

# レンズ風車の最適空力設計におけるパレート解とその流れ場の関係

## Relationship between Pareto solutions and their flow fields for optimal aerodynamic design of wind-lens turbine

- 岡 信仁, 九大院, 福岡県福岡市西区元岡 744, oka@haira.mech.kyushu-u.ac.jp
- 古川 雅人, 九大, 福岡県福岡市西区元岡 744
- 山田 和豊, 九大, 福岡県福岡市西区元岡 744
- Nobuhito Oka, Kyushu University, Motooka744, Nishi-ku, Fukuoka City, Fukuoka
- Masato Furukawa, Kyushu University, Motooka744, Nishi-ku, Fukuoka City, Fukuoka
- Kazutoyo Yamada, Kyushu University, Motooka744, Nishi-ku, Fukuoka City, Fukuoka

An optimal aerodynamic design method for the new type of diffuser augmented wind turbine (DAWT) called “wind-lens turbine” has been developed. Blade loading distribution and wind-lens shapes are simultaneously optimized by the optimal design method. Aerodynamic performances in the optimal and conventional cases are obtained from experiments and Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) simulations. The output power coefficients in the optimal case obtained from the experimental results are superior to those in the conventional case and the Betz limit. Three-dimensional flow fields in the optimal and conventional cases have been investigated by the experiments and the RANS simulations. The results show that the aerodynamic performance of wind-lens turbine is significantly affected by the interrelationship between the internal and external flow fields around the wind-lens. Therefore, the simultaneous optimization of rotor blade and wind-lens is important for the aerodynamic design of the wind-lens turbine.

### 1. 緒言

風力発電は、発電時に地球温暖化の原因となる CO<sub>2</sub> を排出しない発電手法として全世界で普及が進んでいる。九州大学では、図 1 に示す、回転軸に対し垂直なつばをディフューザ出口に有する「レンズ体」を水平軸風車に取り付けた「レンズ風車」を開発し、高効率化を図ってきた<sup>(1)</sup>。古くからレンズ風車のように翼車の周囲に構造物を取り付け、性能を向上させる取り組みは多くの研究が行われてきた<sup>(2)</sup>。図 2 にレンズ風車まわり流れ場の模式図を示す。効率の良い風車翼を設計するためには、流入速度分布の正確な推定が必要である。しかし、一般的な風車と異なり、レンズ風車を初めとしたディフューザ付き風車では、図 2 に示すようにディフューザ形状の影響を受け、流入速度分布が変化する。また、レンズ風車の性能および流入速度分布は翼車の空力負荷分布から大きな影響を受ける。過去の研究において、レンズ風車の簡易理論と軸対称子午面粘性流れ解析を用い、空力翼負荷分布およびレンズ体形状を考慮することで流入速度分布を推定し、翼車を設計する準三次元空力設計法が構築された。さらに、本設計法および遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:GA)と呼ばれる最適化手法により、風車翼の空力負荷分布およびレンズ体の連成最適化に取り組んできた<sup>(3)(4)</sup>。

本研究では、風車翼の空力負荷分布およびレンズ体が連成最適設計された複数のレンズ風車に対し、風洞試験および三次元定常 RANS 解析により、空力性能および流れ場の調査を行った。また、過去の研究で設計された風車と比較することで、設計条件が空力性能や流れ場へ及ぼす影響について調査を行った。

### 2. 数値解析手法および実験解析手法

#### (1) 数値解析手法

本研究では、レンズ風車の翼車近傍の複雑な三次元流れ場の解明のために三次元定常 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 解析を行った。本数値解析手法は、圧縮性レイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とし、非粘性・粘性流束および体積力は時間方向に全て陰的に離散し、空間上では六面体の計算 cell を用いた cell-centered 法による有限体積法に基づいて離散化し

ている<sup>(5)</sup>。非粘性流束は人工粘性を小さく抑え、境界層および渦構造を鮮明に捉えるために Roe の近似リーマン解法を用いた TVD スキームと 3 次精度の MUSCL 法を組み合わせ高解像度風上スキームにより評価した。粘性流束は Gauss の発散定理を用いて中心差分的に求めている。また、乱流モデルには  $k-\omega$  2 方程式モデルを用いた。

