

あまのじゃくの科学

ショウジョウバエにおけるコントラリアン行動の発生条件

岩本玄輝

要旨

集団には、あえて逆張りの選択を行う個体が存在する。コントラリアン生物学では、そのような個体をコントラリアン(あまのじゃく)と呼んでいる。本研究は、ヒトの脳構造を調べる上でモデルとなりうるショウジョウバエを用い、その発生条件や因子を考察した。ショウジョウバエに対して恐怖刺激を加え、彼らの刺激前後の運動を、UMATracker を用いて解析した。集団のスケールを大きくするにつれ、群れの創発が起きた。さらにスケールを大きくして実験を行ったところ、コントラリアン行動が確認され、それらは遺伝と偶発の相互因子的な影響が強いと示唆された。本研究では他者の意思決定を踏まえて自己の決定を調整する仕組みを数式化しており、コンピューターシミュレーションとも併せて考察している。当該モデル式は今後もコントラリアンの定量化に用いられることが期待される。

キーワード：コントラリアン生物学 逆張り戦略 ショウジョウバエ 集団と個 意思決定

1. はじめに

を、試みたものである。

1)

集団の意思決定とはあえて逆張りの意思決定を行う個体のことを「コントラリアン(日本語であまのじゃくの意)」と呼ぶ。コントラリアンとは、今までは外れ値として無視されてきた事象であり、その存在条件や存在価値といったパラダイムの確立はいまだ研究対象となっている。2023年に創設された「コントラリアン生物学」は、そのような未知領域に対し、メダカ、サル、ヒト、そして本研究でも用いたショウジョウバエ、の四種をモデル生物として研究を進めており、「あまのじゃく」の生態を明らかにしようとしている。これらの研究は、集団と個のあり方を再定義し、集団全体の利益の追求や個人の繁栄という点で、様々な分野にポジティブな波及効果をもたらすものと考えられている。コントラリアン生物学のこれまでの仮説によれば、コントラリアンとは、「集団形成における多様なジレンマを解消するための一つの解決策として、集団を形成する生物に本来的に備わっている機能」である。本研究はそのようなコントラリアン生物学の知見に基づき、コントラリアンの行動パラダイムを確立することを、またその定量的分析

2)

ショウジョウバエの特徴的な行動として、恐怖刺激に対する硬直が挙げられる。Zacarias ら (2018) では、単一のショウジョウバエに対して、スクリーン上の黒円が急激に拡大していくという視覚刺激を与えたところ、急速に拡大していく刺激に対して、硬直(freezing)を見せたことが報告されている。本研究では、この現象を「恐怖刺激に対する硬直」と呼ぶことにした。

3)

また、Ferreira & Moita (2020) では、集団のスケール(=規模)が大きくなると、恐怖刺激に対する硬直が少なくなり、6匹以上の集団については硬直が著しく減少することが報告されており、ショウジョウバエの群れの創発(=群れとしての特異な行動を見せ始めること)として、硬直の減少、もしくは消失が挙げられることがわかる。さらに Ferreira & Moita (2020) は、そうした群れの創発に関係する LC11 というニューロンの存在を発見しており、周りの運動に合わせて動作を再開すること、すなわち硬直の減少、消失は、LC11 に媒介

されていることを示唆した。

4)

恐怖刺激に対する硬直の発生や消失というショウジョウバエの特性を利用した研究は、コントラリアン生物学者の目を引くこととなった。Sato & Takahashi (2024) では、ショウジョウバエの系統の異なる3匹ずつで6匹の群れを構成し、Zacarias ら (2018) や、Ferreira & Moita (2020) と、同様の実験を行った。すると結果は、遺伝的に多様な混成集団では、単一系統集団に比べて硬直反応が強まった上、その運動の回復も迅速だった。このことから Sato & Takahashi (2024) では、群れの遺伝的な多様性が、恐怖刺激に対する行動の切り替えをすばやくすることで、集団全体の捕食行動からの回避に寄与すると示唆した。また、当該研究では、そのような非相加的なパフォーマンス向上にこそ、より本質的な群れの創発が生じているのではないかと結論付けている。

5)

以上のことから本研究では、単一系統での群れにおいても、集団の多様性を高め、集団全体の捕食行動の回避を目指す機能が存在すると考えた。そしてその機能に、コントラリアンを仮定した。すなわち、単一系統の群れにおいても、あるスケールを超えた集団に関しては、必ずコントラリアンが存在するはずだという仮説を立てた。本研究は、コントラリアンそのものの生態を明らかにし、その発生条件を同定することを試みたものである。

II. 手法

本研究は Sato & Takahashi (2024) を参考にした。本研究では、[予備実験]、及び[本実験]、において実験環境や使用したショウジョウバエ、ならびに解析方法で異なる点はあるが、おおむね以下に示す手法に従った。また、詳細は Sato & Takahashi (2024) に依った。

