

平成 30 年 5 月 8 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420106

研究課題名(和文)大規模並列計算による弾性乱流の統計性及び物質混合特性の解明

研究課題名(英文) Study on statistics and mixing in elastic turbulence using large-scale parallel computation

研究代表者

渡邊 威 (Watanabe, Takeshi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30345946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：遅い高分子溶液の流れに特有の乱流現象である「弾性乱流」の統計性及び物質混合特性を、高分子鎖を粒子モデルとして扱った大規模並列計算により調べた。定常な渦流れや角柱周りの遅い流れについて、高分子を添加すると流れ場は非定常化し、乱流状態に遷移することが見出された。この時の速度変動のスペクトルは弾性乱流に特有なべき減衰を示すことがわかった。また、2wayカップリング計算の高精度化と高速化に取り組み、計算コストを減じる方法を提案した。

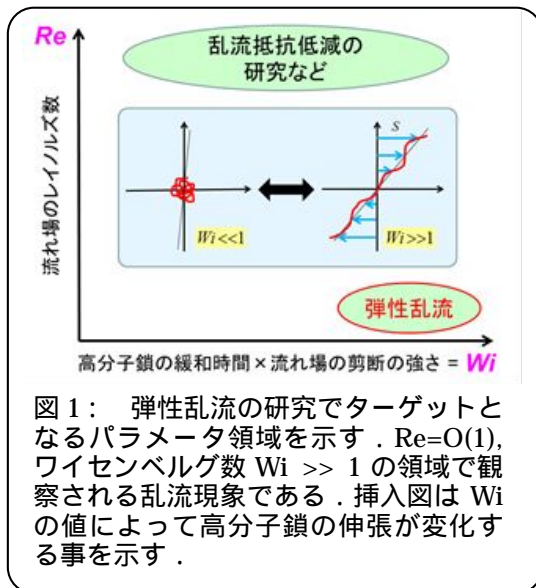
研究成果の概要(英文)：We investigate the statistical nature and mixing in elastic turbulence, which is observed in the creeping polymer solution flow, using large-scale parallel computation of chain-polymer model coupled with the equations of motion for solvent fluid. It is found that the steady creeping flows caused by vortices or around the square rod become unsteady states when the long-chain polymers are injected in the flows. Then the transition into the turbulent states are observed when the Weissenberg number is increased. The power-law decay of spectra for velocity fluctuations is also observed after the turbulent states are attained, where the results are consistent with experimental studies. Moreover we progress the method of two-way coupling simulations for polymer-turbulence interactions and propose the efficient method to decrease the computational cost but keeping the reasonable accuracy of computation.

研究分野：統計流体力学

キーワード：弾性乱流 大規模計算 物質混合

## 1. 研究開始当初の背景

高分子溶液に代表される非ニュートン流体は、ニュートン流体とは異なる独特の流動特性を示す。その代表的なものの一つに“弾性乱流 (Elastic Turbulence)”と呼ばれる現象がある。これは曲がった流路や、サドル点を有する十字流路内の高分子溶液の低レイノルズ数流れにおいて、高分子の弾性的性質が流れ場に強く作用することにより流動が不安定化し、ランダムな非定常運動が出現する現象を指す (図1参照)。弾性乱流は、イスラエルの V. Steinberg 教授らの研究グループによって行われた2枚の回転円盤に挟まれた高分子溶液に生じる流れの実験研究 (Nature 405, 53 (2000)) により広く認識されるようになり、この研究以降、弾性乱流に関する理論及び実験的な研究が数多く行われるようになった。



弾性乱流の重要な性質として、運動エネルギースペクトルの冪則の存在や、速度勾配揺らぎの非ガウス分布等が挙げられ、これらはニュートン流体における高レイノルズ数乱流と類似していることが指摘されている。また様々な形状のマイクロ流路デバイス内で弾性乱流を発生させることで、流路内での物質混合を促進させる研究が近年活発に行われており、応用研究への展開が見込まれている。

弾性乱流に関する研究は、この数年国内外で活発に行われるようになってきた。基礎的な研究に限れば、例えば平板チャンネル内での弾性乱流の発生に関する実験研究 (L. Pan et al. PRL 110, 174501 (2013)) や、構成方程式の数値計算による円柱周り流れの弾性乱流の解析 (M. Grilli et al. PRL 10, 174502 (2013)) などの研究成果が報告されている。しかし弾性乱流の発生や統計性が高分子の物性 (鎖長や緩和時間、弾性の強さなど) にどのように依存し、またそれが物質混合過程にどのような影響を与えるかについての知見はまだまだ十

