

# つば付きディフューザー風車のヨーイング挙動に関する研究

## A study of yaw behavior for a deffuser augmented wind turbine

○臼井啓司, 九大工, 〒816-8580 春日市春日公園 6-1, E-mail: <usui@riam.kyushu-u.ac.jp>  
 内田孝紀, 九大応力研, 〒816-8580 春日市春日公園 6-1, E-mail: <takanori@riam.kyushu-u.ac.jp >  
 大屋裕二, 九大応力研, 〒816-8580 春日市春日公園 6-1, E-mail: <ohya@riam.kyushu-u.ac.jp>  
 Satoshi USUI, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan  
 Takanori UCHIDA, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan  
 Yuji OHYA, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan

Fluid-structure coupled problem like blade bending or yaw rotation is challenge for upsizing Wind Lens Turbine. In deffuser turbine, effects of wind direction or yaw rotation are not clear because it is difficult to measure drag and power output with yaw rotation in the experiment. In this study, effects of wind direction and yaw rotation are clarified by using overset grid. Result of various verifications for calculation code using overset grid, it is possible to calculate pressure field and velocity field with high accuracy. In addition turbine drag coefficient and yaw moment coefficient with yaw angle qualitatively corresponded to experimental result.

### 1. 緒言

近年, エネルギー問題や環境問題を背景に自然エネルギーの有効利用について関心が高まり, 風力発電の研究が盛んに行われている. クリーンで枯渇することのない風エネルギーを利用する風力発電は, 世界的に導入が進んでいる.

こうした状況を踏まえて, 九州大学は通常の風車に比べ高効率のつば付きディフューザー風車 (通称, レンズ風車) を開発した. これはディフューザーの出口にリング状のつばを取り付けた筒状構造体をもつダウンウィンド型風車である. この集風体の集風, 加速効果により, 同じローター径の通常の風車と比べて2.5倍の高出力を得ることに成功した<sup>(1)</sup>.

レンズ風車はさらに安定した電力供給を目指し, 中型, 大型化が検討されている. 本研究ではレンズ風車の中型, 大型化の際に生じる問題について流体-構造連成解析の観点から, それらの現象を明らかにする. 特に風向変動と風車の首振り運動(ヨー回転)に着目し, 風向変動が流れ場に与える影響や, 風車ヨー回転中の風荷重分布の変化, 風車性能の変化を明らかにすることを目的とする.

### 2. 数値計算手法

#### 2-1 重合格子法

レンズ風車は, 風向変動に対して常に風と正対するよう自ら回転する風見鶏効果を有することが実験により明らかになっている. 一方, 風向変動に対する流れ場への影響を調べるためにはヨー回転における遷移的, 過渡的な流れ場の状態を捉える必要がある. つまり, 風車のヨー回転に伴い流れ場が変化し, さらに変化した流れ場が風車ヨー回転に影響するため, 複雑な非定常流れ場を形成することが考えられる.

この複雑な非定常流れ場を捉えるためには, 計算空間

上で風向変動と首振り運動の2つを表現する必要がある. 一般的に物体の移動を含む数値流体解析には非構造格子が用いられる. しかし非構造格子を用いる場合, 計算コストが非常に大きく, 計算時間が増大してしまう. 一方, 構造格子を用いて物体の移動を表現する場合, 物体が移動する度に格子を移動, 変形し計算を進める手法が一般的である. しかしこの手法では計算中に何度も格子を作成する必要があるため計算時間が増大する. そこで本研究では, 計算コストの小さい構造格子を採用し, 風向変動および風車ヨー回転を表現するために重合格子法を用いた数値流体解析を試みる.

重合格子法とは, 複数の格子を重ね合わせ, その領域で互いにデータを補間しながら計算を進める手法で, 比較的容易に複雑形状を表現できることが大きな利点である. 本研究では格子間に角度を設けることで風向変動を表現する. 格子間の角度を変化させながら計算を行い, 各風向の流れ場において風車ヨー回転に関する運動方程式を解くことで複雑な非定常流れ場を捉えることができる.

