

# 最適化技術と高度CFD技術の適用による水車の高性能化

Optimization Method with Advanced CFD Technology for Design of High-Performance Hydraulic Turbines

日向 剛志

榎本 保之

中村 一幸

■ HYUGA Takeshi

■ ENOMOTO Yasuyuki

■ NAKAMURA Kazuyuki

再生可能な自然エネルギーを利用する水力発電は、発電所の立地条件及びユーザーのニーズにより落差や出力が個々に異なるため、発電所ごとに最適な性能を持つ水車を開発することが求められる。効率やキャビテーション<sup>(注1)</sup>性能など最適な水車性能を得るために、水車流水面を定義する多くの設計パラメータを変更し、真の最適な水車形状を見いだすには多大な時間を要する場合が多い。

東芝は解析手法と流れ解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を組み合わせた最適化手法を開発するとともに、CFD技術の精度を更に高度化させ、これらを国内外の発電所に適用して水車の高性能化に大きな成果を上げている。

In hydroelectric power generation using renewable natural water power, it is necessary to develop the optimal hydroelectric performance individually for each hydraulic turbine because of the difference in head and output of each hydroelectric power station in accordance with its location and the customer's requirements. As there are many design parameters for the optimization of hydroelectric performance including efficiency, cavitation performance, and hydroelectric stability, a long computation time is required to obtain the optimal turbine shape.

Toshiba has developed a unique optimization method for the design of high-performance hydraulic turbines that employs both high-accuracy analysis and computational fluid dynamics (CFD) analysis. We have obtained good results applying this method to hydroelectric power stations in the domestic and overseas markets.

## 1 まえがき

水力発電は発電所の立地条件やユーザーのニーズにより個々に落差や出力が異なる。そのため、発電所ごとに最適な性能を持つ水車を開発することが求められる。

水車の性能開発は、発電所の流路と相似な縮小模型を製作し試験することが一般的であるが、1980年代から流れ解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) も併用されるようになった。その後、コンピュータの発達に伴い、高度な解析手法の開発や予測精度の向上とともに、CFDをベースに最適化する手法も確立され、実験計画法 (DOE: Design of Experiment) を利用した手法をはじめ、最近では多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithms) と組み合わせた最適化手法も確立され、実際の水車の性能向上に適用されている。

ここでは、東芝が水車の開発に適用している最適化技術と高度CFD技術の最近の取組み状況、及び実際の発電所へ適用した事例について述べる。

## 2 高性能水車設計手法

水車性能は、主に効率、キャビテーション性能、及び水圧振動特性で評価されるが、水車は負荷調整の役割もあり定格出

力以外の領域で運転されることも多い。このため、定格点だけでなく広い運転範囲で高性能化が求められている。水車の流水面は、ケーシングや、ステーベン、ガイドベン、ランナ、吸出し管などから構成され、それぞれ流水面形状を定義する設計パラメータを変更することで様々な形状に設計することができる。目的とする運転条件により設計パラメータの最適値は異なるが、広い運転範囲で高性能な水車を開発するには、複数の運転点で効率やキャビテーション性能などを同時に最適化する必要がある。しかし、最適形状を抽出するには多大な時間を要し、真の最適値を見いだすことは困難である場合が多い。

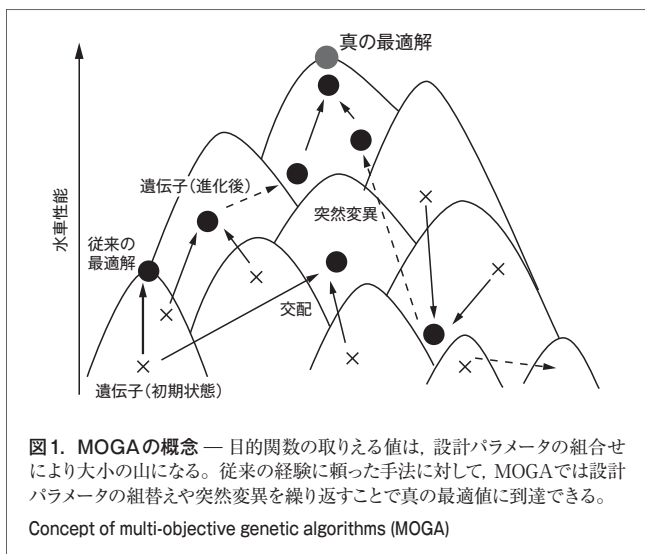
当社は、このような問題を解決するため、MOGA及びDOEを中心とした形状設計プログラムとCFDを組み合わせた最適化手法を適用している。

