

# 海流発電用タービンの設計に向けた数値シミュレーション

荒木 美保 (指導教員: 河村 哲也)

## 1 はじめに

近年、エネルギーは地球規模の大きな問題となっている。例えば、火力発電では化石燃料の枯渇や温室効果ガスの問題が存在し、原子力発電では廃棄物処理や安全性が懸念される。そのため今後は再生可能エネルギーを積極的に利用することが望まれるが、未だ課題は多い。従来の風力発電や太陽光発電は天候に左右されやすいために、質、量ともに不安定である。バイオマス発電や廃棄物を利用した発電なども費用に見合った効果を得にくいとされており、これらに加えて新しいエネルギー源が求められている。

海流発電は潮流発電ともいわれ、海流による海水の流れの運動エネルギーを、水車やブレードの回転あるいは振動を介して電気エネルギーに変換し発電する方式で、現時点でのエネルギーの変換効率は20%から45%と比較的高いと言われている。また、海流エネルギーには資源量が膨大である、風力発電や太陽光発電のように天候に左右されないため安定供給が可能である、などの特徴がある。

海流発電には、回転の軸が海流に対し水平である水平軸型、回転軸が海水の流れに対して垂直な垂直軸型、回転ではなく振動によって発電する形式の振動水中翼型といった種類がある。

海流発電についての先行研究は少なく、上記の設計には未だ改善の余地が見込まれる。そのため本研究では海流発電におけるブレードの回転機構について、数値シミュレーションを用い、理想形状の設計を目指す。

この目標を達成するため、類似の機構を持ち、先行研究も豊富な風車を応用するというアプローチにより、海流発電において想定される代表的なブレードの回転機構である垂直軸かぎ型の構造について、折れ曲がり位置と回転速度を考慮し最適な形状を決定することを課題として設定する。

## 2 モデル化・格子生成

### 2.1 計算領域

かぎ型の風車の全長を4に保ったまま折れ曲がる位置を変化させて2次元でのシミュレーションを行う。計算領域には風向きとそれに垂直な方向に20の正方形をとった。

具体的には、風車の片方の腕の長さ(軸の長さの半分)との比率をFig.2.1のような9種類に定め、それぞれ角速度を変化させて計算を行い、比較する。必要な場合はこれらの間の比率の形状も計算を行った。

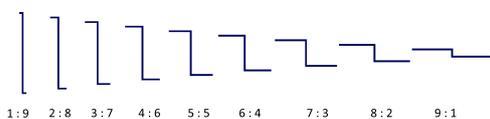


Fig. 2.1

### 2.2 格子

風車付近の流れを正確に計算するため、風車に沿った、風車に近いほど細かい格子を作成する。格子数は $141 \times 141$ とした。(Fig. 2.2)

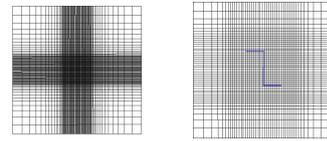


Fig. 2.2: 格子

## 3 計算方法

### 3.1 基礎方程式

風車は一定角速度 $\omega$ で回転しているとして、風車ブレードに固定された回転座標系を用いる。Fig. 3.1に示すように、回転座標系 $(X, Y)$ と静止座標系 $(x, y)$ との関係は、静止状態から測った回転角を $\theta(=\omega t)$ とすると、以下のように書ける。

$$\begin{aligned} X &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ Y &= x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned}$$

同様に、回転座標系における速度 $(U, V)$ と静止座標系における速度 $(u, v)$ との関係は次式で表せる。

$$\begin{aligned} U &= u \cos \theta - v \sin \theta - \omega Y \\ V &= u \sin \theta + v \cos \theta + \omega X \end{aligned}$$

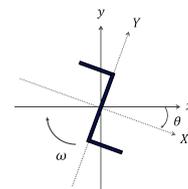


Fig. 3.1 静止座標系と回転座標系

基礎方程式を以下のように回転座標系で表す。

連続の式

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} - \omega^2 X + 2\omega V \\ = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} - \omega^2 Y - 2\omega U \\ = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \end{aligned}$$

$p$ は圧力を表す。 $Re$ は風車半径を代表長さ、風速を代表速度としたレイノルズ数で、 $10^5$ とする。

### 3.2 解法

基礎方程式を一般座標変換した上で、フラクショナル・ステップ法を用いて解く。運動方程式の非線形項(対流項)には3次精度上流差分を、その他には中心差分を適用した。

## 4 評価方法

風車の効率を調べるために以下の用語が使用される。

・ $TR$ : 計算から得られるトルク(風車が回転する力)。 $TR < 0$ では回転を妨げる方向に力が働いている。

・ $Ct$ : トルク係数( $Ct = TR/qRA$ )

