

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・航空学科 教授)

1. 1 研究課題

水力ターボ機械システムは、安定で枯渇のない優良な再生可能エネルギー源である水力タービン、推進機として重要な役割を担うロケットターボポンプや船舶ジェットなどの推進機、生活インフラとして不可欠な上下水道用ポンプ、洪水対策用ポンプなどに使用されている。本研究では、それらの水力ターボ機械システムに関して流体力学、ロータダイナミクスを基礎とした要素研究、開発研究を実施し、性能、信頼性の改善を達成する。本年度は昨年度に引き続き、水力ターボ機械の重要な問題である最適設計による水力機械の性能向上、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と流体、構造連成問題に基づく信頼性向上の解明を実施した。また、研究代表者が会議の議長を務めた2年毎に実施される国際水理学会水力機械委員会の大きなシンポジウムを京都で開催し、最大の参加人数となった。

2. 主な研究成果

2.1 水力機械の新しい設計コンセプトを用いた運転範囲の拡大、効率向上

水力機械の高性能化には、効率向上と運転範囲の拡大が有り、両者共重要なテーマである。特に、水力タービンの運転範囲の拡大は太陽光発電、風力タービンなどの不安定電源に対するエネルギーストレージの役割を担うことができ有用である。また、本年度も昨年度に引き続き、多くの水力タービンおよびポンプの高効率下に取り組み、成果を得た。

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んだ。図1に開発した新型水力タービンの形状を示す。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30%以下の低流量からの運転を可能とするコンセプトを構築、詳細設計を実施した。この水力タービンは、県の既設水力発電所に設置され発電を行うように計画されている。水力タービンに関しては、電力会社の既設10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、一昨年度、昨年度に引き続き30プラント目であり、多くのデータベースの構築に貢献した。メーカーからの依頼では、プロペラタービンの開発を実施し、目標の効率であることを確認した。このプロペラタービンの開発では、負荷（発電機、制御系）として自動車のハイブリッドユニットを用いることで初期コストの低減を図る小水力を可能とした。他に中比速度のフランシスタービンの高性能化に取り組む、高効率化を達成した他、フランシス水車の設計の標準化にも取り組み自動設計の指針を得た。また、ドラフトチューブ内分流れの計測にPIVを用いて実施し、解析結果の検証に用いた結果、両者の良い一致を見た。

ポンプの開発は、多くの機種を手がけている。JAXAおよびメーカーとは次世代のロケットターボポンプ羽根車の高性能化についての取り組みを実施し、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。メーカーとの船舶推進用ポンプの開発を実施し、模型試験で効

率アップを達成した。実海での試験結果により定常性能については大幅な効率向上を確認できたが、加速性能については従来のポンプ性能に及ばず、詳細なキャビテーションによる性能低下のメカニズムを検討中である。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を図ることができる形状を見出し、模型試験による検証を実施中である。

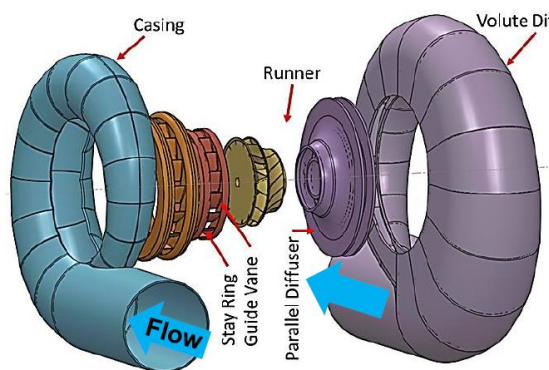


Fig. 1 新型水カタービン形状

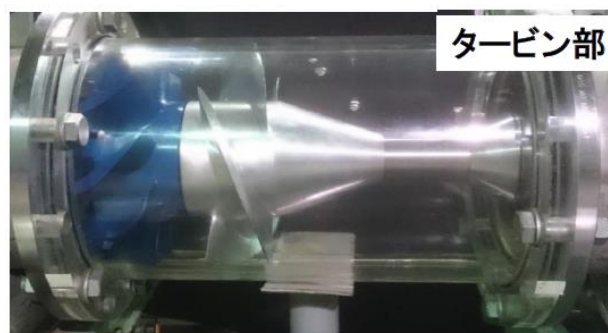


Fig.2 HV ユニットを負荷とするプロペラ水車

2.2 水力機械での流動不安定の予測と評価

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、昨年度に引き続きキャビテーション水槽、翼列試験装置を用いて、その励振力の減衰特性を把握し、また、撥水、親水コーティングの効果についてキャビテーションの初生、生長の影響を明確にした他、LDV 計測による翼面近傍の速度分布を詳細に計測することに成功し、コーティングの差異による摩擦損失の差も明確にした。また、海洋技術安全研究所との共同研究により大型プロペラで懸念されるフラッター特性の評価を実施した。特に、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。

