

重力渦式水車ケーシング内流れの二相流れ解析

渡辺 昌俊^{1†}

¹ 国立高専機構長野高専

Two-phase flow simulation of gravity vortex turbine casing

Masatoshi WATANABE^{**}

^{*}NIT-Nagano

Abstract

The gravitational vortex turbine is a turbine that makes use of the swirling speed due to the vortex generated in the casing. In the casing, a vortex having a free surface towards the drain port of the casing is generated. Converting the angular momentum of this vortex to the rotational energy of the turbine efficiently leads to improvement of the turbine efficiency. The impeller of the water turbine is axially symmetric about the rotation axis. Therefore, if the generated vortex is axially symmetric with respect to the impeller rotation axis, high efficiency can be obtained, and asymmetric it is difficult to obtain high efficiency. In this study, the relationship between casing shape and axial symmetry of vortex was examined with OpenFOAM. As a result, it was shown that the axial symmetry of the vortex can be improved by devising the shape of the outer wall of the casing so as to reduce the interference between the vortices of the casing and the flow of the water guide path.

Keywords: Gravity vortex turbine, Flow simulation, Two-phase flow, Free surface flow, Swirl flow, Vortex

1. 緒言

東日本大震災以降、国内では再生可能エネルギーを用いた新しいエネルギー源の普及が必要とされ、太陽光、地熱、風力、水力等多くの種類の発電設備の設置や研究・開発が進められている。本研究は小水力発電の中でも、重力渦式と呼ばれる落差の小さい、中小河川、用水路での使用が可能な特徴を持つ水車に着目したものである。ケーシング下面の排水口から水が流出する際に生じる渦の回転エネルギーを羽根車で回収する方式であり、羽根車の設計変数である羽根枚数や、回転軸への取り付け角度、羽根車周りの流れ等に関して研究が進められている[1]～[3]。既報告文献の解析、実験結果は、自由表面高さ、旋回速度に周方向不均一性があることも示している。周方向不均一は、羽根車の流体エネルギー変換効率の低下だけではなく、発電機への入力トルク変動の原因となり、長期間使用する発電設備としては解決すべき課題である。本報告は、ケーシング形状が渦の状態、発電量に与える影響を、オープンソースソフトウェアである OpenFOAM (ESI Group の OpenCFD 社が商標登録をもつ) を用いて検討したものである。

2. 解析対象及び解析方法

2.1. 解析対象

本研究で対象とする重力渦式水車の概略を図 1 に示す。作動流体である水は、河川等から導水路 (Water guide) を流れケーシング (Water tank) に導水され、下面に設けられた排水口 (Drain hole, 直径 d_o) に向かい旋回流を生成しながら流下していく。排水口に向かって生成される渦は、自由渦と強制渦の組み合わせである Rankine, Lamb, Vatistas[4]等のモデルで表すことができる。既報告において、ケーシングには、図 2(b)に示すような半径一定の円筒形式が用いられており、これを同心円ケーシングと呼ぶことにする。同心円ケーシングでは、旋回速度、自由表面高さに周方向の不均一が見られることも示されており、その低減に向けてケーシング形状の検討を行う。本報告では、非対称性はケーシングに導かれた水流と、ケーシング内に生じた渦との干渉によるものと類推し、図 2(a)のような、導水路と干渉しない半径 r_i の渦形成領域と、導水路の末端を $\theta = 0$ とした周方向角度に比例してケーシング外壁半径 r_θ が減少する形状のケーシング (非

[†] E-mail address of corresponding author: m_watanabe@nagano-nct.ac.jp

同心円ケーシングと呼ぶこととする) と同心円ケーシングの流れの比較を行うこととした。

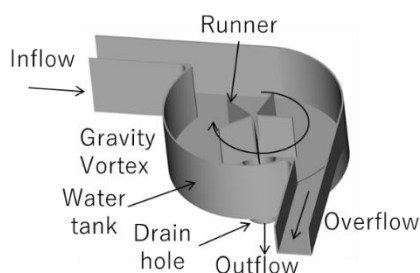
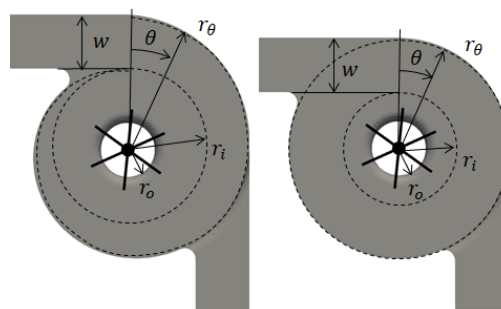


