

格子ボルツマン法を用いた子午面粘性流動解析によるレンズ風車の最適空力設計

Optimal Aerodynamic Design of Wind-lens Turbine with Meridional Viscous Flow Calculation Using Lattice Boltzmann Method

- 黒川 靖, 九大院, 福岡県福岡市西区元岡 744, kurokawa@haira.mech.kyushu-u.ac.jp
 岡 信仁, 九大院, 福岡県福岡市西区元岡 744, oka@haira.mech.kyushu-u.ac.jp
 山田 和豊, 九大, 福岡県福岡市西区元岡 744, k.yamada@mech.kyushu-u.ac.jp
 古川 雅人, 九大, 福岡県福岡市西区元岡 744, furu@mech.kyushu-u.ac.jp
 Yasushi Kurokawa, Kyushu University, Motoooka744, Nishi-ku, Fukuoka City, Fukuoka
 Nobuhito Oka, Kyushu University, Motoooka744, Nishi-ku, Fukuoka City, Fukuoka
 Kazutoyo Yamada, Kyushu University, Motoooka744, Nishi-ku, Fukuoka City, Fukuoka
 Masato Furukawa, Kyushu University, Motoooka744, Nishi-ku, Fukuoka City, Fukuoka

An optimal aerodynamic design method of wind-lens turbine with meridional viscous flow calculation using Lattice Boltzmann Method (LBM) has been developed. First, the meridional flow simulation by LBM is conducted for a wind-lens turbine, and the result is compared with the one of Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) simulation. It indicates that the meridional flow simulation by LBM predicts appropriately flow field around wind-lens turbine. Thus, optimized design of wind-lens turbine is carried out by the optimal aerodynamic design method with meridional viscous flow calculation using LBM. The result of RANS simulations for the optimized wind-lens turbines shows that the optimal wind-lens turbine shrinks separated vortex behind brim and is superior to the conventional one in the performance.

1. 緒言

格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method; LBM) は, Navier-Stokes 方程式を離散化して解く従来の計算方法に比べて, 並列化に優れ高速な計算が可能であることから, 新たな流れの計算手法として期待されている. LBM では直交等間隔格子が使用され, 計算格子内に埋め込まれた物体の境界において計算精度の低下が懸念されるが, 格子生成が容易という利点もある.

近年, ターボ機械の設計において, CFD は必要不可欠なツールとなっている. 著者らの研究グループでは, これまで Navier-Stokes 方程式を離散化して解く従来の計算方法を用いた子午面粘性流動解析による最適空力設計を行ってきた¹⁾. 最適空力設計のように, 同時に複数の格子生成や数値解析を実施する場合などでは, 高速計算が可能で格子生成が容易な LBM は, ターボ機械の空力設計に適した計算手法といえる.

本研究では, LBM による子午面粘性流動解析をレンズ風車に適用した. そして, LBM による子午面粘性流動解析結果を三次元定常 RANS 解析結果と比較し, LBM による子午面粘性流動解析の検証を行った. さらに, LBM を適用した空力設計手法をもとに, レンズ風車の空力最適化を行った.

2. 格子ボルツマン法 (LBM)

(1) LBM の概要

LBM は, 流体を仮想粒子の集合体と考え, 仮想粒子の衝突および並進から巨視的な流体運動を再現する数値計算手法である. 本研究では, 直交等間隔格子を使用し, アルゴリズムが簡単な次式の格子 BGK モデルを用いる.

$$f_i(t + \Delta t, \mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t) = f_i(t, \mathbf{x}) - \frac{1}{\tau} [f_i(t, \mathbf{x}) - f_i^{eq}(t, \mathbf{x})] \quad (1)$$

ここで, f は粒子の分布関数, \mathbf{c} は粒子の速度, τ は単一時間緩和係数, f^{eq} は局所平衡分布関数, 添え字 i は粒子の種類を表す. 粒子モデルには 3 次元 15 速度 (D3Q15) モデルを用いる. 本研究では, マルチスケールモデルを適用し, 格子解像度の違う格子を組み合わせた計算を行う. 計算に用いる格子は, Building-Cube

Method (BCM) を用いて作成した. また, 本計算手法では Wilcox の $k-\omega$ 乱流モデル²⁾より計算される渦粘性係数 μ_t を加えた粘性係数 ν から単一時間緩和係数 τ を求めた.

