

技術解説

内接ギヤポンプのCFD解析技術構築

Construction of CFD Analysis Technology for Internal Gear Pumps

清水 朋佳 ・ 鈴木 一成
SHIMIZU Tomoka ・ SUZUKI Kazunari

要 旨

自動車業界の環境対応に伴う車両の電動化により、省エネ・小型・低コストの観点から駆動ユニットeAxleの開発が加速している。このeAxleに用いられる油圧ポンプの使用用途は多様化しており、冷却・潤滑用途の需要が高まっている。一方、自動車に搭載される油圧ポンプは省エネの観点から高効率化が求められ、更に電動化による車両の低騒音化に伴って、静粛化も重要な要素となっている。このような高い性能要求に応えるには理論・現象論に基づいた設計方策が必要であり、従来からCFD（Computational Fluid Dynamics）解析技術を用いることで、ポンプの流量特性を詳細に予測し、設計の最適化を図ってきた。

本研究では、内接ギヤポンプを対象としたCFD解析技術の流量特性に着目し、CFD解析技術の予測精度を確認した。結果として流量低下の要因を探り、隙間漏れと気泡およびキャビテーションを考慮することによって高精度な予測技術を獲得している。また、本報では内接ギヤポンプの開発案件に活用し、改善した事例について報告する。

Abstract

The electrification of vehicles has accelerated the development of eAxle drive units from the viewpoints of energy saving, compactness, and low cost. The use of hydraulic pumps in these eAxle units is diversifying, and demand for cooling and lubrication applications is increasing. On the other hand, hydraulic pumps used in automobiles are required to be more efficient and quieter from the viewpoints of energy conservation and low noise. To meet these performance requirements, design strategies based on theory and phenomenology are necessary, and CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis technology has been used to predict pump flow characteristics and optimize pump design.

In this paper, we focus on the flow characteristics of an internal gear pump and confirm the prediction accuracy of CFD analysis technology. The causes of flow reduction are mentioned, and a highly accurate prediction technique is obtained by considering crevice leakage, bubbles, and cavitation. In addition, a case study of the application of this technology to a development project of engineering department and its improvement is reported.

1 緒言

自動車業界では、環境対応として車両の電動化が進められており、駆動ユニットにおいては省エネ・小型・低コストの観点からeAxleの開発が加速している。eAxleは主にギヤ、モータ、インバータがパッケージ化された製品であり、ギヤの潤滑やモータの

冷却に油を用いることが多い。この潤滑・冷却に向けた油の供給には油圧ポンプが用いられており、カヤバでは現在、潤滑・冷却用途の内接ギヤポンプ開発を行っている。この内接ギヤポンプにおいても駆動ユニット同様、省エネ化（ポンプの高効率化）が求められ、また電動化による車両の低騒音化に伴って、ポンプ自体もより一層の静粛化が必要となる。

こうした要求に対しては、流動抵抗による圧力損失の低減や隙間漏れの低減、ポートタイミングの調整による内部圧力の整圧化など様々な対策を行うが、より高い性能要求に応えるためには、理論・現象論に基づいた設計方策が必要となり、カヤバではCFD解析技術を活用している。本報では内接ギヤポンプを対象とした場合の流量特性について着目し、油圧ポンプの流量特性から内接ギヤポンプの解析技術、本技術の開発品適用事例を交えて概説する。

2 解析

2.1 流量特性

図1は一般的な油圧ポンプの回転数—流量特性を表したグラフであり、点線は理論吐出流量、実線は実際の吐出流量を示している。油圧ポンプの理論吐出流量はポンプの押しのけ容積と回転数によって算出されるため回転数に比例するが、実際は回転数が増加するほど流量損失が発生する。この流量損失は所定の回転数までは内部漏れによる損失が支配的であり、理論流量に対して漏れの損失分だけ減少した値になる(①)。また、更に回転数が増加すると、ポンプ内部の流速が増大して、吸込み油路やポンプ室にて局所的な圧力低下が発生し、油中気泡の拡大やキャビテーションの発生によって吸込み体積に占める油の体積が減少するため、著しい流量低下を生じる(②、③)¹⁾。

この理論吐出流量と実際の吐出流量の比を容積効率と呼び、油圧ポンプの効率を評価するための指標として用いられている。従って、ポンプの高効率化アプローチとしては、容積効率の向上、つまり流量損失の低減が一段として挙げられる。

