

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月25日現在

機関番号：55301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：平成23年度～平成24年度

課題番号：23760167

 研究課題名（和文） フローフォーカシングによる高速平面伸張流動場における
粘弾性流体の流動挙動

 研究課題名（英文） Flow behavior of viscoelastic fluid
in high speed planar elongational flow

研究代表者

加藤 学 (KATO MANABU)

津山工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：20370017

研究成果の概要（和文）：せん断流動影響の小さな高速の平面伸張流動場を作り出す目的でシースコア流れを用いる手法を提案した。シースコア流れとは、伸張変形を加える流体(コア流体)を挟み込む形でシース流体を流動させ、コア流体とシース流体の合流部分で平面伸張流動を発生させる方法である。本研究では、本手法での粘性流体、粘弾性流体の流動挙動を実験的に確認した。粘弾性流体ではシース流体流量によって、四種類の流れ場が確認された。また、伸張後では流路の中央部分を壁面近傍とでは分子配向状態に差が無いことが確認できた。さらに、流路中心軸上の分子配向の分布から流動挙動に対する伸張流動の寄与の評価が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：It is proposed that the technique to generate planar elongational flow with high elongational rate by using core/sheath flow. In this study we carried out experiments to observe flow behavior for both viscous fluid and viscoelastic fluid in the flow. It is observed for viscoelastic fluid that flow behavior of the core fluid shows four kind of flow patterns from result of flow visualization and velocity profile. Next, we evaluated molecular orientation profile of elongated fluid by using crossed nicols method. As the results, measure of molecular orientation doesn't depend on the distance to sidewalls of the flow cell in elongational flow region. It is shown that contribution elongational property to the flow can be discuss from results of distribution of molecular orientation along center line of the flow cell.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
23年度	2,700,000	810,000	3,510,000
24年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総 計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：非ニュートン流，伸張レオメトリー，平面伸張流動，コア・シース流れ

1. 研究開始当初の背景

高分子材料は、三大工業材料として金属、セラミックと共に工業製品のあらゆる分野で使用されている。高分子材料は、結晶状態を取りえる結晶性高分子とそうでない非晶性高分子に分類される。結晶性高分子は通常、結晶領域と非晶領域が混在し(図1)、結晶領域では規則的に並んだ高分子がさらに大きな構造を形成する。結晶性高分子材料の強度など機械的性能は最終的な結晶領域と非晶領域の比率、およびこれらが形成する高次構造の状態によって大きく異なる。結晶の高次構造の状態は、高分子の屈曲性、結晶化温度、分子配向状態によって大きく異なる。特に、流れによる分子配向は結晶化を促進させ、静止場とは異なる高次構造を形成する。高分子を静止場で結晶化させた場合、球晶(図2(a))が、流動を印加し強い分子配向状態で結晶化させると、シシケバブ構造(図2(b))と呼ばれる高次構造がそれぞれ形成される。シシケバブ構造はシシ部分とケバブ部分から成り、シシ領域が高分子の高強度・強弾性率に大きく寄与し、その形成機構解明のため多くの研究がなされている。

流動の種類にはせん断流動と伸張流動の二種類があり、伸張流動はさらに一軸、二軸および平面伸張流動に分類される。高分子の分子配向はこれらいずれの流動によっても生じる。これまでの結晶化挙動への流動の影響に関する研究報告はせん断流動での議論がほとんどである。特に平面伸張場での流動誘起結晶化現象はほとんど明らかになっておらず、平面伸張変形を受けた高分子成形品の最終的な機械的強度は予測不可能である。

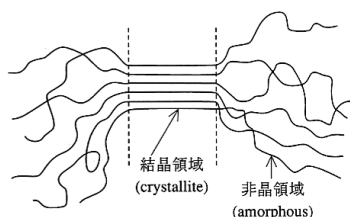


図1 非晶領域と結晶領域
(大澤, 入門高分子化学より)

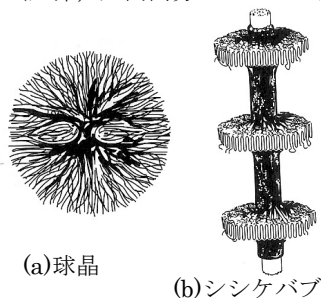


図2 球晶とシシケバブ構造
(大澤, 入門高分子化学より)

伸張流動の結晶化への影響の報告は、低平面伸張速度において Meissner 型レオメータ(小山ら, 成形加工, 7(9), pp576 (1995)), 一軸伸張流動場において対向噴流型レオメータ(H.Janeschitz-Kriegl ら, Rheol Acta, 40, pp.248 (2001))を使用したものがあるが報告件数は非常に少ない。その理由は、既存の方法では、シシケバブ構造を発生させる高伸張速度において流動特性評価が不可能であるためである。本研究を飛躍させるためには、『せん断の影響を消しつつ高伸張速度のみを高分子融液に加える』『使用流体が少量で時間的に効率よい測定』が可能な測定方法の開発が急務である。

研究代表者は、結晶性高分子材料の平面伸張流動場における結晶化過程を明らかにするためのフローフォーカシングを用いたマイクロデバイスの開発を行った(図3参照)。この手法の新しい点は、伸張流動を加える高分子材料とは別に、伸張流動を発生させるための縮小流路を流体(キャリア流体)によって作り出す点で、壁面とポリマーの間にキャリア流体が入ることで、壁面近傍にできるせん断流動場はキャリア流体が受け持ち、ポリマーに純粋な平面伸張流動を加えることができる。さらに、キャリア流体の流量によって中央を流れるポリマーの伸張速度を制御できる。これまでに、ポリマーにポリプロピレンを、キャリア流体には高粘度のシリコンを用いて実験を行った結果、この装置で最大で約 30 s^{-1} までの伸張速度が得られることを実証した。この伸張速度は、既存の手法と比べると高い値が得られているが、H.Janeschitz-Kriegl らの研究グループによ

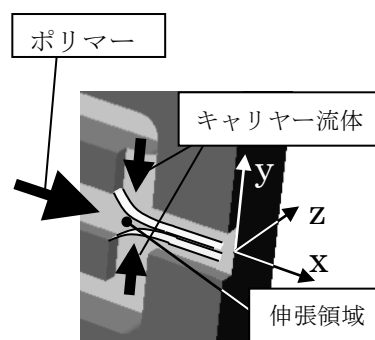


図3 マイクロ流路の概略

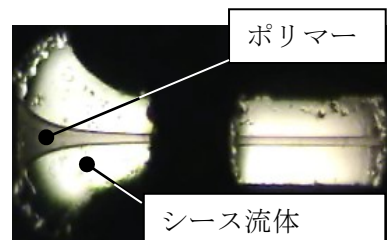


図4 マイクロ流路内流れ

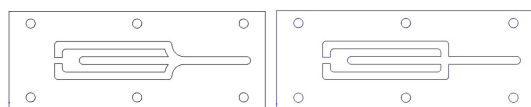
るとシシケバブ構造を得るにはポリプロピレンの場合では、 80 s^{-1} 以上が必要で、さらなる高速化が必要である。そこで、昨年度までに、水道水を用いて合流前と合流後の通路断面積比が伸張速度におよぼす影響及び伸張速度の分布を明らかにし、伸張速度は最大 40 s^{-1} 、局所的にはその3倍程度の伸張速度が得られた。これ以上では、レイノルズ数の増加に伴い伸張流動場が維持できなかった。

2. 研究の目的

本研究では、本手法の実用化に向けて高速平面伸張流動場での流体の有する弾性の流れ場への影響を実験的に明らかにする。そのために慣性力が十分小さいレイノルズ数1以下の流れ場において、ニュートン流体と粘弾性流体とを用いて流れ場の観察および光学異方性測定を行う。得られた結果をもとに、本手法による平面伸張流動誘起結晶化現象の測定手法を策定し検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 実験装置 図5はマイクロ流路板を示している。厚さ 1.0 mm のステンレス板に合流形状の異なる2種類(Y型、T型)の流路形状を放電加工で加工した。この流路板に観察窓を設置した流路上板と流路台で挟み込む形で流路を形成する。図6は組み立てたマイクロ流路を示している。



