

高齢者に代表される弱者を包摂するコミュニティを 交流を通じて形成させるマルチエージェントモデル

○張玥 橋本敬 小林重人 (北陸先端科学技術大学院大学)

Multi-Agent Model for Formation of Inclusive Community through Social Intercourse for the Weak represented by Elderly

*Y. Zhang, T. Hashimoto and S. Kobayashi (Japan Advanced Institute of Science and Technology)

概要— 本研究は、社会的排除のリスクが高い高齢者を包摂する地域コミュニティが成立する条件を明らかにするために、直接互惠による交流ゲームと間接互惠による包摂ゲームの2種類の協力ゲームを行うコミュニティをモデル化して社会的包摂が安定的に維持される条件をシミュレーションによって探索した。結果から、交流ゲームの回数が包摂ゲームのそれを上回ること、そして社会的学習が緩やかに進む条件で社会的包摂が実現されていることを示した。ゆえに直接互惠による協力関係の構築が社会的包摂を生み出す基盤になると示唆される。

キーワード: 包摂コミュニティ, 間接互惠, 弱者, マルチエージェントモデル

1 背景

日本は高齢化社会が進み、65歳以上高齢者（以下「高齢者」と呼ぶ）の人口は3186万人(2013年9月時点)で過去最多になり、4人に1人が高齢者という状況になっている¹⁾。高齢化率の上昇により高齢者を支える人が不足しており²⁾、高齢者の中でも元気な人が弱い高齢者を支えることが期待される。しかし、他人を助けることができない弱者を支えることは、見返りを期待せずに弱者を助けるということである。

多くの協力関係は、相手を助けたら相手からもいずれ助けてもらえるという相互の見返りを期待する。しかし、他者を助けられない弱者を助けるということは、その人からの助けが返って来ることは期待できない。そのような人を助けようと思わないなら、他者に協力を提供できない弱者が排除されるような望ましくない社会になってしまうだろう。しかし実際には、高齢や貧困など様々な困難を持つ弱者を支援し包摂できる社会の構築が求められている³⁾。

弱者を包摂する、すなわち見返りを期待せずに相手に協力するには、間接互惠が有効である。間接互惠行為とは、行動の出し手と、その返報の対象が異なる三者関係での互惠性を指す⁴⁾(真島, 高橋, 2005)。Nowak and Sigmund⁵⁾は評判の概念を導入することで互惠性理論を発展させ、間接互惠が達成できることを示した。彼らのモデルでは、イメージスコアという評判を使いグループ内の全員が継続的に評価される仕組みを導入した。そして「相手に協力行動をすれば、周囲からの自身に対する評価が上がり、相手以外の他の誰かから協力行動を返してもらえ」という間接的互惠関係の仕組みによって、協力行動が進化的に安定なることをシミュレーションによって説明した。

間接互惠が成立するNowak and Sigmund⁵⁾の研究では協力をしないフリーライダーは排除される。一方、我々が目指したい社会は協力したくてもできない人、行動としてはフリーライダーにならざるを得ない人を助ける包摂的な社会である。そのような社会をどうやって作るかというのは、Nowak and Sigmund⁵⁾の仕組みだけでは不十分と考えられる。

見守りコミュニティや震災後の助け合いなど、見返りを期待しない協力は人間社会には存在し、そういったものはどうやってできるのかを調べた事例研究がある。長谷川・小川⁶⁾では、サークルなどの活動から不特定多数の高齢者が交流するコミュニティができ、その交流のコミュニティを踏まえることで、生活問題解決の見守りを行うコミュニティがスムーズに形成できた。すなわち、見守りを行うコミュニティのような包摂的なコミュニティはいきなりできるのではなく、普段からの交流が地域に根付いて、そこからいざという時の助け合いである見守りコミュニティへと段階的作られている。

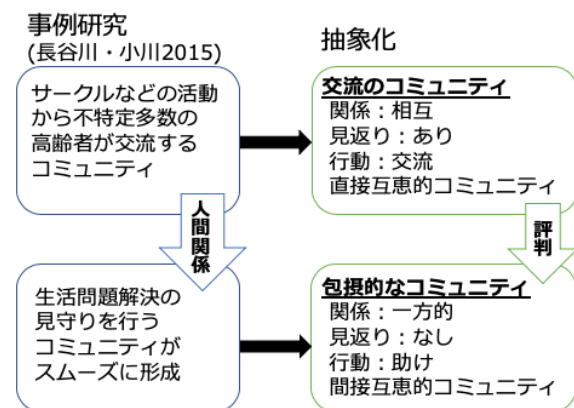


Fig. 1: 事例とその抽象化

この事例より、交流のコミュニティが直接互惠的なコミュニティで、そこでの人間関係が包摂的なコミュニティに伝播し、間接互惠的な協力社会が成り立つという仕組みが予想される (Fig.1)。しかし、このような仕組みはNowak and Sigmund⁵⁾のモデルには含まれておらず、実際にどういう条件で成立するかはわからない。直接互惠と間接互惠が両方存在するモデルがあり、そこでは会ったことがある相手とは、自分の経験を信じて直接互惠的なゲームをするのか、あるいは噂を信じて間接互惠的なゲームをするのかを選ぶようになっている⁷⁾。しかし、この研究でも協力してもら

が相手に協力をしないフリーライダーを排除することが主題となっている。

本研究は、他者を助けることができないような高齢者に代表される弱者が、フリーライダーとして排除されるのではなく助けられる包摂的なコミュニティが作られる方法を示すことを目指している。そのために、交流のコミュニティから見守りコミュニティができる事例⁴⁾にヒントを得て、この2種類の協力的なコミュニティが安定に成立する条件を、エージェント・ベース・シミュレーションを用いて調べる。すなわち、交流のコミュニティで協力関係が形成され、その関係が弱者を包摂するコミュニティに展開される制度設計のヒントをエージェントモデルで示すことを目的とする。

