

罰し方が協力の進化に与える影響について

中丸 麻由子

東京工業大学大学院 社会理工学研究科

nakamaru.m.aa@m.titech.ac.jp

概要

社会の基盤は協力であるが、協力しない方が得をするために協力を維持することは難しい。ではどのようなメカニズムによって協力が進化してきたのだろうか。本論文では罰行動が協力の進化に及ぼす影響について取り上げる。人は非協力者に対して罰を与えるとき、どのように意思決定をしているのだろうか。相手の協力度合いに応じて段階的に罰の強さを加減しているかもしれない。あるいは、ある閾値を境にして、相手の協力度合いが閾値以上であれば罰を与えないが、閾値以下であると厳しく罰を与えるかもしれない。そして、そのような意思決定が協力の進化に影響を与えると考えられる。そこで、本研究では **adaptive dynamics** による侵入可能性解析や進化シミュレーションを用いて、どのようなタイプの罰の反応関数が協力の進化を促すのか解析を行った。社会ネットワーク構造の影響も調べた。結果は以下の通りである。(1) 格子モデルでは、ある閾値を境にして、相手の協力度合いが閾値以上であれば罰を与えないが、閾値以下であると厳しく罰を与える場合には、協力度合いが高い値へと進化が促進されることがわかった。(2) 完全混合モデルでは、罰が有効に働く状況においては、相手の協力度合いに応じて段階的に罰の強さを加減すると、協力度合いが高い値に進化することを示した。

Strict or graduated punishment?

Effect of punishment strictness on the evolution of cooperation.

Mayuko Nakamaru

Department of Value and Decision Science, Tokyo Institute of Technology

Abstract

Whether or not costly punishment promotes the evolution of cooperation has been investigated not only in evolutionary biology but also in other research fields such as mathematical sciences and social sciences. The previous theoretical studies assume that each player chooses either cooperation or defection and either punishment or non-punishment; one reason is to make a simple mathematical model. In reality, different players have different cooperation level and decide how to punish others according to their cooperation level. For example, some players punish opponents strictly if their cooperation level is lower than the threshold and they do not, otherwise. Some players impose gradual punishment proportional to the opponent's cooperation level on the opponent. The former is called

strict punishment and the latter is called graduate punishment. We investigate which punishment promotes the evolution of cooperation level in the complete mixing population or in the lattice structured population, by means of adaptive dynamics and computer simulations. The results are (1) strict punishment promotes the evolution of cooperation level and both coevolve in the lattice structured population, and (2) graduate punishment promotes the evolution of cooperation level and both coevolve in the complete mixing population under the condition that punishment helps cooperators invade the population occupied by defectors.

1. はじめに

社会の基盤は協力であるが、囚人のジレンマゲームや公共財ゲームが示すように、協力しない方が得をするために協力を維持することは難しい。しかし、なぜ人は協力をするのだろうか。これは進化生態学の観点からも大きな問題であり、他の自然科学や社会科学においても扱われる学際的な研究テーマである。協力の進化を促進させるためのメカニズムとして血縁淘汰、群淘汰、直接互惠性、間接互惠性、ネットワークからの影響、罰行動等が相互に理論・実験・実証研究をフィードバックしながら研究が行われている[17, 18]。

本論文では罰行動と協力行動の共進化について扱う。世の中を見ていると、逸脱者に対する罰が実行されている。広義の罰行動は、悪い噂を流したり[11]、繰り返し囚人のジレンマゲームにおいてしっぺ返しをしたり[2]、村八分にすること[15]が含まれる。ここでは、罰を与えられる側も与える側もコストがかかる狭義の罰を考える。この場合、罰された側がコストを被るため、罰自身は進化しない。では、どのようなメカニズムが罰の進化を促

進するのだろうか？例えば感情に着目した議論がある[7]。コスト・ベネフィットのみを考えると自分に対して盗みを働いた人を訴訟するのは時間や金銭の損となるために訴えることをしない。しかし、そういう判断をしていると、泥棒が謳歌してしまう。そこで怒りの感情にまかせて、時間的・金銭的成本がかかったとしても訴えるのである。この感情が盗みを防ぐ役割をはたしているという。この様な感情と罰の関係に着目して罰の進化を捉えるというのも一つの方法だろう。

