

油圧作動液中の気泡含有量コントロール技術の研究

Research on Technology to Control Air Bubble Content in Hydraulic Fluid

北村佳彬・小寺康大
KITAMURA Yoshiaki・KODERA Yasuhiro

要 旨

自動車の無段変速機（Continuously Variable Transmission（以下CVT））等に用いられる油圧ポンプにおいては、油圧回路自体の振動により空気が油圧作動油表面から混入し、また作動油からもキャビテーションにより気泡として析出する。CVT用ポンプにおいては、その使用環境で油圧回路内の作動油に10%から多いときには30%以上の気泡が混入しているといわれている。こうした気泡はポンプの吐出性能低下や、振動・騒音、耐久性の低下等の不具合発生の原因ともなる。

したがって、ポンプ開発においては気泡含有量を考慮した実使用条件下での性能評価を行う必要がある。しかしながら、一般的に気泡含有量を安定的に調整することは困難である。

そこで、作動油中の気泡含有量を制御する装置および手法を開発している。まず油中の気泡除去技術として旋回流を用いた方式¹⁾に着目し、気泡分離装置を作製した。この装置の気泡分離効果については、解析的・実験的に十分であることを確認した。さらに、気泡分離装置を実機ポンプ試験装置に取り付け、気泡除去効果が得られるかを検証した。最後に、気泡含有量を自動制御させるため、気泡分離装置の放気口側の弁の開閉を制御することで、任意の気泡含有率を得られるかを検証した。本報では以上の内容の検証結果について解説する。

Abstract

In hydraulic pumps used in Continuously Variable Transmission (CVT) of automobiles, air is mixed from the surface of hydraulic fluid due to vibration of the hydraulic circuit, and also the dissolved the air appears in the working oil due to the cavitation. In CVT pumps, 10% to more than 30% of air bubbles are contained in the hydraulic fluid in the hydraulic circuit under the operating environment. These bubbles cause many problems such as pump discharge performance reduction, as well as degradation related to vibration, noise, and durability.

Therefore, when developing a pump, it is necessary to evaluate its performance under actual operating conditions, taking into account the bubble content. However, in general, there are no devices or methods to stably adjust the bubble content.

To solve this problem, KYB has developed a device and method to control the bubble content in the hydraulic fluid. First, we focused on a method using a swirling flow as a technique for removing bubbles from oil, and fabricated a bubble separation device. Second, we analytically and experimentally confirmed that the bubble separation effect of this device was sufficient.

Furthermore, we installed the bubble separator in the actual pump test equipment and verified whether the bubble removal effect could be obtained. Finally, to automatically control the bubble content, we verified it was possible to obtain the desired bubble content ratio by controlling the opening and closing of the valve on the outlet side of the bubble separator. In this report, the results of the above verification are described.

1 緒言

油圧作動油には、大気圧下で数%の空気が溶解しており、写真1のような油圧ポンプ等の内部においては、油路の局所的な圧力低下により、いわゆるキャビテーションの気泡が発生する(図1)。これにより析出した小さな気泡は作動油中に一定時間停留し、再び溶解したり、浮上して消泡したりするには時間を要する。また油圧回路やタンク自体が振動することによる巻き込み(スロッシング)によっても空気は作動油表面から混入する。このような形態から、空気の混入機会が多い自動車のCVT用油圧回路内の作動油では、10%から多いときには30%以上の気泡が混入しているといわれている。多くの気泡が混入した作動油は写真2のように気泡含有率が低いときと比べ白濁した状態となる。こうした作動油中の気泡は機器のトラブルの原因となる油中の固形微粒子や水分に継ぐ第3のコンタミネーション²⁾とも呼ばれており、振動・騒音や機器破損の原因ともなる。また、作動油中の気泡は油の見かけの剛性を低下させるため、システムの応答性も損なう。過去の研究³⁾では、積極的に油中の気泡含有量を低下させると、結果として作動油中への溶解空気の量を減らすことができるため、キャビテーションの発生量を抑制できることが確かめられている。油圧要素機器の故障の主原因の一つはキャビテーションによる壊食であることから、作動油中の気泡含有量を低下させることは機器の故障を防ぐことにもつながる。



