

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360072

研究課題名(和文) 風レンズ風車の革新的三次元空力設計法の創出とそのベッツ限界への挑戦

研究課題名(英文) Development of Innovative Method for Three-Dimensional Aerodynamic design of Wind-Lens Turbine and Challenge to the Theoretical Betz Limit

研究代表者

古川 雅人 (FURUKAWA, MASATO)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30181449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：子午面粘性流れ解析と翼の二次元翼素設計とを組み合わせた「風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法」を創出するとともに、その空力設計法と遺伝的アルゴリズム(GA)による多目的最適化手法とを組み合わせることにより、風レンズと翼車の両者を同時に最適設計可能な「風レンズ・翼車の多目的最適空力設計法」を構築した。本最適設計法を適用した風レンズ風車モデルを試作し、風洞試験でその全体性能を計測するとともに、三次元レイノルズ平均ナビエ・ストークス(RANS)解析によりその流れ場を詳細に調べた結果、本設計法はベッツの理論限界を凌駕する高性能な風レンズ風車を実現することが可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：A three-dimensional aerodynamic design method for the wind-lens turbine has been developed, which consists of the meridional viscous flow analysis and the two-dimensional blade element design. A multi-objective optimal design approach for the wind-lens and the rotor blade has been constructed by combining the present aerodynamic design method for the wind-lens turbine and the genetic algorithm (GA). The present optimal design approach can achieve the simultaneous optimization of the rotor blade loading distribution and the wind-lens shape. The aerodynamic performance and the flow field for a Pareto optimal solution of wind-lens turbines designed by the present optimal design approach has been investigated by wind-tunnel tests and three-dimensional Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) simulations. It was found that the wind-lens turbine can realize the transcendence of the theoretical Betz limit with the present optimal design.

研究分野：流体工学

キーワード：風力発電 風レンズ 空力設計法 最適設計 ベッツ限界

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出削減という観点から、風力発電システムは再生可能エネルギーの利用として全世界でその普及が推進されている。しかしながら、日本では、平均風速が低い上に風速と風向の変動が大きく、風力発電に適した地域は非常に限られており、我が国において風力エネルギーをより有効に利用するためには、日本の風況に適した高性能の風車を新たに開発する必要がある。

風車による発電量は風速の3乗に比例することから、風車まわりに風を局所的に集中させることができれば、発電量は大幅に増加し、年間平均風速の低い日本に適した風力発電方式の構築が可能となる。このように積極的に風エネルギーを集めることは従来ほとんど研究の対象とされてこなかったが、集風機能を有する「風レンズ風車」が九州大学において独自に開発されている。この風レンズ風車では、図1のとおり、ディフューザとつばを組み合わせた「風レンズ」(集風体)を翼車の外周部に装着することによって、翼車まわりに風を局所的に集中させる。大型の風レンズを装着することで約5倍の、コンパクト型の風レンズでも約2~3倍の風車出力の向上を実現することができる。風レンズ風車は次のような利点を有することから、日本の風況に適した風車として注目されている。

- ・ 風レンズの集風効果による高出力・高起動特性 ⇒ 低風速でも起動・発電が可能
- ・ 風レンズのつばによる高い風向追従性 (高い風見鶏効果) ⇒ 翼車を風上に向ける制御が不要
- ・ 風レンズによる翼端渦の抑制 ⇒ 翼車からの空力騒音が低下
- ・ 風レンズ(静止構造体)への避雷針の設置 ⇒ 落雷対策が容易

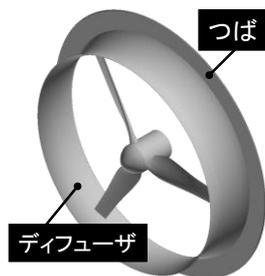


図1 風レンズ風車

風レンズ風車では、図2に示すとおり、風レンズのつば外周で流れが剥離し、その後方に剥離渦が形成される結果、つば後方の圧力が風車前方の大気圧よりも低下し、この圧力差で風車周囲の流れがディフューザ内に引き込まれることによって、集風効果が得られる。この集風効果、すなわち風レンズ内部へ流入する風量は風レンズ風車の空力設計において最も重要なパラメータであるが、集風効果が風レンズと翼車の両流れ場の干渉の

結果決まることから、設計段階で集風効果を定量的に予測することは容易でない。

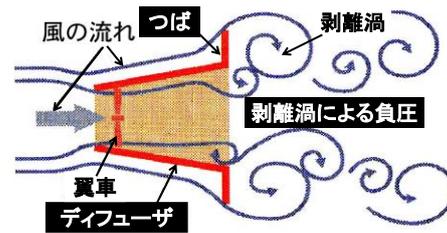


図2 風レンズの集風メカニズム

また、風レンズ風車の場合、図3のとおり、風レンズ内の内部流れと風レンズまわりの外部流れが混在すること、風レンズ後方で流れの剥離が発生すること、集風効果に伴う流入流線の曲率発生によって風レンズへの流入風速に大きな半径方向分布が現れることから、従来の風車よりも極めて複雑な流れ場が形成される。

さらに、風レンズ風車では、翼負荷分布が風レンズの外部流れに大きな影響を与えるとともに、風レンズの外部流れ(特に風レンズ後方の剥離渦流れ構造)が風レンズの内部へ流入する風量に大きな影響を及ぼす。すなわち、風レンズの内部流れ場と外部流れ場とを連成して、風レンズ風車の空力設計を行うことが求められる。

以上のような流れ場の特徴をもつ風レンズ風車に対して、従来の風車設計法を適用することには限界があり、高性能な風レンズ風車を開発するためには、従来の設計法にとられない斬新な発想に基づく空力設計法の新たな創出が不可欠である。

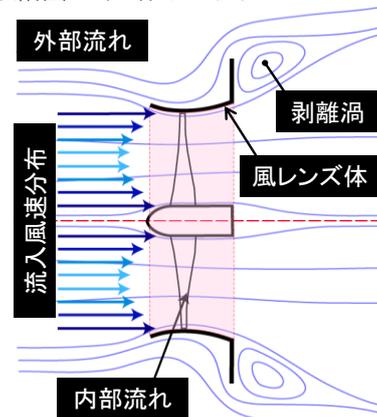


図3 風レンズ風車まわりの流れ場

2. 研究の目的

本研究では前述の観点から、日本の風況に適した新形態の風レンズ風車に適用可能な革新的三次元空力設計法を創出することにより、ベッツ限界を超越した高性能風車の実現を探索することを目的とする。具体的には、まず子午面粘性流れ解析と翼の二次元翼素設計とを組み合わせた「風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法」を創出し、次にその翼車の空力設計法と遺伝的アルゴリズム(GA)

による多目的最適化手法とを組み合わせることにより、風レンズと翼車の両者を同時に最適設計可能な「風レンズ・翼車の多目的最適空力設計法」を構築する。さらに、本設計法を適用した風レンズ風車モデルを試作し、風洞試験でその全体性能を調べるとともに、風車の翼負荷分布を詳細に調べることで、本設計法の妥当性を検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法の創出

まず、風レンズまわりの流れ場の特徴を考慮した「風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法」を新たに創出した。本設計法は与えられた風レンズ形状に適した翼車を設計するための手法であり、その設計スキームは、図4に示すとおり、「子午面粘性流れ解析」と「二次元翼素設計」から構成され、その両者について以下のとおり定式化を行った。

「子午面粘性流れ解析」においては、子午面 ( $r-z$  面) 内の軸対称かつ粘性流れを仮定するが、軸対称流れの仮定のもとで翼作用 (翼負荷分布) を考慮するために、翼両面の圧力差に基づいた翼力 (体積力) として翼作用をモデル化した。設計条件として与えられる風レンズの形状および翼負荷 (角運動量) 分布のもとに、翼力を体積力として付加した軸対称ナビエ・ストークス方程式を数値的に解いて、風レンズの内部流れと外部流れを連成して解析することにより、風レンズの集風量 (風レンズ内部を通過する風量) および流入風速分布を求めた。

「二次元翼素設計」では、上述の子午面粘性流れ解析で求めた風レンズの流入・流出風速分布、および設計条件として与えられた翼負荷分布から翼車前後の速度三角形を規定し、風レンズの効果を一次元的に考慮したダクト付きタービンの運動量理論による二次元翼素理論に基づいて翼素性能データから翼弦長と取付角を決定した。

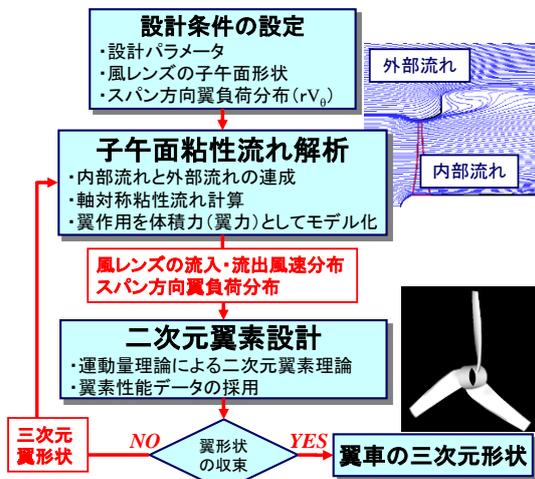


図4 風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法

#### (2) 風レンズ・翼車の多目的最適空力設計法の構築

上記(1)で構築した風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法と遺伝的アルゴリズム(GA)による多目的最適化手法とを組み合わせることによって、風レンズまで含めた風レンズ風車全体に対する最適設計技術として「風レンズ・翼車の多目的最適空力設計法」を構築した。そのために、前述の風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法における設計条件としてのスパン方向翼負荷分布および風レンズの子午面形状を最適化の設計変数とするとともに、風車の出力係数  $C_{m}^*$  および風レンズの集風効果係数  $K$  を目的関数に設定して、遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化問題を構築した。

#### (3) ベッツ限界を超越する高性能風レンズ風車の試作・性能試験および三次元数値解析

上記(1)および(2)に基づく革新的三次元空力設計法を適用して、風レンズと翼車とのマッチングまで最適化した風レンズ風車の空力設計を実施することにより、ベッツ限界 (風車の理論効率の限界値) を超越する風レンズ風車を設計した。

そのベッツ限界を凌駕した設計結果について、風車の試作を行うとともに、その全体性能試験および流れ場計測を九州大学応用力学研究所の大型風洞 (地球大気動態シミュレーション装置) で行うことにより、本設計手法の有効性を検証した。また、ベッツ限界を凌駕した設計ケースの流れ場を把握するために、三次元レイノルズ平均ナビエ・ストークス (RANS) 解析を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) 風レンズ・翼車の多目的最適空力設計結果

本最適空力設計法により設計された各個体の空力性能を図5に示す。同図における空力性能は本設計スキーム内で実施される子午面粘性流れ解析に基づいて評価された。本最適設計では、各世代あたり16個体の設計を行い、50世代まで設計を実施した。

本最適設計ケースの中から、出力係数  $C_{m}^*$  の値が最も高かった設計結果 (図5中の赤色で示す個体、以降ではOptimalと呼称) に対して、三次元RANS解析を行うとともに、試作および全体性能試験を行った。その際に、従来の設計法を適用して最も高出力であったもの (以降ではConventionalと呼称) と比較することで、Optimalの特徴について調べた。

図6は、OptimalおよびConventionalの両者について、風レンズの子午面形状を示している。両者の形状を比較すると、ディフューザの開き角はOptimalの方が若干小さくなっているが、つばの高さは両者で大きく異なり、Optimalの方が著しく小さくなっていることが分かる。また、Optimalは翼車前方のノズル部が短く、ディフューザ部が長いといった

特徴を有していることも分かる。

図7に Optimal および Conventional のスパン方向翼負荷分布を示す。両者の負荷分布はいずれもスパン中央部でピークを有するが、Optimal の翼端側で Conventional よりも高い翼負荷を有していることが分かる。

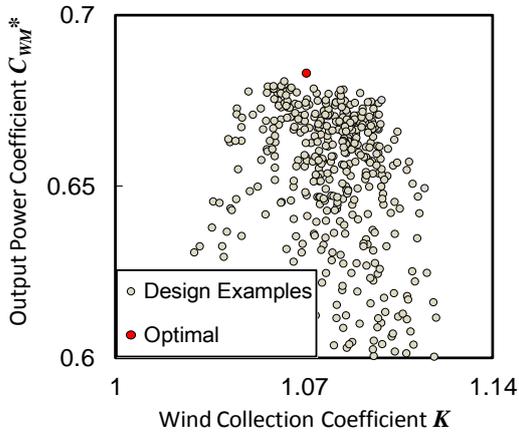


図5 最適空力設計法により設計された各個体の空力性能

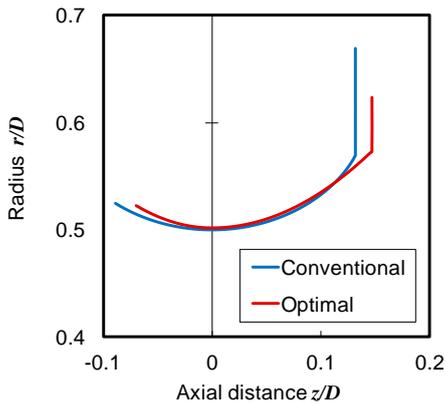


図6 風レンズの子午面形状

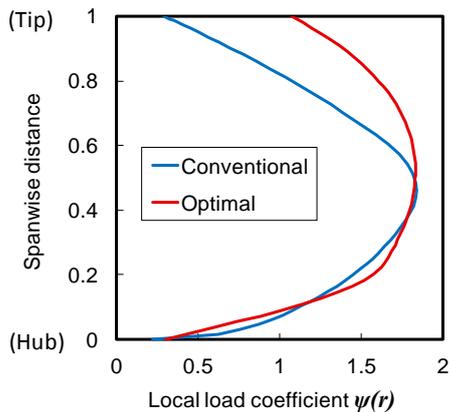


図7 スパン方向翼負荷分布

(2) 高性能風レンズ風車の全体性能特性

図8は Conventional および Optimal 両者について風洞による性能試験 (図中の EFD) および三次元 RANS 計算による数値解析 (図中の CFD) から得られた全体性能特性を示す。図中の出力係数  $C_w^*$  は翼車外径ではなく、風レ

ンズ風車の最大外径、すなわち風レンズのつば先端直径から算出される風車全体の受風面積に基づいて定義されている。同図中には、風車の理論出力限界であるベッツの理論限界値 (黒色破線) も合わせて示されている。

図8によると、最適設計された風レンズ風車 Optimal の出力係数は、既存の風レンズ風車 Conventional と比較して、風洞試験において全周速比  $\lambda$  にわたり約 20% 向上していることがわかる。また、周速比が 3.5 から 4.0 の範囲においてベッツの理論限界値を超越する性能を発揮していることが確認される。

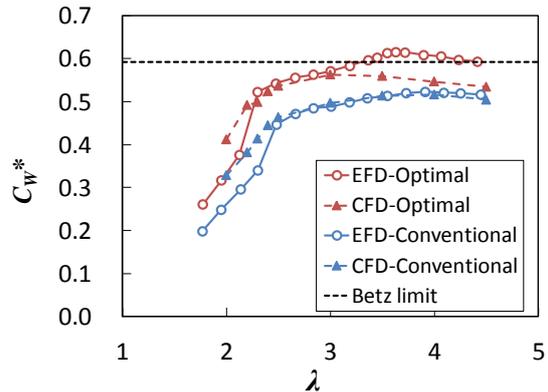


図8 全体性能特性

(3) 高性能風レンズ風車まわりの流れ場

図9に Optimal および Conventional の三次元 RANS 解析から得られた周方向平均流れ場における子午面速度分布および子午面流線を示す。Optimal では、風レンズのつば高さが低いことから、つば後方のはく離域が著しく縮小化している。また、Conventional ではディフューザ内面の出口付近においてははく離が認められるが、Optimal ではディフューザ内面のはく離が観察されない。このことは、Optimal では翼先端側の翼負荷が高いことから、翼車下流のディフューザ内面近傍で旋回速度成分が増大する結果、その遠心力作用によりディフューザ内面のはく離が抑制されたことに起因する。

以上のとおり、風レンズの形状と翼負荷分布は相互に影響し合うことから、両者を連成して最適設計することが風レンズ風車の性能向上には重要である。

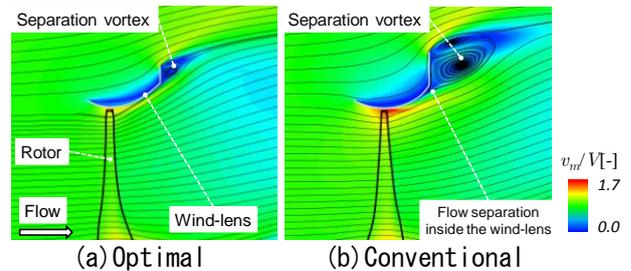


図9 周方向平均流れ場の子午面速度分布

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6件)

- ① Nobuhito Oka, Masato Furukawa, Kazutoyo Yamada, Akihiro Oka and Yasushi Kurokawa, “Aerodynamic Performances and Flow Fields of Pareto Optimal Solutions in an Aerodynamic Design of a Wind-Lens Turbine”, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015, ASME Paper No. GT2015-43619, 2015. (査読有)
- ② Nobuhito Oka, Masato Furukawa, Kota KIDO, Akihiro Oka and Yasushi Kurokawa, “Aerodynamic Performance of a Wind-Lens Turbine with Optimized Blade Loading Distribution and Wind-Lens Shape”, Proceedings of the Grand Renewable Energy 2014 (GRE2014) International Conference, Paper No. O-Wd-6-1, 2014. (査読有)
- ③ Nobuhito Oka, Masato Furukawa, Kazutoyo Yamada, Kenta Kawamitsu, Kota Kido and Akihiro Oka, “Simultaneous Optimization of Rotor Blade and Wind-Lens for Aerodynamic Design of Wind-Lens Turbine”, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014, ASME Paper No. GT2014-25770, 2014. (査読有)
- ④ 岡信仁, 木戸康太, 岡明宏, 古川雅人, 山田和豊, 「レンズ風車の最適空力設計」, 日本流体力学会学会誌「ながれ」, 第33巻, 第2号, 2014, pp. 153 – 160, 2014. (査読無)
- ⑤ Nobuhito Oka, Kenta Kawamitsu, Soichiro Tabata, Masato Furukawa, Kazutoyo Yamada, Kota Kido, “Numerical Analysis of Vortical Flow Field around Wind-lens Turbines”, Proceedings of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, Paper No. ICJWSF2013-1130, 2013. (査読有)
- ⑥ Nobuhito Oka, Masato Furukawa, Kazutoyo Yamada, Kota Kido, “Aerodynamic Design for Wind-lens Turbine Using Optimization Technique”, Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Summer Meeting, ASME Paper No. FEDSM2013-16569, 2013. (査読有)

[学会発表] (計14件)

- ① 岡信仁, 黒川靖, 古川雅人, 山田和豊, 「レンズ風車によるベッツ限界の超越に向けて」, 日本機械学会第92期流体部門講演会, 2014年10月25日～26日, 富山大学(富山市).
- ② Nobuhito Oka, Kota Kido, Kazutoyo Yamada, Masato Furukawa,

“Aerodynamic Design of Wind-Lens Turbine with Axisymmetric Viscous Flow Calculation using Lattice Boltzmann Method”, The 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2014, 2014年9月24日, ハウステンボス(佐世保市).

- ③ 岡信仁, 岡明宏, 黒川靖, 古川雅人, 「翼負荷および風レンズ体が連成最適化されたレンズ風車まわりの流れ場に関するEFDおよびCFD解析」, 日本機械学会年次大会2014, 2014年9月7日～10日, 東京電機大学(東京都).
- ④ Nobuhito Oka, Masato Furukawa, Kazutoyo Yamada, Kenta Kawamitsu, Kota Kido, “Aerodynamic Design Optimization of Wind-Lens Turbine”, EWEA Europe’s Premier Wind Energy Event 2014, 2014年3月11日, Fira de Barcelona Gran Via(バルセロナ).
- ⑤ 岡信仁, 木戸康太, 岡明宏, 古川雅人, 山田和豊, 「レンズ風車の最適空力設計」, 第27回数値流体力学シンポジウム, 2013年12月17日～19日, 名古屋大学(名古屋市).
- ⑥ 木戸康太, 川満健太, 岡信仁, 岡明宏, 古川雅人, 「風レンズ風車の翼車と風レンズの連成最適設計」, 日本機械学会第91期流体工学部門講演会, 2013年11月9日～10日, 九州大学(福岡市).
- ⑦ 岡信仁, 古川雅人, 川満健太, 山田和豊, 木戸康太, 「風レンズ風車の空力性能と流れ場との関係」, ターボ機械協会第69回総会講演会, 2013年5月24日, 東京大学(東京都).
- ⑧ 岡信仁, 木戸康太, 古川雅人, 山田和豊, 「遺伝的アルゴリズムと準三次元流動解析を用いた風レンズ風車の最適空力設計」, 日本機械学会九州支部第64期総会・講演会, 2013年3月13日, 九州産業大学(福岡市).
- ⑨ 川幡宏亮, 大村尚登, 森英男, 古川雅人, 秋吉雅夫, 沖野真也, 「感圧塗料を用いた低速流れ場における非定常計測技術」, 日本機械学会第90期流体工学部門講演会, 2012年11月18日, 同志社大学(京都市).
- ⑩ 川満健太, 木戸康太, 岡信仁, 古川雅人, 「最適化手法を用いた風レンズ風車の空力設計」, 日本機械学会第90期流体工学部門講演会, 2012年11月18日, 同志社大学(京都市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古川 雅人 (FURUKAWA MASATO)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 30181449

### (2) 研究分担者

森 英男 (MORI HIDEO)

九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：70362275

山田 和豊 (YAMADA KAZUTOYO)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：00344622