## 研究論文

# ダリウス形水車を用いた超低落差水力及び潮汐力発電

Extra-Low Head Hydro and Tidal Power Generations with Darrieus-Type Water Turbine

古川明徳\*・大熊 Akinori Furukawa Kusud

大 熊 九州男\*\* ・ 竹之内 和 樹\*\*\* Kusuo Okuma Kazuki Takenouchi (原稿受付日2001年1月31日, 受理日2001年8月3日)

#### Abstract

Utilization of a Darrieus-type water turbine was investigated for extra-low head hydro and tidal powers, which have been abandoned due to poor cost-effectiveness with conventional turbines. In the present paper, after concrete specifications of a high performance runner and flow passage configurations are reviewed, conceivable structures of power generation plants with a ducted Darrieus-type turbine are proposed with governing equations of the systems and procedures for estimating their power generations. Based on experimental and computational results of the turbine performance and power generation, guiding principles for investigating the appropriate site and designing the electric generation system are quantitatively demonstrated as useful data.

.....

## 1. はじめに

化石燃料枯渇化と地球温暖化が問題となっている今日, 水力や潮汐力は積極的に利用されるべき再生可能エネルギ ーの一つである. それらは再生可能エネルギーの中ではエ ネルギー密度も比較的高く,供給も時間的に安定している ことから、従来の開発対象から外れる小規模地点であって も,局地的エネルギー源として有用であると考えられる. しかし実際には, 平地河川や身近に多数存在する工業・農 業用水路など、2m以下の超低落差地点は利用されずに放 置されている.また、これらと同じ程度の落差を与え得る 潮位差5m以下の潮汐力は、エネルギー量としては莫大で あるにもかかわらず殆ど手つかずといえる. このような現 状は,超低落差水力および潮汐力利用では設備規模に対し て出力が小さいため製造・建設を始めとする諸経費が割高 になり、従来形の水車では経済的に採算が取れないことに 起因しており,エネルギー利用の可能性を与える適切な水 車システムの出現が期待されていた.

ダリウス形水車は,流れ方向に矩形のランナ(翼車)断 面を有する二次元形状を持つため構造が簡単で,製造・建 設,保守にかかる経費が低廉となる.また,水車軸が流れ に垂直となる横流形であるため流れの方向に関係なくラン ナは同じ方向に回転する.これらの特徴は,超低落差水力 や潮汐力エネルギーの利用に適するものと判断される.

\*九州大学大学院工学研究院機械科学部門教授
\*\* / / 技官
〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1
\*\*\*九州芸術工科大学芸術工学部助教授
〒815-8540 福岡市南区塩原4-9-1

著者らはこれまで,ダリウス形水車の小型模型を用いて 性能試験を行い<sup>1)</sup>,この水車が本質的に低落差形であるこ とを明らかにした上で<sup>2)</sup>,ランナ及び流路の最適諸元の選 定指針を明確にし,発電システムの構成や高効率を与える 運転制御法の提案を行ってきた<sup>11~7)</sup>.本論文では,その結 果を基に,平地河川や工業・農業用水路などの超低落差水 力や潮位変動を潮池内外の落差に変換して潮汐力を利用す る場合に適用可能なダリウス水車発電システムを提案し, 実用規模のシステム設置時の出力推算を行って,水車設置 候補地での落差や潮位差から水車出力を評価するために有 用な資料を与える.

#### 2. ダリウス形ランナの作動原理と最適形状

ダリウス形水車の作動原理を図1に示す. ランナ形状は 二次元で、その車軸は近寄り流れVに垂直に置かれ、翼は 周速 $U=R\omega$ で回転して軸の上流側と下流側で流れを横切 る.このとき、翼には相対流れ(流速W,迎え角 $\alpha$ )に 対して揚力 $F_i$ と抗力 $F_i$ が作用し、これらの合力のランナ周 方向成分 $F_i$ がトルクを発生する.ダリウス形ランナは横流 形であるので、翼への相対流れは回転角位置 $\theta$ によりラン





図2 ランナ構造と諸元の最適値

ナ1回転で周期的に変動し,発生トルクもこれに伴い変動 する.ランナの発生動力*P*<sub>o</sub>と理論効率 η<sub>i</sub>は,ランナ1回転 における平均値として,それぞれ次式で求められる.

 $P_o = \int_0^{2\pi} F_u U d\theta / 2\pi \ , \qquad \eta_t = \int_0^{2\pi} F_u U d\theta / \int_0^{2\pi} (F_u U + F_d W) d\theta \ \cdots (1)$ 

式(1)中の流体力や流速は,翼形状を始めとするランナ や流路の諸元,ランナ周速と流入流速との速度比U/Vによ り決まる<sup>3.6.7)</sup>.

