

## 進化計算に基づく海流発電タービンの最適配置

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 正会員 竿本 英貴  
同上 正会員 片桐 淳

### 1. 目的

海流発電を効果的に行うためには、(1) 海域の選定、(2) タービン性能の向上、(3) タービンの配置様式、などに対する検討が必要である。本研究は、(3) で挙げたタービンの配置様式について検討したものであり、海流からパワーを効率的に取得するためのタービンの最適配置を、GA などの進化計算手法に基づいて求めようとするものである。

### 2. 海流の解析方法とタービンの表現方法

海流の支配方程式として、次式で表される定常非線形浅水長波方程式を考える。

$$\nabla \cdot (H\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -g\nabla\eta + \nabla \cdot \bar{\nu}\nabla\mathbf{u} - \frac{c_b + c_t}{H}\|\mathbf{u}\|\mathbf{u} + \mathbf{f}_u \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$  は流速ベクトル、 $H$  は静止時の水深  $h$  に静止時水面からの変動量  $\eta$  (流れによって引き起こされる) を加えたもの ( $H = \eta + h$ )、 $g$  は重力加速度 ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )、 $\bar{\nu}$  は、水平方向の渦動粘性係数の水深方向平均値 (定数)、 $\mathbf{f}_u$  は、海底の勾配に起因する項 (今回は海底の勾配は考慮しないので零ベクトル) である。また、 $c_b$  は、海底との摩擦を表すパラメータ (定数)、 $c_t$  は、タービンが存在することによって付与される摩擦を表すパラメータ (位置座標の関数) である。なお、 $\mathbf{u}$ 、 $\eta$ 、 $c_t$  の各変数は、位置座標  $(x, y)$  を引数とする関数であることに留意されたい。 $c_t$  は、タービンが占める領域内での摩擦係数を高くすることによってタービンが存在していることを表現しようとするものであり、本研究では、Funke ら<sup>1)</sup> に倣って、 $c_t$  を次のように定義した。

$$c_t = c_t(x, y; \mathbf{m}) := \sum_{i=1}^{N_t} C_i(x, y; \mathbf{m}) \quad (3)$$

ここで、 $N_t$  はタービンの基数、 $C_i(x, y; \mathbf{m})$  はタービン  $i$  が存在することで付与される摩擦係数の分布を示す関数である。また、 $\mathbf{m}$  は関数のパラメータ (設計変数) であり、本研究ではタービンの位置座標 ( $N_t$  基分) を格納した数ベクトルとなる (要素数:  $2N_t$ )。すなわち、 $\mathbf{m} := \{x_{t1}, y_{t1}, x_{t2}, y_{t2}, \dots, x_{N_t}, y_{N_t}\}$ 。ここで、 $x_{ti}$  と  $y_{ti}$  は、タービン  $i$  の  $x$  座標値と  $y$  座標値をそれぞれ示している。また、 $C_i(x, y; \mathbf{m})$  は、次に示す 2 変数のベル型関数として設定される<sup>1)</sup>。

$$C_i(x, y; \mathbf{m}) := K_i \psi_{x_{ti}, r}(x) \psi_{y_{ti}, r}(y) \quad (4)$$

ただし、

$$\psi_{p,r}(x) := \begin{cases} \exp(1 - 1/(1 - \|\frac{x-p}{r}\|^2)) & \text{for } \|\frac{x-p}{r}\| < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

本研究では、Funke ら<sup>1)</sup> に倣って、タービンの直径を  $20.0 \text{ m}$  ( $r = 10.0 \text{ m}$ )、タービンの摩擦の大きさに関するパラメータ  $K$  を  $21.0$  と設定する。式 (1) と式 (2) の求解には、オープンソースの有限要素法ライブラリ OpenTidalFarm<sup>2)</sup> を用いた。

### 3. 問題設定と解析結果

タービンの最適配置に対する問題設定を図-1 に示す。海流はモデル左端 (流入速度  $2.0 \text{ m/s}$ ) から右端に向けて流れており、途中、図中の黒枠線内のタービン設置領域 (32 基設置) を通過する。タービン配置に対する評価は、タービンから取得された総パワー  $J$  (単位はワット) ( $J = \int_{\Omega} \rho c_t \|\mathbf{u}\|^3 d\Omega$ ,  $\Omega$  は解析領域全体を示す) が

キーワード: 海流発電, タービン, 最適配置, 進化計算

連絡先: 〒 305-8567 茨城県 つくば市東 1-1-1 中央第 7, E-mail: h-saomoto@aist.go.jp

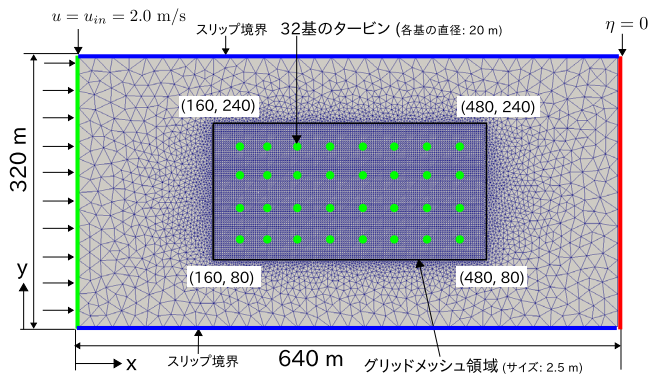


表-1 Parameters for forward analysis

parameter	value
$c_b$	0.0025 [-]
$h$	50.0 [m]
$\bar{v}$	3.0 [m <sup>2</sup> /s]

図-1 Problem setting and finite element mesh

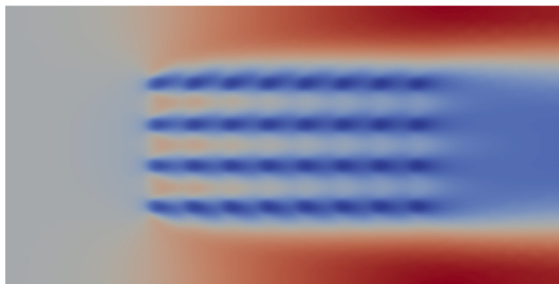


図-2 Regular arrangement ( $J = 55.7$  MW)

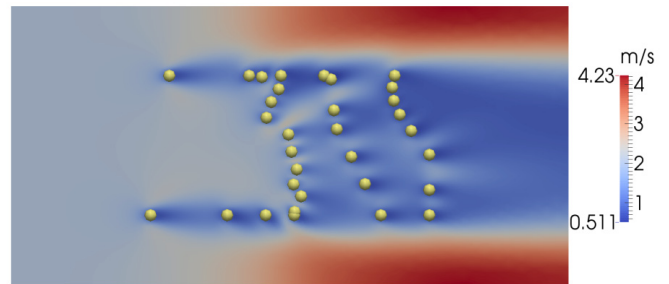


図-3 Optimal arrangement obtained from GA ( $J = 106.0$  MW)

大きいほど高い．なお，順解析に用いたパラメータは表-1のとおりである．進化計算手法として，ここでは遺伝的アルゴリズム (以下 GA) を用いた<sup>3),4)</sup>．交叉率は 1.0，交叉法は 1 点交叉，突然変異率 1.0%，親個体の選定法はルーレット選択，1 世代あたりの個体数は 50，計算世代数は 100 とした．

図-2 は，格子状 (4 行 8 列) にタービンを配置した場合の流速分布 (大きさ) を示している．このケースでは，取得されたパワーは，55.7 MW であった．上流側のタービンを通することで減速された流体が次のラインのタービンに流入するということを繰り返すため，効率的にパワーを取得することができない．一方，GA に基づいて得られた最適配置は図-3 に示すとおりであり，この配置から取得されたパワーは 106 MW である．この数値は格子配列の約 1.9 倍であり，極めて効率的であると言える．カタカナの「コ」の字状の配置が特徴的であるが，これは流れをまず中央部に集約し，集約した領域に多くのタービンを効率的に配置する構造となっているものと推察できる．

#### 4. まとめと今後の展望

GA を用いて海流発電タービンの最適配置を求め，その特徴を考察した．結果，規則的な配置に比べて最適配置は約 2 倍の性能を発揮しており，タービンの配置様式についても十分に検討すべきであることを示した．なお，1 世代あたりの個体数や計算世代数をより大きくした場合には，より高い性能を発揮する配置が探索できる可能性があることを付記しておく．

今後は GA のみならず，Particle Swarm Optimization (PSO) など，GA と並んで高い成功を収めている進化計算手法との比較・検討を行い，より効率的に海流からパワーを取得できるタービン配置を探索する．また，タービンの個数や流入速度の境界条件を変更し，最適配置がどのように変化するかを考察する予定である．

#### 参考文献

- 1) Funke, S.W., Farrell, P.E., Piggott, M.D.: Tidal turbine array optimisation using the adjoint approach, *Renewable Energy*, Vol.63, pp.658-673, 2014.
- 2) OpenTidalFarm のウェブサイト: <http://opentidalfarm.readthedocs.org/en/latest/> (2015 年 3 月 5 日閲覧)
- 3) Holland, J.H.: *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, 1975.
- 4) Perone, C.S.: *Pyevolve documentation 0.6r1*, 2010.