カヤバではこの流量損失の主要因となる図1内の①～③について考慮した設計及び解析を行っている。

①ポンプ内部における隙間漏れ

油圧ポンプは回転運動や揺動運動を伴うことから、部品間には焼付きを防ぐためにクリアランスが設けられている。一方で、このクリアランスは流体の通

り道となり得るため、ポンピングによる吸い込み口から吐出口に向かう油の流れの他に、クリアランスを通してポンプ内部を循環する流れが生じる。故に、この流れにより、吐出流量は吸込み流量から内部循環する流量分だけ減少し、容積効率が低下する。

また、内部漏れによって高圧油が低圧側に入ると圧力脈動の悪化を引き起こし、騒音問題に繋がるとい課題も有する。以上のことから、焼付きを防止するためにはクリアランスの設定が必要不可欠となるが、容積効率の低下や騒音の要因にもなるため、焼付きを防止しつつ、極力漏れを少なくするための適切なクリアランス設計が求められる。

②油に含まれる気泡

図2はベーンポンプの吸込み油路を可視化したものであり、油路内の白い点は作動油中に含まれている気泡である。この気泡は、油圧回路内で作動油が攪拌されたり、タンクが揺動されたりすることによって空気が油に混入し、そのままポンプ内部に流れてきたものである。なお、自動車の変速比を連続的に変化させるCVT(Continuously Variable Transmission)システムを例にすると、油圧回路内の作動流体には10～30%以上の気泡が混入していると言われてい

る。この混入した気泡は回転数増加に伴って流速が大きくなるほど流体圧力が下がるため、膨張した気泡の体積分だけ流量を送り出せなくなり、吐出流量が低下する。また、この気泡の増加は振動・騒音、機器破損や油の見かけの剛性を低下させるため、システムの応答性の悪化原因となる²⁾。

③ポンプ内部において発生するキャビテーション

図3はベーンポンプのポンプ室を可視化したものであり、ポンプ室内の白い部分はキャビテーションによる気泡である。このキャビテーションは、ポンプ内部の流速増大などによって流体圧力が飽和蒸気圧以下になった際に流体が気化して、発生する気泡である。故に、②同様に発生した気泡分だけ流量を

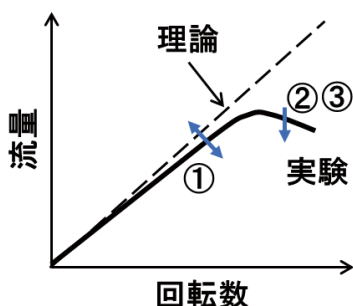


図1 回転数—流量特性結果



図2 作動油中の気泡

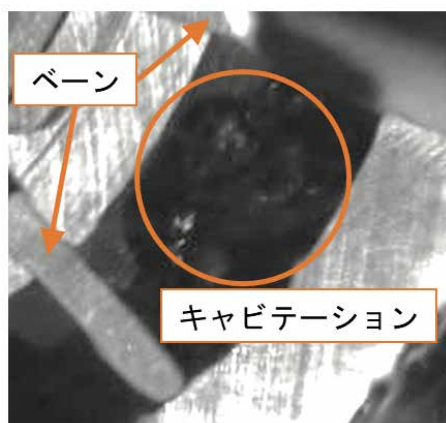


図3 ポンピングにより生じるキャビテーション

送り出せなくなることによって吐出流量が低下し、壊食による機器破損の原因にも繋がるため、キャビテーションを抑制することが重要である²⁾。

よって、ベーンポンプと同じ容積式ポンプである内接ギヤポンプの流量特性を高精度に予測するためには、解析モデルへのクリアランスの反映と混相流の考慮、キャビテーション現象の数式化を取り入れる必要がある。

2.2 対象内接ギヤポンプ

次に本報の説明で用いる内接ギヤポンプの部品概要について図4に示す。インナロータとアウトロータ、シャフトで構成されたロータASSYはボディとカバーによって挟まれた構造となっており、インナロータの歯数は6歯、アウトロータの歯数は7歯となる。内接ギヤポンプは、インナロータの回転に伴いアウトロータが回転し、ギヤ同士の噛み合わせによって形成されるポンプ室の容積が増減することでポンピングを行う。ポンプ室の容積は吸い込みポート直前で最小となり、吸い込みポート区間で増大していくことで油をポンプ室へと流入し、吐出ポート区間で減少していくことで油を吐き出す（図5）。

2.3 解析条件

解析には市販ソフトSimerics MP+®(米Simerics社)を用いており、図6に内接ギヤポンプの流体部の計算格子例を示す。またポンプ室の形状は回転とともに刻々と変化するため、ポンプ室の形状に合わせて計算格子のサイズも変わる。図7にメッシュサイズが最大と最小におけるポンプ室形状を示す。

表1は主な解析条件の一覧であり、油と気体の混相流を考慮した計算を行っている。全体の計算格子数は約40万セルであり、ポンプ室はメッシュの体積変化が著しいためメッシュを細かくしており、全体の5割ほどを占めている。

また、内接ギヤポンプにおいても内部漏れを考慮するためにインナロータとアウトロータのクリアラ

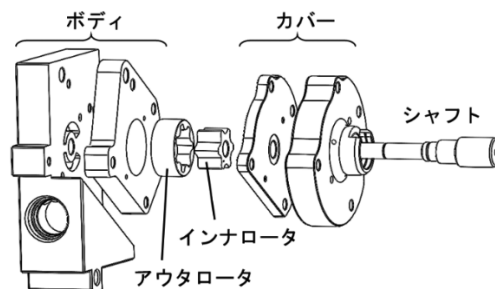


図4 内接ギヤポンプの構成

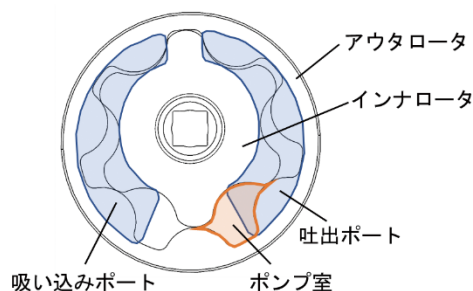


図5 ロータ部の名称

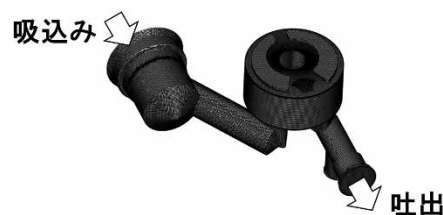


図6 計算格子

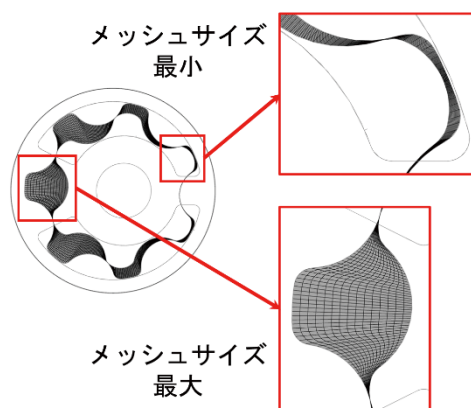


図7 ポンプ室モデルの移動境界

ンス（図8，以降チップクリアランス）、カバーまたはボディと各ロータのクリアランス、アウトロータとボディの外周部のクリアランス（図9，以降サイドクリアランス、及びボディクリアランス）を解析モデルに追加した。

2.4 内接ギヤポンプの調整項目

前述した流量損失を考慮した内接ギヤポンプのCFD解析を行うために、解析モデルの設定や解析

表1 解析条件一覧

流体パラメータ			
油	温度	100	℃
	密度	786	kg/m ³
	粘度	0.0048	Pa・s
	体積 弾性率	1.52	GPa
	蒸気圧	400	Pa(Abs.)
気体	密度	0.94	kg/m ³
	粘度	2.194×10^{-5}	Pa・s
境界条件			
吸込み圧		0	MPa(Gage)
吐出圧		0.2, 0.5	MPa(Gage)
回転数		1000, 3000, 5000	—
流体モデル			
二相流流れ		均質媒体モデル	
粘性		層流モデル	
格子			
移動境界		スライディングメッシュ	
ポンプ室		六面体格子	
その他		四面体格子	
最小セルサイズ		1×10^{-5}	m
総セル数		約40万セル	
計算			
時間		1.5- 2 日	

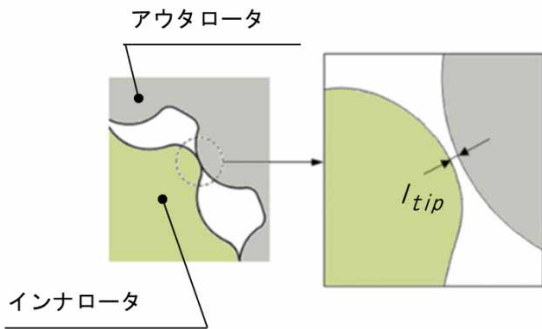


図8 チップクリアランス

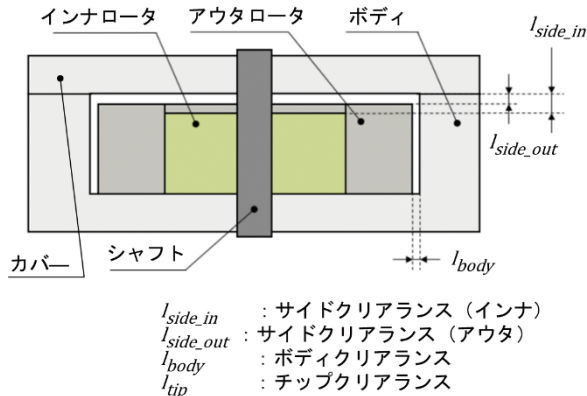


図9 サイドクリアランス、ボディクリアランス

条件の項目について調整を行った。以下にそれらの調整項目を示す。

①キャビテーションモデル

解析上でキャビテーション現象を表現するため、数値モデルとしてsinghalモデルを用いており、このモデルは液体-蒸気相変化と非凝縮性気体の影響を考慮することで、キャビテーション現象における蒸気の発生・消滅及び気体の移送を表現することが可能である³⁾。式(1)における R_e 、 R_c は蒸気の生成および消滅に関する係数であり、カヤバではこの係数について作動油に合わせた設定を行い、高精度化を図っている。しかしながら、従来は油に含まれる気泡の質量分率を一定で解いており、溶存空气の析出、気泡の膨張・収縮が未考慮であったため、これらを考慮できるよう改善されたsinghalモデルを新たに採用することで更なる高精度化を図った。

(液体—蒸気相変化式 一部抜粋)

$$\frac{\partial(\rho f_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} f_v) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f_v) + R_e - R_c \quad (1)$$

ρ : 液体の混合密度
 f_v : 蒸気質量分率
 $\vec{V}$: 計算格子体積
 Γ : 拡散現象式
 R_e : 蒸気の発生量
 R_c : 蒸気の消滅量

②クリアランス設定

クリアランスを設定する場合には設計寸法値を参考にすることが多いが、非常に小さい値となるため、解析モデルの寸法精度がクリアランスに大きく影響を与えてしまう。内接ギヤポンプにおいて一例を挙げると、インナロータ及びアウトロータの回転軸の軸間距離がこれにあたる。前述の通り、インナロータの回転に伴ってアウトロータが回転して油を吐き出すが、この際に軸間距離がずれている場合、ずれ分がチップクリアランスに対する誤差となる。この誤差が最小チップクリアランスを上回った場合はインナロータ及びアウトロータが接触する状態、つまり解析的には計算領域の一部が無くなることとなり、計算不可となる。従って、精度の良い解析を行うためには軸間距離が正確にモデルに反映されているかなど、クリアランスに影響を与える寸法においてはクリアランスと同レベルの細かさで確認することが重要である。

③解析モデルの解像度

解析モデルは三角形の面の連結で構成されており、複雑な形状になるほど形状の再現のために三角形の数を増やす必要がある。これを考慮しない場合、モ

デルの曲線部を例に挙げると、滑らかな曲線を再現できず角張った箇所が多くなり、部品間のクリアランスが正しく表現できず、最悪の場合は前述したインナロータとアウトロータの接触による計算不可などが発生する。

よって、内接ギヤポンプの解析モデルの正確な形状の再現のために、メッシュ細分化を行った。図10は解析モデルの曲線部のメッシュの比較を表しており、細分化によって曲線部を構成する座標点数が増加し、解析モデルの解像度が向上することでモデルの正確な再現が可能となっている。

2.5 CFD計算結果

前項で述べた調整項目の考慮有り無しのCFD解析結果と実験結果の比較を以下に示す（図11）。考慮無しの解析結果が赤点、考慮有りの解析結果が青点、実験結果が黒線となり、考慮前は予測誤差が最大22.5%と精度が悪い条件（低回転）があったのに対し、考慮後は予測誤差最大3.0%と全ての回転領域において高い予測精度を獲得している。

3 設計提案事例

3.1 内接ギヤポンプの開発試作品

eAxleでの冷却用途を考えた場合、冷却効率の観点から低粘度の作動油が望ましいため、現在eAxle用冷却ポンプに使用されている作動油は、カヤバで開発対象としてきたパワーステアリング用やCVT用の

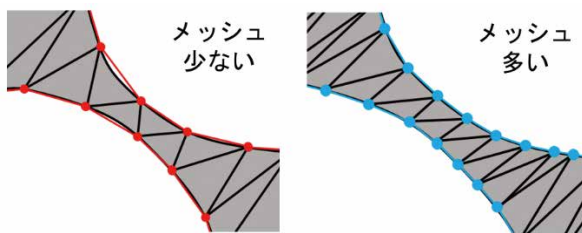


図10 メッシュの比較

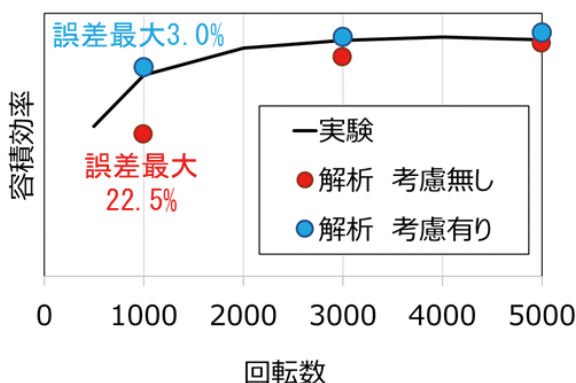


図11 回転数—容積効率

作動油に比べて低粘度の傾向にある。一方、低粘度の作動油の場合は同じ流速においても乱流になりやすく、乱流になると局所的な圧力低下が起きてキャビテーションが発生する。よって従来の油圧ポンプに比べて、キャビテーション発生による容積効率低下の懸念があるため試験結果にて確認したところ、高回転域において容積効率の低下が見受けられた。よって上記課題に対してCFD解析を活用し、改善案を検討して効率の改善を試みた。図12は改善前の内接ギヤポンプの吸い込み油路に対して回転軸方向から見たときの流線、図13はポンプ室内部に発生するキャビテーション量を示している。これらの結果から吸い込み油路の黒丸部まで円滑に油を導くことが出来ず、ポンプ室内においてキャビテーションが多く発生するため、これが容積効率を低下させる要因として考えられた。よって吸込み油路の形状を改善し、流れを整流化することで黒丸部まで油を導き、キャビテーションを抑制することで、容積効率の向上を図った。

3.2 改善方策

図14は回転軸に対して垂直な方向から見た吸込み油路形状の比較を表している。改善前は吸い込み油路から吸い込みポートに入る直前の屈曲部が急激で、段差部が生じていた。この段差によって流れが悪化し、吸い込みポート端部まで油を導けていない。よって、この部分について、改善後は屈曲部に曲率を与

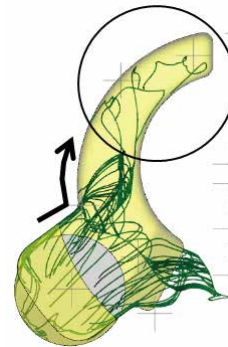


図12 改善前の吸い込み油路の流線

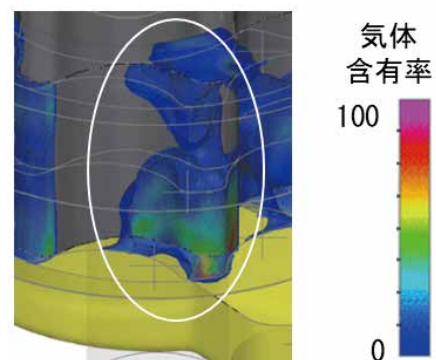


図13 ポンプ室内部のキャビテーション発生箇所

えて段差を除いた形状に変更し、更に吸い込みポート端部まで流入しやすくなるように吸い込みポート部を深さ方向に広げた。

また、図15に回転軸方向から見た吸い込み油路の改善前後の形状を示す。改善前の屈曲部に対して、改善後は屈曲部を無くし、流れが吸い込みポートに直線的に流入できるように形状を変更した。

