

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06066

研究課題名(和文) 回転円すいを用いた遠心力場における高粘度液体の揚水遷移と液糸の生成メカニズム

研究課題名(英文) Pumping-up transition of high viscous fluid and generation mechanism of liquid-filament under the centrifugal force field by a rotating cone

研究代表者

足立 高弘 (Adachi, Takahiro)

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60344769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：頂角を下にした円すいを水に浸し回転させると、円すい外表面を膜状流れが揚水される。水より粘性の大きなニュートン流体では曳糸性の影響により、円すい外表面には糸状の揚水が現れる。このとき、円すい外表面の揚水流には遠心力が作用するにも拘らず液が飛散することはない。膜状揚水から糸状揚水への遷移現象を利用して液体から液糸をうまく生成する機構について調べた。本研究では、回転数と粘度の変化に対して膜状揚水と糸状揚水の発生条件を明らかにした。また、揚水に必要な動力の値を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、液糸の生成方法について研究を行なった。円すいを回転させる方法を用い、これまでとは異なる製法を用いることで、必要となる消費動力の低減にもつながる可能性を有することを見いだした。このような方法は、コロナ対策で品不足となった不織布マスクを生成することに応用できる。日本の繊維産業が急速なテンポで縮小を余儀なくされきた中で、不織布だけは確実な成長を遂げており、生活に密着した分野から工業分野にいたる幅広い分野の新用途で発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：When a cone is immersed in water and rotated, a filmwise flow is pumped up along the outer surface of the cone. In the case of Newtonian fluid that is more viscous than water, filament-wise pumping-up flow appears on the outer surface of the cone due to the effect of spinnability. At this time, the liquid does not scatter despite the centrifugal force acting on the pumped flow on the outer surface of the cone. We investigated the mechanism of successful formation of liquid filament-wise flow from using the transition phenomenon from filmwise pumping to filament-wise pumping. In this study, the generation conditions of the filmwise pumping and the filament-wise pumping were clarified with respect to the change of the rotation speed and the viscosity. Moreover, the value of power required for pumping was clarified.

研究分野：熱流体工学

キーワード：回転円すい 膜状揚水 糸状揚水

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

頂角を下にした円すいを水に浸し回転させると、円すい外表面を膜状流れが揚水される。水より粘性の大きなニュートン流体では曳糸性の影響により、円すい外表面には糸状の揚水が現れる。このとき、円すい外表面の揚水流には遠心力が作用するにも拘らず液が飛散することはない。この興味深い現象を利用して液体から液糸を生成する機構についての研究を行う。一方、高粘度で非ニュートン性を有する高分子流体の場合には、分子の配向により液が揚水されずに下降する現象が見られる。本研究では回転数と粘度の変化に対して膜状揚水と糸状揚水の発生条件を明らかにする。また、非ニュートン性の変化に対して、下降流が形成される条件を明らかにする。さらに、揚水に必要な動力および周囲へ放出される液滴や液糸の分布特性を明らかにする。

### 2. 研究の目的

図1は、作動媒体が水の場合に回転円すい周りの液膜流を高速度ビデオカメラを用いて可視化した結果であり、回転数を0から6000 rpm程度まで徐々に変化させた場合の膜状揚水を示している。図1(a)は初期状態で、円すいが静止している状態である。円すいが回転し始めると、遠心力の斜面上向き分力の効果により図1(b)のように水面が持ち上がる。しかし、この時点では回転数が小さいため、それ以上液が上昇することはない。さらに回転数を増大させると、図1(c)のように持ち上がった水面位置が高くなり、半径方向に変形し飛散する。その後、円すい外表面に沿った均質な薄い液膜流が形成され、液が膜状に安定的に揚水される。液がさらに上昇するに伴い円すいの半径が増大するので膜厚がより薄くなる。そのため膜状流は微粒化して円すい底部の縁で剥離し、液滴となって周囲に噴霧される(図1(d))。