本論文の構成は以下の通りである。背景・目的を述べた本章に続いて、第2章では本研究で構築したモデルを詳細に説明する。第3章ではシミュレーションの結果と考察を述べる。第4章では、全体に対する考察を述べた後、制度設計のヒントを提示し、現実的における意味、理論的な発展を提示する。最後に第5章では、結論を述べた上で本論文において提起した問いに対する答えを提示する。

2 モデル

2.1 概要

本研究では交流のコミュニティと包摂的なコミュニティという2種類のコミュニティを考える。2つのコミュニティがあるのではなく、コミュニティへの参加者は同じであり、相互作用の仕方が異なる。交流のコミュニティは、たとえば町内会での会話などの負担が小さい交流を目的とし、互いに楽しく話し合うような見返りが期待できる特徴を持つ。したがって、こちらを直接互惠によりモデル化する(「交流ゲーム」とする、Fig. 2)。包摂的なコミュニティとは、助ける相手のところに行き、交流のコミュニティと比べて負担が大きい物理的・直接的な助けを一方的にしてあげてを目的とし、相手に手助けをしてあげても、相手が弱者だったらず助けをしてくれない、相手が弱者ではなくても手助けの見返りを期待しないような特徴をもつコミュニティとする。したがって、こちらは間接互惠の

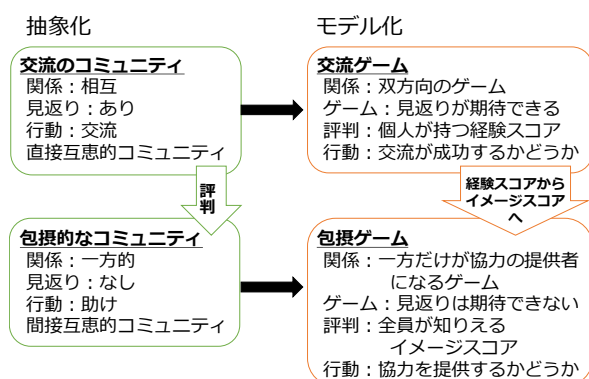


Fig. 2: 抽象化とモデル化

ゲームとしてモデル化する(「包摂ゲーム」とする)。そして、前者での関係が後者に影響を与えるとする。

これらの2つのコミュニティにおけるエージェント間の相互作用を、Nowak and Sigmund⁵⁾、およびGilbert⁷⁾の2つの研究をベースに、高齢者に代表される弱者とそうでない人を区別するようにエージェントをモデリングした。

2.2 エージェント

Nowak and Sigmund⁵⁾と同様に各エージェントは、他者とのつきあいを判断する基準、および経験に応じた他エージェントへの評価値を持つ。それぞれを本研究では「不寛容度」「経験スコア」と呼び、 k と e で表す¹⁾。不寛容度 k ($1 \sim k_{\max}$ の整数を取る)は各エージェントが他者と交流・協力するかどうかを決める基準であり、この値が小さいほど寛容的で交流も協力もする傾向にある。経験スコア e (こちらも $1 \sim k_{\max}$ だが非整数も可)は、各エージェントが持つ他のそれぞれのエージェントに対する評価であり、高いほど評価が高い。また、各エージェントは全エージェントが持つ自身に対する経験スコアから構成される「イメージスコア」(i で表される)によっても評価される。これが評判である。このNowak and Sigmund⁵⁾と共通する3つの要素に加えて、本研究では、エージェントは弱者かそうでないかの違いを持つ。この性質の違いはシミュレーションを通じて変化しない。

エージェントは直接互惠による「交流ゲーム」と間接互惠による「包摂ゲーム」で相互作用し、交流ゲームにおいては k と e 、包摂ゲームにおいては k と i をもとに意志決定する。これらがどのように用いられるか、また変化するかは、次に示す各ゲームの中で説明する。

2.3 交流ゲーム

交流ゲームの流れをFig. 3に示す。エージェント a が交流ゲームに参加するかどうかは不寛容度に応じた確

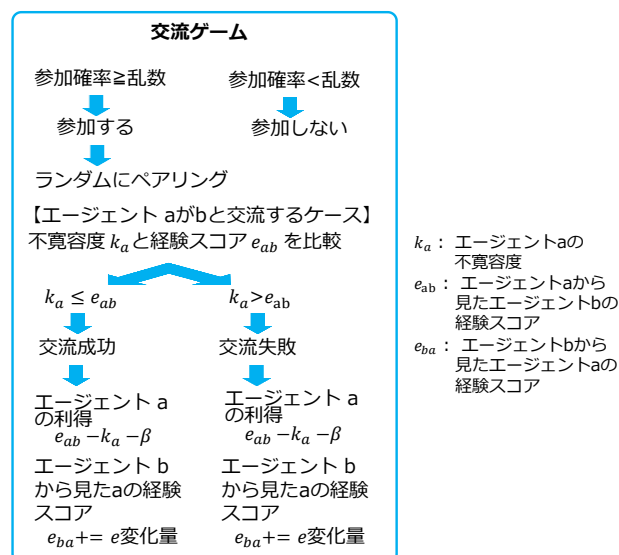


Fig. 3: 交流ゲーム

¹⁾ 先行研究⁴⁾では $k=[-5,5]$ としているが、本研究では不寛容度という意味が分かるように正の値のみをとるように $k=[1,11]$ にずらした。経験スコア e 、イメージスコア i のと

る範囲も同様に $[1,11]$ の正の値をとる。

率で決まる．

$$\frac{k_{\max}^2 - k_a \cdot k_{\max} + 1}{k_{\max}^2 - k_{\max} + 2}$$

不寛容度が大きいほど参加確率が低く、 $k=1$ ではほとんど毎回参加し、 $k_a = k_{\max}$ ではほとんど毎回参加しない．参加するエージェントは、ランダムに他エージェントとペアリングされる．

そして、自身（エージェント a とする）の不寛容度 k_a と自身が持つペアリングされた相手（エージェント b とする）に対する経験スコア e_{ab} を比較し、 $k_a \leq e_{ab}$ のときに交流が成功だと感じる．そして、交流がうまくいったら、相手がいい人だと思い e_{ab} が上昇する（上昇幅を e_u とする）．逆の条件（ $k_a > e_{ab}$ ）では交流がうまくいかなかったと感じ、自身が持つ相手の経験スコア e_{ab} を下げる（減少幅を e_d とする）．どちらの場合も、エージェント a は $e_{ab} - k_a - \beta$ の利得を得る．

2.4 包摂ゲーム

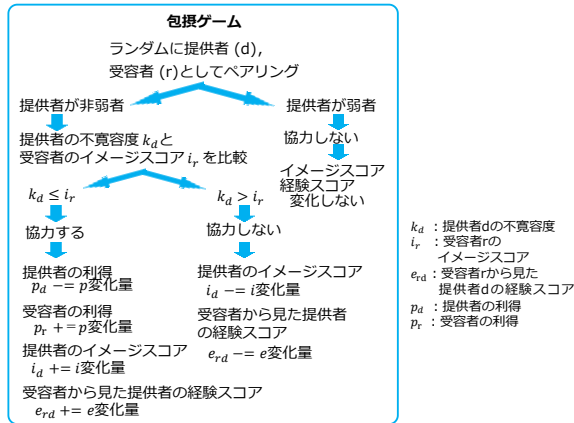


Fig. 4: 包摂ゲーム

包摂ゲームの流れをFig. 4に示す．間接互惠で成り立つコミュニティを表す「包摂ゲーム」では、エージェントはランダムに協力の提供者か受容者となる．提供者が弱者でない場合は、受容者に見返りを求めない協力をするか否かを判断する．自身（提供者、エージェント d とする）の不寛容度 k_d と相手（受容者、エージェント r とする）のイメージスコア i_r を比べ、 $k_d \leq i_r$ であれば協力する．協力により自分の利得が p_d 減り、イメージスコアが i_u 上がり、相手の利得が p_u 増加する．また、相手が持つ自分に対する経験スコア e_{rd} も上がる（上昇幅を e_u とする）．逆の条件（ $k_d > i_r$ ）のときは相手には協力せず、利得の変化はないが、自身のイメージスコア、相手が持つ自身の経験スコア e_{rd} がともに減少する（それぞれ、減少幅を i_d と e_d とする）．

一方、提供者が弱者の場合は、不寛容度、イメージスコアの値にかかわらず協力しない．だが、イメージスコア、相手の持つ経験ともに下らない．

あるエージェント（ここでは y とする）のイメージスコアは、出会ったエージェントが持つ自分に対する経験スコアの平均と現在のイメージスコアを合わせるように、次式で作られる．

$$i'_y = (1 - \alpha) i_y + \frac{\alpha}{M} \sum_x e_{xy}$$

ここで x の和はエージェント y が出会った相手すべてにわたってとり、 M はその総数である． α は経験スコアがどの程度反映されるかを定めるパラメータである．本研究では、イメージスコアは評判として広まっていて、基本的には全員が共通して知り得るものとする．しかし、実際にその値を正確に知る確率は、提供者が交流のコミュニティへ参加する程度に依存し、よく参加するほど正確に知る確率が高くなるように決まる．

$$\frac{1.5^n - 1}{1.5^{r_1 \times S_m} - 1}$$

ここで、 r_1 は1ステップにおける交流ゲームの回数（ステップは次節で定義）、 S_m は記憶を維持できるステップ数、 n は提供者が S_m ステップ中に交流ゲームに参加した回数である．そして、正確に知れない場合は相手（受容者）のイメージスコアを $1 \sim k_{\max}$ の中の値とみなす．

2.5 全体の流れと不寛容度の模倣

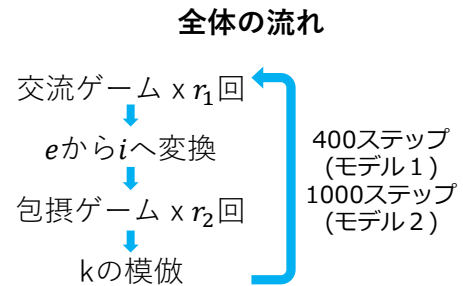


Fig. 5: モデルの全体の流れ

全体の流れをFig. 5に示す．全エージェントが交流ゲームを r_1 回行い、その交流で作られた経験スコアからイメージスコアが計算される．つぎに包摂ゲームを r_2 回行う．その後、各エージェントは他のエージェントの不寛容度を確率的に模倣する．この一連の流れを「1ステップ」と呼ぶ．

進化ゲームモデルでは、上位利得の戦略が増え下位利得の戦略が少なくなるという適応的進化、あるいは進化ゲームモデルを社会のモデルと考える場合は、上位利得の戦略を模倣する社会学習が使われる場合が多い．生物進化の場合、あるいは金融戦略のように模倣しやすい場合はそのような模倣の方法が適しており、最適解を探しやすい．しかし本研究では、人間（特に高齢者）はそうのように柔軟に自分の戦略を変更できたり上位利得の個体を見つけられたりするとは考えず、より穏当な社会学習方法を採用する．

具体的には、あるエージェントが交流ゲーム・包摂ゲームを通じて出会ったエージェントの中で一番利得が低いものが自分の同じか自分の方が低いなら、戦略を変更することにする．模倣の対象は、現在と前ステップで出会ったエージェントの中からランダムに選ぶ．そして、その模倣対象が持つ不寛容度を模倣するが、その方法としてつぎの2つのモデルを比べている．

- ・ 即時模倣モデル：対象の不寛容度に変更する
- ・ 漸近模倣モデル：対象の不寛容度に1近づく

シミュレーション結果

3.1 パラメータ設定

Table 1: パラメータ設定

パラメータ	数値	パラメータ	数値
総エージェント数	500	e 変化量 ($e_u = e_d$)	0.5
交流ゲームの回数 (r_1)	3	i 変化量 ($i_u = i_d$)	1
包摂ゲームの回数 (r_2)	2	p 変化量 ($p_u = p_d$)	1
参加コスト (β)	5	α	0.8
記憶維持できる ステップ数 (S_m)	2	模倣確率	0.5
不寛容度の最大値 (k_{max})	11		

