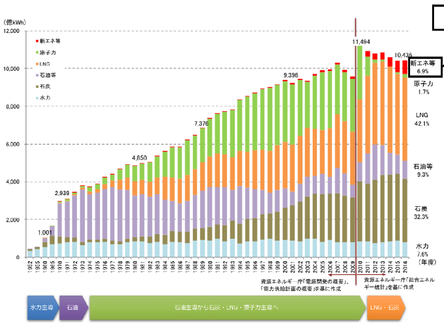
洋上発電への応用を目指した
垂直軸型風車の数値流体力学的研究

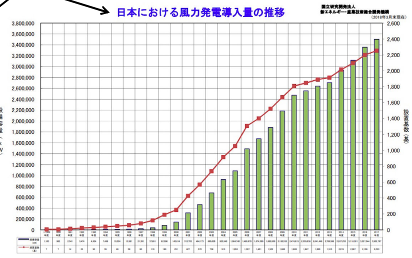
電子情報部門　桑名杏奈

日本のエネルギー・発電の供給量割合

風力が占める割合：約0.5%



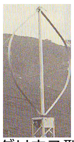
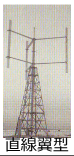
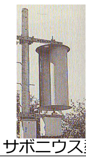
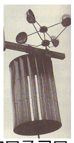
出典：経済産業省エネルギー庁「エネルギー白書2018」



出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

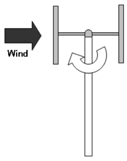
洋上風力発電施設の割合：約1.9%

風車の種類

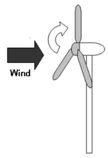
	揚力型	抗力型
垂直軸型	 ダリウス型  直線翼型	 サボニウス型  クロスフロー型
水平軸型	 プロペラ型	 オランダ型  多翼型

高速回転する
→発電用

高いトルクを発生する
→換気・揚水・他の風車の起動用



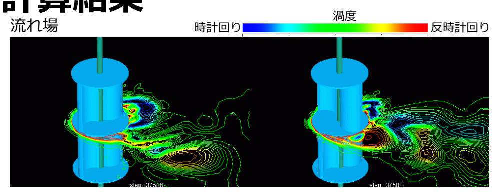
発電機などを
風車下部に置ける
→構造上、安定



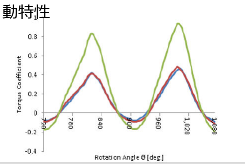
風向きの変化に
追従する必要がある

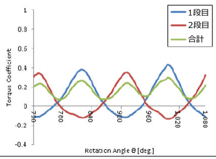
計算結果

流れ場

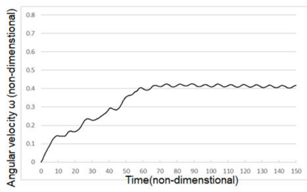


動特性



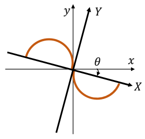


起動特性



計算方法

風車まわりの流体の基礎方程式



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

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

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

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

(X,Y,Z)：風車に合わせて回転する回転座標
(U,V,W)：回転座標上の速度
p：圧力　　t：時間　　ω：風車角速度
Re：風車半径と一様流速に基づいたレイノルズ数（$=10^5$）

計算アルゴリズム（フラクショナル・ステップ法）

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

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

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

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

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

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

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

移流項の差分近似：三次精度上流差分（通称：k-kスキーム）

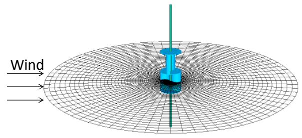
$$f\frac{\partial u}{\partial x}\sim f\frac{-u_{i+2}+8(u_{i+1}-u_{i-1})+u_{i-2}}{12\Delta x}+\frac{|f|\Delta x^3}{12}\frac{u_{i+2}-4u_{i+1}+6u_i-4u_{i-1}+u_{i-2}}{\Delta x^4}$$

風車の運動方程式

$$I\frac{\partial\omega}{\partial t}=N-B$$

I：慣性モーメント（定数）
N：風車が風から受けるトルク（圧力pから計算）
B：風車軸が軸受から受ける抵抗（角速度ωに比例）

計算領域・条件



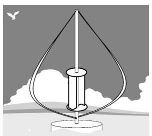
境界条件：
遠方境界：一様流
計算領域上下：自由流出入
風車ブレード上：滑りなし条件

格子数：　周方向72×半径方向60×高さ方向80

検討中1：
風車の最適形状・最適配置

ダリウス・サボニウス型風車

既存製品

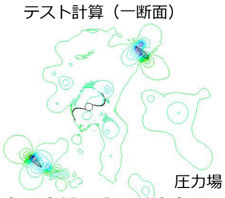


想像図

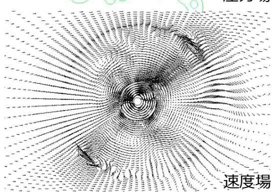
・ダリウス型：高速回転→発電用
　サボニウス型：高トルク→起動用

・風車ブレードの最適形状の検討
・複数風車の最適配置の検討

テスト計算（一断面）



圧力場

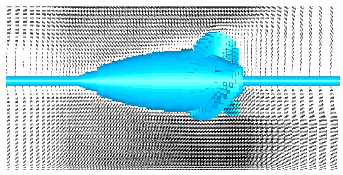


速度場

検討中2：潮流発電

空気密度＜水密度（約1000倍）。天候に左右されにくい。流れの速度・向きが安定している。
→電力源として潜在力が大きい。

写真は割愛



テスト計算

その他：数値計算手法の開発（例：細長い領域に特化した計算手法）

細長い流路内の非圧縮性流れは、河川、血管、トンネルなど、現実に数多く存在するが
数値的に説くのが難しい
・MAC法、FS法など：連続の式を精度よく満たすことが難しい
　（圧力のポアソン方程式を反復法によって収束させることが難しい）
・流れ関数-渦度法：２次元、軸対称流に限られる

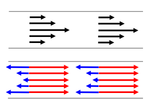
入口から脈動流が流入
$u=1+0.5\sin\omega t$

標準的なMAC法で計算
→ 出口付近の流量が入口付近の流量に比べて小さい
　（連続の式が満たされていない）
　収束させるには、計算コストがかかる

非圧縮性流体の基礎方程式 → 単純化した問題の解＋そこからのずれ　で表す

$$\begin{cases}\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}=0\\[2mm]\dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}=-\dfrac{\partial p}{\partial x}+\dfrac{1}{\mathrm{Re}}\left(\dfrac{\partial^2u}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2u}{\partial y^2}\right)\\[2mm]\dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}=-\dfrac{\partial p}{\partial y}+\dfrac{1}{\mathrm{Re}}\left(\dfrac{\partial^2v}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2v}{\partial y^2}\right)\end{cases}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\tilde{u}}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}=0\\[2mm]\dfrac{\partial\tilde{u}}{\partial t}+(f+\tilde{u})\dfrac{\partial\tilde{u}}{\partial x}+v\dfrac{\partial\tilde{u}}{\partial y}=-\dfrac{\partial\tilde{p}}{\partial x}+\dfrac{1}{\mathrm{Re}}\left(\dfrac{\partial^2\tilde{u}}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2\tilde{u}}{\partial y^2}\right)\\[2mm]\dfrac{\partial v}{\partial t}+(f+\tilde{u})\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}=-\dfrac{\partial\tilde{p}}{\partial y}+\dfrac{1}{\mathrm{Re}}\left(\dfrac{\partial^2v}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2v}{\partial y^2}\right)\end{cases}$$



$$\begin{cases}u=f(t)+\tilde{u}\\p=-f'(t)x+c+\tilde{p}\end{cases}$$

提案手法での計算結果（計算コストは左図と同等）

出口付近まで流量が保たれる