(2) LBM への外力項の導入

風レンズ風車の空力設計は翼力を導入した軸対称粘性流れ解析を用いて行われる. 本研究では, この軸対称流れ解析に LBM を応用する. そこで, 円筒座標表示のシステム方程式に現れる遠心力・コリオリ力等の見かけの力および翼作用を表す翼力を, LBM の外力として導入することで軸対称粘性流れ計算を可能にする. 外力を導入した際の格子 BGK モデル³⁾は次式となる.

$$f_i(t + \Delta t, \mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t) = f_i(t, \mathbf{x}) - \frac{1}{\tau} [f_i(t, \mathbf{x}) - f_i^{eq}(t, \mathbf{x})] - F_i \quad (2)$$

ここで F_i は外力項であり, D3Q15 モデルでは次式となる.

$$F_i = -3 \frac{\mathbf{F} \cdot (\mathbf{c}_i - \mathbf{v})}{c^2} f_i^{eq}(t, \mathbf{x}) \quad (3)$$

ここで, \mathbf{F} は導入する外力, \mathbf{v} は流体の速度である. 本研究で導入される見かけの力 \mathbf{F}_{Axi} を次式に示す.

$$\mathbf{F}_{Axi} = \begin{bmatrix} F_{Axi z} \\ F_{Axi r} \\ F_{Axi \theta} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \nu \frac{\partial v_z}{\partial r} \\ v_\theta^2 + \nu \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r} \right) \\ -v_r v_\theta + \nu \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで, ν は粘性係数, 添え字 r, θ は各方向を表す. また, 翼力として非粘性流れに基づく翼力モデル⁴⁾を導入した. この翼力モデルは次式で表される.

$$\mathbf{F}_b = \begin{bmatrix} F_{bc} \\ F_{br} \\ F_{b\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{bc} F_{b\theta} \\ n_{b\theta} \\ n_{br} F_{b\theta} \\ n_{b\theta} \\ \rho \frac{v_m}{r} \frac{\partial(rv_\theta)}{\partial m} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 m は子午面に沿った距離を表す。本翼力モデルでは、非粘性流れ場を仮定していることから、翼力が翼キャンパ面に垂直に作用するとモデル化する。このとき翼キャンパ面の単位法線ベクトルを \mathbf{n} とすると、翼力の軸方向成分 F_{bc} および半径方向成分 F_{br} は、上式のように与えられる。

3. レンズ風車の最適空力設計手法

(1) 準三次元空力設計法¹⁾

準三次元空力設計法は、レンズ風車の簡易理論、および翼作用を考慮した軸対称子午面粘性流動解析より構成される。図 1 に準三次元空力設計のフローチャートを示す。本設計手法はまず、レンズ風車の簡易理論に基づき、既存の二次元翼型データより翼素形状を決定する。その後、設計された翼に対して、子午面粘性流動解析を行い、得られた流入速度分布を翼設計にフィードバックする。この作業を翼形状が収束するまで繰り返し行い、最終的な翼形状を決定する。

(2) 最適化手法

本研究の最適化手法には実数値 GA を用いた。GA とは、世代交代、交叉および突然変異と呼ばれる生物の進化プロセスを模擬した過程を繰り返すことで最適解を得る手法である。最適化のフローチャートを図 2 に示す。本研究の最適化手法では、まず初期条件を設定し、その初期条件に基づいて風レンズ形状を決定し、準三次元空力設計法を用いて翼設計を行う。次に、設計されたレンズ風車について軸対称子午面粘性流動解析により算出される性能を評価する。さらに、この評価をもとに GA を用いて新たな設計条件を生成し、準三次元空力設計法により次世代のレンズ風車を設計する。このプロセスを繰り返すことで最適な風レンズ形状と翼負荷分布を求めた。なお、本研究の GA では世代交代モデルに NSGA-2⁵⁾ を、交叉モデルは多親交叉モデル REX⁶⁾ を用いた。

