

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06082

研究課題名(和文) 静電場中でのシートジェットの安定性と薄膜形成への応用

研究課題名(英文) Instabilities of a sheet jet in an electric field and application of the jet to forming a thin membrane

研究代表者

吉永 隆夫 (Yoshinaga, Takao)

同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員

研究者番号：40158481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：弱電導性の2枚の平行平板シース間を、スリットノズルより噴出した平面液体ジェットが流れるとき、流れ方向に平行な静電場がジェットの振る舞いに及ぼす影響を理論及び数値解析により明らかにした。特に、粘性率や表面張力などの流体パラメータと、電気伝導率や誘電率の電気パラメータの複雑な兼ね合いで現象が大きく異なることを示した。理論解析では、シート厚みが薄いとする近似の下で非線形の発展方程式を導出し、種々のパラメータに対する線形安定性を調べた。その結果を基にして、非線形方程式の初期値境界値問題を数値解析することにより、ジェット先端部が薄いシート状になる場合のパラメータ領域を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液膜の工業的な応用として、上方のスリットノズルから下方の被塗装物体に薄い液膜状の塗装液を落下させるカーテンフローコーティングが古くから知られている。しかし、液膜が途中で切れたり気泡などが混じる問題があり、液膜薄さや落下速度のコントロールなどこれまでいろいろ研究されてきた。本研究ではこのような問題の新しい解決方法として、静電場による安定な液体の薄膜の形成について提案し、解析的にそのような安定で薄い液膜形成のためのパラメータとその領域を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When a sheet jet emanating from a slit nozzle is flowing between two parallel planar walls with a weak conductivity along which an electric field is applied, behavior of the jet is investigated theoretically and numerically. In particular, the behavior is shown to be largely depending upon both liquid parameters such as viscosity and surface tension and electric parameters such as conductivity and permittivity. Jet equations are derived theoretically under a thin membrane approximation and linear instabilities are shown for the parameters. On the basis of these results, initial and boundary value problems are numerically solved and some parameter region in which the jet is reduced downward to be a thin membrane is clarified.

研究分野：流体力学

キーワード：平面ジェット 表面張力 静電場 非線形 不安定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、食品、化粧品、医薬、印刷等の多くの分野で微小粒子やカプセル、微細ファイバーの需要が高まっており、これらを静電場中の流体ジェットを用いてより微細で均一な粒子やファイバーを生成する試みが90年代以降盛んに行われるようになってきた。そのような例として、エレクトスピニングやスプレーが知られている。金属製の円形ノズルとコレクター間に高電圧(数千ボルト程度)を印加することにより、ノズル出口で高分子溶液の表面が帯電し、ノズル先端で形成されたテイラーコーンより数マイクロオーダーの微細な液糸が形成され、さらに下流で振れ回り不安定を起こしながらコレクターに到達する。このとき、印加電圧が低すぎると液糸から表面張力不安定により微小液滴が形成され、高すぎる場合はノズルから同時に多方向に複数のジェットが発生した後に液滴が形成される。一方で、カーテンフローコーティングとして知られているように、固体面のコーティング等において薄い液膜の需要があるが、上述の手法では作れない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、静電場中で細長いスリットノズルから液体を噴出してシートジェットを形成し、静電力によりこのジェットから安定な薄膜を形成する手法を開発することを目的とする。シートジェットは円柱ジェットとは異なり、ジェットは表面張力により安定化されるが、周囲流体との速度差により不安定化(空力不安定)されるため、これまでシートが途中で破断したり(カーテン切れ)、気泡が混入するなどの問題があった。本研究では、このようなシートジェットに現れる不安定性を静電場を用いて制御し、どのようなパラメータに対して安定な薄膜が形成されるかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示すような2枚の平行な弱電導性の平板シース間にスリットノズルより噴出したシートジェットが流れる状態を考える。平板シースには主流方向に電場をかけ、高分子溶液表面にイオン化や誘電分極により電荷が誘起され、ジェットは主流方向に引き延ばされ、急激に加速し極薄のシートが形成される。そのとき、シースで与えられた電場によりシート界面が接線方向に引っ張られるため、周囲流体による空力不安定は抑えられることが期待できる。本研究ではこのような平板シースではさまれた領域でのシートジェットの発展を記述する非線形方程式を導出し数値的に解くことにより、初期攪乱、外部電場、粘性、誘電率などの種々のパラメータに対して、薄膜の形成や破断の様子を明らかにする。

