

テナガエビの化学感覚および動体検知反応

浜松学芸高等学校

サイエンス部 2年 山川美咲 他2名

1. 動機・目的

本校サイエンス部では、テナガエビ *Macrobrachium nipponense* (図1)を飼育している。テナガエビを観察していると、長い触角をしきりに動かしている様子が観察された。さらに、給餌の際、触角を動かした後、探索行動をしながら餌のもとへ接近していた。テナガエビは、幼体から稚エビになるまで海や汽水域で成長した後、川を遡る(嬉 2012)。さらに、テナガエビは夜行性で昼間は底石の下や壁際に潜んでいることが多く、静かに餌を送り込んでやると、日中でも問題なく釣ることができる(嬉 2012)。テナガエビは、釣りや料理などでかなり昔から親しまれている身近な生き物であるが、研究面では生態学分野での研究報告が多く、生理学的、行動学的実験についてはほとんど報告されておらず、実験動物としてあまり用いられていないようである。現時点で、水中におけるテナガエビの嗅覚に着目した研究は全く確認できなかった(嬉 2012)。



図1. 実験に用いたテナガエビ.

エビ、カニ、ロブスター、ザリガニ等の大型の甲殻類生物では、自ら作った流れを使って、化学シグナルを送ったり、化学受容に向かって引き寄せたりする(T. Breithaupt 2011)。これらの甲殻類生物は匂いを辿って餌を探索するときにも、自ら生成した流れを利用しているといわれている(T. Breithaupt 2001)。この甲殻類生物の行動を解明し、その行動を模倣することができれば、環境汚染物質や海底資源や機雷等から漏れ出した化学物質を辿って、発生源を探索するロボットの開発に役立つと期待される(石田 2020)。

海洋環境保護のために、水雷の不発弾に含まれる爆発物や沈没船から漏れ出る残存油などの危険性のある化学物質を海中において探知し、除去することが必要とされている(大橋ほか 2008)。これらの化学物質を人間が水中に潜って探し出すことは困難であり、危険が伴う。そのため、水中に存在する化学物質を自律的に見つけ出して除去するロボットの開発が望まれる(大橋ほか 2008)。アメリカザリガニ *Procambarus clarkia* は、沼のような流れの乏しい環境に適応し、自ら匂いを集めて餌を探索する。口元にある顎脚を振り、左右に噴流(噴き出す流れ)を作り出し、周囲の流体が噴流に巻き込まれ、噴流に向かう流れが誘起され、この流れによって運ばれてきた匂いを検出している(Breithaupt 2011, Denissenko et al. 2007)。

しかし、テナガエビの優れた嗅覚を利用した装置およびシステムはまだ考案されておらず、嗅覚に着目した反応性についてもまったく明らかにされていない。陸上では、トリュフには雄ブタの性フェロモンと同様の物質が含まれていることが確かめられており、ブタがトリュフを簡単に探し当てる(馬場 2021)。また、ブタは元々トリュフが好きなので、齧ったり食べたりするため、フランスでは最近ブタを使わなくなり、訓練されたトリュフ犬が使われている(山中 2015)。しかし、水中ではそのような動物は現時点では存在していない。さらに陸上とは違い、人間が水中で匂いを感じることは非常に困難である。そこで、テナガエビの嗅覚と探索行動に着目し、そのメカニズムを解明すれば、陸上のイヌのような働きを期待することができるのではないかと考えた。

本研究では、テナガエビを利用した水中での能動的な化学サンプリング行動の解明を目的とし、テナガエビの嗅覚の強さや体のどの部位で感知しているか、どのような化学物質やにおい物質に対して敏感に反応するか、反応行動を明らかにする。テナガエビの探索・採餌行動をよく観察すると、給餌から数秒後に探索行

動を開始し、餌となる魚が通過した後を追跡している様子が観察された。観察例より、テナガエビは嗅覚によって採餌行動をしていると推測できた。テナガエビがどのような化学物質において物質に対してどのような反応をとるのかを解明することにより、テナガエビを用いた水中での化学物質の異常感知や化学物質の発生源探索システムの開発につながる可能性がある。また、テナガエビは川底に泥が堆積し、水中が濁っている状態でも餌を認識し、捕食することができる(嬉 2012)。そのため、濁った環境でも本システムが適用可能であり、より広範囲の場面で活躍できる見込みがある。