他の観点からの研究もある。協力者が非協力者に対して罰を行うというものである。もし罰実行者が協力者であるなら、他の協力者と協力関係となり、罰実行にかかるコストを穴埋めすることが出来るのだ。それによって協力と罰が進化すると考えられる。そこで様々な理論・実験研究が行われてきた[1, 23, 21, 6, 3]。社会ネットワーク構造や戦略更新ルールが罰と協力の進化に影響していることも示された[4, 12, 13]。

理論的には非協力者に罰をする非協力者、協力者への罰（反社会的な罰）という戦略を考えることも出来る。その上で協力と非協力

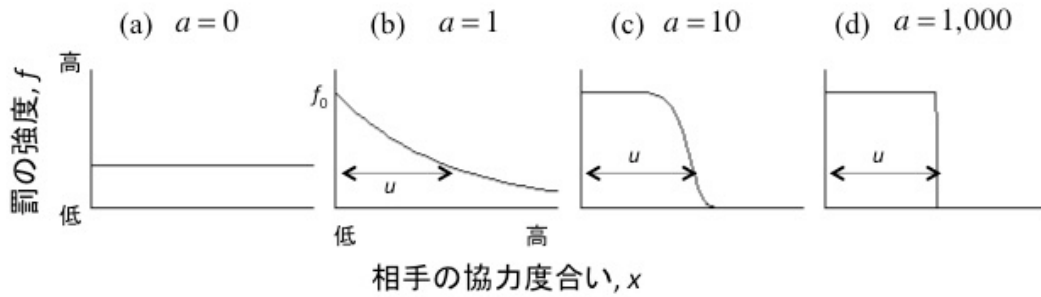


図1 罰に関する意思決定関数

者への罰行動の共進化がどのような条件によって可能かどうかの研究も進んでいる[19, 9]。16カ国での実験によって、civic cooperation の低い国では非協力者への罰に加えて反社会的罰が観察されるが、civic cooperation の高い国では反社会的罰はあまり観察されなかったという研究もある[8]。また、制度として罰を行う機構（警察など）を人は作り上げてきたという観点の研究も進んでいる[22]。

理論の先行研究では、協力する／協力しない、罰する／罰しないという戦略を仮定した。これは数学的に取り扱いが容易くなるというメリットがある。一方で人は協力する・しないではなく、協力度合いがある。また、罰についても厳しい罰を与える場合もあれば、そうではない罰を与えることもある。そして罰の与え方は相手の協力度合いに依存しているだろう。例えば、相手の協力度合いに応じて段階的に罰の強さを加減しているかもしれない。あるいは、ある閾値を境にして、相手の協力度合いが閾値以上であれば罰をしないが、閾値以下であると厳しく罰を与えるかもしれない。つまり、協力度合いを導入することで、罰の与え方についての意思決定

に関する研究が可能となるのだ。

そこで本論文では筆者の研究である罰の意思決定に関する進化ゲーム研究を紹介する[14, 20]。

2. モデル (1)

Nakamaru and Dieckmann (2009)のモデルを紹介する[14]。プレイヤー i は協力度合い ($x_i; x_i \geq 0$)、罰の強度 ($f_i; f_i \geq 0$)、罰の判断の閾値 ($u_i; u_i \geq 0$) そして罰反応関数 ($a_i; a_i \geq 0$) の4つの進化形質を持つ。この研究では空間構造がある場合 (格子モデル) と空間構造がない場合 (完全混合モデル) の2つの社会ネットワーク構造を仮定している。まずは空間構造のあるモデルを例にしてモデルを説明する。格子モデル上の各格子点上にプレイヤーが1人いる場合とプレイヤーがいない空格子点を考える。プレイヤーは最隣接格子点上のプレイヤーと社会的相互作用を行う。つまり、プレイヤー i は x_i の協力度合いでプレイヤー j に協力する。このとき協力コストは $C_1(x_i) = \kappa_1 x_i^{\beta_1}$ とする。次にプレイヤー j はプレイヤー i の協力度合いに応じて、プレイヤー i に罰をするかしないか、す

(a) 罰が進化しない時 ($f = 0$)



