

# 社会的ワクチン：裏切りによる協調の進化

## Evolution of cooperation by a social vaccine

山本 仁志\*, 岡田 勇†

Hitoshi Yamamoto & Isamu Okada

このファイルは草稿です。最終バージョンは、「山本仁志, 岡田勇, 「社会的ワクチン：裏切りによる協調の進化」, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J94-D, No.11, pp.1836-1846, 2011(11)」を参照してください。

### 概要

集団における規範維持のモデルとして良く知られたメタ規範ゲームは,  $n$  人囚人のジレンマの拡張モデルとして, 国際問題における協調問題など中央集権的でない集団においていかに規範を維持するかを検討する上で優れたモデルである. 進化論的な分析によって, 規範ゲームでは協調は維持されないが, メタ規範ゲームでは協調が維持されることが知られている. しかし近年, メタ規範ゲームがシミュレーションの世代数に対して脆弱であるとの指摘がなされている. 我々は, 様々なシミュレーション条件における協調の成立条件を精査し, 脆弱性のメカニズムを探る. 更に我々は, ジレンマ状態にある集団における協調の頑健にするための「社会的ワクチン」を提案し, その効果を検討した. 社会的ワクチンとは, 集団の中にごく少数の常に裏切り行為をとるエージェントが存在することで, 集団全体の規範を高く維持することができる効果をいう. 社会的ワクチンを導入することで, 協調は広範なパラメータ空間で頑健に維持されることがわかった.

## 1 はじめに

Axelrod[1] の規範ゲーム・メタ規範ゲームは, 集団における秩序の維持に対するよく知られたモデル化である. 規範ゲームは,  $n$  人囚人のジレンマを拡張したものであり「非協調者を罰する」という行動原理を集団の参加者に導入している. しかし, この行動原理を導入するだけでは規範は達成されず, 非協調が支配的な戦略になることが示されている. そこで Axelrod は, 「非協調者を罰しなかったものを罰する」というメタ規範を導入した. この導入によって, 集団内で協調が維持されることがシミュレーションによって示された. Deguchi[2] はレプリケータダイナミクスを用いてメタ規範ゲームを分析して協調の安定性を支持している. また Heckathorn[3] や Horne and Cutlip[4] は, 心理学的な実験を行いメタ規範が存在することを示している.

しかし, Axelrod の枠組みにはいくつかの根強い批判が存在する. Yamashita et.al.[5] や Galan et.al.[6] では, メタ規範として集団全員の相互監視を敷いているモデル化は, 認知限界から集団数の上限をもたらす, また相互監視というシステムは非現実的な強い制約であることを主張している. そのために, メタ規範ゲームを部分集団に拡張する研究 (Prietula and Conway[7]) や, スモールワールドネットワーク上での相互監視に限定した研究での研究 (Newth,[8]) が提案されている.

また, Axelrod の知見はごく限られたパラメータ空間でしか成立していないことも指摘されている. 織田

---

\* 立正大学 経営学部

† 創価大学 経営学部

[9] では、初期の懲罰確率によってはメタ規範ゲームにおいても協調が成立しないと述べている。さらに、Galan and Izquierdo[10] は Axelrod[1] をコンピュータシミュレーションと数理解析で精査した結果、メタ規範ゲームが協調を安定させるパラメータ空間は限定的であることを指摘した。

彼らによると、協調の維持には大きく3つの制約が存在している。一つは世代制約である。高々100世代では協調が維持されるが、100万世代までシミュレーションを実施するとメタ規範ゲームでも協調が崩壊する。協調崩壊のメカニズムとしては後述のように、二重の壁による協調の不安定性と、非協調支配の方が安定的であることが原因である。これは、そもそもメタ規範ゲームが規範ゲームより協調安定的とはいえ、何らかの契機によって崩壊すると不可逆性を持つという危険性があることを指摘するもので、メタ規範ゲームにおける協調の非頑健性を示す重要な知見である。

二つ目に、メタ規範ゲームにおける懲罰損失と懲罰コストを、それぞれ規範ゲームにおける懲罰損失、懲罰コストの0.1倍にしても崩壊することを指摘している。メタ懲罰損失が減ることはメタ規範的な裏切りにメリットを上昇させるので、直観的にも支持されるものであろう。

最後に突然変異確率を0.1倍にすることで協調が崩壊されることを指摘している。しかし、彼らは協調が崩壊することを示しているが、では協調の安定を実現するためにはどうすればよいのかに対して答えていない。我々は、Axelrodの限界を指摘する意味では彼らと同じ主張をしているが、もう一步踏み込んで、協調を安定させる十分条件を抽出しようとするものである。

我々は生物の免疫システムにヒントを得て、社会において協調を維持するために裏切りがもたらす効果に着目した。我々は集団に少数の常に非協調行動をとるエージェントを導入することで頑健に協調が維持されることを発見した。この効果を社会的ワクチン効果と呼ぶ。Lotem et.al.[11] は、1対1の間接互恵性ゲームにおいてイメージスコアリングを導入した環境下では、常に裏切る phenotypic defectors を導入することで協調が安定するという、同様のアイデアを提案している。しかし間接互恵性ゲームは1対1の相互作用を想定しており、集団内での複数間の相互作用が扱えない。本研究では、メタ規範ゲームを用いることで、懲罰と裏切りの効果の比較ができるほか、 $n$ 対 $n$ の相互作用のある社会を記述できることにより影響範囲の大きさの議論ができるほか、さまざまな領域に適用範囲が広がる。

## 2 規範ゲーム・メタ規範ゲーム

本節では、Axelrodの規範ゲーム・メタ規範ゲームを整理し、拡張のための追試を行う。

### 2.1 モデル

規範ゲームは $N$ 人囚人のジレンマゲームの拡張としてとらえることができる。 $N$ 人のエージェントで構成される集団を考える。エージェント $i$ は裏切るか協調するかの二つの行為を選択することができる。裏切る確率を $B_i$ (大胆さ)で表現する。 $i$ が裏切ると、 $i$ は $T(=3)$ の利得を得ることができる。残りの $(N-1)$ 人エージェントは $H(=-1)$ の利得を得る。 $i$ が協調すれば、すべてのエージェントの利得は0である。