トルクを風車の大きさで無次元化したもの。

$q$ : 動圧( $= \rho/2$ ),  $\rho$ : 空気密度,  $R$ : ローター半径,  $A$ : ブレードの掃過面積( $= 2RH$ ),  $H$ : 風車高さ(2次元計算の場合は1)とする。

・ $\lambda$ : 周速比( $\lambda = R\omega/u_\infty$ )

風速に対する風車ブレード先端の速度。

$\omega$ : ブレードの角速度,  $u_\infty$ : 風速とする。

・ $Cp$ : パワー係数( $Cp = \lambda Ct$ )

風から取り出すことの出来るエネルギーの割合。単位時間の仕事量を表し、風車の性能を示す。

## 5 結果と考察

### 5.1 トルク

Fig. 5.1 は、周速比  $\lambda = 0.5$ , すなわち、ブレード先端が風速の半分の速さで回転するときのトルク係数の時間変化を示している。グラフの横軸は静止状態から測った回転角度  $\theta$ , 縦軸はトルク係数  $Ct$  である。風車が3回転目を一周回る間のトルク係数の変動をグラフにしている。風車形状の対称性から、180度で概ね一周周期をもつ。圧力場が複雑に変動するため、720度から900度と、900度から1,080度のグラフ形状は、完全には一致しない。

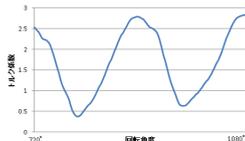


Fig. 5.1 トルク係数の時間変化

### 5.2 流れ場

Fig. 5.2 は、5.1 でトルク係数が一番大きくなる時と、小さくなる時の流れ場(カラーマップは圧力, 黒い矢印は流速ベクトル)である。トルク係数が大きくなる時は、図の上側のブレードに風が入り、ブレード内部の圧力が高くなっている。トルク係数が小さくなる時は、図の下側のブレードに風が当たり、風車を逆方向に回転させようとする力が高くなっている。

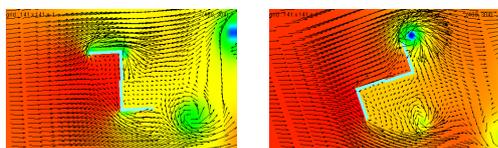


Fig. 5.2 風車まわりの流れ場

### 5.3 理想形状の計算

2.1 の通り、風車の全長が等しく形状の異なる9通りの風車に対して、シミュレーションを行った。Fig. 5.3 は、9通りの風車それぞれのトルク係数を合わせて表示したものであり、特に下段は風車が周速比0.5で3回転目を一周回る間のトルク係数の時間平均を一覧にしたものである。図の左側に向かうにつれて、風をキャッチするためのブレード部分が短くなるため、風車は回りにくくなり、トルク係数は減少している。図の一番右側の風車では、ほぼ一直線の棒に等しくなるため、図の左側の風車以上に、風をキャッチすることができない。結局、風車の全長が等しい(風車作成にかかる材料や、風車の重さが等しい)場合、対称的な形状が最も効率が良くなることが示された。

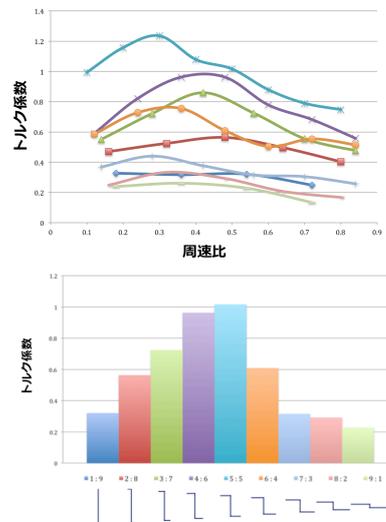


Fig. 5.3: 形状の異なる風車に対する計算

## 6 まとめと今後の課題

いずれの周速比においても、風車の片方の腕の長さ(軸の長さの半分)と回転の中心から腕までの長さ(軸の長さの半分)との比率がちょうど1:1であるようなかぎ型の風車が、最も効率が良くなるということがわかった。これにより、海流発電において想定される代表的なブレードの回転機構である垂直軸かぎ型の構造について、折れ曲がり位置と回転速度を考慮し最適な形状を決定するという課題が達成された。

今後は、同様に垂直軸抗力型の風車であるS字型やサボニウス型の風車に関して、今回と同じように形状と回転速度を考慮した理想形状をさぐることで、レイノルズ数などの諸条件をより海流に近づけてシミュレーションすることなどを、新たな課題としていきたい。

### 参考文献

- [1] 河村, サイエンス社, (2006).
- [2] 河村, 山海堂, (2003).
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁「エネルギー白書」  
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>(最終アクセス: 2015/02/05)