(3) 設計変数および目的関数

本研究では、スパン方向翼負荷分布 rv_θ と風レンズ形状を最適化した。スパン方向翼負荷分布 rv_θ においては、図 3 に示すように、スパン方向位置を固定した 6 点について、各点の翼負荷を設計変数とした。これらを Bezier 曲線により補間することでスパン方向翼負荷分布を得た。また風レンズ形状においては、図 4 に示すように、「ベルマウス高さ」、「ディフューザ高さ」、「風レンズ長さ」、「スロート位置」および「つば高さ」の 5 つを設計変数とした。ベルマウスとディフューザの子午面形状は、スロート位置を原点とした二次関数で与えており、スロート位置で勾配が一致するように設定した。以上より、設計変数に計 11 点を与えた。

また目的関数は、子午面粘性流動解析で得られる出力係数 C_{Wmer}^* および集風効果係数 K とした。これらの定義を次式に示す。

$$C_{Wmer}^* = \frac{mrv_\theta\omega}{\rho A^*V/2} \quad (6)$$

$$K = v_1/V \quad (7)$$

ここで、 \dot{m} は質量流量、 r は半径、 v_θ は周方向速度、 ω は翼車の角速度、 ρ は密度、 A^* はつば外径に基づく風レンズ風車の総受風面積、 V は遠方の近寄り風速、 v_1 は風車直前の流入速度である。

