

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420103

研究課題名(和文) 共変性要素の導入による新たな乱流解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of turbulence analysis method with incorporation of covariant elements

研究代表者

堀内 潔 (Horiuti, Kiyosi)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：10173626

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高分子添加溶液の抵抗低減機構の解明をBDS-DNS法を用いて行い、反変型高分子は大きく伸長した時、伸長過程で貯蔵した弾性エネルギーを保持できず、溶媒の運動エネルギーに伝達するため、散逸の生成が増大する事、共変型高分子は、最大に伸長した時、伸長過程で貯蔵した弾性エネルギーを保持するため、顕著な抵抗低減が得られることを明らかにし、伸長の大きな高分子が剛性を有するというde Gennesの仮説の正当性を示した。更に、MHD乱流の磁場ベクトルは、反変性高分子と類似した挙動を、また、スカラー勾配と渦度ベクトルは、各々、反変性と共変性高分子に類似した挙動を示す事を明らかにし、普遍的な特性が示された。

研究成果の概要(英文)：We conduct multi-scale study on energy transfer due to polymers dispersed in homogeneous isotropic turbulence in elasto-inertial regime (EIT). Effect of non-affinity with macroscopically-imposed deformation in the motion of polymers is examined by connecting mesoscopic Brownian dynamics of dumbbells to DNS for solvent. The dumbbells are allowed to be advected either affinely (contravariant) or completely non-affinely (covariant). The relaxation time of polymer is in the order of eddy turnover time. Contravariant polymers drain more energy from the large scales than they can dissipate and transfer the excess energy back into the solvent when they are highly-stretched. The skewness of strain-rate tensor in the production term for elastic energy and dissipation rate transfer elastic energy back into the smallest scale of the solvent and increase the dissipation. In the covariant polymers, this backward transfer is eliminated and elastic energy is retained when highly stretched

研究分野：流体工学

キーワード：反変性、共変性 高分子添加溶液 MHD スカラー伝達 多重スケール解析

1 . 研究開始当初の背景

乱流場において重要な役割を果たす要素の一つに、流体のせん断による伸長を受けて運動するベクトルがある。このベクトルの分類の一つに、反変性を有する要素と共変性要素がある。ここでは、その運動方程式が upper および lower の convective derivative で表されるベクトルを、各々、反変および共変ベクトルとするが、前者は material line element、後者は material surface element の輸送方程式と同一となり、反変ベクトルは一般に線状の要素を表すのに対し、共変ベクトルはそれに直交する超平面を附随した層状の要素を表すベクトルとなり、互いに直交する補空間を形成する。反変ベクトルの例には、渦度ベクトルとそれを連ねた渦線、電磁流体力学 (MHD) における磁場および電流ベクトル等が挙げられる。渦を巻いている領域は直接観測にかかる事が多いため、反変性の物理量は認識し易い要素と思われる。共変ベクトルは、層状の要素を張る反変ベクトルの面積ベクトルで与えられるため、認識が難しいと思われ、反変性要素に対する解明は進んでいるのに対して、共変性の物理量の解析と活用はあまり行われていないように見受けられる。しかしながら、共変ベクトルで表される物理量の例として挙げられる、温度・密度等のスカラー量の勾配ベクトル、MHD の Lorentz 力等は反変性要素と同等に重要と思われる。

高分子添加溶液の数値解析においては、共変型高分子が、汎用されている反変型に比べて大きな抵抗低減を起こす事を明らかにされ、共変性要素が重要な役割を果たす事が示された。そこで、より広範な乱流場において共変性要素の役割を明らかにする事の必要性と、この解析によって新手法の開発が図れる可能性が示唆された。

