

令和元年6月17日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06116

研究課題名(和文) 冷凍サイクルにおけるナノオイルの適用に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Application of Nano-Oil to Refrigeration Cycles

研究代表者

福田 充宏 (FUKUTA, MITSUHIRO)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：70199222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：冷凍機油にナノ粒子を添加したナノオイルの物性計測を行い、粒子濃度が大きいほど、熱伝導率、粘度、比誘電率が増加し、ハミルトン・クロッサーの熱伝導率モデルやコーレの粘度モデルが適用できることが分かった。ナノオイル/冷媒混合物については、粒子の混合により冷媒溶解度が変化するため、さらに検討が必要である。また、ナノ流体の微小な隙間における流動は、粒子の大きさが隙間に対して約1000分の1程度にも関わらず閉塞現象が観測され、流路隙間、粒子濃度、流速のパラメータのみでは整理しきれない特徴的な結果が得られた。さらに、わずかではあるが、シール部における漏れの低減効果としゅう動部における摩擦低減効果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷凍空調システムの高効率化に向けて、冷凍機油にナノ粒子を添加したナノオイルを実際のサイクルに適用するためには、ナノオイルの物性値や流動特性を知る必要がある。ナノ粒子の添加によって熱伝導率や誘電率はその粒子濃度に従って変化するが、粘度は冷媒溶解度の変化によって大きく変化するために、注意が必要である。また、流路の閉塞現象に対して様々なパラメータを包括的に評価できる基準を示すことはできなかったが、本研究で得られた物性値の情報や微小流路の閉塞現象に対する試験結果は、冷凍サイクルにおけるナノオイルの適用を検討する指針を与えている。

研究成果の概要(英文)：Properties of Nano Oil, which contains nano particles in a base refrigeration oil, are measured. Thermal conductivity, viscosity and dielectric constant increase with the particle concentration. Hamilton and Crosser model for the thermal conductivity and Kole model for the viscosity are available respectively. Since refrigerant solubility with the nano oil changes by mixing the nano particles, more discussion is necessary to examine the properties of nano oil and refrigerant mixture. Although order of nano particle size is about one thousandth of a flow channel, clogging of the channel by the nano particle cooccurs. The clogging phenomenon could not be organized by the clearance of channel, the particle concentration, flow velocity and so on. Effect of the nano oil on a sealing of leakage and reduction of friction are slightly observed.

研究分野：流体工学

キーワード：冷凍サイクル 冷媒圧縮機 潤滑油 ナノ流体 ナノオイル ナノ粒子 磁性流体 分散・凝集

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

冷凍空調装置、ヒートポンプおよびヒートポンプ給湯機においては、省エネルギーの観点より、心臓部である圧縮機の効率向上や、熱交換器の伝熱性能向上が重要となっている。近年、ナノ粒子を含むナノ流体が様々な分野で応用されつつあるが、冷凍空調分野においても熱交換器におけるナノ粒子の混入による伝熱性能向上が長い間検討されてきた。最近では主に中国においてナノ粒子を混入した冷媒や冷凍機油をドロップイン試験により評価した結果が報告されており、サイクルの性能が10~20%向上したといった報告も見られ、注目を集めている。しかし、実際の冷凍空調サイクルにおいてナノ流体を使用するためには、ナノ粒子を均一に分散させる技術を確立する、ナノ粒子を含む冷凍機油および冷媒との混合物の物性を明らかにする、ナノ粒子の混入はキャピラリーチューブや膨張装置の流れを阻害する可能性もあり、微小隙間を流れるナノ流体の流動特性を明らかにする等の課題があり、実際のサイクルにナノ粒子を混入することはメーカーにもユーザにも許容されていない。

