災害時に恐慌状態の人々が引き起こす二次災害を防ぐ方法の創造 - 生物集団から解き明かす恐慌状態の本質 -

福岡県立筑紫中央高等学校 久保 善嗣

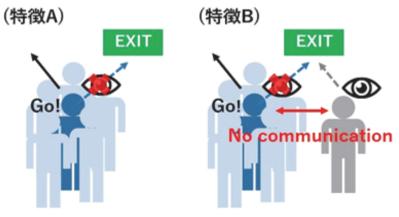
1. はじめに

近年、異常気象や地震などの災害が多発 している。そのような災害に遭遇すると人 は冷静に行動することができない。特に人 口が多い都心部などで同時に多くの人が被 災するとパニックが起きる。パニックを起 こした人々が建物から逃げるために狭い通 路に集中したり避難所に向かうため狭い道 に殺到すると予期せぬ二次災害を生んだり、 短時間で避難できずに被害が大きくなるこ とが予想できる。このような問題が生じる 原因を解明し、災害時に安全で凍やかに避 難できる方法を模索することは非常に重要 だと考える。しかし、実際に災害時と同様 の条件を再現して実験を行うことは現実的 ではない。もし可能でも、場所、人員を考 えると莫大なコストがかかる。そこで、本 研究ではパニックを起こした人のモデルと なるような生物としてゾウリムシを用いた。

ゾウリムシを用いたのは、人に囲まれて目的地の正確な位置がわからない状態で行動する (特徴A)、遠くの人 (数m~数+m)とコミュニケーションを取らずに行動する(特徴B)というパニックを起こした人の特徴 (下図)を再現できると考えたためである。ゾウリムシは目を持っておらず、ゾウリムシは目を持っておらず、ゾウリムシは目を持っておらず、ゾウリムシは目を持っておらず、ゾウリムシに関連やせ、場所を取らないためコストを低く抑えられる利点もある。本研究では実際にゾウリムシの集団を観察し、ゾウリムシの密度、境界条件を変化させた時に起きる移動中の現象を調べた。

2. 実験方法

図1(a)は本研究の実験設定の概要図を表している。スライドガラスの上に濃い青色で描かれているような漏斗状の通路を作り、



パニックを起こした人の特徴

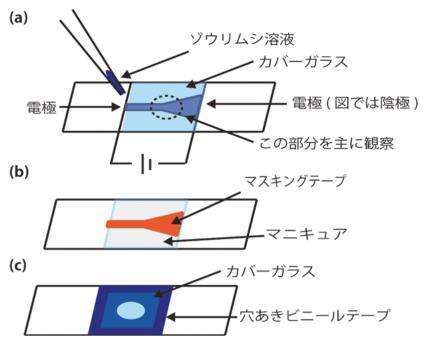


図1 実験設定

- (a) 実験設定の概要図を示している。電源と電極のケーブルをつなぎ替えることで、ゾウリムシの運動をコントロールすることができる。
- (b) 流路の製作方法
- (c) ゾウリムシの個体数を計測するのに用いたプレパラート

その通路をゾウリムシが培養された溶液で 満たし、カバーガラスをのせて、プレパラ ートを作った。通路の両端には電極(炭素 棒)を設置しており、この電極と電源をつ なげることで、通路の両端に電圧を印加す ることができる。ゾウリムシは負の電気走 性を持っているので、図1(a)のように電源 につなぎ、電圧を印加すると陰極側(広い ほう) にゾウリムシが集まってくる。今回 の研究では印加する電圧を5 Vに固定して 配線をつなぎ変えることで、ゾウリムシを 広いほうから狭いほうに誘導する。この時、 図1(a)の点線で囲んだ辺りが混雑するの で、ここを観察する。観察に用いたのは実 体顕微鏡で、顕微鏡カメラを取り付け、解 像度1920×1080、フレームレートは60fpsで 動画を撮影した。次に通路の作り方を説明する。図1 (b)に示すようにスライドガラスの上に作りたい形のマスキングテープを貼る。その周りに均一にマニキュアを塗り、乾かす。乾いた後でマスキングテープを剥がせば流路ができる。また、マニキュアを重ね塗りする回数を変えることで、通路の厚みを定性的に変えることができる。前半に紹介する実験結果は5回重ね塗りをしたものを使用している。

図1(c)はゾウリムシの密度を求めるために用いたプレパラートで、これにゾウリムシの培養液を封入し、顕微鏡観察したものが図2(a)に示されている。今回の研究ではゾウリムシ単体に注目するのではなく、全体の構造に注目するため、低倍率で観察を

