

水力発電の高性能化・近代化技術

Technologies to Achieve Higher Performance and Modernization of Hydroelectric Power Generation Facilities

中原 裕輔

■ NAKAHARA Yusuke

水力発電は、環境負荷をほとんど増大させずに大規模な発電ができる事業用発電システムとして世界中で利用されており、今後も利用の増大が予想されている。

東芝は、これまで水車及び発電機の性能向上と品質向上を目指した様々な技術の開発を継続的に行っており、これらの技術を新規発電所、及び既設発電所の更新や改修に適用することで、世界最高レベル性能の製品を提供し続けている。

Hydroelectric power generation is expected to further expand worldwide as a power source that can provide large amounts of electricity with minimal increase in environmental burden.

Against this background, Toshiba has been continuously developing a wide variety of technologies to improve the performance and quality of turbines and generators, including a simulation technology to optimize turbine runner shape, thrust bearings with a plastic surface, a radial ventilation cooling system, and many others. We are making efforts to supply products with the world's highest level of performance by applying these technologies to the new construction and renewal of hydroelectric power plants in both the Japanese and overseas markets.

1 まえがき

水力発電は、地球温暖化をはじめとする環境負荷をほとんど増大させずに大規模な発電ができる事業用発電システムとして、1世紀以上にわたって世界中で利用されている。また、今後も再生可能エネルギーの一つとして、より多くの水力発電エネルギーが活用されていくと予想される。国内でも、再生可能エネルギー固定価格買取制度の導入により、新規発電所の建設や、既設発電所の水車及び発電機出力を向上させるための更新と改修が盛んに行われている。

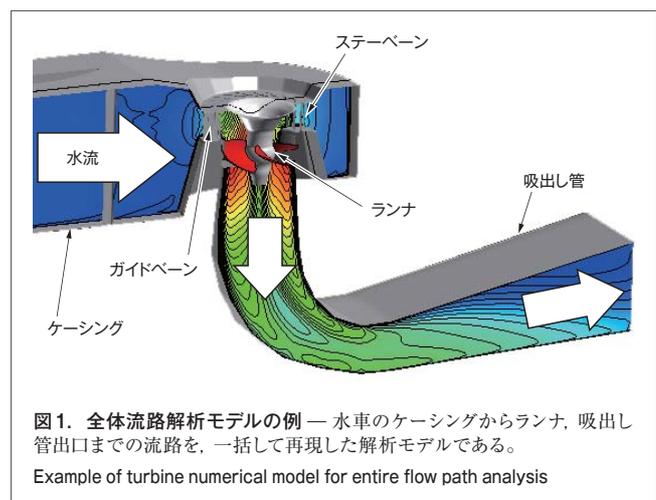
東芝は、これまで水車及び発電機の性能向上と品質向上を目指した技術の開発を継続的に行っており、現在も世界最高レベル性能の製品を提供し続けている。

ここでは、近年開発した水車及び発電機の高性能化技術とその適用例について述べる。

2 水車の高性能化技術

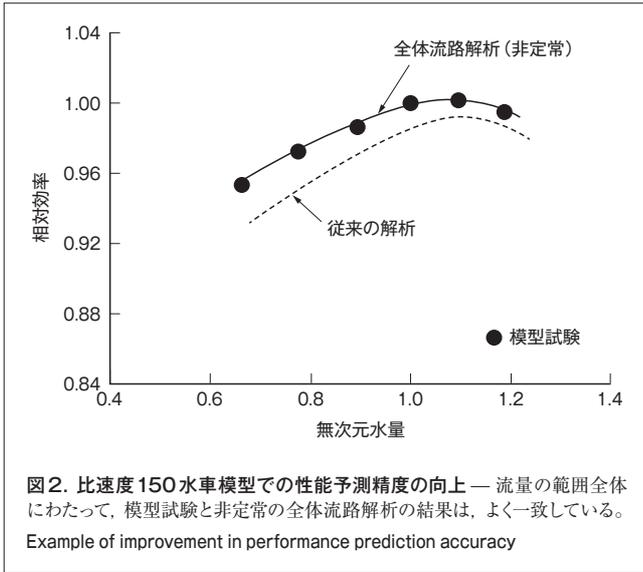
2.1 全体流路解析

水車の性能を向上させる技術開発は、まず流れ解析結果に基づいて流路を最適化し、その流路形状を再現した模型試験水車による性能模型試験を実施、必要に応じてランナ羽根形状や静止部の流路形状に修正を加えるのが一般的な方法である。これまでの解析手法では、ランナ、ステーパーン、ガイドベーン、及び吸出し管の各要素別に数値解析を実施し、個別の解析結果を組み合わせることで水車性能を予測してきた。しか