⊖ 格子効果で、協力が進化
○ 罰効果で、協力が進化

(b) 罰も進化する時

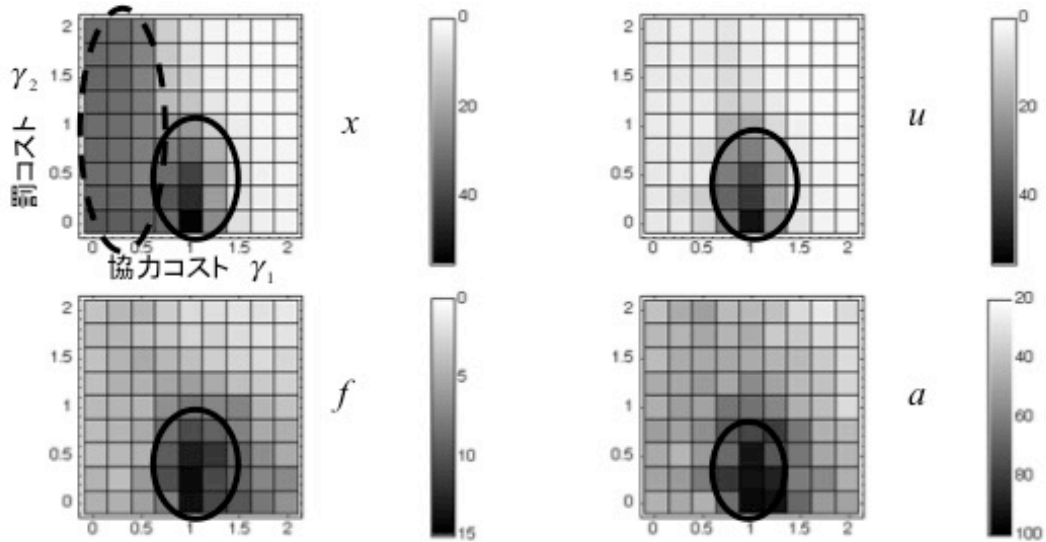


図2 Nakamaru and Dieckmann (2009) の結果

る場合はどのくらいの罰を科すか意思決定を行う。この意思決定は以下の関数型

$$F_j(x_i) = f_j \exp\left[-1 \times (x_i/u_j)^{a_j}\right] \quad (1)$$

に従うとする (図1)。この関数型に進化形質が含まれる。 a の値によって関数型が決まる。図1 a は $a = 0$ の時、つまり協力度合いによらずに一律に罰を与えるという意思決定をしめし、図1 b は段階的罰を示す ($a = 1$)。図1 c、d はステップタイプの罰関数を示す ($a = 10, 1000$)。 $F_j(x_i)$ がプレイヤー i が被る罰コストとなる。罰を実行したプレイヤー j にかかるコストは $C_2(f) = \kappa_1 F^{\eta_1}$ とする。た

だし、 $F_j(x_i) = F$ である。このモデルでは、相互作用の相手からの協力度合いの平均値によって増殖率が決まり、隣接の空格子にその増殖率に従って子どもを産むとする。子どもは基本的には親の形質を受け継ぐが、突然変異によって親とは異なる形質を受け継ぐとする。各個体に協力コスト、罰実行コスト、相手からの罰によるコストは各個体の死亡率に影響するとする。

完全混合モデルでは、ランダムに出会った2人のプレイヤーが上記の社会的相互作用を行い、子孫もランダムに見つけた空格子点に産むとする。

このモデルを解析した。完全混合モデルでは **adaptive dynamics** を用いて数理モデル化を行い[5]、協力と罰の共進化が起こらないことを示した。空間構造のあるモデルはエージェントベースシミュレーションを行った。様々な研究から空間構造によって協力度合いは進化することがわかっている。つまり、罰の影響によって協力度合いが高くなったのか、それとも空間構造によって協力度合いが高くなったのかを区別する必要がある。図 2 a は協力度合いのみが進化形質であるときの協力コストのパラメータ (γ_1) と協力度合いの関係を示している。 $\gamma_1 < 1$ のとき、つまり、協力度合いが高くなってもコストがあまりかからない状況において、空間構造の影響によって協力度合いは高い値に進化することがわかる。図 2 b は協力コストと罰コストのパラメータ (γ_1, γ_2) と 4 つの進化形質の関係を示している。この結果より、 $\gamma_1 < 1$ のときにも協力度合いは高い値になっているが、罰の強度 (f)、罰の判断の閾値 (u)、そして罰反応関数 (a) は低い値のままである。 $\gamma_1 = 1$ 前後であり $\gamma_2 < 1$ では協力度合いが一番高い値に進化し、このとき罰の強度 (f)、罰の判断の閾値 (u)、そして罰反応関数 (a) は高い値となっている。つまり、罰の影響によって協力度合いが高い値に進化するパラメータ範囲も存在し、そのとき、高い a 値、つまりステップタイプの罰反応関数(図 1 a)に進化するのだ。

