

# ランナ取替えによる既設水車の リパワリング技術の開発

Updated re-powering technology for old hydraulic turbine by exchanging runner

宮川 和 芳 辻 浩 二 三 戸 良 介  
長 瀧 正 隆 国 松 直 斗



近年、水車既設機の改修による効率向上や出力増大のニーズが高まっており、従来と同等の寸法の下で要求性能を満たす設計技術が要求されている。このため、CFD技術の急速な発展を背景に、既存模型試験データを有効活用して、CFD解析から得られた予測を補完・高精度化するハイブリッド性能予測手法を創出し、短期間・低コストで最適化設計を行う技術を構築した。本報では、実機ランナ取替え工事に伴い、ランナの最適設計を実施、ハイブリッド性能予測手法を用いて新設ランナの水車性能を予測、現地効率試験により性能改善及び予測値との良好な一致を確認した結果を紹介する。

## 1. ま え が き

国内では建設立地、経済性の観点から水車の新設建設地点は減少しているが、一方、既設機の改修による効率向上や出力増大のニーズは高い。水車の高性能化は、従来、模型試験で内部流れを計測することにより損失発生要因を見出し、流路・翼列を改造し、また模型試験を実施し性能を検証することにより達成していたが、近年のコンピュータの高速・大容量化、並列計算機の普及に伴いCFD(Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学)技術が急速に発展し、短期間での最適化設計が可能となってきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。このような解析技術の活用は、改修のような制約条件の下で性能改善を目指すための有効な手段である。

上述の状況から、四国電力の大橋発電所ランナ取替え工事にて、CFD解析を適用して設計した新しい設計コンセプトのランナを適用するとともに、CFDと既存模型データを組み合わせることで性能を予測<sup>(4)</sup>することで模型試験を省略しコスト低減を図った。この結果、現地効率試験において、予測どおりの改善が図られた。

本報では、既設改修の制約のなかでランナの最適設計を行い、CFDと既存模型試験結果をベースとした水車性能予測

手法を用いて新設ランナの水車性能を予測し、現地効率試験により、効率改善を確認した結果を紹介する。

## 2. 対象プラントの概要とリパワリング工事概要

対象プラントは高知県にある四国電力の大橋発電所(フランス水車)である。1939年12月に運転を開始し、2001年3月に新設計したランナの取替え工事を行った。この取替え前後に現地効率試験を実施し、効率、出力の計測を行った。大橋発電所の仕様を表1に示す。

## 3. ランナ設計

### 3.1 数値解析を用いた水車性能予測

大橋発電所のランナを新設計するにあたり、既存の模型試験の結果と数値解析を駆使し性能把握を行った。性能把握のため実施した解析を表2にまとめた。これらの、数値解析手法を利用して、ランナの設計クライテリアの確認、模型試験と同様な種類の性能予測を行った。

### 3.2 既設機ランナ取替えに伴う制約

既設機のランナ単体の取替えのため、新ランナの設計には外形寸法、子午面形状に制約条件が伴う。さらに、大橋発電所の場合、ケーシング、二重翼列形状は既設機をそのまま用

表1 大橋発電所仕様

発電所	四国電力大橋発電所	有効落差	67.2 m
所在地	高知県土佐郡	使用水量	9.74 m <sup>3</sup> /s
運転開始	1939年12月	回転速度	450 rpm
認可出力	5 500 kW (取替前5 300 kW)	ステーベン枚数	10 枚
		ガイドベーン枚数	20 枚
		ランナベーン枚数	14 枚

取替前15枚

表2 数値解析内容

狙い	解析内容
A. 既設ランナ上流境界条件把握	ケーシング・ステーベン10枚・ガイドベーン20枚の静止部一体解析
B. 既設ランナ内部流動把握	ガイドベーン20枚・ランナベーン15枚翼列解析
C. 既設機ケーシング入口からドラフト出口の内部流動把握	ケーシングドラフトチューブまでの一体解析
D. 新ランナ設計	ガイドベーン20枚・ランナベーン14枚翼列解析
E. 新設機性能予測	ケーシングドラフトチューブまでの一体解析

