

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年に向けたカーボンニュートラルの達成のためのエネルギー改革が進められているなか、エネルギー、推進、インフラ機械機器の整備に備えて、様々な流体機械システムの高度化、高信頼性化が求められている。本プロジェクトにおいても発電用水車、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、水車の研究を、外部からの委託、共同研究としてポンプや水車の開発、要素技術の研究を実施している。それらの研究開発のため、ターボ機械の流体解析や混相流の流体解析、可視化や高速データ処理などの実験技術の開発を進めてきた。解析技術はより高度なモデルの使用により複雑な流体挙動を予測可能とし、流れの計測技術も多くのセンサーや高速データ処理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、今後のエネルギー、環境などのインフラとして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企業との共同研究により進め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核となる水力機械の性能および信頼性向上を実施した。特に、国立研究法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」(NEDO) 研究として実施した水素利用等先導研究開発事「水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築」に関しては、液体水素と物性の似ている液体窒素を用いた試験装置を構築し、流体解析結果の検証を実施している。また、優良な再生可能エネルギーである水車の関しての研究開発も継続して実施していて、フランス水車部分負荷の流動不安定の低減や廃棄エネルギー回収用縦軸クロスフロー水車の開発も実施した。地球温暖化による水害の増加に対応する今後の排水用ポンプもポンプのサイズを変えずに大流量化の目処を得た。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。

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 液体水素ターボポンプ、液体水素レシプロポンプの研究開発

液体水素はその特異な性質(圧縮性、沸点、臨界点)がボトルネックとなり、それを扱うための基盤流体技術は未確立である。液体水素の利用は宇宙分野が先行しているが、水素キャリアシステムの構成機器の運用形態(オフ・デザイン運転、長時間運転)やコスト要求が宇宙分野とは異質であることな

どにより、水素社会向け大型設備の具体化には多くの技術課題が残されている。例えば、詳細な検証実験データの取得を含め、流体解析技術を中核とする基盤流体技術を構築し、代表的な流体機械装置に適用することで、技術課題への適用性を評価し、実用化する必要がある。より具体的には、ポンプ・配管内の圧力低下に伴う蒸発現象であるキャビテーションにおいては、極低温流体が蒸発潜熱を奪う事でキャビテーションの成長を抑制する効果、すなわち熱力学的効果の考慮が重要である。また、臨界点近傍（気体と液体が共存できる限界の温度・圧力条件の周辺）で生じる流体物性の急変現象、さらには、外部入熱により発生する沸騰現象（ボイルオフガス）の予測と制御を可能とする基盤技術の確立が必要である。以上のように、多岐にわたる構成機器の開発に資する基盤技術を開発するために、液体水素に関する主要な機械・機器のエンジニアリングでの基盤流体技術である流体シミュレーション技術と流体計測技術の構築のための研究を行った。特に、本プロジェクトでは、①液体水素解析、実験の高度化と不安定流動、②流体機械内部流動予測・評価技術の開発を実施する。これらの研究開発で得られた成果をもとに、大容量昇圧ポンプの高性能化、高信頼性化につなげる。

液体水素は、極低温で沸騰することに加え、安全性や価格の面で取り扱いが大変に難しいため、相変化の状態が似ている液体窒素を用いて研究を実施する。図1に液体水素ターボポンプ、レシプロポンプの開発アプローチを示す。液体窒素を用いる流体機械、機器のシミュレーション

