

群れの中に相互作用のある群れの動き

(2つの群れの中に相互作用がある場合の群れの動き)

古市 望
日本大学大学院 理工学研究科

§.1 はじめに

わたしたちは生態系のなかで“群れ”というものをよく見かける。小動物・草食動物・鳥・魚、ときには肉食動物ですら群れをなして行動する。群れをつくる目的は「他の生物から身を守る」・「効率よく狩りをする」などそれぞれの生物によって異なる。

ある生物の群れが他の生物に襲われたときを考えてみると、最初のうちは群れ全体で逃げる。このときは特定の1匹（もしくは数匹）が追いかけているわけではない（少なくともわたしたちにはそう見える）。最終的に捕まって食われてしまうかどうかは別にして、しばらくすると特定の1匹だけが追いかられる。実際の生物の群れの中には明らかに他の個体と見分けのつくもの、つまりアルビノ¹や大きな病気・けがを持ったものはほとんど見られない。この場合、群れを構成する各個体にはあまり大きな差はないはずである。それではこの不幸な1匹はどのようにして決まるのだろうか？

§.2 モデル

§.2.1 今回の研究について

今回、わたしは2次元の平面上に追いかける群れ（Hunter）と逃げる群れ（Beast）の2つの群れを考えた。そして、この2つの群れの中に追いかける・逃げるといった相互作用があるとき（図1）、その2つ群れがどのような振る舞いをするのかを調べた。

§.2.2 モデルについて

“群れ”のモデルには三宮^{[1], [2]}、S.Niwa^[3]のものがあるが、わたしはY.Hayakawa^[4]のモデルを簡略化したモデルを用いた。簡単のため群れを構成する各個体は質点とし、頭の向きや死角・有効視界は考えていない。また「BeastがHunterに食われる」や「HunterがBeastを追いかけることをあきらめる」といったこともいれていない。

N を Hunter の個体数、 N' を Beast の個体数とする。また $\vec{r}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ を Hunter の各個体の位置ベクトル、 $\vec{r}_k (k = 1, 2, \dots, N')$ を Beast のそれとする。このとき Hunter と Beast の2つの群れの動きは運動方程式

¹先天的に色素が欠乏して全身が白くなった生物。いわゆる白子のこと。

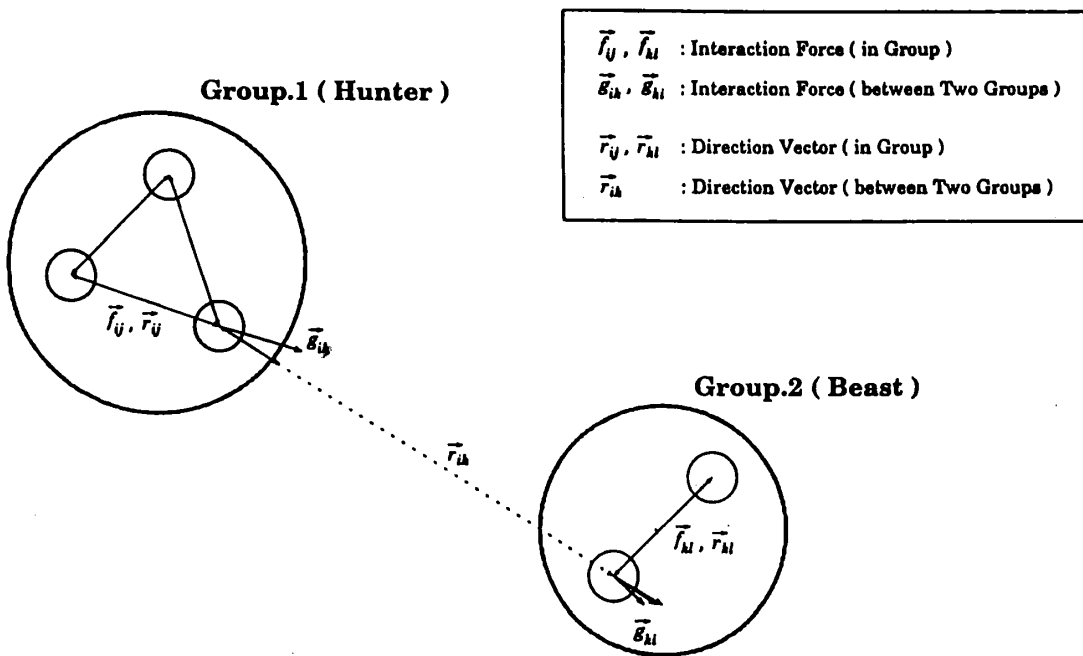


図 1: 2つの群れの間働く相互作用

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = -\gamma \frac{d\vec{r}_i}{dt} + c \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \vec{f}_{ij} + d \sum_{k=1}^{N'} \vec{g}_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \\ m \frac{d^2 \vec{r}_k}{dt^2} = -\gamma \frac{d\vec{r}_k}{dt} + c' \sum_{\substack{l=1 \\ k \neq l}}^{N'} \vec{f}_{kl} - e \sum_{i=1}^N \vec{g}_{ki} \quad (k = 1, 2, \dots, N') \end{array} \right.$$

