

# 非定常回転風車の最適化のための 数値シミュレーション



群馬大学 理工学府 理工学専攻  
電子情報 数理教育プログラム  
BAI XUEYAN YAODAN  
桑名杏奈 小林春夫

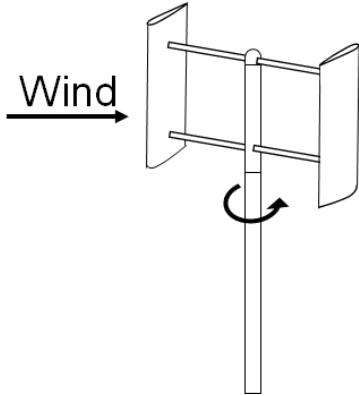
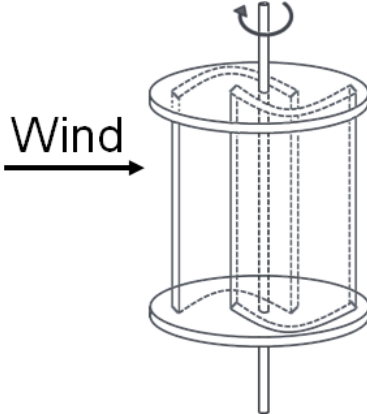
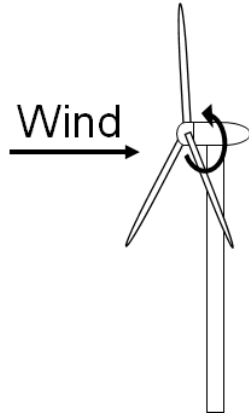
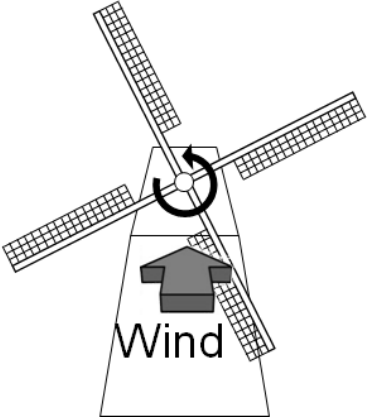


# 発表の流れ

- 風車の種類
- 研究内容
- 計算方法
  - 基礎方程式
  - 計算領域と境界条件
  - 計算条件
  - 数値解法と移流項の差分
  - トルクの計算と風車の運動方程式
- シミュレーション結果
- まとめ

# 風車の種類

## 4種類の風車

	揚力型	抗力型
VAWT 垂直軸風車	① 	② 
HAWT 水平軸風車	③ 	④ 

- ①直線翼垂直軸型風車  
風向きの影響を受けない
- ②サボニウス風車  
風向きが変わりやすい
- ③プロペラ型風車  
発電効率は良い
- ④オランダ型風車  
遅い回転速度ながら、  
トルクは大きい

# 研究内容

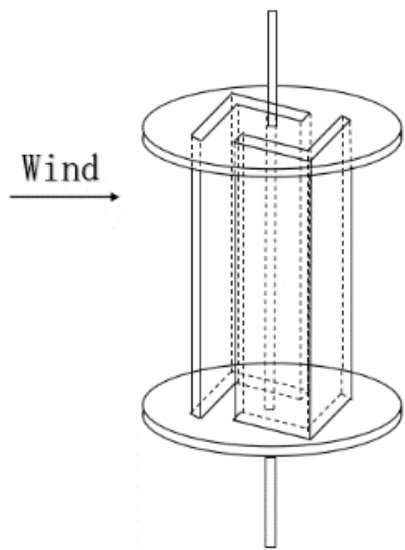


図1. サボニウス風車

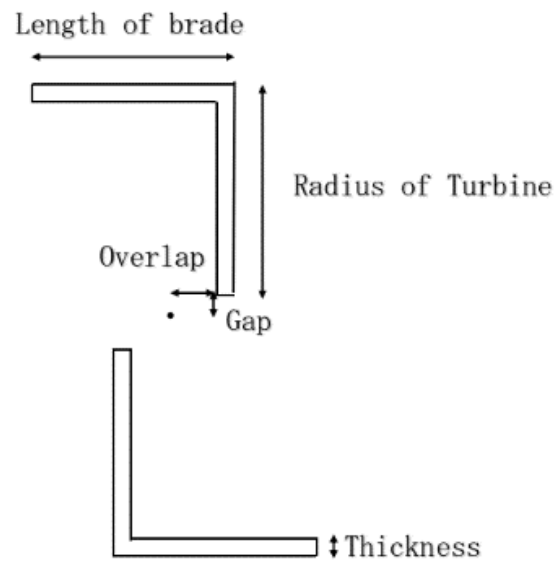
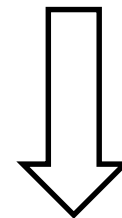


