

5 同調伝達による協力行動とスパイト行動の空間ダイナミクス

若野友一郎

(明治大学大学院先端数理科学研究科)

10 概要

ヒトの社会を記述するモデルとして、多人数2戦略ゲームを行うプレイヤーの集団を考える。ここで各プレイヤーは、次のように戦略を選ぶ：自己の利得が低いときにより高い確率で他者の行動を模倣し（社会学習）、社会学習するときは多数派をより好む（同調伝達）。これは、一種の利得依存型の社会学習ではあるものの、利得は社会学習の動機としてのみ使われ、模倣相手の選択には同調伝達のみが働くという仮定である。この場合の戦略頻度のダイナミクスを、レプリケーター方程式の一般化としてモデル化する。同調伝達の効果が強いとき、どちらの戦略の固定状態も、ともに局所的に安定である。このようなプレイヤーが空間的に分布し、ゲームや学習は局所的に行われる場合に、2戦略のどちらが優位となるかを、反応拡散方程式における等速進行波解の理論を用いて調べた。この研究を空間的公共財ゲームに応用した場合、同調が強ければ、非合理的な行動が広まりうることが分かった。同調伝達がなければこのような現象は見られないことから、多数派への同調は、集団全体の利得を低下させる文化的衰退を引き起こす可能性が示唆された。

1. 緒言

25 他者の行動を模倣する社会学習は、人間社会において広く見られる学習様式であり、文化進化を支える原動力ともなっている。社会学習において、行動 A がたとえば 60% の頻度（すなわち多数派）で観察されたとき、行動 A を 60% 以上の確率で模倣する社会学習様式を、同調伝達と呼ぶ。同調伝達は心理学実験など実際に観察されており、その進化的意義については、社会学習そのものの
30 進化と合わせて、最近多くの研究がなされつつある(Henrich & Boyd 1998, Kameda & Nakanishi 2002, Wakano & Aoki 2007, Nakahashi 2007, Nakahashi et al. in press)。

本稿では、意思決定に自己の利得レベルおよび同調伝達を用いるプレイヤーの集団を考察する。プレイヤーは大人数が同時に参加するゲーム的状况に置かれていてと仮定する。ゲームから得られる利得が小さいとき、プレイヤーは自己の行動を「再考」し、集団中の他者の行動を模倣（社会学習）すると仮定する。このとき、多数派に同調する効果が存在するか否かによって、戦略頻度のダイナミクスにどのような影響が存在するかを調べる。

本研究は、学習戦略の進化の研究ではなく、上述のような意思決定をする集団において、どのような行動が選択されるかを調べた研究である。本稿では、なるべく数理的詳細は割愛し、得られた結果のみを報告する。人類学および本プロジェクトに向けて、本研究の結果が示唆する事柄を、考察にまとめた。

2. モデルと解析結果

2.1 基本的枠組みと、その解析

すべてのプレイヤーが同一の多人数2戦略ゲームをプレイしている無限集団を考える。プレイヤーの死亡や繁殖は考えず、プレイヤーは自己の利得が低いときに、他者の行動を模倣する（社会学習）と考える。この結果、集団中に占める戦略1の頻度 u は変化する。具体的には、プレイヤーの現在の利得が p のとき、単位時間あたり $v(p)$ の確率で社会学習を行う（ $v(p)$ は単調減少関数）。このとき、戦略1を模倣する確率は、頻度 u に依存する $T(u)$ という関数であると仮定する（ $T(0)=0, T(1)=1$, 図1参照）。

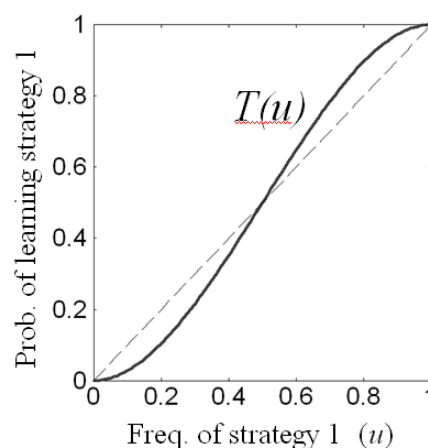


図1：同調を表す伝達関数 $T(u)$ 。図で示したのは $T(u)=u+D(1-u)u(2u-1)$ で、実線は $D=1$ 、点線は $D=0$ の場合。

微小時間 Δt 後の頻度の変化は、

$$\begin{aligned} (u \text{ の変化量}) = & - (\text{戦略 1 を持ち、かつ社会学習した個体頻度}) \\ & + (\text{社会学習によって新たに戦略 1 を獲得した個体頻度}) \end{aligned}$$

60 であるから、

$$u(t + \Delta t) - u(t) = -(v_1 \Delta t)u + \Delta t[v_1 u + v_2(1 - u)]T(u)$$

より、戦略の頻度ダイナミクス

$$\frac{du}{dt} = F(u), \quad F(u) = v_1 u[T(u) - 1] + v_2(1 - u)T(u)$$

を得る。ただし $v_i = v(p_i(u))$ は戦略 i の学習率であり、 $p_i(u)$ は戦略 i の利得であってゲー

65 ム構造によって決まる関数である。とくに、 $T(u) = u$ のとき

$$\frac{du}{dt} = u(1 - u)[v_2 - v_1]$$

となり、これは適応度が $f_i = -v_i$ のときのレプリケーター方程式と一致する。

戦略 2 の固定状態 ($u^* = 0$) と、戦略 1 の固定状態 ($u^* = 1$) の局所安定条件は、それぞれ

70 $F'(0) < 0$ と $F'(1) < 0$ である。同調伝達がない場合 ($T(u) = u$) には、これらの安定条件は利得 $p_i(u)$ から通常の方法で計算される ESS 条件と一致する。しかし、 $T'(0)$ や $T'(1)$ の値

が 1 より小さいときは、局所安定条件は通常の ESS 条件よりも緩くなる。

同調伝達は、固定状態を安定化させる。このようにして安定化した 2 つの平衡状態を、空間的につないだとき、どちらが優位となるであろうか。プレイヤーはランダムに移住 (拡散率 d) するとし、ゲームや学習は局所的に行われるとすると、次のような空間 1 次元の

75 反応拡散モデルを得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} u = d \frac{\partial^2}{\partial x^2} u + F(u) \quad (t \geq 0, x \in R) \quad (\text{RD})$$

$F(u)$ が単一の不安定内部平衡点 $u = u^*$ をもつ双安定系であるとき、標準的な仮定の元で、この方程式の解は等速進行波解

$$u(x, t) = U(x - vt), \quad U(+\infty) = 0, \quad U(-\infty) = 1$$

80 に収束することが証明されている (Fife & McLeod 1979)。すなわち、初期において、空間の左側で戦略 1、右側で戦略 2 が優勢のとき、やがて左側は戦略 1 ばかり、右側は戦略 2 ばかりとなり、その境界は一定の速度で移動するようになる (後述する図 3 も参照) ここで進行波の向き、すなわち戦略 1 が戦略 2 に侵入するのか、その逆が起こるのかは、

$$\text{sgn}(v) = \int_0^1 F(u) du \quad (\text{Vel})$$

85 によって決まる。上式が正のとき、戦略1が空間ゲームの勝者となる。

2.2 公共財ゲームへの応用

戦略1を協力(頻度 u)、戦略2を非協力(頻度 $1-u$)と考える。公共財ゲームでは、協力戦略を取るプレイヤーは、コスト c を公共財に対して投資する。すべての投資は R 倍され、
90 利得 $Rc (=r)$ を全プレイヤーが平等に共有する。よって利得関数は、 $p_1(u) = ru - c$ および $p_2(u) = ru$ となり、また利得に応じた社会学習率を $v(p) = \exp(-p)$ と仮定すると

$$v_1 = \exp(-ru + c) = C \exp(-ru)$$

$$v_2 = \exp(-ru)$$

$$C = e^c > 1$$

を得る。ここで C は、リスケールされた協力のコストであり、状況が同じならば協力者は非協力者に比べて(利得が小さいために)、 C 倍社会学習を実行する。以上のモデルを前節
95 の結果に応用すると、

$$u=0 \text{ (全員が非協力) が安定} \Leftrightarrow C > T'(0)$$

$$u=1 \text{ (全員が協力) が安定} \Leftrightarrow C < 1/T'(1)$$

であることがわかる。同調伝達がないとき、 $T'(0) = T'(1) = 1$ なので協力平衡状態は不安定であるが、同調伝達が協力のコストに比べて強ければ、協力平衡状態が安定化する。

100 さらに解析のため、以後、同調伝達関数の関数形を

$$T(u) = u + D(1-u)u(2u-1), \quad 0 \leq D \leq 1$$

と仮定する。 $T'(0) = T'(1) = 1 - D$ から、系が双安定であるための条件は

$$1 - D < C < \frac{1}{1 - D}$$

となる(左側の不等式は常になりつつ)。

105 $F(u) = \exp(-ru)Q(u)$

$$Q(u) = u(1-u)[2D(C-1)u^2 + D(3-C)u + 1 - C - D]$$

と書くと、 $Q(u)$ は4次関数なので、このとき $u=0$ と $u=1$ の間に不安定な内部平衡解 u^* がただ一つだけ存在する(図2参照)。協力平衡点が安定であるのは、協力のコストが小さ

く $C < \frac{1}{1-D}$ を満たすときである。詳細な数理解析によって、協力のコストが無限に小さく

ても、協力状態は非協力状態に比べて実現されにくい(吸引領域が小さい)ことを示すこ

110 とができる。またこれらの結果は、公共財への投資効率 r とは無関係である。

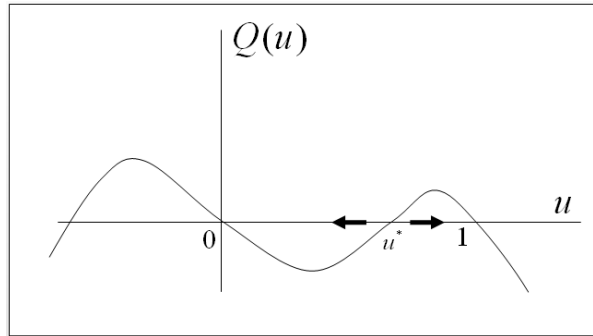


図2：安定平衡点 $u=0$, $u=1$ と、不安定内部平衡点 $u=u^*$

115 2.3 空間つき公共財ゲームへの応用

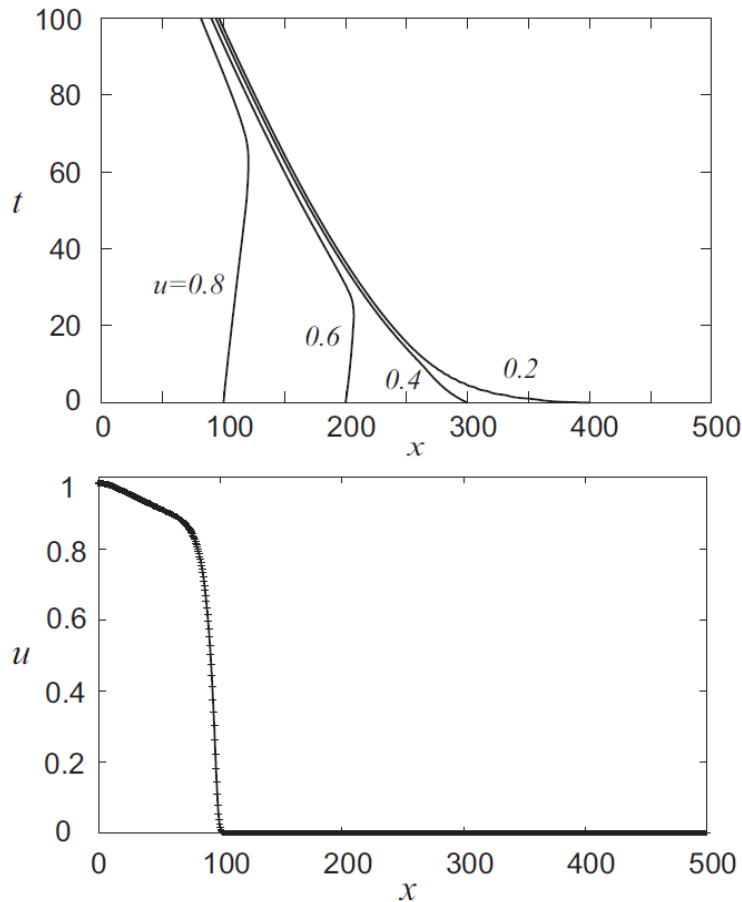
公共財が局所的に共有され、学習もまた局所的に行われる場合は、モデルは (RD)式で表される。我々が興味あるのは、等速進行波の向きである。 $r=0$ のとき、(Vel)式は

$$\int_0^1 F(u)du = \int_0^1 Q(u)du = \frac{-1}{60(C-1)(10-D)} < 0$$

となる。すなわち系は、非協力状態が協力状態に侵入していく等速進行波解に収束する。

120 一般の r についても計算は可能で、結果は次のようになる。

まず $r > 0$ のときには、 $r=0$ のときと同様に(Vel)式は負である。つまり協力状態は非協力状態に侵入されて、最終的には全空間が非協力となる。この場合の数値計算結果を、図3に示した。



125 図3：(RD)式の数値計算結果。協力者の集団に非協力者の集団が侵入している。等速進行波が形成され、左へ向かって一定速度で進んでいる。上のパネルは等高線を、下のパネルは $t=100$ における進行波の形状をあらわす。 $d=1, c=0.1, r=10, D=1$.

逆に $r < 0$ のときには、 r の値によって(Vel)式の符号は変化しうる。とくに $r \rightarrow -\infty$ のとき、実質的に $u=1$ 近傍の $F(u)$ だけで積分の値が決定するので、任意の有限の C, D (ただし $C < \frac{1}{1-D}$) に対して $\int_0^1 F(u) du > 0$ である。

$r < 0$ のとき、戦略1を協力行動と呼ぶのはもはや適切ではない。この行動は、「コスト c (> 0) を払って他者の利得を下げる行為」であり、スパイト行動である。一方戦略2は、何もしない戦略である。スパイト行動は、たとえばコリシン産生型大腸菌などに見られるように、その行動をすることによって競争相手の利得（繁殖や生存力）を、自分の利得よりもさらに下げることによって、結果として競争に勝利しようとする戦略である (Iwasa et al. 1998)。コリシン産生型大腸菌は、当然コリシンに対する耐性を持っており、自ら作った毒で自ら苦しむことはない（毒生産のコストだけが自己の利得減少分となる）。しかしながら、

140 本モデルにおける $r < 0$ の場合の投資行動は、コストを払う上に、自己の利得も他者の利得も同じだけ減少させる。言わばコストを払って自ら毒を作り、その毒に自ら苦しむ行動となっている。このような非合理的行動は、同調伝達が存在しない場合には、決して進化しない（そもそも ESS ではない）。

3. 考察

145 3.1 同調伝達

本稿では、利得に応じて社会学習を行うプレイヤーの集団を考察した。利得が低いときに社会学習率が上がり、かつ社会学習が線形に行われるならば、系の振る舞いは

$$\text{(適応度)} = - \text{(社会学習率)}$$

150 と考えたレプリケーター方程式と一致することを示した。社会学習率は利得の減少関数なので、これはゲームの利得が個体の繁殖成功を示す場合と定性的に同じ振舞いをすることを意味する。しかし、社会学習に同調伝達の要素が入ると、系の振る舞いは2つの意味で大きく変わりうる。1つ目は、ゲームの利得行列においては安定でない固定状態（純粋戦略平衡点）が、同調の効果により安定となることである。2つ目は、このように安定化した固定状態は、たとえそれがゲームの利得行列からは考えられないような非合理的戦略であつても、もう一方の（合理的）平衡状態に比べて進化しやすい場合があることである。とくに空間構造があるときは、非合理的戦略が合理的戦略を採用する集団に侵入し、集団全体に広まることのできる。本稿では、空間公共財ゲームをこの手法で解析した結果、協力行動は広まらないことが明らかとなった一方で、（非合理的）スパイト行動が広まりうることを示した。

160 同調伝達は、人間社会において広くみられる学習様式である。社会学習を実行する以上、そこには「集団の多数派は正しい行動をしている」という暗黙の期待が存在している。よって、社会学習において多数派の行動に同調することは、戦略頻度のダイナミクスに対して、それほど大きな影響力は持たないように感じられる。しかし実際には、本稿で示したように、同調伝達（あるいは一般的には、歪んだ社会学習）を実行する集団では、およそ
165 非合理的な行動の伝播が促進される可能性があるのである。

3.2 同調伝達は文化の局所性を作るか

同調伝達は文化の局所性（空間的異質性）を作ると一般に考えられているが、本稿の結果によれば、移住率 d （文化交流の活発さとも解釈できる）や同調度合い D がどれほど強くとも、一方の文化が最終的には他方を駆逐するという結論が導かれる。本稿では割

愛したが、Wakano (2012) は、連続一次元空間モデルだけでなく、2つの集団がつながった島モデルも考察しており、この場合には島間の結合度が低い場合は、文化が一様化せずにそれぞれの島に固有の文化が存続可能である。連続空間モデルにおいても、Wakano et al. (2011) が示すように、2次元空間上で2つの領域が狭い回廊によってつながれている場合には、それぞれの領域において固有の文化が存続しえる。よって本稿の結果から、同調伝達は文化の局所性を作らないとは結論できない。むしろ、同調伝達だけでは局所性が維持されるとは限らないと結論すべきと考える。

3.3 交替劇への考察

180 本稿では、同調伝達の存在を仮定し、自己の利得が低いときに他者を観察し、集団の多数派が採用する行動を自分も採用するような社会学習者の集団を考えた。単純化のため、
185 個体学習者の存在を仮定していない。彼らはいわば、「うまくいっている間はいいが、うまくいかなくなったらひたすら周囲を見回してみんなに合わせる、自分で考えない人」である。このような集団を考えた背景には、たとえ環境が安定していて正しい行動が変化しない
190 い場合においても、上のような社会学習者の集団においては、何か不合理なことが起こりうるという私の推量があった。さらに推論を進めれば、個体学習者による集団の舵取りは、たとえその個体学習者の頻度が少数であっても、集団の文化的発展にとってきわめて重要な役割を果たすことを示唆している。長期に渡って同一の石器をつくり続けたネアンデルタールは、このような個体学習者を欠いていたため、それが文化的停滞（本モデルは、停滞のみならず、非合理的行動の出現と固定という後退が起き得ることも示唆している）を引き起こし、サピエンスへの交替劇の一因となったのかもしれない。

参考

本研究の詳細は、数学的詳細を含めて、以下の論文にまとめられている。

195 "Spatiotemporal dynamics of cooperation and spite behavior by conformist transmission."

Joe Yuichiro Wakano

Communications on Pure and Applied Analysis 11 (2012) :375-386.

引用文献

200 Fife PC & McLeod JB (1979) Lecture Notes in Biomathematics 26, Springer-Verlag, pp.335-361

Henrich J, Boyd R (1998) The evolution of conformist transmission and the

emergence of between-group differences. *Evol. Hum. Behav.* 19, 215-241.

205 Iwasa Y, Nakamaru M, Levin SA (1998) Allelopathy of bacteria in a lattice population:
Competition between colicin-sensitive and colicin-producing strains, *Evolutionary
Ecology*, 12: 785-802.

Kameda T, Nakanishi D (2002) Cost-benefit analysis of social/cultural learning in a
nonstationary uncertain environment: an evolutionary simulation and an experiment
with human subjects. *Evol. Hum. Behav.* 23, 373-393.

210 Nakahashi W (2007) The evolution of conformist transmission in social learning when
the environment changes periodically. *Theor. Pop. Biol.*

Nakahashi W, Wakano JY & Henrich J (in press) Conditions for the evolution of
conformist transmission. *Human Nature*

215 Wakano JY (2012) Spatiotemporal dynamics of cooperation and spite behavior by
conformist transmission. *Communications on Pure and Applied Analysis* 11:375-386.

Wakano JY, Aoki K (2007) Do social learning and conformist bias coevolve? Henrich
and Boyd revisited. *Theor. Popul. Biol.* 72, 504-512.

220 Wakano JY, Ikeda K, Miki T, Mimura M (2011) Effective dispersal rate is a function of
habitat size and corridor shape: mechanistic formulation of a two-patch compartment
model for spatially continuous systems. *Oikos* 120: 1712-1720.

225 **Spatial dynamics of costly spite and cooperation by conformist transmission**

Joe Yuichiro Wakano

(Meiji University, Graduate School of Advanced Mathematical Science)

230 **Abstract**

In this paper, we propose a model describing the dynamics of human society. Then we show that classic theorems on traveling wave solutions in a reaction diffusion equation can be readily applied and we obtain some mathematical result. Our model considers a human society where people play a two-strategy multi-player game. The key concepts are 1) payoff-dependent update rule of strategy

235 and 2) social learning with conformism. Because of conformism, the system can be bistable and our primary concern is whether one global majority appears or not when multiple societies that initially have different local majorities are spatially connected. Applying the result of this general framework to a public goods game example, we show that cooperation is less likely maintained by conformism and that the spread of irrational spite behavior can occur.

240