(追いかける群れ (Hunter) の方程式)

(逃げる群れ (Beast) の方程式)

にしたがう。

\vec{f}_{ij} , \vec{f}_{kl} は Y.Hayakawa らが用いた同じ群れに属する各個体が群れようとする力であり

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{f}_{ij} = - \left(\frac{1}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^3} - \frac{1}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} \right) (\vec{r}_j - \vec{r}_i) \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \\ \vec{f}_{kl} = - \left(\frac{1}{|\vec{r}_l - \vec{r}_k|^3} - \frac{1}{|\vec{r}_l - \vec{r}_k|^2} \right) (\vec{r}_l - \vec{r}_k) \quad (k, l = 1, 2, \dots, N') \end{array} \right.$$

という形をしている。この力は群れを構成する個体同士が離れているときには引力になり、近くにいるときには斥力になる。したがって同じ群れに属する個体間の距離をほぼ一定に保とうとする力になる。Y.Hayakawa らはこの力の中に体長の効果を取り入れている。また、このほかに頭の向きや死角の効果も取り入れているが、ここでは考えていない。

$d\vec{g}_{ik}$ は Hunter が Beast を追いかける力で、 $-e\vec{g}_{ki}$ は Beast が Hunter から逃げる力である。ここで実際の生物は逃げる (追いかける) ための情報の入力に「視覚」・「聴覚」・「嗅覚」などを用いる。当然のことではあるが、これらの感覚が働く有効範囲は異なっている。しかし、わたしはこれらを1つの関数で近似した。それぞれ

$$\left\{ \begin{array}{l} d\vec{g}_{ik} = d \left(\frac{1}{|\vec{r}_k - \vec{r}_i|^2} \right) (\vec{r}_k - \vec{r}_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, N') \\ \hspace{15em} \text{(Hunter が Beast を追いかける力)} \\ -e\vec{g}_{ki} = -e \left(\frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_k|^2} \right) (\vec{r}_i - \vec{r}_k) \quad (k = 1, 2, \dots, N'; i = 1, 2, \dots, N) \\ \hspace{15em} \text{(Beast が Hunter から逃げる力)} \end{array} \right.$$

となっている。ここで、“追いかける力の強さ d ”と“逃げる力の強さ e ”は Hunter が Beast を追いかける、または Beast が Hunter から逃げるための加速度もしくは速度に関する変数である。

運動方程式の中に抵抗 ($-\gamma(d\vec{r}_i/dt)$, $-\gamma(d\vec{r}_k/dt)$)が入っているので、それぞれの群れを構成する各個体の速度が無限大になることはない。また、2つの群れを構成する各個体にモーターがないので Hunter に追いかけれなければこの抵抗の項によって Beast は止まってしまう。

§.3 シミュレーション結果

§.3.1 パラメーターの値について

シミュレーションでは“追いかける力の強さ d ”と“逃げる力の強さ e ”を変化させたときに、Hunter と Beast の2つの群れがどのような振る舞いをするのかを見た。Hunter と Beast の個体数はそれぞれ

- Hunter の個体数： $N = 3$
- Beast の個体数： $N' = 2$

にしたが、 $N = 3$, $N' = 1$ としたときのシミュレーションはすでに発表している^[5]。このときは追いかける群れの“群れようとする力の強さ”と“追いかける力の強さ”を変化させたときに2つの群れがどのような振る舞いをするのかを調べた。同じように逃げる1匹を Beast、追いかける3匹を Hunter とするとこの場合の結果は

1. Beast が Hunter から逃げきれ
2. Beast が Hunter 1匹に追いかけられる
3. Beast が Hunter 2匹に追いかけられる
4. 複雑な動き

の4つに分類することができ、Hunter 2匹で Beast を追いかける場合にのみ2つの群れの軌跡がサークルになるときがある。また、この4つの振る舞いは主に追いかける力の強さの大きさによって決まることがわかった。

