

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14673

研究課題名（和文）流動誘起ゲルの成長過程とその限界の解明

研究課題名（英文）Clarification on growth process of flow-induced gel and its limitation

研究代表者

原 峻平（Hara, Shumpei）

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：20844088

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、広い開水路の底面から浸出壁を介して界面活性剤溶液を浸み出すことで、開水路乱流中に流動誘起ゲルを作り出し、流動誘起ゲルの時空間的挙動を実験的に調査した。開水路底面の浸出壁に固着して形成された流動誘起ゲルは10 cmオーダーの大きさまで成長することが明らかになった。これは従来のマイクロ流路で報告されていた流動誘起ゲルに比べて10万倍の大きさと言える。この流動誘起ゲルは乱流状態にある高速な流れをせき止めるほどの固体的な性質を有しており、高速な流れから瞬間的に横向きの力を受けると流動誘起ゲルの表層部分のみ運動することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかにした、開水路乱流に形成された流動誘起ゲルの時空間的挙動は、ゲルゾル相転移の理論構築のみならず、生体内でのソフトマテリアルの役割や機構といった造詣を深めることにも繋がる。また、その知見は、流動誘起ゲルを利用した流体バルブ、生体システムに倣った周期的に膨潤・収縮を繰り返す自励振動機能を持った材料といった新技術・次世代の新規高機能性材料の開発の一助にもなる。

研究成果の概要（英文）：The present study experimentally investigated the temporal-spatial behavior of the flow-induced gel formed in the open-channel flow with surfactant solution dosing from the bottom wall. The formed flow-induced gel attached to the dosing wall grew to a size on the order of 10 cm. This was 100,000 times larger than the flow-induced gel reported in conventional microchannels. The flow-induced gel had a solid-like property and was tough to stop high-speed flow of the turbulent state.

研究分野：熱工学

キーワード：ソフトマテリアル 流動誘起ゲル 相転移 開水路

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ゲルとは、高分子が架橋された三次元的網目構造を骨格とする膨潤体であり、溶媒に不溶のものとして定義される。その中でも、流動中のせん断・伸長によって高分子鎖が絡み合い架橋して形成されるゲルを流動誘起ゲルと呼ぶ。流動誘起ゲルの作製や構造相転移を利用した物理的制御法などの次世代の材料・技術の開発のためには、流動誘起ゲルの動的な挙動に関する理論が必要とされる。流動と相互干渉しながら形成される流動誘起ゲルの成長過程とその成長限界を調べることは、ゲル相転移現象の理論構築のみならず流動誘起ゲルの力学的特性を知ることにもつながる。とりわけ、工業的に重要視される高速の流れ(乱流)に接して、流動誘起ゲルの形成・保持が確認された報告例はほぼ無い。

### 2. 研究の目的

本研究では、広い開水路の底面から浸出壁を介して界面活性剤溶液を浸み出すことで、開水路乱流中に流動誘起ゲルを作り出し、浸出壁に固着した流動誘起ゲルの時空間的挙動を実験的に調査する。そして、流動と流動誘起ゲル構造に関する双方の解析を通じて、流動誘起ゲルの時空間構造を明らかにし、流動誘起ゲルの成長過程と成長限界を解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

界面活性剤溶液の開水路乱流を対象に、積層金網で構成される浸出壁を介して同種溶液を浸出させ、可視化実験、粒子画像流速測定(PIV)および粒子像追跡流速測定(PTV)を行うことで調査した。

### 4. 研究成果

界面活性剤溶液の開水路乱流に同種溶液を浸出させると、たとえ数十 ppm の溶液であったとしても、浸出壁から流動誘起ゲルが形成されることがわかった。流動誘起ゲルはスパン方向に縞状の分布を持ち、流れ方向に一定の周期で揺らいでいる様子が確認できた。また、開水路乱流の溶液が水であったとしても、界面活性剤溶液を浸出することで小規模の流動誘起ゲルが形成されることがわかった。浸出を開始してから流動誘起ゲルは徐々に大きくなり、ある時間を堺に急激に成長した(図1)。そして、流動誘起ゲルとせん断乱流の界面は時間とともに揺動しつつ、流動誘起ゲルは壁から 10 cm オーダーの大きさまで成長することが明らかになった。また、流動誘起ゲルが形成されていく間に開水路の水位は変化しなかった。流動誘起ゲルの成長に及ぼす乱流の影響を明らかにするために、一様せん断乱流に設置したメッシュ付きノズルから形成される流動誘起ゲルの厚み  $h_{gel}$  を調べた結果、動粘度及び主流方向速度変動の乱れ強度と積分長スケールで構成される乱流レイノルズ数によって  $h_{gel}$  は整理可能であった。

