

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420111

研究課題名(和文) ハイブリッド解析による極低落差用エコ水車の開発

研究課題名(英文) Development of eco-friendly hydraulic turbine for extremely low head by hybrid simulation

研究代表者

池田 敏彦 (IKEDA, Toshihiko)

信州大学・工学部・特任教授

研究者番号：60021010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では実験と粒子法による開放型貫流水車の性能向上と振動・騒音予測の可能性評価に注力した。その結果、粒子法におけるランナ内外部の流動現象を再現することを可能とし、時間平均速度分布をもとにした角運動量の変化からランナに作用するトルクを算出することで、実験と良好に一致する水車性能曲線を得ることができた。その一方で、振動・騒音を予測するためには、ブレード表面圧力の時系列データを得る必要があると考え、その算出精度について検討した。その結果、現在のアルゴリズムでは実際には生じ得ない過大な変動圧力が観測された。この原因解明までには至らなかったが、水粒子と壁粒子との異常接近が関係していることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study was focused on improvement of an open type cross-flow runner performance and feasibility study to simulate its vibration and noise with both of MPS method and experiment. The simulation employs a two-dimensional particle method. Flow in the turbine is successfully simulated, with the simulated turbine performance showing good agreement with experimental measurements. On the other hand, the noise and vibration could not be simulated accurately. We tried to calculate time history pressure on the surface of blades for estimation of these characteristics. However, too large pressure fluctuation was frequently occurred, and these characteristics could not obtain reasonable values. The problem may be caused by abnormally contacting between water type particles and wall type particles.

研究分野：流体工学

キーワード：粒子法 ハイブリッド解析 開放型水車 水車性能

1. 研究開始当初の背景

本研究では、実験とシミュレーションとのハイブリッド解析による開放型貫流水車の性能予測と振動・騒音評価を実施することを目的とした。開放型貫流水車において、その性能にはランナ内外部の流動現象が大きく影響するが、気相と液相との自由表面を有する開放型貫流水車においては、一般的なVOF法での解析では計算負荷が大きいこと、グリッド条件で解析結果が変化することなどから効率的な研究が推進できない。そこで、本研究ではシミュレーション手法にグリッド形成が不要かつ計算負荷が小さな二次元粒子法としてMPS法を採用した。

2. 研究の目的

二次元MPS法を開放型貫流水車の性能評価に使用できるようにするアルゴリズムの開発と、そのシミュレーション結果の妥当性評価、さらに水車性能評価を可能にしたのちに、開放型貫流水車で問題となり得る振動や騒音をMPS法で解析する場合の可能性評価を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験方法

本研究ではMPS法の妥当性を検証するために、実験も並行した。使用した実験装置の概要を図1に示す。ピットの水をその上部に設けた開放水路(図2)へとポンプアップし、水路一端から流下させ、ランナに作用したのちにピットへと戻る循環式とした。流量はポンプ回転数と手動弁により制御し、電磁流量計により監視した。

曲面流路と測定部の概要を図3に示す。曲面流路は開放水路端から始まる四分円をどのように設置し、四分円の先に平板を正接する構造とした。曲面流路は流路両脇からの空気の流入による流れのはく離を抑制するために高さ50mmの端板を設けた。ランナは開放型貫流ランナとし、その回転軸にトルク計とブレーキを直結する構造とした。水車の出力は、回転軸に作用するトルクと回転軸の回転数を測定することで算出した。