2. 仮説

- (1) テナガエビは嗅覚を用いて、餌を探索して化学物質により反応が異なる。
- (2) テナガエビには学習能力および記憶能力が存在する。
- (3) テナガエビは動体の色や大きさの違いにより、動体に対する反応が変化する。

3. 方法

(1) 嗅覚による反応

五基本味を含む化学物質に対するテナガエビの反応性を明らかにすることを目的として行った(以下、嗅覚実験)。五基本味のうち塩化ナトリウム(塩味)、グルタミン酸ナトリウム(うま味)、クエン酸(酸味)、グルコース(甘味)、塩酸キニーネ(苦味)の4つの味覚成分を各(0.01M)ずつティーバック内に投入した。それに加えて、市販エビ餌0.05g(Hikari スマエビ (株)キョーリン製、原材料:粗たん白質41%以上、粗脂肪6.0%以上、粗繊維2.0%以下、粗灰分14%以下、りん1.0%以上)と対照処理としてティーバック内に何も入れないものの合計6種類の餌袋を用意した。塩酸キニーネ(苦味)は、販売価格が高価であるため実験を行うことが困難であった。

化学物質やエビ餌は、重しである直径1.5cmのガラス球とともにティーバックのなかに封入され、Y字型水路内の分岐のどちらか一方に不規則に投入した(図2)。その後、ビデオカメラでテナガエビの動きを3分間撮影し、テナガエビがY字型水路のどちらに行くかを追跡した。餌袋の存在する分岐の一方に移動したら誘引効果ありとみなし+1、餌袋のないもう一方の分岐に移動したら忌避効果とみなして-1と記録した。各味覚成分で10回ずつ実験を行い、各味覚成分での結果よりテナガエビの各化学物質に対する誘引忌避効果について評価した。

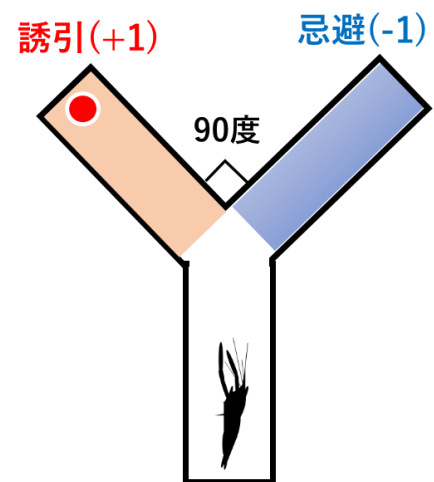


図2. Y字型水槽での実験のようす。

(2) 学習能力および記憶能力

高度に複雑化した神経系をもつ動物だけが獲得・遂行できると考えられていた学習現象が、単純な神経系しかもたない昆虫(Bitterman 1988, 1966; 石田 1993)やその他の無脊椎動物(Kandel 1970, 1979)によっても獲得・維持されることが次第に明らかになってきた。魚類を含む多くの動物種は、学習を繰り返すことで多様な生活環境に適応しているといわれている。記憶能力は生物にとって学習に必要な不可欠のものであるが、テナガエビについてはその有無や詳細について明らかにされていない。本実験は、テナガエビに学習能力および記憶能力があるのか明らかにすることを目的として行った。

水槽(縦15cm×横21cm×高さ3.8cm)内に迷路を作製し、水を水深1cmまで注いでテナガエビの身体を完全に浸らせた(図3)。その後、スタート地点にテナガエビ1個体を投入した。迷路の最終地点には、市販のエビ餌2gと重しのためにガラス球が入った餌袋を配置し、テナガエビの様子をビデオカメラで水槽上面から15分撮影した。

迷路のスタート地点にはS、その後の各地点にX1、X2、X3、X4、X5の目印をつけて、テナガエビが目標地点に到達するまでの時間とルートを計測した。実験は、対象個体を替えながら何度も反復させ、正しいルートのみ通って目標地点まで到達する時間と回数を計測した。

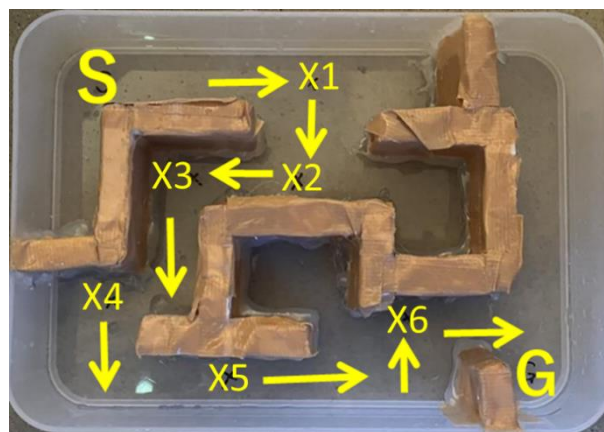


図3. 迷路実験の水槽.

(3) 動体検知反応

本実験は、テナガエビの動いている物体(以下、動体)に対する反応行動を明らかにすることを目的として実施した。水槽にテナガエビ1個体を投入し、水を水深1cmまで注いだ。

テナガエビの正面20cm離れた位置に、寒天を釣り糸で吊り下げた(図4、図5)。テナガエビが落ち着くのを待った後、動体である寒天を水中で移動させた。釣り糸で吊り下げた寒天は、自作したロボットによって4cm/sで移動し、片道20cmの距離を2往復した。寒天の色は赤、黄、緑、青の4種類を用い、テナガエビの正面から見た寒天の大きさ(面積)を 1.0cm^2 、 1.5cm^2 、 2.0cm^2 の3種類用意した。色や大きさが異なる寒天をテナガエビに接近・後退させたときに、テナガエビ個体に生じる反応についてビデオカメラで水槽上面から撮影し解析した。

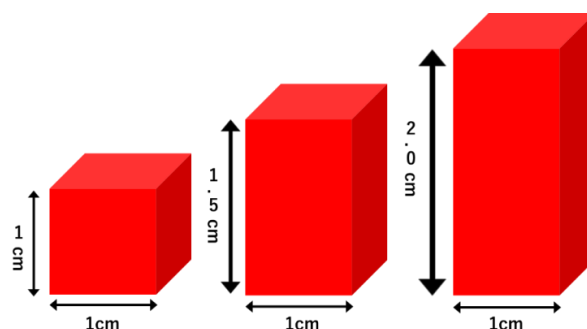


図4. 寒天の大きさの違い.

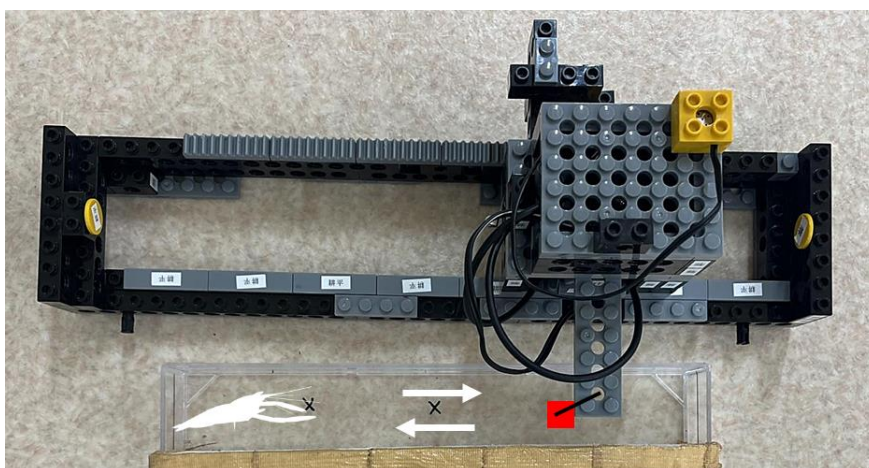


図5. 動体検知反応の実験のようす.

4. 結果と考察

(1) 嗅覚による反応

塩味、酸味、甘味、うま味の4つの味覚成分によるテナガエビに対する誘引忌避効果には大きな差異がみられた(図6)。

塩味に誘引されたテナガエビは10個体中5個体(50%)、忌避効果は5個体(50%)でみられた。テナガエビは、幼体から稚エビになるまで海や汽水域で成長した後、川を遡る(嬉 2012)。成体になったテナガエビに

とって、海や汽水域の塩分濃度に耐えられるかは判断できない。しかし、本研究における Y 字水路内の塩分濃度は、餌袋周辺でなければ低いいため大きな影響はないと考えられる。

酸味に対するテナガエビの誘引効果と忌避効果は、それぞれ 10 個体中わずか 1 個体(10%)のみに過ぎなかった。酸味に対するテナガエビの反応では、他の味覚成分ではみられない特異的な反応がみられた。10 個体中 8 個体(80%)が移動せずその場に留まった。予備実験で行った嗅覚実験では、30 分間酸味条件下にテナガエビを置いたところ。テナガエビは、酸味に対して強い忌避反応を示し、実験後にテナガエビ 40 個体中 10 個体(25%)が死亡した。さらに、死亡しなかったテナガエビ個体のなかには身体全体が小刻みに震えていた。酸味成分で最も低い誘引効果であった原因は、最終地や飼育環境の淡水と大きく異なる pH の急激な変化の影響であると推定される。酸味の場合では、テナガエビと餌袋を投入後、テナガエビは同じ位置で留まり続け 5 分以上移動せず、明瞭な静止行動を示した。また、移動した個体も Y 字水路の分岐まで直進しても、その後折り返して開始地点まで戻る個体がみられた。

甘味に対する誘引効果がみられたのは 10 個体中 4 個体(40%)であり、忌避効果は 6 個体(60%)で確認できた。

うま味の誘引効果は 10 個体中 7 個体(70%)、忌避効果は 2 個体(20%)となり、誘引効果の割合が最も高かった。これは、うま味成分のグルタミン酸ナトリウムが自然環境下におけるテナガエビの餌である魚の死骸や水生動物に含まれているためだと推定された。Y 字水路内に、テナガエビと市販のエビ餌を投入すると、速やかにテナガエビは市販餌に向かって直進し、Y 字水路の分岐に到達したときにいずれの分岐に進むか探索するようなようすを示した後、そのうち 7 個体は 30 秒以内には市販餌まで到達した。

各味覚成分での餌袋または反対側の端まで到達するまでの平均到達時間を算出した。塩味では誘引効果が 2 分 47 秒(5 個体)と忌避効果 4 分 27 秒(5 個体)で忌避効果時に大きな値となった。酸味では誘引 0 分 11 秒(1 個体)と忌避効果 0 分 23 秒(1 個体)であり、著しく小さな値であった。甘味は 1 分 38 秒(5 個体)で忌避効果では 2 分 26 秒(5 個体)、うま味では誘引効果は 6 分 27 秒(5 個体)で忌避効果は 5 分 51 秒(5 個体)と著しく大きな値となった。最も高い忌避反応を示した酸味は、平均到達時間が最も長くなっており、うま味と甘味は忌避・誘引反応にかかわらない平均到達時間を示した。

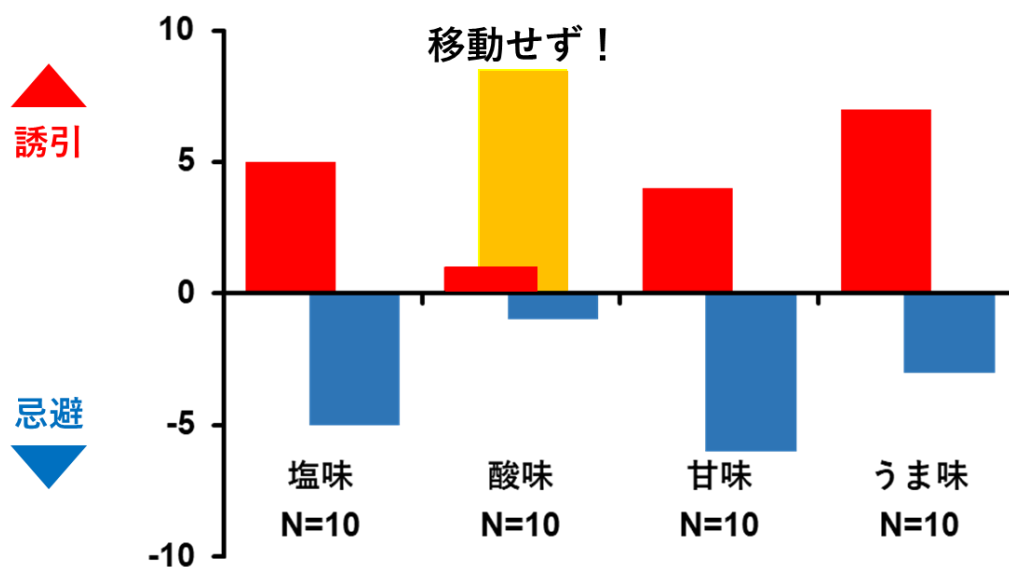


図 6. 4 つの味覚成分に対するテナガエビの誘引・忌避効果.

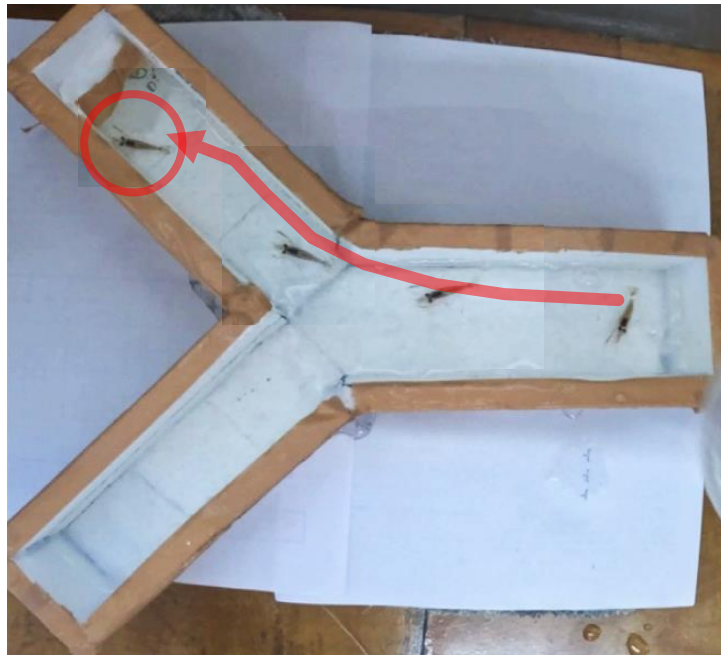


図 7. テナガエビの Y 字水路内での移動の様子(合成写真).

(2) 学習能力および記憶能力

テナガエビでは試行回数を重ねるほど、ゴールへの到達時間が長くなるというやや強い相関がみられた ($R^2=0.2084$ 、図 8)。テナガエビは、何度も迷路実験を施行させてもゴールまでの到着時間は全く短縮されなかっただけでなく、逆に到達時間が増加した。このことから、テナガエビには記憶能力および学習能力は本実験では確認できなかった。

スタート地点からの距離と各地点まで到達することができるテナガエビの割合には、強い負の相関 ($R^2=0.936$) がみられた (図 9)。スタート地点から距離が遠くなるほど、各地点まで到達するテナガエビの割合は低下した。これは、使用した迷路のスタート地点から目標到達地点までの距離が長く、難易度が高いことが理由として考えられた。また、テナガエビは瞬発的に大きな力を出す筋肉を持っているために、持久力を発揮して複雑な迷路を長時間かけて移動することに困難がある可能性がある。図 3 のスタート地点「S」にテナガエビを投入後、多くのテナガエビが勢いよく「X1」地点を超えるほど直進し、正面の壁まで到達した。各地点間の平均到達時間を計算すると、S-X1 間は 21 秒、X1-X2 間は 49 秒、X2-X3 間は 1 分 15 秒、X3-X4 間は 1 分 33 秒、X4-X5 間は 1 分 52 秒、X5-X6 間は 2 分 11 秒、X6-G 間は 2 分 17 秒であった。スタート地点から離れるほど各地点間への到達時間は増加した。直進や曲がり角にかかわらず到達時間は長くなった。時々壁で囲まれた狭い場所や壁際にとどまったテナガエビが数分間もしくは実験終了の 5 分が経過するまで静止行動を続ける場合もあった。各地点間での前の地点から次の地点までの到達率は S-X1 間は 96.4%、X1-X2 間は 81.5%、X2-X3 間は 95.5%、X3-X4 間は 100%、X4-X5 間は 81.0%、X5-X6 間は 88.2%、X6-G 間は 86.7%であった。開始地点からの距離は長くなっても各地点間ごとの到達率は低くならない。各地点間の到達率は各地点間の距離や、各地点間の到達時間に関連はみられなかった。

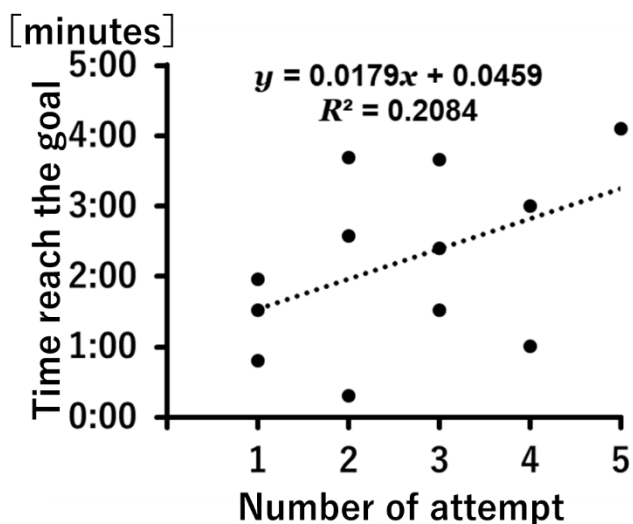


図8. 試行回数とゴールまでの到達時間.

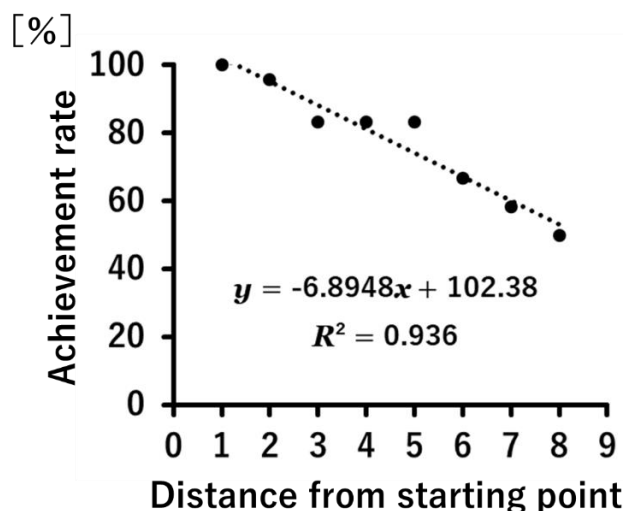


図9. スタート地点からの距離と到達割合.

(3) 動体検知反応

テナガエビは寒天に対して誘引反応は全く示さず、明確に忌避反応を示した(図 10)。このことからテナガエビは寒天を捕食者として認識している可能性が示唆された。赤色と緑色の寒天においては、大きさが大きくなるにしたがって忌避反応率が増加した。赤色と緑色が補色であること、水中に視認しやすい光の色であることが関係していると推定された。いずれの寒天でも表面の面積が大きくなるほど忌避反応が強くなる傾向がみられ、テナガエビは大きな寒天をより身体の高い天敵として認識していたのではないかと推定された。一方で、表面面積が1cm²の小さな寒天に対して、テナガエビは忌避反応を示さなかった。このことから、ある程度の大きさがないと危険な捕食者とは見なさない可能性がある。黄色の寒天で最も大きな忌避反応を示しているが、どの色に対しても忌避反応を示すことからテナガエビの視覚は色だけではなく、明暗度により物体を認識している可能性がある。

テナガエビ個体の正面から寒天を動かしたとき、テナガエビは移動しない無反応の場合と、移動する寒天をよけて壁際に身体を後ろに引く忌避反応がみられた。忌避反応が生じる原因は、寒天が触覚に触れることによる物理的刺激、または移動する寒天によって発生する水流の影響であると推定していた。しかし、寒天がエビの触覚に触れなくても、身体から約1cm以内に寒天が接近すると明確な反応が現れた点。寒天が大きくなるとそれに伴い水流も大きくなると考えられるが、黄色と青色の寒天では表面積が1.5cm²で最も高い忌避反応を示したことから、寒天そのものが近づいてきたことによる視覚の影響により、忌避反応が生じたと結論できた。

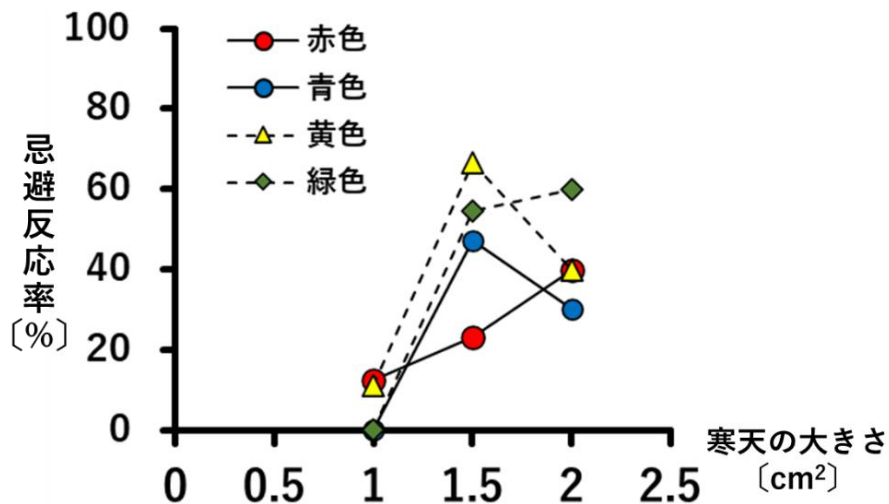


図10. 寒天の大きさと色に対するテナガエビの忌避反応率.