写真1 カヤバ製油圧ポンプ一例

キャビテーション発生

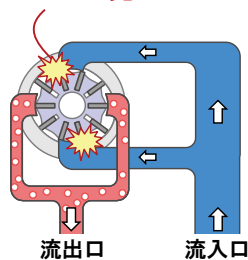
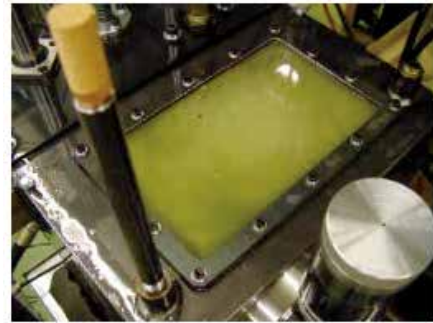


図1 キャビテーション発生例



(a) 気泡含有率0%



(b) 気泡含有率10%

写真2 油圧回路内タンクの気泡

しかしながら、作動油中にどの程度の気泡量が含有していると機器の性能を損ない故障に至るかの定量的な指標は明らかとなっていない。これは現状では、作動油中の気泡含有量を実時間で精度よく測定したり、調整したりすることが極めて難しいためである。一方、従来までの油中気泡の除去としては油タンクからの自然放気や作動油への消泡剤の添加など消極的な方策が主な技術であった。

こうした中で、最近の自動車では、燃費向上のためエンジン停止も含めた間欠運転させる頻度が増大し、エンジンに接続する油圧ポンプにも頻繁な起動停止が要求されるため、作動油中の気泡が油圧回路の各所で停留・合体し、起動初期の騒音や油圧システムの不安定性の原因ともなり、油中の気泡含有量による影響の解明やその対策も急務となっている。

以上の状況から、まずは油中の気泡含有量を安定的に調整可能とする技術開発をしている。本報では、旋回流を用いた気泡分離装置に流入する気泡を含んだ油に対して、装置の放気側の弁の開閉を制御することにより、装置から流出する油中の気泡量を調整する手法を提案し、その手法の妥当性を実験的に検証した結果について報告する。

2 気泡分離装置の設計と製作

2.1 旋回流を用いた気泡の分離装置

図2は旋回流を用いて作動油中に分散している気泡を集合合体させ、簡易な機構で分離除去する気泡分離装置の構造原理図である。この装置は、作動油中に分散する気泡を旋回流により、およそ100msの短い時間で中心軸上に集合・合体させ、流出口と放気口とのわずかな圧力差により、放気口より集合気泡を分離することができる⁴⁾。したがって、この放気口の下流に開閉のための弁を設け、その開閉の時間やタイミングを制御することにより、油から分離除去する気泡量を調整することができると考えられる。今回は、この原理を利用すれば、装置の流出側における作動油中の気泡含有量を制御調整するシステム構築ができると考え装置製作に着手した。

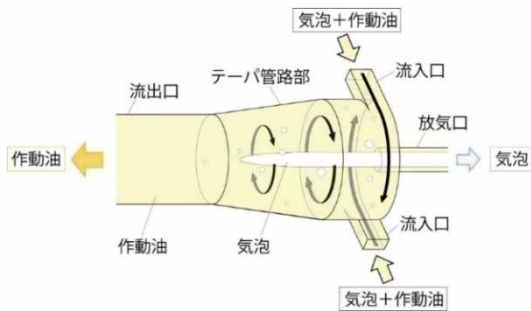


図2 気泡除去装置の原理と構造

2.2 気泡分離のシミュレーション

本研究で検証する手法の目標は、気泡含有率を1～40%の気泡含有率範囲で調整することとした。そのためには、まずは気泡分離装置の除去性能がこの気泡含有率の範囲で十分に確保されている必要がある。ここで、装置の性能は流入口の形状寸法や放気口径に大きく依存するため⁵⁾、装置設計において流れの条件に対するパラメータの選定は極めて重要である。

原理確認および最適な形状パラメータの選定としてまずは、数値流体解析 (CFD) による気泡分離シミュレーションでの検討を実施した。解析における流体および気泡の流路を図3に、諸条件を表1に記す。気泡含有率としては対象とする範囲のうち一例として20%、30%、40%の条件で解析した場合を記す。