(a) Y型 (b) T型

図5 マイクロ流路板の概略図

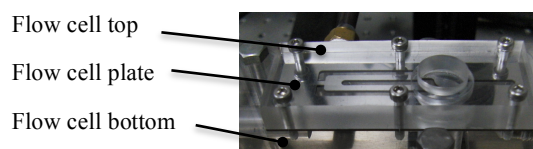


図6 マイクロ流路

(2) 速度分布の測定 二種類のマイクロ流路について、高粘度のニュートン流体と粘弾性流体を用い低レイノルズ数で合流領域におけるコア流体の流速の変化を計測した。コア流体には可視化粒子を懸濁させ、粒子の移動を高速マイクロスコプで撮影し、流路中心軸上の粒子についてPTVによって速度分布の計測を行った。

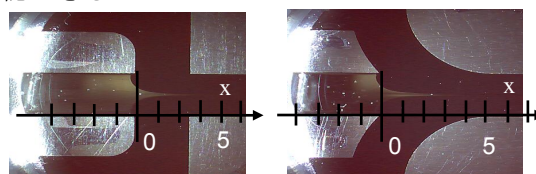
(3) 分子配向分布の計測 粘弾性流体には複屈折性を示す界面活性剤水溶液を用い、流路上下に直交配置した偏光板を入れてクロスニコルによる偏光観察を行った。流れ場の撮影した動画から静止画を切り出し、輝度から分子の配向分布を評価した。

(4) 試験流体 試験流体として、ニュー

トン流体に水あめ水溶液(40wt%)、粘弾性流体にCTAB/NaSal系界面活性剤水溶液(0.03/0.23 mol/l)を用いた。可視化粒子にはnylon12(粒径 $63\text{--}83\text{ }\mu\text{m}$)を用いた。液温は室温とし $20\text{--}25^\circ\text{C}$ であった。

4. 研究成果

(1) マイクロ流路内の速度分布 図7は、ニュートン流体の定常流動状態での流れ場の様子を表しており、いずれもコア流体が合流部分より伸張変形を受けていることが確認できる。



(a) $Q_{sh}=3760\text{ }\mu\text{l/min}$ (b) $Q_{sh}=3760\text{ }\mu\text{l/min}$

図7 ニュートン流体での流れ場

コア流体流量 $Q_{co}=199.2\text{ }\mu\text{l/min}$

図7においてコア流体中に見える粒子は、可視化粒子であり、これら粒子の移動をトレースして速度の変化を計測した。図8は、合流開始地点を原点として、 x 軸方向の流速 v_x の変化を示している。 v_x の x に対する傾きは、平面伸張速度を表しており、伸張速度一定の流れ場が形成されていることが確認できる。図中の破線は v_x を二次元ポアズイユ流れの仮定の下で計算した結果であり、計測結果とほぼ一致していることがわかる。すなわち、伸張変形後の流れ場は、 y 軸方向(図7の縦方向)にはほぼ一樣な流れ場が形成されている。

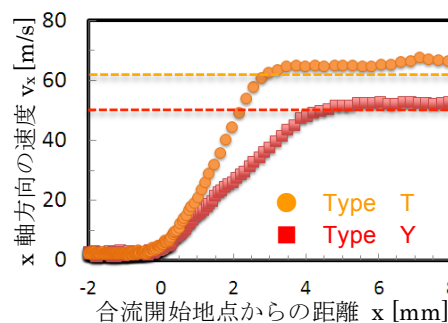


図8 ニュートン流体の中心軸上速度分布

(測定条件は図00に同じ)

次に、図9に粘弾性流体での流れ場を示す。粘弾性流体では、コア流体流量を固定し、シー流体流量を変化させたところ、四種類の流動様式が確認できた。すなわち、合流後に y 軸方向に膨らむ場合(図9(a))、 x 軸方向へ伸張される場合(図9(b))、合流領域の上流から伸張される場合(図9(c))、弾性跳ね戻りが発生し流れが不安定になる場合(図9(d))の流れ場がシー流体量の増加とともに変化する。さらに、不安定流動が生じる条件以外の各流動様式において、流路中心軸上