### 2.1 MOGA

遺伝的アルゴリズムは生命の進化論に基づいて開発された手法であり、広域的に最適値を探索することができる<sup>(1)</sup>。この手法を複数の目的関数に対して適用したものをMOGAと言う。

MOGAの概念を図1に示す。設計パラメータの組合せにより目的関数の取りえる特性を描くと大小の山が存在することに

(注1) 水車内部で、水流中の低圧部が飽和蒸気圧以下となると気泡が発生する現象。この気泡が圧力回復により崩壊するときに騒音やランナ表面の損傷が生じる。



なるが、従来の手法では初期状態を経験に頼って設定するため、狭い範囲で最適値を見つけるにとどまっていた。一方、MOGAでは初期の形状を確率的にランダムに作成し、それぞれの設計パラメータの組替えや突然変異を繰り返し、新たな形状を発生させて真の最適値に到達できる。

この手法は、水車の設計段階で代表的な比速度に対する本質的な設計パラメータを最適化するために適用される。

## 2.2 DOE

DOEは、一般に直交表を用いて最適化を行う手法である<sup>(2)</sup>。直行表に基づき設計パラメータを組み合わせて水車形状を設計し、その形状をCFDにより評価する。このデータから設計パラメータの目的関数に対する感度を反映した伝達関数を求め、この伝達関数を用いて最適解を見いだすことができる。この手法は、初期状態のある局所的な空間で短時間に最適解を見いだすことができるため、いかにして最適解に近い初期状態を選定するかが重要になる。

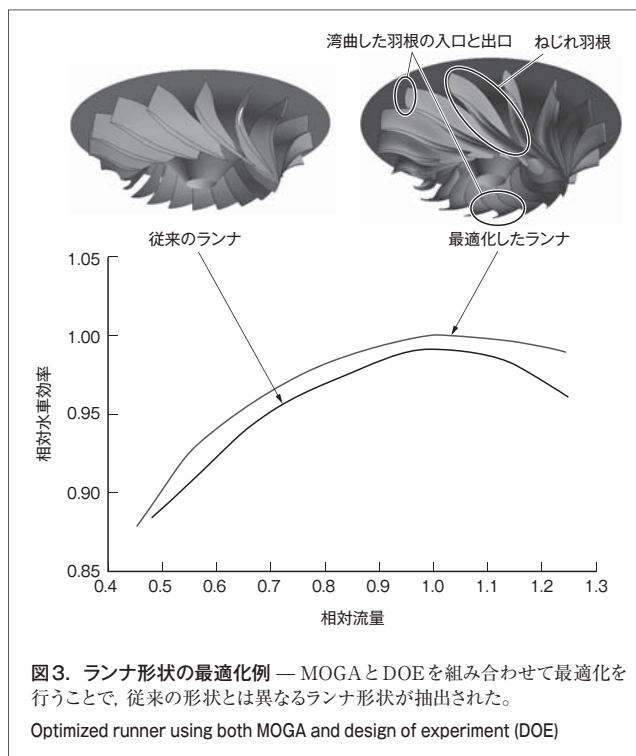
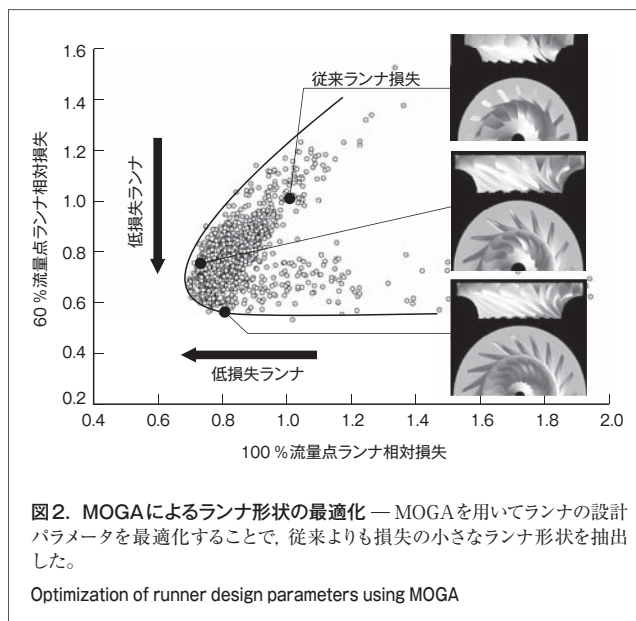
この手法は、個々の発電所に特有な要求仕様を満たすために適用される。