図2. サボニウス風車の断面図

パラメータ:

- ・ ブレード長さ
- ・ 風車半径
- ・ オーバーラップ
- ・ ギャップ
- ・ ブレード厚さ

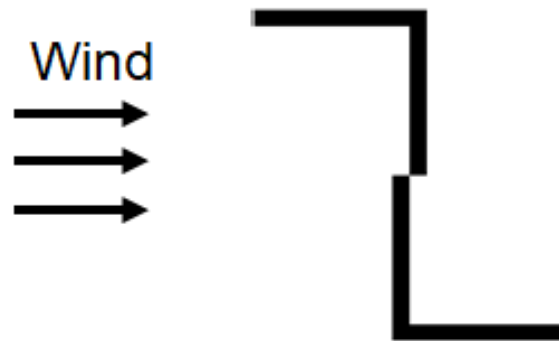


最適化

# 研究内容

## 定常回転

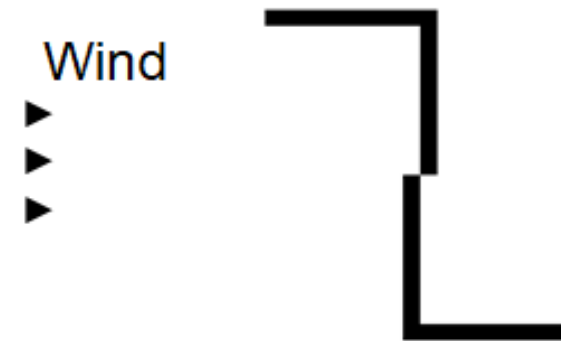
- 風車が一定の角速度で回転
- 風車の設計に役立つための基本的な特性を調べる
- 多くの研究で行われている



## 非定常回転

本研究

- 風車の回転速度が変わる
- 風速が変わったときの応答を調べる  
(起動・停止・加速・減速など)
- 研究例は少ないが、重要



起動の例

# 計算方法

## 基礎方程式

連続の式

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

非圧縮性Navier-Stokes方程式

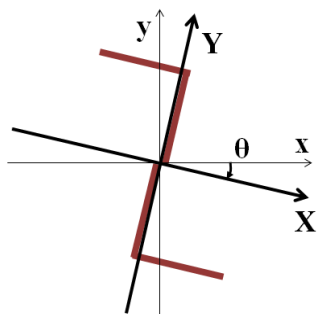
$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} - \omega^2 X + 2\omega V = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} - \omega^2 Y - 2\omega U = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right\} \quad (3)$$

回転座標系

$(X, Y)$  : 位置

$(U, V)$  : 速度



$p$  : 圧力

$t$  : 時間

$\omega$  : 角速度

Re: レイノルズ数 ( $10^5$ )

# 計算方法

## 数値解法

式(1)-(3)をフラクショナルステップ法によって解く。

$$U^* = U^n + \Delta t \left\{ -U^n \frac{\partial U^n}{\partial X} - V^n \frac{\partial U^n}{\partial Y} + \omega^2 X - 2\omega V + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 U^n}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U^n}{\partial Y^2} \right) \right\}$$

$$V^* = V^n + \Delta t \left\{ -U^n \frac{\partial V^n}{\partial X} - V^n \frac{\partial V^n}{\partial Y} + \omega^2 Y + 2\omega U + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 V^n}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V^n}{\partial Y^2} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial^2 p^{n+1}}{\partial X} + \frac{\partial^2 p^{n+1}}{\partial Y^2} = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{\partial U^*}{\partial X} + \frac{\partial V^*}{\partial Y} \right)$$

$$U^{n+1} = U^* - \Delta t \frac{\partial p^{n+1}}{\partial X}$$

$$V^{n+1} = V^* - \Delta t \frac{\partial p^{n+1}}{\partial Y}$$

## 移流項の差分

三次精度の上流差分：高レイノルズ数流れを安定して解けるといわれている。

$$f \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = f \frac{-u_{i+2} + 8(u_{i+1} - u_{i-1}) + u_{i-2}}{12\Delta x} + \frac{|f|\Delta x^3}{12} \frac{u_{i+2} - 4u_{i+1} + 6u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{\Delta x^4} \quad (4)$$

# 計算方法

## 計算領域

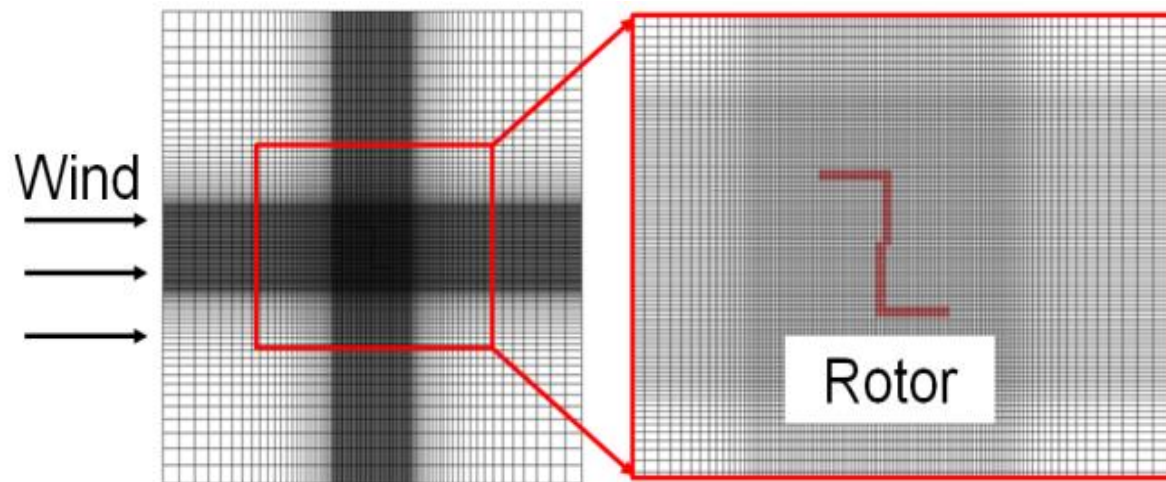
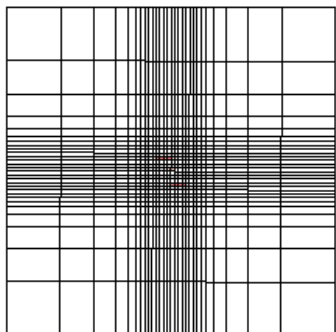


図3. 計算格子



風車付近で細かく，遠いほど粗い。  
格子は風車に固定されており，  
風車とともに非定常回転する。

## 境界条件

	遠方境界	風車ブレード上
速度	一様流 $u = 1.0, v = 0.0$ # 左から # 右に向かって # 風が吹く	回転座標系における 滑り無し条件 $U = 0.0, V = 0.0$ # ブレードに接する風は # ブレードと共に # 回転する
圧力	$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$	近傍点の圧力値の平均

