

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12632

研究課題名(和文)液体のダイナミクスから見たイオンナノ流体の機能解明

研究課題名(英文)Liquid dynamics in ionic liquid based nanofluids

研究代表者

吉田 亨次(Yoshida, Koji)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号：00309890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：イオン液体を始めとする種々の液体に数パーセントのナノ粒子を分散させたものはナノ流体と呼ばれ、新しい熱輸送媒体として注目されている。ナノ流体の高い熱伝導の原因をナノ流体を構成するベース液体の運動の観点から調べるため、X線・中性子散乱およびNMRを測定した。液体分子のダイナミクスを広い時間スケールで観測し、液体分子の並進運動や回転運動を明らかにした。ナノ粒子表面に存在する液体分子ではナノ粒子との相互作用で運動が遅くなっていることが明らかになった。これらの情報を用いると、ナノ流体の計算機シミュレーションの検証が可能であり、分子設計によってナノ流体の物性を制御することが可能になると思われる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱エネルギーの輸送は熱マネジメントにおいて重要であり、エネルギーの有効利用のためには高効率な熱輸送媒体の開発は必要不可欠となっている。ナノ流体は純液体に比べて熱伝導率が高いことが報告されており、新しい熱輸送媒体として期待されている。本研究では、ナノ流体を構成する液体のダイナミクスを幅広い時間スケールで観測した。その結果、ナノ粒子表面での液体分子はナノ粒子との相互作用で運動が遅くなっていることが明らかになった。分子間相互作用の観点から液体の構造や運動を調べることで、ナノ流体の物性の発現原理を明らかにし、物性の制御可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Nanofluids, in which a few volume percent of nanoparticles are dispersed in various liquids, such as an ionic liquid, are attracting attention as a new heat transport medium. X-ray and neutron scattering, and NMR measurements were performed to clarify the cause of the high thermal conductivity of nanofluids in terms of the motion of the liquid that constitutes the nanofluid. By using different techniques, the dynamics of liquid molecules were observed over a wide time scale, and the translational and rotational motions of liquid molecules were revealed. The experimental results show that liquid molecules on the nanoparticle surface are slowed down in motion by their interaction with the nanoparticles. This information can verify the result of nanofluids by computer simulations. We can control the properties of nanofluids by molecular design in the future.

研究分野：溶液化学

キーワード：ナノ流体 液体 中性子散乱 X線散乱 ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

イオン液体を始めとする種々の液体に数パーセントのナノ粒子を分散させたものはナノ流体と呼ばれる[1]。ナノ流体は純液体に比べて熱伝導率が高いという特徴があるため、新しい熱輸送媒体として期待されており、実際に一部実用化されている。ナノ流体の熱伝導率は一般的に Maxwell-Garnet 則から予測されるが、多くのナノ流体について実測値は予測値よりも大きな値を示すことが報告されている。熱伝導率が向上するメカニズムはいくつか提案されているが、どの効果が支配的であるのかはまだ明らかにはなっていない。また、工業的応用においてはナノ流体の粘性率が重要なパラメータとなるが、ナノ粒子を添加したことによる粘性率の変化についての理論もまだ確立されていない。

種々のナノ粒子(金属、金属酸化物、炭素材料など)と種々の液体の組み合わせからなるナノ流体は非常に多くの種類が存在する。それらの物性については、実験的に測定された結果が多く報告されている。しかし、ナノ粒子と液体の組み合わせを系統的に調べた研究はあまり行われおらず、ナノ流体の設計指針などは明らかにされていない。また、分子動力学計算を用いた研究例も多いが、そこではナノ粒子のポテンシャルをレナードジョーンズ相互作用で表している。つまり、ナノ粒子表面を疎水性を持つ壁として表している。そのため、計算結果と現実系との厳密な比較は困難となっている。

液体分子の運動の観点からのナノ流体の研究は、本研究の研究代表者らによって行われた。銅ナノ粒子/エチレングリコール系およびアルミナナノ粒子/水系の X 線非弾性散乱測定が行われ、熱伝導率と液体分子の運動の間の相関が見出された[2]。

エチレングリコールや各種オイルなどの有機溶媒にナノ粒子が分散されたナノ流体が多く開発されている。その理由はナノ粒子の分散性が高いためであるが、一方、高温での使用では火災等の危険がある。そのため、熱的に安定な水やイオン液体をベースとしたナノ流体の開発が望まれている。

