

単一流管理論を用いた水流タービンの 波浪影響に関する研究

A STUDY ON EFFECTS OF WAVE TO DRAG FORCES AND POWERS
INDUCED IN A HYDRO TURBINE
BY USING SIMPLE STREAM TUBE THEORY

関田欣治¹・鳥井正志²・大久保寛²・臼井慧介³
Kinji SEKITA, Tadashi TORII Hiroshi OKUBO and Keisuke USUI

¹正会員 工博 東海大学 海洋土木工学科 (〒424-8610静岡市清水区折戸3-20-1)

²正会員 新日鉄エンジニアリング(株) 海洋エネルギー部 (〒100-8071東京都千代田区大手町2-6-3)

³学生会員 東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

The tidal and sea current turbines are one of potential sources for utilization of natural energies. When applying them to the actual sea, it is necessary to evaluate how much increase of hydro forces acting on the turbines, and to examine if any drop or increase of electrical generation due to waves. Therefore, we conducted 2-dimensional tank tests in the current, both wave and current to measure the loads, rotational speed and output volts induced in the 1/100 scale turbine. As simple stream tube theory often apply to analyze a turbine in uniform flow, so we use it for the analyses of hydro forces and energy outputs of the turbine in coexistence of wave and current. The paper presented the comparison the model tests results with the theoretical calculation to clarify the effects of waves to the turbine.

Key Words : Tidal and sea current, hydro turbine, wave, model tests, drag forces, power output

1. はじめに

海流・潮流に代表される海水の有する流れのエネルギーは、同じ自然エネルギーである風力に比べ水の密度が空気の約 800 倍と大きい結果同じエネルギーを得るための流速はおおよそ 1/9 で済むこと、また年間を通して変動性が極めて低いことが特長である。さらに、海洋における水流エネルギーは広範囲に賦存し、平均的にはエネルギー密度は低いが、安定的なかつ相当量の賦存が期待できる。これらに着目し関他¹⁾によって開発された直線翼垂直軸型風力タービンを、鳥井らは海洋における潮流などの水流への適用性を検討²⁾してきた。その過程で、日本沿岸の海流や潮流の賦存量を推定しその可能性が高いことを明らかにする³⁾とともに、曳航模型実験により、流れ単独場および流れと波浪が共存する場における水流タービンの回転特性や抵抗荷重に関し実験的に明らかにしてきた⁴⁾。さらに、水流タービンを実際の海域に適用し⁵⁾、タービン作用する最大荷重や発電量の推定を行い施設の計画や設計ができる段階に至っている。しかしながら、実際の海域は波浪と流れが共存する場であり、水流タービンが適する海域であっても外洋となると相対的に流れが卓越

しない条件もあり波浪の影響は過小評価できない。したがって、今後の採算性の評価等のためには、波浪が抗力(スラスト力とも呼ぶ)や発電出力に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。

2. 研究内容

流れ場における水流タービンの抵抗特性や発電出力推定は一樣流理論、例えば若濱等が適用している単一流管理論⁵⁾、関他¹⁾が開発した多流管理論等によって解析がなされている。いずれもタービン前後で流速変化が発生するとしその速度低減率を a とすると、上流の流れがタービン前後で $(1-a)$ 倍の流速に減速し、さらに透過後の下流での流速は $(1-2a)$ 倍に減少することを前提とするものである。解析の手順ははじめに速度低減率を仮定し、水流タービンに作用するトルクに対する回転運動を解き、得られた水流タービンに作用する抗力係数と速度低減率の物理的関係を満足するまで収束計算により低減率を決定するものである。両理論とも、直線翼垂直軸水車に関して、実用的な精度で模型実験とよく一致するといわれている。また関他の研究¹⁾によれば、翼の