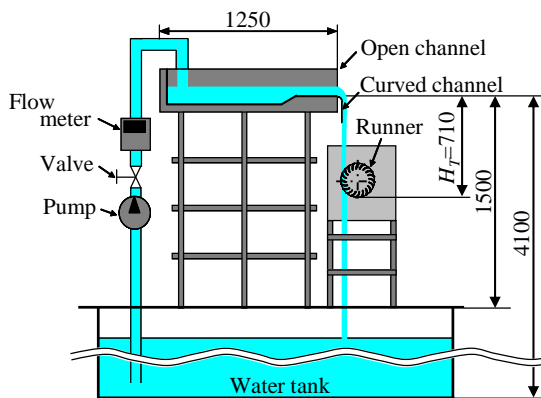


図1 実験装置概要

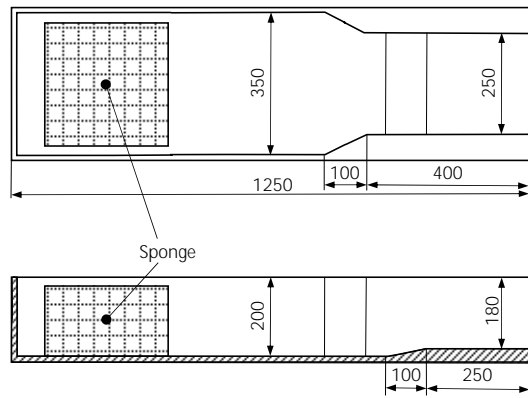


図2 開水路形状

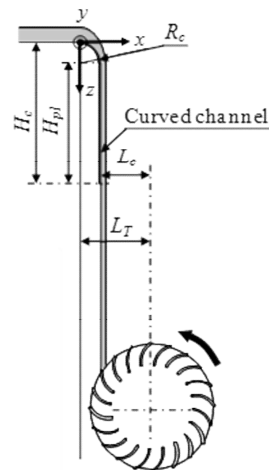


図3 測定部

(2) 数値シミュレーション方法と対象

シミュレーションには、自由表面流れの解析に有用なMPS法(Moving Particle Semi-implicit法)を用いる。従来の共同研究でも用いられた方法である。流れに非圧縮性を仮定すれば、質量および運動量の保存式はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 t は時間、 \mathbf{u} は速度、 P は圧力、 ν は動粘度、 \mathbf{F} は重力などの外力を表す。

MPS法では流体を粒子で離散化し、その運動をLagrange的に計算する。式(2)における勾配およびラプラシアンは、粒子間相互作用により表現する。相互作用は、重み関数 w を用いて考慮する。

$$w(r) = \begin{cases} r_e/r - 1 & r \leq r_e \\ 0 & r > r_e \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 r は粒子間距離であり、 r_c は相互作用が及ぶ範囲を定めるパラメータである。

粒子 i の位置における粒子数密度 n_i を次式で定義する。

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{r} は粒子の位置ベクトルを表す。

非圧縮性流れでは流体の密度は一定であるから、 n_i も一定である必要がある。この一定値を n^0 とする。この場合、粒子 i の位置における勾配演算およびラプラシアン演算は、それぞれ次式で表される。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (5)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)] \quad (6)$$

ここで、 ϕ は任意の物理量、 d は次元数、 λ は変数分布の分散を解析解と一致させるための係数であり、次式で与えられる。

$$\lambda = \int_V w(r) r^2 dv / \int_V w(r) dv \quad (7)$$

粒子数密度により自由表面を表現する。すなわち、 n_i が次式を満たす場合には、粒子 i が自由表面上にあるものと判定する。

$$n_i < \beta n^0 \quad (8)$$

ここで、 β は計算パラメータであり、 $\beta < 1$ である。

ランナとブレードの詳細を図4に示す。ランナの直径 D_1 は200 mm、ブレードの枚数は20である。

計算領域を図5に示す。落下水流(厚み t)がランナに向かって流入する。ブレード入口角度は β_1 で定義する。

ランナの回転角速度を ω 、外周速度を V_i ($=\omega D_1/2$)、浅速流の速度を V_0 とし、周速比 $\lambda = V_i/V_0$ を定義する。また、水車出力 P の無次元値すなわち水車効率 η を次式で定義する。

$$\eta = 2P / (\rho Q V_0^2) \quad (9)$$

ここで、 Q は流量である。

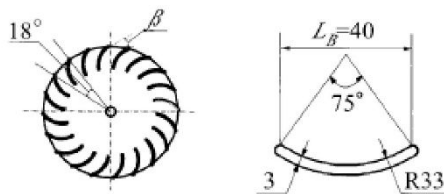


図4 ランナとブレード

4. 研究成果

本研究では実験と粒子法による開放型貫流水車の性能向上と振動・騒音予測の可能性評価に注力した。その結果、粒子法におけるランナ内外部の流動現象を再現することを可能(図6)とし、時間平均速度分布(図7)をもとにした角運動量の変化からランナに作用するトルクを算出することで、実験と良好に一致する水車性能曲線を得ることができた(図8)。また、水流とランナとの相対位置と水車性能との関係を明らかにするなどの成果を得た。その一方で、振動・騒音を予測するためには、ブレード表面圧力の時系列データを得る必要があると考え、その算出精度について検討した。その結果、現在のアルゴリズムでは実際には生じ得ない過大な変動圧力が観測された。この原因解明までには至らなかったが、水粒子と壁粒子との異常接近が関係していることが示唆された。

