

水力ターボ機械システムの高性能化、高信頼性化研究

研究代表者 宮川 和芳
(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 1 研究課題

本研究での水力ターボ機械システムは、優良な再生可能エネルギー源である水力タービン、推進機として重要な役割を担うロケットターボポンプや船舶ジェットなどの推進機、生活インフラとして不可欠な上下水道用ポンプ、洪水対策用ポンプ、更には、将来のエネルギー源として重要な海流・潮流発電、水素エネルギーの輸送に使用されている。本研究では、それらの水力ターボ機械システムに関して流体力学、ロータダイナミクスを基礎とした要素研究、開発研究を実施し、性能、信頼性の改善を達成する。本年度は、流動解析（CFD）をベースとした最適設計による水力機械の性能向上と流体、構造連成問題に基づく信頼性向上の解明を主に実施した。

2. 主な研究成果

2.1 水力機械の内部流れの解明、最適設計による性能向上

水力機械の高性能化には、内部流れの解明に基づく設計コンセプトの構築が重要なテーマであり、また、内部流れの評価、設計ツールとして解析手法の高度化、詳細な実験による検証が不可欠である。本年度は、多くの水力タービンおよびポンプの高性能化に取り組み、成果を得た。

水力タービンの性能開発においては、電力会社の共同研究として中比速度フランシス水車の高性能化に取り組み、CFD を組み込んだ多目的最適化手法を用い、従来開発を実施してきた比速度 160m-kW 級シュラウドレス水車の高効率化を実施、模型試験装置による性能の検証を実施した。検証結果により、性能向上のアプローチ手法の妥当性が確認でき、他の水力機械設計への展開を図ることができた。図 1 に開発したシュラウドレス水力タービンの 2 種類の羽根車および CFD による羽根車内のキャビテーション領域の予測結果を示す。水力タービンに関しては、資源エネルギー庁の補助研究でも 300kW の実機設計を開始し、従来、羽根車出口ドラフトチューブ（ディフューザ）内での不安定流動により最低流量が約 50%の流量であったものを、全く違う型式の羽根車、出口ディフューザを考案することにより 30%の低流量からの運転を可能とするコンセプトを構築した。この低流量からの運転を可能にすることで、再生可能エネルギーの太陽光、風力などの不安定電源での出力を安定で即応性のある水力発電で補うことができるようになる。引き続き、低流量域での更なる不安定流動の抑制と効率改善を図る。水力タービンに関しては、電力会社の既設 10 プラントのタービンについて、CFD を用いて診断し、更に部分回収、全面改修による性能改善を定量的に予測した。本プロジェクトは、昨年度に引き続き 20 プラント目であり、更なる 10 プラントを引き続き検討する。メーカーからの依頼では、中比速度のフランシスタービンの高性能化に取り組み、2017 年 5 月に模型試験を実施し、設計の妥当性を確認した。他、プロペラタービン、フランシスタービンの高性能化もメーカーと一緒に取り組んでいる。

ポンプの性能開発は、多くの機種を手がけている。JAXA およびメーカーとは次世代のロケット

ターボポンプ羽根車の高性能化についての取り組みを実施し、圧縮性を考慮した水素解析までも含め高度な予測を駆使し、高性能羽根車の開発を実施した。図 2 に遠心ポンプ内での液体水素の圧縮性解析による静温分布、密度分布を示す。また、メーカーとの船舶推進用ポンプの開発を実施し、解析および大学での模型試験で効率アップを達成した。メーカーでの実機試験では大学での結果と乖離した結果となり、現在、その原因を解明中である。上下水道用のポンプでは、メーカーと斜流ポンプの開発を実施、低流量域での右上がり特性の改善を図ることができる形状を見出した。引き続き、模型試験により検証を実施していく。SIP(内閣府戦略的イノベーション創造プログラム)のエネルギーキャリアの研究では、レシプロ、ターボ型の液体水素ポンプの設計開発の検討を実施し、CFD により実現性を確認した。

