

氏 名 きつね ぎき うらべ ち より  
 狐 崎 (占部) 千 由  
 学位(専攻分野) 博 士 (人間・環境学)  
 学位記番号 人 博 第 330 号  
 学位授与の日付 平成 18 年 3 月 23 日  
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当  
 研究科・専攻 人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 人 間 ・ 環 境 学 専 攻  
 学位論文題目 砂山形成過程におけるゆらぎのダイナミクス

(主 査)  
 論文調査委員 教授 富田博之 教授 阪上雅昭 助教授 早川尚男

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、粉体の堆積体である砂山の形成・崩壊過程を、主として計算機シミュレーションを用いて理論的に解析したものである。粉体はミリメートル前後のマクロな微粒子の集合体であり、要素粒子は古典力学に従うが、その内部自由度の多さゆえに集合体としての振舞いは簡単な粒子力学や通常の流体力学を用いて解析することが困難な複雑系であって、時と場合に応じて固体的性質と流体的性質を示す。粉体は自然界のみならず工業的にも多様な場面に登場し、地球科学、化学工学など数多くの分野で研究が行われてきたが、近年、物理学の対象としてその動力的振舞いの原理的解明に力が注がれている。

本論文で扱われているのは、粉体において見られる典型的な自己組織化臨界現象である砂山崩しの動力的解析である。申請者は、臨界状態に達した砂山に絶え間なく粒子供給を行うことにより間歇的に発生する雪崩現象に対して、これと密接な相関を有すると推測される砂山の頂点移動の時系列に着目し、現実的なモデルを用いた計算機シミュレーションにおいて、砂山の規模、粒子供給の頻度などの条件を様々に変えることにより、頂点移動の時系列のパワースペクトルを克明に解析した。

第 1 章においては、まず粉体系に対して物理学的視点から取り組まれてきた諸研究と、特に砂山の雪崩現象に関する実験的・理論的研究の現状と課題をまとめている。中でも、人工的な数理モデルを用いた先駆的な研究において示唆されていた雪崩時系列パワースペクトルの  $1/f$  則が、より現実的な砂山モデルで実現されるかどうかを確認することが重要な課題であるとして、本研究の目的を位置づけるとともに、雪崩現象の解析において頂点移動の時系列に着目した本研究の独創性を主張している。

第 2 章では、2 次元的な砂山を対象としている。マクロな要素微粒子の内部自由度の効果を取り入れるため、モデルとして各微粒子に弾性、粘性、および表面摩擦を設定し、さらに格子構造の形成を避けるためと現実に近い系を用意するために、適度な粒径分布を採用し、離散要素法を用いて計算機シミュレーションを行っている。砂山の頂点移動の時系列を数値的に解析した結果、(1)そのパワースペクトルが、周波数  $f$  に対して  $1/f^\alpha$  の形のべき則に従うこと、(2)粒子の供給間隔が短い場合には  $\alpha \approx 1$  となること、(3)供給間隔の中間的な広い範囲で  $\alpha \approx 1.4$  となること、(4)さらに大きな供給間隔では  $\alpha \rightarrow 2$  に漸近する様子が見られること、などを見出した。その解釈として、少なくとも  $\alpha \approx 1$  の場合に関しては、雪崩が起きる方向を 2 値化した時系列においても同様の  $1/f$  則が現れること、さらにその時系列が左右各方に滞在する持続時間(待ち時間)  $\tau$  の分布が  $1/\tau^2$  則に従うことを確認し、雪崩が無相関に起きることがその理由であると論じている。このことに関しては、2 値化された時系列のパワースペクトルと待ち時間分布の間の普遍的な関係を、付録 A において理論的に導き、砂山崩しにおいて後者も同等な観測量となり得ることを提案している。さらに、雪崩現象を直接的に表現すると考えられる運動エネルギーの流れの時系列をも解析し、頂点移動の時系列との間の相関を調べることにより、本研究で頂点移動の観測に着目したことの根拠づけを行っている。

第3章では、2次元で導入したモデルを3次元に拡張している。その結果、粒子の供給間隔の変化による頂点移動のパワースペクトルの指数 $\alpha$ の変化特性は、ほぼ次元によらず共通していることを確認した。3次元では、雪崩の方向を2値化することはできないことから、頂点位置の極座標表示による角度変化の時系列を用いてパワースペクトルを解析し、雪崩を特徴づける運動量の角度座標の時系列パワースペクトルとほぼ同じ法則に従うことを見出している。

第4章では、本研究で得られた結果のまとめを行っている。本研究の第一の成果は、雪崩時系列パワースペクトルの $1/f$ 則が、現実的な砂山モデルにおいて、ある条件下で確かに実現されることを示すとともに、それが無相関の待ち時間分布をもつ時系列に起因することを確認したことである。第二の成果は、パワースペクトルのべき指数が粒子供給率に依存することを明らかにしたことである。

## 論文審査の結果の要旨

本申請論文は、粉体の動力学の統計物理学的研究に関するものである。砂を例に取るまでもなく、粉体は日常的にありふれた物質である。粉体を扱う学問分野は、土壌学、薬学、地盤工学、化学工学、都市工学、機械工学、流体工学、地球科学等多岐にわたっており、砂丘による平地の浸食や地震による地盤の流動化現象など、環境と深く関わった学際分野になっている。

粉体は一粒がミリメートル前後のマクロな大きさを持ち、熱的な効果は殆ど効かないと考えられている。その主たる相互作用は粒子間斥力であり、また要素粒子の内部自由度の多さ故に、衝突等の粒子間接触において重心運動のエネルギーが保存しないなど、簡単な粒子力学的解析を許さない。粉体を解析する手法は、古典力学や連続体力学など物理学に基礎を置くものが多く、これらの諸分野を束ねる共通の方法論として非線形物理学や計算機科学の重要性は古くから意識されていた。

こうした背景のもとに、近年、粉体を物理学の視点により正面から取り上げる研究が展開されてきている。その端緒の一つとして、Bak等による人工的な数理モデルを用いた研究があげられる。粉体の堆積体である砂山崩しが自己組織化臨界現象として間歇的に発生し、雪崩のサイズ分布や頻度のパワースペクトルが $1/f$ 則に従うのではないかという指摘が行われていた。しかしながら、その後の検証実験を通して現実の砂山崩しは簡単な数理モデルで記述できるようなものではなく、粉体系の本質はより複雑であり、安易な接近を許すものではないことが明らかにされたことが、多くの物理学者にとって粉体研究を開始する動機となっている。

先駆的研究の欠点は、用いられたモデルが現実の砂山と対応していない点にあった。物理学の分野で粉体研究が盛んに行われるようになってからは、多様な興味ある現象が次々に明らかになり、当初に強調されていた $1/f$ 型スペクトルの重要性や砂山の雪崩現象そのものの研究すら忘れられがちであり、初期の否定的検証を除くと、砂山崩しのパワースペクトルの実験的、理論的研究は殆ど行われてこなかった。一方で防災の立場からは、砂山に限らず斜面上で雪崩がどのようなメカニズムで起き、それをどのように防ぐかという点は依然として重要であり、盛んに研究され続けている。したがって、当初に着目された雪崩のパワースペクトル、すなわち雪崩発生時間相関に着目して現実的な砂山を解析することは、工学的立場と理学的立場を融合した環境科学として重要な課題になっている。

申請者は、物理学者が粉体研究に取り組む原点であった砂山崩しの問題に立ち帰り、構成粒子の弾性、粘性、表面摩擦等を設定した、より現実的な砂山モデルを用いた計算機シミュレーションに取り組み、雪崩と深い関わりをもつ頂点移動の時系列データのパワースペクトルを数値的に調べることを目論んだ。その結果、パワースペクトルが $1/f^\alpha$ という振動数分布則に従い、ある条件下では $\alpha \approx 1$ となるが、 $\alpha$ は粒子の供給間隔に依存することなどを明らかにしている。この発見は、砂山崩しが自己組織化臨界現象であるという理解が現実的な系でも有効であることを示唆した点で重要であり、また粒子の供給間隔に依存して指数 $\alpha$ が変化するという事実とあわせて、臨界状態にある砂山で起きる雪崩現象の統計的性質を明確にした研究であると位置づけることができる。

本論文で用いた手法は、粉体のシミュレーションで標準的な離散要素法である。この手法は多くの検証テストから信頼度の高いものとして確立しており、本論文で報告されているシミュレーションは堅実な数値実験と位置づけることができる。また2次元系のみならず3次元系においても数値実験を行っており、実際の実験との比較が可能なものとなっている。したがって申請者の得た数値実験結果は、将来の砂山研究や地滑り等の防災面で重要性をもつ可能性を有しており、基礎科学の

立場から自然環境の諸問題を探求する人間・環境学研究科自然環境論講座の研究としてふさわしいものとなっている。また本論文においては、本研究の物理学的な背景や研究成果の的確な位置づけのみならず、関連分野に対する学際的で十分な理解度が示されている。

申請者は、本論文の主たる部分である第2章を単著論文として学会英文誌に投稿し、既に刊行している。また海外の国際会議等でも発表を行い、その研究成果は注目を集めている。さらに第3章についても、英文誌に投稿する準備を進めている。

よって本論文は、博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年2月3日に論文内容とそれに関する試問を行った結果、合格と認めた。