

めだかの学校(1) : 群をつくらせる

著者	佐々木 直幸, 神原 武志, 櫻森 与志喜, 内藤 正美, 淵上 信子
雑誌名	日本歯科大学紀要. 一般教育系
巻	26
ページ	85-97
発行年	1997-03-20
URL	http://doi.org/10.14983/00000467



めだかの学校

I. 群れをつくらせる

Simulation Study of Fish School

I. Schooling Mechanism of Fish

歯学部	佐々木	直	幸
電気通信大学電子物性工学科	神原	武	志
電気通信大学電子物性工学科	檜森	与志	喜
日立製作所基礎研究所	内藤	正	美
東京都立大学理学部物理学科	淵上	信	子

Naoyuki SASAKI

The Nippon Dental University, Fujimi, Chiyoda-ku, Tokyo 102, JAPAN

Takeshi KAMBARA and Yoshiki KASHIMORI

Department of Applied Physics and Chemistry,

The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182, JAPAN

Masayoshi NAITO

Advanced Research Laboratory, Hitachi Ltd., Saitama 350-03, JAPAN

Nobuko FUCHIKAMI

Department of Physics, Faculty of Science,

Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-03, JAPAN

(1996年11月30日 受理)

目的

鯖やにしんのように群れをなす魚には、特定のリーダーが存在しているわけではない。それらは、仲間の魚との相互作用によって、自己組織的に群れを作っている。では、ど

のような相互作用が働いて安定した群れを作っているのか、そのメカニズムを探り、群れを作らせることが今回の目的である。

群れをなす実際の魚の行動

魚がどのようにして群れを作るのかを、モデルを作って調べるためには、まず、群れを作る実際の魚の行動に学ばなければならない。Partridge^{1,2}らは、大型水槽に群れを泳がせ、その様子を観測することにより、次のような特徴を見いだした。

1. 群れの構造について

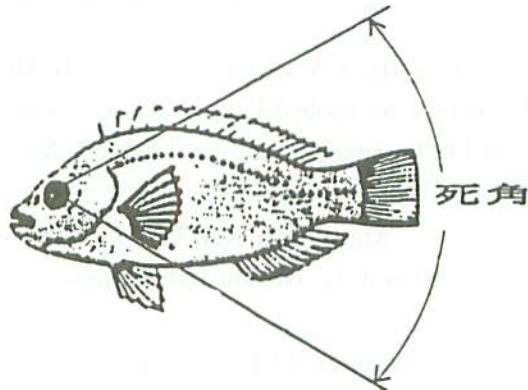
隣の魚が近づけない最小距離が存在する。この最小距離は体長の約半分である。

最も近い魚までの好適距離が存在し、それはほぼその魚の体長に等しい。どの魚も、最も近い仲間を自分の体軸に対して一定の好適角度に保とうとする傾向がある。

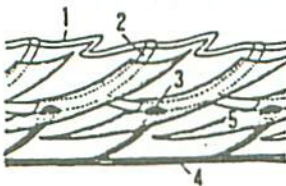
2. 側線と視覚の役割について

個々の魚は群れの中での位置を保つのに、視覚だけでなく、側線、すなわち、水圧の変化を感じ取る敏感な器官が、同じくらいに重要である(図1)。目を覆い、盲

側線 (点線で示す)



側線の内部構造



側線器：水圧の変化を感じる装置

ここに流れ込む水の圧力の強弱によって感覚細胞が刺激され、それが脳に伝えられて、体の回りの水の流れの強さや方向を感じる

1 表皮, 2 側線管, 3 側線器, 4 神経,

図1 魚の目と側線

目にした魚を正常な群れの中に入れても、彼らは群れの中に自分の位置を確保できる。しかし、正常な魚よりいっくらか離れて泳ぐ。側線を切った魚も群れを形成することができる。ただし、正常な魚よりいっくらか密着して泳ぐ。すなわち、目だけでも、あるいは側線だけでも群れを形成することができる。目だけで維持される距離は、側線だけで維持される距離より小さい。

