

海流発電装置設計における流速活用手法

Utilization of current information for Ocean Current Turbine design

学籍番号 47136659 牧野 耕大

指導教員 高木 健 教授

(平成 27 年 2 月 3 日 発表予定)

Keywords: 海流発電, 設計条件, 再解析データ, 観測, PSD(Power Spectral Density)モデル

Keywords: Ocean Current Turbine, Design condition, Reanalysis data, In-situ observation, PSD model

1. 序論

1.1 研究背景

海流発電装置の実用化には多くの課題が残されているが、開発段階は着実に進んでおり、実海域の情報を反映した設計を検討していく必要があるフェーズに入ってきている。

黒潮の流れについては、従来から海洋科学の対象として研究が続けられており、大まかな流れのエネルギー、流速の速い海域、大蛇行現象のメカニズム等、海流発電装置の概念設計を行うには十分な情報が揃っている。しかし、装置の機能や構造に関する基本設計を行うために必要な情報は存在していないのが実情である。そのため、再解析モデルと観測情報とを組み合わせ、流速情報を活用する手法がより詳細な設計を進めていく上で必要である。

1.2 先行研究

海流発電装置に関する研究は、主に東京大学と Florida Atlantic University (FAU)において進められている。いずれも水槽実験と数値計算を組み合わせ、装置の概念成立性が示されており、今後実海域での試験に進んでいく段階にある^[1]。東京大学において開発されているシステムは、五之治らによって浮体の深度制御手法が確立され、流速の追従対応可能スケールが示されたが^[2]、それらを実際に検証する流速データが存在していないという問題がある。

黒潮観測においては、清松らによって三宅島沖で約 1 年間の係留観測が行われ、そのデータを基に、観測点での再解析モデル内の誤差が示された^[3]。その他、黒潮流域の平均流の空間分布や長期の変動を扱った研究は存在するが、海流発電装置の翼回転周期や固有周期に関わるような周期帯を対象にした観測事例は非常に少ない。

1.3 海流流速を活用する際の課題

装置設計においては、機能毎に重要となる周波数帯が異なるが、基本的には連続的な時系列の中での応答解析によって設計が進められる。しかし、これらの検討を行うための流速情報は不十分であるという課題がある。一方、流速取得という観点からは、各モデルや観測手法に存在する解像度限界から、取得されるデータは断片的になってしまうという問題がある。これらの問題点を整理しているのが Fig1 であり、両立場を踏まえた整理手法、活用手法が必要である。

1.4 研究目的

以上の問題点を踏まえ、本研究の大目的として、黒潮流域における海流情報を反映した設計を行える状態にすることを掲げる。そのため、以下の 2 点について検討した。

- 海流流速情報の整理手法、工学的活用手法の確立
断片的に得られている情報を統合し、工学的な観点から必要な流速情報を推定する手法及びその活用法について検討を行った。
- 精度向上が必要なスケールの流速観測手法確立
黒潮流域における高周波数の変動を対象とした観測事例は非常に少なく、過去の観測でも測器動揺等の問題が生じていた。この点を考慮した観測手法を確立し、設計に必要な情報の拡充手法を検討した。

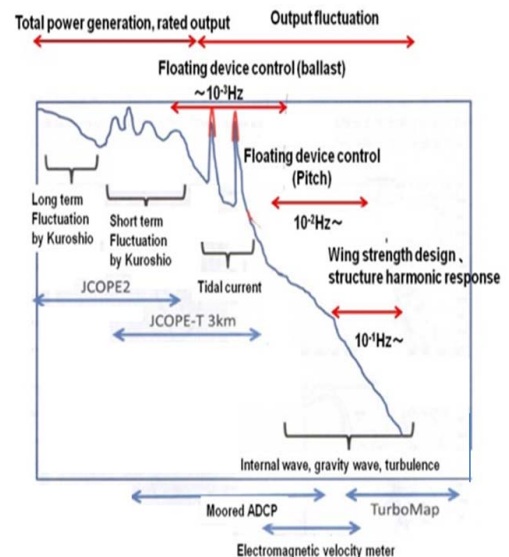


Fig. 1 Schematic image of ocean current information in frequency domain from the standpoint of design and data acquisition

