

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に向けて、機械工学、特にターボ機械には多くの役割が求められている。例えば、再生可能エネルギーの増大のためには、水力タービンや風力タービンの性能、信頼性向上やコストの低減が求められ、水素エネルギーの実現のためには高性能な液体水素ポンプ、コンプレッサやガスタービンの開発が必要となる。本プロジェクトにおいても水力発電用タービン、液体水素用ポンプなどの研究開発を鋭意進めているが、その横通し技術として、給水、冷却系ポンプ、上下水道用ポンプ、洪水対策用ポンプ、ロケットターボポンプや船舶プロペラ、船舶ジェット推進などの推進機も重要なインフラであり、本プロジェクトの重要なテーマである。従来、先進的コンピュータ、実験技術の開発を進めてきたが、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。

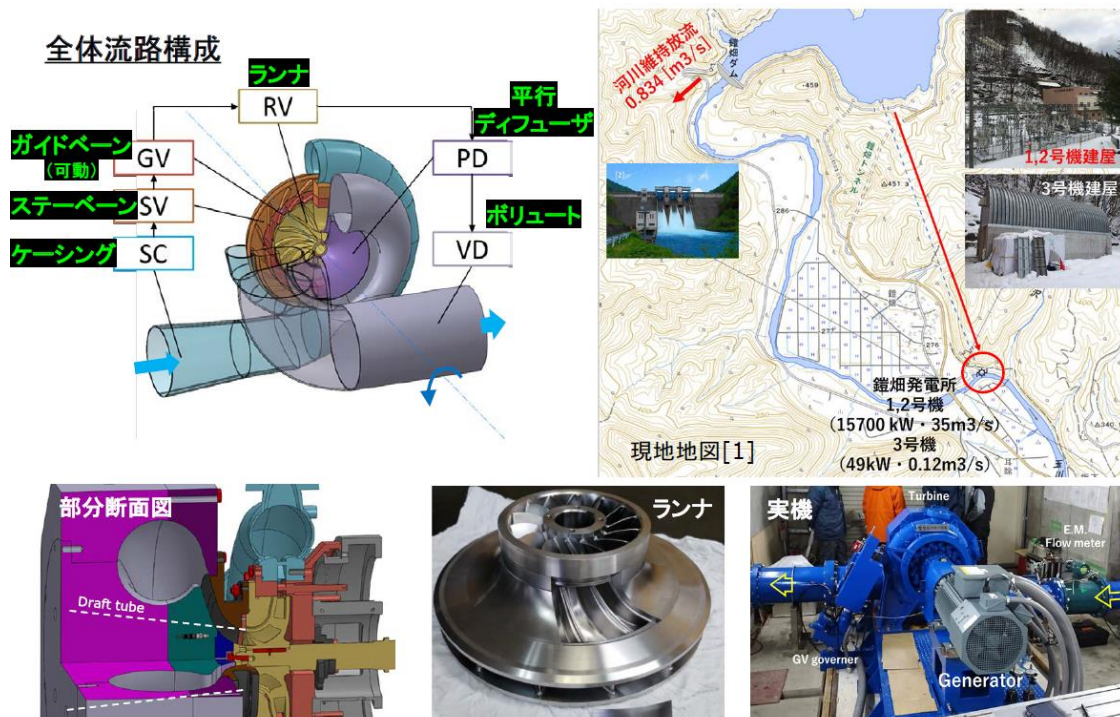
本年度は従来に引き続き、水力ターボ機械の研究開発の中心課題である水力機械の性能向上について、新しいコンセプトによる運転範囲拡大可能な水力タービンの実証試験に移行でき、各種ポンプも性能コントロール手法を得た。また、流体、構造連成問題や固液二相流挙動評価に基づく信頼性向上の解明を実施した。

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、重要な成果を得た。

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、水力タービンに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。そのための水力タービンの性能開発においては、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



