

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )	氏名	新屋啓文
学位授与の要件	学位規則第4条第①・2項該当		
論文題目			
<p>Theoretical study for morphodynamics of sand dunes and snow avalanches regulated by aeolian process in surface layer  (地表層内の風成作用によって制御される砂丘と雪崩の動力学に関する理論的研究)</p>			
論文審査担当者			
	主 査	教 授	西 森 拓
	審査委員	教 授	小 林 亮
	審査委員	教 授	中 田 聡
	審査委員	教 授	西 村 浩一 (名古屋大学大学院環境学研究科)
	審査委員	准教授	栗 津 暁紀
〔論文審査の要旨〕			
<p>粉体と流体の混合系が生み出す特徴的な空間パターンやダイナミクスは、砂丘、河川、クレーターなど、地球表面や地球外惑星表面における様々な地形の形成の他、水中の微小生物の集団運動にいたるまで、様々なスケールおよび様相を呈する。しかしながら、粉体と流体のダイナミクスを統一的に扱う基礎方程式は確立されておらず、これらの系の理論的解明は、いまだ発展の途上にある。</p> <p>本論文において著者は、粉体と流体の混合系のダイナミクスの中でも、巨視的なスケールを有する自然現象の典型例として、粉体状地形のダイナミクス、とりわけ、砂丘や雪崩のダイナミクスを理論的に取り扱うための新たな理論的手法を提案した。著者は、砂丘と雪崩それぞれの現象に対して、異なる粗視化レベルの数理モデルを構成し、ダイナミクスの特徴を再現し、かつ、複雑なダイナミクスに潜む基本的な機構の解明を試みた。</p> <p>論文は全4部9章から構成される。第1部では、流体・粉体混合系のダイナミクスに対する基礎研究、とくに、砂丘と雪崩のダイナミクスについて、現時点までの理論的研究の進展が過不足なくまとめられ、当研究分野を概観できる。第2部では、3種類の典型的な砂丘形状の安定性や、風の強さ等の環境パラメータに応じた安定形状間の転移機構について、巨視的な視点から独自の数理モデル「dune skeleton model (砂丘骨格モデル)」を構築し、現象の再現と、その背後にある機構を理論的に説明することに成功した。第3部では、雪崩の運動形態の再現や詳細な内部構造について、雪崩を構成する雪の小塊群を粉体粒子群と見なして粉体ダイナミクスによる数理モデルを構成した。このモデルでは、粉体粒子間の近接的相互作用だけでなく、雪崩に取り込まれた空気(流体)を介した粉体粒子間の非近接相互作用も考慮し、それによって、雪崩現象の重要な特徴を定性的に再現し、かつ、雪崩進行方向最前面部の形状に関するスケールリング則を見いだした。第4部では、本論文で得られた結果全体について考察が行われ、今後への展望が記されている。以下、第2部、第3部そ</p>			

れぞれについて、より詳細に述べる。

第2部の砂丘のダイナミクスに関して、著者はまず、「一方向風下で生成される孤立砂丘の風上側、風下側それぞれの斜面は、砂丘のサイズによらず、おおよそ一定の角度を保つ」という定性的な観測事実に着目した。このことは、砂丘の形状が、風向と平行な無限個の相似三角形の断面の集合で近似できることを意味する。著者は、十分多数(N個)の相似三角形の断面集合として砂丘形状をモデル化した。また、相似な各断面の空間的拡がり、2つの変数(断面の頂点の高さ、頂点の風向き方向の座標)のみで完全に表されるため、N個の相似断面集合のダイナミクスは、 $2N$ 次元の力学系として表現される。著者は、各断面内のダイナミクスに関して観測事実と砂の局所保存則に照らし合わせた運動ルールを導入し、並行して、隣接断面間の相互作用を砂の拡散として表現し、これらを組み合わせることで砂丘のダイナミクスに関する $2N$ 次元力学系モデル(Dune Skeleton Model--砂丘骨格モデル)を構成した。さらに、この砂丘骨格モデルに基づく計算機実験を実行することで、一方向風のもとで生成される砂丘の典型的形状をすべて再現することに成功した。同時に、計算機実験によって再現された砂丘形状と、風の強さ、砂量の多さなどの環境パラメータとの関係を表現する相図作成を行い、観測によって得られている知見と一致を見た。次に、砂丘骨格モデルを構成する断面数Nを2まで減らすことで、砂丘骨格モデルを4次元力学系モデルとして表現し、保存則と対称性によりモデルの次元をさらに2まで下げることで、数理的な解析を実行し、環境パラメータ変化による安定砂丘形状間の転移を低次元力学系における分岐現象として説明することに成功した。