2 . 研究の目的

Newton 性流体に希薄高分子を添加することにより抵抗低減が起きるとする Toms 効果⁽¹⁾ は流体の輸送技術やビル空調、地域冷房などの冷媒輸送動力低減技術、省エネルギー化に貢献をしているが、詳細な機構は明らかにされていない。従来、この抵抗低減機構には 2 つの仮説が提唱されている。1 つは Lumley⁽²⁾ による、コイル状になった高分子が大きな歪みが起きている領域で伸長され、伸長粘度の増加により抵抗低減が起きるとする仮説である。一方、de Gennes⁽³⁾ は、高分子が伸長することで弾性エネルギーが蓄積されて張力が発生し、乱流の小スケールへのエネルギーカスケードが抑制されるという仮説を立てた。de Gennes⁽³⁾ は、同時に、伸長の大きな高分子は剛性を有して流体の局所的な変形に対する非追従性を示すという仮説を提唱した。実際、高分子応力の構成方程式を用いた解析では、非追従性を考慮した場合、追従性を仮定した場合に比べて顕著な抵抗低減が生じる事が Horiuti et al.⁽⁴⁾

によって明らかにされた。また、Valente et al.⁽⁵⁾ は追従性の高分子において Weissenberg 数が大きな場合、高波数帯域で、溶媒の運動エネルギーから弾性エネルギーへの伝達が顕著に減少して散逸が増大するという結果が報告されたが、この乱流場は elasto-inertial turbulence (EIT) と呼ばれる。本研究では、EIT におけるエネルギー伝達機構を解明する事を目的とし、BDS-DNS 法⁽⁶⁾ ⁽⁷⁾による多重スケール解析を行った。

本研究では、先ず、macroscopic なスケールの溶媒の運動を Navier-Stokes 方程式の直接数値積分 (Direct Numerical Simulation, DNS) で解析し、mesoscopic なスケールでは、高分子鎖を dumbbell モデルで近似してその運動を Lagrange 的に直接追跡して溶媒との相互作用を two-way coupling で取り入れる計算により、非追従性高分子における顕著な抵抗低減の機構を検証する事を目的とした。

次に、対象を MHD と一様等方乱流におけるスカラー場の伝達に拡張して共変性要素の役割と反変性要素との相互作用の考察を行い、新たな知見の導出を図った。

3 . 研究の方法

高分子添加溶液の解析では、有限伸長を有する 2 つの beads を非線形バネで繋いだ dumbbell モデル (Finitely extensible nonlinear (FENE) elastic dumbbell) により高分子鎖を近似する⁽⁶⁾。この高分子鎖の運動と作用する応力を Lagrange 的に追跡するが、dumbbell の beads を結ぶ connector vector の支配方程式は式 (1) となる。

$$\frac{dR_i^{(n)}}{dt} = u_i(x_1^{(n)}) - u_i(x_2^{(n)}) - \frac{1}{2\tau_s} \frac{R_i^{(n)}}{1 - (R_k^{(n)} R_k^{(n)} / L_{MAX}^2)} + \frac{r_{eq}}{\sqrt{2\tau_s}} ((W_1^{(n)})_i - (W_2^{(n)})_i) \quad (1)$$

ここに、 r_{eq} は非追従性を表すパラメーター、 $S = S_{ij}$ は strain rate tensor、 f は FENE 関数、 \mathbf{W} は Brownian なノイズを示す。 $r_{eq} = 0.0$ と $r_{eq} = 1.0$ で各々非追従性が最小、最大となる。式 (1) の右辺第 1 項を Taylor 展開すると、 $r_{eq} = 0.0$ と $r_{eq} = 1.0$ の場合、主要部は、各々式 (2)、式 (3) となる。

$$\frac{dR^i}{dt} = R^j \cdot \frac{\partial u^i}{\partial x^j} - \frac{1}{2\tau_s} R^i \quad (2)$$

$$\frac{dR_i}{dt} = -R_j \cdot \frac{\partial u^j}{\partial x^i} - \frac{1}{2\tau_s} R_i \quad (3)$$

式 (2)、式 (3) は、各々 upper-convective derivative、lower-convective derivative で表され、その解は各々反変型、共変型のベクトルとなる。以下、前者を反変型 (contravariant) 高分子、後者を共変型 (covariant) 高分子と呼ぶ。

Dumbbell が溶媒に及ぼす高分子応力 τ_{ij} は式 (4) から算出し、この応力による力を Navier-Stoke 方程式に付加する。

$$\tau_{ij} = \frac{3\pi a r_{eq}^2 (1-\beta) \nu}{2(1-2\alpha)\tau_z} \sum_{n=1}^{N_s} \left\{ \frac{R_i^{(n)} R_j^{(n)}}{r_{eq}^2} f\left(\frac{|R|}{L_{MAX}}\right) - \delta_{ij} \right\} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{r}_s) \quad (4)$$

Dumbbell の connector vector の方程式を用いて高分子応力の構成方程式を導出すると、式 (5) の Johnson-Segalman 方程式 (2) となる。

$$\frac{D\tau_{ij}}{Dt} = (1-\alpha) \left(\tau_{ik} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \tau_{kj} \right) - \alpha \left(\tau_{ik} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \tau_{ij} \right) - \frac{1}{\tau_z} \tau_{ij} \quad (5)$$

この構成方程式の近似解を求めると式 (6) となる。

$$\tau_{ij} \approx \nu(1-\beta)2S_{ij} + 2\nu(1-\beta)\tau_z \{ 2(1-2\alpha)S_{ik}S_{kj} - (S_{ik}Q_{ij} + S_{jk}Q_{ki}) \} + 8\nu(1-\beta)\tau_z^2(1-2\alpha)^2 S_{ik}S_{kj}S_{ij} + \dots \quad (6)$$

この近似解を用いて、高分子の弾性エネルギーの生成項 P_e を導出すると式 (7) となる。

$$P_e = \pm(1-2\alpha)(\tau_z S_{ij}) ; \text{sign} \begin{cases} +: \alpha \leq 0.5 \\ -: \alpha > 0.5 \end{cases} \left(k_p = \pm \frac{1}{2} \tau_z \right) \approx 2\nu(1-\beta) [S_{ij}S_{ji} + 2\tau_z(1-2\alpha)S_{ik}S_{kj}S_{ij} + 4\tau_z^2(1-2\alpha)^2 S_{ik}S_{kj}S_{ij}S_{ij} + \dots] \quad (7)$$

一方、溶媒の散逸率 ε を表す $S_{ij}S_{ji}$ 項の支配方程式は式 (8) となる。

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} S_{ij} S_{ji} \right) = -S_{ik} S_{kj} S_{ij} + \dots \quad (8)$$

BDS-DNS 計算のデータから、dumbbell の伸長が大きい場合、式 (6) 中の $S_{ik}S_{kj}$ 項の非対角成分、即ちせん断応力が支配的となる事が示された。したがって、伸長が大きい場合、弾性エネルギーの生成項と散逸率の生成項 P_e の主要項は、反変型高分子では、

$$P_e \approx +4\nu(1-\beta)\tau_z S_{ik}S_{kj}S_{ij} < 0, \quad P_e \approx -S_{ik}S_{kj}S_{ij} > 0 \quad (9)$$

共変型高分子では、

$$P_e \approx -4\nu(1-\beta)\tau_z S_{ik}S_{kj}S_{ij} > 0, \quad P_e \approx -S_{ik}S_{kj}S_{ij} > 0 \quad (10)$$

となる。Strain skewness 項 $-S_{ik}S_{kj}S_{ij}$ では正值が支配的である事を考慮すると、反変型高分子では弾性エネルギーが溶媒の運動エネルギーに変換されて散逸の生成に寄与するのにたいし、共変型高分子では弾性エネルギーと散逸の双方の生成に寄与するものと予測される。

4. 研究成果

4.1 高分子添加溶液における解析結果

流れ場は強制一様等方乱流 (7) とし、計算領域は全方向に 2 周期境界条件を適用した。格子点数は 128^3 、粘性係数は $\nu = 1/30$ とした。時間積分には 3 次精度 Runge-Kutta 法を用い、 $\Delta t = 0.001$ とした。空間の離散化にはスペクトル法を用い、aliasing 誤差は 3/2 則により除去した。Dumbbell の最大長は Newton 性流体の Kolmogorov 長 とし $L_{max} = 0.1$ 、dumbbell の平衡長は $r_{eq} = L_{max}/50$ とした。緩和時間 τ_z は Kolmogorov 時間スケール τ_η に対して、 $Wi = \tau_z / \tau_\eta$ で定義されるワイゼンベルグ数を $Wi = 10.0$ とした。

