

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420131

研究課題名(和文)粘弾性流体の壁乱流における二方程式およびレイノルズ応力方程式モデルの構築

研究課題名(英文)Two-equation and Reynolds-stress models for wall turbulence of viscoelastic fluid

## 研究代表者

塚原 隆裕 (Tsukahara, Takahiro)

東京理科大学・理工学部・講師

研究者番号：60516186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：二方程式モデル(非等方性/等方性 $k$ -モデル,  $k$ -モデル)およびレイノルズ応力方程式モデルをフレームワークとして、粘弾性流体の抵抗低減流れを再現し得る乱流モデルの構築を目的とした。直接数値解析および界面活性剤水溶液の実験も行い、そのデータベースを元にa-prioriテストを通じて、粘弾性寄与項やGiesekus構成方程式に現れる非線形項について新たなモデルを提案した。粘弾性流体における複雑流路(有限平板周りやバックステップ流路)の乱流を調査し、Kelvin-Helmholtz渦の抑制効果、剥離点距離の延長、および主流揺動を見出し、それらの解明と(乱流モデルによる)予測を行った。

研究成果の概要(英文)：We investigated drag-reducing turbulent flows of viscoelastic fluids in order to construct a new turbulence model applicable for those flows. We developed several models in frameworks of two-equation eddy-viscosity model and Reynolds-stress model. In addition, we performed relevant direct numerical simulations (DNS) and experiments, where the Giesekus constitutive equation and surfactant solutions were employed, respectively. Through a-priori tests using DNS database, we discussed the modeling for non-linear terms in the constitutive equation and improved the predictive performances of a Reynolds-stress model (RSM) in computing a drag-reducing turbulent flow. In the DNS and experiment, we examined the viscoelastic turbulent flows through complicated geometries, such as a channel with finite plates and a backward-facing step. We found the suppressed Kelvin-Helmholtz eddy and the downstream shift of reattachment point, which phenomena were predicted qualitatively by our proposed model.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流モデル 乱流 粘弾性流体 シミュレーション工学

## 1. 研究開始当初の背景

広く流体管路中の省エネルギー化をもたらす有効な方法として、「トムズ効果」の実用的応用が期待されている。トムズ効果とは、高分子物質や界面活性剤溶液を液体に少量添加したとき、乱流状態にある流体の摩擦抵抗が著しく減少する効果である。既に水・石油等のパイプラインや地域冷暖房システムの熱輸送媒体などの液体輸送に応用されている。トムズ効果のメカニズムや抵抗低減流れの流動特性は不明な点も多く、実験や数値解析が多く行われてきた。先行研究の大半は、平滑な平板上の規範的な流れ、いわゆるカノニカル乱流を対象としており、非均質な流れ場を対象とした研究は層流のものにほぼ限られている。上記のトムズ効果を発現する流体は、ニュートン流体（水道水や空気など）には無い弾性的レオロジ特性を有し、パラス効果や法線応力効果など特異な流れの変化をもたらす粘弾性流体である。非均質な流れでは、平板上の流れ等では検知されない抵抗低減流れの更なる乱流変調が生じると考えられる。よって、剥離や再付着などを伴う複雑な流路内の粘弾性流体の変調乱流（以下、「粘弾性乱流」と呼称）を詳しく解析していく必要がある。

大型計算機の発達に伴い、粘弾性乱流の DNS（直接数値解析）が数多く行われ、実験観測されてきた乱れ低減現象について知見を深めてきた。これと同様に、複雑流路における流動特性の理解と予測も期待できるが、昨今の流体機器設計においては乱流モデルを用いた計算負荷の小さい数値シミュレーション（RANS）が好まれる。しかし、ニュートン流体についての乱流モデルは良く整備されてきたが、粘弾性流体乱流モデルの実用化には程遠い。複雑流路の粘弾性乱流の実験および DNS 解析結果をもとに、粘弾性流体に適応し得る乱流モデルへの拡張・整備が求められている中、本研究はその課題に挑むものである。

