

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：33202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00643

研究課題名(和文) 高耐塵性・低環境負荷な低回転ボルテックス水車の動作解析と設計指針の開発

研究課題名(英文) Development of a Design Principle through Analysis of Work Mechanism of the Low Rotating Gravitation Vortex Water-turbine

研究代表者

上坂 博亨 (Uesaka, Hiroyuki)

富山国際大学・現代社会学部・教授(移行)

研究者番号：50329364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ゴミ対策と耐久性に極めて優れ、設置工事が少なく魚道が不要などの利点の多い「渦巻き利用型発電用水車(低回転ボルテックス水車)」は、水車の力学的動作機序が不明で、発電効率が低く、信頼性のある装置設計ができないという問題があった。本研究では低回転ボルテックス水車の実験機を試作して基本性能を測定するとともに、数値シミュレーションによって動作機序を検討し、その結果に基づいて水車羽根条件などを変更しながら水車効率の改善を行った。その結果、水車羽根を渦巻中心近傍の高流速部分で効率良く作用させ、水車羽根下部や渦中心での無効水流を小さくすることで70%程度の水車効率を得られる事が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)： It is known that the power generation turbine for slow spiral stream (low rotation vortex turbine) shows excellent characteristics in garbage tolerance and durability, less installation work and less need for fish-way. On the other hand, because the dynamic mechanism of turbine motion is not understood well, it is difficult to design a reliable device and to improve the power generation efficiency. In this research, we measured the basic performance of an experimentally manufactured low rotation vortex turbine, and improved turbine efficiency while changing water turbine blade conditions etc. based on the result of numeric simulation.

As a result, it was revealed that water turbine efficiency of about 70% can be obtained by making water turbine blades operate efficiently in the high flow velocity part near the center of the spiral, and reducing the amount of ineffective water flow at the lower part of the turbine blade and at the center of the vortex.

研究分野：地域エネルギー学

キーワード：小水力発電 ボルテックス水車 数値シミュレーション 再生可能エネルギー 水車効率

1. 研究開始当初の背景

水力発電に用いられる水車には、それが利用する水力エネルギーの様態により重力水車、反動水車、衝動水車に分類される。本研究が対象とする低回転ボルテックス水車は、円筒形の水車容器内の流速と排水時に生ずる渦の力によって回転すると考えられるが、その動作機序の詳細は未だ明らかではなかった。原型はヨーロッパで 1960 年代に考案されており、低落差での発電が可能でゴミ対策と耐久性に非常に優れ、低コストで発電システムを構築できる等の利点が示されている。しかし発電効率が低い事から余り普及せず、特に高い発電効率を追求してきた我が国の水力発電事業からは受け入れられなかった。現在、我が国でも地域における小規模なエネルギー自給と活用への社会的要求が高まる中、未利用の小河川や用水路などにおいては出力 3kW 程度から 10kW 程度の小規模発電用水車の実用化要求は高まっている。しかしボルテックス水車はサイズの小規模化によって著しく発電効率が低下するため、国内事情に合わせて開発された小型のボルテックス水車は国内ではほとんど普及していない。一方、小河川・用水路ともに落ち葉や雑草などの流下塵芥が多いため従来の高回転型の水車では塵芥対策費用がかさむことが問題となっている。この点でゴミに強い低回転ボルテックス水車は極めて大きな利点を持っているといえる。海外で実用化されている低回転ボルテックス水車を、効率を低下させずに日本の流況に合わせて小規模化することは小水力発電普及の点からも重要である。

2. 研究の目的

本研究では、小規模ボルテックス水車の動作機序を明らかにし、水車効率改善条件を見出すことを目的とした。そのために実験用ボルテックス水車を試作して円筒水槽内部に発生する渦水流の形状や部分流速を明らかにし、水のエネルギーを回転エネルギーに変換するブレード（水車羽根）枚数と形状を指標として動作効率を高めるための検討を行った。また数値シミュレーションによってブレード周辺の乱流発生状況と速度分布を算出し、動作効率向上の指針を見出す検討を行った。