円すい外表面を揚水される液の形態は水の場合には液膜流となるのに対して、液体の粘性が大きくなると曳糸性の影響により液糸の形態で揚水される。図2は、ポリビニルアルコール(PVA)を水に混ぜ5wt%濃度水溶液にして水よりも粘度を大きくした場合の糸状揚水の様子を示している。液糸の筋が周方向に規則的に現れ、円すい外表面を円すい底部の縁まで上昇する(図2(a))。揚水された糸状流は液糸として周囲に放出される(図2(b))。今までのところ、揚水から周囲に放出される過程では、図3のA(膜状流から液滴)およびD(糸状流から液糸)の過程が確認できている。このような現象はこれまでに国内外を問わず報告例のない興味深い現象であり、過程Aについて本申請者等の報告があるのみである。ただし、膜状揚水から糸状揚水への遷移メカニズムは明らかではない。また、回転数や粘度等の変化によっては、B(膜状流から液糸)あるいはC(糸状流から液滴)の過程の実現も期待できるが、それぞれのパターンの遷移条件や、放出された液糸の直径分布などの基礎的な理解については未だ明かではない。一方、ここで用いたPVA水溶液は非ニュートン性を有する作動媒体であり、その濃度をさらに増加させた場合には非ニュートン流体としての特異な現象が現れる。図4は、10wt%のPVA水溶液の場合の回転円すい周りの可視化写真である。PVAのような高分子液体の場合には、ワイゼンベルグ効果により、回転のせん断による分子の配向が生じて法線応力差が生じる。回転円柱の場合には液面を上昇させる効果となるが、回転円すいの場合には円すい斜面下向きに分力が生じて液を下降させる効果が生じる。図4では、円すい壁面近傍で下降流が生じ液面が凹んだ下降凹流となっている。ただし、PVAは疑塑性を有する非ニュートン流体であり、剪断速度により粘度が変る。回転数が小さい場合には粘度の大きな第1ニュートン流体となるが、回転数が大きくなると粘度の小さな第2ニュートン流体に収束する。粘度が小さくなると、再び遠心力による揚水の効果が支配的になり揚水が生じ膜状あるいは糸状に上昇流が生成されることが期待できるが、その詳細は明らかでない。

