HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	せん断流下における微粒子のブラウン運動［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	瀧川, 佳紀
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11876号
Issue Date	2015-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58579
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yoshinori_Takikawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　瀧川 佳紀

学 位 論 文 題 名

せん断流下における微粒子のブラウン運動

(Brownian motion of particles under shear flow)

ブラウン運動は、1828 年にイギリスの植物学者ロバート・ブラウンによって初めて発見された液体中で微粒子などが不規則に運動する現象である。1905 年にアインシュタインの論文によって、ブラウン運動が媒質分子の衝突よって生じるものだとする分子運動論を用いた説明がなされ、統計物理学で重要な定理の一つである揺動散逸定理に対応する方程式が導かれた。このように、ブラウン運動について 100 年以上前から理論および実験的研究が行われてきたが、現在でもブラウン運動に関連する研究が盛んに行われている。その要因の一つとして、近年レーザーピンセット、高感度高速カメラ等を用いてメソスケールの構造およびゆらぎの測定法が発展してきたことがあげられる。また、本来のブラウン運動では静止流体中の運動を研究対象としたが、様々な環境下でのブラウン運動にも興味がもたれるようになったからである。例えば、せん断流下にある微粒子の拡散を考えると、流れによる輸送とブラウン運動による拡散の効果の結合によって、平均自乗変位に通常の時間 t に比例する拡散項に加えて、t の 3 乗に比例する項が現れること (異常拡散) が理論とシミュレーションによって示された。この異常拡散を観察するために動的光散乱法を用いた研究がせん断流下で行われたが、t の 3 乗に比例する効果は見られなかった。せん断流により粒子が移動してしまうため、平均自乗変位を t の 3 乗の効果が現れる長時間側まで求めることが困難であったからである。この類似研究として最近、せん断流下において微粒子を光ピンセットを用いてトラップし、その位置の直接測定が行われた。平衡状態にある微粒子のブラウン運動を考えると、x,y,z 方向の運動はそれぞれ独立である。一方、せん断流下では流れ方向と速度勾配方向の運動に相関が現れることが理論および実験の両面から示されている。さらに、位置の相互相関関数の時間反転対称性がせん断を印加することで破れることも検証された。これらの結果はせん断流下という非平衡状態で現れる特徴的な現象である。しかし、せん断流下におけるブラウン運動の基本的特徴である異常拡散自体は観測されていない。

そこで本研究では、せん断印加装置と共焦点レーザー顕微鏡が一体となった装置を用いて、せん断流下にある微粒子の軌跡を長時間にわたり精密に測定した。その軌跡を解析することにより平均自乗変位を求め理論的に予言されていた異常拡散の実験的な検証を試みた。それに加えて、軌跡の持続確率を実験的に求め、せん断流が持続指数に与える影響を確かめ、その値と近似計算によって求めた持続指数との比較を行った。また、振動せん断流下において、印加するひずみ振幅と位相に依存した見かけの拡散係数の変化の測定を試みた。

本論文は全 5 章から構成されている。

第 1 章では、ブラウン運動に関係する先行研究を紹介し、研究の背景と目的について述べる。

第 2 章では、定常せん断流下におけるブラウン運動を直接観察した結果について述べている。実験には、せん断印加と微粒子の運動の観察が同時に可能な装置を用い、平均自乗変位の統計的な精度を高めるために、一度の観察で複数の軌跡の情報を取得できるプログラムを構築し、その改良を行っている。通常の平均自乗変位では、流れによる変位が異常拡散に比べて大きいため、異常拡散を検出できない。そこで、流れによる変位を含まない新たな変位を導入し、その平均自乗変位を求め、理論値と比較し、良好な一致を得ている。しかし、理論値より実験値の方がわずかに小さな値を示していた。そこで、観察領域が有限であることに着目し、それを考慮した理論値を求めたところ、実験値と良い一致を示した。平均自乗変位に加えて、確率密度関数を実験的に求めている。短時間領域では、せん断の影響が小さく空間的異方性が見られなかったが、時間が経過するにつれて、せん断の効果により、流れ方向の拡散が垂直方向に比べ大きくなることが確かめられた。

第 3 章では、第 2 章で求めた軌跡を、持続確率 (粒子が時間 t 秒後までにもとの位置に戻らない確率) を用いて解析を行なっている。第 2 章において新たに定義した変位の持続確率を求めたところ、それが冪関数で減衰し、低せん断側と高せん断側で指数の異なることを明らかにした。しかし、その持続指数は通常の変数に対して計算されている結果とは異なっていた。そこで、新たな変数に対して、すでに報告されている近似法を用いて持続指数を計算し、実験結果と比較したところ、低せん断および高せん断の両側において良い一致が得られることを見出している。また、持続指数の近似計算の過程で導出した 2 時間相関関数をもとに通常の変位と新たな変位の統計的な類似点と相違点を議論している。このことから、持続確率を用いることによって、平均自乗変位には現れないせん断流の効果を明らかにした。

第 4 章では振動するひずみを印加したときのブラウン運動を観察している。第 2 章では、せん断を印加することでせん断流れとブラウン運動による拡散の効果の結合によって異常拡散が現れることを示したが、振動するひずみの場合でも拡散への影響が期待できる。振動ひずみを印加したときのブラウン運動をランジュバン方程式をもとに調べ、流れ方向の位置を振動の周期毎に観測すると、平均自乗変位は時間に比例し、さらにその比例係数 (見かけの拡散定数) が振動ひずみの振幅と位相に依存して変化することを示している。観測された軌跡から平均自乗変位を計算し、見かけの拡散定数のひずみ振幅および位相依存性を求めたところ、理論と良い一致が得られた。このことから、振動流下においてもせん断流れとブラウン運動による拡散の効果の結合によって拡散に異常が現れることを本研究で明らかにしている。

最後に、第 5 章で本研究の成果をまとめる。