

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560201

研究課題名(和文) 潮汐と潮流に進出する相反転方式発電ユニット：明日への布石

研究課題名(英文) Counter-Rotating Type Tidal Range and Stream Power Unit: Challenge to the Future

## 研究代表者

金元 敏明 (Kanemoto, Toshiaki)

九州工業大学・大学院工学研究院・特任教授

研究者番号：90092642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)： 潮汐発電：干満潮に好適な双方向流ランナ形状を数値シミュレーションによって最適化した後、基本特性と流れの状態を実験的に調べ、(1)水力効率は一方向専用機と同等であり、(2)流れはブレードに迎え角を持って入りブレードに沿って流出し、(3)オンカム運転が可能なること、を明らかにした。

潮流発電：実験と数値シミュレーションにより、(1)パイルに働く流体力と係留式発電ユニットの姿勢を把握し、(2)ブレード翼素の翼厚、そり線、最大反り位置を好適化した後、半径方向翼負荷分布の好適化によるブレード端渦の抑制、水深に応じたキャビテーション初生以下のプロペラ回転速度を考慮するプロペラの設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)： Tidal range power unit: The blades of the tandem runners suitable for the falling and the rising tides were optimized and the performances were confirmed as follows. (1)The hydraulic efficiency corresponds to the efficiency of the blades designed exclusively for the one directional flow. (2)The unit can be provided for on-cam operations. (2)The flow attacks to the leading edge with the large angle and discharges along the blade camber to get the momentum change.

Tidal stream power unit: The experiments in the water tunnel bring (1) hydraulic forces acting on the pile and (2) behaviors of the unit moored with one rope. The tandem propeller were also optimized through the numerical simulation and the experiments. That is, (3) the blade thickness, the camber and the position of the maximum camber, (4) the blade load in the radial direction to suppress the blade tip vortex, and (5) the rotational speeds to suppress the cavitation, were optimized to get the higher efficiency.

研究分野：流体力学

キーワード：海洋資源 再生可能エネルギー 新エネルギー 潮汐発電 潮流発電

### 1. 研究開始当初の背景

持続可能な循環型社会の構築が急務な今日、次世代に負の遺産を渡さないためには、人口問題、食糧問題、水問題とともに、エネルギー問題を着実に解決する必要がある。このままでは人類にとって致命傷でもあるエネルギー危機が訪れるのは必至であり、日本は世界で最初に迎えるかもしれないほど切迫している。人類ひいては地球を救うためには、再生可能な自然エネルギー資源の有効利用に向けて、早急に行動すべきであろう。

世界の内陸包蔵水力は 2TW、包蔵風力は 72TW である(世界の総需要量 1.4TW)。これに対し、地球表面の 2/3 を覆っている海洋は、上記に比べて理論上 3 桁以上の潜在エネルギー  $2 \times 10^3$  TW を包蔵している。この潜在能力は一面、希望を持たせてくれるが、従来技術の延長線上で対応できるほど楽観的なものではない。残っているだけに、あらゆる面で使いづらい資源が多く、将来に向けて、それぞれの海洋環境に適した技術を準備しないと、取らぬ狸の皮算用になりかねない。

近年、英国やノルウェーを始めとして、各国で波力、潮汐/潮流、海洋温度差発電が試みられているが、万民が認める技術は未だ登場していない。また、IEC では海洋発電に関する規格化を早々と進めているが、日本は実績不足で傍観的立場にある。また、隣の韓国は世界最大の潮汐発電実績を有しているが、世界最高の水車技術を誇る日本の企業を尻目に、スイスの VA TECH HYDRO GmbH が開発設計し中国で製造されている。