ここまでは $N$ 人囚人のジレンマゲームであるが、規範ゲームでは、このあと $(N-1)$ 人のエージェントに懲罰のチャンスがある。エージェント $j$ は確率 $s$ で $i$ の裏切りを発見する。発見しなかった場合、なにも起こらず $i, j$ いずれの利得も変化しない。 $j$ が $i$ の裏切りを発見した場合、 $j$ は自身の持つ復讐度 $V_j$ の確率によって $i$ を罰する。 $j$ が $i$ を罰した場合、 $i$ は $P(=-9)$ の利得を $j$ は $E(=-2)$ の利得を得る。罰しなかった場合、 $i, j$ の利得に変化はない。

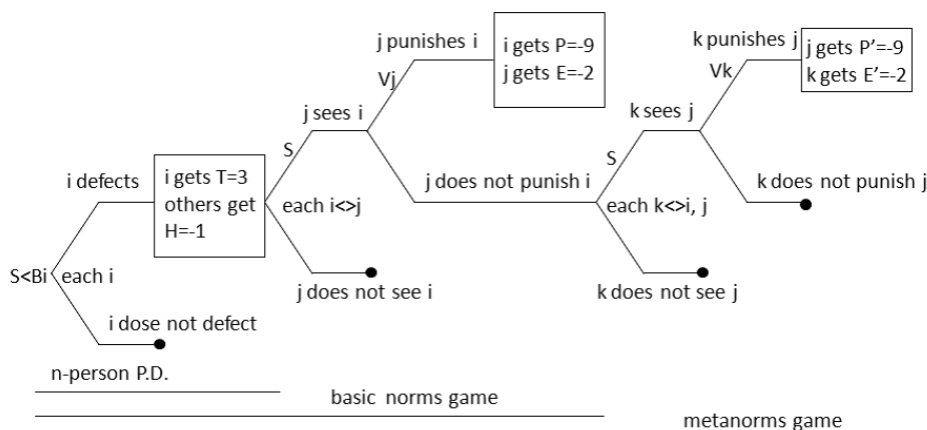


図1 規範ゲームとメタ規範ゲームの構造 (Axelrod[1] より)

ここまでが規範ゲームである。メタ規範ゲームとは、エージェント  $j$  が  $i$  の裏切りを発見し、更に  $j$  が  $i$  を罰しなかったことをエージェント  $k$  が発見したときに  $k$  が  $j$  を罰するという構造を導入したものである。このとき、 $k$  が  $j$  を罰すれば、 $j$  は  $P(=-9)$  の利得、 $k$  は  $E(=-2)$  の利得を得る。

これらの構造をまとめたものが図1である。各エージェントはそれぞれ4回の行為をおこなう。4回の行為の結果得られた利得によって次世代に個体を残せるかどうかが決まる。Axelrodのモデルでは、集団内の利得の平均と標準偏差を基準に使い、平均  $+\sigma$  より大きい利得を得た個体は2個体の子孫を残し、平均  $\pm\sigma$  以内の個体は1個体を残す。平均  $-\sigma$  より小さい利得の個体は子孫を残せないとしている。ここで子孫の数を調整して世代間で集団の規模  $N$  が変わらないように調整を行う。ただし、この際の調整の詳細については記述されていないため、(For convenience, the number of offspring is adjusted to maintain a constant population of 20. [1]) 本研究ではいくつかの調整方法を試みる。

$+\sigma$  以上の個体が *high*、 $\pm\sigma$  以内の個体が *mid*、 $-\sigma$  以下の個体が *low* いたとする。調整が必要となる場合は、 $high \neq low$  のときである。

調整1: *high*, *low* のうち多いほうのグループから  $high = low$  となるまで *mid* グループに吸収する。

調整2: *high*, *low* のうち少ないほうのグループへ *mid* グループからランダムに選択した個体を移動する。

調整3: 規則通りに *high*, *mid*, *low* の各グループの個体数を変化させたのちに、ランダムに選択した個体を個体数20になるまで増やす(もしくは減らす)。

## 2.2 Axelrod モデルの実験

本節では、規範ゲーム・メタ規範ゲームの追試を行う。実験で用いたパラメータは Axelrod[1] の値を用いている。表1は実験に用いたパラメータ群である。

個体数の調整については「調整2」を用いた。その理由は、規範ゲームにおいてもメタ規範ゲームにおいても、利得の分布は歪んだものとなり、例えば調整1ではすべての個体の子孫数が1になってしまう( $+\sigma$ 以上の個体が0となる)。調整2、調整3は結果的には類似のふるまいとなる。

図2は、規範ゲーム・メタ規範ゲームの挙動の一例を示すために異なる乱数種でおこなった実験の時系列の挙動を示したものである。横軸が世代数であり、縦軸に大胆さ ( $B$ )、復讐度 ( $V$ ) をプロットしている。右上・上左は規範ゲームの結果であり、乱数種によって異なる挙動を示していることがわかる。また、下右・下左は

表 1 実験に用いたパラメータ

パラメータ	値
集団の規模 $N$	20
大胆さ ( $B$ ) の初期値	一様乱数
復讐度 ( $V$ ) の初期値	一様乱数
裏切ることの利得 $T$	3
裏切られることの利得 $H$	-1
懲罰されることの利得 $P$	-9
懲罰することの利得 $E$	-2
個体の進化と調整	調整 2
世代数	100
突然変異率	0.01
裏切りを発見する確率 $s$	一様乱数

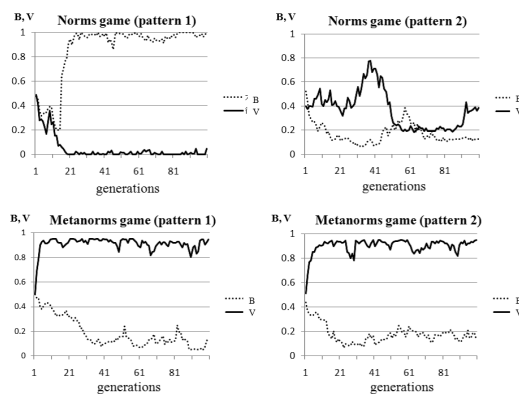


図 2 Axelrod モデルにおける規範ゲームとメタ規範ゲームの挙動

メタ規範ゲームの結果であり、協調が達成され安定していることがわかる。Axelrod の実験の通り、規範ゲームでは部分的に規範が成立する場合、大胆さが高く復讐度の低い場合が見られた（裏切り支配）。またメタ規範においては裏切りが抑制され規範が成立している。

