

走化性による集団追跡と逃避のモデル

Group Chase and Escape with Chemotaxis

大澤智興 (Chikoo Oosawa)

九州工業大学 情報工学部 物理情報工学科

E-mail: chikoo@phys.kyutech.ac.jp

キーワード: 走化性、集団的な追跡と逃避、非マルコフ性、自己駆動粒子、
対数正規分布、クオラムセンシング

1 序論

Boid[1] や Vicsek[2] モデルだけでなく、自動車や歩行者などの自己駆動粒子系のモデルでは、構成要素であるエージェントはお互いの距離や方向が、電磁波 (光) や音波などを用いて計測できることを前提とし、その結果をもとに移動している。しかし、微生物や体内の自然免疫の細胞などは、走化性と呼ばれる拡散を介した化学物質のやりとりを信号として用いており、信号の伝播速度は、電磁波や音波に比べて遅れて伝わるだけでなく、方向や距離も不明確である。このような走化性エージェント集団に、自然免疫細胞系のように追跡 (捕食, 食細胞など)-逃避 (被食, 病原体など) 関係を導入した数理モデルを提案する [3]。

2 数理モデル

本モデルにおける各エージェントは、2次元格子上を確率的に移動する [4, 5] が、追跡者 (C) と逃避者 (T) を実現するために、

$$p_C \propto \exp(k_{C \leftarrow C} \cdot I_{x,y}^C) \cdot \exp(k_{C \leftarrow T} \cdot I_{x,y}^T) \quad (1)$$

$$p_T \propto \exp(k_{T \leftarrow T} \cdot I_{x,y}^T) \cdot \exp(k_{T \leftarrow C} \cdot I_{x,y}^C) \quad (2)$$

で表現されるソフトマックス関数に従って2次元格子上を移動する。ただし、追跡者 (C) と逃避者 (T) が存在した場所に異なる化学物質を分泌し、これが足跡となってそれぞれの濃度場 ($C_{x,y}, T_{x,y}$) を形成する。これら化学物質の強度 ($I_{x,y}$) は、タイムステップ毎に追跡者 (C) と逃避者 (T) から式 (3) に従って放出 ($f_p > 0$) され、さらに、式 (4) と (5)

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t) + f_p \quad (3)$$

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t)(1 - \delta) \quad (4)$$

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t)(1 - \alpha) - \frac{\alpha}{4}[I_{x+1,y}(t) + I_{x-1,y}(t) + I_{x,y+1}(t) + I_{x,y-1}(t)] \quad (5)$$

に従って、分解 (や昇華)、拡散が生じ、濃度場 ($I_{x,y}^C, I_{x,y}^T$) の強度は、時間的空間的に変化する。

3 $k_{X \leftarrow X}$ 依存性

ここで、簡単のため単一の追跡者 (C) のみの行動を考えると、式 (1) や式 (2) は、

$$p_C \propto \exp(k_{C \leftarrow C} \cdot I_{x,y}^C) \quad (6)$$

と単純になる。

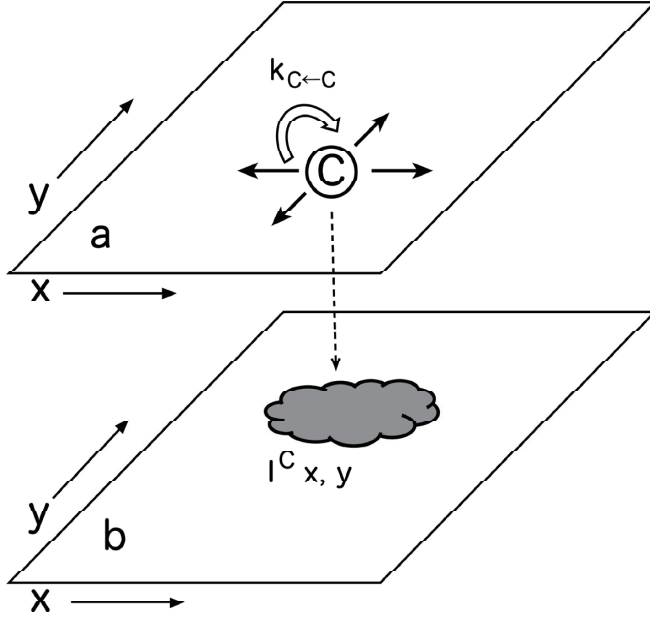


図 1: 単体のエージェントモデルの実装 a(上): エージェントは、二次元格子上的矢印で示された4方向に移動可能で、その移動方向は、式 (6) で確率的に決まる。白抜きの矢印は、エージェントに対する $I_{x,y}^C$ の影響を示す。 $k_{C \leftarrow C}$ は、その影響の程度を決めるパラメタである。b(下): $I_{x,y}^C$ は、式 (3) から (5) に従って形成される濃度場の強度である。