### 2. 研究の目的

上記が起爆剤となり、本研究では、海洋が持つ運動エネルギーの潮汐と潮流を有効利用する新たな発電技術を世界に先駆けて提供することを目的とした。

潮汐/潮流エネルギーの吸収に向けて、プロペラ形、ダリウス形などの従来形式タービンが提案されつつある。これらとは設計思想を異にし、筆者は前後二段の羽根車と内外二重の回転電機子を持つ発電機で構成された全く新しい“相反転方式”を世界で初めて提案している。二段の羽根車が内外回転電機子を互いに逆方向に駆動するので、(a)磁界を切る速度が速くなり、発電機径の縮小、起電圧の増加、極数の減少、回転速度の減少(キャピテーション対策に有利)を可能にし、(b)前後の羽根車間および内外の回転電機子間で回転トルクが相殺され、外部に反作用が働かないので頑強な据え付けベッドやパイルを必要としないなど、いかなる海洋環境にも容易に対応できる隠れた才能も持っている。

#### (1) 潮汐発電の研究課題

相反転方式では、上述のように回転トルクすなわち前後の羽根車(ここではランナと呼ぶ)を通る流れの角運動量変化が同じ所で運転されるから、軸方向流入した流れは軸方向流出する。したがって、本方式(図 1)は湾岸

や入江に設けた堰での干満差(潮汐)による双方向流に対して簡易大容量

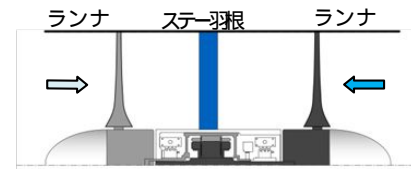


図 1 双方向流相反転方式潮汐発電ユニット例

発電を可能にする。これを具現化して世に送り出すためには、(a)双方向流に適したランナ形状を求め、(b)設置場所が陸上近傍なので大容量系統連系が前提となるから、干満(落差)変化によるオンカム運転を実現する必要もあろう。

#### (2) 潮流発電の研究課題

潮流発電では速度エネルギーを利用するので自由流中に羽根車(ここではプロペラと呼ぶ)を設けることになる。前記特徴は本発電ユニットを海底あるいは海上から策 1 本で係留(図 2)できることを意味している。上述の潮流発電と密接に関連しているが、別途に解決すべき課題として、(a)潮流がプロペラを通過する際、半径外向き流れが生じるので、新たな設計法が必要となり、(b)振動問題にも関係する深度に応じて変化するキャピテーション特性と非正常特性の把握、(c)係留式ではプロペラと係留索の絡まり防止とプロペラ姿勢の確保が必要となる。

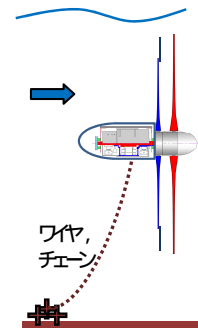


図 2 相反転方式潮流発電ユニット(係留式)

### 3. 研究の方法

潮流発電では干満差 0.2m ~ 15m を対象とし、(a)双方向流に適したランナ形状を求め、(b)相対回転速度を一定に保ったまま上記干満差に対する最高効率および最高出力のオンカム運転を保证する。

潮流発電では流速 1m/s ~ 8m/s を対象とし、(a)発電ユニットに働く流体力を把握して適切な搭載技術を求め、かつ(b)プロペラ形状の好適化を図る。

以上の成果を統合して、潮汐/潮流発電ユニットとして望ましい姿を求めめるため、実験と並行して、ANSYS CFX14.0 による流れや性能の数値シミュレーションを行う。本来の姿はタンデムランナ/プロペラと内外二重回転電機子方式発電機との組み合わせとなるが、実験ではインバータで回生制御できる電動機 2 台を用いて、前後段プロペラの回転トルクが一致するようにそれぞれの回転速度を調節した。このとき、測定値に予め調べておいた軸受などの機械損失動力を加算することによってランナのみでの性能を求めた。機械損失動力については、ランナ/プロペラを空転させてトルク検出器にかかる軸トルクを測

定し、その軸トルクと回転速度から算出することにした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 潮汐発電