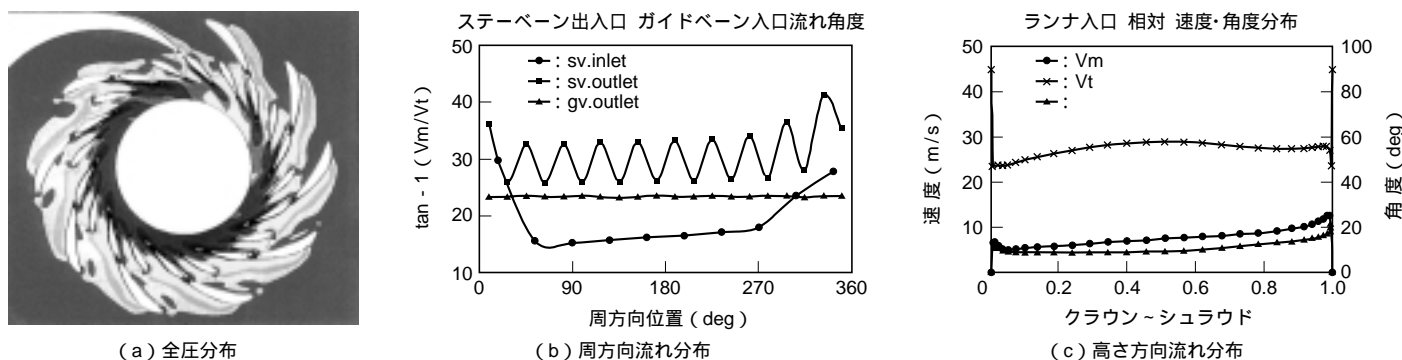


図1 ケーシング解析結果 既設機のケーシングと二重翼列の解析により、流れの非一様性を把握することができる。

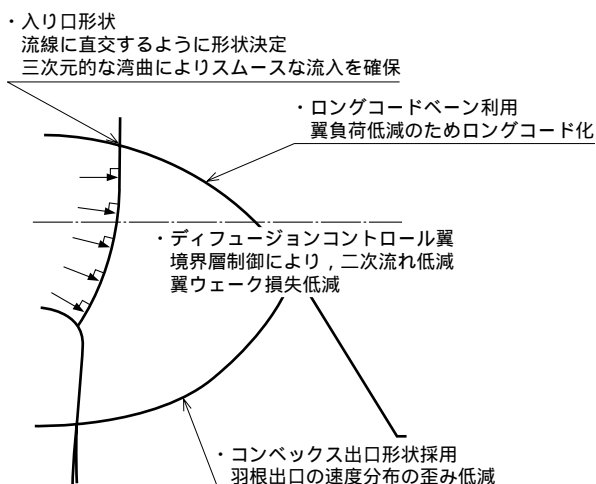


図2 設計コンセプト説明 新ランナに適用した性能向上のためのコンセプトを示す。

いるためランナへの流入境界条件は固定されたものとなる。したがって、新ランナの設計の前段階で既設機のケーシング・ステーベン・ガイドペーンの一体解析を実施し、ランナへの流入条件の事前検討を行った。図1に基準落差、最高効率点近傍での全圧分布とランナへの流入条件を示す。本解析結果を基にランナ設計を実施した。

### 3.3 新ランナ設計コンセプト

新ランナの設計では、三次元粘性解析コードを用い、上述の静止部の解析及びガイドペーン・ランナペーンの翼列解析により形状の適正化を図った。本解析での流入境界条件は静止部（ケーシング・ステーベン・ガイドペーン）の解析結果から求めている。ガイドペーンからランナペーンへ流入する境界層を考慮した解析を実施することにより、より実現象に近い流れ場でペーン形状の適正化が可能となる。

以下に本改修で適用した新ランナの設計コンセプトを説明する。また、図2に設計手法の説明図を示す。

#### ロングコードペーン

従来ランナに比べ、ランナペーンコード長を長くすることで、単位面積当たりの翼負荷を低減でき、翼面上で発生する流れの急減速及び2次流れを抑制する。

#### ディフュージョンコントロール

ランナペーン入口から出口にかけての羽根角及び翼厚の分布を調整することにより翼面上の境界層の発達を抑

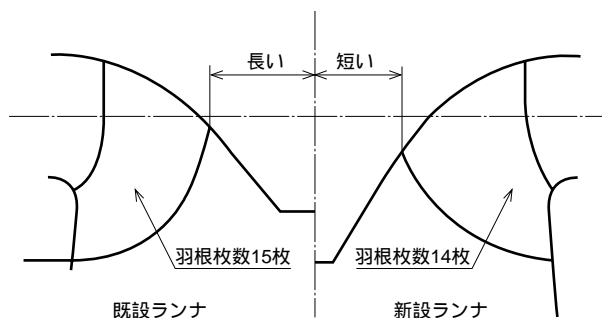


図3 子午面形状比較 既設ランナと新ランナの子午面形状の比較を示す。翼枚数を低減する一方でコード長を伸ばし負荷をコントロールし低損失化した。

えるように速度分布を決定。境界層損失及び翼ウェークによる損失を低減する。

#### コンベックス（凸型）出口形状

ランナペーンの高さ方向の流れの分布を見たとき、クラウン壁及びシュラウド壁に近い部分の流れは遅く、一方、翼中央部分の流れは速くなっている。これにより生じる羽根出口における速度の歪みを低減するため、羽根出口形状をコンベックス（凸型）とする。

#### エンドバンド入口形状

ステーベン・ガイドペーンからランナへの流れは翼中央付近と壁面近傍とで境界層の影響により大きく異なる。ランナ入口形状をその流れと整合させるために三次元的な湾曲を持たせ、上流からの流れをランナ入口でスムーズに流入させることにより設計点、非設計点での損失を低減させる。

## 4. 設計結果

図3は既設ランナと新ランナの子午面形状の比較を示したものである。ペーン枚数は15枚から14枚へと減少し、子午面形状も設計コンセプトに従い変更を行った。さらに、既報による知見と多数のパラメータスタディにより、ペーン形状の適正化も実施した<sup>(2)</sup>。

### 4.1 翼列解析結果

以下に新ランナ形状の最適化のために行った翼列解析の結果を示す。図4は解析に用いたメッシュを示したものであるが、定量的評価を行えるように細かなメッシュを用いている。解析は基準落差、最高効率点にて行った。

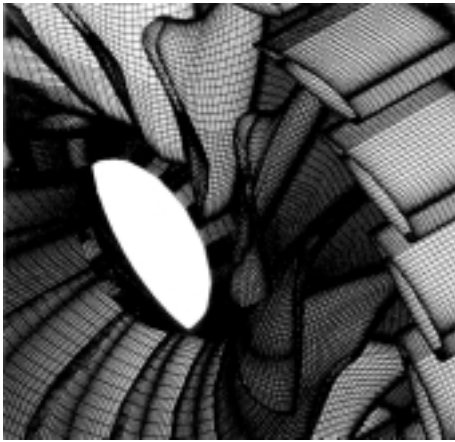


図4 翼列解析メッシュ ガイドベーンとランナの翼列解析用のメッシュを示す。予測精度向上のため壁面近傍等は細かなメッシュとしている。

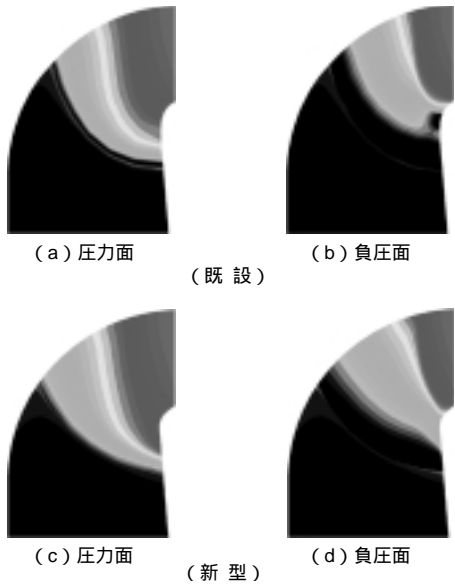


図5 静圧分布予測結果 既設ランナの負圧面シュラウド圧力が低下しているが新型ランナではこれが改善されている。

図5に圧力面及び負圧面の静圧分布の比較を示す。これによると、既設ランナでは負圧面のシュラウド側で圧力が急に低下している領域があることが分かる。これに対し、新ランナではこれが解消され、緩やかな圧力勾配となっていることが分かる。既設ランナでは圧力分布及び速度分布に急勾配がみられるが新ランナではこれが抑制され損失低減がなされている。

4.2 一体解析結果

ランナ取替え後の性能把握及びドラフトチューブの流況把握のため、ケーシング入口からドラフトチューブ出口までの一体解析を実施した。図6に解析格子を示す。

図7に解析の一例として、子午面速度分布及び速度ベクトルを示す。解析条件は、基準落差、最大出力点近傍である。これによると、既設ランナではドラフトチューブの壁面境界層の発達により有効面積が狭まったため、適切な減速がなされずドラフトチューブ曲がり後流が非常に乱れている。これに対し新ランナではきれいな流れが得られているのが分かる。

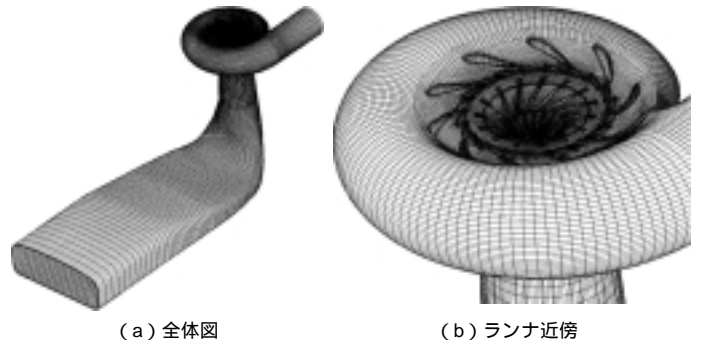


図6 一体解析用メッシュ スパイラルケーシング入口からドラフトチューブ出口までランナを含めた一体解析用のメッシュを示す。



図7 速度分布及びベクトル予測結果 新型ランナによりドラフトチューブ壁面境界層が既設に比べ薄くなるようコントロールされている。

このように、ランナ流れの改善により積極的にドラフトチューブの内部流動をコントロールし、損失の低減を図った。

5.性能予測

大橋発電所の新ランナに対し、数値解析を行って性能予測のための諸量を求め、既存類似比速度の模型試験結果あるいは異なる比速度の既存模型試験結果を用いて補正することにより性能の把握を行った。具体的には、大橋発電所新ランナの類似模型である従来設計ランナの既存性能データと、比速度140 220 (m, kW, min<sup>-1</sup>)の新コンセプトモデルの既存性能データから大橋発電所新ランナの性能を推定し、これをCFDによる予測値に反映することで、解析が苦手とする諸量の予測精度を向上するとともに定性的傾向の確認に用いた。

この数値解析と既存模型試験結果を用いたハイブリッド性能予測により、模型試験を実施することなく性能を把握することができ、試験装置の計画・製作・組立の期間とコストを削減でき、その結果、開発期間の約30%短縮が可能となった。さらには、削減された時間を各種設計パラメータの適正化に費やすことができ、高度な最適結果を得ることも期待で

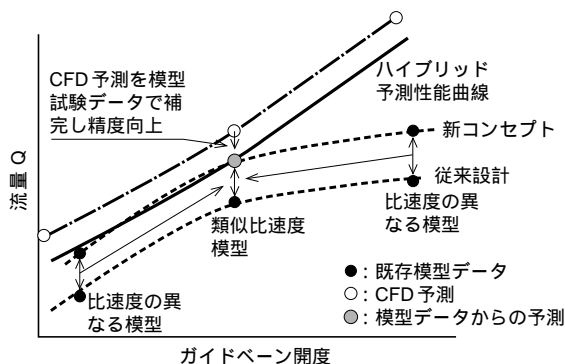
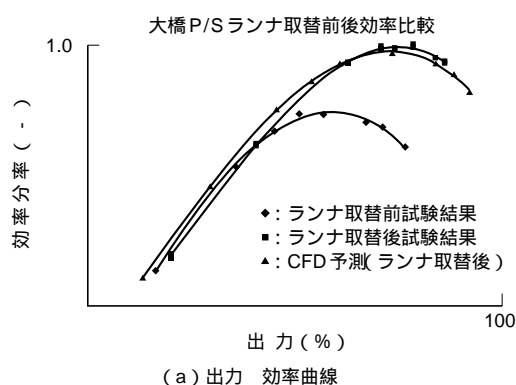
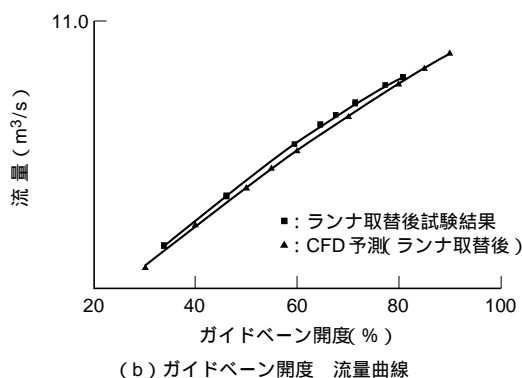


図8 ハイブリッド性能予測 新型ランナ適用後の水車性能予測はCFD解析及び類似比速度の既存モデル試験データの両面から実施した。



(a) 出力 効率曲線



(b) ガイドベーン開度 流量曲線

図9 現地性能試験及びハイブリッド予測結果との比較  
 ハイブリッド予測結果もよく一致することが分かった。

現地性能試験により、効率向上を確認。ハイブリ

表3 性能予測項目別対比

	：精度良く予測可能	：精度低下を伴うが予測可能	×：予測困難
	数値解析手法のみよる性能予測		模型試験と数値解析手法のハイブリッド予測
水車効率(設計点)			
水車効率(非設計点)			
キャピテーション性能(初生)			
キャピテーション性能(臨海)			
無拘束速度特性		×	
水圧脈動特性(設計点)			
水圧脈動特性(非設計点)		×	
開度-流量特性			

きる。表3に数値解析のみによる性能予測と今回適用したハイブリッド予測の対比を示す。また、図8にハイブリッド性能予測の概略図を示す。

### 6. 性能予測結果と現地効率試験結果との比較

大橋発電所にてランナ取替え後に行ったピトー管法による現地効率試験結果及びCFD解析と既存模型試験結果によるハイブリッド性能予測結果の比較を図9に示す。これによると、性能予測結果と実測結果が非常に良く一致しているのが分かる。効率向上と年間運用出力増大という要求を十分満足した結果をハイブリッド性能予測どおり得ることができた。

### 7. ま と め

大橋発電所のランナ取替え工事に三次元翼設計を行ったランナを適用し、大幅な効率向上と出力増大を達成した。本結果により発電所認可出力も約4%増大させている。数値解析結果と既存模型試験結果を組み合わせたハイブリッド性能予測により水車性能予測を実施し、現地効率試験にて良い一致が得られることを確認した。ハイブリッド性能予測により模型試験をせずとも性能を把握することが可能となり、開発費及び期間を縮小することにより取替え工事のコスト低減を実現した。本改修例は既設機の運用性向上に非常に有効であり今後も同種工事に適用するとともに、更なる性能向上、精度向上を目指してゆく。

### 参 考 文 献

- (1) 宮川和芳ほか, フランス水車ランナの内部流れ(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
- (2) 宮川和芳ほか, 三次元翼設計技術によるフランス水車の効率向上, 第44回ターボ機械協会総会講演会講演論文集(2000-5)
- (3) Miyagawa et al., Study on Internal Flow and New design Technology for a Francis Turbine Runner, 20th IAHR symposium(2000-8)
- (4) 宮川和芳, 水車の性能予測と模型試験結果, ターボ機械, 27-9(1999)



宮川和芳  
高砂製作所  
ポンプ・水車部 主席



辻 浩二  
高砂製作所  
ポンプ・水車部  
ポンプ水車設計課



三戸良介  
技術本部  
高砂研究所  
ターボ機械研究推進室



長瀧正隆  
四国電力株式会社  
電力部課長(水力)



国松直斗  
四国電力株式会社  
電力部発電課副長