

潮流タービンにより流れ場に与えられる外力の計算法

Method to calculate an axial force from a tidal turbine

北海道大学工学部 ○学生会員 広田知也(Tomoya Hirota)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 猿渡亜由未(Ayumi Saruwatari)
 函館工業高等専門学校 正員 宮武誠(Makoto Miyatake)

1. はじめに

環境に優しいグリーンなエネルギー源として潮流や海流、波浪等の海洋再生可能エネルギーを利用して発電を行う為の研究、開発が進められている。中でも潮流発電はエネルギーポテンシャルの把握と将来予測が比較的容易な為、実用化に近い所まで研究が進んでいる装置やサイトが存在する。例えば北アイルランドの Sea Gen やフランスの Tidal Energy 社による潮流発電装置等が有名である。津軽海峡や関門海峡を始めとし各地で現地実験や調査が行われている。2013年3月に北海道が行った現地調査によると函館沖における流れを利用して発電が行える可能性があることが明らかになった。

潮流発電デバイスを設置するとその下流に後流が発生し、周囲の物理的環境が変化する。風車や水車の後流による流れ場の変化について調査した既往研究は数多くあるが、数値計算的手法を取るものの場合タービンプレードを十分に解像する計算条件で後流の構造を詳細に調べるものから、タービンの影響をマクロにモデル化して現地スケールの影響評価に利用するものまである。本研究は後者のマクロモデル的手法を用いて、津軽海峡に潮流デバイスを設置した場合の流れ場への物理的影響を調べ為の方法を提案するものである。

2. 計算法

2-1 海洋流れモデル

本研究ではマサチューセッツ工科大学によって開発された非静力学三次元流れモデル、MIT General Circulation Model (MITgcm, e.g. Marshall et al., 1997a, 1997b) を用いて津軽海峡内の流れを計算した。本モデルは圧縮性流体の Navier-Stokes 式を有限体積法により解くものであり、外力として重力、粘性力、コリオリ力等が考慮される。本研究ではこれらに加え潮流タービンにより流れに作用する抵抗力を外力として与える事によりタービンによる流れエネルギーの減衰を考慮する。

2-2 タービンにより流れに作用する力

タービンによる外力は風車背後の流れを解く為に用いられ、近年潮流タービン周辺の流れ場の計算の際にもしばしば用いられる Stream tube model と Blade element method を組み合わせた方法により決定する。流れの中のタービンを、ある抵抗を有するディスクとしてモデル化するとするとき、タービンを通過する一様流の流線は図1の様に表せる。タービンから十分離れた上流側に断面1、下流側に断面4、タービンの直前、直後にそれぞれ断面2, 3を定義する。ここでそれぞれの断面における流速

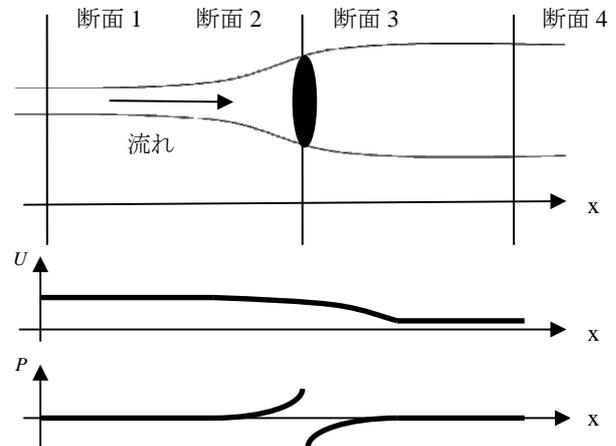


図1 Stream tube model

及び圧力を V_i, P_i ($i = 1, 2, 3, 4$) と定義する。

断面1~2, 断面3~4間では次式に示されるエネルギー保存則が成立する。

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$

$$\frac{P_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} = \frac{P_4}{\rho} + \frac{V_4^2}{2} \dots (1)$$

ここで $V_2 = V_3, P_1 = P_4$ であると仮定すると、上式は次の様に整理される。

$$P_2 - P_3 = \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_4^2) \dots (2)$$