## 2.3 水車ランナ形状最適化への適用例

前述の二つの手法を低比速度のフランス水車ランナへ適用した事例について述べる。

まず、MOGAによりランナ形状を最適化するため、ランナ形状をランナ子午面形状や3次元羽根形状など約30の設計パラメータで定義した。また、最適化する目的関数として、120%流量点、100%流量点(設計点)、及び60%流量点でのランナ損失を選定した。ランナ損失分布における最適化の推移と、その代表的な形状を図2に示す。設計回数が増えるにつれて徐々に損失が減少し、従来よりも損失の小さなランナ形状が得られた。

次に、MOGAで得られた損失の小さい設計パラメータを基準とし、DOEにより更なるチューニングを行った。ここでの最



適化は実際のニーズに合わせて各運転点の損失に重み付けを行い、その荷重平均損失を最小化するように設定した。また、キャビテーション性能や吸出し管性能も重要であることから、これらの影響も最適化対象に加えてランナ形状の最適化を行った。

このようにして最適化を行った結果、図3に示すように従来とは大きく異なるランナ形状になったが、模型試験により、小流量から大流量まで広い運転範囲で大幅に効率が向上することを確認した。

### 3 高度CFD技術

2章で述べた設計段階における形状の最適化はCFDの結果を基に行うため、CFDの精度向上が重要になる<sup>(3)</sup>。また、CFDでは実験からは得られない水車内部の複雑な流動現象を詳細にとらえることができるため、CFDで得られた情報を設計に有効活用することで、更に水車の高性能化を図ることが可能になる。

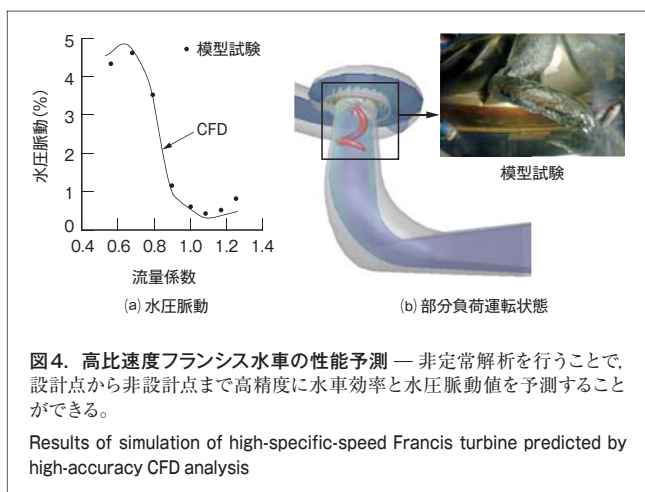
当社は、水車効率や、キャビテーション性能、水圧脈動特性など水車の主な性能をCFDで予測するため、解析対象の流れ場に合った乱流モデル<sup>(注2)</sup>やキャビテーションモデル<sup>(注3)</sup>の選定を行い、高精度化に向けた研究開発を進めている。代表的な例について、以下に述べる。

#### 3.1 効率及び水圧脈動の予測

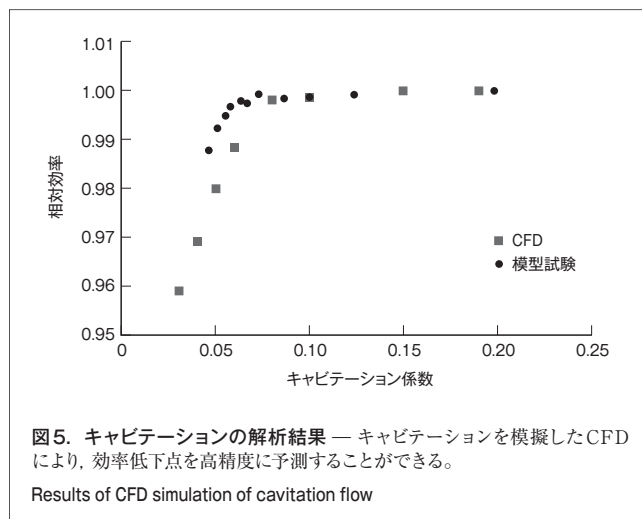
比速度が高くなると非定常性の影響が強くなり、精度良く水車性能を見積もることは難しくなる。そのため、水車性能の予測にも非定常解析手法を用いることが必要になっている。

代表的な乱流解析手法であるRANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) の乱流モデルに、非等方性を持つ流れ場を高精度に解くことができるレイノルズ応力モデルを組み合わせた解析を行った。その結果、定常解析に比べて非定常解析の効率予測結果が模型試験の結果とよく一致した。また、図4の解析結果は、部分負荷運転点で発生する吸出し管の旋回渦の挙動もよくとらえており、更に、これら渦の挙動などに起因する水圧脈動についても高精度に予測できている。

今後この渦の挙動による水圧脈動の増大の要因を分析することで、水圧脈動を低減する知見が得られると期待される。



(注2) 乱流の渦を直接解くのではなく、空間的又は時間的に平均化処理をして解く数学モデル。  
 (注3) キャビテーション現象を数値的に解析するための数学モデル。キャビテーションを含む流れ(気液2相流)を擬似単一媒体とみなしその混合密度を圧力だけで変化すると仮定したBarotropicモデルや、個々のキャビテーションの成長を計算する気泡流モデルがある。



#### 3.2 キャビテーション性能の予測

水車は水中で運転されるため、キャビテーション性能は重要な開発対象である。水車内部の圧力が低下して飽和蒸気圧以下になると、キャビテーションが発生する。

このキャビテーションが更に発達すると効率が急激に低下する現象が見られる。この現象をCFDでとらえるためには、水車内で発生する非定常なキャビテーションの挙動の影響を考慮する必要がある。

このためキャビテーションの解析では、RANSを基本方程式としてキャビテーションが発生している領域をVOF (Volume of Fluid) 法により表現し、キャビテーション核の成長や崩壊についても模擬できるように修正 Rayleigh-Plesset 方程式を用いている。模型試験の結果と予測結果を比較すると、CFDにより効率低下点を高精度にとらえられることが確認できた(図5)。

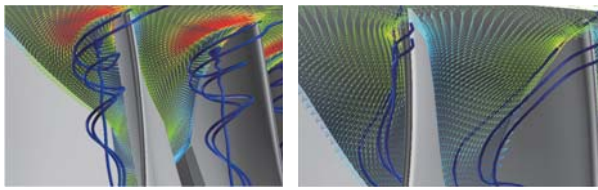
### 4 水車性能改善の実施例

最新の最適化手法や高度CFD技術を適用することで高性能化を図った事例を紹介する。当社はポンプ水車の開発も行っているが、ここでは水車専用機の事例について以下に述べる。

#### 4.1 フランシス水車の高性能化

4.1.1 ランナ形状の最適化 比速度210クラスのフランシス水車に対してランナ形状の最適化を行った。最適化ランナの部分負荷運転点における羽根入口付近の流れのようすを、従来形状ランナと比較して図6に示す。

従来形状ランナでは羽根入口で流れがはく離し渦状の乱流が発生しているが、最適化ランナでは乱流が低減されていることがわかる。このような乱流を抑制することで、特に部分負荷領域において効率が大幅に向上することが模型試験により確認された。



(a) 従来形状ランナ (b) 最適化ランナ

図6. ランナ形状最適化による性能向上 — 60%流量の近傍における羽根入り口付近の流れの様子を示す。従来形状ランナでは流れがはく離し乱流が発生しているが、最適化ランナでは乱流が低減されていることがわかる。

Streamline at runner inlet under 60% flow condition

**4.1.2 吸出し管の最適化** 通常、ランナ下流に設置される吸出し管は、地中に埋設されるため土木掘削量が多くなり、吸出し管の高さは建設コストに影響を及ぼす。そこで建設コストを低減するために吸出し管の高さを浅く設計すると、曲がり部の流れが偏って曲がり部出口ではく離が生じるため圧力回復ができず、水車性能が悪化する。

このような背景の下、MOGAにより吸出し管の深さが浅く、かつ高性能な形状の開発を行った<sup>(4)</sup>。最適化された吸出し管は、図7に示すように従来の形状に比べ高さを約30%低減し、更に損失も約20%低減することができた。

#### 4.2 軸流水車の高性能化

可動翼であるカプラン水車の高性能化を行った。カプラン

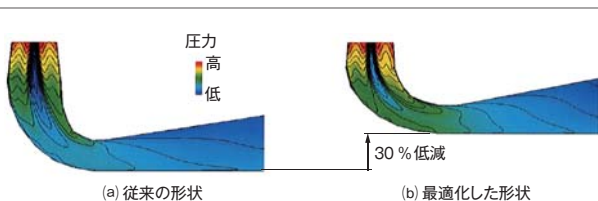


図7. 吸出し管内部の圧力分布 — MOGAを用いて吸出し管の高さと性能の両方を両立する形状を抽出した。

Optimization of draft tube shape maintaining balance between draft tube height and total pressure loss

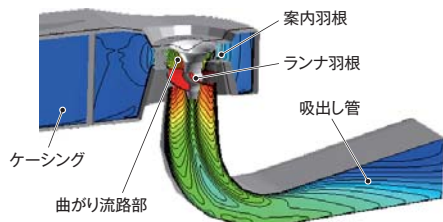


図8. カプラン水車の形状最適化 — 全体流路形状の最適化により、比速度が400～500クラスの水車で1%以上の効率向上を実現した。

Improvement of efficiency of Kaplan turbine by optimization of entire flow passage

水車の形状最適化のポイントは、フランス水車と同様に全体流路形状の最適化であるが、フランス水車と異なる点として、大型案件で適用されるセミスパイラルケーシングの形状や、ランナベーン上流の曲がり形状、ランナ羽根と回転部のギャップなどが挙げられる。

これらの各要素に対して、図8に示す形状最適化を行うことで、比速度が400～500クラスの水車の効率を1%以上向上させることができた。

## 5 あとがき

水力発電はクリーンな再生可能エネルギーとして地球温暖化の防止に重要な役割を果たしている。ここで述べた水車の開発に適用している最適化技術と高度CFD技術は中国ほかアジア地域などの新設発電所向け高性能水車の供給だけでなく、わが国や北米地域をはじめとする既設発電所の性能向上にも適用し、水力発電の高性能化を図っている。

当社は、今後も水車性能を向上させるための技術を開発し、より高効率で信頼性の高い水車を開発し、地球環境に貢献できるよう努めていく。

## 文献

- (1) 榎本保之, ほか. 多目的遺伝的アルゴリズムによるフランス水車ランナの最適化設計. ターボ機械. **33**, 12, 2005, p.732-737.
- (2) 中村高紀, ほか. フランス水車ランナのキャビテーション性能の改善. ターボ機械. **33**, 2, 2005, p.85-90.
- (3) Kurosawa, S., et al. Numerical model test for a Francis turbine. HYDRO2009 International Conference and Exhibition. Lyon, France, 2009-10, Hydropower & Dams ; Network Event Ltd. No.7.01.
- (4) 中村一幸, ほか. 遺伝的アルゴリズムによる高比速度フランス水車の最適設計. ターボ機械. **35**, 8, 2007, p.53-58.



日向 剛志 HYUGA Takeshi

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部。  
水力発電機器改修のエンジニアリング業務に従事。ターボ機械協会会員。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



榎本 保之 ENOMOTO Yasuyuki

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主務。水車性能の開発に従事。ターボ機械協会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



中村 一幸 NAKAMURA Kazuyuki

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部。水車性能の開発に従事。ターボ機械協会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center