2. 海流流速情報の整理

2.1 海流 PSD モデルの提案

風車設計時には、PSD モデルから再現した変動時系列が応答解析に用いられる。これは、風車設置個所が大气境界層内にあり、等方性乱流の仮定を置いているからであるが、このような PSD モデルは設計時にもデータ整理時にも非常に有用である。そこで、本研究においても、PSD に基づき、周波数空間上で海流流速情報の整理を行った。その上で、経験的モデルであるが、(1)式によって海流における PSD モデル式を提案し、現状利用可能な情報と新たに観測した結果を用い変数を推定した。

$$P_{model}(f) = Af^\alpha \quad (1)$$

2.2 再解析データ

日本周辺の海流流速数値データとして、黒潮流路の再現性をデータ同化によって高めた海洋大循環モデルの計算結果、海洋再解析が存在する。本研究では、複数存在するモデルデータの中で、Table.1 にまとめたデータを使用した。

2.3 過去の観測データ

Table.1 にまとめたように、再解析モデルのデータには解像度限界が存在している。そこで、モデル誤差の定量化及びモデルで解像できていないスケールの取得を目的に、三宅島沖における観測が行われており、本研究ではそれらのデータを用いた。

この観測時に、高周波数成分を計測する際には、船体の動揺が混入してしまうことや、測器が傾斜してしまうという問題点が明らかになった。そこで、本研究ではこの点を定量化し、海底設置等によってデータ取得が困難な黒潮流域における観測システムに関する検証を行った。

Table 1 Summary of reanalysis data.

Resource	Period (time step)	Horizontal resolution
FRA-JCOPE2	1992/1/1~2013/12/3 (1day)	1/12° grid
JCOPE-T-Tokara	2006/1/1~12/31 (1hour)	1/36° grid

Table 2 Summary of observation data at Miyakejima area.

Resource	Period (time step)	Location
ADCP on Moored buoy ^[4]	2013/3/12~2014/3/10 (1hour)	139.462°E 34.126°N
ADCP on Ship ^[5]	2012/12/14 (30sec)	
EM from Ship ^[5]	2012/12/14, 2013/3/12 (0.5sec)	

3. 黒潮流域における観測

3.1 観測概要

黒潮流域は水深が数百 m 以上と深く、潮流発電設置海域のように、海底設置型によって流速を取得することが困難である。そのため、船上からの観測や係留系による観測が必要になるが、その際に生じる動揺影響や傾斜影響の問題が過去の観測で指摘された。そこで、本研究では、流速を取得するとともに、船体動揺の影響や係留系の動揺、傾斜の影響の定量化、補正を試みた。観測を行った海域は、黒潮流路に近いトカラ海峡口之島沖と潮岬沖である。特に、潮岬沖では Fig3 のように数時間にわたって一様な流れを観測でき、黒潮に近い流れを観測できたと考えられる。

3.2 観測システム

Fig2 に示したように、船上観測と係留電磁流速計による観測を行った。船上観測では、5 ビーム式の ADCP を船体に固定し、4 本のビーム流速から平均流を観測し、鉛直方向ビームから、高周波数変動成分の取得を試みた。この鉛直流速には、船体の動揺が大きく影響すると考えられ、この補正を 6 自由度センサーによる計測結果から試みた。トカラ海峡口之島沖での観測では、船上観測結果の確認用として、海底設置 ADCP による観測も行った。

係留系取り付け電磁流速計による観測では、海面ブイの動揺や流れによる傾斜影響が存在するものと考えられる。そこで、この観測手法においても電磁流速計に加速度センサーを取り付け、測器の動揺の定量化を試みた。また、汎用ソフト OrcaFlex によって係留系をモデル化し、傾斜影響についても分析した。

