

令和元年6月24日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21047

研究課題名(和文) 風況条件や形状の不確かさを考慮した小型風車の最適設計とその有効性実証

研究課題名(英文) Shape optimization of a small wind turbine considering uncertainties and its validation

研究代表者

山崎 渉 (Yamazaki, Wataru)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50598696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、条件の不確かさを考慮した垂直軸型風車の最適形状設計を行う事を主題とし、不確実性解析手法の比較検討や、効率的な形状表現手法の提案、実験と数値解析データを融合した最適設計技術の開発なども行った。開発した手法を用いる事で、現実的な不確かさ要因を考慮した上で、より性能のロバストな、安定した性能を持つ垂直軸型風車のブレード形状を設計する事ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、稼働条件などの変動に対してロバストな、安定した性能を持つ流体機械を効率的に最適設計する技術を開発し、それを垂直軸型風車の形状設計問題において検討した。開発技術は今後各種流体機械の設計に応用する事が可能であり、高性能な流体機械を短期間でかつ自動的に設計する事ができると考えられ、工学的な価値を十分に有するものである。

研究成果の概要(英文)：In this research subject, shape optimizations of small vertical axis wind turbines (VAWT) have been performed with considering uncertainties of operating conditions. We have also performed the comparing investigation of several uncertainty quantification approaches, the development of an efficient geometry parameterization method, and the shape optimization of VAWT with integrating experimental and numerical performance evaluations. Utilizing the developed approaches, robust optimal VAWT shape designs could be efficiently obtained.

研究分野：設計工学、流体力学

キーワード：不確実性解析 垂直軸型風車 最適形状設計 応答曲面法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

小型風車は非常用電源及び分散型電源として期待されている再生可能エネルギーであり、将来的な需要の高まりが見込まれている。一方でその普及には、導入コストが割高な事や安全性、及びその高性能化や発電可能な風況条件の拡大などの問題を解決する必要がある。風車形態は水平軸型と垂直軸型に大別されるが、垂直軸型風車は風の方向と風車の回転軸が直交する形態のものであり、風向依存性がない事から近年特に注目されている。近年においては数値流体力学（CFD）に基づく風車の最適形状設計も行われるようになってきた。

一般に数値流体解析においては与えられた流体機械の物体形状や流れ場条件に対し決定論的にその出力（例えば風車のパワー係数値など）が与えられる。しかしながら現実の流体問題においては、複数の要因により出力性能値に不確実性が内在している場合が多い。これは例えば物体形状に関してはその製造誤差や変形、また運用中の損傷・磨耗等が想定できる。同様に一様流速などの流れの諸パラメータの変動もその要因として想定されうる。そのため、CFDにおける数値解析や最適設計においても、流れ場条件や形状の微小変化に対する性能の変動、すなわち不確実性を検証していく事はより高度な流体解析や流体機械設計を行う上で必要不可欠である。出力値の確率密度関数や累積分布関数を検証する事で、数値解の質の評価や出力値の信頼性評価も可能となると考えられる。このような不確かな入力条件を考慮できる数値解析技術は不確実性解析と呼ばれ、出力として性能値の平均・標準偏差・確率密度関数などを得る事ができる。不確実性解析は数値解析において定量的信頼性を示す事ができるため近年様々な分野で注目されている。

### 2. 研究の目的

本研究においては、不確実性解析技術を小型風車の設計に適用し、条件の不確かさを考慮した小型風車の最適形状設計を行う事を目的とする。各種条件の不確かさとしては、一様流速の大きさ・流れの乱れ度・風車回転数・ブレード枚数などを考える事ができる。特に風車の回転数においては、回転数の変化と共にブレード形状に対する見かけの迎角範囲が変化するため、回転数の不確かさを考慮する事には工学的な意義がある。不確かさに対して性能変動の小さい、すなわち安定した性能・高い稼働率を持つ小型風車を設計し、その有効性を検討する事を目的とする。

上記の目的のために、各種の不確実性解析手法について検討を行い、その特性を把握したうえで、最適設計システムに導入する。これにより、不確実性を考慮したより現実的な最適設計問題を効率的に解くことが可能となる。また、最適設計問題を解く上で重要な要素となる形状表現法についても検討を行い、固有直交分解（POD）の技術を応用した効率的な形状定義手法を導入し、最適形状設計における計算コストの低減を目指す。最適化手法としては、過去に開発済みの **Kriging** 応答曲面法を活用した大域的な近似最適化技術を用い、小型風車形状の最適設計を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 従来、不確実性解析では **Monte-Carlo Simulation (MCS)** と呼ばれる、不確実性を持つパラメータの注目点付近で CFD 解析を数千回以上実施する必要のある、計算負荷の高い手法が用いられてきた。近年の低コストかつ高精度な手法として、不確実性の伝播を直接解析するために支配方程式自体を拡張する多項式カオス法に基づく手法や、応答曲面法を活用する **Inexpensive MCS (IMCS)** 法、数個のサンプル点での性能評価値の重みづけ和で不確実性を取り扱う **Divided Difference Filter (DDF)** 法などがある。これらの手法を導入し、MCS 結果と比較する事で、それぞれの手法の精度・特性について検討した。

(2) 形状表現法についても、**Bezier** 曲線や **B-spline** 曲線を用いるもの、コンピュータグラフィクス分野で開発された自由形状変形法など多数の手法がこれまでに提案されている。本研究では有望形状群からその主要な変形モードを抽出し、それを設計変数として用いる、POD 技術を応用した手法を開発し、その有効性について検討した。

(3) また、過去に開発した複数精度性能値を援用する応答曲面最適化技術を活用して、風車の実験性能値を高次精度データ、CFD 解析の性能値を低次精度データとして両者を融合し最適設計を行う、実験と解析を融合した最適設計技術を開発し、その有効性を検討した。これは低コストな CFD 解析で大まかな傾向を捕えた上で、実験計測により重要形状の実性能を担保する、という発想に基づく設計手法の提案であり、実験による性能値情報を最適設計に取り入れる事で風車ブレード翼間での干渉影響などの現実的な要因を設計に取り入れる事について検討した。また、ブレード翼間での干渉影響について詳細に調査する目的で、ロータのブレード翼枚数を 1 枚または 3 枚とした場合の多目的最適設計も実施し、翼間の流れの干渉効果が最適翼形状に与える影響について検討した。

(4) 更に、**Kriging** 応答曲面法を活用した大域的な近似最適化技術に不確実性解析技術を導入し、風車の回転数に現実的な不確実性を付与した場合の形状最適設計を行った。パワー係数の平均値の最大化と標準偏差値の最小化の多目的最適化問題を解き、ロバスト性を向上させるための設計知見について検討した。

#### 4. 研究成果

(1) MCS 法、多項式カオス法、IMCS 法、DDF 法などの不確実性解析手法について CFD 解析を用いた比較を行い、各手法の精度や特性を検討した。MCS 法は最も精度が高いと考えられるが、計算負荷も最も高コストとなる。MCS 法の結果と比較し、多項式カオス法、IMCS 法、DDF 法は格段に低コストであり、かつ不確実性解析結果も定性的には MCS 法と一致する事が確認できた。IMCS 法においては、応答曲面生成時のサンプル点の個数や配置が不確実性解析結果に大きく影響を与える条件もある事が確認された。支配方程式を直接拡張する多項式カオス法では、サンプル点の個数や配置を考慮する必要がない利点があり、本研究の結果としても、不確実性入力変数の確率分布の主要領域における予測精度は十分に高く、計算コストの面でも利点がある事が確認された。DDF 法では、CFD 解析を行うサンプル点は不確実性入力変数の尖度や標準偏差値に基づいて自動的に決まるため、ユーザー側がパラメータ設定に悩む必要がないという利点があり、不確実性入力変数が複数ある場合には、計算コストも最も小さくなる事が確認された。