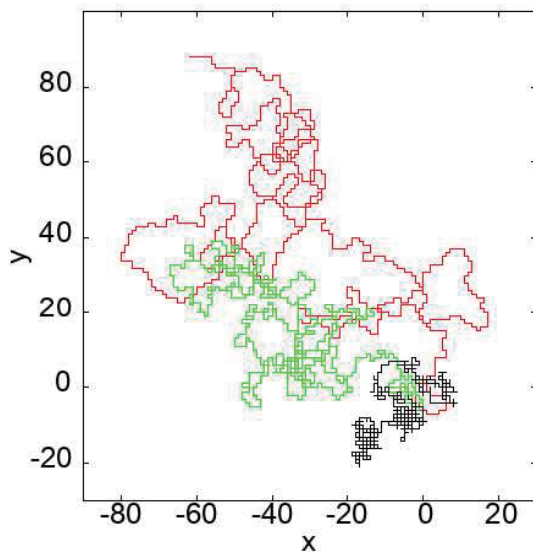


図 2: 軌道の例: 式 (6) において、異なる $k_{C←C}$ から得れた軌道を示す。赤: $k_{C←C}=-5.0$, 緑: $k_{C←C}=-1.0$, 黒: $k_{C←C}=0.0$ である。時刻 $t = 0$ において、エージェントは原点 $(0, 0)$ から移動を開始した。 $t = 1000$ までの軌道を示している。式 (3) から (5) の条件は、 $f_p = 5$, $\alpha = 0.5$, $\delta = 0.1$ である。 $k_{C←C}=0.0$ (黒) は、ランダムウォークに一致する。

ここで、 $k_{C←C} < 0$ では、自らのエージェントの足跡に対して、負の走化性となり自らの足跡から遠ざかる方向に移動する確率が増大する。または、エージェントは自らの足跡から斥力の効果を受ける。この効果により、このエージェントは水に浮かべた樟脳粒 [6] のように、その運動は、自己駆動性を獲得 [7, 8, 9] するだけでなく、エージェントが過去に存在した位置に依存するため、非マルコフ性も示し、超拡散 (図 2) だけでなく、 $k_{C←C} > 0$ の場合には、準拡散もみられた [10]。

4 $k_{X←Y}$ 依存性

追跡者 (C) と逃避者 (T) が共存する場合では、式 (1) 中の $k_{C←T} > 0$ とすることで、正の走化性となり、追跡者 (C) は逃避者 (T) の濃度場 $I_{x,y}^T$ の大きい方向に移動する確率が増大する。さらに、式 (2) 中の $k_{T←C} < 0$ とすることで、負の走化性となり、逃避者 (T) は追跡者 (C) の濃度場 $I_{x,y}^C$ の小さい方向に移動する確率が増大する。これらの走化性による局所相互作用により集団追跡と逃避が成立する [11, 12], (図 3)。