1 双方向流ランナの性能と流れ 一方方向流のランナと同様に軸方向に流入した流れは前段ランナに回転トルクを与え旋回流となる。その旋回流は後段ランナに前段とは逆方向の回転トルクを与え軸方向に流出する。このような流れを実現するとともに、流れ方向に依存せずに運転が可能になるように設計されたランナブレード D(ランナ径 245mm)の断面形状を図3に示す。NACA0009翼型を参考にした厚みを分布させたが、双方向流に対応させるために前後縁形状が同一で反りのない対称翼素からなり、角超過を持たず自由渦型となるように捻りが与えられている。前後段ランナ羽根の相違点は捻りのみであり、数値シミュレーションによって、できるだけ剥離が抑えられ、かつ軸方向流入流出となるように設計されている。

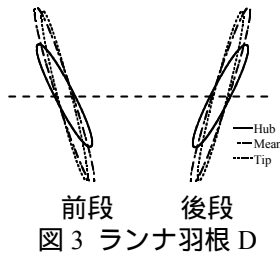


図3 ランナ羽根 D

流量を一定に保ち、前後段の回転速度を変化させて性能を測定した結果、各実験データは相似則を満たし、羽根枚数によらず単位相対回転速度  $N_{11}(=nDH^{1/2})$ ,  $n$ : 相対回転速度,  $D$ : ランナ径,  $H$ : 落差)に対して類似の性能を示す。最高出力が得られる単位回転速度が存在するが、羽根枚数が少ないランナほど高回転速度側で高出力となり、単位流量  $Q_{11}(=Q/(D^2H^{1/2}))$ ,  $Q$ : 流量)も幾分多い。すなわち、羽根枚数の減少につれて低比速度型から高比速度型になる。単位相対回転速度の減少に伴って単位流量も減少するので、水力効率は適度な  $N_{11}$  で最高値となり、その値は 0.80~0.85 程度に達し、従来の単方向流ランナの効率と遜色ない。

また、前後段の羽根枚数を入替えても最高効率、最高出力、単位流量ともほぼ同じ値を示す。羽根枚数の入替えは流れ方向が逆転したことに相当するから、本方式が双方向流に適用できることを証明している。

2 ランナまわりの流れ 最高出力運転におけるランナ前後の軸方向から測った相対流れ角  $\beta$  の一例を図4に示す。ここに、 $Y$  は流路幅で無次元化したハブ壁からの距離、図中の点線は羽根の翼弦方向  $\beta_{th}$  (反りがないので出入口角は同じ)、M1, M2, M3, M4 は前後段ランナそれぞれの入口、出口測定断面である。双方向流用のランナにおいても軸方向流入、軸方向流出になり、反りがないため、前後段ランナともに大きく衝突流入し、羽根に沿って流出することで角運動量変化、すな

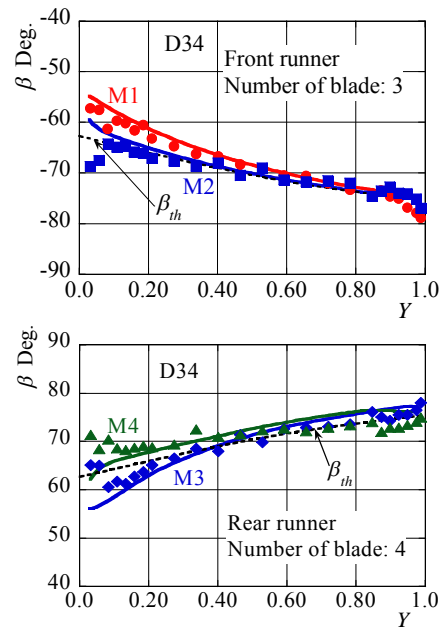


図4 相対流れ角 (Runner D34)

わち出力を得ている。なお、流れ方向が逆転してもランナまわりの流れはほとんど同じである。

3 オンカム運転 任意の流量、潮位差に対して羽根角を変化させ、最高効率点で運転を行うオンカム運転について検証するため、羽根取付け角を種々に変化させて性能試験を行った。オンカム運転における回転速度は 8 極の発電機を想定して西日本地域の系統周波数 60Hz となるように、前後段ランナの相対回転速度を  $900\text{min}^{-1}$  に保ち、なおかつ発電ユニットの運転条件を考慮して、前後段ランナに働く回転トルクが一致する回転速度で実験した。

