

水車・ポンプ水車の内部流れと高性能化技術

Internal Flow Investigation and High Performance Technology for Hydraulic Turbine and Pump Turbine

技術本部 宮川 和 芳^{*1}

高砂製作所 小室 隆 信^{*2}

水車・ポンプ水車は、市場競争力強化のために小型化、高速化によるコスト低減と更なる運用性の向上のための性能向上が求められている。水車・ポンプ水車の性能向上のためには、詳細な内部流れを把握し、損失発生メカニズムを明らかにすることが必要である。そのためのツールとして流動解析と内部流れの詳細計測が有効である。最近の流動解析技術の進歩により、流れ場のより詳細な挙動を解明できるようになってきた。また、複数の翼列、流路を一度に解くことにより、全体の流れ場の把握が容易になり、かつ個々の境界条件の問題が解決するため、解析精度が向上した。流動解析の精度向上とともに内部流れの計測技術、試験装置も発展し、高性能化に寄与している。本報では、水車・ポンプ水車の設計ツールとして実用化段階にある流動解析、実験計測技術及びそれらを用いた高性能化技術について紹介する。

In order to strengthen our competitiveness in the world market, manufacturing costs must be decreased by increasing the rotational speed and reducing the size of hydraulic turbines, and pump turbines to improve performance. To improve the performance of hydraulic turbines and pump turbines, it is necessary to clarify the loss mechanism by closely detailing the internal flow. Both computational fluid dynamics (CFD) and a detailed measurement of the internal flow are effective for this purpose. Our revised design technology includes the CFD code and design criterion, based on the loss mechanism which is reflected in the hydraulic turbine design system. The CFD technology, experimental technology to get high performance are all described in this paper.

1. ま え が き

水車・ポンプ水車は、市場競争力強化のために従来に比べて大幅なコスト低減を要求され、ますます小型、高速化の傾向にある。また、同時に運用性の向上から更なる高性能化も要求されている。そのためには、水車・ポンプ水車の翼列、流路における損失発生メカニズムの把握と内部流れのコントロール手法に基づく性能向上技術が必要である。最近の流動解析技術と内部流れの計測技術の進歩は、従来困難であった水車内部の詳細な流れの把握と損失発生メカニズムの解明を可能とした。特に流動解析は、オイラー解析による翼列の三次元効果、体積力による影響評価を始めとし、ナビエ・ストークス解析による粘性効果の把握に用いられている⁽¹⁾。また、その解析範囲は、翼列、流路単独から水車すべての構成要素を含んだ一体解析へ、また定常から非定常にと大規模化してきている⁽²⁾。これら解析技術の精度向上のためには、高い空間、時間分解能を有する詳細な内部流れの計測結果を検証に用いる必要があり、そのために特化された試験装置や高度な計測技術が開発されてきた。

現在の水車・ポンプ水車の高性能化技術は、流動解析と内部流れの計測技術の高度化の上に成立っており、新技術を織込んだ設計システムとして実用化している。

2. 高性能化のためのツール

2.1 高性能化手法

水車・ポンプ水車の高性能化手法を以下に示す。始めに設計仕様に従ってケーシング、ステーパーン、ガイドペーン、ランナペーン、ドラフトチューブの流体設計を行う。次に流動解析を用いて性能を予測するとともに、設計クライテリアを満たしているかどうかを評価する。設計結果がこのクライテリアを満たした後に、

模型試験が効率、キャビテーション性能等の確認のために行われる。また、模型試験装置や要素試験装置を用いて行われる内部流れ計測の結果は、流動解析結果と共に損失発生メカニズムの解明や設計時に予測したフローパターンの確認に用いられる。そのほかこの計測結果は、流動解析結果の検証、精度向上や新しい設計クライテリアの設定、設計コンセプトの構築にも用いられる。また、流動解析のプログラムはツールとして設計システムに組込まれ、クライテリアの評価に用いられている。