2. 研究の目的

冷凍空調サイクルにおいて、ナノ粒子をサイクル内に混入することにより圧縮機の動力が減少し、また熱交換器における伝熱性能が改善されるため、冷凍空調サイクルの性能が向上するといった報告がなされている。しかし、実際の圧縮機や冷凍サイクルにおけるナノ粒子添加の影響と効果については不明な点も多く、結果的にナノ粒子を実際の冷凍空調サイクルに添加することはメーカーにもユーザにも許容されていない。本研究では、ナノ粒子を含んだ冷凍機油(ナノオイル)に対して、以下の3項目について検討し、冷凍空調サイクルにおけるナノオイルの実用化に向けた基礎データの蓄積を目的としている。

- (1) ナノオイル中のナノ粒子の分散状態の評価
- (2) ナノオイルの物性値計測
- (3) ナノオイルの流動特性および潤滑特性

2. 研究の方法

(1) ナノオイル中のナノ粒子の分散状態の評価

一般的にナノ流体中のナノ粒子は主にファンデルワールス力によって凝集し、塊となって沈殿してしまう。そこでナノオイルの作成においては、粒子が油中で凝集しないように分散剤を用い、超音波分散機によってナノ粒子を分散させる。実験では、分散剤の種類と混合率や混合の順番を変え、冷凍機油中のナノ粒子の分散状態を沈殿の様子および物性値の経時変化によって評価し、均一に分散させる処理とモータや圧縮機要素による機械的な攪拌の影響について検討する。

(2) ナノオイルの物性値計測

ナノオイル内のナノ粒子の種類や濃度を変え、粘度、誘電率、表面張力、熱伝導率などを測定し、ナノオイルの基本的な物性値を明らかにする。図1に物性値測定に用いた圧力容器の図を示す。誘電率は可変容量コンデンサの静電容量をLCRメータで測定し、粘度はプラグ型粘度計、また、熱伝導率は非定常熱線プローブを用いてそれぞれ測定する。容器内の温度はヒータにより加熱し、熱電対および温度調節器によって制御する。表面張力は最大泡圧法にて別の容器において測定する。ナノオイルに冷媒が溶解した混合物の物性値の計測は、図1に示した圧力容器に、図2に示すように冷媒ポンペを接続し、ナノオイルに冷媒を溶解させて行う。冷媒の溶解度は、サンプリング法によって測定する。ナノ粒子の凝集による沈殿を防ぐため、どちらの場合もマグネットスターラによる攪拌を行い、測定時は攪拌を止める。

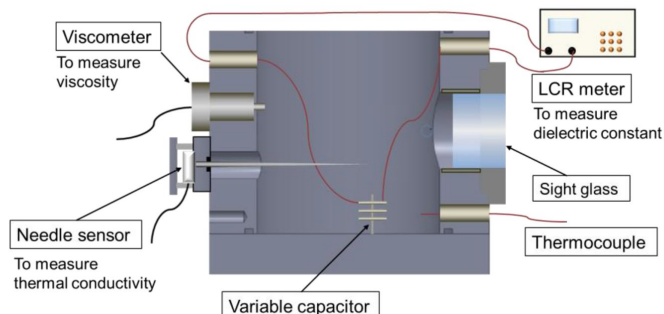


図1 圧力容器における物性値測定

(3) ナノオイルの流動特性および潤滑特性

ナノオイルの適用により、圧縮機内の漏れの抑制効果が期待できる一方で、キャピラリーチューブのつまりなどが懸念される。そこで、微小な隙間におけるナノオイルの流動特性を明らかにすることにより、ナノオイルによるシール効果や流動に対する閉塞の有無について明らかにする。実験に使用した微小流路を図3に示す。流路は鋼材研磨面と光学研磨を施したガラス面