図5に前後段とも3枚の羽根Dからなるランナの羽根角を変化させた単位流量  $Q_{11}$ , 単位相対回転速度  $N_{11}$  に対する水力効率  $\eta_h$  分布(オンカム目玉曲線)の一例を示す。ここに、前後段の羽根取付け角  $\theta_f, \theta_r$  [deg] は設計点からの偏差角で表し、スタッガ角が大きくなる方向(羽根を周方向に寝かせる方向)を正とした。また、図中の細線は羽根角を変化させた単位流量  $Q_{11}$  に対する単位相対回転速度  $N_{11}$  である。同じ効率の点を線でつなぐことで、相反転方式水力発電ユニットでも一般の単段の水車と同様にオンカム特性を等値線図で表すことができる。目玉曲線の中心で比較すると、羽根枚数が多いほどすなわち低比速度型ほど単位相対回転速度は遅くなる傾向にあるが、単位流量はほぼ同じである。

図6に図5の目玉曲線から求めた、オンカム運転時の単位流量  $Q_{11}$  に対する単位相対回転速度  $N_{11}$ , 単位出力  $P_{11}[=P/(D^2H^{3/2})]$ : m, kW,  $P$ : 軸出力], 水力効率  $\eta_h$  および前後段羽根の取付け角  $\theta_f, \theta_r$  を示す。 $N_{11}$  の増加につれて  $Q_{11}$  と  $P_{11}$  は増加し、 $\theta_f$  と  $\theta_r$  は減少傾向にあるが、最高効率は  $N_{11} = 350 \text{ m, min}^{-1}$  付近で得られる。このような傾向は羽根枚数および羽根形状に依存しない。