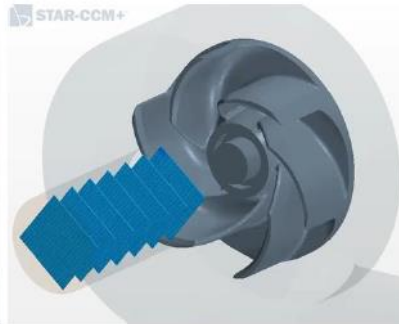
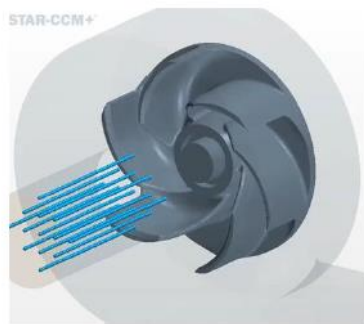
メーカーとの上下水道ポンプの開発においては、紐や布などの異物の翼間流路への閉塞が問題となるが、要素、ポンプ実験および CFD と個別粒子法 (DEM) の連成解析を用いて、異物通過のシミュレーションを可能とすることにより、ポンプおよび水カタービンの異物通過性の評価を可能とした。今年度は、特に中小水カタービンで問題となる葉っぱの異物通過シミュレーションを実施し、良いしにゅレーション結果を得た。

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。

低比速度ポンプ、水カタービンで問題になる円板摩擦の損失に関しては、数ミリメートル以下の狭い隙間における回転円板、静止円板間の流れを流動解析により求め、また、単焦点の LDV (レーザードップラ流速計) を用いて計測した結果、両者の良い一致を見た。今後、この部分の損失低減のための形状検討を実施してゆく。

Strings & clothes motion in a pump



String motion in a Francis turbine

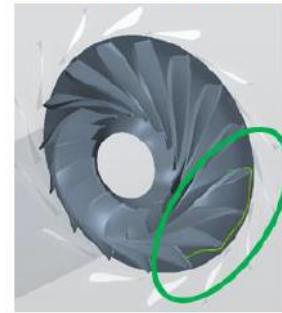


Fig.3 異物通過性シミュレーション（ポンプと水車）

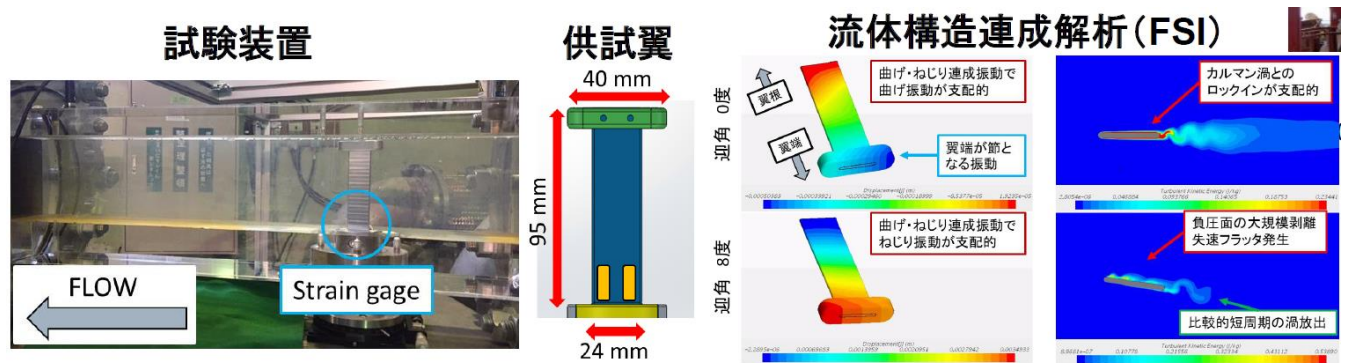


Fig.4 キャビテーション流下におけるフラッター特性の評価

3. 共同研究者

平田 邦夫（理工総研・客員上級研究員）

斉藤 純夫（理工総研・客員上級研究員）

Lee Nakjong （基幹理工学研究科・次席研究員）

Favrel Arthur Tristen （理工総研・次席研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

4.2 の ASME, IAHR 発表内容が IOPconference シリーズに掲載済み.