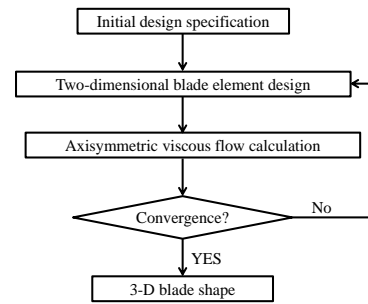


Fig.1 Flow chart of blade design

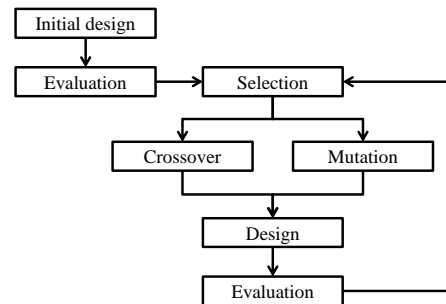


Fig.2 Flow chart of optimization

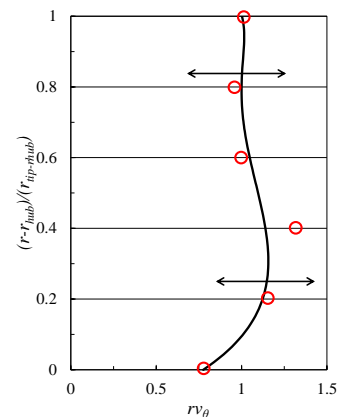


Fig.3 Distribution of blade loading

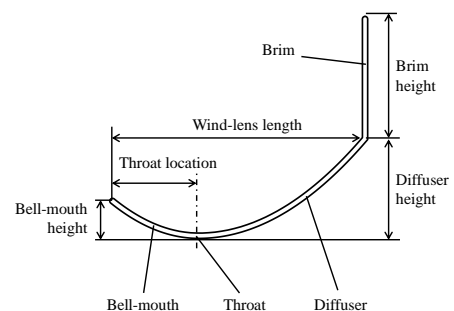


Fig.4 Wind-lens shape

4. LBM による子午面粘性流動解析手法の検証

本研究では、LBM による子午面粘性流動解析をレンズ風車に適用し、1 ピッチ三次元定常 RANS 解析の結果と比較して、検証を行った。

(1) 計算条件

LBM の計算に用いた計算格子は直交等間隔格子であり、1 ブロックあたりの格子点数が 11×11 、全体の格子点数は約 12 万点である。また、代表長さである翼端半径に基づいた最小格子幅は 2.4×10^{-3} [m] である。LBM を用いた軸対称粘性流れ解析で使用した格子を図 5 に示す。一方、三次元定常 RANS 解析は、圧縮性 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程式(RANS)を基礎方程式とし、乱流モデルは、Wilcox の $k-\omega$ 乱流モデルを用いている。また、三次元定常 RANS 方程式の計算に用いた計算格子は物体適合構造格子であり、格子点数は約 1600 万点である。また、代表長さである翼端半径に基づいた最小格子幅は 1.0×10^{-4} [m] である。三次元定常 RANS 解析で使用した格子の子午面断面を抜き出した図を図 6 に示す。

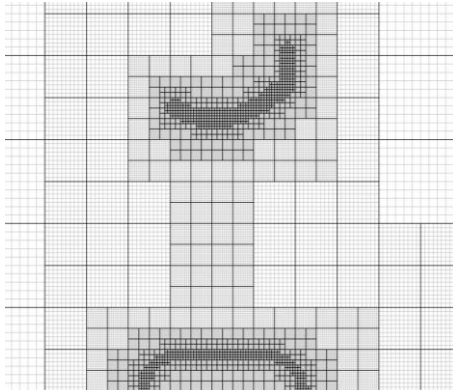


Fig.5 Computational grid example for meridional flow calculation with LBM

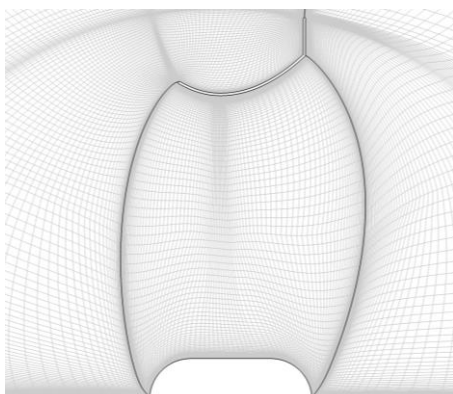


Fig.6 Computational grid example for three-dimensional flow calculation with RANS

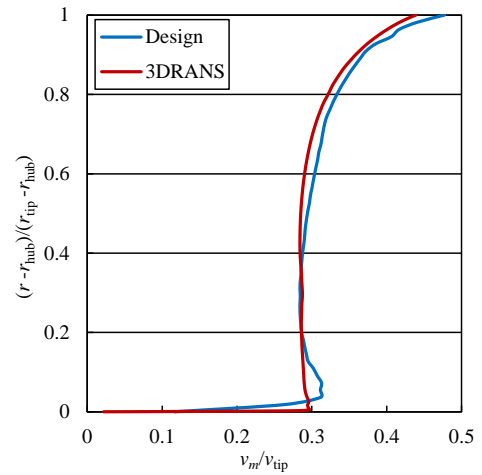
(2) LBM を適用したレンズ風車の子午面粘性流動解析の検証

レンズ風車翼前縁および後縁における速度分布を図 7 に示す。なお、Design は LBM による子午面粘性流動解析の結果、3DRANS は三次元定常 RANS 解析結果を示す。

