

## 海流・潮流発電による後流攪拌が及ぼす影響に関する基礎的研究

### A research on how the wake stirring by the ocean current generation impacts on surrounding waters

学籍番号 096650 渋谷 直樹  
指導教員 山口 一 教授

(平成 23 年 3 月 24 日修了予定)

Keywords: 潮流発電, 乱流, 海洋モデル, 後流

Keywords: ocean current generation, turbulence, Ocean Model, wake

## 1. 序論

### 1.1 背景

IPCC 第 4 次報告書によると、気候システムの温暖化には疑う余地がないと言える。地球温暖化の原因は人為起源の温室効果ガス濃度の増加によってもたらされた可能性が非常に高い。特に CO<sub>2</sub> は最も重要な人為起源の温室効果ガスである。温暖化を防止するために、CO<sub>2</sub> の排出量を削減することは世界的な急務となっている。一方で、世界で使用される一次エネルギーは増加し続けている。その中で化石燃料はエネルギー消費の 8 割以上を占めている。また化石燃料の可採年数は限りがあり、現状の使用量を維持すると石油は今世紀の間に枯渇することになる。今後、化石燃料を使用しないエネルギー源へとシフトしていく必要がある。

### 1.2 海流・潮流発電

そのような中、注目されているのが海流・潮流発電である。海流・潮流発電とは、海中に設置した発電装置で海流を受けてタービンを回し、海洋エネルギーから直接エネルギーを取り出すもので、CO<sub>2</sub> を排出しないクリーンな新エネルギーの一種である。装置全体のシステムは風力発電とほぼ同一であるが、流体密度が高いためエネルギー密度が高い、出力変動が少ないもしくは予測可能な点で、風力発電よりも優れていると考えられている。

### 1.3 本研究関連プロジェクト

本研究は「日本沿岸域に適した低コスト潮流発電システムの開発」の一角をなすものである。日本では、現在は設計手法が確立されていない海流・潮流発電において、低コストでスケラブルな海流・潮流発電のプロトタイプシステムの開発が進められている。本研究の実験で使うタービンはこの研究で設計・製作されたものを使用した。Fig.1 にプロジェクトの概要図を示す。このプロジェクトの中で、本研究は海流・潮流発電プラントを設置したときの環境影響評価につながる基礎研究を行う。考えられる影響の 1 つとして、海洋の成層が強くて生物生産が貧しい海域で、タービンプレードの攪拌により海洋が混合され、一次生産が増加する可能性がある。これは風力発電では起こりえないメリットである。本研究ではタービンプレードの回転による効果について考察し、これを海洋物理モデルの中に組み込むことを目的とする。本研究で得られた海洋物理モデルに生態系モデルを結合させることで、生態系への影響評価につながる。

## 2. 手法

研究手法は翼数 2 枚、最大  $C_p=0.40$  の翼型のタービン模型を用いて、タービン後流の流速分布を計測し、その計測結果をもとに実海域スケールでの数値計算を行うというものである。実験ではタービン後流の流速分布(軸方向流速分布、鉛直方向流速分布)と

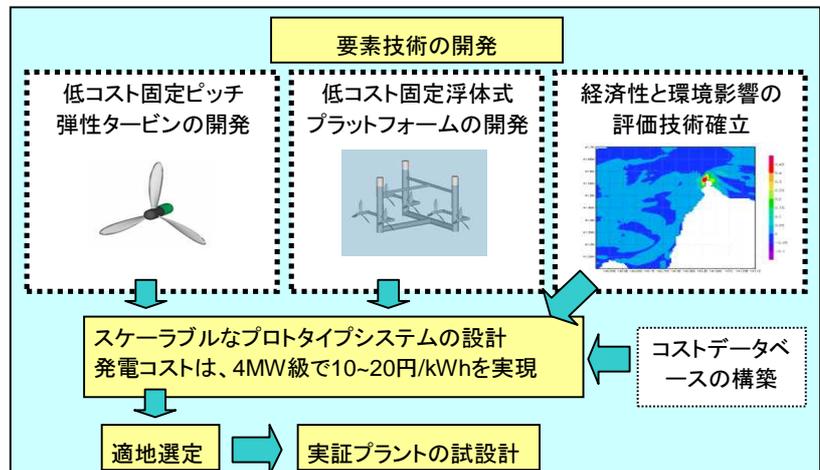


Fig1. overview of Development of low cost tidal and sea current generator system suitable for the sea around Japan[1]