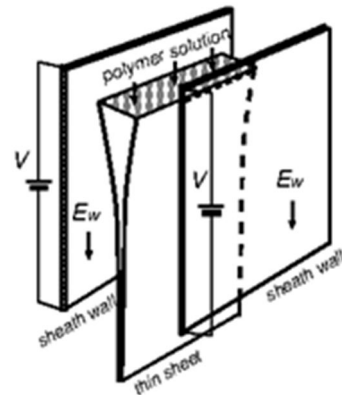


図1 平面シース間でのシートジェット

4. 研究成果

まず、二枚の平行平板間にある一様な粘性シートの線形安定性を、周囲流体が非粘性で外部電場が平行平板に沿ってかけられた場合について調べた。特に、電気 Peclet 数  $Pe$  (= 表面電荷の緩和時間/流体の移流時間)と電気 Euler 数 (= 静電圧/流体慣性力)のシートの安定性に及ぼす影響をパラメータの広い範囲で調べた。その結果、シートの不安定は空力不安定モードと静電不安定モードからなる。対称変形(シート両面の变形が反位相)では両不安定モードが融合し、 $Pe$ の減少と  $A$ の増加により不安定性はより強められる(図2左参照)。一方、反対称変形(シート両面の变形が同位相)

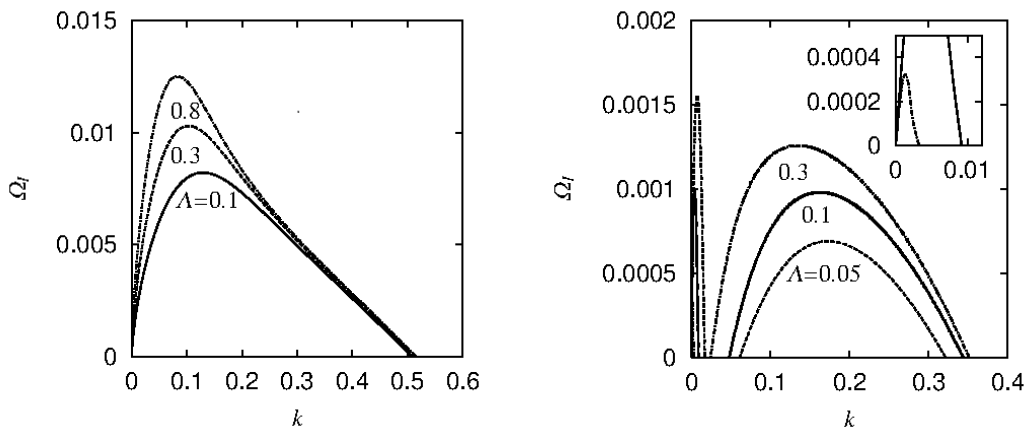


図2 変形波数  $k$  に対する時間増幅率  $\Omega_i$ : 左図は対称変形(空力, 静電両不安定モードは融合), 右図は反対称変形( $k \sim 0$ 付近は空力不安定モード,  $k \gg 0$ は静電不安定モード)。

ではこれらの不安定モードは常に分離しているが、 $Pe$  の減少により静電モードの不安定は増加するが空力モードの不安定は変わらない。しかし、 $\beta$  の増加とともに静電不安定モードはより強くなるが空力不安定モードは反対に弱められることがわかった(図2右参照)。さらに、両変形に対して、電気伝導率比(=周囲流体の電気伝導率/液体シートの電気伝導率)と誘電率比(=シートの誘電率/周囲流体の誘電率)の積が1の場合最も不安定性が抑えられ、その傾向は  $Pe$  が減少するとより強められることが示された[ ]。