2.2 流動解析

流動解析においては、翼列、流路内での体積力、三次元効果を把握できる非粘性解析や粘性効果を明らかにするためのナビエ・ストークス解析が、既に設計ツールとして実用化されている。また、最近ではランナペーンと二重翼列（ステーパーン、ガイドペーン）を定常流れとして同時に解く多段解析や、更にはそれら翼列にケーシングからドラフトチューブを加えた水車全体を一体で解析する大規模解析も実用化されつつある。図1にフランシス水車の一体解析例を示す。この一体解析は、翼列、流路単独の解析での境界条件をケーシング入口とドラフトチューブ出口でのみ与えればよくなり、特に解析精度の向上に大きな効果を示している。

2.3 内部流れ計測

従来、水車の内部流れは、模型性能試験装置を用いてガイドペーン下流やドラフトチューブ入口でピトー管等を用いて計測されてきた。しかし模型の構造が複雑なためにトラバース範囲が限られることや、空間、時間分解能を高く取れないことにより、内部流れに特化した試験装置を製作した。ランナ内部の詳細な流れを計測するために、図2に示す水車用低速回転試験装置を開発した。本装置では、寸法を模型性能試験に用いる模型よりも大きくすることにより、高い空間分解能での計測が可能となった。また、静止系から回転しているランナ内部での流れを計測するためには、

*1 高砂研究所ターボ機械研究推進室

*2 機械技術部水車設計課主務

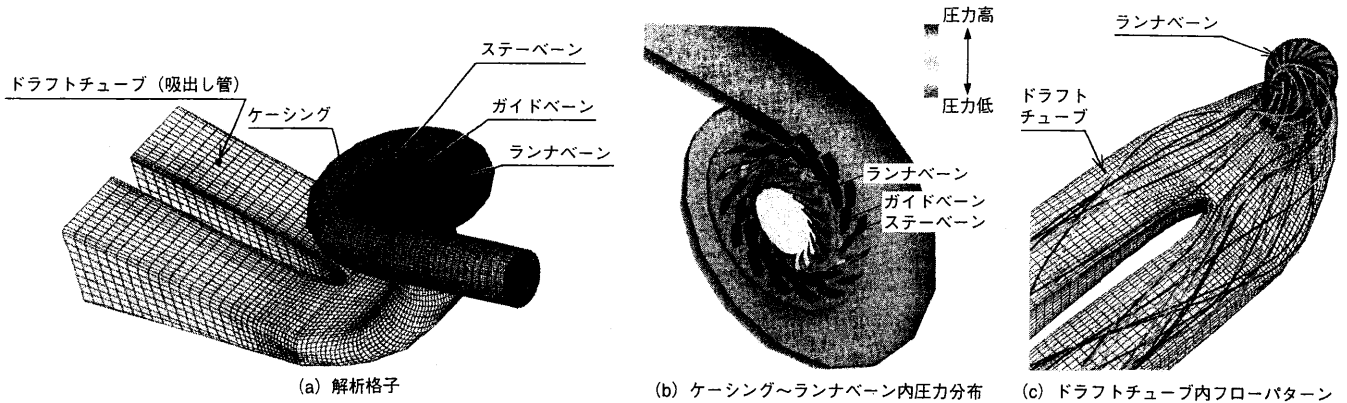


図1 フランシス水車一体解析例 すべてのフランシス水車構成翼列，流路を一体で解析する三次元粘性流動解析の解析格子及び結果例を示す。
Computational mesh and results of whole francis turbine