一方、ディスク上の微小領域 dA に生じる x 方向の力 dF_x は断面2-3間の圧力差により決定される為、(2)式を用いて次のように表わされる。

$$dF_x = (P_2 - P_3)dA$$

$$= \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_4^2)dA \dots (3)$$

また、断面2-3間の運動量の釣り合いは次の関係式を導く。

$$F_x \Delta t = \dot{m} \Delta t V_1 - \dot{m} \Delta t V_4 \dots (4)$$

ここで $\dot{m} = \rho A V_2$ はディスク位置における質量フラックスである。(2)(3)式より dF_x について次式の様に整理される。

$$dF_x = \frac{\rho}{2} V_1^2 \{4a(1-a)\} 2\pi r dr \dots (5)$$

r はディスクの半径方向の座標であり、 $a = (V_1 - V_2)/V_1 \dots (6)$

はタービンによる流速の減衰率である。

次に、タービンブレードに生じる揚力、抗力の関数から a を決定する。図2のタービンブレードに生じる揚力、抗力の関数から複数のプロペラにより構成される潮流タービンを考える。流速 V_2 が作用する時のタービンの角速度が Ω となる時、ブレードに対する流れの接線方向流速 U_t は次の様に表される。

$$U_t = \Omega r + \frac{1}{2} \omega r$$

$$= \Omega r(1+a') \dots (7)$$

ここで ω はタービンの後流の角速度、 r はタービン中央を原点とする半径方向の座標軸である。 $a' = \omega/2\Omega$ Angular induction factor である。また (6) 式より法線方向相対流速は $V_2 = V_1(1-a)$ となる。即ち回転するブレードに追従する座標系において、ブレードへの流れの入射角 β は

$$\tan \beta = \frac{\Omega r(1+a')}{V_1(1-a)}$$

$$= \lambda_r \frac{1+a'}{1-a} \dots (8)$$

と表される。ここで $\lambda_r = \Omega r / V_1$ は局所 Tip Speed Ratio である。更にこの時ブレードに入射する相対流速 W は次式により表わされる。

$$W = \frac{V_1(1-a)}{\cos \beta} \dots (9)$$

W を用いてブレード上の微小要素に生じる揚力 L と抗力 D は次式の様を求める事ができる。

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \dots (10)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \dots (11)$$

ここで C_L 、 C_D はそれぞれ揚力、抗力係数、 c はブレードのコード長である。 L と D の合力 dF をタービンの回転方向 θ と軸方向 x に分解する事により、 θ 、 x 方向に生じる力 dF_θ 、 dF_x を次式のように求める事ができる。

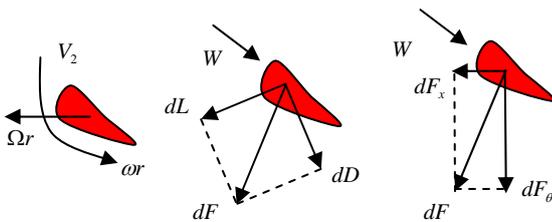


図2: 翼型プロペラ断面を通過する流速とそれにより生じる揚力と抗力

$$dF_\theta = \frac{B}{2} \rho W^2 (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) c dr \dots (12)$$

$$dF_x = \frac{B}{2} \rho W^2 (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) \dots (13)$$

上式は前出の (3) (5) 式と同じ力を表し、これら4式を連立させて解くことにより a 、 a' を次の様に決定できる。

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma' (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta)}{4Q \cos^2 \beta} \dots (14)$$

$$\frac{a'}{1-a} = \frac{\sigma' (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta)}{4Q \lambda_r \cos^2 \beta} \dots (15)$$

本研究では以上のように求めた F_x をタービンによる流れへの外力項として与える。

2-3 計算条件

表1と図1に MITgcm の計算領域と諸条件を示した。

本研究で用いた計算領域及び諸条件を図3及び表1に示す緯度経度方向の計算解像度は 45sec×45sec (約 1.4km×1.0km)、鉛直方向のグリッドは水面に近づく程細かく 1.0-200m 間隔で水平に分割した。水深データは Gebco(解像度:30sec)によって与え、潮流速の境界条件は TPXO tidal solution 7.2 (Egbert・Rofeewa, 2002) のオホーツク、日本海上の局所解 (解像度 1/30°) から主要 8 分潮分 (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1) を補間して与えた。計算期間は 2013 年 3 月 15 日 0:00 から 2013 年 4 月 19 日 0:00 (UTC) までの 35 日間とした。初期条件は静水状態としており、計算開始からの 48 時間は流れ場を安定させる為の助走計算期間とした。

表1 計算領域と諸領域

Domain	E139.60° -E141.80° N40.70° -N42.25°
Grid number	177×125×60(lon×lat×vert)
Grid interval	45"×45"(lon×lat), 1~200m(vert)
Timestep	10sec