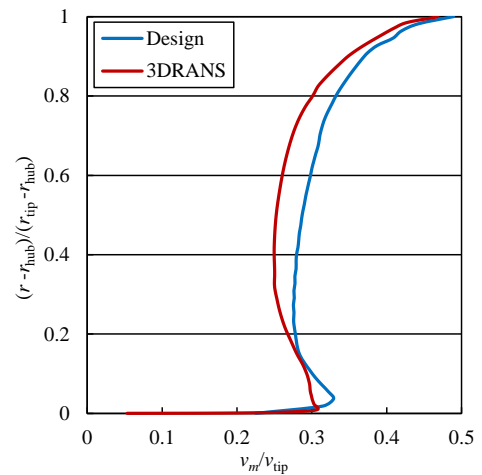
図 7 より、翼前縁および後縁の速度分布はよく一致していることが確認できる。なお、ハブ近傍における境界層が Design では厚く見積もられているが、これは格子トポロジーの違いが影響していると考えられる。LBM による子午面粘性流動解析には、直交等間隔格子を用いており、ハブ面のような曲面を厳密には再現できない。また、前節に述べたように、両計算手法では最小格子幅が異なる。そのため、最小格子幅が大きな LBM では、その影響を受け、ハブ側での境界層が厚く評価されている。

以上に示したように、LBM を用いた子午面粘性流動解析では、レンズ風車の翼設計に必要な、翼周辺の速度分布を精度よく予測できることが確認できる。よって、従来の Navier-Stokes 方程式を

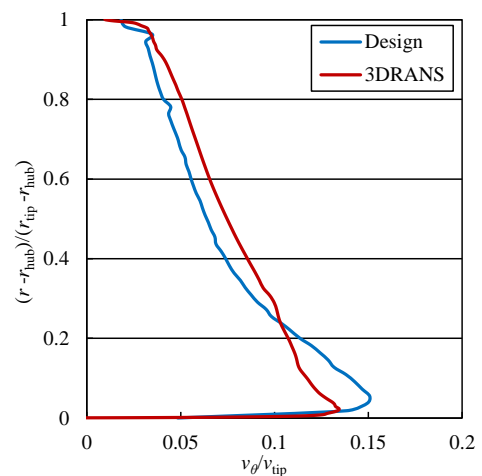
用いた準三次元空力設計法と同様に、LBM を用いた準三次元空力設計法により、レンズ風車の設計は可能であると言える。



(a) Distributions of meridional velocity at L.E.



(b) Distributions of meridional velocity at T.E.



(c) Distributions of circumferential velocity at T.E.

Fig.7 Velocity distributions at blade L.E. and T.E. of wind-lens turbine

5. LBM を適用したレンズ風車の最適空力設計

(1) 最適化結果

本研究では、1 世代あたりの設計個体数を 20 個体として 20 世代まで設計を行い、最適化した。また、本最適化過程における二種的设计変数の他に、各個体に共通的设计仕様として、表 1 に示す設計仕様を用いた。

最適化で得られたレンズ風車の、子午面粘性流動解析で得られた集風効果係数 K 、および出力係数 C^*_{Wmer} の分布を図 8 に示す。最適化によって得られた風車の中で、 C^*_{Wmer} が最大のレンズ風車を「Opt1」、 K が最大のレンズ風車を「Opt2」と呼称する。なお、比較対象として、最適化手法を用いずに、Navier-Stokes 方程式を適用した準三次元空力設計法により設計された中で、過去最高出力のレンズ風車を「Conventional」と呼称して用いる。

上記 3 基のレンズ風車の翼負荷分布を図 9 に、風レンズの子午面断面形状を図 10 に示す。図 9 から、最適化により得られた Opt1、Opt2 の翼負荷分布を、Conventional と比較すると、最適化された 2 つのレンズ風車は、スパン中央においてほぼ一定値をとり、翼根および翼端側で緩やかに減少する分布となった。また、図 10 から、最適化により得られた Opt1、Opt2 の風レンズ形状を、Conventional と比較すると、両方とも、Conventional よりつば径が小さいことがわかる。これは、目的関数に出力係数 C^*_{Wmer} を設定したことが要因だと考えられる。(6) 式に示すように、 C^*_{Wmer} は、出力をつば径基準の面積で無次元化することで求められる。本研究では出力係数 C^*_{Wmer} が大きくなるように、すなわちつば径が小さくなるように最適化が行われたため、Conventional よりつば径が小さくなったと考えられる。

