

平成 30 年 4 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13861

研究課題名(和文)濡れた粉体における穴構造の安定性とカニの巣穴強度理解への応用

研究課題名(英文)Stability of a void structure in wet granular layer and its application to crab burrow strength

研究代表者

桂木 洋光(Katsuragi, Hiroaki)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：30346853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：砂浜に生息するスナガニは適度に湿り気のある領域に直径数cm程度の巣穴を作る。このスナガニの巣穴を構成する砂地は物理的には濡れた粉体とみなすことができる。スナガニの巣穴の分布やサイズを決定する因子として濡れた粉体層中の空隙構造の安定性という要素が考えられることになる。本研究ではスナガニ巣穴の空間分布・サイズ分布と濡れた粉体層中のトンネル構造の力学特性との関係を定量的に明らかにするため、実験およびフィールド調査を行った。実験とフィールド調査の結果より、スナガニの巣穴が力学的に十分安定な構造を持つように作られていることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Ghost crabs make cm-scale-diameter burrows on appropriately wet sandy substrate. Physically, such a sandy substrate can be regarded as wet granular matter. Thus, the size and distribution of crab burrows might be governed by the stability of a void structure in wet granular layer. In this study, we performed the experiment and field work to quantitatively reveal the relation among the mechanical properties of tunnel structure in wet granular layer, spatial distribution of crab burrows, and their size distribution. From the obtained results, we found that the actual crab burrows are sufficiently stable in terms of wet granular mechanics.

研究分野：ソフトマター物理

キーワード：粉体物理 巣穴 生態

## 1. 研究開始当初の背景

砂山にトンネルを作るためには適度な湿り気が必要であるということは、誰もが幼い頃に砂場遊びの中で学ぶ。乾燥した砂ではトンネルはおろか壁のような構造の自立すら難しい。しかし、水を含む濡れた砂は水の持つ表面張力の効果により強度を獲得する。この効果を定量的に明らかにするためには、いわゆる濡れた粉体の力学的性質を正確に把握する必要がある。しかし、濡れた粉体は含水率のわずかな違いで大きくその挙動を変化させることもあり[1]、その理解は十分に進んでいない。

一方、海辺を散歩すると自然界には濡れた粉体の強度を利用している生物がいることに気がつく。砂浜に生息するカニやエビの仲間は、外敵からの攻撃を避けるために、砂浜に巣穴（トンネル構造）を作る（図1）。この巣穴はある程度の強度を持って安定的に存在しており、その表面にはカニのハサミや足で付けたと思われるテクスチャも見られる[2]。また、トンネル構造の安定化のために巣穴壁を押し固めているような場合もある。しかし、その強度や安定化の秘訣についての定量的説明はこれまで試みられてこなかった。

濡れた粉体層中のトンネルや空隙構造の安定性等に関する物理的観点からの研究やその結果を実際のスナガニ巣穴の諸特性と比較するような研究はこれまで全く取り組まれていなかった。



図1：砂浜に見られるスナガニ巣穴の入り口

## 2. 研究の目的

以上のような背景を受け、本研究では濡れた粉体層中のトンネル構造の安定性や力学特性を実験的に明らかにし、得られた結果を実際の砂浜のスナガニ巣穴についてのフィールド調査の結果と比較することとした。実験とフィールド調査の比較から、スナガニ巣穴が濡れた粉体の力学特性にどれだけ制約を受けているかを明らかにすることが目標となる。以下に、実験およびフィールド調査のそれぞれの目的を概説する。

### 2-1. 実験の目的

濡れた粉体層中に穴（トンネル）構造を作り、穴に外力を加えた際の変形と力学的応答を実験的に計測することにより、濡れた粉体

系の力学特性解明を目指す。濡れた粉体の力学特性は含水率などのパラメータに非線形的に依存し複雑な挙動を示すため、その理解は必ずしも十分に進んでいない。本研究では、トンネル工学のモデル等を用いながら、濡れた粉体の力学特性を特徴付ける新たな実験を行い、実験データに基づいて濡れた粉体の力学特性の理解を深めることを目指す。また、トンネル構造に外力を加えた際の変形様式がどのような実験パラメータに主に依存するのかについても実験的に明らかにする。

