

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 黒谷 雄司

粘性流体や粘弾性体を力学的に変形すると、その密度や濃度といった保存量の揺らぎが増大し、破壊に至る現象はよく知られているが、未だその物理機構の理解は十分とは言えない。本研究は、流動誘起不安定化機構と呼ばれる物理機構を基礎として、このような力学的不安定化・破壊現象の機構の解明を目的として実施されたものである。

第1章では、研究背景と目的が記されている。特に、流動誘起不安定化機構と呼ばれる、粘性率や弾性率、緩和時間が保存量である密度に依存する場合に、変形下で系の密度が自己増殖的に増大し、系が不安定化しついには破壊に至る物理機構が説明されており、粗視化モデルに基づくシミュレーション及び理論的手法についても記されている。する一軸伸長変形下での破壊、という2つの未解明問題に取り組むことの意義や重要性についても記されている。

第2章から第4章では、粘性流体における固体境界壁上でのスリップ現象の物理機構に関する研究結果が述べられている。第2章では、粘性流体の固体壁上でのスリップ現象に関する研究背景が記されている。近年の実験手法の発展に伴い、単純粘性流体の流動における固体境界壁上でのスリップの出現条件、スリップ長について定量的な知見が得られていること、しかしながら、それを満足な形で説明可能な理論が存在しないことなど、この分野の現状について詳細に述べられている。この現状を打破するアイデアとして、液体中に溶解した気体が流動誘起相転移機構により境界壁上に選択的に生成するというシナリオに基づき、流動誘起スリップ現象を説明する、という本論文における基本的な研究アプローチについて述べられている。

第3章では、粘性流体のスリップ機構を研究するための数値シミュレーション方法が記されている。特に、固体境界壁の影響、すなわち流体方程式中の境界条件、及び液体・気体・固体間の接触角の影響を数値的に適切に取り入れる方法が議論されている。

第4章では、粘性流体におけるスリップ機構に対する数値シミュレーション結果とそれに関する考察が記されている。境界壁の存在を反映して静止流下においても密度揺らぎが境界壁近傍で特異的に増加することや、流動誘起不安定化機構により、せん断流下で流体の不安定化現象、すなわち気泡の不均一核生成やスピノーダル分離型の相転移が促進することが記されている。これは、せん断流により境界壁近傍で流体が容易に不安定化され、スリップが誘起されること示している。一方、境界壁上に生じた気泡が生成したとしても、せん断流を印可し続けると再び液体に溶解し得ることを数値的に確認し、その物理機構が述べられている。そして、このような、せん断流下で気体の生成機構と消滅機構が共存する複雑な挙動は、実験的に観察されている挙動と類似していることが指摘されている。また、しばしば実験的に観察されるものの、分子動力学シミュレーシ

ョンでは説明困難な、数 μm スケールでの流体のスリップ現象を上記のシナリオにより自然に説明できる可能性があることが述べられている。

第5章から第7章においては、粘弾性体に対する一軸伸長変形下での破壊機構に対する検討結果が述べられている。第5章では、粘弾性体の一軸伸長破壊に関する研究背景が記されている。粘弾性体を一軸伸長変形させると、脆性的もしくは延性的な破壊の2種類の破壊挙動が観察されることや、それが材料のポアッソン比や伸長速度に依存することが述べられている。これらの破壊挙動を説明するために、粘性散逸の存在や周期構造の欠如などアモルファス構造を持つ粘弾性体の特徴を反映した新しい破壊の物理機構を考察することの必要性が指摘されている。その基礎として、系の微小な揺らぎが力学的な入力下で流動誘起不安定化機構によって増幅し、マクロな破壊に至る、という物理機構が説明されている。

第6章では、粘弾性体の一軸伸長シミュレーションの方法の詳細が述べられている。特に、粘弾性応力をバルク成分と traceless 成分に分け、それぞれ標準的な構成方程式である upper-convective Maxwell 方程式に従うとする基本的仮定について記されている。また、不安定化の鍵を握る、系の弾性率や緩和時間に対する密度依存性や、一軸伸長をシミュレーションで実施する具体的方法等が記載されている。

第7章では、粘弾性体の一軸伸長破壊に対するシミュレーション結果とその考察について記されている。材料のポアッソン比や伸長レートの大きさによって伸長破壊挙動が異なることや、初期の密度揺らぎの大きさによって破壊歪みの閾値が異なることが明らかにされている。また、これらの挙動は、初期の密度揺らぎが流動誘起不安定化機構によって力学的に増幅され、マクロな破壊に至る、という上述の機構によって説明できることが記されている。そして、これらの破壊挙動は高分子メルトに対する実験結果と定性的に一致することが指摘されている。

第8章では以上の研究結果の総括と今後の展望について述べられている。

以上のように、本研究により、輸送係数や粘弾性特性の密度依存性を介した流動誘起不安定化機構に基づいて、これまで物理的機構が十分に理解されていなかった流動下の流体の壁面スリップ現象、伸長変形下での粘弾性体の破壊現象の物理的機構が明らかにされた。連続体の線形粘弾性構成方程式を基礎とする本機構は、その適用範囲が広く、そのため応用面での意義も大きいと期待され、本論文の結果は物理工学上も重要と考えられる。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。