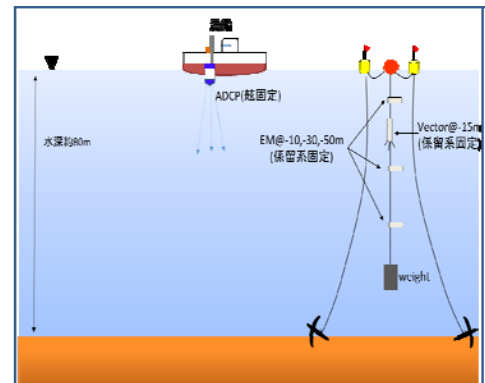


Fig. 2 Schematic image of ocean current observation system in Kuroshio area

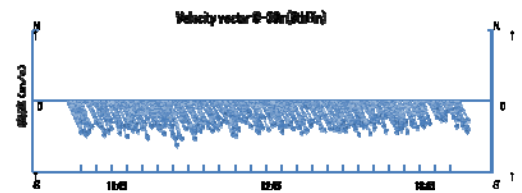


Fig. 3 Observed velocity vector at Shionomisaki

3.3 観測データ補正結果

トカラ海峡口之島沖において取得した鉛直方向成分流速の PSD を Fig4 に示す. 補正前の取得データは明らかに船体動揺と同じオーダーの変動となっているが、動揺成分のベクトルをセンサーから算出し、補正を施すことで、海底設置型の示す結果に大きく近づいたことが分かる. しかし、海底設置型 ADCP 及び船上 ADCP の示す結果は共に PSD オーダーで 10^{-3} 付近になるとホワイトノイズに近くなっており、この周波数帯が ADCP による観測限界であると考えられ、補正によって得られる周波数帯は限られたものになる.

係留系についても、取り付けた加速度データを解析することで、ブイの動揺による成分と、測器もしくは係留系のロープに起因すると考えられる動揺成分が確認できた. 特に鉛直方向の運動は、船体のオーダーとほぼ同程度であったため、係留観測による高周波数成分取得のメリットは大きくないことが明らかになった. 取得データに補正することで PSD のオーダーの変化が見られたが、補正後の値が正しいか確認できるデータがないため、この点に関しても更なる検討が必要である.

3.4 観測システムに関する考察

再解析モデルでは解像できていない1時間以下のスケールの変動成分の取得を目的に観測を行った結果、1分以上の変動までは ADCP の 4 ビームによって精度よく観測可能であることが確認できた. (Fig.5,6) ADCP の 5 ビーム目で鉛直流速を測る場合には、数秒周期以下の変動は精度限界から不可能であることがわかり、電磁流速計等の測器との組み合わせが必要であるが、それらの傾斜影響や動揺影響を考慮しなければならない.

4. PSD による流速情報整理結果

4.1 海域毎の整理

観測データの存在する黒潮流域の各海域において、広範な PSD 分布図を作成し、本研究で提案した Power law の仮説について確認を行った. 整理によって、各海域において、モデルの解像できていない周波数帯であっても変動を過小評価している可能性があることが明らかになった.

4.2 高周波数成分の分布

観測データの存在する3つの海域(三宅島沖、潮岬沖、口之島沖)において得られている情報の中で、再解析モデルによる解像度以下のスケールの PSD 分布を Fig7 に示した. この結果より、高周波数成分のパワーの分布幅が明らかになり、工学的観点からは、この分布幅の中で設計を検討できる. また、本研究で取得したデータから得られる PSD のパワーは過去の三宅島沖における観測結果より得られるものよりも低く、海域によってこのような差が生じ得るのかについて更なる検証が必要である.