4.2 発表（国際）

(1) Asuma Ichinose, Norio Kimura, Mamiko Yoshimura, Tomoyuki Hayashi, Kazuyoshi.Miyagawa、 INVESTIGATION OF INTERACTION BETWEEN TIP LEAKAGE FLOW GENERATED BY UNSHROUDED IMPELLER AND DIFFUSER INTERNAL FLOW、 ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Conference, Montreal, July 2018

(2) Yohei Nakamura, Manato Chinen, Masamichi Sakakibara, Kazuyoshi.Miyagawa、 INFLUENCE OF PULSATING FLOW ON TURBINE PERFORMANCE INVESTIGATED BY DES AND PIV、 ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Conference, Montreal,

July 2018

- (3) Yamato Imasaka, Hitoshi Kanno, Sumio Saito, Kazuyoshi Miyagawa, Motohiko Nohmi, Miho Isono, Masahito Kawai, Clogging Mechanisms of Vortex Pumps: Fibrous Material Motion Capture and Simulation with a CFD DEM Coupling Method, ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Conference, Montreal, July 2018
- (4) Gabriel Taillon, Kaoruko Onishi, Sumio Saito, Kazuyoshi Miyagawa, Stochastic processes to model impact events in a vibratory cavitation erosion apparatus, 10th International Symposium on Cavitation, Baltimore, December 2018
- (5) Kazushi Ajiro, Kunimasa Matsuda, Kaoruko Onishi, Kazuyoshi Miyagawa, Verification Fluid Exciting Force due to Flutter and Rotor-Stator Interactions of an Axial Flow Turbine, Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, Yokohama, June 2018
- (6) Zhihao Liu, Kazuyoshi Miyagawa, Kyoza Kasahara, Hiroyuki Aoki, Performance Improvement of Francis Turbine in a Small Hydro by Exchange a Runner, Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, Yokohama, June 2018
- (7) W Takahashi, M Shinji, Z H Liu, K Miyagawa, Yoshiichiro Hayashi, Design optimization of medium specific speed Francis turbines with unshrouded runners, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (8) Takamitsu AIDA, Yohei NAKAMURA, Kazuyoshi MIYAGAWA, Development of High-Efficiency and Low-Cost Unshrouded Turbine Runner for Small Scale Hydropower plant, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (9) Kazushi Ajiro, Kunimasa Matsuda, Kaoruko Onishi, Kazuyoshi Miyagawa, Fluid exciting force due to flutter and rotor-stator interactions in axial flow turbines, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (10) G Taillon, K Onishi, T Mineshima, Kazuyoshi Miyagawa, Statistical analysis of cavitation erosion impacts in a vibratory apparatus with copulas, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (11) G Taillon, S Saito, Kazuyoshi Miyagawa, C Kawakita, Cavitation erosion resistance of high-strength fiber reinforced composite material, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (12) T Hayashi, Y Nakamura, K Miyagawa, Design optimization of a low specific speed centrifugal pump with an unshrouded impeller for cryogenic liquid flow, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (13) Yamato Imasaka, Hitoshi Kanno, Kazuyoshi Miyagawa, Motohiko Nohmi, Motion prediction of foreign matter using a CFD-DEM method in Francis turbine for small and medium power stations, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (14) T Irie, M Shinji, W Takahashi, K Miyagawa, T Sugimoto, T Naganuma, R Waku, Proposal of a new hydraulic turbine capable of high efficiency operation over a wide range of flow rate and effective head, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018
- (15) Zhihao Liu, T Yukawa, Kazuyoshi Miyagawa, T Fahimi, M Tahani, Characteristics and

Internal Flow of a Low Specific Speed Pump used as a Turbine, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018

(16) Taisei Mineshima, Kaoruko Onishi, Kazuyoshi Miyagawa, Flow Field and Cavitation Characteristics of Hydrofoils Coated with Hydrophilic and Hydrophobic Polymers, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018

