

平成22年 3月17日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560070

研究課題名（和文） 強磁場下における移動現象のシミュレーション

研究課題名（英文） Numerical simulation of transport phenomena under the strong magnetic field

研究代表者

平野 博之（HIRANO HIROYUKI）

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：60264115

研究成果の概要（和文）：強磁場下において、円筒容器内に導入された微粒子の挙動を実験と計算により求めて両者を比較検討した。実験には超音波振動子を用いて微粒子にみたてた water mist を発生させて、これを用いた。解析においても、これと対応させるために微粒子の密度を水に等しくした。解析の結果、water mist は磁気力によりその運動を弱められること、そして、その停滞位置が明らかとなった。そしてこれらは実験結果と良く一致することがわかった。

研究成果の概要（英文）：Under the strong magnetic field, the motion of fine particles in a cylinder was numerically studied with the Langevin equation considering the Brownian motion. The computed result was compared with the experimental one. In the experiment, water mist was generated and assumed as a Brownian particle. Accordingly, the density of a fine particle was set to equal to that of water at the numerical study. The experimental results showed that the water mist almost stops at some locations in the magnet at inclined angles, and this agreed well with the numerical results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：移動現象

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎／工学基礎

キーワード：強磁場、ブラウン運動、ランジュバン方程式、計算力学

1. 研究開始当初の背景

日常生活において用いる磁場にくらべて桁違いに強い、いわゆる、強磁場を利用すると、水や空気といった物質までもが磁場の影響を受ける。

こうした強磁場に関する研究は、フランスやオランダといったヨーロッパの国立研究所においてその研究が進んでいる。今から20年ほど前の1991年に、20T（テスラ）程度の強磁場を用いた場合に、カエルやイチゴが

空中を浮遊する写真が Nature 誌に掲載された。これを端とし、その後、種々の強磁場に関わる現象が同誌をはじめ、著名な雑誌に報告されるようになった。

強磁場を利用することで、空気（の中の酸素）や水などといった、身近に存在する様々な物質が力学的に影響を受けることになり、条件によっては、地上においてさえも、擬似的に無重力の状態を再現することが可能となる。

このように強磁場を外力として利用することで、さまざまな工学的な応用が考えられる。

2. 研究の目的

本研究においては、強磁場下にある、微粒子のブラウン運動について、実験と数値シミュレーションの両観点から検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実験

超伝導磁石を用いて、強磁場を印加した。water mist は超音波振動子によって発生させてこれを用いた。磁場強度は 10 T (Tesla = $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$) とした。実験装置概要を図 1 に示した。

なお、図中の円筒容器を傾けることで、傾斜角度の影響についても検討した。

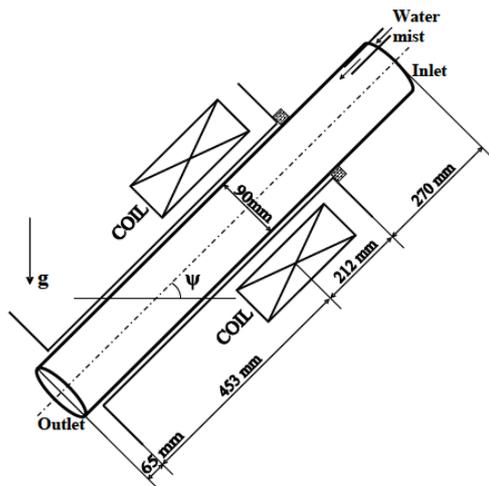


図 1 : 実験装置概要

(2) 数値計算方法

実験において発生させて用いた water mist を顕微鏡にて観察したところ、これらはほぼ直径 d が約 $3 \mu\text{m}$ 程度の球形粒子としてみなせることを確認できた。

大気圧下において、空気の平均分子自由行程 λ は約 $0.07 \mu\text{m}$ 程度である。したがって、 $\text{Kn} = \lambda/d$ で定義される Knudsen (クヌーセン) 数とよばれる無次元数は 0.23 となる。この無次元数は、注目している粒子の周囲に対する不連続性を表すもので、この値が小さいほど連続性が満たされていることを意味する。

