

変動する流れ場内にある回転機構の非定常数値シミュレーション

理学専攻・情報科学コース 荒木 美保

1 はじめに

本研究では、海流発電⁽²⁾に垂直軸S字型回転機構(水車)を用いることを想定し、流れ場における非定常特性を流体シミュレーションにより調べることを目的とした。2次元の機構については⁽¹⁾にて既に検討したため、本論文では主に3次元垂直軸S字型回転機構について、その回転によって生じるトルクと回転軸で生じる抵抗とをもとに、回転角速度を時間発展的に算出し、時間的に変動する流速に応じて回転する回転機構の角速度や流れ場の時間変化を、高さの違いや隔壁の有無に着目し2次元のものと比較、解析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

半径1の半円を組み合わせたS字型で高さ1, 2, 4, 6の垂直軸型回転機構について3次元でのシミュレーションを行う。計算領域は $20 \times 23 \times (\text{機構高さ} + 22)$ の直方体にとった。

2.2 格子

回転機構付近の流れを正確に計算するため、回転機構に沿った、回転機構に近いほど細かい格子を作成する。格子数は $101 \times 81 \times (\text{機構高さ} + 1)$ に対して20+上下空間分40とした。(Fig. 1)

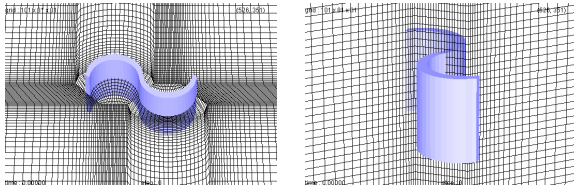


Fig. 1 Computational grid

3 計算方法

3.1 基礎方程式

回転機構に固定された回転座標系を用いる。回転座標系 (X, Y, Z) と静止座標系 (x, y, z) 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。

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

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

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

流体に関する基礎方程式を以下のように回転座標系で表す。

連続の式

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

運動方程式

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

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

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

p は圧力を表す。Reは回転機構半径を代表長さ、流速を代表速度としたレイノルズ数で、 10^5 とする。

回転機構の回転角速度は、回転の運動方程式

$$I \frac{d\omega}{dt} = T - B$$

に基づき、回転機構の回転によって生じるトルクと、回転機構の回転軸で生じる抵抗をもとに算出する。

I は回転機構の慣性モーメントで定数、 T は回転機構の表裏にかかる圧力差から計算したトルク、 B は回転機構が軸受から受ける抵抗で、回転角速度 ω に比例すると仮定した。

3.2 解法

流体の基礎方程式を一般座標変換⁽³⁾した上で、フラクショナル・ステップ法⁽⁵⁾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。

回転の運動方程式は4次精度のルンゲ・クッタ法で解く。

4 評価方法

回転機構の特性を調べるために以下のパラメータを用いる。

- T : 計算から得られるトルク
回転機構が回転する力。 $T < 0$ では回転を妨げる方向に力が働いている。
- Ct : トルク係数 ($Ct = T/qRA$)
トルクを回転機構の大きさと無次元化したもの。
 q : 動圧 ($= \rho/2$), ρ : 空気密度, R : ローター半径, A : 回転機構の掃過面積 ($= 2RH$), H : 回転機構高さとする。
- λ : 周速比 ($\lambda = R\omega/u_\infty$)
流速に対する回転機構先端の速度。流速が一定の時、 λ が大きいほど回転機構の回転が速いことを意味し、 $\lambda < 1.0$ は先端の速度が流速よりも遅いことを意味する。 ω : 回転機構の回転角速度, u_∞ : 遠方の流速とする。

5 結果と考察

5.1 周速比

Fig. 2 および Fig. 3 は、それぞれ、回転機構の上下に隔壁のある場合とない場合について時間経過ともなう周速比の変化を示している。グラフの横軸は時間変化、縦軸は周速比入である。なお、隔壁のない場合には参考のため 2 次元計算の結果も示している。

2 次元の場合は、静止状態から急速に回転を始めピークから少し遅くなった状態で定常に達する。3 次元の場合は単調に定常状態に達する。隔壁のある方が、ない方に比べて、すべての高さでその周速比の収束値が大きくなっている。さらに、どのグラフも周速比が 1.0 未満で収束しており、この傾向は一般の S 字型回転機構の性質、即ち、流速より速く回転できないというものに合致する。(4)