一致するといわれている。また関等の研究¹⁾によれば、翼の回転周速度 $R\omega$ と流れ Uc の速度比である周速比 $\beta (=R\omega/Uc)$ がある値を越えると両理論の適用結果の違いは表われるとされるが、発電出力で比較してみると数%とさほど大きくない。そこで、より簡便な単一流管理論に基づき水流を表現する一様流速の代わりに、微小振幅波理論に基づく水平水粒子速度成分と一様流速のベクトル和を用いることで波浪影響を評価することとした。

本論文では、はじめに鳥井等の行った1/100縮尺潮流模型実験²⁾の解析に作成した運動及び流体力を解析する時間領域解析プログラムを適用し、抗力等の実験結果との比較により解析法の有効性を確認する。ついで流れと波浪場における模型実験の解析にも適用する。これら一連の解析から流れ、波浪、流れと波浪共存場での水流タービンの回転特性を流速と水粒子速度から定義する合成流速により統一的に扱い、抗力や発電出力が流れ単独の場合に比較し波浪があるとどのように影響するかを数値解析により明らかにする。なお模型実験は、2~4m/sの強潮流域において高波浪時にはタービンを下げる等の保護をするなどして1mの波高まで稼働できるものと想定し実施されたものである。

3. 単一流管理論への波浪影響の導入

(1) タービンに作用する抗力とトルク

水流タービンの一枚の翼に図-1に示されるように流速が作用すると、水流タービンは ω (rad/s)の回転速度で回るとする。また、タービンの半径を R とする。一枚の翼に対し回転による周速度 $R\omega$ と流速 $U(1-a)$ から成る相対流入速度と呼ばれる合成速度ベクトル(その成分 W)が作用する。この結果、翼には合成速度の2乗で表される抗力と揚力、回転モーメントが作用するので、複数枚の翼から構成されるタービンはこれらの力とモーメントによる回転トルクを受ける。なお、図中の合成速度ベクトルの方向 α は、周速度と流速の大きさの関係で決定できる。

さて、微小振幅波理論における水粒子速度と流れの速度 Uc を用いると、流速 U は次式で与えられる。

$$U = U_c \pm \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(2\pi(h+z)/L)}{\sinh(2\pi h/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (1)$$

ただし、 H は波高、 T は波浪の周期、 h は水深、 L は波長、 x は翼の流れ方向の座標、 z は翼の鉛直方向の座標、 t は時間である。式(1)の±の符号は流れと同じ方向に進行する追波と反対方向に進行する向波に対応する(図-2参照)。翼 i を上下に分割(以下の検討では15分割)し要素 j の中心座標 (x_{ij}, z_{ij}) における流速から、その要素に作用する抗力 $D_{ij}(t)$ 、

揚力 $L_{ij}(t)$ 、回転モーメント $M_{ij}(t)$ を算定する。さらに鉛直方向に積分することで、翼 i に作用する抗力 $D_i(t)$ 等が得られる。この結果、3本の翼からなるタービンに作用する抗力 $F_x(t)$ は式(2a)で、またトルク $Q(t)$ は式(2b)でそれぞれ与えられる。

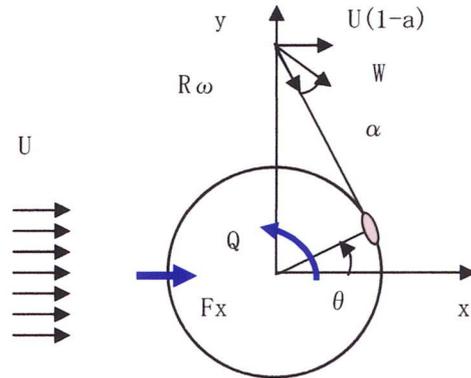


図-1 翼に発生するトルク

$$F_x(t) = \sum_{i=1}^3 (L_i(t) \cos(\alpha_i + \theta_i(t)) + D_i(t) \sin(\alpha_i + \theta_i(t))) \quad (2a)$$

$$Q(t) = -\sum_{i=1}^3 (M_i(t) + R(L_i(t) \sin(\alpha_i) + D_i(t) \cos(\alpha_i))) \quad (2b)$$

なお、 $\theta_i(t)$ は翼 i の流れ方向の x 軸から逆時計回りに測る回転角であり3枚の翼で $2\pi/3$ づつ増える。

(2) 運動方程式

水流タービンの回転し始める際の非定常の運動は、直接次式を解いて求めることになる。

$$J_T \ddot{\theta} = Q(\theta) \quad (3)$$

ここで、 J_T は水流タービンの慣性2次モーメントであり、この慣性モーメントには翼断面に対応する水の付加質量2次モーメントも加える。タービン全体の抗力やトルクが得られると、タービンの投影面積($S_w = 2R \times Z_0$)当りの抗力係数 $C_T(t)$ およびトルク係数 $C_Q(t)$ が、 ρ を水の密度とし流れの速度 U_c に対する動圧を基準にそれぞれ算定される。

$$C_T(t) = \frac{F_x(t)}{1/2 \rho S_w U_c^2} \quad (4a)$$

$$C_Q(t) = \frac{Q(t)}{1/2 \rho S_w R U_c^2} \quad (4b)$$

出力 $P(\text{turn})$ は、タービンが1回転する間の仕事を回転に要する時間で除し式(5)のように得られる。

$$P(\text{turn}) = \omega / (2\pi) \int_0^{2\pi} Q(\theta) d\theta \quad (5)$$

同様に、出力係数 $C_p(\text{turn})$ も流れの運動エネルギーを基準に次式で算定する。

$$C_p(\text{turn}) = \frac{P(\text{turn})}{1/2 \rho S_w U_c^3} \quad (6)$$

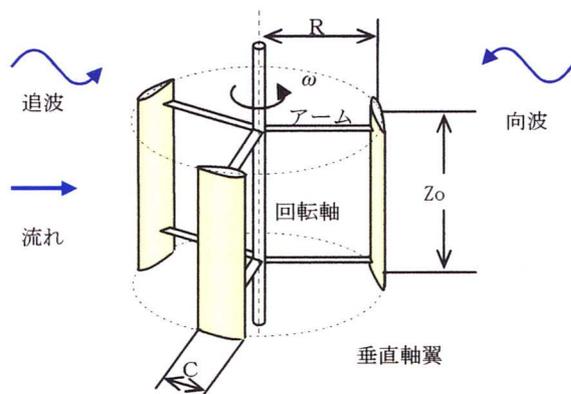


図-2 水流タービン模型

なお、回転軸と上下3セットのアームに作用する流体の荷重は10要素にわけ、その要素毎にモリソン式で算定した。アームの形状から抗力係数は1.5、慣性力係数2.1とし、回転軸は円断面なのでの抗力係数は1.2、慣性力係数2.0とし算定した。

(3) 水流タービン

ここで検討し模型実験にも用いた水流タービンは、図-2に示すように回転軸回りに半径R20cmの円周上に120°間隔で配置される3本の直線翼とそれらを回転軸固定する上下3対のアームから構成される。翼弦長Cは8cm高さZ₀が40cmである。翼断面はNACA0018の対称翼であり、その抗力係数C_Dと揚力係数C_Lおよびモーメント係数C_Mが-180°～180°の出会い角αに対し得られている。その中から、本研究のレイノルズ数範囲(0.11～1.13×10⁶)に対応する0.9×10⁶の実験結果を用いた。回転軸直径は3cm、アームは厚さ12mm幅40mmである。実験に関しては既に鳥井等により公表されている²⁾ので、詳細に述べないが模型実験は水深50cm、幅50cm、長さ20mの2次元造波水路で実施し、流れが起こせないで走行台車で模型を牽引した。

4. 水流タービンの回転応答

波浪単独の実験においても水流タービンは、波の山谷の通過に伴ってやや脈動しながら流れと同じ方向に規則的に回転した。そのため、波高10cm一定のまま周期を0.9～3.0sの範囲で7ケースの規則波に対し回転計により回転数を測定した。1分間あたりの平均回転数n(=ω/(2π))は、周期が短いと回転数が若干大きく、周期が長くなると少し減少する。これは長周期の波浪では水粒子速度が小さくなることに対応する。なお、本タービンが一樣流中で起動を始める限界流速は20cm/s程度にあり、周期により

