

# チスイコウモリの社会形成のシンプルモデル

## A Simple Model of Social Formation in the Vampire Bats

○川村松吉\*, 三上大志\*, 加納 剛史\*, 石黒章夫\*

○ Syokichi Kawamura\*, Taishi Mikami\*, Takeshi Kano\*, Akio Ishiguro\*

\*東北大学

\*Tohoku University

キーワード: チスイコウモリ (Vampire bats), エネルギーシェアリング (Energy sharing),  
サバイバビリティ (Survivability), ネットワークモデル (Network model),

連絡先: 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学 電気通信研究所本館 4 階 M457  
川村松吉, Tel.: 022-217-5465, Fax.: 022-217-5464, E-mail: syokichi@riec.tohoku.ac.jp

### 1. 緒言

生物は、食料源が限られ時々刻々と状況が変化するような、過酷な環境下を生き残るためしばしば群れを形成する<sup>1,2)</sup>。なかでも、群れの一部の個体が他個体のために自ら犠牲を払う利他行動は、群れの維持に寄与していると考えられている<sup>2,3)</sup>。このような利他性が集団の維持にどのように影響するかを深く理解することは、レジリアントな人工システムの構築に資すると期待できる。

本研究では、ナミチスイコウモリ (*Desmodus rotundus*) に着目する<sup>4)</sup>。彼らは、鳥類や哺乳類の血液をエサとする生物で、10 匹前後の群れを形成する生物である<sup>4,5)</sup>。彼らは2日間エサを得られないと死んでしまうか弱い生物であるものの、血縁に関係なく、エサにありつけなかった個体に吐き戻した血液を分け与える (フードシェアリング) ことで、10 年以上も

生き延びることが知られている<sup>4,5)</sup>。このフードシェアリングは誰にでも行われるわけではなく、彼らは毛繕い (グルーミング) によって友好関係のネットワークを築き、その中でのみフードシェアリングを行うことが知られている<sup>5,6,12)</sup>。

これまでに、チスイコウモリの利他性と集団の維持の関係を深く理解するために数理モデリングによる研究も行われてきた<sup>7-11)</sup>。しかしながら、これまでに提案されてきたモデルの多くはグルーミングとフードシェアリングの影響を個別論的に議論したものであり、それらの相互関係がどのように集団の維持に資するか、その本質的なメカニズムは十分に捉えられていなかった。

この問題に取り組むため、筆者らは以前、フードシェアリングとグルーミングによるコミュニティ形成の相互関係を記述したエージェントベースモデルを提案した<sup>13)</sup>。その結果、誰とでも関係を築き、誰

とでもフードシェアリングを行うよりも、実際のチスイコウモリと同様に形成するコミュニティの大きさやフードシェアリングの行いやすさを限定することが、集団の個体数の維持に資することが示された。しかしながら、モデルが複雑であったため、チスイコウモリの社会性についてそれ以上に議論を深化することが困難であった。

そこで本研究では、従来モデルを単純化することにより、集団の維持に資するチスイコウモリの社会性の本質を抽出することを試みる。そのために、位置座標の更新が必要な自己駆動型の従来モデルから位置座標の更新が不要なネットワーク型のモデルへの再構築を行なった。本稿では、提案数理モデルとシミュレーション結果について報告する。

## 2. 数理モデル

本節では、集団の維持に資する本質的なメカニズムの議論を深化させるためのシンプルで抽象的なモデルとして、ネットワークモデルを提案する。ネットワークモデルとは、ノードとエッジで構成されたモデルであり、ノード間はエッジで繋がれている。ノード  $i, j (= 1, 2, \dots, N)$  は満腹度を有しており、ノード  $i$  から  $j$  へ向かうエッジの重み  $w_{ij}$  はノード  $i$  が  $j$  をどれだけ好んでいるかを表す (図 1)。本モデルでは、生物学的知見に基づき、グルーミングやフードシェアリングによってリンクの重みが更新され、コミュニティが形成されているものとみなした。まず、満腹度  $x_i$  についての時間発展式は次のように表される：