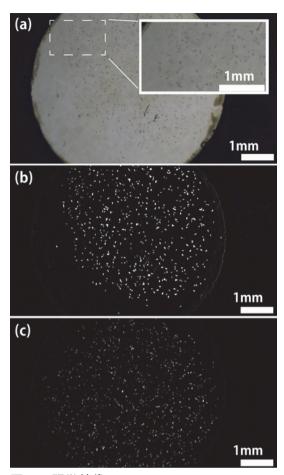


図2 顕微鏡像

(a) (b) は遠心機でゾウリムシを凝縮する前(c) は濃縮後の画像。(b) (c) は画像処理によってゾウリムシのみを白く映したもの。

行っている。図2(b)は図2(a)を画像処理したものを示している。方法は各ピクセルの輝度の時間平均を求めそれを背景とし、それを反転させたものをもとの動画に加えることで、ゾウリムシのみを白色で映している。画像処理にはImageJ(https://imagej.nih.gov/ij)というフリーソフトを用いている。同ソフトを使って、ゾウリムシの個体数をカウントし、封入した溶液の体積からゾウリムシの密度を求めている。図2(b)の画像から培養液中のゾウリムシの密度は1.0×10⁴

個/mlであることがわかった。図 2 (c) はゾウリムシの培養液を濃縮したものを封入した時の顕微鏡像を画像処理したものを示している。10mlのゾウリムシ培養液を2000rpmで4分間、遠心機にかけ、上澄みを取り除き1mlにすることで濃縮している。濃縮後のゾウリムシの密度は1.5×10⁴個/mlであることがわかった。

3. 実験結果

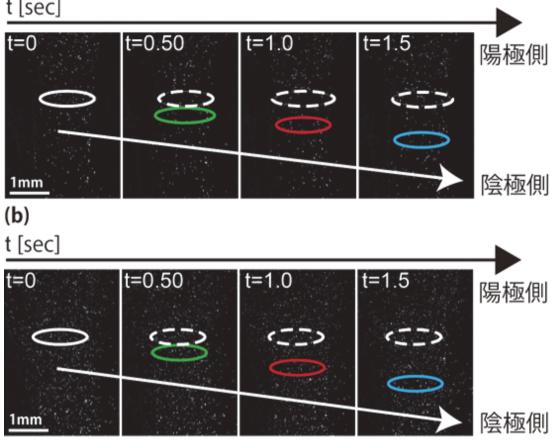
次に図1(a)の電極付きプレパラートを使った実験結果を紹介する。図3(a)は濃縮していないゾウリムシの培養液で、図3(b)は濃縮したゾウリムシの培養液を用いた実験結果を示している。まず、ゾウリムシを超落の広いほうに集めておき、配線を切り替えて、通路の狭いほうに誘導した。図3は狭い通路に殺到したゾウリムシの様子を0.5秒ごとに示している。時刻t=0秒の時に白丸で囲まれたゾウリムシの集団が0.5秒たつごとに緑、赤、青の位置に移動しているのが、動画をコマ送りして解析することでわかった。図からもわかるようにゾウリムシの密度が上がり、混雑度が増しても、移動速度に大きな差がないことがわかった。

この結果はゾウリムシが混雑のモデル生物として扱えることを否定しているように思える。しかし、あることを考慮すれば、ゾウリムシを混雑のモデル生物として扱えることがわかった。詳しくは考察で述べるが、考慮すべきことは運動している空間の次元である。ゾウリムシは3次元空間を泳いでおり、人間、車などは2次元面内で運動している。この次元をそろえることで、混雑の影響をゾウリムシの集団が受けるのではないかと考え、実験を行った。

具体的には通路の厚さを変え、ゾウリムシの3次元的運動を抑制した。通路の厚さ

(a)

t [sec]



ゾウリムシの集団の移動

(a) 濃縮前 (b) 濃縮後 濃縮前と後で移動速度に大きな変化はなかった。

は前述のとおりマニキュアを重ね塗りする 回数で、定性的に変化させた。

実験結果は図4に示す通りで、細くなっ た通路付近の画像を PIV という手法を用いて 解析した。PIV とは「Particle Image Velocimetry (粒子画像流速計)」の略で、気体や流体な ど、通常、目で見る事のできない流体の速 度をトレーサー粒子の動きを追うことで、 求める手法である。具体的には、ある短い 時間間隔で連続撮影した2枚の画像を比較 することで、流れの速度を求める。今回は ゾウリムシをトレーサー粒子に見立てて、 図4(a)(b)のような細くなった通路での速