Table1 Design specification

Loading coefficient	1.0
Approach velocity [m/s]	10
Rotor Diameter [mm]	1000
Hub/Tip ratio	0.139
Tip speed ratio	3.5
Number of blades	3

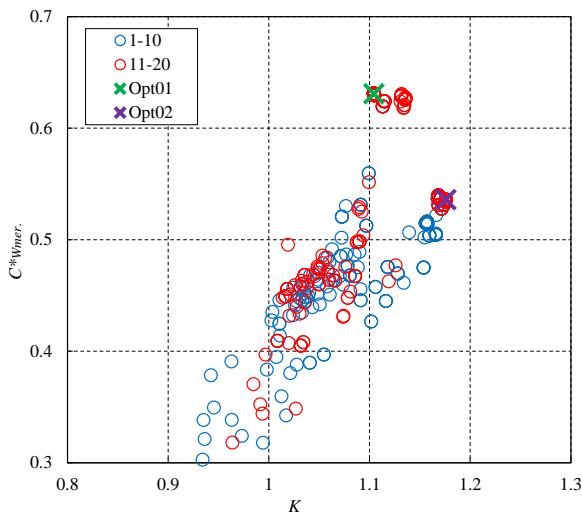


Fig.8 Distributions of K and C^*_{Wmer}

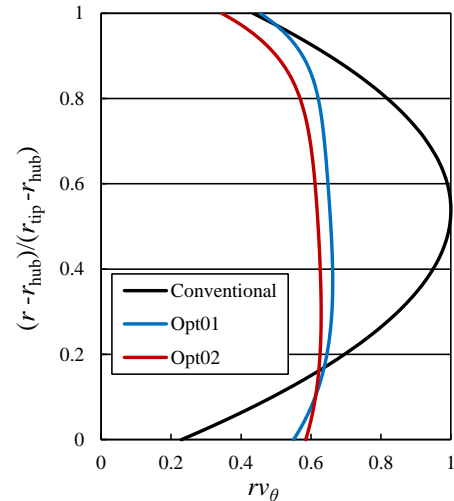


Fig.9 Distributions of blade loading

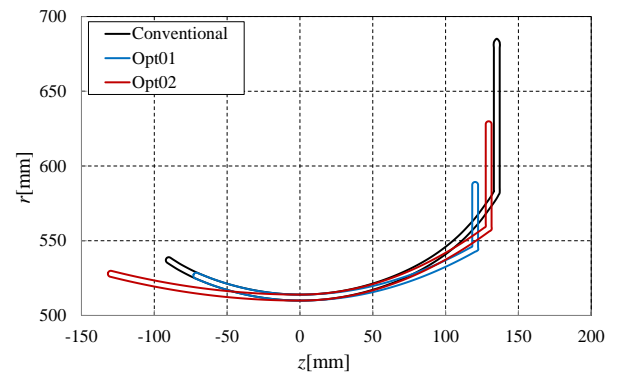


Fig.10 Wind-lens shapes

(2) 三次元定常 RANS 解析結果

前述した 3 基のレンズ風車に対し、三次元定常 RANS 解析を行った。三次元定常 RANS 解析によって得られた出力係数 C^*_w および集風効果係数 K を表 2 に示す。

集風効果係数 K を比較すると、Conventional が最も大きい。その要因として、図 10 に示すように、Conventional のつば径が他の 2 つより大きいことが考えられる。また、図 9 に示すように、Conventional の翼負荷は、他の 2 つと比較して、翼端部の値がスパン中央の値と比較して大きく減少している。ここで、図 11 に翼後縁における各風車の周方向平均された子午面速度分布を示す。これより、Conventional では翼端部において他の 2 つより流れが最も加速されており、その結果、 K が大きくなったと考えられる。

一方、出力係数 C^*_w を比較すると、Opt1 が最も大きい。これは、Opt1 がつば後方のはく離渦を抑制したことが影響していると考えられる。図 12 に周方向平均された子午面速度分布および子午面流線図を示す。これより、Conventional は、つば後方のはく離渦が大きく、風レンズ出口の内面にまではく離が及んでいることがわかる。それに対し、Opt1 や Opt2 では、つば後方のはく離渦が小さく、風レンズ内面にはく離渦は見られない。過去の研究により、風レンズ内面にはく離が発達することで、レンズ風車の空力性能が低下することが明らかになっている。よって、Opt1 や Opt2 は出力係数 C^*_w を増加できたと考えられる。また、図 10 に示すように、Opt1 のつば径は Opt2 より小さい。従って、Opt1 は、Opt2 より集風効果係数 K が小さいが、出力係数 C^*_w は大きくなったと考えられる。

以上より, LBM を適用した最適空力設計により, 過去の研究において最高出力であった Conventional よりもつば径が小さく, 出力係数 C_w^* が大きなレンズ風車を開発したことを確認できた。

4. 結言

本研究では, 格子ボルツマン法をターボ機械の設計問題に適用することを目指し, 格子ボルツマン法による子午面粘性流動解析を準三次元空力設計法に適用し, レンズ風車の空力設計を行った。また, 本設計手法を用いて設計したレンズ風車に対し三次元流れ解析を行い, LBM を適用した子午面粘性流動解析の予測精度を検証した。その結果, LBM を適用した子午面粘性流動解析によって, レンズ風車近傍の流れ場を精度よく予測できたことから, LBM を用いた準三次元空力設計法により, レンズ風車の設計は可能であるといえる。

さらに, LBM を適用した準三次元空力設計法をもとに, レンズ風車の最適空力設計を行った。その結果, つば後方は離渦を抑制することで, 過去最高出力のレンズ風車よりもつば径が小さく高出力なレンズ風車を開発できた。

Table2 Result of three-dimensional steady flow analysis with RANS

	C_w^*	K
Opt1	0.517	1.05
Opt2	0.502	1.09
Conventional	0.514	1.13

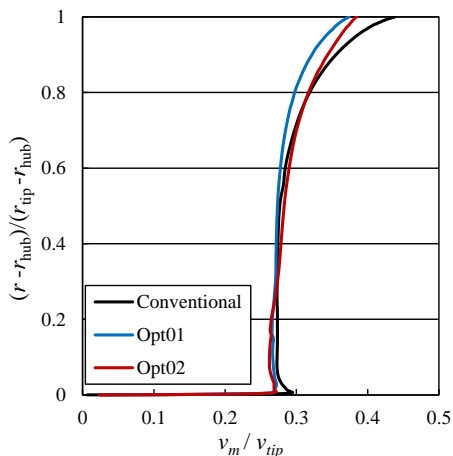
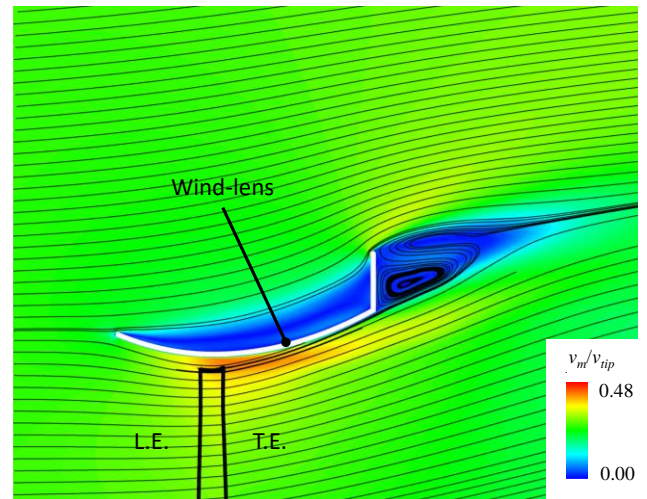
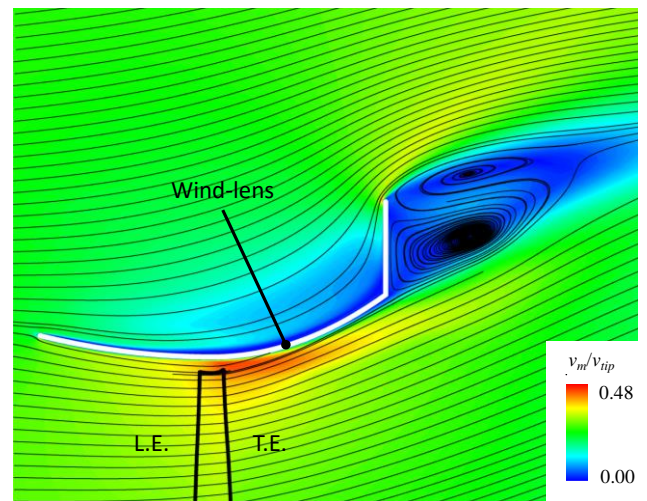