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -c_0 + \sum_j f_{ij}(t) + S_i(t). \quad (1)$$

ここで、 $c_0$  は、正の定数で基礎代謝を表す。 $S_i$  は、環境からのエサ摂取による満腹度の変化量を表す。 $f_{ij}$  は、フードシェアリングによる満腹度の変化量を表す項である。本モデルにおいて、フードシェアリングは同時に起こりうるので、総和の形になっている。 $f_{ij}$  は、ノード  $i$  と  $j$  の間でフードシェアリングが行われ

ることによる満腹度の変化を表し、

$$f_{ij}(t) = \begin{cases} \max\{w_{ji}(t)(x_j(t) - x_i(t)) - c_s, 0\} & (x_j(t) - x_i(t) \geq 0) \\ -\max\{w_{ij}(t)(x_i(t) - x_j(t)) - c_s, 0\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

と表される。ただし、 $c_s$  は正の定数である。これは、 $j$  が  $i$  よりも満腹な時に  $j$  から  $i$  に対してエサを与える場合 ((2) 式の上側の式) を考えると、 $j$  から  $i$  への友情度が高いほど、また  $j$  が  $i$  より満腹であるほど、与えるエサ量が大きいことを意味する。また、 $j$  が  $i$  より  $c_s/w_{ji}$  以上満腹である場合のみエサを与えることになる。一方、 $i$  が  $j$  よりも満腹な時に  $i$  から  $j$  に対してエサを与える場合 ((2) 式の下側の式) を考えると、 $i$  から  $j$  への友情度が高いほど、また  $i$  が  $j$  より満腹であるほど、与えるエサ量が大きいことを意味する。また、 $i$  が  $j$  より  $c_s/w_{ij}$  以上満腹である場合のみエサを与えることになる。 $f_{ij}$  は、 $j$  から  $i$  にエサをあげた場合を満腹度の変化量が正、 $i$  から  $j$  にエサをあげた場合を満腹度の変化量が負と定義している。 $c_s$  は、フードシェアリングの起こりにくさを表す重要なパラメータである。(2) 式は、Carter らの行動学的知見をもとに記述しており<sup>14)</sup>、十分に友好関係ができていないコミュニティ内でのみフードシェアリン

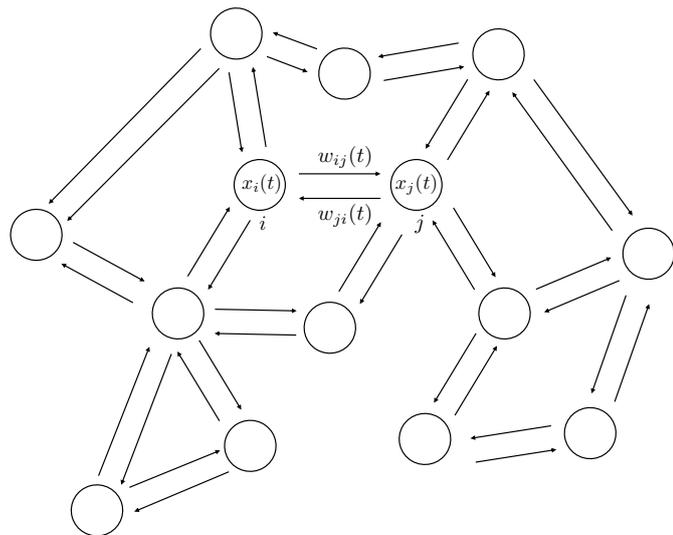


Fig. 1 ネットワークモデル. Network model.