本研究で用いているパラメータ設定をTable 1に示す。以降の分析ではこのうち一部を変更して調べているが、明示しない限りこの表の値をとっている。包摂ゲームでの協力は相対的に負担が大きいと想定しているので、イメージスコアの変化量は経験スコアの変化量より大きく設定している。

エージェントの性質を決める寛容度は、ある程度多様性があるように $k_{max}=11$ とした²。全ての可能性があるように初期値は $k=[1,11]$ で一様分布とし、どの値に収束するかを調べる。なお、初期分布を最も協力的な $k=1$ と最も非協力的な $k=11$ の2種類のエージェントのみとした場合も結果は変わらない。

先行研究と同じように、eとiの初期値は全てkの中心の値である6とし、利得の初期値は0である。シミュレーションは、モデル1は400ステップ、モデル2は1000ステップまで行い、最後の100ステップの平均の20runの平均値を図に用いている（時系列以外）。

本稿で示したパラメータ依存性以外のパラメータについては、結果は本質的に変化しないことが確かめられている。

3.2 即時模倣モデルの結果

3.2.1 参加コストの影響

ここでの参加コストは交流のコミュニティを維持するために参加者が支払うべき費用と考え、便益を享受できるコミュニティを維持できる設計を検討するために、まず参加コストに対する依存性を見る。Fig. 6は横軸に参加コスト β をとり、各 β において各不寛容度kの値を取るエージェントがどの比率で安定になるかを描いている（ $k=1\sim 11$ の11本重ね描き）。 $\beta \leq 5$ で全員が完全寛容の $k=1$ になる協力的な社会になる。逆にコストがこれより大きいと多くのエージェントが完全不寛容 $k=11$ になる。したがって交流ゲームにはほとんど誰も参加しない。 $\beta = 5$ という閾値は、交流ゲームに参加することで少しでも利益が得られる値である（eが初期値の6、 $k=1$ とすると、 $\beta = 5$ で利得が0となる）。

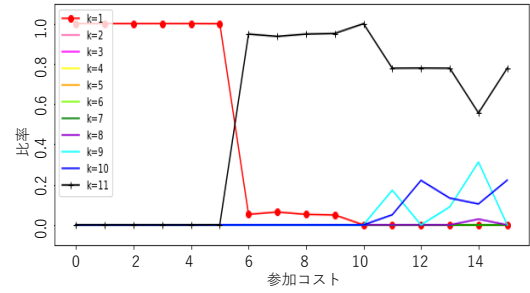


Fig. 6: 参加コストによる不寛容度の分布の違い

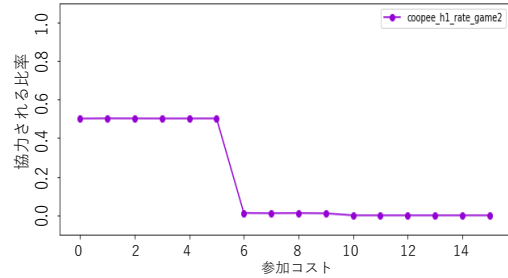


Fig. 7: 参加コストによる弱者被協力率の違い（即時模倣）

包摂ゲームにおいて弱者がどの程度協力されているかを「弱者被協力率」とする。この参加コストによる違いをFig. 7に示した。交流ゲームに参加するコストが参加から得られる利益より小さいと、包摂ゲームで弱者が協力される。コストが高く交流ゲームに参加しない状況では弱者被協力率もほぼ0になる。弱者被協力率が0.5程度に留まるのは、ランダムに提供者・受容者が決まるため、提供者も弱者である可能性が半分あるからである。

3.2.2 交流・包摂ゲーム回数の影響

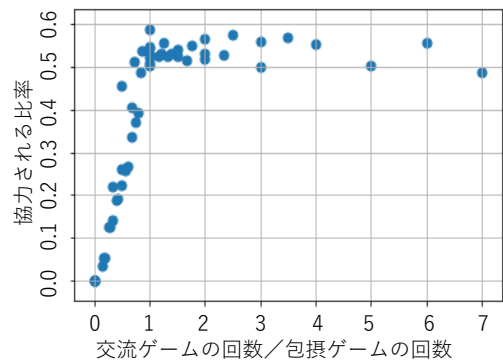


Fig. 8: ゲーム回数の比による弱者被協力率の違い（即時模倣）

交流のコミュニティが包摂的なコミュニティにどのような影響を及ぼすのかを見るために、交流ゲーム・包摂ゲームの回数を変えた場合の、弱者被協力率をFig. 8に示した。包摂ゲームのみ（横軸=0の点）では、弱者はまったく協力されず、どのエージェントも協力行動をせず、間接互惠が成立していない。交流ゲームの回

² 先行研究⁴⁾と同じ値の幅である。

数が相対的に多くなると、包摂ゲームでの協力がうまく行くようになり、包摂ゲームの回数より多いと（横軸>1の領域）、弱者が協力される。

交流ゲームでは k が低い人の利得が上がりやすいが、包摂ゲームでは k が低い人はよく協力をするので利得が低くなりやすい。交流ゲームでは β が低い場合は、回数が多ければ多いほどプラスになるため、結果的には利得がプラスになりやすい。したがって、交流ゲームが多いほど低い k が模倣されやすくなる。包摂ゲームの回数が相対的に多くなると、協力によるコストが多くなるので、協力がうまくいかなくなる。

3.2.3 模倣確率の影響

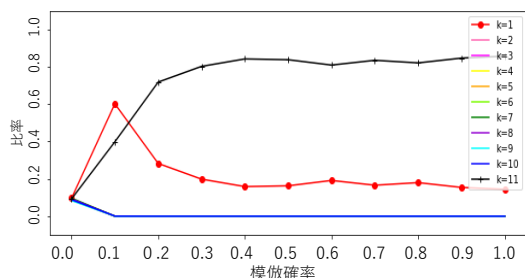


Fig. 9: 模倣確率による不寛容度の分布の違い ($\beta = 5.04$) (即時模倣)

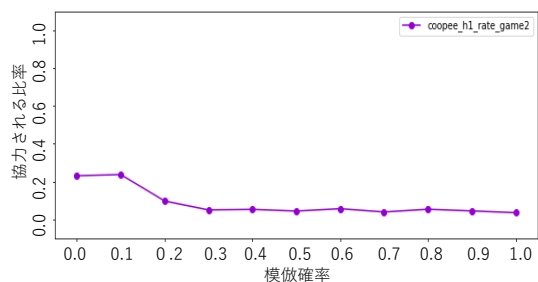


Fig. 10: 模倣確率による弱者被協力率の違い ($\beta = 5.04$) (即時模倣)

つぎに、他者を模倣できる確率がどのように協力に影響するのかを見る。この後は、参加コストが少し高いという、より厳しい状態で包摂的コミュニティが成立するかどうかを見るため、参加コストを協力的社会ができない状態の 5.04 に設定する。Fig. 9 が示すように、このコストの値では、 $k=1$ と 11 が共存するものの、模倣確率が 0.1 以下なら、 $k=1$ のエージェントが一番多く存在する状態になる。Fig. 10 に示すようにその場合は包摂ゲームにおける弱者への協力が起きている。

模倣確率が低いというのは、 k が変わりにくいということである。すぐに学習しないというのは、目先の利益に飛びついて学習しないほうが、より包摂的な社会になることを示唆する。しかしこれは現実的に制度とし操作するのが難しいパラメータである。

3.2.4 総エージェント数の影響

コミュニティの規模と包摂の関係を調べるために総エージェント数を変化させた結果を Fig. 11 と 12 に示す。総エージェント数が 100 以下では、参加コストが $\beta = 5.04$ と少し大きくても $k=1$ のエージェントが一番多くなり、包摂ゲームで協力が行われている。

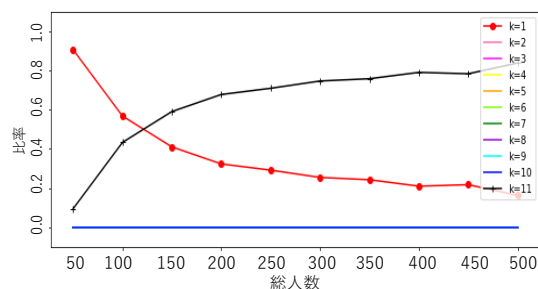


Fig. 11: 総エージェント数による不寛容度の分布の違い ($\beta = 5.04$) (即時模倣)

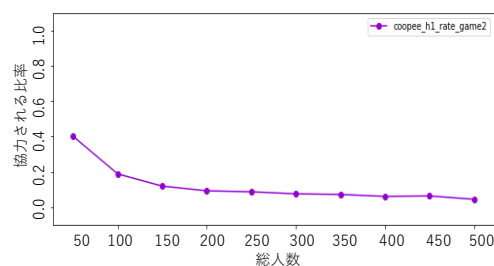


Fig. 12: 総エージェント数による弱者被協力率の違い ($\beta = 5.04$) (即時模倣)

交流コミュニティでは k が低いほど参加しやすく、総エージェント数が少ないほどその効果が大きくなる。なぜなら、総数が多いと k が大きいエージェントがたまたま参加するという事象が生じるが、総数が少ないとそのような事象は実現しにくいからである。そして、今のモデルでは交流の相手をランダムマッチングするので、総数が少ないと会ったことがある人と会いやすく、その相手は k の小さいエージェントである確率が高い。さらに、模倣対象は会ったエージェントからランダムに選ぶため、 k が小さいエージェントが模倣されやすく、 $k=1$ が最も参加確率が高いため模倣対象となる確率も高いということになる。一方、総エージェント数が多いと $k=1$ の人に会いにくくはなるが、ゲームの回数を増やすと会える可能性は高まるだろう。制度設計にはコミュニティの人数を少なくする工夫が有効だと考えられる。

3.2.5 不寛容度の最大値（幅）の影響

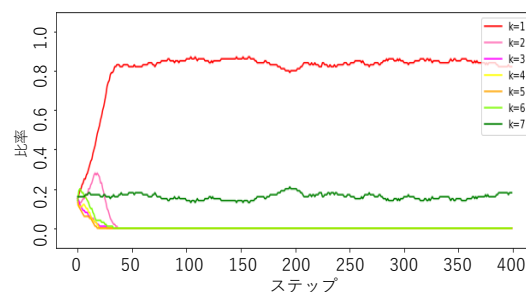


Fig. 13: 不寛容度の分布の時間変化 ($\beta = 5.04$) (即時模倣)

不寛容度が取り得る値の幅（不寛容度の多様性の幅）が協力に影響するのかどうかを見るために、不寛容度

の最大値を $k_{\max}=1\sim 20$ の範囲で分析した。

不寛容度の最大値が7以下、すなわち不寛容度の幅が $k=1\sim 7$ の場合、参加コストを $\beta=5.05$ (11の場合では協力的社会ができない状態)としても、より厳しい状態のFig.9と比べると、 $k=1$ が一番多く (Fig.13)、協力もされている (Fig.14)。不寛容度の最大値が7以上の場合、参加コストを5.00 (協力的社会ができる状態) とすると $k=1$ に収束する。

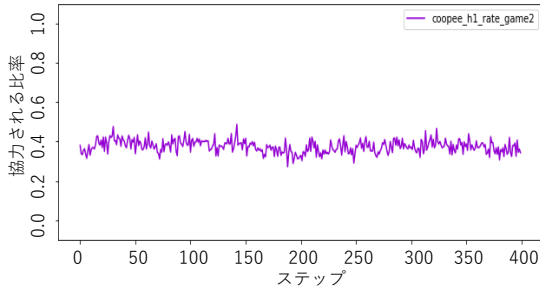


Fig. 14: 弱者被協力率の時間変化 ($\beta=5.04$) (即時模倣)

3.2.6 エージェントの入れ替わり率の影響

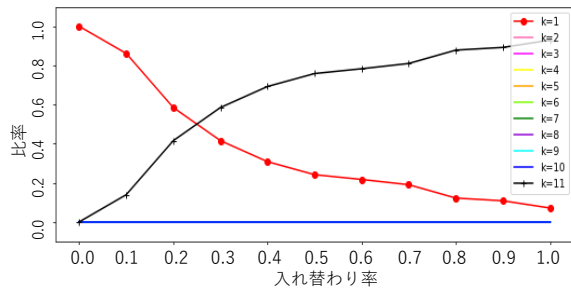


Fig. 15: エージェントの入れ替わり率による不寛容度の分布の違い (即時模倣)

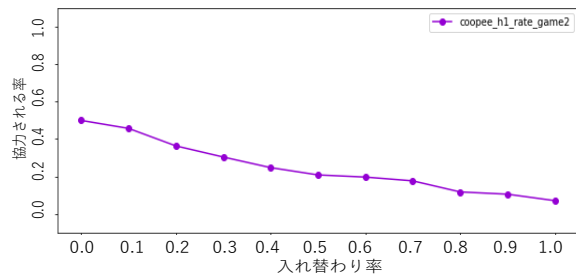


Fig. 16: エージェントの入れ替わり率による弱者被協力率の違い (即時模倣)

エージェントの入れ替り率、つまり、安定性を維持できるかどうかを見るために、弱者と最低利得のエージェントの不寛容度が確率的に $k=11$ になるように設定した。これは、弱者あるいは利得が低いエージェントが死に新しいエージェントが入ってくるという事態をモデル化したものと考えられる (人口総数は変わらない)。新しいエージェントの不寛容度を $k=11$ としたのは、 $k=1$ が占める協力的な社会が $k=11$ という不寛容で非協力的なエージェントの侵入に対して安定性を持

つかどうかを調べるためである³。

Fig. 15が示すように、エージェントの入れ替り率が高くなると $k=11$ が増えていくが、線形に増えるというよりも入れ替り率が低い領域で $k=1$ が減る程度が大きい。 $k=11$ のエージェントは包摂ゲームで協力コストを払わないため最低利得のエージェントになることが少ないのに対し、 $k=1$ のエージェントは包摂ゲームで協力するコストを払うために最低利得になりやすく、入れ替り率と模倣の両方で $k=1$ が減ってしまうためだと考えられる。

3.3 漸近模倣モデルの結果

つぎに、漸近模倣モデルの結果を示す。このモデルでは、模倣対象をすぐにまねるのではなく、その不寛容度に1だけ近づくようになる。そうすると当然ながら、Fig.17が示すようにゆっくりと変化し収束が遅くなる。最終的には $k=1$ が占めるようになるが、それまでにいろいろな k の低いエージェントが共存する状態がある (ここでは過渡的变化がわかりやすいように模倣確率を0.1に設定している。0.5の場合は収束が早くなるがダイナミクスは定性的に同じである)。Fig.18が示すように協力も少しずつ増える。

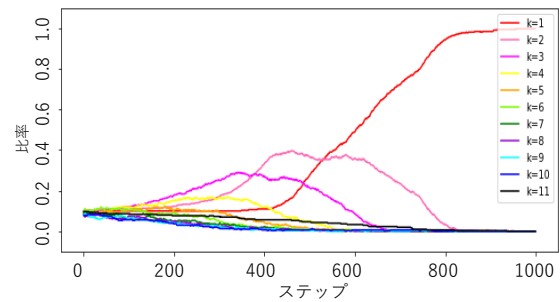


Fig. 17: 不寛容度の分布の時間変化 (模倣確率=0.1) (漸近模倣)

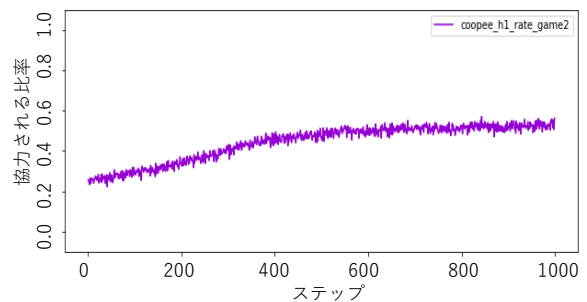


Fig. 18: 弱者被協力率の時間変化 (模倣確率=0.1) (漸近模倣)

3.3.1 参加コストの影響

模倣確率が0.5の場合でも、Fig.19と20で示すように、この模倣方法の場合、参加コストが5より大きくなっても不寛容度と弱者被協力率への影響が少なく、協力的な社会ができている。Fig.19と20では模倣確率を0.5

³ これまでに示した結果から、今のモデルの社会状態は最終的に $k=1$ か $k=11$ のどちらかに分化するが多い。

にしているが、モデル1に比べて実質的に低い状態になっている。この結果もすぐに学習しないほうがより包摂的な社会になりやすいことを示している。また、このモデルの場合、多様な不寛容度のエージェントがいる状態が長期間過渡的に生じている。そうすると、毎回交流に参加して交流を楽しみ包摂ゲームでも協力する人と、まったく参加せず協力もしないという二極化するのではなく、たまに参加して交流したり、参加しても交流がうまくいかなかったりという中間的であ

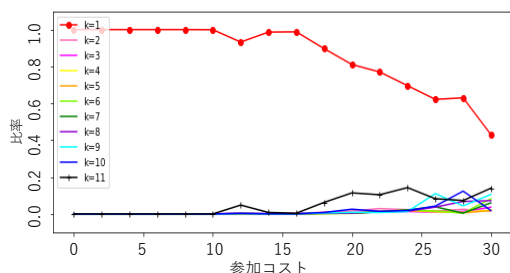


Fig. 19: 参加コストによる不寛容度の分布の違い

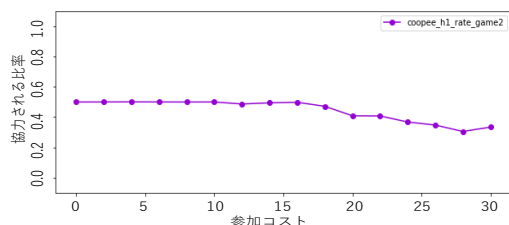


Fig. 20: 参加コストによる弱者被協力率の違い（漸近模倣）

るが協力的な模倣対象が増える。それらが媒体になって k が小さい方に近づいていくものと考えられる。

3.3.2 交流・包摂ゲーム回数の影響

Fig. 21が示すように、包摂ゲームのみ（横軸=0の点）では、弱者はまったく協力されず、どのエージェントも協力的行動をせず、間接互惠が成立していない。交流ゲームの回数が1、包摂ゲームの回数が7未満、つまり交流ゲームの回数が少なすぎなければ、協力が起きる。

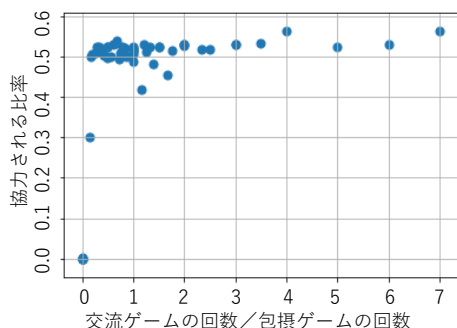


Fig. 21: ゲーム回数の比による弱者被協力率の違い（漸近模倣）

3.3.3 総エージェント数の影響

総エージェント数が500でも、完全寛容 $k=1$ が支配的となり、他の k と共存しない。総エージェント数が50から500までの場合、総エージェント数と関係なく協力が行われている。

総人数が多くても漸近模倣の仕方では、いろいろな種類の k が比較的長く存在する。そうすると多様な模倣対象がいる中で、交流ゲームで高い利得を得られやすい低い k を持つエージェントが増え、その中で一番高い利得が得られるような $k=1$ のエージェントが最終的には一番多くいることになる。

3.3.4 不寛容度の最大値（幅）、エージェントの入れ替わり率の影響

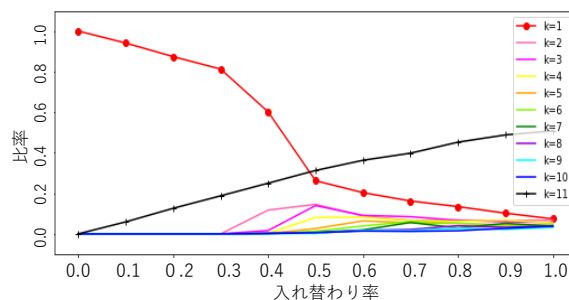


Fig. 22: エージェントの入れ替わり率による不寛容度の分布の違い（漸近模倣）

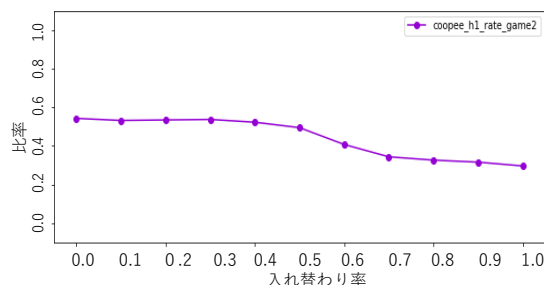


Fig. 23: エージェントの入れ替わり率による弱者被協力率の違い（漸近模倣）

不寛容度の最大値がいくつでも、参加コストと関係なく、不寛容度が $k=1$ に収束する。漸近模倣においては、不寛容度の最大値が協力に影響しない。

弱者と最低利得エージェントが確率的に $k=11$ に入れ替わる場合、Fig. 22が示すように、入れ替わり率に応じて線形に $k=11$ が増える。入れ替わり率が0.3を越えると $k=1$ の比率が急に下がるが、漸近模倣では侵入する $k=11$ がすぐに模倣されるのではなく k が徐々に大きくなるだけなので、 $k=1$ のエージェントは $k=2\sim4$ に変わっていくだけである。その結果、 $k=11$ が増えても、そのような低い k のエージェントが包摂ゲームで協力するため、弱者の被協力率は高く維持される（Fig. 23）。

Fig. 15とFig. 22を比べ、入れ替わり率が同じでも、模倣の仕方の違いにより非協力的な $k=11$ の広がり方が違う。即時模倣モデルは不安定で侵入されやすく漸近模倣は侵入されにくい。

3.4 結果のまとめ

即時模倣モデルと漸近模倣モデルにおいてパラメータの依存性（どのパラメータ領域で弱者が協力される

包摂的コミュニティが成立しやすいかを、Table 2にまとめた。

Table 2: 即時模倣と漸近模倣において協力的な社会が成り立つ範囲

パラメータ	即時模倣	漸近模倣
参加コスト	交流ゲームで得られる利益が参加するコストを超える(5.02以下)	高くても成り立つ
包摂ゲームの回数に対する交流ゲームの回数	交流ゲームの回数が包摂ゲームの回数を上回る	少なすぎない限り成り立つ
総人数	100以下	多くても成り立つ
模倣確率	0.1以下	高くても成り立つ
不寛容度の最大値	7以下	大きくても成り立つ
エージェントの入れ替わり率	0.3以下	高くても成り立つ
経験スコア e の変化量	いくらでも成り立つ	いくらでも成り立つ
イメージスコア i の変化量	いくらでも成り立つ	いくらでも成り立つ
利得 p の変化量	いくらでも成り立つ	いくらでも成り立つ
経験スコアがどの程度反映されるかを決定するパラメータ α	いくらでも成り立つ	いくらでも成り立つ
記憶できるステップ数	いくらでも成り立つ	いくらでも成り立つ

