

CFD による水平軸型海流発電用回転装置の動特性の解析

理学専攻・情報科学コース

平賀郁子

1 はじめに

二酸化炭素は地球温暖化の原因とされる温室効果ガスの一つであり、その排出量の33パーセントはエネルギー転換部門が占める。中でも、化石燃料を使用した発電は、自然エネルギー由来の発電と比べてはるかに二酸化炭素の排出量が多くなっている。しかし自然エネルギー由来の発電は、天候などの影響で出力の変動が大きく、電気の安定供給に問題が生じるため、化石燃料を使用した発電に頼っている。そこで近年、海流発電が注目されている。海流発電は、海流による海水の流れを用いて水車などを回転させ、その運動エネルギーを電気エネルギーに変換する方式である。天候の影響を受けにくく出力が安定している、エネルギー変換効率が高い、などの特徴を持っている。本研究では、海流発電の実用化に向けた数値シミュレーションを行う。

2 モデル・格子

Fig. 2.1 は本研究で使用する発電機のモデルを示している。このモデルを変形することで回転力にどのような影響が出るかを調べる。評価は以下の方法で行う。一様流の中に回転装置を置き、一定速度で強制的に回転させる。一定時間後、回転装置のブレードの表と裏にかかる圧力の差から回転力を計算し、回転力と回転速度からパワーを計算する。多くのパワーが得られた形がより適する形だと考えられる。

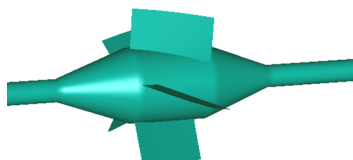


Fig. 2.1: Model

Fig. 2.2 は回転装置に沿った格子を5格子毎に表示している。格子数は回転方向、半径方向、円柱の長さ方向にそれぞれ186×41×101であり、ブレードの枚数に合わせて領域を分割した。

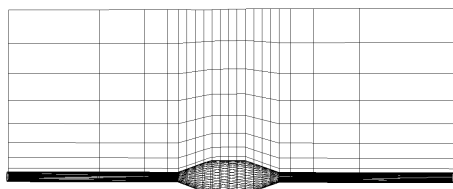


Fig. 2.2: Grid System

3 計算方法

3.1 基礎方程式

Z軸周りを角速度 ω で回転する回転座標系を用いる。このとき連続の式と Navie-Stokes 方程式は以下のように

なる。
連続の式

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

Navier-Stokes 方程式

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

P: 圧力, Re: レイノルズ数,
 ω : 回転装置の回転角速度, θ : 回転角
X,Y: 回転座標系での位置,
U,V: 回転座標系での速度

回転座標系で表した式を用いることで、物体に固定した格子による計算が可能になる。なお、静止座標とZ軸まわりの回転座標との間には以下のような関係がある。

$$x = X \cos \theta + Y \sin \theta$$

$$y = -X \sin \theta + Y \cos \theta$$

$$X = x \cos \theta - y \sin \theta$$

$$Y = -x \sin \theta + y \cos \theta$$

また静止座標系における速度 u, v と回転座標系における速度の間には以下のような関係がある。

$$u = U \cos \theta + V \sin \theta + \omega y$$

$$v = -U \sin \theta + V \cos \theta - \omega x$$

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta - \omega Y$$

$$V = u \sin \theta + v \cos \theta + \omega X$$

3.2 解法

上記の方程式を MAC 法を用いて解く。 $\Delta t = 0.005$, $Re = 2,000$, 計測時間は 100 秒とした。

4 結果

4.1 計測時間の評価

Fig. 4.1 はあるパラメータをとったときのトルクの時間変化を表している。ほかのパラメータをとったときも同様に一定時間後にトルクの値が落ち着くことを確認できた。従って、100 秒後に十分トルクが落ち着いているとし、100 秒後のトルクの値で比較する。

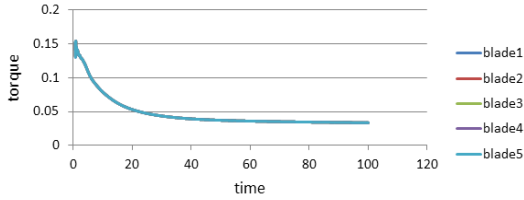


Fig. 4.1: Time vs Torque

4.2 様々なパラメータを用いた比較

4.2.1 ブレードの高さをパラメータとした場合

Fig. 4.2 はブレードの高さとブレードにかかる単位面積あたりのトルクの関係を表している。ブレードの高さは高ければ高いほど良いが一定のところまで収束に向かうという結果が得られた。今回計算した中で一番ブレードを高くした場合の圧力分布とブレードの後端の速度分布はそれぞれ Fig. 4.3, Fig. 4.4 のようになった。

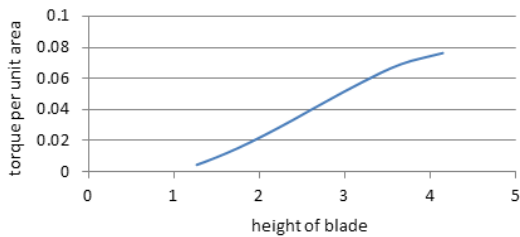


Fig. 4.2: Height of Blade vs Torque per Unit Area

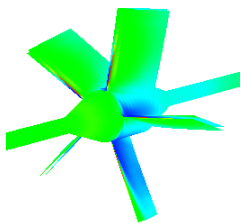


Fig. 4.3: Pressure Distribution

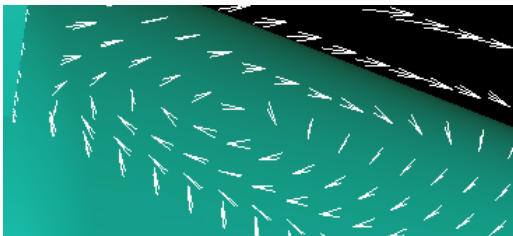


Fig. 4.4: Vecor Distribution

4.2.2 回転速度をパラメータとした場合

Fig. 4.5 は回転速度とパワーの関係を示している。回転速度 $\omega = 0.06$ のときパワーは最大の値をとった。

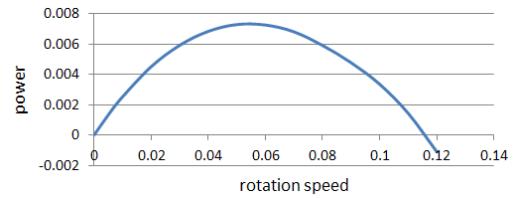


Fig. 4.5: Rotation Speed vs Power

4.2.3 ブレードの傾きをパラメータとした場合

Fig. 4.6 はブレードの傾きとトルクの関係を表している。ブレードは前に傾いているほどよいという結果が得られた。

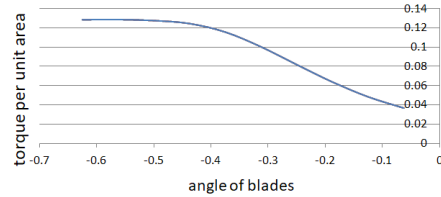


Fig. 4.6: Angle of Blade vs Torque

4.2.4 ブレードの枚数をパラメータとした場合

Fig. 4.7 はブレードの枚数とトルクの関係を表している。ブレードの枚数は多ければ多いほど良いという結果が得られたが、ブレード一枚あたりにかかるトルクを計算すると、4枚のときが最も高い値が得られた (Fig. 4.8)。

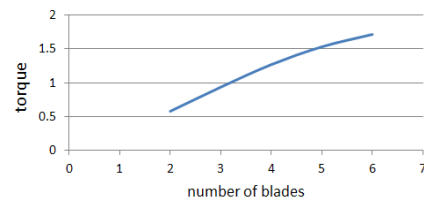


Fig. 4.7: Number of Blades vs Torque

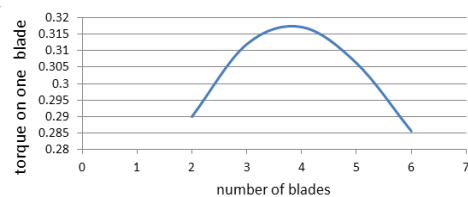


Fig. 4.8: Number of Blades vs Torque on One Blade

5 まとめ

海流発電に使えるような鈍頭型の発電機のモデルを作成しそのシミュレーションを行い、様々なパラメータが回転力へ及ぼす影響を観察した。

6 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K04165 の助成を受けて行ったものです。

参考文献

- [1] 河村哲也. 数値シミュレーション入門. サイエンス社, 2006.