3. 研究の方法

3-1 実験装置および測定方法

実験装置として、還流型水車実験装置を製作して利用した。本装置は上部に給水タンク、その下部に実験用ボルテックス水車、さらにその下部に排水タンクを配置して、水中ポンプを利用して排水タンクから給水タンクに水を循環させる還流型である。上部の給水タンクには常時約 2m³ の水が維持されるよう水中ポンプ（IWAKI Magnet Pump Model MXM442（吐出量 200L/min）1 台、SANSO Magnet Pump Model PMD-37013B（吐出量 550L/min）2 台）によって、最大約 21.6L/sec

の能力で還流した。実験時には約 70m³/s（19.4L/s）の流量を維持する事とした。

実験および数値シミュレーションに使用したボルテックス水車は内径 1m 高さ 550 mm の容器部分と容器中心部に設置したローター（羽根車）からなり、ローターのシャフトが上部に設置したギアおよび発電機に接続する構造とした。ローターには数枚（3 枚～6 枚程度）のブレードが取り付けられており、これが水流を受けてトルクを発生する機構となっている。水車容器には内径 208mm のパイプが接続されておりここから水が容器内部に流入する。容器底面には内径 216mm の排水口がありパイプで排水タンクに接続されている。流入過剰になった場合には容器上部に設けたオーバーフロー溝から漏出する構造とし、オーバーフロー高は 500mm とした。

3-2 数値シミュレーションの方法

数値計算にはオープンソース CFD ソフトウェアである OpenFOAM を使用し、たらい式水車内の気液混相流を対象とした数値シミュレーションを実施した（図 3-2）。流入部、たらい部、流出、およびオーバーフロー流路は静止しており静止した計算セルを充てた。セル数は約 50 万とし、回転するローターの周囲には羽根とともに回転する領域を設けた。静止部とローターとの界面に AMI (Arbitrary Mesh Interface) を設定した。

基礎式は連続の式と表面張力項に CSF (Continuous Surface Force) モデルを採用したナビエストークス方程式とした。計算セル内の液体体積分率 γ によって水および空気の流れを扱う VOF 法を採用した。乱流モデルとして k- ϵ 乱流モデルを採用し壁面では壁関数により境界条件を与えた。水車の回転数は 53rpm とし、水車羽根とその周囲回転領域セルを回転させた。流量を毎時 70t とした。流入面には流量を面積で除した速度を一定値として与えた。羽根を構成する各面に働く圧力および粘性力による力は、OpenFOAM の functionObject 機能を利用して算出した。

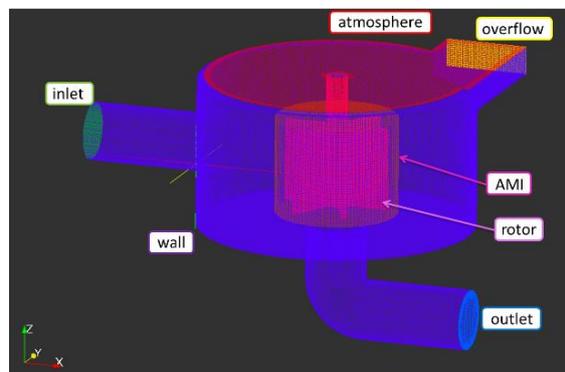


図 3-2 数値シミュレーションモデル。AMI 面の内部にあるセルはローターとともに回転し、AMI 面の外側にあるセルは静止している。

4. 研究成果

4-1 海外事例視察の成果

スイス中央部、アアラウ (Aarau) の南約 10km 付近の Schöftland に位置する GWWK 社に、Daniel Styger 氏を訪ねた。直径 6.5m の低回転ボルテックス水車 (最大出力 18kW) が稼働しており、その動作の様子を観察するとともに Styger 氏にヒアリングした。訪問時は渇水期で河川流量は少なく出力は 2kVA(400V, 5A)程度であった。円筒容器内への流入速度は 0.9-1.0m/s で、流れは中心部に近づくほど速度を増す特徴が見受けられた。回転する水流とローターブレードを視察した結果、以下の点で特徴があった。①直径 6.5m 高さ 2.5m の円筒容器の底面に直径 1m の排水口が位置しその上部に 5 枚のブレードを有するローターが懸架され回転する。②渦水流の中心は排水口中心からわずかに偏心しており、その補正のためにローターが自由軸で懸架されている。③ローターは中心付近の水流によって回転し、回転速度は容器外周水流よりも高い。④ローターは回転前方に向かって傾斜しており、水流に対してより有効に動作させるための工夫がみられた。

