

単索係留された相反転プロペラ式潮流発電ユニットの高出力化

村上 天元^{*1}, 金元 敏明^{*1}

Improvement of Output Power of a Counter-rotating Propeller Type Tidal Stream Power Unit Moored with One Cable

Tengen MURAKAMI^{*1} and Toshiaki KANEMOTO^{*1}

^{*1}Institute of Ocean Energy, Saga University
1, Honjo, Saga-City, Saga, 840-8502, Japan

Abstract

Tidal stream is expected as a high-integrity energy source in the world because the time change of flow direction and flow velocity are predictable. Tidal stream energy extraction devices can be categorized as a horizontal axis system and a vertical axis system. The authors have developed a horizontal axis counter-rotating type power unit which is applied in the conversions of wind energy and tidal energy. A counter-rotating type tidal stream power unit is composed of tandem propellers driving double rotational armatures, while the rotating torques are counter-balanced in the power unit. The power unit can be moored with one cable and keep the posture stable without rolling motion in the tidal stream, in which the cable is hooked at the balancing point of the moment among the buoyancy, gravity and drag. The posture, however, may lose balance by a dynamic disturbance. The capability to set the rotational planes of tandem propellers equal to the flow direction is required for high output power. In order to keep the posture stable in every circumstance, the winglets were installed on each rear blade. In this research, effectiveness of winglets in case mooring with a wire at near the water surface was verified by the circular water channel test. Besides, the performances in two cases with and without winglet were analyzed by 3-D steady numerical simulation.

Key words : Tidal Stream, Power unit, Counter-rotating, Tandem Propellers, Posture

1. 緒 言

潮流は、潮の干満によって規則的に起こる往復流であり、長期にわたって予測可能なため、比較的信頼性の高いエネルギー源と言える。本研究では、持続可能な循環型社会の構築に向けて、未開発の流動包蔵エネルギーを効率良く吸収する簡易発電ユニットの開発を目的としている。プロペラ形、ダリウス形などの従来タービンも高効率化を達成しつつあるが、ここでは、前後二段のプロペラが内外二重回転電機子をそれぞれ駆動する相反転方式 (Kubo, et al., 2008) を採用する。相反転方式は、前後のプロペラ間および内外の回転電機子間で回転トルクが相殺され、発電ユニットにローリングが働かない優れた特徴を有しており、1本の索だけで本発電ユニットを安定姿勢で係留できる可能性がある (Jung, et al., 2017)。その姿勢は浮力、重力、抗力がキーポイントとなり、発電ユニットを子午面上の回転モーメント中心で係留すると、抗力によってプロペラ回転面を流れに対面させることができる。但し、潮流の転流時、流れ方向の逆転に伴い、発電ユニット本体も 180 deg.向きを変えるため、係留索とプロペラとの接触や絡まりを回避する対策が必要となる。

本研究では、海面近くに弛緩係留した場合の発電ユニットの姿勢に及ぼすウイングレットの効果について回流水槽実験によって検証した。また、ウイングレット無しおよびウイングレット付きの場合のプロペラ性能を3次元定常数値シミュレーションにより求めた。

原稿受付 2021年10月12日

^{*1} 佐賀大学海洋エネルギー研究センター (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1)

E-mail of corresponding author: murakami@ioes.saga-u.ac.jp

2. 実 験

Fig. 1 はウイングレット無しおよび後段プロペラにウイングレットを有する発電ユニット模型を示す. いずれの場合も前段プロペラ枚数は3枚, 後段プロペラ枚数は5枚であり, プロペラ直径は, 前段 250 mm, 後段 237.5 mm である. 本模型に発電機は搭載されていない. Fig. 2 は回流水槽内に設置した発電ユニット模型が流れを受けて, 仮に姿勢が水平方向となった場合の配置を示す. 発電ユニット模型は, テーパーが施された厚さ 12 mm のステンレス板に1本のワイヤで弛緩係留されており, 流速は 0.7 m/s, 0.8 m/s, 0.9 m/s, 1.0 m/s の4通り変化させた. 回流水槽は, 幅 1 m, 水深 0.7 m である. 模型の姿勢はカメラで撮影した画像により求め, 前後段プロペラ回転速度はストロボスコープにより計測した.