高性能ランナ形状の推奨諸元を図2にまとめて示す.翼 形状に中程度の厚みをもつ対称翼NACA0018を用い,翼 弦長 l をランナピッチ円半径Rとの比  $l/R=0.3\sim0.35$ にと り,翼を翼弦長中央でランナピッチ円に接して取付けると き高ランナ効率を与え<sup>3)</sup>,水車の利用限界を与えるキャビ テーション性能もよい<sup>2)</sup>.翼枚数Zは,Zの増加に伴う効率 低下と発生トルク変動の平滑化を勘案して,実用的には Z=3が推奨される<sup>4)</sup>.翼のランナ軸への支持には,ランナ回転時の流体抵抗を減じた流線形断面を持つアームを用い,さらに翼端からの漏れ渦による効率の低下防止のために翼断面の7倍の面積を持つ翼端板を設ける<sup>5)</sup>.このランナを納めるケーシングは、ランナとケーシング壁の間を通過する無効な流量を可及的に減じるために流路幅Sを $<math>2R/S\approx1$ にとることが望ましい.

なお式(1)から、高 $\eta_i$ を得るには、回転力 $F_u$ が大きい ことと同時に翼の抗力 $F_d$ を小さくすることが必要なことが 知られる.このためには翼回転レイノルズ数 $R_e=Ul/v$ (vは水の動粘度)を $R_e \ge 10^6$ を目安に設定して、高Reにおけ る翼の低抵抗特性を利用するのが有利である<sup>6</sup>.

### 3. 平地河川及び水路の超低落差水力への適用

河川や水路における低落差地点でのダリウス形水車設置 例を図3に示す<sup>7</sup>).水車流路は導水管,ランナ部,吸出し 管から成り,一定落差での運転を可能にするためのバイパ ス水路と流量調節のためのゲート弁を付設する.流路前後 の水位差(総落差) $H_i$ は水の流下とともに、ランナでの消 費落差( $H=C_kV^2/2g$ ),流路の摩擦損失( $\zeta V^2/2g$ )及び 吸出し管出口での廃棄損失( $C_kV^2/2g$ )として失われる. ここで、係数 $C_i$ 、ζ, $C_i$ はランナや流路の形状及びランナ 運転速度比U/Vにより決まる値で、車軸断面での流路幅を S=0.4mとし、出口/入口の流路幅比 $S_d/S=2.25$ で広がり角  $\theta_d=9.5^\circ$ の吸出し管を用い、ランナを2章に示した好適形 状(l/R=0.3, 2R/S=0.925)に選定したときの水車特性試 験結果を図4に示す。図にはランナへの流入に平行流路 ( $S_i/S=1.00$ )と縮小流路( $S_i/S=0.74$ )を採用したときの特 性を示している。図中の $\eta_*$ は水車効率で、出力と総落差 水力との比(次式)を表す。

 $\eta_w = \eta_t C_h / (C_h + \zeta + C_v) \quad , \qquad P_o = \eta_w \rho g Q H_t \quad \dots \dots \dots \dots (2)$ 

ここでQは流量, $\rho$ は水の密度,gは重力加速度である. 低落差水力の場合,総落差の有効利用には摩擦損失や廃棄 損失の低減が不可欠であり,縮小流入流路( $S_i/S=0.74$ )の採用により $\eta_w$ が大幅に向上する<sup>7</sup>.



図3 超低落差水力発電システム



152

また,水車運転時に翼面圧が蒸気圧以下になるとキャビ テーションが初生し、効率低下と翼面損傷を招く、そこで、 ダリウス形水車におけるキャビテーション係数 kを次式で 定義して、ダリウス翼のキャビテーション初生限界係数 [k] を実験的に求め<sup>2)</sup>, それを図4中に示す. ここで△h<sub>s</sub> は図3に示す押込み水位, Harは蒸気圧と大気圧とのヘッ ド差である.

kに [k] を用いて式 (3) を変形整理すれば、水車設置 地点で実際に得られる押込み水位△h<sub>k</sub>に対するキャビテー ション初生限界落差Huewが次のように得られる.

$$H_{tcav} = (\Delta h_s + H_{av}) / \left\{ \left[ 1 + [k] (U/V)^2 \right] / (C_h + \zeta + C_v) - 1 \right\} \cdots (4)$$

