

# 高性能水車開発を支援する高度解析技術

## 次世代水車の開発に貢献する高度最適化解析技術

高精度流れ解析と遺伝的アルゴリズムによる最適化手法を用いて、発電用水車の性能最適化システムを開発しました。このシステムでは、水車流路形状を定義する数十もの設計変数を自動最適化するとともに、設計変数空間内の大域的最適解を探索できるため、これまでにない新しい形状の高性能水車を得ることが可能となります。このため、エネルギー資源の有効活用に貢献する高出力・高効率な次世代型水車が提案できるものと考えられます。

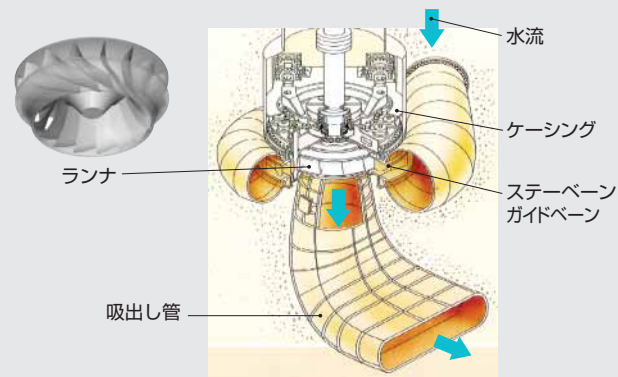


図1. 発電用水車の構造 — 発電用水車は、ダムからの水流をケーシングとステーパーン・ガイドベーンで整流した後に、ランナに当て発電用回転力を得るものですが、とても複雑な形状をしています。

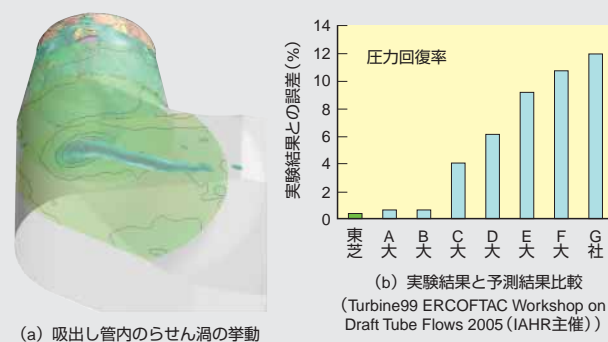


図2. 高精度流れ解析を吸出し管に適用した事例 — 吸出し管内のらせん渦を解析した事例 (a) と解析精度のベンチマーク結果 (b) です。当社の流れ解析コードは国際水理学会主催の吸出し管流れ解析ワークショップに出展され、世界トップの解析精度であるとの評価を得ています。

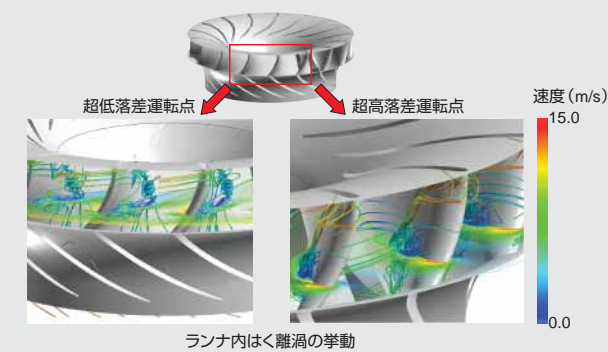


図3. 高精度流れ解析をランナに適用した事例 — 落差変化により発生するランナはく離渦の解析事例です (左: 超低落差運転点, 右: 超高落差運転点)。はく離渦の挙動を流線表示と羽根高さ中央断面での速度コンターで示しています。

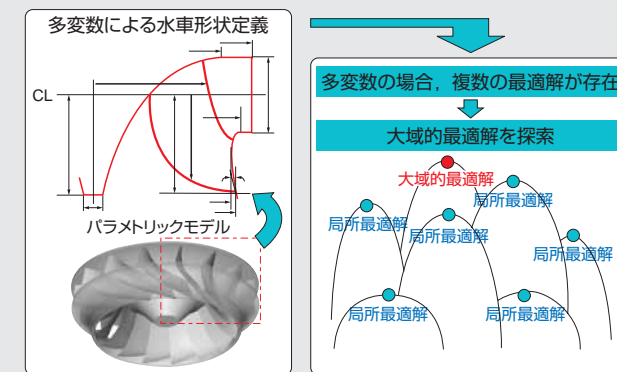


図4. 水車の性能最適化 — ランナの-parametricモデル (左) と設計変数平面上の最適解分布イメージ (右) です。多数の最適解が存在するため、性能最適化ではもっとも高い山の頂上を探し出す必要があります。

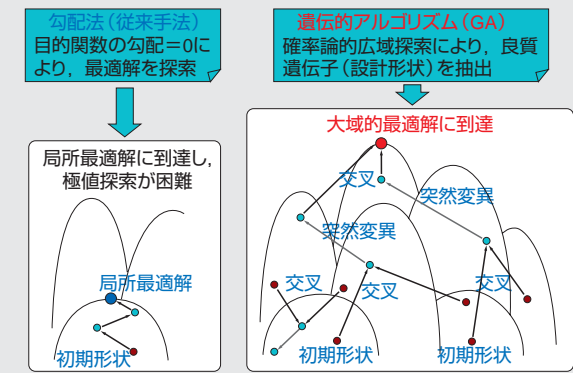


図5. 遺伝的アルゴリズムによる性能最適化 — 勾配法の最適解探索原理 (左) と遺伝的アルゴリズムの最適解探索原理 (右) を比較したものです。遺伝的アルゴリズムでは大域的最適解を検索することができます。

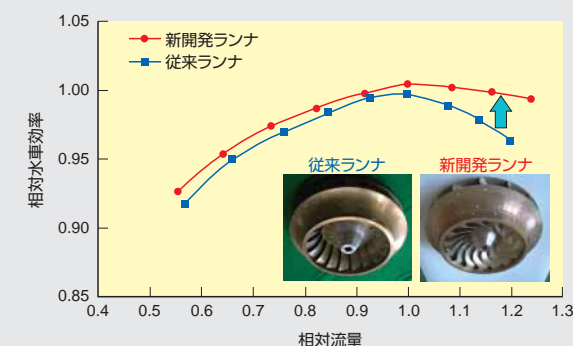


図6. 性能検証模型試験結果 — 水車効率特性の検証結果と検証に使用した模型ランナです。従来形状とはまったく違った高性能羽根形状の適用により、大幅な効率向上を達成しています。

### 発電用水車性能開発の課題

水力発電は上池と下池の落差を利用して発電するクリーンなエネルギー発電設備です。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水車を適用する必要があります。このため、設計者は流れ解析や経験などを駆使しながら水車性能向上に努めていますが、その形状の複雑さから最適化には長い時間が必要でした (図1)。

このような背景のもと、高精度流れ解析をベースにした水車流路形状の自動最適化システムの開発が望まれています。

### 高精度流れ解析技術

水車の内部流れは羽根により整流さ

れますが、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ます。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部材である吸出し管では、二次流れや渦が発生します。このため、現在の乱流解析技術を適用しても流動現象を高精度に予測することは容易ではありません。このような課題を克服するため、東芝では内部流れに強く影響する大きな渦をモデル化することなく直接計算する大規模渦シミュレーション法 (LES: Large Eddy Simulation) に、水車性能検証模型実験で培った経験則を付加した高精度流れ解析方法を開発してきました。こうした高精度流れ解析技術により、落差変化により発生するランナ内はく離渦の挙

動や、吸出し管内に発生するらせん渦の挙動を実現象並みの正確さで再現することが可能になりました (図2, 3)。

### 水車の性能最適化

水車の流路形状は一般的に複雑で、多くの設計変数で定義されます。例えば、コア部材であるランナの形状は、入口径・出口径・羽根長さなど、合計26種類もの設計変数で決められています。したがって、各々の設計変数について水車性能を最適にする複数の値が存在する可能性があります。設計変数平面上に水車性能を描くと、大小様々な山が存在することになります。水車の性能最適化にあたっては、設計変数平面上の低い山の頂上 (局所最適解) ではなく、もっとも高い山の

頂上 (大域的最適解) を探し出す必要があります (図4)。

### 遺伝的アルゴリズムによる大域的最適解探索

最適解の探索方法としては、様々な方法が提案されていますが、決定論的な方法と確率論的な方法に大別できます。前者の方法の代表例としては勾配 (こうばい) 法がありますが、この方法では目的関数の一次微分すなわち勾配 = 0 となるような最適解を探索しますが、このため、探索効率は良いのですが、局所最適解を探索しやすいという欠点があります。これに対し、遺伝的アルゴリズムで代表される後者の方法では、設計変数平面上に初期形状をランダムに多数発生させてから各々の

形状の設計変数の組替えや突然変異的な設計変数の変更を行います。これにより、新たな特性の優れた形状を繰返し発生させるので、大域的最適解に到達することができます (図5)。

### 水車ランナ最適化事例

当社では、前述した高精度流れ解析と遺伝的アルゴリズムによる最適化手法をベースにした水車流路形状の自動最適化システムを開発し、実物水車の性能開発に活用しています。例えば、この最適化システムを高落差フランシス水車ランナに適用した場合には、従来の水車ランナとは違ったS字型羽根出口形状の解が得られました。これは、遺伝的アルゴリズムによる大域的最適解探索が成功していることを間接的に

示すものです。また、性能検証模型実験により、この最適化ランナを適用した場合には、従来水車と比べて最大で3%の効率向上が図れることも確認しています (図6)。

### 今後の展望

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す。こうした貴重な水力エネルギーを有効利用するためにも、水車流路形状の自動最適化システムを活用していきたいと考えます。

黒澤 貞男

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