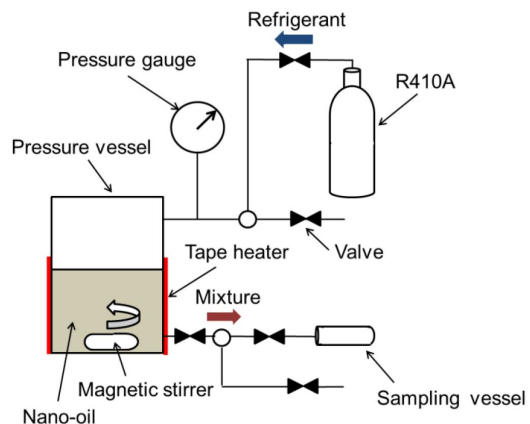


図2 冷媒混合物の物性値測定

で構成され、その隙間は隙間ゲージにより 10~100 μm に設定できる。実験では、図 3 に示した隙間流路を用いて、図 4 に示す評価装置においてナノ流体の流量の経時変化を測定し、特に懸念される微小隙間流路の閉塞現象について評価した。試験流体には、ナノオイルとともに、分散性が保障されている市販の磁性流体を用いてその流動を検討した。また、ナノ粒子のベアリング効果による潤滑特性および漏れに対するシール性の評価は、研究室で開発された漏れと摩擦の同時測定装置¹⁾を用いて行った。

<引用文献>

1) T. Kitamura, M. Fukuta, M. Motozawa, T. Sotani, Leakage And Friction Measurement at Tip Seal of Scroll Compressors, Proceedings of the 9th Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning, (2018)

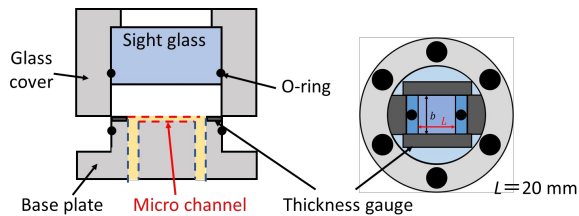


図 3 微小隙間流路

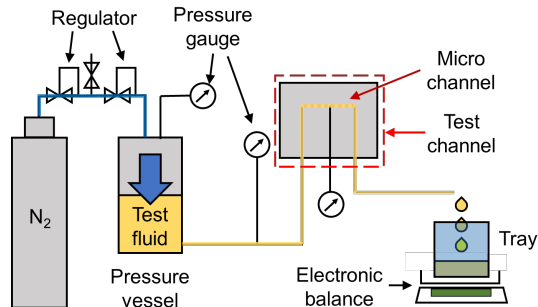


図 4 流量測定による閉塞評価装置

4. 研究成果

(1) ナノオイル中のナノ粒子の分散状態の評価

ナノオイルの調整法について、まずは鉱油と CuO(公称平均粒径 48nm)、分散剤(Sorbitan Monooleate, HLB=4.3)を用いて検討した結果、始めに分散剤と粒子を混合して粒子表面に分散剤の膜を形成し、その後基油を入れて超音波分散機にて 1 時間分散させた場合に、比較的良好な分散結果が得られた。次に冷凍機油の 1 種であるポリビニルエーテル(PVE)油において、同様の手順でナノオイルを調整した結果を図 5 に示す。ここで、PVE に対しては、分散剤として Sorbitan Monolaurate, HLB=8.6)を用い、粒子濃度は 1vol%、分散剤濃度は粒子の 5wt%である。図に示されるように PVE では超音波分散後、3 時間が経過すると沈殿が始まっており、ナノ粒子の長期の安定分散を得ることはできなかった。ここで図 6 に、ナノオイル(3vol%)を調整した後の熱伝導率の経時変化に対する攪拌の影響を示す。熱伝導率はナノ粒子の添加によって基油のそれ(直線)より増加するが、2 時間を経過すると粒子は沈殿を始め、徐々にその値は小さくなっていく。しかし、スターラによって攪拌し続けたものは、ナノオイル調整直後の分散状態にある熱伝導率の値を保っており、ナノ粒子は凝集によってナノサイズでは存在していないものの、機械的な攪拌により均一に分散していると見なすことができる。冷媒圧縮機内では、軸の回転などにより油は常に攪拌されている状況であり、ナノ粒子は物性値に影響を与えない程度には分散していると考えられる。以下の物性値測定では、攪拌し続けた状態で各物性値の測定を行った。

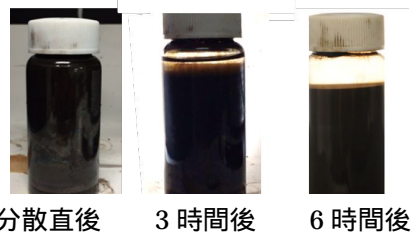


図 5 分散の安定性

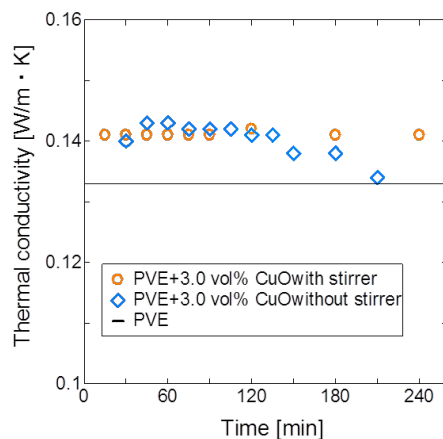


図 6 熱伝導率に対する攪拌の影響

(2) ナノオイルの物性値計測

まずは大気圧下において、ナノオイルの物性値を測定した。ナノ粒子の体積分率に対する熱伝導率、粘度、比誘電率の変化をそれぞれ図 7 から 9 に示す。

図 7 は CuO 粒子を混入した場合のナノオイルの熱伝導率の変化を、ナノ粒子の混入がないときの値を 1 として示す。ナノ粒子自体は油より大きな熱伝導率を持っているため、ナノ粒子の混合率が大きくなると、ナノオイルの熱伝導率は大きくなる。熱伝導率の増加傾向は Maxwell 方程式を修正した Hamilton-Crosser モデルと同じ傾向を示すが、増加量はモデルの予測値に比べてやや小さい。

図 8 に CuO 粒子を混入した場合のナノオイルの粘度変化をナノ粒子の混入がないときの値を 1 とし

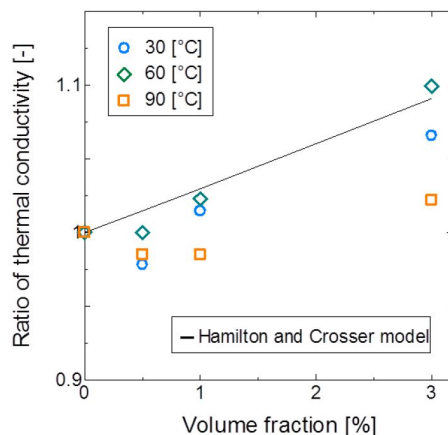


図 7 ナノオイルの熱伝導率

て示す。図より、ナノ粒子の混入によってナノオイルの粘度は大きくなる事が分かる。図中の線はそれぞれ、Einstein (1956), Batchelor (1977), Kole ら (2011) によって提案されたモデルによる予測値で、粒子の凝集を考慮して実験的に得られた Kole らのモデルによる予測が比較的合っている。

図 9 に CuO 粒子を混入した場合のナノオイルの誘電率の変化を、ナノ粒子の混入がないときの値を 1 として示す。ナノ粒子の混入によりナノオイルの誘電率が大きくなる事が分かる。これはナノ粒子自体の誘電率が大きいからであり、その変化は Maxwell-Garnet モデルによる予測よりやや大きな値となった。油の誘電率が大きくなると、圧縮機内のモータで発生する漏れ電流が大きくなって効率が低下するため、ナノオイルを適用する場合にはその誘電率に注意を払う必要がある。

熱伝導率、粘度、誘電率の変化は、 Al_2O_3 ナノ粒子を混合した場合についても調査したが、ナノ粒子の混入によるこれらの物性値の変化は、ほぼ同じであった。

図 10 に、CuO 粒子と Al_2O_3 粒子を混合した場合の表面張力の変化を、ナノ粒子の混入がないときの値を 1 として示す。表面張力はナノ粒子の混入によって増加するが、粒子の量を多くしていくとその増加割合は小さくなる。また、CuO ナノオイルと比較して、 Al_2O_3 ナノオイルの方が表面張力の増加割合はわずかに大きかった。

ナノオイルに冷媒が溶解した場合の物性値について、熱伝導率、粘度、および誘電率の測定を行った結果、冷媒濃度が小さい場合にはこれらの物性値はナノオイルの場合と同様にナノ粒子の添加によって増加し、冷媒濃度が大きくなると、ナノ粒子の添加による物性値の変化は小さくなった。これは、冷媒濃度がそれぞれの物性値に与える影響の方がナノ粒子の添加による影響より大きいためである。冷媒が溶解した場合の物性値の測定例として、図 11 に熱伝導率の変化を冷媒溶解度に対して示す。本研究の範囲では、ある温度と圧力における冷媒溶解度はナノ粒子の添加によりそれほど変化しなかったが、ナノ粒子の添加によってナノオイルの密度が大きく増加していることを加味すると、純粋な油の質量に対しては冷媒溶解量が増えていることとなり、ナノ粒子の添加が冷媒溶解度および物性値に与える影響については、さらに深く検討する必要がある。

本研究で得られた物性値の情報は、国内外において始めて得られたものであり、物性値としての学術的価値に加え、物性値の変化を検出することによるナノ粒子濃度センサの開発などにつながるものである。

(3) ナノオイルの流動特性および潤滑特性

ナノ粒子を含んだ潤滑油には、しゅう動隙間における漏れを減少させるシール効果が期待される一方で、圧縮機内の油の供給路やサイクルにおけるキャピラリーチューブ等の膨張装置における流れの閉塞を引き起こす可能性が危惧される。そこで図 3 に示した隙間管路において、隙間高さ、流速、粒子濃度等を変えて、その流動特性について、特に閉塞の発生の有無について検討した。ナノオイルは前述の通りその分散性が不安定なため、ナノオイルと共にナノ粒子の分散が保証されている磁性流体(公称平均粒子径 10nm)を用いて試験を行った。図 12 は微小な隙間にナノ流体を流した場合の流量の経時変化例を示す。青い破線は流量がほぼ一定で流れており、2 次元ポアズイユ流れとして流量を見積もることができる。緑の一点鎖線は時間の経過と共に徐々に流量が小さくなっていく

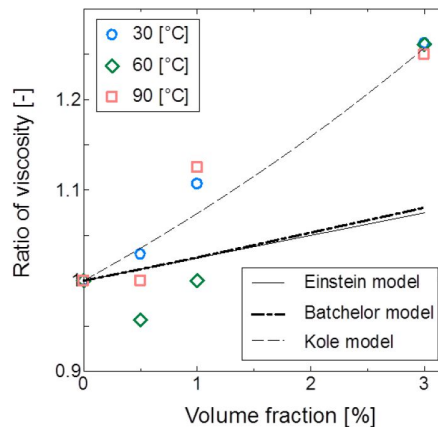


図 8 ナノオイルの粘度

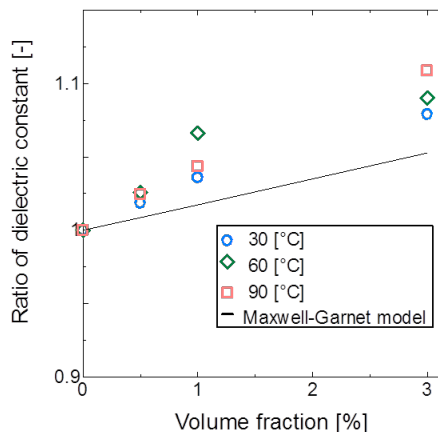


図 9 ナノオイルの比誘電率

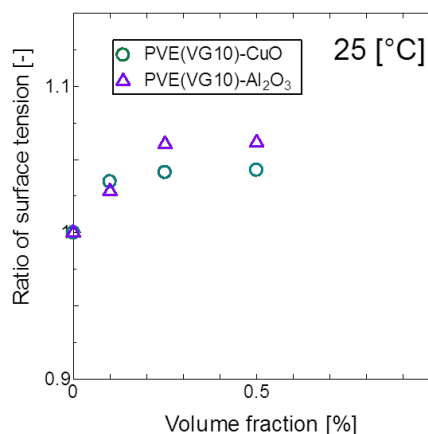


図 10 ナノオイルの表面張力

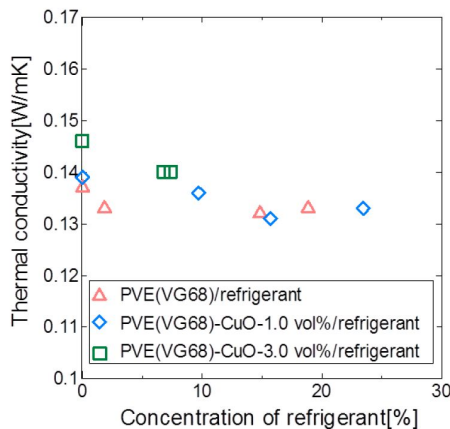


図 11 冷媒溶解時の熱伝導率

場合である．赤の点線は，ナノ流体を流し始めるとすぐに流量が減少していき，流路が閉塞して流れなくなる場合である．図 13 に示すように，流れが閉塞する場合には流路入口において粒子の凝集体が観察され，それによって流路が閉塞していることが分かる．ナノ粒子の大きさは流路の 1/1000 のオーダーであるが，流路入口の急縮小部で粒子同士が衝突して付着・凝集し，さらにヘテロ凝集によって凝集体の形成が促進されて流路の閉塞

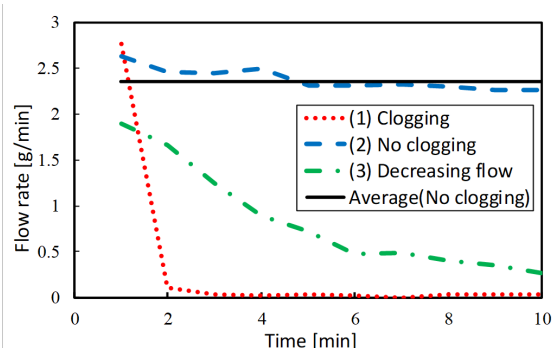


図 12 微小流路におけるナノ流体の流量変化

にいたると考えている．

流路の閉塞はいつも起こるわけではなく，不安定な現象であるため，それぞれの条件において，流れが閉塞した場合を 1，流れが徐々に減少していった場合を 0.5，流れの減少がほとんどなかった場合を 0 とし，複数回の実験の閉塞頻度を評価した．