タービン中心から下端の深さにおける水粒子速度はこれを下回る。それにも拘わらず回転する理由は、タービン上部での水粒子速度が限界流速を超えることや、波浪による周期的な変動トルクにより回転が励起され易いものと考えられる。さて、波浪単独、流れ(実際は曳航実験)単独、波浪と流れ共存に対する回転数をそれぞれ図-3に示す。横軸の合成流速u*(cm/s)は、これらを統一して比較するため導入したものであり、以下のように定義する。

$$u^* = \sqrt{U_c^2 + \frac{1}{T} \int_0^{T/2} (u_o \sin(\frac{2\pi}{T} t))^2 dt} \quad (7)$$

式(7)中のU_cは流れの速度、右辺平方根中の第2項は流れと同一方向の水粒子速度成分の1周期Tあたりの二乗平均速度の半分である。u_oは水流タービンの平均深さにおける微小振幅波理論による水平水粒子速度である。半分とした理由は水粒子が逆流する間の速度を除くためである。したがって、流れと共存する追波も迎波も同じ定義となる。

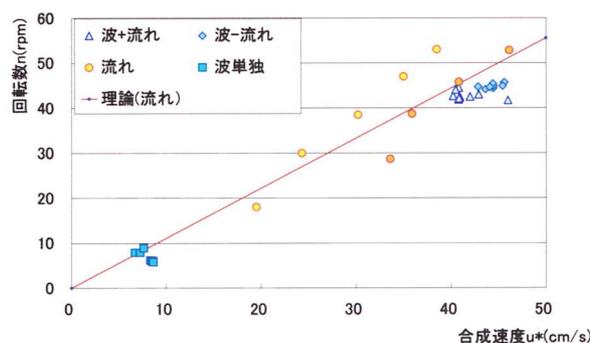


図-3 水流タービンの回転数と合成流速との関係

さて、図-3の回転数は計測値の平均であり、波浪単独の場合、回転数のばらつきが一番大きく平均回転数に対して約15～20%である。直線は流れ場における単一流管理論によって得られる理論線である。波浪単独の場合も式(7)で算定した合成流速に対しプロットしたところ、実験結果は流れ場における理論線によく一致する。

一方、流れ単独の実験においては、始動流速より小さい18cm/sの流速でもゆっくりした回転を発生する。しかしながら、これを上回る20cm/s以上の流速では理論線とほぼ一致するが数ケースほど実測の回転数が理論値よりやや大きい。

他方、波浪と流れ共存場では、流れ場における単一流管理論による解析結果を若干下回る程度である。後に出てくるが、回転数が大きいとタービンの抗力や出力が一般的に大きくなる。因みに追波と向波共存場で9ケースの平均回転数はそれぞれ44.7rpm、42.8rpmであり、追波の方が回転数はやや大きい。

以上の通り、波浪と流れが共存する場合でも実測

された回転数が流れ場におけるタービンの回転特性の理論結果に概ね一致することから、3. で述べた解析法を模型実験の解析に適用する。

5. 流れ場における水流タービン応答

(1) 水流タービン抗力

図-4は流速36cm/sにおける単一流理論による水流タービン抗力の解析結果を実験結果と併せて示したものである。実験結果には回転計とロードセルによる計測した回転数と曳航力時刻歴である。実験では、約2秒経過した時点で曳航速度が目標値に達し同時に回転数もほぼ定常になる。作用荷重は一定値を中心に変動する。解析値には変動が顕著でないが、実験結果にはいくつかの変動周期を有する。フーリエ解析の結果、第1ピークの周期はタービンが1回転する平均周期1.55sに、第2のピークの周期は0.5sに相当する。これは水車が3枚の翼で構成されていることから、回転数の3分の1の周期で変動したものと見える。解析結果と比べると、平均の抗力はほぼ一致するが、実験の方が変動範囲は大きく、スペクトルの第2のピークに対応し尖った波形となる。そのため、以下最大、平均、最小値で比較をした。

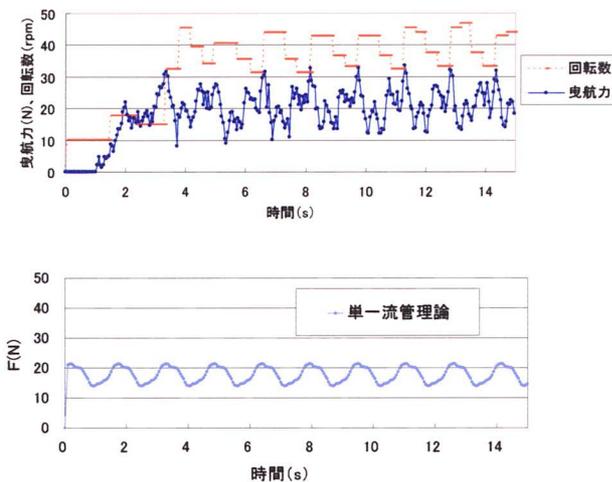


図-4 流れ場でのタービンに作用する抗力 F(N)

流速に対する水流タービンに作用する抗力との関係を図-5に示すが、全体として抗力の最大値、最小値および平均値とも流速の増大とともに増加する。解析結果の平均値は実験と比較的よく一致するが、最大値および最小値は50%程度も異なり単一流管理論の限界かもしれない。また、収斂計算で最適な値を決定する速度低減率 α は、抗力平均値が一致するように決めた。この結果、全般的に0.09~0.21に範囲であった。また、タービン水面間の回転軸を除いた平均の抗力に対し水流タービンの抗力係数 C_T を算定したところ、0.26~0.48(平均0.34)にある。最

大値や最小値に対する抗力係数は、解析結果の場合それぞれ平均0.47, 0.24である。実験結果の場合は回転軸を含むが、それぞれ平均0.80, 0.09となる。解析結果を実験の最大値を合わせようとする、回転軸はタービン相当の径になる。そのため、図-4に示したように回転周期の3分の1の周期に走行台車に固定した水流タービン模型の固有周期が近いために最大値と最小値があわなく、また最小値に負の値が計測されている一つの理由でないかと見ている。

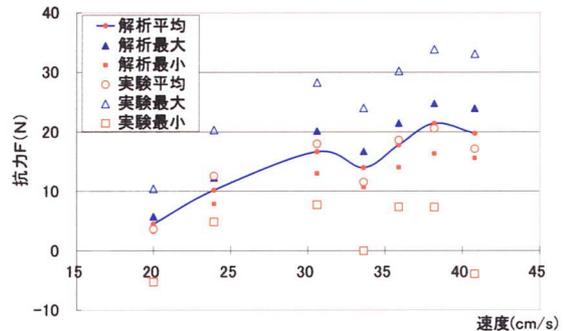


図-5 流れ場での水中タービンに作用する抗力

(2) 水流タービン出力

発電量 P_o は測定した出力電圧 E の二乗に比例することから、式(8)で出力係数に対応した無次元出力係数 C_p' を求めた。厳密な較正はしていないが α は $0.5 \text{ m}^3 / (\text{V}^2 \text{ s}^3)$ なる換算係数である。