3. ある魚と他の魚との行動の相関関係について

最隣接魚の行動（スピードと方向）との相関が一番強いわけではない。

すなわち、いかなる魚の行動とも特に強い相関は見られない。

一つの魚のスピードと方向は、群れ全体の平均スピードおよび平均的方向に対して最も強い相関を持っている。ただし、平均的速度と方向は、単なる平均ではなくて、重みつき平均（近くの魚からより強い影響を受ける）である。

モデル

以上の Partridge の観測、および東大海洋研の青木の実験データとその解析^{3,4}に基づいて、つぎのような行動パターンを仮定する。

1. 視覚による2体間の行動パターン

BL を魚の体長とし、見える領域を 5 BL までとする。ただし、魚の真後ろから左右 30°（計 60°）の領域は、死角とし、そこにいる魚からは影響を受けない（図 1, 2）。影響を受ける魚が 1 匹しかいない場合には、青木のモデルを参考にして、図 2 に示したように、その魚までの距離に依存した、4 つの行動パターンをとらせる。すなわち、中心にいる魚 i が、影響を受ける魚 j との相互作用によって受ける進行方向の変化を β_{ij} として

- ①注目している魚までの距離が体長の 2 分の 1 以下（repulsive area）の場合には、衝突を回避する方向に進路を変える。

$$\beta_{ij} = \angle(v_i, v_j)$$

ここで、 $\angle(v_i, v_j)$ は、 v_i と v_j とのなす角度である。

- ②注目している魚までの距離が体長の 2 分の 1 以上かつ体長の 2 倍以内の場合（parallel area）には、その魚と同じ方向に泳ごうとする。

$$\beta_{ij} = \angle(v_i, v_j)$$

- ③注目している魚までの距離が体長の 2 倍以上かつ体長の 5 倍以内の場合（attrac-

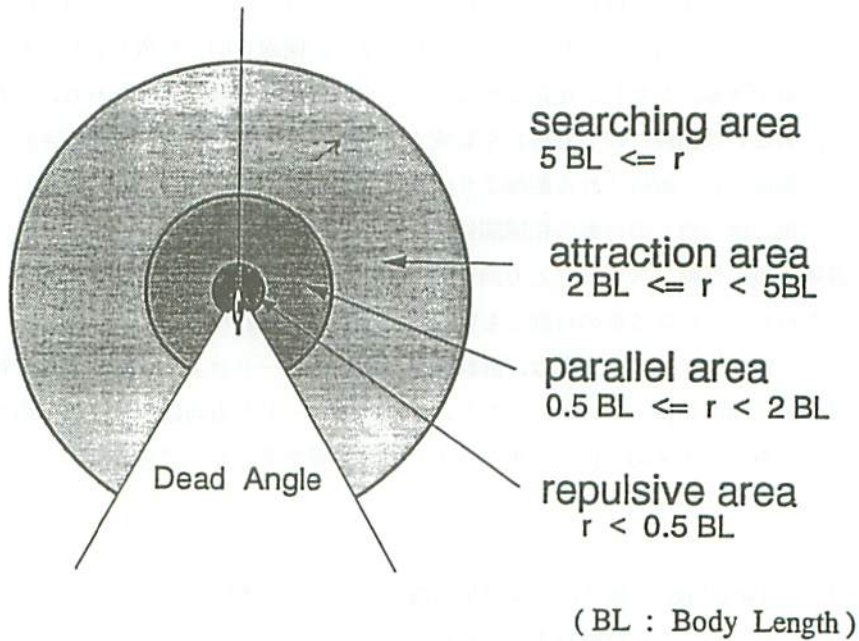


図2 視覚による2体間の4つの行動パターン
 中心にいる魚は、注目した魚がどの領域にいるかによって、4つの基本行動のどれかをとるとする

tion area) には、その魚の方に行こうとする。

$$\beta_{ij} = \angle(v_i, x_j - x_i)$$

- ④注目している魚までの距離が体長の5倍以上の場合 (searching area) には、視界の最大距離を越えているとして、ランダムに進行方向を少し変えて仲間を探す。

$$\beta_{ij} = -15^\circ \sim 15^\circ \text{の範囲でランダムに}$$

仲間がたくさん集まったときは、どの魚から一番強く影響を受けるのか、その影響の受け方をいろいろ変えてみることによって、全体的にはどのような行動をとるのかをシミュレートする。