グが起こる様子を表している。

次に、友情度  $w_{ij}$  についての時間発展式は次のように表される：

$$\frac{dw_{ij}(t)}{dt} = -c_1 w_{ij}(t) + c_2 |f_{ij}(t)| + g_{ij}(t). \quad (3)$$

ここで、 $c_1$  は、正の定数で友情度の減衰を表す。 $c_2$  は、正の定数である。つまり、 $c_2 |f_{ij}|$  は、フードシェアリングによる友情度の変化を表す項である。これは、エサの授受量に比例して双方の関係が深まることを表している。 $g_{ij}$  は、グルーミングによる友情度の変化を表し、

$$g_{ij}(t) = c_4 \max\{c_3 - \sum_k w_{ik}(t), 0\} \quad (4)$$

と表される。ただし、 $c_3$  は、正の定数である。 $c_4$  は、正の定数であり、グルーミングによる友情度の変化の度合いを表す。 $\sum_k w_{ik}$  は、コミュニティの大きさを表す。 $c_3$  は、グルーミングが起こりうるコミュニティの大きさを表す重要なパラメータである。(3)式は、Carter らの行動学的知見をもとに記述しており<sup>14)</sup>、コミュニティ ( $\sum_k w_{ik}$ ) が狭いほど、グルーミング頻度を増やす様子を表している。

なお、 $x_i$  が 0 になると、個体  $i$  は死亡したとみなす。すなわち、個体  $i$  のノードと個体  $i$  に繋がる全てのエッジは消滅し、 $x_i$  は 0 のまま変化しなくなる。

### 3. シミュレーション

この節では、シミュレーション条件とシミュレーションによって得られた結果について述べる。

#### 3.1 シミュレーション条件

本シミュレーションでは、満腹度  $x_i$ 、友情度  $w_{ij}$  は (0, 1] の範囲でランダムに初期化する。(1) 式的环境からのエサ摂取による満腹度の変化量  $S_i$  については、各タイムステップに確率  $p_i$  で  $n_{food}$  の量のエサが与えられ、それ以外の場合にはエサが与えられないようにした。ただし、腹の容量を表す満腹度  $x_i$  の限界値  $x_{limit}$  を設けており、それを超えると ( $x_i(t) > x_{limit}$ )

環境から摂取できるエサを意図的に摂取しなくなる。なお、 $p_i$  は (0, 1] の範囲でランダムに初期化する。シミュレーションは、タイムステップサイズを 0.1 秒とし、1 試行あたり 100000 タイムステップ行う。

#### 3.2 シミュレーション結果

シミュレーションにて、フードシェアリングとグルーミングによるコミュニティ形成が集団の維持にどのように影響しているのかを検証した。具体的には、フードシェアリングの起こりにくさ  $c_s$  とグルーミングが起こりうるコミュニティの大きさ  $c_3$  を変化させ、1 試行終了後の生存個体数を 100 試行平均した値で評価を行った。表 1 にシミュレーションで用いたパラメータの値を示す。

図 2 は、シミュレーション結果である。横軸は  $c_s$ 、縦軸は  $c_3$  であり、横軸片対数グラフになっている。ピクセルの色は 100000 タイムステップ後の生存個体数を表しており、生存個体数が少ない方から順に黒-赤-黄-白の連続的な色空間で表される。シミュレーション結果から、フードシェアリングの起こりにくさ  $c_s = 0.0001$  オーダーで小さい時は、 $c_s = 0.001 \sim 0.01$  オーダーで中程度の時に比べて、生存個体数が少なくなった。また、 $c_s = 0.001 \sim 0.01$  オーダーの時、 $c_s$  を大きくしても生存個体数はほとんど変化しなかった。さらに、グルーミングが起こりうるコミュニティの大きさ  $c_3$  を 0~4 の範囲で変化させても生存個体数はほとんど変化しなかった。

Table 1 シミュレーションのパラメータ。Parameters in the simulation.

文字	数値	単位
$N$	10	$[]$
$c_0$	0.0005	$[s^{-1}]$
$c_1$	0.00001	$[s^{-1}]$
$c_2$	0.01	$[]$
$c_4$	0.001	$[s^{-1}]$
$n_{food}$	0.0008	$[s^{-1}]$
$x_{limit}$	1.0	$[]$

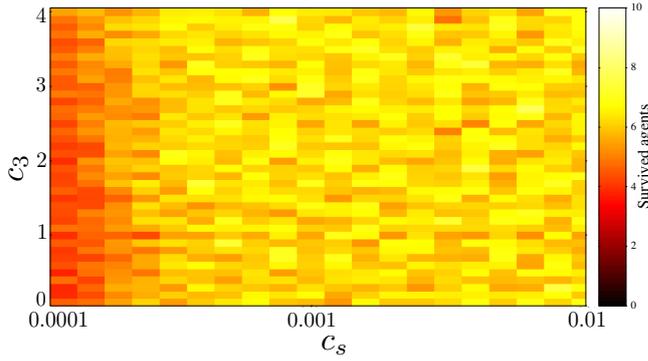


Fig. 2 100000 タイムステップ後の生存個体数のパラメータ依存性. Parameter dependence of the number of survived agents after 100000 time steps.

#### 4. 考察

シミュレーション結果より,  $c_3$  を 0~4 の範囲で変化させても, 生存個体数はほとんど変化しなかった. これは, 友情度  $w_{ij}$  は  $(0, 1]$  の範囲でランダムに初期化するので,  $w_{ij}(0)$  を全個体で平均すると,  $\sum_j w_{ij}(0)/(N-1) \simeq 0.5$  となる. よって, 表 1 のパラメータの場合, (4) 式における初期のコミュニティの大きさ  $\sum_k w_{ik}(0) \simeq (N-1)0.5 = 4.5$  となる. すなわち, 図 2 の  $c_3$  の範囲では  $c_3 < \sum_k w_{ik}(0)$  となるため, そもそも初期にグルーミングが行われず, グルーミングを通じたコミュニティが形成されていないと考えられる.

また,  $c_s = 0.0001$  オーダーで小さい時は,  $c_s = 0.001 \sim 0.01$  オーダーで中程度の時に比べて, 生存個体数が少なくなった. これは,  $c_s = 0.0001$  の場合を考えると, 友情度  $w_{ji}$  又は  $w_{ij}$  に関わらず, フードシェアリングの閾値  $c_s/w_{ji}$  又は  $c_s/w_{ij}$  は 0 に近くなるので, 友好関係の程度に関係なく誰にでもフードシェアリングが行われる. そのため, 全個体の満腹度  $x_i$  がほとんど均質になる ( $x_1 \simeq x_2 \simeq \dots \simeq x_N$ ). (1) 式より全個体の基礎代謝  $c_0$  の総和が環境からのエサ摂取  $S_i$  の総和を上回っている時 ( $Nc_0 > \sum_i S_i(t)$ ),

全個体の満腹度は全て  $(Nc_0 - \sum_i S_i(t))/N$  の速度で減少することになる. また, エサ摂取確率  $p_i$  は  $[0, 1]$  の範囲でランダムに初期化するので,  $p_i$  を全個体で平均すると,  $(\sum_i p_i)/N \simeq 0.5$  となる. すなわち,  $S_i$  を 100000 タイムステップ平均したものの総和は,  $\sum_i S_i(t) \simeq \sum_i (p_i n_{food}) \simeq 0.5 n_{food} N$  となる. したがって, 全個体の満腹度の減少速度は, 表 1 のパラメータの場合,  $(c_0 N - \sum_i S_i(t))/N \simeq c_0 - 0.5 n_{food} \simeq 0.0001$  になるので, シミュレーション時間 10000 秒間で全個体の満腹度  $x_i$  は全ておよそ 1 減少すると考えられる.  $x_i$  は, 最大でも 1 までの範囲で初期化されているため, ほとんどの個体が死亡することが考えられる.

さらに,  $c_s = 0.001 \sim 0.01$  オーダーの時,  $c_s$  を大きくしても生存個体数はほとんど変化しなかった. これは,  $c_s$  を大きくするほど, フードシェアリング頻度は少なくなるものの, 同時に各個体の友好関係も狭くなることで, 友好関係の深い個体全員の環境からのエサ摂取  $S_i$  の総和が基礎代謝  $c_0$  の総和を上回るため, 友好関係の深い個体全員にフードシェアリングが行き届くと考えられる.

#### 5. 結言

本研究では, 従来モデルを単純化することにより, 集団の維持に資するチスイコウモリの社会性の本質を抽出することを目指した. そこで本稿では, 位置座標の更新が必要な自己駆動型の従来モデルから位置座標の更新が不要なネットワーク型のモデルに再構築し, フードシェアリングとグルーミングによるコミュニティ形成が集団の維持にどのように影響しているのかをシミュレーションで検証した. その結果, 各個体が他者に対して高頻度でフードシェアリングを行うと, 生存個体数は少なくなった. これは, 摂取できるエサが少ない場合であっても誰にでもフードシェアリングすることでエサ不足に陥るためである可能性が示唆された. また, 各個体が他者に対して適

度な頻度でフードシェアリングを行うと、生存個体数はほとんど変化しなかった。これは、フードシェアリング頻度の減少に応じて友好関係も狭くなることで、友好関係の深い個体全員にフードシェアリングが行き届くためである可能性が示唆された。

今後は、グルーミングを通じたコミュニティ形成が起こりうるパラメータでシミュレーションを行い、コミュニティ形成に対するグルーミングの役割を検証する予定である。また、個体ごとの友好関係の広さをネットワーク構造から解析することで、集団の維持に対する友好関係の広さの影響を検証する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 国際共同研究加速基金 ( 国際共同研究強化 (B)) 19KK0103 および東北大学 タフ・サイバーフィジカル AI 研究センターからの援助によって行われた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) S. Camazine, J.L. Deneubourg, N.R. Franks, J. Sneyd, E. Bonabeau, G. Theraula: *Self-organization in biological systems*, vol.7, Princeton university press (2003)
- 2) J. Liu, A. Prindle, J. Humphries, M. Gabalda Sagarra, M. Asally, D.L. Dongyeon, S. Ly, J.Garcia-Ojalvo,G.M.Süel: *Nature* **523**(7562), 550 (2015)
- 3) J.M. Graham, A.B. Kao, D.A. Wilhelm, S. Garnier: *Journal of theoretical biology* **435**, 184 (2017)
- 4) A.M. Greenhall: *Natural history of vampire bats*, CRC Press (2018)
- 5) G.S. Wilkinson: *Nature* **308**(5955), 181 (1984)
- 6) G.S. Wilkinson: *Animal Behaviour* **34**(6), 1880 (1986)
- 7) M. Paolucci, R. Conte, G.D. Tosto: *Adaptive Behavior* **14**(3), 223 (2006)
- 8) M. Kubo, H. Sato, T. Matsubara, C. Melhuish: *Artificial Life and Robotics* **14**(2), 168 (2009)
- 9) M. Kubo, H. Sato, T. Matsubara, C. Melhuish: in *SCIS & ISIS*, vol.2008, 1876/1881
- 10) M. Witkowski: *Adaptive Behavior* **15**(3), 307 (2007)
- 11) G. Di Tosto, M. Paolucci, R. Conte: *International Journal of Cooperative Information Systems* **16**(01), 51 (2007)
- 12) G.S. Wilkinson: *Scientific American* **262**(2), 76 (1990)
- 13) T. Mikami, T. Kano, A. Ishiguro: An agent-based model for community formation process of vampire bats that survive by sharing food, *Artificial Life and Robotics* **25**, 561/568 (2020)
- 14) G.G. Carter, D.R. Farine, R.J. Crisp, J.K. Vrtillek, S.P. Ripperger, R.A. Page: *Current Biology* (2020)