図 1 と図 2 に溶媒の散逸率と高分子の弾性エネルギー生成項 P_e の時間発展を示す。赤線は反変型、青線は共変型、黒線は Newtonian

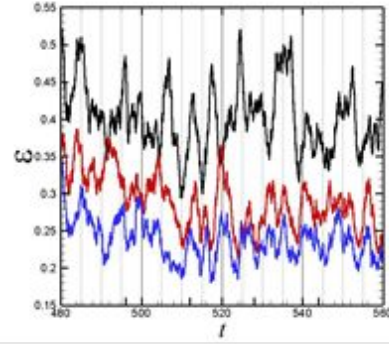


Fig.1 Temporal variations in ε .

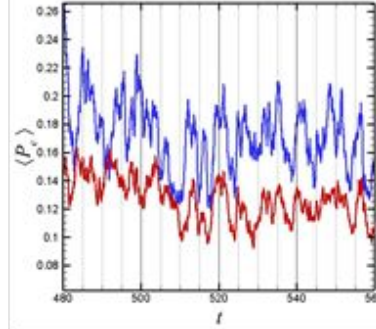


Fig.2 Temporal variations in P_e .

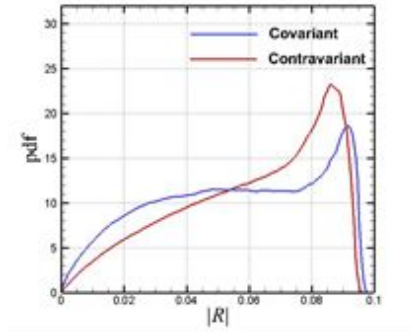


Fig.3 p.d.f. of the dumbbell length

を示す。散逸率 ε は抵抗低減の指標であり、小さな値をとるほど顕著な抵抗低減を得られていることを意味する。抵抗低減の大きさは共変型、反変型、Newtonian の順になっている事から、共変型において顕著な抵抗低減が起きていることが判る。図 2 より P_e は共変型高分子の方が大きな値を取っていることが見て取れる。図 3 に、高分子の長さの確率密度関数 (p.d.f.) を示す。最大伸長をとる確率は、共変型高分子が反変型高分子に比べて大きい事から、共変型高分子においてより大きな粘弾性効果が起きているものと考えられる。

本節では、高分子の配向を検証するが、ここでは、2 種類の固有ベクトルを基底とした座標系を設定する。一つは、strain rate tensor S_{ij} の固有ベクトルであり、 e_s, e_+, e_- と記述する。ここに、3 固有ベクトル中で過度ベクトルに最も平行な固有ベクトルを e_s 、残りの 2 ベクトル中で対応する固有値が大きなベクトルを e_+ 、残りを e_- とする。もう一つは $[A_{ij}]$

$\equiv (S_{ik}\Omega_{kj}+S_{jk}\Omega_{ki})$ 項の固有ベクトル, a_s, a_+, a_- に依る基底である (Ω_{ij} は渦度テンソル). BDS-DNS データの解析から, dumbbell の伸長が大きな場合, 最大頻度で抽出される上記固有ベクトルと dumbbell の配向は, 反変型高分子では R/e_s , 共変型高分子では R/e_- となる事が示された (図は省略)

図 4 と図 5 に, 反変型高分子における $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ 項と各々 $P_e, S_{ij}S_{ji}$ 項との joint p.d.f. を示す. 但し, ここでは, S_{ij} 項等については, DNS の格子点での値を dumbbell の重心での値に補間して各項を算出している. 青色の等高線は, $|\cos\theta(R, e_s)| \sim 1$ の条件付きに抽出された joint p.d.f. を示し, 黄色の曲線は確率が最大となる点を連ねた分布を示す. R と e_s が平行に近い場合, $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ 項の増加と共に P_e 項は減少するのに対して, $S_{ij}S_{ji}$ 項の生成は増加する事が見て取れる. したがって, 弾性エネルギーの生成は減少するのに対し, 溶媒の散逸へのエネルギー伝達が増大する事を示し, 3 節での式 (9) による解析的な予測と整合する. この結果は, Valente et al. (5) による Fourier 空間における EIT の実空間における記述を与える.

図 6 と図 7 に, 共変型高分子における $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ 項と各々 $P_e, S_{ij}S_{ji}$ 項との joint p.d.f. を示す. 青色の等高線は, $|\cos\theta(R, e_-)| \sim 1$ の条件付きに抽出された joint p.d.f. を示し, 黄色の曲線は確率が最大となる点を連ねた分布を示す. R と e_- が平行に近い場合, $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ 項の増加と共に P_e 項の値は増大するのに対して, $S_{ij}S_{ji}$ 項の生成は, 小さな値の $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ 項で飽和に達する事が見て取れる. したがって, 弾性エネルギーの生成は増加するのに対し, 溶媒の散逸へのエネルギー伝達は減少する. 3 節の式 (10) からは両方向へのエネルギー伝達が考えられたが, 実際の高分子では, 弾性エネルギー生成への伝達が, 溶媒の散逸への伝達に卓越する事が示された. このため, 共変型高分子では顕著な抵抗低減が起きるものと考えられる.

図 8 と図 9 に, 各々, 反変型高分子と共変型高分子における $|R|^2$ と P_e 項の joint p.d.f. を示す. 黒色の太い曲線は確率が最大となる点を連ねた分布を示す. Dumbbell の伸長が中間値の領域では, 反変性では単調に P_e 項の値が増加しているのに対して, 共変性では P_e 項の値は零値付近に集中している. 一方, dumbbell の伸長が最大値付近では, 共変性では P_e 項の値が顕著に増加するのに対して, 反変性では増加は小さい. したがって, dumbbell の伸長が中間値の領域では, 反変性高分子が高分子エネルギーの生成において機能するのにたいして, 最大値付近の領域では, 共変性高分子が機能しており, 反変性と共変性高分子の機能には, 棲み分けが存在する事が分かる. この結果は, 働くアリと働かないアリの機能の棲み分け⁽⁹⁾に類似しており, 自然界における系全体の普遍的な維持機構である可能性が考えられる.

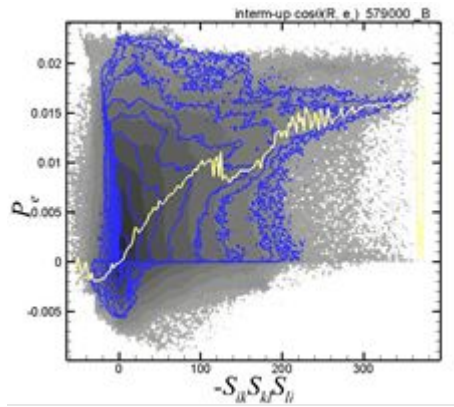


Fig.4 Joint p.d.f. between $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ and P_e . Blue contours: conditioned on $R//e_s$.

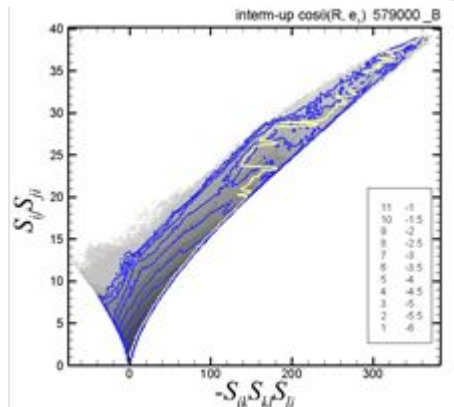


Fig.5 Joint p.d.f. between $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ and $S_{ij}S_{ji}$. Blue contours: conditioned on $R//e_s$.

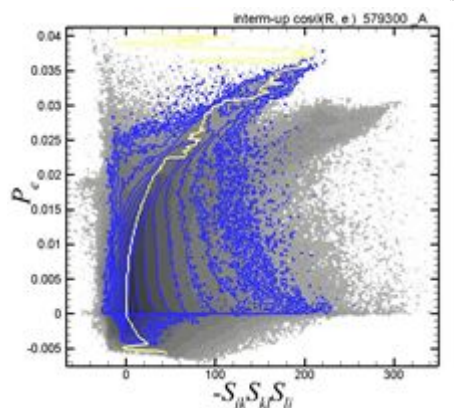


Fig.6 Joint p.d.f. between $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ and P_e . Blue contours: conditioned on $R//e_-$.

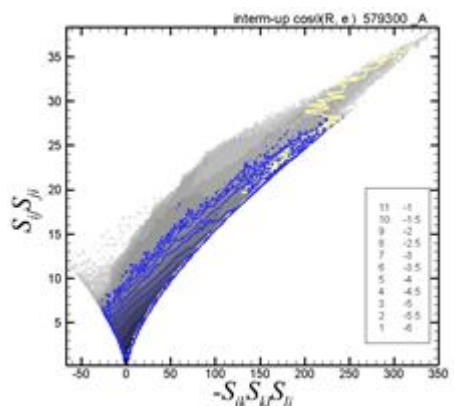


Fig.7 Joint p.d.f. between $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ and $S_{ij}S_{ji}$. Blue contours: conditioned on $R//e_-$.

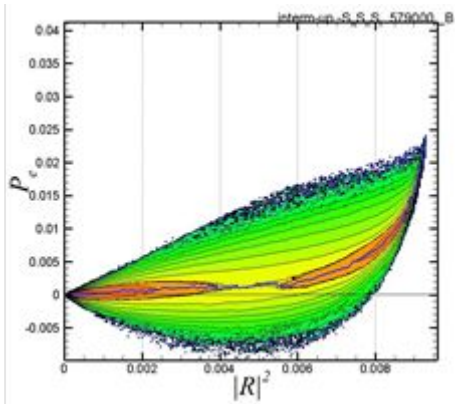


Fig.8 Joint p.d.f. between $|R|^2$ and P_e .
obtained in the case with $\alpha=0.0$.

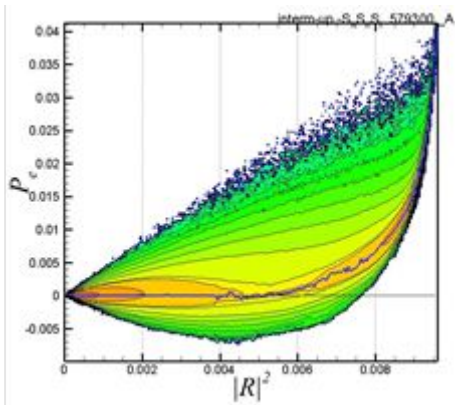


Fig.9 Joint p.d.f. between $|R|^2$ and P_e .
obtained in the case with $\alpha=1.0$.

本研究では、高 Weissenberg 数における、高分子添加溶液の抵抗低減機構の解明を BDS - DNS 法を用いて行い、以下の結論を得た。

- ・反変型高分子は大きく伸長した時、伸長過程で貯蔵した弾性エネルギーを保持できず、溶媒の運動エネルギーに伝達するため、散逸の生成が増大することを示した。

- ・共変型高分子は、最大に伸長した時、伸長過程で貯蔵した弾性エネルギーを保持するため、顕著な抵抗低減が得られることを明らかにした。

- ・本研究の結果は、伸長の大きな高分子が剛性を有するという de Genne の仮説に対する支持を与える。図 3 から、反変型高分子では、大きな長さを持つ dumbbell 数が単調に増加する事が見て取れるが、これは、反変型高分子は flexible なため coil した状態から容易に伸長されるが、大きく伸長されると今度は容易に収縮するためと考えられ、反変型高分子は必ずしも有効な抵抗低減の添加媒体ではない可能性がある。一方、共変型高分子では p.d.f. が 2 つの極大値を持つ事が見て取れる。これは、共変型高分子は剛性を有するため、coil した状態からの伸長を拒絶するが、いったん伸長した場合は収縮しにくくなるためと考えられる。したがって、抵抗低減に最も有効な高分子は、伸長が中間値の場合は反変性を示し、伸長が最大長に近い場合は共変性として振舞う高分子と考えられる。実際の高分子における挙動の検証が今後の課題

となる。

4.2 MHD 乱流における解析結果

MHD 乱流では、エネルギー伝達機構の DNS データを用いた解析を行い、磁場の誘導方程式から、磁場ベクトルの反変性と磁場エネルギーと散逸の生成を担う項が高分子添加溶液と同様に strain skewness $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ 項である事、磁場が大きく伸長した場合、磁場エネルギーを保持できず流体の運動エネルギーに伝達するため、流体の散逸が増加することを示した e_+ 方向に配向する磁場の増加による strain skewness 項の正值から負値への変換により、磁場エネルギー生成の増加と流体散逸の減少が得られる事を明らかにした。

4.3 一様等方スカラー乱流場における結果

一様等方スカラー乱流場では、スカラー散逸構造の DNS データを用いた解析を行い、スカラー勾配ベクトルの共変性と渦度ベクトルの反変性である事、および、スカラー散逸とエンストロフィーの生成を担う項が高分子添加溶液と同様に strain skewness $-S_{ik}S_{kj}S_{ji}$ 項である事、スカラー勾配ベクトルの e_+ 方向への配向により、大きなスカラー散逸の生成が得られる事、Strain skewness 項が大きい場合、渦の伸長は低減し、渦度ベクトルの e_+ への配向転換により、大きなエンストロフィーの生成が得られる事を示した。

MHD 乱流における磁場ベクトルの解析結果は、反変性高分子の挙動にたいする結果と類似しており、また、スカラー勾配と渦度ベクトルの伸長の解析結果は、各々、反変性と共変性高分子の挙動にたいする結果と類似している事が明らかにされた。したがって、反変性と共変型ベクトルが有する普遍的な特性が示された。

参考文献

- (1) Toms, B. A., Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes an . large Reynolds numbers, In Proc. 1st Intl Congr. Rheol., 1 (1949), 135-141.
- (2) Lumley, J. L., Drag reduction by additives, Annual. Review of Fluid Mechanics., 1 (1969), 367-384
- (3) Taybor, M. and Gennes, P. G. D., A Cascade Theory of Drag Reduction, Europhys. Lett., 2(7) (1986), 519-522.
- (4) K. Horiuti, K. Matsumoto, and K. Fujiwara., Remarkable drag reduction in non-affine viscoelastic turbulent flows, Phys. of Fluids 25, 015106 (2013).
- (5) Valente P. C., da Silva, C.B. and Pinho, F.T., The effect of viscoelasticity on the turbulent kinetic energy cascade, J. Fluid Mech, 760 (2014).
- (6) Watanabe, T. and Gotoh, T., Hybrid Eulerian- Lagrangian simulations for polymer-turbulence interactions, J. Fluid Mech, 717 (2013), 535-575.
- (7) 竹生, 堀内, 増田, BDS - DNS 法による

高分子添加液における抵抗低減機構の解明, 第 27 回数値流体力学シンポジウム (2013).
(8) Johnson, M. W. and Segalman, D., A model for viscoelastic fluid behavior which allows nonaffine deformation., J. Non-Newton. Fluid Mech., 2 (1977), 255.
(9) 長谷川英祐, 『働かないアリに意義がある』メディアファクトリー (2010).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

K. Horiuti, S. Yanagihara and T. Tamaki, Nonequilibrium state in energy spectra and transfer with implications for topological transitions and SGS modeling, Fluid Dyn. Res, 査読有, 48, 021409 (15pp) (2016).

堀内 潔, 非アファイン性を考慮した高分子添加溶液におけるエネルギー伝達と抵抗低減 - 働く高分子と働かない高分子 -, 流体工学部門ニューズレター『流れ』, 11 月号 6, 査読無, および, 日本機械学会 2016 年度年次大会 企画ワークショップ「複雑流体の新展開」(招待講演), 九州大学, 2016 年 9 月 11 日-14 日 (2016).

鈴木 舟, 堀内 潔, 鈴木 葵, Elasto-inertial turbulence における反変・共変高分子の伸長とエネルギー伝達に関する研究, [特集] 注目研究 in 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 日本流体力学会誌「ながれ」, 査読無. 35, p.133-137 (2016). [学会発表](計 1 3 件)

松井将器, 堀内 潔, 坪木和久, 雲解像モデルによるスーパー台風の渦構造と形成過程の解明, 日本流体力学会年会 2016, 査読無, 名古屋工業大学, 2016 年 9 月 26 日-28 日, 0231-4-4 (2016).

K. Horiuti, Aoi Suzuki, Multi-scale study on process of contravariant and covariant polymer elongation and drag reduction in viscoelastic turbulence, 69th Annual Meeting of the APS DFD, Portland, Oregon, Nov.20-22 (2016).

K. Horiuti and S. Suzuki, Contravariant and covariant polymers in elasto-inertial viscoelastic turbulence, Proc. of 24th ICTAM, FM12, 査読有, Montréal, Canada, August 21-26 (2016).

M. Matsui, K. Horiuti and K. Tsuboki, The Super Typhoon - its structure and formation process, Proc. International Workshop on Theoretical Aspects of Near-Wall Turbulence Studies, 査読無, Kansai Seminar House, Kyoto, June 28-30 (2016).

K. Horiuti, Energy cascade and drag reduction in elasto-inertial turbulence diluted with contravariant and covariant polymers, EUROMECH-ERCOFTAC Workshop "Turbulence cascades" (招待講演),

December 02-04, Lille, France (2015).

K. Horiuti and S. Masuda, Multi-scale study on process of contravariant and covariant polymer elongation and drag reduction in viscoelastic turbulence, 68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Boston, Massachusetts, Nov. 22-24 (2015).

島田 俊之, 堀内 潔, 久郷 結熙, 反変・共変性要素の添加による圧縮性乱流における抵抗低減の解析, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 査読無, 九州大学, 12 月 15 日-17 日 (2015).

鈴木 舟, 堀内 潔, 鈴木 葵, Elasto-inertial turbulence における反変・共変高分子の伸長とエネルギー伝達, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 査読無, 九州大学, 12 月 15 日-17 日 (2015).

K. Horiuti, Contravariant and Covariant Vector Elements Governing the Fluid Motions in Turbulence, International Workshop "Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics" (招待講演), September 23-27 Hotel Nikko Nara, Nara (2015).

T. Fujiwara, K. Horiuti and S. Suzuki, Drag reduction in homogeneous shear flow turbulence diluted with contravariant and covariant polymers, Proc. of 15th European turbulence Conference, 査読有, Delft University of Technology, Delft, Netherland, Aug. 25-28 (2015).

K. Horiuti and S. Masuda, Multi-scale study on process of contravariant and covariant polymer elongation and drag reduction in viscoelastic turbulence, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, San Francisco, California, Nov.23-25 (2014).

鈴木 舟, 堀内 潔, 久郷 結熙, BDS-DNS 法による反変・共変型高分子の伸長素過程の研究, 日本流体力学会 年会 2014, 査読無, 東北大学, 9 月 15 日-17 日 B104-3-2 (2014).

藤原健利, 堀内 潔, 島田 俊之, BDS-DNS 法による高分子添加一様せん断乱流における抵抗低減機構の解明, 日本流体力学会 年会 2014, 査読無, 東北大学, 9 月 15 日-17 日, B104-3-3 (2014).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 潔 (HORIUTI Kiyosi)
東京工業大学・工学院・准教授
研究者番号: 10173626

(2) 研究協力者

J. Schumacher, Technische Universität Ilmenau, Department of Mechanical Engineering (Germany), Professor