2. 側線器による行動

魚は視覚だけでなく、体表面に分布する側線器という、水の動きを敏感にとらえる器官によっても、自分の位置や周囲の動きを捉えている。

側線器は水圧の変化を感じる装置である (図1)。ここに流れ込む水の圧力の強弱に

よって、感覚細胞が刺激され、それが脳に伝えられて、体のまわりの水の流れの強さや方向を感じる。まわりの魚の動きによって、水がどのように動くかを考えなければいけないが、今回は近似として、魚の動きの変化そのものを側線器が感じるとする。すなわち、まわりの魚の速度の重みつき平均（各魚までの距離に反比例させた速度の重みつき平均）に合わせて方向を決めるとする。

魚の動き

N 匹の魚の初期位置をある領域内にランダムに与える。各魚の運動の初期方向もランダムにしておく。時刻 t における i 番目の魚の位置を $\mathbf{x}_i(t)$ 、速度を $\mathbf{v}_i(t)$ とする。他の魚との相互作用により、 i 番目の魚はタイムステップ Δt 秒後に、位置と速度を $\mathbf{x}_i(t+\Delta t)$ 、 $\mathbf{v}_i(t+\Delta t)$ に変える。これらを、時刻 t における位置と速度で次のように表す。

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_i(t+\Delta t) &= \mathbf{x}_i(t) + \Delta t \cdot \mathbf{v}_i(t+\Delta t) \\ \mathbf{v}_i(t+\Delta t) &= v_i(t+\Delta t) \mathbf{e}_i(t+\Delta t) \\ \mathbf{e}_i(t+\Delta t) &= \begin{pmatrix} \cos \alpha_i(t) & -\sin \alpha_i(t) \\ \sin \alpha_i(t) & \cos \alpha_i(t) \end{pmatrix} \mathbf{e}_i(t)\end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{e}_i(t)$ は i 番目の魚の速度方向を示す単位ベクトル、 $\alpha_i(t)$ はタイムステップ Δt の間に進行方向が転回した角度である。距離 r は魚の体長 BL を単位として測る。視覚の場合には、回転角 $\alpha_i(t)$ は、注目した魚 j が上に述べた 4 つの領域のどこにいるかによって決ってくる方向転換した角度 $\beta_{ij}(t)$ と慣性の割合 a とで

$$\alpha_i(t) = (1-a) \cdot \beta_{ij}(t), \quad (0 \leq a \leq 1)$$

のように表されるとする。慣性の効果は、これまでの運動方向を保持し、 $(1-a)$ だけ新しい方向に変わることを表している。

速さ $v_i(t)$

i 番目の魚の速さ $v_i(t)$ は他の魚の分布によらず確率 $p(v)$ で、各時刻 (Δt 間隔) ごとに決める。すなわち、速さは平均速度のまわりにガンマ分布

$$p(v) = \frac{A^K}{\Gamma(K)} \exp(-Av) v^{K-1}$$

をもつ乱数を発生させて、その値を時刻 t における速さ $v_i(t)$ とする。平均速度は

$v=1.2 BL$ (1/sec) とする。定数 K , A の値は, 青木^{3,4}が観測結果の解析から得た値 $K=4$, $A=3.3$ を用いることにする。

Partridge は魚の遊泳において, 各魚はまず目と側線を同時に使って群れの中のすべての魚のスピードを測る。つぎに, 近くの魚の影響を強調する加重平均値に一致するように, 自分のスピードを調整する, と言っている。