Nakamaru and Dieckmann (2009)では図 1 a のステップタイプの罰と協力の共進化が見られたが、図 1 b のような段階的罰と協力の共進化は生じなかった[14]。なぜであろうか。空間構造のあるモデルでは、隣接するプレイヤーは同じようなタイプの進化形

質となる。すると、隣接プレイヤーの協力度合いが自分の罰判断の閾値より高いと、罰を全く与えないのでコストもかからない。閾値より少しでも低い値であると、厳しく罰を与えることになる。これによって協力が促進されると考えられる。一方、段階的な罰では、協力度合いを下げたとしても罰からのダメージは図 1 a のように突然大きく高くなることはないため、どんどん協力度合いを下げる方向に進むと考えられる。

段階的な罰と協力が共進化することはないのであろうか?そこで、Shimao and Nakamaru (2013)ではモデルの設定を変えて解析を行った[20]。

3. モデル (2)

Shimao and Nakamaru (2013)のモデルを説明する[20]。プレイヤー i は協力度合い ($x_i; 1 \geq x_i \geq 0$)、罰の強度 ($f_i; 1 \geq f_i \geq 0$)、罰の判断の閾値 ($u_i; 1 \geq u_i \geq 0$)、そして罰反応関数 ($a_i; a_i \geq 0$) の 4 つの進化形質を持つ。この研究でも空間構造がある場合(格子モデル)と空間構造のない場合(完全混合モデル)の 2 つの社会ネットワーク構造を仮定している。まずは空間構造のあるモデルを例にしてモデルを説明する。格子モデル上の各格子点上にプレイヤーが 1 人ずつ配置されているとする。空格子点は無い。各プレイヤーは隣接する 3 人と公共財ゲームを行う。公共財ゲームでは、各プレイヤーは 4 つの 4 人グループのメンバーとなっている。各グループでは 4 人がそれぞれ各自の協力度合いに応じて公共財へ投資を行う。投資額の和に利子率 r を乗じた値を均等配分する。各プレイヤー (j とする) は他のメンバー (i とする) の協力