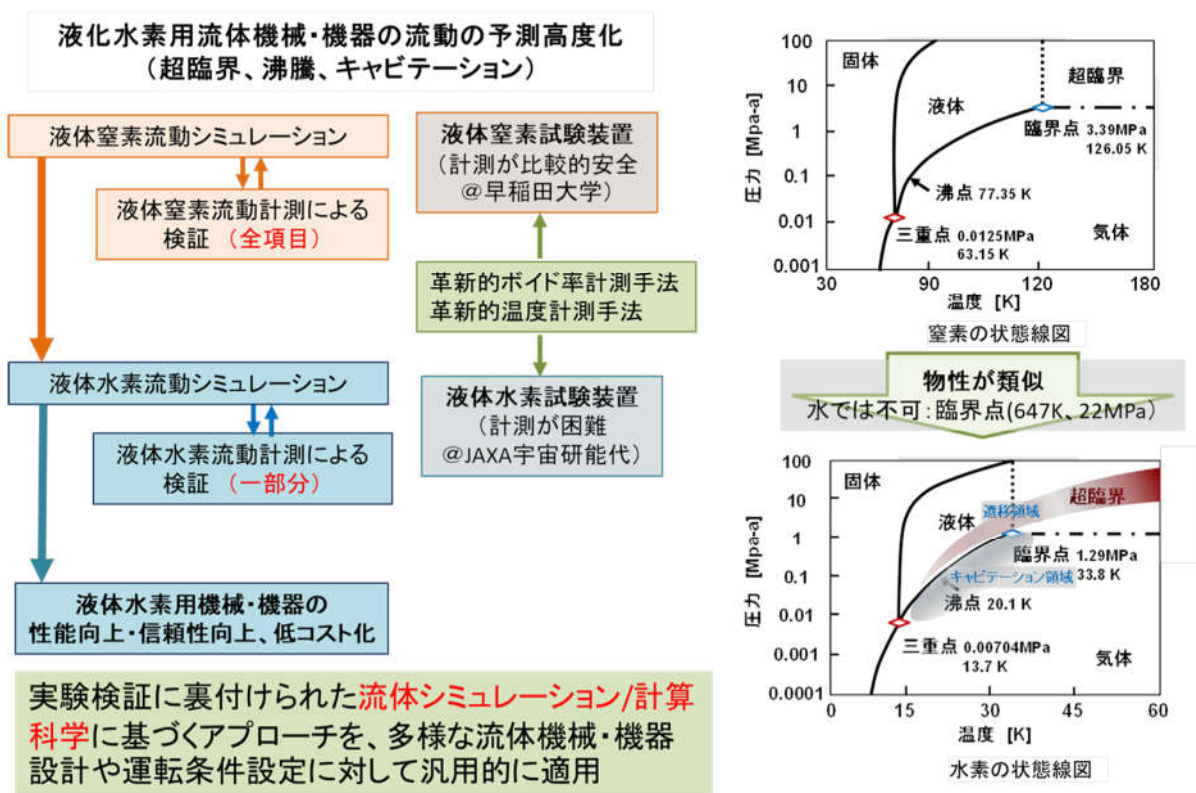


図1 液体水素ターボポンプ、レシプロポンプの開発アプローチ

技術を試験、計測を用いて高度化して、液体水素を用いる流体機械、機器の予測を行う。検証試験は、図2に示す液体窒素ループとターボポンプインペラ部分を用いる。インペラの製造は、困難を伴うがAM(Additive Manufacturing)を用いて製造した。表面粗さの改善は必要であるが、形状としては問題の無い精度での製造ができた。また、高压レシプロポンプ向けにシールシステムの研究開発も進めた。