我々のモデルでは, スピードは一定にしておくけれども, 運動方向の決め方は結果的にはこの結果と類似したものになっている。

集団行動を記述する指標

集団運動を記述する指標として, 次の3つの量の時間変化を調べる。

1. 空間的広がりを示す量 $\text{expanse}(t)$

重心のまわりの分布の時間的変化を表す量であり, 群れに属するすべての魚の重心からの距離の二乗平均距離であり, 次式で与えられる。

$$\text{expanse}(t) = \sqrt{\frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \{x_i(t) - x_G(t)\}^2}, \quad x_G(t) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} x_i(t)$$

N' は群れに属する魚の数である。

2. 運動方向のバラツキを示す量 $\text{polarity}(t)$

平均的方向のまわりの分布の時間的変化を表す量であり, 群れに属するすべての魚の運動方向の平均からの, 各魚のバラツキの平均値であり, 次式で与える。

$$\text{polarity}(t) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \angle(v_i, \bar{v}), \quad \bar{v} = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} v_i$$

3. 群れの構造の程度を表す指標 $n_{12}(t)$

最隣接魚までの距離と第2隣接魚までの距離の比の平均値の時間的変化を表す量である。

計算結果

以下に, 影響を受ける魚が複数いるとき, その影響の受け方をいろいろ変えてみることによって, 全体的にどのような行動をとるのかシミュレートしてみよう。

シミュレーション 1

各魚が, 各タイムステップで, 自分の最も前方にいる魚にのみ注目して自分の行動を決めるとしたときのシミュレーションの結果を図3(a), (b)に示す。すなわち, 注目

