

# 世界市場での大容量・長寿命化のニーズに応える水車適用技術

Technologies for Large-Scale and Long-Life Hydraulic Turbines for Global Market

中川 斉年

黒川 敏史

中原 裕輔

■ NAKAGAWA Naritoshi

■ KUROKAWA Toshifumi

■ NAKAHARA Yuusuke

水力発電の需要は全世界で拡大しており、東芝は、多様な顧客要求に対応して様々な技術開発を行っている。

近年需要の多い大型水車へ対応するため、大型溶接ランナ製造技術として固有ひずみ法による溶接変形解析技術や、センシングを用いた溶接ロボットによるより正確な溶接技術を、また、大型水車の止水弁として近年要求が多いリングゲートとその制御・保護方式を確立した。更に、水車を過酷な条件下で運転する要求も増えてきており、土砂の多い流域で運転する水車の長寿命化の対策の一つとして水車流水部への溶射技術を確立した。

Toshiba has been developing various technologies for hydraulic turbines in response to expanding world demand for hydroelectric power. To meet the demand for large-scale hydraulic turbine in recent years, we have developed manufacturing technologies for large-scale welded turbine runners including an analysis method for estimating welding deformation based on the inherent strain method, and an accurate welding technology using a welding robot with a sensing system. We have also developed a ring gate and its control and protection system for application as turbine stop valves. Furthermore, we have developed hard coating technologies for turbine water-contact surfaces as a solution against the silt abrasion of turbine.

## 1 まえがき

水力発電は、環境に優しい発電システムとして、新たな地点開発や既設発電所の更新が盛んに行われており、主な電力供給源の一つとして、今後も世界中で広く役割を果たすことが期待されている。近年、世界の水力市場では、地点の多様化に伴い、豊富な流量を利用した大容量水車あるいは、長寿命化など様々なニーズが高まっている。

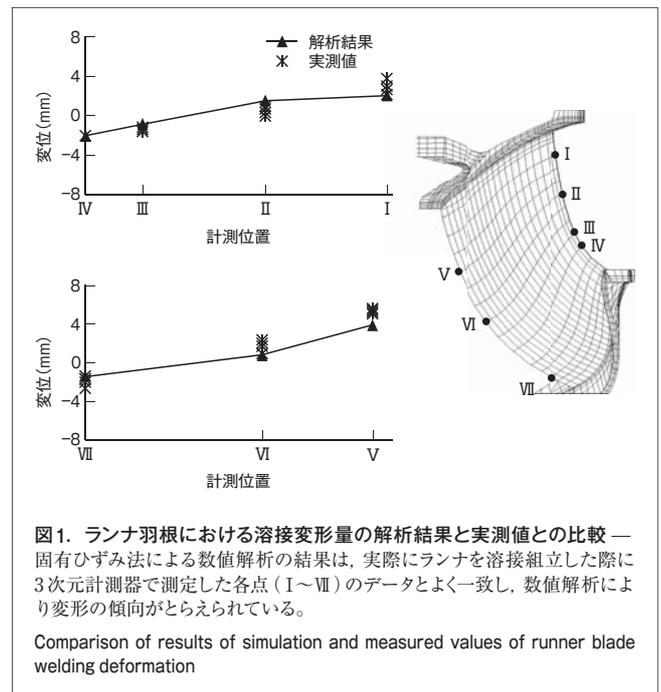
ここでは、東芝が開発した大容量水車への適用技術や水車の長寿命化技術の中から、特にニーズの高い、大型ランナ製造技術、リングゲート技術、及び溶射応用技術について述べる。

## 2 大容量水車への適用技術

### 2.1 大型ランナへの適用技術

低落差（約100 m）で大容量（200～600 MW）の水車は、大河が流れる諸国で需要が旺盛（おうせい）である。このクラスの水車ランナは大きいもので直径8 m、質量300 tに達するものもあることから、当社は、特に大型溶接ランナの製造技術の信頼性向上に注力してきた。この技術は、例えば中国の効果橋発電所に建設した現地ランナ製造工場において、直径7 mの実機ランナに適用されている。そのなかの特徴的な技術について以下に述べる。

**2.1.1 溶接変形解析技術** 構造物を溶接する場合、溶接中及び熱処理中の変形に対応するため、溶接変形の方向及



び量を予測して、あらかじめ逆方向に変形を付与したり、材料に余肉を付けるといった手法が採られる。ランナが大型になるほど変形量が増加して必要な余肉量も増えるため、溶接や加工のコストが増大し、場合によっては変形により余肉が不足することもある。このようなリスクを回避するためには、事前に変形量を精度よく想定しておくことが重要になる。この場合、

実機相当のモックアップを作成して確認することが有効であるが、大型ランナではコストと時間の面から実用的ではない。

そこで当社は、溶接の分野でも近年開発が進んでいる数値解析により溶接変形の予測を行っている。数値解析には固有ひずみ法を採用した。固有ひずみ法は、溶接継ぎ手形状に応じた固有ひずみを3次元モデルに解析条件として付与し、有限要素法により全体の変形量を求める手法で、複雑なモデルもシンプルな手法で構築することができる。固有ひずみのデータは、弾塑性解析によって求めることもできるが、今回はより信頼性の高いモックアップ試験による変形測定により採集した。

固有ひずみ法による変形予測と、米国ノクソンラピッズ発電所のランナ（直径6m）製造時に3次元計測器を用いて測定した変形量の比較を図1に示す。図1から、解析結果と実機の計測データがよく一致し、数値解析により変形の傾向がとらえられていることがわかる。

**2.1.2 溶接ロボットシステム** 当社は、現地組立ランナの高品質化及び生産性向上のため、現地溶接への適用もできる自動溶接ロボットを開発した（図2）。ランナの溶接線は3次元曲線で、狭隘（きょうあい）な箇所もあり、溶接姿勢も多様に変化するため、前後、上下、旋回の3軸マニピュレータに小型の6軸多関節ロボットを搭載する構成とした。また、大型ランナで現地工場にも運用されることも考慮し、設置や段取りが容易な可搬式システムとした。

このシステムにはレーザーセンサを取り付けており、溶接前のビード形状を計測することで、あらかじめオフラインティーチング<sup>(注1)</sup>により設定したトーチ狙い位置や溶接条件を、溶接パスごとに自動的に補正する機能を持っている。溶接は回転ローラで位置決めされた羽根ごとに行い、バンド、クラウン（ランナハブ）の溶接に応じてロボットの設置位置を変更する。



(注1) 事前に別のコンピュータなどを用いて、施工方法をプログラミングしておく技術。

## 2.2 リングゲートの開発

リングゲートは水車の止水弁の一種であるが、水圧管路に設置される入口弁と異なり、ステイベンとガイドベン間に設置されるのが特徴である。ゲートを全閉にしたモデル図を図3に示すが、円筒状のゲート弁体が流路を閉塞（へいそく）しゲート弁体の上下に設けた円環状シールによって止水している。水車起動時に、水車上カバーに設置した油圧式サーボモータで上方向にゲート弁体を移動させて上カバーとステイリングで構成される弁室に格納するため、運転中は水力的損失が発生しない。

リングゲートは入口弁と比較して、大口径管路にも対応できること、及び機器や土木掘削のコストが削減できることから、中低落差フランス水車で採用が進んできており、当社も中・大容量機への適用拡大を図るため開発を進めている。

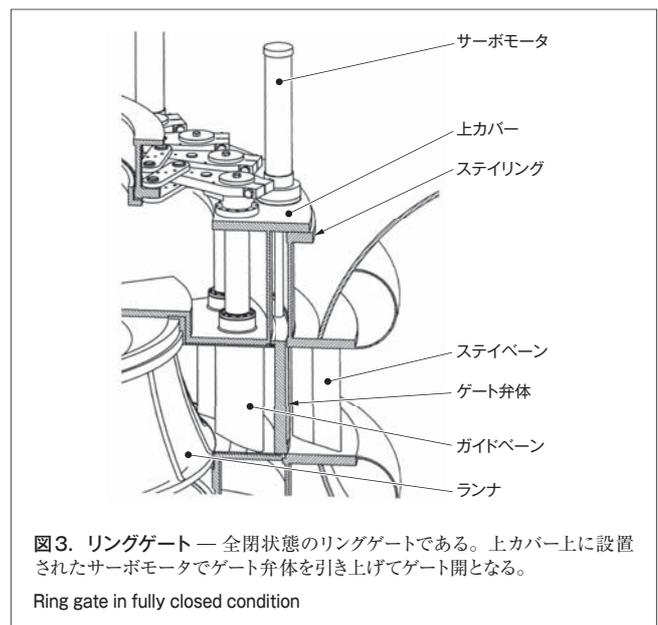
リングゲートの開発のポイントは以下のとおりである。

- (1) 周方向に複数台配置されたサーボモータのストローク同期を要する。
- (2) ガイドベン不動作時の事故停止弁としての役割を要求される。
- (3) 制御系故障時にゲート自重による閉鎖を要求される。

これらを考慮した制御設計を行い、油圧機器とPLC（Programmable Logic Controller）を組み合わせることで、信頼性、安定性、及び応答性に優れた電気油圧方式の制御システムを実現した（図4）。

その特徴を以下に述べる。

- (1) 複数台サーボモータを同期制御することで、弁体開閉操作時にゲート弁体の水平を保持し、ゲート弁体と静止部との接触による摩擦力の増大を防止する。具体的には、PLCで各サーボモータのストロークと目標の偏差を演



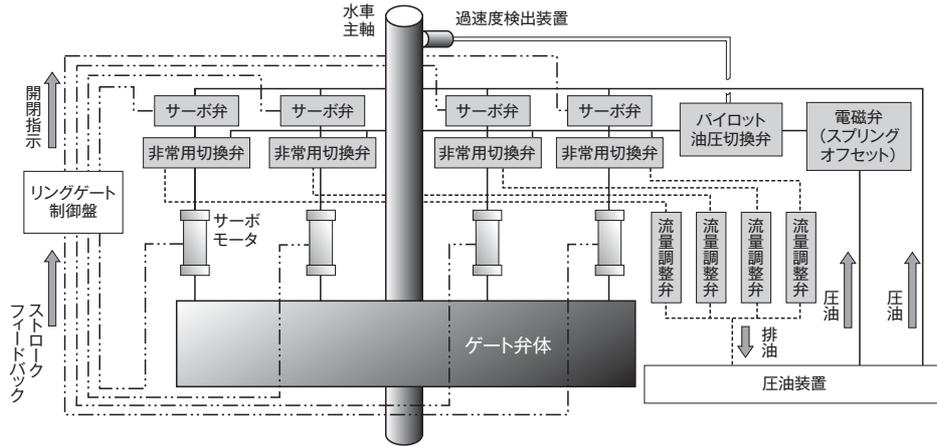


図4. リングゲート制御システムの構成 — 制御装置を各サーボモータに備えており、制御不能となったサーボモータを切り離して制御できる構成としている。サーボモータは通常4～10台で運用されるが、ここでは4台の場合を示す。

Configuration of ring gate control system

算し、その値が許容値を超えたサーボモータに対して位置補正指令を出すことで同期制御を実現している。

- (2) サーボモータ流量を調節するサーボ弁を、各サーボモータに対して1台設置する構成とした。これにより応答性の改善と高い信頼性を実現した。また、サーボ弁が固着などして操作不能となった場合でも、正常なサーボ弁を用いて閉鎖操作を継続することで安定性と信頼性の向上を図った。
- (3) リングゲートは油圧系統が故障した場合、主機を保護するための最終手段として、ゲートの自重閉鎖が要求される。この機能は非常用切換弁を切り換えることで達成される。この場合のサーボモータの同期は排油系統に設置した流量調整弁の機能により保たれる。また、発電所の電源喪失の際も、スプリングの機能で電磁弁（スプリングオフセット型）が切り換わり、ゲートは自重閉鎖する。
- (4) 调速機が故障して主機が過速度になったことを機械的に検出した場合、リングゲートによる流水遮断で水車を停止させることもできる。

### 3 溶射技術

土砂摩耗対策として、当社は、タングステンカーバイド（WC）を基材材料に用いた超高速フレーム溶射（以下、HP-HVOF（High Pressure High Velocity Oxygen Fuel）溶射と呼ぶ）で多くの実績を持つ。ここでは、最近10年間における適用事例とともに、HP-HVOF溶射の新たな技術について述べる。

#### 3.1 耐土砂摩耗溶射

耐土砂摩耗溶射は、ランナの羽根やシール面をはじめとして、シートライナ、シールライナ、ラビリンス型の主軸封水装置

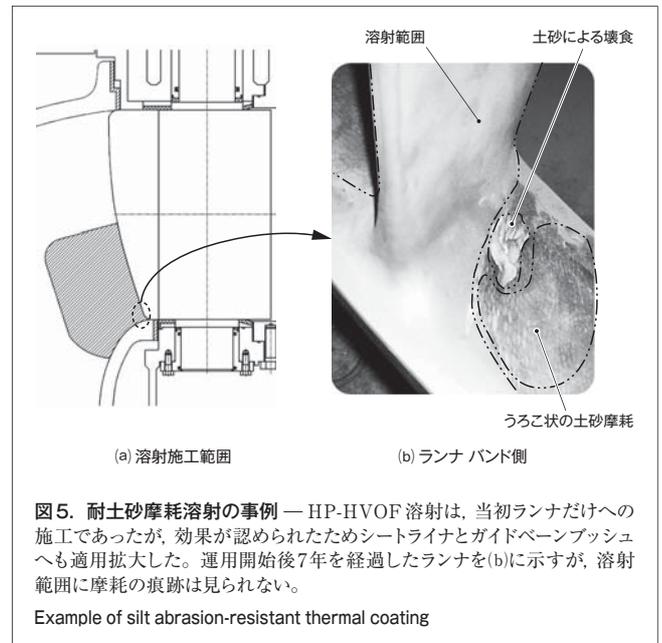


図5. 耐土砂摩耗溶射の事例 — HP-HVOF溶射は、当初ランナだけへの施工であったが、効果が認められたためシートライナとガイドベーンブッシュへも適用拡大した。運用開始後7年を経過したランナを(b)に示すが、溶射範囲に摩耗の痕跡は見られない。

Example of silt abrasion-resistant thermal coating

など、流速が早く土砂摩耗の被害を受けやすい箇所に施工されて大きな効果を上げている。一例として、土砂が多い水系であるため、建設当初からランナ羽根入口部とシール面にHP-HVOF溶射を施工して納入した発電所の事例を述べる。

運用開始後1年目に点検したところ、溶射箇所と非溶射箇所での摩耗様相に著しい差異が認められ（図5、ただし運用開始後7年目のもの）、HP-HVOF溶射の効果が確認された。その後、摩耗の激しかったシートライナとガイドベーンブッシュにもHP-HVOF溶射を施工した改良品を納入し、現在に至るまで順調に運用されている。

### 3.2 溶射皮膜の除去技術

皮膜の再溶射をする場合、旧皮膜と新皮膜の密着性の低さが問題となる。そのため、いったん旧皮膜を除去しなければならないが、従来はブラストやグラインダ研削といった物理的手法が用いられてきた。しかし、これらの手法は母材まで削り込むため、再溶射前に母材の整形が必要になるという欠点があった。そこで母材に損傷を与えない除去方法として、電解質溶液による電気化学的な剥離（はくり）方法を開発した。具体的には、電解質溶液に強アルカリ性溶液、陰極材にステンレス鋼を使用し皮膜除去ができることを確認した。

### 3.3 狭隘部への溶射技術

狭隘部に施工する場合、溶射ガンの最小施工距離が施工範囲に対する制約となる。当社は先端が曲がったアングルガンを用いて最適な溶射条件を確立することで、従来約400 mm必要だった最小施工距離を150 mmまで縮めることに成功した。この技術により、フランス水車ランナの羽根出口部などの狭隘部に対してもHP-HVOF溶射が施工できるようになった。

### 3.4 延性溶射材料

前述のWC系材料は、耐土砂磨耗性を重視して硬度や密着度を確保することに主眼をおいて開発されたため、これと相反する性質である延性が低いという特徴がある。したがって、大きく変形する構造物に対しては、皮膜が構造物の変形に追従できず割れや剥離を生じるため適用が困難であった。

そこで同じWC基材でありながら、金属成分を増大させることにより、延性に富んだ溶射材料を開発した。従来の耐土砂

磨耗材料との機械的性質の比較を図6に示す。耐土砂磨耗材料に対して、延性が大きいことはもとより、キャビテーションによる損傷が少ないことがわかる。一方、耐土砂磨耗性能に寄与する硬度については従来材料のほうに優位性があることが確認された。

この技術の確立により、変形の大きな部品、特にキャビテーション壊食を受けやすく補修の困難であった揚水機のステイベーンの保護に、HP-HVOF溶射を適用するめどが立った。

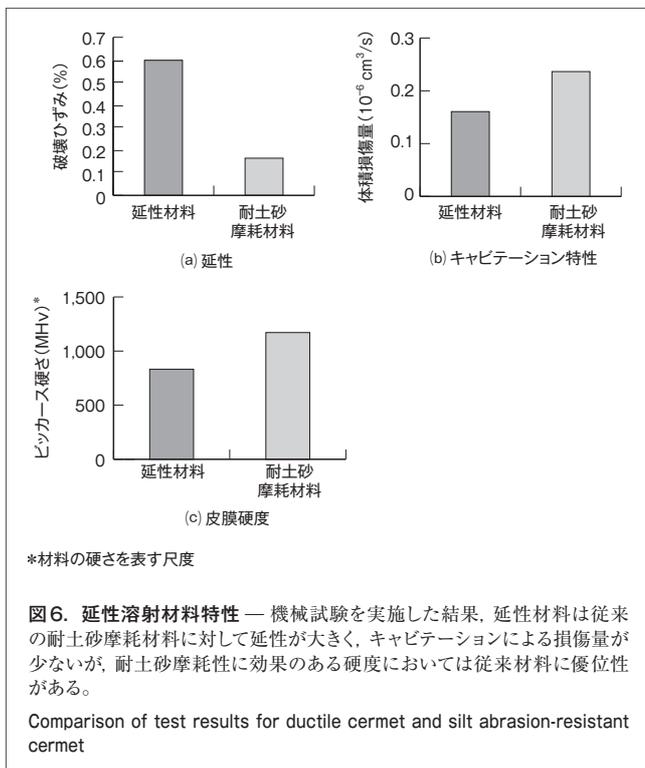
## 4 あとがき

水力発電は環境に調和した発電システムとして、重要な位置づけを担っている。近年の顧客要求の多様化に 대응するため、当社はここで述べた大型ランナの製造技術や、リングゲート、耐土砂磨耗溶射技術など、様々な技術開発を推進してきた。また、これらの技術以外にも、水潤滑セグメント軸受などの水車構造に対する新技術や、研削自動化などの製造技術の開発を推進している。

今後もグローバルな顧客ニーズに即した技術開発を推し進め、エネルギーのベストミックスによる安定供給と地球温暖化の防止を目指すエネルギーアプローチの一翼を担い続けていく。

## 文献

- 向井一馬, ほか. 中国市場向け水力発電機器の大容量化技術. 東芝レビュー. 64, 9, 2009, p.57-61.
- 稲垣泰造, ほか. 水力発電機器改修におけるライフサイクルコンセプト. 東芝レビュー. 54, 12, 1999, p.44-48.



中川 斉年 NAKAGAWA Naritoshi

電力システム社 京浜事業所 水力機器部主務。  
水力発電機器の水車構造の開発・設計に従事。  
Keihin Product Operations



黒川 敏史 KUROKAWA Toshifumi

電力システム社 京浜事業所 水力機器部参事。  
水力発電機器の水力設計に従事。  
Keihin Product Operations



中原 裕輔 NAKAHARA Yuusuke

電力システム社 火力・水力事業部主務。  
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.