と比べて、小型風車(直径：0.6m)の実験データにより近い結果を与える改善が見られた。

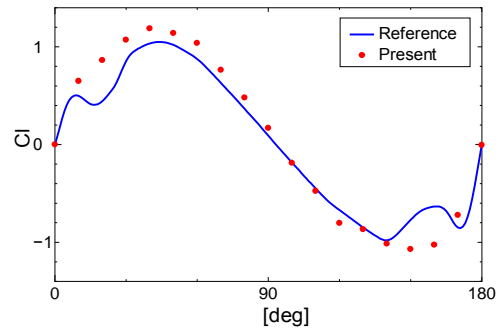


図 1 対称翼(NACA 0018)の揚力係数(C_L)の迎角依存性 ($Re=2 \times 10^4$ 、赤丸：本 CFD 計算、青線：文献値)

(2) 2%、4%、6%の反りを持った非対称翼(キャンバー翼)である NACA 2518、NACA 4518、NACA 6518 の3つの翼型について、CFD による空力特性の計算を行いデータベースを構築した。失速角以下の小さい迎角において揚力係数およびモーメント係数が一定割合でそれぞれ増加および減少することを見出し、その変化率を表す近似式を求めた。また、作成した空力データベースを入力データとし、翼素運動量理論に基づく性能予測によって、キャンバー翼を有する垂直軸風車(ローター直径： $D=0.6\text{m}$ 、翼弦長： $c=0.047\text{m}$ 、風速： 6m/s)の性能への影響を調べた。外凸キャンバー翼では反りが増加すると出力特性ピーク幅が広がり、内凸キャンバー翼では逆に狭まる傾向を持つことを示した(図 2 および図 3 参照)。

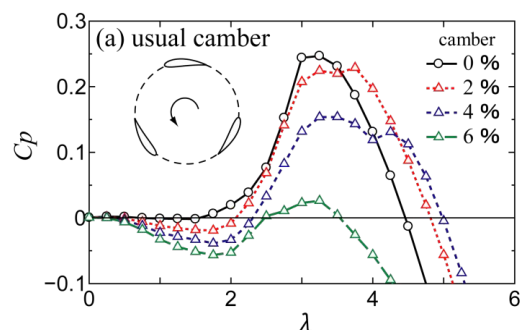


図 2 外凸キャンバー翼を持つ垂直軸風車の出力特性 (C_p : 出力係数、 λ : 先端周速比)

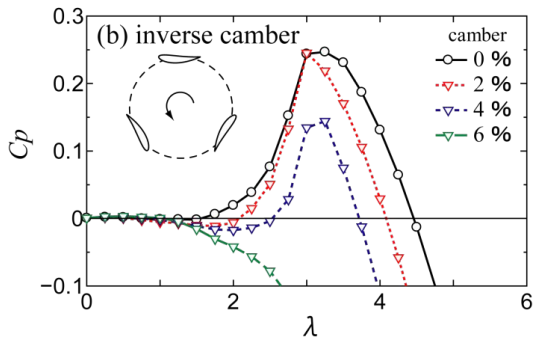


図3 内凸キャンパー翼を持つ垂直軸風車の出力特性 (C_p : 出力係数、 λ : 先端周速比)

(3) 対称翼(光造形製)とキャンパー翼(ガラス繊維強化プラスチック[GFRP]製)の2種類の低重心風車(ローター直径: $D=0.4\text{m}$ 、ローター高さ: $H=0.25\text{m}$ 、図4参照)の風洞実験を行い、本実験機のように翼弦長対半径比($cR \sim 0.6$)が大きい場合には、キャンパー翼が対称翼よりも、トルクおよび出力が大きくなることを示した(図5)。特に高速回転状態で差が大きくなった。また、2次元のCFD計算によっても定性的に同様な結果を得た。これらの差異は、(回転する翼に相対的な)湾曲した流線の影響に原因があると考えられる。



図4 実験用低重心風車、対称翼(光造形製: 白)とキャンパー翼(GFRP製: 赤)

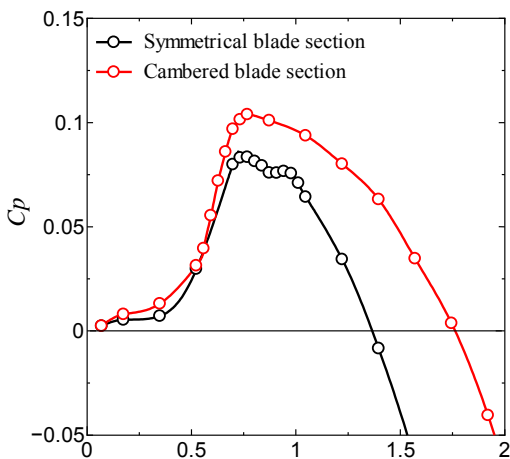


図5 風速 6m/s における対称翼低重心風車[黒丸]とキャンパー翼低重心風車[赤丸]の出力特性の比較

(4) 低重心風車の派生形として、二重翼構造のバタフライ風車を考案し、その特性予測のために四重多流管理論を提案した。また、対称翼(光造形製)とキャンパー翼(ビニロン繊維強化プラスチック製)の2種類のバタフライ風車(ローター直径: $D=0.4\text{m}$ 、ローター高さ: $H=0.3\text{m}$ 、図6参照)を製作し、風洞実験を行った。結果として、低重心風車と同様に、キャンパー翼が高速回転状態において特性が優れることを示した(図7)。しかし、低速回転状態では対称翼の発生トルク(起動トルク)がキャンパー翼よりも多少大きくなった。実験用として試作したキャンパー翼の低重心風車とバタフライ風車の比較では、バタフライ風車の方が起動性・最大出力ともに優れていた。



図6 実験用バタフライ風車、対称翼(光造形製: 白)とキャンパー翼(ビニロンFRP製: 青)

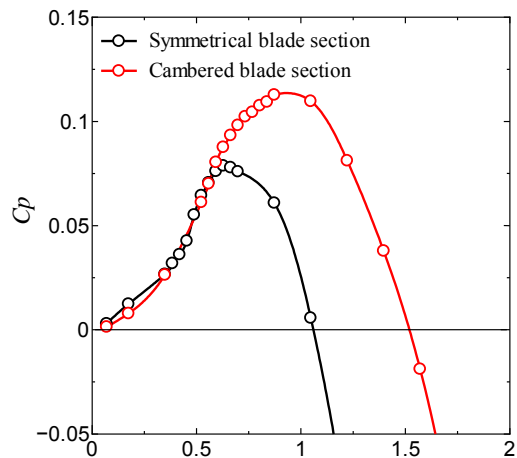


図7 風速 6m/s における対称翼バタフライ風車[黒丸]とキャンパー翼バタフライ風車[赤丸]の出力特性の比較

(5) 軽量の複合材料のキャンパー翼が性能向上には望ましいことがわかってきたが、一方で、すぐに実現可能な低コスト化の方法として、アルミ合金の押出と曲げ加工により、対称翼のバタフライ風車を作る案が浮上してきた。企業2社の協力もあり、直径約2m、高さ0.8mの『アルミ円形翼バタフライ風車』の試作および実証実験を行った(図8)。繊維強化プラスチック(FRP)などの複合材料に比べると多少重量が大きくなるが、比較的軽量で剛性が高い曲線状の中空翼が低コストで製作できることを示した。実証実験では、風速 11.3m/s において、最大 241W (362 rpm)

を観測した。



図8 アルミ円形翼バタフライ風車の実証機
($D=2.06\text{m}$ 、 $H=0.8\text{m}$)

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9件)

原 豊、塩崎 明、西小野寛明、斎藤栄徳、塩谷啓介、古郷昇平、高垣雄大、アルミ円形翼バタフライ風車の実証実験と性能予測、日本風力エネルギー学会論文集、Vol. 38、No. 1、(通巻 第109号)、pp.16-21、2014年5月、査読有
Yutaka HARA、Takahiro SUMI、Mutsuko WAKIMOTO、Shohei KOGO、Sho MIZUGUCHI、Kouichi YOSHIMI、Hiromichi AKIMOTO、Comparison between Symmetrical and Cambered Blade Sections for Small-scale Wind Turbines with Low Center of Gravity、Bulletin of the JSME、Journal of Fluid Science and Technology、Vol. 9、No. 1、pp.1-16、2014年4月、査読有、

DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0006

Yutaka Hara、Takafumi Kawamura、Hiromichi Akimoto、Kenji Tanaka、Takuju Nakamura、Kentaro Mizumukai、Predicting Double-Blade Vertical Axis Wind Turbine Performance by a Quadruple-Multiple Streamtube Model、International Journal of Fluid Machinery and Systems、Vol. 7、No. 1、pp.16-27、2014年1月、査読有、

DOI: 10.5293/IJFMS.2014.7.1.016

原 豊、住 隆博、井上尚子、田中華奈、CFDによるキャンバー翼の空力特性計算と小型垂直軸風車特性予測への応用、日本機械学会論文集(B2特:18th 動エネシンポ、ノート)、Vol. 79、No. 808、pp.2567-2571、2013年12月、査読有、DOI: 10.1299/kikaib.79.2567

井上尚子、西村紗也香、原 豊、住 隆博、垂直軸風車特性予測のための広迎角範囲・広レイノルズ数範囲における翼型空力特性のCFD計算、ターボ機械 [論文]、Vol.41、No.2、(通巻457号)、pp.104-109、2013年2月、査読有

[学会発表](計21件)

原 豊(他6名)、アルミ円形翼バタフライ風車の実証実験、第35回風力エネルギー利用シンポジウム、2013年11月13日、科学技術館(東京都)

原 豊(他3名)、キャンバー翼を持った低重心垂直軸風車の特性、日本機械学会2013年度年次大会、2013年9月11日、岡山大学 津島キャンパス(岡山)

原 豊(他3名)、CFDによるキャンバー翼の空力特性計算と小型垂直軸風車特性予測への応用、日本機械学会第18回動力・エネルギー技術シンポジウム、2013年6月21日、千葉大学 西千葉キャンパス けやき会館(千葉)

原 豊、バタフライ風車と四重多流管理論の提案、日本機械学会2012年度年次大会、2012年9月12日、金沢大学 角間キャンパス(金沢)

原 豊(他4名)、低重心垂直軸風車と直線翼垂直軸風車の模型実験による特性比較、第33回風力エネルギー利用シンポジウム、2011年11月30日、科学技術館(東京都)

原 豊(他2名)、低重心垂直軸風車の回転実験、日本機械学会2011年度年次大会、2011年9月12日、東京工業大学 大岡山キャンパス(東京都)

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称:垂直軸風車の翼及び風車並びに発電装置

発明者:原 豊

権利者:国立大学法人鳥取大学

種類:特許

番号:特許願2012-6927号

出願年月日:24年1月17日

国内外の別:国内

[その他]

ホームページ等

中小機構 J-Net21 (動画有り)

<http://j-net21.smrj.go.jp/develop/energy/company/2013100301.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

原 豊 (HARA, Yutaka)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号:60242822