水車設置地点での総落差がH<sub>t</sub>>H<sub>teav</sub>のとき, すなわち押 込み水位△hが不十分のとき,図5に示す割合で効率が低 下する<sup>2</sup>. ここで横軸のΔVは式(5)から求まる各速度の  $差(V-V_{cav})$ であり、 $\Delta V > 0$ のときキャビテーション発 生による効率低下を招く.

$$V_{cav} = \sqrt{2gH_{tcav}/(C_h + \zeta + C_v)} \quad , \qquad V = \sqrt{2gH_t/(C_h + \zeta + C_v)} \quad \dots (5)$$

したがって、キャビテーションによる効率低下の回避に は、次式に示す押込み水位△h\*の確保が必要となる.

$$\Delta h_s^* + H_t = \left\{ \left[ 1 + [k](U/V)^2 \right] / (C_h + \zeta + C_v) \right\} H_t - H_{av} \quad \cdots (6)$$

平地河川や水路に図3に示したものと相似な構造を持つ 水車を設置したとき定落差運転が可能で、その低落差水力 から有効に出力を取出すには水車効率 η, が最高値を示す 運転点に合わせた水車設計が選定されねばならない. ここ では, 流路幅S=0.4mにおいて高効率(図4)を示した縮 小流入流路(Si/S=0.74)を採用し、最高効率点速度比 U/V=4.0を設計運転点とした.ただし、効率 n<sub>w</sub>は式(2) からわかるようにη, C<sub>h</sub>, ξ, C<sub>v</sub>の値によって変化する. そして、それらの値は水車サイズ(流路幅Sの選定)によ って、すなわち、nとCiはランナの翼回転レイノルズ数Re によって、<br />
とC。はランナ下流の吸出し管長さによって変 化する. 図4に示した平行流入流路(S<sub>4</sub>/S=1.00)と縮小 流入流路(Si/S=0.74)における最高効率点速度比(それ ぞれU/V=3.5, 4.0) での,水車サイズによる $\eta_i$ ,  $C_h$ ,  $\xi$ , C<sub>6</sub>の変化を流れ計算<sup>6</sup>により求め、その結果を図6に示す。 *ξとC*<sub>6</sub>について見ると, 図3に示した水車構造の相似設計 のもとでは、流路幅Sの増加とともに吸出し管長さが増す ため摩擦損失は増大するものの出口流れの一様化が進んで 廃棄損失は大幅に減少し,両者の和は図5 横軸に示したサ イズの変化範囲では小さくなる.

水車設置候補地での総落差Hと流量Oが与えられたとき





水車特性の寸法効果 図 6

の水車サイズと出力は、次の1)~5)の手順を経て推算 される.

- 1)河川または水路幅からSを設定(大ほど高効率となる) してランナと流路の平面形状(図2と図3)を決定する とともにランナ部での平均流速Viを仮定する.
- 2) U= (U/V) V<sub>1</sub>=4.0V<sub>1</sub>から翼周速を求め, R<sub>e</sub>数からC<sub>h</sub> と $\eta_i$ を,  $S/S_o$ から $\xi$ と $C_v$ を求める (図6).
- 3)  $H_i$ ,  $C_h$ ,  $\eta_i$ ,  $\xi$ ,  $C_v$ を式 (5) に代入して $V_2$ を求め, *V*<sub>1</sub>=*V*<sub>2</sub>となるまでステップ2)・3)を繰り返し、両者が 一致したのち次のステップに進む.
- 4) 式(6) を用いて△h<sup>\*</sup>を求め、キャビテーション発生 の有無を判定する. △h<sup>\*</sup>>0の場合にはキャビテーショ ン発生による η,の低下を考慮して水車効率 η,を修正す る.
- 5) Q=V<sub>2</sub>SBより流路高さ(翼スパン長) Bが, また式 (2) より出力P。が得られる.

図7は流路幅をS=0.5, 1.0及び2.0mとして上述の計算に よって得られた、総落差H.に対する単位流路面積当りの 出力 $P_o/(BS)$ と流速V及び押込み水位 $\Delta h_s^*$ の変化を示す. 図から、VにはSによる違いは見られないが、同じHの値 に対してはSを広く取ると単位出力Po/(BS)が増すこと<sup>6)</sup>が 知られ、流路設計には可能な限り流路幅Sを広く取ること