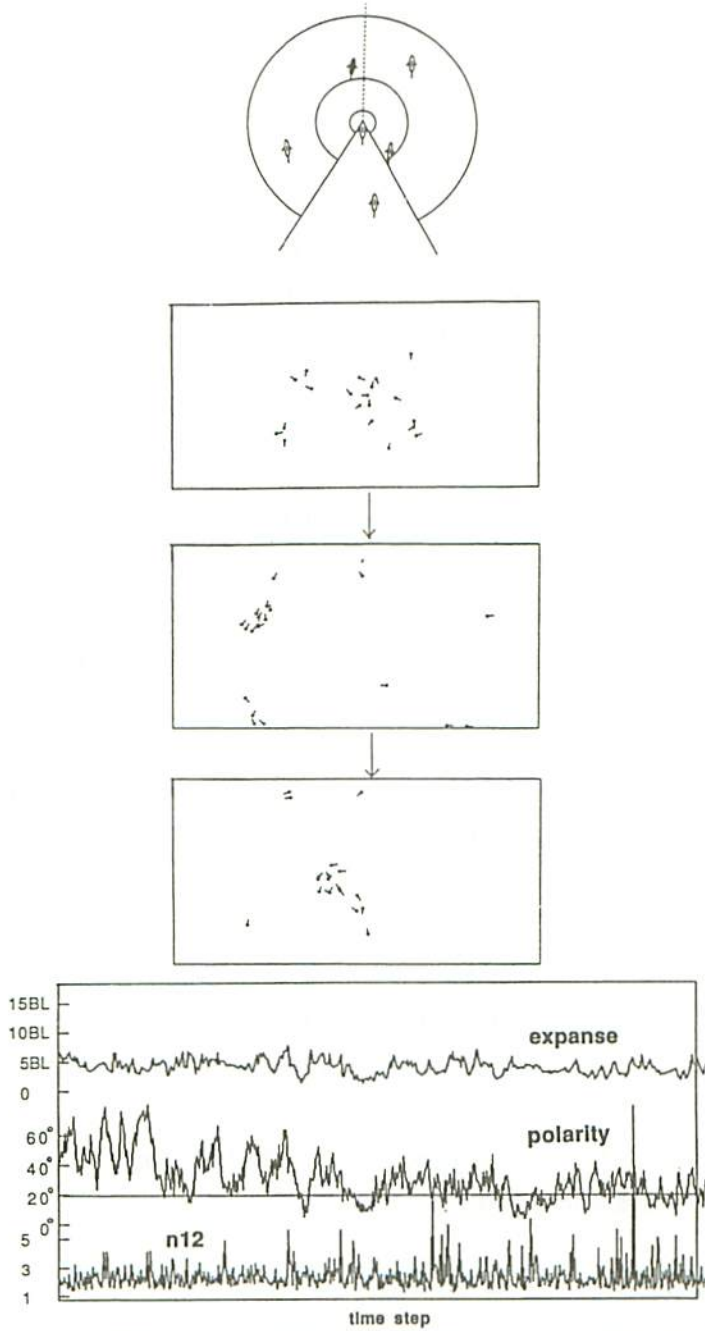


図3 影響を受ける魚が複数いるとき、自分の最も前方にいる魚にのみ注目する場合のシミュレーション

(a) 魚群の形の時間変化

(b) 集団行動を記述する指標 $expand$, $polarity$, n_{12} の時間変化

した魚が前掲の4つの領域のどこにいるかによって進行方向を変えながら泳ぐ場合のシミュレーションである。

集まってはくるが、全体としての方向性ができないため群れはできない。

シミュレーション 2

各魚が、各タイムステップで見える範囲で自分に一番近くにいる魚に注目して自分の行動を決めるとしたときのシミュレーションの結果を図4 (a), (b)に示す。この場合も、集まってはくるが、全体としての方向性ができないため群れはできない。

シミュレーション 3

各魚が、各タイムステップで、見える範囲でランダムに1匹の魚に注目して自分の行動を決めるとしたときのシミュレーションの結果を図5 (a), (b)に示す。ただし、1匹を選ぶ確率は $1/r$ に比例させている。すなわち、近くにいる魚からの寄与は大きく、遠くにいるものからの寄与は小さいとしている。図5 (a)で見られるように、20匹の魚は50ステップほどで、群れを作りはじめ、外的惑乱がなにもなければそのまま群れを保ち続けている。

expand と polarity の時間変化から、魚達は単にかたまっているだけでなく、互いにその方向性もほとんど揃えて泳いでいる、すなわち、群れを作っていることがわかる。すなわち、視覚だけでも群れを形成できることがわかる。

シミュレーション 4

ここでは、視覚を用いず、側線器のみを用いた場合に対応するシミュレーションを行う。すなわち、まわりの魚の速度の重みつき平均（各魚までの距離に反比例させた速度の重みつき平均）に合わせて、そのつど方向を決めるとしたときのシミュレーションの結果を図6 (a), (b)に示す。

側線だけでも群れを作ることがわかる。ただし、側線だけで維持される距離は、視覚だけで維持される距離より大きい。

シミュレーション 5

図7に目と側線器の両方を用いた場合の群行動のシミュレーションの結果を示す。図7 (a)は目の役割が0.1、側線の役割が0.9とした場合、(b)は目の役割が0.3、側線の役割が0.7、(c)は目の役割が0.5、側線の役割が0.5とした場合の結果である。