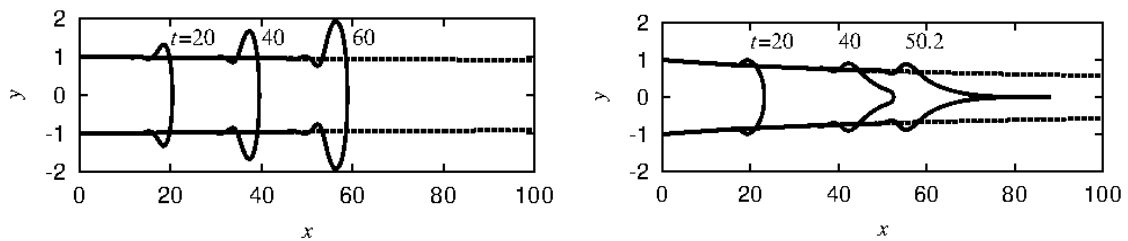


図3 対称攪乱に対するジェット先端部の形状の時間変化(破線は定常解)：左図は表面張力が支配的な場合( $Pe=100$ ,  $\beta=0.01$ )、右図は静電力が支配的な場合( $Pe=100$ ,  $\beta=0.1$ )。

一方、非線形解析に関して、厚みに比べて変形波長が長いとする「薄膜近似」を用いて、対称及び反対称両変形に対する新たなジェットの発展方程式を導出した[ ]。この方程式をスリットノズルからの放出条件を用いた初期値境界値問題として数値的に解くことにより、シートジェット先端部の発展に関して以下のことがわかった。(I)表面張力が支配的な場合、ジェット先

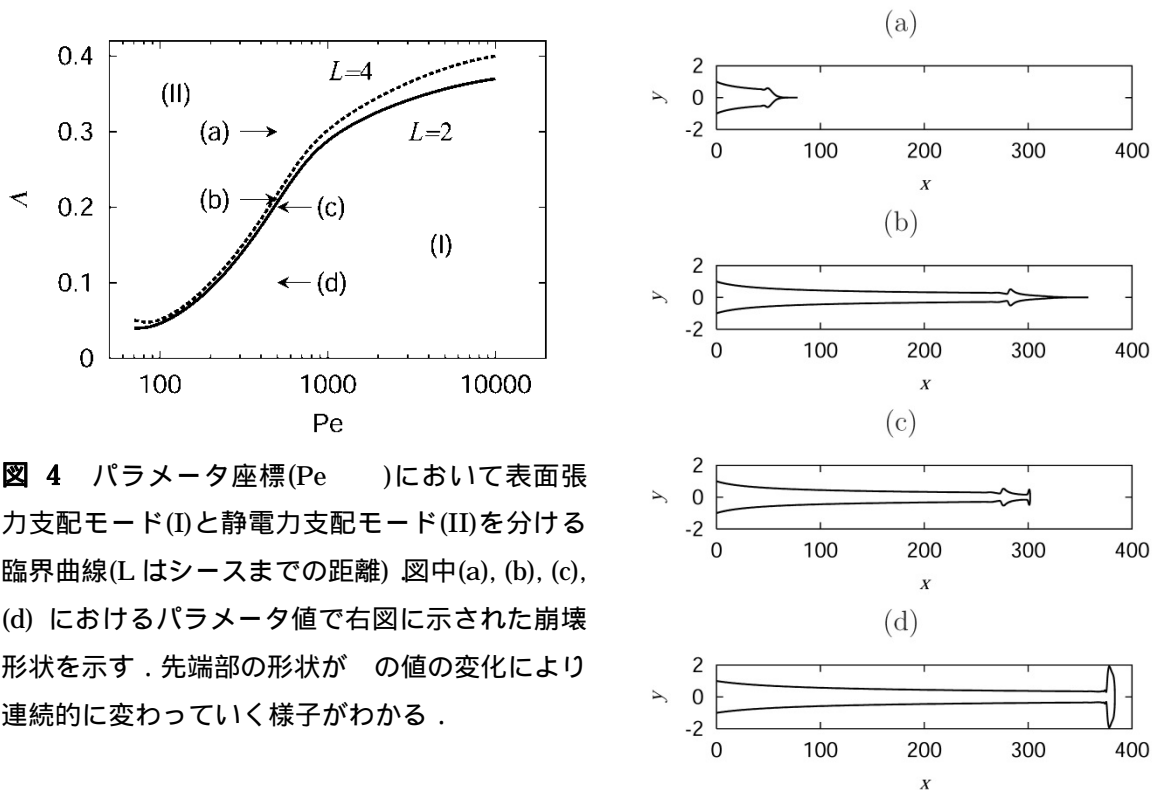


図4 パラメータ座標( $Pe$ )において表面張力支配モード(I)と静電力支配モード(II)を分ける臨界曲線(Lはスリットまでの距離) 図中(a), (b), (c), (d)におけるパラメータ値で右図に示された崩壊形状を示す。先端部の形状が  $\beta$  の値の変化により連続的に変わっていく様子が見られる。

端部が丸みを帯び薄膜形成には至らない(図3左参照)。(II)静電力が支配的な場合ジェット先端部が下流に向かって加速し厚みがどんどん薄くなって最終的に厚みの十分薄い薄膜が安定に形成される(図3右参照)。これら(I), (II)の二つの典型的な現象には  $Pe$  と  $\beta$  が深く関わっており、これら二つのパラメータ座標で(I), (II)の存在領域を調べた結果、 $Pe$  の減少と  $\beta$  の増加とともに(II)の領域が増えていくことが示された(図4左参照)。特に、二つの特徴的な先端部の形状が  $\beta$  の変化とともに連続的に変わっていく様子が確認できた(図4右参照)[ ]。このように先端部形状の変化から、 $Pe$  が小さく  $\beta$  が大きくなるにつれて、安定な薄膜形成が実現することがわかる。さらに、反対称変形に対してはジェット厚みが大きい間は中央面が不安定性により大きく変動するが、いったん厚みが薄くなると急激に安定化し薄膜が形成されることがわかった(図5参照)。

また、崩壊形状に関しては、静電力によりジェットが加速すると、空力不安定の影響が顕著になり、低速での破断現象とは異なった崩壊現象を示すことが予想される。実際、対称変形に関して、静電力を考慮していない円柱ジェットの崩壊では、ジェット流速が大きくなると断面がカスプ状に変形し、カスプ先端部から微細な液滴が発生し崩壊に至ることが示されている(図6

参照) [ ].

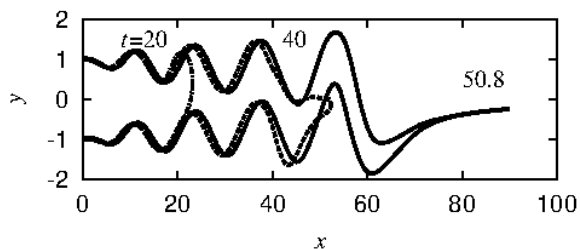


図 5 反対称攪乱に対するジェット先端部の形状の時間変化 ( $Pe=100$ ,  $\epsilon=0.1$ ) .

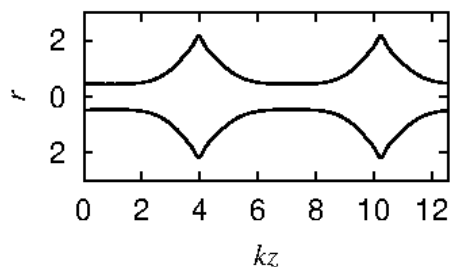


図 6 円柱ジェットでのジェット流速が大きい場合 (ウェバー数  $We=1000$ ) に現れる空力不安定モード .

