

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04138

研究課題名（和文）大域的なトポロジー最適設計手法の提案と垂直軸型風車形態の俯瞰的考察

研究課題名（英文）Development of advanced global topology optimization methods and investigation of topologies of vertical axis wind turbines

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では大規模次元の設計変数空間を扱う大域的な最適化手法として、次元削減技術を活用して設計変数空間を低次元化する手法や、機械学習技術を活用した効率的な手法を提案し、その有効性を示した。垂直軸型風車形態の設計問題において検討を行い、その翼端板形態やブレード翼形状の最適設計を実施した。その最適化結果から、垂直軸型風車の性能向上に対する有益な設計知見を抽出する事ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義として、大規模次元の最適設計問題を効率的に解くための手法を提案できたため、複雑な形状・形態の設計を短期間で効率的に実施する事が可能になったと言える。また、垂直軸型風車の最適設計を実施し、その性能向上に対する重要な設計因子を検討・考察することができたため、より発電効率の高い垂直軸型風車の設計指針を明らかにする事ができた。

研究成果の概要（英文）：In this research subject, efficient global optimization methods for high-dimensional design variables space were proposed by utilizing dimension reduction technologies and/or machine learning technologies. The effectiveness of the proposed methods has been demonstrated in this research. The aerodynamic design problems of vertical axis wind turbines were investigated, and then optimal designs of its wingtip plate and of its blade wing were obtained. From the optimization results, useful design knowledge for improving the performance of vertical axis wind turbines could be extracted.

研究分野：流体力学、設計工学

キーワード：最適設計 応答曲面法 次元削減 機械学習 垂直軸型風車

1. 研究開始当初の背景

最適化分野では、板厚などの直接的な寸法を最適化する寸法最適化と呼ばれる方法に始まり、その後翼形状やノーズ形状などの三次元的な複雑形状をパラメータ表現してそのパラメータを最適化する形状最適化と呼ばれる方法が開発されてきた。また、当初は性能値の形状パラメータに対する勾配（感度）情報を用いた、所謂山登り法による局所的な最適設計が行われていたが、近年では応答曲面法などの効率的な手法が開発され、初期形状に依存しない大域的な最適設計が許容可能な設計コストに収まり、工学的な実設計問題にも積極的に適用されている。更に構造設計分野を中心に、トポロジー最適化と呼ばれる、形状変化に加え、形態の変化（例：追加物体や穴の導入）を考慮できる最適化手法が提案されている。単純な形状設計（例：流管・翼の形状）のみならず、各種要素の結合や配置（例：流路の統合・分岐、複数枚翼の配置）についても最適設計が可能となるため、既存の形態及び設計者が経験的に想定する形態とは異なる、潜在的な革新形態を得る事が可能であり、近年注目されている。

ただし、これまでの標準的なトポロジー最適化は感度解析手法との組み合わせによる局所的な最適化手法であり、非線形性が強く性能値関数が多峰性を持つ流体設計問題には不向きな一面があった。また、感度解析の必要性から、商用解析ソフトウェアなどの任意の性能評価ツールと組み合わせる事ができない点も問題点として指摘されていた。既存の大域的な最適設計手法を直接的にトポロジー最適化に適用する事については、その形態表現自由度に対応するパラメータ（設計変数）の総数が膨大になるため、そのような大規模次元の設計変数空間で大域的な最適解を探索する事が設計コスト的に現実的ではなく、より効率的な手法の提案が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、大規模次元の設計変数空間を適切に低次元化する手法や、機械学習技術を採用した高精度・低コストな大域的最適化手法を提案する事で、大規模次元の設計問題に適用しうる大域的なトポロジー最適化手法を提案する。多種多様な形態を考慮に入れた最適設計を行う事のできる技術を汎用化する事ができれば、中身がブラックボックス化された市販商用ソフトウェアとも組み合わせる事ができ、任意のもの作りの現場に革新的な展開をもたらす事が期待できる。

また、本研究における主要な設計対象の1つとして、垂直軸型の小型風車ローターを想定している。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注目されている小型風車形態である。小型風車による発電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の1つであり、更なる性能向上が望まれており、その最適形態に関する検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 高次元設計変数空間の低次元化を目指し、固有直交分解（POD）や独立成分分析（ICA）などの次元削減手法の導入について検討した。手法の概略としては、まず通常の形状表現手法を利用した（高次元の）設計変数空間における応答曲面上で近似的なパレート最適解群を取得し、その近似最適形状群の形状データに対して次元削減手法を適用する。これにより、その近似最適解群の形状を表現するために重要な形状変形モードを取得し、その主要な変形モードを（限られた個数の）設計変数として用い、適切な形状表現自由度を保ったまま設計変数空間の低次元化を図るものである。また、その近似最適解群の取得の段階では、性能評価の精度は厳密でなくてもよいと考えられるため、この最適設計の前処理にあたる段階において低次元精度の性能評価手法を用いる方法についても検討した。

(2) 機械学習技術を活用した、高次元設計変数空間に対する効率的な大域的最適設計手法についても検討を行った。手法の概略としては、まず既知サンプル点群に対してDBSCANクラスタリングを行い、現時点での最適解を含むグループと含まないグループとに分類する。続いて、サポートベクトルマシンにより両グループ間に分離超平面を構築する。この分離超平面上ではサンプル点が疎であることが想定されるため、構築した応答曲面モデルでの予測性能値が最適となる分離超平面上の位置を追加サンプル点位置とする。DBSCANでの処理に含まれる距離パラメータ ϵ を適切に設定する事で、大域的探索と局所的探索をどちらも実現する事ができる。開発手法は、解析関数の最小化問題や空力形状最適設計問題において、その有効性検証を行った。更に、70個の設計変数により定義された空力トポロジー最適設計問題にも適用できるように拡張し、その結果についても検討した。

(3) 垂直軸型風車周りの数値流体解析を行い、3枚のブレード翼を端部で結合する翼端板の形態に関する調査及び最適設計を行った。また、ブレード翼枚数及びソリディーの変化を許容した

風車形態の最適設計も行い、垂直軸型風車における翼間干渉効果の影響についても調査を行った。得られた代表形状や最適形態についてはその実験性能評価も行い、設計結果の妥当性についても検討を行った。

4. 研究成果

(1) 高次元設計変数空間に性能値の応答曲面近似モデルを構築し、その近似モデルに基づいて、有望形状データ群を取得し、それに対して次元削減技術を適用した。得られた重要な形状変形モードのみを利用して、低次元設計変数空間において低コストな最適設計を実施した。高次元設計変数空間において従来手法で最適化した結果と、低次元化した上で最適化した結果は定性的に一致しており、設計変数空間の適切な低次元化を実現できた。また、高次元設計変数空間での処理に低次精度の性能評価手法を用い、低コストに低次元化を実現するような手法についても検討した。本検討では物理モデル忠実度や計算格子解像度の低下により低次精度評価手法を定義し、その結果最適設計に関わる全体の解析コストを大幅に低減する事ができた。得られた重要な形状変形モードからは設計知見の抽出も可能であり、有効な最適設計手法を提案する事ができた。POD と ICA の比較としては、両者共に有効な低次元化が実現できたものの、ICA において、より局所的な特徴を変形モードとして抽出する事ができた。図 1 は揚力係数 (C_l) の最大化・抗力係数 (C_d) の最小化の多目的最適設計問題における各モードの効果を示している。POD では第 1 モードが従来手法で得られたパレート解群 (FFD) に沿う性能変化を示すものの、第 2 モード以降の性能値への影響はあまり大きくない。ICA では複数のモードがパレート解群に沿う性能変化を見せており、有望形状データ群からの設計知見抽出手法として、その有効性が確認できた。

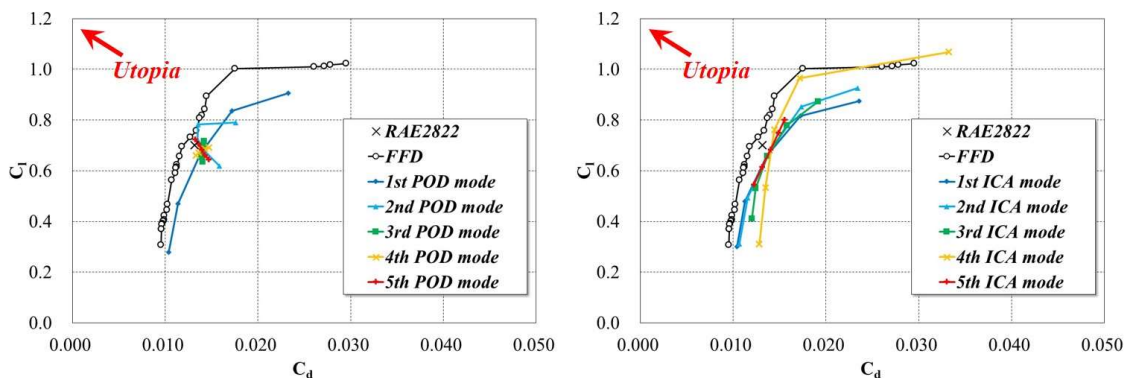


図 1 POD・ICA による主要モードの効果の比較

(2) 提案手法を 80 設計変数次元の解析関数最小化問題及び空力形状最適化問題において検討した所、既存手法である Bayesian 手法を用いた場合に比べて良好な結果を得ることができ、性能値の近似モデル構築に関わるコストも大幅に低減できる事が確認された。本手法は 70 個の設計変数により形態を定義する空力トポロジー最適設計問題にも適用した。70 個の設計変数により、NURBS 曲面を構築し、その断面から二次元翼形態を表現した。図 2 に示したように様々な翼形態を考慮に入れた上で、抗力の最小化を目的とした超音速条件下での二次元翼形態のトポロジー最適設計を行い、その結果として Busemann 複葉翼形態と類似した最適形態を得ることができた。Busemann 複葉翼は衝撃波を翼間で相殺することによって低い抗力値を実現することができる線形理論上の抗力最小形態として知られており、これに類似した最適形態が得られたことから開発手法の有効性を示す事ができた。

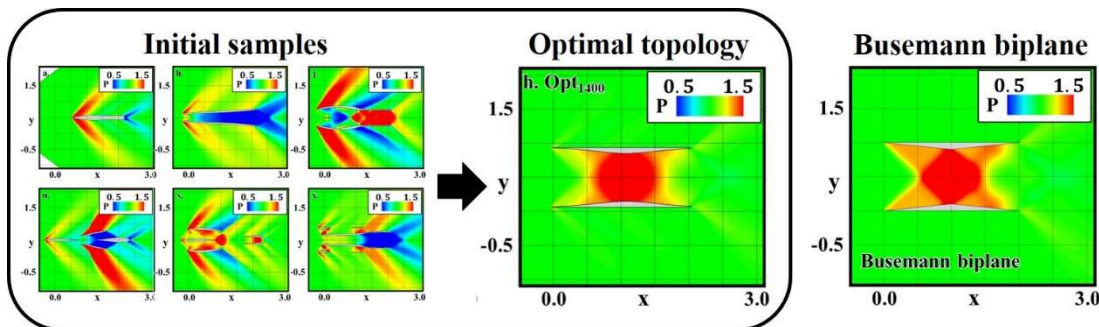


図 2 超音速翼形態の最適設計

(3) 周速比 0.7 における平均パワー係数値の最大化を目的関数として、3 枚のブレード翼を有する垂直軸型風車ローターの翼端板形状の最適設計を行った。翼端板の付与によるブレード翼端での流れの抑制による性能向上が確認された。図 3 に代表形状のシミュレーション結果、実験用の製作ローター、及びその実験評価により得られた性能線図を示す。Model1 は単純な円盤形状であり、Model2 は二次関数により幾何学的に定義された形状である。得られた最適形状は Model2 に近いが、翼後縁側で大きくくびれた非対称性を有する。この形状の差異により、ローター内部により適切な負圧領域が生じ、性能向上につながっている事が確認された。シミュレーションにおいて確認された性能差は、実験においても同様に確認され、最適形状の翼端板の付与により、円盤形状 (Model1) に比べ 10% 程度の性能向上を達成している。

また、周速比 0.7 における平均パワー係数値の最大化を目的関数として、ブレード翼枚数及びブレード翼形状の最適設計を行った。本設計条件においては、翼枚数が少ない方が風車ローター内部の流速が増加し性能が向上する事が確認され、最適設計結果は翼 2 枚の形態となった。図 4 に最適設計結果及びその実験評価により得られた性能線図を示す。本検討においてもシミュレーションにおいて確認された性能差は、実験においても同様に確認され、得られた設計結果の妥当性を示す事ができた。これらの垂直軸型風車形態の最適化に関する検討を通じて、その性能向上に関わる重要な設計知見を効率的に取得し、考察することができた。

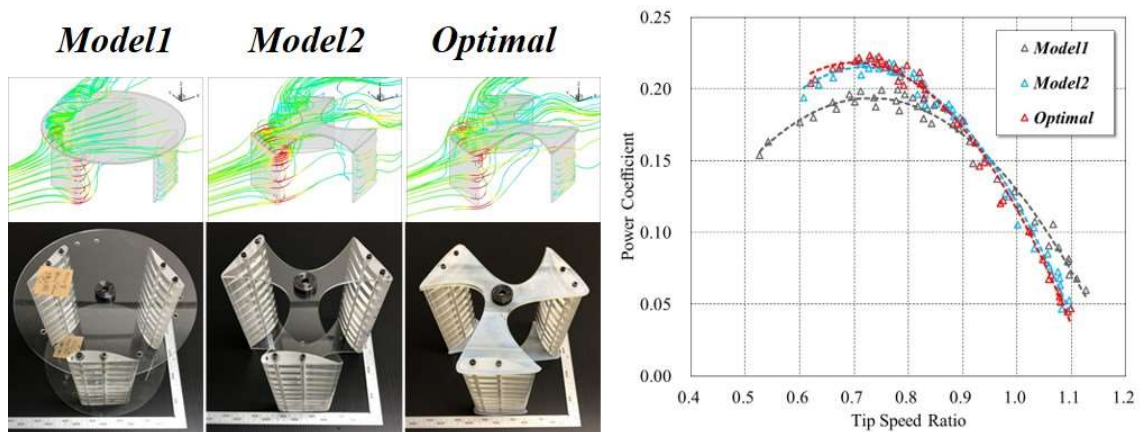


図 3 垂直軸型風車翼端板形状の最適設計

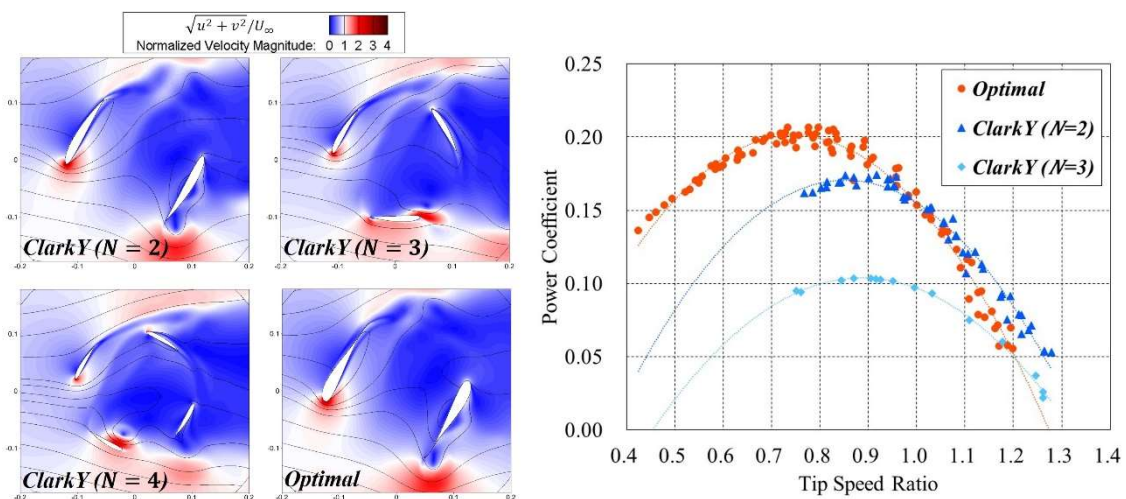


図 4 垂直軸型風車のブレード翼枚数及びブレード翼形状の最適設計

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ban Naohiko, Yamazaki Wataru	4. 巻 59
2. 論文標題 Black-Box Function Aerodynamic Topology Optimization Algorithm via Machine Learning Technologies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 5174 ~ 5185
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J059605	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 Ban Naohiko, Yamazaki Wataru	4. 巻 22
2. 論文標題 Efficient global optimization method via clustering/classification methods and exploration strategy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optimization and Engineering	6. 最初と最後の頁 521 ~ 553
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11081-020-09529-4	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 Tabata Soichiro, Hanazaki Kyohei, Yamazaki Wataru	4. 巻 63
2. 論文標題 Uncertainty Quantification and Robust Design Optimization of Supersonic Biplane Airfoils	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 233 ~ 242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.63.233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 YAMAZAKI Wataru	4. 巻 14
2. 論文標題 Efficient multi-objective shape optimization using proper orthogonal decomposition with variable fidelity concept	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Wataru YAMAZAKI
2. 発表標題 Efficient Multi-Objective Shape Optimization Using Dimension Reduction Technology
3. 学会等名 AIAA Scitech 2022 Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今井伸哉、山崎渉
2. 発表標題 クリギングモデルを用いた小型垂直軸型風車のブレード翼形状およびソリディティ値の最適化
3. 学会等名 日本機械学会第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高松良輔、山崎渉
2. 発表標題 機械学習技術を用いた超音速翼の大域的トポロジー最適設計
3. 学会等名 日本機械学会第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruki Shiine, Shinya Imai, Wataru Yamazaki
2. 発表標題 Performance Investigation of Various Topologies of Small Darrieus Vertical Axis Wind Turbines
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Soichiro Tabata, Wataru Yamazaki
2. 発表標題 Extraction of Design Knowledge from a Robust Design Optimization of Supersonic Biplane Airfoil
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎渉、Nomin BUYANBAATAR、伴直彦
2. 発表標題 サロゲートモデルを用いた高次元設計空間における最適設計
3. 学会等名 CMD2020計カスクウェア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井伸哉、小林俊輝、山崎渉
2. 発表標題 小型垂直軸型風車における翼端板の形状最適化
3. 学会等名 CMD2020計カスクウェア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井伸哉、山崎渉
2. 発表標題 小型垂直軸型風車に対するブレード翼枚数の変化を考慮した翼形状最適設計
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田畑宗一郎、山崎渉、湯原達規
2. 発表標題 Split Tip Wingletの多分野統合最適設計と次元削減手法による設計知見の抽出
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高松良輔、山崎渉
2. 発表標題 機械学習技術を用いたトポロジー最適設計手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiki Kobayashi, Shinya Imai, Wataru Yamazaki
2. 発表標題 Performance Enhancement of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine with Wingtip Devices
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Ikarashi, Naohiko Ban, Wataru Yamazaki
2. 発表標題 Two-Dimensional Aerodynamic Topology Optimization in Supersonic Flow
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinya Imai, Naohiko Ban, Wataru Yamazaki
2. 発表標題 Robust Optimization of a Blade Airfoil Shape for a Small Vertical Axis Wind Turbine
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林俊輝、今井伸哉、山崎渉
2. 発表標題 小型ダリウス型風車における翼端板形状の最適設計
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井伸哉、伴直彦、山崎渉
2. 発表標題 小型垂直軸型風車における最適翼形状と翼間干渉効果の関係
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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