[1]国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス

図1 竣工した新形水車（鎧畑発電所3号機）

型水力タービンの形状と製作機および実証試験の様子を示す。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した。図2に水力タービン性能の従来と新型の比較を示す。図では運転可能な流量と落差の関係を示すが流量、落差とも運転範囲が広く拡大されていることがわかる。水力タービンに関しては、従来に引き続き電力会社の既設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、5年目となり40プラント以上の検討の実施により、多くのデータベースの構築に貢献した。

また、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開発も実施している。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。2020年度には検証のため早稲田大学西早稲田キャンパスでの新しい模型試験を構築し、上記水車の開発のために多くの性能試験を実施する予定である。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構築中であり、2021年9月に大分県で実証する予定である。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。

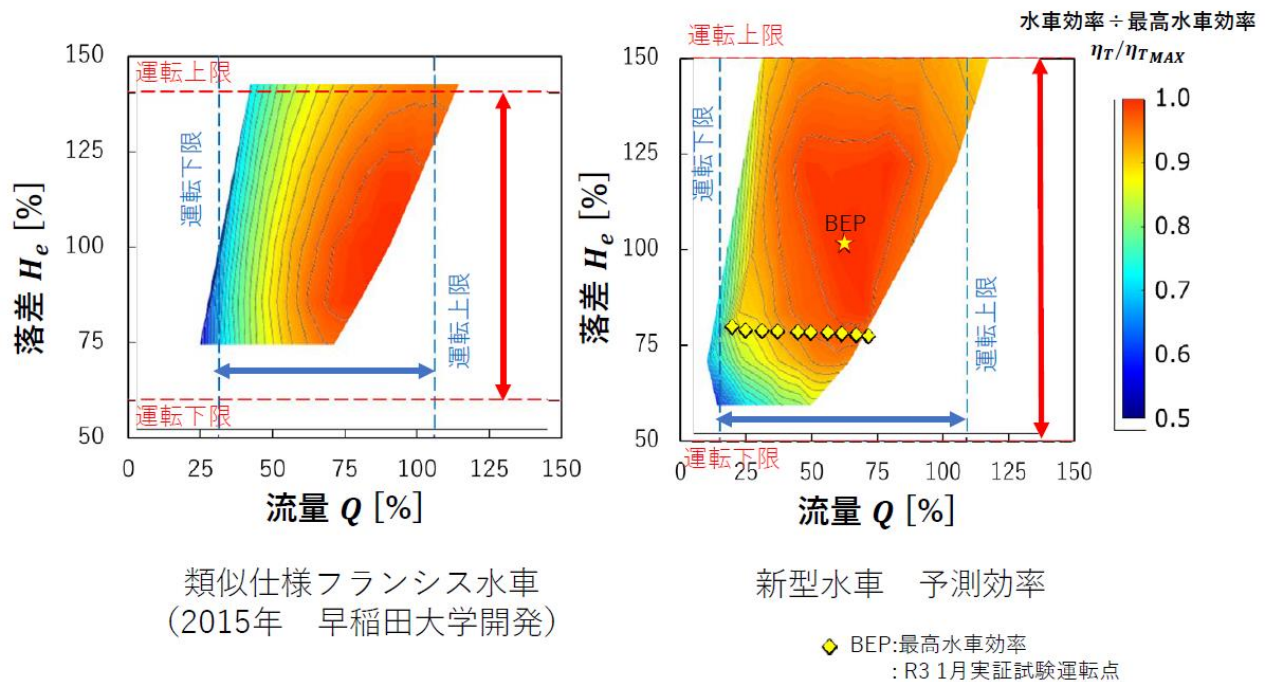


図2 新形水車とフランス水車の性能比較

2.2 産業用、推進用ターボポンプの性能向上

ポンプの研究開発は、JAXA およびメーカーと次世代のロケットターボポンプの高性能化についての取り組みを実施し、流動解析により詳細な内部流れの確認をした他、実験により開発した高性能羽根車の性能検証、内部流れの解明を実施した。産業用、推進用のポンプの開発も会社との共同研究で実施し、新しいコンセプトの羽根車を考案し、性能と羽根車形状の関係を明らかにした。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とキャビテーション性能の改善を図ることができた。図3には、オープンインペラ翼列流れの解析結果とディフューザ内の非定常流況分布を示す。