### 2-2. フィールド調査の目的

実際の砂浜においてスナガニ巣穴の位置およびサイズの分布を系統的に調査し、同時に、砂地の含水率等の条件を調べる。得られた巣穴と砂地の情報を実験の結果と比較することにより、スナガニの巣穴が力学的にどのような状態にある濡れた粉体層に形成されているのかについて明らかにする。これらの知見を深めることにより「化石中に見つかる巣穴痕の状態からの古環境を推定する」というようなより古生物学的な応用のための基礎データを物理的側面から提供することも目指す。

## 3. 研究の方法

上記研究目標を達成するために実験およびフィールド調査を行った。それぞれの方法について以下に概説する。

### 3-1. 実験方法

まずは、ガラスビーズもしくは砂粒子と水を含含水率を調整して混合し容器に充填する。容器には予め水平に円形の穴を開けておき、その穴に円柱を差し込んでおいた状態で濡れた粉体を容器に充填率を制御しながら充填する。その後円柱を引き抜くことにより濡れた粉体層中に横穴（トンネル構造）を準備する。次にトンネル構造を含む濡れた粉体層全体を万能試験機により上面から一定速度で圧縮する（図2左）。この時の圧縮速度は慣性の効果などが無視できる程度に十分遅い速度とした。実験中、圧縮に要する外力の大きさと系全体の変形を万能試験機でモニターした。また、穴の変形をCMOSカメラにより撮影し（図2右）、画像解析から穴崩壊の様子を記録した。

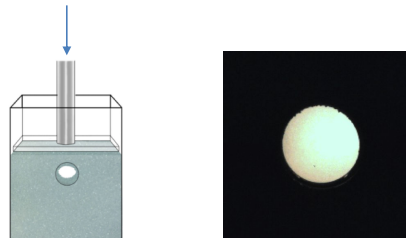


図2：(左) 実験セルと圧縮の概念図。(右) カメラにより取得されたトンネル形状の画像の具体例。

主な実験パラメータは、粒子種類(形状)、粒子粒径、含水率、空隙率、初期穴直径となる。得られる実験データから濡れた粉体中の穴構造の強度や変形様式の物理則を明らかにする。

粉体材料としてはガラスビーズと砂浜の砂を用いた。前者は球形を持ち、天然の巣穴に直接は結びつかないが、多くの粉体物理実験がガラスビーズで行われており、また数値計算も通常球形粒子を(標準粉体材料として)用いることが多いため、それらの先行研究の結果と本研究の結果とを比較するためには好適である。ガラスビーズを用いた実験により、濡れた粉体中のトンネル構造に関する物理としての本質的に重要な部分を明らかにし、砂を用いた実験では、実際の巣穴を模擬することと同時に、濡れた粉体の力学特性が粒子形状にどのように依存するかを確認した。

### 3-2. フィールド調査

フィールド調査により、実際の砂浜で巣穴の空間分布およびサイズ分布を調べた。具体的には、設定した調査領域内に存在する巣穴について汀線からの距離を求め、それぞれの巣穴の入り口直径と鉛直深さを直接計測およびおもりを垂らすことにより調べた。

また、砂浜の粒子充填率および含水率についても汀線からの距離および地表からの深さを変化させながら計測した。地下水位のレベルについても汀線からの距離が異なる複数の地点で計測した。また、一部の巣穴については石膏を流し込むことによりその巣穴の形状の型取りを行った。実際に生息するスナガニの種を同定するために、一部のスナガニの捕獲も行った。調査は、沖縄県の石垣島および三重県津市の砂浜海岸で行った。フィールド調査の項目について図3に示した。

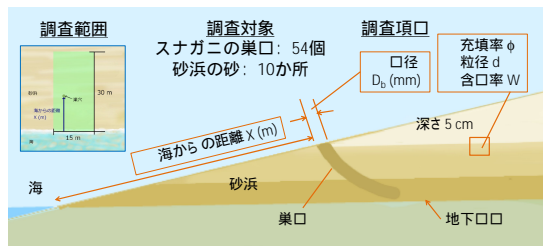


図3：フィールド調査項目

## 4. 研究成果

実験とフィールド調査の結果を総合することにより、トンネル構造の初期安定性、荷重によるトンネルの変形モードの相変化、巣穴の自重による崩壊のリスク、巣穴の空間分布と砂浜含水率の関係、などの項目が明らかとなった。以下に項目毎に得られた結果を概説する。