度のベクトル場を求めている。図の矢印は ゾウリムシの運動の方向、色が明るいほど 大きな速度を持っていることを示している。 図4(a)はマニキュアを4回重ね塗りした時 の結果で、ゾウリムシが陰極側に大きな速 度を持って運動している様子がわかる。一 方、図4(b)はマニキュアを2回重ね塗りし た時の結果で、混雑の影響を受け、ほとん ど通路に侵入できていない様子がわかる。 定性的ではあるが、以上の結果から2次元 面内で運動するゾウリムシは混雑の影響を 受け、通路での停滞などパニックを起こし た人々と似た振る舞いをすることがわかった。

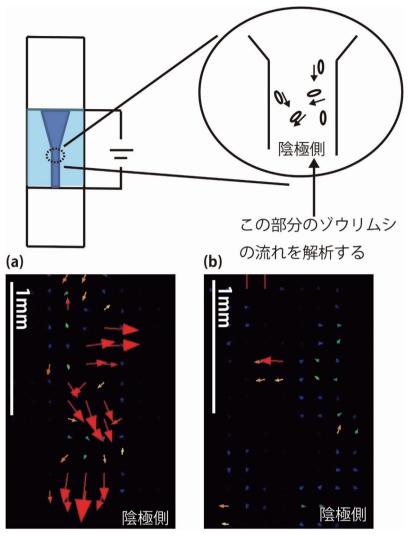


図4 通路でのゾウリムシの流れの解析

- (a) 通路が厚い時 (3次元的運動)
- (b) 通路が薄い時(2次元的運動)

4. 考察

グウリムシが通路の厚みがある程度以上あり、3次元的運動が行える時、混雑の影響を受けにくい理由を考察する。物体同士が衝突するということは、ゾウリムシの体積を考えなければ、物体同士の軌跡が交点を持つと言い換えることができる。混雑時にはなるべく衝突回数を減らす方向に系全体が動くと予想できる。つまり、それぞれ

のゾウリムシの運動の軌跡が互いの交点を減らすように時間発展する。この時、考えられるゾウリムシの軌跡は図5に示すように互いに平行になるか、中心が同一で違う半径を持つ物が考えられる。一方、同様のことを3次元で考えてみる。3次元では上述の方法に加え、ねじれの位置を取る方法が考えられる。つまり、2次元に比べ3次元では無数の交わらない軌跡を描くことが

2 次元面内での運動

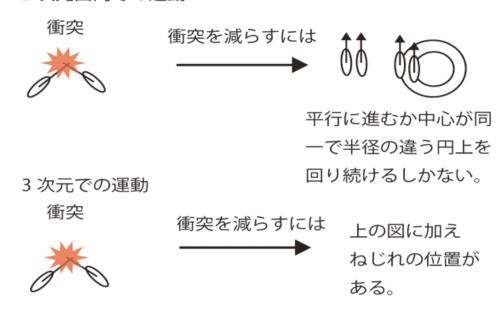


図5 ゾウリムシの運動の模式図

できる。これを実験に当てはめてみると、 3次元ではゾウリムシの濃度が高くなって も混雑の影響(ゾウリムシ同士の衝突)を 受けないゾウリムシの進み方が存在するこ とになる。以上の考察から3次元空間内で 運動する物体、生物は混雑の影響を受けに くいことが考えられる。

今回、考察した内容を補強するためにいくつかの定量的な実験を行わなければならない。具体的にはパラメーターとして、厚さ h をある値から小さくしていき、どのような値の時に図4(a)に見られるような混雑の影響を受けない運動から図4(b)に見られる混雑の影響を受ける運動に変わるかを調べないといけない。この臨界点 h。を求め、その値がゾウリムシの大きさに比べてどの程度かを調べることで、今回、行った考察の内容を補強できると考える。

5. まとめ・展望

パニックを起こした人のモデルとなるような生物としてゾウリムシを用い、ゾウリムシの集団を観察し、ゾウリムシの密度、境界条件を変化させた時に起きる移動中の現象を調べた。研究を行っていく中で、ゾウリムシをモデル生物として扱うためには3次元的な運動を抑制し、2次元面内で運動させる必要があることがわかった。ここから得られる知見は混雑の影響を受けずに集団が移動するには3次元的な運動が理想的であるというものである。

本研究を発展させるのには直接関係ないが、ここで得られた知見について言及しておく。近年、ドローンを用いた流通についての研究が盛んに行われている。ドローンでの運搬は離島など海路しか運搬経路がなく、迅速に物を運ぶのが困難な地域での活躍が期待されている。ここでは、ドローン

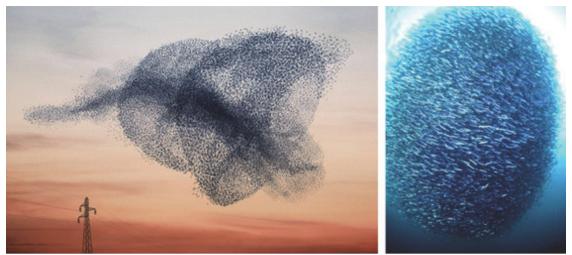


写真 1 左:ムクドリの群れの様子 右:イワシの群れの様子(写真は画像検索したものを 用いています。検索 URL は別記)

