

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 24 日現在

機関番号：54102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23710100

研究課題名（和文） 発電領域の拡大を目指した海流発電用水車システムの開発

研究課題名（英文） Generating Power Improvement of Marine Current Turbine Stream

研究代表者

渡辺 幸夫（WATANABE YUKIO）

鳥羽商船高等専門学校・商船学科・准教授

研究者番号：20332033

研究成果の概要（和文）：海流発電用水車の実用化を目指し、発電領域を拡大する水車システムの開発を行った。開発技術のキーファクターは、水車をシュラウド（囲い）で囲うことである。特にシュラウドの断面について工夫し、翼型断面形状にすることを提案した。翼断面形状の効果によって、周流効果による流入流の増速と、翼の低圧部による増速効果を見出した。シュラウドが本質的に有する翼端失速軽減効果と合わせ、翼断面形状を有するシュラウドを利用することで水車の発電効率向上を確認した。

研究成果の概要（英文）：This study examines methods for designing and analyzing kinetic turbines based on Boundary Element Method (BEM) and Computational Fluid Dynamics (CFD). The underlying goal of the work was to assess the potential augmentation of power production associated with enclosing the turbine in an expanding shroud. Thus, a comparison of the potential performance of shrouded and without shrouded turbines was carried out. By utilizing the effect of inflow velocity increases the power generation efficiency of the shrouded turbines output is achieved.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：環境学

科研費の分科・細目：環境技術・環境材料

キーワード：再生利用可能エネルギー、海流・潮流発電、数値流体力学、回転機械

1. 研究開始当初の背景

日本国内における海流の状況を見ると、鳴門海峡での最大流速 10 ノットをはじめとして、黒潮など各地に潮流の強流域があり、そのエネルギーの賦存量は膨大である。また、鳩山政権時に提唱された「2020 年までに、CO₂ 排出量を 1990 年比で 25%削減」という目標を持つ我が国にとって、この一部にであっても海流エネルギーの利用によって地球温暖化対策に寄与することは、まさに時節に適ったことであると思われる。海流発電は水車の製造コストが高いことや大型化が困難なことなど、まだまだ多くの課題が残されてい

るが、英国を中心に実用化に向けて海外の大型プロジェクトが動き出しており、隣国である韓国でも 1 MW 級の発電装置を 300 台設置する開発計画が発表されるなど、国際的な開発競争も激しさを増しつつある。国内では、（財）エンジニアリング振興協会がメガワット級海流発電システム実用化 FS 検討委員会を設置し、平成 23 年度年以降に実証実験を計画しているループ型タービンなどがある。このような状況から、今後は我が国においても海流発電に対する期待は益々高まるものと思われる。

海流発電用水車の形態は、これまで様々な

ものが考案されているが、主なものとして、水平軸型と垂直軸型の2つに大別することができる。これらの利点・欠点は以下のようになる。

(1) 水平軸型の水車は垂直軸型に比べて発電効率が低い。また、多くの風車・船用プロペラなどの膨大な実験データ、設計・解析ツールが転用可能である。しかしながら、それ自身だけでは流入流に対してヨー調整ができず、ヨー制御装置を付加する必要があるなどの欠点もある。海外で実証実験に入っている潮流発電用水車としては、水平軸型が多数であり、上記ループ型タービンもこの形式である。

(2) 垂直軸型の水車は流入流に対して指向性がなく、水平軸型で必要となるヨー制御装置は必要ない。しかしながら、発電効率がそれほど高くない。また、国内外問わず、小型から中型の風車では垂直型が多く採用されているので、それらの実験データ、設計・解析ツールも転用が可能であろうと考えられる。国内で学術的に研究されている水車は垂直軸型が多い。

そこで本研究では、海流発電用水車の周りに翼型の断面形状を有するシュラウドを設置して発電効率向上・起動性能向上を目指した調査を行う。

2. 研究の目的

本研究では水平軸型水車に着目し、風車の分野で近年注目されているシュラウドを、回転する水平軸型潮流発電用水車ブレード周りに設けることによってその集流効果と翼端失速低減効果を利用し既存の水平軸型潮流発電用水車よりも発電効率が向上するような、シュラウド+水車システムの基礎性能把握を研究目的とする。特に、風車で有効性が明らかとなっているディフューザタイプのシュラウドと、増速効果が見込まれるノズルタイプのシュラウドを比較し、水車に適した形状のシュラウドを提案し、水槽実験や数値解析を行うことでその出力特性を調査する。最後に、どのような形状(2タイプそれぞれの長さの比率など)のシュラウドが潮流発電用水車にとって最適であるのかを検討する。

