

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24年 6月14日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760122

研究課題名（和文） 非ニュートン流体乱流のラージエディシミュレーション解析法の研究

研究課題名（英文） Large Eddy Simulation for Turbulent Flow of non-Newtonian Fluid

研究代表者

太田 貴士（OHTA TAKASHI）

福井大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：10273583

研究成果の概要（和文）：非ニュートン流体のためのラージエディシミュレーション(LES)解析法を開発するために、チャンネル乱流の直接数値シミュレーション(DNS)を実行して、非ニュートン流体壁乱流の特徴を観察した。その結果、瞬時構造と統計量の観点によるスケール解析によって、局所変動粘度を用いて乱流構造を普遍的に正規化できることを見いだした。この結果に基づいて、LESのための改良モデルを提案して、界面活性剤水溶液乱流に対する適用性を確かめた。

研究成果の概要（英文）：To develop a large-eddy simulation (LES) method for non-Newtonian fluid such as surfactant solution, we performed direct numerical simulations (DNS) of turbulent channel flow and investigated features of wall turbulence of non-Newtonian fluid. As a result, we found, due to a scale analysis from a viewpoint of instantaneous structures and turbulence statistics, that the turbulent structures of non-Newtonian fluid could be generally normalized with the local variable viscosity as well as the case of Newtonian fluid. We suggested a modified model for LES and validated the reliability for turbulent flow of surfactant solution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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：非ニュートン流体、壁乱流、直接数値シミュレーション、乱流変調、乱流モデル、ラージエディシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

ラージエディシミュレーション(LES)は、小さな渦をモデルで表現して大きい渦だけを直接計算するため、計算負荷の増加を抑えた実用的な乱流の数値シミュレーション手法として注目されている。ニュートン流体乱流

に対する LES は、研究が積み重ねられており、実用的な乱流の解析に多く採用されている。しかし、ニュートン流体と異なる性質を持つ非ニュートン流体に対して、LES やそのモデルの特性が調べられている例は見当たらない。

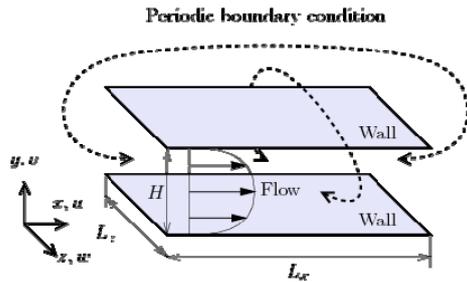


図1 計算領域と境界条件

例えば、界面活性剤を添加した水溶液では、せん断を与えると SIS (shear induced state) と呼ばれるせん断粘度が上昇する状態になり、壁乱流の抵抗を著しく低減することが知られている。そして、界面活性剤を利用した抵抗低減は工学的に応用され、循環系のポンプ動力の効率を改善するための手段として利用されている。界面活性剤水溶液の発達した壁乱流の変調を数値シミュレーションで予測することは、乱流抵抗の低減を最適化した設計を実現するために不可欠である。この他にも、高分子溶液、粒子懸濁液、プラスチック、合成繊維、ゴム、洗剤、医薬、生物流体、紙パルプや印刷インクなど、多くの工業上重要な流体は非ニュートン流体であることから、乱流状態を想定して、非ニュートン流体乱流に対する LES 解析法を確立することは重要である。

2. 研究の目的

本研究では、各種非ニュートン流体乱流の直接数値シミュレーション(DNS)により、発達した壁乱流における非ニュートン流体の影響を調べる。特に、界面活性剤水溶液に注目して、乱流統計量により乱流構造の空間スケールを評価し、さらに、正規化の方法を見直すことで、ニュートン流体の場合と同様に観察できることを示す。そして、DNS で得られた知見を基にして、非ニュートン流体乱流に対する LES 解析法を提案する。

3. 研究の方法

本研究で対象とする平行平板間乱流の計算領域および境界条件を図1に示す。界面活性剤水溶液の流動を記述する基礎方程式は、非圧縮性流れの連続の式と Cauchy の運動方程式である。偏差応力テンソルを求めるために、一般化非ニュートン流体の構成方程式と修正 Bird-Carreau モデルを組み合わせた構成方程式モデルを使用した。本計算では、せん断速度によってモデルパラメータを切り替えることで、SIS を表現した。以上の基礎方程式に従って、コロケート格子を用いて DNS

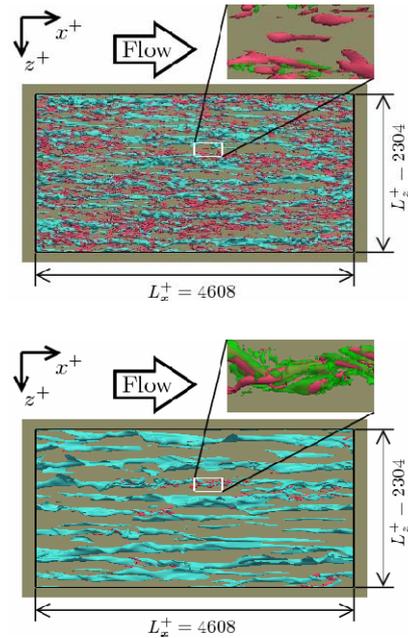


図2 ニュートン流体 (上) と非ニュートン流体 (下) の瞬時乱流構造

を実行した。空間微分は4次精度中心差分で近似し、時間積分のために、対流項と粘性項に2次の Adams-Bashforth 法を、圧力項と連続の式に Backward Euler 法を用いた Fractional Step 法を採用した。LES では、非圧縮性流れの連続の式と Cauchy の運動方程式にフィルターをかけて導出した GS(grid scale)の基礎方程式を用いた。また、格子スケール以下の乱流渦の効果を表す SGS(subgrid scale)応力に、Smagorinsky モデルを与えた。

4. 研究成果

図2に、ある瞬間の主流方向渦度による縦渦の分布と低速領域、および、縦渦に作用する粘性拡散が強い領域を示す。界面活性剤水溶液の場合、いまのしきい値で可視化されている縦渦が少なく、各低速ストリークのスパン方向の間隔も大きい。また、縦渦に対して粘性拡散が渦全体に作用している。このことから、縦渦によるせん断で SIS が生じており、強い粘性拡散が作用することで縦渦が減衰していると考えられる。壁乱流の変調を定量的に評価するために、渦度変動強度の分布を図3に、速度変動強度の分布を図4に示す。界面活性剤水溶液の場合、乱流境界層の粘性低層と対数層の間にあるバッファ層で、渦度変動強度の減少が顕著であり、最大値の位置がニュートン流体の場合より壁から離れている。速度変動強度では、主流方向成分は大きく、逆に、壁垂直方向とスパン方向成分は小さい。また、渦度変動強度と同様に、各成

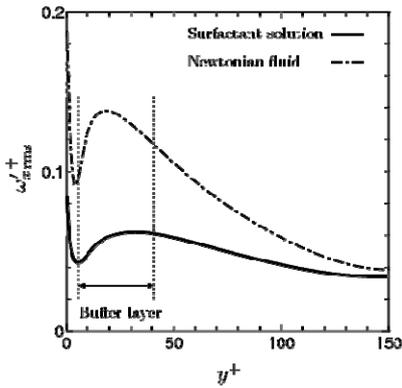


図 3 渦度変動強度の分布

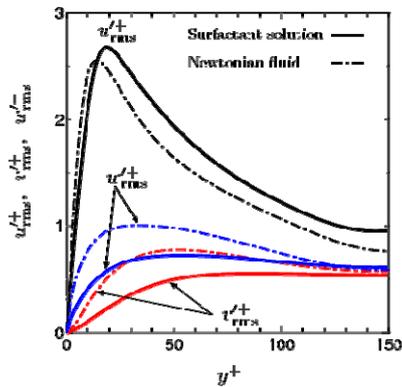


図 4 速度変動強度の分布

分の最大値の位置も遠くなっている。このように、界面活性剤水溶液の壁乱流では、乱流統計量の大きさや最大値の位置が、ニュートン流体の場合と一致しない。

界面活性剤水溶液のせん断粘度は、流れの状況によって、時間的、空間的に変化して、さらに複数のせん断方向に対応する成分がある。しかし、これまでは、粘度の変化を考慮せずに、ニュートン流体の場合と同様に一定の動粘度を用いた正規化で評価した。非ニュートン流体である界面活性剤水溶液の場合に、ニュートン流体の正規化の手順により、ニュートン流体の結果と比較できるとは限らない。そこで、壁面摩擦速度と粘度の変化を考慮した代表動粘度で正規化した統計量(上付きの \oplus で表示)を見積もる。このとき、代表動粘度は、壁からの距離に依存して変化することになる。壁面摩擦速度と代表動粘度で正規化した主流方向の速度変動強度の分布を図 5 に示す。 \oplus 表示の界面活性剤水溶液の場合、最大値の壁からの距離がニュートン流体の場合と一致している。

次に、壁乱流の瞬時構造に注目して、平均ストリーク間隔を、壁面摩擦速度と代表動粘度

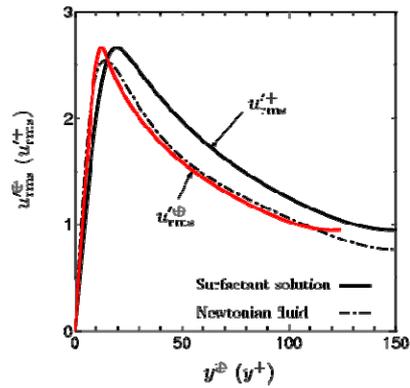


図 5 改良版速度変動強度の分布

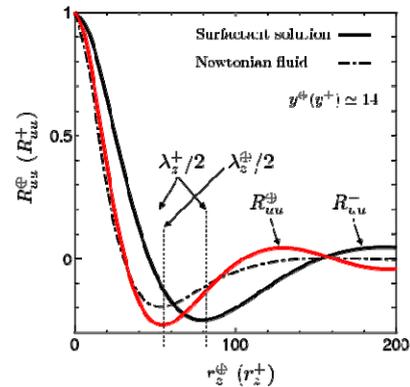


図 6 平均ストリーク間隔

で正規化して評価する。主流方向速度変動のスパン方向二点相関の分布を図 6 に示す。界面活性剤水溶液の \oplus 表示の結果では、平均ストリーク間隔が大きくなっている。それに対して、 \oplus 表示の場合は、ニュートン流体の場合と一致している。以上のことから、粘度変化を考慮した正規化により、乱流の空間的な特徴がニュートン流体の場合に近くなる。その結果、界面活性剤水溶液の場合でも、乱流の組織構造の普遍的特徴を観察できることが明らかになった。この傾向は、界面活性剤水溶液とは異なる構成方程式、例えば、ベキ乗則モデルや Casson モデルを用いた平行平板間乱流の DNS でも示された。そのため、この知見は、様々な非ニュートン流体への適用が期待できる。

LES では、特定の空間スケールのフィルター操作で、乱流場に存在する渦を分解する。一方、乱流の空間スケールの基準の一つに粘性長さがあり、界面活性剤水溶液のような非ニュートン流体の場合では、局所の粘度情報を用いることで、ニュートン流体の場合と同じように扱えることをすでに示した。このことから、局所の粘度情報を適用して、フィルターをかける乱流場の長さスケールを普遍的

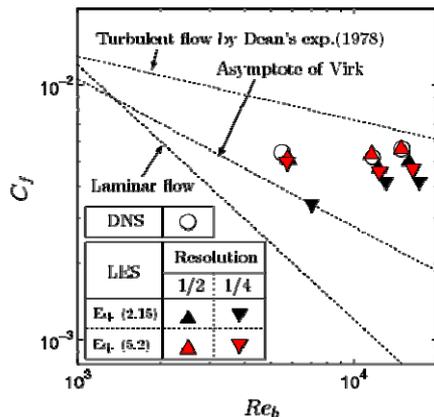


図 7 壁面摩擦係数の予測結果

に評価することで、LES による非ニュートン流体乱流の再現が期待できる。そこで、Smagorinsky モデルの渦粘性係数に粘度変化による補正関数を取り入れて、DNS の場合から主流方向とスパン方向の格子数を 1/2 倍、1/4 倍と格子解像度を粗くして LES を実行した。図 7 に、レイノルズ数と壁面摩擦係数の関係を示す。粘度変化による補正関数を取り入れたことで、格子解像度を粗くしても DNS の結果と一致している。このように、精度良く抵抗低減効果を再現していることから、粘度変化による補正を LES に加えることは有効であることを証明した。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

①太田貴士、笛吹祐登、八十嶋裕志、直接数値シミュレーションによる界面活性剤水溶液の抵抗低減壁乱流の予測、日本機械学会論文集B編、査読有、78巻786号、2012、218-230、DOI:10.1299/kikaib.78.218

[学会発表] (計 4 件)

①笛吹祐登、太田貴士、DNS による界面活性剤水溶液壁乱流の空間スケールの評価、第 25 回数値流体力学シンポジウム、2011 年 12 月 19 日、大阪大学

②笛吹祐登、太田貴士、DNS and LES of Turbulent Channel Flow with the Effect of Surfactant、International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering 2010、2010 年 11 月 12 日、福井大学

③太田貴士、八十嶋裕志、界面活性剤の効果による壁乱流変調の予測、日本機械学会 2010 年度年次大会、2010 年 9 月 6 日、名古屋工業大学

④八十嶋裕志、太田貴士、界面活性剤の効果

を導入した溝乱流の直接数値シミュレーション、日本機械学会関西支部定時総会講演会、2010 年 3 月 16 日、神戸大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 貴士 (OHTA TAKASHI)

福井大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：1 0 2 7 3 5 8 3