<引用文献>

吉永隆夫, 静電場中での平面ジェットの安定性, 京都大学数理解析研究所講究録, 2034 (2017) pp.72-79

Yoshinaga, T., Linear instabilities of a planar liquid sheet in a static electric field for intermediate relaxation and convection of surface charges, Fluid Dynamics Res. 50 (2018) 025513 (28pp)

吉永隆夫, 岡本充弘, 静電場中での流体ジェットの安定性と崩壊( ), 京都大学数理解析研究所講究録, 1989 (2016) pp.214-218

Yoshinaga, T. and Okamoto, M., Breakup modes of a planar liquid jet in a static electric field, Fluid Dynamics Res. 50 (2018)045510(34pp)

吉永隆夫, 静電場でノズルから噴出する平面ジェット先端部の形状, 京都大学数理解析研究所講究録, 2128 (2019) pp.50-57

吉永隆夫, 同軸円筒内を流れる流体ジェットの安定性, 京都大学数理解析研究所講究録, 2076 (2018) pp.238-246

Yoshinaga, T., Instabilities of a liquid column jet in a surrounding gas flowing through a coaxial cylindrical sheath, Fluid Dynamics Res. 52 (2020) (掲載予定)

## 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 2件）

1. 著者名 Yoshinaga Takao	4. 巻 52
2. 論文標題 Instabilities of a liquid column jet in a surrounding gas flowing through a coaxial cylindrical sheath	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	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） doi.org/10.1088/1873-7005/ab9a9e	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 吉永隆夫	4. 巻 2128
2. 論文標題 静電場でノズルから噴出する平面ジェット先端部の形状	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 50, 57
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 Yoshinaga Takao	4. 巻 50
2. 論文標題 Linear instabilities of a planar liquid sheet in a static electric field for intermediate relaxation and convection of surface charges	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 25513
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1088/1873-7005/aaa3ca	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 Yoshinaga Takao, Okamoto Mitsuhiro	4. 巻 50
2. 論文標題 Breakup modes of a planar liquid jet in a static electric field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 45510
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1088/1873-7005/aac7be	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 吉永隆夫	4. 巻 2076
2. 論文標題 同軸円筒内を流れる流体ジェットの安定性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 238, 246
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 吉永隆夫	4. 巻 2034
2. 論文標題 静電場中での平面ジェットの線形安定性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 72, 79
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉永隆夫, 岡本充弘	4. 巻 1989
2. 論文標題 静電場中での液体ジェットの安定性と崩壊 ( I I I )	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 214, 218
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 吉永隆夫
2. 発表標題 高ウェーバー数での平面液体ジェットの破断
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉永隆夫
2. 発表標題 同軸円筒内での周囲流体を含む液体ジェットの安定性
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉永隆夫
2. 発表標題 高ウェバー数での平面液体ジェットの破断
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉永隆夫
2. 発表標題 同軸円筒内での周囲流体を含む液体ジェットの 安定性
3. 学会等名 日本物理学会分科会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉永隆夫
2. 発表標題 一様な静電場中での液体円柱の変形
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉永隆夫
2. 発表標題 静電場中でノズルから噴出するジェットの振る舞い
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉永隆夫
2. 発表標題 同軸円筒内を流れる液体ジェットにおける不安定モードの遷移
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Hara and T. Yoshinaga
2. 発表標題 Prediction and Optimum Size and Volume Ratio of Potatoes in Boiling Process for Ecological and Energy Saving Cooking
3. 学会等名 XXIIII IFHE World Congress (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉永隆夫, 縁田怜史
2. 発表標題 静電場中での平面液体ジェットの線形安定性
3. 学会等名 日本物理学会分科会
4. 発表年 2016年



1. 発表者名 吉永隆夫, 松田拓也
2. 発表標題 液体ジェットの臨界ミセル濃度近傍での液滴形成
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松田拓也, 吉永隆夫
2. 発表標題 円柱ジェットによる液滴形成に及ぼす界面活性剤の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉永隆夫, 縁田怜史
2. 発表標題 静電場中での平面液体ジェットの安定化
3. 学会等名 日本流体力学会年会
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
---------	---------------------------	-----------------------	----