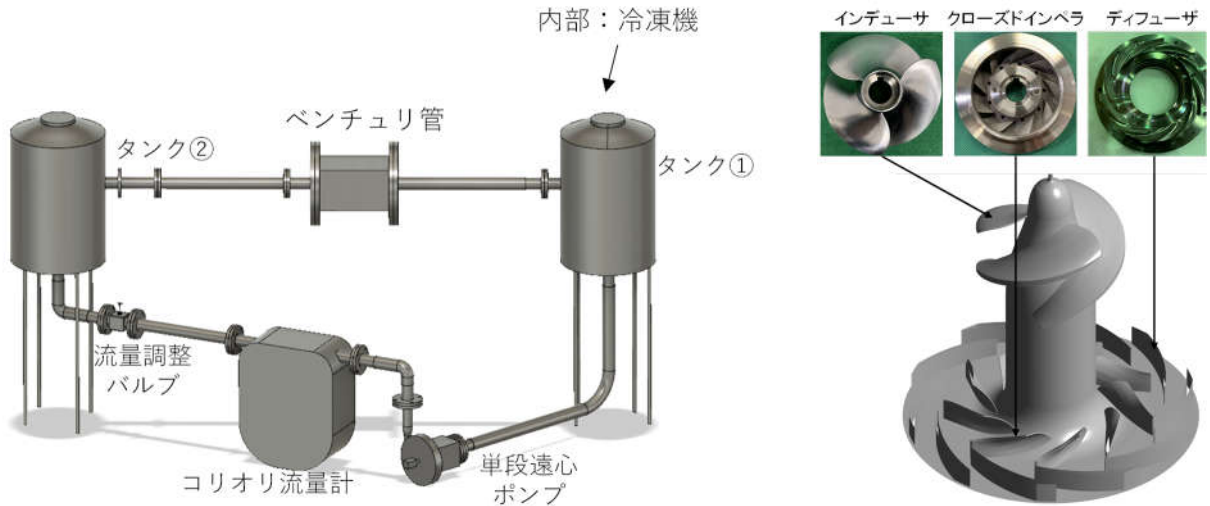


図2 液体窒素試験装置とポンプ回転部（インデューサ、インペラとディフューザ）

2.2 発電用水車の開発

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、更なる高効率化と運転範囲の拡大が必要である。そのため、当プロジェクトでは高効率で高い信頼性を有する水力タービンの研究に取り組み、高い効率と運転可能範囲の拡大を図る水力タービンの開発をすることができた。研究成果は実機に展開され、韓国での 50MW を超える大容量水車の運転が開始され、国内向けには 1.5MW、0.2MW の水車の開発を実施し有水試験を実施中である。また、昨年度まで鋭意取り組んできた新型水車を 0.2MW の水車に適用することを目的に研究開発を実施している。図2に本年度に開発した水車模型試験装置の形状と流水路部を示す。水車の運転診断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、模型試験装置と実機でシステムの検証を実施した。