$$C_p' = 2P_o / (\rho S_w U_c^3) = \alpha E^2 / U_c^3 \quad (8)$$

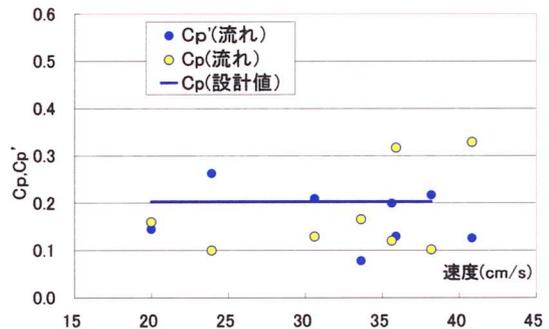


図-6 流れ場での水中タービンの出力

C_p' (流れ) と流速の関係を図-6に示した。当該水流タービンが多流管理論にもとづき最適な周速比 $\beta 2.3$ になるよう設計され、その最適出力係数0.205を太線で表した。ほぼ一定線で示した理由は、図-3に示したように n と U_c は線形関係にあり、本実験の範囲では理論的には最適値になるためである。実験結果は β が1.7~2.9であり平均2.4と理論とは乖離する。そのため実験の回転数 n は理論値と異なるので、3.で述べた時刻歴解析により、実験の n に一致する定常解から出力係数を算定した。これを C_p (流れ)として同図に載せたが、概ね0.1~0.33の

範囲にあり、 C_p' とは同程度の範囲にある。

6. 波浪と流れ共存場での水流タービン応答

(1) 水流タービンに作用する抗力

流れと波浪の共存場を式 (1) に示したように、一定方向に移動する定常流と波浪の水平方向の水粒子運動を重ね合わせることでモデル化した。波による水粒子鉛直速度は、水流タービンでは取付け用アームに鉛直力として作用するものの、タービンの回転への影響が小さいので無視した。模型実験では規則波を造波している間に、一定速度でタービンを曳航した。波浪条件は、波高10cm一定とし周期0.9秒～2.6秒の範囲で9ケースの規則波を発生させ、回転数、作用荷重及び出力電圧を計測した。

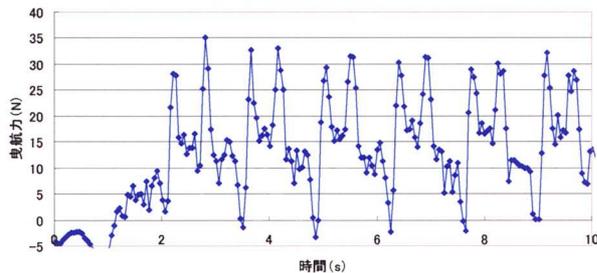


図-7 水流タービン抗力の時刻歴

図-7は流速43cm/sの流れと向波（周期 $T=0.89s$ ）が共存する条件での模型実験で得られた抗力（実際は曳航力）の時刻歴を示したものである。速度が目標値に達した約2秒後に、抗力は平均値を中心に定常的に変動する。フーリエ解析の結果、変動成分が最も大きい周期は1.14sである。これは、波周期とタービンが回転周期1.32sの平均に当たる。2番目に大きいピークに対応した変動周期は0.42s秒であり、回転平均周期の約1/3周期である。これは流れ単独の場合と同様の現象である。一方、波浪周期2sの場合は最大フーリエ成分となる周期は波浪の周期と離れているためタービン回転周期に一致する。共存場での実験でも時刻歴波形に上下に尖った波形が生じており、これは模型全体の水平方向の固有周期が1/3周期と共振したのではないとも思われる。

図-8は流れ単独（回転数52rpm）、流速が少し異なるが流れと向波（同42.5rpm）と追波（同44.8rpm）共存場における水流タービンに作用する抗力の解析結果の時刻歴である。3つとも、タービン回転周期と3枚の翼に対応する1/3の周期的変動が若干認められるものの、流れ方向も運動方程式を立てて直接解くようなことはしていないので波の周期と1/3の回転周期が若干表われる定常解となる。実験結果も追波の方は向波より変動幅は大きく、流れ単独の全振幅に対し概ね向波で1.2、追波で2倍となる。抗力が大きく異なるのは、前述したように

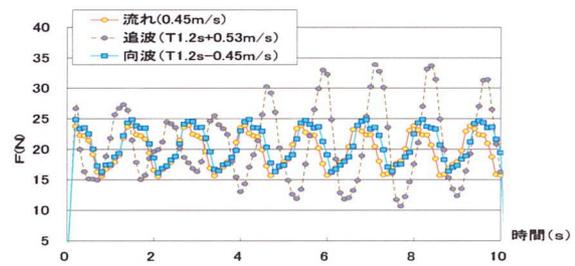


図-8 波と流れ共存場でのタービン抗力の解析結果

回転数の影響である。これは、因みに回転数が35.6rpmとすると、同じ流速でも図-8の時系列に比べ約17Nを中心に全振幅も8N程度範囲で変動することから分かる。流れと向波における水流タービンに作用する抗力の波浪周期に対する応答結果を図-9に図示した。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 Δ ）、最小値（ \square ）および平均値（ \circ ）を示し、併せてそれぞれに対応し実線、 \blacktriangle 、 \bullet で解析結果を示してある。

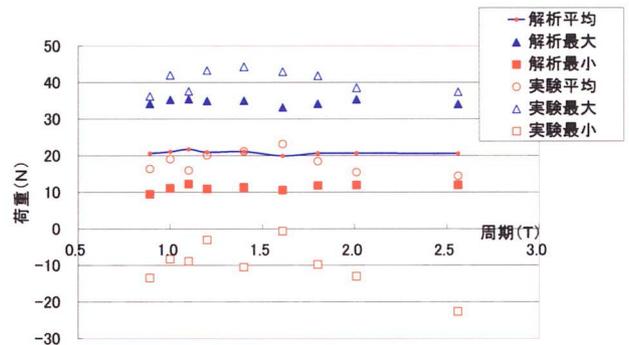


図-9 波と流れ共存場での抗力の周期特性

これらから、①水流タービン回転周期が流速でほぼ決定されたため、実験も解析結果も周期依存性は少ない。②ほぼ同じ流速43cm/sの流れ単独の場合に比べ、平均値は向波では数%、追波では約10%上回る。また、③平均荷重に対するタービン抗力係数 C_T は向波で0.32～0.37（平均0.36）、追波で0.31～0.41（平均0.38）で流れ単独より大きい。④最大荷重に関しては、解析結果が向波追波でも実験結果より約25%小さく、最小荷重は実験と解析結果もあわない。これは、解析法の限界の他に模型全体の水平方向の固有周期と回転1/3周期との共振の可能性が考えられる。流れの場合と同様、解析と実験の最大値があらうためにはタービン回転軸直径が25cm程度になる。

(2) 発電量の比較

流れ単独の場合の測定した出力電圧と波浪が共存する場合の電圧の周速比に対する違いは、流れ単独の場合に比較し向波も追波もわずかに大きいか同程度であった。両者を比較するため、ここでは式 (8)

により出力係数 C_p' と周速比 β の関係で発電量を整理することとし、それを図-10 に示した。

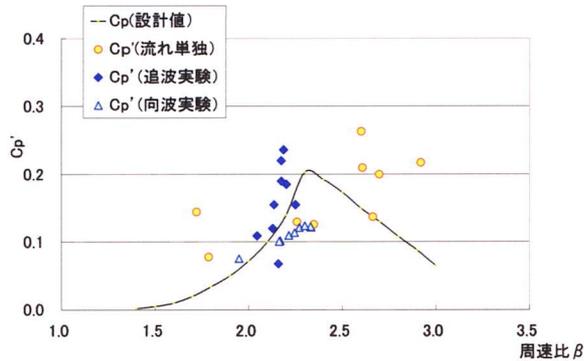


図-10 電圧から推定した水中タービンの出力係数

図中の実線は一樣流における多流管理論に基づく設計曲線であり、これからタービンの性能は β が 2.3 で最大の出力を得るよう設定されていることが分かる。実験結果の C_p' は、ばらつきは大きいものの設計曲線に類似した傾向にある。また、流れと追波共存場での C_p' は向波のそれより概ね大きい。流れ単独の結果はばらつきが大きいので適切に比較しにくいですが、波浪の存在は悪影響を与えないと見做して構わないといえよう。

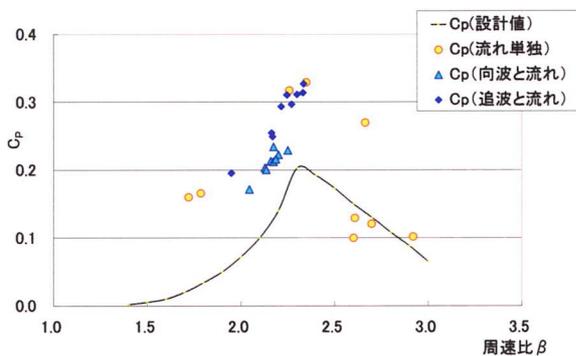


図-11 流れ及び波浪場中の水中タービンの出力係数

前述のように流れ単独の場合でも単一流管理論で解析される回転数よりいくつかのケースで大きかったので、また回転数が高いと出力も大きくなるので、実験から得られた回転数を用いて、波と流れを同時に考慮した時刻歴解析から得られた出力係数 C_p と β の関係を図-12 に示した。図-11 と同様ばらつきが大きい類似した関係にあり、流れと向波も追波共存場でも、流れ中の設計曲線よりは全般に大きい。また流れ一部を除けば流れと波浪が共存すると安定的に大きな発電出力を確保できるものと言える。

なお、図-10 に比べて設計線より大きめの出力係数となる理由は、測定した電圧が平均出力値であることと厳密な較正はしていないことに対し、図-11 は 1 回転中の出力の時間積分値から得られた結果であるためと考えられる。

7. 結論

水流タービンが受ける波浪の影響を明らかにするため、波浪と流れが共存する場での単一流管理論により時刻歴解析プログラムを作成し、模型実験と比較検証した。その結果、波浪の影響についてつぎの結論が得られた。

- (1) 流れと波浪が共存するとタービンに作用する抗力は、実験も解析結果も流れ単独の場合より大きく、向波より追波の方が大きい。すなわち、荷重に対してはタービンが無指向でない。
- (2) 発電出力に関しては、実験数が少なくばらつきが大きいので明確に言いがたいが、実験および解析に得られた出力係数から波浪の存在による悪影響は少ないと思われる。

なお、水流タービンに作用する抗力変動の最大最小値の予測精度は提案した解析法では十分でないので、流れ単独の場合も含め水平方向の運動方程式を直接解き動的評価する等の検討が今後課題である。

謝辞：本研究で使用した実験データは、新日鉄（株）と東海大学との共同研究で得られたものであり、その間に実験の指導と水流タービンの提供して戴いた関和市長元東海大教授にここに謹んで感謝の意を表明します。

参考文献

- 1) 関和市長他：直線翼垂直軸風車の性能に関する研究，東海大学産業学科研究所研究報告，15号，pp. 1-7，1984.
- 2) 鳥井正志他，山根信，大久保寛，関和市長，関田欣治，相良啓太：直線翼垂直軸型水流発電システムの検討，土木学会，海洋開発論文集，第21巻，pp. 559-562，2005.
- 3) 鳥井正志，大久保寛，山根信，関田欣治，関和市長：海洋における水流エネルギーの賦存とその回収の検討，第31回土木学会海洋開発論文集，第22巻，pp. 835-839，2006.
- 4) 鳥井正志，大久保寛，山根信，関和市長，関田欣治，相良啓太：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，第31回土木学会海洋開発論文集，第22巻，pp. 841-844，2006.
- 5) 若濱久敬，経塚雄策：潮流発電用ダリウス形水車の流力特性について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第3号，論文番号2006A-G5-4，pp. 407-410，2006.
- 6) Torii, T., Ookubo, H., Yamane, M., Sagara, K., Seki, K. and Sekita, K.: A Study of Straight-Wing Vertical-Axis Hydro Turbine Generation System in the Ocean Environment, Proceedings of International Conference and Exhibition of Renewable Energy 2006, pp.1462-1465, Oct. 2006.