4-2 実測による渦水流の速度分布

発電実験に先立ち、ローターを挿入しない渦水流の特性を、水面形状と部分流速について確認した。部分水位は流入口の極座標位置を 0 度方向として 45 度間隔で同心円状に 32 点について計測した。なお水深の計測は物差しで行った。その結果、水面形状は外周部から中心部にむかって上に凸の緩やかな曲線を示すすり鉢状であることが確認された。また渦の中心は流入の影響を受けて 270 度~315 度方向にやや偏心していることも確認された。渦表面には外周の壁面からの反射の影響とみられる定常波 (凹凸) も 2~4 箇所確認された。

渦水流に 3 次元電磁流速系を没入して部分流速を計測した。円筒形の水車容器において水の流入方向を X 軸、それと直行する水平方向を Y 軸、また鉛直方向を Z 軸としたとき、3 方向の合成速度の分布を求めた結果が図 4-2 に示す部分流速分布である。グラフの横軸は渦水流の半径を示し、ゼロの位置は容器中心を表している。ここで容器中心に近い距離 100mm の点で部分流速が最も高く外周になるにつれて速度が減少する結果が得られた。すなわち、渦水流は外周から内周に向かって落ち込みながら加速して中心部から排出されることがわかる。これを水平方向と垂直方向の速度成分に分解すると、水平速度の分布の傾向は全方向の合成速度の分布に非常に近似した傾向を示し、中心に近い部分 (半径 100mm) で最も水平速度が高く 1.5~2.8m/s、外周に近い部分 (半径 400mm) で最も遅い結果が得られ 0.6~1.5m/s であった。その一方で垂直方向の部分流速は、半径 100mm の測定点の一部で高い値を示したものの、ほとんど

の測定点において $-0.2 \sim +0.8\text{m/s}$ の範囲の比較的小さな値を示す結果が得られた。これらのことから水車容器内部での渦水流は、流入後中心部に行くにしたがってほぼ一定速度で徐々に沈降しながら周方向の水平速度を高めながら容器底面の排出口に流れ込んでいると思われる。

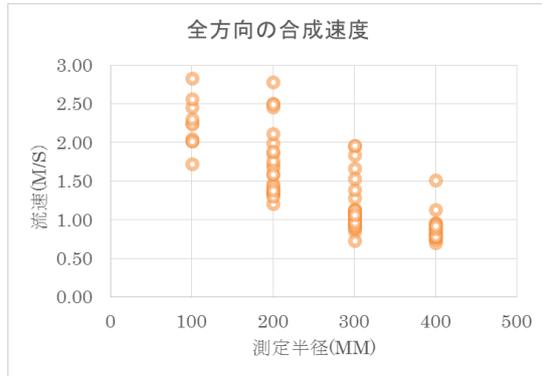


図 4-2 渦中心から周辺に向かって 8 方向に測定した渦水流の部分流速分布。横軸は渦中心からの距離を、縦軸は流速を示す。

4-3 シミュレーションによる水流の再現

数値シミュレーションによるエネルギー収支評価の基礎資料とするため、ローターの無い状態での渦の様相を再現することを試みた。容器の内径は 1m、高さは 550mm とし、オープンソースソフトウェア OpenFOAM を利用し、VOF 法により気液界面を含む流れを再現した。数値シミュレーションでは、流れを層流と仮定して実施した。容器底面の出口中心を座標の原点とし、円筒座標系を考える。容器側面に沿う周方向速度の分布を図 2 に示す。図には、測定およびシミュレーション結果 (底面から 100mm の高さ) とともに、自由渦と強制渦を組み合わせるランキン渦として解析的に得た速度も示す。

排出口の上部に存在する大きな渦が強い旋回流を作る。旋回成分は中心付近で最大となり、外周部では小さい。実験結果はランキン渦モデルで表現できる。シミュレーション結果も実験に近い速度分布を再現した。