Fig. 3 は, ウイングレット無し (PU₀) およびウイングレット付き (PU_w) の場合の, 水平とプロペラ回転軸とのなす角である傾斜角 α の流速による変化を表している. ウイングレットの有無によらず, 流速が高いほど模型の傾斜角は小さくなる事が分かる. また, いずれの流速においてもウイングレットを有する場合に傾斜角は小さく, 流速 1.0 m/s においてウイングレット無しの場合, 傾斜角は 19 deg. であり, 一方, ウイングレットを有する場合の傾斜角は 11 deg. と小さい値となった. Fig. 4 は前後段プロペラの相反回転速度をウイングレット付きとウイングレット無しの場合で比較している. 流速がいずれの場合も, ウイングレット付きの場合に相反回転速度は約 1.3 倍に増加しており, ウイングレットを設けることで高出力が得られる.

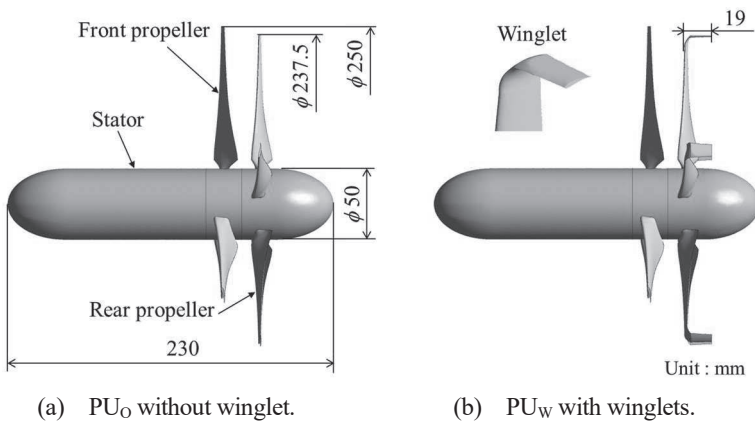


Fig. 1 Model turbine units.

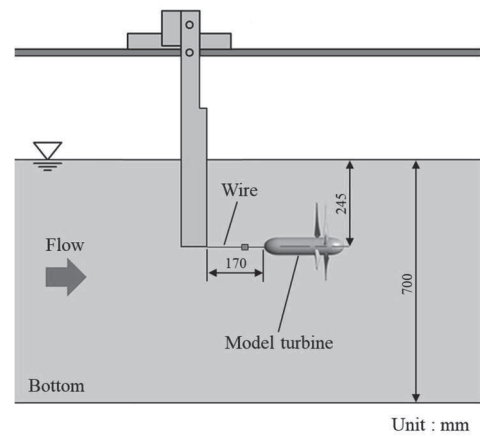


Fig. 2 Arrangement of model turbine in circular water tank.

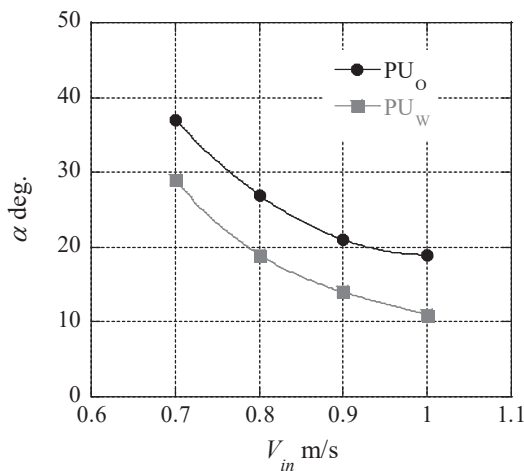


Fig. 3 Change in tilt angle due to flow velocity.

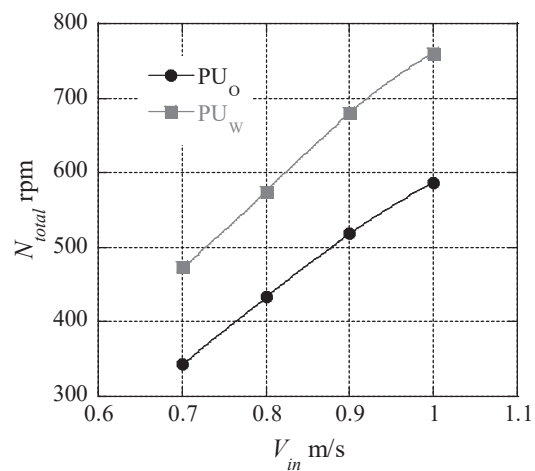


Fig. 4 Change in counter-rotational speed.

3. 数値計算

Fig. 5 はウイングレット無しの場合における計算領域を示す. 3次元粘性数値シミュレーションには, ANSYS-CFX ver. 19.0 を用い, 前後段それぞれ1ピッチ分流路を計算領域とし, 乱流モデルには SST を採用した. ウイングレット無しの場合の計算格子数は 1,953,847, ウイングレット付きの場合の計算格子数は 2,036,927 である. 入口流速は 1.0 m/s である.

Fig. 6 はトルク値の周速比による変化を比較している. 縦軸のトルク値は, ウイングレット無しの場合の後述の最高パワー係数が得られる周速比 $\lambda=6.4$ における単段当たりのトルク値との比を表している. 太線は前段プロペラ, 細線は後段プロペラのトルクを表している. 周速比 λ は以下の式で定義される.

$$\lambda_f = \frac{\omega_f R_f}{V_{in}} \quad (1)$$

$$\lambda_r = \frac{\omega_r R_r}{V_{in}} \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_f + \lambda_r \quad (3)$$

ここに, ω は回転角速度, R はプロペラ半径, V_{in} は入口流速, 添え字 f は前段, r は後段を表している. Fig. 6 に示すように, ウイングレット無しおよびウイングレット付きのいずれの計算結果も, 前後段トルクは良好に一致している. また, 周速比 $\lambda=6.4$ よりも高周速比側でウイングレット付きの場合にトルク値は僅かに低下した.

Fig. 7 は出力比を表す. 縦軸は, 以下の式で定義されるパワー係数 C_p を, ウイングレット無しの場合の周速比 $\lambda=6.4$ におけるパワー係数 $C_{p,ref}$ で除した値である.

$$C_{pf} = \frac{T_f \omega_f}{\frac{1}{2} \rho V_{in}^3 A_f} \quad (4)$$

$$C_{pr} = \frac{T_r \omega_r}{\frac{1}{2} \rho V_{in}^3 A_r} \quad (5)$$

$$C_p = C_{pf} + C_{pr} \quad (6)$$

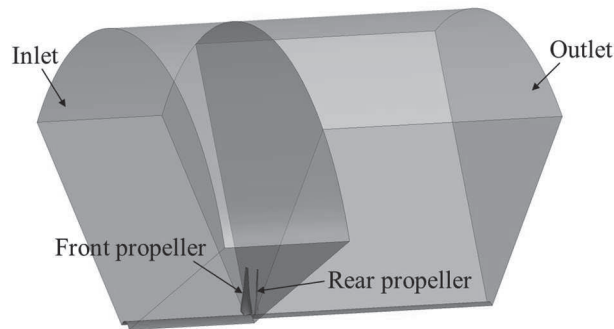


Fig. 5 Simulation domain in case without winglet.

