

研究テーマ 「 黒潮による海流発電に適した浮揚式二重反転水車の開発に関する研究 」

研究責任者 所属機関名 鳥羽商船高等専門学校

官職又は役職 准教授

氏 名 渡辺幸夫

メールアドレス ywata@toba-cmt.ac.jp

共同研究者 所属機関名 広島大学大学院工学研究科

官職又は役職 教授

氏 名 岩下英嗣

(平成 27 年度募集) 第 28 回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要

日本の領海・排他的経済水域 (EEZ: Exclusive Economic Zone) は世界第 6 位の面積を誇り、この EEZ における海洋再生可能エネルギーの利用は温室効果ガスの排出抑制や、エネルギー安全保障の面からも積極的な推進が求められている。一方、有効活用する為にクリアすべき技術的課題も多く、政府は国内 5 県 7 海域を実証フィールドに指定し、新潟県沖の粟島では 2014 年、2016 年に実証実験が実施されるなど、課題解決のため積極的な取り組みがなされている。ところで、黒潮の流速は最大で 2m/s に達する場合があります、流れの幅も約 100km と広い。さらに水深も約 1000m と深いため、保持するエネルギーは膨大で試算例としてはおよそ $15.6 \times 10^7 \text{kW}$ に達すると報告されている。この巨大なエネルギーを利用することで日本の自然エネルギーを利用したクリーンな安定電源を新たに構築できると期待されている。

そこで本研究では、再生可能エネルギーの 1 つである海流エネルギーの有効利用を目的として、翼型断面を有するシュラウドで海流発電用水車を囲うシステムを提案した。この提案した水車システムについて、CFD 解析を実施し水車出力が 1.81 倍増加することを確認できた。また、提案する水車システムは、シュラウドの浮力により浮遊状態で海中に設置することを想定している。突起物を極力減らした翼断面シュラウドにより、高出力化を実現しながらも係留力を小さく保つことが可能となり、係留索の強度についても配慮したものとなる。本研究で開発した CFD 解析により、システムが受ける流体抵抗も解析可能となった。最後に、このシステムの水車を二重反転化することで、出力の増加だけでなく前方水車の発生するトルクの反力を相殺できことを期待した。水槽実験によってこの二重反転水車の出力を推定したが、今回検証できた範囲では、最大で 36.8% の出力向上が見込まれることが判明した。

今後これら要素技術を総合することで実海域での実証実験が可能となり、近い将来海洋エネ

ルギー利用が実現すると予想される。

2. 実施内容および成果の説明

海洋エネルギーをはじめとする再生可能エネルギーの利用は、地球温暖化や原油価格高騰とあいまって注目を集める分野となっている。海洋エネルギー利用法のひとつとして海流発電があり、黒潮に代表される流れのエネルギーを海中に沈めた水車で機械的なエネルギーに変換し発電するものである。海流発電に対する期待は今後益々高まると思われ、環境省では、2030年の段階で142億kWh、（高位予測、低位予測でも54億kWh）、2050年の段階で577億kWh（低位予測で201億kWh）と、発電量を予測している。

本研究では、海流発電における発電用水車の出力増加を目的として、シュラウドの集流・増速という流体力学的効果に着目しその効果について検討した。また、カウンタートルクの防止と同時に効率向上が期待できる二重反転水車について検討した結果を報告する。

・シュラウドの増速効果

はじめに、シュラウドの増速効果を調査するために数値解析（CFD解析）を実施した。本研究で実施したCFD解析には、全てANSYS社のFluent 17.2を用いた。シュラウドは水車を囲む短いパイプのような三次元形状をしており、一般には板状のものを成形したものである。このシュラウド断面の形状を翼型としたことが本研究のポイントのひとつである。解析を実施するにあたって、シュラウド断面としてはNACA0012、NACA4412、19Aの3種類を対象とした。19A断面は、船舶のダクトプロペラのダクトの断面として一般的に用いられているものである。NACA0012、

NACA4412については迎角を5度つけたものについても対象とした。シュラウドは全て前縁を基準とした直径 D_s が330mmで、主流方向の長さ L を100mmとして。主流はシュラウド前縁から後縁に向けて $V=1.5\text{m/s}$ で流入