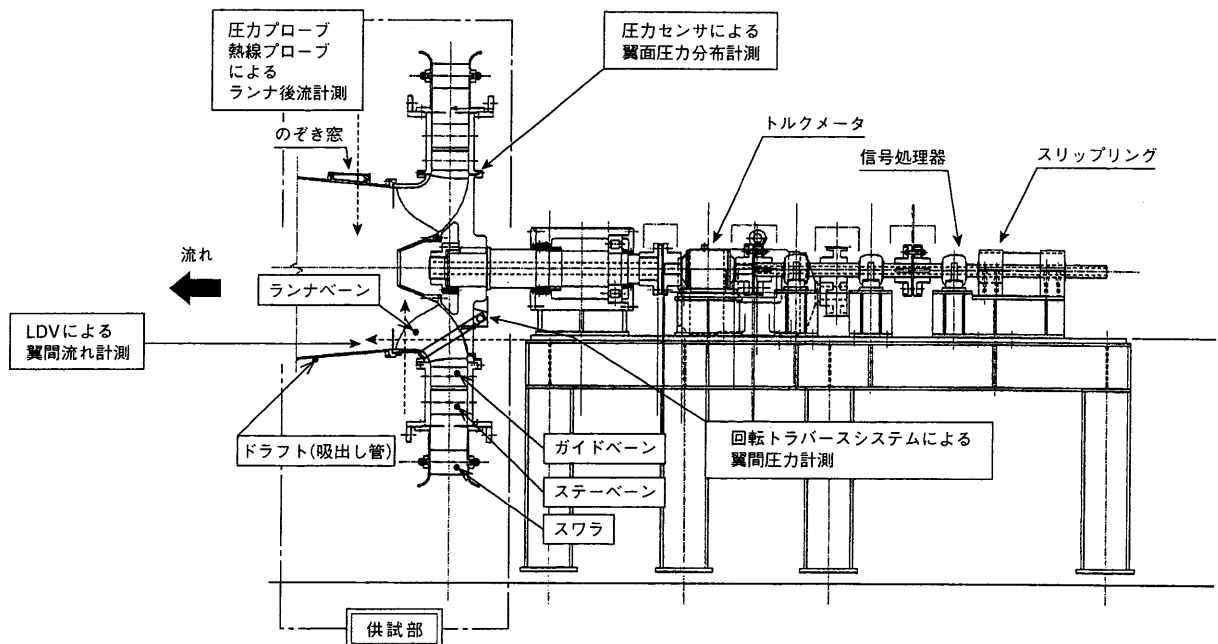


図2 水車用低速回転試験装置概要 大きな羽根車を低速で回転することにより，計測の時間，空間分解能を向上させることができる。
Schematic drawing of low speed research hydraulic turbine test rig

高い応答性を有するセンサが必要となるが，水用よりも応答性の高い空気用のセンサを用いるために作動流体は空気とした。

このほか，回転系でのトラバースシステムやLDV (Laser Doppler Velocimeter) による内部流れ計測も可能である。

本試験装置を用いることにより，二重翼列，ランナの詳細な内部流れ計測が可能となった。

3. 内部流れの詳細把握

3.1 二重翼列内の流れ

水車・ポンプ水車の内部流れの把握のために，前述の流動解析や計測技術を用いた。図3に，フランシス水車ガイドベーン，ランナベーン出口流れの計測位置を示す。ガイドベーン出口では周方向，高さ方向に，またランナベーン出口ではランナ出口に沿ってピトー管をトラバースすることができる。図4 (a)にガイドベーン出口での全圧損失の計測結果を示すが，ステアーベーン及びガイドベーンのウェークを捕らえている。また，二重翼列，ランナの多段解析による解析結果と実験結果との比較を図4 (b)に示すが，両者は良く一致している。