### 4-1. トンネル構造の初期安定性

まず、ガラスビーズおよび砂を用いてトンネル構造が安定に存在し得る含水率領域に

ついて実験的に調べた。実験の結果、トンネル構造を安定に維持するためには適切な含水率範囲があることが分かり、例えば砂を用いた場合は、含水率(全体積における水の占める体積分率)が0.017から0.39の範囲にある場合にトンネルが安定に維持された。含水率が低すぎる場合は穴を形成することは不可能で、逆に含水率が高すぎる場合も、水の壁面からのしみ出しなどがありトンネル構造を安定に維持することが難しくなることが明らかになった。

### 4-2. トンネルの変形モード

次に安定的に初期トンネル(直径 $D_0$ )が形成される濡れた粉体層を上面から一定速度で圧縮させた。このとき、トンネル構造の変形様式が、粉体粒子の粒径およびトンネルの初期サイズに依存して質的に変化することが新たに分かった。具体的には、粉体粒子粒径もしくはトンネルの初期直径がある閾値を超えた場合に、トンネルは定速圧縮に対してカタストロフィックな崩壊を経験し、それ以外(閾値以下)の場合は横穴(トンネル)が連続的に(徐々に)縮小するということが明らかになった。図4に実際のトンネル構造の変形の具体例を示す。

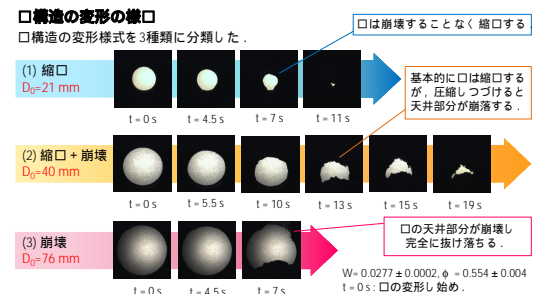


図4：トンネルの定速圧縮による変形の様子。(1)縮小は初期トンネル直径( $D_0$ )が比較的小さい場合の連続的縮小モードを示しており、(2)ではトンネルの収縮中に天井の一部が剥がれて崩壊が起こっている。初期トンネル直径が最も大きい(3)では、穴上部の全体が完全に崩壊する地崩れが起こった。

この連続的収縮と突然の崩壊の境界となる閾値がおおよそ $D_0 = 40$  mmであることが実験の結果から明らかになった。この穴径は実際に砂浜で見られるスナガニの巣穴直径の上限値にほぼ相当している。このことより、カニの巣穴はカタストロフィックな崩壊を避けるようにデザインされていることが示唆された。一方で、この縮小・崩壊の相変化は、粉体層の含水率や空隙率にはほとんど依存しないことも実験の結果から明らかになった。このことは、(実際の海岸の砂浜等でも含水率等は大きく変化する場合もあるが、)砂浜の含水率の多少の変化はは巣穴の強度にあまり影響を与えないことを示していると言える。

### 4-3. 巣穴の自重による崩壊のリスク

続いて、トンネルを圧縮したときにトンネルが変形を始める荷重を穴断面積の収縮速度に閾値を設けることにより求めた。得られた荷重の値をトンネル上部にある砂の自重でおきかえることにより、トンネル構造が変形をし始める深さを見積もった（深いトンネルではトンネル上の砂の自重に耐えられず変形・崩壊が起こることになり、それ以上深い箇所にトンネル構造を作ることが難しくなる）。実験結果より、フィールド調査で得られた条件を考慮すると、直径 30 mm 程度の穴構造は深さ 1 m 程度まで十分安定であることが分かった。一方で、フィールド調査では典型的なスナガニ巣穴の深さは 0.3 m 程度となっており（図 5 右下参照）、実際の巣穴の深さは濡れた粉体の力学的限界のみに制約されているわけではないことが示唆された。今後は、スナガニの生態の詳細を考慮して、どのような理由（制約）でスナガニの巣穴深さが決定されているのかについて更なる検討を進めていくことが重要な課題となる。

### 4-4. 巣穴の空間分布と砂浜含水率

最後に砂浜の含水率と巣穴の空間分布の関係について得られた結果を報告する。図 5 にフィールド調査により得られた、砂浜の含水率と地下水位、巣穴の個数累積分布と深さ分布をそれぞれ汀線からの距離  $X$  の関数として示した。