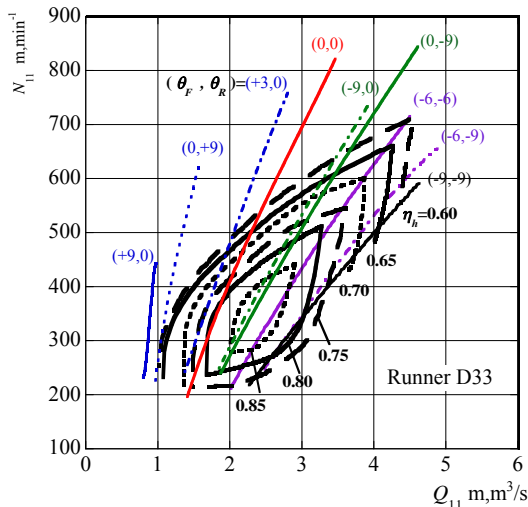


図5 最高効率点のオンカム目玉曲線

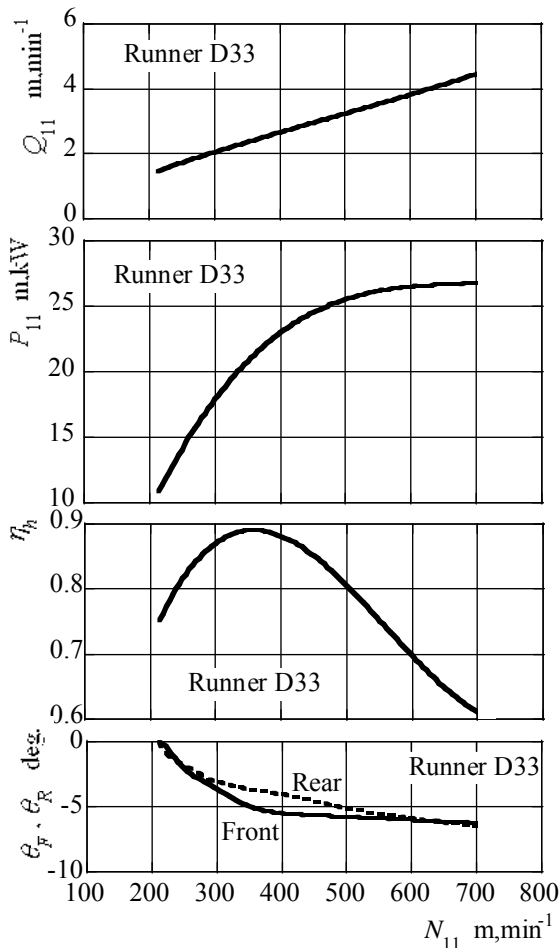


図6 オンカム運転時の性能

(2) 潮流発電

1 発電ユニットの運転 相反転プロペラを有する潮流発電ユニットの実運転状態をまず調べることにした。図7に出力特性を示す。ここに、出力係数は  $C_p = P / (\rho A V^3 / 2)$  [ $P$ : 出力,  $\rho$ : 密度,  $V$ : 流速,  $A$ : 受流面積 ( $A = \pi d_F^2 / 4$ ), 添え字  $max$ : 最大出力係数] から算出し,  $\lambda_T$  は相対周速比 [= (ティップ位置での相対回転速度) / (風速  $V$ )] を示す。白丸プロットはインバータで回生制動できる電動機を用いてプロペラの発生動力を制御した場合、塗潰しプロットは回転速度にかかわらず機械的な負荷トルクを持つ場合である。相対周速比約  $\lambda_T = 8$  で最高効率を得られているが、機械的負荷トルクがかかっている場合、次のような理由で低回転速度での運転ができない。一定流速下にあるプロペラは、非常に大きな迎え角でも回転を開始できれば(たとえば無負荷)、回転速度の増加に伴って迎え角は減少して好適迎え角に達し、回転トルクも増加する。さらに回転速度が増加すると迎え角の減少に伴うトルクの減少により回転速度が遅くなり、再度迎え角が増加して安定運転が実現される。すなわち、何らかの外因で負荷が増加すると回転速度は減少して迎え角が大きくなり、負荷が減少すると回転速度の増加により迎え角が小さくなり、元の状態に復元する。これに対し、負荷を伴って上記より過大な迎え角になると、失速により回転不能となる。自然流でのプロペラ回転速度は水流と負荷によって自動的に定まるので、低負荷では高速回転して安定領域運転に達し、過大な負荷ではプロペラの発生トルクがブレーキ効果を賄い切れず回転速度が急減して運転不能となる。すなわち、回転速度に対して適切な負荷が存在し、無負荷始動が望ましい。なお、白丸プロットは風洞でモータを介して強制的に回転させているため、迎え角の大きい低周速域のデータも取得できるが、実運転状態とは異なる。

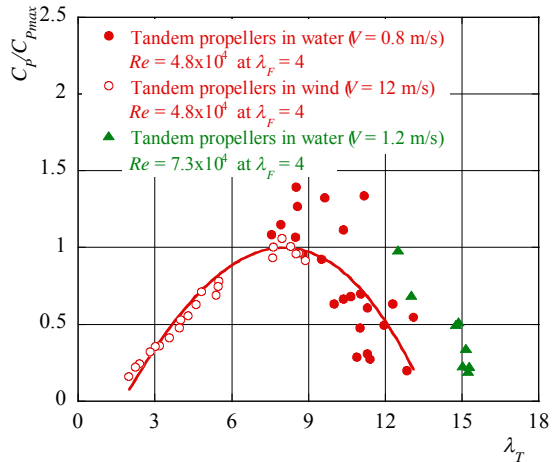


図7 モデル発電ユニットの運転

2 パイルに働く流体力 本発電ユニットを搭載するパイルの設計資料を得るため、パイルに働く流体力を調べた。パイルに働く軸方向の抗力係数  $C_{DX} [= F_X / (\rho A V^2 / 2)$  ( $F_X$ : パイルに働く軸方向力)] は相対周速比約  $\lambda_T = 11$  のとき約  $C_{DXmax} = 0.83$  であり、流速にかかわらずほぼ一定となる。