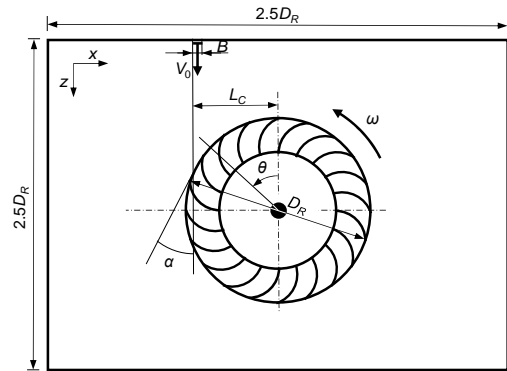


図5 計算領域

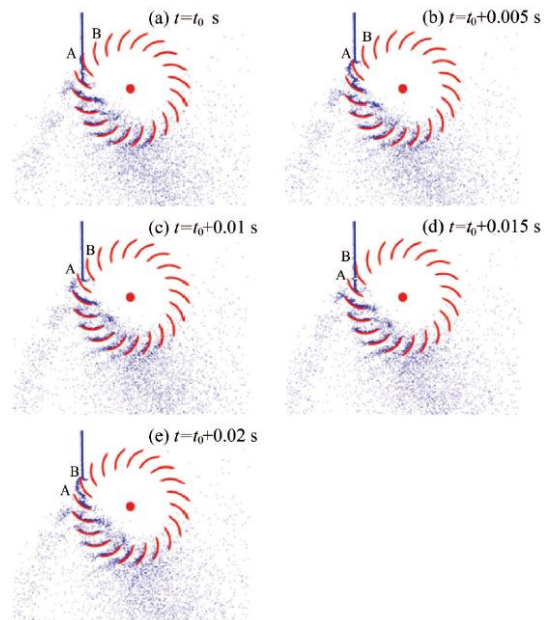
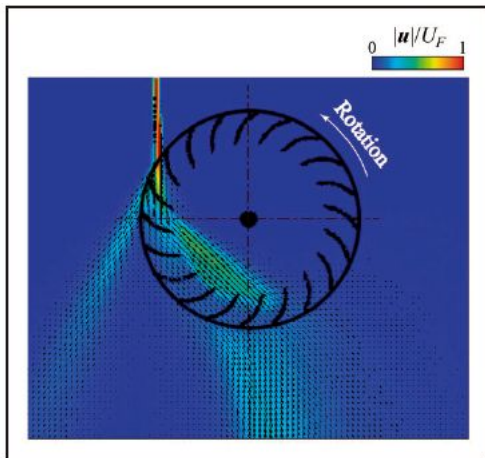
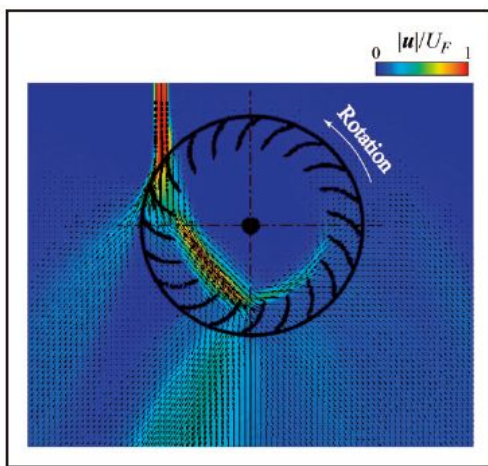


図6 ランナ内外部の水流状況 (MPS法)