このような状況を踏まえると、ナノ流体の液体分子の運動を実験的に明らかにし、その物性の発現原理を説明することが必要であると考えられる。その結果、水やイオン液体をベースとしたナノ流体について、高い性能を有するナノ流体の設計指針を確立することが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、時間と空間の両方の情報が得られる中性子準弾性散乱および X 線非弾性散乱、および NMR 緩和を手段として用い、液体のダイナミクスを観測し、ナノ流体を構成する液体分子の運動とナノ流体のマクロな性質(熱伝導率や粘性率)との関連性を明らかにする。分子の運動は分子間相互作用に関する情報を反映するため、分子動力学計算の結果の検証にも役立つと考えられる。

3. 研究の方法

イオン液体 butyltrimethylammonium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide $[N_{4111}^+][NTf_2^-]$ に種々のナノ粒子(アルミナ、カーボンブラック)を超音波分散法により分散させ、ナノ流体の安定性を検証した(イオンナノ流体)。また、水中にナノ粒子(アルミナ、酸化チタン、酸化ジルコニウム、パラジウム)を分散させたナノ流体を試薬メーカーより購入した(水系ナノ流体)。これらのナノ流体は長期間、分散状態にあった。

中性子準弾性散乱は、茨城県東海村にある J-PARC 物質・生命科学実験施設の DNA (BL02) 分光器および東大物性研究所 AGNES 分光器で測定した。測定のための試料はアルミニウムで作られた二重円筒形セルである。酸化ジルコニウム(ZrO_2)/水系のナノ流体は、加水分解を防ぐため、pH が 4-5 に調整されている。そのため、ガラス製の二重円筒形セルを用いた。中性子準弾性散乱では、水素原子の非干渉性散乱断面積が他の原子に比べて非常に大きいので、液体を構成する分子中の水素原子の運動が観測される。本研究では、エネルギー分解能が高い条件で測定を行ったため、比較的遅い運動、すなわち、液体分子の並進運動が観測される。そこから、単純拡散モデルを使うと液体分子の拡散係数が得られる。

X 線非弾性散乱は SPring-8 BL35 ビームラインで実施した。試料セルは石英毛细管を使用した。本研究で用いたエネルギー分解能は 1 meV 程度であり、液体分子の分子間振動(フォノン)の観測が可能である。X 線は電子によって散乱されるため、X 線非弾性散乱では水素原子を除いた酸素原子などの運動が観測される。水分子であれば水分子の重心の運動が観測される。

NMR 緩和測定については福岡大学に既設の Bruker Ascend 400 を用いて、Inversion-recovery 法によって、液体分子のスピン格子緩和時間 T_1 を測定した。NMR 緩和から明らかにされる分子運動の時間スケールは中性子準弾性散乱で観測される時間スケールに近いが、NMR 測定では水分子の ^{17}O 核の緩和を測定しているため水分子の回転運動に関する情報が得られる。これは ^{17}O 核は核スピン量子数が 5/2 であり、四極子緩和(核の四極子モーメントと周囲の電場勾配との相互作用による)が支配的であるからである。

4. 研究成果

ナノ流体の中性子準弾性散乱を測定し、ナノ流体中の水分子の拡散係数を得た。図1は10 wt% ZrO₂/水ナノ流体の QENS 測定結果であり、QENS スペクトルの半値幅を Q^2 に対してプロットした。ここで Q は散乱ベクトルの大きさである。図1において、最小二乗法により得られた直線の傾きが拡散係数である。表1には各温度および各濃度における ZrO₂ ナノ流体の拡散係数を示した。ZrO₂ 濃度が 10 wt% 以上になると、すべての温度で拡散係数は減少した。これは、ZrO₂ ナノ粒子周囲の水分子の移動が、ナノ粒子との引力相互作用によって制限されていることを示唆している。拡散係数の温度依存性からアレニウス活性化エネルギーを算出した。活性化エネルギーは、ナノ粒子の濃度が 20 wt% まで上昇すると、誤差の範囲内ではあるが、わずかに上昇するようである。これは、水分子とナノ粒子表面との間の引力的相互作用に起因するものと思われる。

ZrO₂ ナノ流体の NMR 緩和測定では、ナノ粒子の濃度が高くなるにつれて、 T_1 は減少した。これは、水分子の回転運動が遅くなっていることを示している。中性子散乱を同じ傾向である。すなわち、水分子とナノ粒子表面との相互作用により、並進運動と回転運動の両方が遅くなっていることが明らかになった。

ナノ流体の X 線散乱測定では、液体分子からだけではなく、ナノ粒子からの散乱も含まれる。図2に ZrO₂ ナノ流体の X 線散乱プロファイルを示した。ナノ粒子の濃度が増えるにつれて、低い Q 側での散乱が大きくなっている。これはナノ粒子の大きさに依存した小角散乱が観測されている。 $Q = 3 \text{ nm}^{-1}$ 以上では、散乱強度はほとんど一定であり、液体の散乱が支配的であると考えられる。そのため、 $Q = 3 \text{ nm}^{-1}$ 以上のスペクトルに液体のダイナミクスが反映されていると考えて、解析を行った。

図3に ZrO₂ ナノ流体の X 線非弾性散乱スペクトルを示した。物質のフォノン励起を再現するモデルを使って、 Q の関数としてフォノン励起エネルギーを求めた。一般に分散関係(角周波数と波数の関係)は音速に相当する。しかし、X 線の波長は原子間距離に近いので、本研究で得られる量は音速ではなく、原子の粗密の伝わりを反映する高周波音速となる。ZrO₂ 水系では、高周波音速は純水に比べて 3 % 程度大きくなる傾向がみられた。すなわち、ナノ粒子の影響により水の構造化が起こっていると考えられる。ナノ粒子の周囲の水の構造化は分子動力学計算などからも明らかにされている。

以上の結果は、ナノ流体中の水のダイナミクスがバルクのそれとは異なることを示している。これがナノ流体の熱伝導率を向上させる理由の一つであると考えられる。

また、ナノ流体はベース液体に比べて、粘性率が Einstein 則で予測される値よりも大きくなる傾向が報告されている。本研究の結果、ナノ流体中では水分子の並進運動と回転運動が抑制され、フォノンダイナミクスが高速化することが明らかになった。このことは、ナノ流体中の水の微視的な粘性率が純水よりも大きいことを示している。つまり、水のダイナミクスの変化は、ナノ流体の粘性率の上昇に関係している可能性がある。

イオン液体からなるナノ流体については、いずれの系においても、純水な液体との違いは測定誤差の範囲内であった。ナノ粒子の濃度が 2 wt% であるため、ナノ粒子の表面にある液体に比べてバルクの液体の量が多く、ほとんどバルク液体の性質を観測しているためと思われる。ナノ粒子の濃度を上げる試みを行ったが、ナノ粒子が沈降してしまい、測定が可能な試料は得られなかった。

本研究では、ナノ流体において、分子間相互作用を反映する液体分子のダイナミクスを実験的に得ることができた。ナノ粒子界面にある液体とバルクの液体を区別するというミクロスコピックな議論はできないが、分子動力学シミュレーションではそのような研究が可能である。分子動力学シミュレーションでは、分子間相互作用を仮定する必要があり、結果の実験的検証が必要である。本研究の成果はその検証に役立つと考えられる。

[1] R.A. Taylor et al. "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids". Journal of Applied Physics. 113 (1), 011301–011301–19 (2013).

[2] K. Yano, K. Yano, K. Yoshida, K. Kamazawa, H. Uchiyama, S. Tsutsui, A.Q.R. Baron, Y. Fukushima, T. Yamaguchi, "Investigation of collective dynamics of solvent molecules in nanofluids by inelastic x-ray scattering", J. Mol. Liquids 248 468–472 (2017).

[3] K. Yoshida, Y. Sanada, T. Yamaguchi, M. Matsuura, H. Tamatsukuri, H. Uchiyama, "The translational, rotational, and phonon dynamics of water in ZrO₂ /water nanofluid", J. Mol. Liquids 366, 120218 (2022).

表1 中性子準弾性散乱より得られた酸化ジルコニウムナノ流体の拡散係数[3]。温度ならびにナノ粒子の濃度を変化させている

Diffusion constant ($10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) of water molecule obtained from the QENS measurements of ZrO₂ nanofluid at 5, 10, 20, and 30 wt% and pure water.

T/K	water	5 wt%	10 wt%	20 wt%	30 wt%
298	1.90 ± 0.01	1.95 ± 0.02	1.87 ± 0.01	1.63 ± 0.02	1.47 ± 0.02
293	1.71 ± 0.01	1.74 ± 0.01	1.70 ± 0.03	1.48 ± 0.01	1.25 ± 0.02
288	1.53 ± 0.01	1.53 ± 0.01	1.51 ± 0.01	1.39 ± 0.02	1.21 ± 0.01
283	1.32 ± 0.01	1.34 ± 0.01	1.32 ± 0.01	1.11 ± 0.02	1.06 ± 0.01
278	1.13 ± 0.01	1.13 ± 0.01	1.13 ± 0.01	0.941 ± 0.027	0.895 ± 0.021

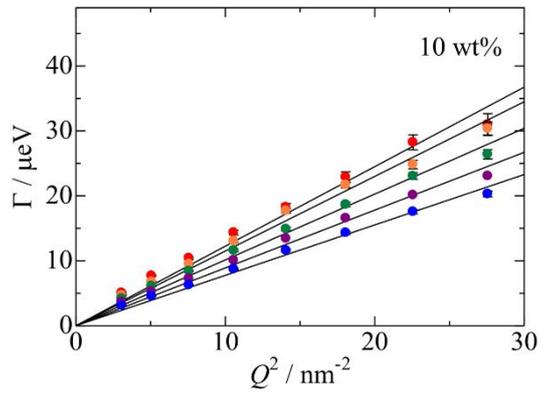


図1 10 wt% ZrO₂/水ナノ流体の中性子準弾性散乱の測定結果[3]。QENS スペクトルの半値幅を Q^2 に対してプロットしたもので、傾きは拡散係数に相当する

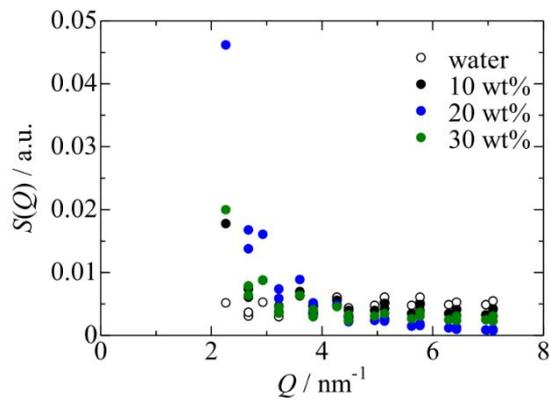


図2 いくつかの濃度における ZrO₂/水ナノ流体の X 線散乱の測定結果。濃度が高くなると、低い Q 側で散乱が大きくなり、ナノ粒子の小角散乱に帰属される

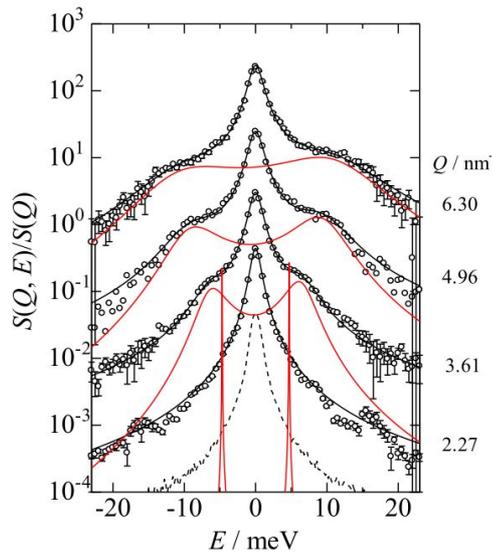


図3 散乱ベクトル Q を変化させたときの ZrO₂/水ナノ流体の X 線非弾性スペクトル[3]。破線は装置の分解能関数、赤線は水のフォノン励起を表す

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamaguchi Tsuyoshi、Yoshida Koji、Hosokawa Shinya、Ishikawa Daisuke、Baron Alfred Q. R.	4. 巻 157
2. 論文標題 Effects of molecular shape and flexibility on fast sound of organic liquids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 154504 ~ 154504
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0107387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshida Koji、Sanada Yusuke、Yamaguchi Toshio、Matsuura Masato、Tamatsukuri Hiromu、Uchiyama Hiroshi	4. 巻 366
2. 論文標題 The translational, rotational, and phonon dynamics of water in ZrO ₂ /water nanofluid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Molecular Liquids	6. 最初と最後の頁 120218 ~ 120218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.molliq.2022.120218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shirai Jun、Yoshida Koji、Koreeda Hiroki、Kitamori Takehiko、Yamaguchi Toshio、Mawatari Kazuma	4. 巻 350
2. 論文標題 Water structure in 100nm nanochannels revealed by nano X-ray diffractometry and Raman spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Molecular Liquids	6. 最初と最後の頁 118567 ~ 118567
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.molliq.2022.118567	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshida K.、Yamaguchi T.、Bowron D. T.、Finney J. L.	4. 巻 23
2. 論文標題 The structure of aqueous solutions of hexafluoro-iso-propanol studied by neutron diffraction with hydrogen/deuterium isotope substitution and empirical potential structure refinement modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 13561 ~ 13573
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D1CP00950H	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hosokawa Shinya, Kamiyama Takashi, Yoshida Koji, Yamaguchi Toshio, Tsutsui Satoshi, Baron Alfred Q.R.	4. 巻 332
2. 論文標題 Collective dynamics of liquid acetone investigated by inelastic X-ray scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Molecular Liquids	6. 最初と最後の頁 115825 ~ 115825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.molliq.2021.115825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hosokawa Shinya, Kamiyama Takashi, Yoshida Koji, Yamaguchi Toshio, Tsutsui Satoshi, Baron Alfred Q.R.	4. 巻 332
2. 論文標題 Collective dynamics of liquid acetone investigated by inelastic X-ray scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Molecular Liquids	6. 最初と最後の頁 115825 ~ 115825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.molliq.2021.115825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Toshio, Fukuyama Nami, Yoshida Koji, Katayama Yoshinori	4. 巻 12
2. 論文標題 Ion Solvation and Water Structure in an Aqueous Sodium Chloride Solution in the Gigapascal Pressure Range	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 250 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c03147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Yongquan, Yamaguchi Toshio, Zhang Wenqian, Ikeda Kazutaka, Yoshida Koji, Zhu Fayan, Liu Hongyan	4. 巻 22
2. 論文標題 The structural elucidation of aqueous H3B03 solutions by DFT and neutron scattering studies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 17160 ~ 17170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CP02306J	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Yongquan, Yamaguchi Toshio, Ikeda Kazutaka, Yoshida Koji, Otomo Toshiya, Fang Chunhui, Zhang Wenqian, Zhu Fayan	4. 巻 11
2. 論文標題 Dihydrogen Bonds in Aqueous NaBD ₄ Solution by Neutron and X-ray Diffraction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1622 ~ 1628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b03183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhu Fayan, Yamaguchi Toshio, Yoshida Koji, Zhang Wenqian, Liu Hongyan, Zhou Yongquan, Fang Chunhui	4. 巻 145
2. 論文標題 Ion hydration and association in aqueous potassium tetrahydroxyborate solutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 2245 ~ 2255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9AN01662G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida K., Yamaguchi T.	4. 巻 718
2. 論文標題 Generalized Langevin analysis of inelastic X-ray scattering for copper/ethylene glycol nanofluid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 74 ~ 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2019.01.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Koji, Ishida Shigeru, Yamaguchi Toshio	4. 巻 117
2. 論文標題 Hydrogen bonding and clusters in supercritical methanol?water mixture by neutron diffraction with H/D substitution combined with empirical potential structure refinement modelling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Molecular Physics	6. 最初と最後の頁 3297 ~ 3310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00268976.2019.1633481	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Koji, Uchiyama Hiroshi, Yamaguchi Toshio	4. 巻 291
2. 論文標題 Structure and dynamical properties of hydrated F-actin investigated by X-ray scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Molecular Liquids	6. 最初と最後の頁 111265 ~ 111265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.molliq.2019.111265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 吉田亨次、山口敏男、馬渡和真
2. 発表標題 ナノ空間に閉じ込められた水のX線構造解析
3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yoshida, T. Zenin, T. Yamaguchi
2. 発表標題 The effect of alkyl ammonium ionic liquids on aggregation of α -lactoglobulin
3. 学会等名 Polysolvat2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田亨次、山口敏男、馬渡和真
2. 発表標題 300 nmのナノ空間に閉じ込められた水のX線回折測定
3. 学会等名 第43回溶液化学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 亨次、松浦 直人
2. 発表標題 酸化ジルコニウムナノ流体中の水のダイナミクス
3. 学会等名 日本分析化学会 第69会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yoshida, T. Yamaguchi
2. 発表標題 Inelastic X-ray scattering measurements of copper/ethylene glycol and alumina/water nanofluids
3. 学会等名 36th International Conference of Solution Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yoshida, T. Yamaguchi, K. Yano
2. 発表標題 Solvent dynamics of nanofluids investigated by X-ray scattering
3. 学会等名 International Conference on Small Science 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 赤坂一之, 赤浜裕一, 東 正樹, 跡見順子, 阿部 洋, 阿部文快, 石河孝洋, 石黒 亮, 石松直樹, 一柳 光平, 伊藤英司, 稲熊宜之, 乾 雅祝, 井上 徹, 今井基晴, 入船徹男, 岩橋 均, 上杉健太, 上床美 也, 吉田亨次 (他 152名)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 500
3. 書名 高圧力の科学・技術事典	

1. 著者名 K. Nishiyama, T. Yamaguchi, T. Takamuku, N. Yoshida, K. Yoshida (他)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 481
3. 書名 Molecular Basics of Liquids and Liquid-Based Materials	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------