潮流発電装置を複数配置した流場影響評価に関する基礎的研究

渡邊 由香¹・居駒 知樹²・増田 光一³・恵藤 浩朗⁴

¹ 日本大学大学院理工学研究科 海洋建築工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: csuk14003@g.nihon-u.ac.jp

² 正会員 日本大学理工学部教授 海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: ikoma.tomoki@nihon-u.ac.jp

³ 正会員 日本大学理工学部教授 海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: masuda.koichi@nihon-u.ac.jp

⁴ 日本大学理工学部准教授 海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: eto.hiroaki@nihon-u.ac.jp

本研究は、ファンモデルとポーラスメディアを用いて潮流発電装置を簡易的に模擬し、流況について考察した。ポーラスメディアはブレードの回転影響を考慮することができないが、ファンモデルはブレード形状を詳細に定義せずにモデル化でき、さらに回転影響を考慮することができるため、周辺の流場解析に適していると考えられる。ただし、ファンモデルの場合、モデル通過後の流速が増加するためポーラスメディアによるエネルギー減衰を人工的に与えた。

本手法を用いて複数のモデルを配置し、装置間の流況について考察したところ、モデル後方 20D で流入速度の 98 %まで回復することが確認できた。さらに、流入方向に対して垂直に配置した場合には、装置間を 1.5D にすると流入速度と同じになることが確認できた。

Key Words : tidal energy, array, fan model, porous media, CFD

1. 緒言

潮流発電に関する研究は世界の潮流試験サイトで行われており、単体のデバイスにおいては実機サイズを想定して実証試験が行われている。その中でも水平軸型水車による研究開発が主に実施されており、ファーム化の計画がヨーロッパを中心に挙げられる。例えばイギリスのスコットランド西海岸のIslay海峡ではHammerfest Storm社が2003年から2009年にノルウェーで実海域実験で使用された海底設置型3枚翼のプロペラ式潮流発電を10機配置した10 MWのアレイ潮流発電ファームのプロジェクが実施されている¹⁾。その他にもオークニー諸島のPentland Firth海峡では第一段階として86 MW級、第二段階では2020年までに398 MW級の潮流発電ファーム化を目指している²⁾。いずれもAtlantis Resources社が2010年にEMECで実施された後継機モデルを用いたものである。

その他にもフランスの北西部Raz Blanchardで1機あたり1.4 MWを4機配置した総発電量5.6 MW級のパイロットプロジェクトを実施し³⁾、20年間の稼働を目標として

いる。

このように欧州では装置単体の開発だけでなくファーム化計画が数多く進められており、アレイ方法に関する評価法についての研究が報告されている。Myers et al.⁴⁾はアクチュエータディスクを複数用いた水槽実験を実施し、ディスク間の干渉影響とウェーク領域についての検討を行った。また、Malki et al.⁵⁾は3枚翼の水平軸型水車を想定した複数機配置のデバイス間干渉についてBEM-CFD(翼素運動量理論と数値シミュレーション)を用いて評価した。その結果、発電装置の配置間隔を参考にすることができ、さらに複数配置した際の計算に適した手法であることを示した。

日本では欧州に比べ実用規模での開発が行われていないが、潮流エネルギーのポテンシャルが高いとされていることから水平軸型や垂直軸型水車の研究が行われている。いずれもファーム化を考えた場合には装置間隔を把握するためにデバイスの後流状況評価を行う必要がある。そのためには、水平軸型や垂直軸型などの種類に問わず、翼形状を含めた計算格子を再現してロータを回転させる必要がある。しかしながら、数値力学的手法(CFD)

は物体の動きを考慮しながらの流場解析には膨大な計算時間を要することから特に装置を複数配置した流場解析を行うためには、計算対象とするモデル化の工夫が必要となる。

そこで本研究では、ファンモデルとポーラスメディアを用いて水車の簡易モデル化を実施し、本モデルを用いて水車をアレイに配置した際の周辺流場を再現した後流状況評価を実施した。

