

下掛け水車の出力に関する翼素運動量解析と水槽試験

佐々木壮一*・黒川由美*・大宅雄一郎*・館野真一**

Water Tunnel Test and Blade Element Momentum Analysis on Output Characteristics of an Undershot Water Turbine

by

Soichi SASAKI*, Yumi KUROKAWA**, Yuichiro OYA** and Shin-ichi TATENO

We evaluated the output characteristics of the undershot water turbine in a circular type water tunnel of a state where the channel width was wide enough for the blade span and there was no influence of the bottom surface of the channel. The output characteristics of the water turbine are analyzed by the angular momentum acting on the blade element; the difference between the actual measurement value and the analysis was discussed based on the observation of the flow regime around the impeller in the water tunnel. The maximum output of the measured value of the more deeply immersed water turbine was larger than that of the shallow one. The analysis results of the output based on the angular momentum of the blade element could represent the characteristics of the measured value of the turbine in the case of the shallow water depth. From the observation of the flow regime, when the tip speed ratio was low, the flow going up the blade of a long chord generates bubbles in the front side of the impeller, and the bubble flow flows over the blade to the rear side. We could confirm by the observation that the flow entrained the air on the water surface, moreover, there were a lot of bubbles between the blade in the rear side.

Key words: water turbine, water tunnel, blade element momentum analysis

1. はじめに

2012年に再生可能エネルギー固定買取制度が開始されて以来、近年、中規模の水力発電設備を大規模改修し、売電事業に取り組む事例がいくつか報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。この水力発電所の放流水には大きな落差はないが、年間を通して安定した流量を確保することができる利点がある。日本国内には、民間の小水力発電施設が約550箇所あり⁽³⁾、これらの施設における放流水の二次利用が検討されてきた⁽⁴⁾。出力1000kW以上の中規模の水力発電施設では、安定した出力を確保するためにその流量が管理されており、その水路には台風や洪水の対策もなされている。例えば、前橋市の広桃発電所の放水路の幅は最大で約12m、水深は約5m、

その総延長は約1481mである。このとき、放水路のある地点における水路断面の動圧を基準とした理論動力は約40kWになる。しかし、この放水路の特定の地点には落差がないため、水力エネルギーを回収するためには水流の動圧を回収する必要がある。この理論動力を複数のマイクロ水力発電システムによって回収することができれば、小水力発電事業への展開も検討することが出来る。

筆者らの一部は、超低落差用の投込み式下掛け水車の出力性能を模型試験の結果に基づいて解析した⁽⁵⁾。農業用水路のような矩形の開水路で利用される下掛け水車は、羽根車の前後で水流が堰上げされ、その水位差が水車の有効落差となる。この開水路と同程度の羽

平成**年**月**日受理

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 株式会社西日本流体技研

** 日本電設工業株式会社

根幅のクローズ型下掛け水車の効率は40%を超える。しかし、発電所の放水路のような施設では、水車によって流れを堰き止めることがないように、その川幅よりも十分に狭い羽根幅の下掛け水車の利用を想定する必要がある。また、水車設置に伴う付帯工事を最小にすることは、発電設備導入の初期費用の低減に貢献する。これらの状況を勘案すると、放水路における水力エネルギーの回収には、投込み式下掛け水車の多連装システムの開発が一つの有効な手段になる。しかし、従来の下掛け水車の性能に関する研究は農業用水路や融雪溝のような狭い川幅の開水路への設置を前提としたものが多く、川幅の広い放水路での利用に関する知見は少ないのが現状である。また、この水車を水深の深い放水路で利用する場合、抗力の直接利用とその貫流効果の優位性について実験的に確認された先行研究は、筆者が調べた範囲ではほとんどない⁶⁾。

そこで、本研究では、羽根幅に対して川幅が十分に広く、川底の影響がない状態における下掛け水車の出力特性を回流水槽で試験する。この水槽試験の出力特性が翼素に作用する角運動量によって解析され、実測値と解析結果の乖離の原因が羽根車周りの流れの観察に基づいて考察されている。

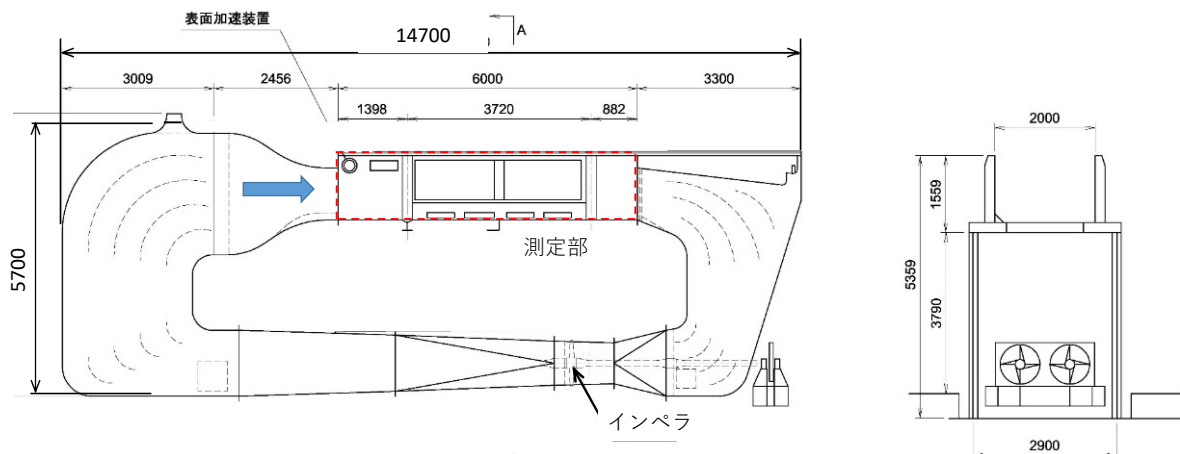
おもな記号

- B : 羽根幅(m)
- C : 翼弦長(m)
- H : 没水深さ(m)

- dQ : 部分流量(m^3/s)
- m : 位相の分割数
- n : 翼素の分割数
- P : 出力(W)
- r : 半径位置(m)
- U : 周速度(m/s)
- V : 主流速度(m/s)
- V_θ : 主流速度の周方向成分(m/s)
- W_θ : 相対速度の周方向成分(m/s)
- α : 絶対流入角(deg.)

2. 実験装置および測定方法

図1には、回流水槽の外観図が示されている。この回流水槽は垂直循環型であり、羽根車は出力22kWの電動機2基で駆動される。観測部の寸法は、幅2.0m、水深1.0m、長さ6.0mである。図2は水槽の観測部を示したものである。水車は観測部の幅方向中央、制波板から1.5m下流に取り付けられている。水位は水車回転軸から1.0m上流および1.0m下流の2点で、サーボ式水位計(ケネック、SW101)を用いて計測された。水車にはトルク検出器(小野測器、SS-200)および回転検出器(小野測器、MP-981)が接続され、各試験条件におけるトルク T (N・m)と回転数 N (rpm)が計測された。水車の回転数はACサーボモータ(キーエンス、SV2-M075AK)によって制御された。代表流速には、水深0.01mの流速が採用されている。トルクと回転数はA/D変換器を介して計算機に取り込まれ、それらの値が平均化処理



方式	2インペラ方式垂直循環式
動力	22kW電動機×2
発生最高流速	2.0 m/s
観測部寸法	幅2.0m×水深1.0m×長さ6.0m

Fig. 1 Circular type water tunnel

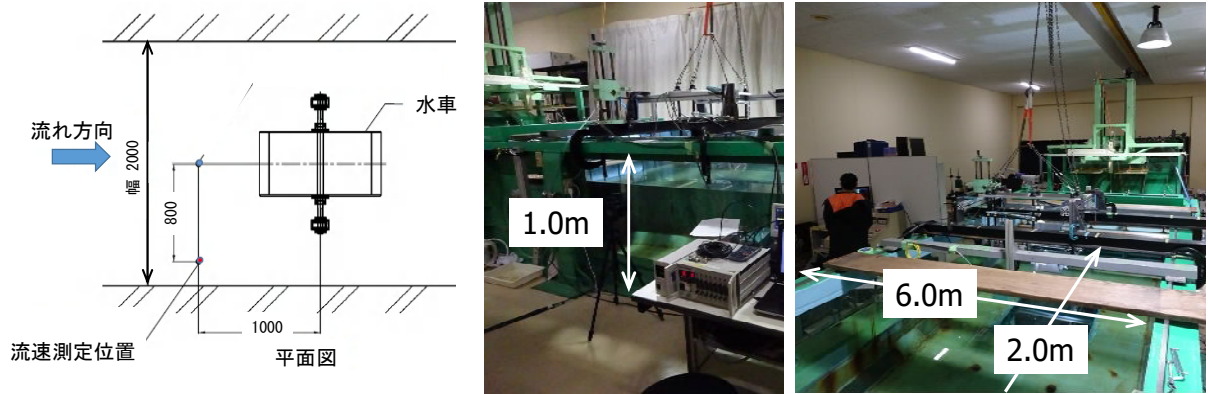


Fig. 2 Measurement part of the water tunnel

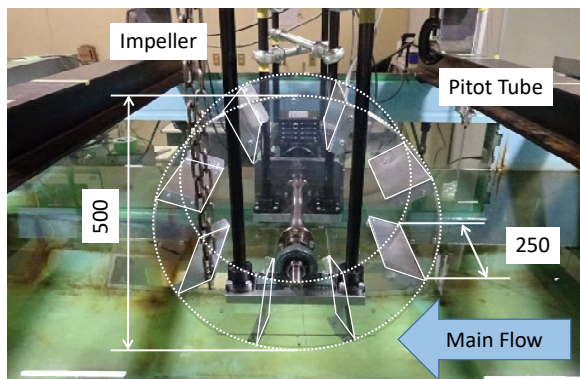


Fig. 3 Impeller in water tunnel

Table 1 Main dimensions of impeller

Diameter, D (m)	0.5
Span length, B (m)	0.25
Chord, C (m)	0.08 0.16
Main flow velocity, V (m/s)	1.25

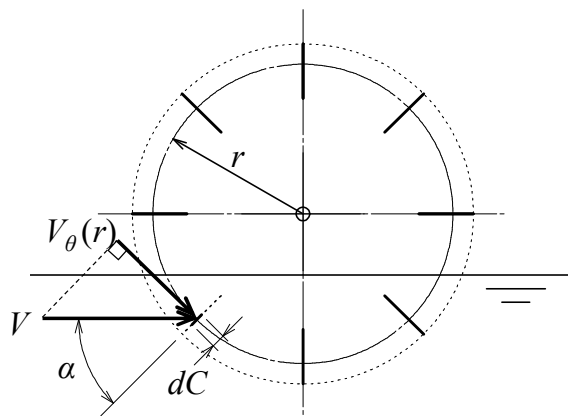


Fig. 4 Velocity triangle of the flow regime around the blade element

された。計測時間は20秒、サンプリング周波数は50Hzに設定された。図3は回流水槽に取り付けられた羽根車の外観写真を示したものである。表1には、羽根車の主要寸法が整理されている。水槽試験では、没水深さと翼弦長が水車出力に及ぼす影響が試験される。

図4は羽根車周りの流れの解析モデルを示したものである。半径位置 r における微小領域 dC の翼素の角運動量について考える。この翼素の相対速度の周方向成

分 $W_{\theta}(r)$ は式(1)となる。

$$W_{\theta}(r) = V_{\theta}(r) - U(r) \quad (1)$$

ここで、 $V_{\theta}(r)$ は主流速度の周方向成分、 $U(r)$ は半径位置 r での周速度である。このとき、この翼素の角運動量は式(2)となる。

$$dT_{\theta} = \rho dQ W_{\theta} r \quad (2)$$

このとき、翼素に流入する部分流量 dQ は式(3)となる。

$$dQ = B V dC \sin \alpha = B V_{\theta}(r) dC \quad (3)$$

ここで、 B は羽根幅、 V は主流速度、 dC は翼素の翼弦長、 α は主流の翼素に対する絶対流入角である。従っ

て、水車の出力 P は式(4)となる。

$$P = \int T_{\theta} \omega dC = \rho B \int V_{\theta}(r) W_{\theta}(r) U(r) dC \quad (4)$$

水車の出力は翼弦長を n 個の翼素に分割して解析され、1 ピッチの運動は m 個の位相に分割して解析される。

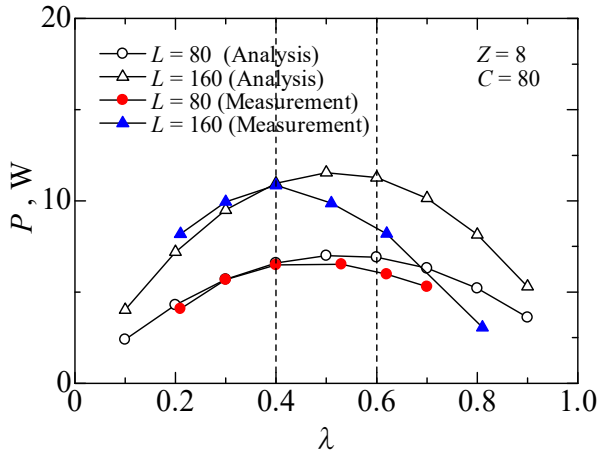
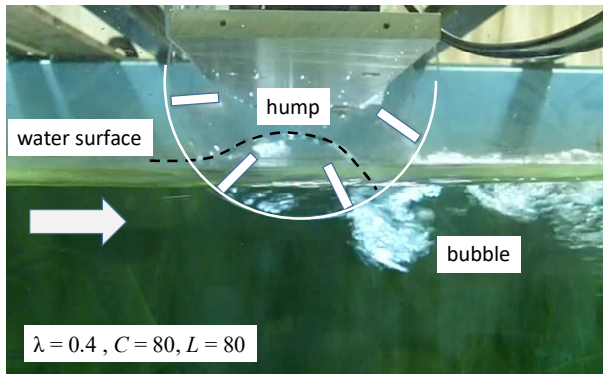


Fig. 5 Characteristics of the water turbine in the different submerged depth

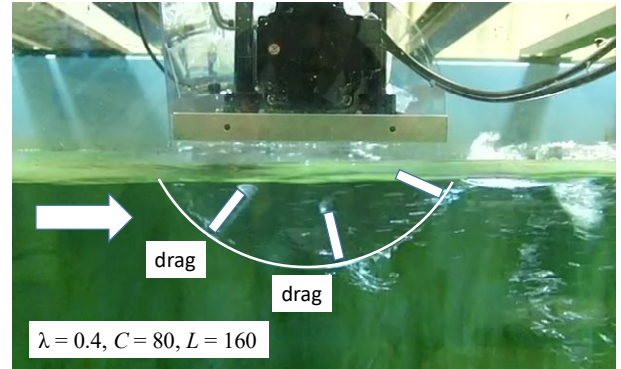
3. 結果および考察

図5には、異なる没水深の水車性能が比較されている。翼弦長は80mmである。水車の没水深は80mmと160mmに設定されている。図中の中塗りの記号が実測の特性であり、白抜きの記号が式(4)の解析結果である。没水深160mmの実測値の最大出力は80mmのものよりも大きくなる ($\lambda=0.4$)。いずれの解析結果とも、周速比0.4までの水車出力を表すことができる。没水深80mmの解析結果は、広い運転範囲で実測値の出力特性の傾向を表すことができる。一方、没水深160mmの解析結果は、周速比0.4以上の運転範囲で実測値よりも過大に見積もられる。

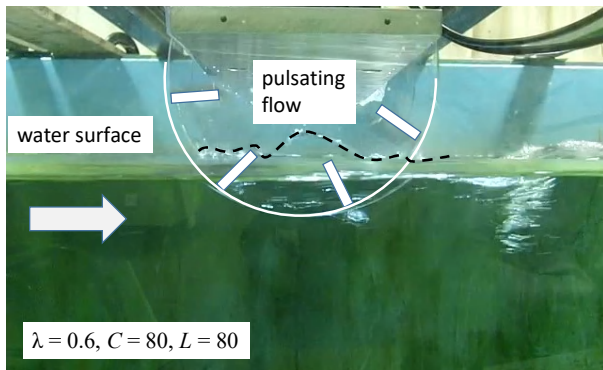
図6は没水深80mmの羽根車周りの流れを二つの周速比で観察したものである。図(a)の周速比0.4の場合、



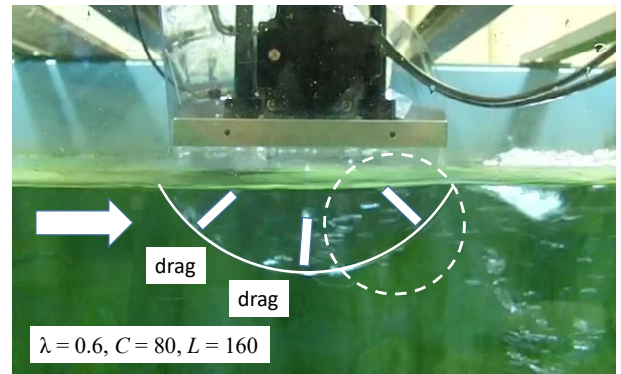
(a) $\lambda=0.4$



(a) $\lambda=0.4$



(b) $\lambda=0.6$



(b) $\lambda=0.6$

Fig. 6 Flow regime around the impeller in the different circumferential velocity ratio

Fig.7 Flow regimen around the impeller in the different circumferential velocity ratio

前方の羽根を越流した流れが空気を巻き込み、その後流には気泡流が形成される。没水深さが小さいときには、この後流中の気泡流は出力性能の劣化には影響しない。図(b)の周速比0.6の場合、羽根車内の水面の流れは脈流する。没水深さが浅いとき、この脈流が水車性能の劣化に与える影響も小さい。

図7は羽根車周りの流動様相を二つの周速比で比較したものである。没水深さは160mmである。文献(5)の解析結果に従えば、その出力の上昇には主流に対して上流側の羽根が貢献する。周速比0.4の条件では、上流側の羽根には空気の巻き込みが少なく、その羽根には抗力が作用していると考えられる。周速比0.6の条件でも、上流側と後流側の翼間への空気の巻き込みは少なく、その後流への気泡流の放出も少ない。従って、周速比0.6の運転点での解析結果と実測値との乖離は、後流側の翼間の回転抵抗によって生じると考えられる。

図8は二種類の異なる翼弦長の水車出力を比較したものである。翼弦長が長くなると、抗力を受ける翼面が広がるために、その解析結果の水車出力は短いものよりも大きくなる。しかし、翼弦長の長い水車の実測値の出力は翼弦長が短いものよりも相対的に低下する。図9は翼弦長160mmの水車の羽根車周りの流動様相を観察したものである。いずれも周速比は0.3である。前面側の羽根を遡上する流れが気泡を生成し、その気泡が前面側の羽根の角運動量を低下させる(A点)。また、前面側で生成された流れが羽根を越流するときに、水面の空気が翼間に巻き込まれる(B点)。羽根に作用する角運動量が後流側の翼間の気泡によって小さくなり(C点)、それが水車出力を低下させたと考えられる。

4. おわりに

- (1) 没水深さの深い ($L = 160\text{mm}$) 水車の実測値の最大出力は浅い ($L = 80\text{mm}$) ものよりも大きくなった。翼素の角運動量に基づく水車出力の解析結果は没水深さの浅い水車の実測値の特性を表すことができた。一方、没水深さの深い水車の実測値の出力は高周速比の領域で解析結果より低くなった。
- (2) 翼弦長の長い ($C = 160\text{mm}$) 水車の実測値の出力は短い ($C = 80\text{mm}$) ものよりも相対的に低下した。羽根車周りの流れの観察から、周速比が低いときに、翼弦長の長い羽根を遡上する流れが気泡を生成すること、その気泡流が前面側の羽根を越流すること、その流れは水面の空気を巻き込むこと、後面側の翼間には多数の気泡が存在すること、などが確認された。

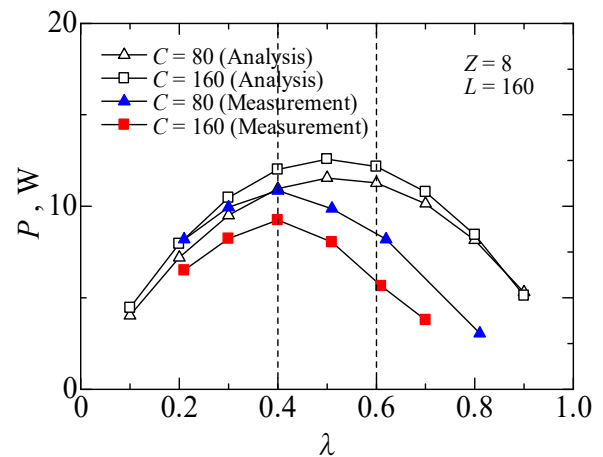


Fig. 8 Characteristics of the water turbine in the different chord length

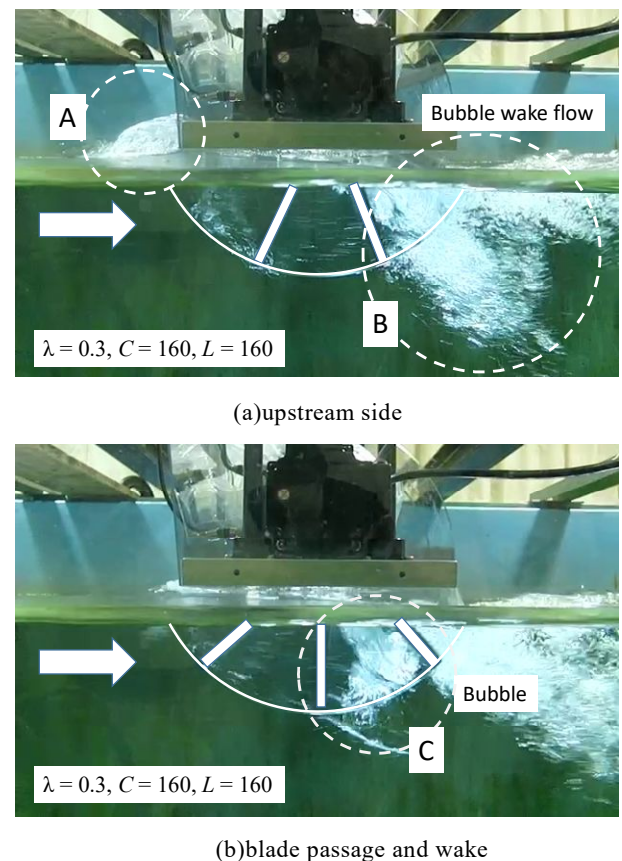


Fig.9 Flow regimen around the impeller in the low circumferential velocity ratio ($\lambda=0.3$)

参考文献

- (1) 例えば, <https://sgforum.impress.co.jp/news/3604>, 建設後 88 年経った水力発電設備を大改修して固定価格で売電, 2020 年 12 月工事完了の予定, インプレス Smart Grid フォーラム, accessed 18. March 2019.
- (2) 例えば, <https://www.kensetsunews.com/web-kan/100687>, 電気は原料! 1954 年建設の自社水力発電施設を更新する日本カーリット, 建設通信新聞, accessed 18 March 2019.
- (3) 全国小水力利用推進協議会, http://j-water.org/db_forum/, 小水力発電データベース, accessed 18 March 2019.
- (4) 例えば, <https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1803/06/news021.html>, 放流水と未利用落差で発電、中部電力が 170kW 水力発電を新設, accessed 18.March 2019.
- (5) 佐々木壮一, 黒川由美, 大宅雄一郎, 桑原順, 超低落差用投込み式下掛け水車の出力特性に関する研究, ターボ機械, 47-4, 2019, pp. 200-207.
- (6) 菊池孝高, 木綿隆弘, 河野孝昭, 流雪溝における発電用下掛け水車性能に関するフィールド実験, 日本機械学会年 2013 年度次大会講演論文集, 2013, 5 pages.