

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04258

研究課題名（和文）進化的計算法を用いた集水装置付き軸流水車の多目的最適化と集水増速作用の解明

研究課題名（英文）Multi-Objective Optimization of an Axial Flow Hydraulic Turbine with a Collection Device Using Evolutionary Computation Method and Elucidation of Water Collection Acceleration Action

研究代表者

西 泰行（Nishi, Yasuyuki）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・教授

研究者番号：50585122

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、水深の浅い開水路流れを利用する集水装置付き軸流水車の性能特性を単相流れ場で制御することで、自由表面流れ場において高出力かつ低軸推力を実現しうる多目的最適化設計法を構築することを目的とする。そこで、進化的計算法を用いた羽根車と集水装置の同時多目的最適化設計法を構築し、4つの性能特性を制御した。その結果、水深の浅い開水路において出力増大に寄与しない圧力回復係数を適度に減少させ、背圧係数を減少させることで水車本体を大幅に小型化でき、実際の開水路において軸推力がほぼ同等で水車出力が大幅に向上することが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風レンズ風車は単相流解析により性能評価が可能であるが、水深の浅い開水路で作動する集水装置付き軸流水車は自由表面を考慮した混相流解析による性能評価が必須であり、計算負荷が極めて大きく最適化が困難である。本研究では、水車出力や軸推力に加えて集水増速作用に関係する圧力回復効果や背圧減少効果を単相流れ場で制御することで、実際の開水路において高出力かつ低軸推力を実現する多目的最適化設計法を構築した。得られた成果は、様々な条件下の開水路において作動する水車を計算負荷の小さい単相流解析を用いて迅速に最適化するための多目的最適化設計法の構築とその設計指針の確立に資するものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a multi-objective optimization design method that can achieve high power and low axial thrust in a free surface flow field by controlling the performance characteristics of an axial flow hydraulic turbine with a collection device utilizing shallow open channel flow in a single-phase flow field. Therefore, a simultaneous multi-objective optimization design method of runner and collection device using evolutionary computation method was constructed to control four performance characteristics. As a result, it was demonstrated that the pressure recovery coefficient, which does not contribute to increased output in shallow open channels, can be moderately reduced and the backpressure coefficient can be reduced to significantly reduce the size of the turbine body, resulting in a significant increase in turbine output with almost the same axial thrust in actual open channels.

研究分野：流体工学

キーワード：小水力 水車 軸流羽根車 集水装置 開水路 自由表面 進化的計算法 多目的最適化

1. 研究開始当初の背景

水力エネルギーは最大の再生可能エネルギー源であり、CO₂ 排出量削減の観点から、その導入容量の拡大が期待されている。この実現には、単位面積当たりの出力が小さく、利用し難いために、これまで見過ごされてきた開水路流れのエネルギーを積極的に活用していくことが求められる。その打開策として、申請者は可搬性に優れ、河川や用水路などの水深の浅い開水路の流水中に、大人二人で持ち運んで容易に設置できる集水装置付き軸流水車を考案した。本水車は風レンズ風車の原理を応用し、軸流羽根車に高さ方向一定のディフューザ部を持つ集水装置を付加した構造である。そのため、羽根車外径を水深と同程度までサイズアップでき、流れを集水・増速させることで出力向上を図っている。

これまでの研究で、本水車の出力向上には相反する羽根車の負荷と集水装置による集水増速作用を適正化する必要があること、集水増速作用は背圧減少効果が小さく、圧力回復効果が大きいほど向上することを明らかにした。しかし、水深の浅い開水路では水車自身の抵抗により上流・下流の水深差が大きくなり、背圧減少効果が格段に大きくなるものの、集水装置ディフューザ部が水で満たされず、圧力回復効果が得られないため、出力低下を引き起こすことを見出した。したがって、自由表面流れ場における背圧減少効果や圧力回復効果の影響、ひいては集水増速作用を解明し、それらを制御できれば、様々な開水路条件での出力向上が期待できる。しかし、背圧減少効果はつば形状に、圧力回復効果は集水装置ディフューザ形状に密接に関係している。例えば背圧減少効果を高めるためにつばを長くすれば、水車に作用する軸方向の推力(軸推力)が増大し、大人二人での設置・撤去が困難となる。また、圧力回復効果を高めるためにディフューザ部を大きくすると、水車本体が大型化する。すなわち、性能と可搬性はトレードオフの関係にある。しかも、本水車は羽根車と集水装置が相互干渉し、設計変数も極めて多いため、性能特性を制御することは容易でない。したがって、いかにして水車に作用する軸推力を減らしつつ出力を増大させるか、自由表面流れ場における集水増速作用の解明と制御が大きな課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、水深の浅い開水路流れを利用する集水装置付き軸流水車の性能特性を単相流れ場で制御することで、自由表面流れ場において高出力かつ低軸推力を実現しうる多目的最適化設計法を構築するとともに、集水増速作用を解明することを目的とする。そこで、水深の浅い開水路において出力増大に寄与しない圧力回復効果を抑え、背圧減少効果を高めることで水車本体を小型化するとともに、出力を最大化しつつ軸推力を低減させることを試みる。

3. 研究の方法

本水車の出力向上には相反する羽根車の負荷と集水装置による集水増速作用を適正化する必要があるが、羽根車と集水装置の設計変数は極めて多い。そこでまず、羽根車形状を固定し、集水装置のみを対象とした多目的最適化設計法を構築する。その上で、集水装置の設計変数を抽出し、羽根車と集水装置の同時多目的最適化設計法を構築する。さらに、水車本体の小型化と出力係数を最大化しつつ軸推力係数を低減させるため、圧力回復係数をどの程度抑制すべきか 3 段階に減少させたときの性能特性に及ぼす影響を調査する。

(1) 集水装置の多目的最適化設計法の構築

背圧減少効果は集水装置のつば形状に、圧力回復効果は集水装置のディフューザ長さと同広がり角に密接に関係していると考えられる。そこで、ディフューザ長さ、つば長さと同広がり角に加えて、ノズル部の両狭まり角を設計変数とする。水深の浅い開水路において出力増大に寄与しない圧力回復係数を減少させ、背圧係数を減少させることで水車本体(ディフューザ部)を小型化するとともに、出力係数を最大化しつつ軸推力係数を低減させるべく、これら 4 つの性能特性を目的関数とした多目的最適化設計法を構築する。

本設計法の流れを図 1 に示す。本設計法は実験計画法、応答曲面法および最適化手法を組み合わせたものである。実験計画法には L9 直交表を使用し、4 個の設計変数を 3 水準に変化させ、L9 直交表に割り付ける。9 個の水車の性能特性の評価には、計算負荷を低減させるため、自由表面を考慮しない一様流れを仮定した定常単相流解析により行う。性能特性の解析結果から応答曲面法として Kriging 法を使用し、性能特性と設計変数をパラメータとした解空間を生成する。生成した解空間から最適化手法として NBI (Normal Boundary Intersection) 法を使用し、パレート解の探索を行う。4 つの目的関数のパレート解からデータマ

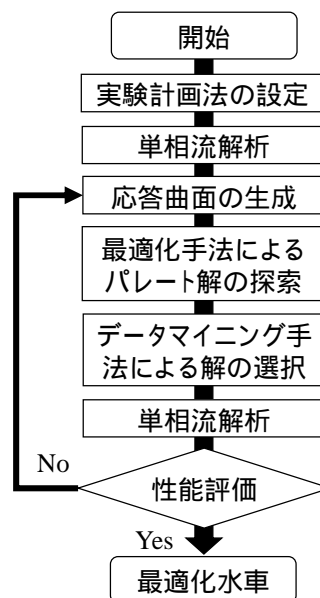


図 1 最適化設計フロー

イニング手法として自己組織化マップ (SOM) を使用し、原型水車に対して出力係数 C_w はほぼ同等で、圧力回復係数 C_{pd} は極力小さく、軸推力係数 f_a は同等または少し大きい程度で、背圧係数 C_{pb} は小さい最適候補を抽出する。この最適候補の水車に対して定常単相流解析を行い、目的関数とした性能特性を評価する。求める性能特性が得られた場合、それを最適化水車とする。求める性能特性が得られない場合は、この結果を学習させ、応答曲面の生成から定常単相流解析による性能評価までを繰り返す。

得られた最適化水車に対し、模型実験と自由表面を考慮した混相流解析を行い、本設計法の有効性を検証する。模型実験では、開放型回流水槽を用いて性能試験と軸推力測定(集水装置のみ)を行う。性能試験では、送水ポンプおよび流量計を用いて設計流量に設定し、回転速度を変化させてトルクを測定することで水車出力を定量的に評価する。軸推力測定では、同様に2分力計を用いて集水装置に作用する軸推力を測定する。自由表面を考慮した混相流解析では、VOF (Volume of Fluid) 法を用いて実験と同一条件で非定常解析を行う。

(2) 羽根車と集水装置の同時多目的最適化設計法の構築

羽根車と集水装置を同時に多目的最適化する設計法を(1)と同様に構築する。実験計画法にはL27直交表を使用し、集水装置では(1)での結果を基に抽出した3個(ディフューザ長さ、つば長さ、両広がり角)、羽根車では10個(5つの無次元半径位置0.12、0.25、0.50、0.75、1.00における翼弦長および翼角度)の計13個の設計変数とする。27個の水車の性能特性の評価は、定常単相流解析により行う。応答曲面法としてKriging法を使用し、解空間を生成する。生成した解空間から最適手法として進化的計算法の一種であり、NSGA-IIアルゴリズムをベースとしたNSEA+ (Non-dominated Sorting Evolutionary Algorithm+) 法を使用し、パレート解の探索を行う。4つの目的関数のパレート解からデータマイニング手法として自己組織化マップ(SOM)を使用し、圧力回復係数をどの程度抑制すべきか3段階に減少させた3つの設計コンセプトの最適候補を抽出する。3つの設計コンセプトは原型水車に対して圧力回復係数 C_{pd} をそれぞれ約-15%、-25%、-35%とし、出力係数 C_w はほぼ同等または大きい、軸推力係数 f_a は同等または少し大きい程度で、背圧係数 C_{pb} は小さい水車である。3つの設計コンセプトの最適候補の抽出は、それぞれのルートで行う。各最適候補の水車に対して定常単相流解析を行い、求める性能特性が得られた場合、それを最適化水車とする。求める性能特性が得られない場合は、この結果を学習させ、応答曲面の生成から定常単相流解析による性能評価までを繰り返す。

得られた各最適化水車に対し、自由表面を考慮した混相流解析を行い、単相流解析結果と比較検討する。特に圧力回復係数 C_{pd} を約-25%とした最適化水車については模型実験(性能試験と軸推力測定(集水装置のみ))を行い、本設計法の有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 集水装置の多目的最適化設計法の構築

集水装置のみを対象として多目的最適化した最適化水車は、原型水車に対してディフューザ長さが46.0%減少、つば長さを含むディフューザ幅が1.2%減少した。原型水車と最適化水車の性能特性の比較を表1に示す。単相流解析結果において最適化水車は原型水車に対して出力係数 C_w が-0.9%、軸推力係数 f_a が+6.7%、圧力回復係数 C_{pd} が-16.1%、背圧係数 C_{pb} が-12.8%であった。混相流解析結果において最適化水車は原型水車に対して C_w が+11.6%、 f_a が+2.6%、 C_{pd} が+28.3%、 C_{pb} が+21.5%であった。実験結果でも設計回転速度 $n=490 \text{ min}^{-1}$ において水車出力 W が+9.0%、軸推力 F_a (集水装置のみ) が+1.1%と混相流解析結果と同様の傾向が得られた。

したがって、集水装置の多目的最適化設計法により水深の浅い開水路で出力増大に寄与しない圧力回復係数を減少させ、背圧係数を減少させることで水車本体を大幅に小型化でき、実際の開水路において軸推力がわずかに増加するものの水車出力が向上することが実証された。

表1 性能特性の比較 ($\lambda = 3.59$)

		出力係数 C_w	軸推力係数 f_a	圧力回復係数 C_{pd}	背圧係数 C_{pb}
単相流解析	原型水車	0.400	3.232	0.506	-0.491
	最適化水車	0.396	3.448	0.425	-0.554
混相流解析	原型水車	0.260	3.927	-2.381	-0.960
	最適化水車	0.290	4.029	-2.166	-0.754

(2) 羽根車と集水装置の同時多目的最適化設計法の構築

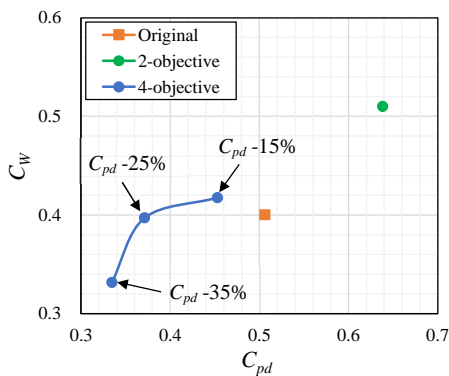
羽根車と集水装置の同時多目的最適化において、目的関数を出力係数 C_w 、軸推力係数 f_a 、圧力回復係数 C_{pd} 、背圧係数 C_{pb} の4つとし、原型水車に対して圧力回復係数 C_{pd} をそれぞれ約-15%、-25%、-35%として最適化を行った。得られた4目的の最適化水車(4-objective)をそれぞれ C_{pd} -15%、 C_{pd} -25%、 C_{pd} -35%と呼称する。比較のため、目的関数を出力係数 C_w と軸推力係数 f_a の2つで多目的最適化を行った。その際、原型水車に対して同等の軸推力係数 f_a で出力係数 C_w を最大化させた最適化水車を2-objectiveと呼称する。

単相流解析および混相流解析による圧力回復係数 C_{pd} と出力係数 C_w の関係をそれぞれ図2(a)、(b)に、圧力回復係数 C_{pd} と軸推力係数 f_a の関係をそれぞれ図3(a)、(b)に示す。また、混相流解析

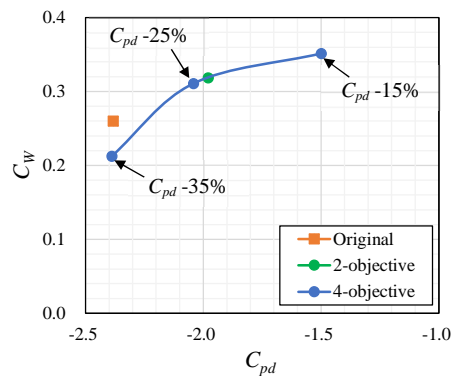
による圧力回復係数 C_{pd} とディフューザ長さおよびディフューザ幅 (つばを含む) の関係をそれぞれ図 4(a)、(b) に示す。

図 2(a)、(b) ~ 図 4(a)、(b) より、最適化水車は C_{pd} が小さいほど C_w と f_a が小さくなり、ディフューザ長さも小さくなっている。また、 C_{pd} が一定以上減少すると単相流解析に対する混相流解析での C_w の低下が大きくなり、 f_a の増大が小さくなることからわかる。 C_{pd} -25% に着目すると、単相流解析では原型水車に対して C_{pd} が約 25% 減少したものの、ほぼ同等の C_w と f_a が得られた。混相流解析では C_{pd} -25% は原型水車とほぼ同等の f_a で、 C_w が 19.4% 向上した。2-objective と比較すると、単相流解析では C_{pd} -25% は 2-objective とほぼ同等の f_a であるが、 C_w が大幅に低い。しかし、混相流解析では C_{pd} -25% は 2-objective に対して f_a が少し小さく、 C_w がほぼ同等であった。 C_{pd} -25% は原型水車や 2-objective に対してディフューザ長さが大幅に小さい。ディフューザ幅についても C_{pd} -25% は原型水車とほぼ同等で、2-objective に対してやや小さくなっており、大幅に小型化されている。この C_{pd} -25% に対して性能試験および軸推力測定を行い、水車出力と軸推力について混相流解析結果と同様の傾向が得られることを確認した。

以上より、進化的計算法を用いた羽根根車と集水装置の同時多目的最適化設計法により水深の浅い開水路において出力増大に寄与しない圧力回復係数を適度に減少させ、背圧係数を減少させることで水車本体を大幅に小型化でき、実際の開水路において軸推力がほぼ同等で水車出力が大幅に向上することが実証された。

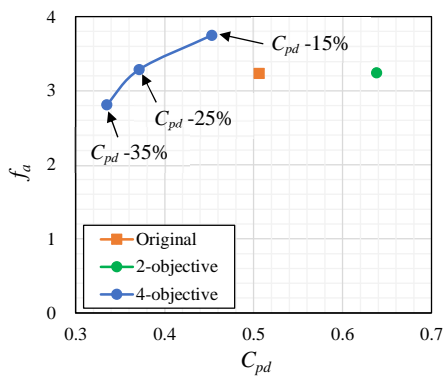


(a) 単相流解析結果

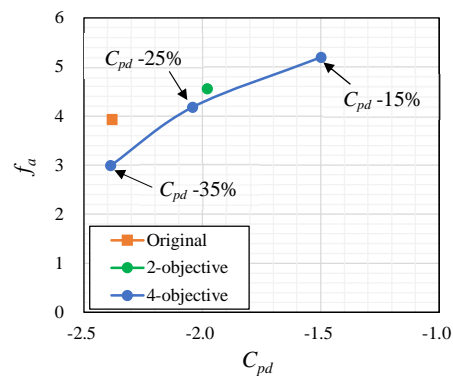


(b) 混相流解析結果

図 2 圧力回復係数 C_{pd} と出力係数 C_w の関係 ($\lambda = 3.59$)

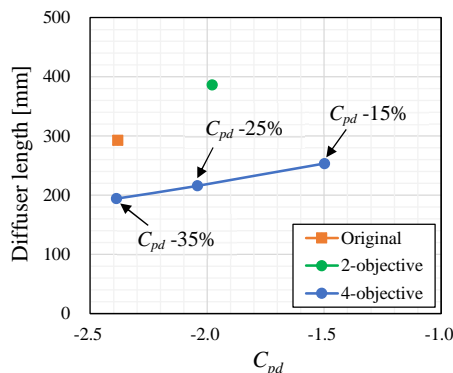


(a) 単相流解析結果

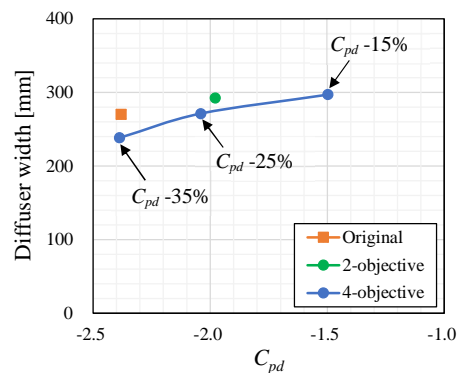


(b) 混相流解析結果

図 3 圧力回復係数 C_{pd} と軸推力係数 f_a の関係 ($\lambda = 3.59$)



(a) ディフューザ長さ



(b) ディフューザ幅

図 4 圧力回復係数 C_{pd} と水車寸法の関係 (混相流解析結果、 $\lambda = 3.59$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nishi Yasuyuki, Koga Hiromichi, Inagaki Terumi	4. 巻 16
2. 論文標題 Multi-Objective Optimization of the Collection Device Shape of an Axial Flow Hydraulic Turbine with a Collection Device	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Fluid Machinery and Systems	6. 最初と最後の頁 110 ~ 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5293/IJFMS.2023.16.1.110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nishi Yasuyuki, Koga Hiromichi, Wee Yi Hong	4. 巻 209
2. 論文標題 Multi-objective optimization of an axial flow hydraulic turbine with a collection device to be installed in an open channel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Renewable Energy	6. 最初と最後の頁 644 ~ 660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.renene.2023.03.130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 WEE YI HONG, 西泰行, 古賀広理, 稲垣照美
2. 発表標題 開水路における集水装置を有する軸流水車の集水装置形状の4目的最適化による高出力・低軸推力化
3. 学会等名 日本機械学会2021年度茨城講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 WEE YI HONG, 西泰行, 古賀広理, 稲垣照美
2. 発表標題 集水装置を有する軸流水車の羽根車および集水装置の多目的最適化
3. 学会等名 第99期日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------