

水車の起動過程における損傷メカニズムの解明及び強化学習による高速起動と寿命消費抑制の両立

Technologies for Hydraulic Turbines to Identify Failure Mechanisms during Startup Processes and to Achieve Quick Startup Time and Suppress Fatigue Life Consumption by Applying Reinforcement Learning

向井 健朗 MUKAI Takero 橋立 忠之 HASHIDATE Tadayuki 中薗 昌彦 NAKAZONO Masahiko

再生可能エネルギーの増加に伴い、電力需給調整力の必要性が高まっている。迅速な起動・停止と出力制御が可能な水力発電は、調整力の担い手として注目され、更なる高速起動の実現や、頻繁な起動・停止が望まれる。このような運用は水車ランナ(以下、ランナと略記)への負担が大きく、ランナの疲労寿命(以下、寿命と略記)消費に大きな影響を与える一方で、損傷メカニズムは未解明であった。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、損傷メカニズムを解明し、起動時の強度評価手法を構築した。また、強化学習を用いた起動時間短縮と寿命消費抑制の両立をもくろみ、現地にて試験により得られた結果と比較して、同程度の寿命消費ながら約8%の起動時間短縮の可能性を確認した。これらを応用し、水力性能への影響を最小限に抑えながら高速起動を可能とするランナの開発につなげ、電力需給調整における水力発電の価値向上に貢献する。

Integration of renewable energy systems to make power grids more flexible is garnering more attention than ever before. Hydroelectric power systems play a key role in adjusting electricity supply and demand as they enable quick startup and shutdown and can also quickly control output fluctuations. In recent years, demand for faster startup times and more frequent startup and shutdown operations has grown, however, such operations could significantly impact the lifetime of turbine runners, as the mechanisms behind fatigue damage remain unknown.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has succeeded in identifying the mechanisms behind turbine runner damage and established a method for evaluating turbine runner strength during the startup process. Simulations have confirmed that applying reinforcement learning to shorten startup time and suppress fatigue life consumption shorten the startup time by approximately 8% compared with on-site test data regardless of the same degree of fatigue life consumption. Our approach to developing turbine runners capable of high-speed startup while maintaining hydraulic performance is expected to contribute to enhancing the value of hydroelectric power in the supply and demand adjustment market.

1. まえがき

気象条件によって発電出力が変動する再生可能エネルギーの増加により、電力系統における調整力の必要性は一段と高まっている。火力発電などに比べ、短い時間で起動可能な水力発電は、これまで以上に調整力としての役割を担い、その結果、起動・停止回数が更に増加していくことが想定される。

図1に、水力発電所の概要と水車の構造図を示す。起動・停止回数の増加は、水車のコア部品であるランナの寿命消費に与える影響が大きく、損傷事例⁽¹⁾も報告されている。今後は起動過程の信頼性を定量的に評価・管理することが必要となるが、ランナ損傷を招く衝撃荷重の発生メカニズムの解明が課題であった。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、これまで解明されていなかった、起動過程においてランナに過大な応力が発生するメカニズムを明らかにした。また、このメカニズムに基づき、起動過程に対応した強度評価手法の構築や起動モード