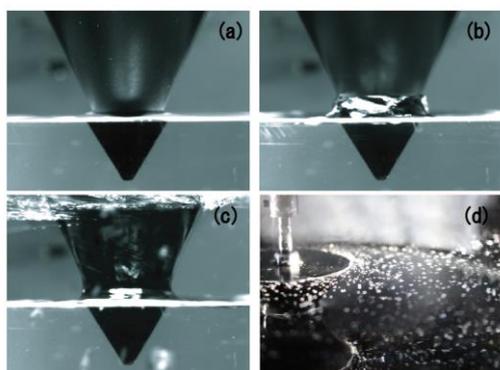


図1 膜状揚水流と液滴の放出

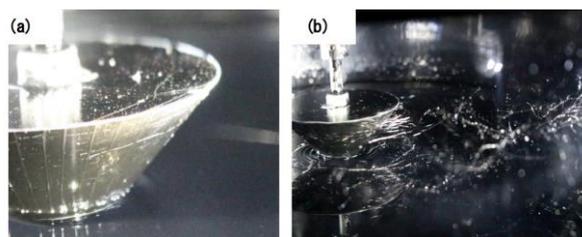


図2 糸状揚水と液糸の放出。図2(b)の回転数、シャッター速度は図1(d)と同じ

本研究では、回転円すい外表面に生成される膜状揚水と糸状揚水および下降凹流の遷移現象を円すいの回転数と液の粘度および非ニュートン性の変化により明らかにすることと、生成された液系の直径分布や空隙密度等の特性と回転数や流量および消費動力等との相関関係を明らかにすることが目的である。本研究では、膜状流から糸状流への遷移と図3のA、CおよびDの過程に着目する。膜状揚水と糸状揚水の遷移は円すいの回転による遠心力場におけるレイリー・テイラーの不安定性に関連があると考えられる。すなわち、密度の大きな液が遠心力の斜面上向き分力によって加速度を受け密度の小さな空気中に揚水されると考えられる。その際、液の粘度が比較的小さい場合には円すい壁面との粘性摩擦が小さいため液全体が壁に沿って膜状に揚水され、粘度が大きくと壁面との摩擦が大きく膜状には揚水されず壁面から僅かに離れた核となる点から曳糸性によりフィンガー状に揚水され糸状揚水が形成されると予想される。それらの基礎的なメカニズムを明らかにするために、まず取り扱いの容易なグリセリン水溶液(ニュートン流体)を用いて、粘度(濃度)を変更することで揚水が生じる回転数の臨界値を明らかにする。膜状揚水が生じる回転数の臨界値は粘度が大きくなるに伴い増加し、一方で糸状揚水が生じる臨界値は粘度の増加に対して減少することが期待されるので、それらのパターンが交代する粘度に関する臨界値を明らかにする。次に、これらの揚水が生成される臨界条件に及ぼす非ニュートン性の影響を調べる。PVA水溶液(非ニュートン流体)を用いて、非ニュートン性(濃度)を変化させることで高分子の配向による下降凹流の発生条件を明らかにする。さらに、放出流の揚水および液系化に必要な消費動力を測定する。非ニュートン流体の場合には同じ濃度のPVA水溶液に対しても疑塑性の効果から回転数の大小により必要な消費動力の値が変わることが考えられる。さらに、揚水された放出流の特性について調べる。放出された液の形状は、粘度が比較的小さい場合には球状の液滴となるが(図3のA,Cの過程)、粘度が大きくなるにつれて曳糸性の影響から楕円球さらには液系に変化していくと考えられる(図3のDの過程)。特に、高分子流体の場合にこの傾向が強い。そのような液滴の粒子径分布や液系の直径分布や長さや空隙密度などの特性を明らかにすることが目的である。

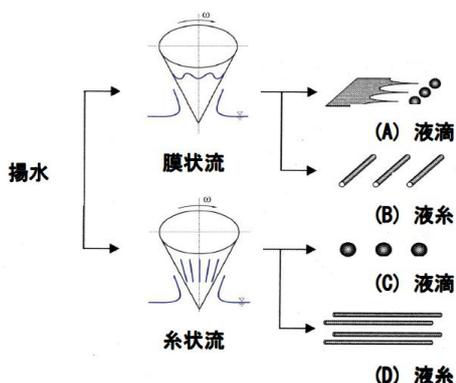


図3 流れパターンの分類

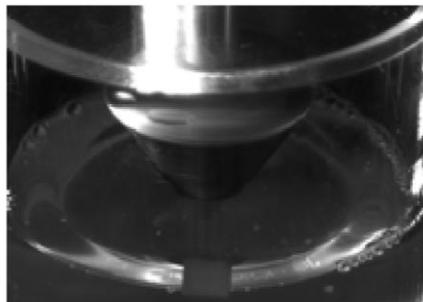


図4 分子配向による下降凹流の可視化

### 3. 研究の方法

実験装置の概略図を図5に示す。テストセクションでは、作動媒体である水あるいは粘性の異なる液体で満たされた円筒タンク中心に円すいが設置される。円すいを回転させると、円すい外表面を液が揚水され膜状流あるいは糸状流として外部に放出される。放出された作動媒体は2次タンク(左下)に回収され、バルブと流量計で流量を調節した上で再びポンプによって円筒タンクに送られる。十分に時間が経過すると、揚水され放出される作動媒体の流量は、円筒タンクに供給される流量と釣り合うので、流量を知ることができる。

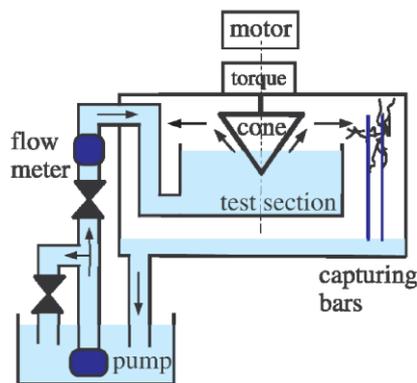


図5 実験装置概略図

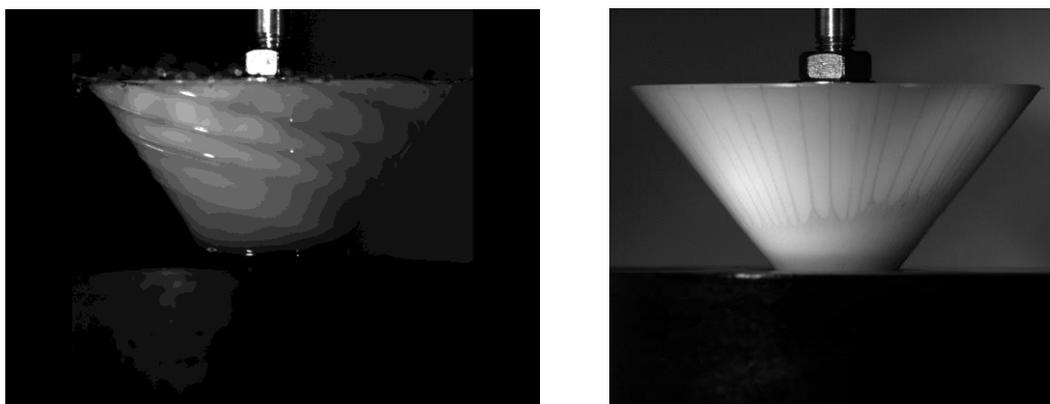
回転円すいの外表面を作動媒体が揚水される際に、膜状流と糸状流のどちらの流れ形態となるのか、その発生条件について調べる。この形態の違いは、作動媒体の粘度に大きく依存していると考えられる。そこで先ず、取り扱いの容易なニュートン流体であるグリセリンの濃度を変更することで粘度を変化させ実験を行う。高速度ビデオカメラを用いた可視化実験により円すい外表面の流れを可視化することで、流れのパターンの違いを捉え遷移条件を明らかにする。作動媒体は、粘度が水程度の大きさの場合には、粘性摩擦の効果が小さく遠心力によって膜状に揚水されるが、粘度が大きくなるにつれて曳糸性の影響が強くなる。粘度が大きい場合には、円すいを取り巻く界面に攪乱波が生じ振幅の大きな部分で遠心力がわずかに大きく、曳糸性のため

に糸を引き始める核となるポイントが存在する。円すいの表面に形状(凹凸)の不均一があれば、核の位置が変り糸状流発生の臨界値が変わることが予想される。そこで、円すい表面の加工精度や撥水・親水性等の表面性状を変更して実験を行う。次に、PVAを用いて非ニュートン性を変化させる。この場合には、上昇流が下降流に転じる臨界条件を調べる。この場合には、上述の条件に加えて円すいの頂角を変更することで、遠心力や分子配向による力の円すい斜面成分の値を変化させる。頂角が小さい場合には遠心力による揚水効果が小さく、法線応力差によるワイゼンベルグ効果が支配的になると考えられる。一方で、頂角が大きな場合には遠心力が支配的となり揚水が容易な状況になると考えられる。それぞれの状況において作動媒体が揚水され上昇流となるか下降流となるかの条件を明らかにする。さらに、回転円すいの回転軸に作用する軸トルクの測定を行う。トルクセンサーをモーターと円すいの上に挿入して測定する。

なお、さらに広範囲なパラメータ(粘度や回転数)に対して、汎用の流体解析ソフトであるOpenFOAMを用いた数値解析も並行して行う。水の場合の膜状揚水の計算結果の一例を図8に示す。OpenFOAMはフリーソフトであるが、高粘度の非ニュートン流体に関するソルバーが用意されており、この計算を実験と並行して行うことで、現象のさらなる理解に繋げる。

#### 4. 研究成果

高速度ビデオカメラを用いて可視化実験を行った結果を図6に示す。すなわち、回転円すい外表面を上昇する液膜流れと上昇した後周囲に噴霧される液滴の可視化実験を行った。図6(a)は、膜状揚水の結果であり、この度の高精細な可視化実験により膜が波打ちながら円すい外表面を上昇している様子がよく撮影できている。一方、図6(b)は、糸状揚水の可視化写真である。糸状に揚水される様子がよく撮影できている。また、図7は、OpenFOAMを利用して、この現象の再現に取り組んだ計算結果の可視化写真である。OpenFOAMによる計算結果においても、回転円すい外表面を液膜流が上昇する様子が再現できている。ただし、図7は膜状揚水の結果であり、糸状揚水の再現には至らなかった。微細な液糸の揚水を再現するためには、さらに細かなメッシュを必要になると考えられる。図7にトルクと回転数との関係を示す。液膜揚水するために必要な遠心力が回転数の2乗に比例するため、トルクも回転数に対して非線形に増加する。