の流れ方向の速度分布を計測した．図10より， v_x は合流まえに一度減少した後に，加速が開始されていることがわかる．さらに，シー流体流量が増加すると伸張速度の上昇が認められ，伸張流動領域が上流側へ移動していることがわかる．また， $Q_{sh}=392 \mu\text{l/min}$ の結果では，合流前から伸張流動状態となっていることも確認できる．伸張流動が開始する前に見られる流速の減少は，ニュートン流体においても観測され，図9の縦方向の速度分布の変化によって生じているものと思われる．一方で伸張流動が合流前に生じる流動様式は，ニュートン流体では生じないことか

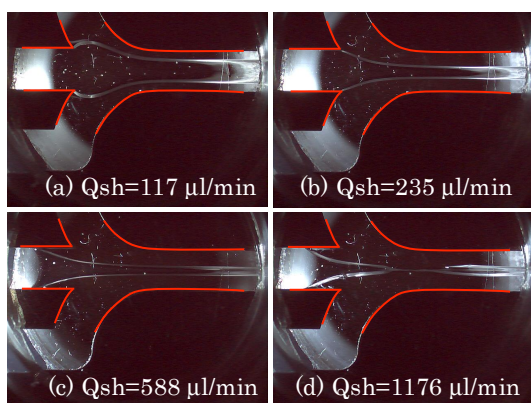


図9 粘弾性流体の流動様式
($Q_{co}=39.8 \mu\text{l/min}$)

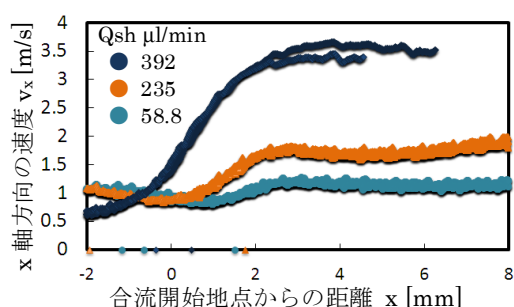


図10 粘弾性流体の中心軸上速度分布
($Q_{co}=119 \mu\text{l/min}$)

ら，図9(c)および(d)については，流体の弾性の影響によって生じている．以上の結果は，T型流路においても同様に観察された．

(2) マイクロ流路内の分子配向分布

クロスニコルによる偏光観察から画像の輝度を計測し，分子配向を定性的に評価した．T型流路，Y型流路の両方について，流路中心軸上0.1 mm幅で輝度を計測した．図11および12に結果を示す．原点は先ほどと同様に合流開始地点である．縦軸は，グレースケールの白を1.0となるように輝度の測定値を255で正規化している．いずれも，輝度が上昇する前に一度減少していることが確認できる．また，シー流体流量の増加によって，輝度の減少と増加の場所は上流方向に移

動している．これらは，前項で見られた，速度分布の変化と対応しているものと思われる．加えて，Y型流路では，伸張流動領域が終了

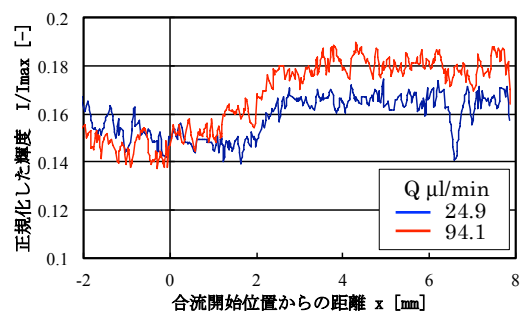


図11 T型流路中心軸上の正規化輝度の変化
($Q_{co}=119.5 \mu\text{l/min}$)