図8は水流に対して垂直方向に働く流体力  $C_{DY} [= F_Y / (\rho A V^2 / 2)$  ( $F_Y$  はパイルに働く垂直方向力)] を示す。ここに、垂直方向力  $F_Y$  は前段プロペラの下端でみた回転方向を正とし、

タンデムプロペラの後段プロペラを取り除き前段プロペラのみで運転させた結果 (Front propeller) も併記した。前段プロペラのみ、すなわち従来形式の単段プロペラを最高出力が得られる最適なブレード取付角  $\beta_F = 0 \text{ deg.}$  で運転させた場合、一方向に偏った垂直方向流体力がパイルに作用していることが確認できる。あたかもプロペラがパイルと一体化したときのような、パイル支持点まわりのモーメントが発生する。これに対し、本発電ユニットで採用している相反転方式は、回転トルクが増加しても、垂直方向流体力がほとんど発生していないことがわかる。すなわち、相反転方式は前述のように回転トルクを相殺し、発電ユニットの外部、つまりパイルに反作用が働いていないことが確認できる。

タンデムプロペラの回転及び動バランスがパイルに及ぼす影響を調べるため、パイルに働く力の周波数分析を行った。タンデムプロペラの動バランスが不釣合いのとき、パイルに働く垂直方向流体力のスペクトル密度の卓越周波数は、前段プロペラの回転周波数と後段プロペラの回転周波数にほぼ一致し、タンデムプロペラの動バランスが重要なことが確認できた。

図9に予め動バランスの不釣合いを取り除いたときの、垂直方向流体力のスペクトル密度分布を示す。各プロペラの回転に伴う卓越周波数(前段  $N_F = 187 \text{ min}^{-1}$ :  $f_F = 3.1 \text{ Hz}$ , 後段  $N_R = 227 \text{ min}^{-1}$ :  $f_R = 3.9 \text{ Hz}$ )は弱まり、動バランスがパイルの振動に影響することが再認識できる。図中には、各プロペラの回転とは異なる卓越周波数も示している。Hanson は自由空間内にある二重反転プロペラの干渉の周波数は  $f = |mZ_R N_R + kZ_F N_F|$  [ $m$ : 自然数,  $k$ : 整数 (- ~ +)] で与えられることを見出しており<sup>2</sup>, これから推定される卓越周波数とよく一致する。

水流に対して垂直方向の流体力の卓越周波数には、各プロペラの回転周波数と干渉周波数以外にも卓越周波数  $f = 5.0 \text{ Hz}$  が確認できる。これは対称翼型パイルから発生するカルマン渦と考えられる。カルマン渦の発生周波数は  $f_K = S_r V / d$  ( $S_r$ : ストローハル数,  $d$ : 代表長さ) で与えられ、パイルの流れ方向投影幅を等価直径  $d = 25 \text{ m}$  とした周波数とほぼ一致している。

以上の結果は、発電ユニットを設置するパイルの設計に際して、流れ方向の抗力とともに、各プロペラの回転周波数、前後段の干渉周波数、カルマン渦、さらにはこれらの共振も考慮する必要があることを示唆している。

係留方式については、上述のような流体力が発電ユニットの姿勢を左右する。現象が複雑なので詳細は文献<sup>3</sup>に譲るが、加速度と角速度は流れ方向成分が大きく、それらの力の