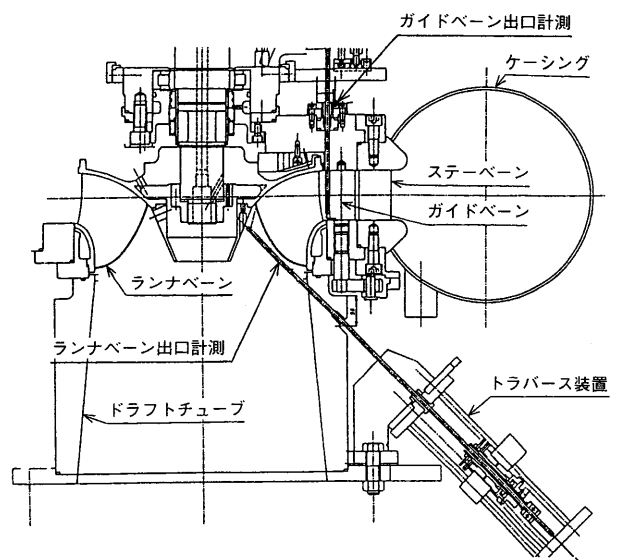


図3 フランシス水車ガイドベーン，ランナベーン内部流れ計測位置
フランシス水車ガイドベーン及びランナベーン出口流れの計測位置を示す。
Measurement position of flow for francis turbine

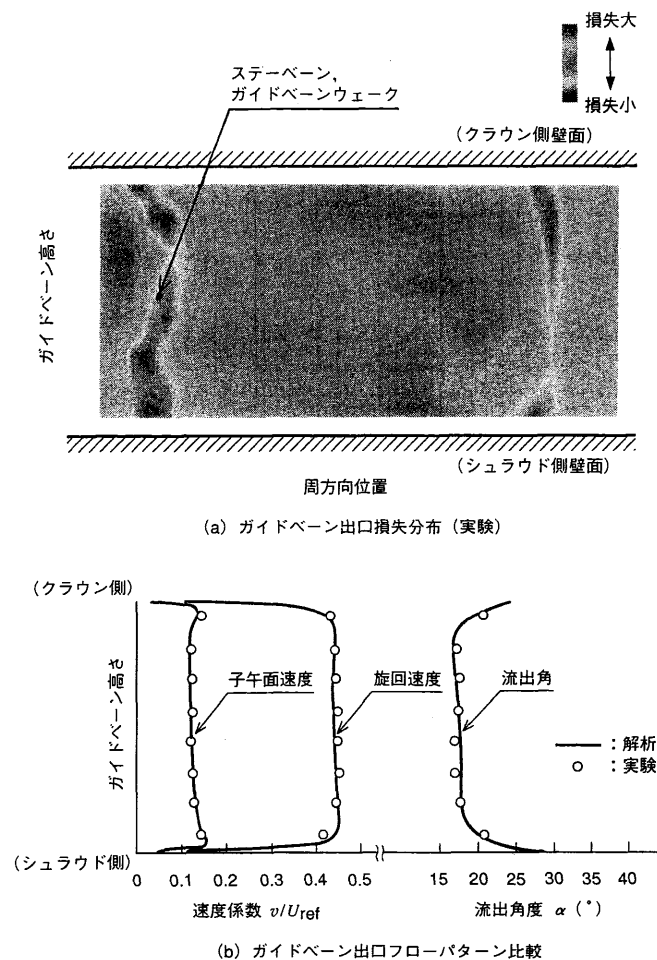


図4 ガイドベーン出口フローパターン ガイドベーン出口での解析による損失分布及び解析と実験結果とのフローパターン比較を示す。
Flow pattern of guide vane exit plane

3.2 ランナ内の流れ

ランナ内の流れには、回転による遠心力、コリオリ力、翼面、壁面の曲率による遠心力等が働き、非常に複雑な二次流れを形成する。図5(a)に、一体解析によるランナ入口から約25%及びランナ出口近傍での二次流れベクトルを示す。ランナ上流から発達した二次流れは、ランナ出口においてクラウン側からシュラウド側へ及び圧力面から負圧面への二次流れとなる。この二次流れは、シュラウドと負圧面とのコーナーに低エネルギー流体を運び、大きな損失域を形成している。図5(b)には、高い応答性を有する非定常流れ計測用ピトー管を用いたランナ出口での全圧分布を示す。ランナベーン出口では強いウェークとジェットの領域が観察される。これらのように、二重翼列、ランナのフローパターンと損失分布を明確にすることにより、損失発生メカニズムを推定することができる。

3.3 キャビテーション性能

水車・ポンプ水車のキャビテーション性能は、効率と同様に重要である。特にポンプ水車では運転がキャビテーション未発生領域で行われるために、キャビテーション初生点の予測技術が必要である。図6に、ポンプ水車ポンプ流れの解析による圧力分布を示す。図6(a)はポンプ水車の最高揚程側での解析結果であり、ランナベーン負圧面側で低い圧力となっている。また最低揚程側での解析点を示す図6(b)では、ランナベーン圧力面側で低圧力領域が表れる。キャビテーション初生点はこの最低圧力値から求めることができるが、図6(c)に流量に対するキャビテーション初生点

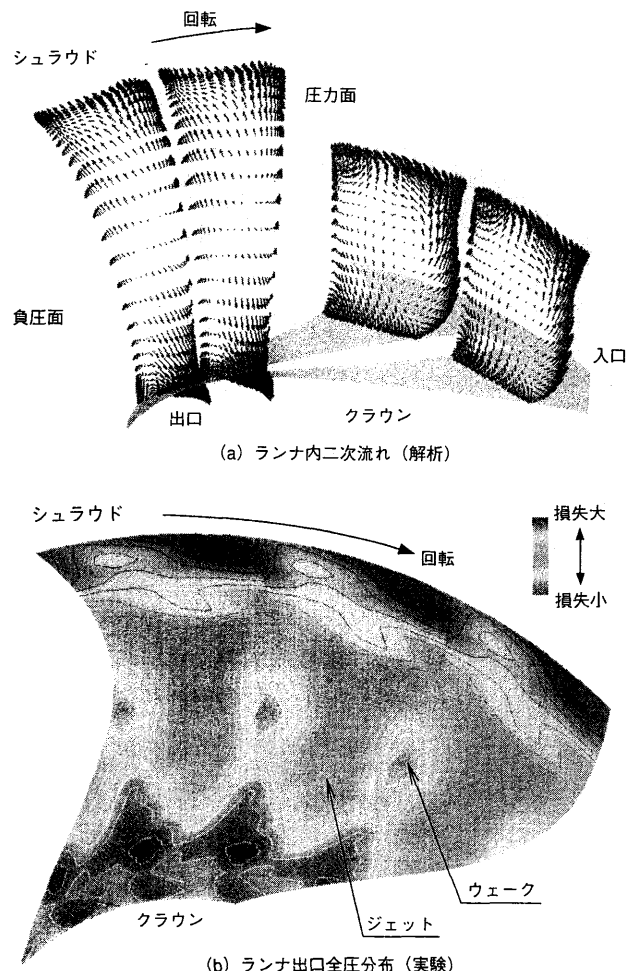


図5 ランナベーン内フローパターン ランナベーン内での解析による二次流れ分布及びランナ出口での全圧分布計測結果を示す。
Flow pattern in runner vane

の解析結果と実験結果との比較を示す。本図において両者は良く一致しキャビテーション初生点は、粘性解析により定量的に予測できることが明らかになった。

4. 高性能化の検討

現在の水車・ポンプ水車の効率は高いレベルにあるが、更なる高効率化を図るためには構成要素すべての低損失化が必要である。特に各翼列、流路の形状最適化と相互の流れの影響評価による低損失化が重要となる。

図7に、フランシス水車ケーシング、二重翼列の損失低減例を示す。ケーシング内ではその曲率のために強い二次流れが発生し、ステーパーンへの流入角度が高さ方向、周方向に大きく変化する。そのため周方向に異なるステーパーン形状を用い、流れとの整合性を向上させるとともに、ステーパーン自体の損失低減も図った。図7(a)はステーパーン改善前の全圧損失を、また図7(b)は改善後の全圧損失を示す。模型試験により効率向上の検証を行った結果、図7(c)に示すとおり本改善策が有効であることを確認した⁽³⁾。

ランナ是水車の最も重要な構成部分であり、従来から多くの損失低減手法を試みてきた。図8は、ランナ二次流れの低減により損失を低減した結果を示す。新形状では、シュラウドと負圧面のコーナーに集積される低エネルギー流体が、原型に比べて低減されていることが図8により示される。

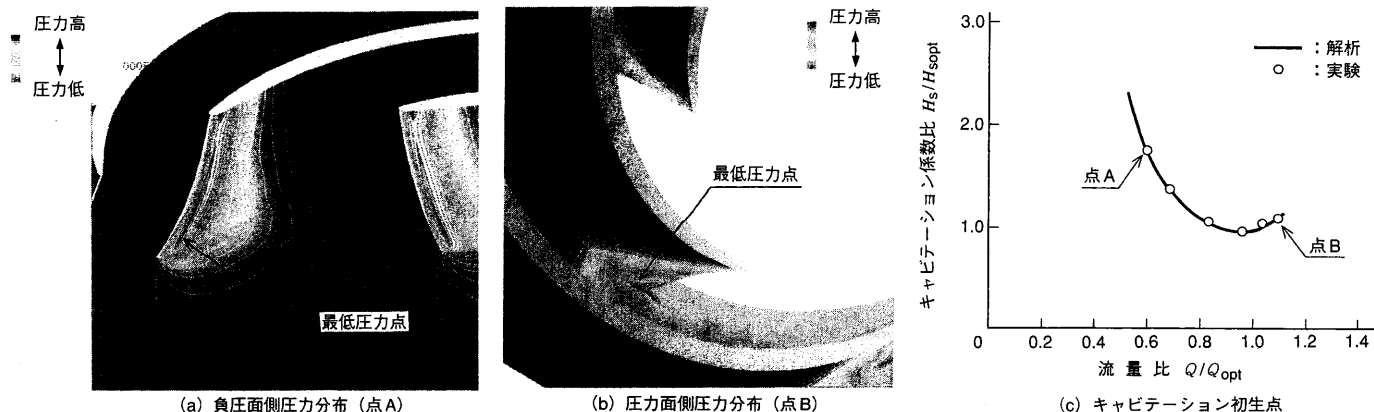


図6 ポンプ水車ポンプ流れキャビテーション初生予測
 テーションを予測した例を示す。
 Prediction of cavitation inception for pump turbine

流動解析による圧力分布により、ポンプ水車ポンプ流れでランナベーン入口に発生するキャビ

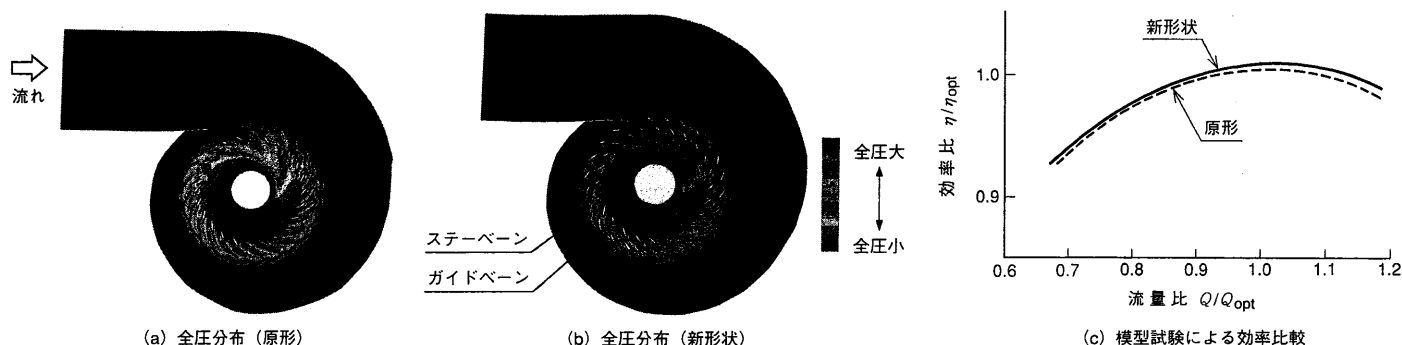


図7 フランシス水車ケーシング、二重翼列損失低減
 上を確認した。

Loss improvement of francis turbine casing, double circular cascade

ケーシング、二重翼列の損失をステーパーン形状の改善により低減し、模型試験により水車の効率向

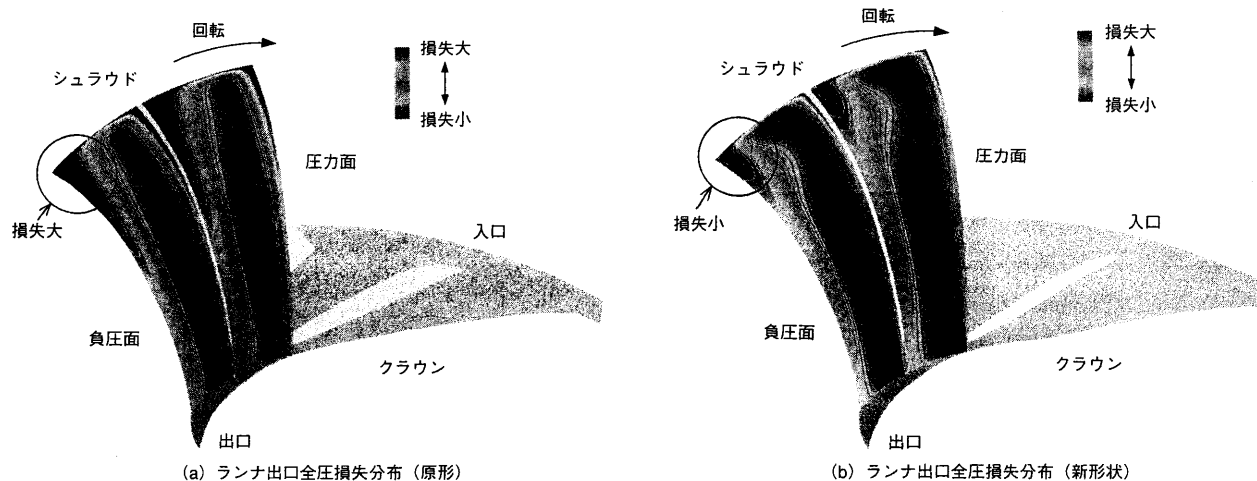


図8 フランシス水車ランナ損失低減 ランナ内の二次流れ低減によるランナ出口での損失低減を流動解析により確認した。
 Loss improvement of francis turbine runner

5. む す び

流動解析技術及び内部流れの計測技術の発展に伴い、水車・ポンプ水車の内部流れが詳細に把握ができるようになった。また損失発生メカニズムに基づく流れのコントロール手法を構築し、高性能化技術が大きく進展した。今後も水車・ポンプ水車高性能化の重要なキーテクノロジーは、計測、解析技術の更なる高度化であり、より詳細な損失発生メカニズムの解明が必要である。

参 考 文 献

- (1) 宮川ほか、数値解析技術を用いた最近のハイドロタービン設計、第31回ターボ機械協会講演会 (1994) p.61
- (2) 宮脇ほか、数値流体解析のターボ機械への適用、三菱重工技報 Vol.33 No.4 (1996-7) p.274~277
- (3) 宮川ほか、CFDを用いたフランシス水車二重円形翼列の設計、日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集(I) (1997-3) p.70