

新設計コンセプトを用いた高性能水車の開発

Development of High Performance Hydraulic Turbine Based on New Design Concepts

技術本部 宮川和芳*¹ 小室隆信*²
高砂製作所 岩崎純弘*³ 安田国雄*⁴

水車の市場競争力を強化するためには、高性能で低コストな水車の開発が不可欠であり、性能向上のためには詳細な内部流れの把握により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CFD (Computational Fluid Dynamics) や内部流れの計測に特化したLSRHT (Large Scale Research Hydraulic Turbine) を利用した流れの計測技術が有効であり、最近の研究により水車各流路、翼列の損失発生メカニズムの解明も進んでいる。水車の高性能化コンセプトはこのメカニズムに基づいた損失低減法により構築され、ケーシングの二次流れと二重翼列との干渉効果を考慮した湾曲ステーベーンや二重翼列からの境界層を考慮したMブレードランナ、ランナ内での二次流れを抑制したCONVEXブレードランナなどフランス水車の新しい設計コンセプトが開発された。本報ではこれらの新しい設計コンセプトと模型試験により検証されたこれらのコンセプトの有効性を示す。

To strengthen hydraulic turbine competitiveness globally, a hydraulic turbine with high performance and low manufacturing cost is needed. Although high efficiency has been achieved, this must be improved still further, which requires that we clarify the loss mechanism by understanding detailed internal flow. CFD and detailed internal flow measurement using LSRHT aid in this, and new design technology based on this loss mechanism reflects this understanding to improve performance. In this paper, the effect of bowed stacking stay vane, M blade runner and CONVEX blade runner as new design concepts including verification test results are described.

1. ま え が き

最近の水車は、市場競争力強化のために従来以上にコスト低減と効率の向上を要求され、小型、高速化と高性能化という相反する2つの課題を同時に満たすことが必要となっている。このためには水車の翼列、流路の内部流れを把握し、損失発生メカニズムを明らかにした上で損失を低減させるための新しいアイデアを構築することが必要である。最近のCFD (Computational Fluid Dynamics) とLSRHT (Large Scale Research Hydraulic Turbine) などを用いた内部流れの計測技術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⁽¹⁾。

CFDは、現在、水車の開発設計の過程で内部流れによる設計クライテリアと損失を評価値とした形状最適化のパラメータスタディに適用されている。また計測技術も大型の回転試験装置の内部流れをLDV (Laser Doppler Velocimetry) や高応答プローブで計測することによりCFDの評価に用いることができる高い空間、時間分解能のデータが取得できるほど高度化している。これらを利用した水車内部の詳細な内部流れの把握も損失低減を目的に色々と検討されている。例えば、ケーシング内での二次流れとステーベーン、ガイドベーンとの干渉効果はケーシング、翼列の一体解析や二重円形翼列試験装置により明らかにされている⁽²⁾。また、従来困難であったランナ内流れの粘性効果や三次元効果はガイドベーンとランナの段解析により把握され、また、LSRHTにLDV、高応答プローブを適用した実験的な内部流れの把握はCFDの精度評価や損失発生メカニズムの解明にも利用されている⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、ガイドベーンとランナとの翼列干渉効果も前述のLSRHTによるLDV計測や翼列干渉解析により検討されつつある⁽⁵⁾。

水車の高性能化はCFDや実験により明らかになった損失発生メカニズムを基に内部流れをコントロールし損失低減を図ることの

できる新しいアイデアにより達成されている。

本報では内部流れの詳細把握に基づき新しい水車の設計概念を構築し顕著な効率向上を達成した結果について報告する。ここで研究対象とした水車は比速度140 m-kW級のフランス水車でステーベーン、ガイドベーン枚数16枚(一部の研究では24枚)、ランナベーン枚数18枚である。

2. 二重翼列の新コンセプト

2.1 ケーシング、二重翼列の内部流れ

水車のケーシングは内周部にあるステーベーン、ガイドベーンに流れを供給するために一様であることが望ましいが、ケーシングからの流れは、ケーシングの流れ方向の曲率による二次流れにより周方向、高さ方向に著しい非一様流れとなる。図1に三次元粘性流動解析によるステーベーンへの流入角分布を示す。ステーベーンの高さ方向中央ではケーシングの巻始め、巻終りを除き周方向に流れ角の大きな変化は少ないが、壁面近傍では特にケーシング壁面に沿って内周部に流入する二次流れの増加する周方向位置100°付近から角度が著しく大きくなる。図2は二重円形翼列試験装置によりステーベーン下流1ピッチの全圧損失を計測した例を示す。ケーシング巻始めにおける損失はステーベーン後流が主要因であるが、ケーシング巻き角120°付近ではステーベーン翼間1ピッチにわたり壁面近傍でも損失が大きい。

二重翼列ではケーシングの二次流れに起因する流れの周方向、高さ方向の非一様性が流れと二重翼列入口のマッチングのずれを引起し大きな損失発生の要因となっている。

2.2 低損失二重翼列

損失の小さな二重翼列を開発するために前述のケーシングからの流れと二重翼列との干渉を検討した。新形状ステーベーンは翼を高さ方向に湾曲させ上流の流れとのマッチングを合せ、また、ステーベーン外周側での減速を小さくすることにより損失を低減

*1 高砂研究所ターボ機械研究推進室

*3 機械技術部水車設計課長

*2 高砂研究所ターボ機械研究推進室主務

*4 機械技術部水車設計課

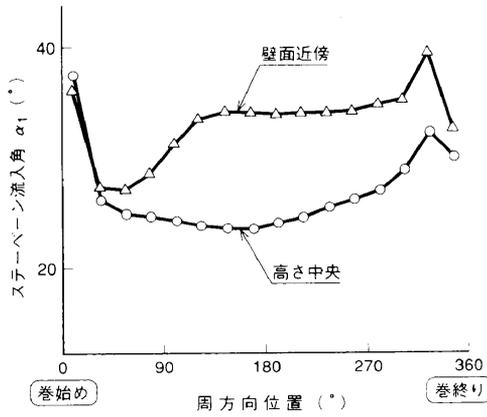
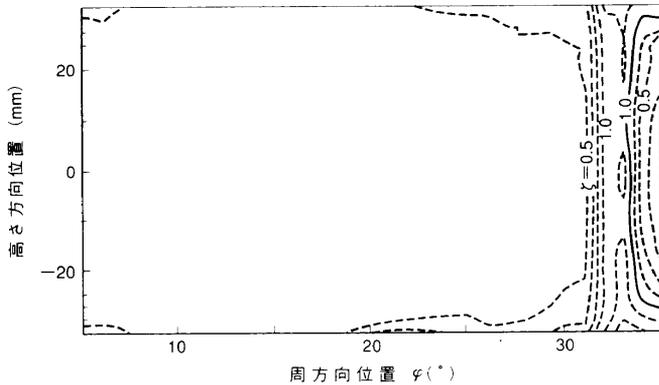
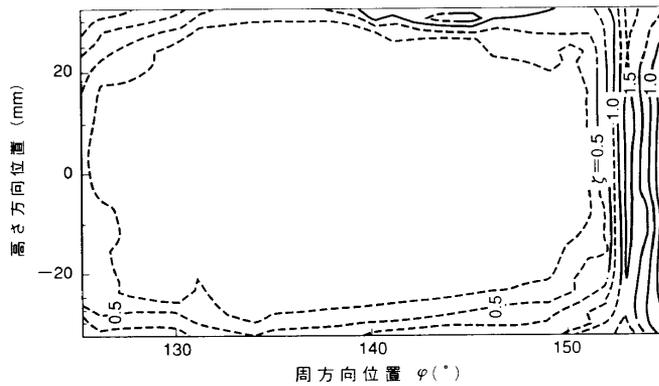


図1 ステーベーン流入角分布 (従来形状) ステーベーン流入角はケーシングの二次流れにより周方向、高さ方向に大きく分布する。
Flow angle distribution at stay vane inlet (conventional type)



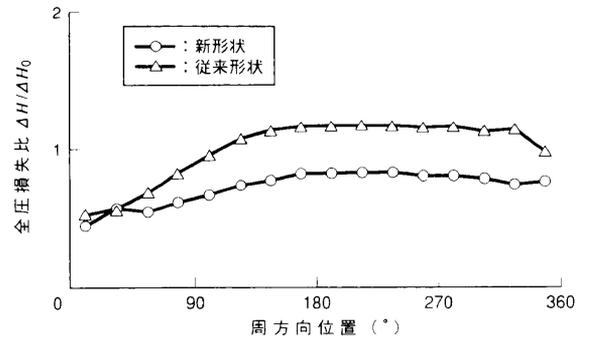
(a) 巻始め



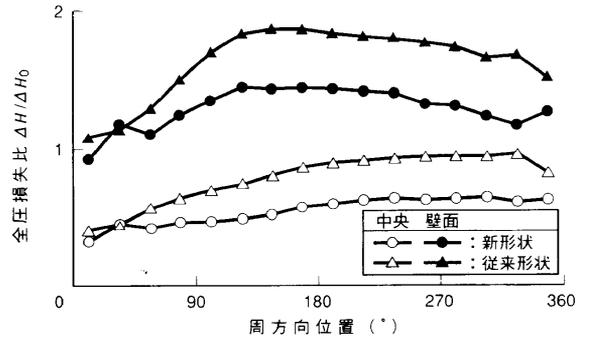
(b) 巻き角約120°

図2 ステーベーン下流全圧損失分布 二次流れの強さの異なる周方向位置の違いによりステータベーン下流の損失は異なるパターンとなることを示す (ζは損失係数)。
Total pressure loss distribution of stay vane downstream

させている。図3にケーシング巻始めを0°とした周方向位置に対するケーシングからステータベーン下流までの解析結果による全圧損失分布 (従来形状の平均値を基準) を各ピッチの平均値とステータベーン中央高さ、壁近傍で示す。新形状では高さ方向中央、壁近傍において従来形状と比較して損失低減が認められるが、特に、ケーシングの二次流れが強い周方向位置100°より大きな位置で新形状の効果を確認できる。図4はケーシングからガイドベーンまでの全圧損失分布を示したもので、性能模型におけるガイドベーン

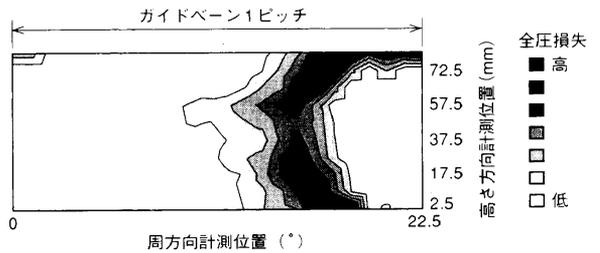


(a) 周方向、高さ方向ピッチ平均

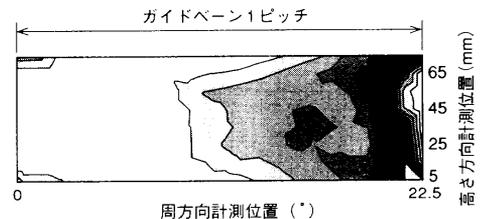


(b) 周方向平均

図3 ケーシング～ステータベーン全圧損失分布 ケーシング～ステータベーンのCFDによる全圧損失値を従来形状と新形状で周方向に示す。
Distribution of total pressure loss from casing to stay vane



(a) 新形状ステータベーン



(b) 従来形状ステータベーン

図4 ガイドベーン出口全圧損失分布 ガイドベーン出口での実験による従来形状、新形状の損失の違いを示す。
Total pressure loss contour at exit of guide vane

ン出口での周方向、高さ方向のピトー管トラバース結果を示す。図4によると従来形状ではステータベーン内周側において大きな損失域があるが、新形状ではその領域の低減が図られている。また、中央付近の粘性後流による損失も新形状の方が小さい。

これらのCFD結果、実験結果によりケーシングの二次流れを考慮し、境界層コントロールを行ったステータベーンの損失低減効果

が大きいことが分かる。

3. ランナの新コンセプト

3.1 ランナの内部流れ

ランナの内部流れに関して三次元粘性流動解析、LSRHTを用いた計測及び性能模型での実験により、ランナ内での粘性効果、三次元効果と損失発生メカニズムを検討した。

図5はガイドベーンとランナベーンの一体解析によるランナ入口における相対系での流入角を示している。図5によるとランナ壁面近傍では中央付近よりも流入角が小さくなっていることが分かる。これは上流の二重翼列で生長した上下壁面近傍の境界層の影響により子午面速度が低下していることによる。すなわち、ランナのクラウン側、シュラウド側では境界層の影響が大きいことが分かる。

図6に三次元粘性流動解析及び性能模型試験によるランナ負圧面側での流跡の比較を示す。図6はランナベーン負圧面側を示すが、負圧面シュラウド側のCFD結果では流線の集まる領域、また、実験結果では可視化のためのペイントが集積される領域が生じているのが分かる。図7にランナベーン出口近傍における翼間1ピッチの断面内での二次流れベクトルの分布及び全圧損失分布を示す。ランナ内の流れには回転による遠心力、コリオリ力、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7にはランナクラウン側からシュラウド側への二次流れ及びシュラウド側での圧力面から負圧面への二次流れが示されている。これらの二次流れは負圧面とシュラウドで囲まれる領域で大きな損失

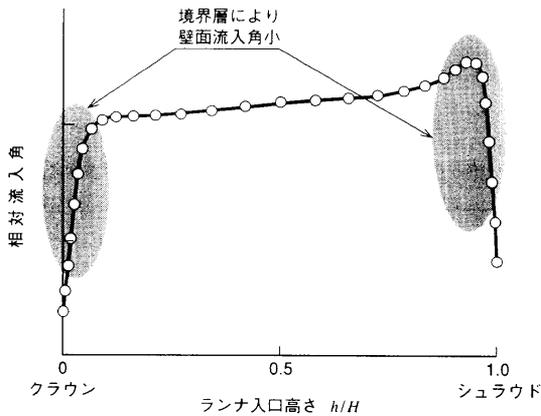


図5 ランナ流入角分布 CFDによるランナへの流入角分布を示す。
Flow angle distribution at runner inlet

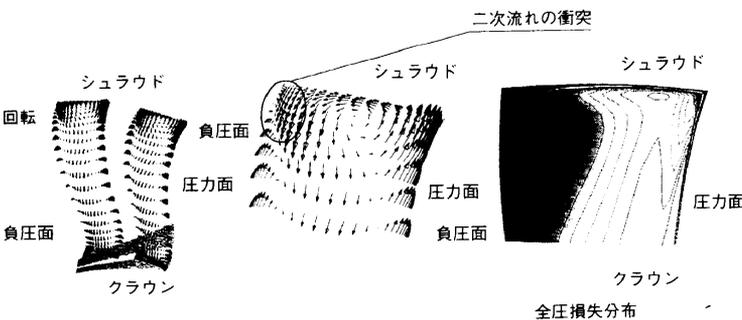


図7 ランナ出口近傍二次流れ ランナ出口近傍での二次流れベクトル及び損失分布を示す。
Secondary flow vectors and total pressure contour by CFD

を形成するが、特に図6に示した二つの二次流れの衝突する領域での損失増大が大きい。

3.2 新コンセプトランナ

前述した上流境界層による流入角の影響及びランナ内での二次流れに起因する損失増大を抑制するために、新形状のランナを開発した。新形状ランナの設計では上流からの境界層を考慮し、二次流れを抑制するために負荷分布のコントロールが行われたが、前縁がM型に湾曲していること、また、後縁が凸型であることに特徴がある。

図8に一体解析によるランナ圧力面側での二次流れの比較を示す。従来形状ではランナ前縁近傍から圧力面側でクラウンからシュラウドへ向かう大きな二次流れが見られる。一方、新形状では圧力面側での二次流れが大きく抑制されていることが分かる。図9にCFDによる従来形状と新形状のランナベーン翼面近傍流線の比較を示す。図8に示したように従来形状では圧力面側で大きな二次流れを発生している。また、シュラウド側では圧力面から負圧面への流線が翼間の流線と衝突し、その衝突により発生した混合領域がランナ後縁近傍で負圧面に到達している様子が分かる。一方、新形状では圧力面でもクラウンからシュラウドへ向かう二次流れは抑制され、また、シュラウド面でも従来形状に見られた二次流れによる挙動は見られず、流れが大きく改善されていることが分かる。図10にCFDによるランナ出口近傍での損失分布の比較を示す。図10に示すように従来形状ではシュラウド側、負圧面側での損失の大きな領域が存在したが、新形状ではその領域が小さくなっている。これはランナ面での前縁近傍での境界層の生長の抑制と二次流れの抑制の効果による。

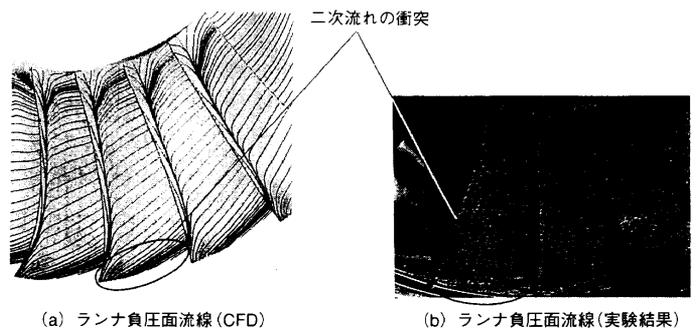


図6 ランナ翼面流線比較 ランナ翼面での二次流れの衝突をCFD、実験結果で示す。
Comparison of streamlines between computation and experiments using paint method

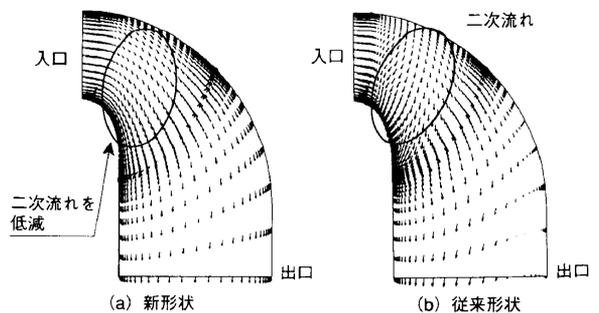


図8 ランナ子午面内二次流れ比較 ランナ子午面内での従来形状、新形状の二次流れの比較を示す。
Comparison of secondary flow vectors

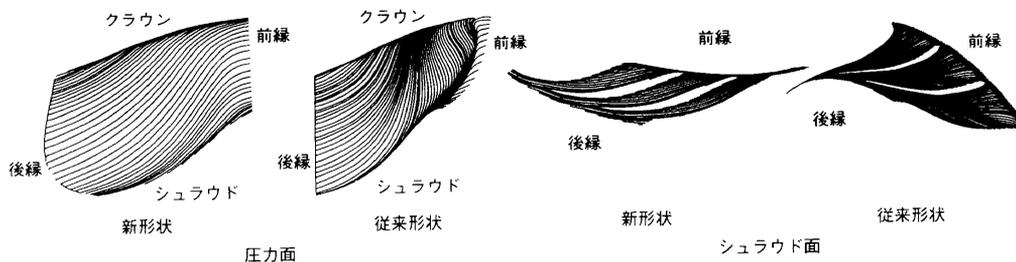


図9 ランナペーン翼面近傍流線 ランナペーン翼面近傍でのCFD結果による流線を示す。
Comparison of streamlines

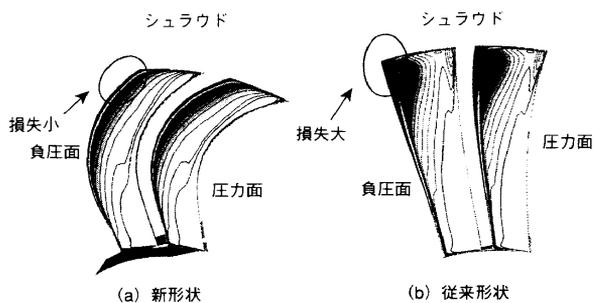


図10 ランナ出口損失分布比較 CFDによるランナ出口での損失分布の従来形状と新形状の比較を示す。
Comparison of total pressure loss contour

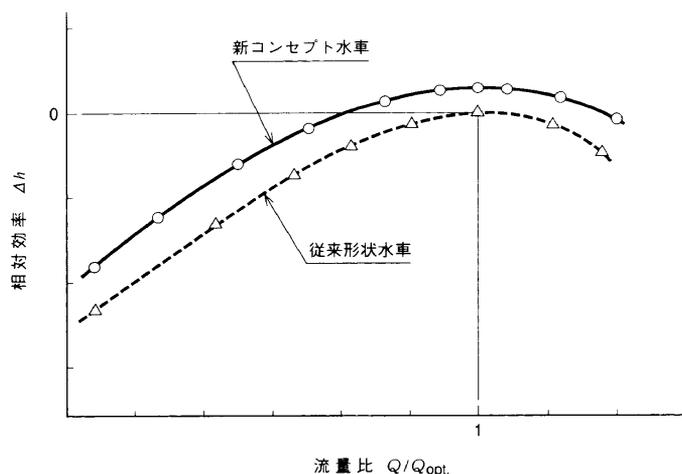


図11 効率比較 実験により、流量に対する効率を新形状と従来形状とで比較した結果を示す。
Comparison between conventional blade and new blade

4. 効果の確認

図11に前述した設計コンセプトを用いて設計した湾曲形状ステーパーン及びMブレード、CONVEXブレードランナを用いたフランシス水車の模型性能試験結果を示す。図11は最高効率点流量との流量比に対する従来形状水車の最高効率との効率差を示している。従来形状水車に比べて新形状水車は最高効率で1%以上の効率向上を示し、かつ、大流量側での効率の低下が少ない。また、部分負荷でも効率が数%改善されていることが分かる。

新設計コンセプトは流量に対する効率の向上に寄与しているが、新形状ランナの設計点が従来形状ランナと同じであるにもかかわらず、大流量側での効率低下が改善されているのは大流量側で増大する二次流れの抑制が特に影響していると考えられる。

5. むすび

CFD及び内部流れの計測技術の発展に伴い水車内部流れの詳細把握が可能となり損失発生メカニズムに基づく高性能化の新コンセプト構築が大きく進展した。特に各流路、翼列間の干渉効果や粘性効果、三次元効果を把握しそのメカニズムを検討することにより、損失の抑制を図ることができる。

ケーシングの二次流れと二重翼列との干渉効果を考慮した湾曲ステーパーンや二重翼列からの境界層を考慮したMブレードランナ、ランナ内での二次流れを抑制したCONVEXブレードランナなどの新コンセプトを適用することにより従来の高効率フランシス

ス水車の効率を更に改善することが可能であることを本報で示した。

これらの新コンセプトによる設計は新設水車のみならず、既設水車の改修により効率、出力を改善する場合にも適用可能である。

参考文献

- (1) 宮川和芳ほか、水車、ポンプ水車の内部流れと高性能化技術、三菱重工技報 Vol.35 No.3 (1998-5)
- (2) Miyagawa, K. et al., Study of flow phenomena in spiral casing and double circular cascade of a Francis turbine, 4th KSME-JSME Fluids Engineering Conference (1998-10)
- (3) 宮川和芳ほか、フランシス水車の内部流れ(ランナ内流れの粘性効果)、日本機械学会第76期流体工学部門講演会講演論文集 No.98-15 (1998-8) p.187
- (4) 宮川和芳ほか、フランシス水車の内部流れ(損失発生メカニズムの検討)、日本機械学会第76期全国大会講演論文集 No.98-3 (1998-10) p.9
- (5) 宮川和芳ほか、フランシス水車の翼列干渉効果、日本機械学会第77期流体工学部門講演会講演論文集 (1999-10)