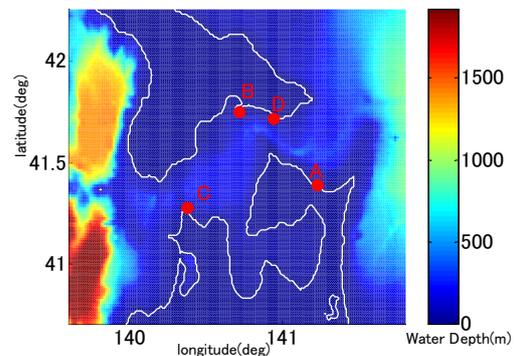


図3: 計算領域

3. 検証

3-1 水位変動の検証

計算結果の再現性を確認する為に、図-3 に示す A~C の3点(下北, 函館, 竜飛)において気象庁が公開する実測潮位及び天文潮位と本研究の計算結果とを比較した。図-4 にそれぞれの時間変化を示すが計算期間中の潮位変動を概ね再現していることを確認した。函館における実測値については t=24 日前後に顕著な水位上昇は低気圧の通過によるものであるが、本研究では海面上の気圧変化や風によるシアによる影響を考慮していない為これは再現していない。

3-2 流速の再現性

流速の再現性を確認するために北海道が函館沖で観測した流れの速度と本研究の計算結果を比較した。観測地点は図-3 に示す点 D (北緯 41 度 43 分 1.9 秒, 東経 140 度 56 分 30.7 秒)である。津軽海峡内の流れ場は同オーダーの流速の潮流と海流が共存する合成流速場であり本来は海流による作用を考慮して流れ場を求めるべきであるが前述したように本研究ではそのうち潮流成分のみを計算

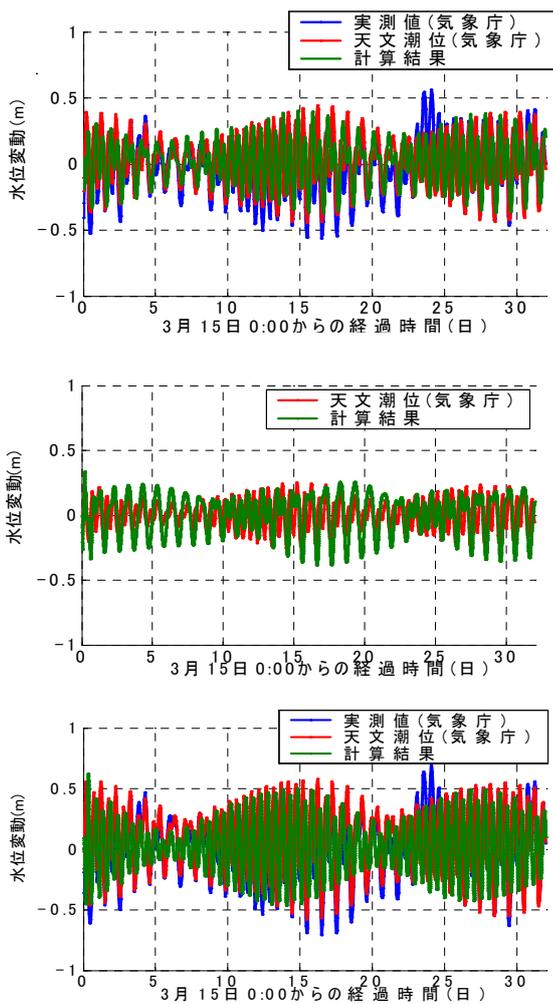


図 4: 函館, 下北, 竜飛における MITgcm の計算結果と気象庁の実測値及び観測値の比較

している。そこで現地観測結果の 25 時間移動平均流速を本研究で求めた潮流流速に足してやる事により仮想的に潮流成分以外の流れ成分を考慮した。それらの比較を図-5 に示す。計算結果は観測結果よりもピーク流速がやや過大評価になっているが、これは主にグリッド解像度が粗いことに起因するものと考えられる。

4. タービンにより流れに作用する力の検証

2 章で提案した計算法により種々の条件のタービンにより流れに作用する力の試算を行った。与えたタービンの条件は、ブレード数 $B=10$, その他のタービンの条件は、ブレード数=10, Tip Speed Ratio $\lambda=5$, コード長 $c=0.3m$, twist angle $\gamma=80^\circ$ であり、タービン半径 R は 2.5, 5.0, 8.0m の3 ケースとした。これらのタービンを流速 1.0m/s の地点に設置した際のディスク面上に生じる軸方向力の密度の分布を図 6 に示す。この時のディスク全面から流体に掛かる力の積分値はそれぞれ $4.2265 \times 10^4 N$, $2.0313 \times 10^5 N$, $5.5841 \times 10^5 N$ となった。

5. 流れモデルへの適用結果

2 節で提案した潮流タービンによる抵抗力の計算法のテストの為に、流れモデル MITgcm の外力項に F_x を加え流れ場を計算した。設置したタービンの条件は図(3)と同一であり、図 2 に示す点 D の海底面から 10m 情報にタービンの軸が来る様設置すると仮定した。図は計算極初期のタービンの軸と同じ鉛直レベルにおける流速場の時間変化を表す。また図は図に対応する位相におけるタ