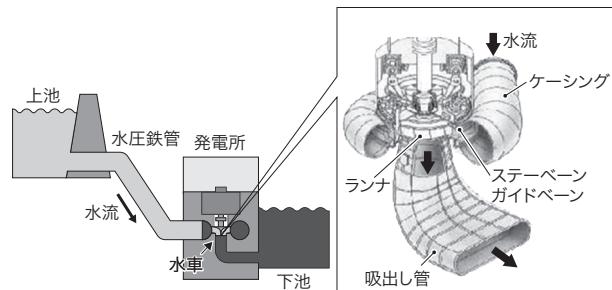


図1. 水力発電所の概要と水車の構造

回転体であるランナの周囲に配置されたガイドペーン開度を調整し、ランナへ流れ込む水流の量(水車の出力)を制御する。

Hydroelectric power plant outline and hydraulic turbine structure

の改善など、電力需給調整における水車の価値向上技術の開発に取り組んでいる。

ここでは、まず起動過程に特有の過大応力の発生メカニズムについて述べる。次に、強化学習による寿命消費抑制と起動時間短縮について述べた後、起動過程を含めた強度

評価手法を適用した結果について述べる。

2. 起動過程に生じる過大応力とメカニズム

2.1 過大応力の現地測定

図2に、実機の高落差フランシス水車ランナの羽根に発生する応力を把握するために、動的歪み(ひずみ)を起動から停止までの一連の運転状態について測定した結果⁽²⁾を示す。動的歪みは起動過程で大きく(中でも回転し始めた直後で最も大きく)、次に無負荷近傍や停止過程で大きいことが分かる。この結果は、これまで長期間にわたって安定的に運用されてきた発電所であっても、運用パターン変更などによる起動・停止回数が増加する場合や、無負荷近傍の運転時間が長くなる場合に、突発的なランナ損傷のリスクが高まることを示唆している。特に、起動過程における歪み波形は、時間・空間に対して散発的に発生する特徴を持っており、ランナ回転に独立して発生していた。測定された歪み波形の特徴から、この現象を楽器のドラムをスティックでたたく様子になぞらえて、ハイドロドラム(Hydro Drum)現象と名付けた⁽³⁾。

2.2 過大応力の再現性

起動過程で発生する過大な応力を詳細に調査するため、模型試験^{(4), (5)}を実施した(図3)。試験では、ランナの羽根面上の動的歪みと水圧を測定するためのセンサーを設置し、様々なガイドペーン開度について試験を実施した。起動過程の運転点では、実機と同様に、衝撃的な動的歪みが散発的に発生しており、特に、ガイドペーン開度が13.5%と大きいときに過大な応力が発生する。また、同時に衝撃的

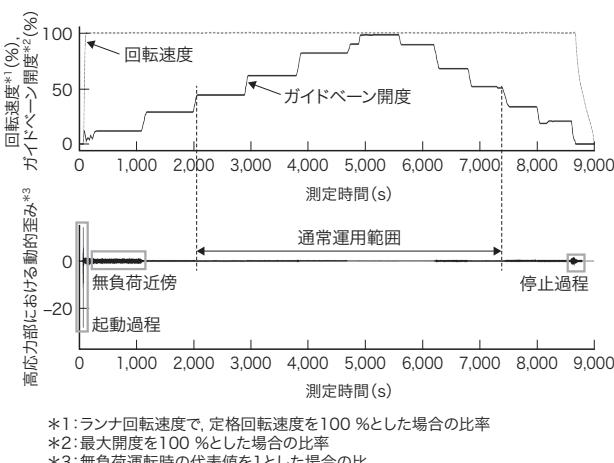


図2. 実機フランシス水車ランナの動的歪み測定結果例⁽²⁾

動的歪みの測定結果から、実働時に加わる応力は、通常運用範囲に比べ、起動・停止時や無負荷近傍が大きいことが分かる。

Example of Francis turbine runner dynamic strain measurement results

な水圧変動を確認した。これにより、起動過程の過大応力は特定の水車に固有の現象ではなく、水力的な普遍性を持つものであることが明らかとなった。

2.3 過大応力の発生メカニズム

起動過程で生じる過大応力が水力的な現象に起因することが確認できたことから、詳細なメカニズム解明を進めるために、流れ解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)を実施した。

解析を進めることで、起動過程の特に低回転数領域において、飽和水蒸気圧以下となった部分で大規模な水蒸気泡の塊(キャビテーションクラウド、以下、CCと略記)が発生し、発生したCCが連鎖的に崩壊する際の衝撃により、ランナ羽根の付け根に高い応力が発生することが分かってきた。CCの挙動をCFDにより解析した結果を、図4に示す⁽⁵⁾。図4の時刻(a)において存在している、二つのCC(図4のCC(A), CC(B))の推移から損傷メカニズムを説明できる。

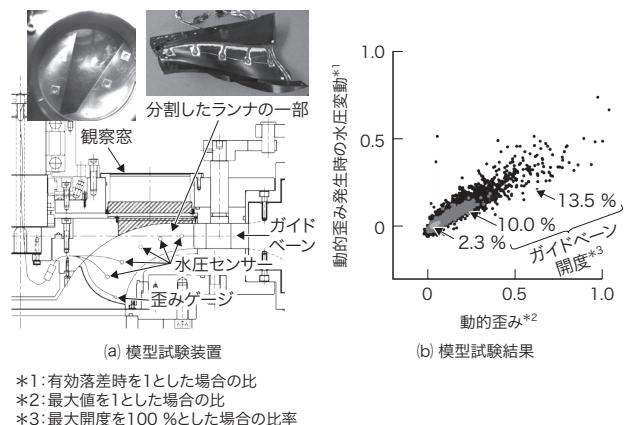


図3. 模型試験装置及び結果^{(4), (5)}

起動過程で発生する応力やランナ内部の水圧変動評価を目的とした模型試験装置である。

Results of overstress measurements using model test equipment

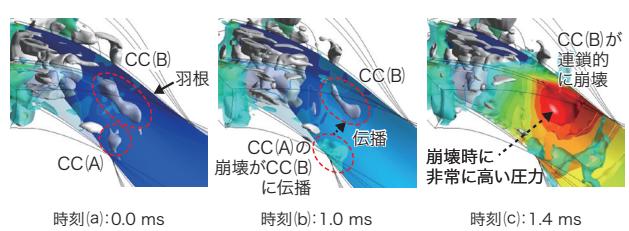


図4. CC崩壊時のメカニズムのCFD解析⁽⁵⁾

CC(A)崩壊時の圧力波が伝播(でんぱ)し、CC(B)の急速な連鎖的崩壊を引き起こすことで、非常に高い圧力がランナの羽根面に生じる。

Results of chain-reaction collapse of cavitation clouds (CC) obtained by computational fluid dynamics (CFD) analysis

すなわち、図4の時刻(b)において、緩やかにCC(A)が崩壊し、このとき、生じた圧力波が音速で伝播(でんぱ)して、時刻(c)にてCC(B)を連鎖的、かつ急激に崩壊させる。CC(B)が崩壊する際、水力発電所の有効落差に相当するレベルの衝撃圧力が広範囲で発生し、これが過大応力の原因になっていると考えられる。

当社は、このようなCCの連鎖的崩壊が引き金となる起動過程の過大応力の発生メカニズムを、世界で初めて^(注1)明らかにした。なお、模型試験においても、CCの連鎖的崩壊により圧力波が上流側に伝播した場合に、羽根入口近傍のCCが崩壊する様子を確認した⁽⁶⁾。

3. 強化学習による寿命消費抑制と起動時間短縮

起動過程において生じるランナ過大応力を低減する方法として、ランナ停止状態から昇速していく過程をコントロールするガイドベーン開度の制御方法、すなわち起動モードの改善がある。図5に、ある水力発電所における、同じ水車での異なる起動モードによる動的歪みと起動時間(回転速度が100%に達するまでに掛かる時間)の比較例を示す。ランナ回転速度(以下、回転速度と略記)の上昇を緩やかにすることで動的歪みが低減する一方、起動時間が長くなる。

起動モードの改善手法として、現地測定結果を基にした回帰モデルと強化学習を組み合わせた最適化手法⁽⁷⁾について説明する。強化学習とは、“エージェント”が“環境”と相互作用しながら、“行動”を試行錯誤的に変化させて解を探

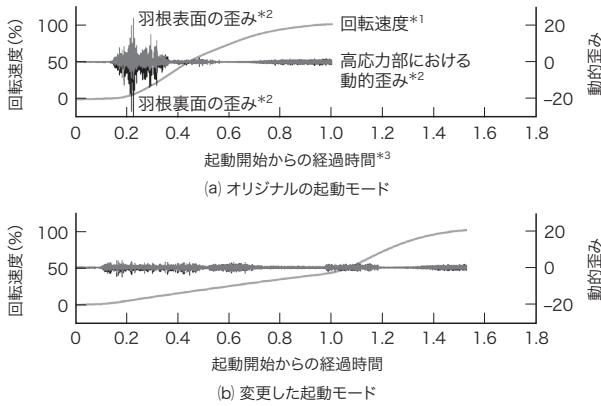


図5. 起動時間と羽根面に生じる動的歪みの関係

起動過程での回転速度上昇を緩やかにすることで、羽根面の動的歪みを大きく減少できるが、起動時間が長くなる。

Relationship between startup time and dynamic strain on blade surface for different startup modes

(注1) 2025年10月時点、当社調べ。

索し、最適な行動を学習する機械学習の一種である。起動モードの探索のゴールは、行動をガイドベーン開度として試行錯誤的に変化させ、設計寿命を満足する中で、より高速起動が可能な起動モード(以下、高速起動モードと略記)を求めることが、又は規定の起動時間において寿命を最大化することとした。ここでは、前者の高速起動モードを求める場合について説明する。

3.1 回転速度上昇率と寿命消費率の回帰モデル構築

現地測定結果より、1秒当たりの回転速度上昇量である回転速度上昇率と、1秒当たりの寿命消費量である寿命消費率に関する回帰モデルを作成した。図6に、三つの起動モードの例で、この回帰モデルを利用した起動時間と寿命消費指数の予測結果を示す。ここでいう寿命消費指数は寿命消費量を対数化し、全ケースの最大値を1とした場合の比である。予測結果と実測値はよく合致しており、作成した回帰モデルの妥当性が確認できる。

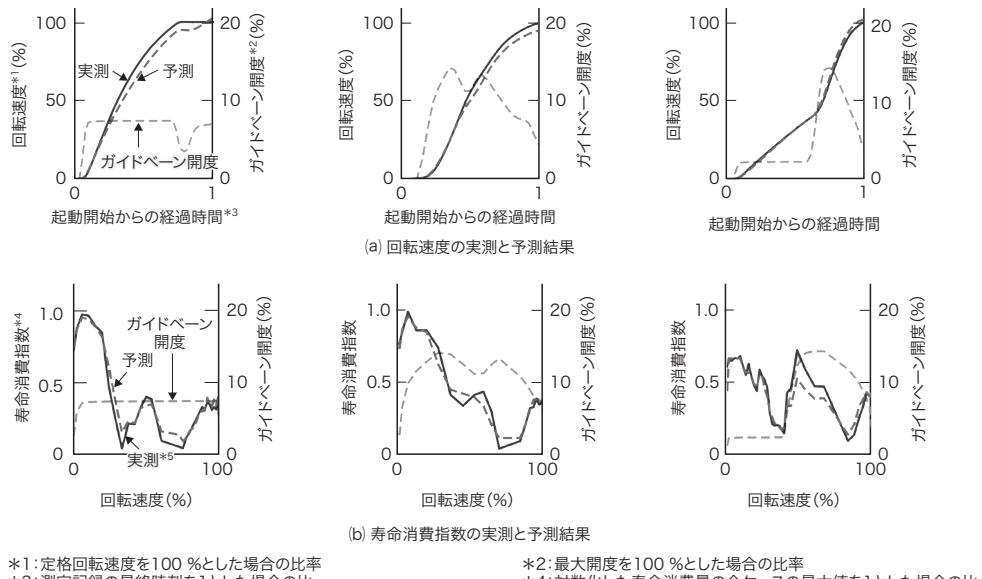
3.2 強化学習による高速起動モードの算出

作成した回帰モデル(回転速度上昇率と寿命消費率)を組み込んだシミュレーション環境を用いた強化学習により、回転速度ごとの最適なガイドベーン開度を探査した。状態は回転速度、ガイドベーン開度、寿命消費率とし、行動はガイドベーン開度変化量として、物理的制約(絶対値と変化率)を試行錯誤的に変化させて与えた。また、学習には強化学習の代表的なアルゴリズムの一つであるQ学習を適用し、図5の“変更した起動モード”をベンチマークケースとした場合に、寿命消費量がベンチマークケースと同等となるように制限した上で、起動時間が早くなるように報酬関数を設定した。更に、学習した結果のガイドベーン開度変化量の時刻歴情報から起動モードを作成することで、学習後の高速起動モードを構築できる。

図7に示すように、試行を重ねるごとにエージェントの行動の学習が進み、最終的にベンチマークケースと同等の寿命消費量の下で、低回転速度域でのガイドベーン開度をベンチマークケースより大きくした高速起動モードが得られた。この高速起動モードでは、ベンチマークケースに対して約8%の起動時間の短縮が見込まれる。現地測定だけを用いた起動モードの探索は、試行回数・運用条件の制約から効率的な探索が難しいが、現地測定結果を用いて回帰モデルを作成し、強化学習と組み合わせることで、計算機上の仮想空間を用いた効率的な探索ができる。

4. 起動過程を含めた強度評価手法

従来、強度評価は、主に静的荷重や動静翼干渉といった、比較的定式化しやすい荷重に焦点を絞った検討が行わ



*1: 定格回転速度を100 %とした場合の比率

*2: 最大開度を100 %とした場合の比率

*3: 測定記録の最終時刻を1とした場合の比

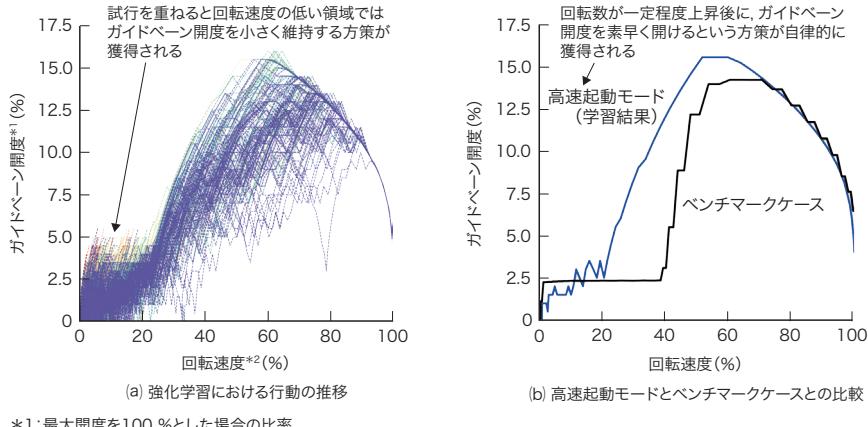
*4: 寿命消費量の実測は、実際の寿命消費量の値を基に演算した値

*5: 寿命消費指数の実測は、実際の寿命消費量の値を基に演算した値

図6. 異なる起動モードでの回転速度と寿命消費指数の予測結果^[7]

現地測定結果を基に構築した回帰モデルを用いて、エージェントの行動（ガイドペーン開度）に対する回転速度の推移と寿命消費量を予測できる。

Results of measured and predicted startup times and fatigue life consumption indexes



*1: 最大開度を100 %とした場合の比率

*2: 定格回転速度を100 %とした場合の比率

図7. 強化学習における行動の推移とベンチマークケースとの比較^[7]

強化学習にて熟練者ノウハウと整合する方策が自律的に獲得される。得られた高速起動モードは、ベンチマークケースに対し、同等の寿命消費量で約8 %の起動時間短縮を確認した。

Changes in behaviors of reinforcement learning agent and comparison of training result and benchmark during startup process

れてきた。起動過程で生じる過大応力については、これまでその発生メカニズムが明らかになっていなかったことや、予測の困難さから、運用開始後に羽根の損傷が生じた際に、個別に対処療法的な対策がなされているのが実情である^[1]。羽根が損傷してからの対処は、広範な原因究明、及びランナの再設計や取り換えを伴うことから、発電停止期間が長くなるなど、水力発電の運用へのインパクトが大きい。

当社は、これまでの研究成果をベースに、高速起動や頻繁な起動・停止が求められる個別の発電所に対して、起動過程を含めた疲労強度評価ができる技術を構築した。図8は、起動過程で羽根に発生する応力を、当社の独自技術を適用した有限要素解析による過渡応答解析にて評価した結果^[3]である。衝撃荷重によって羽根に発生する応力の時間変化を精度良く捉えていることが分かる。

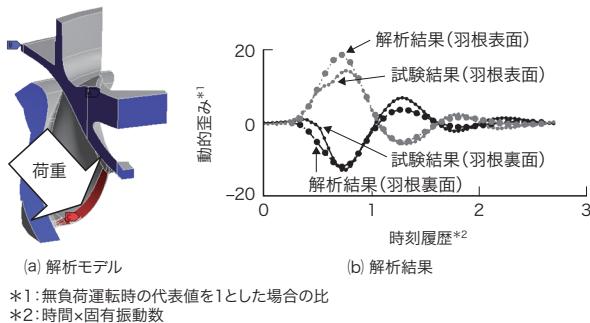


図8. 起動過程応力評価のための強度評価手法の妥当性評価^③
有限要素解析による過渡応答解析を実施し、現地試験結果を再現することを確認した。この評価手法を用いて新設計ランナを開発・評価した。
Results of strength evaluation method validation during startup process

更に、これらの技術を応用することで、水力性能への影響を最小限に抑え、高速起動を可能とするランナを開発^⑧した。ある水力発電所で使われているランナと比較して、羽根厚みを変更することなく、同じ水圧荷重に対しての発生応力を20%以下に低減できることを、シミュレーション上にて確認した。

5. あとがき

ここでは、起動過程に特有の過大応力の発生メカニズムを世界で初めて解明し、起動過程を含めた強度評価手法を構築した成果を報告した。また、強化学習を用いることで、起動時間短縮と寿命消費抑制が両立できる起動モードが得られる可能性を確認した。これらの技術は、現地測定とシミュレーションを組み合わせることで、従来困難であった起動過程を含めた運用全体を通した信頼性管理を実現する。

当社は、今後もこれらの取り組みを通じて、電力需給調整における水力発電の価値を更に高め、持続可能なエネルギー社会の実現に貢献していく。

文 献

- (1) Gummer, J. H.; Etter, S. Cracking of Francis runners during transient operation. The International Journal on Hydro-power & Dams, 2008, Issue 4, p.81–85.
- (2) Mukai, T. et al. "Measurement of dynamic stress and optimized start-up method for prototype Francis turbine". The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM16). Yokohama, Japan, AFMC. 2021.
- (3) Mukai, T. et al. "Mechanism of extraordinary stress on blade during start-up of the Francis turbine". Proceedings of the 31st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Trondheim, Norway, IAHR. 2022.
- (4) Mukai, T. et al. "Investigation of flow behavior causing extraordinary stress on blade during start-up of the Francis turbine". Proceedings of the 31st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Trondheim, Norway, IAHR. 2022.
- (5) 向井健朗, ほか. 高落差低比速度フランシス水車の起動過程においてランナ羽根に生じる衝撃的な水圧荷重の発生メカニズム. ターボ機械, 2023, 51, 4, p.220–228.
- (6) Mukai, T. et al. "Chain-reaction collapse of cavitation clouds in Francis turbine runner during start-up". Proceedings of the 32nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Roorkee, India, IAHR. 2024.
- (7) Mukai, T. et al. "Optimizing quick and safe start-up mode of Francis turbine using reinforcement learning". The 18th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM18), Ha Long, Vietnam, 2025.
- (8) 東芝, 東芝エネルギーシステムズ, 向井健朗, ほか. フランシス型水車用ランナ及びフランシス型水車. 特許第7278985号. 2023-05-22.



向井 健朗 MUKAI Takero, Ph.D.
東芝エネルギーシステムズ(株) 京浜事業所 水力・発電機部
博士(工学)
日本技術士会・日本機械学会・ターボ機械協会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



橋立 忠之 HASHIDATE Tadayuki
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギー技術開発センター 機械技術開発部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



中薗 昌彦 NAKAZONO Masahiko
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギー技術開発センター 機械技術開発部
日本機械学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.