表1. 境界条件

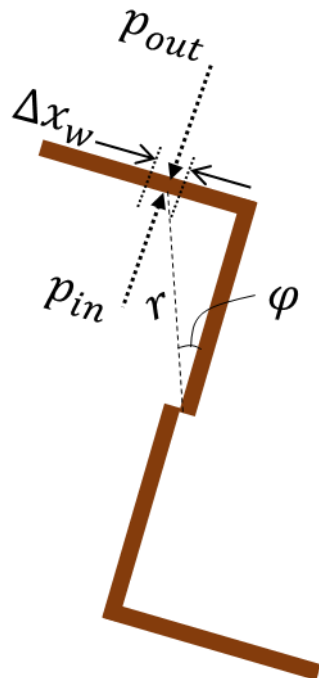


# 計算方法

## トルクの計算

トルク：風車を回転させる力  
 風車の周りの圧力値から計算する。  
 微小領域におけるトルク：

$$\Delta N = \Delta x_w (p_{in} - p_{out}) r \quad (5)$$



## 風車の運動方程式

$$I \frac{\partial \omega}{\partial t} = N - B \quad (6)$$

I：慣性モーメント

N：風車を回転させる力（トルク）

式(5)をブレードに沿って積分して得られる。

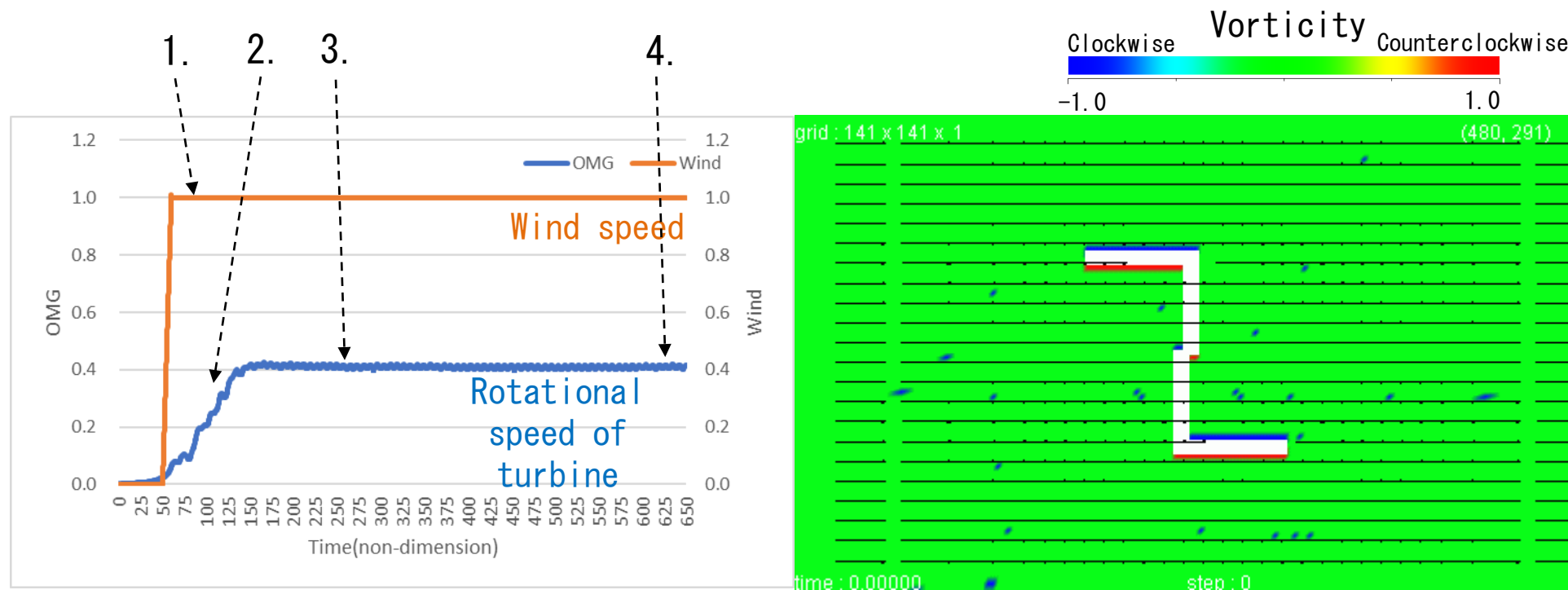
B：回転軸から受ける摩擦等，風車を停止させる力  
 $\omega$ に比例する。

式(6)をルンゲ・クッタ法で計算し，  
 得られた $\omega$ に従って風車を非定常回転させる。

# 計算方法

## 計算条件 (起動時の特性)

1. 静止している風車に風を当てる
2. 風車が回転を始める
3. 一定の速さで風車が回転
4. トルク係数の値を計算



# シミュレーション結果

縦軸：トルク係数（大きいほど、風車の効率が良い）

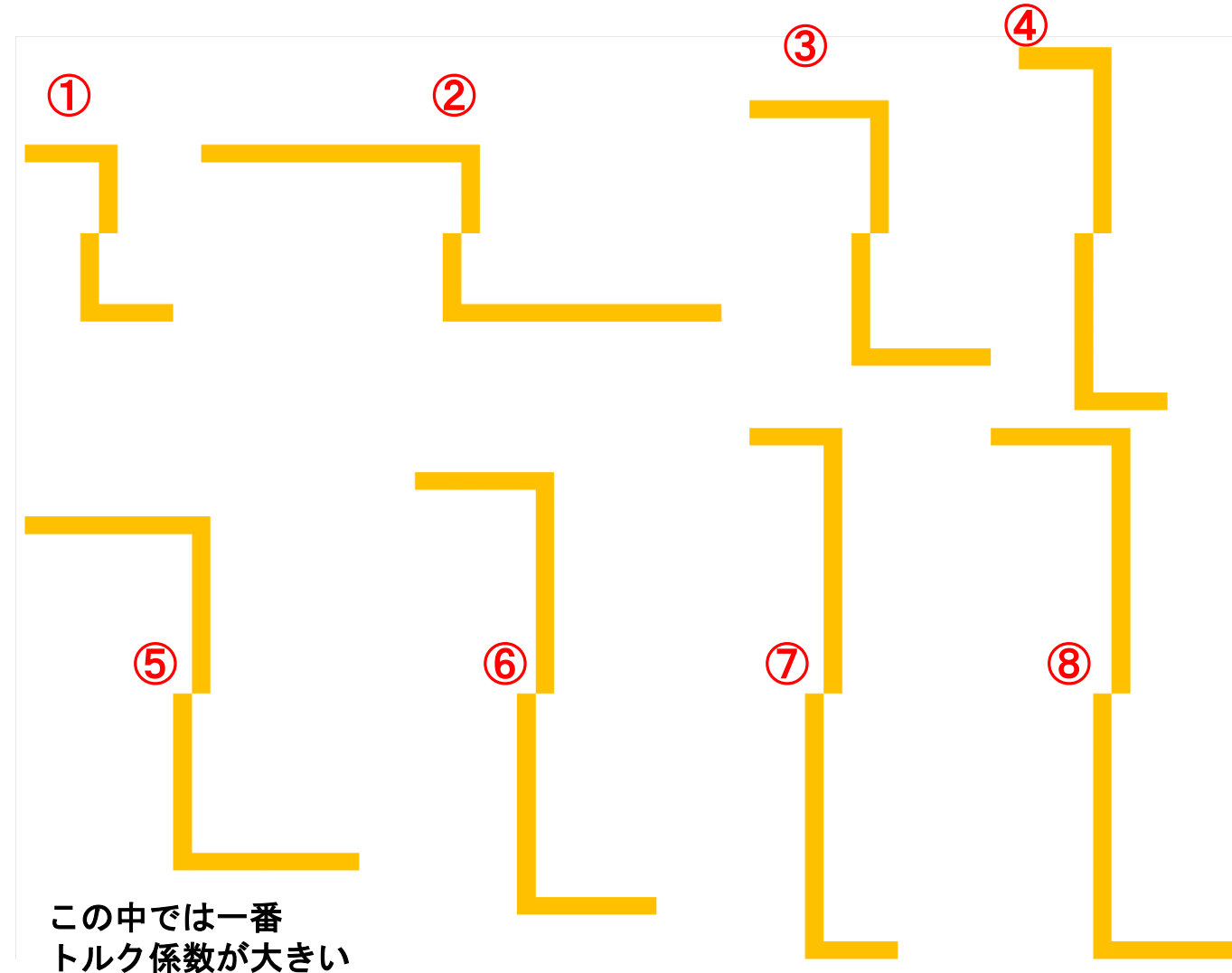
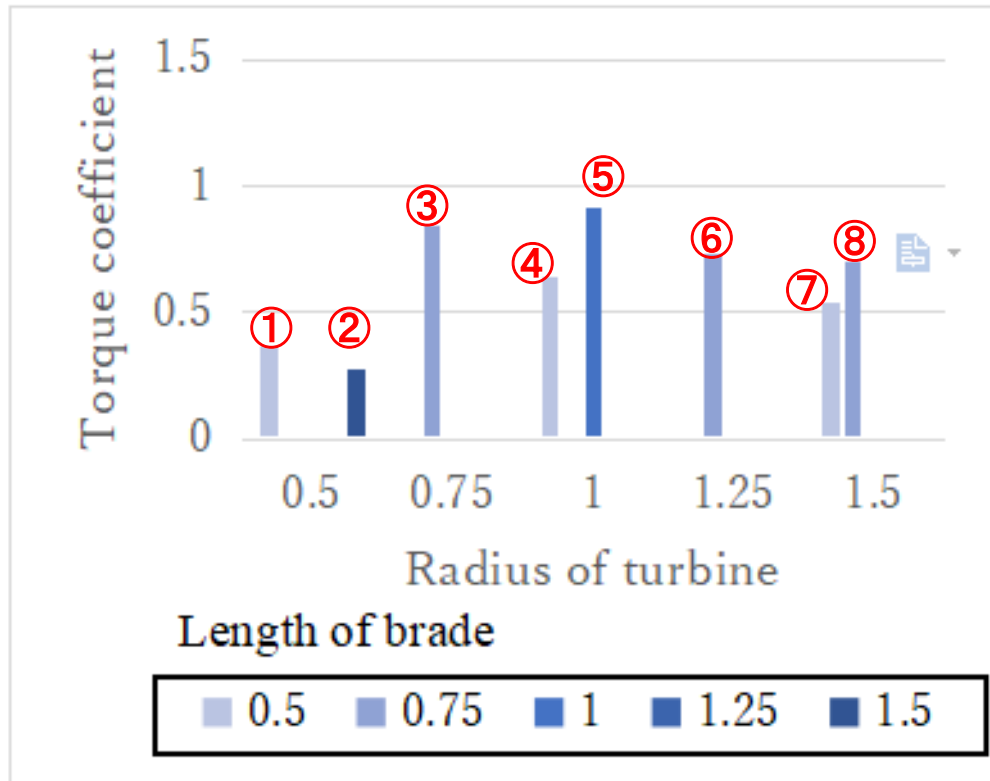
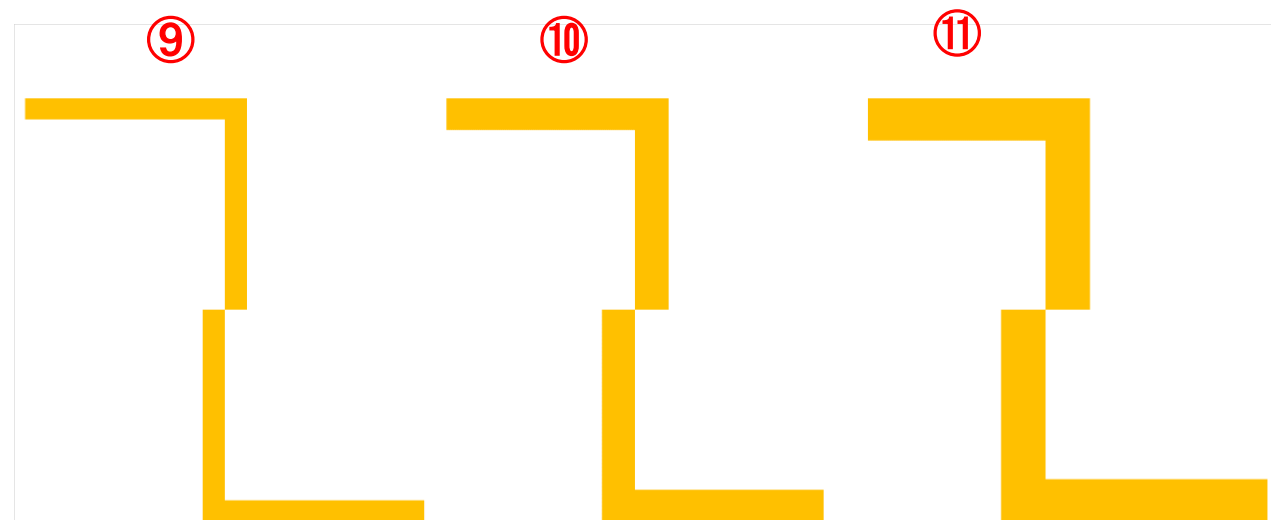
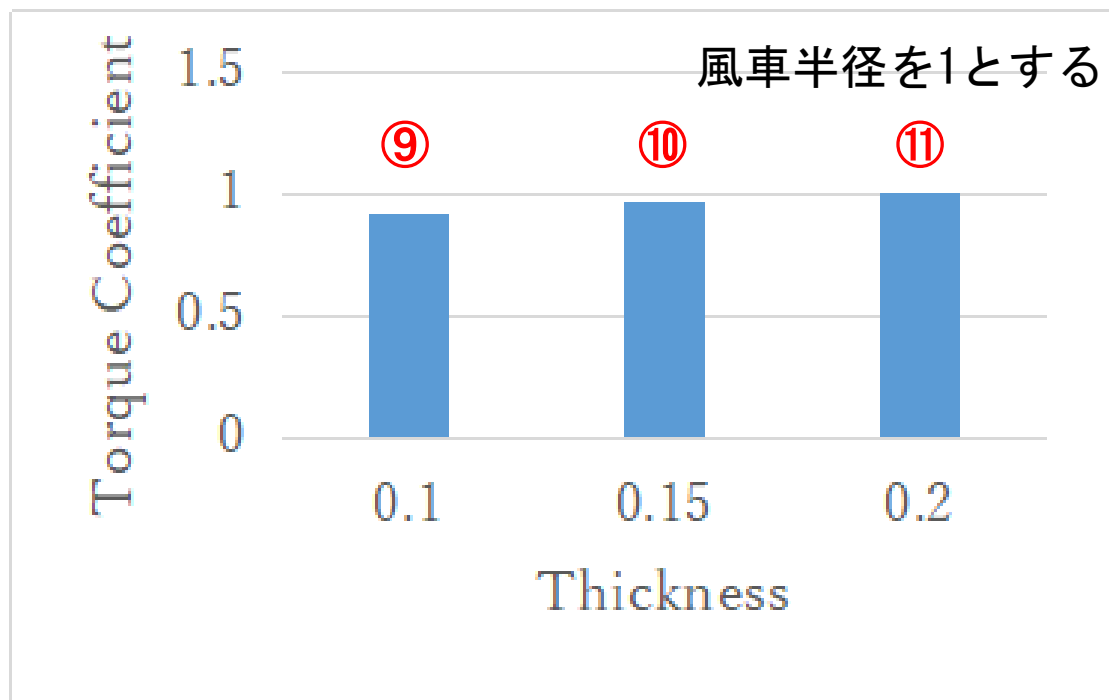


図4. ブレード長さと風車半径の解析  
(厚さ=0.1, オーバーラップ・ギャップ=0.0)

# シミュレーション結果

縦軸：トルク係数（大きいほど、風車の効率が良い）

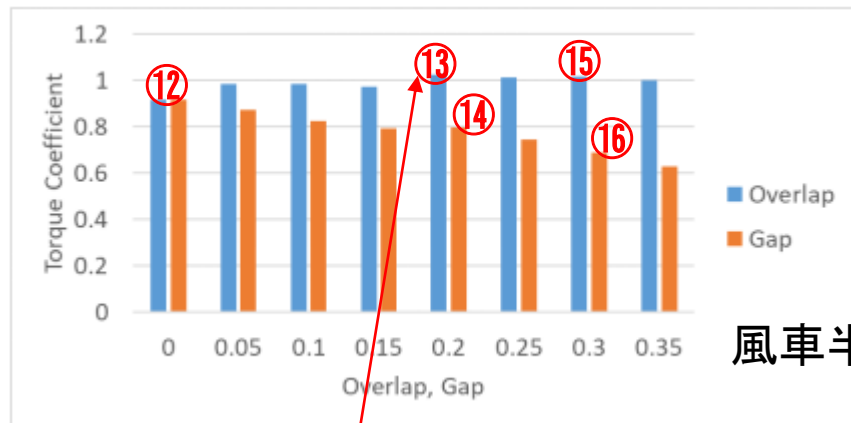


この中では一番  
トルク係数大きい

図5. ブレード厚さの解析

# シミュレーション結果

縦軸：トルク係数（大きいほど、風車の効率が良い）



風車半径を1とする

図6. オーバーラップ・ギャップの解析

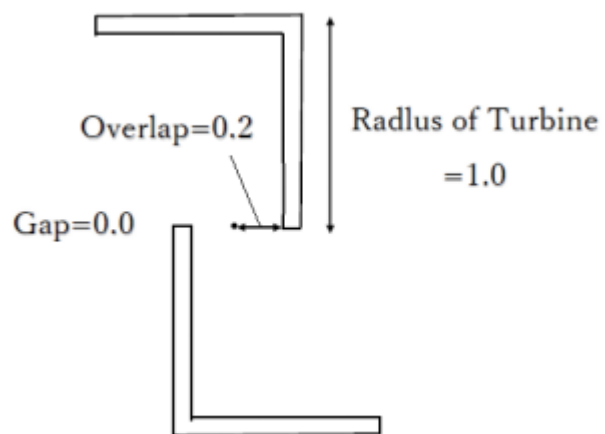
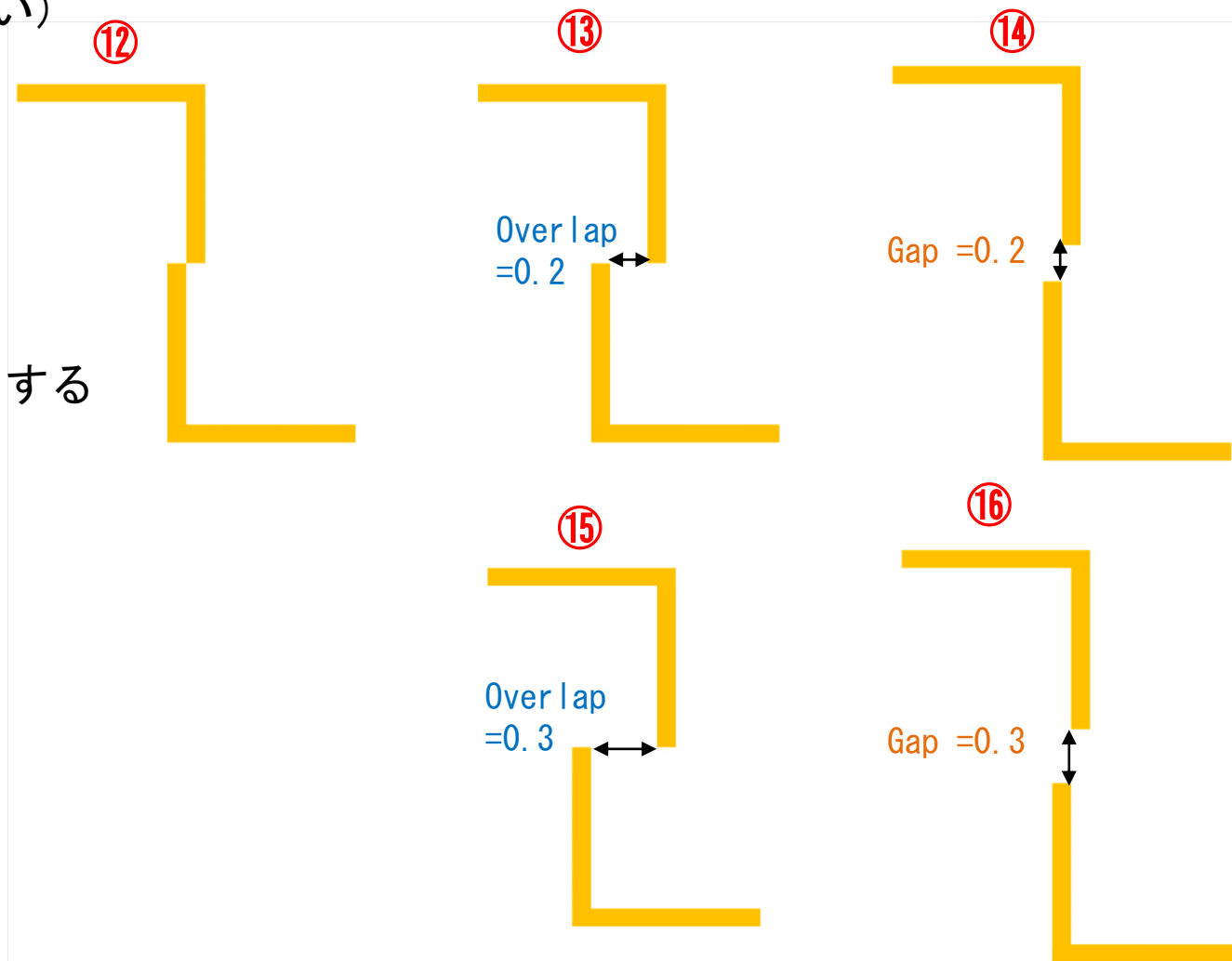


図7. ①～⑱の中で最高のトルク係数を発生する風車



# まとめ

- 本研究では風車回転時の特性を研究し，最適翼形状を調べるために，時間変動回転の数値シミュレーションを行った。
- 5つのパラメータ（ブレード長さ，風車半径，オーバーラップ，ギャップ，ブレード厚さ）を変更し，その中で最適形状を得た。
- シミュレーション結果の傾向は，定常回転する風車に対する実験結果と定性的に一致した。

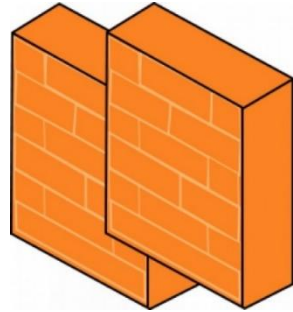
# まとめ

## 今後の研究

風車の効率をより高めることを目指して、  
複数の風車を近接して設置する場合のシミュレーションを行う。

# 中国の諺（ことわざ）

風向きが変わるとき、ある者は塀を建て、ある者は風車を作る  
见风使舵（風向きをみて舵をとる）



Don't be afraid of change!



その意味は、環境が変化した時、違う人は異なる対応の態度があって、ある人は消極的な態度を持って、すべてのチャレンジを外に拒んで、ある人は事態によく適応する。



# Q&A

Q1.

たとえば「Thickness」が厚くなると、風車が重くなって風車が回りにくくなったりするのですか？

A1.

今回のシミュレーションでは、風車の重さは変わらず、風車の形が変わるだけです。

Q2.

非定常の効果は、結果の中にどのように現れますか？

A2.

静止した風車が回転を開始して、徐々に角速度が速くなります。  
風車の形状に合った、一定の角速度で回転を続けます。  
この角速度は、風車の形状によって、異なります。