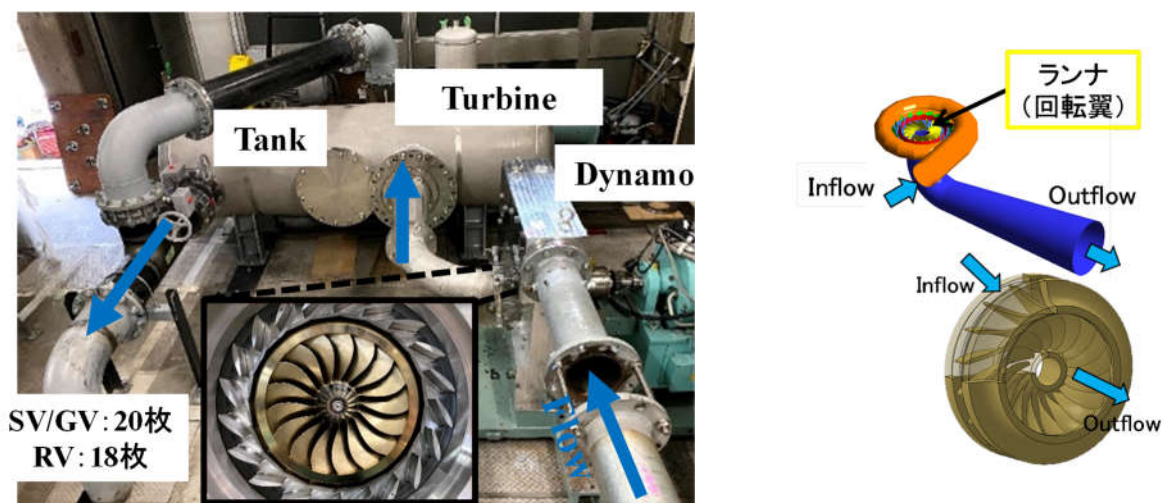


図3 構築したフランシス水車模型試験設備とフランシス水車ランナベーン

2.3 複雑非定常現象の現象把握、予測精度向上

当プロジェクトでは、複雑な現象である気液二相流、固液二相流や、流体の振動問題に関して実験、解析技術を駆使し、現象の把握、解明とその抑制により流体機械・機器の信頼性向上を図っている。水車やポンプで発生するキャビテーションは、流動不安定を引き起こす場合がある。巡回キャビテーションとキャビテーションサージである。特に、キャビテーションサージは大きな流量変動や圧力変動を引き起こし、流体機械や機器の破損に結びつく場合がある。そのため、発生メカニズムを明確にし、変動抑制条件を見いだすことが必要となる。図4は上流に旋回流がある場合のキャビテーションサージの実験と流体解析結果との比較である。旋回流れが流路拡大部に達した時に大きな渦に拡大し、また、周期的な変動が実験と解析で見られる。大変に複雑な現象であり、解析的予測の精度向上のため、今後も研究を続ける。当プロジェクトでは、長年、固液二相流の現象把握も実施している。図5は、船舶推進用の軸流ポンプに細かな粒子が混入した場合の装置、粒子が翼面に衝突して翼面に塗布しているペイントが剥がれた場所の実験と解析結果の比較を示している。解析は流体解析と個別粒子法（DEM）を組み合わせた方法であり、粒子の翼面への衝突位置を定性的に予測することが出来ていることを示している。今後も、気液、固液二相流の挙動解析、実験に注力していく。

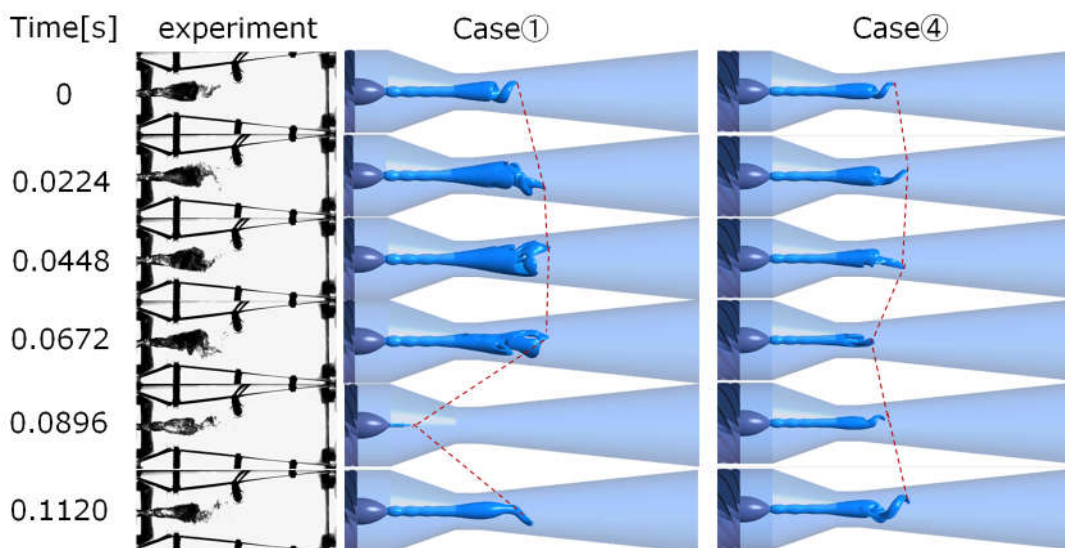


図4 旋回流によるキャビテーションサージの実験と解析の比較



図5 固液二相流解析（CFD-DEM）によるインペラ内の固体粒子衝突挙動の予測（実験と解析）

2.4 ロケットターボポンプバランスピストン、ティルティングパッド軸受の特性評価

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。キャビテーション水槽では、大型プロペラや潮流タービンの翼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ている。回転機械のロータは各種軸受で支えられているが、発電機やタービン、圧縮機、ポンプなどで使用されているティルティングパッドジャーナル軸受について、CFD を用いた静特性、動特性の解析的評価と検証のための実験を昨年度に引き続き実施した。解析に関しては、従来実施していないパッドの移動を伴う解析により動的挙動を予測することができ、複雑な軸受の不安定限界の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。今年度も昨年度に引き続き、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6に磁気軸受を用いたロケット用ターボポンプ動特性試験装置および翼列部の概要を示す。本研究によりロータ系の安定性向上を目指す。

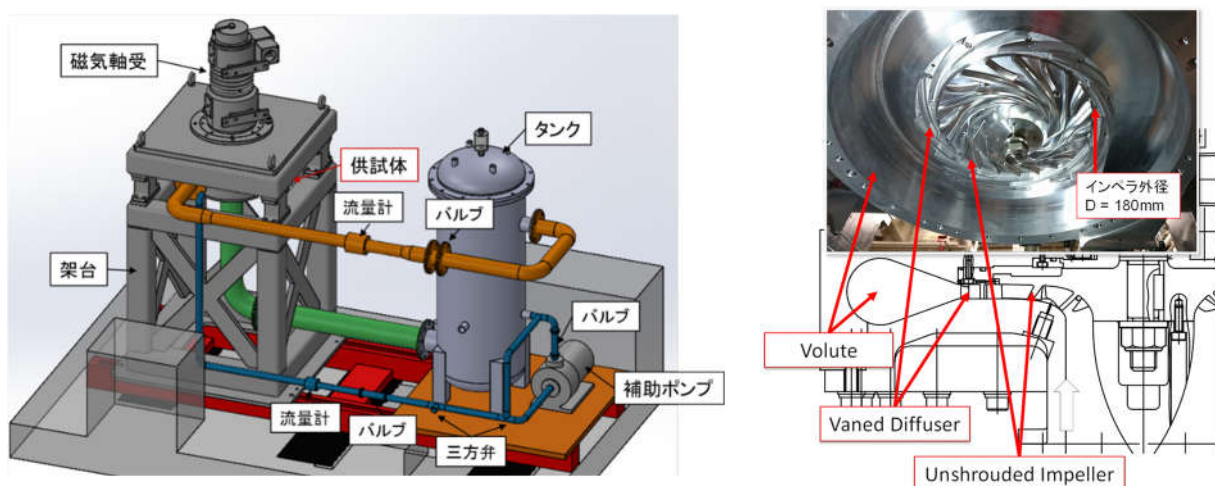


図6 ターボポンプバランスピストン試験装置とターボポンプインペラの組立状況

3. 共同研究者

Lee Nakjoong (基幹理工学部・講師 (任期付))

入江達也 (基幹理工学部・助手)

Khozai Mohamad (理工総研・次席研究員)

鈴木敏明 (客員上級研究員)

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) Resonator-like behavior of a wall-bounded precessing vortex core in a diffuser with wall asymmetries, Arthur Favrel, Zhihao Liu, Kazuyoshi Miyagawa, Physics of Fluids 35(3), DOI:10.1063/5.0140025. 2023.3