表 2 は 50 回の試行をおこなった結果である。  $L, M, H$  は、  $B, V$  がそれぞれ  $1/3$  未満であった回数、  $1/3 \leq B, V < 2/3$  であった回数、  $2/3$  以上であった回数を示す。規範ゲームにおいては  $B$  が高く協調が崩壊したケースが 18 回、  $B, V$  共に低い状態で協調が達成されているケースが 23 回、その他の中間的なケースがあわせて 9 回と結果がばらついている。一方、メタ規範ゲームにおいては 50 試行中 47 回  $B$  が低く  $V$  が高くなり、協調と裏切りに対する懲罰が維持されていることがわかる。

表 2 Axelrod モデルの挙動パターン

		$B$					
		規範ゲーム			メタ規範ゲーム		
		L	M	H	L	M	H
$V$	H	0	0	0	47	0	0
	M	5	0	0	3	0	0
	L	23	4	18	0	0	0

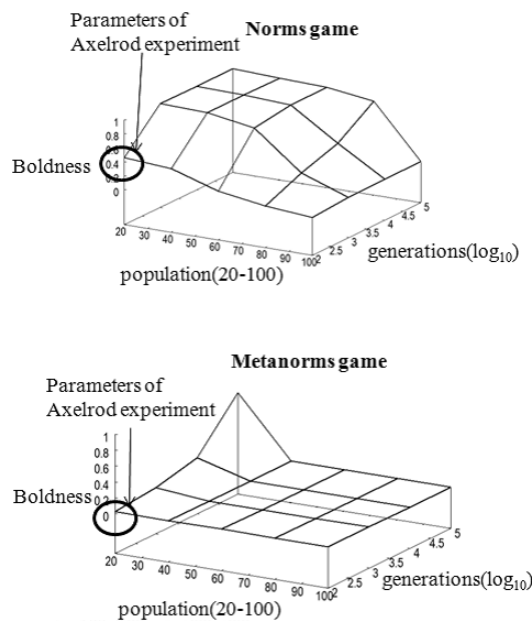


図 3 集団規模と世代を変化させた Axelrod モデル

### 3 メタ規範の脆弱性

本節では Axelrod のモデルにおいてメタ規範が脆弱であることを示し、更に進化過程に GA を導入して様々な状況におけるメタ規範の成立条件を探る。

#### 3.1 Axelrod モデルにおける脆弱性とモデルの限界

ここでは、集団の規模  $N$  を 20 から 100 まで変化させ、更に世代数も 100 から 100,000 まで変化させた実験を行った。

実験は 50 回の試行を行い、各世代の大胆さ  $B$  の 50 回の試行の平均値をプロットしている (図 3)。

規範ゲームにおいて、世代数が増えるるとほぼ裏切り支配になることがわかる。また、集団の規模が大きくなると協調が維持されやすくなっている。これは、集団の規模が大きくなることで、裏切りが発見される回数も

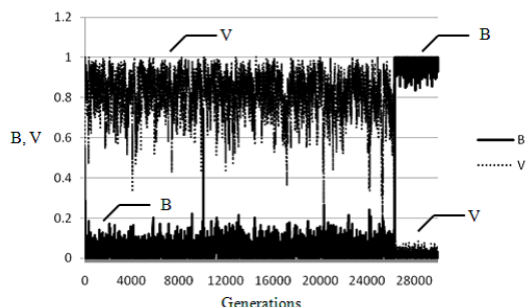


図 4 長期世代におけるメタ規範の崩壊

増え、裏切ることによって得られる利得より裏切りを発見されて集中的に罰せられることで裏切りが不利になるためである。ただしこれは大規模な集団での完全な相互監視を意味しており、現実的には非常に厳しい制約であると考えられる。

メタ規範ゲームにおいては、ほぼ協調が支配的となるが、 $N = 20$  において世代数を長くすることで規範が崩壊していることが分かる。集団規模が少し大きくなると協調が安定していることは、先に述べたように完全な相互監視がメタ規範のレベルで徹底しているために、非常に厳しい監視社会となり協調が維持されている。

図 4 は、メタ規範で規範が崩壊する過程を示したものである。世代が長期になると協調が崩壊する理由は以下の理由による。一度協調が達成され裏切り行為者が集団からほぼ完全に排除されると、復讐度の低いエージェントはミュータントとして集団に侵入が可能になり、復讐度の高いエージェントに対して無差別となる。復讐度が低くなる中で裏切り行為者がある程度発生すれば、その時点で懲罰しなかった者に対してメタ規範による懲罰が働き、再び協調が成立している。しかし、復讐度が低くなった中で裏切り行為者の発生が少ないと、更に復讐度は低くなってしまふ。そのタイミングで裏切り行為者が発生すると、裏切り優位な状態が成立してしまい、協調は一気に崩壊する。世代が長くなると、崩壊のきっかけが多く存在することになり、どこかの時点で閾値を越えてしまう可能性が高まる。

一度復讐度が低くなり裏切りが支配的な状態になると、協調的なエージェントが侵入しても集団のほぼすべてが裏切るため裏切られる利得  $H$  を集団全体から被る。更に、他者を懲罰するコストを自らだけが払うために利得は低くなり子孫を残すことができない。よって裏切り支配になった状態から協調が支配的な状態へと戻ることはできない。

### 3.2 GA モデルによる拡張

本研究では更に様々な状況でのメタ規範の限界を議論するが、ここで進化過程に GA を導入する。その理由は、Axelrod モデルの進化は、集団の利得の分布に対して平均と標準偏差を基準としてグループを分けている。しかし、実際の利得分布は非常に歪んだものとなる。また、この方法自体が GA にヒントを得て採用されたものであり、一般的な GA を用いたほうが自然であると考えられる。

なお本研究における GA では、エージェントの遺伝子は 8 ビットからなり、前半 4 ビットが  $B$  の値、後半 4 ビットが  $V$  の値を表す。それぞれの値は  $0/15$  から  $15/15$  までの 16 段階のひとつをとる。各世代のエージェント  $i$  の利得を  $u_i$  とするとき、エージェント  $i$  の適応度は  $f_i = u_i - u_{min}$  とする。ここで  $u_{min} = \min_i u_i$  である。選択ルールにはルーレット選択を用い、交叉は一樣交叉を用いている。突然変異率は Axelrod の実

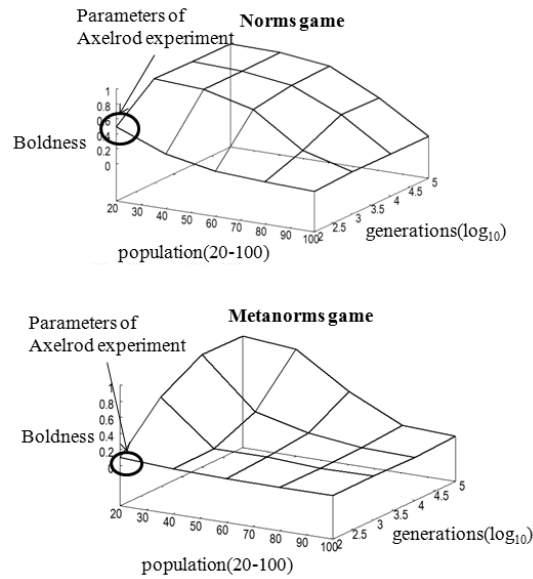


図 5 集団規模と世代を変化させた GA モデル

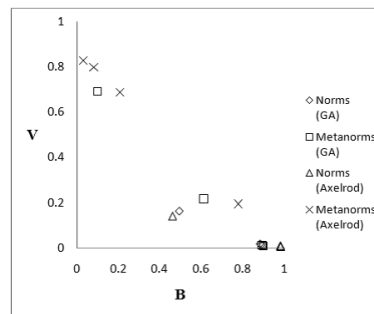


図 6  $B$  と  $V$  のトレードオフ関係

験に従い 0.01 としている。

GA モデルでも Axelrod モデルでも同様の結果が得られることを図 5 に示す。図 5 は GA モデルを採用し、図 3 と同様の実験を行ったものである。

メタ規範ゲームにおいて崩壊が早期に発生していることが観察される。これは、Axelrod モデルでは新たな形質は突然変異によるものしかなかったが、GA を採用したことによって、交叉によって新たな形質が生じる可能性が高くなり、崩壊の起こるタイミングが頻発するためと考えられる。また、いずれの場合も集団規模が大きくなることは協調に優位に働くことが分かる。

ここまでは  $B$  のみを観察してきたが、ここで  $B$  と  $V$  の関係を確認する。図 6 は、図 3 および図 5 の実験において、 $N = 20$  の時の  $B$  と  $V$  をプロットしたものである。復讐度  $V$  は、 $B$  と負の相関があり  $B$  の値を観察することで  $V$  の挙動もわかるため、本論文では大胆さ ( $B$ ) のみを観察する。また、規範ゲームでは  $B$  は 0.4 を下回ることはなく、協調が安定的に維持されていないこともわかる。

続いて、本研究では集団規模は基本である  $N = 20$  に固定し、突然変異率を変化させた実験を行う。図 7

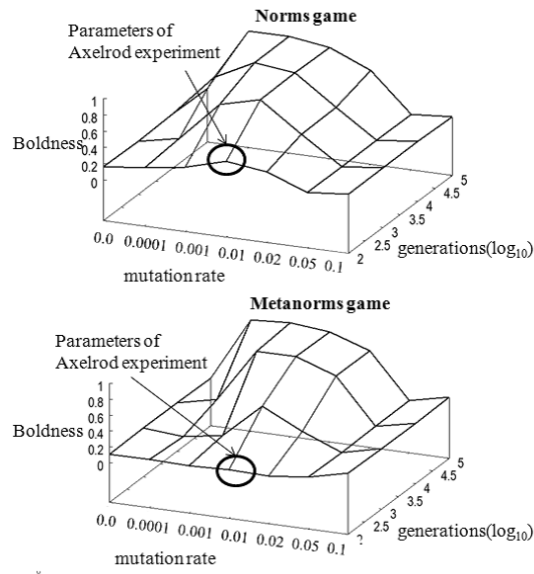


図 7 突然変異率と世代を変化させた GA モデル

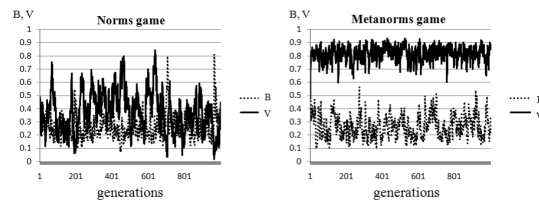


図 8 突然変異率が 0.05 のときの GA モデルの挙動

は、規範ゲーム・メタ規範ゲームにおいて、突然変異率，世代数を変化させたものである．突然変異率が 0 と 0.05 以上のときに協調が成立していることが観察される．

突然変異率が 0.05 のときに協調が達成されているように観察されるが，時系列の推移を観察してみると，図 8 のように非常にランダムな世界であることが分かる．図 8 はそれぞれ規範ゲーム，メタ規範ゲームの突然変異率が 0.05 における時系列推移である．規範ゲームにおいては  $B$  も  $V$  も 0.1 から 0.8 の値をとり，メタ規範ゲームにおいても  $B$  は 0.15 から 0.5 までの間を不規則に推移している．

突然変異率が 0 のときは，いったん戦略が安定すると変化する要因がないため最終的な結果は安定的となる．規範ゲームにおいても，初期に高まった復讐度の高さが協調の安定を促し，早い世代で戦略が一様になるため裏切りの侵入がなく安定的な結果となる．ただし，一様になる直前に交叉で裏切りが発生して裏切りが支配的になることも低い頻度である．その結果大胆さの平均値は 0.2 前後で安定している．

#### 4 社会的ワクチンの導入

前節までの結果をまとめると以下のように整理できる． $N = 20$ , 世代数 100 では，規範ゲームにおいて 3 パターンの結果が生じ，メタ規範ゲームにおいて協調が達成されることを再確認した．しかし，規範ゲームに



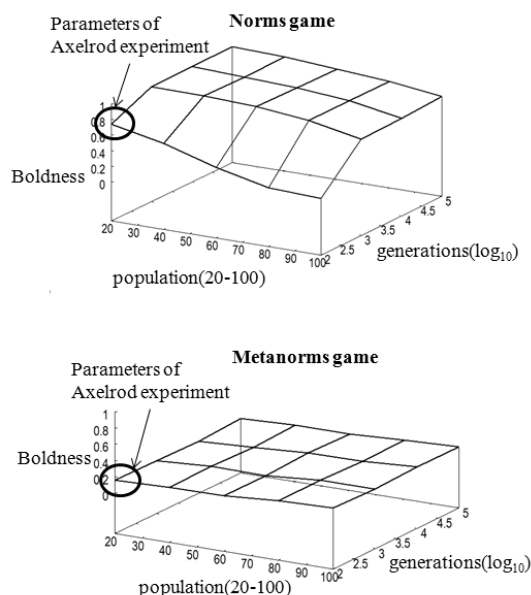


図9 社会的ワクチンを導入したことによるメタ規範の安定（集団規模の変化）

おける3パターン（裏切り、中間、協調）はすべて裏切りへの過程にすぎず、世代数を伸ばすことで裏切り支配となってしまう。つまり規範ゲームでは集団規模を増やさない限り裏切りに収束する。メタ規範ゲーム（ $N = 20$ ）も、超長期では裏切りになる。これは進化過程をGAに変更しても同様である。突然変異率が0や0.05では平均的な裏切り率は抑制されたが、突然変異率が0であることは進化ゲームとしては不自然であるし、0.05の状態はランダム性が大きい。

我々は、頑健に協調を維持するための方策として「社会的ワクチン」の導入を提案する。ワクチンとは一般的に弱毒化した病原体を接種することで抗体をつくり病原体への感染を予防することをいう。社会的ワクチンとは、集団の中にごく少数の常に裏切り行為をとるエージェントが存在することで、集団全体の規範を高く維持することができる効果をいう。

図9は集団に集団規模の5%のワクチンエージェント（常に裏切るエージェント）を導入した際の大胆さの平均値である。集団規模と世代数を変化させた。5%の理由は、最小規模の20に導入できる最低数1が5%であることによる。

規範ゲームにおいては、裏切りが支配的となっているが、メタ規範ゲームにおいては世代数を変化させても協調が安定的に維持されることが分かった。

メタ規範ゲームにおいて協調が崩壊する理由は、協調達成時に復讐度の低いエージェントが侵入してきても、裏切り行為がないため、それを発見できないため復讐度の低いエージェントが広まってしまうためであった。しかし、ワクチンエージェントがいることで、集団内には常に裏切り行為が存在する。復讐度の低いエージェントが侵入してきた場合、周囲はこのエージェントが裏切りを懲罰しないことを認識することができる。そのため、復讐度の低いエージェントは発見されやすくなり、集団全体の復讐度が下がることを防ぐことができる。

続いて、突然変異率と世代を変化させた実験の結果を図10に示す。メタ規範ゲームにおいて、突然変異率に対しても頑健に協調が維持されていることが分かった。

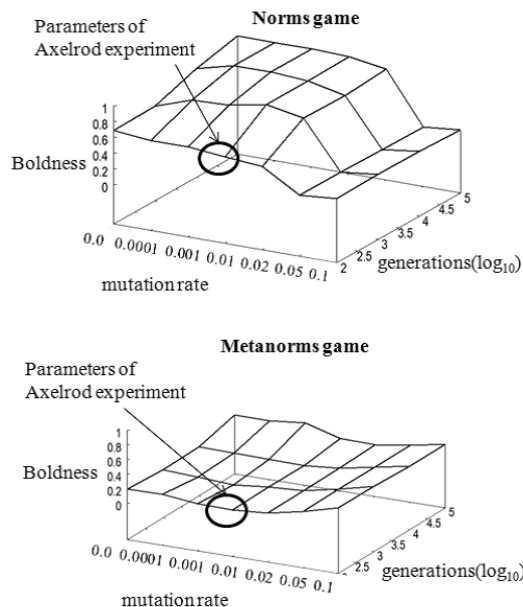


図 10 社会的ワクチンを導入したことによるメタ規範の安定（突然変異率）

## 5 社会的ワクチンの数学的解析

異質な集団の相互作用を数学的に解析することは困難である．しかし集団が均質であるという強い仮定を置くことで均衡解を議論することはできる．その議論は異質集団の挙動を理解するうえで傍証とすることができる．そこで本節では，なぜメタ規範が崩壊し，社会的ワクチンによって協調が頑健に維持されるのかを，動学を分析することで議論する．

ここで，エージェント  $i$  の大胆さ（裏切りの確率）を  $b_i$  とし，復讐度（懲罰の確率）を  $v_i$  とする．そうすると，エージェント  $i$  の期待利得  $U_i$  は (1) 式であらわすことができる．なお，各パラメータの値は，表 1 を用いており， $ME = E$ ,  $MP = P$  とする．

$$\begin{aligned}
 U_i = & T \cdot b_i + H \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_j + E \frac{v_i}{2} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_j^2 \\
 & + P \frac{b_i^2}{2} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n v_j + ME \frac{v_i}{4} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, k}}^n b_k^3 (1 - v_j) \\
 & + MP \frac{1 - v_i}{4} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, k}}^n b_k^3 v_j
 \end{aligned} \tag{1}$$

それぞれの項の意味を説明する．第 1 項は，自身の裏切りにより得られる利得，第 2 項は他者の裏切りによ

りうけるコスト，第 3 項は他者を懲罰するコスト，第 4 項は自身の裏切りが懲罰を受けるコストである\*1。

ここまですべてが規範ゲームであり，第 5 項以降はメタ規範ゲームの利得である。第 5 項は裏切り者を懲罰しないものを自身が懲罰するコストであり，第 6 項は自身が裏切り者を懲罰しなかったときに他者から懲罰を受けるコストである。

ESS[12] の議論を援用し集団の戦略の動学および安定点を探る。ESS が成立するためには，任意のミュータントに対して ESS が頑健であることを示せばよい。

集団の戦略がすべて  $(b_i, v_i)$  であるときに，任意のミュータントが侵入しえないときには，(2) 式がなりたつ。ここではあるミュータントエージェントの戦略を  $(b_m, v_m)$  とする。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_m}{\partial b_m} = \frac{\partial U_i}{\partial b_m} \\ \text{OR} & \left( b_m = 1 \text{ AND } \frac{\partial U_m}{\partial b_m} \geq \frac{\partial U_i}{\partial b_m} \right) \\ \text{OR} & \left( b_m = 1 \text{ AND } \frac{\partial U_m}{\partial b_m} \leq \frac{\partial U_i}{\partial b_m} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

すなわち，もし集団内のすべてのエージェントの戦略が同じ  $(b_i, v_i)$  であるときに，任意のミュータントが侵入したとして，(3) 式を満たせば，その集団よりも  $B$  が微小量増加したミュータントは集団の期待利得の増分よりも期待利得の増分が大きいから，その点における動学の  $B$  成分は正に動く。不等号が逆の向きならばマイナスに動く。

$$\frac{\partial U_m}{\partial b_m} > \frac{\partial U_i}{\partial b_m} \quad (3)$$

(2) 式と同様に， $V$  においても ESS の条件を記述することができ，動学の向きがわかる。このようにすべての点において，動学の向きを記述すると，集団全体が同じ戦略を均一に持つという仮定の下ではあるが，集団における戦略の動学を記述することができ，シミュレーション結果と併せて観察することで集団の挙動を理解することができる。

以降の動学は利得パラメータはシミュレーション同様に  $T = 3, H = -1, E = -2, P = -9$  を用い，集団規模に関しては  $N = 20$  を用いて求めている。

図 11 は，規範ゲームにおける動学を示したものである (ESS の導出に関する詳細は付録を参照のこと)。集団は  $(B, V) = (0, 0)$  の向きへ向かうが最終的には，裏切り支配となる  $(B, V) = (1, 0)$  へと収束してしまうことがわかる。これは図 2 左上の挙動を表しており，規範ゲームが最終的には崩壊してしまうことを動学からも理解することができる。

\*1 第 3 項  $\frac{v_i}{2} \sum_{j=1, j \neq i}^n b_j^2$  は，裏切る確率  $b_j$ ，裏切りが発見される確率  $b_j/2$ ，懲罰する確率  $v_i$  から導出できる。規範ゲーム・メタ規範ゲーム [1] において，他者から発見される確率  $s$  は，ゲームの第一段階であるエージェントが裏切るかどうかの条件， $s < b_i$  における  $s$  を用いているため，エージェント  $j$  が  $i$  に発見されるかどうかの時点では  $0 \leq s < b_j$  が成立する。よって発見される確率は  $b_j/2$  となり第 3 項のように導ける。

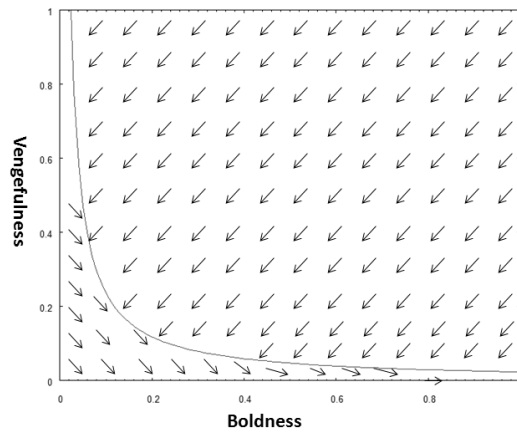


図 11 規範ゲームにおける動学

続いて図 12 は、メタ規範ゲームにおける動学を示したものである。 $(B, V) = (0, 1)$  近くの均衡点に一度収束するが、ここは不安定な均衡点である。突然変異などの摂動により  $V$  が減少する領域に移行してしまうことで、最終的には  $(B, V) = (1, 0)$  に収束してしまう。

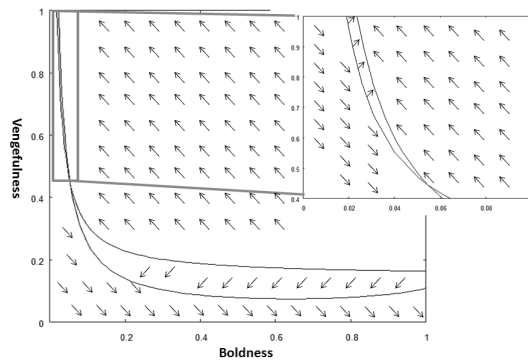


図 12 メタ規範ゲームにおける動学

では、社会的ワクチンを導入した際の動学はどのように描けるのであろうか。ここで、集団に社会的ワクチンエージェントを 1 エージェントだけ投入する。社会的ワクチンエージェントの戦略は常に  $(B, V) = (1, 0)$  とする。図 13 が社会的ワクチンを導入した際の動学である。図からわかるように、縦軸 ( $V$ ) の境界となるラインが領域の下方にあるため、協調が達成されたのち、 $V$  が減少する力が働かない。そのため、協調が頑健に維持されることが動学からも支持される。

