

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	やとう ひろき 八登 浩紀
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
(学位論文題目) Flow pattern transition in curvilinear shear flows of viscoelastic fluids (曲率を持つせん断粘弾性流れにおける 流れのパターン変化)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 藤 定義 准教授 太田 隆夫 教授 小貫 明 教授

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	八登浩紀
論文題目	Flow pattern transition in curvilinear shear flows of viscoelastic fluids		
(論文内容の要旨) 粘弾性流体は、生体流体や油、工業用樹脂のように、日常生活に普遍的に見られる。しかし、水のような粘性流体では観測されない特異な流れを呈することが知られている。この特異な流れは、流れの主流方向とは異なる方向への流れ（二次流れ）によって特徴づけられる。また、粘弾性流れでは、低レイノルズ数においても流れが不安定化し、乱流に発展しうることが、従来研究により報告されている。 この二次流れは、せん断などの流速の勾配によって強められた弾性応力により引き起こされる。特に、主流が曲率を持っているとき、曲がり方向内向きに働く弾性力が二次流れを誘起するひとつの原因となる。流れの曲率と弾性のカップリングの寄与をより詳細に知るためには、それぞれの系について数値的検証を行うことが欠かせない。しかし、粘弾性流体の数値計算は、計算コストが大きく、粘弾性流れ特有の数値的不安定が起こることから、単純な境界を持つシンプルな系への適用にとどまっているのが現状である。 申請論文では、複雑な境界を持つ曲がり系での粘弾性流れの数値解析の第一歩として、二次元曲がり管内の粘弾性流れの数値計算を行った。数値計算スキームとしては、スペクトル要素法とよばれる高精度の方法を用いた。支配方程式としては、ミクロな高分子バネの運動を記述する FENE-P モデルを使用した。従来の研究では弾性が支配的な状況が主に注目されてきたが、本研究では、慣性の大きさの指標となるレイノルズ数と、弾性の大きさの指標となるワイゼンベルグ数の二つの無次元パラメータを広い範囲で変化させながら、曲がり管内の流れの解を探索する。この結果、パラメータ空間において慣性が支配的な領域、慣性と弾性が同等となる領域、弾性が支配的となる領域において、それぞれ流れのパターンが顕著に異なることを見出した。特に、慣性が支配的な領域においても、壁面付近での壁面速度よりも速いジェット流という形で弾性の影響が大きく現れる。さらに、弾性力の強さを徐々に強くしたとき、ジェット流の位置の変化やはく離渦の消滅といった顕著なパターン変化が起こる。また、この変化は、壁面粘性応力の急減や、壁面弾性応力の急増という管内流れの特徴を表す物理量の変化を伴うことを見出した。 次に、慣性と弾性のバランス変化がいかにして流れのパターン変化を引き起こすかについて、管の中の弾性力を含めた力のバランスを考慮することで詳細に考察した。その結果、従来知られていたような主流方向に垂直な方向の弾性力だけでなく、流れ方向に働く流れを加速させる弾性力が、ジェット流の生成・消滅といった主要なパターン変化を引き起こしていることを見出した。このような流れ方向の弾性力は、低レイノルズ数の慣性が寄与しない流れでは観測されず、慣性と弾性の競合によって引き起こされる現象である。また、簡単なスケール解析により、顕著なパターン変化が起きるパラメータ領域での、弾性と慣性のバランスが定量的に示された。			

(論文審査の結果の要旨)

粘弾性流体は日常生活に普遍的に見られ、粘性流体では観測されない特異な流れがしばしば起こることから、これまで数多くの基礎的・応用的研究がなされてきた。しかしながら、粘弾性流れにおける流れ場と弾性応力の相互作用の基礎的な理解は未だに十分とはいえない。本申請論文では、曲率を持った粘弾性流れを高精度の計算スキームを用いて数値的に解き、詳細に分析している。その結果、従来の理論及び実験結果では指摘されてこなかった、慣性と弾性の両者が寄与する新たな粘弾性特有の現象を見出し、今後の粘弾性流体研究や数値解法の指針を与えた。

粘弾性流れでは、テンソルで表される弾性応力と速度や圧力といった変数が非線形にカップルしており、支配方程式は複雑である。このような系で解析的に解を得ることは望めない。しかし、非線形相互作用が粘弾性流れ特有の現象を生み出しているため、これらの相互作用をすべて取り込んだ解析を行う必要がある。加えて、弾性力は曲率のある流れで顕著に流れに作用するという、さらに壁面付近で弾性応力が強められる傾向にあることから、実験で扱われるような粘弾性流れの性質の再現のためには、曲がった壁面のある流れを考慮することが望ましい。本研究では、この目的を達成するため、スペクトル要素法とよばれる数値計算スキームが用いられた。この手法は、従来の手法に比べて複雑境界の流れを高精度に扱うことができるという特徴を持つため、近年多くの注目を集めている。この高精度スキームの粘弾性流れへの適用例は多くないが、粘弾性流体特有の数値的不安定性の克服のためには、非常に有用な方法である。

本研究では、慣性と弾性の寄与の程度を表すレイノルズ数及びワイゼンベルグ数の2つの無次元パラメータを広範な範囲で変化させることで、曲率のある流れでの慣性と弾性の寄与が詳細に調べられた。まず、解析においては、運動方程式における各項（弾性項、移流項、圧力勾配項、粘性項）の系全体での大きさの度合いを定義し、その大小関係を比較することで、パラメータ空間の解の分類を行っている。これにより、弾性と慣性、圧力勾配のバランス変化が、流れのパターン変化と対応していることが明瞭に示された。さらに、慣性が支配的な状況でさえも、壁面付近の壁面速度よりも速いジェット流という形で、弾性の効果が顕著に認められることがはじめて見出された。この現象は、慣性の効かない低レイノルズ数の解析においては観測されない。曲率を持った粘弾性流れの研究としては、近年低レイノルズ数での不安定性や乱流化が実験的に見出され注目を集めてきたが、慣性の存在が弾性に寄与する、あるいは弾性を卓越する状況でも弾性の効果を見逃すことが示されたことは、今後の粘弾性流れの研究に新しい方向性を与えられられる。

また、弾性力、遠心力、圧力勾配の力のバランスを用いて、流れのパターン変化を引き起こすメカニズムについても詳細に議論された。その結果、従来指摘されてきたような「主流方向に垂直な方向への弾性力」だけでは流れのパターン変化を説明できず、主流方向への弾性力をも考慮する必要があることがはじめて見出された。本研究では非線形の定常解が扱われたが、これらの結果は、さまざまな系において観測される粘弾性流れのパターン形成、不安定性、乱流の理解に寄与することが期待される。

以上の結果から本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について平成22年6月29日に口頭試問を行った。その結果合格と認めた。