

ダンベル状微小要素混入流れにおける乱流摩擦抵抗の 低減機構に関する研究

学位論文内容の要旨

水に微量の鎖状高分子あるいは棒状ミセルを形成する界面活性剤を添加すると、乱流域での抵抗が著しく低減することは Toms 効果として知られている。これまで Toms 効果に関する高分子溶液や界面活性剤溶液の実験、またそれを模擬したシミュレーションが数多く行われており、抵抗低減時の流れ場の特徴についてはある程度のコンセンサスが得られている。例えば、平均速度分布は、バッファ層の厚みが増すことによって対数則が上方にずれる。乱れの統計量については、鎖状高分子の添加によって主流方向の速度変動はむしろ増大することがあるが、壁に垂直な方向の変動は抑制され、レイノルズせん断応力が減少する。また、壁近傍のストリーク構造がスパン方向に広がるとともにバースト周期が長くなること、エネルギースペクトルが低波数側に移ることなどが報告されている。これらの知見によると、乱流の流動抵抗低減は、乱れ強さの低減ではなく、乱れの構造の変化によるものであると考えられるが、構造的なメカニズムはまだ十分に解明されているとは言えない。梶島らは添加高分子の効果を多数の離散要素モデルを混入させることによって近似し、これをニュートン流体に加えた乱流の直接数値シミュレーションを行った。その結果、摩擦低減効果が得られること、また乱流統計量に関して、乱れが非等方化すること、乱流せん断応力が減少すること、壁面近傍にみられるストリークの幅が拡大することなど、Toms 効果を示す流れにおいて実験的に知られている事実を再現できることを報告している。このことは、彼らの用いた離散要素が流体にもたらす効果が鎖状高分子の添加によってもたらされる効果と同一のものであることを示唆している。しかしながら、彼らの用いた離散要素のサイズは、流れの計算格子サイズの制約から実際の高分子と比べて非常に大きく、その点で実際に高分子のもたらす効果を模擬しているかどうかについて疑問の余地がある。彼らが用いた離散要素モデルは溶媒と同じ密度の 2 つの球をばねと粘性を表すダンパで連結したものである。このモデルが鎖状高分子のモデルとして妥当かどうかは別問題として、このように単純な構造の要素を混入することで乱流の摩擦抵抗が低減することは大変興味深い。

そこで本研究では、離散要素を混入した乱流場のシミュレーションを行い、得られた結果を基に乱流摩擦抵抗低減のメカニズムを明らかにすることを目的とする。また、離散要素を添加した場合とニュートン流体との流れ場の構造の違いを明らかにするため、AVS を用いて乱流場の可視化を行った。これにより、離散要素を添加したことで乱流場の組織的構造がいかに変化したかを観察した。なお、本研究で用いたモデルは当初、鎖状高分子を模擬するものとして提案されたが、本研究ではその妥当性は議論しない。すなわち、本研究の対象は厳密には高分子溶液ではなく、モデルで表されるような特性を持つ人工物が混入された流れ場を扱っていると捉えていただいて構わない。本研究の主眼は、離散要素の混入による摩擦抵抗低減のメカニズムを明らかにすることであり、これが明らかになれば他の方法で乱流を制御する際にもその知見が役立つものと思われる。

本研究では、離散要素として、(a)単球モデル、(b)2球を質量のない剛体棒で結んだモデル(剛体ダンベルモデル)、(c)2球をばねとダンパで接続したモデル(粘弾性ダンベルモデル)を用いた。本計算では流れ方向の圧力勾配を一定とし、チャンネル半幅と摩擦速度で定義されるレイノルズ数 $Re_\tau=150$ とした。

本論文は、全5章より構成されている。

第1章では、本研究の目的及び背景、本研究で用いたDNSについての概要、これまで行われてきたToms効果の解析手法について述べた。

第2章では、本研究で用いた計算手法について述べた。本研究で用いた離散要素モデルについての特性とその運動方程式及び追跡の手法、計算条件、境界条件などを述べた。さらにスタッガード格子法、フラクショナル・ステップ法について述べ、ナヴィエ・ストークス方程式の離散化を行った。

第3章では、計算によって得られた解析結果について述べた。まずスペクトル法との比較によって本計算の妥当性を示し、次に摩擦係数に対する混入要素の影響や、平均速度分布及び速度変動強度分布を示した。また、ダンベル要素を混入した場合に、要素の並進運動及び2球の相対運動によって要素が流体の運動量を輸送する効果が、応力欠損の発生機構として説明できるが、応力欠損は抵抗低減にとって本質的ではないことを示した。さらに、離散要素の配置と姿勢について示した。これらの結果から、乱流抵抗の低減機構は、ダンベル要素が主流方向に配向することによって、主流方向に軸を持つ渦の伸張運動を抑制する効果によるものであることを示した。さらにそのことが非等方性の増大を引き起こすことを示した。また、ストリーク間隔やその他の諸量について、乱流応力の収支について、離散要素の挙動について示し、最後にレオロジーとの対応を示した。

第4章では、離散要素を添加した場合とニュートン流体との流れ場の構造の違いを明らかにするため、AVSを用いて乱流の瞬間場の可視化を行った。離散要素を添加したことで乱流場の組織的構造がいかに変化し、それがどういったメカニズムで摩擦抵抗の低減を引き起こすのか、第3章で述べたことを裏付けるものとして観察した。

第5章では、本研究で得られた成果をまとめて示した。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 黒 田 明 慈
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 藤 川 重 雄
副 査 教 授 池 川 昌 弘

学 位 論 文 題 名

ダンベル状微小要素混入流れにおける乱流摩擦抵抗の 低減機構に関する研究

水に微量の長鎖状高分子あるいは棒状ミセルを形成する界面活性剤を添加すると、乱流域での抵抗が著しく低減することは Toms 効果として知られている。これまで Toms 効果に関する高分子溶液や界面活性剤溶液の実験、またそれを模擬したシミュレーションが数多く行われており、抵抗低減時の流れ場の特徴についてはある程度のコンセンサスが得られている。例えば、平均速度分布は、バッファ層の厚みが増すことによって対数則が上方にずれる。乱れの統計量については、鎖状高分子の添加によって主流方向の速度変動はむしろ増大することがあるが、壁に垂直な方向の変動は抑制され、レイノルズせん断応力が減少する。また、壁近傍のストリーク構造がスパン方向に広がるとともにバースト周期が長くなること、エネルギースペクトルが低波数側に移ることなどが報告されている。これらの知見によると、乱流の流動抵抗低減は、乱れ強さの低減ではなく、乱れの構造の変化によるものであると考えられるが、構造的なメカニズムはまだ十分に解明されているとは言えない。梶島らは添加高分子の効果を多数の離散要素モデルを混入させることによって近似し、これをニュートン流体に加えた乱流の直接数値シミュレーションを行った。その結果、摩擦低減効果が得られること、また上述したような Toms 効果を示す流れにおいて実験的に知られている事実を再現できることを報告している。このことは、彼らの用いた離散要素が流体にもたらす効果が長鎖状高分子の添加によってもたらされる効果と同一のものであることを示唆している。しかし、抵抗が減少するメカニズムについては明確な答が得られていない。

本研究では、離散要素を混入した乱流場のシミュレーションを行い、得られた結果を基に乱流摩擦抵抗低減のメカニズムを明らかにすることを目的としている。また乱流場の可視化を行い、離散要素を添加したことで乱流の組織的構造がいかに変化したかを観察している。なお、本研究で用いたモデルは実際の高分子と比べて非常に大きく、その点で実際に高分子のもたらす効果を模擬しているかどうかについて疑問の余地があるが、本研究ではその妥当性は議論していない。本研究の主眼は、離散要素の混入による摩擦抵抗低減のメカニズムを明らかにすることであり、これが明らかになれば他の方法で乱流を制御する際にもその知見が役立つものと思われる。

本論文は、全 5 章より構成されている。

第 1 章では、本研究の目的及び背景、本研究で用いた DNS についての概要、従来の Toms 効果の解析手法について述べられている。

第 2 章では、本研究で用いた計算手法、すなわち離散要素モデルの特性とその運動方程式及び追跡の手法、計算条件、境界条件などを述べられている。

第 3 章では、計算によって得られた解析結果について述べられている。まず摩擦係数に対する混入要素の影響や、平均速度分布及び速度変動強度分布が示されている。また、ダンベル要素を混入した場合に、要素の並進運動及び 2 球の相対運動によって要素が流体の運動量を輸送する効果として、応力欠損の発生機構を説明し、これが抵抗低減にとって本質的ではないことが示されている。さらに、離散要素の配置と姿勢について示されている。これらの結果から、乱流抵抗の低減機構は、ダンベル要素が主流方向に配向することによって、主流方向に軸を持つ渦の伸張運動を抑制する効果によるものであることが示されている。さらに同じ機構により非等方性の増大を引き起こすことを示している。また、ストリーク間隔やその他の諸量について、乱流応力の収支について、離散要素の挙動について示し、最後にレオロジーとの対応が示されている。

第 4 章では、離散要素を添加した場合とニュートン流体との流れ場の構造の違いを明らかにするため、乱流の瞬間場の可視化を行っている。離散要素を添加したことで乱流場の組織的構造がいかに変化し、それがどういったメカニズムで摩擦抵抗の低減を引き起こすのか、第 3 章で述べたことを裏付けるものとして観察されている。

第 5 章では、本研究で得られた成果が結論としてまとめて示されている。

これを要するに著者は、ダンベル状の微小離散要素を混入することによって乱流摩擦抵抗が著しく低減する現象を解析し、そのメカニズムを明らかにした。これは古くから知られている Toms 効果のメカニズム解明のための手がかりとなるばかりでなく、流動抵抗低減技術やそれに基づいた伝熱促進技術を発展させる上で重要な知見を得たものであり、流体力学、熱工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。