2. 研究方法

(1) 解析方法

流況の解析には汎用熱流体解析ソフトFLOW-3D Ver.11.0⁶⁾を使用した。これは自由表面解析機能と柔軟でロバスト性が高い移動物体の取り扱いに有するものに使用されている。運動方程式にはNavier-Stokes (N-S)方程式が用いられている。本解析では、流体を一定の温度の非圧縮性流体として扱い、自由表面の追跡手法には気体側の移動特性を自由表面上の境界条件に置き換えるVOF法を用いて解析を実施した。非圧縮性流体に対する流れの基礎式は(1)式と(2)式に示すように質量保存式として連続の式と運動量保存式としてN-S方程式が用いられる。ここで、 u : 流速, t : 時間, ρ : 流体密度, μ : 粘性係数, P : 圧力, G : 加速度である。

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = G - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{3\rho} \nabla(\nabla \cdot u) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u \quad (2)$$

(2) ファンモデル

ファンモデルとは詳細なブレード形状を定義せずに運動量ソースと抵抗を与えることでモデル化できる。このモデルは旋回流速度と軸流速度の両方の成分を生じさせることができるものである。これによりファン周辺の流れを簡便に効率よく計算することが可能となる。

本モデルの特徴として以下の点が挙げられる。

- 幾何形状は、回転軸に対して軸対称形状を想定し、ファンは円筒状の回転領域として定義
- 障害物の体積的な閉塞効果は無視

代表的なファンの性能曲線について図-1に示す。縦軸が圧力、横軸が流量とし、赤い実線がファンの性能曲線、青い破線がCFD計算上での線形近似曲線となる⁶⁾。これは、デバイスを介して発生する圧力低下と平均の流れ速度を示したものである。

回転速度 S_d 、ブレードがもたらす流体運動を制御する適応係数 A_d 、軸流量を制御する B_d のパラメータがファンの特性を決定する。ファンモデルの性能にはブレード

の詳細な形状やサイズ、またはブレード数によって左右されるがそれらを含めて全体的な特性の指標となる図-1に示すような性能曲線を基準に係数を調整する。この性能曲線は、装置全体の厚さにわたる角運動量ソースを等価圧力損失と関連付けて、断面全体にわたって流量を平均化することによって算出したものを(3)式に示す。ここで、 Δp : インペラを横切る圧力差, A_d : 回転速度に対する適応係数, S_d : 回転速度, B_d : 軸流速度の係数, Q : 正味の流量, R : 外半径, r : 内半径である。(3)式の関係から、 y 切片が Δp_0 , x 切片が Q_0 の線形曲線が与えられる。これらの値は(4)式や(5)式のようになり、任意の性能曲線に対する線形近似の性能曲線をモデル化できる。

$$\Delta p = \rho L A_d \left(\frac{2}{3} S_d B_d R \left(1 - \frac{r^3}{R^3} \right) - \frac{Q}{\pi R^2} \right) \quad (3)$$

$$\Delta p_0 = \rho L \left(\frac{Q_0}{\pi R^2} \right) A_d \quad (4)$$

$$Q_0 = \frac{2}{3} \pi (R^3 - r^3) S_d B_d \quad (5)$$

図-1 ファンの性能曲線

ポーラスメディアはブレードの回転影響を考慮することができないがファンモデルの設置により回転影響を考慮できることから周辺の流場解析に適していると考えられる。図-2にファンモデル、図-3にファンモデルとポーラスメディアを設置した後流影響を示す。図-2に示すように、ファンモデルのみの場合、モデル通過後の流速が増加する。この時の流速を 1 m/s とし、回転速度 S_d は 3.3 rad/s 、適応係数 A_d を 2.0 、軸流量係数 B_d を 2.0 、外半径 R および内半径 r をそれぞれ 9.0 m と 1.0 m とした。このことから、図-3に示すようにポーラスメディアを設置することでエネルギー減衰を人工的に与え、さらにモデル前後の圧力差と後流を実際の水車の状況に近づけることとした。これにより水車を簡易的に模擬することができる。

図-2 ファンモデルによる後流影響 (x-z 断面)

図-3 ファンとポーラスメディアによる後流影響 (x-z 断面)

3. 数値計算

(1) ファンモデルとポーラスメディア計算の妥当性

ファンモデルとポーラスメディアを用いた数値計算の妥当性の検討には、単機の水平軸型水車による流場特性の検証を行った。ここでは一様流速場に単機の水車を設置し、流況状況を流体 剛体運動連成計算を実施した。これにより流場をシミュレーションすることで単機の水車が存在する流況を把握した。

本シミュレーションで用いた水車は直径 18 m、ナセル直径 4 m、長さ 11 m、水車密度は 4000 kg/m^3 のものとした。その時の水車モデル概要とその周辺の流速ベクトルを図-4 に示す。また、ファンの直径を 18 m、ポーラスメディアの直径を 20 m とし、多孔度を 0.8 とした。

計算条件は、単機の水車とファンモデル・ポーラスメディアは同様とし、流動モードを 1 流体非圧縮性の粘性流れとした。表-1 に計算条件の詳細を示す。

翼形状を考慮した単体の水車では計算時間が 15 時間以上かかるのに対して、ファンモデルとポーラスメディアを用いることで約 92 % の時間短縮が図れることが確認できた。ただし、単機の水車モデルには機械的な摩擦抵抗を導入しておらずエネルギー損失影響のない、パワーテイクオフを考慮していない状態とする。図-5 には水平軸型水車とファン・ポーラスメディアの流況比較を示

す。ここで、HAMT (Horizontal Axis Marine Turbine) は水平軸型水車を示す。図-5 の単機水車と検討モデルの流況の比較から、ファンとポーラスメディア間で流速が速くなるが、ファン直前とポーラスメディア通過後直後の流速分布はいずれも減少傾向を示し、良好な一致を示している。よって、ファンモデルとポーラスメディアを用いた手法は妥当であるとし、本検討モデルでの実施できることが確認できた。

図-4 水車モデルの概要
(水車周辺の流速ベクトル)

表-1 単機水車と検討モデルの計算条件

パラメータ	単機水車	検討モデル (ファン・ポーラスメディア)
流速 U		1.0 m/s
計測時間 t		900 s
流体の密度 ρ		1000 kg/m^3
長さ L		1000 m
計算領域 幅 B		200 m
深さ h		200 m
x 座標最小側		流速境界
x 座標最大側		圧力境界
z 座標最大側		水面圧力境界
その他		対称境界
モデル直径 D	18 m	18 m・20 m
計算時間	15h 30min	1h 20min

図-5 水平軸型水車とファン・ポーラスメディアの流況比較

(2) ポーラスメディアの設定および流速変化

ポーラスメディアの空隙率はメディア全体の体積で割った値として定義される。図-6 にポーラスメディアの多孔度変化による流況比較を示す。微視的スケールでは空

隙領域内の速度と圧力分布はかなり複雑になるが、巨視的な観点から流れを考慮するのであれば、多孔度の変化による傾向を確認することが可能であると考えられる。この時の流速は 1 m/s とし、多孔度を 0.2 から 0.8 の抵抗係数を 0.001 、ファンモデルの条件は前述したとおり回転速度を 3.3 rad/s とした。ここで、横軸はモデル間をモデル直径で示し、縦軸は自由流速の流速絶対値 U_0 とモデルを配置した場合の流速絶対値 U で無次元化したものである。その結果、多孔度の値が小さいほどポーラスメディア通過後の流速の回復率が遅くなり、さらにファンとメディア間の流速が上昇することが確認できる。これはメディアに流入する透過率が小さくなることで、ファンによって噴出された流量がポーラスメディアが障害となってモデル間では流速が急激に上昇すると考えられる。また、多孔度 0.2 の時のポーラスメディア直後の流速傾向は図-5 に示す単機水車の流速の減少と比較すると近似傾向にあることが確認できる。しかし、本条件では流速の回復が3枚翼の水車モデルに比べ遅く、さらに本研究ではモデルの後流域の流場解析に着目していることから、本モデルでの多孔度は 0.8 が妥当であると考えられる。