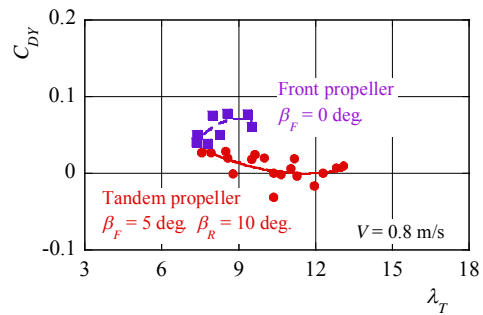


図8 パイルに働く流れに垂直方向の力

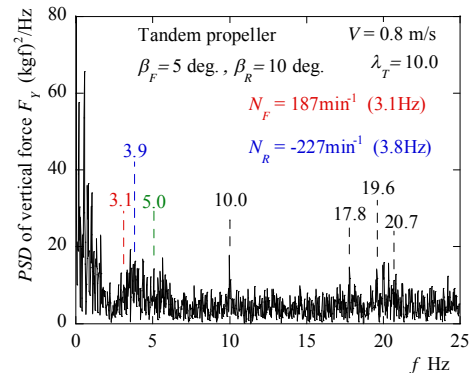


図9 パイルに働く流れに垂直方向の非定常力スペクトル密度

作用により発電ユニットは流れに対して幾分傾いて変動する

3 プロペラ形状の最適化 数値シミュレーションと実験を併用して潮流発電に適したタンデムプロペラの高効率化を試みた。高効率が期待できるプロペラの設計は、(1)翼素について翼厚、そり線、最大反り位置の最適化を行い、高揚抗比で高出力が期待できる翼素を決定し、(2)ブレード端離脱渦の抑制を考慮して半径方向翼負荷分布を最適化し、(3)水中におけるキャビテーション発生を抑制するため、発電ユニットを設置する水深に応じたキャビテーション初生以下のプロペラ回転速度を選定すればよい。このとき前段プロペラはハブ側で無負荷とし半径の大きいところで大部分のトルクを発生させる半面、ティップ近傍ではトルクの発生を抑える。後段プロペラは全域でトルクを発生させるとともに、発電機を高効率で運転させるために相対回転速度増加の任務を負わせる。

上述の方法で求めた前段ブレード B, 高さが違う後段ブレード B および C (前後段直径比は前者が 0.84, 後者が 0.9) を組み合わせたプロペラの出力係数  $C_p$  を図 10 に示す。風車用として設計した Tandem propeller AA の  $C_p$  に比べて大幅に出力係数は向上し、Tandem propeller BC の最高出力係数は 43% となる。

4 出力に及ぼすレイノルズ数の影響 規模に限りがある実験室で得られる出力は実機にそのまま適用できない。そこで、前段プロペラの出力係数に及ぼすレイノルズ数 ( $Re = wC_r / \nu$ ,  $w$ : プロペラ端の相対速度,  $C_r$ : 翼弦長,  $\nu$ : 動粘度) の影響を調べた (図 11)。本