計算格子は流れ場全体を表現した主格子と物体の形状を再現した副格子で構成される. 主格子から副格子へのデータの補間は副格子境界でのみ行われ, 副格子から主格子への補間は格子が重なる全ての点で行われる. またデータの補間には演算量が少ない線形補間を用いた.

(Fig.1)

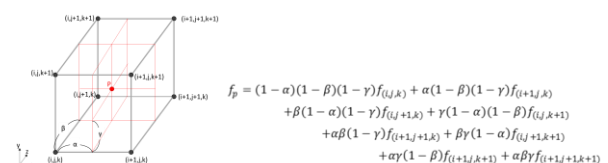


Fig.1 Concept of interpolation method.

2 – 2 数値計算法概要

数値計算法の概要をTable 1に示す. 乱流の取り扱いに関しては, 本研究ではDNSを採用しているものの, 十分な格子解像度を設定できていない. 今後, LESなどの乱流モデルの導入を検討予定である.

風向変動とヨー回転に注目するため, 風車は剛体と仮定し, 弾性変形はないものとした. 物体を表現する手法としてマスキング法を採用した. これは物体内部に含まれる格子点上に流速ゼロの条件を課すのみで流体領域と物体領域を区別することなく計算する手法で, その有用性が内田らによって確認されている<sup>2)</sup>. この手法を用いることで, 移動境界問題を静止物体周りの流れ解析に帰着させることができるため, コード化が容易になる.

Table 1 Numerical overview

Coordinate system	3D Cartesian
Turbulence model	DNS
Variable arrangement	Collocated
Scheme	finite difference method
Coupling algorithm	Fractional Step method
Iteration formula (Poisson equation)	SOR method : Successive Over-Relaxation method
Time step	Euler explicit method
Discretization of pressure terms	2nd-order central scheme
Discretization of viscos terms	2nd-order central scheme
Discretization of advective terms	3rd-order upwind scheme

3. 角柱周りの流れ解析による計算精度の検証

3 – 1 解析条件

作成した重合格子計算プログラムの精度を検証するため, 重合格子を用いた角柱周りの流れ解析を行った. 角柱周りの流れ解析は検証問題に広く用いられ, Lynらの実験結果<sup>3)</sup>などと比較されている.

計算領域をFig.2に示す. 外側が主格子の境界, 内側の青線が副格子の境界を示している. 正方形角柱の一辺の長さをDとし, 主格子は主流方向に15D, 主流直交方向に12D, 高さ方向に0.5Dの大きさで, 上下面に周期境界条件を課すことで2次元流れを再現している. 副格子は主流方向に2D, 主流直交方向に2D, 高さ方向に0.5Dの大きさである. 格子点数は主格子が151×111, 副格子が41×41×11である. 境界条件をFig.3に示す. 主格子において, 入口境界は主流方向の一様流, 出口境界には主流方向にゾンマーフェルト放射条件, 主流直交方向速度, 高さ方向速度にノイマン条件を課している. 下面は周期境界条件, その他の3面は滑り条件とした. 圧力の境界条件は全てノイマン条件とした. また, 副格子については全ての面を主格子から補間している. なお, Re数は実験と等しくRe=2.14×10<sup>4</sup>とした.

本研究では角柱周りの流れ解析による2つの検証を行った.

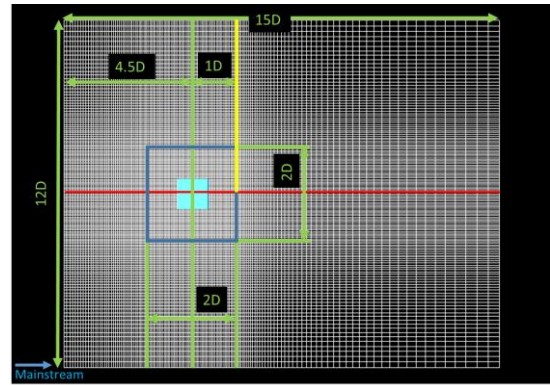


Fig.2 Calculation domain (square cylinder)

