

変形型サボニウス風車の特性解析

玉田真里奈 (指導教員：河村哲也)

1 はじめに

サボニウス風車は垂直軸抗力型風車の一つであり、実験、数値計算ともに様々な研究が行われている (1),(2)。

静止状態のブレードに特定の向きからの風が当たった場合に負のトルクが発生し、起動しにくいことがあるが、起動性を改善するために種々の工夫がなされている (3)-(5)。本研究では、図 1 に示すように風車のブレードが 2 段になっている風車について特性解析を行った。2 段のブレードの位相をずらすことで、起動性の改善、および回転時のトルク変動の抑制を目指す。2 段目のずらし角度の異なるいくつかの風車に対して静止トルクおよび動トルクを計算し、最適形状の提案を行う。なお、図 1 は左からそれぞれ、2 段目のブレードの位相が 1 段目から 0 度 (変形なし)、30 度、60 度、90 度ずれたものである。

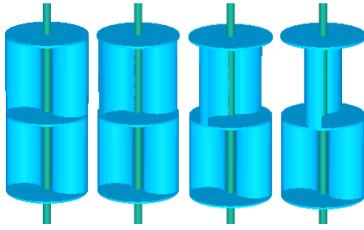


図 1: 2 段サボニウス風車

2 計算方法

2.1 基礎方程式

風車は一定角速度 ω で z 軸のまわりを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。図 2 に示すように、回転座標系 (X, Y, Z) と静止座標系 (x, y, z) 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) の関係は次式で表せる。

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

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

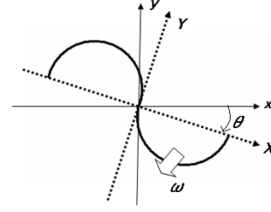


図 2: 静止座標系と回転座標系

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

p 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。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 (6) を用いて解く。

2.2 計算領域、境界条件

図 3 に示すように風車ブレードに沿った、風車から遠ざかるほど粗くなる不等間隔格子を用いる。格子数は周方向に 72、半径方向に 60、高さ方向に 80 とした。遠方境界では一様流、計算領域上下は自由流出入、風車ブレード上では滑りなし条件を課した。

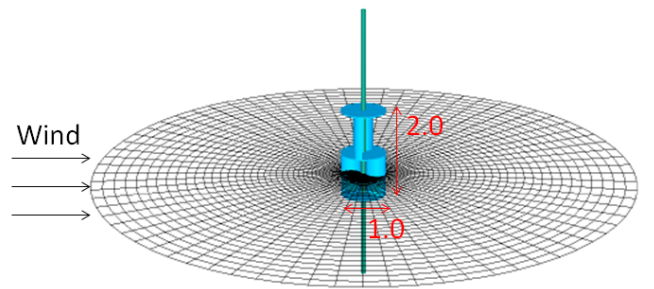


図 3: 計算領域

2.3 ブレードの条件

- 各段の風車の高さは円の直径を 1 としたとき 1 とした。1 段目の風車に対しての、2 段目の風車のずらし角度を **Phase (位相角)** と呼ぶことにして、 ϕ で表す。図 4 に示すように、1 段目を基準として 2 段目の風車をずらすことにする。 $\phi = 0$ のとき、従来の、変形しないサボニウス風車を意味する。風車形状の対称性より、 ϕ は $0 \leq \phi \leq 90^\circ$ で定義している。

- 風車の起動性を調べるために、固定された風車ブレードに風が当たったときに発生するトルク（静トルク）を計算する。1段目の風車に対しての **Attack Angle**（迎角）を図5のように定義し、 α で表す。計算を始めてから充分時間がたったあとでの、一定時間間に発生するトルクの時間的平均値を、その α での静トルクとする。風車形状は180度周期になっているため、 α は $0 \leq \alpha < 180^\circ$ で定義している。

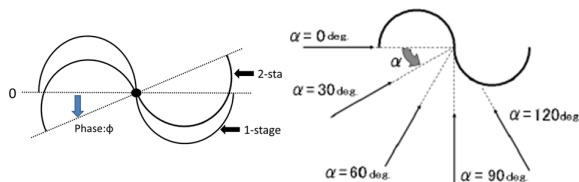


図4: 位相角 ϕ

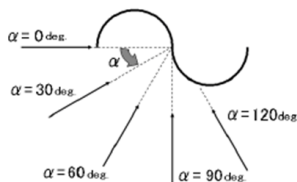


図5: 迎角 α

3 計算結果

3.1 変形前風車 ($\phi = 0$) の起動特性

はじめに、変形前風車（位相角 $\phi = 0$ ）計算結果を示す。図6のグラフの横軸は図5で定義した迎角、縦軸はトルク係数、青線（1-stage）は1段目の風車が発生する静トルク、赤線は2段目の風車が発生する静トルク、緑線（Sum）はそれらの合計である。

図6より、 $\alpha = 40$ から $\alpha = 50$ でトルク係数の値が大きく、 $\alpha = 130$ から $\alpha = 160$ の間ではトルク係数の値が負、すなわち起動できない状態になっている。

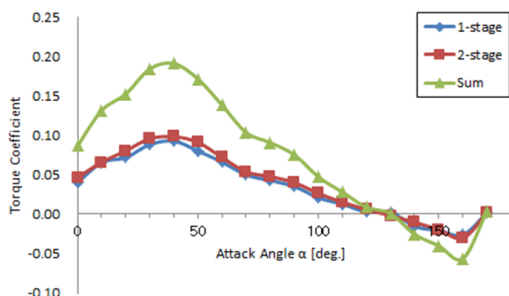


図6: 変形前風車の起動特性

3.2 変形後風車 ($\phi = 90$) の起動特性

2段目を1段目に対して回転させ、位相 ϕ をずらして重ねた風車に対して、3.1と同様の計算を行った。 $\phi = 90$ の結果を例として示す。図7は、図6に対応するグラフであるが、1段目の風車（青線）が正のトルクを発生することができない領域（ $\alpha = 130$ から $\alpha = 160$ の間）において、90度位相のずれた2段目の風車（赤線）が正のトルクを発生しており、合計すると（緑線）正のトルクを発生する、すなわち起動できない領域をなくすることができる。

位相角を10度ずつずらして同様の計算を行った結果、 $\phi = 50$ 以上で、負のトルクは発生しない。つまり、位相角 $\phi = 50$ 度以上の変形により、起動特性が改善される。

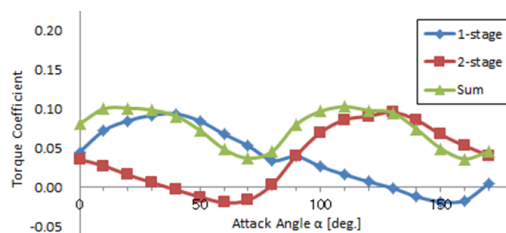


図7: 変形後風車の起動特性 ($\phi = 90$ の例)

3.3 動特性

図8は変形前の風車（位相角 $\phi = 0$ ）と、3種類の変形風車（ $\phi = 30, 60, 90$ ）それぞれに対して、動特性を計算したものである。グラフの横軸は周速比 λ （風速に対する風車ブレード先端の速度）、縦軸はパワー係数（自然風の中から風車によって取り出すことができるパワーの割合）を表す。変形前風車の、周速比 $\lambda = 0.6$ から 0.8 前後で、パワー係数が 0.14 程度になるという傾向は、一般的なサボニウス風車と定量的に一致する(4)。

位相角 ϕ が大きくなるほど特性が劣化するの、各段のアスペクト比が小さくなっているために、回転角速度の増大に伴って戻り側バケット後方に生じる誘導渦が原因で、抵抗が増大するためと考えられる(1)。

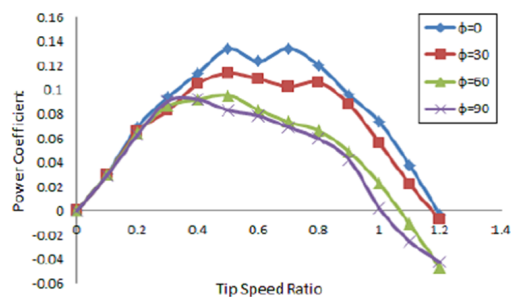


図8: 変形前・変形後風車の動特性

4 まとめ

位相角の違う2段サボニウス風車に対して数値解析を行い、静止時および回転時の特性解析を行った。

参考文献

1. 牛山, 他2名, “サボニウス風車の最適設計形状に関する研究,” 日本機械学会論文集 (B編), 52巻480号 (1986), pp.2973-2982.
2. 石松, 他3名, “サボニウス風車に関する数値計算(放出渦が運転特性に及ぼす影響),” 日本機械学会論文集 (B編), 61巻581号 (1995), pp.12-17.
3. 李, 他3名, “多段羽根型サボニウス風車の性能実験,” 日本機械学会2003年度年次大会講演論文集 (II), (2003).
4. 林, 他3名, “サボニウス風車の起動性改善に関する風洞実験,” 日本機械学会講演論文集 No.045-1, (2004).
5. Kuwana, et al. “Numerical Simulation of the performance of Modified Savonius Rotors,” CFD Journal, 15(4), (2007), pp.598-602.
6. Yanenko, N.N., “The method of fractional Steps,” Springer-Verlag, (1971).