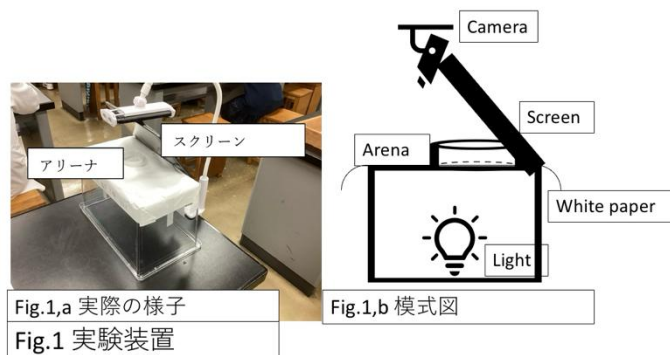
1)材料

本研究ではショウジョウバエ (*Drosophila*

melanogaster) を用いた(以後ハエと呼ぶ)。東京都立大学より、Yellow、Vermilion、および Wild の3系統を分譲していただき、それぞれ20度の保温槽でそれぞれ15 cm程度の飼育瓶に入れて飼育、繁殖させた。実験を行う前に、0度で4分間、低温麻酔を行ったのち、完全に運動が回復するまで約30分待ってから刺激を開始した。実験では、同じ個体を複数回用いることはしなかった。

2)装置

刺激を与えるために、Fig.1のような実験装置を作成した。解析の簡単のため下からライトを照らし、白紙を敷いた上に半径9.0 cm、高さ1.5 cmの円形のアリーナを設置した。アリーナの中にハエを単数または複数入れて実験を行った。スクリーンは上方45度の角度となるようにし、スクリーン上の黒い円の中心が常にアリーナの中心となるように設置した。アリーナの真上にカメラを設置し、刺激を与えている最中の行動を撮影した。また、実験装置全体には、白い紙を用いて外部光を遮断した。

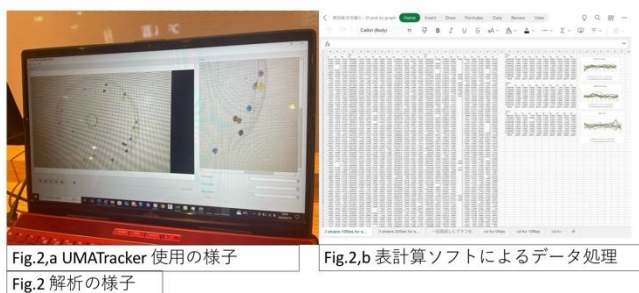


3)刺激

実験に用いた黒い円の恐怖刺激は、「Scratch」で作成した。Scratch は、MIT メディアラボが開発したプログラミング言語である。インターネットで無償で配布されている。恐怖刺激は iPad (第九世代) の全画面に表示し、200 ms で拡大後に500 ms 間表示、1400 ms 間休止、というサイクルを10回繰り返すようになっており Sato & Takahashi (2024) で用いられた刺激を再現した。

4)解析

ハエの行動追跡ツールとして、UMATracker (Yamanaka & Takeuchi (2018)) を導入した。UMATracker により個体識別、座標の割り出しを行ったのち、表計算ソフトで速さ、速さの変化量(加速度と呼ぶことにする)を算出し、考察した。動画は 30 fps であり、100 ms 間に 3 枚のフレームが含まれる計算になる。これらにスワッピング (swapping) などを行うことで、個体識別及びトラッキングを行った。Fig.2 はその様子を示した。なお、表計算や解析に用いた動画は、本文末尾に示したリンクに共有した。



5)[予備実験]

1、3、5、7 匹の Yellow 系統のハエに対して恐怖刺激を加え、硬直回数を計測した。これにより先行研究と大差がないことを確認した。[予備実験]での硬直は、毛繕いを除く、2 秒以上の静止と定義した。

6)[本実験]

ハエの群れのスケールをさらに大きくし、コントラリアン行動の発見を目指した。具体的には、5、10、20 匹の集団を構成し、Yellow、Vermilion、そして Wild の全ての系統で実験した。それらについては UMATracker を用い、個体識別を行いながら正確な歩行速度を解析した。その後、出された座標データから

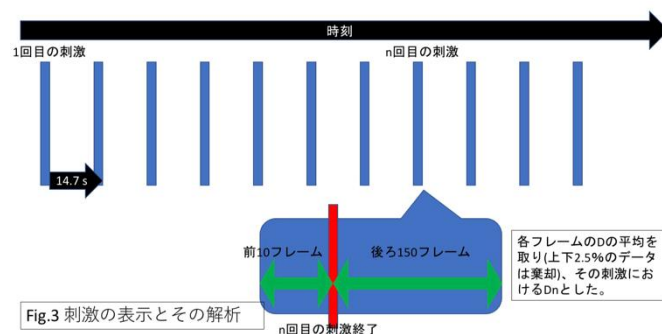
$$V_t = \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2}$$