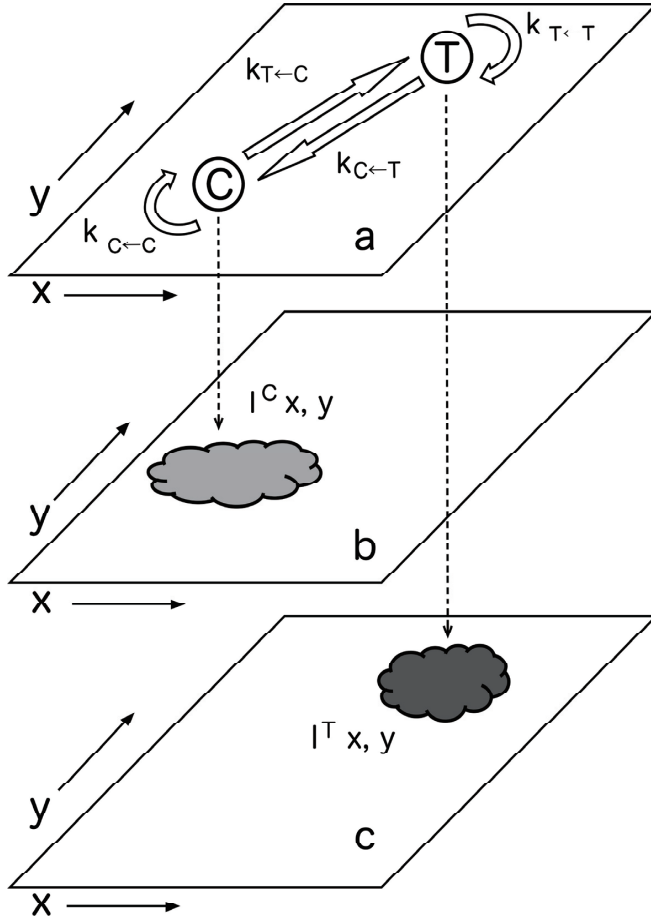


図 3: 追跡-逃避モデルの実装:a(上): エージェントレイヤー、これらエージェントの移動ルールは、式 (1),(2) に示した。白抜きの矢印は、エージェントに対する $I_{x,y}$ の影響を示す。 $k_{X \leftarrow X}$ は、その影響の程度を決めるパラメタである。b,c(中段、下段): $I_{x,y}$ は、式 (3) から (5) に従って形成される濃度場の強度である。

5 計算条件

各ステップ内で、全ての追跡者 (C) と逃避者 (T) の位置は、ランダムアップデートされる。追跡者 (C) が逃避者 (T) に追いつくと、逃避者 (T) は捕食され消滅する。従って、追跡者数は一定であるが、逃避者数が時間的に減少する。また、同種のエージェント間では、捕食は起こらず、排除体積効果により各エージェントは、同じ場所に複数のエージェントが存在できないため、移動できない (図 4)。

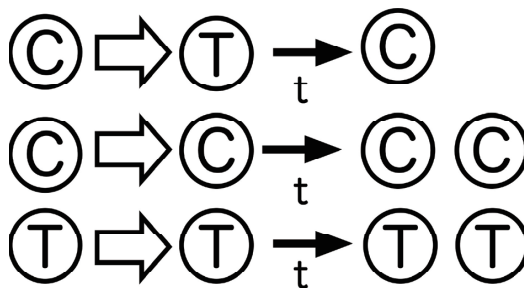


図 4: 逃避者 (T) は、追跡者 (C) に追いつかれると捕食され消える (上)。その一方同種のエージェント間では、排除堆積効果のため移動できない。

計算条件は、 100×100 の周期的境界条件下で、式 (1),(2) 中の $k_{X \leftarrow X}$ (表 1) や式 (5) 中の拡散係数に対応する α 、初期逃避者の数を変更して行った。

表 1: 式 (1) と式 (2) 中の $k_{X \leftarrow X}$ の計算条件：正では $I_{x,y}$ の大きいほうに、負では $I_{x,y}$ の小さいほうに移動する確率が増大する。 $k_{X \leftarrow X} = 0$ では、 $I_{x,y}$ に依存しなくなる。

	斥力	引力
$k_{T \leftarrow T}$	-5	5
$k_{C \leftarrow C}$	-5	0

計算は、逃避者数が 0 になるまでの所要タイムステップ数を求めた。さらに、各々の条件下で、所要タイムステップ数を 10^4 回ランダムなエージェントの初期配置から求めた。

6 結果と考察

図 5 に、 30×30 で、初期エージェント数 $(N_C, N_T) = (10, 1)$ 例を示す。クラスターや群れなどのエージェントの集団の目立った構造は見られなかったが、各エージェントの進行方向とは逆方向に伸びる尻状の濃度分布をみることができる。

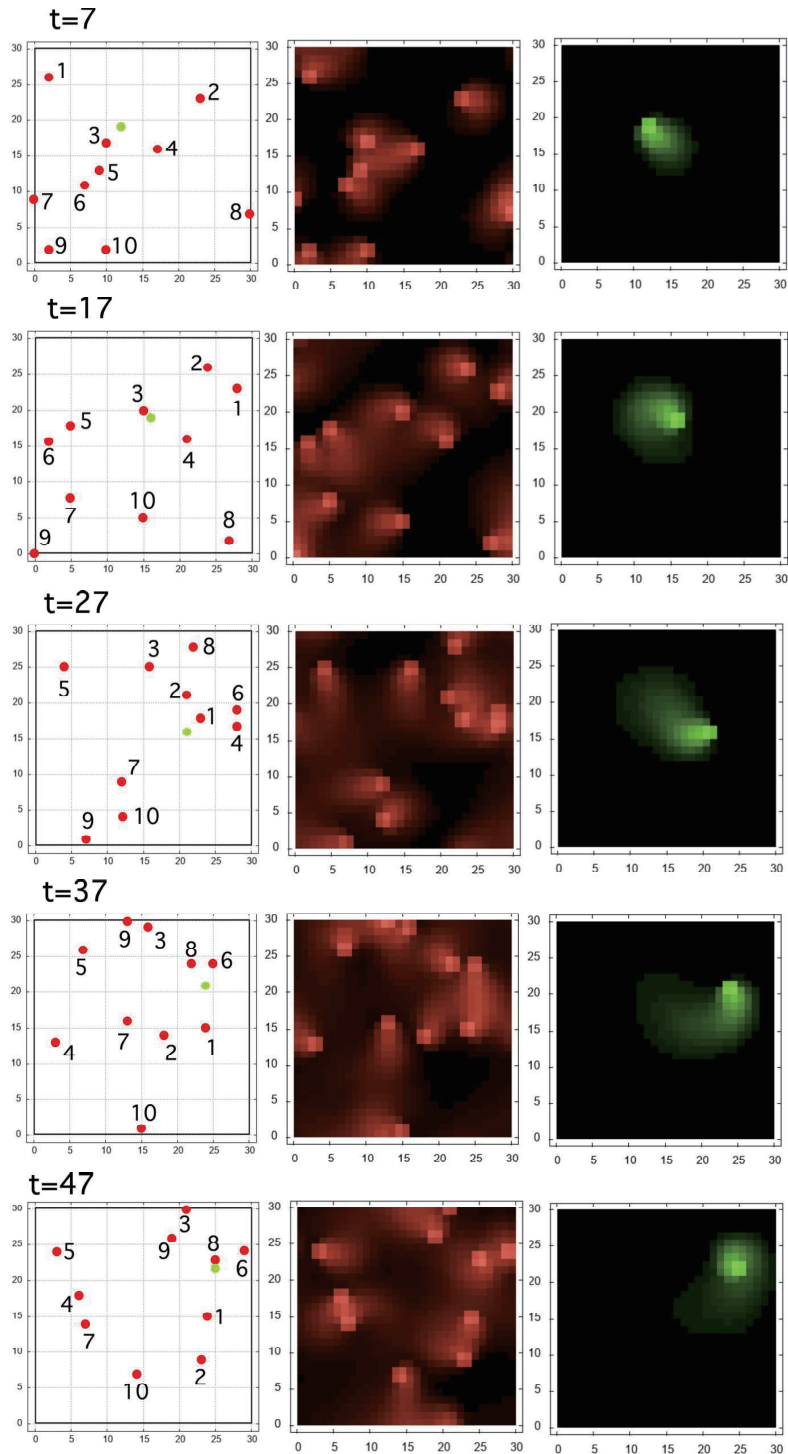


図 5: 計算結果の例：上からそれぞれの時刻 t におけるエージェントの位置 (左列) と $I^C_{x,y}$ (中央)、 $I^T_{x,y}$ (右列) を示す。赤や緑が濃い場所ほど $I^C_{x,y}$ や $I^T_{x,y}$ が高いことを示している。図中の異なる数値は、異なるエージェントと示す。 $t = 48$ で、逃避者 (緑) は、8 番の追跡者に捕食された (動画 [13])。

逃避者 (T) 数が 0 になるまでの所要タイムステップ数の頻度分布の形状は、対数正規分布に近くなった (図 6)[11, 12]。表 2 に示す各条件からの分布から中央値を求めて比較すると、追跡者と逃避者の行動戦略をみることができた。

