

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・航空宇宙学科 教授)

1. 研究課題

2050年のカーボンニュートラルの実現や災害対策のためのインフラ整備に向けて、様々な流体機械の高度化が求められている。本プロジェクトにおいても水力発電用水力タービン、液体水素用ポンプなどの研究開発を鋭意進めているが、公的研究として水素関連、水力タービン、流体関連振動の研究を、外部からの委託、共同研究として流体機械の開発、要素技術の研究を実施し、その横通し技術として、消防用ポンプ、洪水対策用ポンプや船舶ジェット推進ポンプなどへの展開も図っている。それらの研究開発のため、流体解析を核としたマルチフィジックス解析技術、可視化、高速データ処理を含めた実験技術の開発を進めてきた。解析技術は、大規模な並列コンピュータにより複雑な流体、構造系の挙動を予測可能とし、羽根車などの内部流れの計測技術も小型センサーや高速データ処理システムの利用により従来よりも時間、空間分解能を向上させることができた。解析、実験の比較により解析精度の精度向上を図ることができ、精度の良い水力ターボ機械の性能、内部流れの予測が可能となった。

本プロジェクト研究では、今後のインフラ整備に重要な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模型や実機的设计開発を進め、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目的とする。

本年度は従来に引き続き、水力ターボ機械の研究開発の中心課題である水力機械の性能および信頼性向上について、新しいコンセプトによる運転範囲拡大可能な水力タービンの実証試験を継続し、また、技術的に高度なフランシスタービンの開発に成功した。産業用ポンプも新しい最適設計を試み良好な性能を得る予測結果を得た。また、流体、構造連成問題や固液二相流挙動評価に基づく信頼性向上の解明を引き続き実施した。極低温流体の適用に向けた解析技術の高度化も実施しており、実験による検証を実施していく。

2. 主な研究成果

水力機械の高性能化、高信頼性化の研究開発のためには、設計、解析、実験技術の高度化が必要であり、本部プロジェクトによる基礎、応用技術の構築により最新の水力機械の開発に貢献することが可能である。本年度も従来に引き続き、多くの水力タービン、ポンプおよび流体機械、機器の高性能化、高信頼性化に取り組み、以下の成果を得た。

2.1 水力タービンの高効率化、運転範囲の拡大

風力や太陽光などの不安定な再生可能エネルギーの拡大でエネルギー需給調整や貯蔵のニーズが増加しているなかで、水力タービンが不安定電源に対する需給調整やエネルギーストレージの役割を担うためには、更なる運転範囲の拡大が必要である。そのため、資源エネルギー庁の補助研究で秋田県およびエンジニアリング会社と新型水力タービンの研究開発に取り組み、従来の運転可能

範囲を大きく拡大することができた。図1に本年度に開発した新型水車の形状と構造を示す。

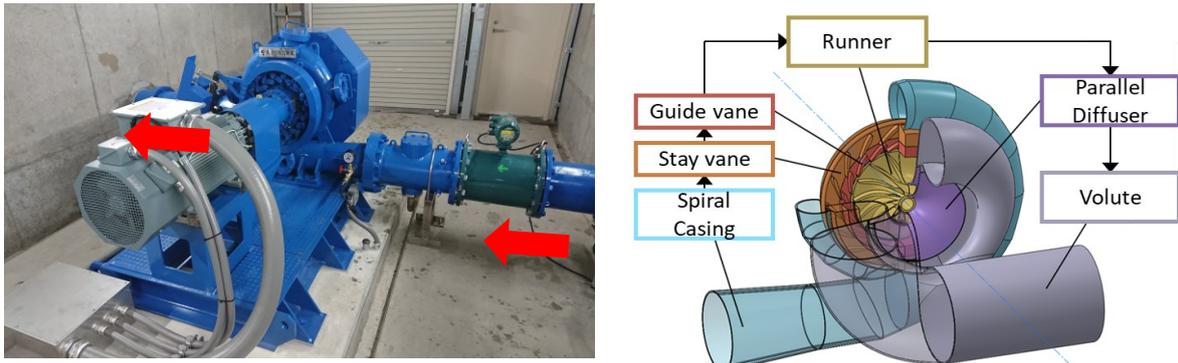


図1 竣工した新形水車（釜畑発電所3号機）と構造図

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20%以下の低流量からの運転を可能とする水力タービンを開発し、秋田県の既設水力発電所に設置され実証試験を実施中である。実証試験を開始してほぼ1年経過するが、問題なく運転実施している。フランシス水車に関しては、県およびメーカーとの共同研究で1500kWを目指した水力タービンの研究開発を実施し、目標性能を得たことを模型試験の実施により確認した。このタービンでは100%、40%の流量での安定で、高効率な運転を目指し、解析技術を駆使して開発を実施している。2021年度には性能の検証のために早稲田大学西早稲田キャンパスで新しい模型試験を構築し性能試験を実施した。海外との連携も引き続き実施しており、53000kW級のフランシス水車は韓国で模型試験を実施している。その他メーカーからの依頼で、フランシス水車の効率向上を実施し、目標の効率達成を流動解析により確認している。