分ではない。この理解のためには、高分子鎖の動力学をメソスケールのレベルで取り扱うことが重要であるが、先行研究ではマクロな構成方程式を用いた数値解析に限定されている。弾性乱流の性質を高分子の物性と関連付けて理解するためには、粒子描像に基づいた数値解析は必要不可欠である。

研究代表者は、これまでに大多数の高分子鎖の離散モデルと乱流場の相互作用を実現する数値計算手法の開発に従事し、開発したコードを用いて高分子が乱流の減衰過程に及ぼす影響を調べてきた。特に減衰最終過程において多くの高分子鎖が伸張した状態を維持している時、流れ場の統計性質は弾性乱流のものと非常に類似していることを見いだした。この研究を通して、高分子鎖の離散モデルを用いた数値計算を駆使し、弾性乱流の発生とその統計性を解析する有効性を確信した。また弾性乱流による物質混合過程の詳細は十分理解されていない一方、高レイノルズ数乱流による物質混合については過去に膨大な数の研究があり、研究代表者も過去に関連した研究を行ってきた。そこでこれまでの研究で得た知見と数値計算の経験を生かして、弾性乱流の素過程とそれによる物質混合の特性を解明したいと思い、本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、弾性乱流の素過程及びその物質混合特性を、流体力学の基礎方程式と高分子鎖の離散モデルの集団を連結した大規模並列計算により調べる。特に弾性乱流の乱流特性が高分子のメソスケールの性質にどう依存し、それがマクロな物質混合過程にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。またニュートン流体における高レイノルズ数乱流中の物質混合過程との類似点、相違点を明らかにすることで、弾性乱流の乱流現象としての性格を詳らかにする事を目指す。具体的には、以下の点を解明することを目的としている。

### (1) 弾性乱流の発生条件の検証

定常な流れ場に大多数の高分子鎖を分散した時の弾性乱流の発生条件を調べる。基本場の渦構造が高分子の影響でどのような分岐を経て不安定化し、乱流状態へ遷移するのかを明らかにする。さらに高分子鎖の緩和時間や、鎖長を変化させたときの乱流遷移過程への影響を調べる

### (2) 弾性乱流の統計性質の解明

次に弾性乱流が観測されるパラメータ領域において、弾性乱流の基本的な流動特性とその統計性質について調べる。乱流を特徴付ける基本的な統計量である運動エネルギーやエネルギー散逸率の時間変化、エネルギースペクトルの振る舞い、速度勾配の揺らぎの

統計性について調べ、それが高分子の物性を特徴づけるパラメータにどのように依存するかを明らかにする。

### (3) 弾性乱流による物質混合特性の評価

弾性乱流による物質混合の性質を明らかにする。評価方法は物質濃度場の移流拡散方程式を計算に取り込み、初期に不均一に分布した物質濃度が弾性乱流によってどのように均一化していくかを統計的に評価する。また高レイノルズ数のニュートン流体における乱流混合過程の結果と比較することで、両者の類似点と相違点を詳らかにする。

## 3. 研究の方法

弾性乱流の発生とその統計則、及び物質混合の素過程を大規模並列計算により調べる。溶媒場はナビエ・ストークス方程式と連続の式で記述され、個々の高分子鎖の動力学はバネ・ビーズモデルにより支配される。流媒場は高精度なスペクトル法、あるいは有限差分法を用いて数値計算を行い、一方で個々の高分子鎖はブラウン動力学計算を行う。流れ場に分散した大多数の高分子鎖の時間発展をラグランジュ的に追跡し、溶媒場へは高分子鎖のアンサンブルからポリマーストレス場を計算し、流体とのカップリングを実現した並列数値計算を実行する。外力場により定常な渦流れを生成し、そこに高分子を添加したときの流れ場の不安定化の様子と弾性乱流の発生条件を調べる。また高分子鎖の鎖長や緩和時間を系統的に変化させて計算を行い、弾性乱流の統計性質、及びその物質混合特性が高分子の物性にどのように依存するか明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) Taylor-Green 流れにおける弾性乱流の発生とその統計性

Taylor-Green 渦による規則的で定常な流れが、高分子鎖の影響によってどのように変形し、定常流れが乱流状態へ遷移するかを調べた。その結果、定常な渦流れに高分子を分散させると、流れ場は非定常化し、乱流状態に遷移することを明らかにした(図2)。また速度揺らぎの時間変動のパワースペクトルは弾性乱流に特徴的なべき減衰を示す事がわかり、結果は実験研究の結果と概ね一致することが明らかになった。

### (2) 物体周りの流れにおける高分子の影響

弾性乱流の実験研究の多くは、波形状流路や円柱周りの流れといった物体周りの流れを扱う。そこで平行流路内に周期的に配置された角柱周りの流れに生じる弾性乱流の性質についてオイラー・ラグランジュ計算を行

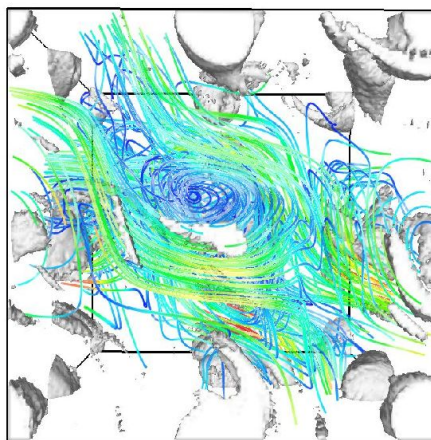


図2: Taylor-Green 流れによる弾性乱流の流れ場の構造を、速度勾配テンソルの第2不変量の等値面(グレー)と流線(カラー:色は速度の大きさを表す)を用いて可視化したもの。

い、その性質を調査した。流れ場は2次元とし、流体方程式の計算には有限差分法を用い、圧力場のポワソン方程式の解法には、odd-even SOR法を用いてスレッド並列化した。流れ場のレイノルズ数は0.1程度であり、このときニュートン流体では定常な層流となった。この状態で高分子を添加し、流れ場の平均圧力勾配の増加させることで流速を増やし、高分子鎖の伸長を特徴づけるワイゼンベルグ数を増加させることで、流れがどのように遷移するかを観察した。

図3に弾性乱流に遷移したときの渦度場および高分子伸長場のスナップショットを示す。渦度分布は層流状態のものとは大きな違いはないが、時間変化する様子を観察すると、角柱間に存在する渦がうねる様子が観察できた。また高分子が強く伸長する領域が壁面近傍で存在し、非定常運動を引き起こすことがわかった。

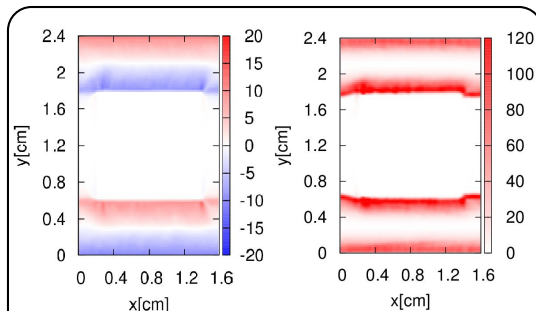


図3: 角柱周りの遅い流れで発生する弾性乱流の流れ場の様子を示す。左図は渦度の分布、右図は高分子ストレスのトレース場の分布をそれぞれ示している。

### (3) 2wayカップリング計算の改良

Taylor-Green 流れや角柱周りの流れで発生する弾性乱流について、オイラー・ラグランジュ計算による解析を行ってきた。この過

程において、高分子ストレス場に発生するカスプ状の特異構造の存在が明らかになった。この特異構造を通常の計算方法で解像しようとする、流れ場の計算精度が低下するため、例えば弾性乱流のエネルギースペクトルの振る舞いを正確に予測するためには、2wayカップリング計算の方法の問題点を改良する必要がある、という問題が浮き彫りになった。

そこで本研究では、2wayカップリング計算で用いる、デルタ関数の平滑化による影響と計算コストについて、いくつかのテスト関数の場合についてその精度とコストの評価を行った。その結果、ガウス関数を用いた平滑化手法は、計算精度とコストの両面において優れていることが明らかになった。また近似ガウス関数を用いた平滑化法を提案し、これにより2wayカップリング計算にかかる計算コストが大幅に縮小されることがわかった。

#### 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 7件)

T. Watanabe and T. Gotoh, "On the smoothing of point force in the two-way coupling simulation of polymer-laden turbulent flows", J. Phys.: Conf. Ser., 査読有 (2018), 掲載予定

渡邊友貴, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸, "乱流と固体粒子群の相互作用に関する大規模シミュレーション", ながれ, 査読無 (2018) (注目研究 in CFD31 として掲載予定)

J. Wang, T. Gotoh, T. Watanabe, "Spectra and statistics in compressible isotropic turbulence", 査読有, Phys. Rev. Fluids, 2, 13403 (2017)

J. Wang, T. Gotoh, T. Watanabe, "Shocklet statistics in compressible isotropic turbulence", 査読有, Phys. Rev. Fluids, 2, 23401 (2017)

渡邊威, "乱流と微小粒子群の相互作用に関するシミュレーション研究", 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 2007, 28-39, (2016).

T. Gotoh and T. Watanabe "Power and Nonpower Laws of Passive Scalar Moments Convected by Isotropic Turbulence", 査読有, Phys. Rev. Lett. 11, 114502 (2015)

渡邊威, 後藤俊幸, "弾性乱流のオイラー・ラグランジュシミュレーション", 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 1944, 58-69, (2015)

[学会発表](計 20件)

Y. Watanabe, T. Watanabe, I. Saito, and T. Gotoh, "Large-scale simulation of monodispersed small solid particles in isotropic turbulence", NITech Lecture on Turbulence and Cloud, Nagoya Inst. Tech. Nagoya, March (2018)

渡邊友貴, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸, "乱流と固体粒子群の相互作用に関する大規模シミュレーション" 第31回数値流体力学シンポジウム, 京都工繊大 12月 (2017)

渡邊威, 後藤俊幸 "弾性乱流のエネルギースペクトルの振る舞い" 日本物理学会秋季大会, 岩手大学 9月 (2017)

渡邊威, 後藤俊幸 "ランダム速度場下での弾性乱流の発生とその統計性" 京都大学数理解析研究所 RIMS 共同研究 7月 (2017)

T. Watanabe, "Eulerian-Lagrangian simulations for viscoelastic turbulence", Meeting on "Nonequilibrium thermodynamics and statistical physics: From rational modeling to its applications", JR Hakata City, Fukuoka, 3月 (2017)

野村優介, 渡邊威, 後藤俊幸 "2次元格子乱流における高分子の影響" 日本流体力学会年会 2016, 名古屋工業大学 9月 (2016)

T. Gotoh and T. Watanabe, "Inertial and inertial convective ranges and crossover length", 24<sup>th</sup> ICTAM, Montreal, Canada, 8月 (2016)

T. Gotoh and T. Watanabe, "Scaling exponents of passive scalars in homogeneous turbulence", International Workshop on Theoretical Aspects of Near-Wall Turbulence Studies, Kansai Seminar House, Kyoto, 6月 (2016)

渡邊威, "ながれと微小粒子集団の相互作用に関する大規模シミュレーション", 第34回名古屋駅前イノベーションハブ技術シーズ発表会, 愛知県産業労働センター, 3月 (2016)

石川直樹, 渡邊威, 後藤俊幸, "等方乱流中の有限サイズ粒子の挙動" 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 3月 (2016)

T. Gotoh and T. Watanabe, "On the power law of passive scalars in turbulence", 68th Annual Meeting of the



APS Division of Fluid Dynamics, Boston, Massachusetts, 11月(2015)

後藤俊幸, 渡邊威, "Anomalous scaling and non-power law of passive scalar convected by turbulence", Plasma Simulator Symposium, 核融合科学研究所, 9月(2015)

渡邊威, "乱流と微小粒子群の相互作用に関するシミュレーション研究", RIMS 研究集会「乱流を介在した流体现象の数理」7月(2015)

渡邊威, "オイラー・ラグランジュシミュレーションによる弾性乱流の研究", NIFS セミナー, 核融合科学研究所, 5月(2015)

川口尚吾, 渡邊威, 後藤俊幸, "物体周りの遅い流れにおける高分子の影響", 日本物理学会年会 2015, 早稲田大学早稲田キャンパス, 3月(2015)

川口尚吾, 渡邊威, 後藤俊幸, "物体周りの希薄高分子溶液流れに関する数値シミュレーション", 第 28 回数値流体力学シンポジウム, タワーホール船堀, 12月(2014)

T. Gotoh and T. Watanabe, "Intermittency and universality of small scales of passive scalar in turbulence", 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco, CA, 11月(2014)

渡邊威, 後藤俊幸, "Taylor-Green 流れにおける弾性乱流の性質 II", 日本物理学会 2014 年秋季大会, 9月(2014)

T. Gotoh and T. Watanabe, "Universality of small scale statistics of passive scalar in turbulence", The 2014 Turbulent Mixing and Beyond Workshop (TMBW-2014), the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy, 8月(2014)

渡邊威, 後藤俊幸, "弾性乱流のオイラー・ラグランジュシミュレーション", RIMS 研究集会「乱流研究のフロンティア」7月(2014)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:

権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡邊 威 (WATANABE, Takeshi)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科  
・准教授  
研究者番号: 30345946

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

##### (4) 研究協力者

( )