

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、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、水力発電用水力タービン、火力発電所、原子力発電所の給水、冷却系ポンプ、上下水道用ポンプ、洪水対策用ポンプ、エネルギー貯蔵システムのポンプ水車など重要なインフラであり、いまだに高性能化、高信頼性化が要求されている。一方、従来から多くの研究者により、性能、信頼性の向上が図られており、さらなる改善には、現象解明と高性能化をリンクさせる研究開発が必要である。昨今のコンピュータ、実験技術の進歩や、多変数での最適化技術は、水力ターボ機械の高性能化、高信頼性化に有用である。特に解析技術は、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できる進歩を遂げた。また、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、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る。これらの解析技術は、最適化のアルゴリズムと一緒に最適化設計に使用される。

本研究では、上述の社会インフラにとって重要であり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、解析、実験の要素技術から実際の設計開発に役立てることができる最適設計技術を用いることにより進め、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。

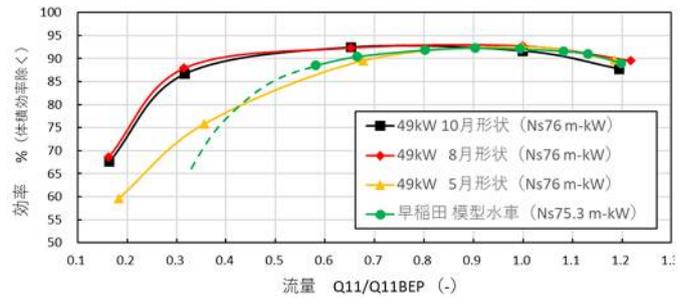
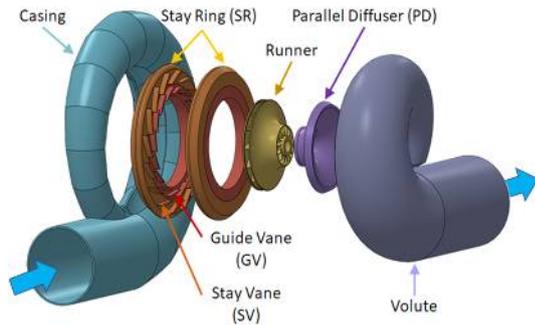
本年度は昨年度に引き続き、水力ターボ機械の重要な問題である最適設計による水力機械の性能向上、新しいコンセプトによる運転範囲拡大可能な水力タービンと流体、構造連成問題に基づく信頼性向上の解明を実施した。

2. 主な研究成果

水力機械の高性能化、高信頼性化は安定した、また、省エネルギーに向けた産業用基盤の構築にとって大変に重要である。そ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性能化、高信頼性化に取り組み、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役割が大きくなった。水力タービンは安定な再生可能エネルギーであるが、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でいて良い成果を上げている。図1に本年度に開発した新型水力タービンの形状と解析による効率予測結果を示す。2018年度から流量と有効落差が変わっ



定常解析による新型水車効率曲線図

図1 新形水車の形状と性能

ており、タービンの開発をコンセプトを残したまま、実施している。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の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6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、4年目となり36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。また、県およびメーカーとの共同研究で1000kW級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年度に検証のため早稲田大学西早稲田キャンパスでの模型試験を実施する予定である。海外との連携も実施しており、53000kW級のフランス水車の高効率化研究にも取り組んでいて、設計を完了している。本開発により高比速度フランス水車の高効率化に目処がついた。その他メーカーからの依頼で、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、今年度は信頼性の確認試験を実施した。ドラフトチューブ内部流れの計測にPIVとLDVを用い、詳細な見た不安定な渦挙動を確認した。

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、産業用、推進用のポンプの開発を主に会社との共同研究で実施している。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、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。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、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実施した。また、従来より実施している異物通過性予測のための解析技術を、軸流型式のポンプにも展開することができた。その他、異物のプロパティの解析への入力方法も新しい試験装置により構築できた。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2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。

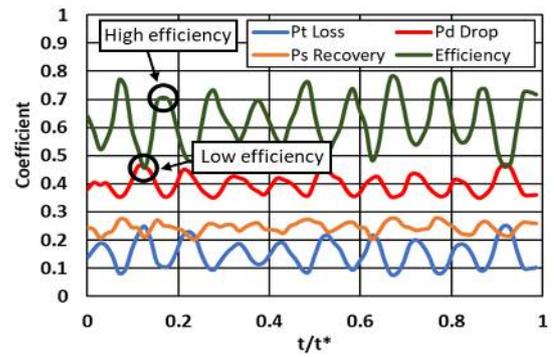
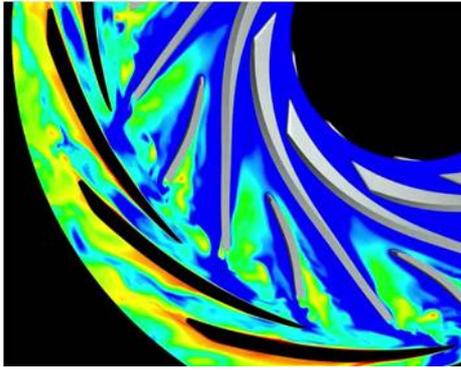


図2 オープンインペラ内のエントロピー分布とディフューザ内損失発生過程

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、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た。特に、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。図3に水中翼のフラッター特性に関する流体-構造の連成解析結果と周波数応答モデルによる安定性解析結果を示す。メーカーとの上下水道ポンプの開発および前述したウォータージェット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、ポンプの異物通過性の評価を可能とした。

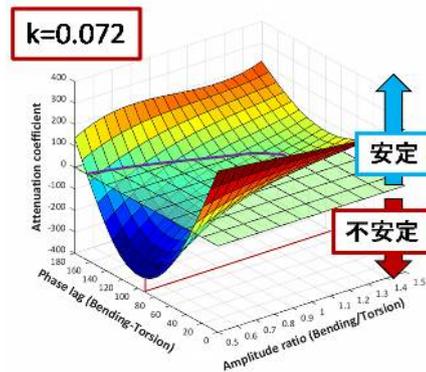
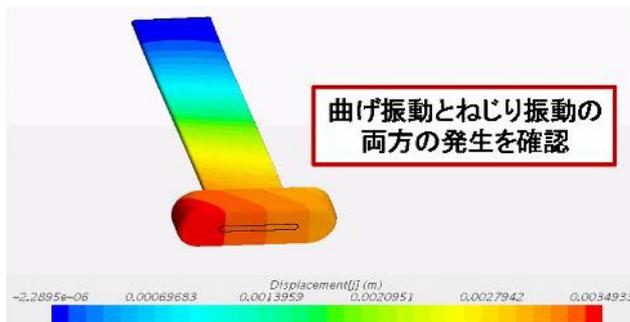


図3 水中翼フラッターの流体、構造連成結果と周波数応答による安定性解析

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。図4に軸受荷重と剛性係数の解析結果を示す。公称値と

の定性的一致を示す。今年度は磁気軸受試験装置を用いた実験的検証の計画を実施し、更なる解析の高精度化を目指す。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。また、バランスピストンの構成要素であるオリフィス隙間およびバランスホールの特性評価を実施し、予測手法の構築も実施した。低比速度ポンプ、水力タービンで問題になる円板摩擦の損失に関しては、回転円板、静止円板間の流れを流動解析により求め、損失低減形状を見出した。更なる最適化形状の検討を実施中である。

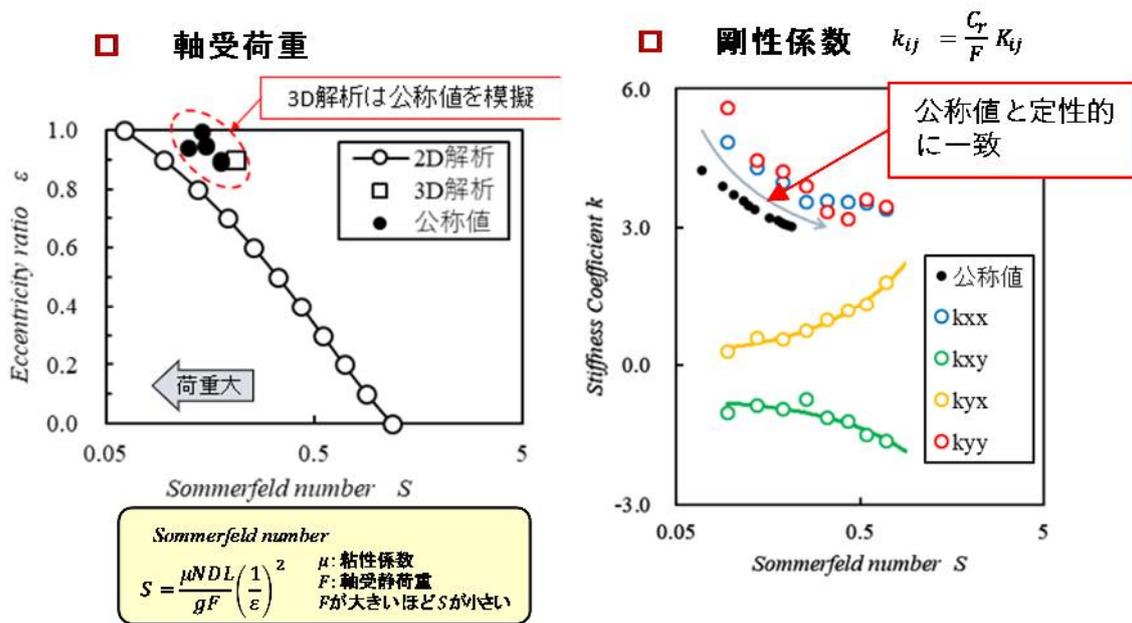


図4 テイルテイングパッド軸受の軸受荷重と剛性係数のCFDによる予測結果

3. 共同研究者

齊藤 純夫 (理工総研・客員上級研究員)

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

Gabriel Taillon, Kazuyoshi Miyagawa, Stochastic Impact Model: Poisson Processes and Copulas to Model Cavitation Erosion Impacts, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2019 Volume 12 Issue 4 418-428, Published: 2019, Released: December 26, 2019

4.2 発表 (国際)

- (1) T Hayashi, M Yoshimura, K Matsumoto, K Miyagawa, S Kawasaki, J Takida, H Hiraki, N Suwa, Dynamic Characteristics of Unshrouded Impellers Equipped with Balance Piston Systems for Rocket Turbo Pumps, *ASME-JSME-KSME Jointed Fluids Engineering Conference 2019*, San Francisco, July 2019
- (2) Asuma Ichinose, Tomoki Takeda, Kazuyoshi Miyagawa, Yohei Ogawa, Hideyo Negishi, Kazuki Niiyama, Unsteady Flow in the Vaned Diffuser of a Low Specific Speed Pump with an Unshrouded Impeller, *ASME-JSME-KSME Jointed Fluids Engineering Conference 2019*, San Francisco, July 2019
- (3) T Irie, W Takahashi, A Favrel, K Miyagawa, T Sugimoto, T Naganuma, R Waku, Prediction of the characteristics of a new hydraulic turbine capable of offering a high efficiency and a stable flow at part-load operation, *The 2nd IAHR-Asia Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Busan, September, 2019
- (4) Nak-Joong Lee, Yong Cho, Kazuyoshi Miyagawa, Numerical Investigation of Pressure Fluctuation in the Draft Tube of a High Specific Speed Francis Turbine, *The 2nd IAHR-Asia Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Busan, September, 2019
- (5) M. H. Khozaei, N. Yamaguchi, K. Miyagawa, Numerical Analysis of Hydraulic Loss in a Medium Specific-speed Francis Turbine, *The 2nd IAHR-Asia Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Busan, September, 2019
- (6) Takuma Kawahara, Hidemitsu Takamiya, Hitoshi Motono, Takayuki Hotta, Kazuyoshi Miyagawa, Pumps performance and internal flow characteristics of fire pumps, *The 15th Asian International Conference on Fluid Machinery*, Busan, September, 2019
- (7) Yohei Nakamura, Manato Chinen, Masamichi Sakakibara, Yuudai Abe, Kazuyoshi Miyagawa, Prediction of a turbocharger performance under pulsating flow by construction of an unsteady one-dimensional flow analysis model, *The 15th Asian International Conference on Fluid Machinery*, Busan, September, 2019
- (8) A. Favrel, Z. Liu, W. Takahashi, T. Irie, M. Kubo, K. Miyagawa, Visualization of the elliptical form of a cavitation vortex rope and its collapse by means of two cameras, *IAHR International Workshop on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*, Stuttgart, October 2019

4.3 発表 (国内)

- (9) 中村揚平, 宮川和芳, 森吉泰生, 窪山達也, 田畑正和, エンジン熱効率 50%に寄与した過給

機システムの研究と開発，第 81 回ターボ機械協会総会講演会，東京，2019 年 5 月

- (10) 阿部勇大，知念真渡，榊原將至，中村揚平，宮川和芳，エンジン脈動波形がターボチャージャタービン性能に及ぼす影響，第 81 回ターボ機械協会総会講演会，東京，2019 年 5 月
- (11) 安代和司，中居俊介，新保拓哉，宮川和芳，荒木力，山岸直人，杉本隆幸，ハイブリッドユニットを負荷とする軸流型水力タービンシステムの構築，第 81 回ターボ機械協会総会講演会，東京，2019 年 5 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，バランスピストン機構の静特性、動特性の評価，第 81 回ターボ機械協会総会講演会，東京，2019 年 5 月
- (13) 八野田真也，武田智貴，新田成輝，宮川和芳，各種ポンプの滑り係数の調査，第 81 回ターボ機械協会総会講演会，東京，2019 年 5 月
- (14) 野田真也，生田晃浩，宮川和芳，逸見恭彦，佐藤英吉，川内清恵，ウォータージェット推進船の過渡定常走行のポンプキャビテーション特性，第 82 回ターボ機械協会岡山講演会，岡山，2019 年 10 月
- (15) 稲葉夢乃，市之瀬飛馬，宮川和芳，遠心羽根車隙間流れの LDV 計測，第 82 回ターボ機械協会岡山講演会，岡山，2019 年 10 月
- (16) 林智之，松本圭介，岩瀬文悟，宮川和芳，川口英晃，千葉秀俊，増田光，流体剛体連成解析を用いたティルティングパッドジャーナル軸受の特性予測手法の検討，第 82 回ターボ機械協会岡山講演会，岡山，2019 年 10 月
- (17) 峰島大誠，中居俊介，向井善郁，宮川和芳，川北千春，白石耕一郎，水中翼のフラッタ特性の把握及びキャビテーションによる影響評価，第 82 回ターボ機械協会岡山講演会，岡山，2019 年 10 月

4.4 総説・著書

4.3 招待講演

- (1) 招待講演“新形水車の共同開発事業概要”、あきた水力発電導入促進セミナー、2019 年 12 月 10 日、秋田県秋田市
- (2) 技術講演“更なる普及を目指す水力発電システム技術の開発”、四国地区水力発電技術研究会技術講演、2019 年 11 月 11 日、高知県高知市
- (3) Keynote speech, “Influence of cavitation on vibration problems due to fluid exciting force”, The 3rd International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow, April 20, 2019, Shanghai China
- (4) Keynote speech, Siemens “Realize LIVE JAPAN2019”、7 月 10 日、東京

4.4 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

4.5 プレス発表

- (1) 秋田さきがけ、2019年12月11日

4.6 理工総研主催行事

4.7 学会および社会的活動

- (1) 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」、2019年4月12日
(2) ターボ機械協会第144回セミナー、「ターボ機械に生じる流体関連振動」、2019年7月12日
(3) ターボ機械協会若手技術者育成プログラム（水車編）、2019年11月27日
(4) 国際会議議長、ISROMAC200, April 16, Hawaii, US
(5) ターボ機械協会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、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。