3. 研究の方法

(1) 新しい数値解析ツールの開発

水車単体および、シュラウド付き水車についての数値解析ツールの開発をおこなった。解析法として、3次元パネル法を採用し、シュラウドの影響を詳細かつ容易に考慮できるものとした。また、定義上非粘性計算法であるので、汎用流体解析ソフト Fluent を用

いた CFD 解析を行なって粘性影響を取り込ための改良を加えた。

(2) 数値解析ツールの検証

水車を作製し、回流水槽とプロペラ単独試験器を用いて、水車の発生トルク、推力、回転数を計測した。トルクと回転数から発生出力を算出し、出力係数分布の把握と、数値解析の精度検証を行った。

(3) シュラウド付き水車の性能解析

開発した三次元パネル法の数値解析ツールを用いて、水車性能に対してシュラウドが及ぼす影響を調査した。シュラウドについては、その形状と長さについて着目した解析を行った。

4. 研究成果

潮流発電用水車に対するシュラウドの影響を調査するために、新しい数値解析法を開発した。

(1) 数値解析法

① 三次元パネル法 (BEM: Boundary Element Method)

理想流体を仮定した領域において、一様流速 U 中に置かれたローターブレードが、角速度 ω で回転運動を行うと考える。法線ベクトル n を流体領域内向きが正として取り、流体は非回転非圧縮の理想流体とし扱えるものとする。速度ポテンシャル ϕ を導入できる。いま水車固定座標系からみたブレードへの流入ベクトルを V_I とおくと、水車周りの流速場は $V = V_I + \nabla\phi$ となる。ただし、 $V_I = U i - \omega \times r$ と表すことができる。 ϕ は Laplace 方程式および物体表面上での境界条件を満足しなくてはならない。

$$[L] \quad \nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{in Fluid Domain})$$

$$[H] \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = -V_I \cdot n \quad \text{on } S_B, S_D$$

ここで、 S_B 、 S_D はそれぞれ、水車表面、シュラウド表面を表す。水車表面 S_B 、シュラウド表面 S_D およびそれぞれの trailing edge から無限遠方へのびる無限小厚さの伴流渦面 S_{WB} 、 S_{WD} を取り囲む無限流体領域に Green の第二定理を適用し、 S_{WB} 、 S_{WD} 面上において $\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi}{\partial n}$ (±は S_{WB} 、 S_{WD} の上下面を表す) であることを用いることによって、積分方程式

$$\frac{\phi(P)}{2} - \iint_{S_B} \phi(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} dS - \iint_{S_D} \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n} G(P, Q) dS + \iint_{S_{WB}+S_{WD}} \Gamma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} dS$$

を得る。ここで $P=(x, y, z)$ 、 $Q=(x', y', z')$ は trailing edge 上の点を表している。また、 $G(P, Q)$ は Laplace 方程式の主要解である。圧力は無限遠方での圧力を p_∞ として

$$\frac{p - p_\infty}{\rho/2} = -2V_I \cdot \nabla\phi - \nabla\phi \cdot \nabla\phi$$

を計算しなくてはならないので ϕ に関して非

線形となる。Kutta 条件はこの圧力を用いて以下の式で表すことができる。

$$\Delta p \equiv p^+ - p^- = 0 \quad \text{at trailing edge}$$

圧力の線形項のみを考慮し S_{WB} 、 S_{WD} それぞれの面の上下で圧力が等しいという偏微分方程式を組みその解を求めると、翼、シュラウドおよびそれらから延びる伴流面に関して $\phi(Q^+) - \phi(Q^-)$ は一定値を取りその値は trailing edge での値に等しいことが導ける。この Morino 近似を用いると上記の積分方程式は翼およびシュラウド面上の $\phi(Q)$ を未知数とする積分方程式となり、離散化を行って境界条件の下数値的に求解することができる。

実際には得られた $\Gamma(Q_r) (= \phi(Q^+) - \phi(Q^-))$ を初期値とし、積分方程式と Kutta 条件を同時に満足する $\phi(Q)$ 、 $\Gamma(Q_r)$ を求める問題について繰り返し計算を用いて解くことになる。本研究では、Newton-Raphson 法を用いた繰り返し収束計算を行っている。 ϕ が求めれば上記の圧力の式により圧力を計算し、それを積分することによってトルク: Q 、推力: T 、出力: $P (= Q\omega)$ を求めることができる。

②粘性影響の考慮

水車が実際に稼働するのは粘性流体中となり、理想流体を仮定した三次元パネル法では十分な精度で水車性能を予測することはむずかしい。本研究では、汎用数値流体力学ソフトである Fluent を使用して解析を行い、あらかじめ二次元翼性能データベースを作成し、各半径位置での局所レイノルズ数と三次元パネル法から求めた揚力係数から、三次元影響を含んだ迎角を推定し、粘性影響を含んだ水車出力を算出する方法を採用した。

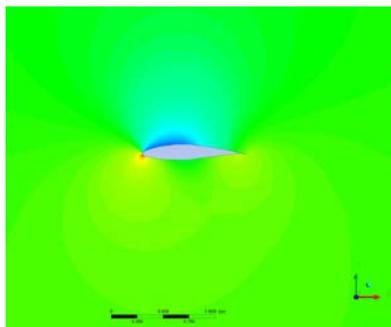


図1 CFDによる二次元翼の計算結果

(2) 計算精度の検証

数値解析法の確認のため水車単独の性能について水槽試験を実施し比較検討した。実験に使用した水車は、直径 250 mm、3 枚翼・断面翼型 M-F073 (揚抗比 76.3) である。

積分方程式を数値的に解くために、水車表面およびその後流渦を四辺形要素の微小パネルに分割した。その他、物性値などの計算条件は水槽試験に準じた。次節以降では、シ

ュラウド付き水車についても解析を行ったが、シュラウド付き水車については、上記のパネルに加えて、シュラウド表面と後流渦を四辺形要素に分割して計算を実施した。水槽試験、および水車を対象に数値解析を行った結果を図2に示す。

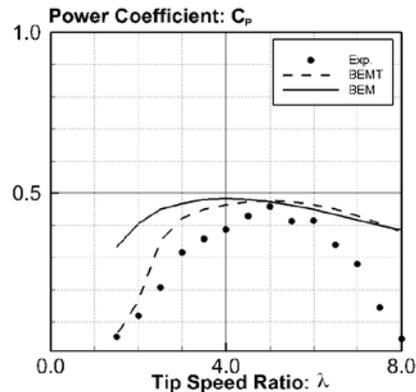


図2 出力係数における計算精度検証結果

図の横軸は周速比 (翼端周速 (角速度 $\omega \times$ 半径 R) / U) λ 、縦軸は水車性能をあらわす出力係数 $C_p (P / \text{水車の掃過面積あたりの流体保有エネルギー})$ である。また図中の黒丸は実験結果を、点線は風車の解析の際に一般的となっている翼素運動量理論 (BEMT: Blade Element Momentum Theory) による計算結果、実線は本研究で開発した三次元パネル法による解析結果を表している。水槽試験を行った結果から、設計通り $\lambda=5$ で最大の出力係数が得られており、更に比較的低周速比域において C_p が大きな値となっている。また、計算と実験の結果を比較すると、設計点付近の領域において、BEMT および三次元パネル法双方とも信頼性の高い結果が得られている。設計周速比を離れると、パネル法の計算精度が下がるが、これは計算の定義上、翼表面から流れが剥離する影響等を含むことができない為である。

(3) 水車性能に及ぼすシュラウドの影響

①シュラウド設置の水車性能への影響

開発した計算ツールを、シュラウド付き水車へ適用し解析を行った。対象としたシュラウドは、流入側直径 D_I が流出側直径 D_O よりも大きな ($D_I > D_O$) ノズルタイプと $D_I < D_O$ となるディフューザータイプの 2 種類であるシュラウド断面は翼断面 (NACS0015) とし、それぞれの小さい方の直径を 255mm、大きい方の直径を 275mm、平均直径 $D (D_I > D_O) / 2$ とシュラウド長さ: L の比 $L/D=0.2$ とした。また水車の位置は、ノズルタイプは流出部、ディフューザータイプは流入部とした。ノズルタイプシュラウドの概略図を図3に示す。なお、流入側は紙面左側とする。

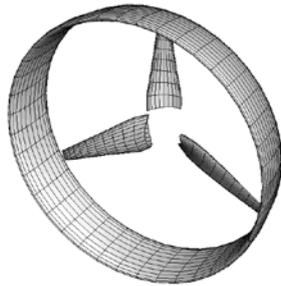


図3 シュラウドに囲まれた水車の概略図

それぞれのシュラウドと水車単体の出力係数の比較を図4に示す。

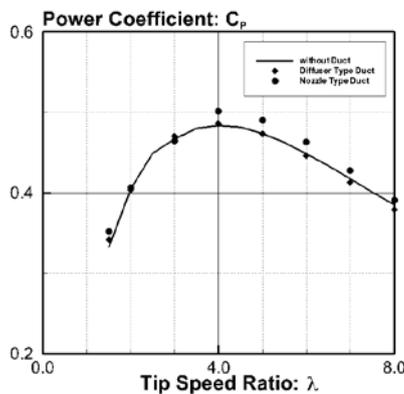


図4 シュラウドの有無による出力係数の比較

水車の出力係数へのディフューザタイプシュラウドを付加することの効果は、低周速比側で多少見られるだけである。一方、ノズルタイプのシュラウドについては、周速比4以上の領域でいずれも水車単体よりも大きな出力係数となっていることが判明した。その値は、最大で7%ほどである。

②シュラウド長さの影響

シュラウド長さの水車性能への影響について、比較計算を行った。シュラウド長さは $L/D=0.1\sim 0.5$ で変化させた。計算条件としては、周速比 $\lambda=5.0$ で固定している。計算結果を図5に示す。

図5の横軸は L/D である。ディフューザタイプ、ノズルタイプ共にシュラウドが長くなることで出力係数が増加している。これは、シュラウド外の流れの影響が小さくなり、相対的にシュラウドの増速効果が現れやすいことなどが要因と考えられる。

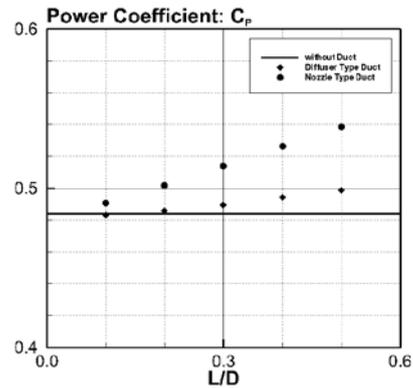


図5 出力係数へのシュラウド長さの影響

(5) まとめ

一様流中で作動する潮流・海流発電用水車と単体とこれを囲むシュラウドも考慮した三次元パネル法の性能計算手法を開発した。特に水車単体については計算と実験値の比較を行った結果、実用上問題のない精度であった。また、水車をシュラウドで囲むことで、この増速効果により、水車性能が向上することを確認した。シュラウドの形状については、ノズルタイプの方が、より出力係数の増加率が大きく、シュラウドの長さについては、 L/D の増加が出力係数の増大へつながることを明らかにした。

これらのアイデアを採用することにより海流発電用水車の出力増大効果が見込まれ、更に研究を継続することで実用に資するものとなっていくものとする。東日本大震災によって、自然エネルギーへの注目度は研究当初よりも格段に高まっているため、コスト面なども含めた導入や運用面に関する検討も必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

(1) 渡辺幸夫、伊藤政光、潮流・海流発電用水車の高出力化に関する研究、日本機械学会東海支部第62期総会講演会講演論文集、査読無、133-1巻、2013、241-242

(2) 渡辺幸夫、工業分野における汎用熱流体解析ソフトウェアの応用に関する研究、鳥羽商船高等専門学校紀要、査読無、34巻、2012、73-74

(3) 渡辺幸夫、伊藤政光、翼断面形状を有するシュラウドを用いた潮流発電用水車の高出力化、環境技術、査読有、40-11巻、2011、22-25

(4) Daisuke Yanagihara, Hidetsugu Iwashita, Yukio Watanabe, A Passive Pitch-Angle Control of Blades for the HAWT Using Fiber-Reinforced Rubber, Journal of Environment and Engineering, 査読有, Vol. 6-4, 2011, 869-881

(5) 柳原大輔、岩下英嗣、渡辺幸夫、繊維ゴムを用いたパッシブピッチ角制御機構付き水平軸型風車の性能予測、日本機械学会論文集B編、査読有、77巻(784号)、2011、161-172

〔学会発表〕(計3件)

① 渡辺幸夫、潮流・海流発電用水車性能に対するシュラウドの影響、日本船舶海洋工学会春季講演会、2011年5月19日、福岡県中小企業振興センター

② 渡辺幸夫、潮流・海流発電用水車の高出力化に関する研究、日本機械学会東海支部第62期総会講演会講演会、2013年3月19日、三重大学

③ 渡辺幸夫、オートジャイロローターによる船舶推進について、日本船舶海洋工学会春季講演会、2013年5月28日、広島国際会議場

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 幸夫 (WATANABE YUKIO)

鳥羽商船高等専門学校・商船学科・准教授

研究者番号：20332033