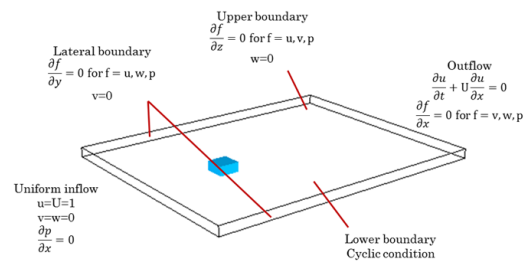


Fig.3 Boundary condition for main grid (square cylinder)

3 – 2 角柱周りの速度分布による検証

角柱周りの流れ解析において広く用いられるLynらの実験結果<sup>3)</sup>と本解析における結果を比較し, 重合格子が速度場に与える影響を調べた. 取得データはFig.2に示す領域中心の赤線上での主流方向時間平均速度分布と角柱より1D後方の黄線上での主流方向および主流直交方向の時間平均速度分布であり, いずれも領域中心高さのデータとした. なお, 角柱は副格子にのみ設置しており, 角柱の表現には前述のマスキング法を採用している.

計算結果をFig.4, Fig.5, Fig.6に示す. Fig.4は横軸に角柱中心からの無次元距離, 縦軸に流入風速で規格化した無次元速度を示しており, Fig.2の赤線上での主流方向時間平均速度を示している. Fig.4より領域中心での主流方向速度は, 角柱後方の逆流領域やさらに後方の速度回復を含め実験結果と良く一致している. Fig.5およびFig.6は横軸に正規化した無次元速度, 縦軸に角柱中心からの無次元距離を示しており, Fig.2の黄線上での主流方向および主流直交方向時間平均速度をそれぞれ示している. Fig.5, Fig.6より角柱中心から1D付近の速度の極値が実験と異なっている. しかし全体的な傾向は良く一致しているため, 格子解像度を増加させることで誤差は小さくなると考えられる.

以上の結果より, 重合格子を用いた角柱周りの流れ解析において速度場が実験結果と良く一致を示しており, 高精度の計算を行うことができたと言える.

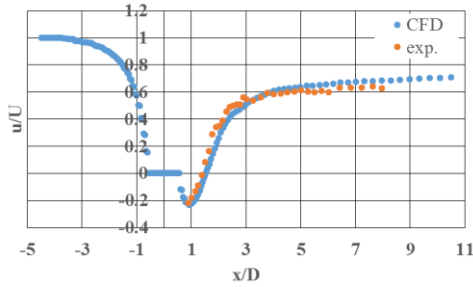


Fig.4 Mainstream time average velocity (domain center)

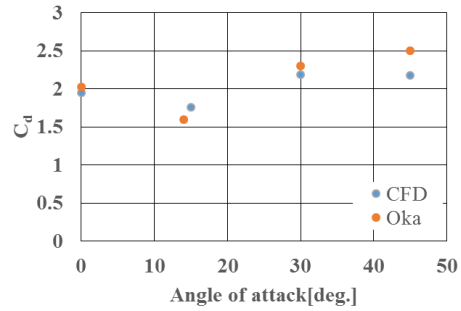


Fig.7 Cylinder drag coefficient

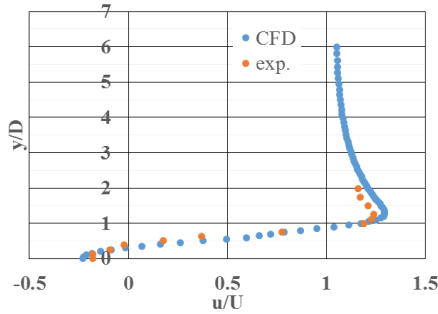


Fig.5 Mainstream time average velocity  
(Cylinder backward)

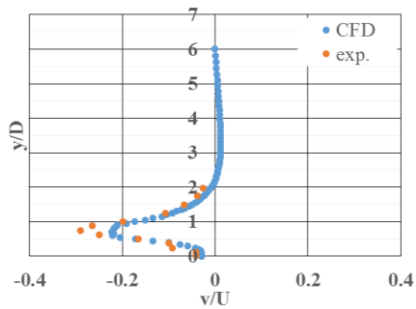


Fig.6 Vertical mainstream time average velocity  
(Cylinder backward)

### 3-3 角柱抗力係数による検証

迎角の変化に対する角柱の抗力係数の変化を高精度で解析した岡らの解析結果<sup>(4)</sup>と本解析結果を比較し、重合格子が圧力場に与える影響を調べた。

主格子に対して副格子に角度を設けることで迎角を表現した。迎角は0, 15, 30, 45[deg.]の4ケースに設定し、各迎角で解析を行った。抗力係数は粘性抵抗を無視し、副格子における角柱周辺の圧力を流入風向の力に変換し正規化することで求めた。

計算結果をFig.7に示す。Fig.7は横軸に角柱の迎角、縦軸に抗力係数 $C_D$ を示している。Fig.7より、全体の傾向は類似しており、各迎角の抗力係数が比較的高い精度で抗力係数を得られていることがわかる。

以上の結果から、重合格子を用いた角柱周りの流れ解析において圧力場についても比較的高精度に計算可能であることが示された。

## 4. 静止状態の風車周りの流れ解析

### 4-1 解析条件

さらに複雑なモデルの抗力およびモーメントの計算精度を確認するため、重合格子を用いた剛体風車周りの流れ解析を行った。

計算領域をFig.8に示す。外側が主格子の境界、内側の青線が副格子の境界を示している。風車のローター直径を $D$ とし、主格子は主流方向に $8D$ 、主流直交方向に $7D$ 、高さ方向に $4D$ の大きさである。副格子は主流方向に $2D$ 、主流直交方向に $2D$ 、高さ方向に $3D$ の大きさである。格子点数は主格子が $211 \times 211 \times 71$ 、副格子が $101 \times 101 \times 151$ である。境界条件をFig.9に示す。主格子において、入口境界は主流方向の一様流、出口境界には主流方向にゾンマーフェルト放射条件、主流直交方向速度、高さ方向速度にノイマン条件を課している。下面は非滑り条件、その他の3面は滑り条件とした。圧力の境界条件は全てノイマン条件とした。また、副格子については全ての面を主格子から補間している。なお、計算 $Re$ 数は $Re=3 \times 10^5$ とした。

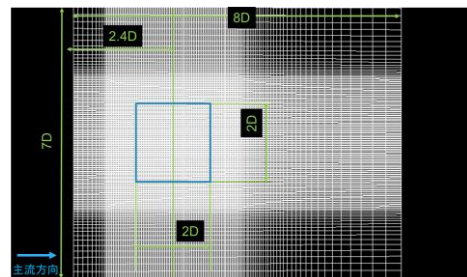


Fig.8 Calculation domain (wind turbine)

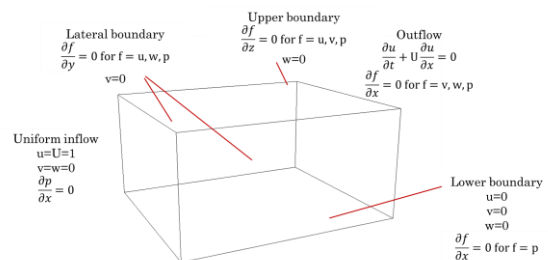


Fig.9 Boundary condition for (wind turbine)

#### 4-2 通常風車の流れ解析

通常風車とはディフューザーを付加していない一般的な風車である。ここではブレードは回転せず、静止状態の風車を解析した。風車のヨー角が0, 45, 60, 80, 90[deg.]の5ケースについて解析を行い、風車の抗力係数  $C_D$  およびヨーモーメント係数  $C_{Mz}$  を求め、実験結果<sup>(5)</sup>と比較した。風車が受ける力は各点の圧力のみから計算し、風車のローター直径を代表面積として正規化した。

計算結果をFig.10, Fig.11に示す。Fig.10は横軸に風車ヨー角、縦軸に抗力係数を示している。Fig.10より、計算結果が実験結果に比べて若干高いものの、定性的に良く一致していることがわかる。Fig.11は横軸に風車ヨー角、縦軸にヨーモーメント係数を示している。ただし、負の値が風と正対する方向に働くモーメントである。Fig.11より、両者の全体的な傾向は類似しているものの値が異なることがわかる。しかし通常風車のヨーモーメントは非常に小さいため、誤差は十分小さいと言える。

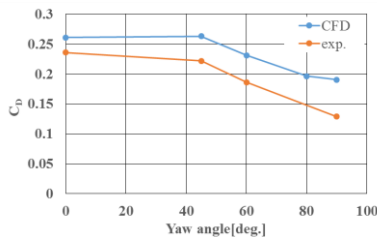


Fig.10 Wind turbine drag coefficient

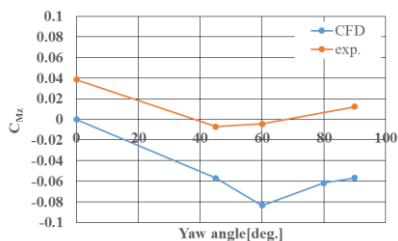


Fig.11 Wind turbine yaw moment coefficient

#### 4-3 レンズ風車の流れ解析

4-2 で述べた解析においてモデルをレンズ風車に変更し計算を行った。なお、代表面積は受風面積である鏝外径ではなくローター直径で定義している。また、抗力の実験値はブロッケージの影響を受けていると考えられるため、ブロッケージの影響を考慮した実験値の75%の値を比較対象としている<sup>(5)</sup>。

計算結果をFig.12, Fig.13に示す。Fig.12よりレンズ風車の場合にも計算結果がわずかに高いものの定性的な一致を確認できた。Fig.13よりヨーモーメントについても定性的に良く一致していると言える。計算結果が実験結果に比べて3割ほど小さくなっているが、これは形状の再現精度、特にディフューザー形状の再現精度が低いためであると考えられる。格子解像度を増加する

ことで誤差を小さくすることができると言える。

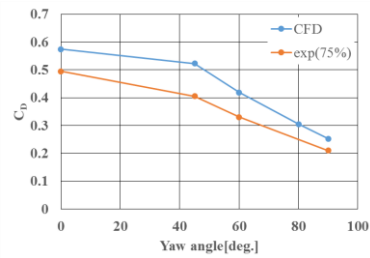


Fig.12 Wind lens turbine drag coefficient

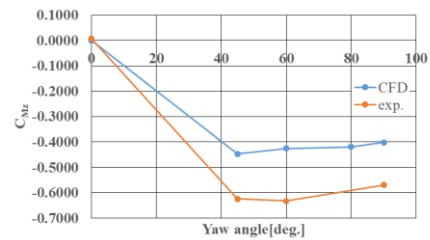


Fig.13 Wind lens turbine yaw moment coefficient

### 5. 結言

本研究では風向変動と風車ヨー回転が流れ場や風荷重、風車性能に与える影響を調べるため、重合格子計算プログラムを作成した。プログラムの計算精度の検証を行い、以下に結論を得た。

- ・角柱周りの流れ解析を行い、高精度の計算を行うことができた。
- ・風車周りの流れ解析を行い、抗力およびヨーモーメントが実験結果と定性的に一致した。

今後は連続的な風向変動や風車の運動を取り入れ、連成解析を行う予定である。

### 参考文献

- (1) 大屋裕二：風レンズ風車という新しい風力発電システム, Wind Engineers, JAWE Vol.36, No.1(No.126), January 2011
- (2) 内田孝紀, 大屋裕二：DNSによる複雑地形を過ぎる安定成層流の風況予測—矩形格子系と一般座標系との比較—, 九州大学応用力学研究所所報第82号, 113-126(1997)
- (3) D.A.Lyn et.al : A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristic of the turbulent near wake of a square cylinder, Fluid Mech. ,vol.304, 285-319(1995)
- (4) 岡新一, 石原孟, 藤野陽三：一樣流中に置かれた正方形角柱の空力特性と表面風圧に関する数値予測, 第17回風工学シンポジウム, 207-212(2002)
- (5) 李雪：レンズ風車の大型化に関する研究, 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文 2013