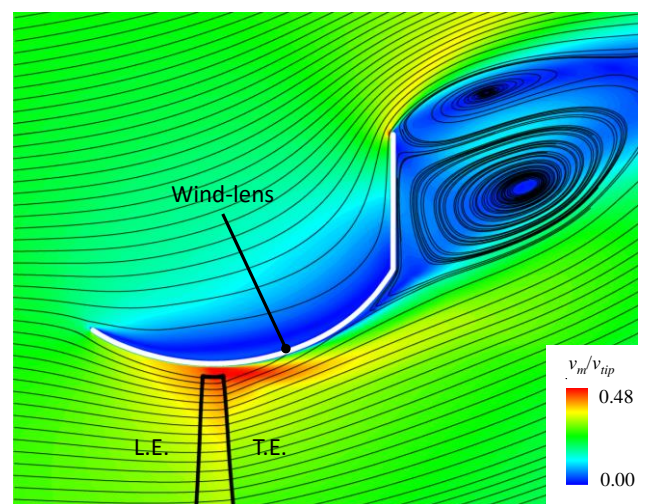
Fig.11 Distributions of meridional velocity at blade L.E.



(a) Opt1



(b) Opt2



(c) Conventional

Fig.12 Meridional velocity contour and streamline

参考文献

- (1) N. Oka, M. Furukawa, K. Yamada, A. Oka and Y. Kurokawa, "Aerodynamic Performance and Flow Fields of Pareto Optimal Solutions in an Aerodynamic Design Optimization of a Wind-lens Turbine", Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015, Paper No. GT2015-43619.
- (2) Wilcox, D. C., "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models", AIAA Journal, Vol.26, No.11, pp.1299-1310,(1988)
- (3) A.A. Mohamad, and A. Kuzmin, "A critical evaluation of force term in lattice Boltzmann method, natural convection problem", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.53 (2010), pp990-996.
- (4) S. Tabata, F. Hiratani, and M. Furukawa, "Axisymmetric Viscous Flow Modeling for Meridional Flow Calculation in Aerodynamic Design of Half-Ducted Blade Rows", Memories of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.67, No.4 (2007), pp199-208.
- (5) Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T.meyarivan7 "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm NSGA-II", IEEE Transactions on evolutionary computation, Vol.6,No.2 (2002)
- (6) 小林重信, "実数値 GA のフロンティア", 人工知能学会論文誌, Vol.24, No.1(2009), pp147-162
- (7) N.Oka, K.Kawamitsu, S.Tabata, M.Furukawa, K.Yamada, and K.Kido, 2013, "NUMERICAL ANALYSIS OF VORTICAL FLOW FIELD AROUND WIND-LENS TURBINES", 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows