

地球温暖化抑制に有効な高効率水車の開発

Development of High Performance Hydraulic Turbine Contributing to Solution of Global Warming Problem

宮 川 和 芳^{*1}
Kazuyoshi Miyagawa

前 川 真 丈^{*2}
Masatake Maekawa

福 田 暢 英^{*3}
Nobuhide Fukuda



地球温暖化抑制の打ち手の一つとして、安定した自然エネルギーである水力資源を最大限に利用することが重要であると考えられる。最近、研究開発が進められたスプリッターランナ水車の適用により部分負荷運転時の高効率化を含めた総合的な性能向上が図られている。スプリッターランナ水車設計の高度化により、高落差から低落差までの水車に対してピーク効率と部分負荷効率両方の効率向上が可能となった。

1. はじめに

地球温暖化抑制のために、現在の暮らしの豊かさを維持しながらCO₂排出量を低減する手段としては水力、風力、太陽光などの再生可能な自然エネルギーの有効利用が考えられる。特に水力エネルギーは日々の天候変化等に左右されず安定したエネルギー源となるため早くから開発が進められてきた。一方で、貯蔵された水のエネルギーを電気に変換する水車、発電機は最近においても進歩を続けており既存の水車に対して、最新技術を駆使して設計された新型水車への取替え工事が多く見られるようになってきた⁽¹⁾。これにより単機出力の増加や、稼働率の増加を実現し水力によるエネルギー供給量を増やすことが可能となる。さらに、世界的には水力の開発率は今だ低いレベルであり経済発展に伴うエネルギー需要の増加に対して高性能

高信頼性水車を投入することで自然エネルギーの供給量を大幅に増大させることが可能となる。本報では水力エネルギーの高効率利用に有効な一手法であるスプリッターランナ水車の適用を中心に最新の高性能水車設計技術を紹介する。

2. 水車高効率化技術

(1) 水車の構成と高性能化技術

国内外の代表的な機種であるフランシス型水車の高性能化設計にも、近年の高度化されたCFD (Computational Fluid Dynamics) 技術が駆使されており、例えば図1のように上流のケーシングから、ステーベーン、ガイドベーンの二重翼列までを一体で解析検討し上流流れの影響を考慮した二重翼列設計の適正化が実施されている。図2の解析結果ではステーベーン後流やガイドベーン周り的高損失域が