(a) (b)  
図6 膜状揚水(a) と糸状揚水(b) の可視化写真

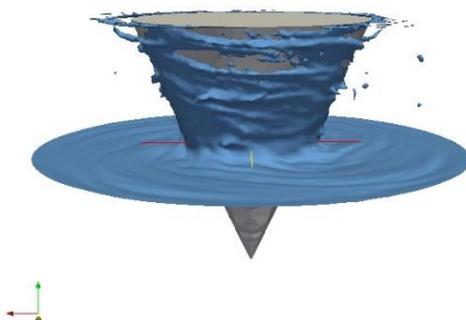


図7 OpenFOAM による計算結果の可視化画像(膜状揚水)

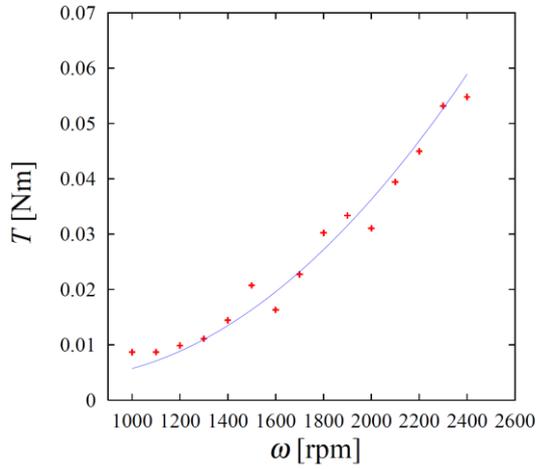


図8 トルクと回転数との関係

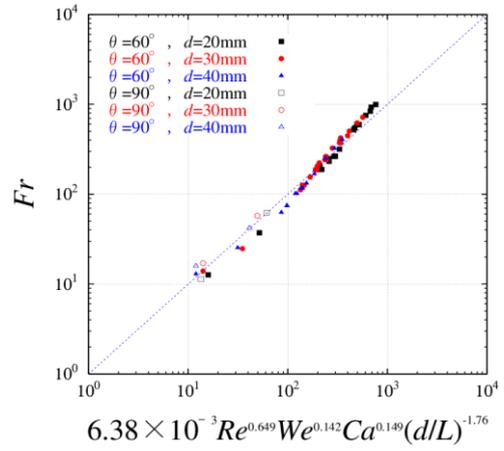


図9 無次元整理式による整理

次に、実験で得られた揚水開始回転数  $\omega$  と粘度  $\mu$  の関係を調べた。  $\theta=60^\circ$  では粘度  $0.890 \leq \mu \leq 149\text{mPas}$  の区間では膜状揚水が発生する。また、  $337 \leq \mu \leq 9750\text{mPas}$  の区間では糸状揚水が発生する。膜状揚水と糸状揚水の間粘度  $149 < \mu < 337\text{mPas}$  の区間では揚水は発生しない。一方  $\theta=90^\circ$  では  $0.890 \leq \mu \leq 849\text{mPas}$  の区間で膜状揚水が確認される。また  $2910 \leq \mu \leq 9750\text{mPas}$  の区間で糸状揚水が確認された。

次に無次元化に用いる無次元数を記述する。レイノルズ数  $Re$ 、フルード数  $Fr$ 、ウェーバー数  $We$ 、キャピラリー数  $Ca$  を以下のように定義する。

$$Re = \frac{\rho(2\pi\omega/60)d^2}{\mu}, \quad (1)$$

$$Fr = \frac{d(2\pi\omega/60)^2}{g \cos \theta/2}, \quad (2)$$

$$We = \frac{\rho d^3 (2\pi\omega/60)^2}{\sigma}, \quad (3)$$

$$Ca = \frac{\mu(2\pi\omega/60)d}{\sigma}. \quad (4)$$

以上の4つの無次元数と無次元長さ  $(d/L)$  を用いることで、  $\theta=60^\circ$  ,  $90^\circ$  の高粘度側で糸状揚水した時の無次元相関式を求めた。以下にその式を示す。

$$Fr = 2.13 \times 10^{-3} Re^{0.682} We^{0.171} Ca^{0.182} (d/L)^{-1.87} \quad (5)$$