ここで、流入速度の変化による流況について図-7 に示す。この時のファンとポーラスメディアの大きさは表-1 に示すとおりである。その結果、流速が 1.0 m/s ではポーラスメディア通過後の流速は $40D$ 付近で流入速度となるのに対し、流速が 2.0 m/s と 3.0 m/s では流速の回復が著しく遅くなることが確認できた。よって、本計算では流速 1.0 m/s を対象とし検討した。

今後はファンとポーラスメディアの大きさによる違いや、ファンの回転速度による流況変化の検討を行う必要がある。

図-6 ポーラスメディアの多孔度変化による流況比較

図-7 流速変化による流況比較

(3) 検討モデルのレイアウト

本研究で実施した検討モデルのレイアウトを図-8 に示す。図-8a)は検討モデルを流入方向に対して水平に配置し、図-8b)は流入方向に対して垂直に配置したものである。そして、図-8c)は前列に2機配置し、後方に1機配置した千鳥配置したものを示す。この時のモデル間距離は水平に配置したもので Δx を $10D$ (D : 直径) から $40D$ とし、垂直に配置したもので Δy を $0.5D$ から $3.0D$ の $0.5D$ 間隔の6ケースとした。さらに、千鳥配置したモデルでは前列の配置間隔 Δx と後方に配置間隔 Δy は図-8a)とb)と同様とした。

計算領域は長さが 1000 m 、幅が 400 m 、深さを 200 m とし、モデルの設置水深を 100 m とした。この時の流体密度は前述したとおり、 1000 kg/m^3 、流速を 1 m/s 、ファンモデルの直径を 18 m 、ポーラスメディアの直径を 20 m とし、多孔度を 0.8 、抵抗係数を 0.001 とした。また、ファンとポーラスメディアの厚みをそれぞれ 6.4 m 、その配置間隔も同様に 6.4 m とし、検討モデルの全体長さとして 19.2 m とした。また、境界条件は表-1 に示したとおりである。

a) 水平配置 (2機)

b) 垂直配置 (2機)

c) 千鳥配置 (3機)

図-8 検討モデルのレイアウト

4. 検討計算結果

(1) 検討モデルの流況

本計算ではモデルの配置影響による流況変化について3つのレイアウトから明らかにした。図-9は図-8a)に示すように流入方向に対して水平にモデル配置した際の後流速度の結果を示す。(2)項に示す図と同様に横軸はモデル間をモデル直径で表記し、縦軸は自由流速の流速絶対値 U_0 とモデルを配置した場合の流速絶対値 U で無次元化したものである。この時の、最前列に配置した水車モデルは0Dの位置とする。モデル間隔を10Dにした場合、流入速度の95%になるのに対して、20D以上離れた場合には98%となる。さらに配置間隔を20Dにした際の2機目以降の後流速度は、55Dで流入速度と同じになることが確認できた。いずれもポーラスメディア通過直前に流速が急激に増加するが、これはファンモデルによる影響のため、後流域の流況把握には無視することとした。

図-10a), b)は図-8b)に示すように流入方向に対して垂直に配置した際の後方20Dの装置間の流速を示す。点線はモデル直径の範囲を示している。装置間が0.5Dから1.5Dの場合、20D後方では装置幅内で流速が回復しないことが確認できた。特に、装置間が0.5Dの場合では装置間の干渉によって最も流速の回復が遅いことが確認できた。そこで、図-8c)に示すように垂直にモデルを2機配置し、後方40Dに1機追加した配置した、計3機の千鳥配置型の後流影響の結果を図-11に示す。その結果、前列に配置した2機の装置間を0.5Dにすると後方40Dでは流入速度の98%になるのに対し、装置間を1.5Dにした場合、流入速度と同じになることが確認できた。