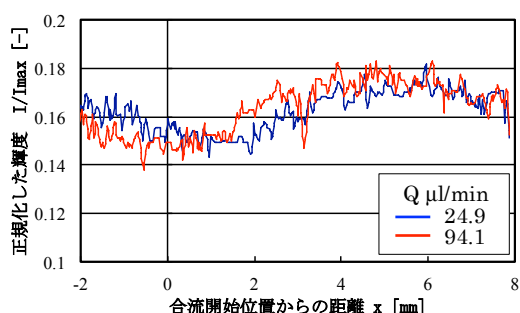


図12 Y型流路中心軸上の正規化輝度の変化
($Q_{co}=95.6 \mu\text{l/min}$)

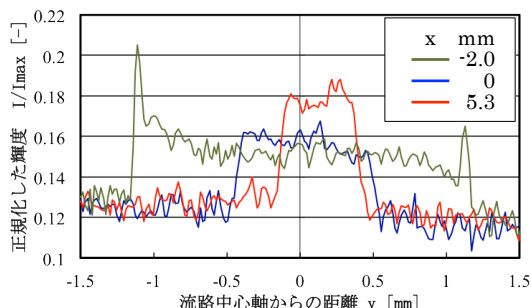


図13 Y型での高さ方向による輝度の変化
($Q_{co}=95.6 \mu\text{l/min}$, $Q_{sh}=94.1 \mu\text{l/min}$)

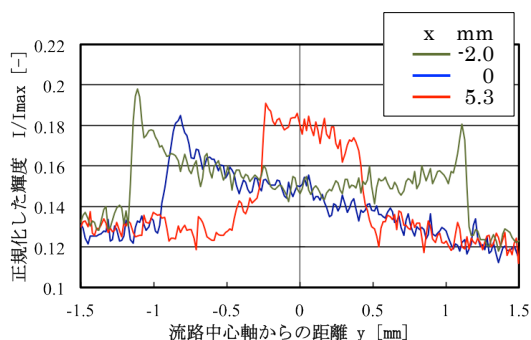


図14 T型での高さ方向による輝度の変化
($Q_{co}=119.5 \mu\text{l/min}$, $Q_{sh}=94.1 \mu\text{l/min}$)

する 5 mm 付近から輝度が若干減少しており、伸張流動によって生じた分子配向が緩和したと理解できる。一方、T 型流路では伸張流動領域後にほとんど緩和過程が見られないことから、輝度の変化は奥行き方向に生じる速度分布によるせん断流動によって生じる流動複屈折を計測しているものと推察される。このことから、流路の奥行き方向を変数として同様の実験をすれば、この流れ場への伸張流動特性の影響を評価できる可能性がある。次に、y 軸方向の輝度の変化から分子配向の分布を調べた。合流前の領域では、壁面において輝度の上昇が見られ、壁面でのせん断変形の影響がみられる。合流部分および伸張変形後では、輝度はほぼ一定の値を示しており、シース流体によって y 軸方向に関する壁面の影響は低減できていることがわかる。

(3) 研究成果の国内外での位置づけ 流体の平面伸張流動特性評価を目的としてコア・シース流れを用いた研究は、J. Wang, D. F. James[J. Rheol (2011)]が、本研究よりも 1 桁程度小さいマイクロ流路を用いて粘弾性流体の伸張粘度評価に関する報告がある。この報告では、本研究で観察されたような合流領域上流から始まる伸張流動が観察されている。本研究は、より流れ場の理解に重点を置いた内容であり、コア・シース流れによる平面伸張流動場において、粘弾性流体の流動挙動を流れ場の観察、速度分布の計測、分子配向分布から議論し、この流れ場における伸張流動の寄与の大きさを分子の配向分布から評価できる可能性を示した、この点は、今後この流れ場を伸張流動特性評価に利用する上で重要なデータを取得するための足掛かりとなる成果である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① Manabu KATO, Yukinobu SUGIHARA, Tsutomu TAKAHASHI, Influence of fluid elasticity to planar elongational flow in Core/Sheath flow, The XVIth International Congress on Rheology, 2012.
- ② 加藤学, 高橋勉, シースコア流れ内平面伸張流動場における粘弾性流体の流動挙動と分子配向, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 学 (Manabu KATO)

津山工業高等専門学校・機械工学科

・ 准教授

研究者番号 : 20370017

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :