

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760156

研究課題名(和文)乱流による高分子溶液劣化のハイブリッドシミュレーションによる解明

研究課題名(英文)Hybrid simulations for the mechanical degradation of polymer solution by turbulence

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) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、乱流による高分子鎖の切断過程を取り込んだ数値シミュレーションを実行し、希薄高分子溶液の劣化過程、及び乱流統計への影響を調べた。その結果、分散する高分子の鎖長が長いほど、乱流への影響が強く表れることがわかった。また高分子の弾性が強い時、流れ場のレイノルズ数は小さくても乱流状態が維持され、このとき運動エネルギースペクトルは特徴的なべき則を示すことが明らかになった。また切断条件を変化させて切断が生じる回数及び流れ場への影響を調べた。結果、比較的切断が生じやすい条件下において、乱流場のエネルギー散逸はゆるやかに回復していき、低減率の減少が確認された。

研究成果の概要(英文)：In this study we examined the mechanical degradation of polymer solution by turbulence and its effects on turbulence statistics by performing the numerical simulations which include the cut-off process of long-chain polymers. It is known that the kinetic energy dissipation of turbulent flows is reduced by polymer additives. It was found that the longer chain polymers have larger influence on the turbulence statistics like the kinetic energy dissipation. When the elasticity of polymers was much stronger, turbulent motions were maintained by stretching polymers even when the turbulence sufficiently decayed. Then the kinetic energy spectrum showed the characteristic power-law decay in the wavenumber range below the Kolmogorov scale. We also found that the reduction rate of the kinetic energy dissipation was gradually decreased with time due to the decreasing of the number of longer chain polymers by cutting.

研究分野：統計流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：高分子溶液 乱流 ハイブリッド計算 大規模並列計算

## 1. 研究開始当初の背景

ダクトやパイプ内の流れにおける乱流摩擦抵抗低減の実現のために、高分子溶液が示す特異な流動特性が利用されている。用いる高分子の物性、環境条件と輸送効率との関連性が明らかになれば、輸送エネルギーのコスト削減など我々の生活に多大な恩恵をもたらす。基礎研究の観点からは、個々の高分子鎖の流れ場中での振る舞いをメソスケールレベルで理解する事が必要不可欠である。乱流は幅広い時間・空間スケールを有する階層的渦運動を伴うため、高分子鎖と乱流との相互作用は非常に複雑である。例えば線状高分子鎖は乱流のエネルギー散逸が支配的な小スケールにおいて、速度勾配揺らぎの影響によりコイル状構造から線状構造まで多様に变化する。コイル-ストレッチ転移は、高分子溶液の流動特性を理解する上で鍵となる重要な物理現象である。

流れ場から伸長した高分子鎖に働く力がその最大弾性力を超えると、鎖は中心付近で切断される事が知られている。切断した高分子鎖数の増大は、高分子溶液の実効的な濃度の減少を意味する。これは例えば乱流摩擦抵抗低減において低減能力の低下を導くことが示されている。つまり高分子溶液の力学的劣化の理解とその予測が現実的な問題として重要になる。しかし切断した高分子の数密度・空間分布と、溶液の劣化程度・時間変化との関連性など、未だ詳細はよく理解されておらず、理論的研究の進展が必須である。

## 2. 研究の目的

研究代表者は、過去の研究において、乱流の直接数値計算と非常に大多数の高分子鎖モデルのブラウン動力学計算を連結したハイブリッド・シミュレーションコードを開発し、乱流場と鎖状高分子鎖の相互作用、並びに高分子が乱流統計に及ぼす影響について調べてきた。本研究課題では、これまでの研究を発展させ、高分子鎖が乱流により切断される過程を取り込んだ、乱流による希薄高分子溶液劣化の大規模数値シミュレーションを実行するためのプログラムコードを新たに作成する。作成したコードを用いて、高分子溶液劣化の時間依存性とその統計法則を明らかにし、乱流のエネルギー散逸や抵抗低減則といったマクロな乱流統計量への劣化の影響を、メソスケールのレベルから理解する事を目的とする。具体的には、以下の3点に焦点をあて、研究を実施した。

- (1) 高分子鎖の切断過程を組みこんだハイブリッド並列計算コードを作成し、計算コードの妥当性を検証する。
- (2) 高分子の性質の変化に伴う乱流の統計性質への影響を解析し、乱流変調のバ

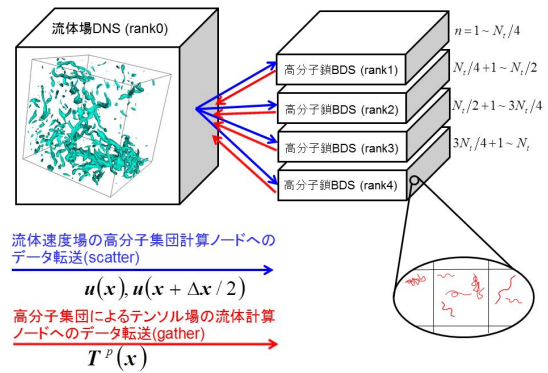


図1：本研究における乱流場の直接数値計算 (DNS) と高分子鎖のブラウン動力学計算 (BDS) のハイブリッド計算の模式図を示す。

ラメータ依存性を吟味する。

- (3) 乱流による高分子溶液劣化の時間依存性を解析し、劣化程度と切断を受けた高分子鎖の数密度、及びその空間分布との関連性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

乱流場の直接数値計算にはスペクトル法を用い、ナビエ・ストークス方程式と連続の方程式を数値積分する。一方で個々の高分子鎖はブラウン動力学計算を用い、乱流中に分散した大多数の高分子鎖のバネ-ビーズモデルの時間発展をラグランジュ的に追跡する計算を行う。流れ場中の粒子位置における流速は、流れ場の更新点からの補間により求める。一方で流体計算の格子点周りの高分子鎖からそのアンサンブルとしてストレス場を計算し、流体とのカップリングを実現した大規模並列計算を実行する。オイラー・ラグランジュ計算コードに高分子鎖の切断過程を取り込み、乱流による高分子溶液の力学的劣化の時間依存性を解析する。切断を受けた高分子鎖の数密度とその空間分布より劣化のメカニズムを明らかにする。さらに高分子溶液の劣化程度と乱流パラメータとの関連性を見出し、その統計法則を探求する。

## 4. 研究成果

- (1) 高分子鎖の切断過程を組みこんだ計算コードの作成

これまで開発してきたハイブリッド・シミュレーションコードを基盤にして、高分子鎖の切断過程を取り入れた新しい計算コードの作成を行った。コード作成の第一段階では、鎖の切断過程を念頭において、高分子鎖の時間発展法について、これまでの研究で用いた手法からの改良を行った。この改良により、高分子鎖の運動方程式がより安定に且つ高精度に数値積分できるようになった。次に、

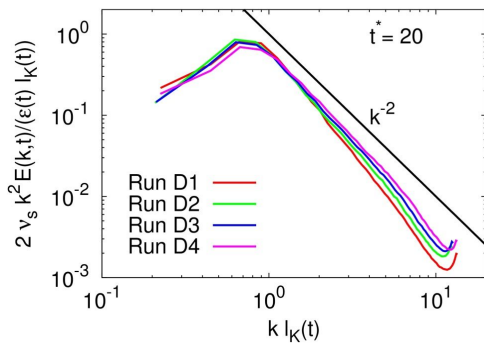


図 2 : 運動エネルギースペクトル ( $\times k^2$ ) の冪則的な減衰を示す. Run D1 では高分子鎖の弾性が最も小さく, Run D4 で最も大きい.

切断過程の解析に先駆けて, 切断を伴わない場合の高分子の乱流場への影響について調べるために, 乱流計算に用いる計算ノードと高分子計算に用いる計算ノードを独立させた大規模並列計算を実行した. 図 1 にこの並列計算の模式図を示す. ここでは, 特に高分子と乱流場の相互作用を特徴付ける統計量の振る舞いに着目した. その結果, 分散させる高分子の濃度を大きくすると, 乱流のエネルギー散逸率の強い低減が生じること, エネルギースペクトルの高波数側が大きく変形することがわかった. また高分子の弾性的性質が大きくなると, 同様の効果が得られることが確認できた.

#### (2) 高分子の鎖長の変化が乱流統計に及ぼす影響

次に, 切断過程の解析に向けて, ダンベルモデルからマルチビーズモデルへの高分子モデルの変更を行い, 高分子の鎖長の変化が乱流の性質に及ぼす影響について調べた. その結果, 鎖長の増大と共に, 運動エネルギースペクトルの高波数領域はより大きく変形し, またエネルギー散逸率の低減がより大きくなることがわかった. また高分子の弾性効果が大きい時, 流れ場のレイノルズ数は小さくても乱流状態が維持されていることが見いだされた. このとき, 運動エネルギースペクトルの振る舞いについて調べた結果, 図 2 に示す通り, スペクトルは特徴的な冪則に従って減衰することが明らかになった.

#### (3) 高分子鎖の切断過程における鎖長の変化とその統計性

高分子鎖の切断過程を取り入れたコードを用いて, 劣化過程が乱流統計に及ぼす影響について解析した. 4 ビーズモデルが切断により 2 個の 2 ビーズモデルに変化する過程を導入し, 切断条件を変化させて切断が生じる回数及び流れ場への影響を調べた. 結果, 比較的切断が生じやすい条件下において, 乱流場のエネルギー散逸低減はゆるやかに回復

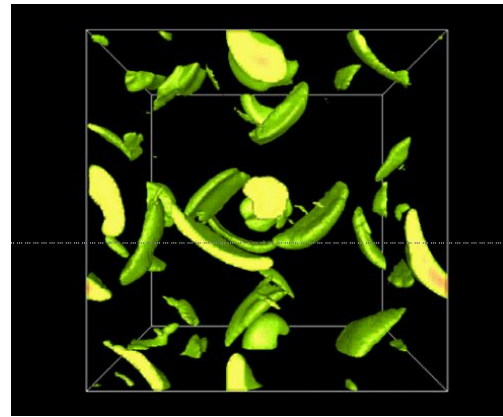


図 3 : 弾性乱流発生時における渦構造を示す. 渦度の大きさの等値面を可視化しており, 紙面に垂直方向が z 軸となる.

していき, 低減率の減少が確認された.

#### (4) 弾性乱流との類似性について

高分子の乱流統計への影響について詳細に調べた結果, 高分子鎖の弾性的性質が強く, 流れ場が十分減衰した状態では, 流体の運動エネルギースペクトルはべき則を示すことを明らかにした. これは「弾性乱流」と呼ばれる高分子溶液特有の乱流現象と非常に類似している. そこで, 粒子描像に基づく高分子鎖と流れ場の相互作用によって弾性乱流を発生させる並列計算を試みた. 外場により定常な渦流れを生成し, そこ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事を見いだした. 図 3 にこの時の流れ場の構造を可視化した結果を示す. 規則正しく配置されていた渦構造は壊れて, ランダムに運動することがわかった. またこのとき運動エネルギースペクトルは冪則に近い減衰をすることが見いだされた.

#### 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 11 件)

渡邊威, 後藤俊幸, “乱流の減衰過程に及ぼす高分子の影響”, 京都大学数理解析研究所講究録 1882, pp.55-64 (2014).

Takeshi Watanabe and Toshiyuki Gotoh, “Power-law spectra formed by stretching polymers in decaying isotropic turbulence”, Phys. Fluids 26, 035110 (2014).

Takahiro Iwayama and Takeshi Watanabe, “Universal spectrum in the infrared range of two-dimensional turbulence flows”, Phys. Fluids 26, 025105 (2014).

Takeshi Watanabe and Toshiyuki Gotoh, "Kinetic energy spectrum of low-Reynolds-number turbulence with polymer additives", J. Phys.: Conf. Ser. 454 012007 (2013).

渡邊威, 後藤俊幸, "Taylor-Green 流れにおける弾性乱流", ながれ 第 32 巻, 441-448 (2013).

T. Gotoh, T. Watanabe and H. Miura, "Spectrum of passive scalar at very high Schmidt number in turbulence", Plasma and Fusion Research 9, 3401019 (2014)

Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh, "Hybrid Eulerian-Lagrangian simulations for polymer-turbulence interactions", J. Fluid Mech. 717, pp.535-575 (2013).

Takahiro Iwayama, Masakazu Sueyoshi, Takeshi Watanabe, "Linear stability analysis of parallel shear flows for an inviscid generalized two-dimensional fluid system", J. Phys. A : Math. Theor. 46, 65501, (2013).

Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, "Scalar flux in a uniform mean scalar gradient in homogeneous isotropic steady turbulence", Physica D 241, 141-148 (2012).

Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, Yuki Suzuki, "Universality and anisotropy in passive scalar fluctuations in turbulence with uniform mean gradient", Journal of Turbulence 12, N48 (2011).

渡邊威, 後藤俊幸, "大規模並列計算による乱流中の高分子モデルの挙動解析", 京都大学数理解析研究所講究録 1711, pp.10-23 (2011).

〔学会発表〕(計 17 件)

渡邊威, 後藤俊幸, "Taylor-Green 流れにおける弾性乱流の性質", 日本物理学会年会 2014, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学湘南キャンパス.

西岡優樹, 渡邊威, 後藤俊幸, "希薄高分子溶液における乱流のハイブリッドシミュレーション", 日本機械学会第 26 回計算力学部門講演会, 2013 年 11 月 2 日, 佐賀大学.

渡邊威, 後藤俊幸, "Taylor-Green 流れ

における弾性乱流", 日本流体力学会年会 2013, 2013 年 9 月 12 日, 東京農工大学.

渡邊威, 後藤俊幸, "希薄高分子溶液における低レイノルズ数乱流の性質", 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 26 日, 広島大学.

渡邊威, 後藤俊幸, "乱流の減衰過程に及ぼす高分子の影響", 京都大学数理解析研究所研究集会「多重物理・多重スケール乱流現象の数理」, 2013 年 01 月 09 日, 京都大学.

土屋勝洋, 西岡優樹, 渡邊威, 後藤俊幸, "一様定常乱流の統計性における鎖状高分子の影響", 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012 年 12 月 18 日, 国立オリンピック記念青少年センター.

杉山智哉, 後藤俊幸, 渡邊威, "テイラーケット乱流における高分子の影響", 第 10 回日本流体力学会中部支部講演会, 2012 年 11 月 09 日, 稲荷山温泉杏泉閣.

Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh, "Kinetic energy spectrum of the low Reynolds number turbulence with polymer additives", CCP2012, 2012 年 10 月 15 日, Nichii Gakkan.

杉山智哉, 後藤俊幸, 渡邊威, "テイラーケット乱流における高分子の影響", 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 2012 年 10 月 06 日, 神戸ポートアイランド南地区.

渡邊威, 後藤俊幸, "高分子添加した乱流のエネルギースペクトルの振る舞い", 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 19 日, 横浜国立大学.

杉本大輝, 渡邊威, 後藤俊幸, "一様定常乱流の統計性における高分子の影響", 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2011 年 11 月 10 日, 九州大学応用力学研究所.

金相佑, 渡邊威, 後藤俊幸, "テイラーケット流れにおける高分子の影響", 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2011 年 11 月 10 日, 九州大学応用力学研究所.

杉本大輝, 渡邊威, 後藤俊幸, "多数の高分子モデルが分散した一様乱流の統計性", 第 2 4 回計算力学講演会, 2011 年 10 月 8 日, 岡山大学.

金相佑, 渡邊威, 後藤俊幸, "テイラーケット流れにおける高分子の影響", 第 2 4

回計算力学講演会, 2011年10月8日, 岡山大学.

渡邊威, 杉本大輝, 後藤俊幸, “一様定常乱流の統計性質への高分子の影響”, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月21日, 富山大学五福キャンパス.

渡邊威, “高分子溶液乱流の大規模並列数値計算”, 第4回NIFS - NIT合同セミナー, 2011年7月29日, 核融合科学研究所.

Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh, “Hybrid simulations of enormous numbers of polymers dispersed in decaying isotropic turbulence”, ICCES'11, 2011年4月18日, Grand Metro Park Hotel, Nanjing China.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡邊 威 (WATANABE TAEKSHI)  
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: