

社会的規範創発の研究

- 交通システムのエージェントシミュレーション -

*森杉育生[†], 池田心^{††}, 喜多一^{††}

[†]京都大学 情報学研究科
〒606-8301 京都市左京区吉田二本松町 学術情報メディアセンター404号室
morisugi@job.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

^{††}京都大学 学術情報メディアセンター
〒606-8301 京都市左京区吉田二本松町

Abstract: We can observe the phenomenon in which people act based on a kind of the norm in our society. It is classified into the norm emerged by a bottom-up process, or given top-down. To form good social norm, it may need both aspects. In this paper, as an example, we constructed a multi-agent simulation in traffic norm for signal, and carried out experiment. As a result, we observed that subtle top down approach helped the emergence of a good norm.

1. 背景および問題意識

社会においてある種の規範の形成が起こっている現象が良く観察される。これらの規範は概ね、a) 自己の利得に基づいて行動した結果、ボトムアップなプロセスから自然発生的に生まれる規範と b) 権力的な存在からトップダウンに与えられる規範に分類することができる。例えば、a)については、エスカレータの並びの偏りや電車の乗り降りの順番などに見られる。また、b)については典型的なものとして法律が挙げられる。

a)に属する社会規範に関する既存の研究として、各自律主体が利害衝突を回避した結果、個性・社会性が発現するという柴田らの研究¹⁾が挙げられる。一方、b)に属する規範への言及として、Hobbesは、社会的ジレンマを解くためには罰を与えることができる権力が必要であることを主張している²⁾。また、罰を与えられる権力を人々が持っていることを前提として、Axelrodは、限定合理性のもとで人々が規範を破ったものに対し、罰を与えることができる規範ゲームの元では、安定的に規範は獲得されず、規範を破ったものを黙認したものに対しても罰を与えることができるメタ規範を与えることで中央的権力の存在がなくとも、規範が安定的になることを示した³⁾。

これら a)および b)の規範に関して、現在の社会では a)と b)のどちらか一方のみが支配しているわけではなく、双方の側面が調和的に適度な規範を作り出している場合がある。その一例として、高速道路では、トップダウンの制度として、制限速度が 100km/h と設定されているが、実際に車両が出す速度は 100km/h より少し高いという現象がよく観察される。ここで例えば、制限速度を完全になくしてしまうと車両が猛スピードを出しやすい環境になり、事故が起こりやすくなる。逆に、強く制限速度を守らせると交通効率が低くなってしまう可能性がある。ここでは、双方のアプローチによってバランスの良い規範を発生させていると予想される。

社会的に望ましい規範の形成のためには、トップダウンだけでは、制定や監視のコストがかかり、ボトムアップだけでは、望ましい社会規範が形成されない場合がある。こうした問題に対し、ボトムアップに発生する自律的・創発的な規範生成に対し適度なトップダウンの介入を行うことによって、これを社会的に望ましいものへと誘導することが期待される。本論文では、こうしたトップダウン・ボトムアップ単独では解決できないような問題における双方向的な規範形成過程を例を用いて解析する。規範の解析を行うことで、将来的には規範形成の制御方法論の知見が得られ、社会的に望ましくない規範を良い方向に導くような制御の実現が期待できる。

2. 本論文のアプローチ

上述した問題を考える上で本論文では交通問題における規範を考える。交通問題は、上述の制限速度の例に見られるように、様々なトップダウンの制度が存在し、その下で車両や歩行者等の自律主体がボトムアップに規範を形成する典型的な問題である。本論文では、その一例として、交通信号に対する規範形成を考える。信号機は赤、青と色を提示（現示）する機械にすぎない。多くの人々は青で

進行、赤で停止という規範を与えられた交通ルールとして学習し、これに従って行動している。信号機はその遵守によって、車両同士の衝突を回避し、効率的に交差点を通過させることができるため、それ自身が安定性を持っている点に注目する。

本論文では、信号機を守るというルールが予め与えられない場合においても、各個人が互いに利害衝突を回避した結果によって、規範がボトムアップに創発されることを示す。さらに、どのような条件でどのような規範が形成されるのかを考察する。そのために、ボトムアップな交通規範の生成過程をマルチエージェントシミュレーションによって検証する。具体的には、交通需要量の割合や、交通密度の地理的な差異、信号現示時間の比率などのパラメータがどのように交通規範の形成に影響するかを検証する。