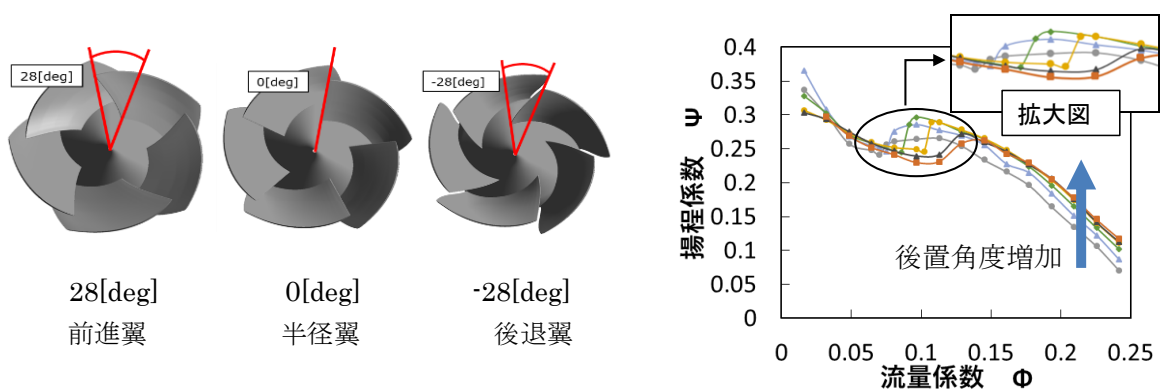


図3 オープンインペラ内のエントロピー分布とディフューザ内損失発生過程

2.3 流体励振力の予測と検証

水力機械の翼列干渉、キャビテーションによる励振力に関しては、引き続きキャビテーション水

槽、翼列試験装置を用いて、その励振力や減衰特性を計測し、流動解析の適用により、実験を補完するデータを得た。海洋技術安全研究所との共同研究では、大型プロペラで懸念されるフラッター特性の解析的、実験的評価に大きな進捗を得た。水槽試験、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の開発や、ウオータージェットポンプの開発を行い、特に後者においては、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、ポンプの異物通過性を評価した。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。

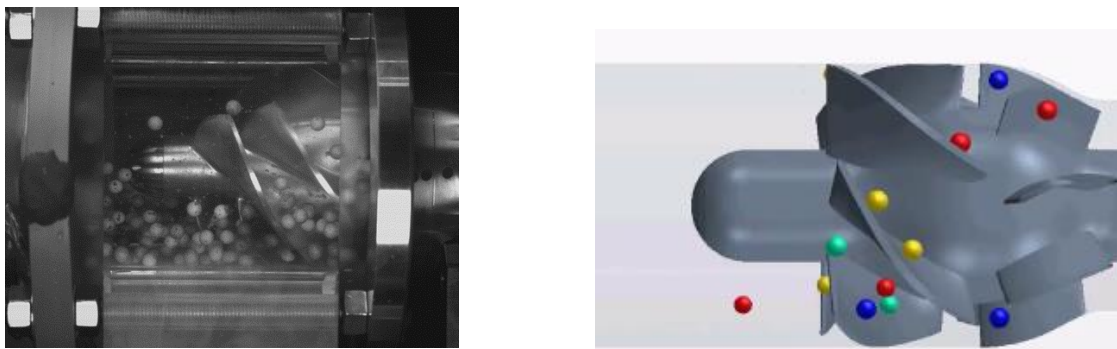


図4 固液二相流解析（CFD-DEM）によるインペラ内の固体粒子挙動（実験と解析）

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。海外メーカーのティルティングパッド軸受けの動特性をパッドの移動を伴う解析により予測することができ、複雑な軸受け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。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、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。