3.3 改善結果

図16、17は改善方策後の解析結果における吸い込み油路の流線およびポンプ室内部に発生するキャビテーション量を表している。これらの結果から、吸い込みポート端部まで油が円滑に流入できており、ポンプ室内部のキャビテーション量は減少することを確認し、容積効率においては高回転時最大2.6%の向上が見られた。

このことから、解析的に改善形状の効果を確かめたため、実機にて試作評価を実施した。図18は所定の圧力・油温条件における回転数－容積効率の実験結果を示しており、高回転域では改善前に対して容積効率が最大4.3%向上することが分かった。

4 結言

内接ギヤポンプの流量特性における解析技術について、解析設定内容や容積効率の予測精度及び解析の適用事例について概説した。

油圧ポンプの流量特性には3つの流量低下原因が

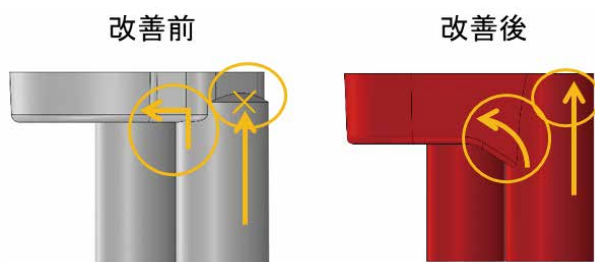


図14 吸い込み油路の形状変更



図15 吸い込み油路の拡大

考えられ、隙間漏れについては部品間に生じるクリアランスをモデルに反映し、混相流の考慮およびキャビテーションの数値モデルを活用して現象を考慮して、回転数－容積効率に関して高い予測精度を確保している。

また、この解析技術を用いて内接ギヤポンプの開発案件に活用し、開発試作品の油路形状について改善活動を行い、容積効率が向上する設計提案が可能になっている。

今後は吐出圧力脈動に関する予測技術構築に取り組み、高効率かつ低騒音な内接ギヤポンプ開発に貢献していく。

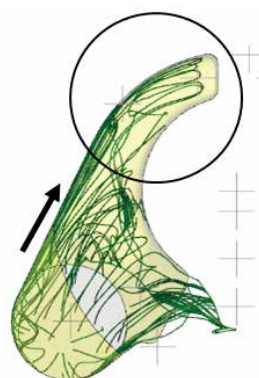


図16 改善後の吸い込み油路の流線

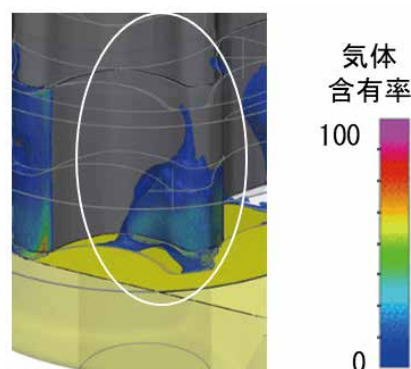


図17 改善後のキャビテーション発生箇所

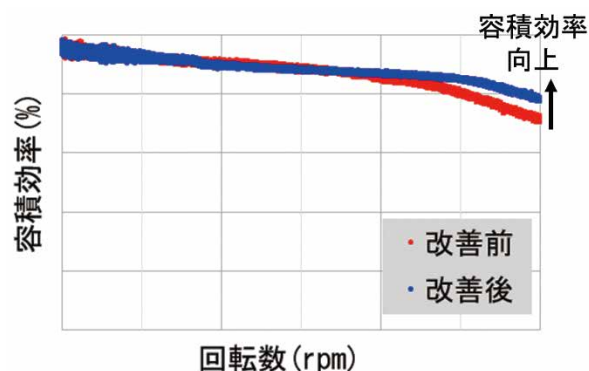


図18 容積効率比較結果

参 考 文 献

- 1) 長島：キャビテーション, カヤバ技報第64号 (2022年4月)
- 2) 北村, 小寺：油圧作動液中の気泡含有量コントロール技術の研究, カヤバ技報第64号, (2022年4月)
- 3) Francesco, O., Luca, M., Massimo, M.,: Cavitation analysis through CFD in industrial pumps: A review, International Journal of Thermofluids, 2023.

著 者



清水 朋佳

2019年入社. 技術本部基盤技術研究所要素技術研究室. 油圧ポンプの研究開発に従事.



鈴木 一成

2008年入社. 技術本部基盤技術研究所要素技術研究室. 油圧ポンプの研究開発ならびに振動騒音関係業務に従事.