一般に連続性と不連続性の境界は、この値が 0.1 から 1 の範囲にあるとされる。したがって、本研究で用いた条件においては、不連続性を考慮する必要があるといえる。

以上より、本研究において用いた water mist は、空気中において不連続性を考慮する必要があると考えられるため、ランダムな外力、すなわち、空気を構成する分子とのランダムな衝突を考慮して、いわゆる、ブラウン運動を表現することが可能な、ランジュバン方程式を基礎方程式として採用し、外力項にさらに磁気力を考慮して解析を行った。

一般的なランジュバン方程式は以下のよう表せる。

$$du_i/dt + \beta u_i = (a(t)_i + F_i)/m$$

ここに、 u は粒子の速度、 t は時間、 β は流体との抗力係数、 $a(t)$ はランダム力であり時間の関数、 F は磁気力を含むランダム力以外の外力、 m は粒子質量である。また、添え字 i はベクトルの成分である。

以上をもとに、強磁場下における微粒子の数値計算を行った。なお、これ以上の詳細は発表論文①を参照。

4. 研究成果

(1) ランジュバン方程式の解法

解析を行うにあたり、まず、ランジュバン方程式の精度の検証をおこなった。図 2 に、直径約 $0.1 \mu\text{m}$ の水滴が空気中に浮遊し、両端に吸収壁を持つ場合にどのように粒子個数が減少し、その結果、粒子個数濃度分布がどのように変化するかを示した。

図中、丸印が計算結果で、実践が解析解である。時間が進行してゆくにつれ、端の粒子個数が減少し、その影響が徐々に内部に伝わり、全体としての粒子個数濃度が減少してゆく様子がわかる。計算結果と解析結果を比較検討した結果、両者は定性的にも定量的にも良い一致を示していることがわかった。

これにより、本研究において作成した、ブラウン運動を考慮した微粒子の運動解析プログラムは妥当であり、解析解をよく表していることがわかった。

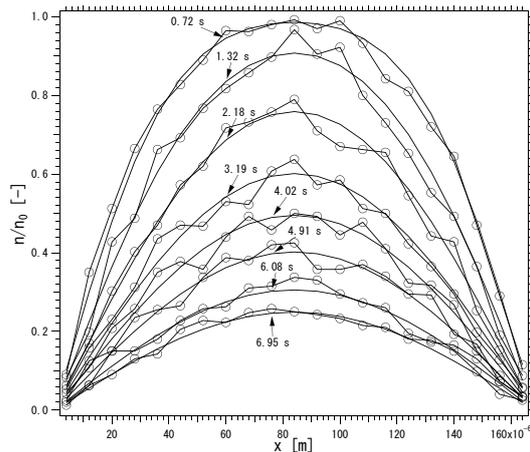


図2 1次元ブラウン拡散の数値解析例
縦軸は時刻 t における粒子個数濃度 n を初期個数濃度 n_0 で割った無次元個数濃度。初期は全てのセルにて無次元個数濃度が $1(n/n_0 = 1)$ であり、時間の経過とともに全てのセルにおいて $n/n_0 = 0$ となってゆく。

(2) 強磁場下における微粒子挙動解析

図3に、本研究において得られた結果の一例を示した。図中の容器は、図1に示した実験装置図に対応しており、円筒容器である。解析は3次元にて実施し、 r - z 断面図を上側に、 r - θ 断面を下側に、それぞれ示してある。詳細な結果については発表論文①を参照。

(a)は磁気力の作用しない微粒子の解析結果である。磁気力が作用しない場合、微粒子は重力により徐々に落下するのみである。

これに対し、磁気力が作用するときの計算結果が(b)である。強磁場により、磁性を有する微粒子に磁気力が働き、円筒容器上部に浮遊している様子がわかる。一部は時間の経過とともに容器中心付近を落下してゆくが、 $\tau=15$ (約1372秒)後においても大部分の微粒子は容器中心にとどまったままであることがわかる。

この様子は、実験結果を支持しており、本研究においては、実験と計算との良い一致が得られた。また、この結果から、磁気力を利用することで、磁性微粒子の運動を制御することが可能であることが示唆された。