図 14 は，横軸に粒子体積濃度をと，縦軸に

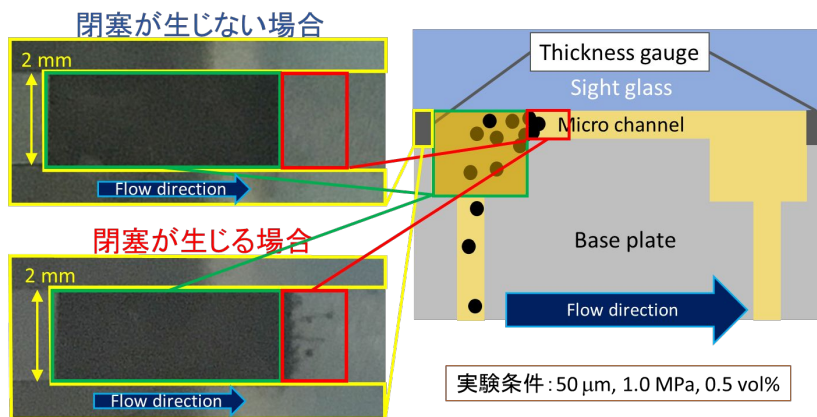


図 13 微小流路のナノ粒子の凝集による閉塞の様子

レイノルズ数(主に隙間高さと流速を反映)をとって，閉塞頻度を数字で示している．閉塞頻度はいつも閉塞が起こる場合が 1，いつも起こらない場合が 0 となっており，閉塞頻度が大きい場合は数字を赤くして示している．図より，粒子濃度が小さいほど閉塞頻度が小さいが，粒子濃度が 0.005 vol% と非常に薄い濃度でも閉塞現象が観測される場合があった．また，ナノオイルにおいて，流路高さが 20 μm ，50 μm ($Re=0.02 \sim 2000$) の時に閉塞が生じたが，さらに隙間高さの小さい 10 μm ($Re < 0.02$) では閉塞が生じなかった．一般的に粒子濃度が大きく，流路隙間が小さいほど閉塞現象が生じやすいように思われるが，必ずしもそのような条件において閉塞が生じるわけではなく，微小流路内のナノ流体特有の流動現象が存在するものと推察される．また，ナノ粒子の分散が保証されている磁性流体でも，粒子の体積濃度が高く，レイノルズ数が小さい(流路隙間が小さい)ほど，閉塞が生じることが分かる．これらの閉塞現象は，流路入口に面取りを施すことにより緩和することができ，流路の閉塞現象を漏れのシール効果として積極的に利用しつつ，微小な隙間においても閉塞を起こさないように流れをコントロールすることも可能である．

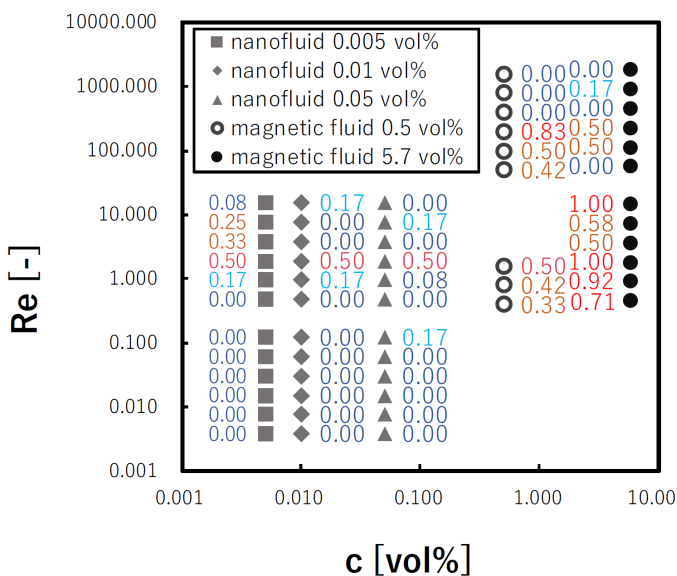


図 14 微小流路の閉塞発生頻度

本研究室で有する漏れと摩擦の同時計測装置を用いて，ナノオイルの漏れと摩擦について評価したところ，ナノオイルの粒子濃度が 0.5 vol% 以上の領域では，粒子濃度の増加に伴って基油に対して漏れ量が減少し，ナノオイルによるシール性が確認された．また，全ての押付力の条件下で，ナノオイルの摩擦係数の値が基油と比較してやや減少する傾向を示した．さらに，多角形の CuO ナノ粒子に対して Al₂O₃ ナノ粒子は球形に近い形状を持ち，CuO ナノオイルに対して Al₂O₃ ナノオイルは，押付力が小さい条件でより小さい摩擦係数を示した．

これらの知見は，冷媒圧縮機においてナノオイルを適用する場合の検討材料として有用なデータベースとなるばかりでなく，マイクロ流路における磁性流体の適用といったアプリケーションにも応用可能であり，ナノ流体の実用化に向けて，ナノ流体の流動特性に対する基礎データとなる．

5 . 主な発表論文等

[学会発表](計 2 件)

M. Motozawa, N. Makida, M. Fukuta, Experimental Study on Physical Properties of CuO - PVE Nano-oil and its Mixture with Refrigerant, 24th International Compressor Engineering Conference at Purdue , #1569 , 査読あり(2018) .

瀬戸俊介, 本澤政明, 福田充宏, マイクロ流路における磁性流体の閉塞現象と磁場の影響, 平成 30 年度磁性流体連合講演会, pp.33-34, 2018 年 .

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：本澤 政明

ローマ字氏名：(MOTOZAWA, Masaaki)

所属研究機関名：静岡大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号(8桁): 50516185

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。