

独立して回転する複数台のJ型回転装置まわりの流れと動特性の数値的研究

理学専攻・情報科学コース 佐々木 桃 (指導教員：吉田裕亮)

1 はじめに

本研究では、海流発電への応用を目指して、一定角速度で回転しているJ型翼サボニウス回転装置（以下J型回転装置と略記）の回転装置まわりの流れを、2次元の非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を数値的に解くことにより解析した。J型回転装置とはバウハ型回転装置を変形したもので、バウハ型やサボニウス型よりも効率がよいとされている[1]ため、本研究では、回転装置としてこの型を選んだ。また、実際への応用を考えると、回転装置は単独で用いられることは少なく、近接して複数台配置されることが多い。このことを考慮して本研究では2台、及び4台が近接しておかれた場合の相互作用も含めて、2次元数値シミュレーションにより、装置間距離や回転装置に当たる流れの角度、周速比の変化が流れに及ぼす影響や、流れ場、トルクを調べた。

2 モデル化・格子生成

2.1 モデル化

本研究では同じ大きさの2台または4台のJ型回転装置が各回転装置を一定角速度で互いが逆方向になるように回転させて計算を行う。さらに、2台の装置の回転軸をつないだ線をy軸、それに垂直な線をx軸とし、x軸となす角を ϕ とおくと、回転装置に当たる流れの方向が $\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ (4台の場合は対称性から、 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)の場合をそれぞれ計算する。(図1)

2.2 格子生成

回転している物体まわりの解析をする際には回転座標系を用いることが多い。しかし、回転している物体が複数ある場合には、一つの回転座標系領域内で複数の物体を個別に計算することは難しい。本研究では複数の物体が回転する。そこで、先行研究[2]と同様に、2つのJ型回転装置を個別に計算できるように回転装置を1つ含む装置領域を用意し、2つの装置領域を接続した全体領域で計算を行った。1つの装置領域は回転座標系の領域と静止座標系の領域の2つに分けられる。回転座標系の領域はさらにブレード内側領域、ブレード外側領域、静止座標系の領域と接する回転領域に分けられる。ここでブ

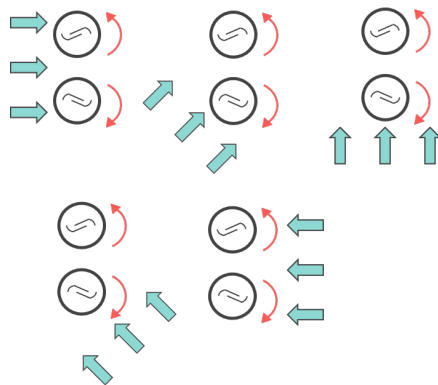


図1: Schematic diagram of two J-type turbines

レード内側・外側領域はデカルト座標系、回転領域は円柱座標系を用いている。また、静止座標系の領域は回転領域に接する接続領域と外部領域で成り立っている。(図2)

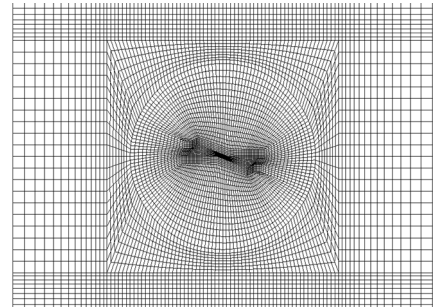


図2: Computational region of a single device

3 計算方法

3.1 基礎方程式

回転装置近傍の回転領域では、回転装置に固定された回転座標系を用いる。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、以下のように表せる。

$$X = x \cos \theta - y \sin \theta, Y = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (3.1.1)$$

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。

$$\begin{aligned} U &= u \cos \theta - v \sin \theta - \omega Y, \\ V &= u \sin \theta + v \cos \theta + \omega X \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

流体に関する基礎方程式として、静止座標系と回転座標系における連続の式とナビエ・ストークス方程式を用いた。回転座標系で表した2次元での連続の式及び非圧縮性ナビエ・ストークス方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3.1.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} - \omega^2 X + 2\omega V \\ = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} - \omega^2 Y - 2\omega U \\ = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

p は圧力を表す。Re(レイノルズ数)は格子の解像度を考慮して、回転装置の直径の長さを代表長さ、流速を代表速度として、12000とする。

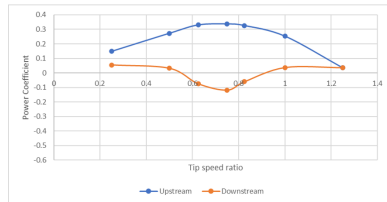
3.2 解法

流体の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[3]を用いて解く。ナビエ・ストークス方程式の非線形項(対流項)は3次精度上流差分、その他の項には中心差分を用いた[4]。

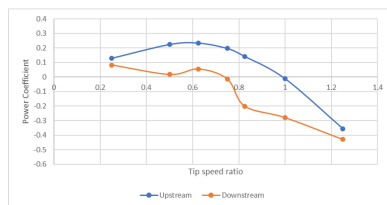
4 計算結果と考察

4.1 周速比の影響

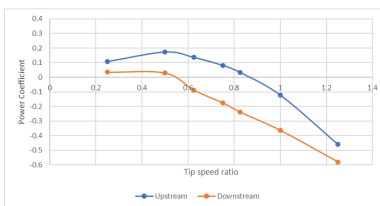
図3は、周速比と出力係数の関係を表すグラフで、迎角が 90° のときの2台の回転装置間距離が近い(図3a)、中間(図3b)、遠い(図3c)場合を示している。どの距離でも上流側の装置と下流側の装置でトルクに差が見られ、下流側の装置は上流側の装置の後流に入るとともに、上流側の装置によってエネルギーが消費されるため、下流側にある装置は大きなトルクを出せず、出力係数が低くなったと考えられる。特に距離が近い場合では下流側装置の出力係数のカーブの形がかなり乱れており、上流側の影響を大きく受けていることがわかる。



(a) near distance



(b) normal distance



(c) far distance

図3: Relation between tip speed ratio and power coefficient (90 degree flow)

4.2 トルク

図4aは回転装置が2台で、周速比が0.825の場合の、2台の装置に働くトルクの総和(5周期の平均値)を一覧にしたものであり、一様流れ角度と回転装置間の距離を変化させて求めたものである。横の欄が一様流れの角度(迎角)、縦の欄が回転装置の回転軸間の距離である。図4bは4台の場合について図4aに対応するものである。これらより、迎角にかかわらず距離が近い方が得られるトルクが大きいことがわかる。これは、風車の回転速度をあらかじめ与えた結果という可能性もある。また、一方の風車をよけた流れが他方により多くのエネルギーを与えている、などの理由が考えられる。

4.3 圧力場

図5は計算結果の一例の回転装置まわりの圧力場を表している。装置間の距離が近く、周速比が0.75、迎角が 90° 、回転角が 1845° のときのスナップショットである。

	0	45	90	135	180
近い	0.59489	0.517536	0.160967	0.544396	0.588816
標準	0.287027	0.272147	-0.03536	0.232282	0.279807
遠い	0.119503	0.17211	-0.12377	0.168051	0.106172

(a) Total torque for two devices

	0	45	90
近い	0.3067463	0.6859694	0.2984398
標準	0.0921739	0.3481936	0.0868696
遠い	-0.0180855	0.2476582	-0.0979731

(b) Total torque for four devices

図4: Total torque (tip speed ratio 0.825)

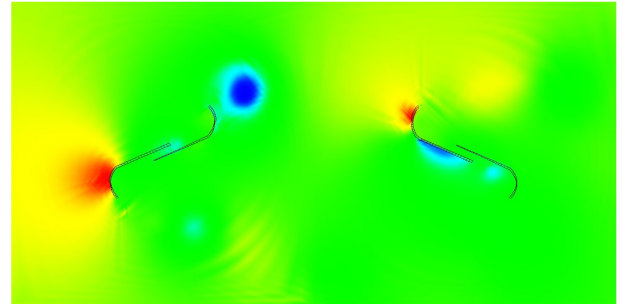


図5: Pressure (Red:High, Blue:Low, Upstream:Left)

5 まとめ・今後の課題

独立して回転する複数台の回転装置まわりの流れを解析するために、個々の回転装置ごとに回転座標系を用意して、それらを、全体領域を表す静止座標系に埋め込むことにより計算する方法を確立した。

そして、この方法を用いて独立に回転する2台および4台のJ型回転装置について2次元のシミュレーションを行い、流れの向きや回転装置間の距離を変化させて流れ場やトルクに及ぼす影響を調べた。

その結果、迎角にかかわらず装置間の距離が近い方が得られるトルクが大きいことがわかった。

今後の課題として流れ場と連動させて回転速度を決めるシミュレーションを行うことや3次元のシミュレーションを行うことがあげられる。

参考文献

- [1] 高久有幹：サボニウス風車の動向と展望，ターボ機械第19巻第5号，(1991.05)，pp.62-67
- [2] 皆川晶子，河村哲也：独立して回転する複数台のサボニウス風車まわりの流れのシミュレーション，日本流体力学会年会2021，(2021.09)
- [3] Yanenko, N.N.：The Method of Fractional Steps, Springer-Verlag, (1971)
- [4] Kawamura, T. and Kuwahara, K.: Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, AIAA Paper 84-0340(1984)
- [5] 佐々木桃，河村哲也：独立して回転する2台のバツハ型回転装置まわりの流れの数値シミュレーション，第35回数値流体力学シンポジウム，(2021.12)，C05-6
- [6] 佐々木桃，河村哲也：複数台のJ型回転装置まわりの流れのシミュレーション，日本流体力学会年会2022，(2022.09)