

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12270

研究課題名（和文）帆布翼式垂直軸抗力型風車の翼形状制御による低風速下での高性能化と性能定式化

研究課題名（英文）Performance Improvement and Formulation of Drag-typed Vertical Axis Wind Turbine with Sailcloth Blades at Low Wind Speeds by Controlling Blade Shape

研究代表者

久保田 健（Kubota, Takeshi）

弘前大学・地域戦略研究所・准教授

研究者番号：70400405

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：8枚翼の垂直軸型風車の空力性能向上を目指した研究であって、実験に数値計算を併用して調査した結果、基本形である直線8枚翼風車では風車内部に流れ込む噴流（増速した流れ）が回転力に寄与していること、ならびにその噴流は逆方向への回転力を発生する翼が生成していることを突き止めた。風車の翼材に柔らかい帆布を用いて変形性を有した翼として、その形状を調整することで流れの制御を図り、風車性能は20%程度増加することを確認した。これと同時に本風車の仕様に起因して2次元数値流体計算が実験値を尤もらしく再現できない点の解決について検討、算術的な後処理で対応できることを見出したことで、性能の予測手法に目途をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柔軟な帆布を翼とする垂直軸の抗力型風車において、ギアのような部品を使うことなく受風時の風のみで翼形状を制御する設計によって、固定翼風車と比べて取り出せる出力を約20%向上、あるいはより低速から始動する仕様を見出した。これによりエネルギーとして利用しにくい地上付近（低層）の低風速でも風車利活用の可能性を高めた。また、充填率の高い風車に対する2次元数値流体計算（CFD）の結果が3次元構造体である実際の風車における実験値と合わないことについて考察、長大な時間を要する3次元CFDをせよとも2次元CFD結果に比較的簡便な後処理を施すだけで実機の性能をおよそ予測できるとの工学的に有用な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to improve the aerodynamic performance of an 8-blade vertical-axis wind turbine, and as a result of the investigation using both experiments and numerical calculations, it was found that in the typical turbine with a straight 8-blade, the jet flow (accelerated flow) into the wind turbine contributes to the rotational force, and that that flow is generated by the blade generating the inverse-rotational force. By adjusting the shape of soft sail cloth blades with deformability to control the flow, the performance of the wind turbine can be increased by approximately 20% was confirmed. At the same time, the problem that 2D-CFD calculations cannot represent experimental results plausibly due to the specifications of the wind turbine was also investigated, it was found that that problem can be handled by arithmetic post-processing.

研究分野：風車工学

キーワード：垂直軸風車 帆布翼 空力性能 数値流体計算

1. 研究開始当初の背景

抗力型の垂直軸風車は、変動する 360 度全方位からの風に対して姿勢制御なしに対応できる特徴を有するが、翼の風に対するアジマス角度によっては順回転を妨げる反力を受けるため、発電用として知られる水平軸の揚力型プロペラ風車に比べてエネルギー取り出し効率が低い。一方で、抗力で回転することから受風時に高いトルクが得られ、低風速でも起動できる点が優位点であって、プロペラ風車では利用できないような地面直上の低層を流れる弱く乱れた風からでもエネルギーを取り出せる。

抗力型垂直軸風車を用いた風力直動式の海水揚水ポンプシステムの屋外実証実験 (図 1) にて、軽量で柔軟な帆布を翼材に採用して長期運用した際のデータを解析したところ、直線形状翼の風車で計測した風洞試験を優位に上回る性能を示した。この原因については風洞実験の結果、長期使用で弛んだ帆布が受風時に円弧を形成し、翼の抗力係数が高まることに起因すると推定された。



図 1 抗力型垂直軸風車を用いた直動式揚水ポンプシステム

2. 研究の目的

直線 8 枚翼の抗力型垂直軸風車を基本形に翼材を帆布とし、弛み (サグ) 量と翼補助の支柱の調整によって受風時に形成される翼形状を制御することで、件の風車の効率はどこまで向上させることができるか、ならびに系統的に調査することで高い空力性能を発揮する 8 枚翼の抗力型垂直軸風車の翼形状を見出すこと、これら 2 つを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

風車は図 2 (a) に示されるような断面形状を有する直線 8 枚翼を基本形 (外直径 1000mm) とし、帆布を翼とするためスパン (軸) 方向の上下端にある支柱で固定、サグ率はスパン長 (最大 740mm) の調整で対応した。また、姿勢制御用の翼補助支柱は、図 2 (b) のようにくの字型やカタナリー曲線様の柱を上下端で固定して設置、位置や角度を調整して様々な形状を設定した。

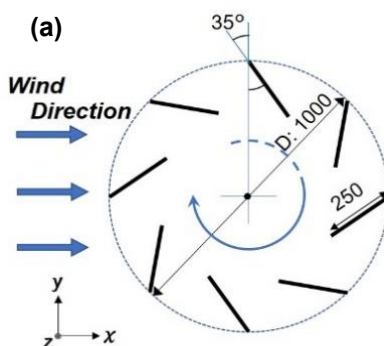


図 2 実験に用いた 8 枚翼垂直軸風車の基本形の断面図 (a), ならびに実験時の風車仕様の一例 (b).

実験は主にゲッチング型風洞 (計測部: W3600, H2000, L15000mm) を用い、閉塞率を考慮して上面と両側面を開放して行い、サーボモータや電磁ブレーキで回転を制御、トルクメータでデータを計測した。

数値流体シミュレーション (CFD) は、ANSYS-Fluent ならびに OpenFOAM を用いて 2 次元乱流モデル $k-\epsilon$ と SST $k-\omega$ で定常/非定常計算を行った。非定常計算については流れが安定化した後の 3 周分の平均を代表値として利用した。

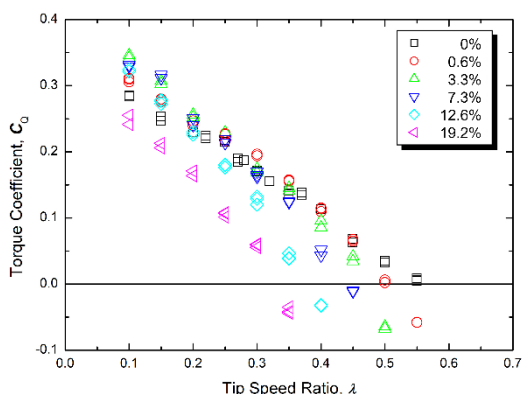


図 3 トルク係数 (C_q) — 周速比 (λ) 曲線の翼長依存性。

4. 研究成果

図 3 は補助支柱なしの条件にて風車の軸長を徐々に短くすることでサグ率を増加させた際のトルク係数 (C_q) と周速比 (λ) の関係を示す。サグ率 0% の直線翼では、 λ に対して直線的な挙動を示し、 $\lambda=0.1$ で約 0.28 の C_q が得られ、 $\lambda \approx 0.55$ でトルクは消失する。翼長が短くなるに従いトルクが消失する周速比は低下する傾向がみられる。一方サグ率 13% 以下の場合、 $\lambda < 0.2$ の低周速比域においてトルク係数は直線翼を上回る値を示し、サグ率 3% 程度において最も高い値を示した。このことは、翼がわずかに弛みを与えられた際、受風により円弧を形成するため抗力係数は増大して風車は停止状態に近い λ で回転力を獲得すること、 λ

が大きくなると反回転力を受けるアジマス角度域 (図1の6時~10時) のモーメントの増強が順回転力を相殺するためと考えられる。また、サグ率が極端に大きい場合の全体的な性能低下は、円弧を形成するも発生している抗力の回転寄与成分が減少するためと考えられる。

図4はサグ率7% (軸長700mm) とし、翼姿勢補助支柱の有無および支柱設定位置を調整してパワー係数 C_p を計測した結果であって、1/4、1/2、3/4 は支柱設置位置の外端からの翼幅比を意味する。ここから、中央 (1/2) に補助支柱を入れた場合には単調に性能は低下、内側 (3/4) に設置した場合はさらに低下することが見て取れる一方で、外側 (1/4) に設置した場合はパワー曲線の値は大きいこと、ならびに高周速側でも風を捉えて回転することがわかる。

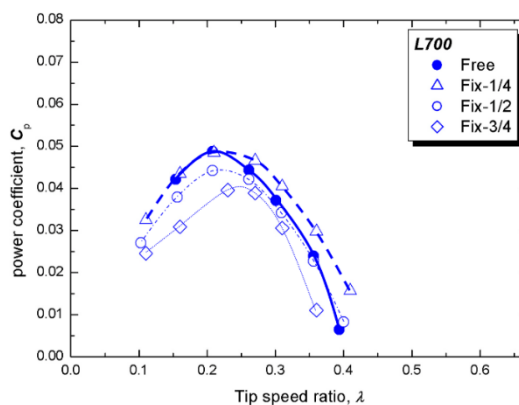


図4 サグ率7.3% (軸長700mm) 時の支柱の設定位置別パワー係数曲線。

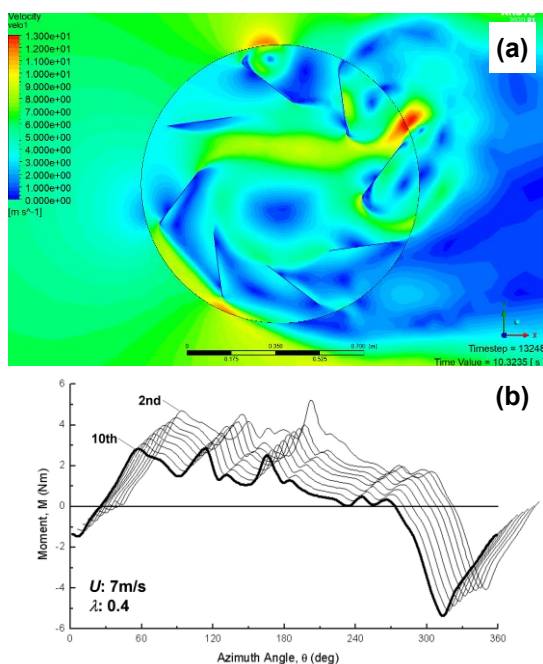


図5 2D-CFDによる直線翼風車の流れ場可視化イメージ(a)、回転モーメント (計算値) のアジマス角依存性(b)。

この点は図4や図5の結果と矛盾するように映るが、 α_1 : 53° 、 W_1 : 187mm、 α_2 : 141° 、 W_2 : 87mm であって、図4や図5の結果が α_1 : 35° 、 W_1 : 250mm、 α_2 : 0° 、 W_2 : 0mm と主翼の配置 (α_1 と W_1) から異なることによる。この風車では10時~12時領域で強い正回転力が強い様子が見てとれる。また、2時~3時領域にある翼の内端付近の気流に明瞭な差異が見られ、流体の引きずり量が少ない。風上側の翼で風車内部への噴流の形成は基本翼と同様に確認できるが、風下側の押し

ANSYS-Fluent を用いた2次元CFDにより風車周辺の流れ場を可視化した(図5(a))ところ、風車の上流にあたる8~9時領域の回転反力を発生する翼から生じる後流のうち、風車内部に流れ込む分が加速して噴流を形成、これが1時(図5(b)の 120°)や2~3時領域にて多段階に下流側の翼を押し出すことで回転力を得ていることが理解された。よって図4における補助支柱ありの実験データは、中央(1/2)や内側(3/4)でくの字を形成することによる内部への噴流の流れ込みの疎外による低下、ならびに外側(1/4)の場合は流れ込みの増強と判断できた。

系統的な実験により得られた効率は、低周速比におけるトルク係数で約25%、パワー係数極大点を示す周速比でのパワー係数で約20、それぞれ直線翼の基本形と比して向上する傾向が得られた。これを踏まえて揚水ポンプシステムのパラメータ・スタディ¹⁾を行い、実証実験機を改良、現在も青森県津軽半島の漁港で運用を続けている。

以上を踏まえてCFDによる翼形状の最適探索を行った一例として、図6には改良型の翼形状を有する風車における $\lambda=0.4$ での(b)流れ場と(c)渦度をそれぞれ示す。なお、(a)に示す翼型は翼の中央付近で内側に折れ曲がっており、

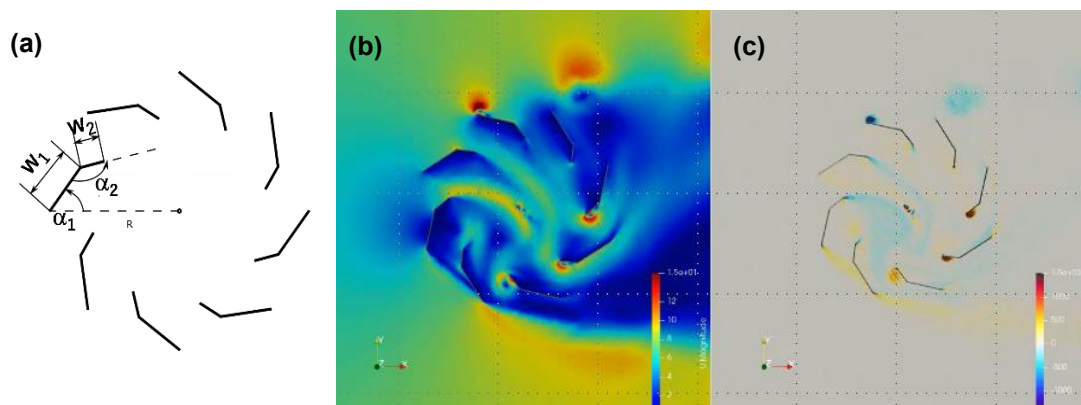


図6 改良8枚翼風車のCFD解析結果、(a)翼形状、(b)速度場、(c)渦度。

れる翼の位置は3時~6時領域に変化している。結果、計算のみの値ではあるものの、 $\lambda=0.4$ での算出される時間平均 C_q は、基本形で0.258、改良形で0.308となり、 C_p に置き換えればそれぞれ0.104、0.124となり、およそ20%の性能向上を示した。なお、この翼型は α_1 、 W_1 、 α_2 、および W_2 の4つのパラメータを変量とし、OpenFOAMによる2次元CFDの定常計算で求められた値についてベイズ最適化による機械学習で繰り返し処理することで導出しており、非定常計算の値で処理できるように構築を進めている。

これら実験や機械学習と並行し、シミュレーション精度の向上に関する検討も行った。上述する2次元CFDでは定常/非定常計算の別を問わず、3次元構造体である風車実験機の風洞実験値と2倍近い乖離があって、計算で空力性能を予測するにおいて尤もらしい値が計算されないという課題が発生した。これは2次元と3次元の相違以外に、本研究における風車が、水平軸の3枚プロペラ風車や同じ垂直軸方式で2~4枚翼の直線ダリウス風車とは一線を画し高ソリディティであるため、翼枚数が多く、互いの干渉率が高いことに起因していると考えられた。

そこで2次元CFD解析の結果に対して本風車の閉塞効果を考慮し、3次元的な風の逃げ、換言すれば流入する風エネルギーの減少を数学的に取り込んだポスト処理後の結果²⁾が図7である。ここから、CFD計算直後の値が実験値と顕著に乖離していたが、およそ実験値を再現できると認められる。よって長大な計算時間を要する3次元CFD計算に頼ることなく、計算コストの面で工学的に有用な2次元CFDであっても、本研究に類似した形状の風車の性能を予測する方策を見出したと考えられる。ただし汎用性や計算に使用する乱流モデルの差異についてはこれからの検討課題であって、引き続き研鑽を重ねてゆく。

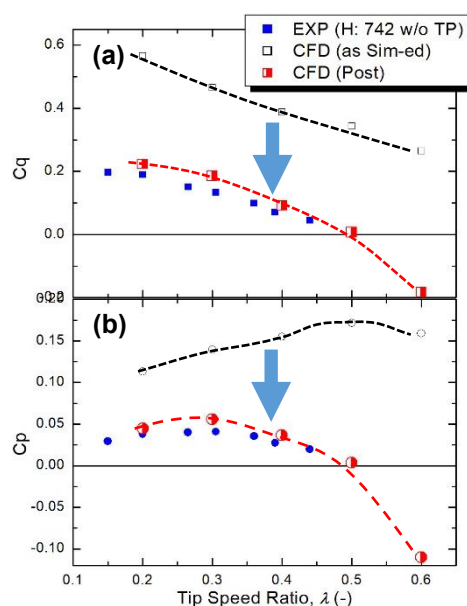


図7 直線8枚翼風車における(a)抗力係数と(b)パワー係数。(風洞実験値とCFD解析の直接結果ならびにポスト処理結果)

<引用文献>

- 1) 志田 崇, 久保田 健, 桐原 慎二, 本田 明弘, “ローテーションフロー風車のトルク特性を用いた揚水実証実験”, 風工学研究論文集, Vol. 26, 2020, 67-75.
- 2) 久保田 健, 葛西 昭治, 中畑 泉美, 南條 宏肇, “2次元 RANS 計算のポスト処理による垂直軸風車の空力性能予測に関する考察”, 風力エネルギー利用シンポジウム論文集, Vol. 44, 2022, 321-324.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 志田 崇, 久保田 健, 本田 明弘, 桑原 久実, 桐原 慎二	4. 巻 58
2. 論文標題 ナマコを漁港水域に閉じ込め養殖するための空気層を持つ構造物の形状の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 水産工学	6. 最初と最後の頁 183 ~ 190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18903/fisheng.58.3_183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 志田 崇, 久保田 健, 桐原 慎二, 本田 明弘	4. 巻 26
2. 論文標題 ローテーションフロー風車のトルク特性を用いた揚水実証実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 風工学研究論文集	6. 最初と最後の頁 67 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 久保田 健, 葛西 昭治, 中畑 泉美, 南條 宏肇	4. 巻 44
2. 論文標題 2次元RANS計算のポスト処理による垂直軸風車の空力性能予測に関する考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 風力エネルギー利用シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 321-324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11333/jweasympo.44.0_321	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 志田 崇, 久保田 健, 桐原 慎二, 本田 明弘
2. 発表標題 ローテーションフロー風車のトルク特性を用いた揚水実証実験
3. 学会等名 第26回風工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保田 健, 葛西 昭治, 中畑 泉美, 南條 宏肇
2. 発表標題 2次元RANS計算のポスト処理による垂直軸風車の空力性能予測に関する考察
3. 学会等名 第44回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

弘前大学地域戦略研究所新エネルギー部門風力・海洋エネルギー研究室ホームページ
<https://www.iri.hirosaki-u.ac.jp/sections/sustainableenergy/offshoreenergyengineering>

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
研究協力者	南條 宏肇 (Nanjo Hirotada)		

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
---------	---------