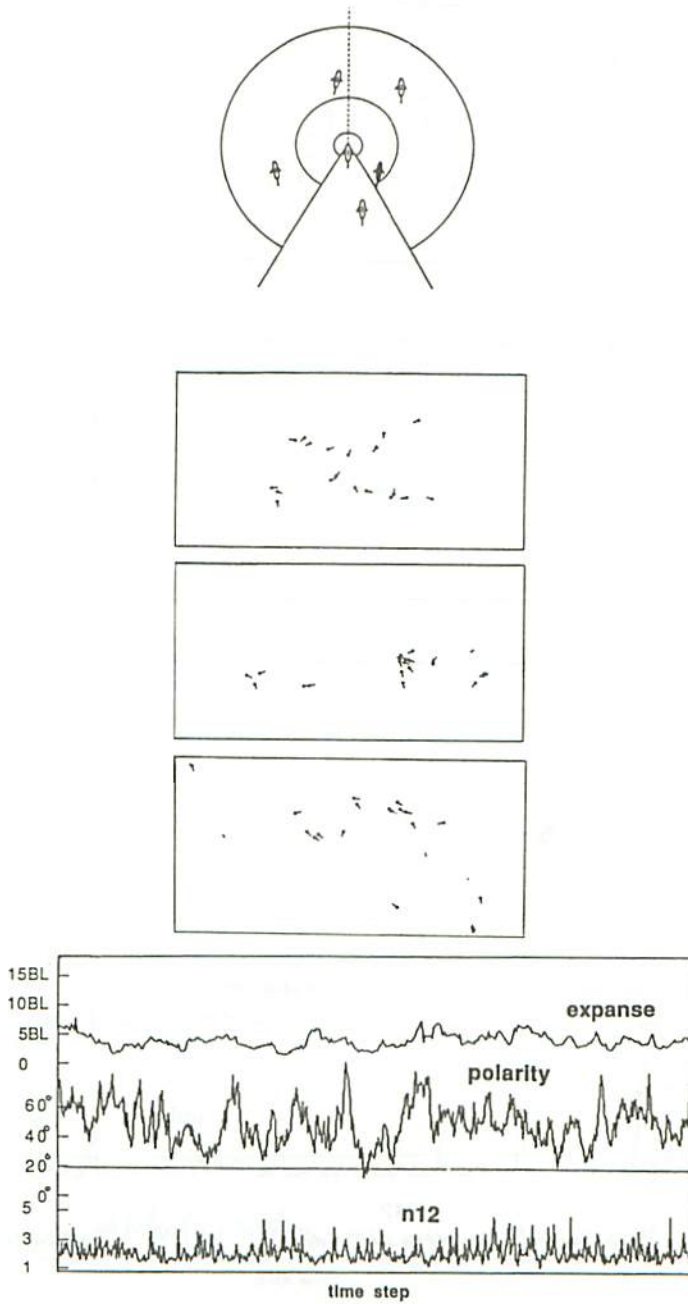


図4 影響を受ける魚が複数いるとき、見える範囲で最も近くにいる魚にのみ注目する場合のシミュレーション

(a) 魚群の形の時間変化

(b) 集団行動を記述する指標 $expanse$, $polarity$, n_{12} の時間変化

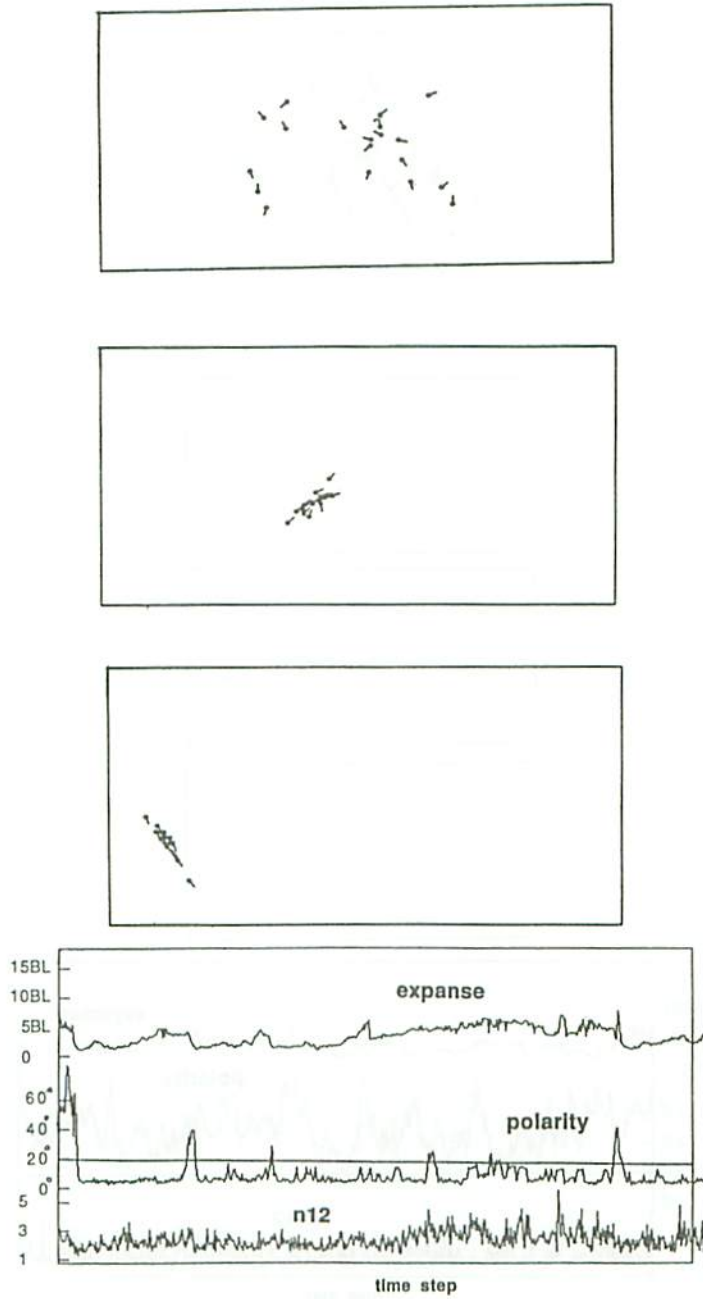


図5 影響を受ける魚が複数いるとき、各タイムステップで、注目する魚を $\frac{1}{r}$ に比例する確率で1匹ピックアップする場合のシミュレーション

(a) 魚群の形の時間変化

(b) 集団行動を記述する指標 *expand*, *polarity*, n_{12} の時間変化

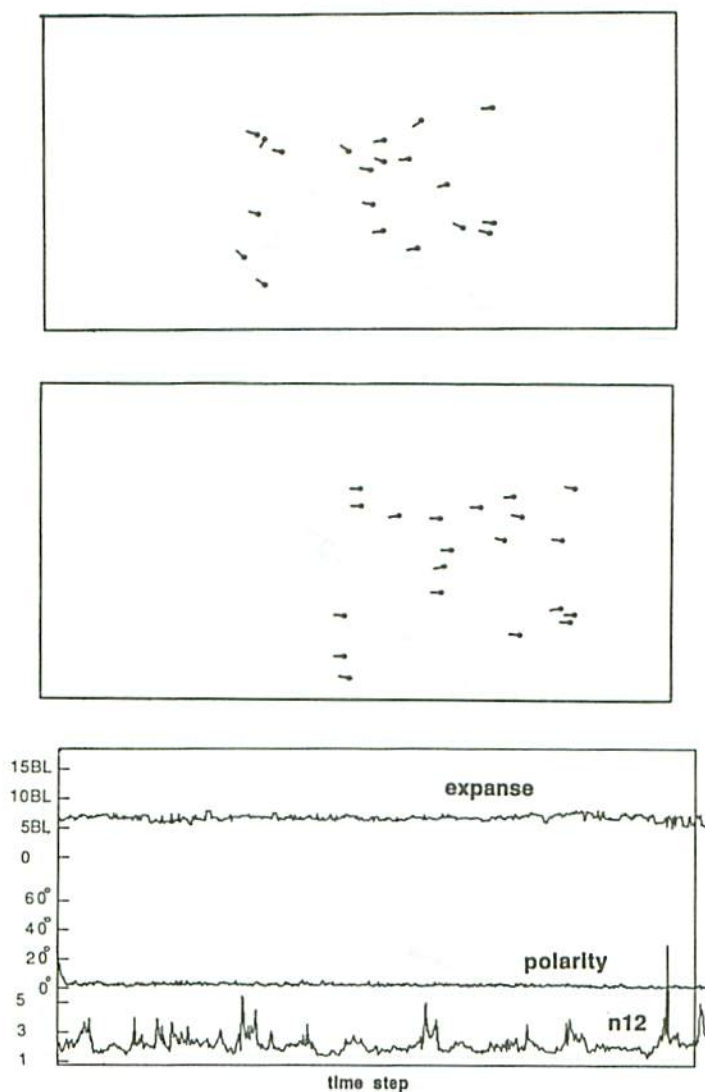


図6 まわりの魚の速度の重み付き平均に合わせて方向を決める場合のシミュレーション
 (a) 魚群の形の時間変化
 (b) 集団行動を記述する指標 $expand$, $polarity$, n_{12} の時間変化

