

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に、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、本プロジェクトのカーボンニュートラル社会達成のための活動内容を示す。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本の柱である。特に、発電用水車、液体水素用ポンプなどの研究開発は重要なテーマであり、図1には本プロジェクトの研究開発の成果を利用した水力発電プラントおよび液体水素ポンプや計測技術の開発に必要な液体窒素試験設備を示す。本プロジェクトでは、ポンプや水車の内部流れや気液二相流、固液二相流など混相流のポンプを含んだ実験、磁気軸受を用いた流体構造の連成問題、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水車、ポンプの閉塞挙動を予測可能とし、また、流体と構造の連成解析によりロケットターボポンプやティルティングパッド軸受の自励振動や強制振動も解析での検討を可能とした。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。流体機械システムの問題として、クローズドインペラの製造方法の検討を実施し、3D金属プリンタ技術の応用による羽根車の設計・製造に着手し、大学での実験用、実際の水力発電用の羽根車を製作した。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、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、多くの社会実装を達成した。特に、優良な再生可能エネルギーである水車に関しての研究を継続して実施していて、研究開発の成果を青森県、長野県、和歌山県向けのフランシス水車として構築し、運転を開始した。廃棄エネルギー回収用単相流縦軸クロスフロー水車の開発も流動解析を駆使して実施し模型試験により性能を確認した。地球温暖化による水害の増加に対応する排水用ポンプも大流量化設計を終えて模型試験により性能の確認を行った。また、本プロジェクトで

カーボンニュートラルの達成と安全・安心の社会に向けてに**産学官連携**で**水と水素に関わる研究を実施しています。**

基幹ロケットターボポンプ(液体水素)開発で培った技術を利用して水素社会の構築に貢献しています。(NEDO、JAXA、重工業メーカー、計装メーカー)

優良な再生可能エネルギー(設備稼働率70%)である水力タービンの開発をしています。※風力20%、太陽光12%(国、地方自治体、電力会社、水車メーカー)

エネルギーを大量に使用しているポンプの性能を向上させ、エネルギー消費の削減を図っています。(ポンプメーカー、モータ発電機メーカー)

所在地	出力 kW	落差 m	運転開始または有水	特徴
山梨県	172	86	2014/12	シュラウド無しフランシスランナ
千葉県	132	42	2018/10	低稼働ランナへの取替
大韓民国	53000	51.3	2021	高比速度フランシス水車
秋田県	49	47.4	2021/12	新型フランシス水車
秋田県	57	8.1	2022/10	軸流水車
大分県	1500	122.0	2023	低稼働ドラフトフランシス水車
青森県	190	90	2023	AI異常診断、フランシス水車
長野県	196	56.4	2024/11	新型フランシス水車
和歌山県	96	37.3	2025/2	3DAMスプリットランナ

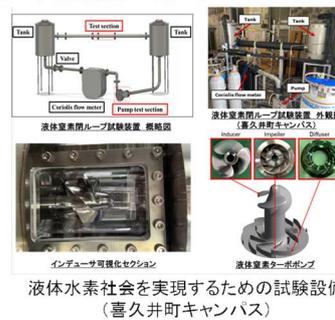


図1 カーボンニュートラル達成のための研究活動

は、新たに液体水素ターボポンプの開発を開始し、インデューサの模型試験により性能確認を実施した。その他、気液二相流ポンプの性能低下メカニズムの解明や水中翼の流体関連振動問題、圧縮機のサージの制御、熱交換器管群の流体励振低減などの研究も実施し良好な成果を得た。これら技術を上述の社会インフラ開発に転用していく。国立研究法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」(NEDO) から「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業／総合調査研究／液化水素流体機械・機器の性能評価に関連する標準化・ガイドライン策定の課題整理に係る調査」を受託し、産学連携で液体水素インフラの標準化、ガイドラインの調査を実施している。