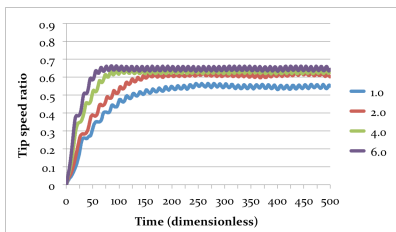


Fig. 2 Time history of the tip speed ratio
: S-rotor with cover

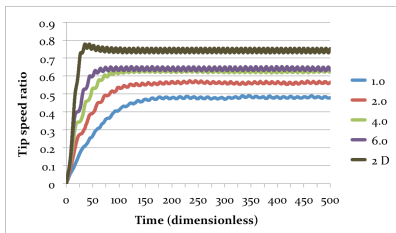


Fig. 3 Time history of the tip speed ratio
: S-rotor without cover

5.2 流れ場

Fig. 4 はトルク係数が大きい値を示すときの水平断面の流れ場を、Fig. 5 はトルク係数が小さい値を示すときの水平断面の流れ場を、それぞれ示しており、どちらも左から 2 次元性を仮定したもの、高さ 2 の隔壁のあるもの、同じく隔壁のないものである。また、Fig. 6 と Fig. 7 は、隔壁の有無ごとに、どちらも同じ回転角度における鉛直断面の流れ場を示しており、左から高さが 1, 2, 4, 6 のものである。

すべての条件で共通して、S 字が立ち上がりかかっているとき (Fig. 4) は上側のへこみに流体が入り内部の圧力が高くなっているため、回転機構を回転させようとする力が強く働いている。また、S 字が横に寝ているとき (Fig. 5) は左側の凸部に流れが当たり圧力も高まっていることから、回転機構を逆方向に回転させようとする力が働いている。

Fig. 6 と Fig. 7 とから、3 次元の機構が回転している際、回転機構の上下端から中央に向かって回り込むような流れが発生している。これにより 3 次元では流れのすべてを回転の動力源にすることができないため、全体的に周速比の収束値が小さくなっていると考えられる。ここで、高さが高くなるにつれて回転機構

の高さに占める、回り込む流れの割合が相対的に小さくなっているため、その影響が小さくなることが考えられる。また、そのような回り込む流れの発生は、トルク係数が小さくなるような角度のときに顕著である。さらに、Fig. 5 では隔壁のある場合と比べて、隔壁がない場合には、流れに逆らい回転を妨げるような渦が下流にできているのが見られる。

これらが 5.1 で見られる周速比の値の差につながると考えられる。

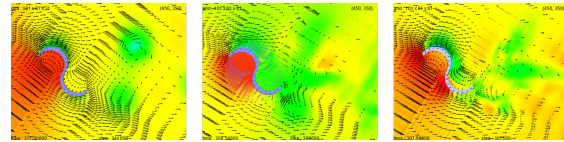


Fig. 4 Flow fields in a vertical cross section
: S-rotor with cover

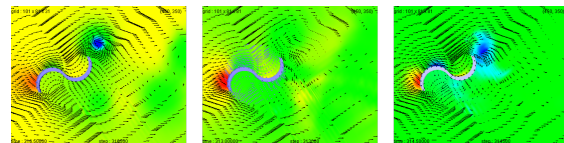


Fig. 5 Flow fields in a vertical cross section
: S-rotor without cover

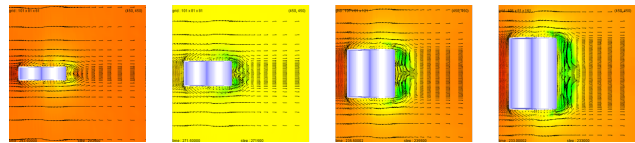


Fig. 6 Flow fields in a vertical cross section
: S-rotor with cover

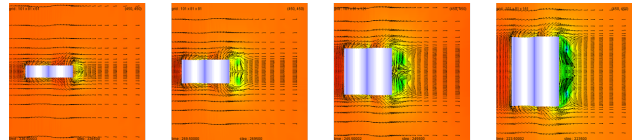


Fig. 7 Flow fields in a vertical cross section
: S-rotor without cover

6 まとめ

3 次元垂直軸 S 字型回転機構について、その回転によって生じるトルクと回転軸で生じる抵抗とをもとに、その回転機構の回転角速度を時間発展的に算出し、時間的に変動する流速に応じて回転する回転機構の角速度や流れ場の時間変化を、高さの違いや隔壁の有無に着目し 2 次元性を仮定したものと比較、解析した。

その結果、3 次元の回転機構の周速比は、2 次元に比べて小さくなること、隔壁の有無は周速比の収束値に影響を与えることが明らかになった。

参考文献

1. 荒木, “回転機構の設計に向けた数値シミュレーション”, 日本流体力学会年会 2016
2. 高木, “海流発電”, 日本船舶海洋工学会誌 (41), 2012-03-10, pp. 26-30
3. 河村, “数値シミュレーション入門”, サイエンス社, (2006), ISBN4-7819-1134-X.
4. 河村, “エネルギーと風車”, 山海堂, (2003), ISBN4-381-01678-5.
5. Yanenko, N. N., “The method of fractional steps”, Springer-Verlag, (1971).