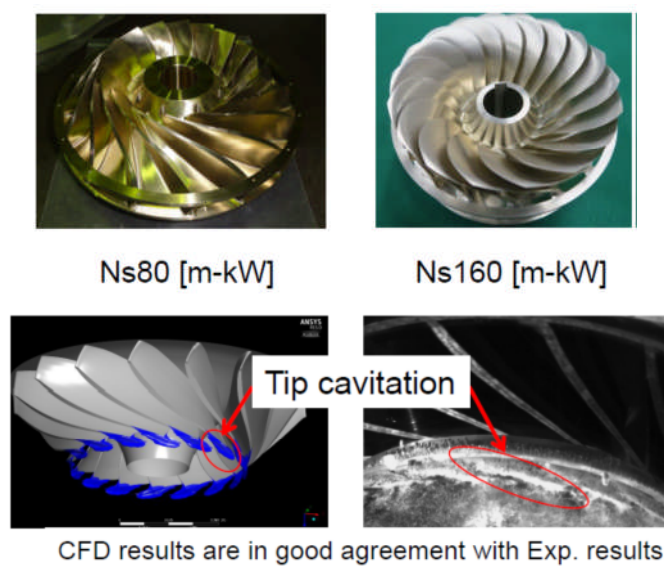


Fig. 1 水力タービン羽根車と内部流れ解析

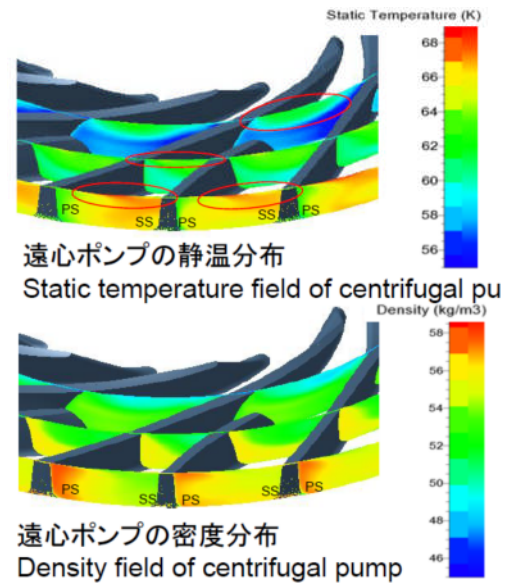


Fig.2 液体水素の圧縮性解析による遠心ポンプの内部流れ

2.2 水力機械での流体励振力の予測と評価、流体-構造干渉問題の解明

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の研究において、相反転プロペラ式での海洋、潮流タービンの開発を実施した。本プロジェクトではタービン、ロータの不安定、励振力の予測を担当した。課題となる翼列干渉、キャビテーションによる励振力に関して、キャビテーション水槽、翼列試験装置を用いて、その励振力の減衰特性を把握し、また、撥水、親水コーティングの効果についてキャビテーションの初生、生長の影響を明確にした他、LDV 計測による翼面近傍の速度分布を詳細に計測することに成功し、コーティングの差異による摩擦損失の差も明確にした。図 3 に親水、撥水コーティング翼に発生するキャビテーションの様子を示す。本タービンは、エネルギー密度の低い海流・潮流では大型化が必須であり、また、非金属材料の適用も検討されているため、自励振動であるフラッターの発生の可能性もある。本研究では、フラッターの発生メカニズムを明確にし、流動-構造の連成解析により失速フラッターの予測を実施、キャビテーション水槽中での発生の検証を実施し、予測技術の有用性を検証した。

メーカーとの上下水道ポンプの開発においては、紐や布などの異物の閉塞が問題となるが、要素、ポンプ実験および CFD と個別粒子法（DEM）の連成解析を用いて、紐の閉塞メカニズムを明確に

し、また、異物通過のシミュレーションを可能とすることにより、ポンプの異物通過性の性能評価を可能とした。さらには布の異物通過シミュレーションを実施中である。

回転機械を支えるロータは各種軸受で支えられているが、ジャーナル軸受、ティルティングパッド軸受について、CFD を用いた静特性、動特性の評価を実施した。本課題では、ロータを半径方向に任意に振動させ、流体力の応答により特性の評価ができる磁気軸受試験装置を構築し、CFD により予測したジャーナル軸受特性の検証に用いた。軸受特性を考慮したロータ解析の応用例として前述の相反転タービンの信頼性を評価している。図 4 に潮流タービンのロータダイナミクス評価結果を示す。

ロケットターボポンプでは、ポンプ、タービンの軸方向推力の釣り合わせにバランスピストンという軸方向推力の自動調心機構を用いている。ポンプの作動条件により、軸方向の強制振動、自励振動を発生することがあるため、CFD により振動特性を評価し、空気モデルによる要素試験により検証を行った。さらには、上述の磁気軸受を用いて軸方向加振を行い、予測の検証を実施中である。

前述の水力タービンに関しては、羽根車下流ドラフトチューブ内での流動不安定が問題となるが、CFD のうち LES (Large Eddy Simulation) を用いた高精度解析による内部流れの解明とドラフトチューブの空気試験装置での PIV を用いた流れ場の把握により、そのメカニズムと CFD での予測誤差の解明を実施した。

Cavitation number σ : 1.04 angle of attack α : 14deg

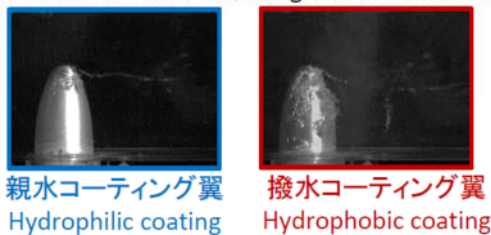


Fig.3 親水、撥水コーティング翼の
キャビテーション発生状況

Transient response analysis

Eigenvalue analysis

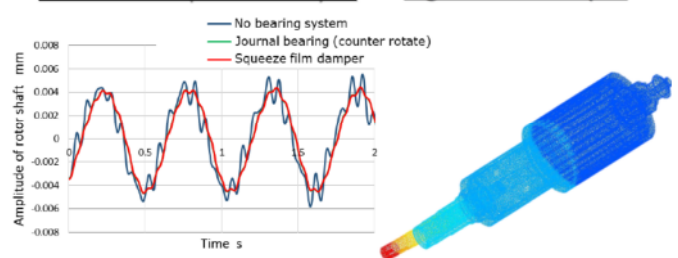


Fig.4 潮流タービンのロータダイナミクス解析

3. 共同研究者

川田 宏之 (基幹理工学部機械科学・航空学科・教授)
細井 厚志 (基幹理工学部機械科学・航空学科・准教授)
須賀 健雄 (先進理工学部応用化学科・専任講師)
平田 邦夫 (理工総研・客員上級研究員)
斉藤 純夫 (理工総研・客員上級研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) T.Takamine,D.Furukawa,S.Watanabe,H.Watanabe,K.Miyagawa, Experimental analysis of diffuser rotating stall in a three-stage centrifugal pump, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 11, 1, p. 77-84(Jan. 2018).

- (2) T.Takamine,D.Furukawa,S.Watanabe,H.Watanabe,K.Miyagawa, Experimental investigation on diffuser rotating stall in a three-stage centrifugal pump, *Pumping Machinery. American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, Vol. 1A-2017(2017)

4.2 発表（国際）

- (1) Z.Liu, M.Shinji, K.Miyagawa、Internal flow and loss mechanism of specific speed 160 m-kW shroudless hydro turbine、*In the 1st symposium of Asian Working Group of IAHR Committee on Hydraulic Machinery and Systems (AWG-IAHR)*, Beijing, November 2017
- (2) H.Kanno, Y.Imasaka, S.Saito, K.Miyagawa, M.Nohmi, M.Isono, H.Uchida, M.Kawai, Behavior prediction of fibrous materials for clarifying clogging mechanism in waste water pumps, The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP), Japan (2017-12)
- (3) K.Onishi, K. Matsuda, K.Miyagawa, Influence of Hydrophilic and Hydrophobic Coating on Hydrofoil Performance, 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), 2017-12
- (4) K. Takenaka, T. Hayashi, K. Miyagawa, Application of CFD analysis for static and dynamic characteristics of hydrodynamic journal bearing, 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), 2017-12

4.3 発表（国内）

- (5) 今坂大和、金井裕明、菅野仁史、斉藤純夫、宮川和芳、能見基彦、磯野美帆、打田博、川井政人、無閉塞ポンプ閉塞メカニズム解明のための繊維状物質の挙動予測、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (6) 進士昌史・劉志豪・宮川和芳、比速度 160 m-kW シュラウドレス水車の内部流れおよび損失メカニズム、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (7) 吉村真美子、木村徳夫、宮川和芳、圧縮性を考慮した液体水素解析による遠心羽根車の内部流れに関する検討、ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (8) 氏家隆太郎、小牧秀太郎、宮川和芳、遠心形ディフューザポンプの動静翼列間距 離による性能と内部流れの変化、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (9) 古川大地、高峯大輝、渡 邊 聡、渡邊啓悦、宮川和芳、三段遠心ポンプにおける回転 - 静止系間隙間が軸スラストに及ぼす影響、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (10) 湯川達人・進士昌史・惣中康太・宮川和芳、水車ドラフトチューブの内部流れの予測と評価、第 78 回ターボ機械協会富山講演会、2017 年 9 月
- (11) 市之瀬飛馬、木村徳夫、吉村真美子、林智之、宮川和芳、ディフューザポンプ内部流れの構造評価、第 78 回ターボ機械協会富山講演会、2017 年 9 月
- (12) 吉村真美子、木村徳夫、市之瀬飛馬、林智之、宮川和芳、遠心形ディフューザポンプにおけるディフューザ設計指針の検討、ターボ機械協会 第 78 回総会講演会、2017 年 9 月
- (13) 木村徳夫、吉村真美子、宮川和芳、遠心形ターボ機械における軸方向推力調整機構の動特性予測の高精度化、第 78 回ターボ機械協会富山講演会、2017 年 9 月

4.4 総説・著書

水力機械の流体関連振動（巻頭言）、電業社機械、第 41 巻第 2 号、通巻第 81 号、2017 年 1 月

4.5 招待講演

“Understanding of Unsteady Flow in Radial Turbomachines using Experimental and Computational Approaches”, The 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAIF), Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Okinawa, 2017-5

“Flow instability in the draft tube of a radial turbine under steady and pulsating flow conditions”, 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), 2017-12

4.6 受賞・表彰

5 件：ターボ機械協会若手優秀講演賞、中村揚平（D2）、進士昌史（M2）、今坂大和（M1）、氏家隆太郎（M1）、吉村真美子（M1）、ターボ機械協会総会講演会、2017 年 5 月、東京

Best Presentation Award, 隆志豪（M1）、the 1st AWG-IAHR's Symposium on Hydraulic Machinery and Systems、2017 年 11 月、北京

4.7 プレス発表

News Release、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、協和コンサルタンツ、アイム電機、前田建設、九州工業大学、早稲田大学、“双反転プロペラ式潮流圧電技術を開発（実海域での曳航試験で発電性能と安全性を検証）”、2017 年 11 月 17 日発表、http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100873.html

プレス発表、科学技術振興機構（JST）、産業技術総合研究所、岡山大学、東京都市大学、早稲田大学、“大型発電用、高出力・高熱効率・低 NO_x 水素エンジンの燃焼技術を開発（地球温暖化など大気環境保全への貢献も期待）”、“平成 30 年 5 月 18 日、<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20180518-2/index.html>

4.8 理工総研主催行事

理工総研第三種行事：イブニングセミナー「圧縮機・タービンの性能と内部流れ、日時：平成 29 年 10 月 19 日～12 月 14 日（12 回）、早稲田大学西早稲田キャンパス

4.9 学会および社会的活動

国際会議組織委員、17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), USA, 2017-12

“水車・ポンプ水車の基礎知識”、ターボ機械協会第 131 回セミナー、水車、2017 年 4 月

“ターボ機械非定常内部流れの計測と開発への応用”、流体工学部門企画 EFD ワークショップ：EFD と CFD の得手不得手－EFD の立場から、日本機械学会年次大会、埼玉、2017 年 9 月
ターボ機械協会特別理事

5. 研究活動の課題と展望

本研究では、社会インフラにとって重要でありニーズの多い水力ターボ機械の性能、信頼性向上を、国家プロジェクトや会社との共同研究により、解析、実験の要素技術をベースに実際の設計開発に役立てることができる最適設計技術に展開し、新しいコンセプトの設計手法を構築、従来の機械システムの性能、信頼性向上を図ることを引き続き目的とする。次年度は、詳細な実験技術に基づく解析手法の高度化、新しい設計コンセプトに基づく水力機械の性能向上に注力する。