



粘弾性流体が形成するキャビティ内バルジ構造の生成メカニズム解明に関する研究

佐藤, 秀紀

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2024-09-25

(Date of Publication)

2026-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9023号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492532>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 佐藤秀紀 _____

専 攻 _____ 工学研究科応用化学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

粘弾性流体が形成するキャビティ内バルジ構造の生成メ
カニズム解明に関する研究

指導教員 _____ 鈴木洋 _____

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

近年、地球温暖化の抑制は喫緊の課題であり、産業横断的に脱炭素化に取り組んでいる。脱炭素化の取り組みとして、太陽光発電、風量発電などによる再生可能エネルギーの利用が促進されている。一方で、これらの発電量は従来の必要エネルギー量を満たすことはできておらず、エネルギー利用において消費エネルギー量を削減することが重要である。特に多くのエネルギーを使用する工場では、省エネルギー化は常に必要とされる課題である。省エネルギー化を達成するためにはエネルギー利用の効率化が必要になる。特に熱交換効率の改善は省エネルギー化に大きく貢献する。熱交換を少スペースで効率良く行う熱交換機としてプレート熱交換機のように、流路に凹凸を儲けることで伝熱面積を拡大させる手方がある。一方で、このような流路には急縮小部(リブと呼ぶ)と急拡大部(キャビティと呼ぶ)が生じ、水のようなニュートン流体を熱媒として用いた際にはキャビティ内の流体と主流には流れの剥離が生じ、キャビティ内には循環領域が形成される。これによって伝熱面積は効率的に使われず伝熱阻害を生じる。その解決策として、粘弾性流体を熱媒として用いる手方がある。急縮小急拡大流路において粘弾性流体を流した時には、バラス効果が発生しキャビティ内に流体が侵入することが知られている。加えて、本検討を通して、レイノルズ数を変更することで、キャビティ内で観測される流動挙動は変化し、中間レイノルズ数においてバルジ構造と呼ばれる流動挙動を示すことがわかった。バルジ構造は熱交換効率の改善に効果的であると考えられるものの、その発生メカニズムは不明である。本研究では、キャビティ内で観測されるバルジ構造の発生メカニズムを解明し、その上で伝熱促進に最も有効である流動挙動および流動条件を定義することを目的とし各検討を実施した。尚、本研究では、界面活性剤溶液を粘弾性流体として用いることで実験的に検討を実施した。

第2章では、キャビティ内で観測されるバルジ構造が生成する粘弾性特性条件について検討を実施した。加えて伝熱促進に有効である流動条件を決定するために、界面活性剤溶液の対イオン供給剤のモル比およびレイノルズ数を変更しながらキャビティ内の流動挙動の可視化およびテストセクションの圧力損失測定を実施した。流動挙動の可視化実験より、キャビティ内で観測される循環領域の大きさを定量化し評価することで伝熱性能を評価した。検討結果より、バルジ構造は対イオン共有剤のモル比が1.5の中間レイノルズ数において最も明確に観測され、流体の粘弾性特性が強くバルジ構造の形成に関連していることがわかり、バルジ構造は時間と共に大きさを変えながら生成と消失を繰り返す非定常流れであることがわかった。またバルジ構造形成時にはキャビティ内の循環領域が小さくなり伝熱促進に有効な流動挙動であると考えられる。一方で、テストセクションの圧力損失は比較的大きくなる。圧力損失を加味することで、伝熱促進に最も有効だと思われる流動条件は対イオン供給剤のモル比が5の時の低レイノルズ数領域であることがわかった。

第3章では、キャビティ内で観察される流動様式とその生成条件に関する検討を実施した。キャビティ内で観測される流動挙動は流体の慣性と弾性に強く起因して遷移す

(氏名： 佐藤秀紀 NO. 2)

と考えられるため、本検討では流路形状およびレイノルズ数を変更しキャビティ内の流動挙動可視化実験を行い、得られた結果を評価した。検討結果より、キャビティ内で観測される流動挙動は、界面活性剤溶液のゼロ剪断粘度基準のレイノルズ数に対するワイゼンベルグ数をプロットした $Re_0 - Wi$ Space で整理でき、流動挙動の遷移条件を粘弾性マッハ数およびデボラ数を用いることで定義できることがわかった。これにより、各流動挙動の発生条件が解明され、伝熱性能に最適な流動条件の設定が可能となった。

