

# 直線翼垂直軸型水流タービンの 海洋環境下への適用検討

DEVELOPMENT OF STRAIGHT WING VERTICAL AXIS  
HYDRO TURBINE GENERATION SYSTEM

鳥井正志<sup>1</sup>・大久保寛<sup>2</sup>・山根信<sup>1</sup>・関和市<sup>3</sup>・関田欣治<sup>4</sup>・相良景太<sup>5</sup>

Tadashi TORII, Makoto YAMANE, Hiroshi OOKUBO, Kazuichi SEKI,  
Kinji SEKITA and Keita SAGARA

<sup>1</sup>新日本製鐵株式会社 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

<sup>2</sup>正会員 新日本製鐵株式会社 (〒229-1131 神奈川県相模原市西橋本 5-9-1)

<sup>3</sup>工博 東海大学 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117番地)

<sup>4</sup>正会員 工博 東海大学 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

<sup>5</sup>東海大学 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117番地)

The tidal and sea current turbines are one of potential utilization of renewable energies as well as offshore wind ones. Although they possibly produce electricity efficiently because of high density of water to air and more steadiness of flow to winds, hydro turbine generation system is less employed than wind one. We are studying an application of Straight Wing Vertical Axis Hydro Turbine Generation Systems in the tidal current and waves. This paper presents the results of hydraulic model tests using 2-dimensional channel.

**Key Words :** sea current, tide, renewable energy, waves, hydroturbine

## 1. はじめに

再生可能エネルギーの一つである海潮流のもつ水流エネルギーと風力エネルギーを比較した場合、水の密度が空気の密度に比べて約3桁大きく、かつ流況が比較的安定していることから、相当の賦存量が期待できる。一方、風車で多くの実績をもつ直線翼垂直軸型風車は、垂直回転軸のまわりに複数の固定直線翼を持つシンプルな構造で、高い変換効率を有するとともに流向に対して無指向性である特色をもつ。そこで、直線翼垂直軸型風車を海洋の水流エネルギーの回収のための水流タービンに適用する検討に着手した。まず、潮流下における水流タービンの特性を検討するため平水中の曳航実験<sup>1)</sup>を行い、さらに本論文では波と流れが共存する状況下での適用性を検討するため、2次元造波水路を用いて、規則波を造波した状態で水流タービンを曳航し水車の回転状態、水流タービンに作用する荷重を検討した。

## 2. 研究の内容

水流タービンの回転応答特性とともに水流タービンに作用する荷重の設定は水車を支持する構造物を設計するうえで重要であり、本システムの経済性と安全性を左右する。そこで、水流タービンの水理実験用模型を用いて水流を模擬した平水中および波浪中における曳航実験を2次元造波水路(幅0.5m、長さ20m、水深0.4m)において行い、水流タービンの挙動を観察し、水粒子速度に対する水流タービンの回転応答特性および荷重特性を検討した。実機を想定した実験ではないが模型の縮率を1:50に想定した実験である。実験の種類と概要を表-1に示す。また、風車理論を用いて流体中のタービンの回転応答計算を行い、実験結果と比較した。用いた水流タービンの主要寸法は、風車半径:0.25m、翼弦長:0.1m、翼長(風車高さ):0.4mである。

図-1に実験の概況写真を示す。水流タービン模型をロードセルを介して曳航台車に取り付けて走行し水車に相対流速を生じさせて潮流を模擬した曳航実験を行い、曳航

力（潮流力相当），曳航速度（潮流速さ相当），回転数を計測した。曳航力をロードセル，曳航速度をポテンシオメータ，水車の回転数をフォトセンサによって計測した。

表-1 実験の種類とケース

実験の種類	曳航速度
①平水中曳航実験	7cm/s ~ 41cm/s
②波浪中曳航実験（迎波）	40cm/s
③波浪中曳航実験（追波）	40cm/s

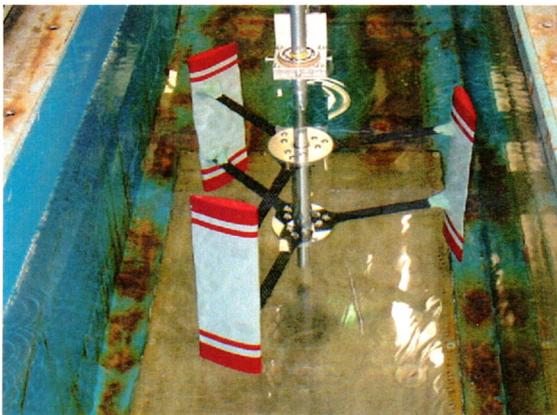


図-1 曳航実験の概況写真

### 3. 平水中における曳航実験

曳航台車から懸架した水流タービンを水路中で一定の速度で曳航し，水流タービンの回転数を計測した。曳航速度を7~41 cm/secに変化させたところ，約20cm/s が初期起動速度となった。水流タービンは若干の脈動を伴いながらほぼ一定速度で力強く回転した。図-2 は実験で得られた曳航速度と1分間あたりの回転数（r. p. m.）の関係を示したものであり，図中には単一流管理論を用いて算出したタービンの回転数の計算結果を併せて示す。

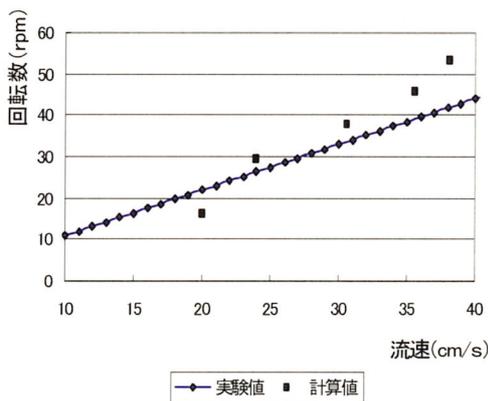


図-2 曳航速度と回転数の関係

図中に示す計算値は次式に示す水車の運動方程式を基に算出したものである。

$$I_p \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2} \rho V^2 S R C_T$$

ただし， $C_T$ ：トルク係数で

$$C_T = \frac{C_P}{\beta}$$

$I_p$ ：水車の慣性モーメント  $\omega$ ：回転角速度

$\rho$ ：水の密度  $V$ ：曳航速度

$S$ ：ブレードの投影面積  $\beta$ ：周速比

$R$ ：ブレードの回転半径

図-3 は計測した曳航力の時刻暦の一例（曳航速度36cm/sの場合）を示したものであり，横軸に経過時間，縦軸にロードセルで計測した曳航力を示し，併せて回転数を示している。曳航開始後，約4秒経過した時に曳航速度，回転がほぼ定常に達し，それ以降も，回転数及び作用荷重は一定値を中心に変動しており，この変動周期（0.5秒）はブレードが1回転する周期（1.55秒）をブレード枚数（3枚）で除した周期に近い。

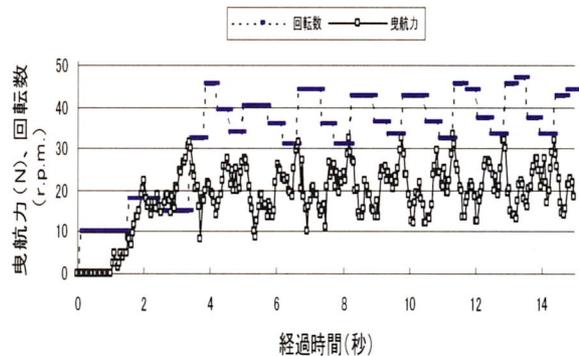


図-3 計測した曳航力の時刻暦

### 4. 波と流れの共存した状態での実験

曳航台車から懸架した水流タービンを造波した水路で一定の速度（約40cm/sec）で曳航した。実験に用いた波は規則波で，波高を10cmとし，波周期を0.9~2.6secの範囲に変化させた。

波向きと同じ向きに曳航した場合（以下，追波状態と言う。）と波向きと逆方向に曳航した場合（以下，迎波状態と言う。）について実験した。

ブレードの回転数及びロードセルを用いてブレードに作用する荷重を計測した。定常に達した状態をデータ解析の対象にした。

### (1) 迎波中での実験結果

水流タービンは波による脈動を伴いながら一定方向に力強く回転し、波周期によらず、ほぼ一定の回転数(41~46rpm)であり、平水中での曳航実験結果の回転数(40.8cm/sの曳航速度で45.7rpm)に比べるとその差は小さく、波が水流タービンの平均回転数に及ぼす影響は小さい。

次に水流タービンに作用する荷重特性に波が及ぼす影響について記述する。図-4は迎波中において水流タービンに作用する荷重の計測結果を示したものであり、横軸に波周期、縦軸にロードセルで計測した荷重を示している。図中には、実験で計測した作用荷重の時刻歴から読み取った最大値(記号◆Exp Max)、最小値(記号■Exp Min)および平均値(記号●Exp Mean)を示し、併せて計算値(記号△Cal)を示している。図中の計算値はCd(1.0を仮定)、投影面積(半径20cmの円筒形を想定)及び水粒子速度の自乗と水の密度を乗じて算出した抗力である。水粒子速度とは曳航速度と波粒子速度の和及び差であり、水流タービンと水粒子との相対速度を示すものである。波粒子速度は、タービンの軸での波粒子速度を微小振幅波理論を用いて水面及びブレードの中央位置の水深に対応して算出した値である。平均荷重値(記号●EXP Mean)を参照すると、12 N~23Nであり、平水中で計測した平均荷重値17 Nに比べるとやや大きくなった。

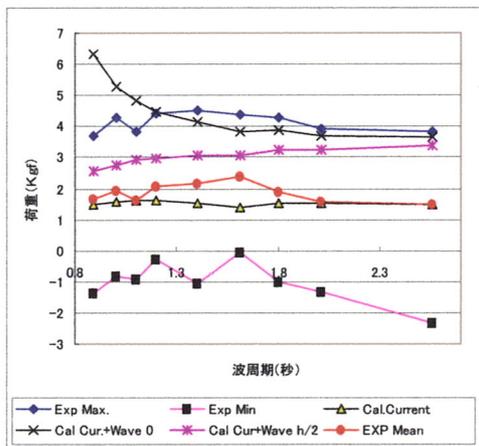


図-4 波周期が作用荷重に与える影響

### (2) 水粒子速度

ブレードとの相対速度である水粒子速度は、主に①曳航速度、②翼の回転によって生じる周速度、③波粒子速度に起因して生じている。これらの成分が水流タービンに作用する荷重に及ぼす影響度合を検討するために、各実験ケースについて波周期を変化させた場合の水粒子速度の3つの各成分の大きさの変化を図-5に図示し比較した。①潮流速度に相当する曳航速度(◆)、②周速度(x)及び③波粒子速度を算出し図中にプロットした。波粒子速度は静水面及びブレードの中央部の水深位置に

おける波粒子速度を微小振幅波理論により算出し、図中にそれぞれ記号■、△で示した。周速度(回転の円周波数に半径を乗じた値)は、87~95cm/secであり、波粒子速度、曳航速度に比べてかなり大きいことがわかる。また、作用荷重は速度の自乗に比例することから周速度が作用荷重に及ぼす影響が他の成分に比べると相対的に大きくなるため、回転し始め定常に達すると波の影響は相対的に小さくなった結果、曳航実験において波が回転数及び荷重に与える影響は小さくなったと考えられる。

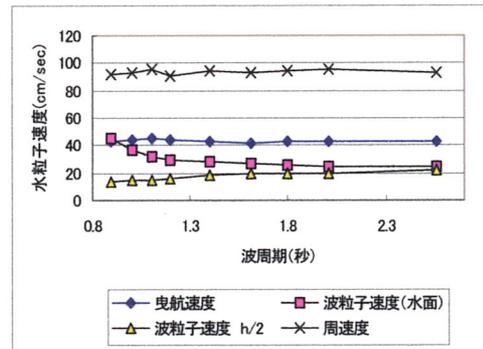


図-5 波周期と水粒子速度の関係

### (3) 追波中での実験結果

迎波中と同様に追波中についての実験結果を図-6に示す。

最大値(記号◆Exp Max)、最小値(記号■Exp Min)の差が大きく、水流タービンに作用する荷重は、平均値(記号●Exp Mean)の周りに激しく変動していることがわかる。

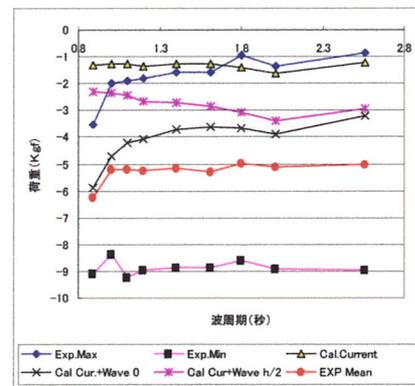
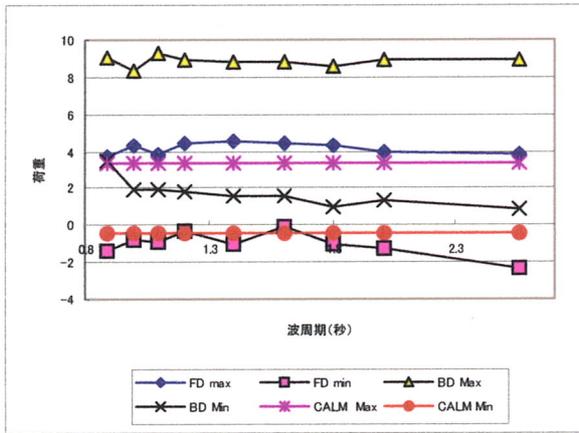


図-6 波周期が作用荷重に与える影響

### (4) 作用荷重の変動幅についての比較

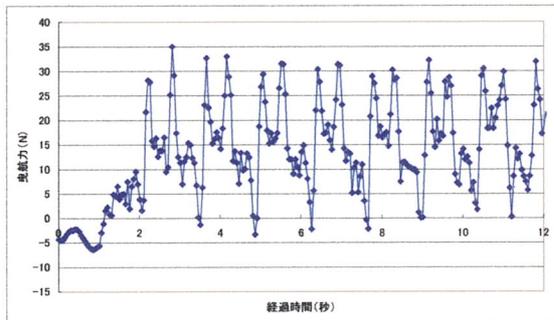
上述した平水中、追波中、迎波中の3種類のケースについてタービンに作用する荷重の変動量(最大値と最小値の差)を比較した。図-7は横軸に波周期をとり、縦軸に荷重(平水中—記号CALM、追波中—記号BD、迎波中—記号FD)を示したものである。図から迎波中に比べて追波中の方が変動量大きいことがわかる。



図—7 波が荷重の変動成分に与える影響について

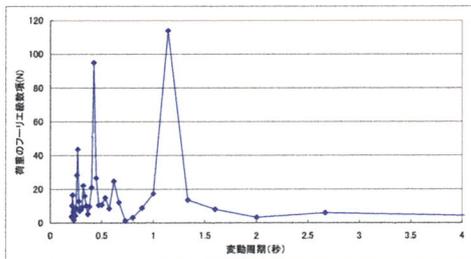
### (5) 曳航力の時間変動

図—8は向波中における波周期0.89秒の場合の実験で得られた曳航力の時刻歴を示したものである。回転が定常に達した後一定値を中心に荷重が変動していることがわかる。



図—8 曳航力の時刻歴

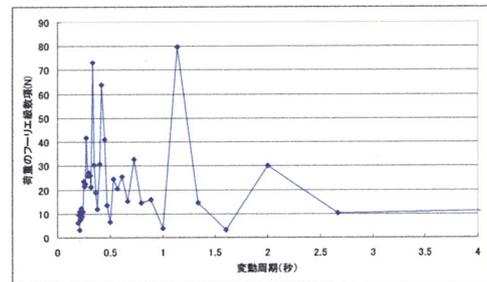
その変動の周波数成分を検討するため、曳航力をフーリエ級数項に展開し、得られた結果を図—9に示す。曳航力のフーリエ級数の最も大きいピーク値に対応した周期は1.14秒であり、回転数の平均周期1.36秒に近い。また、第2のピーク値に対応した変動周期は0.42秒であり、平均回転周期の約3分の1の周期に対応している。水流タービンが3枚のブレードで構成されていることから、各ブレードに作用する荷重が平均回転周期の約3分の1で変動したものと推察できる。



図—9 曳航力のフーリエ級数項 (波周期0.89秒)

図—10は波周期2.01秒の場合について荷重の時刻歴

のフーリエ級数の各成分項を示したものである。



図—10 曳航力のフーリエ級数項 (波周期2.01秒)

波の周期2.01秒に対応した周期にピークが生じており、また、タービンの回転周期(1.14秒)及びその回転周期の3分の1に対応した周期に卓越したピークが生じていることがわかる。

## 5. まとめ

波と潮流が共存する場における水流タービンの水理特性を把握するため、2次元造波水路において平水中、波浪中における曳航実験を行った。

主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 平水中において曳航速度と回転数の関係は単一流管理論でほぼ推定できる。
- (2) 波と潮流との共存する場において対象とした実験ケースでは波周期によらず回転数がほぼ一定値であり、波浪が及ぼす影響は小さい。定常回転に達した後の周速度は波粒子速度、曳航速度に比べて相対的に大きいと考察でき、また、水流タービンに作用する荷重のフーリエ級数の周期成分を比較したところ、ブレードの回転周期に対応した成分が波周期に対応した成分を上回ったことから裏付けられる。
- (3) 水流中のタービン回転および作用荷重は一定の値を中心とし1回転周期をブレード枚数で除した周期で若干変動する。

波と潮流の共存場において実験によるアプローチを行い、その水理特性を把握した。数値解析による確証が今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 鳥井他：直線翼垂直軸型水流発電システムの検討 第30回海洋開発シンポジウム, p. 559, 2005
- 2) 鳥井他：直線翼垂直軸タービンの海洋への適用検討, 太陽/風力エネルギー講演会論文集, p. 439, 2005