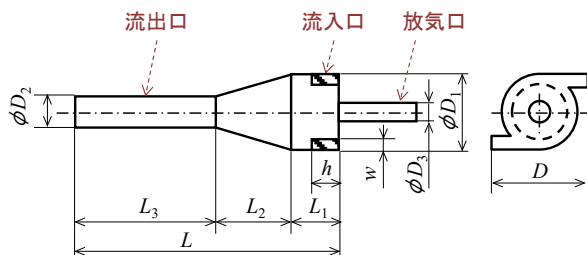


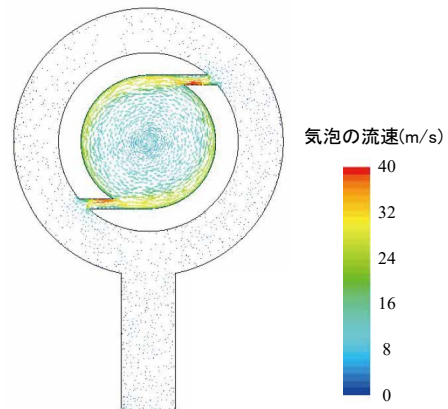
図3 数値シミュレーション流路

表1 数値シミュレーション諸条件

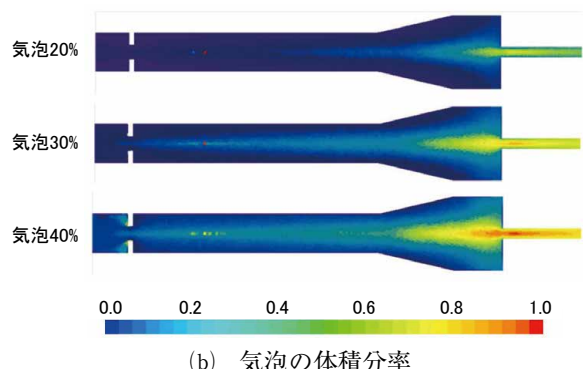
項目	数値	
流入流量 (L/min)	30	
気泡粒子径 (mm)	0.1	
作動油物性	密度 (g/cm ³)	0.8474
	動粘度 (mm ² /s)	9.189
気泡含有率 (%)	20, 30, 40	

流入口から混入された気泡は図4(a)のように流速が外周側が速く中心側が遅くなっており、旋回流が発生している事が確認できる。また気泡含有率が20%、30%、40%の条件における気泡の体積分率は図4(b)のようにいずれの条件でも管路の中心側が高く、気泡は放気口側に効率的に流れ、分離除去されていることが確認された。

数値解析の結果、気泡分離としての最適な形状パラメータを表2に記す。流入口の幅と高さがそれぞれ2.18mm×4.35mm、放気口径がφ4.4mm、流出口径がφ16mmのとき、気泡含有率が20%、30%、40%での気泡除去率を図5に示す。ここで気泡除去率は流出口・放気口から流出した気泡のうち流出口側から出た気泡の割合としている。いずれの条件においても90%以上の高い性能を確保できていることが明らかとなり、この結果を実験用気泡分離装置の設計パラメータとして採用した。



(a) 気泡の流速分布 (気泡含有率40%時)



(b) 気泡の体積分率

図4 気泡流れの数値シミュレーション

表2 最適形状パラメータ

形状パラメータ	数値 [mm]
テーパ管路内径 ϕD_1	30.0
流出口内径 ϕD_2	16.0
放気口内径 ϕD_3	4.4
全長 L	150.0
流入口部管路長さ L_1	20.0
テーパ部管路長さ L_2	30.0
流出口部管路長さ L_3	100.0
流入口幅 w	2.18
流入口高さ h	4.35

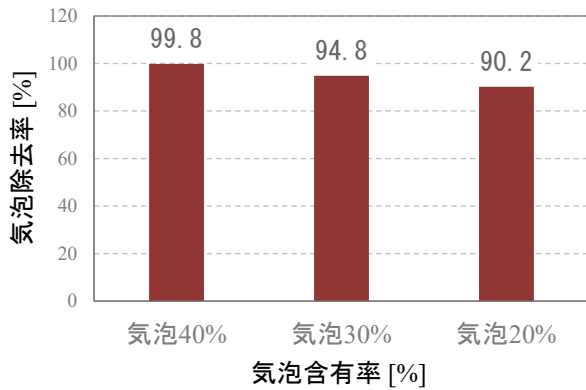


図5 気泡分離シミュレーション結果

2.3 装置設計と製作

前節での解析的検討を基に、油中気泡量の調整実験に用いるために設計製作した気泡分離除去装置の構造を図6に示す。流入口径や流出口径、放気口径などの形状パラメータを実験条件に応じて後で調整できるように、装置を分割して設計し、筐体内に挿入して両側から固定することで一体化する構造とした。また、流れの様子を可視化できるようにするため、外周筐体と挿入部品は透明アクリルで製作した。

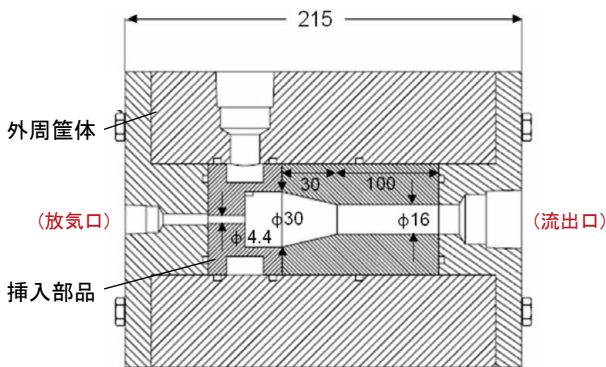


図6 気泡分離装置の設計・製作

3 気泡分離装置の性能評価

製作した装置の気泡分離性能を確認検証するため、まずは予備実験を実施した。

図7に予備実験に用いた油圧回路構成を示す。油の循環回路内に気泡分離装置を設置し、装置の放気口側にマニュアル操作式のニードル弁、流出口側にコリオリ式流量計を設置した。油中への気泡は、その混入量を調整するため、ポンプ吐出側から空気圧コンプレッサで強制的に吹き込んだ。空気を混入させながら、ニードル弁を手動で調整し、その開度に対する流出口側の作動油密度を測定し、気泡含有率を算定した⁶⁾。このとき流入口側の圧力は0.5MPa一定となるよう設定した。

予備試験における気泡分離装置内部の様子を写真3に示す。放気口を完全に閉じた状態では写真3気泡分離の様子(a)のように流路全体が多量の気泡によって白濁した状態となる。放気口を完全に開いた状態では写真3 気泡分離の様子(b)のように、流入口から混入した気泡は放気口に即座に流れていき、装置内に滞留し流出口に流れていく気泡は殆ど無くなっていることが視認できる。

予備実験の結果としてニードル弁の開度と流出口側の気泡含有率の関係を図8に示す。使用したニードル弁の仕様の都合で、弁開度による放気口への流量の精密な調整が難しく、放気口の弁をわずかに開くだけで気泡分離装置の気泡除去効果が大きく働いてしまい、結果として流出口側の気泡含有率が大幅に低下した。しかしながら、放気口側に設置した弁の開度を調整することで、流出口側の気泡量を調整できることが確認された。

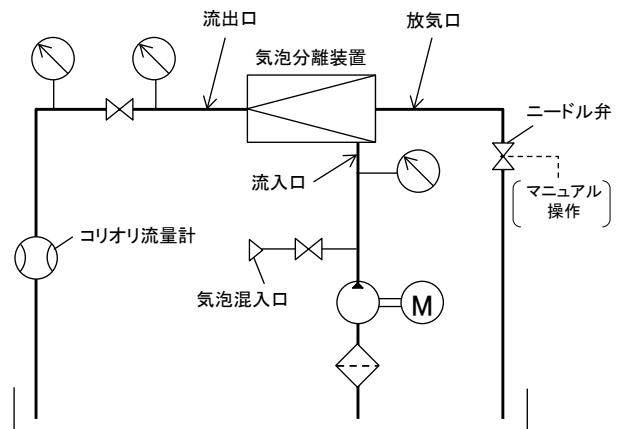
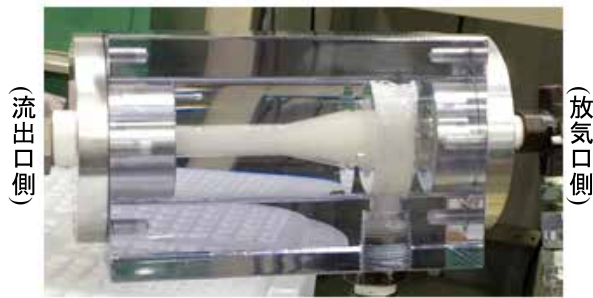
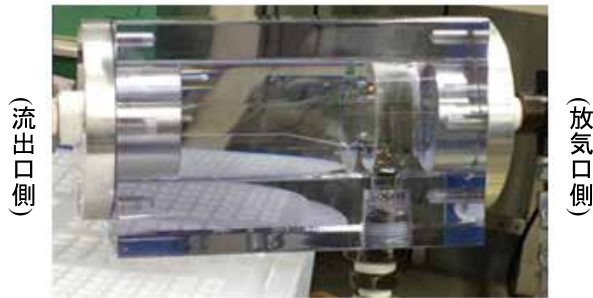


図7 手動での気泡量制御試験の油圧回路



(a) 放気口close時



(b) 放気口open時

写真3 気泡分離装置内部の様子

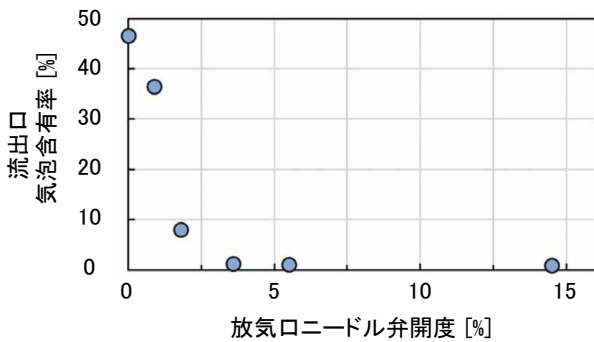


図8 手動制御による気泡含有率

式気泡含有率測定器を配置することでリアルタイムに気泡含有量を測定した。油温は回路内にクーラーおよびヒーターを配置して100℃一定とした。

気泡分離効果検証の一例として、タンク内気泡混入量一定、流出口側径φ10、ポンプ吐出流量18L/minである時の気泡含有率推移を図10に示す。0sでは放気口を閉じており、油路内は攪拌タンクにより気泡含有率30%程度と十分に気泡混入した状態である。放気口を開くと、その直後から気泡含有率は低下し、約4分後には数値安定し10%程度となった。

この値はタンク内の気泡混入機構と気泡分離装置を共に作動させた場合の結果であるため、混入量の強さや気泡分離装置の放気量とを調整することで、任意のエア含有率に調整できると考えられる。

以上より、実機ポンプ評価試験ユニットに気泡分離装置を導入することで、素早く安定的に油圧回路内の気泡含有率を調整できることを確認した。

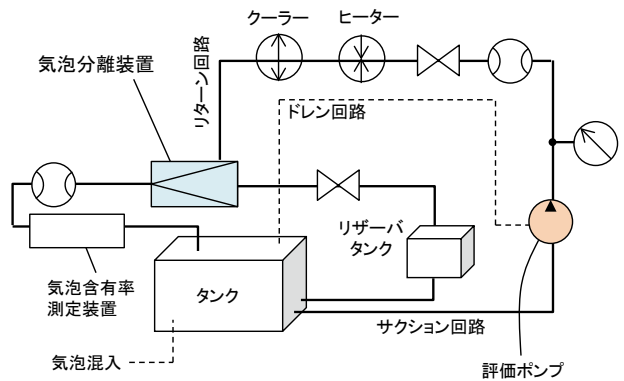


図9 実機実験装置の油圧回路

4 実機を用いた気泡分離性能評価

設計した気泡分離装置を実機ポンプの評価にも適用できるか確認するため、本装置をポンプ評価試験ユニットに導入して実験を実施した。なお本試験においては、気泡分離装置は金属製として改めて製作した。

図9に実機試験装置の油圧回路構成を示す。気泡量によるポンプへの影響を検討することを目的として、油中への気泡混入量増加のため、評価ポンプ上流のタンク内作動油に空気を混入させる機構を設置してある。尚、この混入機構は制御によりその混入量の強弱を調整可能な機器である。気泡分離装置は評価ポンプ下流側に設置し、放気側は予備試験と同様にニードル弁を設け任意に開閉可能とした。流出口側には背圧調整として任意円形状のオリフィスを設置し、その下流にインライン型のインピーダン

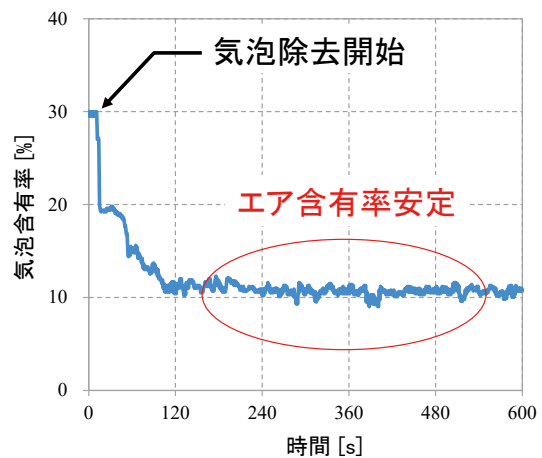


図10 実機での気泡含有率

5 自動気泡量制御の性能評価

気泡分離装置の放気口を開閉することで、油圧回路内の気泡量を調節可能であることが確認できたため、任意の気泡量に自動制御できるか検証するため、放気口側にオンオフ電磁弁を設置し、その切替時間やタイミングを制御することで流出口側の油中の気泡含有量を調整する実験を行った。

図11に調整実験に用いた油圧回路構成を示す。図7と同様な循環回路内に気泡分離装置を設置し、その流入口側にコリオリ式流量計、流出口側に気泡含有率測定器を設置し、それぞれの気泡含有率を実時間で測定した。油への気泡の混入はポンプ吸込み側を大気開放にすることで実現した。気泡分離装置の放気口側にオンオフ電磁弁を設置し、流出口側の気泡含有率測定器の値と気泡含有率の目標値との偏差に応じて、その開閉をリレーによりシーケンサで制御した。

図12に気泡含有率の調整結果の一例を示す。流入側の気泡含有率はおよそ9%、放気口を閉じているときの流出側の気泡含有率はおよそ28%、目標値を18%に設定し、オンオフ電磁弁を開閉する周期を1s、Duty比を10%~100%に設定し、その調整の様子を測定した結果である。表3は気泡含有率が目標値付近に落ち着いてからの一定区間(19.2s~25s間)の各Duty比毎の気泡含有率平均値、および気泡含有率目標値に対する相対誤差を記す。Duty比が小さいと調整精度や応答性は低下するが、各Duty比において目標値に対する相対誤差は9.4%以下に収まっており、一定の調整精度があることを確認した。

ただし、Duty比の設定によっては目標値に安定せずに微量に変動し続けてしまう場合がある。これは気泡分離装置の分離性能の応答性が高いのに比べ、放気口側のオンオフ電磁弁の応答が遅いためである。そのため応答が高速な比例弁を用いるといった対策を施すことで改善すると考えられる。

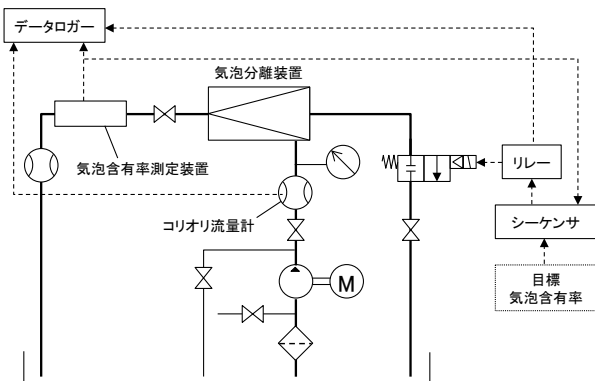


図11 自動気泡量制御試験の油圧回路

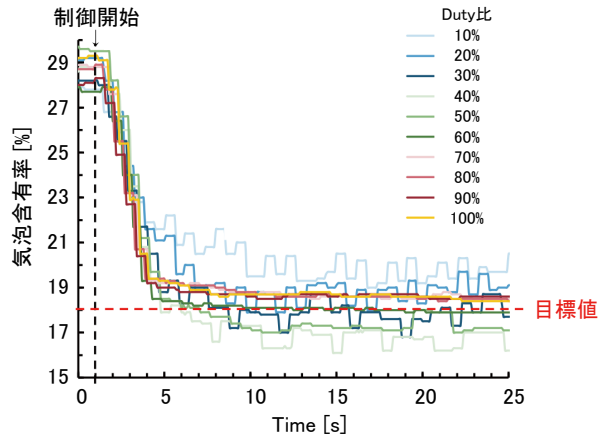


図12 自動制御による気泡含有率

表3 Duty比別の気泡含有率

Duty比 [%]	平均値 [%]	相対誤差 [%]
10	19.7	9.4
20	18.8	4.4
30	17.9	0.5
40	16.8	6.7
50	17.3	3.9
60	18.0	0.0
70	18.6	3.3
80	18.6	3.3
90	18.6	3.3
100	18.6	3.3

6 今後の展望

調整安定性に未だ課題があるが、開発した油中気泡量調整技術を用いて、実使用条件下でのポンプ評価を実施することでより高機能・高品質な製品を開発していく。

また他方で、冒頭でも述べたように第3のコンタミネーションとも称される作動油中気泡をコントロールする技術を活用し、CVTを始めとするポンプ製品の性能向上を成し得る技術展開を目指す。

以上のような開発能力の向上により、更に高効率なポンプを展開し、例えば自動車における燃費改善を実現し得ると考える。これによりカーボンニュートラル社会実現への貢献や、SDGs目標の達成への一助となることが期待できる。

7 結言

本報では旋回流を用いた油中気泡の分離除去技術を使って、作動油中の含有気泡量を任意に調整できる気泡量制御システムの確立へ向けて、その手法の妥当性を検証し以下の結論を得た。

- (1)油圧回路内の気泡を含有率1～40%の範囲で十分に分離可能な気泡分離装置を開発・製作した。
- (2)気泡分離装置を実機ポンプ評価ユニットに取り付けることで、素早く安定的に油圧回路内の気泡含有率を調整できることの確認が出来た。
- (3)放気口側の流量を調整することにより、装置の流出口側の気泡含有量を調整できることを実験的に確認できた。

本研究は、旋回流による気泡分離装置を設計頂いた法政大学田中豊教授、ならびに各種要素実験を実施いただいた青山学院大学坂間清子先生（現国立研究開発法人産業技術総合研究所）の協力を得て実施されたものであり、紙面を借りて感謝の意を表します。

著者



北村 佳彬

2013年入社。技術本部基盤技術研究所要素技術研究室。油圧ポンプならびにパワーステアリングの研究開発に従事。



小寺 康大

2009年入社。オートモーティブコンポーネンツ事業本部技術統轄部開発センター開発実験室。油圧ポンプの開発に従事。

参考文献

- 1) S. Sakama, et.al.: Air Bubble Separation and Elimination from Working Fluids for Performance Improvement of Hydraulic Systems, Proc. IFPE 2014, Paper No. 27. 1, (2014).
- 2) 関戸麻紀子, 水村彰志: フィルタの選び方・使い方とトラブル事例, 油圧技術基礎講座—周辺機材の選び方・使い方—, 日本工業出版, (2016).
- 3) H. Goto, S. Sakama, R. Suzuki, Y. Tanaka: Reduction of Cavitation Damage by Elimination of Bubbles in Oil Reservoir, Proc. FLUCOME2013, OS1-02-4, (2013).
- 4) Y. Tanaka, et.al.: Visualization of Flow Fields in a Bubble Eliminator, J. of Visualization, Vol. 4, No. 1, pp. 81-90, (2001).
- 5) 坂間清子, 田中豊, 鈴木隆司: 気泡除去装置の設計と評価に関する研究 (第2報), 日本フルードパワーシステム学会論文集, 45巻, 5号, pp. 79-84, (2014).
- 6) 五嶋裕之, 坂間清子, 田中豊: コリオリ流量計を用いた油中気泡量の測定, 日本機械学会2015年度年次大会講演論文集, No.15-1, S1150302, (2015).