

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656123

研究課題名（和文） 風車の長期的設計指針を決めるランドマークデザイン

研究課題名（英文）Landmark design for determination of future type wind turbines

## 研究代表者

村井 祐一（MURAI YUICHI）

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80273001

## 研究成果の概要（和文）：

世界的に同時に 10 年で 10 倍という爆発的な普及期にある風力エネルギーについて 2 年間の研究を実施した。それは、将来存在するであろう、風車の設計ビジョンを、現段階で多角的に見極めるというものである。研究の内容は、現在すでに問題となっている風車の設計上の問題を吟味し、その延長線上にある問題を先取りして基礎研究を行うというものである。そのような位置づけから、後述するような A, B, C, D, E の 5 つの選定されたテーマについて、風洞実験、数値シミュレーション、ならびに現地調査に基づく研究を実施した。

## 研究成果の概要（英文）：

Upon the generation that the use of wind energy grows up ten fold in every decade, a two-year project has been carried out in order to judge the vision of design method that will persist in future. The project is planned based on finding essential problems in current age to choose problems that we encounter in the next age. Five kinds of themes are selected and studied through wind tunnel experiments, numerical simulations, and on-site investigation at local wind farms.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：風力発電、自然エネルギー、風車、タービン、環境流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

風車の設計は多様化し、進化を探るステージの真っ直中にある。しかし後には産業経済との整合を条件とした厳しい淘汰を控えている。例えば風変わりな風車デザインの発表はメディアを賑わすが、その正誤の判定は即座に降りない。そのため技術者の設計指針が正しいかが提示されず、ますます混乱を生じさせている。風況と地理の双方で不利な我が国が、風力発電を電力生産の基軸に載せると

いう野望を実現しようとするならば、短期的な試行錯誤設計ではなく、先導的かつ永年の設計指針を確立するような研究課題を設けなければならない。それは、あらゆる周辺制約条件を取り払って設計された流体力学的な究極進化形の提示である。この着想による風車研究こそ、将来の進化の強固な基軸を創り上げる。いま、稼働率低迷や環境悪影響などの負の結果ばかりがトップニュースに躍り出ている。風車の必要性和問題点がきつ

抗している時代だからこそ、目先に囚われない永年の研究が必要である。このような着想の研究は欧州には見られず、風車環境で不利な日本型のアプローチである。

風力発電のエネルギー源は流体にある。従って流体力学的设计が進化の消滅支線に当たるとは決してない。これを礎として申請者は5つの究極設計の「解」を導く。設計を「解」と表現するのは、物理法則から導出される正解を有するべき問題だからである。本研究期間内に明らかにする内容は新発想による出力向上設計と、環境調和のための先行設計である。これら5つは研究計画欄に詳しく述べたが、互いに独立したテーマであり、全ての項目は、いずれも現時点で実用化されていない。しかし設計のブレイクスルーが起こるとき必ずや導入される設計コンセプトである。その政略で、研究期間内に、その取り得る解を明らかにして発表することは、現状において設計で迷走する技術者達の極めて重要な道案内となる。明らかにする内容はこの5つである。

風力発電への過度の期待度の高まりは、産業経済路線の開発対象に傾斜させた。NEDO等による風力開発支援は経済への即効性を狙いとして精力的だ。これに対して本課題はそれと意図的に距離をおき、雑多な設計要因を一旦全て排除し、流体力学のみによる設計を貫く。その成果は、困窮する風力産業の方向性を決める永年のランドマークになる。営利からの拘束を受けることなく、学問を創出し継承する大学であるがゆえ、このような課題設定が許されるべきである。経済・環境・技術の三者間で相互制約を引き起こしている現代風力のトリレンマは、本課題で導く流体力学解が道案内となって後世で整合し、安定で持続可能な風力世界を切り開くのである。

## 2. 研究の目的

本課題の斬新な点は流体力学設計に特化して風車を設計し、その究極の進化形を決定しておくことである。いわば流体力学的な特殊解の導出である。現状の総合ものづくり産業としての風車設計からは離れている。特化して焦点を明確化した研究が、従来までになかった風車の発明を導くと考えるためである。本アプローチが他分野で果たしてきた成功例は多数ある。単なる飛躍への期待や学問上の空論ではない。

代表者は風力発電システムにおける負の側面について研究してきた。バードストライク問題では猛禽類など保護鳥を守る風車周辺環境の三次元モニタリングシステムを3年以上の時間を使って開発した。風車の稼働率が予測値よりも低下する問題については地元テレビ局取材で風況調査の統計幅の貧

弱さを訴えた。地域住民の批判をかわすためアイドリング運転で「風車がよく回っている」という見せかけをしなければならない本末転倒の問題は裏話では済まされない。他にも低周波騒音、暴風/落雷によるブレード破損、風力需要の世界的急進による生産不足とメンテナンス深刻化など、風力をめぐる問題は悲観的ニュースのほうが多くを占め始めている。風力発電はいよいよ持続可能性を論じなければならない段階に入った。流体力学上の究極の解を得るというアイデアは、現状の周辺諸問題を一掃する可能性を秘める。

上記のような経験と近年の問題点を背景に、本研究は風車設計の永年の指標となりうる5つのテーマの先行基盤研究を行うことを目的とする。それぞれのテーマの狙いは次節で述べる。

## 3. 研究の方法

本課題で実施する項目は、風車効率の向上に係わる3つのテーマと、環境対応に関する2つのテーマとする。これらは風車性能の打開と、環境調和型の普及のための方策として将来的な重要性の高い課題である。各テーマは、実験計測、理論解析、数値解析の三つの評価から洗練作業を進める。実験では所属研究室が保有管理する大風洞設備と申請者が開発した気流用高解像度PIVシステムを利用できるという強みがある。理論解析では実験の前段階で性能を見積り、実験後に設計原理の確認と矛盾点を見いだす。数値解析は申請者が独自製作した解析ソフトウェアを風車性能予測用に活用する。研究期間は2年とし、初年度に風車効率向上の3テーマを、二年目に環境対応設計に関する2テーマを扱う。各項目の完了段階で、それぞれのUltimate Design(究極化された設計書)を完成させ、国内外に公表する。

### A. フォーメーション風車～風車どうしを近接配列させた干渉効果で出力増大を図る次世代設計

現状の風車設計は定常な一様流を想定したもので、おのずから一様流時に効率が最大となる。ところが複数の風車を近接配置すると一機当たりの出力が単独の場合より増加する条件がある。特に垂直軸風車ではこのような干渉効果が明瞭に現れる。非一様で周期的変動をもつ気流のほうが回転ブレードによるエネルギー変換に向いているのである。この原理は殆ど認知されていない。実験では2機の風車が主流方向に回転直径の5/2倍離れ、垂直方向に3/2倍ずれていると双方の出力が20%増大する。この情報だけでも風車群の最適なフォーメシ

ョンに対する「解」を提示することができる。出力向上におけるこの方法論は、ビル屋上の例のように都市部で敷地が制限されている場合や、「風の道」に集積型設置(packaged installation)をするときに重要となる。従来は負の要因とされてきた流れの干渉効果を有効エネルギー化する次世代設計である。

#### B. 多自由度回転系の風車～回転軸に対する制限を取り払い流体力増強を図る新三次元化設計

流体力学的性能に特化すれば、回転軸が一つでなければならない理由はない。公転と自転のような二自由度系回転を導入すれば、垂直軸風車の効率を改善することができる。ブレードの揚抗比を各位相での気流相対速度に合わせて理想的に制御できるためである。変速機能や変調制御など三自由度以上の回転にすればさらに改善される。回転軸に水平／垂直を併用すれば、周速比 $\lambda=0\sim 20$ の全域でベッツ限界効率59.3%に接近した性能を作り出すことができる。現在、可変ピッチプロペラ、ジャイロ／ダリウス、サボニウス／ダリウス等のパイブリッドブレードの開発が急進している。その先にあるのは全風速域で最大出力を維持するユニバーサル風車である。宇宙ゴマのように回転する独立二重回転体は、都市部での風向や風速の変動でさえエネルギーに変換することになる。自由にボディを変化させる変態型風車はユニバーサル風車の一つの「解」である。本課題では回転系の自由度制限を外したときに必ず存在し、かつ唯一に存在する、流体力学的究極形を導く。

#### C. フラクタル風車～抗力型風車の出力を全く新しい流体力学的原理で向上させる新発想設計

風車ブレード材料およびその加工についての制限を取り払う。このときフラクタル風車という概念が許される。葉や雪の結晶で代表されるフラクタル形状物体には、大小の相似形状の構造があり、流体との干渉に重要な作用を与える。例えば金網メッシュをブレードとしたサボニウス風車を試作したところトルクが増強した。透過性物体が中実物体より抗力を増大させる作用が風車として発現した興味深い例である。金網は細いワイヤの集合体であり大きな粘性抗力を誘発する。トルクは風車としての全体形状が作り出す。このような流体力の獲得と変換にマルチスケール性をもたせると、粘性と慣性を有機的にカップリングさせた効率改善のための複数の「解」が出現する。

フラクタル風車では、トポロジー研究から引用される種々の風車羽根をブレードに採用して、従来型の翼設計に全く属しない風車を設計する。そこから流体のせん断応力もトルクに変換するようなデザインも生まれるはずである。フラクタル風車は申請者個人の挑戦であると共に、次世代設計を切り開くブレークスルーの芽となる。

以上のA～Cのテーマについては、風洞試験用ミニチュアモデルの製作、PIVによる周囲流動場センシングとトルク計測を実施する。風洞試験でのデータが不足する場合は数値解析による性能予測で詳細なパラメータ研究を補間する。全ての課題は代表者(村井)が担当し、分担者(田坂)は乱流遷移域の渦構造に関する研究経験を活かしてテーマCを担当する。

#### D. 垂直軸型アート風車～風車羽根の曲線美と流動エネルギー場の流線美が両立する解を探る

風向選択性をもたない垂直軸風車はブレード形状の設計自由度が高い。サボニウス型のアート風車の研究を過去5年間担当し、その意義を実感している。都市景観や地域文化にちなんだ風車の形状と色彩を設計することで、回転するモニュメントとしての付加価値を加える。学校や公園での設置が歓迎され、住宅地でも好意的に導入された。風力の末端普及への起爆剤である。小型プロペラ風車は個性がなく騒音も問題となっている。これに対して垂直軸型アート風車は特色あふれるデザインで人の心をつかむ。低回転数起動による静寂な特性と、1kW程度の出力規模が住宅向けニーズに適合している。残された問題はアート性と流体力学的性能の両立である。自己起動性と最大周速比はアート性に対して相反要素になる。非軸対称性や曲面の導入は整合要素になる。本課題では発電効率を50%に抑制したときのアート性の採用可能な形状自由度の「解」を導く。無限通り存在しうるアート性(参考：次頁の写真)を個々に性能実験する必要を排除するためである。この成果から、文理融合的なデザインの実現に向けた流体力学マニュアルを完成させる。

#### E. 陸上／洋上走行風車～来るべき風力コージェネという有効エネルギー化戦略の先駆け設計

自動車の屋根に風車を搭載して走行すると、空力抵抗の一部を電力として回収できる。しかし無風時の走行では風車に作用する空力抵抗増加分の何割かを回収するだけである。この問題は風車抗力係数CDと風

車パワー係数 CP の比で説明される。現状では  $CD < CP$  なる風車が存在しない。そのため自動車への搭載は意味をなさない。これまでの固定風車では  $CD$  が風車支柱の強度設計にしか係わらなかった。本研究では  $CD < CP$  となる初めての風車を設計する。翼の揚抗比の原理と同じで実現可能である。ベッツの理論にも矛盾しない。横風時に走行させたときの例から簡単に証明できる。獲得するエネルギーは気流の主流方向から、走行に対する抵抗はその進路方向だけになるためである。風車を搭載した大型船舶は実在する。進行方向の抵抗にならなければ、走行風車は見かけ上、無限大の成績係数(COP)をもつ発電装置になる

(そもそも船舶のマストは進行方向の力になっている)。本項目では自動車や船舶などの燃料消費率を将来節減する風力コージェネという考え方を先行設計し、実験的立証とともに、そのグローバルエネルギー収支の「解」を求める。

#### 4. 研究成果

以下に、項目別に得られた成果を示す。

テーマAはフォーメーション風車の性能予測で、プロペラ風車の近接配置干渉を、透過性円盤モデルによる風洞実験で計測・評価する方法論を開発した。この方法により周速比を変化させるパラメータが省略され、風車回転円内を通過する気流の速度比またはタービン抵抗のみで、風車どうしの干渉を風洞実験によって試験するシステムが完成した。その結果、風車の後流には、周期的な脈動を伴う乱れが発生することがわかった。

テーマBは多自由度回転系の風車、すなわち回転軸を複数もつ風車性能の調査である。実験ではサボニウスとダリウスを独立回転軸で共有させる試験を行い、抗力型のサボニウスを内側にもつダリウス風車が低周速比で起動することを明らかにした。この結果はアメリカ機械学会主催会議の国際会議論文集に掲載された。

テーマCはフラクタル風車、つまり乱流の乱れ成分と風車幾何学的構造の干渉に関する科学に焦点をあてた。金網で構成されるサボニウス風車が、金網を通過する気流からの粘性抗力をうけて駆動するという原理について回転性能試験と可視化実験を実施した。また、そのような空間スケールに多重性をもつ外部流の3次元流動構造を計測するための3-D PTV 計測を新規に開発し、英文誌に掲載された。

テーマDはアート風車であり、風車性能とアート性の両立条件を合理的に究明するという方法論を研究した。その結果、三次元的な流線と、ブレードの曲面およびそれによってもたらされる光沢の動きが動くモニユメ

ントとしての付加価値を与えることなどを分析した。またこのテーマに関連し、野鳥が風車に衝突する問題、いわゆるバードストライクについて研究を進め、風車のビジュアル性や後流構造に依存した衝突の可能性などについて画像処理技術の開発とともに鳥検知システムの開発を行った。これらは関連学会で発表され、高い評価を受けた。

テーマEは走行風車で、理論および数値シミュレーションによってその性能予測を行った。これは自動車や船舶において抗力の一部を電力として回収する技術として既に実用化されているが、走行方向に垂直な風の成分が、成績係数を増大させることを確かめた。

#### 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1件)

- (1) T.Watamura, Y.Tasaka, Y.Murai, LCD projector based 3D color PTV, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 47, 2013, pp. 68-80 (2013) (査読あり)

[学会発表] (計41件)

- (1) 小田友朗, 大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一, 直線翼垂直軸風車の二体干渉における翼取付け角の影響, 日本機械学会北海道支部学生会第42回学生員卒業研究発表講演会論文集, pp.159-160(2013年3月6日, 旭川高専, 旭川)
- (2) 中島平裕, 武島幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一, 水平軸プロペラ風車の後流速度変動と低周波数騒音との関連性評価, 日本機械学会北海道支部学生会第41回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, pp.231-232(2012年3月9日, 北海道大学, 札幌)
- (3) D.Tanaka, Y.Tasaka, Y.Murai, Experimental study on flow separation around a rotating blade as a flow noise research, Proc. 8th KSME-JSME Joint Thermal and Fluid Engineering Conference - Korea, CD-ROM, pp. 1-4 (2012年3月17日, ソウル国立大学, ソウル, 韓国)
- (4) K.Takeshima, Y.Tasaka, Y.Murai, Y.Takeda, H.Kumeno. Image sensing technique for flying bird detection and classification in natural background, Proc. IBSC (International Bird Strike Committee) Conference - Stavanger Norway, pp.1-12 (2012年6月15日, スタバンガーホテル, スタバンガー, ノルウェー)
- (5) 湯本健明, 渡村友昭, 田坂裕司, 熊谷一郎, 村井祐一, 単一カメラによる気流の広領域三次元速度場計測を実現するPIVシステム, 日本機械学会年次大会2012講演論文集, No.12-1, J055022, pp.1-2(2012年9月13日, 金沢大学, 金沢)
- (6) 村井祐一, 井戸健敬, 離散速度ベクトルデー

- タの時空間楕円補間とその応用, 日本機械学会年次大会 2012 講演論文集, No.12-1, J055021, pp.1-2(2012年9月13日, 金沢大学, 金沢)
- (7) 村井祐一, 湯本健明, 武島幸太郎, 大石義彦, 田坂裕司, 武田 靖, PIV を利用したステレオカメラによる風景画像の立体認識, 可視化情報全国講演会(姫路 2012) 講演論文集, Vol.32, Suppl. No.2, pp.39-40(2012年10月6日, 姫路商工会議所, 姫路)
- (8) 村井祐一, 飛翔鳥種の自動判定技術開発, 鳥衝突日本委員会(JBSC)主催セミナー「Trend of Bird Strike Prevention -2012」, 講演番号 No.2 (2012年12月13日, 日本電気本社ビル, 東京)
- (9) 武島幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一, 風車内構造物を有するダリウス風車周りの流動計測, 日本機械学会北海道支部学生会卒研発表会講演論文集, pp.259-260(2011年3月6日, 室蘭工業大学, 室蘭)
- (10) 湯本健明, 村井祐一, 田坂裕司, 3次元気流速度場計測のためのカラーPIV の性能評価, 日本機械学会北海道支部学生会卒研発表会講演論文集, pp.145-146(2011年3月6日, 室蘭工業大学, 室蘭)
- (11) T.Watamura, Y.Tasaka, Y.Murai, Uncertainty minimization of particle color identification for full color range PTV, Proc. 9th Int. Symp. On Particle Image Velocimetry, USB/Theory and Algorithm IV-1, 4p., BoA. pp. 115-115(2011年6月9日, 神戸大学, 神戸)
- (12) T.Yumoto, Y.Tasaka, Y.Murai, Single-camera 3D3C particle image velocimetry for airflow based on computed tomography for color-illuminated tracer, Proc. 9th Int. Symp. On Particle Image Velocimetry, USB/Theory and Algorithm I-4, 4p., BoA. pp. 55-55(2011年6月9日, 神戸大学, 神戸)
- (13) Y.Murai, Y.Tasaka, and T.Kanda, Flow field measurement from particle tracking accelerometry, Proc. 9th Int. Symp. On Particle Image Velocimetry, USB/Volumetric PIV II-3, 4p., BoA. pp. 107-107(2011年6月10日, 神戸大学, 神戸)
- (14) Y. Takeda, Y. Murai, Bird strike prevention - some Japanese activity, Bulletin of Bird Strike North America Conference - Canada, S11-3, pp. 16-16(2011年6月15日, ナイアガラフォール, オンタリオ, カナダ)
- (15) 村井祐一, 武島幸太郎, 武田靖, 風車バードストライク問題における空港鳥観技術の応用可能性, 第 17 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp.223-224(2011年6月22日, 九州大学, 福岡)
- (16) 村井祐一, 田中大樹, 繁富啓嗣, 武島幸太郎, 田坂裕司, シン ウェン, 垂直軸風車まわりに形成される定在的な風速変動場と低周波騒音, 日本機械学会第 16 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp. 355-358(2011年6月24日, 関西大学, 高槻)
- (17) 武島幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一, 円筒要素によるダリウス風車の迎角制御, 日本機械学会第 16 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp. 347-350(2011年6月24日, 関西大学, 高槻)
- (18) K. Takeshima, Y. Tasaka, Y. Murai, Influence of internal objects in flow characteristics of Darrieus turbine, Proc. ASME-JSME-KSME Fluid Engineering Conference, S22. 23rd Symposium on Fluid Machinery, AJK2011-22039, 6p.(2011年7月10日, 浜松ビア, 浜松)
- (19) 湯本健明, 渡村友昭, 田坂裕司, 村井祐一, 気流三次元計測用カラーPIV における三次元煙濃度分布の再構成, 日本機械学会北海道支部第 50 回講演会講演論文集, No.112-2, pp.97-98(2011年10月28日, 旭川高専, 旭川)
- (20) 中島平裕, 武島幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一, 水平軸プロペラ風車の後流速度変動と低周波数騒音との関連性評価, 日本機械学会北海道支部第 50 回講演会講演論文集, No.112-2, pp.99-100(2011年10月28日, 旭川高専, 旭川)
- (21) 武島幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一, 武田 靖, バードストライク対策のための画像処理による鳥検知と鳥種判別, 日本機械学会北海道支部第 50 回講演会講演論文集, No.112-2, pp.99-100(2011年10月28日, 旭川高専, 旭川)
- 〔その他〕(計 1)
- (1) 村井祐一, 田坂裕司, 風力発電, NHK 北海道放送 2012年2月16日夕方ニュース, ならびに全国放送 (2012)
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔産業財産権〕
- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
村井 祐一 (MURAI YUICHI)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：80273001
- (2)研究分担者  
田坂 裕司 (TASAKA YUJI)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：00419946