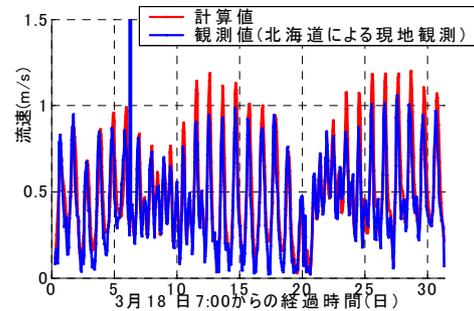


図 5: 汐首岬における MITgcm の計算結果と北海道が行なった観測結果の比較

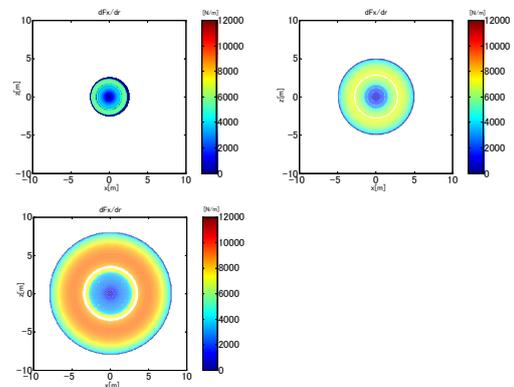


図 6: 3 種類のタービンによって流れに生じる力の密度

ービンによる抵抗力を加えた事により現れた流速差を表す。図が示す様にこれらの位相においては 1m/s 程度の西向きの流れが形成されている。初期の位相からタービンの背後に流速の低下が確認される($t=1.0h$)。その後タービンの上流側にもその流速の低下が広がっていくと共に ($t>2.2h$)、タービン側方にはタービンを避けた流れが集中する事による流速の増加が見られるという典型的な流れ場が形成された。 $(t>2.7h)$

6. おわりに

本研究では潮流タービンによる流速場への抵抗力を計算する方法を提案すると共に、本方法を領域スケールの流れモデルに適用する事により潮流タービンを実地形に設置した際の周囲の流れの変化を求めた。その結果タービン設置点付近には典型的な後流パターンが形成される事を確認した。今後タービン設置による影響範囲等を定量的に評価する為にはより現実的なタービン条件を設定する事により更なる検討を加える必要がある。

(参考文献)

- (1) A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey,: A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. J. Geophys. Res., 102(C3), 5753-5766, 1997a
- (2)C. Hill, L. Perelman, and A. Adcroft, : Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. J. Geophys. Res., 102 (C3), 5733-5752., 1997b
- (3)Egbert & Erofeeva: Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. J. Atmos. Oceanic Technol., 19, pp183-204. ,2002

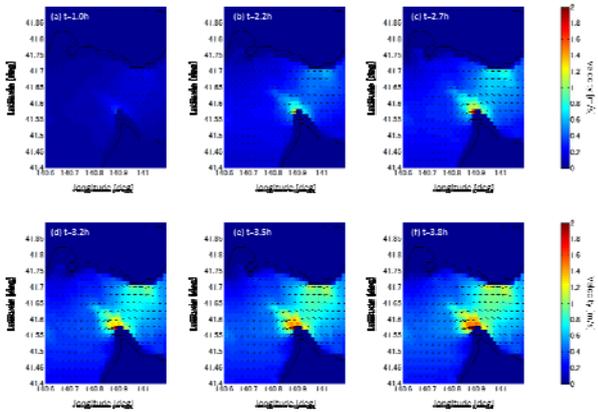


図7 静水面下 28.9m の水平面における水平面における計算開始直後の津軽海峡東部の流速場

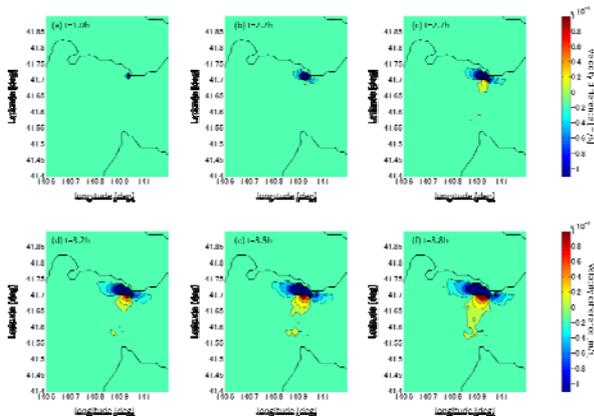


図8 図7に対応する位相、平面上における潮流タービンを設置した事により現れる流速差