

3Dデータの活用で効率化と高品質化を実現する 水車製造技術

Hydraulic Turbine Manufacturing Technologies Achieving High Quality and High Efficiency Utilizing 3D Data

蓮沼 高明 HASUNUMA Takaaki 中川 斉年 NAKAGAWA Naritoshi 後藤 基伊 GOTO Motoi

従来、水力発電用の水車製造では、熟練技術者による繰り返し作業などが必要であった。近年の労働力不足などに対応するため、熟練技術に頼らずに効率化と高品質化を両立させる新たな製造技術が求められている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、3D(3次元)データを活用して、効率的に高品質な水車機器の製造を可能にする技術を開発した。現地溶接による部品の変形に対応した対向面の3D形状データを取得して、NC(数値制御)加工に用いる技術を開発し、有効性を確認した。また、3Dデータを用いたシミュレーション技術の活用により、ランナ狹隘(ぎょうあい)部への溶射施工条件を明らかにして、特殊技能が不要な自動溶射施工技術を開発し、実用化した。更に、ランナの接合部の加工形状と設計形状との偏差を可視化する3D測定技術を開発し、従来は治具を使って手動で行っていた形状計測を不要にした。

In the field of hydroelectric power generation, the manufacturing of hydraulic turbine equipment using repetitive processes continues to be conducted by skilled craftsmen. To address recent labor shortages, demand for technologies that balance high quality, and high efficiency continues to grow to overcome dependence on skilled craftsmen.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed the following technologies to streamline manufacturing of high-quality hydraulic turbine equipment utilizing three-dimensional (3D) data: (1) high-precision numerically controlled (NC) flange surface processing using 3D shape data in consideration of on-site installation welding deformations, (2) automatically controlled thermal spraying processes for confined turbine runner spaces based on optimal thermal spraying conditions obtained via 3D simulation technologies, and (3) visualization of deviations between designed and fabricated turbine runner welded shape parts using 3D measurement data to eliminate dependence on manual measurements. We are continuously working to further improve hydraulic turbine equipment manufacturing processes by verifying the effectiveness and practical application of these technologies.

1. まえがき

東芝エネルギーシステムズ(株)は、1900年に水力発電用水車の製造を開始し、その後120年以上にわたって製造手法や技術の開発を進め、成熟させてきた。しかし、近年の少子高齢化の進行に伴い、これまでの熟練技術に頼った製造手法や、その技術継承が困難になってきた。これを解消するために、作業を効率化しながら、熟練技術に頼らないで高品質な製品を製造する技術が求められている。

このような中、当社は、東芝グループ内の研究部門と協力して、デジタル技術を活用した新たな水車機器製造、及び据付プロセスの開発・適用を進めている。

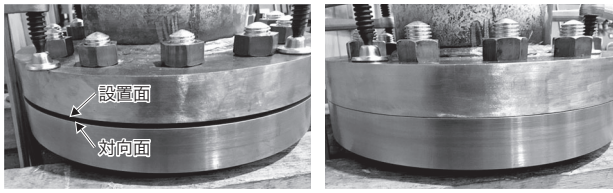
ここでは、3Dデータを用いて開発した水車機器製造技術として、現地溶接による変形に対応できる対向面加工技術、ランナ狹隘部の自動溶射施工技術、及びランナ接合部の3D測定技術について述べる。

2. 現地溶接による変形に対応できる対向面加工技術

水車機器の流路を構成する部品は、輸送中の制約によって分割が必要な場合や、当社供給範囲外の製品と接続が必要な場合など、現地で溶接組立を実施する箇所がある。現地での溶接作業で熱変形が発生することは避けられないが、この変形量は溶接条件によって左右される。

とりわけ、鉄管(ダム側)と水車を接続するフランジの設置面の変形量が大きくなった場合、シール性能を確保するために対向面の修正加工が必要になる(図1(a))。従来、修正加工は現地での手作業による研削、若しくは現地に加工機を搬入しての切削により実施していたが、いずれの方法も据付工程への影響を生じさせていた。そこで、現地溶接により対向面が変形した場合でも、現地での修正加工を省略できる新たな対向面加工技術を開発した。以下に、その手順を示す。

まず、変形した設置面の形状を正確に把握するために3D



(a) 対向面の加工前 (b) 対向面の加工後

図1. モックアップを使ったフランジ対向面の加工前後の比較

溶接で変形した設置面に合わせて、NCフライスで対向面を加工することで、シール性能を確保する。

Comparison of flanges with and without joint surfaces processed on NC milling cutter using mock-up

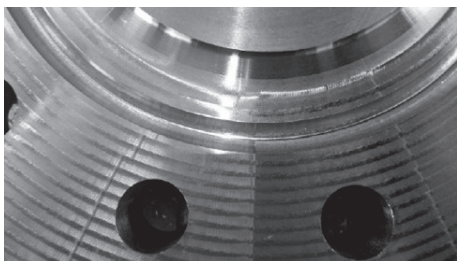


図2. NCフライス盤で加工した対向面

設置面の変形に合わせて、対向面を加工した。

Flange surface processed on NC milling cutter using 3D shape data

形状測定機で座標データを取得する。座標データは接触子を用いた点測定による離散データであっても、倣い計測による点群データでもよく、変形した設置面の寸法に応じて使い分ける。いずれのデータでも治具によるガイドは不要で、フリーハンドで測定できる。次に、取得した座標データから、3D-CAD上で、スプライン曲面を作成し、対向面の加工データとする。最後に、対向面は加工データを用いてNCフライス盤などによりエンドミルで加工する(図2)。

このような加工データの作成のほかに、加工時のエンドミル径や、送り速度、切り込み量といった加工条件を明らかにすることで、シール性が担保されることを確認した。モックアップを使った対向面加工後の様子を、図1(b)に示す。

この加工技術は、平面の変形だけでなく、水圧鉄管と水車機器を接続するために必要な部品であるルーズフランジの円筒面についても検証済みである。今後は、現地作業で溶接変形が予想される製品に、この技術を広く適用していく。

3. ランナ狭隘部の自動溶射施工技術

ランナなどの流水部は、流水中に含まれる土砂による土砂摩擦で、運転に支障を来す損傷を受ける場合がある。その対策の一つとして、溶射がある。溶射は、溶融した金属や

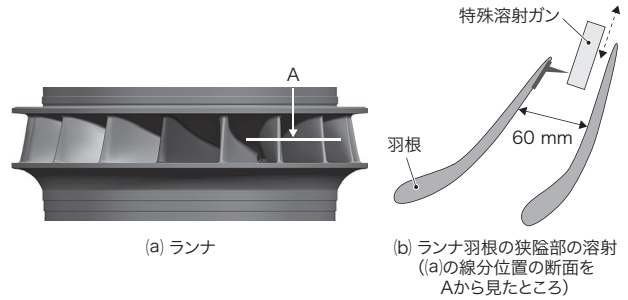


図3. 従来のランナ狭隘部への溶射

ランナ狭隘部への溶射には、特殊装置と技能が必要であった。

Conventional thermal spraying in confined space

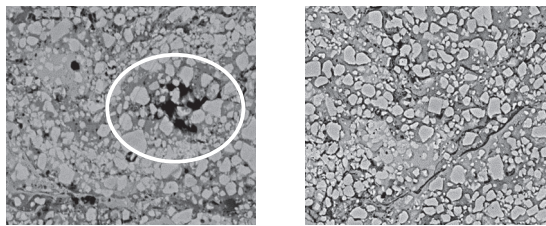
セラミックスなどの材料を溶射ガンで吹き付け、皮膜を形成する技術である。ランナは複雑な曲面の羽根を並べた構造であり、その狭い羽根の間(狭隘部)の溶射には、先端が細い特殊形状の溶射ガンが必要であった(図3)。また、溶射ガンと溶射対象箇所との角度、距離、及び溶射継続時間にもノウハウがあり、ランナ狭隘部への溶射施工は特定の溶射施工業者しかできない特殊技能であった。

そこで当社は、特殊技能がなくても高品質な溶射が可能な自動溶射施工技術を開発した。開発のポイントは、溶射施工業者のノウハウであった溶射施工条件、溶射ロボットの制御、及び溶射設備の三つである。

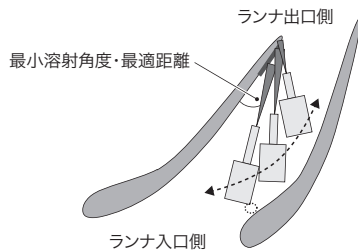
まず、これらの中で最も重要なコア技術である溶射施工条件を得るために、溶射皮膜性状を検証し、皮膜の品質保持のために特に重要なパラメーターである溶射ガンの最小溶射角度・最適距離を明らかにした(図4)。

次に、3Dスキャン技術により、溶射施工業者の溶射ブースのデータを取得し、6軸溶射ロボット全体と、先端に設置される溶射ガンの緻密な動きを、3D-CAD上に再現した(図5)。これらの技術を活用して、短時間に精密で正確な繰り返し検証を行い、溶射施工条件を満たす溶射ガン制御のベースプログラムを作成した。これにより、溶射ガンの寸法制約により困難だったランナの狭隘部に対する溶射が、ランナ入口側から実施可能となった。

当社が作成したベースプログラムに沿って、ロボット制御ソフトウェアメーカーが溶射ロボットの制御プログラムを作成し、溶射設備を持つ溶射施工業者に提供して、溶射を実施する。この自動溶射施工技術は、当社が溶射施工条件を提供するため、特殊技能が不要であり、汎用設備の使用が可能である。この結果、これまで特殊技能を持つ溶射施工業者が担っていた溶射プロセスを、当社、溶射施工業者、及びロボット制御ソフトウェアメーカーが連携して実施するプロセスとしてまとめることができた(図6)。これにより、それ



(a) 溶射角度・距離による皮膜性状の違い

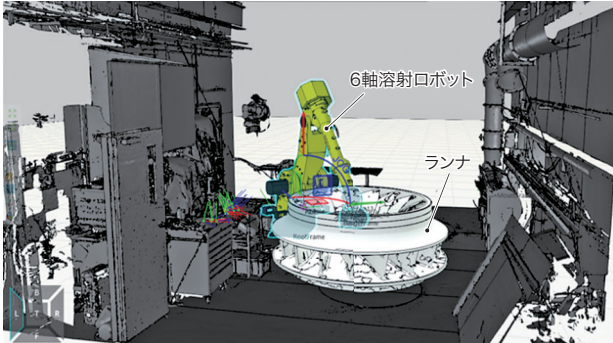


(b) 羽根と溶射角度・距離の位置

図4. 溶射条件による皮膜性状の違い

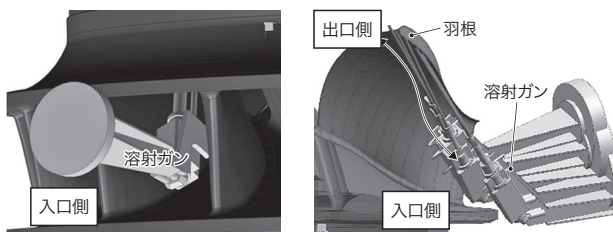
ランナの羽根への溶射角度・距離が、皮膜性状に影響する。

Differences in coating properties according to thermal spraying conditions



データ提供：(株)シンコーメタリコン

(a) 溶射ブース



(b) 流路の入口側から見たランナと溶射ガン

(c) 流路断面から見たランナと溶射ガン(拡大)

図5. 3D-CAD上の溶射ブースと溶射ガン

溶射ブースの3Dデータを取得し、6軸溶射ロボット全体や、先端の溶射ガンの動きなどを、3D-CAD上に再現した。

Positional relationships between thermal spray gun and turbine runner implemented using 3D computer-aided design (CAD)

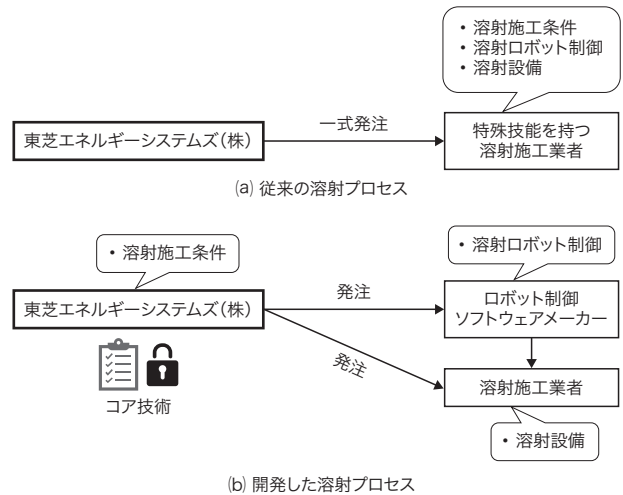


図6. 従来と開発した溶射プロセスの比較

皮膜性状から溶射ガンの最小溶射角度・最適距離などの溶射施工条件を明確にすることで、従来は特殊技能を持つ溶射施工業者が独占していた溶射プロセスを、当社、溶射施工業者、及びロボット制御ソフトウェアメーカーが連携して実施できるようになった。

Comparison of conventional and new thermal spraying processes

それぞれの専門分野の技術を生かして、高品質な溶射を施したランナの安定供給を可能とした。

当社は、この自動溶射施工技術を適用したランナを国内に納入済みであり、今後、適用対象を広げていく。

4. ランナ接合部の3D測定技術

ランナ(図7)は、クラウン、羽根、及びバンドで構成されている。発電運転時には、流れ込む水流により各部品に高い応力が発生する。とりわけ、クラウンと羽根、及びバンドと羽根の接合部では、応力が大きくなるので、クラックの発生リスクが高くなる。

そのため、ランナ製造では、接合部を設計形状のとおり仕上げることが重要である。接合部は複雑な曲面なので、設計形状のとおり仕上げのために、溶接作業時に形

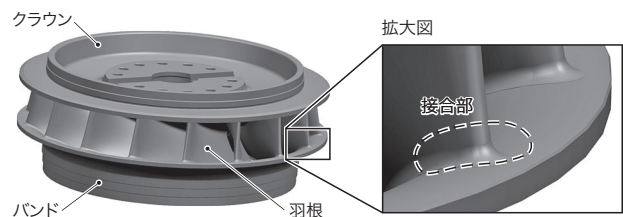


図7. ランナの構造

水車の重要部品であるランナは、接合部の形状が設計形状と異なると応力が大きくなり、クラックの発生リスクが高まる。

Turbine runner structure

形状計測と整形作業を何度も繰り返す、熟練の技術が必要であった。

そこで、これまで曲線測定治具（Rゲージ）を用いて手動で行われてきた形状計測（図8）に替わる3D測定技術を開発した。

3D形状が撮影できるデプスカメラで取得したランナ形状のデータを、解析ソフトウェアで設計データと比較し、その偏差を可視化する（図9）。これにより、作業者が、モニター上で偏差を確認しながら整形することができ、高精度で効率的な作業が可能になる。今後、実作業による検証を進め、実用化を目指す。

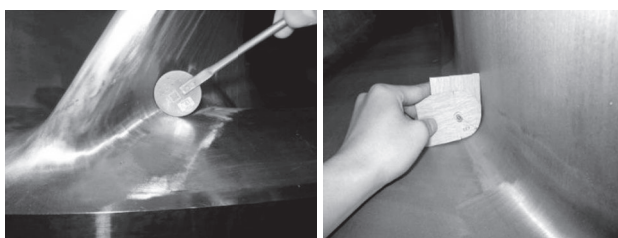


図8. Rゲージによる形状計測

従来は、Rゲージを用いて手動で形状計測していた。

Manually measuring welded parts using radius gauges

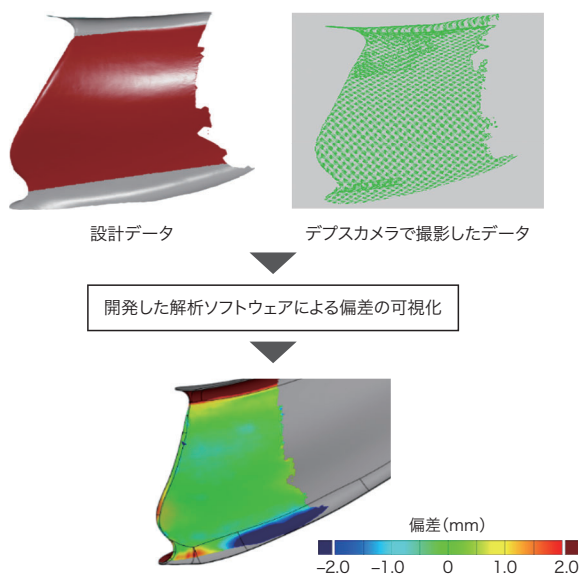


図9. 3D測定技術による偏差の可視化

ランナ形状のデータを、解析ソフトウェアで設計データと比較して偏差を可視化することで、高精度で効率的に整形できる。

Example of visualized deviation between designed and fabricated shapes of welded part using 3D measurement data

5. あとがき

水力発電は、安定的に電力を供給できる再生可能エネルギーとして注目されている。当社は、水車製造で培ってきた技術力をベースに、3D技術などの新しい技術を積極的に適用して、効率化と高品質化を実現する新しい製造技術を開発し、提供していく。



蓮沼 高明 HASUNUMA Takaaki
東芝エネルギーシステムズ（株）
パワーシステム事業部 水力サービス技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



中川 斉年 NAKAGAWA Naritoshi
東芝エネルギーシステムズ（株）
京浜事業所 水力・発電機部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



後藤 基伊 GOTO Motoi
東芝エネルギーシステムズ（株）
京浜事業所 水力・発電機部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.