各個体のその他の変数は

- 群れようとする力の強さ： $c = c' = 1.0$
- 質量 (体重) など： $m = 1.0$, $\gamma = 1.0$

とし、Hunter と Beast の初期値は図2のようにした。

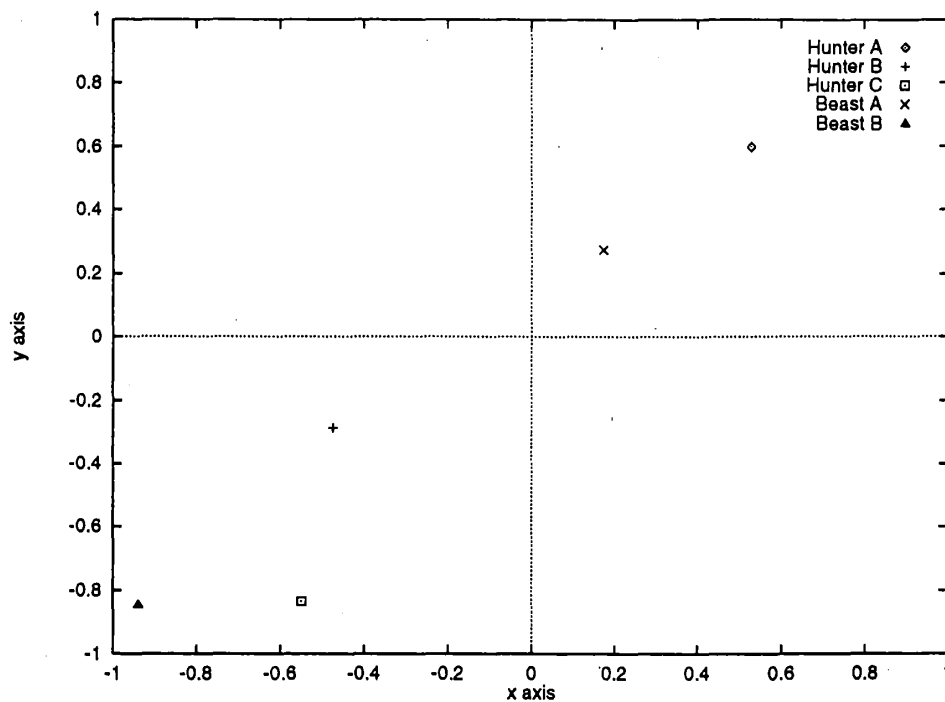


図 2: Hunter と Beast の初期値

§.3.2 分類

パラメーター d と e を変化させてシミュレーションを行ない、その結果を分類すると

1. Beast が Hunter から逃げる事ができる (図 3)
2. Beast が Hunter に追いつかれる (図 4)

のように大きく 2 つに分けることができる。

Beast が Hunter から逃げる事ができる場合、逃げ方は図 3 のようにくもの子を散らすように逃げる場合と 2 匹が並走して逃げる場合の 2 種類しかない。一方、Beast が Hunter に追いつかれる場合には

- 1 匹だけが追いつかれて、もう 1 匹は逃げる
 1. 1 匹に追いつかれる
 2. 3 匹に追いつかれる
- 2 匹とも追いつかれる
 1. 2 匹とも 1 匹に追いつかれる (残りの Hunter 1 匹は Beast を追いつけない)
 2. 片方は 2 匹に、もう片方は 1 匹に追いつかれる
- 複雑な動き
 1. Beast 2 匹を Hunter 3 匹で追いつける?