として速さ V_t (pixel/frame) を計算した。

また、本研究におけるコントラリアンの定義については、従属定数 D 及び D_n を導入し、

$$D_n < -0.5$$

で定義した。この定数の詳しい説明はのちに考察で述べている。刺激の表示終了直後のコマ数を割り出し、そこから前 10 フレーム、後ろ 150 フレームの計 160 フレーム(=約 5 秒間)における D の値を逆算し、平均したものを、n 回目の刺激時の D として D_n で定義した (Fig.3)。各フレームの D の数値に異常値やエラーが含まれることから、上下 2.5% (もっとも大きい 4 フレームと最も小さい 4 フレームの分) は棄却しながら、計算した。



III. 結果

[予備実験]

Table 1 群れの規模と硬直回数 (Yellow)

群れの匹数	系統	回数 (/10)
1	Y	4.6
3	Y	1.6
5	Y	2.8
7	Y	0.9

Table 1 は[予備実験]の結果を示してある。群れを構成する個体数を徐々に増やしたときの Yellow 系統のハエの硬直回数を示した。10 回の刺激を与えたうち、硬直が見られた回数を合計し、1 匹あたりの平均の硬直回数を示した。また、1 匹での実験については、記憶や学習の影響を考慮して、刺激を与える際に別の個体で試行し、その平均とした。

[本実験]

Table 2 コントラリアンの有無 (yellow)

群れの匹数	系統	有無
-------	----	----

5	Y	無(0)
10	Y	有(1)
20	Y	有(3)

Table 3 コントラリアンの有無 (vermillion)

群れの匹数	系統	有無
5	V	無(0)
10	V	有(1)
20	V	無(0)

Table 4 コントラリアンの有無 (wild)

群れの匹数	系統	有無
5	W	有(2)
10	W	有(2)
20	W	有(1)

Table 2、3、4 は本実験の結果を示してある。各系統の各スケールにおけるコントラリアンの有無を示した。また、有無の右の () 内に示した値には、コントラリアン行動が見られた回数を示した。

IV. 考察

1)[予備実験]についての考察

Table 1 より、Ferreira & Moita (2020) などでも報告されているように、群れのスケールが5～7匹ほどになった段階で群れの創発が起き、単体でいるときのような振る舞いを見せなくなったことがわかる。具体的には、単体でいるときには平均して4.6回の硬直を見せていたハエだが、7匹になると0.9回にまで減少し、中には一切硬直しなくなる個体も現れた。

2)式 (1) について

[予備実験]での観察により、以下の式 (1)を考案した。

$$X_{k,t+1} = X_{k,t} + \frac{D}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{i,t} - X_{k,t}) \quad \dots (1)$$

式 (1)の各文字は以下のように定義する。

$X_{k,t}$: 時刻 t における個体 k の意思決定

n : 集団に属する個体数

D : 従属定数 (dependence constant)

式 (1)は、Ferreira & Moita (2020) で報告された、LC11 というニューロンにより媒介される、「他者の動作に合わせて自分の動きを再開する」、という意思決定のプロセスを定式化したものである。ハエは群れの創発が起きた段階で、他者の運動に合わせて自分の運動を決定づけていると見られ、それを本研究では式 (1)の形で表現した。式 (1)における意思決定とは、本研究のように移動速度の値を代入したり、0、1 といった整数値によって意思決定を定義してその値を代入することもできる。

この式では、他者のある時刻における意思決定から、同時刻の自己の意思決定を引くことによっていわば自己の意思決定を「相対化」しているのである。これは物理学における相対速度とのアナロジーによって導かれたもので、自己の意思決定の集団内における位置を正しく把握するためのプロセスである。自己の次の時刻における意思決定は、この相対的な他者の意思決定(相対意見と呼ぶ)を参考にして下される。この意見の相対化によって得られた集団内全員の相対意見の平均を取っているのが、

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{i,t} - X_{k,t})$$

以下の演算が意味するところである。

また、この式では従属定数 (dependence constant) D を導入することで、その個体がどの程度他者の相対意見に影響を受けるかを反映させた。以下では D の値について簡単に場合分けを行った。

I. $D=1$ のとき

相対意見の平均を完全に自己の意思決定に反映させることとなる。このとき、相対意見の平均を自己の意思決定に加算する行為は、単に集団全体の意思決定に迎合することに等しい。

II. $0 < D < 1$ のとき

相対意見を完全に反映させるわけではないが、肯

定的に捉え、自己の意思決定に加算することとなる。この操作を全員が無限に繰り返すと、集団の意見は一つの値に収束する。

III. $D=0$ のとき

相対意見を一切考慮しない頑固者のような振る舞いを見せる。時刻 $t=0$ の時点の自分の意思決定が変わることはない。

IV. $D<0$ のとき

D が負の値を取るとき、その個体は相対意見に対して否定的な反応を見せることになる。すなわち、自己と他者の間にある意思決定の差を、さらに広げようと試みる存在であり、集団の意思決定の収束を妨げる。

本研究では、この D の値の正負によってコントラリアンを識別できないかと考えた。従属定数 D の値を実測値である速さを元に逆算し、それによりコントラリアンを発見することを目指した。従って、理論上のコントラリアンの定義は、「 $D<0$ となるとき」である。特に本研究では、実際の生物実験であることを考慮して、「 $D<-0.5$ となるとき」と定義した。これは、コントラリアン、すなわちあまのじゃくが、集団の意思決定を見て、“あえて”、自己の決定をそこから離してゆく、といった現実に見られる現象とも整合性がとれている。よってこの式(1)を用いた考察をもって、[本実験]の考察を深めてゆく。また、この式 (1)を含む、他者の意思決定を相対化し、自己の意思決定に影響を及ぼす過程のモデルを、「協調性モデル」と呼ぶことにする。

3)[本実験]についての考察

[本実験]ではまず、本実験の第一目標であったコントラリアンの発見を達することができた。Table 2、3、4 より、いずれの系統にもコントラリアンは発生したといえる。しかし、データをさらに詳しく見ると、以下のような事実を発見したので、そのことについても考察した。それは、コントラリアンのスケールに対する発生回数の変化 と、系統間の差異についてである。

まずスケールに対する発生回数の変化についてだ

が、Table 2 では、スケールが大きくなるにつれてコントラリアン行動の回数が、 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ と、順調に増えたことがわかる。しかし、Table 3、Table 4 は、コントラリアン行動自体が 0 回から 2 回の間を推移しており、スケールの増大に伴うコントラリアンの増加は見られなかった。このことは、集団内の個体数の増加とコントラリアン行動の増加には一貫した傾向は見られない、あるいは系統によってその関係性が異なる可能性があるのではないかということを示唆している。

次に、系統間の差異についてだが、先述したスケール増大との相関の有無以外にも、そもそもの硬直回数に違いがある。特に違いが顕著なのは Wild 系統における 5 匹での実験結果である。他の 2 系統では 5 匹の集団ではコントラリアンが見られていなかったのに対して、Wild では 2 回のコントラリアン行動が見られた。このことは Wild 系統は遺伝的にすでに多様であり、Wild 系統内で多様に意思決定を下していることが原因ではないかと考察した。

4)加速度をもとに D を逆算した場合

Table 2、3、4 における D は速さを元に算出したが、ここではあえて加速度を元に算出し直し、同様に D_n を出して考察する。以下に示す Table 5、6、7 は、加速度で D を定義した際のコントラリアンの有無及び回数である。

Table 5 コントラリアン行動の有無（加速度）(Y)

群れの匹数	系統	有無
5	Y	無(0)
10	Y	有(3)
20	Y	有(2)

Table 6 コントラリアン行動の有無（加速度）(V)

群れの匹数	系統	有無
5	V	有(1)
10	V	有(7)
20	V	有(3)

Table 7 コントラリアン行動の有無（加速度）（W）

群れの匹数	系統	有無
5	W	有(4)
10	W	有(1)
20	W	無(0)

ここでは Table 3、4、5（＝速さ条件でのコントラリアン）と、Table 5、6、7（＝加速度条件でのコントラリアン）の差異について考察した。コントラリアンの有無に関しては両者ともおおむね一致していることが見て取れるが、これは、本実験における D が無次元量、すなわち単なる割合で表されることに起因していると考えられる。

5) 遺伝と偶発

コントラリアン生物学における重要な疑問の一つに、次のようなものが知られている。コントラリアン行動が、遺伝的であり個体に固有のものなのか、それとも偶発的であり、その時々で D の値が「割り振られる」ものなのかという問いだ。本研究では、以下に示す Fig.4,ab から、「コントラリアンになりうる性質は個体に固有のものだが、その性質が実際に発現するかどうかは偶発的な要因による影響が大きいのではないか」と考えた。Fig.4 に

は、早さで算出した際のコントラリアンの出現回数が最も高かった、Yellow 系統、20 匹で行った実験について、その刺激回数を横軸に（n 回目の刺激）、その回の刺激における Dn を縦軸に取り、個体ごとに示した。Fig.4,a には 1 匹目（d0）から 10 匹目（d9）までを示し、Fig.4,b には残りの 10 匹を示した。これを見ると、D の値が負の値を取り、コントラリアン行動を見せている個体は、10 回の刺激を通してほとんど決まった個体であるだけでなく、その個体の D が常に負の値を取り続けているとは限らないことがわかる（このときのコントラリアンの定義は理論通り $D < 0$ ）。例えば、d0 は、10 回の中で 2 回 0 を下回っているのに対し、d7 など一回も負の値を取っていない。他にも、d5 や d14 も、比較的小さい値を取りながら推移し、偶発的に負の値を取り、コントラリアン行動を示している。このことは、コントラリアン生物学の大きな謎の一つであった、「遺伝」と「偶発」に対する一つの重要な示唆を与える結果である。「コントラリアンの素質自体は遺伝的だが、その発現には偶発的要因が深く関わっている」ということではないだろうか。さらに Fig.5 として、加速度で算出したとき、もっともコントラリアン行動が見られた Vermillion 系統、10 匹の D のデータを、Fig.4 のように示した。なお、1 回目と 10 回目の刺激時の D の値はあまりにも異常値であったため除外した。Fig.5 でも、d6 や d9 のような、コントラリアンの「素質」を持った個体が時折偶発的なコントラリアン行動を見せる一方、d1 や d2 のように、まったく D が負にならない個体も発生していることがわかる。

Fig.4,a Y20 d0-d9

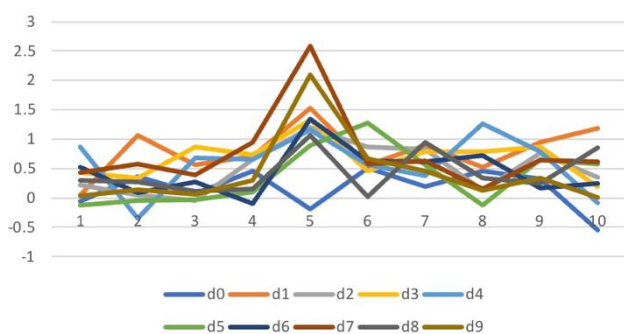


Fig.4,b Y20 d10-19

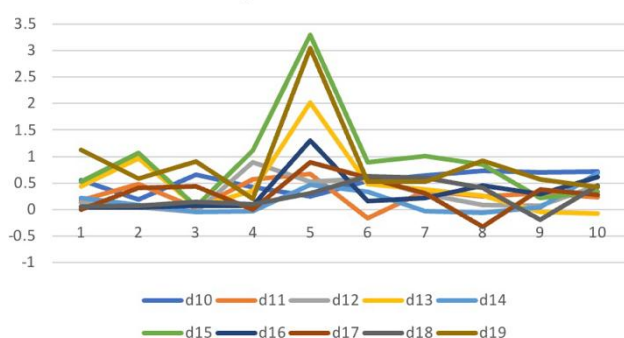
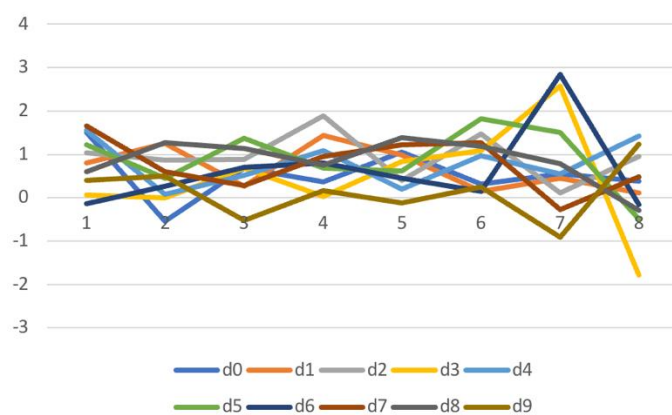


Fig.5 V10



脳科学者の中野信子氏は、自身の著書の中で、このような集団の意思決定に対する態度の個体差について、ドーパミンの必要量に違いがあることを示唆している。これはヒトについても言えることだが、他者に迎合しやすい、 $D>0$ となる個体は、そうで無い個体に比べてドーパミンの分解酵素の働きが強く、ドーパミンの必要量が少ないことがわかっている。ドーパミンが脳内に残りにくく、自分の頭で考えることをすぐやめてしまうからだと考えられる。反対に、ドーパミンの分解酵素の働きが弱い個体に関しては、「新規探索性」と呼ばれる、不確実性への関心が強い個体であり、興奮しやすい性格となるが、これはのちに詳しく述べる、コントラリアンの不確実性への関心の高さとも整合性がとれる。

6) 協調性モデルのシュミレーションによる評価

協調性モデルの妥当性の評価、及びコンピュータシュミレーションによるさらなる考察に向けて、「Google Colab」を使って、協調性モデルを再現したコードを作成し、シュミレーションを行った。以下に示す Fig.6 はその結果である。シュミレーションでは、 X の初項を $-10 < X < 10$ の範囲で乱数生成したのち、 D の値を設定して協調性モデルの式 (1) の操作を繰り返し行った。なお、 $n=20$ 、試行回数は 100 回とした。以下の Fig.6 における条件は、abc ではすべての D が 1、0.5、0.1 で設定されたが、d に関しては、一つだけ、 k_1 の D のみを -0.5 とし、残りの D はすべて 0.5 として試行した。

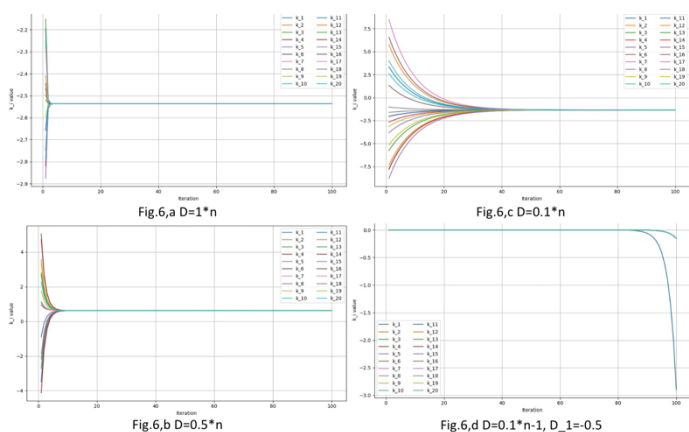


Fig.6,abc を比べると、理論通り D の値が大きくなるほど収束が早められた。いずれの場合も 100 回

以内に収束し、その収束値はほとんど初項の平均値に等しかった。一方、 $D<0$ となる個体が 1 匹でもいた場合、Fig.6,d のように、収束は妨げられ、正、または負の無限大に発散した。このことは、コントラリアンが、集団全体の意思決定の収束を妨げることによって、群れの多様性を維持し、Sato & Takahashi (2024) で指摘されたように、捕食者の回避行動といった、集団全体の利益に寄与していることを示唆している。また、コントラリアンのこの一連の振る舞いは、コントラリアンが不確実性（非収束性）を好むことを意味しており、「新規探索性」の高さという点で、コントラリアンの特性は個体に特有のもので、その発現が主に偶発的なものに左右されうる、というこれまでの本研究における示唆を支持している。

7) ポストディクションを考慮したモデルの改良

脳科学分野において、「ポストディクション」と呼ばれる現象がある。ポストディクションは、事後に起こった事象によって、事前にあった知覚、認知が修正されることをいうが、Hogendoorn (2022) などによって報告されている。神経細胞の活動の遅れにより、私たちは現在の外環境と内環境の情報をリアルタイムで知覚することはできない。そのため、私たちの脳では、常に未来の状態を推論しており、実際にその状態を符号化した信号が送られると、遡及的に知覚や認知を変化させてしまう。Friston (2016) は、この、未来の感覚信号の予測といった現象に対して、自由エネルギー原理を適用して考察を行なっている。ここで重要なのは、我々は未来の状態の推論のために、過去の状態から形成され、学習される脳内の「生成モデル」を利用しており、その後で実際に未来の信号が入力されると、その「生成モデル」も修正され、それに伴い過去の感覚信号も修正される、ということだ。本研究ではこのような脳の特性を反映せるため、式 (1) に改良を加え、式 (2) (3) (4) とした。

$$\mu_{\alpha,t+1} = g_{\alpha}^{t-2}(t) + \frac{D}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(g_i^{t-2}(t) - g_{\alpha}^{t-2}(t) \right) \quad \dots (2)$$

$g_{\alpha}^{t-2}(x)$ は以下の値の回帰直線の式として定義する

$$f_{\alpha}^{t-4}(1), f_{\alpha}^{t-4}(2), f_{\alpha}^{t-4}(3), f_{\alpha}^{t-5}(4), f_{\alpha}^{t-6}(5) \cdot \cdot \cdot$$

$$\cdot \cdot \cdot, f_{\alpha}^1(t-2), f_{\alpha}^0(t-1)$$

また、

$$f_{\alpha}^{t-3}(i) = g_{\alpha}^{t-2}(i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad \dots (3)$$

$$f_{\alpha}^{t-j}(j) = g_{\alpha}^{t-2}(j) \quad (j = 4, 5, \dots, t-1) \quad \dots (4)$$

式 (2) (3) (4) の各文字は以下のように定義する。

$\mu_{\alpha, t+1}$: 時刻 $t+1$ における個体 α の意思決定

$f_{\alpha}^k(m)$: k 回ポストディクション (= 修正) された個体 α の時刻 m における実際の感覚信号 ($k=0$ のとき $f_{\alpha}^0(t)$ はポストディクションされていない実際の感覚信号として定義する)

$g_{\alpha}^{t-2}(x)$: 時刻 t での「生成モデル」とも言える、個体 α の過去の状態から推論された状態の変遷の予測関数。回帰直線によって、時刻 $t-1$ までの情報を用いて一次的に近似する。

回帰直線による生成モデルの近似は、脳が過去の信号から状態の変遷を推論している様子を再現した。またこの時、式 (3) (4) により、ポストディクションが行われる。そしてこの操作ののち、時刻 $t+1$ において時刻 t の状態の感覚信号が入力されると、それに伴ってまた回帰直線の定数部分が変化する。こうして常に修正され続ける回帰直線に合わせて過去の感覚の記憶はポストディクションされていく。こうしてできた各個体ごとの生成モデルの関数に、時刻 t の値を代入することで現在の状態を推論し、その推論結果と従属定数 D から、未来の運動である $\mu_{\alpha, t+1}$ が決定される。なお、このプロセスは式 (1) で行った操作と大差はないので割愛する。これがポストディクションをはじめとする、記憶や認知に関する詳細な条件を反映させた数理モデルであり、今後もこのような発展、応用が期待される。

8) ヒトの行動への応用

最後に、以上の考察及び協調性モデルのヒトの行動への応用可能性について論ずる。

a) ヒトの他者理解のプロセス

Suzuki ら (2012) では、ヒトが他者を理解するとき、脳では「シュミレーション学習」と「行動パターン学習」とを統合して行っていることを報告した。シュミレーション学習とは、b) で論ずるミラーニューロンなどの働きにより、他者の運動を自分の脳内で再現することである。行動パターン学習とは、他人の価値判断を学習する、すなわち 7) で触れたような、「予測モデル」を構築し、他者の推論に役立てる仕組みのことである。この二者が統合されて始めて、他者の価値観や行動を認知することができる。よって、ヒトの脳においても、協調性モデルを支える基盤は存在しており、応用可能であると言える。

b) ミラーニューロン

ヒトの脳には、「ミラーニューロン」と呼ばれるニューロンが存在していることが知られている。我々はこのミラーニューロンを通じて、他者の行動を自己の運動に照らし合わせて理解している。このニューロンは、協調性モデルのヒトに対する適用に一つの根拠を与えるものであり、ヒトは、このミラーニューロンを通じて、他者の運動を知覚していると考えられる。また、ハエにおいても、Ferreira & Moita (2020) や, Klibaite & Shaevitz (2020) が報告しているように、他者の運動を知覚して自分の行動の参考にしていると考えられる。しかし、ヒトの脳において、ドーパミンがこのニューロンの活動をどれほど修飾しているかどうかは個体差がある上、その働きの全容も明らかにはなっていない。よってここでは、ハエとヒトとを結ぶ一つの根拠として取り上げておくにとどめる。

c) 自己理解

ハエやヒトの、他者の運動理解についてはこれまで論じてきたが、自己の運動についてはどうか。Fujiwara ら (2017) では、ショウジョウバエは水平方向のオプティックフロー (= 空間を移動した際に周りの風景が網膜の上を

規則的に流れること)を選択的に処理する HS 細胞が、視覚と独立に歩行情報を推定しており、また感覚統合を行うことで正確な自己の運動の推定及び直進歩行の軌跡の制御を行っていることが報告された。一方ヒトでも、自己受容感覚は体性感覚野で処理されているし、認知に関しても、メタ認知という方法で評価が行われる。メタ認知とは、認知に関する認知であり、前頭極を頂点とする内臓感覚皮質と内臓運動皮質のネットワークがメタ認知を生んでいることなどが知られている。Miyamoto ら (2018) は未知の出来事に関する神経中枢が前頭極 (10 野) に存在することなど、メタ認知における前頭極の役割を詳細に報告している。ハエにメタ認知の機能があるかどうかは定かではない。いずれにせよ、ヒトはハエと同等、あるいはより優れた自己の運動、認知の推定を行っていることは間違い無いだろう。

d) 社会的メタ認知

最後に、コントラリアン生物学の領域代表でもある理化学研究所の宮本健太郎氏の提唱する、社会的メタ認知について考える。社会的メタ認知とは、自己の心的モデルに対する内省的評価であるメタ認知を、他者の心的モデルに合致するように適合させて他者に投影し、他者の心の状態を推定する能力である。Miyamoto ら (2025) によれば、他者の理解の際に、自分よりパフォーマンスが低いパートナーのパフォーマンスを予測する時は、前外側前頭葉 (47 野) が活動し、メタ認知の他者への投影 (=社会的メタ認知) を行うことがわかっている。それに対して、自分よりパフォーマンスが高いパートナーのパフォーマンスを予測する時には、メタ認知が困難なため、側頭頭頂接合部 (TPJ) で過去の成績や履歴や信念に基づいたヒューリスティクスが用いられ、パフォーマンスが予測されると報告された。このことはヒトの脳が、社会的メタ認知などの方法を使い、高度な他者推論システムを構築している、ということであり、これらのことは、ヒトに対して協調性モデ

ル、特に改良版の式 (2)、式 (3) を用いることが十分可能であることを示唆している。

以上より、ハエと我々ヒトの脳の構造や行動原理は非常に似ていると言える。また、ヒトの脳はより高度であり、他者や自己の認知をメタ認知しているという点においても、本研究での協調性モデルに適用するに相応しい。よって、協調性モデルは、ヒトにおける集団行動、コントラリアンの定量化にも、用いられることが期待される。

V. 結論

本研究は、ショウジョウバエにおける群れの創発を確認した。その後、協調性モデルの理論式を用いてコントラリアンを定義した。群れのスケールを大きくし、コンピューターによる個体別トラッキングを行ったところ、コントラリアンはスケールを増大させると現れる、という結果が得られた。また、本研究が示唆した、コントラリアン行動の遺伝と偶発の相互因子的な発生メカニズムは、コントラリアン生物学における重要な示唆である。さらに、協調性モデルを用いたコンピューターシミュレーションは、コントラリアンの発生が群れの多様性に貢献しているということを示唆し、コントラリアンの集団内における有効性と必要性を明らかにした。今後はこれらのモデルを発展、活用し、ハエのみならず、ヒトを含む様々な生物におけるコントラリアンの定量化、及び行動パラダイムの確立を目指してゆくことが期待される。

謝辞

千葉大学佐藤大気先生の助言、およびご指導に感謝するとともに、指導教員の牧田先生はじめ生物科の先生方、理論式に助言くださった秋葉先生にも謝意を表します。

また、大変お忙しい中難しい解析ソフトのプログラミング及びその活用を行ってくださった中能真之介様にも、この場を借りて感謝の言葉を述べさせていただきます。彼の力がなければ、この研究はなし得ませんでした。本当にありがとうございました。

文 献

- Clara H. Ferreira and Marta A. Moita (2020): Behavioral and neural underpinnings of safety in numbers in fruit flies
- Daiki X. Sato and Yuma Takahashi (2024): Neurogenomic diversity enhances collective antipredator performance in *Drosophila*
- Hinze Hogendoorn (2022): Perception in real time: predicting the present, reconstructing the past
- Karl Friston, Thomas FitzGerald, Francesco Rigoli, Philipp Schwartenbeck, John O Doherty, Giovanni Pezzulo: Active inference and learning
- Kentaro Miyamoto, Caroline Harbison, Shiho Tanaka, Marina Saito, Shuyi Luo, Sara Matsui, Pranav Sankhe, Ali Mahmoodi, Mingming Lin, Nadescha Trudel, Nicholas Shea, Matthew F S Rushworth (2025): Asymmetric projection of introspection reveals a behavioral and neural mechanism for interindividual social coordination
- Kentaro Miyamoto, Reiko Setsuie, Takahiro Osada, Yasushi Miyashita(2018): Reversible silencing of the frontopolar cortex selectively impairs meta cognitive judgement on non-experience in primates
- Ricardo Zacarias, Shigehiro Namiki, Gwyneth M. Card, Maria Luisa Vasconcelos and Marta A. Moita (2018): Speed dependent descending control of freezing behavior in *Drosophila melanogaster*
- Osamu Yamanaka, Rito Takeuchi (2018): UMATracker an intuitive image-based tracking platform, Journal of Experimental Biology
- Shinsuke Suzuki, Norihiro Harasawa, Kenichi Ueno, Justin L. Gardner, Noritaka Ichinohe, Masahiko Haruno, Kang Cheng, Hiroyuki Nakazawa(2012): Learning to simulate others' decisions
- Terufumi Fujiwara, Tomas L. Cruz, James P. Bohnslav, M. Ugenia Chiappe(2017): A faithful internal representation of walking movements in the *Drosophila* visual system
- Ugne Kilbaite, Joshua W sheavitz(2020): Paired fruit flies synchronize behavior: Uncovering social interactions in *Drosophila melanogaster*
- 乾敏郎 森脇加江子 (2024): 脳の本質 いかにしてヒトは知性を獲得するか. 中公新書, 59-61 72 194-226.
- 中野信子 (2020): 空気を読む脳 講談社, 55-56
- 金沢大学新学術創生研究機構数理神経科学ユニット: <https://fsosato.w3.kanazawa-u.ac.jp/restop.html> [cited 2025/2/10]
- コントラリアン生物学 HP : <https://www.contrarianbiology.com/> ホーム [cited 2025/1/8]
- Scratch: <https://scratch.mit.edu/projects/editor/?tutorial=getStarted> (刺激用)
- Scratch は、MIT メディアラボが開発したプログラミング言語である。インターネットで無償で配布されている。
- Google Colab: <https://colab.research.google.com/> (シュミレーション用)
- 本実験で用いた動画、座標データ及び処理済データ、協調性モデルシュミレーション等は、どなたでもお使いいただけるよう、以下のリンクに示す Google Drive に保存してあります。どうぞご利用ください。
- https://drive.google.com/drive/folders/19bhJ3Ws0DpTSTtAEGZsZ_I3209xjAjsJ
- 連絡用メールアドレス
yanbengenki@gmail.com