第4章では、キャビティ内の3次元的速度場を計測し、バルジ構造の形成メカニズムの解明を目的とした検討を行なった。異なる流動挙動の3次元速度場を計測するために、流体のレイノルズ数を変更しながら、キャビティ内の流動挙動を2台のカメラを用いて3次元的に観測し、得られた動画をPTV (Particle Tracking Velocimetry)によって解析した。PTV 結果を統計処理することで、キャビティ内の局所の時間平均流速と流速の変動強度を算出し、流動挙動が異なる結果を用いて比較検討を実施した。検討結果より、バルジ構造形成時には比較的奥行き方向の流れが強くなっており、バラス効果による奥行き方向の膨張流れおよび縮流がバルジ構造の形成に強く起因していることがわかった。加えて、キャビティ内の流速の変動強度を比較したところ、バルジ構造形成時に特有な位置で流速の変動強度が高くなっていることがわかった。この結果より、バルジ構造の形成メカニズムを解明した。

第5章では、キャビティ内の伝熱特性に焦点を当て、バルジ構造が示す流動挙動が伝熱促進に効果的であることを検証した。第2章と同様に界面活性剤溶液の対イオン供給剤のモル比を変更し、レイノルズ数を変更しながらキャビティ内の伝熱特性を計測した。伝熱特性を計測するためにテストセクションには電気加熱用のステンレス鋼箔を取り付け、そこに電気を流すことで内部流体を加熱した。局所の伝熱特性を計測するために、キャビティの底部に熱電対を複数設置し、局所の温度を測定することで局所の伝熱特性を評価した。検討結果より、バラス効果およびバルジ構造形成時にキャビティ側壁近傍において伝熱特性が良いことがわかった。これは第4章で検討したキャビティ内の3次元流動挙動の結果から説明がつく。キャビティ内全体の平均伝熱特性はバルジ構造形成時の時に最大となっていることからバルジ構造の形成は伝熱促進に寄与していることがわかった。しかし、第2章で述べる通り、バルジ構造形成時には圧力損失が高くなることから、圧力損失を加味すると対イオン供給剤のモル比が5の時に伝熱促進に有効であると言える。

本研究全体を通じて、急縮小急拡大流路を持つ熱交換機を対象とし、粘弾性流体の特性を利用した伝熱促進法を提案し、キャビティ内の流動挙動を正確に制御することにより、伝熱性能を大幅に向上させることが可能であることを示した。これはエネルギー効率の良い熱交換器の開発に大きく貢献する事が期待される。このような技術は、産業プロセスの省エネルギー化はもちろんのこと、環境負荷の低減にも寄与するため、持続可能な社会の実現に向けた重要な一歩となる。加えて、バルジ構造の形成メカニズムを解明した

(氏名： 佐藤秀紀 NO. 3)

ことで学術的にも意味があり，今後の粘弾性流体の特異流路における流動挙動の最適化および解明にも貢献できることを期待する．

氏名	佐藤 秀紀		
論文 題目	粘弾性流体が形成するキャビティ内バルジ構造の生成メカニズム解明に関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	鈴木 洋
	副 査	教授	大村 直人
	副 査	教授	浅野 等
	副 査	名古屋大学大学院工学研究科機械システム専攻教授	日出間 るり
	副 査		印
要 旨			
多くの熱交換器では、熱交換を高効率に行うため、一般に伝熱量を増大させる目的で、伝熱面にリブを設置して、伝熱面の拡大が行われている。しかしながら水などのニュートン流体を用いた場合には、リブ間のキャビティに流れの循環領域が生成される。その循環領域では流速が低下し、伝熱が不良となる。したがって有効な伝熱面積が限られる問題がある。 Suzuki ら(2002)は粘弾性流体が急拡大流路において流線がキャビティ方向に拡大し、キャビティ内に流体が効果的に侵入するバラス効果に着目し、熱媒体に粘弾性流体を用いる手法を提案した。このことにより、有効伝熱面積が拡大し、キャビティ内の伝熱特性が飛躍的に向上することを示した。本学位申請者は、この粘弾性流体が掃引するキャビティ内の流れに関して、様々なリブ配置、レイノルズ数について検討した結果、中間レイノルズ数域において、キャビティの上流上端において剥離した流れがキャビティの中間域でキャビティ上流下端に逆流して、さらにキャビティ底部を高速に掃引する流れ様式を見出した。剥離した流れとキャビティ上流面との間に剥離循環泡が生じることから、バルジ構造と名付けた。この構造の生成によって、キャビティ底部の伝熱特性がより向上することが期待される。 本研究はこのバルジ構造に着目し、流動および伝熱特性に関して検討したものである。可視化実験を通じてバルジ構造の発現条件を明らかにし、また粒子追跡法を拡張した三次元 PTV(Partuccke Tracking Velocimetry)を用いた3次元流動場測定によって発現のメカニズムを明らかにしている。さらにバルジ構造発現時の伝熱特性について検討し、新たな伝熱促進法の開発を提案するものである。 提出された本論文は6章からなる。第1章では序論として、エネルギーの高効率利用における熱利用の重要性およびその場合の熱交換の有用性について述べている。また従来のニュートン流体を用いた場合の熱交換特性に関して論じ、本研究で検討する粘弾性流体を用いた熱交換の有用性について述べている。また粘弾性を示す流体として界面活性剤を用いているが、その特性について言及している。ここで用いられている界面活性剤溶液は流動抵抗低減剤として知られている。その背景のもと本研究の目的および新規性を明確にし、第2章以下の粘弾性流体の流動構造を明らかにする中で見出された、バルジ構造の発現条件、バルジ構造発現のメカニズム、およびバルジ構造発現下の伝熱特性等を明らかにする取り組みに関する論文構成が明示されている。 第2章においては、まず粘弾性流体として用いるカチオン性界面活性剤のレオロジー特性を詳細に調べ、特に対イオンの濃度に対する流体の粘弾性特性について明らかにしている。次に可視化実験を行って流れ様式を観察している。その結果によって、キャビティ内での流れの再付着・剥離構造を明らかにし、剥離長さに関してワイセンベルク数に基づいたモデルとの比較を行っている。また中間レイノルズ数域において、キャビティの上流上端において剥離した流れがキャビティの中間域でキャビティ上流下端に逆流するバルジ構造を見出し、バルジ構造とキャビティ下流に生成される剥離域の振動が連動していることを見出した。さらに圧力損失に関して検討し、界面活性剤に対する対イオンのモル比に関して、流体がキャビティ内に侵入し、かつ圧力損失を抑制する最適値を明らかにしている。			