さらに角度を変えて計算を実施した結果、 $\phi < \pi/6$ の範囲においては、常にある位置に微粒子が停滞し続けることがわかった。この結果についても、実験結果と良い一致を示した。

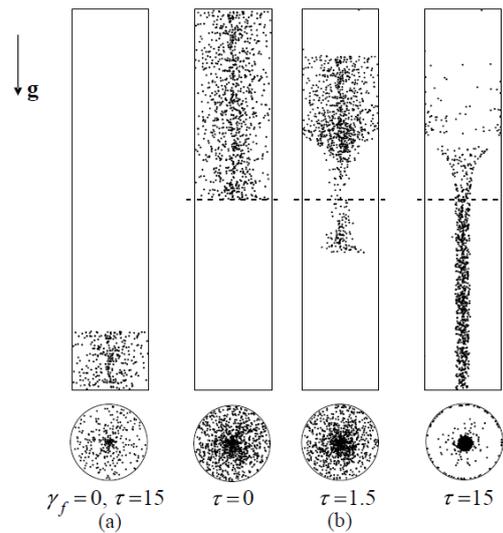


図3：強磁場下において運動する微粒子の挙動の計算結果の例（上側は側面図、下側は上面から下面を見た図）

以上、本研究において、ブラウン運動を考慮した微粒子の運動方程式であるランジュバン方程式の数値解析プログラムの作成および、解析解との比較を行った。両者に良い一致が見られたことを受け、強磁場下にある微粒子の運動を、ランジュバン方程式を用いて解析を行った。解析の結果、磁気力により微粒子の運動が弱められること、そして、それにともない、微粒子がある位置に停滞するという点に関し、実験結果と定性的な一致が見られた。さらに微粒子の停滞位置について詳細に検討した結果、実験結果とよく一致していることがわかった。

本研究成果は、各種の強磁場雰囲気下において、さまざまな要因にて発生する、空気中に浮遊する固形磁性微粒子のみならず、water mistなどの液体微粒子について、その挙動を解析する際に応用可能である。

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5件)

① K. Kuwagi, M. A. Mokhtar, H. Okada, H. Hirano, and T. Takami, “Numerical Experiment of Thermoset Particles in Surface Modification System with Discrete Element Method (Quantization of Cohesive

Force between Particles by Agglomerates Analysis”, Numerical Heat Transfer, Part A, 査読有, 56, pp.647-664, 2009

② Xian Wang, Hiroyuki Hirano, Naotaka Okamoto, “Numerical investigation on the two-phase flow in a Y-shaped micro-channel”, ANZIAM J., 査読有, 48, pp.C963-C976, 2008.

③ Xian WANG, Hiroyuki HIRANO, Toshio TAGAWA and Hiroyuki OZOE, “Water mist flow in a super-conducting magnet inclined at various angles”, Chem. Eng. Comm., 査読有, 194, pp.835-848, 2007

④ Kenya Kuwagi, Hiroyuki Hirano, Toshihiro Takami, “Experimental and numerical study on heat transfer between two spheres”, JP Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, 1(1), pp.49-61, 2007

⑤ Hiroyuki Hirano, Hiroshi Niki, Naotaka Okamoto, “Three-dimensional numerical computation of fluid flow by preconditioning iterative method”, Adv. in Comput. Scie. & Eng., 査読有, 1(2), pp.119-129, 2007.

[図書] (計2件)

① 尾添紘之, 平野博之, 田川俊夫, 黒瀬良一, 桑木賢也, 混相流の数値シミュレーション-分離技術シリーズ13-, 「4.4 ブラウン拡散問題」, 「5.3 マイクロ流路内の二相流動の解析例」, 「6.3 磁場下における微粒子の挙動」分担執筆, pp.98-106, 118-124, 135-139, 分離技術会, 151p, 2009.

② 化学工学会編, 最近の化学工学 59 流動層技術の最近の進展, 「ランジュバン方程式を用いた拡散問題の数値解析」分担執筆, pp.129-136). 化学工業社, 142p, 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 博之 (HIRANO HIROYUKI)
岡山理科大学・工学部・教授
研究者番号：60264115

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：