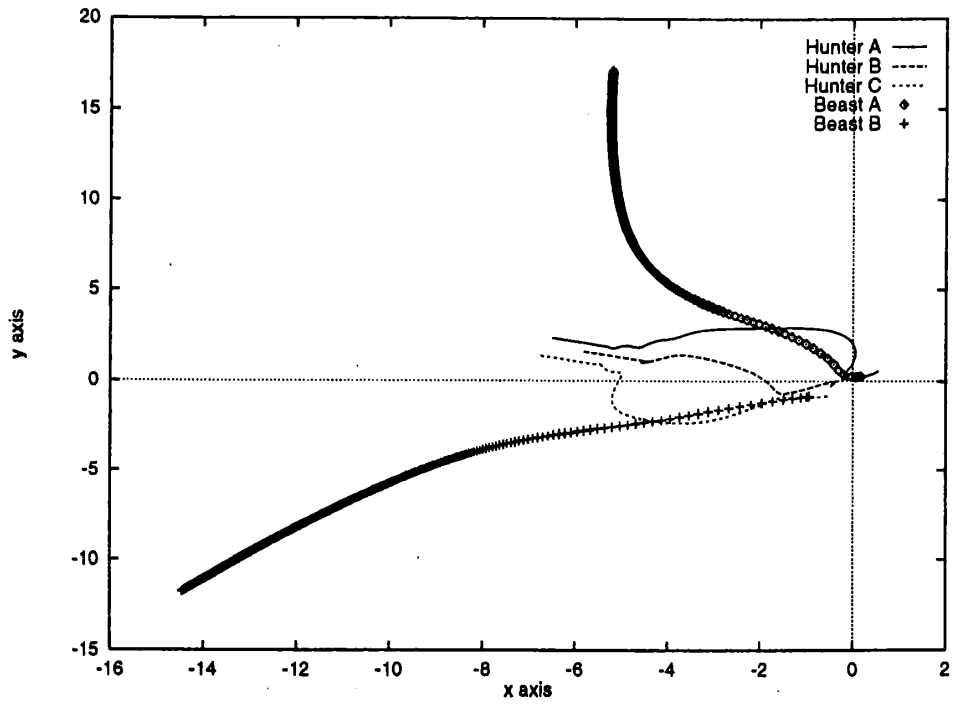


図 3: 逃げることができる場合 ($t = 49.95$ までの軌跡) ($d = 1.00, e = 1.0$)

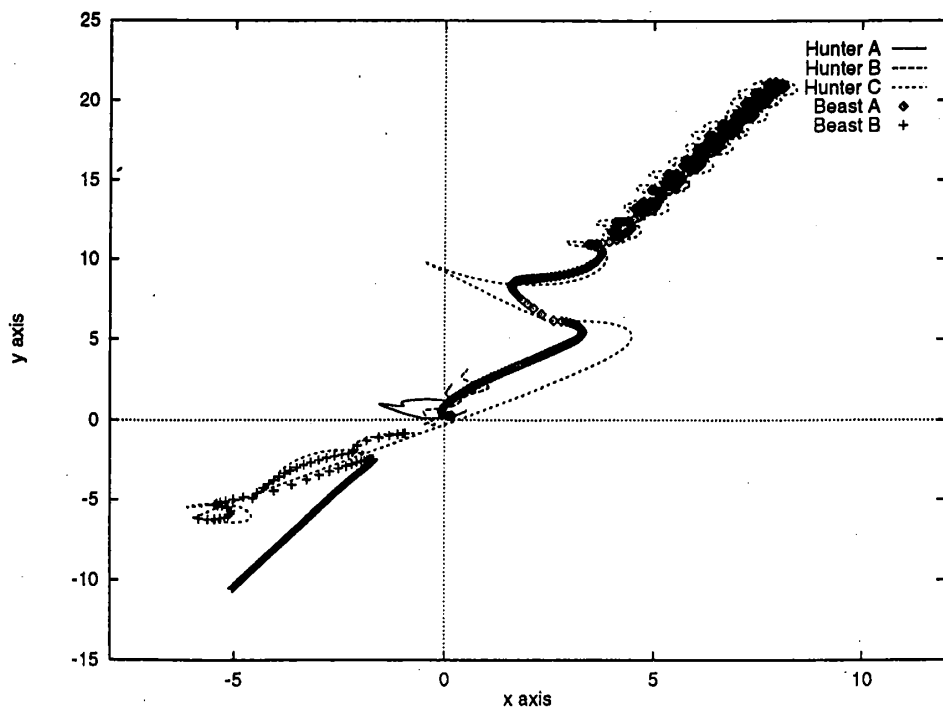


図 4: 追いかけるられる場合 ($t = 49.95$ までの軌跡) ($d = 2.40, e = 1.0$)

2. Beast 2 匹を Hunter 1 匹で追いかける？

のように多くのパターンが出てくる。しかし、Beast 1 匹だけが Hunter 2 匹に追いかけるという場合はまだ発見していない。

また、Beast が Hunter から逃げきれる場合を“◇”で、Beast が Hunter に追いかける場合を“+”でプロットすると図 5 のようになる。この図から Beast 逃げきれる領域と追いかける領域は $e = \alpha d$ ($\alpha \simeq 1.66$) の直線で分けられることがわかる。

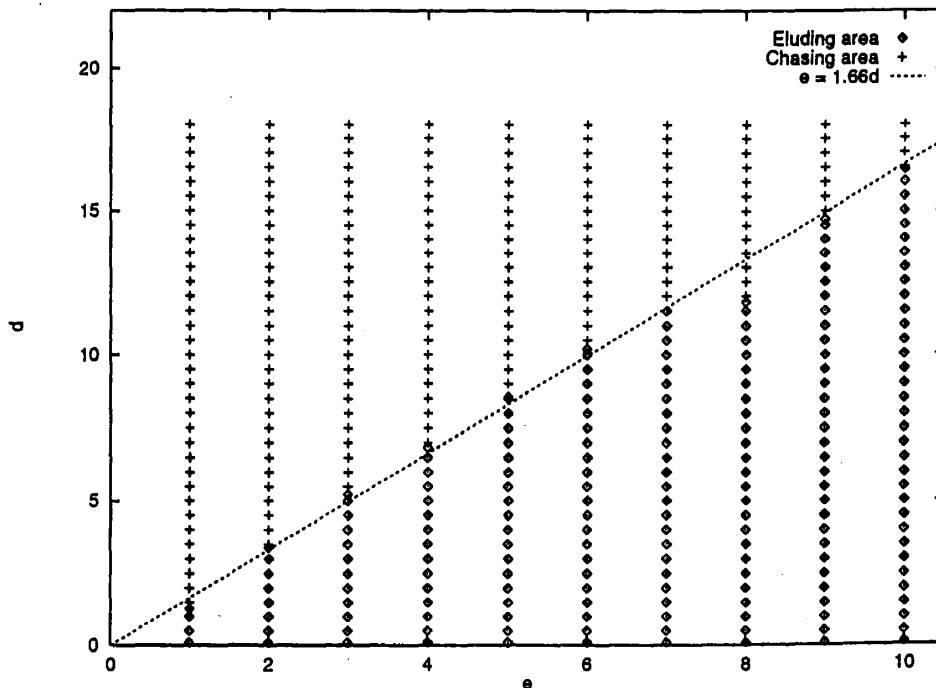


図 5: d と e のパラメーター空間の相図

§.3.3 Beast の中で追いかけるものが変化する

“逃げる力の強さ e ”と“追いかける力の強さ d ”を変化させると Beast A, B の 2 匹のうち Hunter に追いかけるものが変わる。パラメーターの値を変化させると、あるパラメーターの値では Beast A が追いかける (図 6) が、別のパラメーターの値では Beast B が追いかける (図 7) ようになる。

§.3.4 Hunter の中で追いかけるものも変化する

“逃げる力の強さ e ”と“追いかける力の強さ d ”を変化させると Hunter A, B, C の 3 匹のうち Beast を追いかけるものが変わる。つまり、あるパラメーターの値では Hunter A が Beast A を追いかける (図 6) が、別のパラメーターの値では Hunter C が追いかける (図 8) ようになる。しかし

- Hunter B が Beast A を追いかける

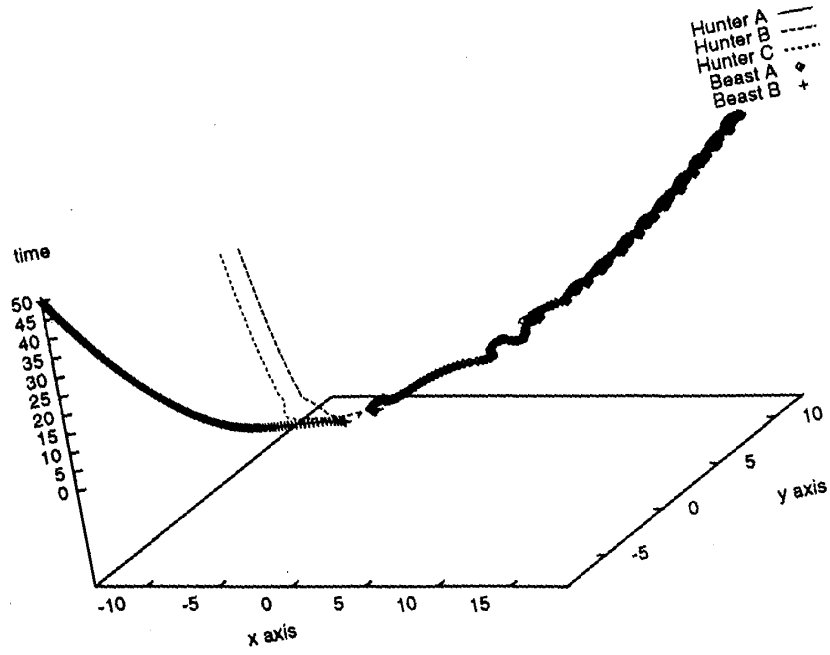


図 6: Beast A が追いかける (縦軸は時間) ($d = 1.10, e = 0.7$)

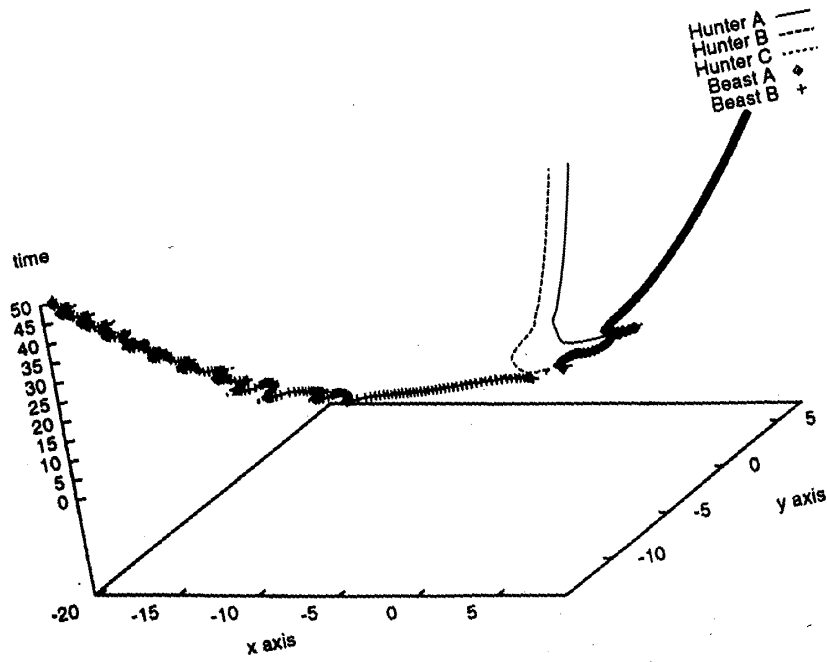


図 7: Beast B が追いかける (縦軸は時間) ($d = 1.20, e = 0.7$)

- Hunter A が Beast B を追いかける
- Hunter B が Beast B を追いかける

という3つの組み合わせも存在するはずであるが、まだ発見していない。また“Hunter C が Beast B を追いかける”という組み合わせは図7に示してある。

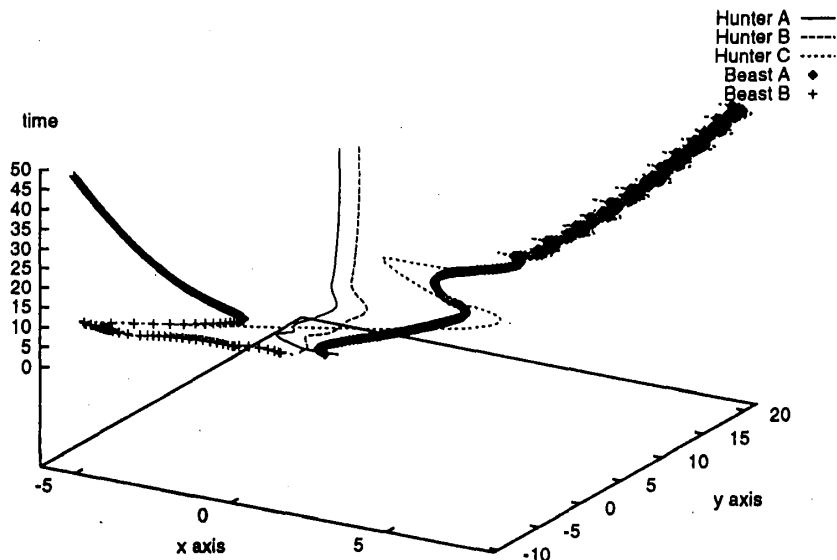


図8: Hunter C が Beast A を追いかける (縦軸は時間) ($d = 2.40$, $e = 1.0$)

§.3.5 初期値を変化させた場合の2つの群れの振る舞い

ここまでは“追いかける力の強さ d ”と“逃げる力の強さ e ”を変化させたときに2つの群れがどのような振る舞いをするのかを示した。以下では d と e を固定させて Beast B² の初期値を変化させた場合に Hunter と Beast の2つの群れがどのような振る舞いをするのかを示している(図9)。Beast B 以外の初期値は図2と同じであり、追いかける力の強さ・逃げる力の強さはそれぞれ $d = 1.20$, $e = 0.7$ とした。しかし Hunter および Beast の個体数や m , γ 等の変数は変えていない。また Beast B の初期値を変化させた範囲は $-1.0 \leq x \leq 1.0$, $-1.0 \leq y \leq 1.0$ である。

図9の□・■・●・○はそれぞれ

- : Beast 2匹が Hunter から逃げる事ができる (図3)
- : Beast A が Hunter に追いかけられる (図4、図6、図8)
- : Beast B が Hunter に追いかけられる (図7)

²図2では△、図3等では+でプロットしている

○ : Beast 2 匹とも Hunter に追いかける (図 10)

を意味している。また、図 9 (b) は図 9 (a) の一部の拡大図であり、図 9 (c) は図 9 (b) の一部の拡大図である。このように拡大して見ていくと、2つの群れが最終的にどのような振る舞いをするのかという境界が単純ではないことがわかる。

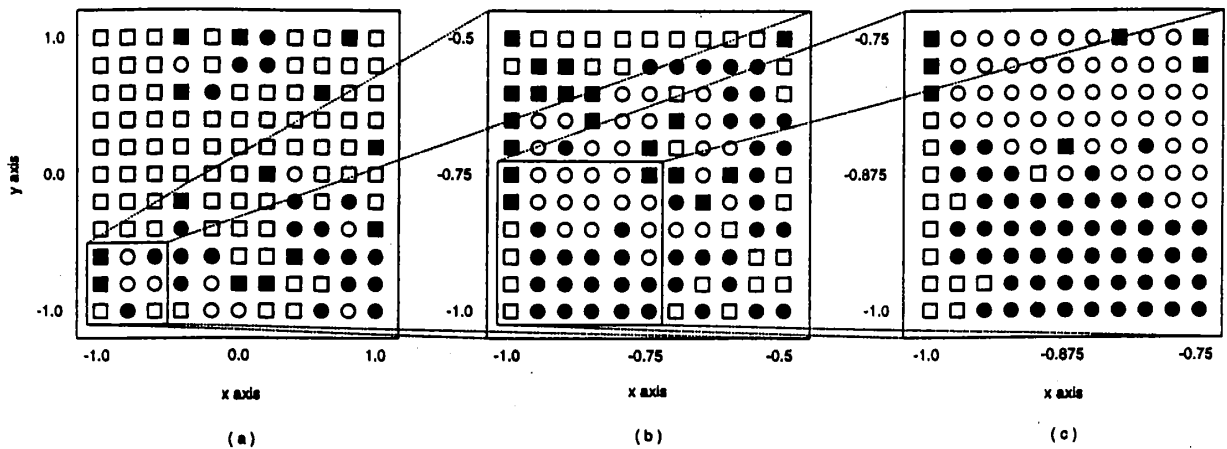


図 9: Beast B の初期値を変化させた場合の相図

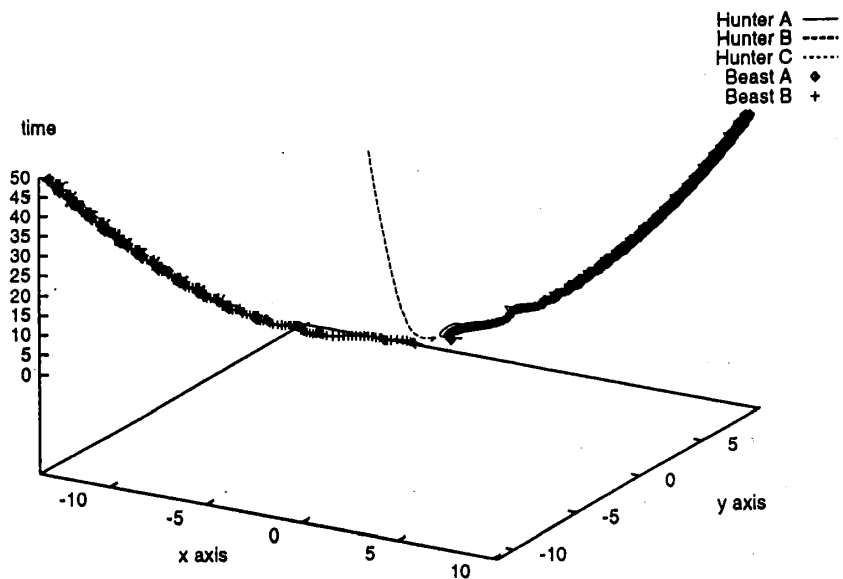


図 10: 2 匹とも追いかける (縦軸は時間) ($d = 1.40$, $e = 0.6$)

§.4 結論

今回は方程式の中に「追いかける・逃げる」と行った相互作用を最初から仕込んだものを用いた。このモデルではすべての個体は無遠慮まで見え、死角もない。つまり、この2つの群れの各個体が2次元平面上のどこにいてもお互いを“見て”いる。このため、2つの群れは必ず「追いかける・逃げる」という動きをするので、追いかける群れが逃げる群れを襲うことなく共存しているような状況はこのモデルからはでてこない。したがって、このシミュレーションは生態系の中で捕食者の群れが被食者の群れを追いかけた直後から観察している場合と同じである。

パラメーターの値を変えることによって、この方程式から生態系の中でよく見られるように逃げる群れがくもの子を散らすように逃げる場合が生じる。また、捕まって食われるかどうかは別にして、逃げる群れの中で追いかける1匹（もしくは2匹）が蛇行しながら逃げる場合も生じる。このモデルでは死角を考えていないが、このことについての利点を次の段落で議論する。

仮に視界の範囲しか見えていない生物がいるとすると、死角から襲われた場合にこの生物は襲われたことに気づかないので逃げることができない。つまり、このような生物に対しての捕獲効率は非常に高く、このような生物が生態系の中で生き残ることは非常に難しい。また、現実の生物に襲ってきた生物が死角に入ったからといって逃げることをやめるものはいないし、襲ってきた生物が追いかけることを諦めたにもかかわらずいつまでも逃げ回るものもない。このことから、ある生物が襲われて逃げる場合には聴覚などの視覚以外の感覚を用いてすべての方向から情報を入手しつつ逃げていると推測される。また、すべての方向から情報を仕入れるこのモデルから生態系の中でよく起こっている現象が生じているため、実在の生物が襲われて逃げているような状況ではすべての方向から情報を仕入れているということが示唆できる。

逃げる群れが追いかける群れから逃げきれない場合は必ず捕まって食われるとすると、図9(a)より捕獲効率は約36%である。ここで、ライオンがトムソンガゼル³を狩る場合の捕獲効率は2頭以上の集団では約30%といわれている^[6]。よって、この追いかける力の強さと逃げる力の強さ（ $d = 1.20$, $e = 0.7$ ）ではライオンが集団で狩りをするときの様子を表わしているといえる。また、この2つの値を変化させることによっていろいろな生物が集団で狩りをする様子が出てくると思われる。

この方程式は常微分方程式なので初期値を無限の精度で決めれば最終的な状態が決まるのは当然であるが、現実の生物は大きさを持っているため群れを構成する各個体の位置は有限の精度でしか決めることができない。このため、図9のように最終的にどのような振る舞いをするのかという境界が単純ではない場合、初期の状態から2つの群れの最終的な状態を予測することができなくなる。つまり、群れの中で最終的に追いかける不幸な1匹（もしくは数匹）は襲われた直後から決まっているわけではなく、「追いかける・逃げる」というダイナミクスの結果として生じることがいえる。

今後の課題としては追いかける群れと逃げる群れのそれぞれの群れようとする力の強さを変化させて、群れようとする力が2つの群れの振る舞いにどのような影響を及ぼすのかを見てみたい。また各パラメーターにゆらぎをいれて2つの群れの各個体に個性をいれたり、2つの群れの個体数を増やしてみてもおもしろいのではないか。

³草原地帯に群生する草食獣。別名ワキスジレイヨウ。

参考文献

- [1] N.Sannomiya, K.Matsuda: A Mathematical Model of Fish Behavior in a Water Tank, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-14, 1984
- [2] 三宮信夫, 島田亮, 中峯浩: 魚群行動における自律分散機構のモデリング, 計測自動制御学会論文集 Vol.29, 1993
- [3] S.Niwa: Self-organizing Dynamic Model of Fish Schooling, Journal of Theoretical Biology 171, 1994
- [4] Y.Hayakawa, T.Mizuguchi, M.Sano, N.Shinoyama and K.Sugawara: Private Communication
- [5] 古市望: 群れの中に相互作用のある群れの動き, 日本物理学会講演概要集 1995 年秋の分科会 第3分冊, pp579, 1995
- [6] 今福道夫: 巧みな狩り, 週間朝日百科 動物たちの地球2 生活戦略2 探す・襲う・食う, 朝日新聞社, pp58-63, 1991