Fig. 1 Schematic view of vortex hydro turbine



(a) non-concentric casing (b) concentric casing

Fig.2 Casing shape handled in this study

表 1, 2 に, 解析に用いたケーシングと羽根車の寸法諸元を示す. 導水路幅(w)100mm, 羽根車高さ 150mm, 羽根枚数 6 枚に固定した。

Table 1 Dimension of tested casing

Casing type	r_i (mm)	r_θ (mm)	$r_{\theta mean}$ (mm)
Non-concentric	150	$250 - \frac{100}{2\pi}\theta$	200
	200	$300 - \frac{100}{2\pi}\theta$	250
Concentric	104	204	204
	155	255	255

Table 2 Dimension of tested runner

Runner type	Runner diameter (mm)
Small	150
Large	200

2.2. 解析方法と解析条件

作動流体を水とし, 空気層との自由表面の解析が可能な OpenFOAM の非圧縮性, 二相流解析用コードである interDymFoam を用いて解析を行った. 静止部と回転部を cyclicAMI (AMI: Arbitrary Mesh Interface) で接続することで回転する羽根車周りの流れを解析するものである. 支配方程式は水の相率輸送式, 質量保存式, 運動量保存式である. 運動量保存式には, 重力による体積力, CSF (Continuous Surface Force) モデルを用いた表面張力が考慮されている. 境界条件は, 流入境界では, ケーシング高さ 150mm まで水の相率と流速を与え, 流出口では, 圧力を規定した. 流入流速は 0.5m/s, 0.75m/s, 羽根車の回転数は 5 rad/s, 7.5 rad/s, 10rad/s とした.

3. 解析結果と考察

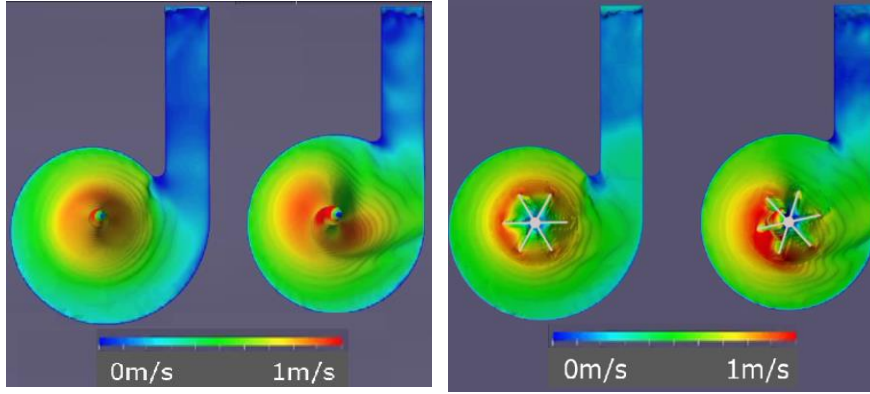
3.1. 自由表面上の周方向速度と自由表面高さ

非同心円ケーシング, 同心円ケーシングの自由表面上の旋回速度分布を図 3 に示す. 図 3(a) は羽根車なしの状態での解析結果であり, (b) は羽根車有りの状態での解析結果である. 各図において左側が非同心円, 右側が同心円ケーシングであり, それぞれ周方向平均半径 200mm, 204mm である. 解析条件は入口流速 0.5m/s, 羽根車の直径は 150mm, 回転角速度は 10rad/s である. 非同心円ケーシングでは, 周方向速度の大きさが排水口を中心として軸対称となっているのに対し, 同心円ケーシングでは反導水路側で速度が大きくなる傾向にある.

自由表面での周方向速度, 自由表面高さのケーシングによる違いを, 導水路がケーシング壁面とつながる位置 ($\theta = 0$) とその反対位置 ($\theta = \pi$) を結ぶ断面で比較する. 流れが完全に軸対称の場合, ある半径 (r_k) を境として内径側では半径に比例する強制渦, 外径側では半径に反比例する自由渦のとなるランキン渦が発生する. この時, 周方向速度 C_u 及び自由表面高さ H はそれぞれ式(1), 式(2)となる.

式(1)において, r は半径, ω は回転角速度である. 回転角速度は導水路の流入速度をケーシング周方向平均半径で除算した値とした. 式(2)において $r = r_{\theta=0}$, $r = r_o$ でそれぞれ解析結果の自由表面高さになるように C , r_k を決定した. 図 4 に自由表面高さを, 図 5 に周方向速度を示す. 横軸の半径位置 R が負の時, $\theta = \pi$ 上を

意味し、正の時、 $\theta=0$ 上を示す。実線はランキン渦の式(1)または(2)である。データ処理は5周分の時間平均を施している。



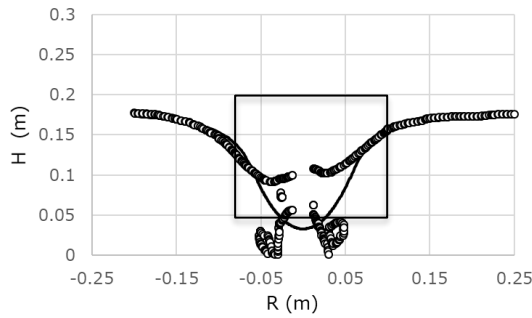
(a) Simulation results without runner (b) Simulation results with runner

Fig. 3 Circumferential velocity magnitude on the free surface

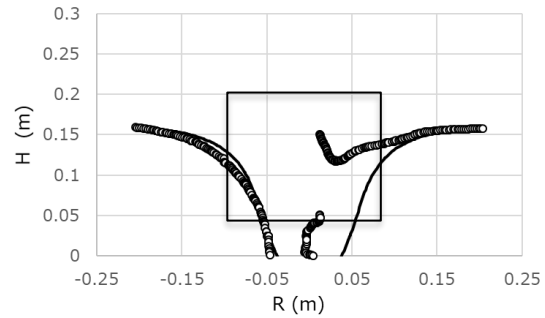
$$\begin{aligned} c_u &= r\omega & (r \leq r_k) \\ c_u &= r_k^2\omega/r & (r > r_k) \end{aligned} \quad (1)$$

$$H = \frac{\omega^2}{2g}(r^2 - r_k^2) + C \quad (r \leq r_k) \quad (2)$$

$$H = \frac{\omega^2}{2g}\left(r_k^2 - \frac{r_k^4}{r^2}\right) + C \quad (r > r_k)$$

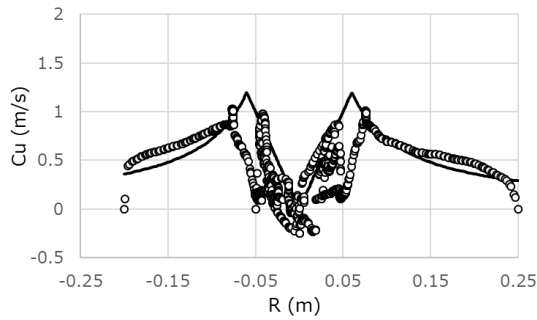


(a) Results of non-concentric casing with runner

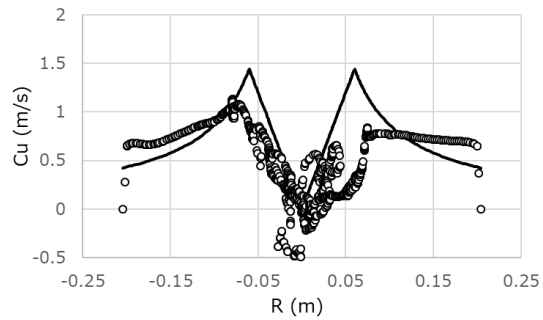


(b) Results of concentric casing with runner

Fig. 4 Free surface height



(a) Results of non-concentric casing with runner



(b) Results of concentric casing with runner

Fig. 5 Circumferential velocity magnitude on the free surface

図 4 の四角で囲われた領域に羽根車が存在する．非同心ケーシングでは羽根車があった場合でも軸対称性は保たれ、水量が確保されているが、同心円ケーシングでは、半径が正、すなわち導水路側では、自由表面高さは高いが、反導水路側ではほとんど水量が確保できていないことがわかる．図 5 から羽根車が存在する $-0.075 < R < 0.075$ の範囲で、非同心円ケーシングでは軸対称性が保たれ、流速も確保されていること、同心円ケーシングでは、水量の豊富な導水路側では速度が小さく、反導水路側では速度が大きい水量が少ないことがわかる．

3.2. 回収動力の比較

非同心円ケーシング，同心円ケーシングの流れの状態は大きく異なることがわかった．持ち込まれる単位時間当たりの角運動量を自由渦と強制渦が交わる位置での周方向速度 ($C_{u r=r_k}$) から求め、羽根車外径位置 (r_i) で羽根車の回転速度まで減速すると考えた場合、持ち込まれる動力 P は式(3)で近似できる．解析の 5 周分の羽根車軸トルクを平均し、回転角速度をかけることでそれぞれのケーシングでの動力求め、式(3)と比較した結果を図 6 に示す．渦を軸対称化した非同心ケーシングがより多くの動力を得ることがわかる．

$$P = \rho Q C_{u r=r_k} (C_{u r=r_k} - r_i \omega) \quad (3)$$

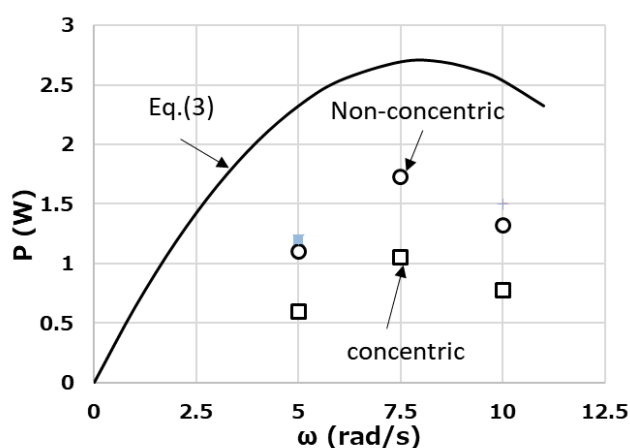


Fig. 6 Comparison of output power between non-concentric casing and concentric casing

4. 結論

ケーシング形状を変え、発生する渦を軸対称化することで重力渦式水車の性能向上を検討した．その結果、

- ・同心円ケーシングでは発生する渦が偏心する．
- ・排水口中心からケーシング外壁までの距離を導水路の影響を少なくするよう徐々に短くし、非同心円とすることで、発生する渦の軸対称化が図れる．
- ・渦を軸対称とすることで、羽根車の動力回収量を向上させることができる．

事が解析によりわかった．今後は、モデル試験により解析の精度を確認し、さらに詳細な解析と分析を行い、定量的な効果を予測を可能としていく．

参考文献

- [1] 上坂 博亨, 中川 慎二, 文部省科学研究費補助金研究 2016 年度実施状況報告書「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」(代表: 上坂 博亨, 課題番号: 15K00643), 最終閲覧日 2018 年 6 月 20 日, <https://kaken.nii.ac.jp/ja/report/KAKENHI-PROJECT-15K00643/15K006432016hokoku/>
- [2] 鈴尾 亮太, 西 泰行, 稲垣 照美, “重力渦式水車の性能に及ぼす羽根枚数の影響”, 日本機械学会 2017 年度茨城講演会(2017/8/29)
- [3] Anjali Mohanan M, “Power Generation with Simultaneous Aeration using a Gravity Vortex Turbine”, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 2, February-2016.
- [4] T Hommes, J Bosschers, H W M Hoeijmakers. Evaluation of the radial pressure distribution of vortex models and comparison with experimental data. 9th International Symposium on Cavitation, Journal of Physics: Conference Series 656 (2015) 012182.