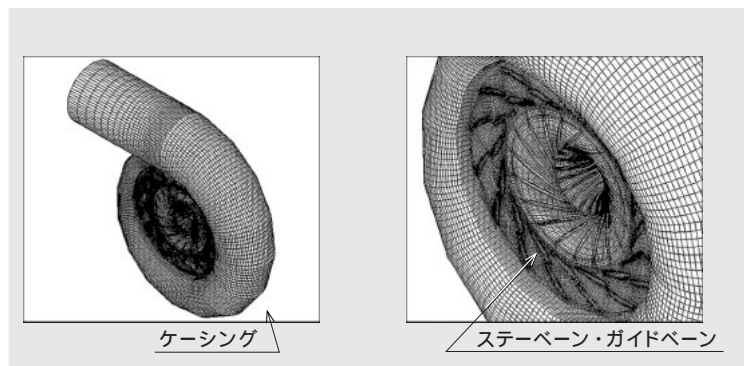


図1 ケーシング、二重翼列、ランナの解析格子 水車最上流のケーシング入口を境界としステーベーン、ガイドベーン、ランナの流動を評価する。

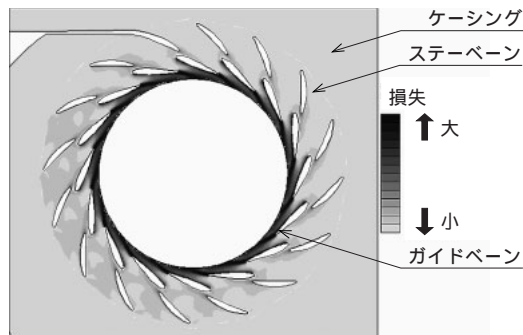


図2 ケーシング、二重翼列、解析結果断面の全圧損失分布を示す。ステーベーンからの高損失域がガイドベーンに干渉する様子が分かる。

^{*1} 技術本部高砂研究所ターボ機械研究推進室主席

^{*2} 技術本部高砂研究所ターボ機械研究推進室

^{*3} 高砂製作所ポンプ水車部生産設計開発グループ

可視化されている。また、ランナに関しては上流ガイドベーンからの流入流にマッチした入口設計がなされ、翼負荷分布調整により翼面二次流れを制御し損失を低減した新型ランナ設計手法が構築されてきた⁽¹⁾。これらの設計に用いられるCFD解析は模型試験との比較により予測精度の確認がされており実プラント水車にも既に高効率設計水車が採用されてきている⁽²⁾。

(2) スプリッターランナの適用

水力発電所における水車運用では最高効率の条件で運転されるのみでなく、最大出力運転から部分負荷運転までの広範囲での運転が行われる。そのため、限られた水量に対して年間の発生電力量を増大するためには、部分負荷から最大出力運転条件までの広い運転範囲において効率が高くまた部分負荷運転時のドラフトサージによる運転制限範囲が狭いことが望ましい。こうしたニーズからスプリッターランナ水車の研究開発が約5年前から始まり部分負荷効率の向上、キャビテーション性能の向上、水圧脈動の低減等の効果が確認されてきたとともに、スプリッターブレードの流体的な役割が明確になってきた⁽³⁾。ただし、初期のスプリッターランナの適用は図3(a)に示されるようにランナ直径に比べてランナ内流路高さが小さくランナクラウン側からバンド側までの流線の変化が小さい高落差機（低比速度）水車と同様の特徴をもつポンプ水車向けが中心であった。これは、二次元的な設計ができスプリッター設計が相対的に容易であることやスプリッター効果による水車、ポンプ各運転時の負荷増加によりランナ小径化が可能となり高落差機で相対的に大きな割合を占める円板摩擦損失が低減できる点などによる。

中、低落差向け（中、高比速度）フランシス水車に関しては、図3(b)に示されるようにクラウン側

からシュラウド側までの流路の変化が三次元的に異なり各流線に対して入口設計や負荷分布を適正化し高性能化が進められてきた。最近ではこの中、低落差機に関してもスプリッターランナの適用を展開している。中、低落差機の場合は最新技術により三次元的に最適設計された水車と同等のピーク効率を維持するためにはフルブレード、スプリッターブレード各々で適正な入口、出口設計や、相対位置の適正化が必要となり設計が複雑化する。ただしフルブレード、スプリッターブレード各々に関して相対位置、厚さ、ブレードリーン角（倒れ）、クラウンからシュラウドまでのブレード長さ比等多数の設計パラメータが制御可能となることから最新のCFD技術を援用することでより高度な設計が可能になると考えられる。すなわち、スプリッターブレードの高度適用により通常の最新設計の水車性能と同等以上でありかつ、スプリッターランナの特徴である高い部分負荷効率とキャビテーション性能を併せ持つ高性能ランナの実現をねらうことが可能であると考えられる。

3. スプリッターランナ水車設計

(1) 開発水車仕様

ここでは、既存の表1に示す仕様の中落差機水車に対してスプリッターブレードを適用した最新設計水車の例を示しその効果を確認する。

(2) スプリッターランナブレード枚数、長さ比の選定

スプリッターランナ水車に関して基本的な重要パラ

表1 開発水車仕様

回転速度	(rpm)	360
有効落差	(m)	198
軸出力	(kW)	58600
比速度 N_s	($m \cdot kW \cdot rpm$)	117

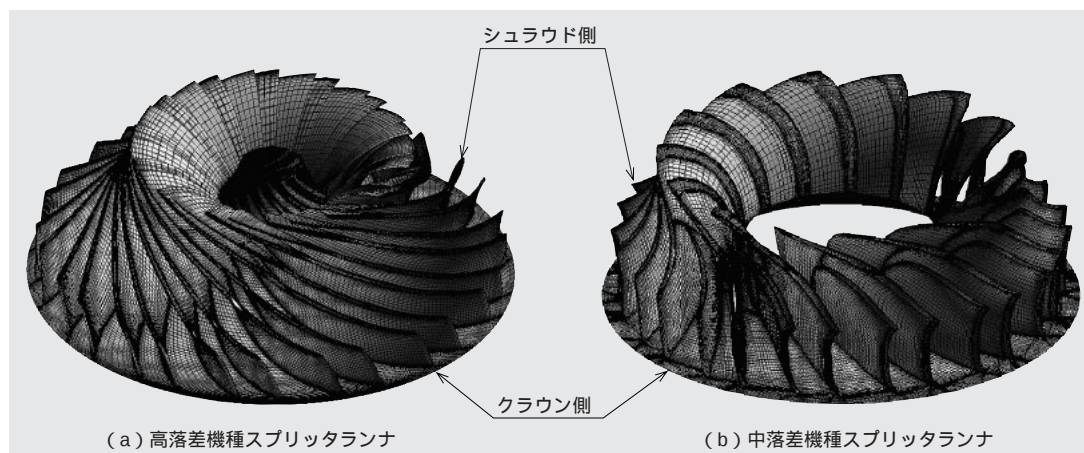


図3 スプリッター水車ランナ 中落差機の場合クラウン側からシュラウド側までの流路高さが高く、各翼素で三次元設計がなされる。

メータとしてブレード枚数，図4に示されるフルブレード，スプリッタブレードの長さ比がある．図5はこれらパラメータの設計点における影響の解析検討結果である．入口衝突損失を低減し部分負荷性能を上げるにはスプリッタブレードによる多翼化が有効と考えられるが，28枚ブレード（フルブレード14枚，スプリッタブレード14枚）において最高効率点における僅かな損失増加がみられており極端なブレード枚数増加は摩擦損失増加により大きな性能低下が生じると考えられる．また，スプリッタブレード長さ比に関しては損失が増加しない範囲で長く取ることによりスプリッタブレードの負荷が増し望ましいと考えられるが，28枚ブレードに対してはブレード長さ比を7割とすることで最高効率点での損失低減が可能となっている．このように高いピーク効率の確保とスプリッタ効果による部分負荷特性向上を両立する組合せとして，総合的な判断により28枚7割スプリッタランナがベース形状として選

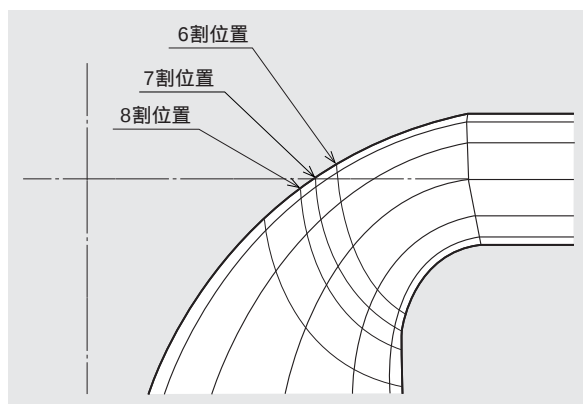


図4 スプリッタランナ子午面形状 フルブレードに対して子午面上で，翼長さ比の異なるスプリッタブレードに関して比較検討を実施した．

定された．

(3) スプリッタブレードの適正化設計

スプリッタブレードの設計適正化に関しては，ランナ入口においてフルブレード負圧面側とスプリッタブレード圧力面側の間隔を相対的に大きく取った不等ピッチとしスプリッタ出口部ではフルブレードの中央部付近の等ピッチ位置に取ったケースが性能向上に有効であることが解析により確認された．これは，低エネルギー流体が集積しやすくランナ損失増大につながるフルブレード負圧面側の流れの増速傾向が強められ境界層の発達が抑制されるとともに，スプリッタブレード圧力面側の高エネルギー流体がフルブレード負圧面側により多く供給される配置となり損失低減に効果があると考えられる．図6は通常設計ランナと適正化したスプリッタランナの翼間損失コンタを比較して示すがフルブレード負圧面の損失増加が抑制されている様子が確認できる．また，スプリッタブレードの後流は流路幅の小さなフルブレード出口翼間まで達しており極力後流幅が

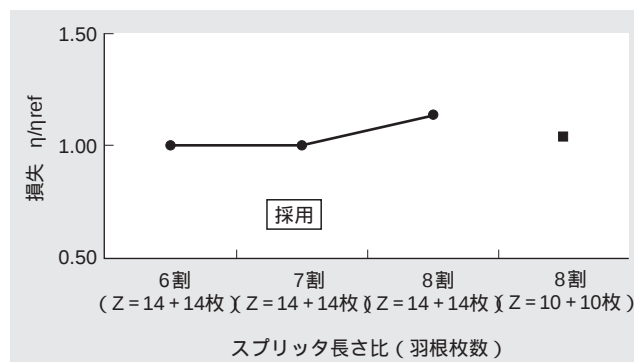


図5 スプリッタ長さ比と翼枚数の影響検討 設計点解析による損失評価により適正な長さ比，翼枚数を評価する．

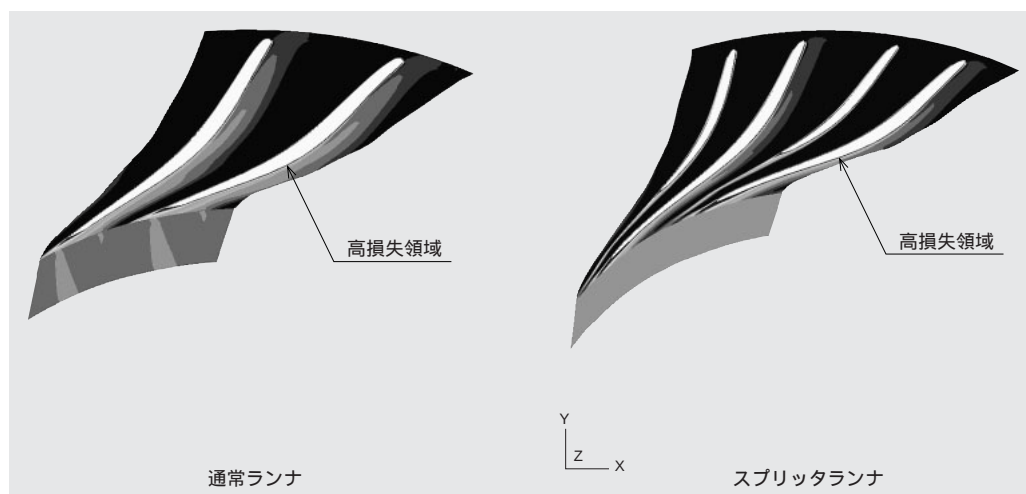


図6 翼間の損失分布の比較 通常ランナの負圧面側に見られる高損失領域が適正なスプリッタランナにおいて抑制されていることが分かる．

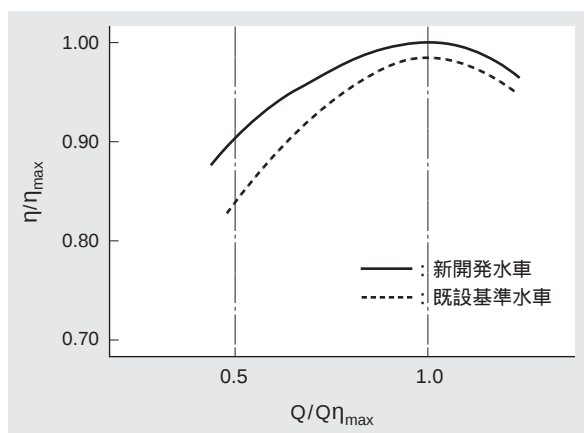


図7 水車効率特性 既設基準水車に対して、最高効率とともに部分負荷運転域でも効率向上が確認できる。

薄い方が性能向上の上で望ましい。そこでスプリッタブレードはその負荷割合に相当する分フルブレードに比べ翼厚が薄く設計されている。

キャピテーション性能に関してはスプリッタランナの場合出口側でのブレード枚数が通常設計より少なくなるため、キャピテーション発生時の流路閉塞が生じにくく一般にキャピテーション性能が向上するが、前述のスプリッタ配置の場合フルブレード負圧面出口部での静圧低下の抑制も可能となるためキャピテーション性能はさらに向上する。

以上のようにスプリッタブレードの入口、出口設計、翼負荷設計、翼厚はフルブレードとは別の適正化が有効と考えられ設計評価手法としては上流を含めたタンデム解析等の最新CFD技術が非常に有効である。

4. 高効率スプリッタランナ水車の性能

新設計されたスプリッタランナ水車の相似模型による性能試験を実施した。図7において流量 - 効率特性を既設基準水車特性と比較して示す。横軸の流量係数比 $Q/Q_{\eta_{\max}}$ に対して効率比 η/η_{ref} が示されるが、水車の最新設計を適用した結果、最高効率の増加とともにスプリッタランナ水車化の効果等により部分負荷効率も大幅に向上していることが分かる。

また、図8には新水車のキャピテーション特性を既設基準水車と比較して示す。スプリッタ水車では115 % $Q_{\eta_{\max}}$ 流量のラインで示される最大出力相当点においても臨界キャピテーション係数 σ_c の増加が抑制されており優れたキャピテーション特性を有することが確認された。

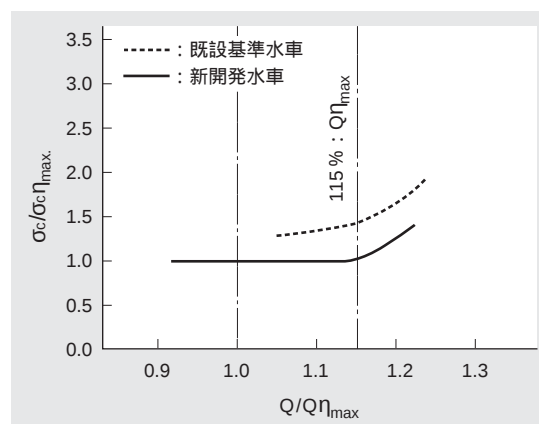


図8 水車キャピテーション特性 既設基準水車に比べて、スプリッタランナ新水車では全運転域において低いキャピテーション係数が保たれている。

5. ま と め

地球温暖化抑制のためのCO₂削減努力は多方面から取り組むべき問題であるが、自然エネルギーを有効に取り出すため古くから用いられる機械の高性能化、高効率化は成果が比較的早期に現れる確実性の高い打ち手の一つと考えられる。水力エネルギーに関しては、CFD技術の進歩とともに設計の高度化、水車効率の向上が進んできたがスプリッタ水車の実用化により部分負荷性能等より高い総合性能の達成が可能となってきた。スプリッタ水車ランナは、通常ランナに比べ設計パラメータが増加し設計が複雑化するが、逆にいえば設計の可能性が大きく膨らんだことになり今後の研究によりさらなる性能向上が期待される。

参 考 文 献

- (1) Miyagawa, K. et al., Study on the Internal Flow and New Design Technology for a Francis Turbine Runner, Hydraulic Machinery and Systems 20th IAHR Symposium Proc. (2000)
- (2) 宮川他, 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, 三菱重工技報 Vol.39 No.3 (2002) p.148
- (3) 宮川他, フランス水車の性能に及ぼすランナスプリッタブレードの効果, ターボ機械協会誌 第27巻6号 (1999) p.57



宮川和芳



前川真丈



福田暢英