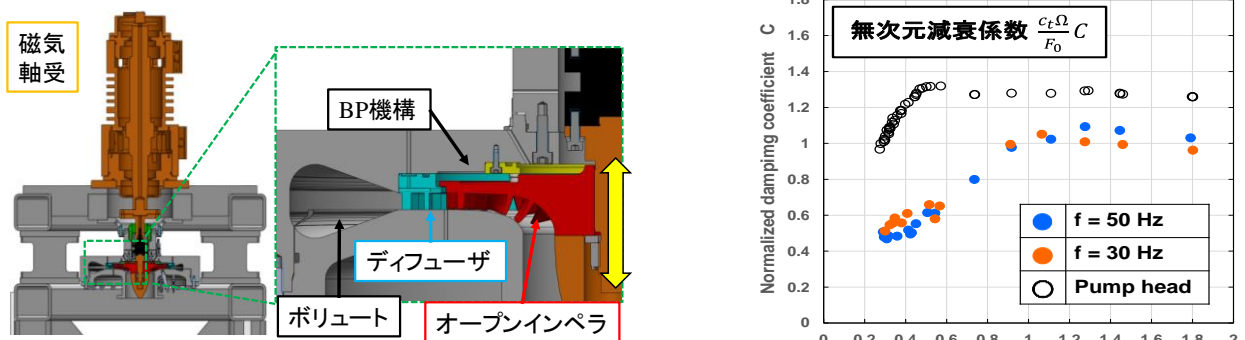


図5 磁気軸受試験装置（左）とキャビテーション係数による無次元減衰係数の変化（右）

3. 共同研究者

Lee Nakjoong (基幹理工学研究科・次席研究員)

中村揚平 (基幹理工学部・助手)

Taillon Gabriel (基幹理工学部・助手)

Favrel Arthur Tristen (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) (共著) (査読付) ターボチャージャタービンの脈動流下における非定常内部流れと損失メカニズム, 中村揚平, 宮川和芳, ターボ機械協会誌, 48 巻第 11 号, p. 52-61, 2020 年 11 月
- (2) (共著) (査読付) Prediction of a Turbocharger Performance Under Pulsating Flow by Construction of an Unsteady One-Dimensional Flow Analysis Model, Yohei Nakamura, Manato Chinen, Masamichi Sakakibara, Yuudai Abe, Kazuyoshi Miyagawa, International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2020, Volume 13, Issue 4, Pages 743-749
- (3) (共著) (査読付) Radial turbine optimization under unsteady flow using nature-inspired algorithms, Seyedmajid Mehrnia, Kazuyoshi Miyagawa, Jin Kusaka, Yohei Nakamura, AEROSPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY (ELSEVIER FRANCE-EDITIONS SCIENTIFIQUES MEDICALES ELSEVIER) 103 2020 年 08 月

4.2 発表 (査読付国際学会論文)

- (4) (国際学会) (査読付) M Weixiang Ye, Kazuyoshi Miyagawa, Prof. X. W. Luo, A modified partially averaged Navier-stokes model for the turbulent flows over a backward facing step(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC18), Online, 23/11-26/11/2020.
- (5) (国際学会) (査読付) Yoshifumi Mukai, Taisei Mineshima, Shunsuke Nakai, Kazuyoshi Miyagawa, Investigation of Fluid Exciting Force on a Hydrofoil under Various Cavitating Flows(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC18), Online, 23/11-26/11/2020.
- (6) (国際学会) (査読付) Ryo Watanabe, Kazuyoshi Miyagawa, Mohammad Hossein Khozaei, Naoki Yamaguchi, Toshitake Masuko, Optimization procedure for a Francis Turbine Runner using 2D Through-Flow Analysis(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC18), Online, 23/11-26/11/2020.
- (7) (国際学会) (査読付) Ryosuke Mori, Kazushi Ajiro, Kazuyoshi Miyagawa, Characteristics of fluid exciting force due to blade row interaction of a propeller turbine 1(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC18), Online, 23/11-26/11/2020.
- (8) (国際学会) (査読付) Dr. Koichi Yonezawa, K. Nishimura, T. Sano, K. Miyagawa, Y. Tsujimoto, Sloshing of Fluid between Rotating Inner Vertical Shaft and Stationary Outer Casing(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC18), Online, 23/11-26/11/2020.