(2) POD 技術を応用した効率的な形状表現手法についても検討を行った。有望形状群からその主要な変形モードを抽出し、それを最適化問題において形状を変化させる設計変数として用いる、という構想の手法について開発を行った。最適設計全体の解析コストを小さくするために、有望形状群は応答曲面の予測値に基づいて推定する事とし、低コストに近似的な有望形状群を取得した。その形状群の POD 解析から重要な変形モードを抽出し、それを設計変数に用いた。2次元翼の揚力係数 ( $C_l$ ) 最大化・抗力係数 ( $C_d$ ) 最小化の多目的最適設計問題において、取得した最も重要な変形モード1つのみを用いた場合（これは設計変数の総数が1つという条件に対応する）で、その結果が従来手法の24変数で形状表現をした場合と定性的に一致し（図1）、開発した手法を用いる事で、格段に設計変数の個数を少なくでき（設計空間を低次元化する事ができ）、最適設計全体のコストを数十%程度小さくできる事が示された。

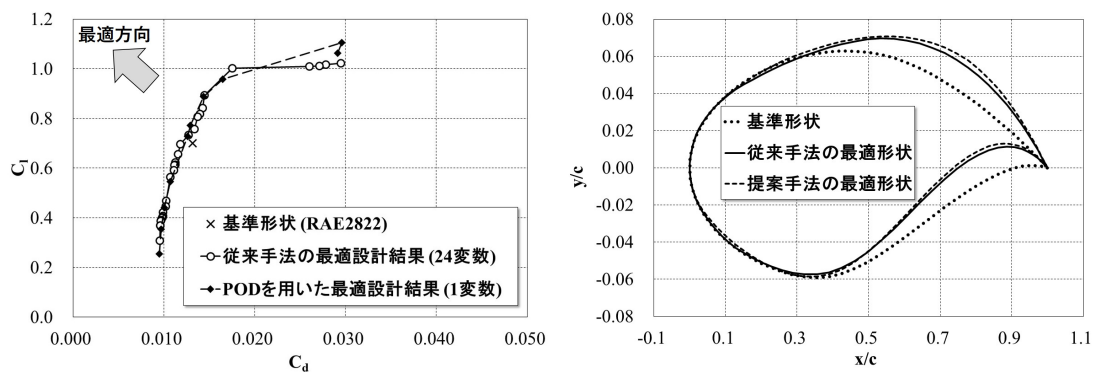


図1 従来手法と提案手法の比較、左：非劣解分布、右：代表形状比較

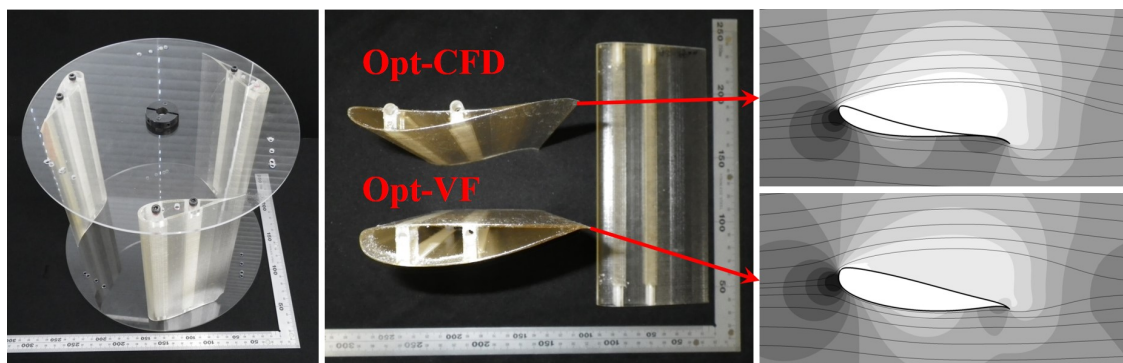


図2 造形した風車ロータ（左）とそのブレード翼形状における数値流体解析（右）

(3) 三次元プリンタにより造形したブレード翼で構成した風車ロータ（図2）の実験結果を高次精度評価値とし、CFD 解析により得られる性能値を低次精度評価値として両者を効率的に利用した最適設計技術を開発した。高次精度評価値の絶対値と低次精度評価値の関数変化傾向を活用して高次精度評価値に対する高精度な近似モデルを生成し、それを最適設計に用いる事により、実験データと解析データを融合した最適設計技術を開発した。CFD 解析のみにより得られた最適ブレード形状 (Opt-CFD) に比べ、実験データと解析データを融合して得られた最適ブレード形状 (Opt-VF) では実験計測によるパワー係数の最大値を約 8%向上させる事ができた（図3）。これは実験による性能値情報を最適設計に取り入れる事で風車ブレード翼間での干渉



影響などの現実的な要因を設計に取り入れる事ができたためであると考えられる。これについてはより詳細な検討として、ブレード1枚で構成される干渉効果の無いロータとブレード3枚で構成される干渉効果の有るロータでのパワー係数値をそれぞれ最大化する、CFD解析に基づいた多目的最適化についても実施した。その結果、両性能値の間にはトレードオフの関係がある事が明らかとなり、前縁半径が大きく、負のキャンバーを有する翼形状が干渉効果の無い場合には性能向上に寄与するが、干渉効果の有る場合には性能低下に作用してしまう事が確認された(図4)。

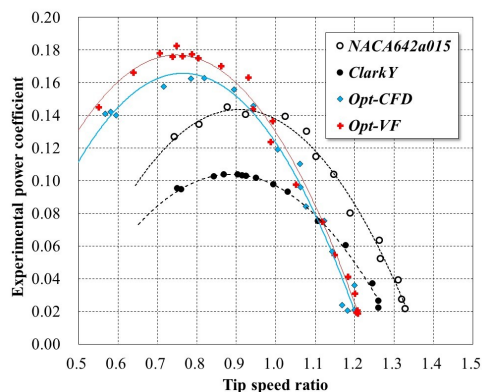


図3 実験計測による性能曲線比較

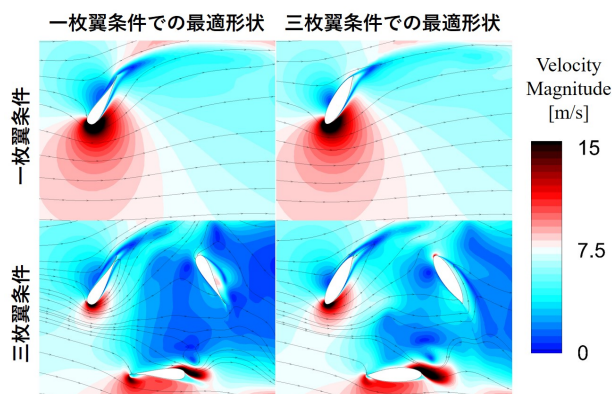


図4 ブレード翼枚数の変化による影響調査

(4) 屋外での風況計測データなどに基づいて、風車の回転数に与えるべき不確実性を設定し、その不確実性を考慮した風車ブレード翼形状のロバスト最適設計を行った。パワー係数の平均値の最大化と標準偏差値の最小化の多目的最適化問題を解き、その最適設計結果 (Robust) を、風車の回転数の平均値条件における決定論的な(従来手法の)最適設計結果 (Deterministic) と比較した。平均値条件におけるパワー係数値では Deterministic 形状の方が高性能であったが、不確実性を考慮したパワー係数の平均値で比較すると Robust 形状の方が高性能であり、開発した手法により、不確実性に対してロバストな最適形状を得る事ができた。図5に各形状の流れ場可視化図を示すが、平均値条件においては、後縁側の翼厚が薄い事が性能向上に寄与していたが、設計条件が変動した時にはその効果が薄れ、結果として性能が非ロバストになる、といった設計知見を得る事ができた。Robust 形状については今後その実験性能測定も実施し、そのロバスト性についてより詳細な追加検討を行う予定である。

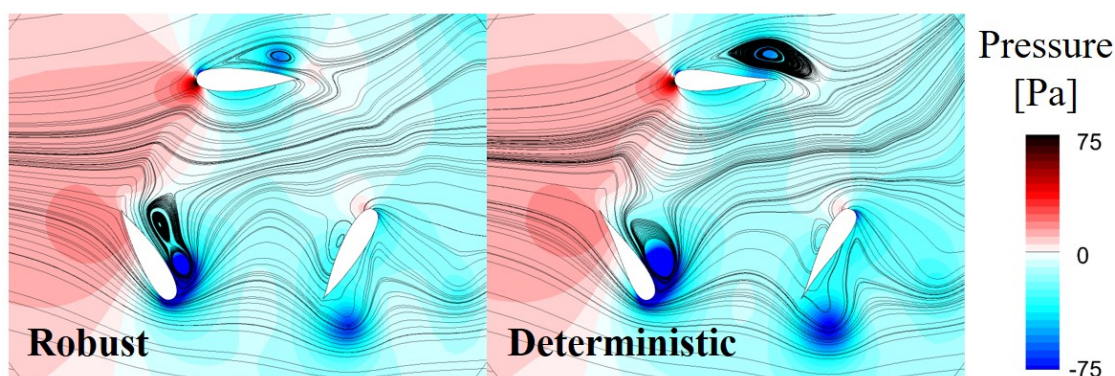


図5 不確実性を付与した場合における最適設計結果

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① W. Yamazaki, Experiment / Simulation Integrated Shape Optimization Using Variable Fidelity Kriging Model Approach, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.11, No.5 (2017), p.JAMDSM0053, DOI: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2017jamdsm0053>
- ② W. Yamazaki and Y. Suga, Comparison of Uncertainty Quantification Approaches in a Supersonic Biplane Airfoil Problem, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 査読有, Vol.60, No.1 (2017), pp.10-17, DOI: <https://doi.org/10.2322/tjsass.60.10>

〔学会発表〕（計 9 件）

- ① 今井伸哉, 伴直彦, 山崎涉, 不確実性を考慮した小型垂直軸型風車の翼形状最適設計, 日本機械学会北陸信越支部第 56 期総会・講演会, 2019.
- ② S. Imai, N. Ban, W. Yamazaki, Effect of Flow Interaction Between Blade Airfoils on Optimal Airfoil Shapes of Small Vertical Axis Wind Turbine, Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, 2018.
- ③ M. Kasai, S. Tabata, W. Yamazaki, Uncertainty Quantification for Robust Design Optimization of Supersonic Biplane Airfoil, Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, 2018.
- ④ N. Buyanbaatar, W. Yamazaki, Efficient Aerodynamic Shape Optimization Using Proper Orthogonal Decomposition, Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, 2018.
- ⑤ 山崎涉, 複数精度の性能値情報を用いた効率的な多目的形状最適設計技術の開発, 第 13 回最適化シンポジウム, 2018.
- ⑥ 林岳, 伴直彦, 山崎涉, 小型ダリウス風車における翼間干渉効果が最適翼形状に与える影響の調査, 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会, 2018.
- ⑦ T. Hayashi, W. Yamazaki, S. Imai, Investigation of Flow Interaction Effect between Optimized Airfoils on Small Vertical Axis Wind Turbine, Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017.
- ⑧ 山崎涉, Variable Fidelity Model を活用した実験・数値解析融合最適設計, 平成 28 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2017.
- ⑨ 山崎涉, 荒川裕太, 垂直軸型風車における実験・数値解析融合最適設計の試み, 第 48 回流体力学講演会／第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016.