図-9から図-11の結果より、モデルを複数配置する場合には垂直配置の間隔を1.5D以上にし、二列目以降の配置間隔を20D以上に設置することで、流入速度と同じになり、効率の良い配置間隔であると考えられる。今後は3機以上配置した場合の、流況影響を検討する必要がある。

図-9 水平配置モデル2機間の後流速度
(10Dから40D)

a) 0.5Dから2.5D

b) 1.0Dから3.0D

図-10 垂直配置モデル2機間の後流速度

図-11 千鳥配置の後流速度
0.5Dから1.5D

5. 結言

本研究ではファンモデルとポーラスメディアを用いて潮流発電装置を簡易的に模擬し、モデル後流の影響について評価した。その結果、以下のことが確認できた。

- 1) ファンモデルとポーラスメディアを用いた評価は流場を簡易的に評価できる手法であることを示した。
- 2) モデルを流入方向に対して水平に配置した場合、上流側に配置しているモデル直径の10倍(10D)の後方では、流入速度が95%程度になり、20D以上の後方では流入速度の98%まで回復することが確認で

きた。さらにモデル間を 20D にした場合、モデルの 2 機目以降の後方流速は 55D で流入速度となることが確認できた。

- 3) モデルを 3 機千鳥配置にした場合 (3 機目を前列から 40D 後方の位置に設置)、前列の装置間距離を 0.5D にすると後方 40D では流入速度の 98 % になるのに対し、装置間距離を 1.5D にした場合、流入速度と同じになることが確認できた。

謝辞：本研究は、環境省の平成 27 年度潮流発電技術実用化推進事業の一部で実施したことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Scottish Power Renewables (2013) Sound of Islay, http://www.scottishpowerrenewables.com/pages/sound_of_islay.asp (2015.5.)

- 2) International Business Times, "World's Largest Tidal Energy Project To Start Construction Off Scottish Coast This Year", <http://www.ibtimes.com/worlds-largest-tidal-energy-project-start-construction-scottish-coast-year-1668098> (2015.5.)
- 3) ALSTOM "Alstom chosen to equip pilot tidal farm at raz Blanchard in France", <http://www.alstom.com/press-centre/2014/12/alstom-chosen-to-equip-pilot-tidal-farm-at-raz-blanchard-in-france/> (2015.6.)
- 4) L.E. Myers and A.S. Bahaj : An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy convertor arrays, *Renewable Energy* 37, Elsevier, pp.28-36, 2012.
- 5) Rami Malki, Ian Masters, Alison J. Williams and T. Nick Croft : Planning tidal stream turbine array layouts using a coupled blade element momentum – computational fluid dynamics model, *Renewable Energy* 63, Elsevier, pp.46-54, 2014.
- 6) FLOW-3D , Ver.11.0, Flow Science Co. Ltd. (2016.2.4 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY OF CURRENT FIELD INFLUENCE WITH MULTIPLE TIDAL TURBINES

Yuka WATANABE, Tomoki IKOMA, Koichi MASUDA and Hiroaki ETO

This paper discusses the flow field to simulate the tidal power generation device using the fan model and porous media. The porous media is not take into account of the rotation effect of the blades. However, the fan model can be modeled without defining a blade shape in detail and it is possible to further consider the rotation effect. Due to the effect, it is suitable for the surrounding flow analysis. Nevertheless, the flow rate increases artificially in the case of using fan model, so that porous media is used to attenuate energy after passing fan model flow. As a result, around 98% of inlet velocity recovered in 20D downstream placing longitudinally space. For laterally space, 1.5D distance between models achieved inlet velocity at 20D downstream.