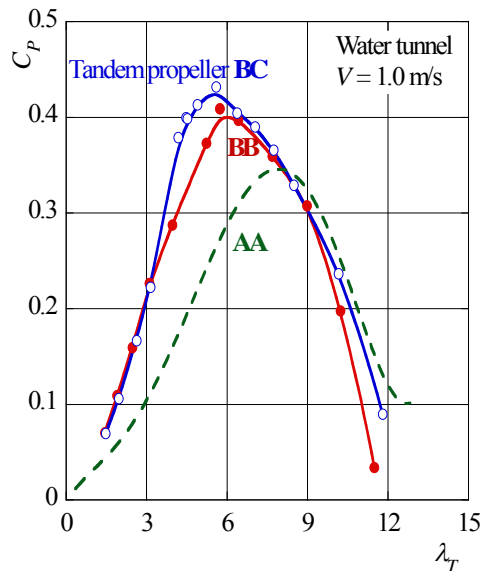


図 10 出力係数

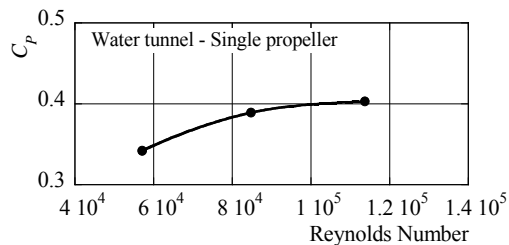


図 11 出力係数に及ぼすレイノルズ数の影響

実験範囲では、レイノルズ数の増加に伴い、効率は増加する。

<引用文献>

- 1 Daisuke Tanaka and Toshiaki Kanemoto, Experimental Study on Design Materials for Solidity of Counter-Rotating Runners, Proceedings of the 23th IAHR Symposium, (2006), F147. pdf
- 2 Hanson, D.B., Noise off Counter-rotating Propellers, Journal of Aircraft, Vol. 22, (1985), pp. 609-617.
- 3 Yuta Usui, Toshiaki Kanemoto, Kohei Takaki and Koju Hiraki, Counter-Rotating Type Tidal-Stream Power Unit Moored by Only One Cable, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.8, No.12, pp.2089-2095 (Dec. 2014).
- 4 Kubo, K. and Kanemoto, T., Development of Intelligent Wind Turbine Unit with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armatures (2nd Report, Characteristics of tandem wind rotors), JSME International Journal of fluid science and technology Vol.3, No.3, (2008), pp. 370-378 & Kanemoto, T. and Kubo, K., Wind Power Generation and Wind Turbine Design Chapter.10, (2010), pp. 333-361.

5 . 主な発表論文等  
〔雑誌論文〕(計 8 件)

- 1 Yuta Usui, Toshiaki Kanemoto, Kohei Takaki and Koju Hiraki, Counter-Rotating Type Tidal-Stream Power Unit Moored by Only One Cable, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.8, No.12, ( Dec. 2014 ), pp.2089-2095. 査読有
- 2 Yuta Usui, Toshiaki Kanemoto, Kohei Takaki and Koju Hiraki, Counter-Rotating Type Tidal-Stream Power Unit Mounted on a Mono-Pile, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.8, No.10, pp.1748-1755, (Oct 2014) 査読有
- 3 Toshiaki Suzuki and Toshiaki Kanemoto, Counter-Rotating Type Tidal Range Power Unit, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.7, No. 12 (Dec. 2013), pp.2381-2387. 査読有
- 4 Yuta Usui, Toshiaki Kanemoto and Koju Hiraki, Counter-Rotating Type Tidal Stream Power Unit boarded on Pillar (Performances and Flow Conditions of Tandem Propeller), Journal of Thermal Science, Vol. 22, No. 6 (2013, Dec.), pp. 280-585. 査読有
- 5 Yuta Usui, Kohei Takaki, Toshiaki Kanemoto and Hoju Hiraki, Counter-Rotating Type Tidal-Stream Power Unit Playing Favorable Feature in Various Ocean Circumstances, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Diego (2013, Nov. 15-21), IMECE2013-66001. 査読有
- 6 Toshiaki Suzuki and Toshiaki Kanemoto, On-Cam Operation of Counter-Rotating Type Hydroelectric Unit, Journal of Energy and Power Engineering, 7(Oct. 2013), pp. 1966-1973. 査読有  
〔学会発表〕(計 7 件)

- 1 Bin Huang, Yuta Usui, Kohei Takaki, Toshiaki Kanemoto, Optimization of blade setting angles of a counter-rotating type horizontal-axis tidal turbine using response surface methodology and experimental validation, Proceedings of AFORE2014, Yeosu, Korea. (Nov. 18, 2014).
- 2 Yuta Usui, Kohei Takaki, Toshiaki Kanemoto, Koju Hiraki and Kohki Yoshida, Counter-Rotating Type Tidal-Stream Power Unit Boarded on Pillar, Proceedings of the 11st International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Ahezen, China (May 8, 2013), JP15.
- 3 高木康平・白井祐太・金元敏明, 相反転方式潮流発電ユニットの研究開発, 日本機械学会第 91 期流体工学部門講演会, 福岡 (2013 年 11 月 9 日), No.1001

6 . 研究組織

(1) 研究代表者  
金元 敏明 (KANEMOTO Toshiaki)  
九州工業・大学工学研究院・特任教授  
研究者番号：90092642