目の役割が増すにつれて、群れが密になってくることがわかる。

まとめ

このモデルでは2体間の相互作用の他に側線を用いるグローバルな相互作用も考えた。

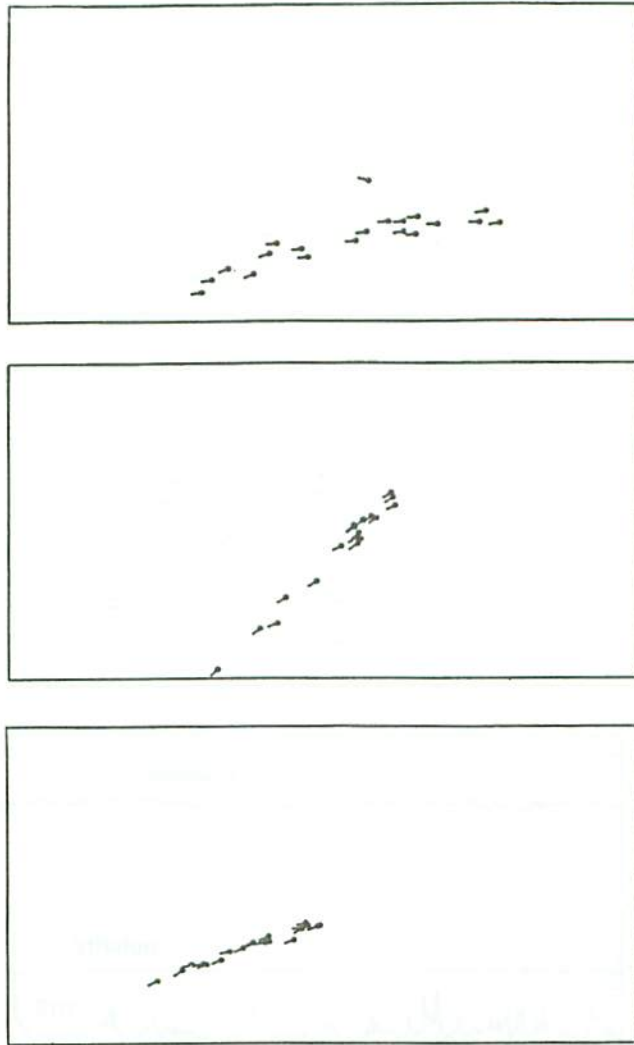


図7 目と側線の両方を用いたシミュレーション
 (a) 目の役割 0.1, 側線の役割 0.9
 (b) 目の役割 0.3, 側線の役割 0.7
 (c) 目の役割 0.5, 側線の役割 0.5

シミュレーションの結果から、目だけでも群れを形成することができた。また、側線だけでも群れが形成できた。そして、側線のみを用いたの方が、視覚のみの場合に較べて、最隣接間距離が大きくなる。すなわち、群れが膨らんでいる。これは、はじめにも述べたように、目だけで維持される距離は、側線だけで維持される距離よりも小さ

い、という観測事実と符合している。

群れを形成する魚では、危険が近づくと群れがキュッと縮まることが知られている。我々のモデルでは、このことは次のように解釈できる。すなわち、通常、魚は主として側線を用いたグローバルなもので悠々と泳いでいるが、危険が近づくと、目の役割が増すことによって群れがしまってくる。

今後の課題

1. 魚の群形成は、自己組織的臨界現象であることを確かめる。
2. 岩や捕食者を加えて、魚群の行動をシミュレートする。
3. 目による制御と側線による制御の割合を自動的に行わせるようにする。

参考文献

- 1) B.L. Partridge and T.J. Pitcher: *J. Comparative Physiol.*, 135('80)315-325.
- 2) B.L. Partridge: サイエンス 1982年8月号 28-38.
- 3) I. Aoki: *Bull. Ocean Res. Inst. Univ. Tokyo*, 12('80)1-65.
- 4) I. Aoki: *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, 48('82)1081-8.