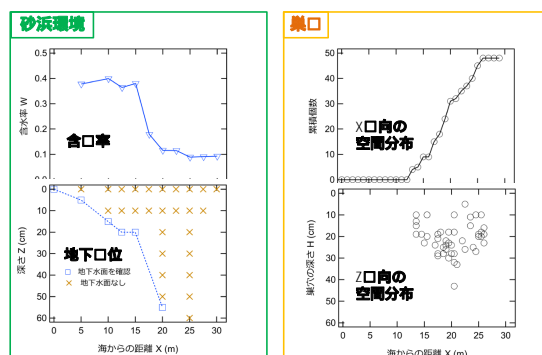


図 5 : (左) 砂浜の含水率と地下水位の汀線からの距離  $X$  依存性。(右) 巣穴の累積個数分布と鉛直深さの空間分布。

図 5 の左より  $X=15$  m の辺りで砂浜の含水率が急激に下がり、地下水位も急激に深くなること分かる。また、図 5 の右より  $X=15$  m の地点辺りから巣穴の数が急激に増加していることがわかる。更に、図 5 左上より、 $X<15$  m の海に近い領域では、含水率が 0.4 あたりまで増加していることがわかる。この値は 4-1 節で報告した安定してトンネル構造が存在し得る含水率範囲の上限 (0.39) とほぼ同等の値となる。すなわち、この領域では安定した巣穴を維持することが難しくなる。一方で、 $X>15$  m の領域では含水率がおよそ 0.1 となり、トンネル構造が十分に維持される範囲

にあることが分かる。以上より、砂浜のスナガニの巣穴の空間分布は、主に砂浜の含水率によって支配されていることが示唆されたと言える。しかし、前述の通り巣穴の深さに関する制約については本研究の中では明らかにすることができなかった。

### 4-5. まとめと今後の課題

本研究ではスナガニ巣穴の空間分布・サイズ分布と濡れた粉体層中のトンネル構造の力学特性との関係を定量的に明らかにするため、実験およびフィールド調査を行った。実験では、含水率が調整された濡れた粉体層中に水平トンネルを作り、粉体層全体に上部から低速圧縮を負荷してトンネルの変形様式を観察した。実験結果より、トンネル構造の初期直径もしくは粉体層を構成する粒子の粒径を大きくするとトンネル構造は不安定になり、わずかな荷重により崩壊することが明らかになった。また、トンネル構造の安定性および力学的強度は濡れた粉体の含水率には敏感に依存せず、適度に濡れてさえいれば力学的特性は大きく変化しないことがわかった。一方、フィールド調査では実際の砂浜でスナガニ巣穴が掘られている位置、巣穴直径、深さ等を計測し、同時に砂浜の含水率等も調査した。フィールド調査で得られた結果と実験の結果とを比較検討することにより、巣穴は穴構造が安定的に存在し得る含水率領域の砂浜に掘られており、そのサイズおよび深さはトンネル構造が十分安定的に存在できる範囲にあることが明らかになった。本研究の結果により、スナガニの生態学的側面の検討を更に進め力学的観点以外からも巣穴の空間分布・サイズ分布を決定する要因について明らかにすることが、今後重要となることが浮き彫りにされた。

また、本研究のフィールド調査では、比較的短時間 (1-2 時間程度) の巣穴の空間分布およびサイズ分布を調べた。しかし、砂浜の環境は潮汐や天候の影響を受けて刻一刻と変化する。本研究ではこれらの要因の影響は考慮されていない。これらの効果の詳細を明らかにすることは今後の重要な課題である。

得られた研究成果は、国内外の学会で発表した。また、研究論文を現在準備中である。

### < 引用文献 >

- [1] S. Herminghaus, Wet granular matter, World Scientific (2013).
- [2] K. Seike and M. Nara, Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 252, 458 (2007).

### 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 0 件)

〔学会発表〕(計5件)

濡れた粉体層における穴構造の荷重による変形様式, 篠田明友子, 藤原慎一, 桂木洋光, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017 年 5 月

濡れた粉体層における穴構造の力学特性, 篠田明友子, 藤原慎一, 桂木洋光, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月

Mechanical characterization of a tunnel in wet granular layer, A. Shinoda, S. Fujiwara, and H. Katsuragi, Granular Matter Gordon Research Conference, 2016 年 7 月

濡れた粉体層における穴構造の力学特性, 篠田明友子, 藤原慎一, 桂木洋光, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月

濡れた粉体層における穴構造の力学特性, 篠田明友子, 藤原慎一, 桂木洋光, 第二回 非線形現象の捉え方, 2016 年 5 月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桂木 洋光 (KATSURAGI, Hiroaki)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授  
研究者番号: 30346853

(2) 研究分担者

藤原 慎一 (FUJIWARA, Shin-ich)  
名古屋大学・博物館・講師  
研究者番号: 30571236

(3) 連携研究者

なし