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

カーボンニュートラル社会の実現に向けて地球温暖化を抑制するエネルギー改革を早急に実現する必要があり、水素やアンモニアの多くの各種研究開発が実施されている。この中で、液体水素は水素ガスの約 800 分の 1 の容積となりエネルギーキャリアとして有望である、一方、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の構築が必要である。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。本プロジェクトでは、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の熱力学的効果、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、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構築、および、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

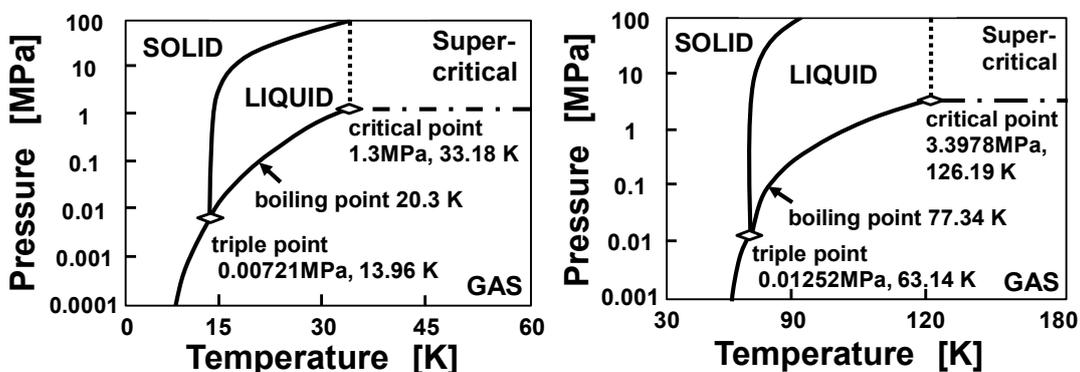


図 2 液体水素（左）、液体窒素（右）の状態線図

ループとターボポンプを用いた。図4に、本試験装置により得たポンプの性能カーブを示す。また、液体窒素を用いた実験によりインデューサのキャビテーションの可視化をすることができ、水とは異なるキャビテーションの状態を明らかにした。