が望まれる.また図から、 $\Delta h^*=0$ のもとで $H_c>0.95$ mにな るとキャビテーションが発生して $H_c$ の増加が出力低下をも たらすことが知られ、 $H_c>0.95$ mにおけるキャビテーショ ン発生回避には $H_c$ の増加以上に過度の $\Delta h^*$ が必要なこと がわかる.したがって、水車据付け位置を掘り下げる対応 は建設費の増大が著しく、低廉な水車設置の利点を失う. この結果はダリウス水車の利用が本質的に極低落差域に限 られることを示している<sup>20</sup>.なお、軸出力 $P_c$ から発電電力  $P_c$ を概算する式を以下に示しておく.この式は、著者らの 水車模型試験(S=0.4m)において得られた機械損失 $\Delta P$ [kW]を整理したもの(a, b, cは実験定数で $a=6.67 \times 10^{-4}$ [kW·s],  $b=3.40 \times 10^{-5}$  [kW·s<sup>2</sup>],  $c=1.07 \times 10^{-6}$  [kW·s<sup>3</sup>]) であり、 $\omega$  [s<sup>-1</sup>] は軸の回転角速度、 $\eta_c$ は発電機効率 (通常、75~80%)である.

 $P_G = \eta_G (P_o - \Delta P)$ ,  $\Delta P = \omega [a + b\omega + c\omega^2] (S/S_o)^2 \cdots (7)$ 

#### 4. 沿岸の超低潮位差潮汐力への適用

沿岸における低潮位差地点でのダリウス水車システムを 図8に提案する<sup>8)</sup>.水路での利用においては流れの向きが 変化しないことから,水車の上流と下流側で非対称な流路 を用いて η<sub>\*</sub>の可及的向上を図ったが,潮位の干満に伴っ て往復流となる潮汐力利用においては,ランナケーシング に平行流入流路を採用し,ランナ前後対称に吸出し管(こ こでは θ<sub>4</sub>=9.5°, S<sub>4</sub>/S=2.25のものを考える)を付設するこ とで単機単一流路の採用が可能となる.またこの場合,流 路途中に流量制御弁は設けず,水車での負荷に応じて海洋 と潮池の間に落差が生じる簡単な構造としている.

水車にかかる総落差 H<sub>i</sub>は潮位 H<sub>o</sub>と潮池の水位 H<sub>p</sub>との差 により作られ,潮池の水位は流路を通過する流量Qにより 変化するので,池の冠水面積をA<sub>p</sub>(ここでは一定とする)



図8 超低潮位差潮汐力発電システム

とすれば、それらの関係は次式のようになる.

ここで t は時間である.水車は各瞬間瞬間において変化 する総落差に応じて運転される.したがってこのような変 落差下において高効率を得るには,常に最高効率を与える 速度比(平行流入流路でU/V=3.5,図4)での運転が不可 欠で,そのため、システムには可変電圧可変周波数 (VVVF)インバータ等の回転数制御機構の組込みが必要 となる<sup>9</sup>.ここでの性能試算では,運転は常に最高効率点 速度比で行われるものとし,各瞬間での出力P。はその瞬間 におけるHを用いて,前章の出力計算手順1)~5)と同様 に,推算手順を考える.ただし,潮位変動は水車設置地点 ごとに異なるため,ここでは,H<sup>m</sup>は平均潮位,Hは潮位差, Tは周期(745分を用いた)として,次のモデル式(9)を 用いた.

水車設置候補地での年間平均潮位差(ここではこれをH。と する)が知られたときの水車サイズと出力は,次の手順を 経て推算される.

- 流路幅Sと高さ(翼スパン)Bを決定して流路断面積 A<sub>o</sub>=BSランナと流路の平面形状(図2と図8)を決定す るとともに潮池の冠水面積A<sub>o</sub>を設定する(実際には、後 述するようにH<sub>o</sub>に対して時間平均出力を最大とする A<sub>o</sub>/A<sub>o</sub>が存在し、これに基づいて決められる).このとき 図6を用いてS/S<sub>o</sub>からζとC<sub>o</sub>を求めておく.
- 2) 時刻 t=0 における潮池の水位 H<sub>p</sub>, t=0 を仮定し,潮位 変化の1周期にわたってステップ3)と4)の逐次計算 を行う.
- 3)式(6)のH.に対して、図6におけるR.数と(Ch, η)の関係及び式(4)を用いて繰返し計算から、流速V (流量Q)、軸出力P。及び周速度Uを求める.このとき、 キャビテーションによる効率低下も考慮する(図5).

4) 流量*Q*から式(6) により時刻*t*+∆*t*における潮池の水



図9 潮汐力利用における出力試算結果



図10 潮位差変化に伴う潮汐力発電の運転状態

位 $H_{p, l+\Delta l}$ を求める.

- 5) t=0と1周期後のTにおける潮池の水位 H<sub>p</sub>, oとH<sub>p</sub>, rとが 等しく(H<sub>p</sub>, o=H<sub>p</sub>, r)なるまで1周期分の逐次計算を繰 り返す.
- 6) *H<sub>p</sub>*, *o*=*H<sub>p</sub>*, *r*となったとき潮池の水位変動が定常状態に なったとして1周期での平均出力を求める.

なお,実際の潮位変化を用いた計算例は文献8)に示している.

図9は流路幅をS=0.5m, 1.0m及び2.0mとし, 潮池冠水 面積比A<sub>p</sub>/A<sub>o</sub>を図中に示す最適値に選定したときに上述の 手順で得られた,潮位差H.に対する単位流路面積当りの水 車出力,流速,落差変動の1周期平均, P<sub>i</sub>/A<sub>o</sub>, V, Ĥ, を, また図10はH<sub>s</sub>=4.0mの潮汐変化においてA<sub>o</sub>=2.0m<sup>2</sup> (S× B=2.0m×1.0m)の水車を設置したときの,潮池での水位 H<sub>p</sub>,出力P<sub>o</sub>, ランナ軸回転数Nの変動を示す.図10中には, N>20 [rpm] で発電機の自動電圧調整装置(AVR)を作 動させ("G"),Nがこれより低くなったときには解除 ("W")する制御を行ったときの発電電力P<sub>6</sub>の変動も示し ている.ただしP<sub>6</sub>の算出には式(5)を用い,η<sub>6</sub>を75%と した.図9を見ると,H<sub>6</sub>>3mになるとΔh<sup>\*</sup>=0のときキャ ビテーションによる出力低下が認められるが,潮汐力発電 には,キャビテーション初生限界係数[k]が大きい平行 流入流路を用いたこと(図5),潮位変動1周期において キャビテーション発生が問題となる高落差時間域が短いこ と(図10)のため,常にΔh=0であっても,その出力低 下は数%程度であり,実際上はほとんど問題にならない. なお,ダリウス形水車は横流形であるので,流路高さ(翼 スパン)Bを大きくすることで出力P<sub>6</sub>の増大を図ることが できる利点を持つ(その場合,Bの増大とともに潮池面積 A<sub>6</sub>も増える).

#### 5. むすび

これまで未利用のまま残されていたH<1mの超低落差 水力やH<4mの超低潮位差潮汐力の動力化に対し、ダリ ウス形水車を用いた場合の利用可能性を,設置構造例とと もに具体的数値を用いて示した.ここで提示した資料,計 算式及び手順によれば,河川や水路における落差・流量, 沿岸における潮位差に対する適切なシステム規模(図3と 図8)と発電量(図7と図9)を見積もることができる.

終わりに、本研究経費の一部は平成12年度原田記念財団 研究助成金に因った.ここに記して謝意を表する.

#### 参考文献

- 1) 高松康生;ダリウス形横流水車,エネルギー・資源,4-3, (1983), 50-55.
- 高松康生・古川明徳・ほか4名;ダリウス形横流水車のラン ナ翼に発生するキャビテーションについて,機論,56-527, B (1990),2008-2013.
- 3) 高松康生・古川明徳・ほか2名;ダリウス形横流水車のラン ナ翼の翼特性と高効率翼形状に関する実験的研究,機論, 56-528, B (1990), 2409-2415.
- 4)古川明徳・ほか3名;ダリウス形横流水車のランナ翼枚数による性能変化と自己起動性に関する実験研究,九大工学集報, 62-6,(1988),683-689.
- 5) 古川明徳・ほか3名;ダリウス形横流水車のランナ形状と回 転損失トルクの低減に関する実験,九大工学集報,66-1, (1993),37-42.
- 6)大熊九州男・古川明徳・渡邉 聡;ダリウス形水車のランナ 翼の抗力低減とその性能試算,九大工学集報,73-2,(2000), 195-201.
- 7)古川明徳・ほか3名;ダリウス形水車による低落差水力の有 効利用に関する一考察,機論,64-624,B (1998),2534-2540.
- 8) 古川明徳・ほか2名,低落差水力利用に開発されたダリウス 形水車の潮汐力発電への応用,ターボ機械,26-6,(1998), 354-360.
- S. Kihoh, et al.; Power Generation from Tidal Currents, Proc. 4th Pacific Cog. of Marine Sci. Tech., Vol.1, (1990), 479-485.