- (2) Influence of swirling flow parameters on frequency response of a simplified draft-tube in presence of cavitation, Mohammad Hossein Khozaei, Arthur Favrel, Kazuyoshi Miyagawa, International Journal of Heat and Fluid Flow 98(10):109043,2022.12
- (3) Experimental and numerical validation of a Francis turbine draft tube designed for mitigation of pressure fluctuations, Arthur Favrel, Tatsuya Irie, Yuya Ishii, Nakjoong Lee, Kazuyoshi Miyagawa, IOP Conference Series Earth and Environmental Science 1079(1) ,2022.6
- (4) Anti-phase oscillations of an elliptical cavitation vortex in Francis turbine draft tube, Arthur Favrel, Zhihao Liu, Mohammad Hossein Khozaei, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, Physics of Fluids 34(6):64112,2022.6
- (5) Effect of the conical diffuser angle on the confined swirling flow induced Precessing Vortex Core, Zhihao Liu, Arthur Favrel, Kazuyoshi Miyagawa, International Journal of Heat and Fluid Flow 95(8):108968,2022.6
- (6) Effect of pulsating flow on mild / deep surge phenomena of turbocharger compressor, Genshu Kawana, Yuji Asanaka, Kazuyoshi Miyagawa, Journal of Physics: Conference Series, vol.2217,012083, 2022.5, IOP Publishing Ltd
- (7) Difference of clogging performance between radial and swept back impeller of axial pump, Y Kondo, K Miura, K Miyagawa, M Nohmi , T Tsuneda, Journal of Physics: Conference Series, vol.2217,012025, 2022.5,IOP Publishing Ltd
- (8) Dynamic characteristics and stability evaluation of cavitation-induced flow instability in a conical diffuse, Kazushi Nakajima Kazufusa Tsutaya, Masashi Kubo, Kazuyoshi Miyagawa, Journal of Physics: Conference Series, vol.2217, 012026, 2022.5, IOP Publishing Ltd
- (9) Investigation on axial thrust behavior of balance piston system for a rocket pump, Kento Sakai, Bungo Iwase, Keisuke Matsumoto, Kazuyoshi Miyagawa, Satoshi Kawasaki, Journal of Physics: Conference Series, vol.2217, 012029, 2022.5, IOP Publishing Ltd
- (10) Effect of the number of blades on diffuser unsteady loss of centrifugal pump, Akihito Ueda, Tomoki Takeda, Daisuke Sugiyama, Kazuyoshi Miyagawa, Journal of Physics: Conference Series, vol.2217, 012052, 2022.5, IOP Publishing Ltd
- (11) The relation between internal flow and loss mechanism of unshrouded runners, Shunsuke Nagata, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, Journal of Physics: Conference Series, vol.2217,012064, 2022.5, IOP Publishing Ltd
- (12) Effect of pulsating flow on mild / deep surge phenomena of turbocharger compressor, Genshu Kawana, Yuji Asanaka, Kazuyoshi Miyagawa, Journal of Physics: Conference Series, vol.2217, 012083, 2022.5, IOP Publishing Ltd

4.2 発表（査読付国際学会論文）

- (1) Effect of surface wettability for disk friction on rotating disk in centrifugal impeller, Kento Sakai, Yumeno Inaba, Yamato Kobayashi, Kazuyoshi Miyagawa, The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image,2022.8

4.3 発表

発表（国内）

- (1) 遠心羽根車内のバランスホールの有無による軸方向流体力への影響評価, 阪井健人, 小林大和, 吉田将太, 宮川和芳, 日本機械学会関東支部第 29 期関東支部総会・講演会, 2023 年 3 月
- (2) 回転数制御による遠心圧縮機で発生する流動不安定の抑制, 李佩澤, 川名玄修, 宮川和芳, 島村明, 日本機械学会関東支部第 29 期関東支部総会・講演会, 2023 年 3 月