し、部分負荷や過負荷などの非設計点において解析結果と模型試験結果の差が大きくなる傾向があり、模型水車形状の修正と性能達成に多大な時間を要する場合があった。

そこで当社は、近年向上し続けるコンピュータの処理能力を最大限に活用し、図1に示すようにケーシング入口からステーパーン、ガイドベーン、ランナ、吸出し管出口までの流路全体を一括して扱うことにより、水車の性能予測精度を向上させる解析技術の開発に取り組んできた。開発した解析手法では、従来では再現できなかったランナや吸出し管における二次流れや渦といった非定常現象も再現できるため、数値流体力学(CFD)解析技術による高精度の性能予測が可能である(図2)。現在、各種水車の性能予測にこの解析手法を活用し

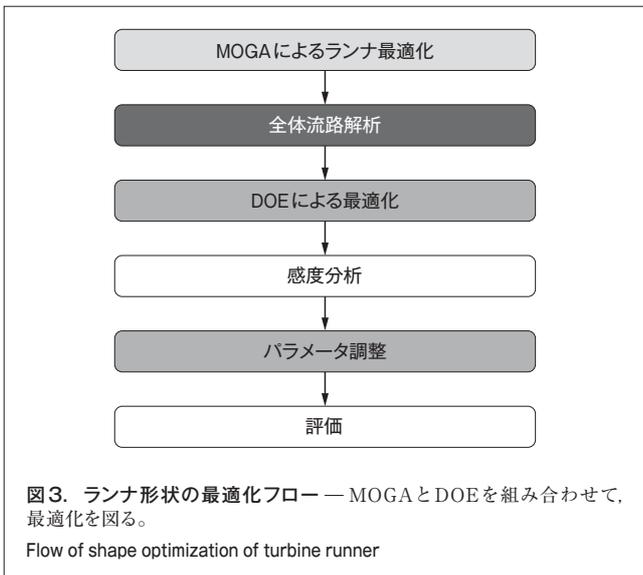


ている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、模型試験による検証に基づいて、更なる精度向上も図っている。

2.2 高性能な水車ランナ形状の設計技術

水車ランナ形状の設計最適化手法としては、多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm) と実験計画法 (DOE: Design of Experiment) があるが、前者は最適化に時間を要する、後者は局所最適解に陥りやすい、という問題点がある。当社はMOGAとDOEを組み合わせた、独自の水車ランナ形状の最適化手法を考案し、短期間で広範な設計パラメータの最適化を実現した⁽⁴⁾。

ランナ形状の最適化フローを図3に示す。この最適化手法は、まずMOGAにより広範な設計パラメータ空間での最適化を実施してから、得られた水車ランナ形状により前述の全体流路解析を行う。次に、全体流路解析により得られたガイド



ベン出口の流れ分布から、ランナ入口の流路境界条件を得た後に、改めてDOEにより最適化を行う。これによって、広範でかつ目的に合った最適な設計パラメータの探索が、比較的短時間で実現できる。

当社はこの最適化手法をベースとして、水車の性能向上を推進しており、国内外の新設・改修案件に対してより高性能な水車ランナを提供している。具体的な例として、その羽根形状の特徴などから名づけたT-Blade™ランナ、及びスプリッタランナ⁽⁵⁾がある。

2.3 水車性能の向上例

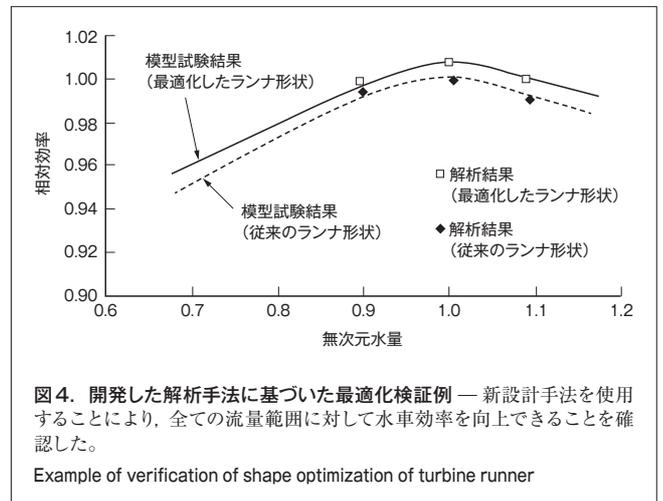
既設水車のランナ更新にあたっては、前述した独自の最適化技術を適用したランナ設計を実施し、性能の向上を実現した(図4)。他社製ランナの更新において性能向上を図った例を、以下に示す。

(1) フランス水車

- (a) 発電所名：オハクリ発電所
- (b) 国名：ニュージーランド(マイティーリバーパワー社)
- (c) 落差：31.8 m
- (d) 回転速度：125 min⁻¹
- (e) 型式：立軸フランス水車
- (f) 改修年度：2011年
- (g) 改修前の水車最大出力：29,830 kW
- (h) 改修後の水車定格出力：30,400 kW

(2) カプラン水車

- (a) 発電所名：船明発電所
- (b) 国名：日本(電源開発(株))
- (c) 有効落差：14.5 m
- (d) 回転速度：90 min⁻¹
- (e) 型式：立軸カプラン水車
- (f) 改修年度：2008年
- (g) 改修前の水車最大出力：34,000 kW
- (h) 改修後の水車最大出力：34,700 kW



3 発電機の高性能化技術

3.1 樹脂素材軸受

発電機効率は、機械構造に起因した機械損と、電気回路に起因した電気損をより少なくすることで向上できる。機械損を低減するには、スラスト軸受の寸法を小さくすることが一つの手段であるが、軸受面積の縮小によって軸受面圧が高くなる。このため、従来のホワイトメタル（すず系材料）軸受の適用が難しくなる。そこで当社は、従来のホワイトメタルに代わる、より高い面圧に対応可能な四フッ化エチレン樹脂（PTFE）系材料を用いた樹脂スラスト軸受を開発し、1994年の初適用から、約100台の発電機に適用してきた（図5）。

この樹脂スラスト軸受は、摩擦係数がホワイトメタルに比べて小さい（静止摩擦係数は、ホワイトメタルが0.15～0.20に対して樹脂系軸受素材は0.05～0.08）ことから、摩擦による損失が小さいだけでなく耐摩耗性に優れていることが最大の長である。

この軸受素材を採用することにより、軸受のコンパクト化や、軸受損失の低減、空冷軸受の適用範囲の拡大などが可能になる。また、この樹脂スラスト軸受を適用することにより、発電機起動時のトルクが小さくなるため、スラスト押し上げ装置を省略することもできる。

この樹脂スラスト軸受の製造にあたっては、炭素鋼の軸受合金に多孔質中間層を形成し、樹脂素材を含浸させて合金と樹脂素材との密着性を確保する、当社独自の製法を適用している（図6）。

樹脂スラスト軸受は、当初は小容量の発電専用機に適用してきたが、近年では大容量の発電専用機や、可逆回転の発電電動機にも適用し、より高周速かつ高面圧のスラスト軸受でも安定した運転を実現している。主な適用実績を表1に示す。

また樹脂素材軸受は、発電機のスラスト軸受だけでなく、水車及び発電機のガイド軸受や、横軸発電機のジャーナル軸受などにも適用が広がっている。

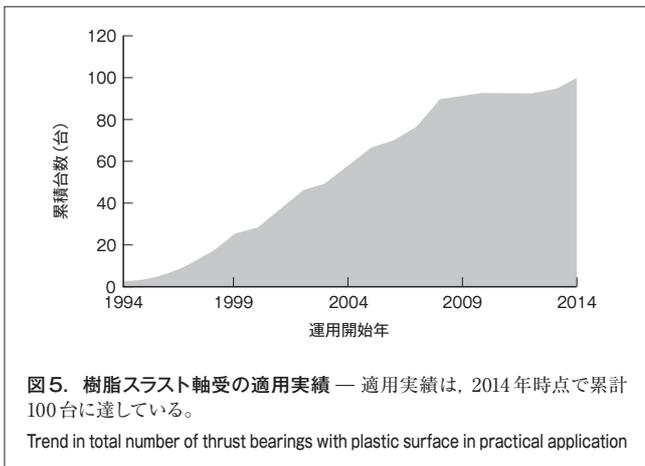


図5. 樹脂スラスト軸受の適用実績 — 適用実績は、2014年時点で累計100台に達している。
Trend in total number of thrust bearings with plastic surface in practical application

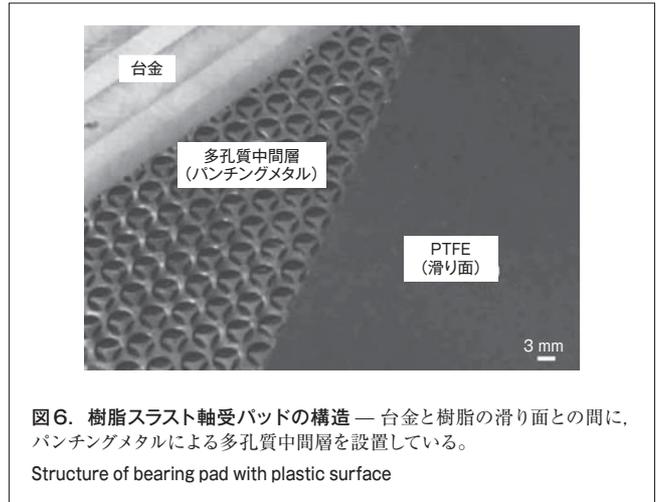


図6. 樹脂スラスト軸受パッドの構造 — 合金と樹脂の滑り面との間に、パンチングメタルによる多孔質中間層を設置している。
Structure of bearing pad with plastic surface

表1. 主な高面圧、高周速、可逆機への樹脂スラスト軸受の適用実績
Typical application of thrust bearings with plastic surface to high-pressure, high-peripheral-speed, and reversible-rotation machines

発電所名及び機器 顧客	発電機容量 (MVA) 電動機出力 (MW)	運転 開始年	平均面圧 (MPa)	平均周速 (m/s)
安曇発電所用発電電動機 東京電力 (株)	109.0 106.0	2004 (改修)	3.1	16.2
董青発電所用発電機 中国 貴州北盤江水電開発有限公司	244.4 —	2009	3.9	22.7
ボゴング発電所用発電機 オーストラリア AGL Southern Hydro社	82.0 —	2008	4.0	41.2
奥清津第二発電所用発電電動機 電源開発 (株)	345.0 340.0	2010 (改修)	4.4	47.1
京極発電所用発電電動機 北海道電力 (株)	230.0 230.0	2014	3.9	47.7
葛野川発電所用発電電動機 東京電力 (株)	475.0 460.0	2014	4.6	52.7
徳山発電所用発電機 (1号機) 中部電力 (株)	146.0 —	2015	5.3	29.6

3.2 ステータコイルの高電圧化

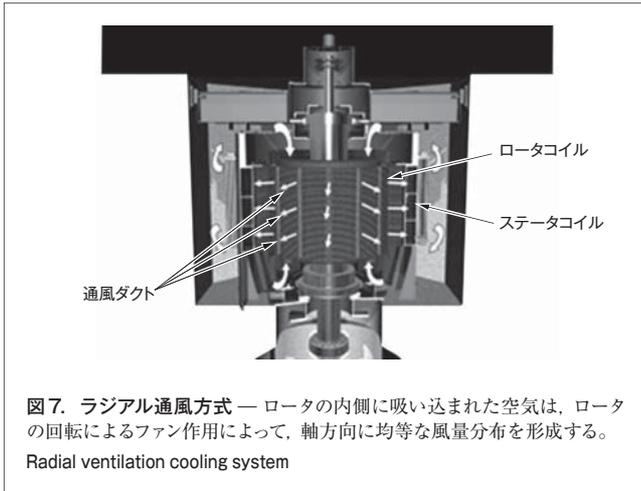
一般に、発電機や発電電動機の大容量化に伴って主回路電流は増大するが、発電機、発電電動機、及び主回路機器の経済性と、選定自由度の拡大を考えると、ステータコイルの高電圧化技術が、コスト低減に欠かせない。

当社は、水力発電用の20 kV級コイルを開発し、中国雲南省の観音岩水力発電所（容量666 MVA、2015年に営業運転を開始予定）に適用する⁽⁶⁾。

この20 kV級コイルは、真空液圧レジンリッチ（VPR：Vacuum Pressurized Resin rich mica tape）絶縁方式を適用しており、大容量の発電機や発電電動機への適用が期待できる。

3.3 ラジアル通風

水車発電機や発電電動機の通風冷却は、ロータの回転による遠心ファン効果を利用したラジアル通風方式の採用が主流となっている。ラジアル通風方式は、ロータリムに多数のラジアル通風ダクトを設置し、回転に伴う遠心ファン効果による空気の流れを活用してロータコイルとロータ外周に設置されてい



るステータコイルを冷却する方式である(図7)。この方式を採用することで冷却用の電動ファンなどを省略でき、構造の簡素化とコストの低減を図ることができる^{(6), (7)}。

回転速度が高くなると、ロータの外径は小さくなる傾向があるため、高速で大容量になるほどラジアル通風方式の適用が難しくなる。当社は実物の縮小模型装置を用いた試験により、500 MVA級の容量で回転速度 500 min^{-1} までラジアル通風方式が適用できることを検証済みで、東京電力(株)葛野川発電所の高速(500 min^{-1})・大容量(475 MVA)発電電動機でもこの方式を採用した。この発電電動機は2014年6月から営業運転を開始し、現在も安定した運転を継続している。

4 あとがき

水力発電は、再生可能エネルギー活用の一翼を担う事業用発電システムとして、新規発電所の建設や、性能向上を目的とした既設発電所の改修などが国内外で数多く計画されている。

これらに対して、当社は1世紀以上にわたり水力発電機器の性能向上と技術革新に取り組んできた技術と実績を基に、今後も更に高性能で高品質な製品を供給していく。

文 献

- (1) リム シャンマオ 他. フランス水車全体流路解析による性能予測. ターボ機械. **39**, 5, 2011, p.57-63.
- (2) 黒澤貞男 他. 水車全体流路解析による性能検証模型試験の代替技術. 東芝レビュー. **67**, 7, 2012, p.19-22.
- (3) Nakamura, K. et al. "Rehabilitation of Middle Head Kaplan Turbine by CFD Analysis". Proceeding of The 11th Asian International Conference on Fluid Machinery and The 3rd Fluid Power Technology Exhibition. Chennai, India, 2011-11, Asian Fluid Machinery Committee. 2011, AICFM_TM_014. (CD-ROM).
- (4) 榎本保之 他. フランス水車ランナの最適化設計. ターボ機械. **41**, 9, 2013, p.58-64.
- (5) 日向剛志 他. 水力発電システムにおける最新技術. 東芝レビュー. **68**, 6, 2013, p.28-31.
- (6) Kubo, T. et al. "Recent Technologies for Hydro Generators and Generator- Motors". Proceeding of CIGRE Colloquium on New Developments of Rotating Electrical Machines. Beijing, China, 2011-09, Chinese National Committee of CIGRE and CIGRE Study Committee A1. 2011, p.61-68.
- (7) 久保 徹 他. 環境負荷の低減に貢献する高性能・高機能水車発電機技術. 東芝レビュー. **65**, 6, 2010, p.15-18.
- (8) 森 淳二 他. 水力発電機器製造120年の歴史と今後の展望. 東芝レビュー. **69**, 2, 2014, p.25-28.



中原 裕輔 NAKAHARA Yusuke

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部参事。
水力発電機器のエンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.