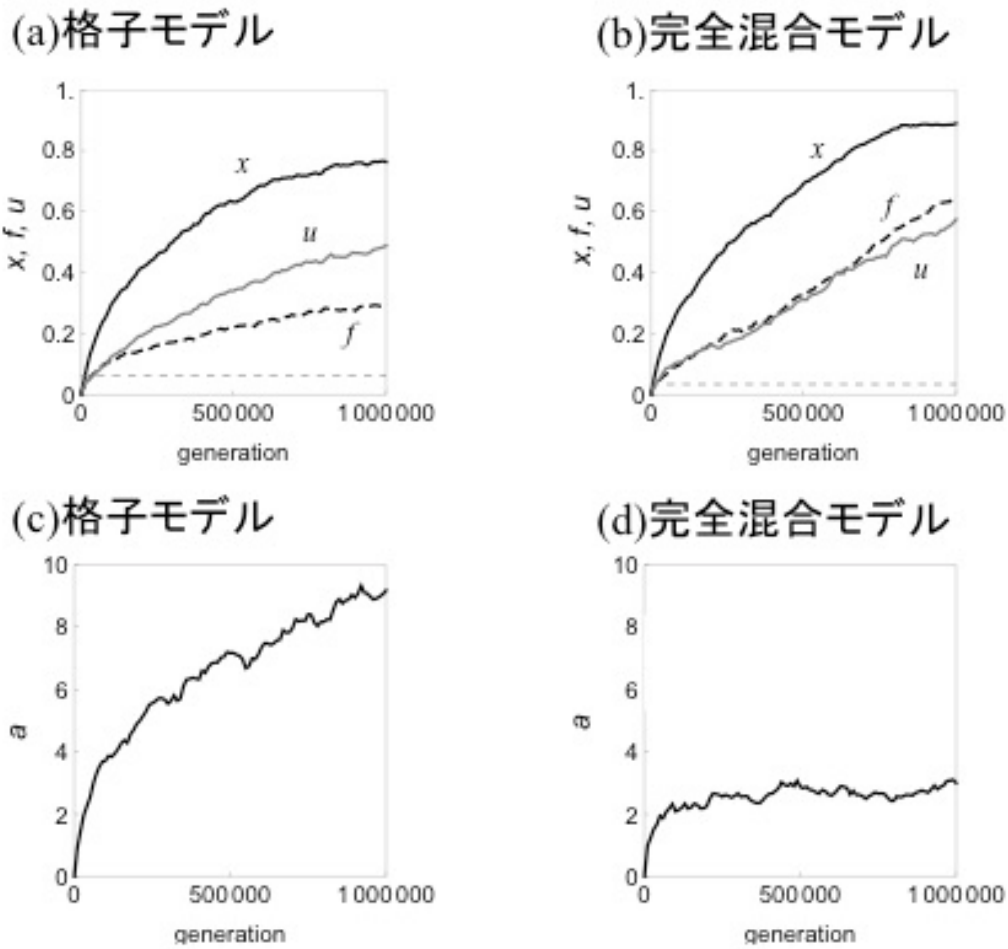


図3 Shimao and Nakamaru (2013) の結果

度合いをもとに、式 (1) の意思決定に従ってそれぞれのプレイヤーに罰をするかどうかを決める。プレイヤー j は $F_j(x_i)$ の罰コストを払ってプレイヤー i に罰をして $\beta F_j(x_i)$ のダメージを与えるとする。公共財ゲームの利得からプレイヤーの罰コストやダメージを引いた値が利得となる。この利得に従って死亡率が決まる。死亡した場合は空格子点となるが、隣接するプレイヤーがランダムに選ばれて子どもを産むとする。子どもは基本的には親の形質を受け継ぐが、突然変異によって親とは異なる形質を受け継ぐとする。空間構造が無い場合は、ランダムに選ばれたメン

バーで公共財ゲームを行い、死亡後の空格子点には集団全体からランダムに選ばれたプレイヤーが子どもを産むとする。

モデル設定の細部は Nakamaru and Dieckmann (2009)[14] とは若干異なる。この中で最も重要な点は、戦略の更新ルールを変えたことである。ここでは、得点依存生存率モデルという戦略更新ルールを用いている[16, 12, 13]。この戦略更新ルールの基では、他人の利益を下げるために自らコストを被るというスパイト行動が進化しやすいことがわかっている。スパイト行動は罰行動と似ており、この戦略更新ルールによって罰行動

が進化しやすいことがわかる。また、得点依存生存率モデルでは、空間構造が無くても罰と協力行動は共進化しやすいこともわかっている[12, 13]。

では罰反応関数と協力の進化の研究では、得点依存生存率モデルという戦略更新ルールによってどのような罰反応関数に進化するのだろうか？

図3より格子モデルでは Nakamaru and Dieckmann (2009)[14]と同様にステップタイプの罰反応関数が協力度合いの進化を促進することがわかる(図3では $r=3$ 、 $\beta=10$)。完全混合モデルの場合では、段階的罰が協力度合いの進化を促進することがわかった。

では、なぜ Shima and Nakamaru (2013)では段階的罰行動の進化が生じたのだろうか[20]？得点依存生存率モデルでは罰と協力の共進化は必ず生じるという前提で話を進めよう。このとき、常にランダムに公共財ゲームを行うメンバーが決まるため、様々な協力度合いのプレーヤーとゲームを行い、罰を与えるかどうかの意思決定を行う。このとき、ステップタイプの罰関数では、ゲームの相手全員の協力度合いが自分の閾値よりも低い値であると被る罰コストが非常に高くなる。一方、段階的罰のように協力度合いに応じて罰の強度を変える方が、罰のコストが軽減されると考えられるためである。

4. 結論と議論

Nakamaru and Dieckmann (2009)と Shima and Nakamaru (2013)の2つの進化ゲーム研究より、(1) 格子モデルにおいてはステップタイプの罰反応関数が協力の

進化を促進し、(2) 完全混合モデルでは、得点依存生存率モデルのような戦略更新ルールでは、段階的な罰反応関数が協力の進化を促進することを示した[14, 20]。

この2つの研究では個人間の罰に関する進化ゲーム研究であった。法や社会規範は社会を「良く」するために罰則規定を作っている。そして逸脱者の逸脱度合いによって罰を与えている。このようなルールが社会全体の効用の最大化をするための条件を探った研究もある[10]。

人の意思決定の仕方に関する進化研究は、認知科学や脳神経科学の発展とともに進むと考えられる。進化ゲーム理論はそれに対して何らかの指針や方向性を与える可能性があるだろう。