- (3) 逆解法手法と数値流体力学を用いたフランシス水車ランナの最適化設計, 永田駿介, 李洛中, 入江達也, 宮川和芳 日本機械学会 第 100 期流体工学部門講演会, 熊本, 2022 年 11 月
- (4) 流体構造連成を用いたティルティングパッドジャーナル軸受における内部流れ及び軸受特性, 小林大和, 阪井健人, 吉田将太, 宮川和芳, 川口英晃, 増田光 日本機械学会 第 100 期流体工学部門講演会, 熊本, 2022 年 11 月
- (5) 気液二相流の形態と圧力損失の検討, Feng Caining, 川原拓真, 宮川和芳, 持田敏治, 川上一美, 第 87 回ターボ機械協会京都講演会, 京都, 2022 年 9 月
- (6) 翼面上に生じるキャビテーションの長さとの崩壊圧の関係評価, Feng Yixin, 中嶋和志, 宮川和芳, 松久光儀, 中川隼太 第 87 回ターボ機械協会京都講演会, 京都, 2022 年 9 月
- (7) ベンチュリ管内に生じるキャビテーション流動不安定現象の予測, 中嶋和志, Feng Yixin, Khozaei Mohammad, 宮川和芳 第 87 回ターボ機械協会京都講演会, 京都, 2022 年 9 月
- (8) 軸流ウォータージェットポンプにおける非対称キャビテーションとルートの特性について, 満留谷圭佑, 生田晃浩, 李佩澤, 宮川和芳, 川内清恵, 逸見恭彦 第 87 回ターボ機械協会京都講演会, 京都, 2022 年 9 月
- (9) CFD+DEM 連成解析による軸流ポンプの閉塞挙動予測, 末松潤一, 宮川和芳, 近藤優樹, 佐野岳志, 中村裕樹 第 87 回ターボ機械協会京都講演会, 京都, 2022 年 9 月
- (10) ロケットエンジンターボポンプバランスピストンの動特性, 阪井健人 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2022, v_BASE フォーラム, 秋田, 2022 年 9 月
- (11) 噴流によるキャビテーションエロージョン生長メカニズムの検討, 木津孝太, 阪井健人, 杉山大介, 宮川和芳, 第 86 回ターボ機械協会総会講演会, 東京, Online, 2022 年 5 月
- (12) 非定常全圧プローブと流動解析による斜流ポンプインペラ内部流れの検討, 李佩澤, 生田晃浩, 宮川和芳, 富松重行, 片山景市 第 86 回ターボ機械協会総会講演会, 東京, Online, 2022 年 5 月
- (13) 小水力発電に適用可能な異常兆候監視システムの開発, 李洛中, 木津孝太, 宮川和芳, 岩田直久, 本川幸雄, 第 86 回ターボ機械協会総会講演会, 東京, Online, 2022 年 5 月
- (14) 水素キャリアシステムの高性能化と課題解決のための基盤流体技術の構築, NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2022, 2022.7

4.4 総説・著書

- (1) 小水力発電の導入・活用に向けた水力タービンおよび周辺技術の開発, 宮川和芳, 電気現場, p.16-21, 2023 年 3 月
- (2) 水車ドラフトチューブ流動不安定現象の流体解析, 宮川和芳, Khozaeiravari Mohammad hossein, 劉志豪, ターボ機械協会誌, 50 巻第 4 号, p.39-55, 2022 年 4 月
- (3) 脱炭素社会にむけた水力発電システムへの動向と期待, 明電時報 377 号, 2022 No.4
- (4) 脱炭素社会に向けた水力発電システムの貢献と課題, 自動車技術, p.24-30, 2023.3

4.5 招待講演

- (1) Contribution of Hydropower Systems toward a Decarbonized Society, Kazuyoshi MIYAGAWA, Grand Renewable Energy 2022 International Conference (GRE2022), December 20, 2022

(2) Investigation of effect of blade skew angle on hydraulic and anti-clogging performance of axial and mixed flow pumps, The 2nd Yangzhou University International Symposium on Hydraulic Machinery, December 11,2022

4.6 受賞・表彰

- (1) 日本機械学会若手優秀講演フェロー賞（流体工学部門）「逆解放手法と数値流体力学を用いたフランシス水車ランナの最適化設計」2022年11月
- (2) 日本機械学会 流れの夢コンテスト最優秀賞 2022年8月
- (3) ターボ機械協会京都講演会 若手優秀講演賞 「ベンチュリ管内に生じるキャビテーション流動不安定現象の予測」2022年9月

4.7 プレス発表

なし

4.8 理工総研主催行事

ターボ機械協会第86回総会講演会 2022/5/13

4.9 学会および社会的活動

- (1) ターボ機械協会第161回セミナー、“水車・ポンプ水車の基礎知識”、2022年4月20日
- (2) ターボ機械協会第4回アフターヌーンセミナー、“ポンプの内部流れと流体設計”、2022年3月15日
- (3) 日本機械学会流体工学部門部門長
- (4) 日本機械学会「機械の日」実行委員長
- (4) 日本機械学会東京ブロックブロック長
- (5) ターボ機械協会副会長、水力機械委員会委員長
- (6) 小水力発電1,000kW未満仕様標準分科会座長

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企業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、信頼性向上を図っている。多くの課題や研究を実施する中、十分に達成できていない研究もあり、今後、プロジェクトの運営の工夫を実施していく。特に、極低温流体研究の推進には解析、実験とも多くの困難があり、今後、解決していく。

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。