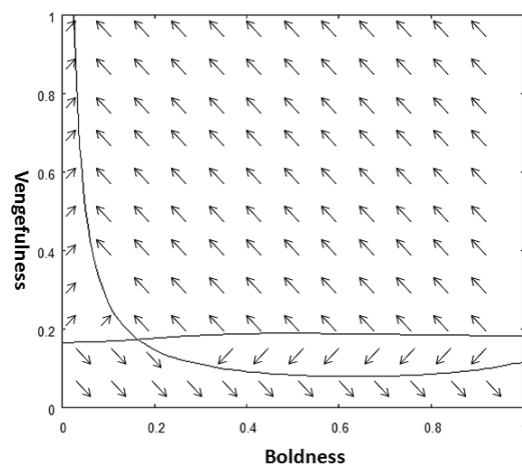


図 13 社会的ワクチンを購入したメタ規範ゲームにおける動学

ここまでの議論から，集団の均質性を仮定した条件下において，メタ規範ゲームは脆弱であるが，社会的ワクチンの導入により協調が頑健に維持されることが示された．

## 6 考察

本節では，社会的ワクチンの示す含意について考察する．

メタ規範に限らずジレンマ状況で協調を達成するための仕組みは様々なレベルで提案されている．Gilbertら [13] らは，エージェントシミュレーションのモデルを抽象度によって，抽象度の高い順に，Abstract Models, Middle Range Models, Facsimile Models と3つのクラスに分類している．ジレンマ状況における協調問題において，Abstract modelsの基本的な知見は，しっぺ返し戦略 [14] やイメージスコアリング [15] であろう．Middle Range models においてはオンライン市場における評判システム [16] の分析があげられる．Facsimile models としては，我々の現実社会における犯罪に対する警察機構と刑法における懲罰システムがあげられよう．

しかし，これらはすべて裏切り行為を識別するための仕組みである．これらの仕組みは裏切り行為を識別し懲罰することで協調の達成を実現できる．

問題は一度協調が達成された後にこそある．それは，協調が達成されたのちには裏切りがないためにこれらの裏切り識別システムが実際には稼働しなくなることである．具体的には，裏切りに対して懲罰的にふるまう戦略と，無条件に協調的である戦略が区別できないために，懲罰のコストを負担しない戦略がミュータントして侵入することを防ぐことができないことである．そのため，協調が支配的な社会においては寛容な戦略が侵入し拡散していく．この状況が続くと，ある時点で急速な裏切り戦略の侵略を防ぐことができずに，裏切り戦略が支配的になる転換を防ぐことができない．この状況を防ぐためには，常に社会において裏切りに対して寛容な状況を作り出さない緊張感が必要となる．それこそが社会的ワクチンの貢献である．

社会的ワクチンの含意は，様々な局面で観察することが可能であろう．たとえば，無菌室で育ったネズミは健康に育つがしかし軽い風邪で簡単に死んでしまう．対して，野生のネズミはさまざまな環境に頑健に育つといった逸話があげられる．このことは常にある程度の外部からの緊張にさらされた環境下にあるほうが強いこ

とを示唆する。

本研究で提案した社会的ワクチンのアイデアは抽象的なものであり、まだ直接的にシステム的设计や運用に援用できるものではない。今後の課題として、協調を頑健に維持するための基本的なアイデアとして、より具体的な状況下における社会的ワクチンの効用を探ることがあげられる。

## 7 まとめ

メタ規範ゲームは安定的な協調の維持にメタ規範が有効であるという有益な知見が発表されて以来、多くの研究がその安定性を前提とした研究が多くなされている。しかし一方で、メタ規範が協調を安定させるパラメータ空間は限定的であることが指摘されている。我々は、メタ規範が協調を安定させる条件を探るためにシミュレーション実験をおこなった。その結果多くのパラメータ環境において、協調が崩壊することを示した。また、我々は従来協調が崩壊するといわれているパラメータ空間においても協調が頑健に維持されるための方策として、社会的ワクチンの導入を提案した。社会的ワクチンを導入することでメタ規範における超長期および様々な突然変率における安定達成を可能とした。

今後の課題として、常に裏切る社会的ワクチンだけでなく、常に裏切りを懲罰するエージェントや常に協調するエージェントを集団に導入した際の効果を検討することがあげられる。いくつかの特徴的なエージェントを集団に導入する効果を比較することで、社会的ワクチンの役割や含意がより深く考察できると考えられる。

## 参考文献

- [1] Axelrod, R.M., An Evolutionary Approach to Norms, *American Political Science Review*, 80 (4), 1095-1111, 1986.
- [2] Deguchi, H., Norm Game and Indirect Regulation of Multi Agent Society, *Proc. of Computational Social and Organizational Science Conference*, 2000.
- [3] Heckathorn, D.D., Collective Sanctions and Compliance Norms: A Formal Theory of Group-Mediated Social Control, *American Sociological Review*, 55(3), 366-384, 1990.
- [4] Horne, C., and A. Cutlip, Sanctioning Costs and Norm Enforcement: An Experimental Test, *Rationality and Society* 14(285), DOI: 10.1177/ s1043463102014003002, 2002
- [5] Yamashita, T., H. Kawamura, M. Yamamoto, and A. Ohuchi, Effects of Propotion of Metanorm Players on Establishment of Norm, *Fourth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA'01)*, 2001.
- [6] Galan, J.M. and L.R. Izquierdo, Appearances Can Be Deceiving: Lessons Learned Re-Implementing Axelrod's 'Evolutionary Approach to Norms', *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 8(3), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/2.html>, 2005.
- [7] Prietula, M.J. and D. Conway, The evolution of metanorms: quis custodiet ipsos custodes?, *Computational Mathematical Organization Theory*, DOI 10.1007/ s10588-009-9056-4, 2009.
- [8] Newth, D., Altruistic Punishment, Social Structure and the Enforcement of Social Norms, in R. Khosla et al. (Eds.): *KES 2005, LNAI 3683*, 806-812, 2005.
- [9] 織田輝哉, 秩序問題への進化論的アプローチ-メタ規範ゲームの展開-, *理論と方法*, 5(1), 81-99, 1990.
- [10] Galan, J.M. and L.R. Izquierdo, Appearances Can Be Deceiving: Lessons Learned Re-Implementing

- Axelrod's 'Evolutionary Approach to Norms', Journal of Artificial Societies and Social Simulation 8(3), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/2.html>, 2005.
- [11] Lotem, A., Fishman M. A. and Stone, L., "Evolution of cooperation between individuals", Nature 400, 226-227, 1999.
- [12] Smith, J.M. and G.R. Price, The Logic of Animal Conflict. Nature, 246 (2), pp. 15-18, 1973.
- [13] Gilbert, G. N. and Troitzsch, K. G.: Simulation for the Social Scientist, Open University Press, (1999)
- [14] Axelrod, R., "The Evolution of Cooperation", New York, Basic Books, 1984,
- [15] Nowak, M.A. and Sigmund, K. "Evolution of indirect reciprocity by image scoring", Nature 393, pp573-577, 1998.
- [16] Yamamoto, H., K., Ishida and T., Ohta, "Modeling Reputation Management System on Online C2C Market", Computational & Mathematical Organization Theory, Vol. 10, No. 2, pp.165-178, 2004.

## 付録

図 11, 図 12, 図 13 の動学は, 以下の手順で ESS の境界となる曲線を求めている.

### 付録 A 規範ゲームにおける ESS の導出

$N$  人の集団における各エージェントの戦略  $(B, V)$  を考える. この集団に戦略  $(b_m, v_m)$  をもつミュータントエージェントが 1 個体侵入し, それ以外の  $(N-1)$  個体は同一戦略  $(b_i, v_i)$  を持つものとする.  $(b_i, v_i)$  の戦略をもつエージェントの期待利得  $U_i$ ,  $(b_m, v_m)$  の戦略を持つエージェントの期待利得  $U_m$  は, (1) 式の第 4 項までを用いて以下のように表せる.

$$U_i = T \cdot b_i + H(N-2)b_i + H \cdot b_m + E \frac{v_i}{2}(N-2)b_i^2 + E \frac{v_i}{2}b_m^2 + P \frac{b_i^2}{2}(N-2)v_i + P \frac{b_i^2}{2}v_m$$

$$U_m = T \cdot b_m + H(N-1)b_i + E \frac{v_m}{2}(N-1)b_i^2 + P \frac{b_m^2}{2}(N-1)v_i$$

これらの式に各パラメータ ( $T = 3, H = -1, E = ME = -2, P = MP = -9, N = 20$ ) を代入し,  $\frac{\partial U_m}{\partial b_m} = \frac{\partial U_i}{\partial b_m}$  を解くことで  $B$  軸の ESS の境界がもとまる.  $\frac{\partial U_m}{\partial b_m} > \frac{\partial U_i}{\partial b_m}$  のとき,  $B$  軸方向の動学の向きは正となり, 不等号が逆の時には負の向きとなる.

また,  $\frac{\partial U_m}{\partial v_m} = \frac{\partial U_i}{\partial v_m}$  を解くことで  $V$  軸の ESS の境界を求めることができ, 動学の向きも同様に求まる.

### 付録 B メタ規範ゲームにおける ESS の導出

(1) 式を用いて同様に  $U_i, U_m$  を求める.

$$U_i = T \cdot b_i + H(N-2)b_i + H \cdot b_m + E \cdot \frac{v_i}{2} \cdot (N-2)b_i^2 + E \cdot \frac{v_i}{2} \cdot b_m^2 + P \cdot \frac{b_i^2}{2} \cdot (N-2)v_i + P \cdot \frac{b_i^2}{2} \cdot v_m + ME \cdot \frac{v_i}{4} [(N-2)b_i^3 \{(N-3)(1-v_i) + (1-v_m)\} + (N-2)b_m^3(1-v_i)] + MP \frac{(1-v_i)}{4} [(N-2)b_i^3 \{(N-3)v_i + v_m\} + (N-2)b_m^3 v_i]$$

$$U_m = T \cdot b_m + H(N-1)b_i + E \cdot \frac{v_m}{2} \cdot (N-1)b_i^2 + P \cdot \frac{b_m^2}{2} \cdot (N-1)v_i + ME \cdot \frac{v_m}{4} \cdot (N-1)(N-2)b_i^3(1-v_i) + MP \frac{(1-v_m)}{4} \cdot (N-1)(N-2)b_i^3 v_i$$

以下, 規範ゲームと同様の計算によって ESS の境界を求めることができる.

## 付録 C 社会的ワクチンを導入したメタ規範ゲームにおける ESS の導出

ここで社会的ワクチンの戦略  $(B, V) = (b_s, v_s)$  とする．集団は  $(N-2)$  個体の同一戦略のエージェント，1 個体のミュータント，1 個体の社会的ワクチンからなる． $U_i, U_m$  をそれぞれ求める．

$$U_i = T \cdot b_i + H \{ (N-3)b_i + b_m + b_s \} + E \cdot \frac{v_i}{2} \{ (N-3)b_i^2 + b_m^2 + b_s^2 \} + P \cdot \frac{b_i^2}{2} \{ (N-3)v_i + v_m + v_s \} + ME \cdot \frac{v_i}{4} [ (N-3) \{ (N-4)b_i^3(1-v_i) + b_i^3(1-v_m) + b_i^3(1-v_s) \} + (N-3)b_m^3(1-v_i) + b_m^3(1-v_s) + (N-3)b_s^3(1-v_i) + b_s^3(1-v_m) ] + MP \cdot \frac{(1-v_i)}{4} [ (N-3) \{ (N-4)b_i^3v_i + b_i^3v_m + b_i^3v_s \} + (N-3)b_m^3v_i + b_m^3v_s + (N-3)b_s^3v_i + b_s^3v_m ]$$

$$U_m = T \cdot b_i + H \{ (N-2)b_i + b_s \} + E \cdot \frac{v_m}{2} \{ (N-2)b_i^2 + b_s^2 \} + P \cdot \frac{b_m^2}{2} \{ (N-2)v_i + v_s \} + ME \cdot \frac{v_m}{4} [ (N-2) \{ (N-3)b_i^3(1-v_i) + b_i^3(1-v_s) \} + (N-2)b_s^3(1-v_i) ] + MP \cdot \frac{(1-v_m)}{4} [ (N-2) \{ (N-3)b_i^3v_i + b_i^3v_s \} + (N-2)b_s^3v_i ]$$

以下，規範ゲームと同様の計算によって ESS の境界を求めることができる．