第3部の雪崩のダイナミクスに関して、著者は、「雪崩を構成する雪塊群は、粉体粒子群と見なせる」と仮定し、近接相互作用をする粉体粒子系の計算モデルとして知られている離散要素法を雪崩の計算モデルの一部として取り入れた。同時に、雪崩の内部では空気を介した、粒子(雪塊)間の非近接的相互作用も系のダイナミクスに大きく寄与すると考え、これら2種の相互作用に、重力やエネルギー散逸の効果を組み合わせ、複合型雪崩モデルを提案した。その後、当モデルに対する計算機実験を実行することで、雪崩の観測や縮小実験で知られている、i)突起状の雪崩先端形状の再現、および、ii)雪崩の進行方向先端部の渦を伴った厚みのある「頭部構造」と、後方の平坦な「尾部構造」の再現、に成功し、さらに、i)に記した突起形状の幅を支配するスケーリング則を見いだした。

本論文で得られた研究内容は、従来と大きく異なる理論手法により、砂丘や雪崩のダイナミクスの研究に新たな局面を切り拓くものである。また、本手法の開発は、砂丘や雪崩のダイナミクスの研究のみならず、粉体と流体混合系の物理学一般の進展にも一定の貢献をするものと見なせる。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士(理学)の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

#### 公表論文

- 1 Stability of transverse dunes against perturbations: a theoretical study using dune skeleton model, Hirofumi Niiya, Akinori Awazu, and Hiraku Nishimori, *Aeolian Research*, Vol. **9**(2013)63-68.
2. Bifurcation Analysis of the Transition of Dune Shapes under a Unidirectional Wind, Hirofumi Niiya, Akinori Awazu, and Hiraku Nishimori, *Physical Review Letters*, Vol. **108**(2012)158001.
3. Pattern formation of granular avalanches simulated by particle method with hydrodynamics interaction, Hirofumi. Niiya, Akinori Awazu, and Hiraku Nishimori, *Proceedings of the 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, (2012)FS08-13.
4. Three-Dimensional Dune Skeleton Model as a Coupled Dynamical System of Two-Dimensional Cross Sections'', Hirofumi Niiya, Akinori Awazu, and Hiraku Nishimori, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. **79**(2010)063002.

#### 参考論文

1. Sand dunes as migrating strings, Lucie Guignier, Hirofumi Niiya, Hiraku Nishimori, Dimitri Lague, and Alexandre Valance, *Physical Review E*, Vol. **87**(2013)052206.
2. Erratum: Hirofumi Niiya, Akinori Awazu, and Hiraku Nishimori, (Three-Dimensional Dune Skeleton Model as a Coupled Dynamical System of Two-Dimensional Cross Sections, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. **79**(2010) 063002 に対する Erratum) *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. **80**(2011)078001.
3. 流体力学的相互作用を組み込んだ粒子法による粉体なだれのパターン形成, 新屋 啓文, 栗津 暁紀, 西森 拓, 第17回交通流数理研究会講演概要, (2011)73-76.
4. 砂丘骨格モデルによる定常バルハンの形成とスケーリング, 新屋 啓文, 栗津 暁紀, 西森 拓, 第16回交通流数理研究会講演概要集, (2010)9-12.
5. 結合断面モデルによる3次元砂丘の形状とダイナミクス, 新屋 啓文, 西森 拓, 栗津 暁紀, 第15回交通流数理研究会講演概要集, (2009)53-56.