

水車全体流路解析による性能検証模型試験の代替技術

Numerical Simulation Technology Based on Whole Flow Passage Analysis to Replace Hydraulic Turbine Model Tests

黒澤 貞男 柯 伯翰

■KUROSAWA Sadao ■KO Pohan

発電用水車の性能開発は、流れ解析により構成要素を個別に最適化した後に、性能検証用模型を製作し、効率や、水圧脈動、キャビテーション^(注1)などの水力特性を実験で調整し検証している。したがって、流れ解析によってこれらの特性が検証できれば、模型試験費用と期間を削減できる。

このような背景の下、東芝は、水車全体流路解析を基盤にした性能検証模型試験の代替技術の開発を進めている。

In general, the method used for the research and development of high-performance hydraulic turbines is composed of two stages: (1) design optimization by flow simulation, and (2) verification of the optimized hydraulic turbine performance by model tests. The model tests require the fabrication of a model turbine, which accounts for a large portion of the total research and development costs. Therefore, numerical simulation that can predict all aspects of the performance of a hydraulic turbine, including efficiency, pressure fluctuations, and cavitation, is expected to significantly reduce the test costs and testing period.

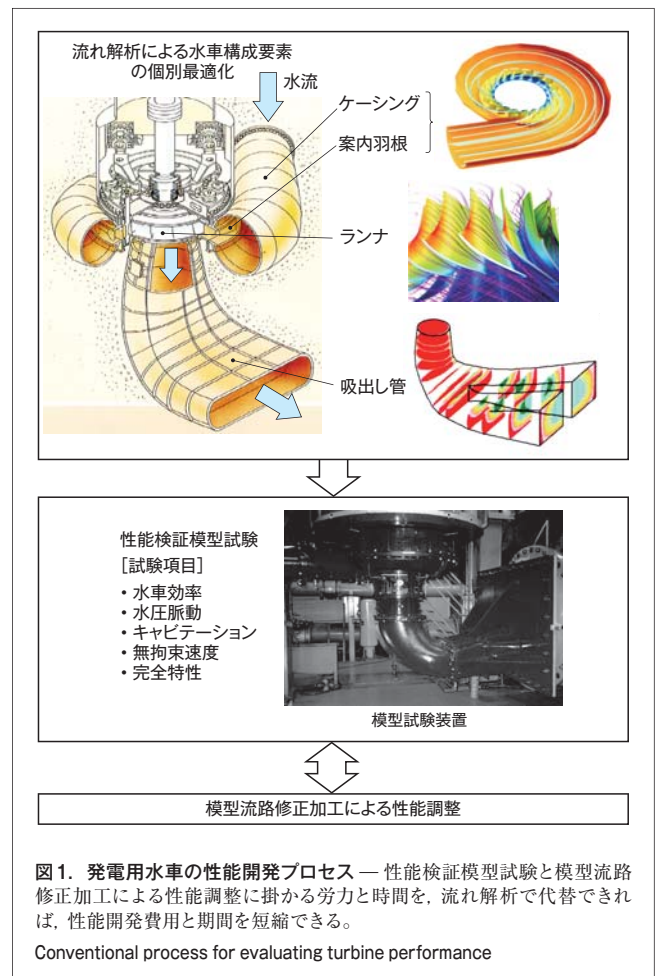
In response to this situation, Toshiba has developed a numerical simulation technology based on whole flow passage analysis to replace hydraulic turbine model tests.

1 まえがき

水力は再生可能なクリーンエネルギーであるばかりでなく、地球温暖化を促進する二酸化炭素も排出しない環境に優しいエネルギーである。このため、世界的に見ても数多くの新たな開発が進められている。特に、中国や、東南アジア、南米などの水力資源の豊富な地域では、大規模な開発が進められており、電力供給の中で大きな役割を担うことが期待されている。一方、国内の水力発電では、既に大規模な開発は完了しているが、既設発電所の性能・出力向上を図るニーズや、分散型電源としての小水力発電開発とその効果的運用が望まれている。

しかし、水力発電所は立地条件や顧客のニーズにより落差や出力が異なるため、発電所ごとに最適な性能を持つ水車を適用する必要がある。その開発には多くの労力と時間が掛かっている。現状の性能開発では、流れ解析により水車構成要素の効率特性を個別に最適化した後に、性能検証用模型を製作し、効率や、水圧脈動、キャビテーションなどの水力特性を実験で調整し検証している(図1)。

したがって、流れ解析によってこれらの特性が検証できれば、模型試験費用と期間を削減できる。また、構成要素の個別最適化を流路全体の最適化に代替できれば、更なる性能向上を実現できる。このような背景の下、東芝は、高精度流れ解析による性能検証模型試験の代替技術の開発を進めている。