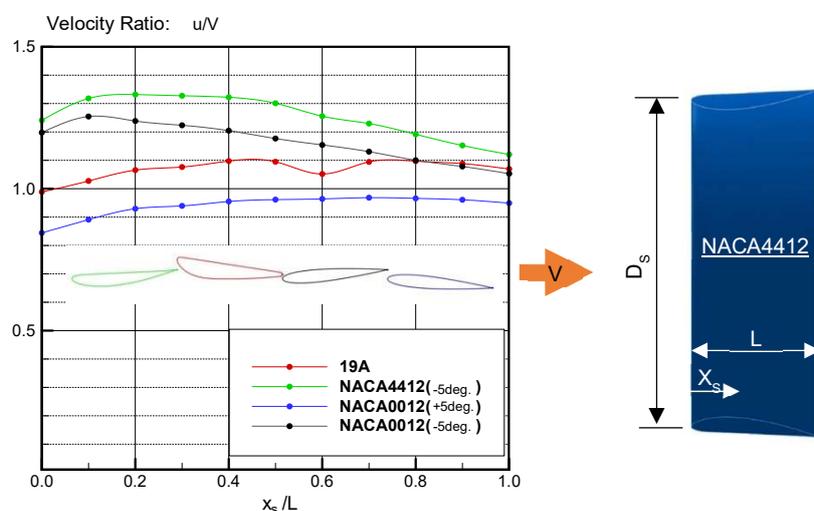


Fig.1 シュラウドの増速率と概念図

するとして解析を実施した。シュラウド模式図とシュラウド中央部における流速 u を主流速度

で除した増速率 u/V についての解析結果を Fig. 1 に示す。グラフの横軸がシュラウド主流方向の位置となり、 $x_s/L=0.0$ が入口、 1.0 が出口に相当する。解析の結果、増速率は入口から徐々に大きくなる傾向がみられ、ピークを迎えた後に徐々に低下する。また、増速率の絶対値に大小はあったが、NACA4412 迎角 5 度の断面が、対象としたシュラウドでは最大の増速率 1.33 となり、増速効果を確認できた。なお、この解析の結果から $x_s/L=0.2$ の位置が水車を設置すること適していると考えられるので、シュラウド付き水車を解析する際には、この位置を採用することとした。

・水車の CFD 解析と精度検証

次に、水車性能の CFD 解析の精度検証のため回流水槽にて水車性能計測実験を実施した。実験を実施した場所は西日本流体技研の回流水槽で、プロペラ単独試験を使用して水車のスラストとトルクを計測した。実験の様子を Fig.2 の左図として示す。水車模型については、予め本研究室で開発したレイノルズ数影響を考慮できる翼素運動量理論ベースの解析プログラムを用いて設計したもので、形状の詳細を Fig.2 中央図に、模型の写真を Fig.2 右図に示す。なお、水車は設計周速比 $TSR=4.0$ ($=2\pi nR/V$ 、 n : 水車毎秒回転数[rps])、 R : 半径 0.15[m]、翼断面 NACA642-415、羽根枚数 3 枚の条件で設計したものである。水車直径は水槽側壁の影響を受けず、かつ流体力が大きくとれるよう 300mm で製作し、ボス比は 0.2、流入流速は 1.5m/s とした。プロペラ単独試験の回転数を変化させ、周速比に対する水車性能を調査した。

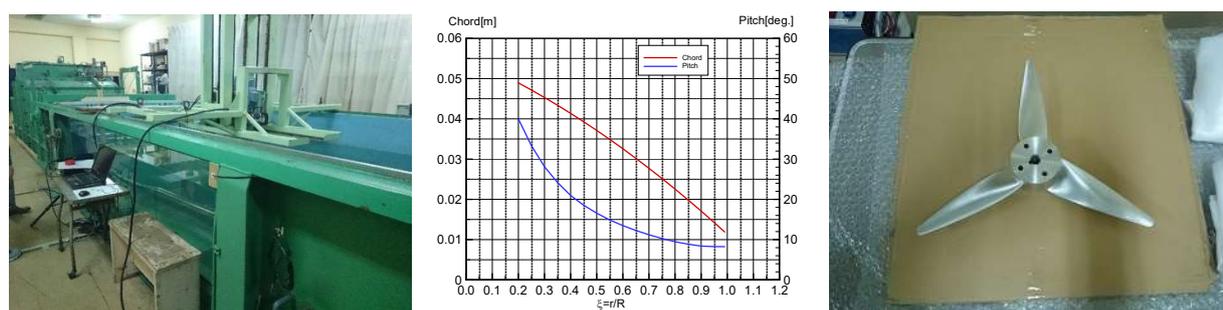


Fig.2 左：回流水槽外観 中：水車模型の弦長とピッチ各分布 右：水車模型

回流水槽実験を受け、水車模型を対象とした CFD 解析も実施した。計算する流体の固定領域は円筒形とし、円筒領域の直径を $10R=5D$ 、円筒領域の長さを上流側 $5D$ 、下流側 $8D$ とした。この流体固定領域内に原点を中心とした円筒形の回転領域を設定した。この回転領域の直径を水車よりも僅かに大きな 315mm、長さを上流側 75mm、下流側 75mm とした。なお、乱流モデルとしては、回転機械の解析で一般的に用いられる $k-\omega$ SST モデルを採用し、解析時間の観点から要素数はおよそ 100 万程度とした。以上の条件下で CFD 解析を実施した結果と水槽実験