水力タービンシステムに関してはAIを用いた故障診断システムを開発し、前述の模型試験装置を用いて検証をした。水力タービンは非設計点で、ドラフトチューブというディフューザの中で大きな流動不安定が発生するが、そのメカニズムと抑制方法をPIVやLDVを用いて解明した。流れの不安定性は、ディフューザ拡大角に大きく影響され、抑制方法も検討された。

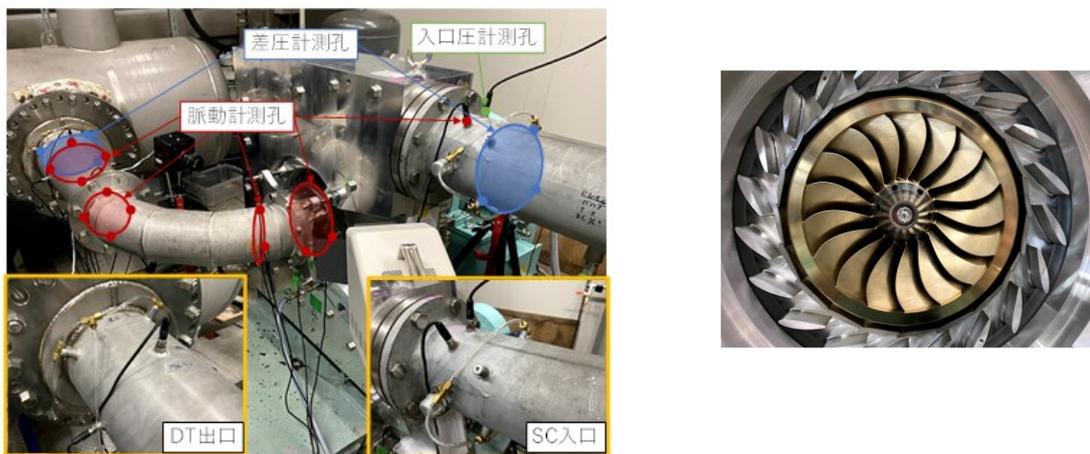


図2 構築したフランシス水車模型試験設備とフランシス水車ランナペーン

2.2 産業用、推進用機器の信頼性向上

ポンプの研究開発として JAXA およびメーカーと次世代のロケット用機器の高性能化・高信頼性化についての取り組みを実施し、流動解析を用いた最適化設計により高い効率を有する羽根車開発を実施した。また、流体機器に関して、キャビテーションエロージョンの実験・解析により多くの試験片を用いて材料のエロージョン進行速度とメカニズムを明確にした。図3にキャビテーションによる噴流と試験片に発生したエロージョンを示す。この結果を推進用機器のパーツに展開した。

洪水用ポンプでは、メーカーと大容量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とキャビテーション性能の改善を図ることができた。また、低温用ポンプの開発も実施し、次年度以降の検証に備えた。

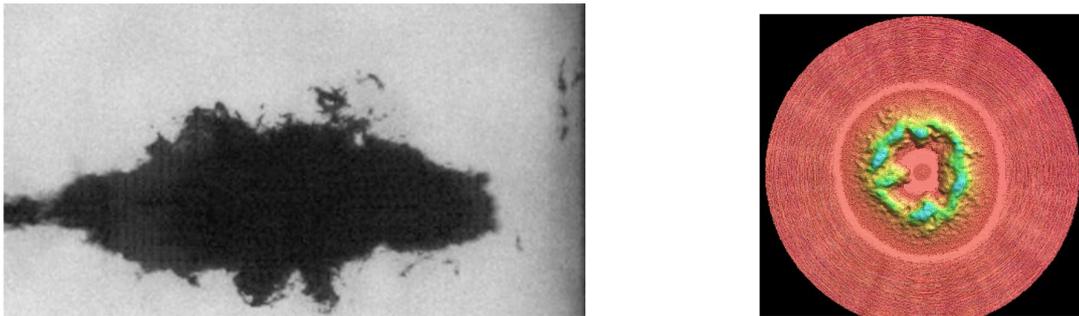


図3 キャビテーション噴流と試験片表面のキャビテーションエロージョン

2.3 流体励振力の予測と検証

水力機械の流体関連振動問題に関しては、引き続きキャビテーション水槽、翼列試験装置を用いて、その不安定流動や動特性を計測した。また、流動解析の適用により、実験を補完するデータを得た。キャビテーション水槽では、大型プロペラで懸念されるフラッター特性の解析的、実験的研究を実施している。水槽試験、流動-構造の連成解析により曲げ、ねじりフラッターの予測を実施、キャビテーション発生の有無による差異を明らかにするとともに、自励振動予測技術の有用性を検証した。上下水道や洪水対策に使われる斜流ポンプやウオータージェットポンプの開発を行い、紐や布などの異物の翼間流路への閉塞を要素、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、異物通過メカニズムを評価した。図4にポンプに多くの異物の通過の様子を示す。また、右図にしめすような解析（CFD、DEM）の連成解析結果を図4の右図に示す。

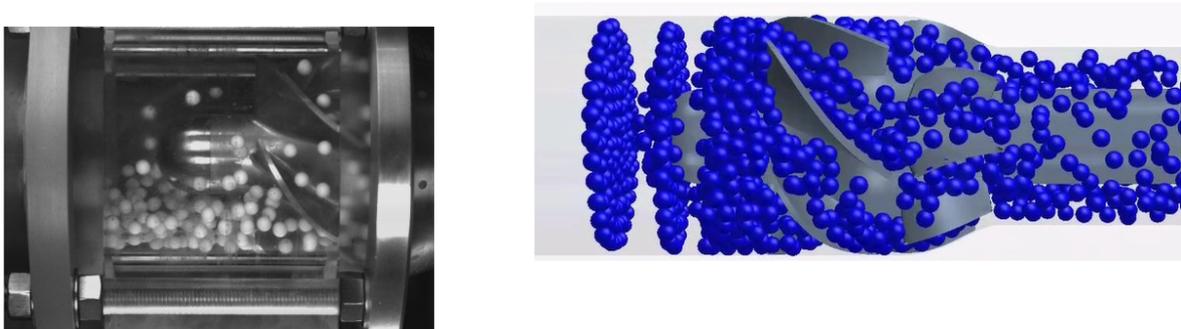


図4 固液二相流解析（CFD-DEM）によるインペラ内の固体粒子挙動（実験と解析）

2.4 ロータシステムの安定性予測

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、ティルティングパッド軸受について、CFD を用いた静特性、動特性の解析的評価を昨年度に引き続き実施した。また、検証のための試験装置も構築し、解析結果の評価を実施した。解析に関しては、特に 3 次元解析への拡張を試み、2次元解析よりも良い予測精度であることを確認した。従来実施していないパッドの移動を伴う解析により予測することができ、複雑な軸受の動特性挙動の定量的予測技術を構築した。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。今年度は、キャビテーションを伴うオープンインペラの動特性を実験的、解析的に明らかにした。CFD により振動特性を評価し、磁気軸受を用いた軸方向加振結果による検証を行ってバランスピストンの軸方向安定性の予測技術を構築した。



図5 ティルティングパッド軸受モデルとる謠解析によるパッド表面圧力

3. 共同研究者

Lee Nakjoong (基幹理工学部講師 (任期付))

Taillon Gabriel (基幹理工学部・助手)

Favrel Arthur Tristen (理工総研・次席研究員)

Khozai Mohamad (理工総研・次席研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文 (査読付学術誌・ジャーナル掲載・原著論文)

- (1) Mohammad Hossein Khozaei, Arthur Favrel, Kazuyoshi Miyagawa, On the generation mechanisms of low-frequency synchronous pressure pulsations in a simplified draft-tube cone, February 2022 International Journal of Heat and Fluid Flow 93(3):108912, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108912
- (2) Gabriel Taillon, Kazuyoshi Miyagawa, Cavitation Erosion of Ni-Based Superalloys Manufactured by Forging and Additive Manufacturing, October 2021, Journal of Failure Analysis and Prevention 21(4):1-16, DOI: 10.1007/s11668-021-01241-4
- (3) Weixiang Ye, Chen Geng, Akihiro Ikuta, Kazuyoshi Miyagawa, Xianwu Luo, Investigation on the impeller-diffuser interaction on the unstable flow in a mixed-flow pump using a modified partially averaged Navier-Stokes model, October 2021, Ocean Engineering 238(1):109756, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109756
- (4) Yumeno Inaba, Kento Sakai, Kazuyoshi Miyagawa, Takeshi Sano, Investigation of Flow Structure in a Narrow Clearance of a Low Specific Speed Centrifugal Impeller, August

2021Journal of Fluids Engineering 143(12), DOI: 10.1115/1.4052240

- (5) Koichi Yonezawa, Kosuke Nishimura, Takeshi Sano, Kazuyoshi Miyagawa, Yoshinobu Tsujimoto, Sloshing of Fluid Between Rotating Inner Vertical Shaft and Stationary Outer Casing, August 2021Journal of Fluids Engineering 143(12), DOI: 10.1115/1.4052127
- (6) Arthur Favrel, Nak-Joong Lee, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, Design of Experiments Applied to Francis Turbine Draft Tube to Minimize Pressure Pulsations and Energy Losses in Off-Design Conditions, June 2021Energies 14(13), DOI: 10.3390/en14133894, LicenseCC BY 4.0

4.2 発表（査読付国際学会論文）

- (1) Akihiro Ikuta, Kazuyoshi Miyagawa, Keiichi Katayama, Yasushi Shinozuka, Shigeyuki Tomimatsu, Influence of forward and backward skew vane angle on positive slope characteristics of mixed flow pumps, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16) , Online, 13/9-15/9/2021.
- (2) Genshu Kawana, Yuji Asanaka, Kazuyoshi Miyagawa , Effect of Pulsating Flow on Mild / Deep Surge Phenomena of Turbocharger Compressor, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16), Online, 13/9-15/9/2021.
- (3) Yuji Asanaka, Ryo Nishimura, Kazuyoshi Miyagawa, Toyotaka Yoshida, Motoki Ebisu,Influence of Nozzle Clearance of VG Turbocharger Turbine on Performance and Internal flow, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16), Online, 13/9-15/9/2021.
- (4) Akihito Ueda, Tomoki Takeda, Daisuke Sugiyama, Kazuyoshi Miyagawa , Effect of the number of blades on diffuser unsteady loss of centrifugal pump, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16), Online, 13/9-15/9/2021.
- (5) Yuki Kondo, Kazuyoshi Miyagawa, Kentaro Miura, Motohiko Nohmi, Tomoki Tsuneda ,Difference of Clogging Performance between Radial and Swept Back Impeller of Axial Pump, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16), Online, 13/9-15/9/2021.
- (6) Kento Sakai, Keisuke Matsumoto, Bungo Iwase,Kazuyoshi Miyagawa, Satoshi Kawasaki, Investigation on axial thrust behavior of balance piston system for a rocket pump, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16), Online, 13/9-15/9/2021.
- (7) Kazushi Nakajima, Kazufusa Tsutaya, Masashi Kubo, Kazuyoshi Miyagawa ,Dynamic Characteristics and Stability Evaluation of Cavitation-Induced Flow Instability in a Conical Diffuser, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16), Online, 13/9-15/9/2021.
- (8) Shunsuke Nagata, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, The Relation between Internal Flow and Loss Mechanism of Unshrouded Runners, The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery(AICFM16), Online, 13/9-15/9/2021.
- (9) Tatsuya Irie, Shunsuke Nakai, Kazuyoshi Miyagawa, Chiharu Kawakita, and Koichiro Shiraishi,, Characteristics of a Hydrofoil Flutter under Cavitation Conditions, 11th International Symposium on Cavitation (CAV2021) , Online, 2021.5

- (10) Tatsuya Irie, Shunsuke Nakai, Kazuyoshi Miyagawa, Chiharu Kawakita, and Koichiro Shiraishi, Characteristics of a Hydrofoil Flutter under Cavitation Conditions, 11th International Symposium on Cavitation (CAV2021) , Online, 2021.
- (11) Arthur Favrel, ZhiHao Liu, Mohammad Hossein Khozaei, Tatsuya Irie, and Kazuyoshi Miyagawa, Transition of a cavitation vortex rope from cylindrical to elliptical mode in Francis turbine draft tube, 11th International Symposium on Cavitation, (CAV2021) , Online, 2021.5,

4.3 発表(国内)

- (1) 入江達也, 宮川和芳, 杉本 隆幸, 茂内孝, 変落差、変流量運転を実現する新形水車の開発, 第 85 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2021 年 5 月
- (2) 植田晃仁, 武田智貴, 杉山 大介, 宮川和芳, 遠心ポンプのディフューザ非定常損失への翼枚数の影響, 第 85 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2021 年 5 月
- (3) 中嶋和志, 津田谷和英, 宮川和芳, キャビテーション崩壊位置の可視化, 第 85 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2021 年 5 月
- (4) 阪井健人, 松本圭介, 岩瀬 文悟, 宮川和芳, ロケット用ターボポンプ向けバランスピストン機構の特性, 第 85 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2021 年 5 月
- (5) 阪井健人, 稲葉夢乃, 宮川和芳, 佐野岳志, 前田聡, 遠心羽根車の回転円板と静止円板間の隙間流れと摩擦トルクの関係, 日本機械学会第 99 期流体力学部門講演会, Online, 2021 年 11 月
- (6) 阪井健人, 松本圭介, 岩瀬文悟, 宮川和芳, バランスピストン機構を有するロケット用ターボポンプのオープンインペラで発生する静的スラストの予測, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, Online, 2021 年 11 月
- (7) 稲葉夢乃, 阪井健人, 入江達也, 寺嶋真伍, 岩瀬英治, 宮川和芳, 表面の微細加工による親水・撥水効果のキャビテーション特性への影響, キャビテーションに関するシンポジウム (第 20 回), 東北大学・Online, 2021 年 12 月
- (8) 阪井健人, 岩瀬文悟, 小林大和, 宮川和芳, 川崎聡, オープンインペラを有するバランスピストンシステム軸方向振動へのキャビテーションの影響評価, キャビテーションに関するシンポジウム (第 20 回), 東北大学・Online, 2021 年 12 月
- (9) M. H. Khozaei , K. Tsutaya, K. Nakajima, A. Favrel, K. Miyagawa, Predicting the natural frequency of a draft-tube in presence of cavitating flow by using 1-dimensional hydroacoustic characteristics of the hydraulic system, キャビテーションに関するシンポジウム (第 20 回), 東北大学・Online, 2021 年 12 月
- (10) 阪井健人, 稲葉夢乃, 入江達也, 寺嶋真伍, 岩瀬英治, 宮川和芳, 各種金属表面の微細加工による親水・撥水効果と流体特性への影響, 第 8 回 ZAIKEN Festa, Online, 2022 年 3 月

4.4 総説・著書

- (1) ターボ機械の流体励振力と不安定流動、ターボ機械, 2022-1、P.3-12
- (2) 脱炭素社会にむけた水力発電システムの役割、エネルギー・資源、2021-7、42 巻 4 号、p.15

(3) 小水力・マイクロ水力発電の最新技術、エネルギー・資源、2021-7、42 巻 4 号、p.40

4.5 招待講演

なし

4.6 受賞・表彰

- (1) 日本機械学会 若手優秀講演フェロー賞，阪井健人，日本機械学会第 99 期流体力学部門講演会，2021 年 11 月，オンライン
- (2) 日本航空宇宙学会 優秀発表賞，阪井健人，第 65 回宇宙科学技術連合講演会，2021 年 11 月，オンライン
- (3) 奨励賞，阪井健人，各務記念材料技術研究所 第 8 回 ZAIKEN Festa，2022 年 3 月，オンライン
- (4) ターボ機械協会技術賞、広範囲な流量・落差で運転可能な新形水車の開発、2021 年 5 月

4.7 プレス発表

なし

4.8 理工総研主催行事

該当なし

4.9 学会および社会的活動

- (1) ターボ機械協会第 154 回セミナー、“水車・ポンプ水車の基礎知識”、2021 年 4 月 20 日
- (2) ターボ機械協会第 155 回セミナー、“ターボ機械に生じる流体関連振動の基礎”、2021 年 7 月 20 日
- (3) 日本機械学会流体力学部門副部門長
- (4) 日本機械学会東京ブロック副ブロック長
- (5) ターボ機械協会副会長、水力機械委員会委員長

5. 研究活動の課題と展望

社会の要求であるカーボンニュートラルの実現、災害に対する有効なインフラ整備、地産地消のエネルギー源の構築など、本プロジェクト研究では、社会、交通、エネルギーインフラの要求に応える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実施している。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、水力ターボ機械の性能、信頼性向上を図ることができた。

共同研究者、研究室の学生により多くの共同研究の性能、信頼性向上を達成することができ、理工総研の支援とともに謝意を表す。

引き続き、詳細な解析・実験技術に基づく流れの解明と水力機械の性能向上に注力していく。