(a) $Q=0.003\text{m}^3/\text{s}$



(b) $Q=0.009\text{m}^3/\text{s}$

図7 平均速度分布

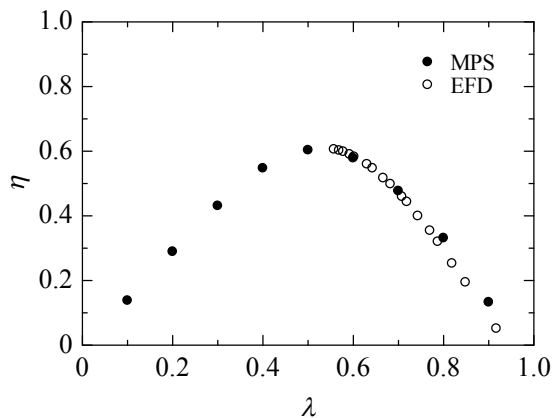


図8 MPS法と実験による水車性能曲線

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4件)

Tomomi Uchiyama, Shou Uehara, Haruki Fukuhara, Shouchiro Iio and Toshihiko Ikeda, Numerical study on the flow and performance of an open cross-flow mini-hydraulic turbine,

Journal of Power and Energy, 査読有, 229(8), 968-977,2015

Yusuke Katayama, Shouchiro Iio, Tomomi Uchiyama, Toshihiko Ikeda, Effect of flow condition on undershot water wheel performance, International Review of Mechanical Engineering Journal, 査読有, 8(6), 1005-1011, 2014
DOI:http://dx.doi.org/10.15866/ireme.v8i6.4707

Tomomi Uchiyama, Shou Uehara, Shouchiro Iio, Toshihiko Ikeda, Yukio Ide, Numerical simulation of water flow through nano-hydraulic turbine driven by rapid and shallow stream, Journal of Energy and Power Engineering, 査読有, 8,1663-1672, 2014

Tomomi Uchiyama, Haruki Fukuhara, Shouchiro Iio, Toshihiko Ikeda, Numerical simulation of water flow through a nano-hydraulic turbine of waterfall-type by particle method, International Journal of Rotating Machinery, 査読有, 1-8, 2013
DOI:http://dx.doi.org/10.1155/2013/473842

[学会発表](計 7件)

Yusuke Katayama, Nobuhiro Hayashi, Shouchiro Iio, Toshihiko Ikeda, Influence of inlet condition on undershot type cross-flow turbine, GRAND RENEWABLE ENERGY 2014,2014.7.31,東京ビッグサイト

Kaika Kimoto, Yusuke Katayama, Shouchiro Iio, Toshihiko Ikeda, Effect of flow direction control with curved for waterfall type turbine, GRAND RENEWABLE ENERGY 2014,2014.7.31,東京ビッグサイト

片山雄介, 飯尾昭一郎, 木本海花, 池田敏彦, 開放型貫流ランナーにおけるブレード角度と内部流れの関係, 第91期日本機械学会流体工学部門講演会, 2013.11.9,九州大学

片山雄介, 木本海花, 飯尾昭一郎, 池田敏彦, 開放型貫流水車のブレード角度が出力特性に与える影響, 第70回ターボ機械協会信州講演会, 2013.9.13,信州大学工学部

上原 翔, 内山知実, 飯尾昭一郎, 池田敏彦, 浅速流用小型水車を通過する流れの数値シミュレーション, 第70回ターボ機械協会信州講演会, 2013.9.13,信州大学工学部

飯尾昭一郎, 池田敏彦, エコ水車の研究開発 . 日本混相流学会混相流シンポジウム
2013, 2013. 8. 10, 信州大学工学部

上原 翔, 内山知実, 福原春起, 飯尾昭一郎,
池田敏彦, 開放型貫流水車の流れと性能の
数値解析, 日本機械学会第 18 回動力・エネ
ルギー技術シンポジウム, 2013. 6. 20-21,
千葉大学

〔その他〕

ホームページ等

研究代表者情報

<http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.OChZhkh.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

池田 敏彦 (IKEDA, Toshihiko)

信州大学・工学部・特任教授

研究者番号 : 6 0 0 2 1 0 1 0

(2) 研究分担者

飯尾 昭一郎 (IIO, Shouichiro)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号 : 8 0 3 7 7 6 4 7

内山 知実 (UCHIYAMA, Tomomi)

名古屋大学・未来材料システム研究所・教
授

研究者番号 : 9 0 1 9 3 9 1 1