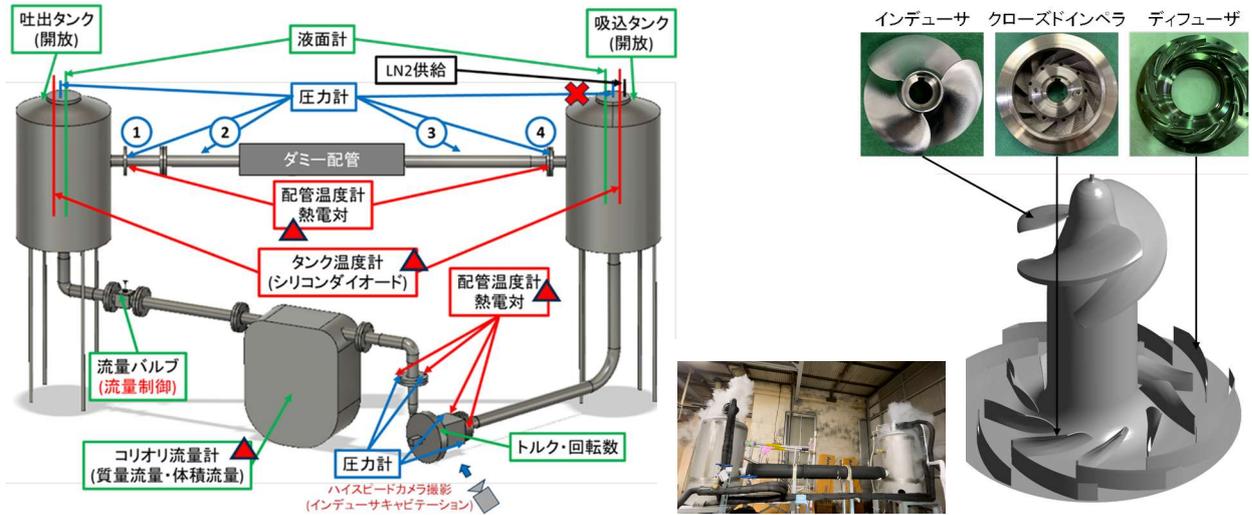


図3 液体窒素試験装置とポンプ回転部

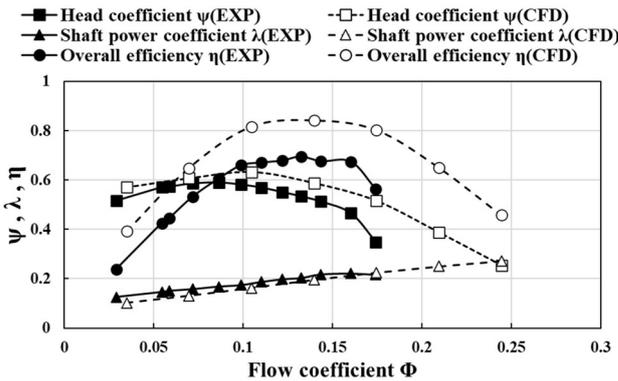


図4 液体窒素ポンプの試験結果（左：性能試験結果、右：インデューサキャビテーション）

2.2 中小水力発電用水力タービンの開発

2.2.1 運転範囲の極めて広い新型水車の開発と実用化

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、その役割を担うための更なる高効率化と運転範囲の拡大およびコスト低減を狙った水車の開発を実施した。本年度は、開発をしてきた200kWの新型水車の実機製造を実施、2024年度に運転を開始した。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単相流クロスフロー水車の開発にも着手し、模型試験により性能を確認した。

また、低圧力脈動のドラフトチューブを適用した200kWの横軸フランシス水車も運転を開始し

た。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、この水車の状態監視を実施中である。小容量水車のランナ（羽根車）はクロズドの場合製作が非常に困難であるが、世界で初めて 3D 金属プリンタ製水車



図5 新型水車（長野県豊丘発電所）



図6 3DAM 製フランス水車

の開発を行い実機運転を開始した。材料はインコネルを用いたが、キャビテーションエロージョンに対しては、従来のステンレス鋼と比較して著しく耐性があることが、エロージョンの要素試験によりわかった。また、この水車には、異物の閉塞を抑制するために中小容量水車では例がないスプリッター付きランナの開発も実施した。

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。圧縮機やポンプで発生する可能性があるサージンは、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に過給機用圧縮機の試験装置とサージンの発生状況を示す。今年度はサージンをモータの回転数制御で抑制する手法を開発してきた。図中には大きなサージ（ディープサージ）の挙動と制御により抑制した結果を示す。

水車やポンプで発生するキャビテーションは、性能低下のみならず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

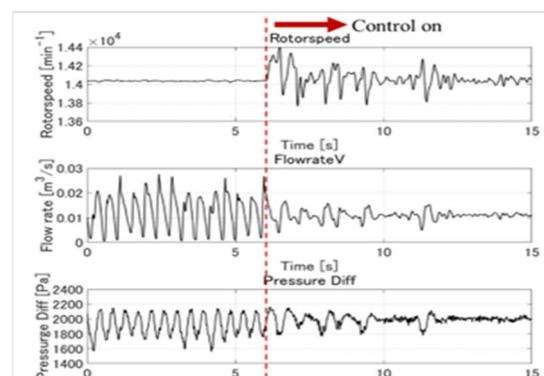
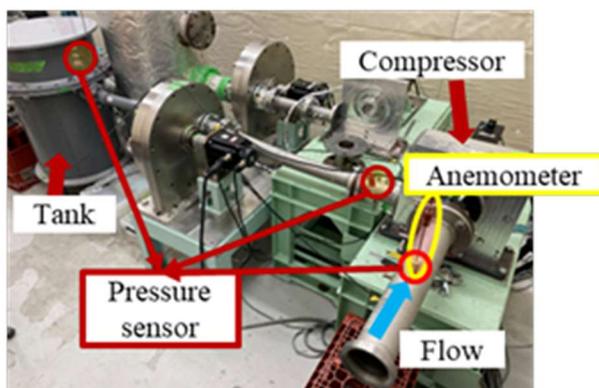


