

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、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。図 1 に、カーボンニュートラル社会達成のための本プロジェクト研究のテーマを示す。優良な再生可能エネルギーである水力発電の導入拡大、大量にエネルギーを消費するポンプの高性能化、液体水素などの CO₂ フリーエネルギーへの転換のための研究が 3 本の柱であり、特に、エネルギー改革において重要なインフラである発電用水車、液体水素用ポンプなどの研究開発の中で、ターボ機械や混相流の流体解析、流れの可視化や内部流れの計測などの実験技術の開発を進めている。解析技術に関しては、流体解析だけではなく、固体との連成を含むマルチフィジックスへの拡張により複雑な流体機械挙動を予測可能とし、また、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。流体機械の設計技術の構築も重要なテーマであり、解析、実験の比較による解析精度の向上から、解析を多用した設計時に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、推進、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および製造技術の高度化を実施した。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」の後継プロジェクトとして、産学連携で液体水素インフラの研究開発を実施している。

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、大分県、青森県向けのフランシス水車の開発を完了し、実機の運転を開始した。また、長野県の水力発電所向けには運転範囲を著しく拡大できた新型水車を適用すべく最適設計を実施し、現在、水車行成部品の製造中である。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模型試験の準備を進めている。地球温暖化による水害の増



図 1 カーボンニュートラル達成のための研究活動

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設計を終えて模型試験により検証した。その他、本プロジェクトで液体水素ターボポンプ、液体酸素ターボポンプ、燃焼器パーツの開発を支援してきた LE-9 エンジンを搭載する H3 ロケットの打ち上げに成功し、JAXA より感謝状をいただいた。これら技術を上述の社会インフラ開発に転用していく。

2. 主な研究成果

水力機械の高性能化、高信頼性化のためには、設計、解析、実験技術の高度化が必要であり、本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ターボ機械の開発に貢献してきた。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 極低温ターボポンプ、低温流体の研究開発

液体水素は圧縮性、沸点、臨界点などの特異な性質を有するため、それを扱うための基盤流体技術は未確立である。そのため、詳細な検証実験データの取得を含め、流体解析技術の中核とする基盤流体技術を構築し、代表的な流体機械に適用することで、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。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した。これらの研究開発で得られた成果をもとに、流体機械の高性能化、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した。図2に液体水素、液体窒素の状態線図を示す。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3に示す液体窒素ループとターボポンプを用いた。図4に、インデューサ、インペラ、ディフューザ、ケーシングからなるポンプの流体解析領域を示す。流体は、水、液体窒素、液体水素の3種類を用いたが、各々非設計点の性能は異なり、また、渦構造も違うことが明らかになった。

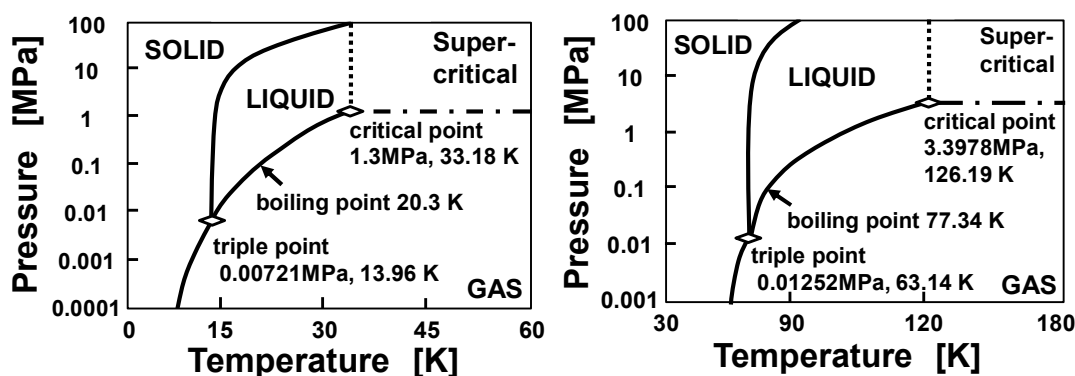


図2 液体水素（左）、液体窒素（右）の状態線図

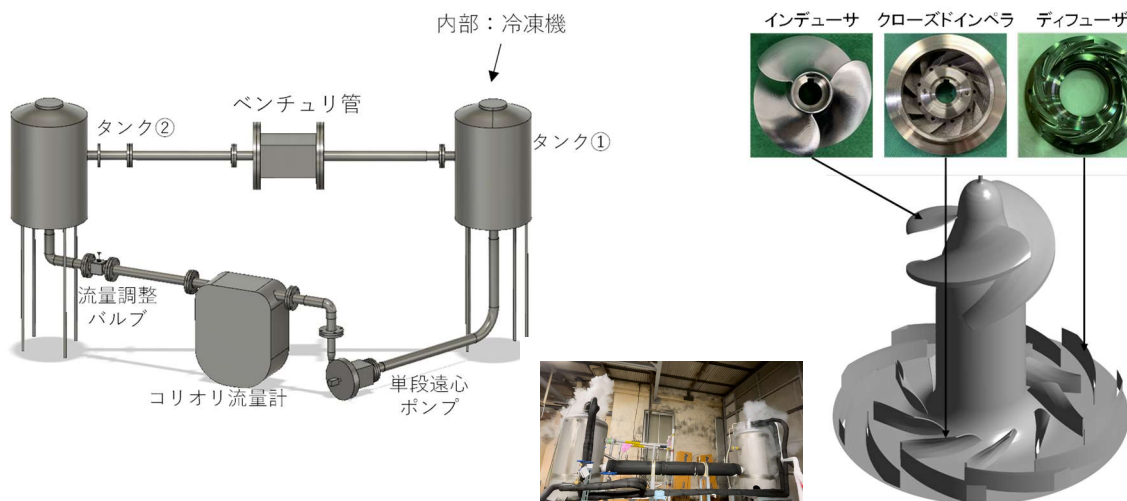


図3 液体水素試験装置とポンプ回転部

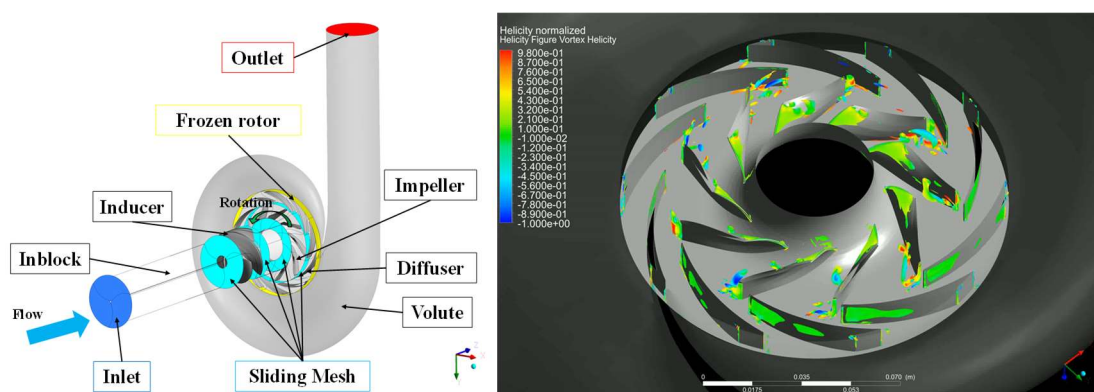


図4 液体水素用ポンプの流動解析結果（左：解析領域、右：渦構造可視化）

2.2 高性能水車の開発

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、水車は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ことを期待されている。そのためには、更なる高効率化と運転範囲の拡大およびコスト低減が必要であり、本プロジェクトの一つとして、低損失で非設計点でも不安定な流動が生じにくい管路（ドラフトチューブ）を開発し、高効率で広い運転範囲の水車を実現できた。これらの成果を、1500kW、200kWのフランス水車に適用し、設計、流体解析や模型試験を経て、実機製造を実施、2023年度に商用運転を開始した。また、極めて運転範囲の広い新型水車を開発し、実機での実証運転を継続中であるが、さらに0.2MWの水車の開発を実施し現在、実機の製造中である。図5に本年度開発した新型水車の流路形状を示す。また、従来は気液二相流の中で運転されていたクロスフロー水車は横軸のみで使用され、流体関連振動の問題もたびたび生じていたが、液相のみで稼働できるクロスフロー水車の開発にも着手し、現在模型試験に向けて準備中である。図6に単相流クロスフロー水車の圧力分布を示す。小水力では度々異物が混入し、水車の運転の障害になっているが、それらを診断するAIを用いた水車の異常診断システムを開発し、実機適用の準備中である。

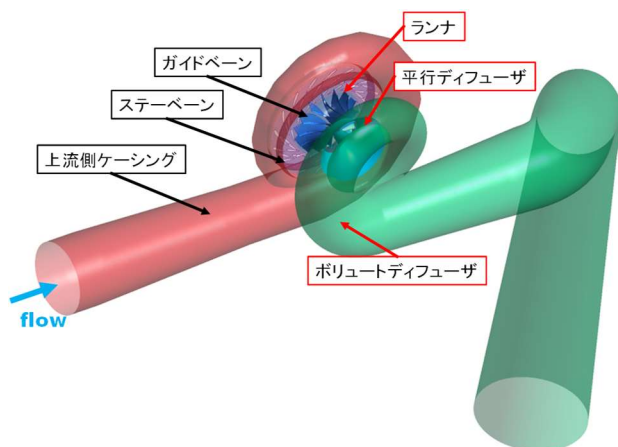


図5 新型水車の流路構成部

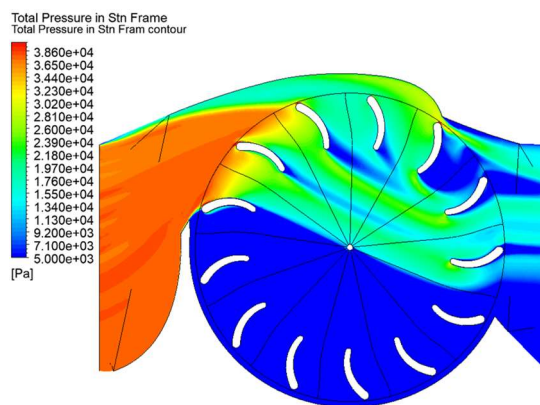


図6 クロスフロー水車の内部流れ例（全圧分布）

2.3 複雑流体现象の把握、予測精度向上

本プロジェクトでは、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。これらの複雑な現象は特に、非設計点で発生する場合が多く、不安定な性能を伴う場合も多い。圧縮機やポンプで発生する可能性があるサージングは、低流量域で発生する不安定現象の代表的なもので、管路内での一次元の極めて大きな流量、圧力変動を伴うため、流体機械の信頼性を大きく損なう。図7に過給機用圧縮機を低回転数で運転した場合、すなわち空気の圧縮性が影響しない範囲でのサージングの発生状況を示す。図中には試験装置と、大きなサージング（ディープサージ）、軽妙なサージ（マイルドサージ）の流量、圧力カーブを示す。また、圧縮機部分を3次元で、管路を1次元で流動解析した場合を併記する。両者は定性的には一致するが、今後は精度向上を図る、また、水車やポンプで発生するキャビテーションは、旋回キャビテーションとキャビテーションサージという流動不安定を引き起こす場合がある。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。本プロジェクトでは、その発生メカニズムを明確にし、抑制条件を明らかにしている。また、このキャビテーションは、流体機械、機器に長い時間を経て壊食を引き起こす場合がある。この壊食状況の予測は信頼性向上

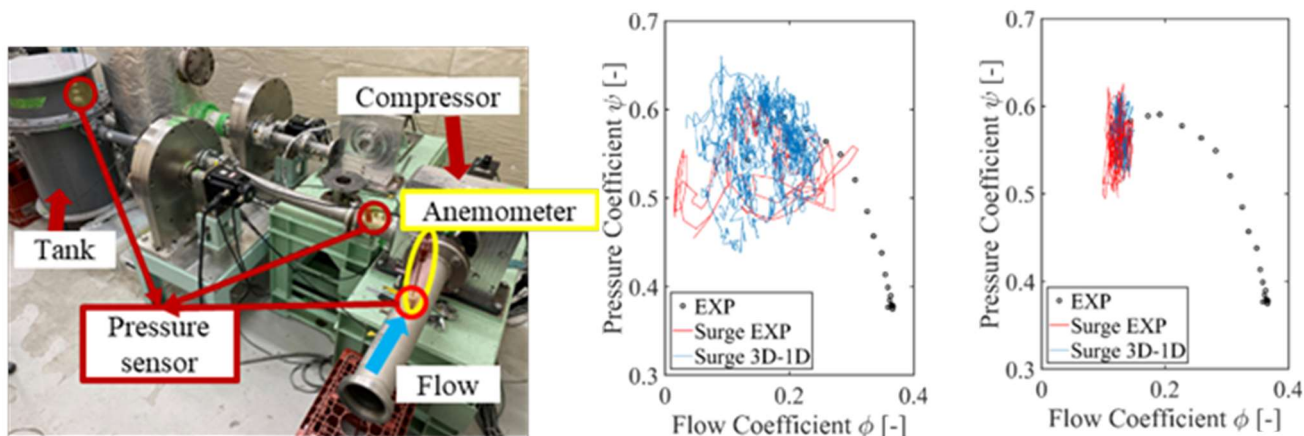


図7 過給機用圧縮機試験装置とディープサージ、マイルドサージ発生時挙動

に重要であるが、解析による予測は極めて難しく、流体側からは微小気泡の崩壊力の、材料側からは壊食進行プロセスのモデル化が必要である。図 8 に、キャビテーション壊食の試験を磁歪試験装置で実施したときに試験片に生じるキャビテーション壊食の様子を、キャビテーションを生じさせるホーンの振幅をパラメータとして示しており、また、図 9 には、一定時間に磁歪試験で生じるキャビテーション気泡の崩壊個数と、壊食強さの関係を示している。ある閾値以上（塑性変形域）で壊食が生じていた。その他、本プロジェクトでは、固液二相流の現象把握も実施している。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、ポンプを含んだ流れと固体粒子や紐、布などの挙動を定性的に予測することが可能となった。



図 8 キャビテーション壊食の発生状況と崩壊力計測センサ

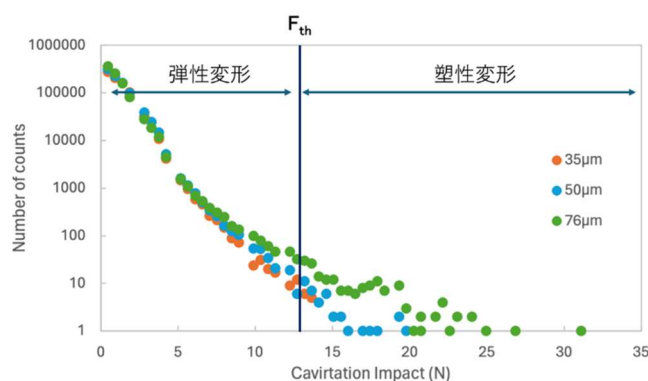


図 9 気泡崩壊力を個数の関係

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タンネル、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。キャビテーションタンネルでは、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。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。今年度も従来に引き続き、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 10 に磁気軸受を用いたティルティングパッド軸受の静特性、動特性試験装置および軸受部の概要および解析によるパッド表面の圧力分布、軸方向の圧力分布を示す。本研究により流体、構造系の振動問題、安定性評価などを進めるとともに、軸受、シールを含むロータ系の安定性向上を目指す。

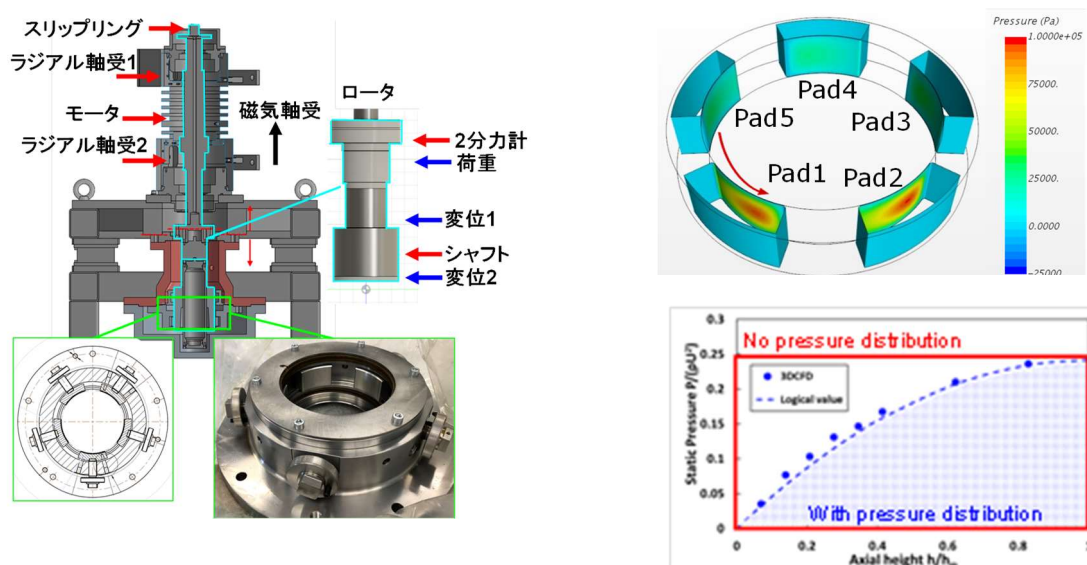


図 10 ティルティングパッド軸受試験装置（磁気軸受）およびパッド表面の圧力分布

3. 共同研究者

片山雄介（基幹理工学部・講師（任期付））

入江達也（基幹理工学部・助手）

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) Reduction of Disk Friction Loss by Applying a Fin to the Back of a Centrifugal Impeller, Satoshi Maed, Takeshi Sano, Kazuyoshi Miyagawa, Kento Sakai, Journal of Fluids Engineering 146(7):1-34. DOI:10.1115/1.4065047, March 2024

4.2 発表（査読付国際学会論文）

- (1) The Development of a New-Type Hydro Turbine Capable of Offering High Efficiency and Stable Flow at Part-load and Full-load Operation, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, 3rd Asian Workshop on Hydraulic Machinery, Seoul, 2024.1
- (2) Two-Way Coupled FSI Simulation of Flat Plate Hydrofoil Flutter, Satoshi Ukai, Keita Yamamoto, Hideyo Negishi, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, International Gas Turbine Congress 2023, Kyoto, 2023.11
- (3) CFD verification of total pressure loss coefficient for gas-liquid two-phase flow, Takuma Kawahara, Caining Feng, Yusuke Katayama, Kazuyoshi Miyagawa, The 17th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM17), Zhenjiang, China, 2023.10
- (4) Frictional pressure drop of two-phase flow in a horizontal tube under low void fraction, Caining Feng, Kazuyoshi Miyagawa, Takuma Kawahara, Yusuke Katayama, The 17th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM17), Zhenjiang, China, 2023.10
- (5) Application of CFD Analysis with Fluid-structure Intersection for Static and Dynamic Characteristics of Tilting-Pad Journal Bearing, Yamato kobayashi, Kento sakai, Shota

Yoshida, Hideaki Kawaguchi, Hikaru Masuda, Kazuyoshi Miyagawa, The 9th International Tribology Conference, 2023.9

- (6) Behavior of Flow Instability at low Flow Rate Under Pulsating Flow Of an Automotive Turbocharger Compressor, Taishi Matsumoto, Genshu Kawana and Kazuyoshi Miyagawa ,ISTP-33, Kumamoto, 2023.9
- (7) Discriminations and Transition Model Validation of Laminar-Turbulent Transition on a Clark Y Hydrofoil, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division AJKFED 2023, Osaka, 2023.7
- (8) Reduction of Disk Friction Loss by Applying a Fin to the Back of a Centrifugal Impeller, Satoshi Maeda, Takeshi Sano, Kazuyoshi Miyagawa, Kento Sakai, ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division AJKFED 2023, Osaka, 2023.7
- (9) Evaluation of the effect of nozzle clearance on turbine performance in turbocharger VG turbines, Kazuyoshi Miyagawa, Takaaki Nigorikawa, Ryo Nishimura, ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division AJKFED 2023, Osaka, 2023.7
- (10) Effect of impeller's wake on unsteady loss in a vaned diffuser, Takeshi Sano, Satoshi Maeda, Akiha Shibata, Kazuyoshi Miyagawa, Kota Kizu, Naoya Oba, ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division AJKFED 2023, Osaka, 2023.7

4.3 発表

発表(国内)

- (1) 「広範囲な運転性能に優れたフランシス水車ランナ設計の特徴」玉田洋一朗, 入江達也, 李洛中, 片山雄介, 宮川和芳, 日本機械学会関東支部第 30 期総会講演会, 東京, 2024 年 3 月
- (2) 「小水力発電向けの異常兆候検知システムの構築および検証」木津孝太, 峯苦祐樹, 宮川和芳, 日本機械学会関東支部第 30 期総会講演会, 東京, 2024 年 3 月
- (3) 「バランスホール内部流動特性をふまえた遠心羽根車における軸スラスト評価」吉田将太, 小林大和, 阪井健人, 陸亨(IHI), 塚野徹(IHI), 坂東佳祐(IHI), 宮川和芳, 日本機械学会関東支部第 30 期総会講演会, 東京, 2024 年 3 月
- (4) 「バランスピストン機構を有する同翼形状のオープン／クローズドインペラにおける軸スラスト特性及び性能評価」小林大和, 阪井健人, 吉田将太, 川崎聡(JAXA), 宮川和芳, 日本機械学会関東支部第 30 期総会講演会, 東京, 2024 年 3 月
- (5) 「ターボポンプタービンマニフォールドによる流れのディストーションの解明」濁川堯明, 山本啓太 (JAXA), 鶴飼諭史(JAXA), 根岸秀世(JAXA), 宮川和芳(早大), 日本機械学会関東支部第 30 期総会講演会, 東京, 2024 年 3 月
- (6) 過給機 VG タービンにおけるノズルクリアランスがタービン性能に与える影響評価」片山雄介, 松本大志, 濁川堯明, 李佩澤, 宮川和芳, 2023 九州北部 ANSYS-CFX コンソーシアムミーティング, 福岡, 2023 年 12 月
- (7) 「水中翼表面への化学コーティング・微細加工による濡れ性付与とキャビテーションの関係」塩川瑛士, 入江達也, 阪井健人, 寺嶋真伍, 岩瀬英治, 宮川和芳, 第 10 回 ZAIKEN Festa, 2023.10
- (8) 「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」宮川和芳, 佐藤哲也 (早稲田大), 能見基彦 (荏原), 伊賀由佳 (東北大), 伊藤優那 (東大), 渡邊聡, 津田伸一 (九大), 田中禎一 (熊本高専), 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月

- (9) 「液体窒素用ポンプ試験装置の設計および構築」 阪井健人, 大場直哉, 木津孝太, 小林大和, 吉田将太, 児玉一騎, 楊倫一朗, 宮川和芳, 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月
- (10) 「作動流体の違いによるターボポンプ非定常内部流れの比較」 大場直哉, 阪井健人, 木津孝太, 宮川和芳, 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月
- (11) 「軸流ポンプの異物流入による性能への影響の検討」 川原拓真, 宮川和芳, 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月
- (12) 「ターボポンプタービンのインレットディストーションに関する研究」 山本啓太, 鵜飼諭史 (JAXA), 西村凌, 濁川堯明, 宮川和芳, 根岸秀世 (JAXA), 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月
- (13) 「インペラカットによる内部流れ変化が右上がり特性へ与える影響」 川原拓真, 宮川和芳, 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月
- (14) 「損失モデルを適用した自動車用過給機の性能予測手法の構築」 嶋根海斗 (千葉大学), 窪山達也 (千葉大学), 山田敏生 (サステナブル・エンジン・リサーチセンター), 森吉泰生 (千葉大学), 宮川和芳, 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月
- (15) 「過給機 VG タービンにおけるノズルクリアランスがタービン性能に与える影響評価」 松本大志, 濁川堯明, 李佩澤, 宮川和芳, 第 89 回ターボ機械協会創立 50 周年記念学術講演会, 東京, 2023 年 9 月
- (16) 「ティルティングパッドジャーナル軸受の静特性、動特性の解析と実験」 小林大和, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2023, v_Base フォーラム, 名古屋, 2023 年 8 月
- (17) 「円筒ディフューザ内における流動不安定現象の抑制方法及び動特性の評価」 木津孝太, 津田谷和英, 中嶋和志, 宮川和芳, (早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ノ最適化設計) 永田駿介, 李洛中, 入江達也, 宮川和芳, 第 88 回ターボ機械協会総会講演会, 福岡, 2023 年 5 月
- (18) 「極低温流体数値解析を通じた各種流体間でのターボポンプ損失特性の比較」 大場直哉, 木津孝太, 植田晃仁, 中嶋和志, 阪井健人, 宮川和芳, 第 88 回ターボ機械協会総会講演会, 福岡, 2023 年 5 月
- (19) 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 10 月
- (20) 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 10 月

4.4 総説・著書

- (1) 国立研究開発法人科学技術振興機構編、研究開発の俯瞰報告書/環境エネルギー分野/水力発電、海洋発電 (2023 年) 2023 年 4 月
- (2) NEDO 水素・燃料電池成果報告、水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/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, 2023 年 4 月

- (3) 一般社団法人ターボ機械協会編、ターボ機械 50 年の系譜と将来の展望、2023 年 9 月

4.5 招待講演

- (1) 水力電気技術研究発表会「再生可能エネルギー導入に向けた水車の課題と対策、今後の水力への期待」、関西電力、2024 年 3 月

4.6 受賞・表彰

- (1) 早稲田大学理工学術院総合研究所第 13 期アーリーバード成果報告会 プレゼンテーション優勝賞 D1 阪井健人 2024 年 3 月 8 日
- (2) ターボ機械協会 2023 年度技術賞「LE-9 エンジンターボポンプの開発」2024 年 5 月
- (3) ターボ機械協会第 89 回学術講演会 若手優秀講演賞阪井健人「液体窒素用ポンプ試験装置の設計および構築」2023 年 9 月
- (4) ターボ機械協会 50 周年記念講演会式典 チャレンジ大賞入江達也 2023 年 9 月
- (5) ターボ機械協会 50 周年記念講演会式典 チャレンジ大賞阪井健人 2023 年 9 月
- (6) 早稲田大学各務記念材料技術研究所主催第 10 回 ZAIKEN Festa 奨励賞塩川瑛士「水中翼表面への化学コーティング・微細加工による濡れ性付与とキャビテーションの関係」2023 年 10 月

4.7 プレス発表

なし

4.8 理工総研共催行事

ターボ機械協会第 90 回総会講演会 2024 年 5 月 17 日

4.9 学会および社会的活動

- (1) ターボ機械協会第 173 回セミナー講師、“水車”、2023 年 4 月 17 日
- (2) ターボ機械協会会長、創立 50 周年記念事業実行委員長
- (3) ターボ機械協会水力機械委員会委員長
- (4) 宇宙航空研究開発機構客員
- (6) 資源エネルギー庁揚水発電委員

5. 研究活動の課題と展望

今後の重要な課題であるカーボンニュートラル社会の実現、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、低コスト化を共同研究など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使用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。多くの課題や研究の実施により即応性のある社会実装を図ってきた。多くの実験設備、解析設備の導入によりニーズに適したシーズ構築の環境は整ってきた。特に、極低温流体や混相流体、流体構造連成研究の推進には解析、実験とも多くの困難があり、引き続き解決していく。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。