参考文献

- [1] Axelrod, R., 1986. An evolutionary approach to norms. *Am Polit Sci Rev* 80, 1095-1111.
- [2] Axelrod, R., Hamilton, W. D., 1981. The Evolution of Cooperation. *Science* 211, 1390-1396.
- [3] Boyd, R., Gintis, H., Bowles, S., Richerson, P. J., 2003. The evolution of altruistic punishment. *Proc Natl Acad Sci U S A* 100, 3531-5, doi:10.1073/pnas.0630443100.
- [4] Brandt, H., Hauert, C., Sigmund, K., 2003. Punishment and reputation in spatial public goods games. *Proc. R. Soc. B* 270, 1099-1104, doi:10.1098/Rspb.2003.2336.
- [5] Dieckmann, O., 2004. A beginners's guide to

- adaptive dynamics. *Mathematical modelling of population dynamics* 63, 47-86.
- [6] Fehr, E., Gächter, S., 2002. Altruistic punishment in humans. *Nature* 415, 137-40, doi:10.1038/415137a.
- [7] Frank, R. H., 1988. *Passions with reason*. Norton.
- [8] Herrmann, B., Thoni, C., Gächter, S., 2008. Antisocial punishment across societies. *Science* 319, 1362-7, doi:10.1126/science.1153808.
- [9] Hilbe, C., Traulsen, A., 2012. Emergence of responsible sanctions without second order free riders, antisocial punishment or spite. *Scientific reports* 2, 458, doi:10.1038/srep00458.
- [10] Iwasa, Y., Lee, J. H., 2013. Graduated punishment is efficient in resource management if people are heterogeneous. *J Theor Biol* 333, 117-25, doi:10.1016/j.jtbi.2013.05.007.
- [11] Nakamaru, M., Kawata, M., 2004. Evolution of rumours that discriminate lying defectors. *Evol. Ecol. Res.* 6, 261-283.
- [12] Nakamaru, M., Iwasa, Y., 2005. The evolution of altruism by costly punishment in lattice-structured populations: score-dependent viability versus score-dependent fertility. *Evol. Ecol. Res.* 7, 853-870.
- [13] Nakamaru, M., Iwasa, Y., 2006. The coevolution of altruism and punishment: role of the selfish punisher. *J Theor Biol* 240, 475-88, doi:10.1016/j.jtbi.2005.10.011.
- [14] Nakamaru, M., Dieckmann, U., 2009. Runaway selection for cooperation and strict-and-severe punishment. *J Theor Biol* 257, 1-8, doi:10.1016/J.Jtbi.2008.09.004.
- [15] Nakamaru, M., Yokoyama, A., 2014. The effect of ostracism and optional participation on the evolution of cooperation in the voluntary public goods game. *PloS one* 9, e108423, doi:10.1371/journal.pone.0108423.
- [16] Nakamaru, M., Nogami, H., Iwasa, Y., 1998. Score-dependent fertility model for the evolution of cooperation in a lattice. *J Theor Biol* 194, 101-124.
- [17] Nowak, M. A., 2006. Five rules for the evolution of cooperation. *Science* 314, 1560-3, doi:10.1126/science.1133755.
- [18] Rand, D. G., Nowak, M. A., 2013. Human cooperation. *Trends in cognitive sciences* 17, 413-25, doi:10.1016/j.tics.2013.06.003.
- [19] Rand, D. G., Armao, J. J. t., Nakamaru, M., Ohtsuki, H., 2010. Anti-social punishment can prevent the co-evolution of punishment and cooperation. *J Theor Biol* 265, 624-32, doi:10.1016/j.jtbi.2010.06.010.
- [20] Shima, H., Nakamaru, M., 2013. Strict or graduated punishment? Effect of punishment strictness on the evolution of cooperation in continuous public goods games. *PloS one* 8, e59894, doi:10.1371/journal.pone.0059894.
- [21] Sigmund, K., Hauert, C., Nowak, M. A.,

2001. Reward and punishment. Proc Natl Acad Sci U S A 98, 10757-10762.
- [22] Sigmund, K., De Silva, H., Traulsen, A., Hauert, C., 2010. Social learning promotes institutions for governing the commons. Nature 466, 861-3, doi:10.1038/nature09203.
- [23] Yamagishi, T., 1986. The provision of a sanctioning system as a public good. J Pers Soc Psychol 51, 110-116.