結果を比較して、解析精度の検証を行った。

出力係数とスラスト係数を比較したグラフを Fig.3 に示す。出力係数とスラスト係数は下記の式で表される。式中の分子はそれぞれ、水車が発生する出力とスラスト（軸方向の力）であり、分母の ρ は流体の密度である。

$$C_P = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3}, \quad C_T = \frac{Trust}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^2}$$

なお、グラフの縦軸がそれぞれの係数を示し、横軸は周速比を表す。また赤の丸が実験の結果を、緑の線が CFD 解析を行った結果である。スラスト係数の高周速比域において差異があるが、広い周速比域において CFD 解析の計算精度が高く、本研究で用いた解析法が有効な手法であることが確認できました。なお、この差異については、プロペラ単独試験機と計算モデルのボス後方の形状の違いがあり、これが影響したものと考えられる。設計周速比とした TSR=4.0 付近で水車は高い出力を発生しており、設計法が有効であることも確認できた。

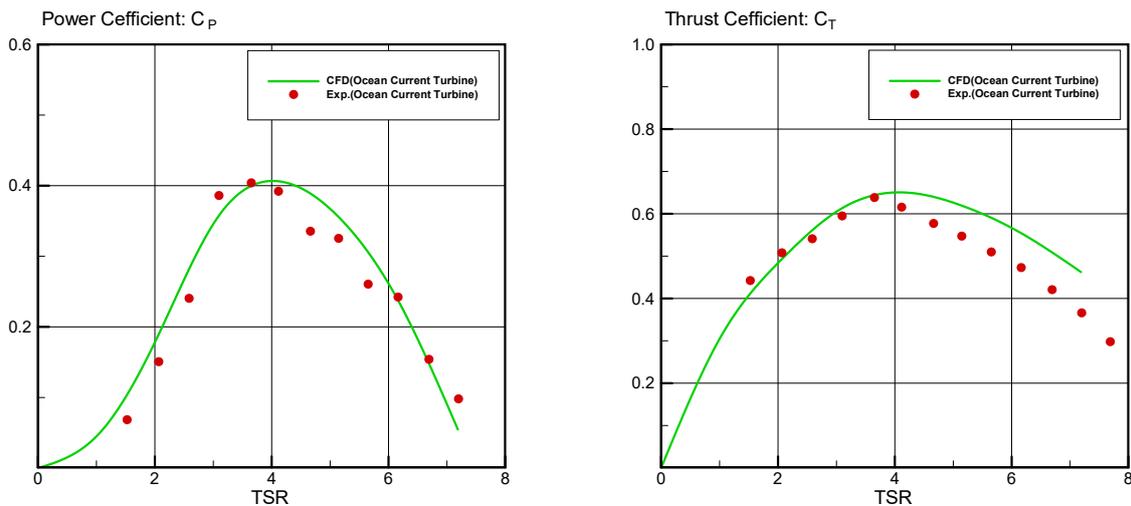


Fig.3 左：水車出力係数 右：水車スラスト係数

・浮遊式シュラウド付き水車の出力向上

水車単体の計算精度が確認できたので、同様の手法でシュラウド付水車の解析を実施した。具体的には、水車単体の解析に加えて回転領域の外側の流体領域内にシュラウドを設置した。流体固定領と回転領域の概略を Fig.4 に示す。なおシュラウドの形状については、シュラウド単体で最も増速が期待できる NACA4412 迎角 5 度を用いた。シュラウドの大きさは、単体の大きさと同じく前縁直径 330mm、長さ 100mm である。なお流出部は計算の領域として水槽試験は直方体ですが、メッシュの精度を確保するため円筒形としているなど、基本的に水車単体と同様の計算条件とし、要素数は約 170 万となった。Fig.5 にシュラウド付水車性能の解析結果

を示す。左が出力係数、右がスラスト係数の結果である。先程の水車単体の結果に加えて、青色の線でシュラウド付水車の結果を示している。なお、無次元化する際の分母は、水車単体と同じである。 C_p の最大値は $TSR=7.0$ のとき 0.730 であり、水車単体の 1.81 倍となった。またピークは高周速比側へ移動した。これはシュラウドの効果によって水車に流れ込む流速が向上することで、回転数も増加した条件が最適値となった為と考えられる。今後、実機などの設計を実施する際には考慮が必要となる。

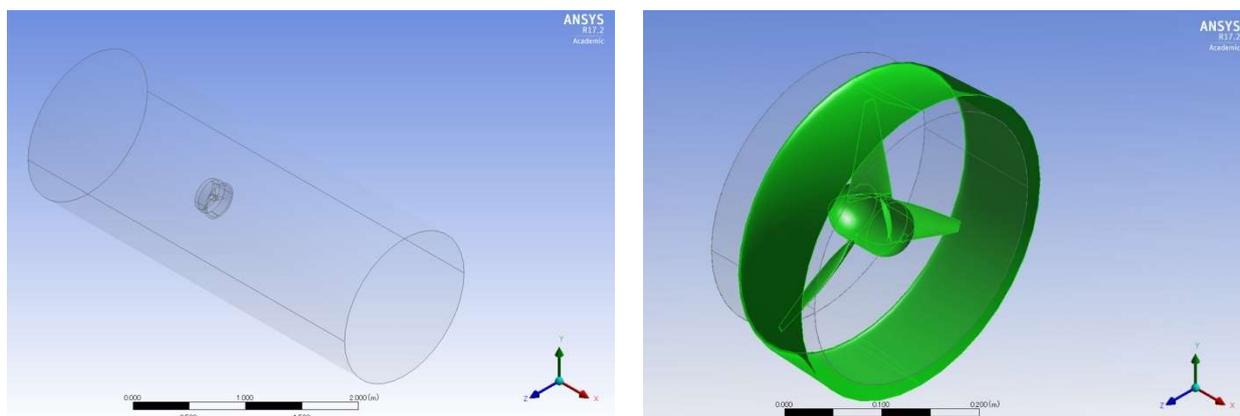


Fig.4 左：解析した流体領域（流体固定領域） 右：シュラウドと水車周りの回転領域

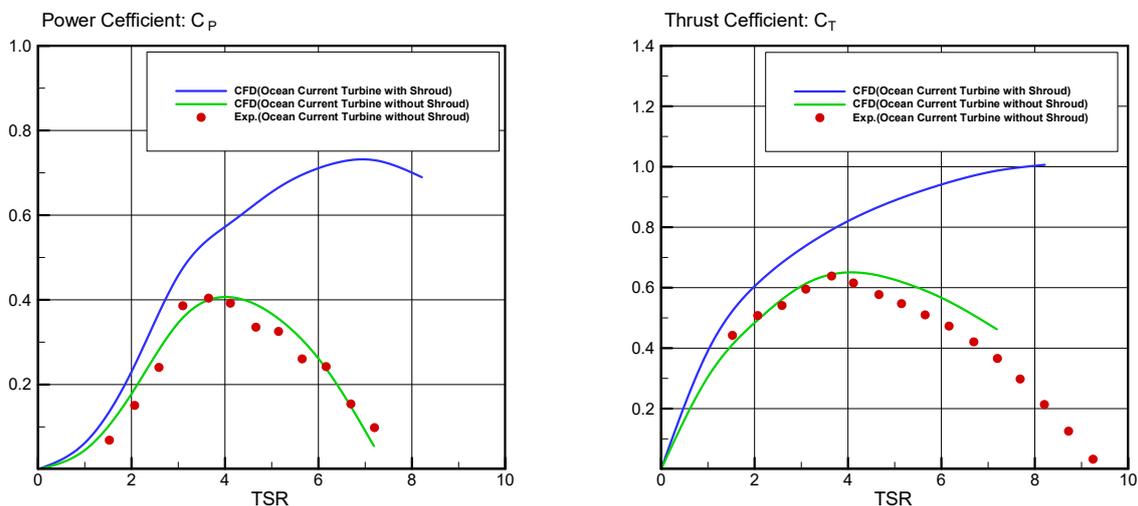


Fig.5 左：シュラウド付き水車出力係数 右：シュラウド付き水車スラスト係数

次に水車とシュラウド周りの流速場について、出力係数が最大となった周速比7での結果を Fig.6 に示す。左の図が yz 断面 ($x=0.0$)、右の図が xy 断面 ($z=0.0$) での x 方向流速分布である。ブレード先端に高速部が、ハブの後ろに低速部が存在していることが見られる。また、水車システム後方に乱れた流れが発生し、流れ場が複雑になっている。いずれもブレード周りで

大きな流速変化が生じていることが判明した。

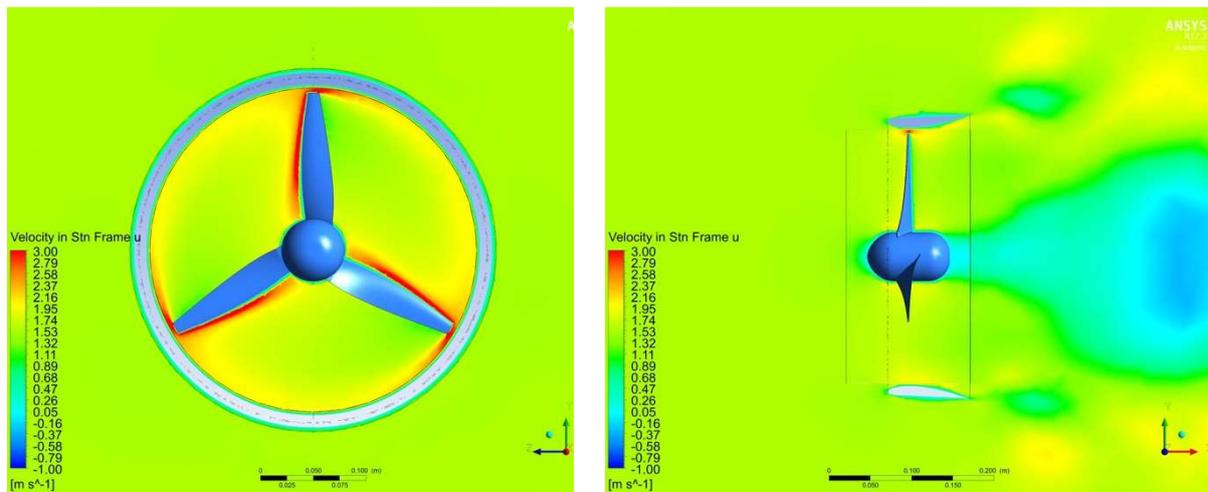


Fig.6 左：xz 断面における流速分布 右：xy 断面における流速分布

・二重反転水車の出力向上

最後に、これまでほとんど研究が行われていない二重反転水車について検討するため、鳥羽商船高等専門学校の回流水槽で水車後流の流速計測を実施した。Fig.7 の左図に計測結果、右図に流速計測の様子を示す。水車後流の減速率は、周速比により変化していることが分かるが、この後流中に新たに水車を設置することによって、水車単体よりも 36.8%出力が向上すること (TSR=6.0 のとき) が推定された。なお、シュラウド付き水車については、今後も数值的、実験的検証が必要である。

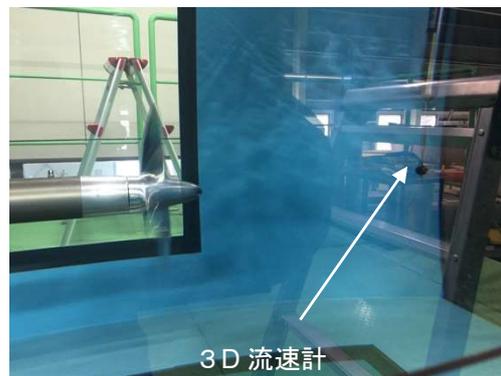
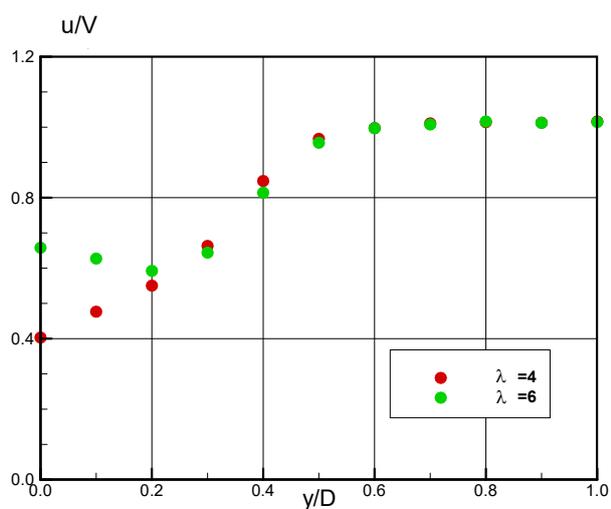


Fig.7 左：水車後方の減速率 (u/V) 右：水車後流計測の様子

○論文発表

渡辺幸夫ほか：シュラウドを有する浮遊式海流発電用水車に関する研究，日本機械学会第 94 期流体工学部門講演会・講演論文集，2016