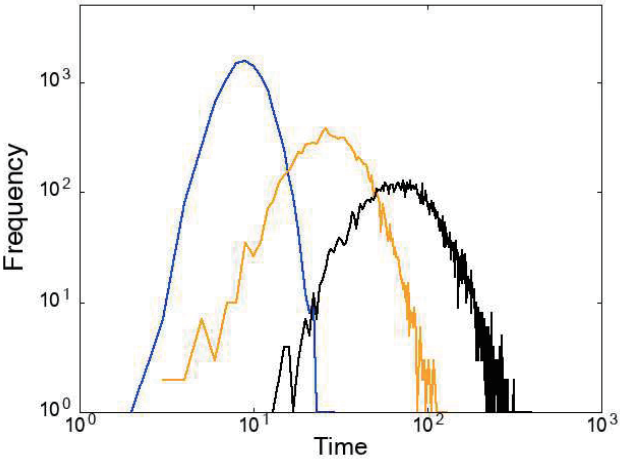


図 6: 所要ステップ数の分布：横軸=逃避者数が 0 になるまでの所要ステップ数、縦軸= 10^4 回中の出現頻度を示す。初期エージェント数 $(N_C, N_T) = (500, 10)$ 、青は、 $k_{C \leftarrow C} = -5$ かつ $k_{T \leftarrow T} = 5$ の条件。オレンジは、 $k_{C \leftarrow C} = 0$ かつ $k_{T \leftarrow T} = -5$ の条件。黒は、 $k_{C \leftarrow C} = 0$ かつ $k_{T \leftarrow T} = 0$ つまり逃避者と追跡者が共にランダムウォークの条件の結果を示している。

表 2: 初期エージェント数 $(N_C, N_T) = (100, 10)$ の場合の結果：値は中央値を示す。RW 条件の中央値は、486 となった。他の初期エージェント数の結果は、[3] 参照。

$k_{X \leftarrow X}$		$k_{T \leftarrow T}$		
		-5	0	5
$k_{C \leftarrow C}$	0	174	98	87
	-5	75	51	36

具体的には、追跡者にとっては、所要ステップ数が、短い方が捕食に対して良い行動戦略である。その一方、逃避者にとっては、所要ステップ数が、長い方が良い生存戦略である。このような行動は、式 (1),(2) 中の $k_{C \leftarrow C} < 0$ 、 $k_{T \leftarrow T} < 0$ でみられた。これは、追跡者、逃避者ともに、図 7 に示すようにお互いに距離を広げたほうが良いということを意味している。これは、実際オオカミや微生物が使っている獲物の捕獲行動に類似している [14, 15]。

交通流の視点では、この条件で同種エージェントの局所的な密度を低下させる効果となり、結果的に渋滞を防いだり、壁を形成しにくくできる。

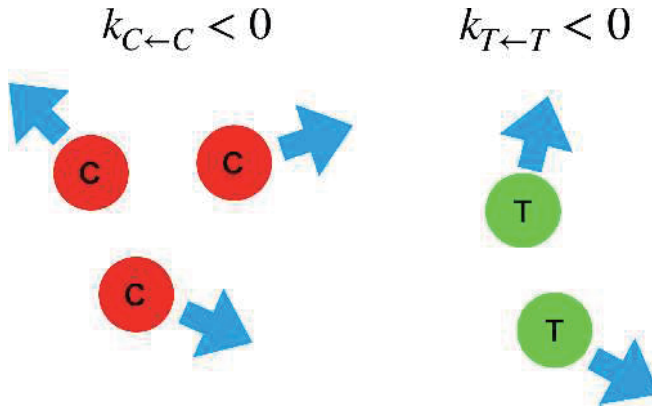


図 7: 追跡者 (C)、逃避者 (T) それぞれにとって、良い戦略は同種間では、集合せずに、なるべく遠くに位置することある。青矢印は、各エージェントの移動方向を示す。

本研究では、モデル駆動的に、種々の条件下で計算を行うことで、エージェント間にクオラムセンシング様のメカニズムが働くことで、群知能として創発する行動戦略を抽出することができた。さらに、この数理モデルを用いて、式 (5) 中の α を変更した場合では、ペクレ数 [16] に相当する値を調節することに相当する [9]。この場合では、 α が小さい場合、つまり拡散係数が小さく、ペクレ数が大きい場合に上記のようなクオラムセンシング様のメカニズムが働かないことを示している [9]。

図 2 に示したように、エージェントの描く軌道は、ランダムウォークから遠く異常拡散を示すため、探索を行うエージェントへも利用できる [17, 18]。さらに、静的フロアフィールド [4, 5] を、足跡やエージェントに適用することで、血管中のように流れのある状況を考慮した計算も行うこともできる。

参考文献

- [1] C. W. Reynolds, “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model,” ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp. 25-34, (1987)
<https://doi.org/10.1145/37402.37406>
- [2] T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen, O. Shochet, “Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles,” Physical Review Letters, Vol.75, No.6, pp. 1226-1229, (1995)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.1226>
- [3] C. Oosawa, “Group Chase and Escape with Chemotaxis” J. Robot. Mechatron., Vol.35 No.4, pp. 918-921, (2023)
<https://doi.org/10.20965/jrm.2023.p0918>
<https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot003500040918/>
- [4] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, J. Zittartz, “Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton” Physica A, Vol.295, pp. 507-525, (2001)

[https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00141-8)

- [5] A. Kirchner, K. Nishinari, and A. Schadschneider, “Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics” *Physical Review E*, Vol.67, Article No.056122, (2003)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.056122>
- [6] M.Nagayama, S.Nakata, Y.Doi,Y.Hayashima, ”A theoretical and experimental study on the unidirectional motion of a camphor disk”,*Physica D* 194,151(2004).
<https://doi.org/10.1016/j.physd.2004.02.003>
- [7] 大澤智興, ”樟脳型自己駆動粒子モデル”, 第26回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集 (2020), “A model of camphor-type self-driven particle” *Proc. of the 26th Symposium on Traffic Flow and Self-driven Particles*, pp. 55-58, 2020.
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/articles/mstf2020-15/>
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/pdf/mstf2020.pdf>
- [8] 大澤智興, ”直鎖状の走化性エージェントモデルの運動性と安定性” 第29回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, pp.17-20 (2023),”Motility and stability of chemotactic agents that chained linearly”, *Proc. of the 29th Symposium on Traffic Flow and Self-driven Particles*, pp. 17-20, (2023)
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/pdf/mstf2023.pdf>
http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/pdf/mstf2023_proceedings.pdf
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/programs/prog2023/>
- [9] C. Oosawa, “Dependence of Peclet Number on agent-based chemotactic predator-prey system”, *Proceedings of The Twenty-Ninth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2024 (AROB 29th 2024)* pp.857-861 (2024).
https://isarob.org/symposium/index.php?main_page=timetable
(調査日:2024年3月24日)
- [10] 大澤智興, ”リカレンスプロットを用いた非マルコフ的に移動するモデル粒子の挙動解析”, 信学技報, vol. 122, no. 280, NLP2022-61, pp. 21-26, 2022年11月.
<https://ken.ieice.org/ken/paper/20221124gCn6/>
- [11] A. Kamimura, T. Ohira, “Group chase and escape” *New J. of Physics*, Vol.12, Article No.053013, (2010)
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/12/5/053013>
- [12] A. Kamimura, T. Ohira, “Group Chase and Escape: Fusion of Pursuits-Escapes and Collective Motions (Theoretical Biology)” Springer, (2019)
- [13] <https://sites.google.com/view/oosawa-lab>
- [14] C. Muro, R. Escobedo, L. Spector, and R. P. Coppinger, “Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations,” *Behavioural Processes*, Vol.88, pp. 192-197 (2011)
<https://doi.org/10.1016/j.beproc.2011.09.006>
- [15] J. E. Berlman and J. R. Kirby, “Deciphering the hunting strategy of a bacterial wolfpack,” *FEMS Microbiology Reviews*, Vol.33, pp. 942- 957, (2009)
<https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2009.00185.x>
- [16] 石本健太, ”微生物流体力学” サイエンス社 (2022).

- [17] 大澤智興, 「2D 平面内における自己回避型エージェントによる探索」 2024 年 情報文化学会九州支部大会 OP-A4
<http://jouhou-bunka.jp/wordpress/wp-content/uploads/2023/12/2024JICSKyushuChapConv.pdf>
- [18] 大澤智興, ”自己回避型エージェントの探索性能”, 日本物理学会 2024 年春季大会講演概要集, p2284, 18pPSL-25 (2024)