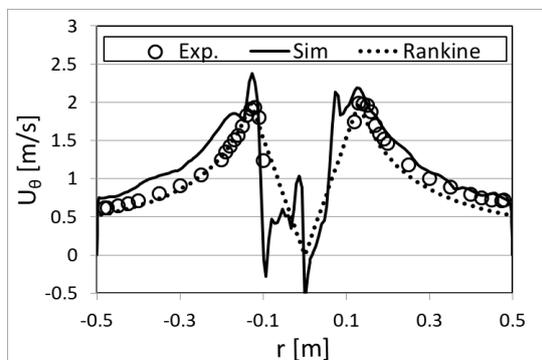


図 4-3 数値シミュレーションおよび実験によって得られた渦水流の部分流速分布。横軸は渦中心からの距離を、縦軸は流速を示す。

4-4 出力へのローターブレードの影響

渦水流にローターを挿入して得られる回転力を軸トルクとして、また最終的な発電出力を各種抵抗に通電した場合の消費電力として測定した。軸トルクの測定は回転軸に抵抗を与えながらひずみゲージ式のトルクセンサを用いて行った。また発電出力はローター回転軸に増速用のギアを介して取り付けた発電機から得られる電流と電圧を計測することで行った。本実験では増速率は4倍とした。水車のローターに取り付けたブレード枚数を3枚、4枚、6枚と変えて発生トルクを計測すると、トルク計軸の回転数が100回転付近で最も大きなトルクが得られ300回転付近でトルクが得られなくなった。この時いずれの回転数でもブレード枚数が多い方が大きなトルクを得る事ができ、トルクの最大値はブレード6枚仕様で139rpmの時に2.05Nmが得られた(図4-4, 上図)。

電氣的出力についてもトルクの場合と同様にブレード枚数の多いローターから大きな出力が得られた(図4-4, 下図)。最大出力は発電機軸の回転数が150~200rpm付近で得ら

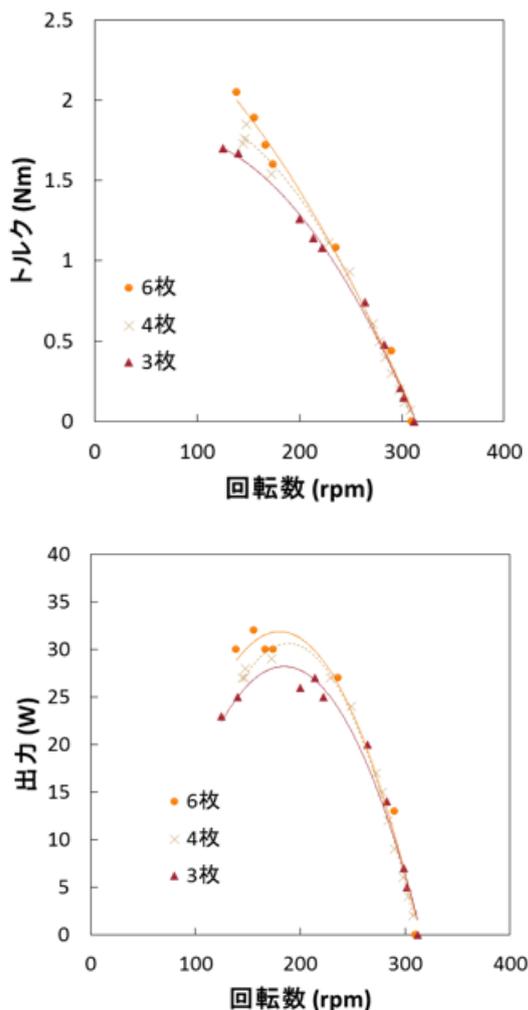


図4-4 ブレード枚数を3枚、4枚、6枚としたローターを用いた場合のトルク特性(上図)、および出力特性(下図)。

れており、実験値としての最大値はブレード6枚仕様の場合に、156rpmの回転数で、32Wを得る事ができた。使用した発電機(SKY-HR160)の定格出力はメーカーカタログより100W/500rpmとされており、今回の実験条件では定格回転数まで回転を上げる事ができなかったため出力は定格の30%程度にとどまった。この点では水車の効率を高めトルク出力を高めることでさらに高い電氣的出力が得られる可能性がある。