得られた PSD 分布の形状は、Kolmogorov 則に近いものになると想定されたが、ピンクノイズに近い構造であった. 情報を得ようとしているのは、海面下 50m 以浅程度のものであり、特に冬季には混合層の内部になる. このような層は、様々な現象の相互作用によって乱れが生じていると考えられ、理論的、物理的な根拠づけは難しく、今回実証した手法によってデータを拡充し、検証が必要である.

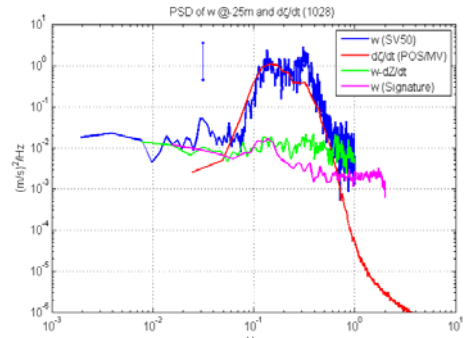


Fig. 4 Result of Ship motion correction from observed vertical velocity by ADCP

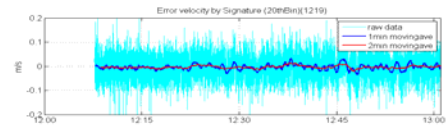


Fig. 5 Error velocity observed by ADCP on Ship

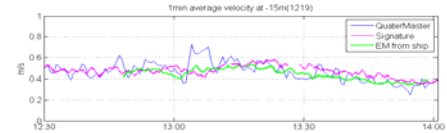


Fig.6 Comparison of 1min average velocity observed by ADCP and EM

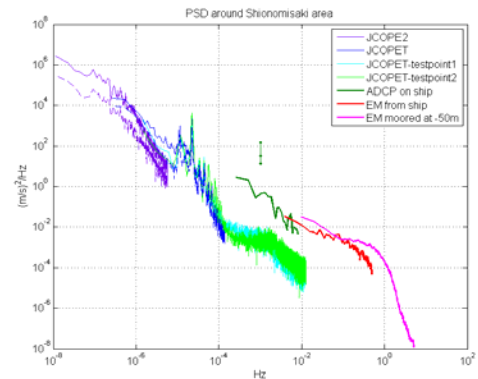


Fig. 7 PSD from reanalysis data and observed data around Shionomisaki area

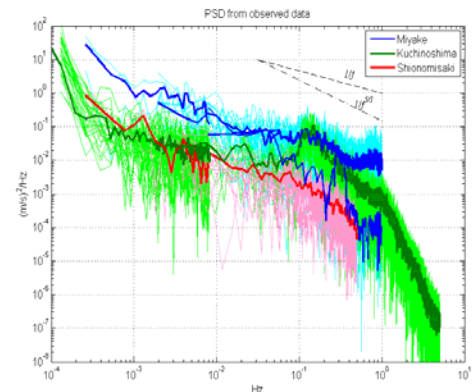


Fig. 8 PSD from observed data in shorter scale than reanalysis model time resolution (1hour)

5. 設計評価への活用事例

PSD モデルが得られれば、風車設計時と同様の仮定を置き、乱数位相によって主流方向の変動流入流速が再現できる。観測データの主流方向成分の確率密度を確認すると、正規分布に近く、本研究においてもこの仮定の下に PSD モデルから時系列の再現を行った。

再現時系列を用いた影響評価例として、翼根の荷重時系列を翼素運動量理論によって推定し、その荷重変動を rainflow サイクルカウント法によって整理することで、疲労等価荷重(DEFL)を計算した。この指標により、観測データより得られている乱流強度(Fig.9)の範囲内を満たすよう PSD モデル変数を変化させ、各ケースの影響を比較した。結果(Fig.10)より、横軸は 40m 深くなった際の流速減少割合を示しているが、鉛直プロファイルの影響を考慮しなかった場合(0%)、分散による影響の差が顕著になる。40m 深くなった際に流速が 10%減少する場合と、30%減少する場合を考えると、流速変動強度が低い流入条件では、鉛直プロファイルを考慮することで疲労荷重の増加割合が大きくなるという傾向を得た。これは、今回観測し、乱流強度が非常に低かった潮岬沖のような流入条件では、流速の鉛直分布に関する情報が重要であると言える。そのためにも、本研究で試みた、鉛直方向に多層観測可能な ADCP による観測は必須であると考えられる。