開水路を利用した実験で得られた可視化画像に適応的二値化を施すことによって流動誘起ゲルの厚み  $h_{gel}$  を算出し、 $h_{gel}$  の時空間的推移を定量的に評価した(図2)。PIV の計測結果を吟味したところ、流動誘起ゲル内部の平均主流方向速度はゼロを示し、流動誘起ゲルが固体的性質を有するとともに、流れをせき止めていることがわかった。なお、開水路内に形成された流動誘起ゲルは手で触ると崩れる程度の強度であった。流動誘起ゲルの内部にある粒子の軌跡を調べたところ、粒子が内部を縦断して主流に合流することがわかった(図3)。また、流動誘起ゲルがせん断乱流から瞬間的に横向き力を受けた際、その表層部分のみ連動していることがわかった。

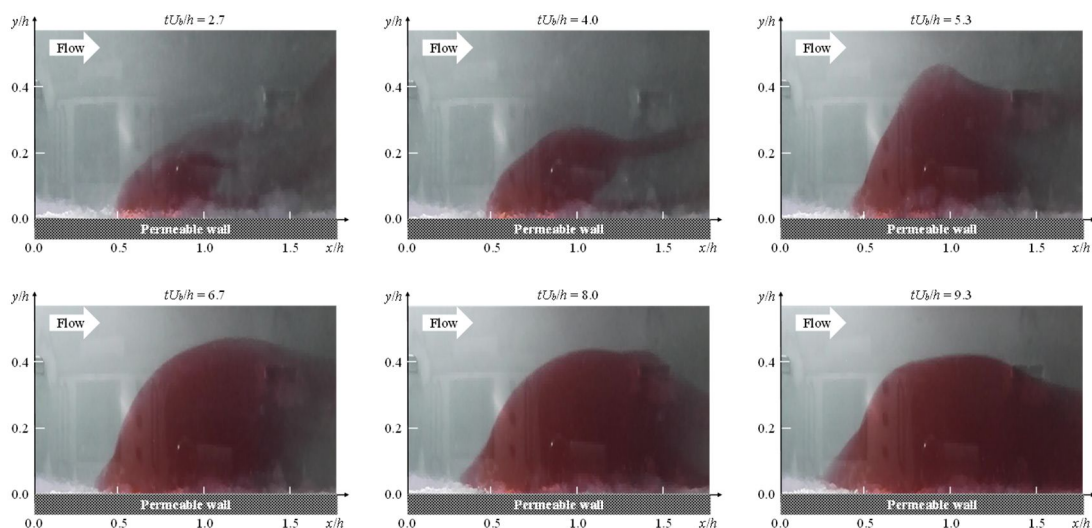


図1 80 ppm の界面活性剤溶液流れに染料入りの同種溶液を浸出した時の様子。開水路の水位  $h$  は 0.249 m、断面平均流速  $U_b$  は  $1.1 \times 10^{-2}$  m/s、浸出速度は断面平均流速の 1.7% とした。浸出開始からの経過時間を  $t$ 、主流方向を  $x$ 、壁面垂直方向を  $y$  としている。