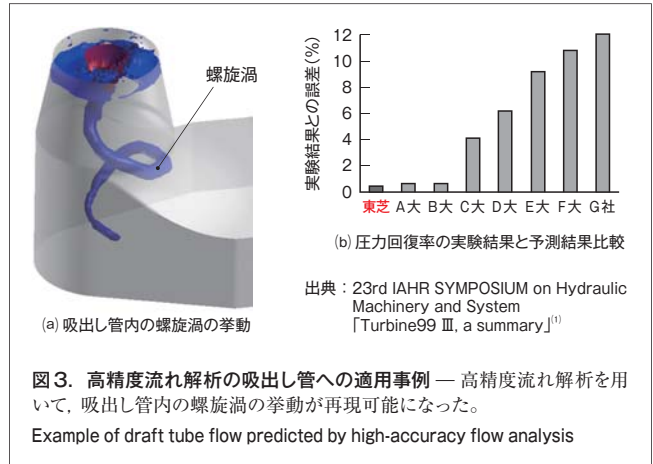
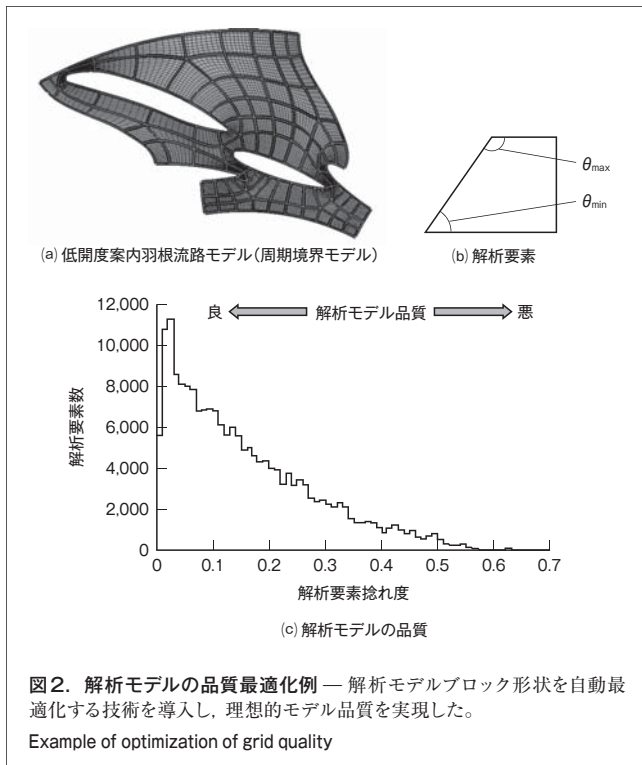
(注1) 水流中の低圧部が飽和蒸気圧以下になると気泡が発生する現象。

2 高精度流れ解析技術

部分負荷や過負荷のような非設計運転状態については、水車流路を構成する要素（ケーシング、案内羽根、ランナ、吸出し管）間の干渉作用が強くなり、境界条件の受渡しをベースにした要素部材ごとの流れ解析では水力性能を高精度に予測することは困難である。また、水車内部の流れは羽根により整流されているが、高レイノルズ数領域にあり、乱れの非定常性が強く複雑なものとなっている。特に、水の落差エネルギーを回転エネルギーに変換するランナやその下流側の要素部材である吸出し管では、二次流れや渦が発生し、従来の定常解析では要求精度を満たせない。このため、当社は、ケーシングから吸出し管出口までを一括してモデル化し、構成部品間の干渉効果を忠実に模擬した非定常の水車全体流路解析を基盤とした性能検証模型試験の代替技術の開発を進めている。

流れの基礎方程式の離散化、乱流モデル、及びキャビテーションモデルについては、現段階でもっとも高精度なものを適用し、数値解析上の誤差を最小化するとともに複雑な水車内部の流れを表現できるようにしている。しかしこの場合、解析モデル品質を十分に確保していないと適切な収束解を得ることができない。このため、解析モデルブロック形状を自動的に最適化するマルチブロック法により、解析モデルを作成している（図2(a)）。このとき、図2(b)に示す解析要素の捻れ（ねじれ）度は、その形状内の角度により式(1)で定義される。

$$\text{解析要素捻れ度} = \max((\theta_{\max} - 90)/90, (90 - \theta_{\min})/90) \quad (1)$$



この解析モデルにより、解析要素の捻れ度が0.7以下の理想的な解析モデル品質を実現している（図2(c)）。

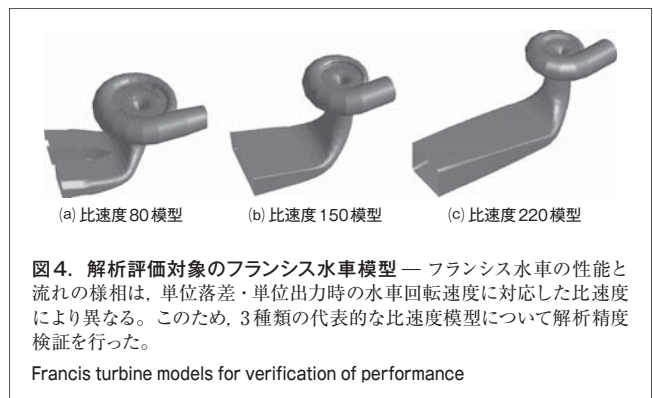
このような高精度流れ解析技術を用いて、落差変化により発生するランナ内の剝離渦の挙動や、吸出し管内に発生する螺旋（らせん）渦の挙動を正確に再現することが可能になっている（図3(a)）。また、この流れ解析技術は、国際水理学会主催の解析ワークショップにも出展され、世界トップレベルの解析精度であるとの評価を得ている（図3(b)）。

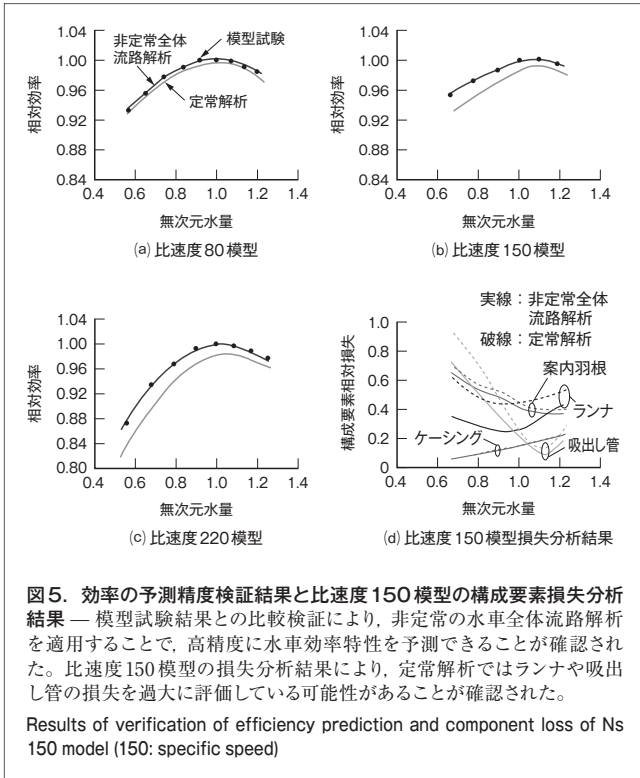
3 フランス水車の水力性能予測技術

流れ解析で性能検証模型試験を代替するには、実物水車の運用を網羅する運転範囲で、効率や、水圧脈動、キャビテーションなどの水力特性を模型試験と同等な精度で算定することが必要である。ここでは、水車機種の中で約50%の水力発電所に適用されるフランス水車を対象に、図4に示すような3種類の代表的な比速度模型について予測精度を検証した結果を述べる。

3.1 水車効率特性

水車効率は、ランナで回収される回転エネルギーと水車流路前後の全圧差により定義されるが、案件応札時には価格換算評価されるため、水力性能上もっとも重要な指標である。





水車効率の予測精度検証結果と、比速度150モデルの構成要素損失分析結果を、図5に示す。従来の定常解析では比速度が大きい機種に対して模型試験値との乖離(かいり)が大きくなる問題があったが、非定常解析を適用することによりランナ損失や吸出し管損失の過大評価が改善され、模型試験と同等の精度で効率特性が予測されていることがわかる。

3.2 水圧脈動特性

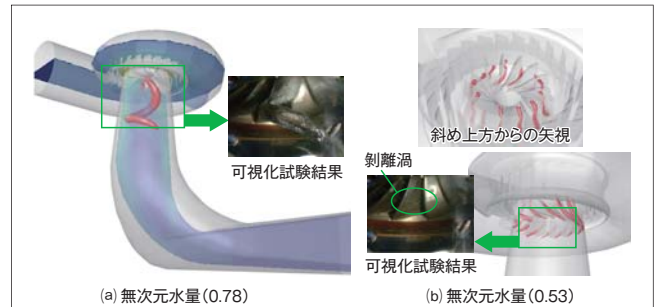
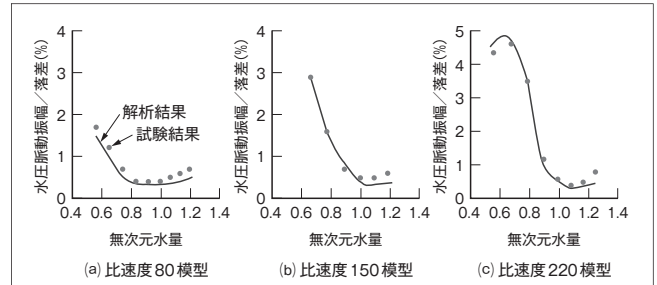
部分負荷運転点では、ランナ出口の流れの周方向速度が大きくなり、螺旋渦が吸出し管内に発生する。この螺旋渦は吸出し管内を振れ回り、その水圧脈動により振動を誘発するため、構造強度上の信頼性確保の観点から螺旋渦の非定常な挙動と吸出し管内の水圧脈動特性を評価することが必要である。

ランナ出口の水圧脈動振幅の予測精度検証結果と比速度220モデルによる非定常流場検証例を、それぞれ図6、図7に示す。これらの図から、水圧脈動の起因となっている螺旋渦やランナ流路内で発生する剥離渦の挙動を定性的に再現しているとともに、振動強度の評価上重要な流量と水圧脈動振幅の関係が高精度に予測されていることがわかる。

3.3 キャビテーション特性

放水路側の水面位置変化によりランナ出口の圧力が低下した場合、ランナ羽根面上にキャビテーションが発生することがある。キャビテーションが極度に発生すると、流水面が壊食^(注2)されるとともに性能が低下するため、水車性能においては性能

(注2) 気泡が崩壊する際に発生する衝撃力で、壁面に損傷が生じる現象。

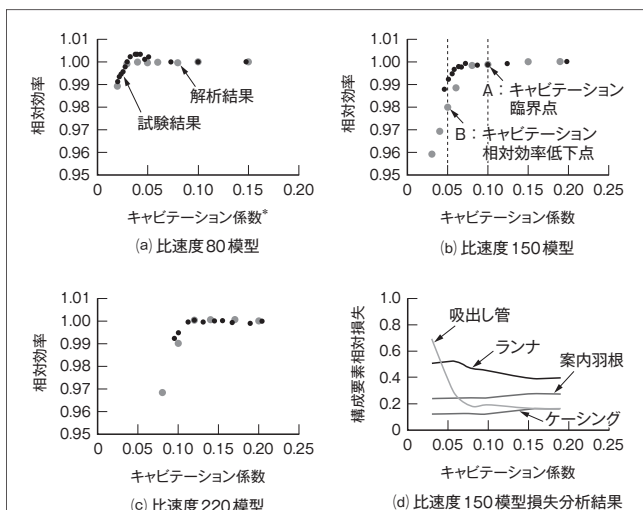


が低下し始める臨界点を評価することも重要である。

キャビテーション特性の予測精度検証結果と比速度150モデルの構成要素損失分析結果を、図8に示す。また、比速度150モデルによりキャビテーション流場を検証した結果を、図9に示す。これらの図から、キャビテーション発生状況や臨界点が高精度に予測されていることがわかる。また、臨界点での効率低下の主因は、吸出し管損失の増加であり、従来考えられていたランナ羽根間流路の閉塞でないことも明らかになった。

4 水力特性予測技術の他機種への展開

低落差で大流量の水力発電所には、カプラン水車やバルブ水車のような軸流水車が適用される。軸流水車に対してもフランシス水車と同様の水車全体流路解析を基盤とした性能検証試験の代替技術を開発している。フランシス水車と異なるのは、広い運転範囲で高効率な運用をするためにランナ羽根角度が変更可能な構造になっていることである。これにより、ランナ羽根外周端と内周端には静止部位との間に隙間が存在し、水車内部の流れをより複雑にしている。すなわち、ランナ羽根には圧力面と負圧面の圧力差に起因した翼負荷が作用す



*水車出口圧力と飽和蒸気圧の差を落差で無次元化した値で、キャビテーション発生の尤度(ゆとり)を意味する

図8. キャビテーション特性の予測精度検証結果と比速度150モデルの構成要素損失分析結果 — 模型試験結果との比較検証により、キャビテーション特性を高精度に予測できることが確認された。比速度150モデルの構成要素分析により、効率低下の主因は吸出し管損失の増加であることが判明した。

Results of verification of cavitation characteristics and component loss of Ns 150 model

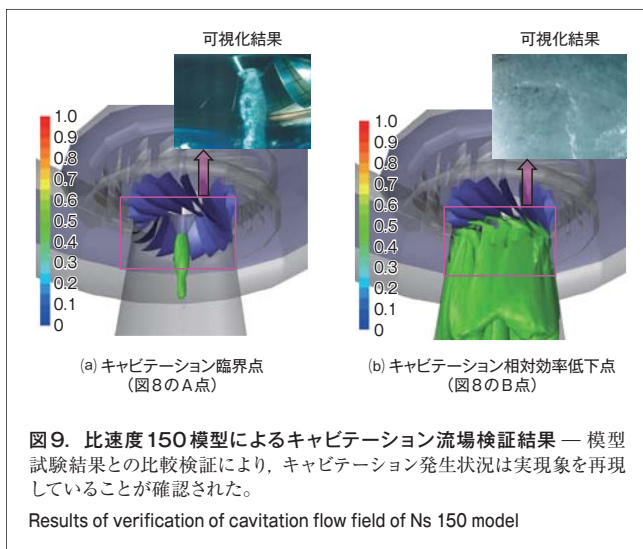


図9. 比速度150モデルによるキャビテーション流場検証結果 — 模型試験結果との比較検証により、キャビテーション発生状況は実現象を再現していることが確認された。

Results of verification of cavitation flow field of Ns 150 model

るが、ランナ羽根外周端と内周端では静止部との隙間を介して圧力面側領域と負圧面側領域が連通するため、強烈な隙間流れが発生してランナ内部の流れを乱すとともに、隙間流れが下流域で渦糸やキャビテーションに成長して吸出し管内の流れをかき乱す。このため、軸流水車の流動現象を高精度に予測するのは容易ではない。

このような課題を克服するために、ランナ羽根面などの壁面付近での層流乱流遷移現象を模擬する物理モデルや、ランナや吸出し管の流れのように渦糸の挙動が問題となる領域について局所的に渦をモデル化することなく直接計算する局所直

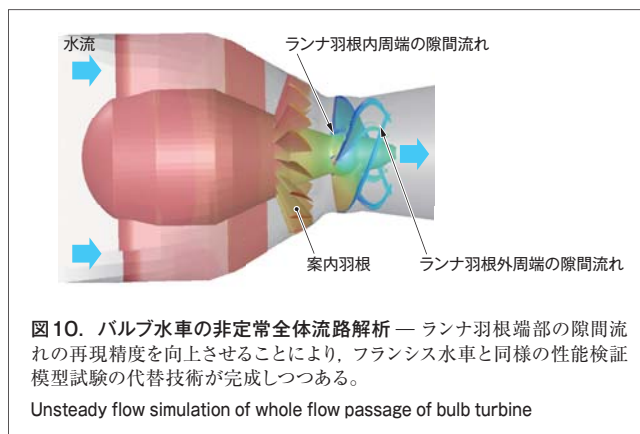


図10. バルブ水車の非定常全体流路解析 — ランナ羽根端部の隙間流れの再現精度を向上させることにより、フランシス水車と同様の性能検証模型試験の代替技術が完成しつつある。

Unsteady flow simulation of whole flow passage of bulb turbine

接渦シミュレーション法 (DES : Detached Eddy Simulation) を導入した。これにより、軸流水車用の高精度流れ解析手法を構築し、軸流水車のランナ翼端渦の挙動や流路内の損失も高精度に予測することが可能になりつつある (図10)。

5 あとがき

水車全体流路解析を基盤とした性能検証模型試験の代替技術開発の状況と、この開発に関係した新たな技術展開について述べた。フランシス水車については、試験代替技術として実用化のめどが得られており、この成果を性能開発に反映していく。また、国内外の中小水力発電所では性能検証模型試験を省略した改修案件が増えているので、このような案件にもこの成果を適用し、新たな市場開拓に貢献していく。

今後は、水車全体流路解析のような大規模解析に適した性能最適化手法を開発し、水車性能開発作業の省力化及び自動化に取り組む。

文献

- (1) Cervantes, M. J. et al. "Turbine99 III, a summary". Proceeding of 23rd IAHR SYMPOSIUM on Hydraulic Machinery and System, Yokohama, 2006-10, IAHR, paper no. 117.
- (2) Kurosawa, S. et al. Numerical model testing to enhance performance and reduce costs of Francis units. Hydropower & Dams, 17, 2, 2010, p.114 - 115.



黒澤 貞男 KUROSAWA Sadao

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主査。水力機器の技術開発に従事。日本機械学会、ターボ機械協会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



柯 伯翰 KO Pohan

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。水車及びポンプ水車の設計支援システムの開発に従事。

Power and Industrial Systems Research and Development Center