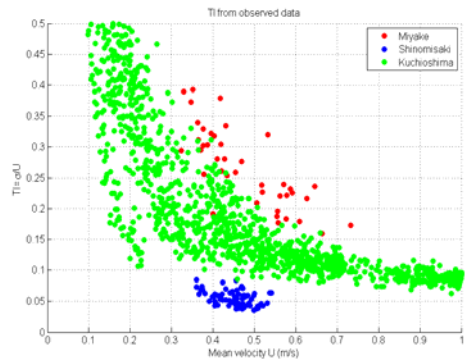


Fig. 9 Turbulence Intensity from observed data around Miyake, Shionomisaki, Kuchinoshima area

6. 結論と今後の展望

6.1 結論

本研究により、以下の 2 点に関して結論が得られた。

1. 海流流速情報の整理による活用手法の提案

この整理により、モデルが解像できているスケールでもパワーを過小評価している可能性があることや、各測器の観測限界スケールが明らかになった。また、海流流域での PSD の広範な周波数帯における分布形状を示し、今回仮定した Power law に従っているという傾向を得た。また、PSD モデルの設計への活用事例により、鉛直プロファイルの形状も流入条件として重要であることを示した。

2. 黒潮流域における、1 時間以下の変動の観測手法確立

5 ビーム式 ADCP を船体に取り付けることによって観測可能な周波数帯を示し、解像度限界によって、他の測器との組み合わせが必要であることを明らかにした。また、高周波数成分取得における船体動揺の補正手法を実証し、適用可能性を示した。

6.2 今後の課題

潮岬沖においては黒潮に由来する流れを計測できていた可能性があるが、他の観測データについては、データ取得時に黒潮の影響があったかの判断が難しい。本研究で示した手法により、黒潮本流での短周期成分の取得によって、今回の整理結果及び仮説に対して、再度検証する必要がある。また、設計評価例では、計算の簡便性から、翼素運動量理論を用いた。しかし、1 秒間隔での変動流中での翼への影響を評価するためには、渦の影響を考慮した手法や半経験的な補正が必要である。

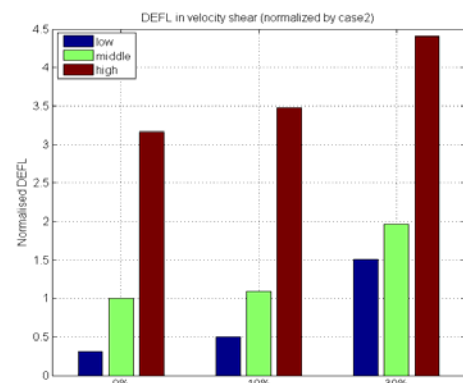


Fig. 10 DEFL normalized by no profile and middle fluctuation inflow case (0%, middle)

参考文献

- [1] J. VanZwieten, F.R. Driscoll, A. Leonessa and G. Deane, "Design of a prototype ocean current turbine—Part I: Mathematical modeling and dynamics simulation", *OceanEng*, vol.33, (2006) 1485-1521. .
- [2] Gonoji, T., Takagi, K. and Takeda, K.: Motion of Twin type Ocean Current Turbine at the time of startup and accident, *OCEANS 2013*, San Diego, 2013
- [3] 清松啓司, 早稲田卓爾, 門元之郎, et al JCOPE-T で再現された伊豆諸島・三宅島近海の流れと海流パワーの検証, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 19 号 (2014)
- [4] 早稲田卓爾, 清松啓司: private communication
- [5] 早稲田卓爾, 和田良太, 小平翼: private communication