図7 過給機用圧縮機試験装置とサージ制御挙動

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、キャビテーション挙動の予測技術の構築や、流動不安定のメカニズムを明確にし、抑制条件を明らかにしてきた。図 8、9 に流動解析によるポンプのキャビテーション予測とキャビテーションサージの様子を示す。キャビテーションサージは管路システムによる影響を含める必要があり今年度は、配管系を 1 次元でベンチュリーを 3 次元でシミュレーションし精度良い挙動予測を実現できた。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。

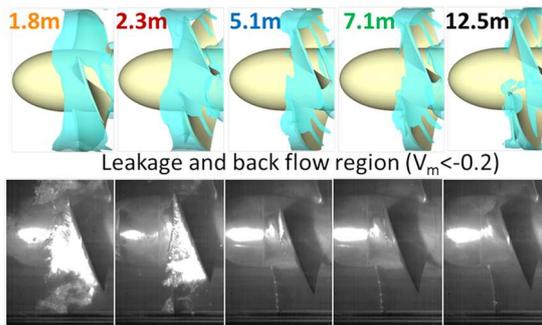


図 8 ポンプのキャビテーションの発生状況

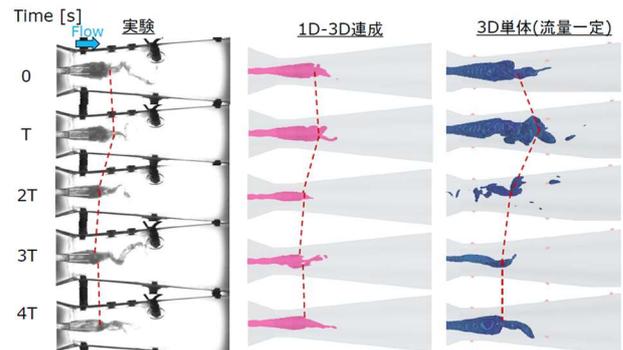


図 9 キャビテーションサージの実験と解析

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、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水槽試験、流動-構造の連成解析により水中翼振動の予測を実施、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ている。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バランスピストンの構成図、およびキャビテーション発生領域、軸方向推力のキャビテーション係数の違いによる変化を示す。その他、今年度から磁気軸受および流体、構造連成解析を用いたシール励振力の評価、軸方向の振動を抑制するバランスピストンの最適設計と実験の計画を実施した。

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している。

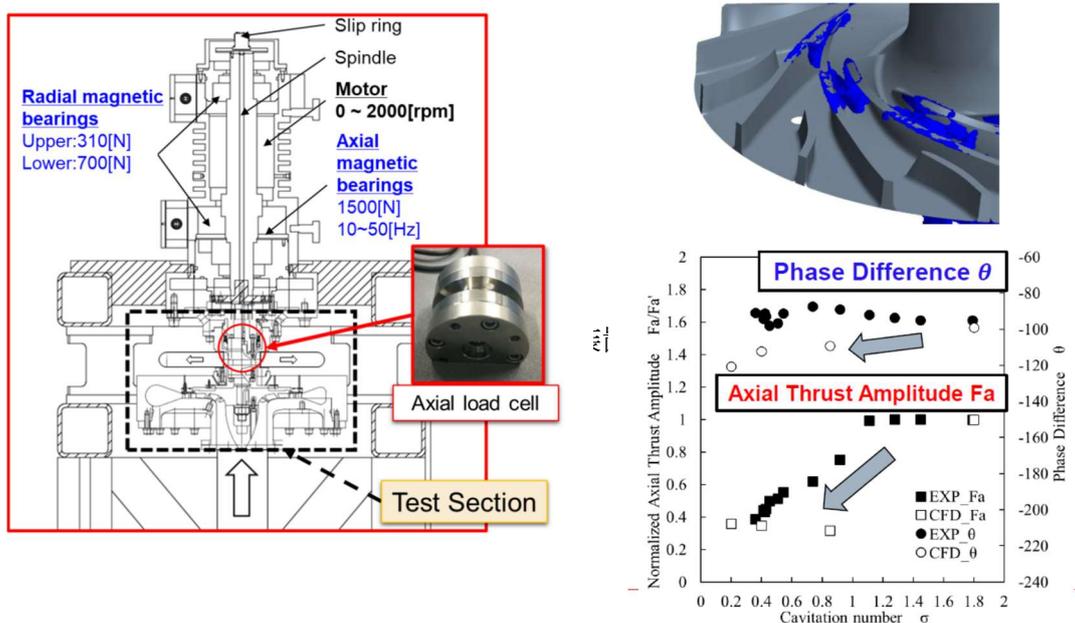


図 10 バランスピストン試験装置 (磁気軸受) およびオープンインペラのキャビテーション

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)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) 阪井健人、大場直哉、河島巖、宮川和芳、高精度性能計測・可視化機能を備えた液体窒素用遠心ポンプ閉ループ試験設備の設計構築と評価、ターボ機械、採録決定
- (2) © Kento Sakai, Kazuyoshi Miyagawa, Alessandro Mariotti, Angelo Pasini, Prediction of static characteristics of cryogenic hybrid journal bearing for reusable pump-fed liquid rocket engine by computational fluid dynamics simulation, *Physics of Fluids*, Volume 37(3): 035189, 2025, <https://doi.org/10.1063/5.0256908>
- (3) Satoshi Maeda, Takeshi Sano, Kazuyoshi Miyagawa, Kento Sakai, Reduction of Disk Friction Loss by Applying a Fin to the Back of a Centrifugal Impeller, *ASME Journal of Engineering*, No.146, Vol.7: 071107, 2024, <https://doi.org/10.1115/1.4065047>
- (4) Shunsuke Nagata, Yoichiro Tamada, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, Investigation on Design Parameters of a Francis Turbine Runner for Optimization based on 3-D Inverse Design Method, *Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2024*, 2024, <https://doi.org/10.1115/FEDSM2024-130904>
- (5) Kento Sakai, Yamato Kobayashi, Shota Yoshida, Kazuyoshi Miyagawa, Satoshi Kawasaki, 3D-CFD Analysis of Axial Thrust Acting on Unshrouded Impeller with Balance Piston in the Liquid

Hydrogen Turbopump, Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2024, 2024, <https://doi.org/10.1115/FEDSM2024-121753>

- (6) Yuki Minetoma, Yuki Kondo, Kazuyoshi Miyagawa, Takeshi Sano and Junichi Suematsu, Evaluation of Clogging Potential Prediction Methods in Axial Flow Waterjet Pumps with CFD-DEM, Journal of Physics: Conference Series, Vol.2854: 012038, DOI: 10.1088/1742-6596/2854/1/012038
- (7) Peize Li, Yusuke Katayama and Kazuyoshi Miyagawa, Investigation of Surge Phenomena in a Centrifugal Compressor by 3D-1D Coupling Approach, Journal of Physics: Conference Series, Vol.2854: 012115, DOI:10.1088/1742-6596/2854/1/012115
- (8) T. Kawahara, C. N. Feng, K. Miyagawa, Y. Katayama, CFD verification of total pressure loss coefficient for gas-liquid two-phase flow, Journal of Physics: Conference Series, Vol.2707: 012144, DOI:10.1088/1742-6596/2707/1/012144
- (9) C. N. Feng, K. Miyagawa, T. Kawahara, Y. Katayama, Frictional pressure drop of two-phase flow in a horizontal tube under low void fraction, Journal of Physics: Conference Series, Vol.2707: 012142, DOI:10.1088/1742-6596/2707/1/012142

4.2 発表 (査読付国際学会)

- (10) Kazuyoshi Miyagawa, Simulation and verification of the behavior of solids in turbomachinery internal flow using CFD-DEM coupling analysis, 4th Asian Workshop on Hydraulic Machinery, 2025.1
- (11) Taisei Shimoda, Naomichi Jinbo, Kotaro Shimada, Ryoji Kobayashi, Yuki Sakamoto, Kento Sakai, Naoya Oba, Kazuyoshi Miyagawa, Tetsuya Sato, Development of All-Metal Capacitive Void Fraction Sensor for Cryogenic Two-Phase Flow, 16th International Space Conference of Pacific-basin Societies (ISCOPS), Japan, 2024.11
- (12) Tatsuya Irie, Yusuke Katayama and Kazuyoshi Miyagawa, A Volute-Equipped Hydro Turbine for Flexible Operation from Deep Part-Load to Full-load, 22nd International Seminar on Hydropower Plants, Vienna, 2024.11
- (13) Kento Sakai, Naoya Oba and Kazuyoshi Miyagawa, Development and Evaluation of Cryogenic Turbopump Testing Apparatus: Integrated Pump Performance Measurement and Cavitation Visualization in Liquid Nitrogen Pump with Inducer, 34th International Symposium on Transport Phenomena, Taoyuan, 2024.11
- (14) Kento Sakai, Kazuyoshi Miyagawa, A. Mariotti and A. Pasini., CFD Performance Prediction of Cryogenic High-speed Bearings for Reusable Pump-fed Liquid Rocket Engines, 75th International Astronautical Congress, Milan, Paper.86927, 2024.10
- (15) Shunsuke Nagata, Yoichiro Tamada, Tatsuya Irie, Kazuyoshi Miyagawa, Investigation on Design Parameters of a Francis Turbine Runner for Optimization based on 3-D Inverse Design Method, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2024, Anaheim, Paper.130904, 2024.07.
- (16) Kento Sakai, Yamato Kobayashi, Shota. Yoshida, Kazuyoshi Miyagawa, Satoshi Kawasaki, 3D-CFD Analysis of Axial Thrust Acting on Unshrouded Impeller with Balance Piston in the Liquid Hydrogen Turbopump, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2024, Anaheim,

Paper. 121753, 2024. 07

- (17) Tatsuya Irie, Eiji Shiokawa, Yusuke Katayama and Kazuyoshi Miyagawa, The interaction mechanisms between flutter and cavitation types on a flat-plate hydrofoil, Cavitation Symposium 2024, Chania, 2024. 6
- (18) Yuki Minetoma, Yuki Kondo, Kazuyoshi Miyagawa, Takeshi Sano and Junichi Suematsu, Evaluation of Clogging Potential Prediction Methods in Axial Flow Waterjet Pumps with CFD-DEM, The 8th International Conference on Pumps and Fans, China, Paper. 012038, 2024. 4
- (19) Peize Li, Yusuke Katayama and Kazuyoshi Miyagawa, Investigation of Surge Phenomena in a Centrifugal Compressor by 3D-1D Coupling Approach, The 8th International Conference on Pumps and Fans, China, Paper. 012115, 2024. 4

4.3 発表（国内学会）

- (20) 李佩澤、梅田聖嗣、宮川和芳(早稲田大学)、自動車用過給機コンプレッサの脈動流下におけるサージラインの特徴、日本機械学会第102期流体工学部門講演会、長岡、2024年11月
- (21) 楊倫一朗、阪井健人、大場直哉、宮川和芳、ベンチュリ管内部で生じる臨界点近傍における窒素物性挙動の予測、日本機械学会第102期流体工学部門講演会、長岡、2024年11月
- (22) 大場直哉、阪井健人、児玉一騎、楊倫一朗、宮川和芳、鈴木竜太、液体窒素中インデューサにおけるキャビテーションの数値流体解析と検証、第91回ターボ機械協会地方講演会、熊本、2024年9月
- (23) 玉田 洋一朗、入江 達也、永田駿介、大貝 直輝、宮川 和芳、ポリュート付き新型フランス水車におけるランナ内部流れの評価、第91回ターボ機械協会地方講演会、熊本、2024年9月
- (24) 玉田洋一朗、入江達也、大貝直輝、鈴木敏暁、宮川和芳、杉本隆幸、長沼翼、大きな変落差、変流量対応のポリュート付き水車の開発、第90回ターボ機械協会総会講演会、東京、2024年5月
- (25) 児玉一騎、木津孝太、中島峻浩、榎本保之、宮川和芳、1D-3D 連成解析によるキャビテーション不安定現象の予測精度向上に向けた取り組み、第90回ターボ機械協会総会講演会、東京、2024年5月
- (26) 村上颯聖、宮川和芳、安藤翼、キャビテーション崩壊に伴う衝撃力計測、第90回ターボ機械協会総会講演会、東京、2024年5月

4.4 総説・著書

なし

4.5 招待講演

- (27) ©Kazuyoshi MIYAGAWA, Contribution of Fluid Machinery to Achieving Carbon Neutrality ~Research and Development of Cryogenic Fluid Machinery~, 2024 KSFM Winter Conference, 4 December 2024, Juju Korea
- (28) ©Kazuyoshi MIYAGAWA, Characteristics and internal flow of automotive turbocharger turbines and compressors under pulsating flow- Synergies with pump and turbine research -, the 8th International Conference on Pumps and Fans, 13 April 2024, Yangzhou, China

- (1) ◎宮川和芳、カーボンニュートラル社会達成に向けての水力発電の役割、令和6年度長野県第1回小規模水力発電研究会、2024年6月24日、長野市
- (2) ◎宮川和芳、カーボンニュートラル・安全安心で便利な社会達成のための流体機械の紹介、永楽倶楽部第61回先進技術研究会、2024年10月29日、東京
- (3) ◎宮川和芳、地域のための小水力発電推進セミナー～地域に貢献する持続可能な小水力発電の可能性～「地域に適した小水力発電機器の開発について」、全国町村会、ダム・発電関係市町村全国協議会、2025年2月20日、東京
- (4) ◎宮川和芳、中小水力発電普及のための水力タービン技術と適用事例の紹介、第19回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム(RE2025)、2025年1月28日、東京

4.6 受賞・表彰

- (1) 部門賞 宮川和芳, 日本機械学会 第102期流体力学部門講演会, 2024年11月
- (2) Best Student's Presentation Award Kento Sakai, the 34th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-34), November, 2024
- (3) 若手優秀講演賞 玉田 洋一郎 (M2), ターボ機械協会第91回学術講演会, 2024年9月
- (4) 若手功労賞 ターボ機械協会第91回学術講演会, 2024年9月
- (5) 小宮功労賞 ターボ機械協会第91回学術講演会, 2024年9月
- (6) 若手優秀講演賞 村上 颯聖 (M1), ターボ機械協会第90回学術講演会, 2024年5月
- (7) 若手優秀講演賞 児玉 一騎 (M1), ターボ機械協会第90回学術講演会, 2024年5月
- (8) 感謝状 H3ロケット試験機2号打ち上げ, 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, 2024年5月

4.7 プレス発表

- (1) 日刊工業新聞 関電、3D造形で水力部品 2025年3月13日
- (2) 電気新聞 水車ランナ3Dで関西電力四村川水力 検証運転を開始 2025年4月

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(金)
- ターボ機械協会特別会員交流会 2025年3月14日(金)

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

4.10 学会および社会的活動

1. 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。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。