



Title	液晶の電場誘起乱流による負の粘性 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	小林, 史明
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14301号
Issue Date	2020-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/80243
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Fumiaki_Kobayashi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 小林 史明

学 位 論 文 題 名

液晶の電場誘起乱流による負の粘性

(Negative viscosity of liquid crystals in the presence of turbulence induced by an electric field)

粘度とは液体の持つ流れに対する抵抗の程度を表す量であり、一般に正の値を持つ。流れは、外力が働かなければ、この抵抗力のため減衰してやがて静止する。一方、外部からエネルギーが供給される非平衡開放系では流れが増幅されることがある。このとき、粘度が負になったと見なすことが出来る。このような見かけの負の粘度は、液体に磁性微粒子や大腸菌などのバクテリアを分散させた流体において、1990年代から活発に探索が行われるようになった。しかしながら、それらの研究では粘度の減少は見られたものの、粘度は正のままで負にはならなかった。このような状況下で、2015年に López らは低粘度用に特別に設計・製作した 10^{-3} mPa·s の測定精度を有するレオメーターを用いて、大腸菌の分散系において初めて粘度が負となることを示した。しかし、観測された負の粘度の絶対値は極めて小さいため（水の粘度の 10 分の 1 程度）、粘度が辛うじて測定されたのみで、流れの増幅等は観測されていない。流体の粘度が負になったとき、負の粘度を起源とした様々な新奇現象が期待されるが、それを観測するにはより大きな負の粘性を示す流体が必要である。また、応用にこのような流体が不可欠であることは言うまでもない。

最近、液晶においても電場を印加すると粘度が減少する現象が Nagaya らによって発見された。元々は電場により粘度が制御できる電気粘性流体として研究されていたものである。液晶は棒状の分子からなり、分子の方向が揃い、結晶のように異方性があるが、液体のように流動性のある物質である。液晶の配向と流れは相互に関係してるので、電場によって配向方向を変えると流れも変化する。液晶は配向に関係した複雑な構造を取り得るので、分散系と同様に負の粘度を含めて特異なレオロジー特性が期待できる。本研究では、これらの点に注目し、液晶の電場下でのレオロジー特性を詳細に調べた。

まず、液晶における負の粘性の探索を目的に、Nagaya らと同じ液晶 MBBA を用いて、しかし電場強度等のパラメータはより広い範囲で変化させて測定を行なった。結果として、極めて大きな負の粘度（大腸菌分散系の数 100 倍）の観測に成功した。この新たに発見された巨大負性粘度は、今まで観測されたことのない負の粘性を起源とする新規現象を通常の（特別に設計された超高感度ではない）レオメーターにより観測することを可能とする。本研究の第二の目的は、自発流れ、せん断速度とせん断応力における非線形関係、自励振動等の負性粘度に特有な現象を観測することである。また、せん断応力の電場振幅依存性や自発せん断速度の電場振幅および周波数依存性の詳細な測定、MBBA 以外液晶での負の粘性の探索、さらに負の粘性の理論的考察も目的として掲げる。

本論文は以下の全 6 章から構成される。

第 1 章では、これまでに行われてきた、負の粘性の探索に関係する先行研究を紹介し、本研究の背景及び目的を述べる。

第 2 章では、液晶の異方性、連続体力学、乱流等に関して本研究において必要な基礎的な事項を紹介する。特に、Ericksen と Leslie らによってまとめられた液晶の流体力学 (Ericksen-Leslie 理論) に

については詳しく説明する。また、レオロジーについても簡単に触れる。

第3章においては第4,5章で実際に用いた液晶試料と実験系について述べる。試料に関しては用いた液晶の構造式、物性値、ドーピングしたイオン性物質の構造式および作成した試料の導電率を示す。実験系に関しては、試料の観察とレオロジー測定を同時に行える装置について説明を行う。また、本研究でレオロジー測定の際に用いたレオメーターの3つの測定方式を紹介する。

第4章では液晶 MBBA のみを用いた種々の結果を示す。ここでは、せん断速度一定の下でせん断応力の印加電場依存性を測定したときに見いだされた巨大な負の粘度の発見から、せん断応力がゼロの下で測定された負の粘性由来の自発せん断速度の電場振幅依存性までを示す。この際、同時に行った試料の顕微鏡観察の結果、液晶は強い乱流状態にあることが判明した。次に、せん断速度及びせん断応力制御の下で測定されたせん断速度とせん断応力の間に現れた S 字曲線及び履歴曲線、そのスケールリング則、さらに、S 字曲線の温度依存性を示す。液晶で観測されたこれらの現象と平衡系の強誘電性相転移に伴う現象との類似性にも言及する。また、コイルバネをレオメーターのシャフトに取り付けることにより自励振動を発生させることに成功した。さらに、レオメーターの回転角についての運動方程式を立て、数値的に解くことでその再現を行った。また、Ericksen-Leslie 理論を用いた考察と応力の分離実験を行うことで、負の粘性が電氣的応力由来であることを明らかにした。液晶の配向分布関数を仮定することで、実験結果の再現も行った。補足において、自発回転方向の逆転、及び制御方式の異なるレオメーターで行った実験結果に関しても言及する。

第5章では主に MBBA と同族の液晶 EBBA を用いた結果に関して述べる。ここでは、EBBA にドーピングするイオン性物質 TBABE の濃度を変化させ、導電率の異なる3つの試料を作成した。これら3つの試料に加え、比較用の MBBA の試料でも実験を行った。その結果、レオロジー特性は導電率に強く依存することが判明した。まず、最初にイオン性物質をドーピングした EBBA とドーピングしていない EBBA でせん断応力の電場振幅依存性を測定し、イオンをドーピングした EBBA で負の粘性が発生することを示した（ドーピングしていない試料では負の粘性は見られなかった）。次に、顕微鏡による観察の結果、負の粘性の発現には乱流の十分な発達が必要であり、その発達には高い導電率が必要であることがわかった。第4章と同様に N 字（4章の S 字と同じであるが、5章では N 字と呼ぶ）曲線の電場強度と周波数依存性の測定を行い、スケールリング則の成立も確認した。さらに広い範囲で電場振幅と周波数の両方を変化させて自発せん断速度の詳細な2次元プロットを作成した。このとき、臨界周波数の近傍において、導電率の高い試料では4章のものと異なる新しいタイプの自励振動が見出された。このとき観測された新しいタイプの自励振動は第4章のようなコイルばねが無くても起こる自励振動であり、条件を変えると単純な一様回転へ転移する。負の粘性由来の非線形レオロジー要素と線欠陥由来の粘弾性要素を組み合わせたモデルを作り、運動方程式を解くことで、自励振動だけでなくこのような転移も再現することに成功した。

第6章では本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の展望について述べる