

論文の内容の要旨

論文題目 ボトルネックを通過する粉体流の理論的研究
(Theoretical investigation of granular flow through a bottleneck)
氏 名 増田 匠

この論文は、「ボトルネックを通過する粉体流の理論的研究」と題し、6章と付録からなっている。

この論文の研究対象は、ボトルネックを通過する粒子群である。代表例は、粉体や人の群衆である。ボトルネックを通過する粒子群特有の現象は、目詰まりである。この性質は様々な社会問題につながる。例えば、粉体の目詰まりは、化学・食品・製薬・農業などの様々な分野における生産プロセスを停止させる恐れがある。また、人の群衆の目詰まりは、災害からの避難の遅延や、大規模なイベントにおける人の移動効率の低下の原因となる。このように、ボトルネックにおける粉体の運動は非常に重要である。しかし、未だに、ボトルネックを通過する粒子群特有の運動を統一系列に説明できる理論はない。

このような背景のもとで、本研究は、粒子群の運動を理論的に取り扱うための指針を提案することを目的としている。そのために、非常に単純なモデルが粒子群の性質の多くを再現することを示し、そのモデルの性質と粒子群の物理的な性質を対応付けた。

第1章は序論であり、先行研究によって発見された粒子群の性質を紹介している。また、本研究の理論的な基礎であるセルオートマトンについて説明している。第2章では二次元の粉体を用いた実験を行っている。この実験によって、目詰まりの発生直前と解消直後の粒子の運動について着想を得た。この発見は次章以降の物理モデルの作成の基礎になる。第3章では一次元セルオートマトンに基づいた非常に単純なモデルを考案した。このモデルは、目詰まりが起こる確率とボトルネックの幅の関係を再現する。目詰まりが起こらないボトルネック幅の存在は、この分野における重要な未解決問題の一つである。モデルはこの問題を否定的に解決した。ただし、実質的には、有限のボトルネック幅でも目詰まりが起こる確率はほぼ0となる。また、モデルの前提について議論の余地がある。第4章では前節と異なるアプローチでモデルを作成した。このモデルは、流出間隔の確率分布を再現する。流出間隔とは、トルネックを連続で流出する二粒子の時間の間隔である。実験によって、流出間隔はべき分布に従うことが確認されていた。

本研究は、流出間隔の分布を初めて理論的に取り扱った。第5章では第4章と第3章で得られた知見を基にして、新しいモデルを作成した。このモデルはボトルネックを通過する粒子群の運動の多くを再現する。再現できた粒子群の各性質を、物理学的な説明とモデルによる解釈の両面から考察した。以上のモデルから、ボトルネックを通過する粒子群の運動をモデル化するための指針を三つ提案した。一つ目は、粒子群の運動の性質はボトルネック近傍のみを着目するだけで説明できること。すなわち、ボトルネックの上流と下流を考慮しなくても多くの性質を説明できる。二つ目は、流出間隔のべき分布を再現する方法の一つは、粒子がボトルネックを通過する確率を離散ロジスティック方程式にしたがって更新すること。三つ目は、粒子は高密度で遅くなること。この原則を取り入れるための有用な方法は、応力の伝搬とエネルギーの減衰を考慮することである。第6章は結論であり、本研究の成果をまとめている。

以上要するに、本論文は、ボトルネックにおける粒子群の流動をモデル化するための指標を提案したものであり、これに従うことによって粒子群の流れ特有の運動を再現できることが実験と理論およびシミュレーションから示されている。この結果は粉粒体の流動に関連した広い分野で応用が期待されている。