4-5 数値シミュレーションによる部分水流の解析

ローターブレード近傍の渦水流の挙動を、乱流モデルを用いた数値シミュレーションで再現して確認した結果を図4-5に示す。ここではブレード先端から軸付近に向かう水の流れを再現し、ブレード枚数が3枚、4枚、6枚と多くなるに従って生ずる水流の向きと速度ベクトルの変化に着目して観察した。

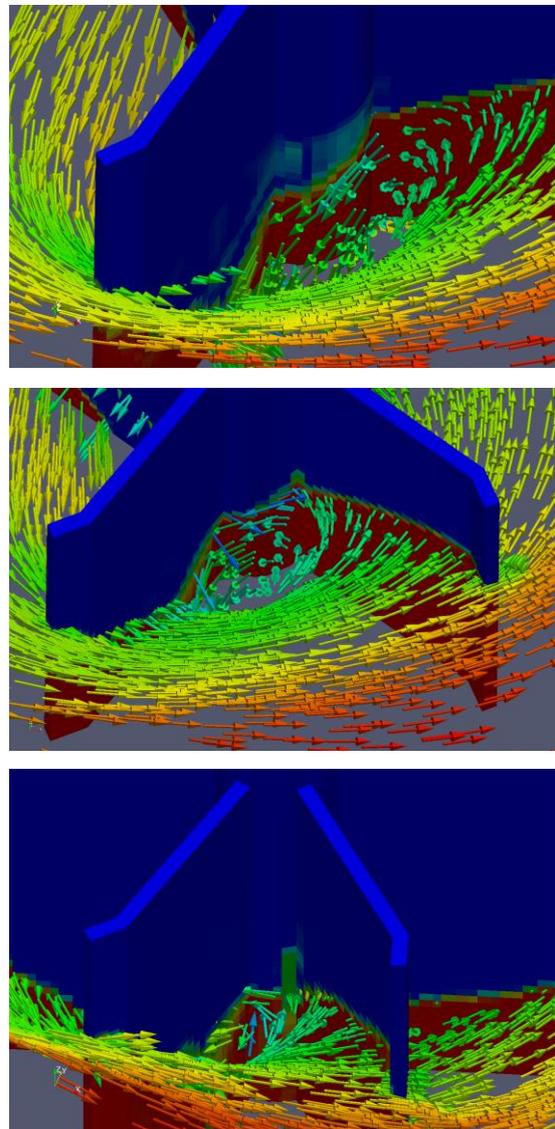


図4-5 ローター周辺の水流の数値シミュレーションによる速度ベクトル分布:上左図はブレード3枚、上右図はブレード4枚、下図はブレード6枚の場合を示す。

ローター周辺では複雑な水流が発生しながらブレードに作用している事が数値シミュレーションによって可視化できた。ブレード外周を流れる水流は最も速度が高く（赤色）これがブレード先端に作用することでブレードに回転力を与えていることが観察された。その後水流は中心に向かって速度を落としながら（黄色→緑→青色）回り込み排出口に流れ落ちていく。ブレードの枚数を3枚、4枚、6枚と変えて計算を行ったところ、ブレード間隔が広い場合（3枚の場合）は排出口に向かう渦が大きく高速であり、4枚、6枚と狭くなるにつれて渦が小さくなり落ち込む速度も遅くなっていた。以上の結果よりブレード枚数が多いほど水流とブレードの干渉の機会が多く、また渦中心から排出される水流が乱されており水流がエネルギーを失っている可能性が示唆された。

4.6 ブレード角度の発電効率への影響

数値シミュレーションの結果より、渦水流はローターブレードの周囲から中心に向かって流れ込み、その際にブレードに後方から作用してブレードを前方に押し出すとともに向きを変え、一部が中心の排水口から流出することが数値シミュレーションから予測された。この時、中心の排水口近傍では下向きの速度ベクトルが高くなり、この流れはブレードに作用することなく流下している可能性がある。そこで、この部分の流れを受けとめる工夫としてブレードに前傾の角度を設け、水車効率の改善を試みた。平板ブレードを6枚設置したローターで、ブレードの前傾角度を0度、15度、25度としたものを試作して発電実験を実施した結果を表4-6に示す。前傾角度が0度（流量70m³/h）のケースでは出力のピークが150-200rpmで55-58Wを示したが、前傾角度を15度（流量80m³/h）のケースでピークが185-215rpmにおいて71-77Wを示し、さらに前傾角度25度（流量80m³/h）のケースでピークが170-210rpmにおいて73-81Wを示した。すなわち、ブレードの前傾を深めることによって大きな電氣的出力を得ることができた。以上によりブレードの前傾は水車効率の改善に効果的である可能性が示された。

表 4-6 ブレード角度と最大出力

取付け角度	最大出力 (W)
前傾 0°	70.0
前傾 15°	81.2
前傾 25°	84.5

5. 考察

5-1 水車効率改善のためのローターおよびブレードの形状について

ボルテックス水車の容器に流入する水は、流入後、渦を形成して水平速度を増しながら中心部に移動し、渦の中心軸に近い位置で最も回転速度を増して排水口に流れ込むことが

3次元部分流速測定から明らかとなった。ブレードを挿入しない渦水流では鉛直方向の流速は排出口のごく近傍まではほとんど変化がなく、排水口付近において急速に高まる特徴も明らかとなった。また、渦水流がブレードに作用してローターにトルクを発生させるメカニズムとして、前進面にかかる正回転の圧力と後進面にかかる水流を押し分ける際の抵抗による圧力が拮抗し、両面の差分としての圧力が寄与していることが数値シミュレーションから予測することができた。これらの事から渦水流にローターブレードを挿入した際の挙動として、ローター直径が小さい（ブレードの長さが短い）場合には回転数が高くなる一方でトルクが小さくなり、また逆にブレード直径が大きい場合には逆の効果が表れる事が示唆された。

ブレード枚数と発生トルクの関係を見ると、ブレード枚数が3枚、4枚、6枚と多くなるにしたがって大きなトルクが発生し、また電氣的出力も増大することが実験によって確認できた。この傾向は数値シミュレーション結果と一致し、ブレード枚数が多いことによって水車の出力が大きくなる事が確認できた。

数値シミュレーションによってローター周辺の速度ベクトル分布を可視化したところ、ブレードの後進面側の中心部では水位が著しく低くなりながら中心の排水口に向かって小さな渦となって落ち込む流れが観測された。この挙動については種村ら（2015）の報告でも指摘されており、ブレード20枚のローターにおいてはさらに顕著で、エネルギーを吸収された流れが排水口に流れ落ちている挙動として報告されている。ただし今回の研究で用いたブレード枚数の少ないローターにおいては排水口付近においても流速がある程度維持されたまま無効水流として排水口に流れ込んでいると見ることもできた。そこで、ローター組み付けるブレードの角度を0度、15度、25度と前傾して、水流が無効のまま排水口に達しないようにする試みを行った。その結果、前傾角度を増大するにしたがって出力が70.0W、81.2W、84.5Wと増加する結果が実験より得られた。この結果からブレードに前傾角度を与える事が無効水流を減少させる有効手段の一つである事が示唆された。

以上の結果を総合して、渦水流を利用したボルテックス水車における水車効率改善のための有効手法を整理する。まず水流の持つエネルギー回収においては、有効水頭 h をできるだけ大きくすることが望ましい。流水の場合は $h=v^2/2g$ により水頭は速度 v の2乗に比例することから、できるだけ中心部の高速な水流を有効に活用する工夫が望ましいと考えられる。ただしローターに発生するトルクはブレード前後面の圧力の積算値として得られる事が数値シミュレーションにより示されたため、ブレードが十分に水中に没するだけの長さ（直径方向）を確保する必要がある。以上によりブレードの長さが水車出力を特徴づ

ける重要な要因である事が示唆され、最適の長さが存在することが予想された。次に排水口付近で発生する無効水流をできるだけ少なくするためのブレード形状検討の必要性が数値シミュレーションより示唆された。本報告では無効水流を減じるための施策としてブレードそのものの前傾を試みたところ有効性が見出された。この他にもさらに効果的なブレード形状の検討、あるいは取り付け位置の検討などの研究が期待される。

5-2 ボルテックス水車の水車効率評価

ボルテックス水車の水車効率については綿引ら (2016) によって有効水頭を用いて理論水力を定義する方法が示されている。これによれば有効水頭 H を下式(1)のように算出している。

$$H = h' + h_i + \frac{v_i^2}{2g} - \left(h_o + \frac{v_o^2}{2g} \right) \quad (1)$$

ここで h' は上流と下流の水路の高さの差、 h_i は上流の水深、 h_o は下流の水深、また $v^2/2g$ は流入と流出の速度水頭である。本報告の装置では水車容器内の水深を物差しで直接計測している事からこれをもって $h'+h_i-h_o$ と同等とし速度水頭を除く水深は 0.5m であった。また流入速度は、内径 208mm のパイプ内部で多少の変動があるものの実測により約 0.72m/s であったことから(部分流速の実測のため計算値とずれがある)速度水頭は $h=v^2/2g$ により 0.13m と算出される。流出速度については、実験装置では垂直の排出口から空気を含みながら重力によって自然流下するため流出速度は考慮しないものとする、有効水頭は $H=0.63\text{m}$ と算定できる。流量は実験条件として $70\text{m}^3/\text{h}$ としたため、 $Q=0.0194\text{ m}^3/\text{s}$ となる。これをもって理論水力を概算すると、 $P=\rho g H Q$ により 119.8W と算出される。これに対して、水車の最大出力 P_e は、実験値である図 3-4-1 に示すブレード前傾 25 度の最大出力 $P_e=84.5\text{W}$ を採用するとすれば、水車の総合効率 $\eta=P_e/P$ により約 70.5% と推定することができる。これは大気開放型の重力水車としては十分な効率であると考えられる。

<参考文献>

- [1] 種村知昭, 西泰行他, 「重力式水車の流れ場に関する研究」, 茨城講演会講演論文集, (23), pp189-190, (2015)
- [2] 綿引宏之, 西泰行, 稲垣照美, 「重力渦式水車の性能におよぼす流量の影響」, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集, (22), pp"GS0523-1"- "GS0523-2", (2016)

6. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) 上坂博亨・中川慎二・谷口達也・伊藤宗康, 「小水力発電用の低回転ボルテックス水車における動作効率改善に関する研究」, 富山国際大学現代社会学部紀要, 第 9 巻, pp.1-13, (2017)

[学会発表] (計 5 件)

- (1) 上坂博亨・中川慎二・清水貴昭・伊藤宗康・佐藤弘規, 「低回転ボルテックス水車の効率改善と動作解析」, 環境科学会 2016 年会, 2016. 9. 8. 東京都市大学
- (2) 清水貴昭・飴谷功佑・中川慎二・上坂博亨・伊藤宗康・佐藤弘規, 「OpenFOAM による低回転ボルテックス水車容器内の気液二相流解析」, オープン CAE シンポジウム 2016, 2016. 11.26 東京大学
- (3) 飴谷功佑・清水貴昭・中川慎二・上坂博亨・伊藤宗康・佐藤弘規, 「OpenFOAM によるたらい式水車の気液混相流解析 (容器内流のシミュレーションと実験)」, 日本機械学会 北陸信越支部学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 2017.3.8 金沢大学
- (4) Kosuke Ametani, Takaaki Shimizu, Shinji Nakagawa, Hiroyuki Uesaka, Hiroki Sato, Muneyasu Ito, "Fundamental Study on Air-Water Multiphase Flow in Tub-Type Water Wheel Vessel (Experiment and Simulation using OpenFOAM)", The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9) / 2017/10/30, TFEC9-1314
- (5) 飴谷功佑, 中川慎二, 清家美保, 上坂博亨, 「小水力発電用低回転ボルテックス水車ケーシング内における空気・水 2 相流の流動シミュレーション」, エコテクノロジーシンポジウム, 2017.12.3 富山

[その他]

ホームページ等

<http://eddy.pu-toyama.ac.jp/研究/たらい式水車/>

7. 研究組織

- (1) 研究代表者
上坂 博亨 (UESAKA HIROYUKI)
富山国際大学・現代社会学部・教授
研究者番号: 50329364
- (2) 研究分担者
中川 慎二 (NAKAGAWA SHINJI)
富山県立大学・工学部・教授
研究者番号: 30337878