糸状揚水の現象は式(5)に従い発生する。実験結果と無次元整理式による予想値のと比較を図9に示す。円すいの形状変化と作動媒体の物性値を含めた水系の性質、つまり円すいの角度  $\theta$ 、浸水直径  $d$  と液体の物性値、水系の大きさ  $(d/L)$  を変更したとしても揚水開始回転数  $\omega$  を予測することができる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahiro Adachi, Yutaro Takahashi, Takeshi Akinaga, Junnosuke Okajima	4. 巻 6
2. 論文標題 Effect of Viscosity on Pumping-Up of Newtonian Fluid Driven by a Rotating Cone	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization	6. 最初と最後の頁 57-65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 足立 高弘	4. 巻 63
2. 論文標題 回転円すいによる糸状揚水を用いた繊維製造技術への応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ケミカル エンジニアリング	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 足立 高弘	4. 巻 69
2. 論文標題 回転円すいを用いた繊維製造と不織布への応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 プラスチック（日本プラスチック工業連盟誌）	6. 最初と最後の頁 47-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Jun Kanamori, Takahiro Adachi, Junnosuke Okajima	4. 巻 6
2. 論文標題 Correlation of Rotation Rate, Viscosity and Immersed Diameter on the Threshold of Pumping-up Phenomena using Rotating Cones	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical and Production Engineering	6. 最初と最後の頁 51-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Takahiro Adachi, Yutaro Takahashi, Takeshi Akinaga, Junnosuke Okajima	4. 巻 6
2. 論文標題 Effect of Viscosity on Pumping-Up of Newtonian Fluid Driven by a Rotating Cone	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization	6. 最初と最後の頁 --
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Adachi, T., Kubo, T., Higashiono, K., Terashima, M., Takahashi, Y.	4. 巻 60
2. 論文標題 Correlation of oxygen mass transfer and power consumption in an aeration system by a rotating cone	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Engineering and Processing - Process Intensification	6. 最初と最後の頁 60-70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Takahiro Adachi, Yutaro Takahashi and Junnosuke Okajima	4. 巻 68
2. 論文標題 Film Flow Thickness along the Outer Surface of Rotating Cones	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 European Journal of Mechanics / B Fluids	6. 最初と最後の頁 39-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Jun Kanamori, Takahiro Adachi and Junnosuke Okajima
2. 発表標題 Correlation of rotation rate, viscosity and immersed diameter on the threshold of pumping-up phenomena using rotating cones
3. 学会等名 397th International Academic Conference on Development in Science and Technology, Taipei, Taiwan
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Kanamori, Takahiro Adachi and Junnosuke Okajima
2. 発表標題 Transition of pumping-up flow patterns with high viscosity in a centrifugal force field by rotating cones
3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaro Takahashi, Takahiro Adachi, Takeshi Akinaga and Junnosuke Okajima
2. 発表標題 Effect of Viscosity on Pumping-up of Newtonian Fluid Driven by Rotating Cone
3. 学会等名 14th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yutaro Takahashi, Takahiro Adachi and Junnosuke Okajima
2. 発表標題 Power consumption of liquid atomization device by using rising film flow along a rotating cone and disk
3. 学会等名 2nd International Conference on Fluid Dynamics & Aerodynamics, Rome, Italy (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋 雄太郎・足立 高弘
2. 発表標題 回転円すいをを用いた高粘度溶液の揚水遷移と内部循環流の可視化
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第53期秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東大野晃慈・足立高弘
2. 発表標題 回転円すいによる周囲環境の熱制御および溶存酸素の移動促進
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第52期秋季講演会・講演会論文集
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 東大野晃慈・足立高弘・寺嶋光春
2. 発表標題 回転円すいによる周囲環境の熱および溶存酸素の同時制御と消費動力
3. 学会等名 第19回日本水環境学会シンポジウム・講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Koji Higashiono, Takahiro Adachi, Yuutarou Takahashi, Junnosuke Okajima and Takeshi Akinaga
2. 発表標題 Heat and Fluid Flow Characteristics of Liquid Film Flow along Heat Transfer Surface with Microscopic Grooves
3. 学会等名 Proc. 13th International Conference on Fluid Dynamics, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Koji Higashiono, Takahiro Adachi and Toshiki Kubo
2. 発表標題 Correlation of Oxygen Transfer and Power Consumption in an Aeration System by a Rotating Cone
3. 学会等名 International Symposium on Green Manufacturing and Applications 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----