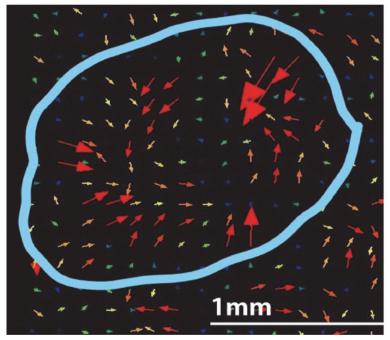


図6 混雑時に現れる特徴的な流れ

での運搬を陸路、海路での運搬と同列、または延長のように捉えているように思える。 しかし、今回、得られた知見を使えば別の 視点からドローンでの運搬を考えることが できる。既存の運搬方法は車、トラック、 船など2次元面内で動く乗り物によって行 われている。この時、乗り物の台数が増え 混雑した状況になると影響を大きく受け、 渋滞、事故などの現象が起き、運搬を定常 的に行うことができなくなる。しかし3次 元的な運動が可能なドローンは混雑の影響 を受けにくく、集団で大量の物を運ぶ際に、 渋滞、事故などの現象が起きにくいと考え られる。このように、ドローンの大規模輸 送が可能になれば流通の概念が変わるかも しれない。また、自然界におけるムクドリ やイワシの群れに注目してみるのも面白い。 写真1のように多くのムクドリやイワシが 群れとなり、まるで一つの生き物のように 振舞っている。密度的には明らかに混雑し ており、激しい衝突を繰り返しそうである が、そのようなこともなく、集団で行動し ている。このような生物の集団運動につい ての研究は盛んに行われているが、今回、 得られた知見がこの分野の発展に活かせる ことを期待する。さらに抽象化してみる。 今回の研究で対象にしているのは混雑時に 起きる現象だが、集団を構成する一つの物 体を一つの要素、衝突などを相互作用とし て、より一般化すれば、要素数が大きく、 相互作用が複雑な系などの研究にも役立つ と考える。結合振動子系やAIなど様々な技 術でこの研究との類似性が発見されること を期待する。3次元的な運動についてはこ こまでにして、2次元面内での運動の話に 戻る。

いけない。当初は紫外線硬化樹脂を用いて流路を設計することを予定していたが、3Dプリンターの値段も安価になってきているので、3Dプリンターを用いて流路を設計し、定量的に流路の厚みを変え、データを集めていきたい。そのうえで、3次元的な運動が抑制される厚さを求め、混雑時に起きる現象を観察、解析し、移動を阻害する原因を特定する。その原因を解消するような境界条件、設置物を3Dプリンターで作り実験を行う。以上のように研究を進める。

謝辞

この研究を遂行するにあたり、助成をいただいた公益財団法人下中記念財団および 関係者の方々に厚く謝意を表する。

【検索URL】

写真1 左

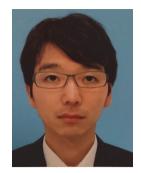
https://www.designboom.com/art/alain-de lorme-captures-the-balletic-murmuration s-of-wild-birds-11-07-2013/

写真1 右

http://www.onsenmaru.com/monthly/M-20 02/M-0207-iwashi.htm

【参考文献】

- (1)鉢山孝彦・小柳光正・嬉 正勝・妹尾圭 司・小泉 修「研究者が教える動物飼育」 第1巻(共立出版) p11~p18 2012年
- (2) 丸岡 禎「教材としての原生動物(3)ゾウ リムシⅡ」(日本原生生物学会『原生動物 学雑誌』第38巻) 2005年
- (3) Vicsek, T, and A. Zafeiris "Collective motion," Phys. Rep. 517, 71-140. Elsevier 2012



久保善嗣先生(くぼよしつぐ)

<略歴>

1989年1月 福岡県生まれ

2011年3月 京都大学理学部 卒業

2016年3月 京都大学大学院 物理学・宇宙

物理学専攻 博士課程修了

2018年4月 福岡県立筑紫中央高等学校 勤

務

<研究成果>

- "Mode bifurcation of a bouncing dumbbell with chirality" PhysRevE. 91. 05290 (2015) Y. KUBO et al.
- "Fluctuations induced transition of localization of granular objects caused by degrees of crowding" Physica D 39-46 (2016) S.ODA, Y.KUBO et al.

<勤務校>

福岡県立筑紫中央高等学校 〒816-0942 福岡県大野城市中央2-12-1 電話 092-581-1470