

## メタ規範の脆弱性とその改善

山本仁志<sup>†</sup> 岡田勇<sup>††</sup>

アクセルロッドの提唱したメタ規範による協調の成立は狭い範囲のパラメータ空間でのみ成立することが指摘されている。我々は、メタ規範による協調の成立条件を精査し、安定的に協調が存続する条件を探索する。その結果、多様性の維持によって協調が成立することが分かった。また、少数の裏切り行為者を常に社会に存在させることで、広い条件下で頑健に協調の安定が達成されることを発見した。

### Vulnerability and evolution of cooperation in the metanorms game

Hitoshi Yamamoto<sup>†</sup> and Isamu Okada<sup>††</sup>

Evolution of cooperation in the metanorms game proposed by Axelrod is well known but some papers pointed out that the evolution emerges only in the relative narrow parameter space. We examine its realized conditions carefully in the metanorms game and search conditions for existing stable cooperation. As a result of analyzing our model, we show that maintaining variety is a key point of evolution of cooperation. Moreover, we investigate that the stability of cooperation emerges robustly in the relative wide parameter space when a few defectors are always existing in the society.

### 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を分析して協調の安定性を支持している。また Heckathorn[5] や Horne and Cutlip[6] 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.[10] や Galan et.al.[4] 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し、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 [9])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,[7])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[8]では、初期の懲罰確率によってはメタ規範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[3] 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でも協調が崩壊する。メタ規範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、崩壊社会の方が安定的であることが原因である。これは、そもそもメタ規範が規範社会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、メタ規範の非頑健性を示す重要な知見である。

二つ目に、メタ規範における懲罰損失と懲罰コストを0.1倍にすることで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。

---

<sup>†</sup> 立正大学  
Rissho University  
<sup>††</sup> 創価大学  
Soka University

最後に突然変異確率を 0.1 倍にすることでも協調が崩壊されることを指摘している。これはメタ規範の維持には、ある程度の突然変異が必要であることを予想させる。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。

我々は新たに、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。我々はこの効果を社会的ワクチン効果と呼ぶ。

## 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 規範ゲーム・メタ規範ゲームの構造

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。

ここまです規範ゲームである。メタ規範とは、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)。

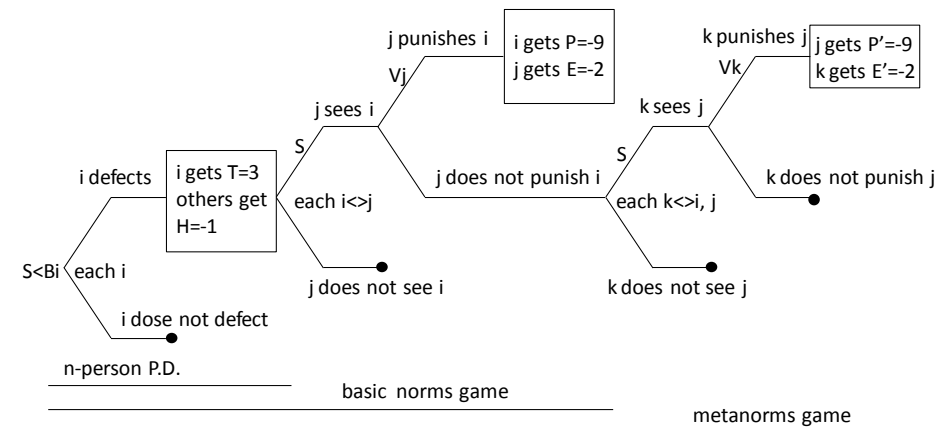


図 1: 規範ゲームとメタ規範ゲームの構造 (Axelrod[1]より)

### 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 実験に用いたパラメータ

パラメータ	値
集団の規模 N	20
大胆さの初期値	一様乱数
復讐度の初期値	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

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 は結果的に同様の調整となる。

図 2 は、規範ゲーム・メタ規範ゲームを異なる乱数種でおこなったものである。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。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。

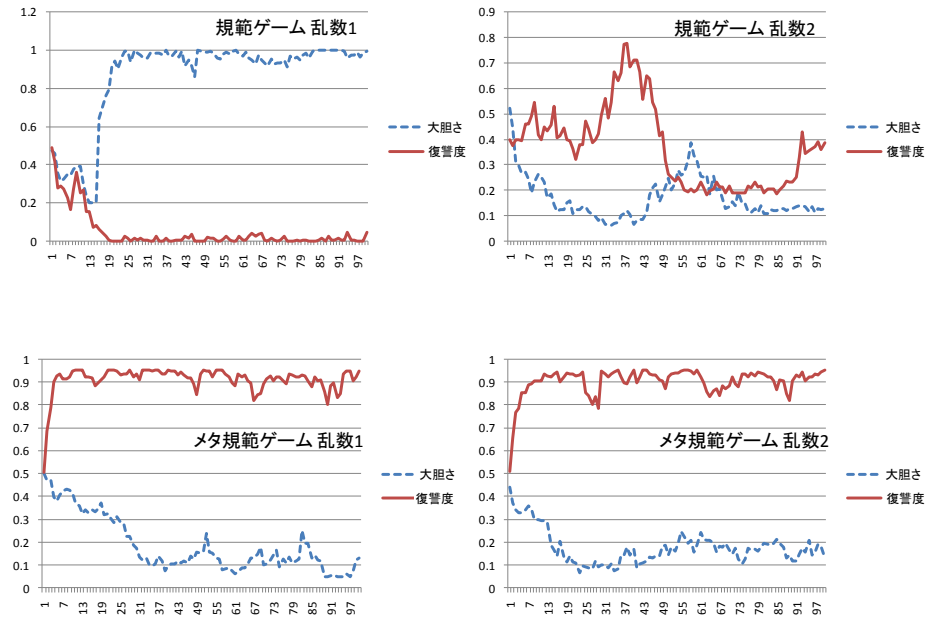


図 2 : Axelrod モデルにおける規範ゲームとメタ規範ゲームの挙動

### 3. メタ規範ゲームの脆弱性

本節ではアクセルロッド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、最終世代の大胆さ B の平均値をプロットしている(図 3)。復讐度 V は、B と強い負の相関があり 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。

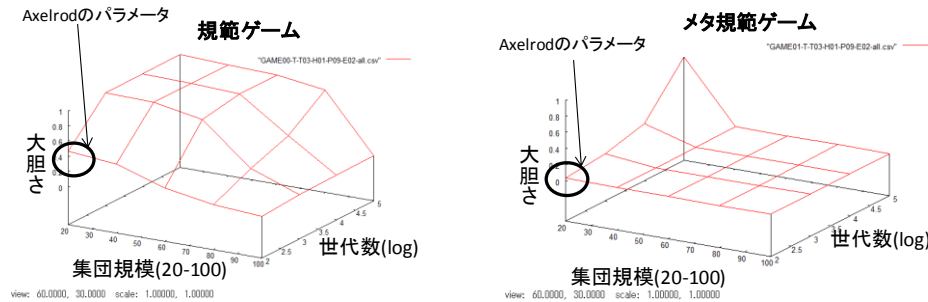


図 3 : 集団規模と世代を変化させた Axelrod モデル

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。これはもともと規範ゲームが懲罰に対するフリーライドを容易にしている構造のため、長期的には裏切りが優位になるためである。

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、再び規範が成立している。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、規範は一気に崩壊する。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。

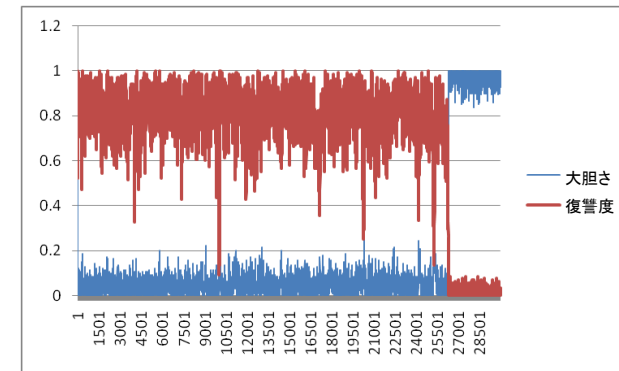


図 4 : 長期世代におけるメタ規範の崩壊

### 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。

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。

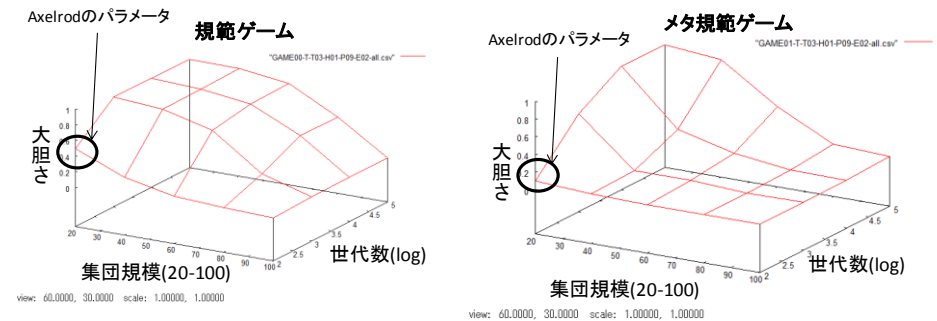


図 5 : 集団規模と世代を変化させた GA モデル

メタ規範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。

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 6 は、規範ゲーム・メタ規範において、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 5% 以上のときに協調が成立していることが観察される。

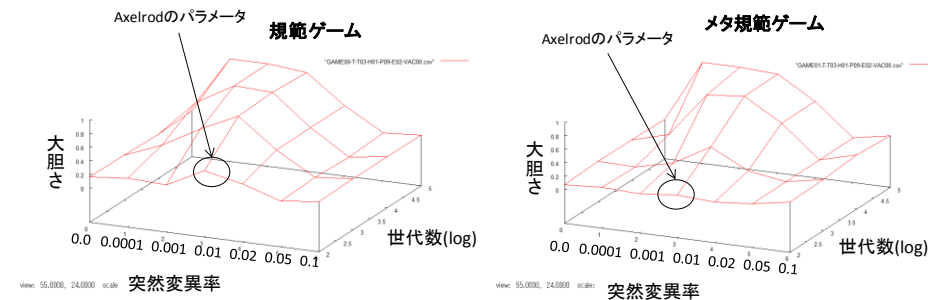


図 6：突然変異率と世代を変化させた GA モデル

突然変異率が 5% 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非常にランダムな世界であることが分かる。突然変異率が 5% のときの時系列変化を観察する。図 7 はそれぞれ規範ゲーム、メタ規範ゲームの突然変異率 5% における時系列推移である。メタ規範において大胆さ(B)は 0.15 から 0.5 までの間を不規則に推移する。

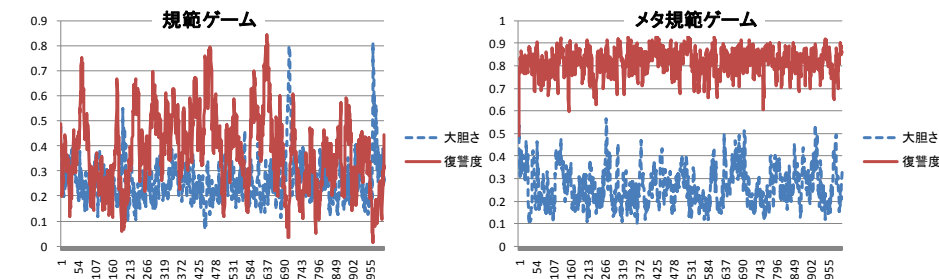


図 7：突然変異率が 5% のときの GA モデルの挙動

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樣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、一樣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. 社会的ワクチンによる協調の維持

前節までの結果をまとめると以下のように整理できる。集団規模=20, 世代数 100 期では、「規範ゲーム=3 パターンの結果が生じる」「メタ規範=協調が達成される」ことを再確認した。しかし、規範における 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 (Agent=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 5% では平均的な裏切り率は抑制されたが、0% は進化ゲームとしては不自然であるし、5% 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。

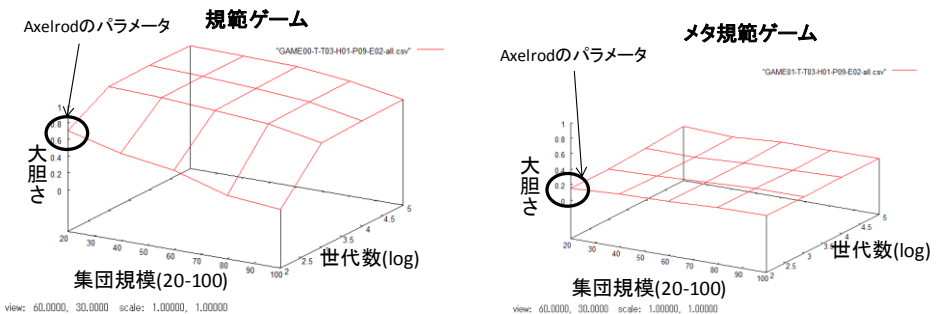


図 8 は集団に集団規模の 5% のワクチンエージェント（常に裏切るエージェント）を導入した際の大胆さの平均値である。集団規模と世代数を変化させた。5% の理由は、最小規模の 20 に導入できる最低数 1 が 5% であることによる。

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、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。

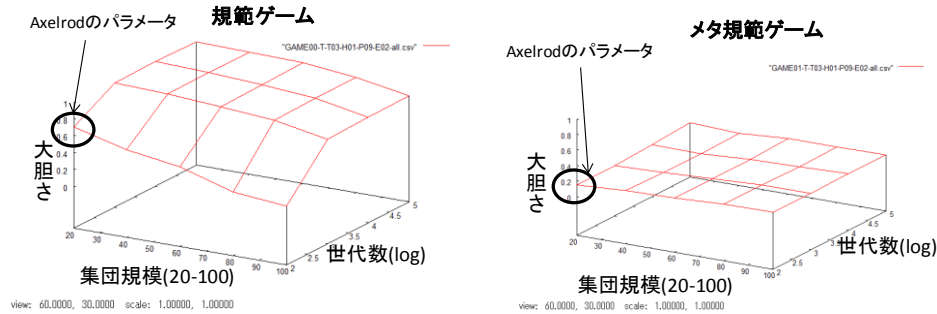


図 8：社会的ワクチンを導入したことによるメタ規範の安定（集団規模の変化）

続いて、突然変異率と世代を変化させた実験の結果を図 9 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。

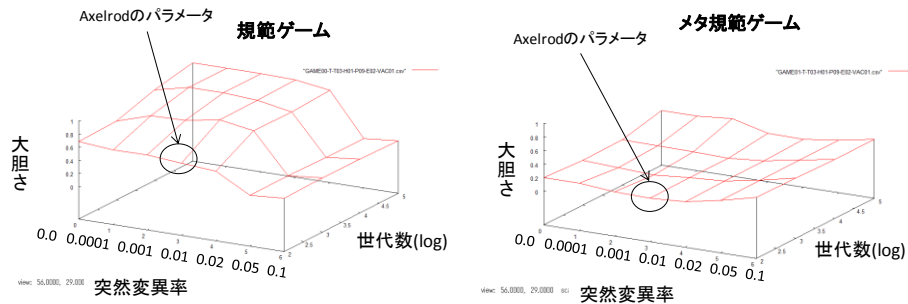


図 9：社会的ワクチンを導入したことによるメタ規範の安定（突然変異率）

## 5. おわりに

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。

## 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) 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.
- 4) Galan, J.M., M. Latek, M. Tsvetovat, and S. Rizi, Axelrod's Metanorm Games on Complex Networks, Proc. of Agent 2007 Conference, 271-280, 2007.
- 5) Heckathorn, D.D., Collective Sanctions and Compliance Norms: A Formal Theory of Group-Mediated Social Control, American Sociological Review, 55(3), 366-384, 1990.
- 6) Horne, C., and A. Cutlip, Sanctioning Costs and Norm Enforcement: An Experimental Test, Rationality and Society 14(285), DOI: 10.1177/1043463102014003002, 2002
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.