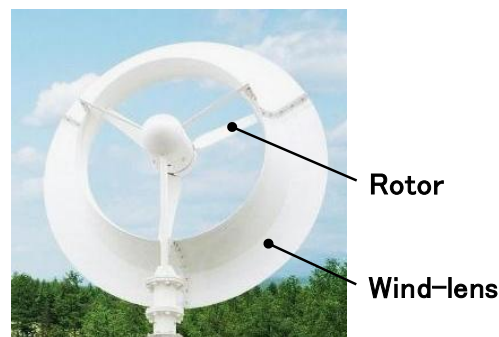


Fig. 1 Wind-lens turbine

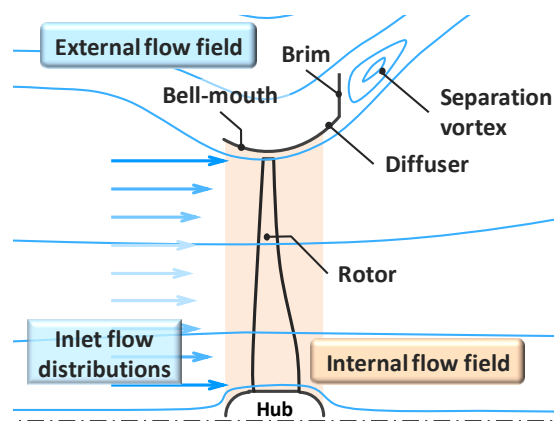


Fig. 2 Schematic flow structure around wind-lens turbine

本研究で実施した三次元定常 RANS 解析では、一翼間のみを解析領域とし、風車周りの流れの周期性を考慮して、回転方向には周期境界条件を適用した。また、外部境界を翼端半径の 10 倍ことり、外部境界には遠方境界条件を与えており、全ての計算領域において、H 形構造格子を形成した。また、総セル数は約 1500 万セルである。なお、三次元定常 RANS 解析においては、近寄り風速を 10[m/s]とした。

### (2) 実験解析手法

本研究では、九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞を用いて、出力およびレンズ風車まわりの流速測定試験を行った。この風洞は幅 3.6[m]×高さ 2[m]×長さ 15[m]の測定部を有し、最大風速 30[m/s]まで風速を任意に設定することが可能である。また、大気開放状態を再現するため、風車設置位置を基準に上流側 2[m]から下流側 4[m]まで風洞壁を取り外した状態で試験を行った。また、本試験は全て近寄り風速を 8[m/s]として実施し、AC サーボモータの負荷によって回転数を制御することで、任意の周速比における出力を測定した。出力測定とあわせて、レンズ体後方で軸方向速度のスパン方向分布を熱線流速計により測定した。

### 3. 解析対象

本研究では、最適化されたレンズ風車 Opt1, Opt2 および Opt3 (以下、これらを Opt シリーズと総称) に加え、これまで、最も高性能とされてきた Conventional に対し、数値解析および実験解析を実施した。Opt シリーズは準三次元空力設計法および遺伝的アルゴリズムにより最適設計されており、一方、Conventional は Opt シリーズが設計される以前に、遺伝的アルゴリズムを用いずに準三次元空力設計法のみを用いて設計されたレンズ風車である。Opt シリーズはレンズ体形状およびスパン方向翼負荷分布が重成最適化されており、これらを除く設計条件は Conventional と同一の条件を与えて設計を行った。また、Opt シリーズは、子午面粘性流れ解析と呼ばれる手法により実施した性能評価を基に最適化されている。最適化されたレンズ風車の子午面粘性流れ解析における空力性能を図 3 に示す。図 3 において縦軸は子午面粘性流れ解析により評価された出力係数  $C_{WM}^*$ 、横軸は集風効果係数  $K$  を表す。それぞれの値は以下の式で定義される。

$$C_{WM}^* = \frac{\int_{hub}^{shroud} \dot{m} r v_{\theta} \omega dr}{\rho V^3 A^* / 2} \quad (1)$$

$$K = \frac{\bar{v}_1}{V} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{m}$  は質量流量、 $\rho$  は風車無限上流における空気密度、 $A^*$  はレンズ風車の最大外径に対応するレンズ体のつば先端半径  $r_{brim}$  をもとに算出されるレンズ風車受風面積( $A^* = \pi r_{brim}^2$ )、 $V$  は風車無限上流における流速、 $\bar{v}_1$  は翼車前縁における断面平均流速を表す。図 3 より、Opt シリーズはいずれもパレート最適解として得られたレンズ風車であることがわかる。図 4 に Conventional および Opt シリーズのレンズ体形状を示す。横軸および縦軸はそれぞれ翼車の外径で無次元化した半径および軸方向位置である。ディフューザ出口の開き角に着目すると、Opt シリーズのディフューザ出口における開き角が比較的小さくなっており、つば高さも縮小していることが分かる。また、Opt シリーズレンズ体の軸方向位置は Conventional レンズ体の軸方向位置と比べ、相対的に後方に位置する。図 4 に Opt シリーズおよび Conventional の局所負荷係数のスパン方向分布を示す。横軸は式(3)に示す局所負荷係数  $\psi$  を、縦軸はスパン長で無次元化した翼根元からのスパン方向局所位置を示す。

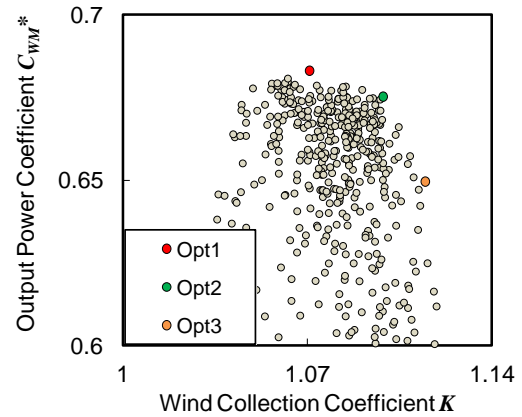


Fig. 3 Aerodynamic performances obtained in optimization procedure

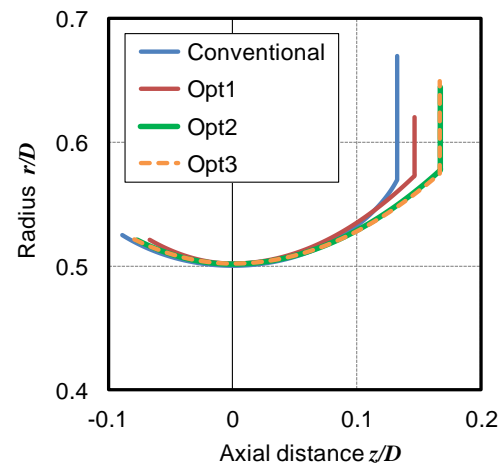


Fig. 4 Wind-lens shapes

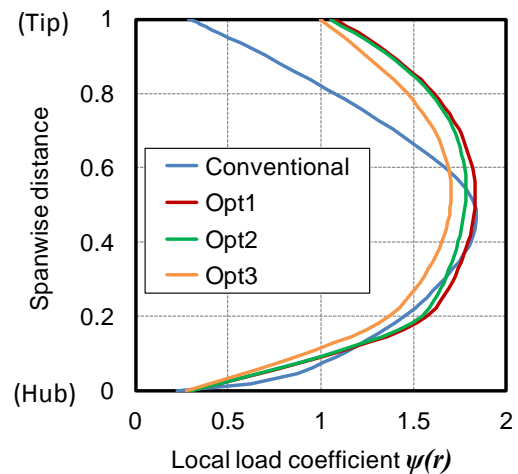


Fig. 5 Spanwise blade loading distributions

$$\psi(r) = \frac{2}{v_1^2} \left[ u(v_{02} - v_{01}) + \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) \right] \quad (3)$$

ここで、 $v_1$  および  $v_2$  はそれぞれ各半径位置における翼車への流入および流出速度、 $v_{01}$  および  $v_{02}$  はそれぞれ各半径位置における翼車への流入および流出速度の旋回成分、 $u$  は翼車の周速である。

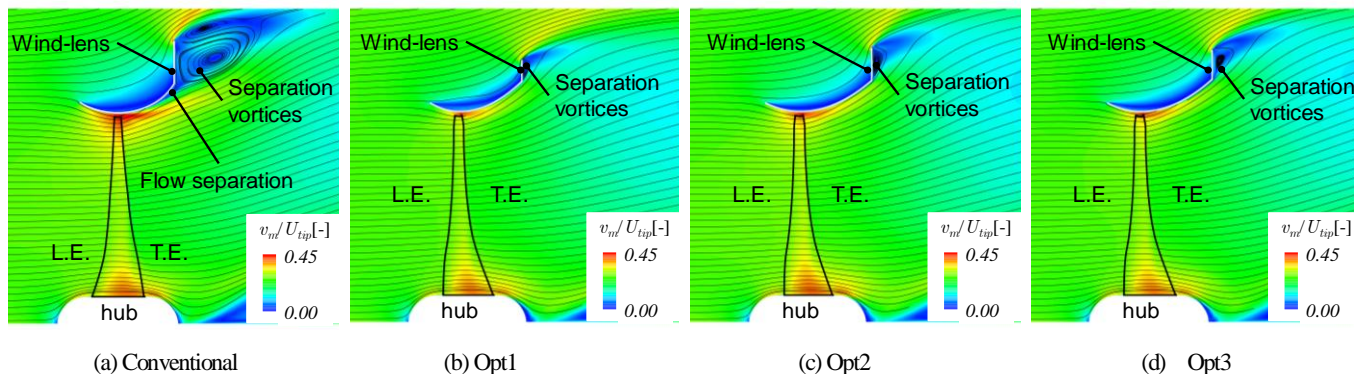


Fig. 6 Meridional streamlines and meridional velocity distributions

両者の負荷分布を比較するといずれもスパン中央部でピークをとる分布となっているが、Opt シリーズでは翼端側で高い負荷を有している事がわかる。

#### 4. 数値解析結果

前述の4種の解析対象に対し、三次元定常 RANS 解析を実施した。三次元定常 RANS 解析においてそれぞれの解析対象は式(4)により定義されるレンズ体外径を基準として算出される出力係数  $C_w^*$ 、式(5)により定義される翼端半径を基準として算出される出力係数  $C_w$  および集風効果係数  $K$  を基に性能評価を行った。

$$C_w^* = \frac{W}{\rho A^* V^3 / 2} \quad (4)$$

$$C_w = \frac{W}{\rho A V^3 / 2} \quad (5)$$

ここで  $W$  は風車出力である。表 1 に設計作動点における三次元定常 RANS 解析により評価されたそれぞれのレンズ風車の性能を示す。表 1 に示す通り、最適化アルゴリズムを用いた最適設計を行うことで、レンズ風車の性能が Conventional に対し大幅に向上したことが分かる。また、レンズ体外径を基準として算出される出力係数  $C_w^*$  においては Opt1 が最も高性能であることが分かる。しかしながら、翼端半径を基準として算出される出力係数  $C_w$  においては、Opt シリーズの中では Opt1 が最も性能が低い。これにより、レンズ体外径の差が大きく風車性能に影響を与えていることがうかがえる。また、Opt2 および Opt3 を比較すると、集風効果と風車出力が比例関係にあることがわかる。両者の設計条件を比較すると、レンズ体形状に差異はほとんど見られないが、図 5 に示すように Opt2 では比較的、翼負荷が高いことが分かる。この高い翼負荷により、Opt2 は Opt3 と比べ集風効果が低下し、出力が低下したと考えられる。さらに、Opt1 と Opt2 の設計条件を比較すると、両者の翼負荷に差異は見られないが、図 4 に示すようにレンズ体形状が大きく異なることが分かる。両者の集風効果と翼端半径基準出力係数がほぼ同等であり、Opt1 はより外径の小さいコンパクトなレンズ体を用いて翼車の性能を引き出すことができた結論付けることができる。

次に、4種の解析対象の三次元定常 RANS 解析結果から得られた流れ場について議論する。図 6 に、それぞれの三次元定常 RANS 解析結果を周方向平均した子午面速度分布を示す。それぞれの流れ場を比較すると Conventional と Opt シリーズではレンズ体のつば後方の渦形状が大きく異なることが分かる。Conventional ではつば後方に大きな剥離渦が発生しているが、Opt シリーズにおいてはつばに張り付くように、比較的小規模な剥離渦が確認される。また、翼車後方のレンズ体内面に着目すると、Conventional では

レンズ体ディフューザ部の逆圧力勾配により流れが剥離していることが分かる。一方、Opt シリーズではレンズ体内面の剥離が観察されない。Opt シリーズでは、これらの剥離を抑えることで風車性能が大きく向上したと考えられる。この要因として、図 4 に示したレンズ体形状の違いが大きな要因の一つと考えられる。図 4 に示す通り、ディフューザの出口角は Conventional が最も大きくこの出口角が剥離を誘引したと考えられる。また、翼車出口の流れの旋回成分による遠心効果も剥離を抑制した要因と考えられる。図 7 に、Conventional および Opt1 の三次元定常 RANS 解析により得られた翼後縁の旋回方向速度の周方向平均値のスパン方向分布を示す。図 7 に示した通り、Opt シリーズでは翼端付近の高負荷領域を通過した流れが、翼車により大きな旋回方向速度成分を与えられていることが分かる。これにより遠心効果が引き起こされ、半径方向外向きの遠心力が働きレンズ体内面の剥離を抑制したと考えられる。

Table 1 Aerodynamic performances obtained from three-dimensional RANS analyses results

	$C_w^*$	$C_w$	$K$
Opt1	0.604	0.977	1.01
Opt2	0.565	0.986	1.01
Opt3	0.594	1.053	1.07
Conventional	0.461	0.853	1.12

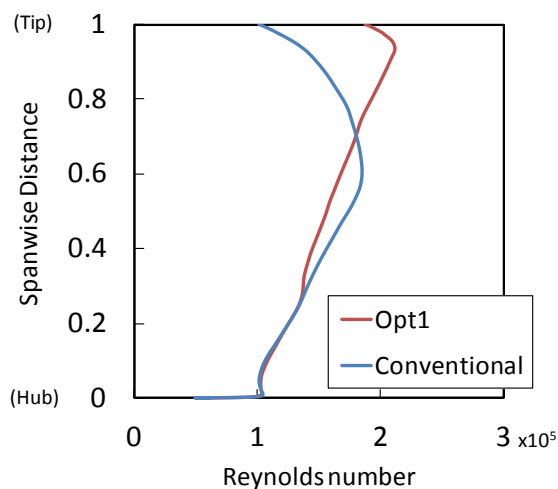


Fig.7 Spanwise distributions of circumferential velocity at blade trailing edges



### 5. 実験解析結果

前章で議論した数値解析結果に基づいて、Conventional およびつば径基準出力係数  $C_w^*$  が最も高かった Opt1 について実験解析を行った。図 8 に Conventional および Opt1 両者の風洞試験により得られた空力性能を示す。図 8 の縦軸はつば径基準出力係数  $C_w^*$ 、横軸は翼端回転周速  $u_{tip}$  と風車無限上流における流速  $V$  の比である周速比  $\lambda (=u_{tip}/V)$  を表す。また、図 8 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) も合わせて示す。最適化されたレンズ風車 Opt1 の出力係数  $C_w^*$  は、既存の風車 Conventional と比較して、全周速比にわたり約 20% 向上した。また、周速比  $\lambda$  が 3.5 から 4.5 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することが風洞試験により確認された。最適化されたレンズ風車 Opt1 では、図 8 に示すとおり、低周速比における出力が向上し、失速点がより低周速比側に遷移した。これは翼負荷の増加に伴って翼弦長が増加したことにより、翼レイノルズ数の低下を抑え、翼車負圧面での離層を抑制できたためであると考えられる。図 9 に前章で述べた数値解析により得られた周速比  $\lambda=2.3$  における翼レイノルズ数のスパン方向分布を示す。横軸は翼レイノルズ数、縦軸はスパン長で無次元化した翼根元からのスパン方向局所位置を示す。図 9 に示すように、本研究で解析対象とした Opt1 および Conventional の翼レイノルズ数は遷移レイノルズ数近傍 ( $Re=2.0 \times 10^5$ ) の値であり、翼負圧面での層流はく離が翼車の性能へ大きな影響を与えていることが示唆される。

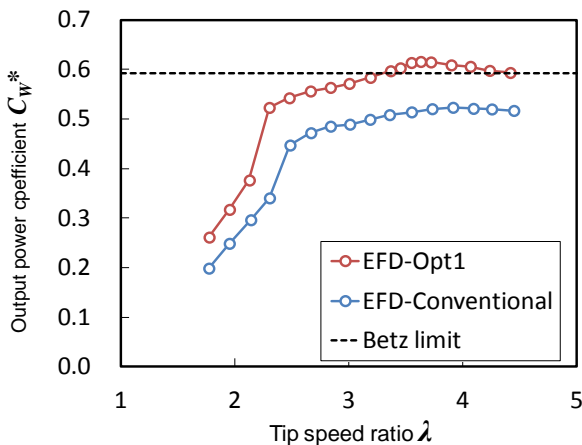


Fig.8 Wind-tunnel test results

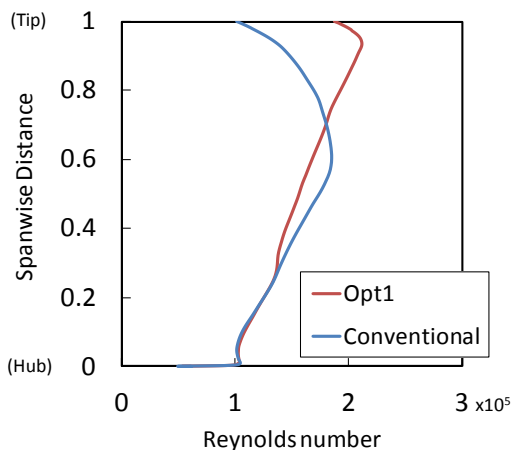
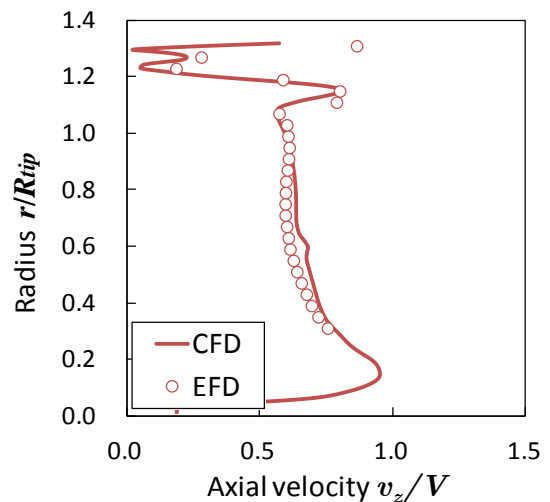
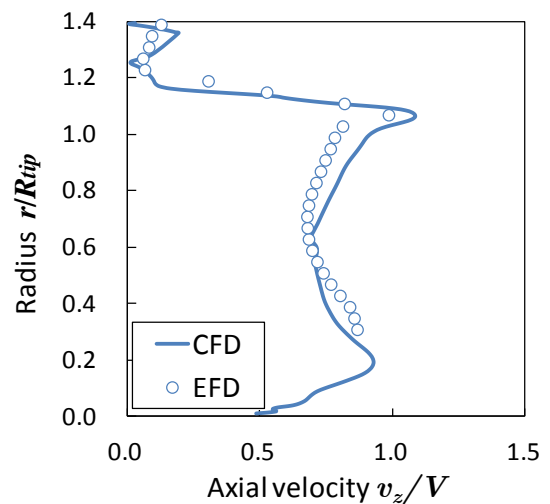


Fig.9 Spanwise blade Reynolds number distributions obtained from three-dimensional RANS analyses results ( $\lambda=2.3$ )

また、前章で述べたレンズ体出口付近のはく離現象について調査するため、レンズ体出口における軸方向速度のスパン方向分布を測定した。図 10(a)および(b)にそれぞれ周速比  $\lambda=3.5$  における Opt1 および Conventional のレンズ体出口の軸方向速度のスパン方向分布を示す。これらの速度分布は、計測機器とレンズ体の干渉を考慮し、Opt1 においてはつば後面から 30mm、Conventional においてはつば後面から 25mm の軸方向位置で計測した。図 10 から、数値解析におけるレンズ体出口の速度分布は、風洞試験の結果と定性的に一致していることが分かる。また、つばの後方の渦が形成される領域 ( $r/R_{tip}=1.2\sim 1.4$ ) は、主流と比べ大きく速度が低下している。また、図 10(a)および(b)における風洞試験結果を比較すると、図 10(b)において低速域がより半径内側に拡大しており、ディフューザ内面のはく離による減速が生じていることが風洞試験においても確認できる。



(a) Opt1



(b) Conventional

Fig. 10 Spanwise distributions of axial velocity behind wind-lens ( $\lambda=3.5$ )

以上より、最適設計されたレンズ風車 Opt1 は高い翼負荷を設定しつつ、レンズ風車の集風効果低減を抑制する翼負荷分布を与え設計を行うことができた結果、出力係数が著しく向上したと結論づける事ができる。また、レンズ体と翼車は相互に影響しあうため、両者を独立して設計するのではなく、連成して設計することがレンズ風車の性能向上には重要である。

## 7. 結言

本研究では、過去の研究において翼負荷およびレンズ体が連成最適設計されたレンズ風車の性能を数値解析および風洞試験により検証した。その結果、最適化されたレンズ風車は、既存の風車と比べ、約 20% 出力係数が向上し、また風車の理論限界値であるベッツの理論限界値を超える性能を発揮することが確認された。また、その流れ場についてこれまで最も高性能とされてきたレンズ風車と比較すると、レンズ体内部のはく離およびつば後方のはく離渦がレンズ風車の性能に大きな影響を及ぼしていることが確認された。この渦流れ場は、設計条件に大きく依存するため、レンズ風車の性能向上のためには翼車とレンズ体を連成して最適設計する必要がある。

## 参考文献

- (1) Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Abe, K., and Inoue, M., “Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser”, *Journal of Wind Engineering*, Vol.96 (2008), pp.524-539.
- (2) Ozer, Igra, 1981, “Research and development for shrouded wind turbines”, *Energy Conversion and Management*, Vol.21, Issue1, pp.13-48.
- (3) Oka, N., Furukawa, M., Yamada, K., and Kido, K., “Aerodynamic Design for Wind-Lens Turbine Using Optimization Technique”, *Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Summer Meeting*, Paper No.FEDSM2013-16569.
- (4) Oka, N., Furukawa, M., Yamada, K., Kawamitsu, K., Kido, K., and Oka, A., “Simultaneous Optimization of Rotor Blade and Wind-lens for Aerodynamic Design of Wind-lens Turbine”, *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014*, Paper No. GT2014-25770.
- (5) Furukawa, M., Nakano, T., and Inoue, M., “Simulation of Transonic Cascade Flow Using an Unfactored Implicit Upwind Relaxation Scheme with Inner Iteration”, *ASME Journal of Turbo machinery*, Vol.114, No.3(1992), pp.599-606.

## 謝辞

本研究は科研費基盤研究 (B) No.24360072 の補助を受け、実施した。ここに記して、謝意を表す。