3. シミュレータの構築

本論文では、上述したようなボトムアップに生成される問題に対して、マルチエージェントシミュレーションを用いる。マルチエージェントシミュレーションは個々のエージェントをモデリングし、それらの相互作用の結果としてボトムアップにマクロな現象を創発させ、その挙動を分析するシミュレーション手法である。ここでは、道路環境において車両エージェントが多数存在し、それぞれが利得が高くなるよう自分の持つ政策を進化させていくというシミュレーションを行う。その進化させた結果を総体として見たときに、多く用いられている政策が規範ということになる。

3.1. 交差点シミュレータの概要

本論文では、セルオートマトンタイプの繰り返し学習型のマルチエージェントシミュレータを構築した。シミュレータの概要を図1に示す。交差点は1箇所であり、南北、東西がそれぞれ同じ信号現示である。また、全エージェントの走行速度は一定とし、進行方向は直進のみとしている。

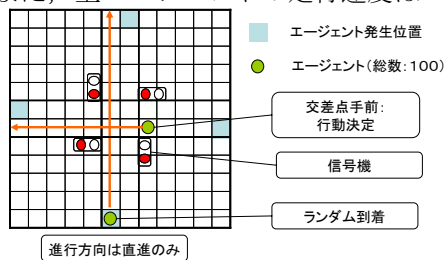


図 1: シミュレータの概要

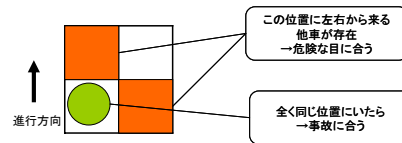


図 2: 危険判定

シミュレーションが始まるとエージェントが順次ランダムに発生し、目的地を目指し走行する。エージェントは信号機の前に到着すると、信号状態と各エージェントが持つ政策に基づき、走行するか停止するか意思決定を行う。交差点内では車両同士の衝突など危険判定が行われ、その後エージェントが目的地まで到着すると、そこで旅行時間と危険判定によって利得が決定される。結果を平均化するためにエージェントは複数回上述のプロセスを繰り返す。その後各エージェントの平均利得を元に学習を行う。そこまででシミュレーションの1サイクルが終了する。

3.2. エージェントの意思決定

エージェントの信号前での意思決定は、エージェントの持つ政策セットに依存する。政策セットとは、信号現示が赤のときそのまま進行する確率を a_1 、青のときそのまま進行する確率を a_2 としたとき、 (a_1, a_2) (ただし $0.0 < a_i \leq 1.0$) で表されるものである。

3.3. エージェントの利得

エージェントの利得は、目的地までの旅行時間をマイナスしたものに危険判定で得られた負の報酬を加えたものにした。これによって、より短時間で旅行し、かつ事故をおこさなかったエージェントの利得が高くなる。危険判定の方法について図2に示す。危険判定はエージェントの進行方向に対して、左右から接近してくる車両のみを対象とし、後方から接近する車両については危険判定を行わない。危険判定の対象となる車両について、隣接するセルにそれが存在するとき、「危険」として若干の負の報酬を与え、全く同じセルにいたとき「衝突」として高い負の報酬を与える。

3.4. 学習

学習は以下 1)~4)の手順によって行われる

- 1) 総個体数に N 体のエージェントを加え、評価を行う
- 2) 利得の上位 (総個体数 $\cdot N$) 人の中から任意に親エージェントを 2 つ選択する

- 3) 2つの親が持つ政策の実数値ベクトルの区間を両方向に α だけ拡大し、その範囲からランダムで政策を決定する
- 4) 2), 3)をN人分繰り返し、総個体に加える。その際利得が低かった以前のN人分を削除する

表 1: 学習の基本設定

個体数	100
政策表現	(a_1, a_2) (ただし $0 < a_i \leq 1.0$)
評価関数	- (旅行時間 + 危険報酬)
選択	Steady State -N
交叉	BLX- α
突然変異	なし

表 2: シミュレーション条件

世代数	500
政策分布	0.1~1 まで 0.1 ぎざみでランダム
車両需要	1500, 2000, 2500, 3000
信号現示比率 (赤 : 青)	10:6
危険報酬 (衝突)	-100
危険報酬 (危険)	-10

4. シミュレーション実験

信号に対する交通規範がどのように形成されるか検証するために、エージェントの政策セットの変遷を分析した。シミュレーションの条件を表 2 に示す。

本実験では、ボトムアップな規範形成の中に介入するトップダウンの要素によって、規範の形成過程がどう変化するかを主に分析した。そのために、トップダウン要素として信号現示時間の比率を赤と青で異なるものにした (赤現示時間の方が長い)。このとき、赤信号を守らなかったらエージェントに負の報酬 (罰) を与えると、直接的な規範は設定されていない。

シミュレーションの分析項目として、右の範囲に全エージェントの政策セットがどの程度分布するかを 5 世代ごとに観察する。

各範囲に属する政策セットの性質としては、1)赤も青も停止しやすい、2)赤で進行しやすく・青で停止ししやすい、3)赤で停止しやすく、青で進行ししやすい、4)赤も青も進行ししやすい、というように特徴づけられる。

- 1) Rude : $a_1 < 0.5, a_2 < 0.5$
- 2) Reverse : $a_1 \geq 0.5, a_2 < 0.5$
- 3) Normal : $a_1 < 0.5, a_2 \geq 0.5$
- 4) Fool : $a_1 \geq 0.5, a_2 \geq 0.5$

5. シミュレーション結果

交通需要量が 2000 台/時における、世代毎の政策分布、平均報酬推移、および最終世代の政策分布について、それぞれ典型的な例を図 3, 図 4, まれに現れる例を図 5 に示す。

図 3 のシミュレーション結果では、初期にランダムな政策セットが与えられた後、進化が進むにつれ 3)Normal および 4)Rude の範囲に含まれるものが他の政策セットを圧倒したが、最終的に「赤ならば停止」、「青ならば進行」というように現実の規範と同様の規範が形成された。これは、交通需要量が 2000 以上のとき多く形成された。これは、衝突回数が増えたこと、信号の現示比率が、10:6 と赤現示時間の方が長いというトップダウン要素の介入によって、合理的選択の結果としてこの結果が導かれたと予想され、図 4 の平均報酬が徐々に上昇していること、最終世代の政策分布が局所的になっていることから推察できる。

図 4 では、初期の進化段階から 4)Rude の範囲に含まれるものが他の政策セットを圧倒し、「青であっても、赤であっても進行する」という規範が成立した。このパターンは主に交通需要量 2000 以下の場合に多く観察された。これは、交通需要量の低下によって、衝突の回数が減少し、信号を無視して進行することが合理的な選択の結果として導かれたと予想される。しかし、交通需要量 2000 のときのように、様々な規範が形成される可能性があるような状況では、その平均利得の変遷を見ると、最初は上昇したが、その後すぐにやや横ばいになっている。また、平均利得が図 3 の 3)Normal が規範となった場合よりも減少し、望ましい規範が形成されなかったと言える。

図 5 では、3)Normal および 4)Rude の範囲に含まれるものが他の政策セットを圧倒したが、交互に占有率が変わり、完全に支配的な規範は形成されなかった。これは、Normal と Rude といった政策が混ざり合って共存する可能性があることを示しているが、平均利得の変遷を見ると、ふれ幅が大きく、安定的に社会的に望ましい規範を導くことは難しいことを示している。

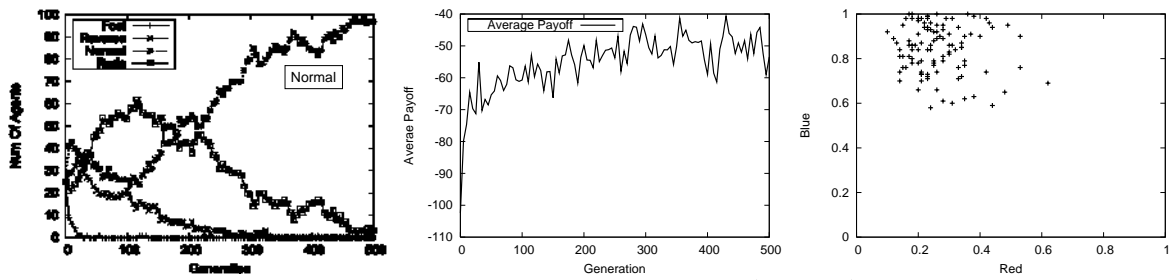


図 3: 政策セット進化の典型例 1(Normal)

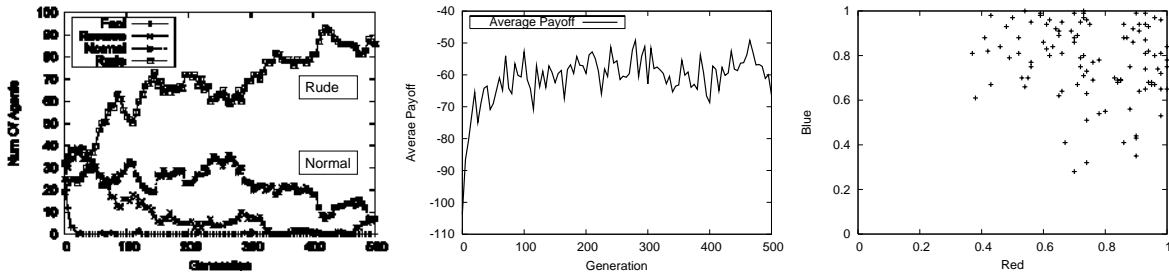


図 4: 政策セット進化の典型例 2(Rude)

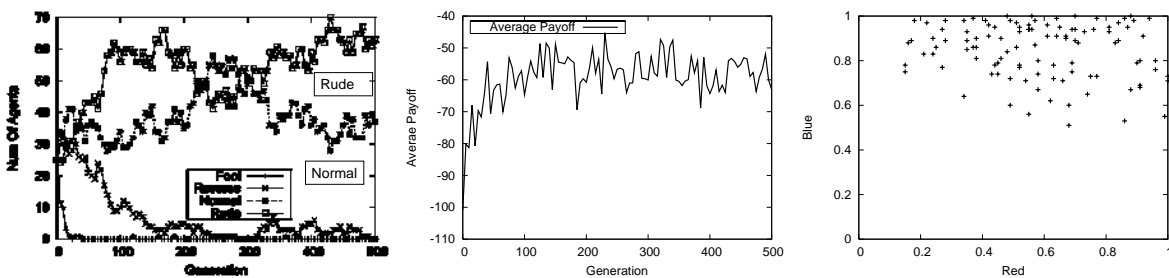


図 5: 政策セット進化の稀な例(周期)

6. まとめ

社会における規範形成過程において、トップダウンとボトムアップの両プロセスによって社会的に有効な規範がされることを背景に、その一例として交通信号機に関する規範のシミュレーションを構築した。そのシミュレーション実験において、青・赤の信号現示時間に差をつける形で、わずかなトップダウンな要素を導入させた。その結果として交通量が多い場合に「赤で停止」「青で進行」という設計者が望む規範がボトムアップに形成されることを確認した。また、交通需要量がある程度減少すると信号機機能が成立しなくなる場合や、現実とは異なる信号機能の創発が見られ、規範の形成についての多様な可能性が示された。これは規範の生成が、ボトムアップな規範形成過程でその前提条件に大きく影響を受けることを表している。今回の場合、車両需要の増減によって結果にばらつきが発生し、必ずしも安定的な規範にはならなかった。

今回の場合は、交通規範を例としたが、より汎用的なモデルを構築すれば、多様な状況で応用可能な規範形成の分析ができる。また、交通問題に限定すると、より広範なネットワーク環境や車両挙動の拡張など、大規模な交通流における規範形成の分析をしていくことによって、交通制度設計への応用ができる。今後は、それらの規範形成過程において、何が規範となることを決定づける要因となり得るのか、シミュレーションや社会実験を行うことによってより詳細に分析していきたい。

引用文献

- 1) 柴田・上田・伊藤： 強化学習による個性・社会性の発現・分化モデル，計測制御学会論文集，Vol.39, No.5, pp. 494-502, 2003.5
- 2) Thomas Hobbes (水田洋訳)： リヴァイアサン，1992
- 3) Robert Axelrod (寺野隆雄訳)： 規範の促進 -規範についての進化的アプローチ-，対立と協調の科学，pp. 61-pp89, 2003