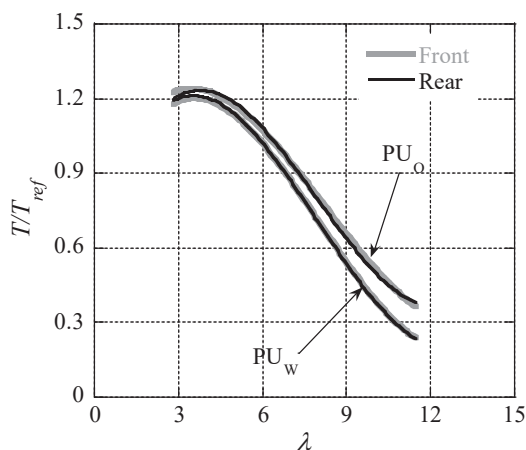


Fig. 6 Change in torque ratio due to tip speed ratio.

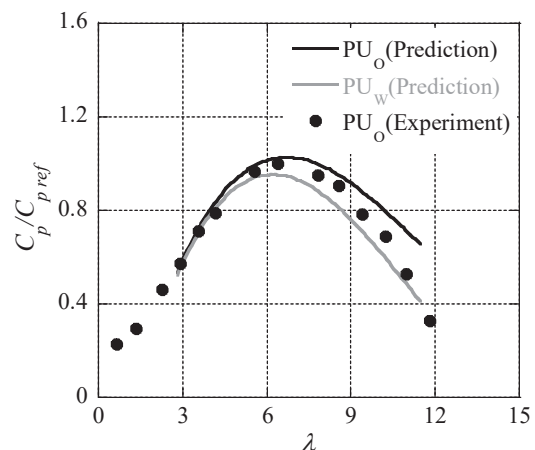


Fig. 7 Change in output ratio.

ここに、 ρ は水密度、 A はプロペラ投影面積を表す。また、Fig. 7の丸記号は実験結果、実線は計算結果である。ウイングレット無しの場合における計算結果と実験結果は、 $\lambda=10.0$ 近傍の高周速比側で違いが見られるものの、最高出力が得られる $\lambda=6.4$ 近傍から低周速比側において良好に一致している。計算結果の比較において、ウイングレット付きの場合、 $\lambda=10.0$ 近傍の高い周速比において出力が僅かに低下しているものの、ピーク値を示す $\lambda=6.4$ における出力比の値は0.94とウイングレット無しの場合と同レベルであり、低い周速比域においてはウイングレット無しの場合と出力はほぼ同じであった。

4. 結 言

本研究では、水面近くに単索係留した場合の相反転プロペラ式潮流発電ユニットの姿勢に及ぼすウイングレットの効果について回流水槽実験によって検証し、また、ウイングレット無しおよびウイングレット付きの場合のプロペラ性能を3次元定常数値シミュレーションにより求め、以下のことを明らかにした。

- (1) 流速1.0 m/sにおいて、ウイングレット無しの場合、傾斜角は19 degであったが、ウイングレットを設けることで11 degと小さくなる。
- (2) ウイングレットを設けることで相反回転速度は約1.3倍に増速する。
- (3) ウイングレット無しの場合と比べて、ウイングレット付きの場合、 $\lambda=10.0$ 近傍の高い周速比において、僅かに出力が低下するものの、最高パワー係数が得られる周速比 $\lambda=6.4$ 近傍から低周速比側においては、出力はほぼ同じとなる。

文 献

- Kubo, K., Kanemoto, T., Development of intelligent wind turbine unit with tandem wind rotors and double rotational armatures (2nd report, characteristics of tandem wind rotors), Journal of Fluid Science and Technology, Vol.3, Issue 3 (2008), pp.370–378.
- Jung, H., Kanemoto, T., Liu, P., A numerical prediction of tip vortices from tandem propellers in the counter-rotating type tidal stream power unit, Journal of Power and Energy Engineering, Vol.5, No.12 (2017), pp.66-74.