RANS では、平均流への乱れ寄与（レイノルズ応力）をモデル化することで、計算負荷を大幅に節約する。ニュートン流体においては事実上、 $k-\varepsilon$  モデルが広く使われている。しかし、粘弾性乱流の独特な非等方性を再現するには不向きで、剥離・再付着を伴う場合には精度に不安が残る。そこで、ニュートン流体の乱流において提案・開発されてきた「非等方性（異方性） $k-\varepsilon$  モデル」、「レイノルズ応力方程式モデル」を粘弾性乱流に応用・拡張していくことで、各種流路の粘弾性流体の流れにおける予測の高度化・高速化が期待できる。また、粘弾性乱流のモデル化の検討を通じて、その構成応力によるレイノルズ応力輸送への寄与や粘弾性エネルギーの輸送現象を解明していくことになる。これは粘弾性流体における抵抗低減効果（トムズ効果）のメカニズム解明に繋がるもので、理学的・工学的にも十分に意義がある。

## 2. 研究の目的

平滑流路のみならず剥離・再付着を伴う流路において、粘弾性乱流に特異なレイノルズ応力と構成応力の輸送現象を解明し、それを再現し得る乱流モデルの提案が目標である。本研究での RANS のフレームワークとして、広く実用的に用いられ比較的安定な  $k-\varepsilon$  モデルと、統計的に物理現象をよりよく再現し得るレイノルズ応力方程式モデルの 2 種を主に取り扱う。一方で、大型計算機を利用して、複雑流路における粘弾性乱流の DNS を行い、乱流モデル構築に適した高レイノルズ数・高ワイゼンベルグ数における粘弾性乱流現象の解明および各種乱流統計量のデータベース化を行う。同時に、界面活性剤溶液を用いた実験により、DNS や RANS の計算結果を常に比較検証し、実現象との乖離を避ける。

## 3. 研究の方法

二方程式モデル（等方性  $k-\varepsilon$  モデル、非等方性  $k-\varepsilon$  モデル、 $k-\omega$  モデル）およびレイノルズ応力方程式モデルをフレームワークとして、ニュートン流体で開発されてきた各種乱流モデルを粘弾性流体について拡張する。これに際して、流体の粘弾性寄与や構成方程式（Giesekus 粘弾性モデル）に現れる非線形項について新たなモデルの構築を検討する。これと平行して、DNS や界面活性剤水溶液を用いた実験により複雑流路における現象解明と乱流統計量のデータベース構築を行う。構築された DNS データベースを利用した a-priori テストにより、提案する粘弾性流体乱流モデルの高度化を図る。

## 4. 研究成果

平滑チャネル乱流の DNS データベースに基づき、ニュートン流体用の低レイノルズ数型  $k-\varepsilon$  モデルを粘弾性流体向けに拡張し、粘弾性乱流におけるモデルおよびモデル定数の修正を行った。検証用のデータベースとして新たに高いレイノルズ数とワイゼンベルグ数について DNS を実施して、提案する乱流モデルの広範な条件での検証が行えるようになった。乱流エネルギー  $k$  の輸送方程式において、粘弾性応力寄与項のモデル化が問題であったが、構成応力の各方向成分について従来よりも定性的に良好な再現性をもたらし得るモデル式を提案した。また、非線形  $k-\varepsilon$  モデルの導入による検証も行い、実験で見られたレイノルズ剪断応力の顕著な抑制について、その再現性に課題が残った。様々なモデル関数や粘弾性寄与項のモデル化を試し、性能を評価した。ニュートン流体で同様に広く利用されている  $k-\omega$  モデルの粘弾性流体への拡張も試した結果、低レイノルズ数型  $k-\varepsilon$  モデルおよび非線形  $k-\varepsilon$  モデルに比べて、 $k-\omega$  モデルではより良好な速度予測が行えることが判明した。粘弾性寄与項（非線形項）のモデル化の工夫のみでは更なる高度化は困難であり、現状のモデル（従来のニュートン

流体向けモデル式)の問題点を明確にした。レイノルズ応力方程式モデルの粘弾性流体への拡張も行い、特にレイノルズ応力輸送の再配分にも注目し、粘弾性流体の抵抗低減流れの再現を試みた。再配分に対する粘弾性寄与項のモデル化を導入したことにより、乱れの非等方性の予測に改善が見られた。

複雑流路に適応した乱流モデル構築に向けて、複雑流路内乱流の DNS を実施した。流路としては、有限長平板を流れに直交させて設置し、3 次元の剥離・再付着現象の解析を行った。特に、平板後流に生じる大規模な縦渦の特性を評価し、粘弾性流体の流れにおける変化を明らかにした。さらなるデータベースの充実化を図るため、剥離・再付着を伴う 2 次元流れバックステップ流路の DNS 解析を行った。これにより、ステップ後流に生じる再付着点位置の変化や、ステップ後流に生じる Kelvin-Helmholtz 渦が粘弾性により顕著に抑制され、乱れ強度が低下するのを確認した。粘弾性流体ではステップ側壁面の対向壁上で第 2 再循環領域が誘起され、主流の大きな揺動を引き起こし、運動量・熱の輸送がニュートン流体に比べて促進される現象を見出した。これに良く似た現象は実験においても確認され、界面活性剤水溶液などの粘弾性流体が主流揺動を起こす条件(レイノルズ数、界面活性剤濃度)が有限な範囲で存在することを示した。特に、レイノルズ数の増加に応じて、揺動発生する界面活性剤水溶液濃度も徐々に高く・広くなり、有意な熱伝達特性への変化をもたらすと分かった。

先の提案乱流モデルを OpenFOAM に実装して、バックステップ流路を対象に DNS・実験・RANS の比較を行った。図 1 に示すように、ニュートン流体から粘弾性流体への変化(再付着点距離の延長)について、提案した乱流モデルでは定性的に予測し得ることを確認したが、定量的予測には未だ課題が残ることが分かった。

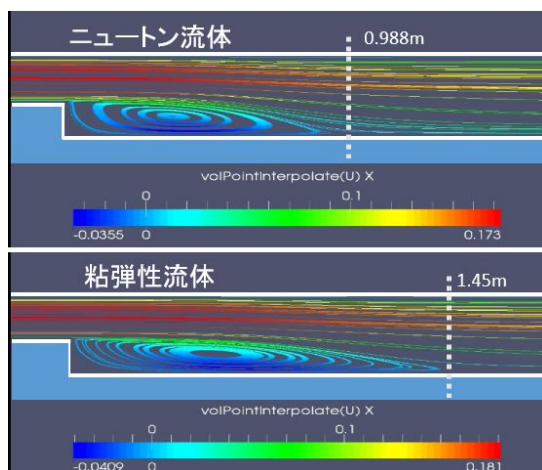


図 1 提案乱流モデルを実装した OpenFOAM を用いた、バックステップ流路の粘弾性流体乱流の RANS シミュレーション結果。ステップ周辺の平均流線(色は速さ)を可視化。

## 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 6 件)

Z. Fu, Y. Iwaki, M. Motozawa, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Characteristic turbulent structure of a modified drag-reduced surfactant solution flow via dosing water from channel wall, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 53, 2015, 135-145. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.03.006

T. Minegishi, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Stress field analysis around vortex in elastic layer of viscoelastic turbulent channel flow, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 530, 2014, 012059 (7 pages). (査読有)  
DOI: 10.1088/1742-6596/530/1/012059

原 峻平, 伊井 隆介, 塚原 隆裕, 川口 靖夫, 界面活性剤添加による抵抗低減流れの乱流エネルギースペクトルに関する考察, *日本流体力学会誌「ながれ」*, 第 33 巻, 2014, 531-538. (査読無)  
<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=33-6tokushu12.pdf&dir=15>

T. Tsukahara, M. Tanabe, and Y. Kawaguchi, Effect of fluid viscoelasticity on turbulence and large-scale vortices behind wall-mounted plates, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2014, 2014, 823138 (12 pages). (査読有)  
DOI: 10.1155/2014/823138

T. Tsukahara, T. Kawase, and Y. Kawaguchi, Heat transfer in a viscoelastic orifice flow at low to moderate Reynolds numbers, *Computational Thermal Sciences*, Vol. 6, 2014, 79-90. (査読有)  
DOI: 10.1615/ComputThermalScien.2014006371

T. Tsukahara and Y. Kawaguchi, Proposal of damping function for low-Reynolds-number  $k-\varepsilon$  model applicable in prediction of turbulent viscoelastic-fluid flow, *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2013, 2013, 197628 (15 pages). (査読有)  
DOI: 10.1155/2013/197628

[学会発表](計 30 件)

S. Hara, R. Ii, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Heat transfer enhancement caused by the meandering motion appearing in the backward-facing step flow with surfactant additives in high Reynolds number, *The First Pacific-Rim Thermal*

Engineering Conference, Hawaii's Big Island (USA), 2016.3.13-17.

戸倉 彰太, 石田 貴大, 塚原 隆裕, 粘弾性流体の回転平面クエット流に関する DNS 解析: ロールセル不安定性の変化, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 九州大学 (福岡県春日市), 2015 年 12 月 15-17 日 .

A. Ikegami, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Viscoelastic stress field in turbulent flow behind backward-facing step, The 5th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Busan (Korea), 2015.11. 22-25.

S. Inoue, T. Tsukahara, S. Jakirlić, and Y. Kawaguchi, A Reynolds-stress model for turbulent flow of a drag-reducing viscoelastic fluid, The 5th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Busan (Korea), 2015.11.22-25.

池上 明人, 塚原 隆裕, 川口 靖夫, 低レイノルズ数バックステップ乱流に対する粘弾性の影響, 第 93 期日本機械学会流体工学部門講演会, 東京理科大学 (東京都葛飾区), 2015 年 11 月 7-8 日 .

井上 俊, 塚原 隆裕, 川口 靖夫, 粘弾性流体の抵抗低減乱流におけるレイノルズ応力方程式モデルの適用, 第 93 期日本機械学会流体工学部門講演会, 東京理科大学 (東京都葛飾区), 2015 年 11 月 7-8 日 .

A. Ikegami, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Influence of visco-elasticity on turbulent flow over a backward-facing step, The ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, Seoul (Korea), 2015.7.26-31.

高橋 通博, 塚原 隆裕, 川口 靖夫, 非線形  $k-\varepsilon$  モデルを基にした粘弾性流体の乱流予測, 第 92 期日本機械学会流体工学部門講演会, 富山大学 (富山県富山市), 2014 年 10 月 25-26 日 .

嶺岸 卓也, 塚原 隆裕, 川口 靖夫, DNS による粘弾性流体チャネル乱流内の渦抑制に関する応力場解析, 第 92 期日本機械学会流体工学部門講演会, 富山大学 (富山県富山市), 2014 年 10 月 25-26 日 .

T. Tsukahara and Y. Kawaguchi, Flow visualization experiment on elastoinertial turbulence in transitional channel flow, The

12th International Symposium on Fluid Control, Measurements, and Visualization, Nara (Japan), 2013.11.18-23.

M. Tanabe, T. Tsukahara and Y. Kawaguchi, DNS study on vortices induced by flat-plate vortex generator in drag-reducing turbulent flow, The 12th International Symposium on Fluid Control, Measurements, and Visualization, Nara (Japan), 2013.11.18-23.

嶺岸 卓也, 高橋 通博, 塚原 隆裕, 川口 靖夫, 粘弾性流体乱流における低レイノルズ数型  $k-\varepsilon$  モデルの改良, 第 91 期日本機械学会流体工学部門講演会, 九州大学 (福岡県福岡市) 2013 年 11 月 9-10 日 .

M. Tanabe, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Viscoelastic turbulent channel flow obstructed with three-dimensional finite ribs, The 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Hong Kong (China), 2013.6.3-6.

T. Minegishi, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Budget of constitutive stress in viscoelastic turbulent channel flow by DNS, The 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Hong Kong (China), 2013.6.3-6.

M. Takahashi, T. Tsukahara, and Y. Kawaguchi, Improvement of low Reynolds number  $k-\varepsilon$  model for viscoelastic fluid flow, The 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Hong Kong (China), 2013.6.3-6.

〔その他〕

<http://murasun.me.noda.tus.ac.jp/db/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塚原 隆裕 (TSUKAHARA, Takahiro)  
東京理科大学・理工学部・講師  
研究者番号: 6 0 5 1 6 1 8 6

### (2) 研究分担者

川口 靖夫 (KAWAGUCHI, Yasuo)  
東京理科大学・理工学部・教授  
研究者番号: 2 0 3 5 6 8 3 5

### (3) 研究協力者

田邊 真明 (TANABE, Masaaki)  
高橋 通博 (TAKAHASHI, Michihiro)  
嶺岸 卓也 (MINEGISHI, Takuya)  
原 峻平 (HARA, Shumpei)  
池上 明人 (IKEGAMI, Akito)  
井上 俊 (INOUE, Shun)