- (9) (国際学会) (査読付) Kazufusa Tsutaya, Z. Liu, M. Kubo, Kazuyoshi Miyagawa, Mitigation method for pressure fluctuations induced by acoustic resonance(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (10) (国際学会) (査読付) Keisuke Matsumoto, Tomoyuki Hayashi, Bungo Iwase, Kazuyoshi Miyagawa, Hideaki Kawaguchi, Hidetoshi Chiba, Hikaru Masuda, Characteristics prediction of a tilting pad journal bearing by using fluid–structure coupled CFD(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (11) (国際学会) (査読付) Yuya Ishii, W. Takahashi, Kazuyoshi Miyagawa, Proposal of a design method for Francis turbines operated in a wide range of flow rates (英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (12) (国際学会) (査読付) Nakjoong Lee, Young–Cheol Hwang, Morihito Inagaki, Kazuyoshi Miyagawa, Design Optimization of High Specific Speed Prototype Francis Turbine by Design of Experiments(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (13) (国際学会) (査読付) Bungo Iwase, Keisuke Masumoto, Tomoyuki Hayashi, Kazuyoshi Miyagawa, Satoshi Kawasaki, Characteristics of axial thrust of an unshrouded impeller equipped with balance piston system (英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (14) (国際学会) (査読付) Akihiro Ikuta, Naruki Nitta, Kazuyoshi Miyagawa, Yasushi Shinozuka, Shigeyuki Tomimatsu, Influence of Forward skew vane angle on positive slope characteristics of mixed flow pumps(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (15) (国際学会) (査読付) Daisuke Sugiyama, Asuma Ichinose, Tomoki Takeda, Kazuyoshi Miyagawa, Hideyo Negishi, Atsuhiko Tsunoda, Investigation of Internal Flow in Centrifugal Pump Diffuser using Laser Doppler Velocimetry (LDV) and Computational Fluid Dynamics(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (16) (国際学会) (査読付) Yumeno Inaba, Asuma Ichinose, Kazuyoshi Miyagawa, Masamichi Iino, Takeshi Sano, Investigation of flow structure in a narrow clearance of a low specific speed centrifugal impeller(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (17) (国際学会) (査読付) Takuma Kawahara, Hideaki Takamiya, Hitoshi Motono, Yasuhiro Hotta, Kazuyoshi Miyagawa, Influence of engine torque fluctuations on performance characteristics of pumps mounted on vehicles(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11–26/11/2020.
- (18) (国際学会) (査読付) Yohei Nakamura, Kazuyoshi Miyagawa, Yasuo Moriyoshi, Tatsuya Kuboyama, Development of turbocharger engine system using 3D and 1D simulation to achieve 50% brake thermal

efficiency(英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11-26/11/2020.

- (19) (国際学会) (査読付) Yuji Asanaka, K. Kobayashi, M. Sakakibara, Y. Itagaki, Y. Nakamura, Kazuyoshi Miyagawa, Effect of Pulsating Flow on Surge Frequency of a Turbocharger Compressor (英語), 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC18), Online, 23/11-26/11/2020.
- (20) (共著) (筆頭) 宮川和芳, 中村揚平, 脈動流下におけるタービン、コンプレッサの性能と内部流れ, ターボ機械協会誌, 46 巻第 7 号, p. 399-410, 2018 年 7 月

4.3 発表(国内)

- (21) 入江達也, 宮川和芳, ポリユート付新型水車開発と性能予測, 日本機械学会関東支部第 27 期講演会, Online, 2021 年 3 月
- (22) 三浦健太郎, 近藤優樹, 宮川和芳, 末松潤一, 佐野岳志, 深尾伸次, CFD-DEM 解析による流体中での球状・非球状物質の挙動予測手法構築とウォータージェットポンプへの適用, 第 84 回ターボ機械協会(長崎)講演会, Online, 2020 年 9 月
- (23) 入江達也, 劉志豪, 宮川和芳, アンシュラウデッドランナを有するフランス水車の LDV 計測による内部流れ分析, 第 84 回ターボ機械協会(長崎)講演会, Online, 2020 年 9 月
- (24) 杉山大介, 市之瀬 飛馬, 武田智貴, 稲葉夢乃, 宮川和芳, オープンインペラを有する遠心ポンプのディフューザにおける非正常損失, 第 83 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2020 年 5 月
- (25) 生田晃浩, 陳奕寧, 八野田真也, 新田成輝, 宮川和芳, 篠塚泰, 富松重行, 斜流ポンプ性能に対する前進スキュー角の影響, 第 83 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2020 年 5 月
- (26) 浅中祐志, 中村揚平, 榊原將至, 板垣悠太, 宮川和芳, 過給機用コンプレッサの脈動流下サージ挙動に関する実験的研究, 第 83 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2020 年 5 月
- (27) 劉志豪, ファブレルアーチャ, 宮川和芳, デュアルカメラによる楕円形状キャビテーションロープの可視化, 第 83 回ターボ機械協会総会講演会, Online, 2020 年 5 月

4.4 総説・著書

- (1) 宮川和芳他, HPC 実用化分科会特集(キャビテーションによる励振力予測)、ターボ機械、2020 年 9 月、第 48 巻第 9 号、p.33~44

4.5 招待講演

該当なし

4.6 受賞・表彰

- (1) Best Paper Award: Mohammad hossein Khozaeiravari, The 2nd IAHR-Asia Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Busan, September, 2019
- (2) Best Paper Award: Yohei Nakamura, The 15th Asian International Conference on Fluid Machinery, Busan, September, 2019

- (3) ターボ機械協会技術賞、宮川和芳、中村揚平、森吉泰生、窪山達也、田畑正和、ターボ機械協会総会講演会、2019年5月、東京
- (4) ターボ機械協会若手優秀講演賞、松本圭介、ターボ機械協会総会講演会、2019年5月、東京
若手功労表彰 小宮功労賞、李洛中、ターボ機械協会岡山講演会、2019年10月、岡山

4.7 プレス発表

- (1) 秋田県庁プレゼンテーションルーム（オンライン参加）、新形水車による実証実験の開始について～鎧畑発電所第3号機の実証運転が始まりました。～、令和3年2月9日
- (2) 朝日新聞、新形水車の実証試験始まる、15面、2020年2月10日
- (3) 河北新報、小流量で効率発電、9面、2020年2月10日
- (4) 秋田さきがけ新聞、新型水車実証試験開始、4面、2020年2月10日

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152回セミナー、“ポンプの性能と信頼性改善手法”、2020年9月12日
- (2) ターボ機械協会第143回セミナー（水車）、“水車・ポンプ水車の基礎知識”、2020年9月10日
- (3) 新エネルギー財団、中小水力発電技術に関する実務研修会、2020年9月
- (4) 国際会議議長、ISROMAC2020,2020年11月オンライン
- (5) 日本機械学会流体工学部門流体技術委員長
- (6) ターボ機械協会副会長、水力機械委員会委員長、イノベーション推進委員会委員長

5 研究活動の課題と展望

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整備に重要であり社会的ニーズの高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実施した。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。新型コロナウイルスによる活動制限があり、今年度の実施内容が特に実験系でできなかったことが多く、解析で多くの埋め合わせを実施した。

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感謝する。

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。