(17) Naruki Nitta, Satoshi Maeda, Kazuyoshi Miyagawa, Yasushi Shinozuka, Kotaro Kado, Shigeyuki Tomimatsu, Influence of Forward rake and skew blade angle on positive slope characteristics of mixed flow pumps, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018

(18) Ryutaro Ujiie, Asuma Ichinose, Yohei Nakamura, Kazuyoshi Miyagawa, Takeshi Sano, Influence of Clearance Flow on Disk Friction Loss in Low Specific Speed Hydraulic Machines, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, September 2018

(19) Masamichi Sakakibara, Yohei Nakamura, Kazuyoshi Miyagawa, CHARACTERISTIC AND UNSTEADY LOSS OF A TURBOCHARGER COMPRESSOR UNDER PULSATING FLOW, The 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29), Honolulu, November 2018

(20) Mamiko Yoshimura, Tomoyuki Hayashi, Asuma Ichinose, Norio Kimura, Satoshi Kawasaki, Junya Takida, Hiromichi Hiraki, Naohito Suwa, Kazuyoshi Miyagawa, STABILITY OF A BALANCE PISTON SYSTEM USED WITH AN UNSHROUDED IMPELLER, The 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29), Honolulu, November 2018

(21) Manato Chinen, Yohei Nakamura, Masamichi Sakakibara, Kazuyoshi Miyagawa, INVESTIGATION OF TURBOCHARGER CHARACTERISTICS BY FLOW VISUALIZATION USING PIV AND CFD ANALYSIS UNDER STEADY AND PULSATING FLOW, Turbocharging Seminar 2018, Shanghai, October 2018

(22) Yophei Nakamura, Investigation of the potential efficiency increase of a hydro turbine plant replacement using CFD, Hydro2018, Gdansk, October 2018

4.3 発表（国内）

- (1) 林智之、竹中健一郎、宮川和芳、磁気軸受加振試験装置を用いたジャーナル軸受の振動特性の測定と評価、第 79 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2018 年 5 月
- (2) 榊原 將至、中村 揚平、山田 翔、保井 健佑、宮川和芳、過給機コンプレッサの脈動流下特性と非定常損失、第 79 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2018 年 5 月
- (3) 知念真渡、中村 揚平、保井健佑、山田翔、榊原將至、宮川和芳、過給機一次元非定常流動モデルの構築と脈動流下特性の評価、第 79 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2018 年 5 月
- (4) 峰島大誠、松田国将、大西馨子、宮川和芳、水中翼のフラッタ特性の把握および安定限界の予測、第 79 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2018 年 5 月
- (5) 氏家隆太郎、市之瀬飛馬、中村揚平、宮川和芳、飯野真成、浅原大輝、佐野岳志、遠心羽根車隙間流れと円板摩擦損失、第 79 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2018 年 5 月
- (6) 大西馨子、峰島大誠、安代和司、宮川和芳、親水・撥水コーティング翼のキャビテーション特性と流れ場への影響評価、第 19 回キャビテーションに関するシンポジウム、北海道、2018 年 10 月

- (7) 峰島大誠 大西馨子 中居俊介、宮川和芳、水中翼のキャビテーション発生時におけるフラッタ特性の評価、第 19 回キャビテーションに関するシンポジウム、北海道、2018 年 10 月
- (8) 中村揚平、知念真渡、榊原將至、宮川和芳、自動車用ターボチャージャタービンの内部流れ分析による設計最適化、第 80 回ターボ機械協会東北講演会、仙台、2018 年 10 月
- (9) 久保雅史、劉志豪、宮川和芳、ディフューザ内流動不安定現象のキャビテーションによる影響、第 80 回ターボ機械協会東北講演会、仙台、2018 年 10 月
- (10) 劉志豪、宮川和芳、遠心羽根車の翼列干渉の特徴、第 80 回ターボ機械協会東北講演会、仙台、2018 年 10 月
- (11) 前田聡、宮川和芳、逸見恭彦、佐藤英吉、内部流れの把握による軸流ウォータージェットポンプの性能向上、第 80 回ターボ機械協会東北講演会、仙台、2018 年 10 月
- (12) 松本圭介、吉村真美子、林智之、宮川和芳、川崎聡、平木博道、須和直人、ロケット用ターボポンプにおけるバランスピストン機構の流量特性、第 59 回航空原動機・宇宙推進講演会、岐阜、2019 年 3 月

2.2 総説・著書

- (1) 宮川（分担執筆）、太田、山本、新関、流体機械、共立出版、2018 年 9 月
- (2) 宮川、中村、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、2018 年 7 月号
- (3) 宮川、潮流・海流発電用タービンの研究開発動向、日本ガスタービン学会誌、2018 年 7 月, pp.285

4.3 招待講演

- (1) K.Miyagawa, “Understanding and progress on the unsteady problems due to rotor-stator interactions in hydraulic machines”, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, September 16-21, 2018, Kyoto, Japan
- (2) K. Miyagawa, “Influence of cavitation on vibration problems due to fluid exciting force”, 3rd International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow, April 19-22, 2019, Shanghai, China
- (3) K. Miyagawa, “Flutter characteristics of a hydrofoil with and without cavitation”, International Symposium on Hydro & Marine Renewable Energy, February 21, 2019, Busan, Korea
- (4) K. Miyagaw, “Understanding and progress on the unsteady problems due to rotor-stator interactions in hydraulic machines”, 清華大学大学院招待講演, November 29, 2018, Beijing, China
- (5) 宮川和芳, ターボ機械の研究開発の動向と性能・信頼性向上に向けての今後の課題, VINAS Users Conference 2018 基調講演, 2018 年 10 月 9 日, 東京
- (6) 宮川和芳, 流体構造連成解析を用いたターボ機械・流体機器の動特性予測, シーメンスユーザー会, 2018 年 7 月 11 日, 東京

4.4 受賞・表彰

- (1) ターボ機械協会若手優秀講演賞、峰島大誠、ターボ機械協会総会講演会、2018 年 5 月、東京

- (2) ターボ機械協会若手優秀講演賞、榊原將至、ターボ機械協会総会講演会、2018 年 5 月、東京
- (3) ターボ機械協会若手優秀講演賞、劉志豪、ターボ機械協会東北学術講演会、2018 年 10 月、仙台
- (4) 若手功労表彰 小宮功労賞、中村揚平 (D3)、ターボ機械協会創立 45 周年記念行事第 80 回 (東北) 講演会・記念式典、2018 年 10 月、仙台
- (5) 貢献賞、宮川和芳、ターボ機械協会創立 45 周年記念行事第 80 回 (東北) 講演会・記念式典、2018 年 10 月、仙台
- (6) Best Oral Presentation Award, Zhihao Liu, Grand Renewable Energy 2018, Yokohama, June 2018.
- (7) SIP「革新的燃焼技術」アワード、中村揚平、SIP「革新的燃焼技術」、東京、2019 年 3 月
- (8) 優秀研究発表賞、中村揚平 (D3)、自動車用内燃機関技術研究組合、東京、2019 年 3 月
- (9) 学生優秀講演賞、松本圭介 (M1)、第 59 回航空原動機・宇宙推進講演会、岐阜、2019 年 3 月

4.5 プレス発表

プレス発表、科学技術振興機構 (JST)、慶應義塾大学、京都大学、東京大学、早稲田大学“ガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンともに正味最高熱効率 50% 超を「産産学学連携」で達成” 平成 31 年 1 月 16 日、<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190116/index.html>

4.6 理工総研主催行事

- (1) 理工総研第二種行事 (T 系): 第 1 回日中韓水力機械ワークショップ、2019 年 1 月 25, 26 日, 西早稲田キャンパス, 参加者 70 名 (日本 39 名, 中国 16 名, 韓国 15 名)
- (2) 輸送・エネルギー・環境を支えるターボ機械の研究開発、早稲田イノベーションフォーラム、東京、2019 年 3 月

4.7 学会および社会的活動

- (1) 国際会議議長, 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, September 16-21, 2018, Kyoto, Japan
- (2) “水車・ポンプ水車の基礎知識”, ターボ機械協会第 137 回セミナー、水車、2018 年 4 月
- (3) “水力機械のキャビテーション”, ターボ機械協会第 142 回セミナー, 2019 年 3 月

3. 研究活動の課題と展望

本研究では、社会インフラにとって重要でありニーズの多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、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、従来の機械システムの性能、信頼性向上を図ることを引き続き目的とする。次年度は、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する。