5. 今後の展望

Y字型水槽を用いた嗅覚実験や迷路実験を行ったときに、テナガエビの動きを観察した時のことである。テナガエビは長い触覚で壁に触れながら、壁に沿って移動していた。交替性転向反応を示すオカダンゴムシ *Armadillidium vulgare* も、進行中に触覚で壁に触れながら移動している様子が観察された。テナガエビでもオカダンゴムシと同様にぶつかると左へ、次は右へ(あるいは右へ、次は左へ)と交互に曲がっていく習性がみられるのではないだろうか。さらに、テナガエビのカルシウムイオンへの反応を評価していきたい。

6. 謝辞

本研究は、静岡大学FSS、山崎自然科学教育振興会の研究助成を受けて遂行可能となった。御多忙な中暖かい助言を下された静岡大学の竹内浩昭先生のおかげで研究をスムーズに進めることができました。また、ご指導に当たっていただいた浜松学芸高等学校サイエンス部顧問の伊藤信一教諭に心から感謝申し上げます。

7. 参考文献

- 馬場俊臣(2020)「猪」「豚」に関することわざ:「猪」「豚」をどう捉えてきたか. 札幌国語研究. 29-43.
- Bitterman, M. E. (1988) Vertebrate-invertebrate comparisons. In H. J. Jerison, (Eds,), *Intelligence and evolutionary biology*. 251-276. Berlin, Springer.
- Bitterman, M. E. (1996) Comparative analysis of learning in honeybees, *Animal Learning & Behavior*. 24 : 123-141.
- デシーア ステラ・日高敏隆訳(1969)動物の行動現代生物学入門 7. 岩波書店, 東京. 石田華子(2020)ザリガニの嗅覚探索行動の解析と噴流を利用した能動化学センシング手法の開発. 東京農工大学博士学位論文. 1-152
- 石田華子(2020) ザリガニの嗅覚探索行動の解析と噴流を利用した能動化学センシング手法の開発. 東京農工大学博士学位論文. 1-153.
- 石田雅人(1993)学習の逆説現象からみた脊椎動物と無脊椎動物の比較. 心理学評論. 36 : 108-129.
- Kandel, E. R. (1970) Nerve cells and behavior. *Scientific American*. 223 : 57-70.
- Kandel, E. R. (1979) Cellular aspects of learning. In M. A. B. Brazier (Ed), *Brain mechanisms in memory and learning: From the single neuron to man*. 3-16. New York, Raven Press.
- 大橋麻梨・名連勇氣・石田寛(2008)ザリガニの嗅覚探索行動を模倣した自律走行型水中ロボット. 日本機械学会第8回機素潤滑設計部門講演会講演論文集. 8(12):147.
- 大分大学理工学部' ' 生き物の動きを追跡してみよう! ' ' (2021-9-10) https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/210910_03.php (2023-1-24 確認).
- P. Denissenko・S. Lukaschuk・T. Breithaupt(2007) The flow generated by an active olfactory system of the red swamp crayfish. *Journal of Experimental Biology*. 210(23):4083-4091.
- T. Breithaupt(2001) "Fan organs of crayfish enhance chemical information flow," *Biological Bulletin*, 200, no. 2 : 150-154, 2001.
- T. Breithaupt(2011) "Chemical communication in crayfish," in *Chemical Communication in Crustaceans*. T. Breithaupt and M. Theil, eds. Springer. 257-276. New York, USA.
- 嬉正勝(2012)テナガエビ. (針山孝彦・小柳光正・嬉正勝・小泉修・日本比較生理生化学会 編集) 研究者が教える. 166-169. 共立出版, 東京.
- 山中勝次(2015)燦、知られざるきのこの世界. 武庫川女子大学生生活美学研究所紀要. 25:19-32.