氏名	佐藤 秀紀
----	-------

第3章においては、リブ長さ、キャビティ長さ、リブ高さおよび流れの流速を系統的に変化させ、流れ様式の分類および発生条件の検討を行っている。その結果、リブ長さ、キャビティ長さ、リブ高さの流路形状によらず、粘性に対する慣性および弾性の強さを示すマッハ数が6以上、弾性緩和時間とキャビティ内を流体が通過する時間スケールの比であるデボラ数が1以下の場合にバルジ構造が生成されることを見出した。また様々なキャビティの幾何形状でキャビティ下流底面に見出される再付着および剥離に関して、幾何形状の影響を詳細に検討しており、特に剥離長さに関して、幾何形状・粘弾性を考慮した新たなモデルを提案し、その有用性を明らかにしている。

第4章においては、バルジ構造周りの流動特性について検討している。まずバルジ構造生成に関して、3次元流動が重要であることを示し、2カメラを用いた3次元粒子追跡法(3DPTV)の手法を開発している。この手法を用いて、3次元流動場を測定し、平均流動場および変動流動場の統計的性質を検討している。その結果、バルジ構造が生成される場においては、粘弾性流体のバラス効果が流路拡大方向のみならず、スパン方向にも生じて、流路側面で流速が大きくなること、そのためキャビティ中央の上流において減速が生じるため、流路中央部の下流域から流体が供給されるため、キャビティ内中央部からキャビティ上流の下端部に向かって逆流が生ずること、その後流路側面の高速流体がキャビティ下流で縮流によって流路中央を加速すること、この加速流が縮小部から拡大部へ流動することによって、バラス効果がスパン方向に生ずることを示した。このことによってバルジ構造生成メカニズムを明らかにしている。

第5章においては、バルジ構造が生ずる場における伝熱特性を検討している。その結果、粘弾性流体を用いた場合、キャビティ内の伝熱が向上すること、バルジ構造が生ずる場合、キャビティ上流および下流において、高い伝熱特性を示すこと、バルジ構造発生時には3次元的な伝熱特性を有することを明らかにしている。また対イオンモル比を変更した場合の伝熱特性についても論じており、第2章で得られた圧力損失との比を比較することによって、必ずしも粘弾性特性が顕著な対イオンモル比が1.5の場合よりも、粘弾性が弱く現れる対イオンモル比が5の場合の方が、圧力損失が小さいため、圧力損失を考慮した熱交換特性が良好であることを明らかにした。

第6章はまとめであり、本論文を総括している。その総括から、リブ間に生ずるキャビティ内の粘弾性流体の挙動について、流動様式、流動様式の発現条件を明らかにしている。また特異な流動様式である、中間レイノルズ域で見出されたバルジ構造の発生メカニズムを明らかにしている。さらに伝熱特性および圧力損失を測定し、粘弾性を示す界面活性剤溶液調整の最適値を結論している。本研究は、粘弾性流体が掃引するキャビティ流れおよび伝熱特性に関する新たな知見を示すものであり、新規に見出されたバルジ構造に関しての検討は、学術的意義が大きいと評価できる。

以上のように本研究の成果は、今後の化学工学・伝熱学の研究基盤となるものであり、工学上有用であると判断される。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の佐藤秀紀君は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。