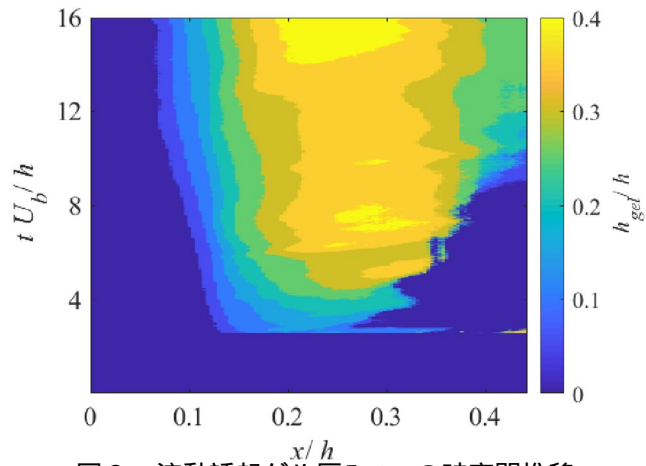


図2 流動誘起ゲル厚み  $h_{gel}$  の時空間推移．

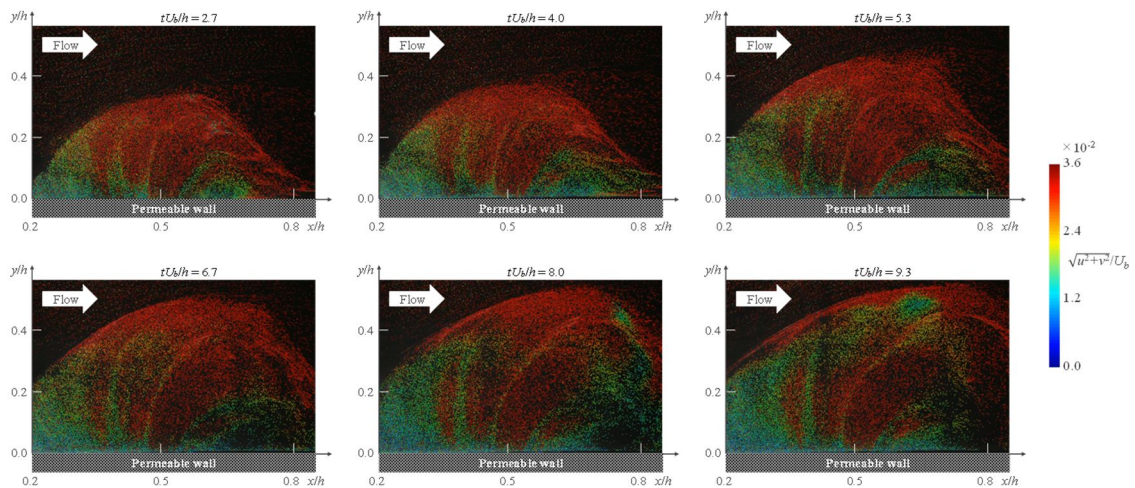


図3 80 ppm の界面活性剤溶液流れに染料入りの同種溶液を浸出した時の PTV の解析結果．  
コンターは主流方向速度  $u$  と壁面垂直方向速度  $v$  から成る絶対速度を表す．

た．この連動現象は，浸出壁付近では確認できなかったため，与えられた応力が流動誘起ゲル全体に伝播するわけではない事がわかった．

得られた成果は，国内・国際学会で発表済みであり，従来の考えが当てはまらない現象として関心を集めた．本研究の知見は，流動内におけるゾルゲル相転移に関する研究の進展に大きく寄与するものと言える．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1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 Hara Shumpei, Ishii Kazuki, Kawaguchi Yasuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Formation of Gel-Like Shear-Induced Structure with Dosing of Dilute Surfactant Solution and Its Effect on Turbulent Channel Flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Open Journal of Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 249 ~ 262
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/ojfd.2022.123012	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 森下 敬斗, 廣田 慎, 原 峻平	4. 巻 -
2. 論文標題 乱流における界面活性剤流動誘起ゲルの成長と崩壊	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会講演論文集	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 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 中川 雄登, 森下 敬斗, 原 峻平	4. 巻 -
2. 論文標題 開水路乱流への界面活性剤水溶液浸出により形成された流動誘起マクロゲルの成長過程	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第51回可視化情報シンポジウム論文講演集	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 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 Keito Morishita, Shin Hirota, Shumpei Hara	4. 巻 -
2. 論文標題 Influence of large-scale turbulent motion on formation of surfactant flow-induced gels	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 33rd International Symposium on Transport Phenomena	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 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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1．発表者名 森下 敬斗，廣田 慎，原 峻平
2．発表標題 乱流中における界面活性剤流動誘起ゲルの成長と崩壊
3．学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4．発表年 2022年

1．発表者名 中川 雄登，森下 敬斗，原 峻平
2．発表標題 開水路乱流への界面活性剤水溶液浸出により形成された流動誘起マクロゲルの成長過程
3．学会等名 第51回可視化情報シンポジウム
4．発表年 2023年

1．発表者名 Keito Morishita, Shin Hirota, Shumpei Hara
2．発表標題 Influence of large-scale turbulent motion on formation of surfactant flow-induced gels
3．学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena ( 国際学会 )
4．発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------