流速の時間変化を測定する。数値計算には MEC モデル(Marine Environmental Committee Model)を用いる。MEC モデルは小スケールから大スケールまでを連続的に解析できる海洋の物理モデルである。本研究ではこのモデルを用いて、実海域スケールの数値計算を行う。

MEC モデルではタービン近傍場の流れを直接での数値計算することはできない。そこで、タービンを含んだものと等価な格子を考案し、それを MEC モデルに組み込むことにする。タービンによる影響は「せき

とめ」と「旋回流」と「乱流拡散」の3つだとし、せきとめと旋回流は流速を、乱流拡散は渦粘性係数を変化させることにより、与えることにする。

### 3. 実験

タービン後流の流速分布を計測するための実験を行う。東京大学舶用プロペラキャビテーションタンネルのプロペラ用試験部を用い、計測には LDV 計測装置を使用した。実験条件を Table1 に、実験で使うタービン模型のパワーカーブを Fig.2 に示す。実験ではこのパワーカーブの大小 3 点の周速比に応じたスラスト係数を用い、計測した。Table.2 に各流速におけるスラスト係数、トルク係数、パワー係数をまとめる。

#### 3.1 本章で使われる記号

- u:流れ方向の流速 (m/s)
- U:一様流中の流れ方向の流速 (m/s)
- r:タービン中心からの距離 (m)
- R:タービン半径 (m)
- D:タービン直径 (m)

#### 3.2 実験結果

実験結果を以下に示す。Fig.3 は各流速での軸方向流速分布、Fig.4 はタービン下流 0.5D の断面の鉛直流速分布、Fig.5 はあるポイントでの流速の時系列データである。

まず軸方向流速分布だが、タービン後流で流速が減速しているのが分かる。流速 U が大きいほど、抗力係数  $C_D(=F/0.5\rho U^2 A)$  は小さくなるので、流速の減少分が少なくなっている。

次に鉛直流速分布については、周方向成分と拡散成分のうち、主に周方向成分の流速が観測された。中心から離れるにつれて流速が減少しているが、これは角運動量理論と一致している。

次に時系列データだが、Fig.5 を見ると周期的な変動があり、タービンブレードの回転の影響を強く受けているのが分かる。Fig.6 に Fig.5 のデータをフーリエ変換した図を示す。実験はタービンの回転数が 16rps、ブレードが 2 枚なので、周波数 32Hz になるが、フーリエ変換すると確かに 32Hz とその倍数である 64Hz の部分にピークが見られた。

Table 1 measurement condition

タービン半径	125mm
回転数	16rps
流速	2.0、2.8、4.2 m/s
流層信号 サンプリングタイム	1 ms
計測位置	タービン下流 0.5D、1.2D ※
計測データ	軸方向流速分布 鉛直流速分布 時系列データ

※D:タービンの直径

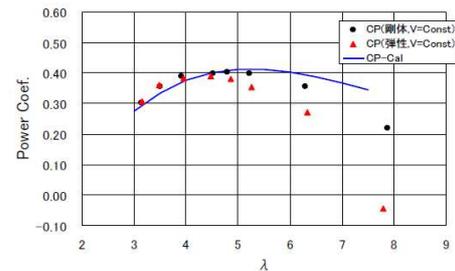


Fig.2 Power Coefficient along tip speed ratio

Table.2  $K_T$  and  $K_Q$  and  $C_p$  at each velocity

流速 (m/s)	スラスト係数 $K_T$	トルク係数 $K_Q$	パワー係数 $C_p$
2	0.10	0.003	0.20
2.8	0.17	0.007	0.31
4.2	0.32	0.018	0.26

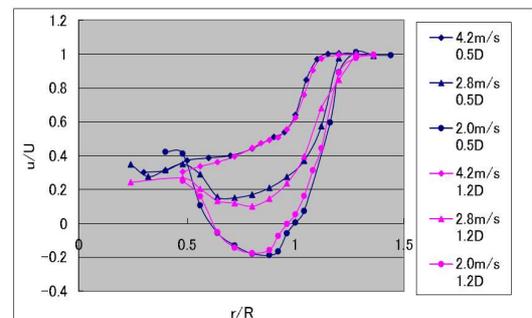


Fig.3 Axial flow velocity distribution along radial direction

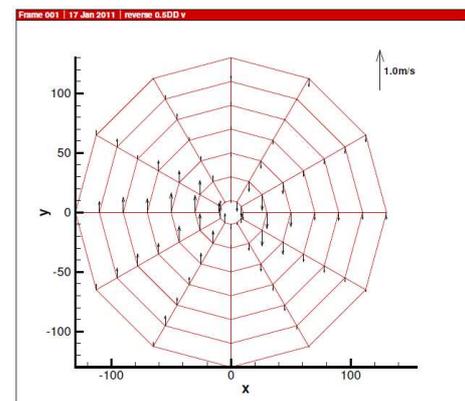


Fig.4 vertical velocity distribution at x=0.5D

### 3.3 渦粘性係数の算出

タービンによる乱流拡散の効果を渦粘性係数で与えるために、実験結果から渦粘性係数を算出する必要がある。タービン近傍場の渦粘性係数の算出の理論は確立していないため、いくつかの仮定をすることで求めることとする。まず乱れ度  $u'$  を以下の式(1)によって求める。Fig.7 に乱れ度  $u'$  のグラフを示す。

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{U} = \frac{1}{T} \frac{\int_0^T (u - \bar{u}) dt}{U} \quad (1)$$

乱流変動エネルギー  $k$  は

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (2)$$

であるが、等方性の仮定  $u'^2 = v'^2 = w'^2$  より、下式で表すことができる。

$$k = \frac{3}{2}u'^2 \quad (3)$$

乱流モデルの一方程式モデルによると、渦粘性係数  $\nu_t$  は

$$\nu_t = c\sqrt{kl} \quad (4)$$

(ただし  $c$  : 経験常数 (=0.09)、 $l$  : 混合距離)

この混合距離  $l$  は物体から遠く離れた後流(far wake)において、

$$l = \beta b_{1/2} \quad (5)$$

(ただし、 $\beta = 0.41$ 、 $b_{1/2}$  : 半値幅)

これらの仮定を用いると

$$\nu_t = c\sqrt{\frac{3}{2}u'^2\beta b_{1/2}} \quad (6)$$

となり、渦拡散係数  $\nu_t$  が算出できる。

## 4. 実海域スケールでの数値計算

本研究では実海域スケールの数値計算を前述の MEC モデルを用いて行う。

### 4.1 計算条件

計算格子の全体図を Fig.8 に、計算格子のパラメータを table.3 に示す。この計算格子の  $x=0$  m の面に 1.0 m/s の流速をいれ、全体が一様流になるようにする。

### 4.2 タービンと等価な格子の組み込み

タービンによる影響をせきとめ・旋回流・乱流拡散の3つとし、それぞれ  $x$  方向の流速・ $y$  方向、 $z$  方向の流速・渦粘性係数として、各格子に入力する。せきとめについては、運動量理論よりタービン上流と下流の平均値がタービンを通過するときの速度になることが知られているので、タービン上流の一様流とタービン下流の流速分布の平均を取り、それを  $x$  方向の流速として入れる。次に旋回流は運動量理論と角運動量理論により算出し、旋回流の鉛直成分を  $z$  方向の流速に、水平成分を  $y$  方向の流速にそれぞれ入力する。最後に渦粘性係数であるが、Fig.7 のデータを用いる。0.5D、1.2D の各断面のデータの平均値を取り、0.5D、

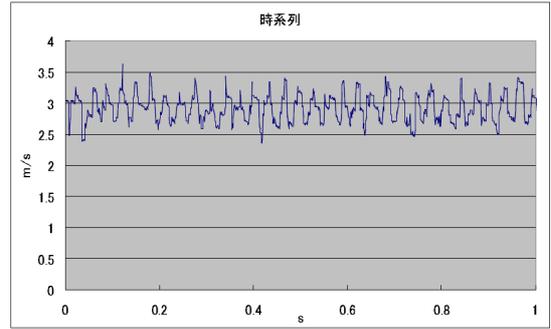


Fig.5 time series of velocity at  $x=0.5D, r=1.28R, \theta = 60^\circ$

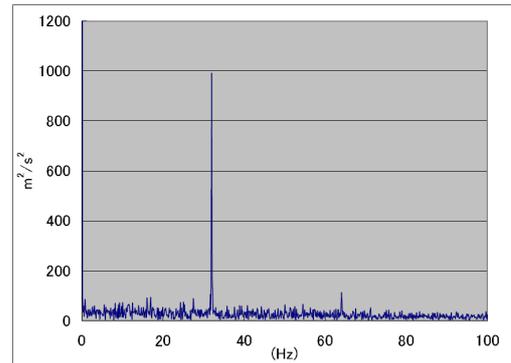


Fig.6 power spectrum obtained by means of Fast Fourier Transformation at  $x=0.5D, r=1.28R, \theta = 60^\circ$

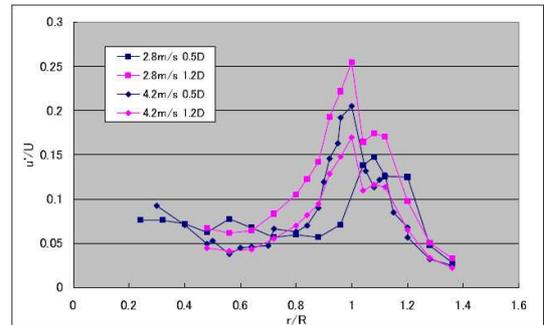


Fig.7 turbulence level along radial direction

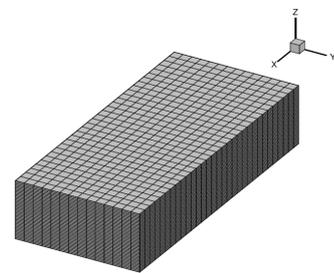


Fig.8 computational grid

Table.3 parameters of the computational grid

格子幅	(x,y,z)=(6m,6m,1m)
格子数	(x,y,z)=(30,13,40)
計算領域	(x,y,z)=(180m,78m,40m)

1.2D の 2 断面の平均値を線形補間することによって、各断面の渦粘性係数の値を求める。そして中心から遠くなるに従って減少するように、各格子に入力する。タービンの組み込みに関してまとめたものを Fig.9 に示す。

### 4.3 計算結果

計算条件を Table.4 に示す。成層状態を表す無次元数であるリチャードソン数の変化の比較をした。リチャードソン数が 1.61 の場合と 3.15 の場合の変化の様子をそれぞれ Fig.10、Fig.11 にそれぞれ示す。

結果を見ると、リチャードソン数が高いときほど後流での減少率は小さく、リチャードソン数が小さいほどリチャードソン数の減少率が大きくなっている。つまり成層が強い海域ほど混ざりにくく、弱い海域ほど混ざりやすいということが分かる。

また、実験よりも渦粘性係数を小さく見積もっている CFD の計算結果を使ったところ、リチャードソン数が 1.61 の条件で 12.6%減少、3.15 の条件で 1.19%の減少ということで、ほとんど変化は見られなかった。

## 5. 結論

本研究の目的は海流・潮流発電プラントを設置した際に、ブレード後流に生じる影響を実験と数値モデルによって求めることである。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- ・ 実験から流速分布を計測し、これを数値モデルに組み込むことで、実海域において発電プラントを設置したときの影響を再現した。
  - タービン後流の流速分布を計測する実験を行い、軸方向流速分布、鉛直方向流速分布、時系列流速データを得た。
  - タービンによる効果を「せきとめ」「旋回流」「乱流拡散」とし、せきとめは実験の軸方向流速分布から、旋回流は角運動量理論から、乱流拡散は実験の時系列流速データから算出した。
- ・ タービンによる影響を算出できる手法を確立した。この手法を使うことで、違うタービンでも影響を算出できる。
- ・ 成層の強さにより、鉛直混合の度合いが変わることを確認した。
- ・ ある程度の成層がある海域で、劇的に鉛直混合が促進されることは考えにくい。

今後の課題として、以下のものがあげられる。

- ・ MEC モデルに生態系モデルを結合し、生態系への影響を評価する。
- ・ タービン近傍場はネスティングしてより厳密で細かい計算をし、全体は粗い格子を用いて、より広い海域の解析をする。

## 参考文献

[1] 日本沿岸域に適した低コスト潮流発電システムの開発研究成果報告書,2010

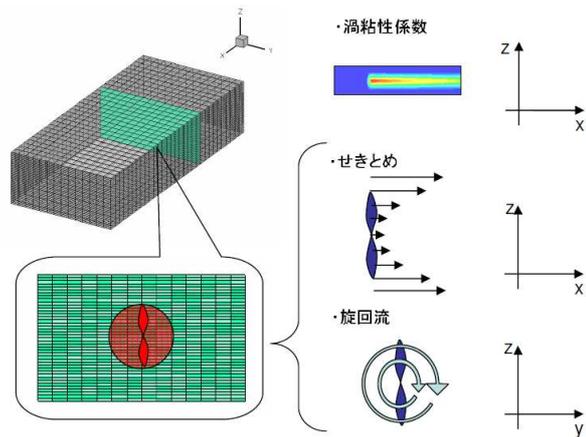


Fig.9 overview of including of turbine effect to the model

Table.4 test case

リチャードソン数	備考	タービン後流のリチャードソン数
1.61	40m で 4(psu)の差の塩分成層	1.41 (減少率は 12.8%)
3.15	40m で 8(psu)の差の塩分成層	3.11 (減少率は 1.2%)
0.383	40m で 1(psu)の差の塩分成層	0.232 (減少率は 39.2%)

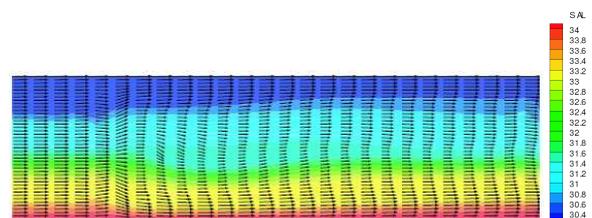


Fig.10 computation result for a case of Ri=1.61

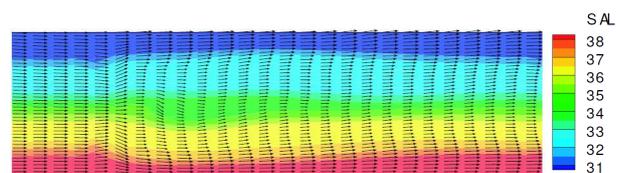


Fig.11 computation result for a case of Ri=3.15