4 考察

4.1 モデルの妥当性に対する考察

本研究では利得を模倣するかどうかを決めるために相対的な形でのみ使用している。しかし、人は相対的な比較だけで生きているわけではないため、利得をより現実的に考えると、利得自体がどのようなものになっているのかも検討したほうが良いだろう。

漸近模倣モデルでは、参加コストが非常に高い場合($\beta=20$)でも $k=1$ が支配的になり (Fig. 24)、包摂ゲームで弱者への協力は起こっている (Fig. 25)。しかし、利得を見ると、参加コストが低くない時 ($\beta=5$) の

利得 (Fig. 26) と比べて、最低利得 ($=-50$) が非常に低くなっていることも見て取れる (Fig. 27)。

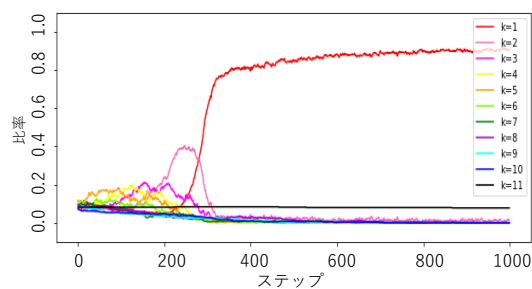


Fig. 24: 不寛容度の分布の時間変化 ($\beta=20$) (漸近模倣)

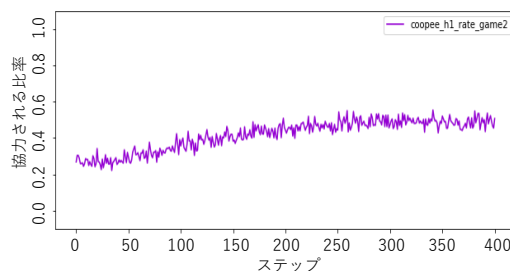


Fig. 25: 弱者被協力率の時間変化 ($\beta=20$) (漸近模倣)

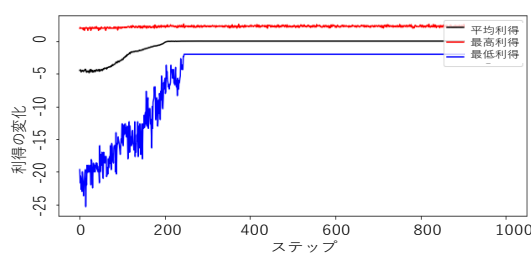


Fig. 26: 利得の分布の時間変化 ($\beta=5$) (漸近模倣)

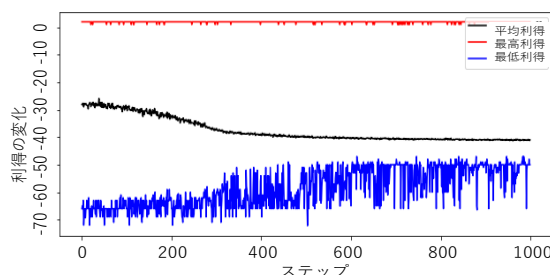


Fig. 27: 利得の分布の時間変化 ($\beta=20$) (漸近模倣)

現実的には、このような不利益を負ってでも人々は協力をするのかは疑問である。もし、人々がコミュニティの外に目を向けた場合、もっと楽に過ごしている人たちがいるはずであり、その人々をみてコミュニティ内の人々は住むところを移動するだろう。

本モデルは町内会のような規範的コミュニティになっていると解釈できるだろう。たとえば、ある新聞記事⁹⁾で、自治会入会金と参加費が高いにも関わらず参加者が参加し続けるという事例が紹介されている。記事の中に「釈然としないが、支払いを断れば集落に居づらくなるから」という参加者の声があった。これは個々の便益と関係なく参加が決められているような状態である。

このように「村社会」的に移動の自由が比較的低い、あるいは、昔から住んでいるところから移動したいと思わない（そのような心理的な面も含めて移動のコストが高い）ような場合には本モデルが成立するが、現代では移動は自由であるため、やはり交流に高いコストがかかるようではコミュニティ内の協力の均衡は破綻すると予想できる。

Nowak and Sigmund⁵⁾に代表される生物学的なモデルでは、資源の提供者と被提供者がランダムにマッチングされる状況を想定しており、それ自体は相手を選べないことを意味する。本研究が想定している包摂的なコミュニティでも、いざという時に助けてもらえる相手は選べず、誰がいつ協力を必要とするのかも予測できないといった点で、ランダムマッチングの妥当性はあると思われる。

本モデルはランダムマッチングを設定しているが、知り合いとよく合うなどのマッチングの仕方もある。ランダムマッチングは実際には現実的ではないが、知り合いと会う場合よりも厳しい状況を設定している。ランダムマッチングだと会った人は必ずしもいい人ではなく、交流ゲームで会うのは k が高いエージェントの場合もある。ランダムでなければ、 k が低いエージェントとよくマッチングし、寛容な人同士が固まりやすく、寛容な人同士で真似しやすくなり、より協力が維持されやすいと考えられる。ランダムマッチングは、最初は厳しい状況だが、長い目で見ると協力的になり得る。

協力的行動が起こっている集団の参加するメンバーが変わらない場合、即時模倣モデルでは50～150ステップで固定点に収束する。漸近模倣モデルでは模倣が遅いために収束に時間がかかり、250～700ステップを要する。協力的な関係を築くには長くかかるが、新しい人に会えるチャンスをいかに増やせるか、そのような場所をどう作るかが重要になる。

メンバーが変わる状況では、即時模倣モデルではメンバーの流動性がない方が協力は起こっている、漸近模倣モデルでは、メンバーの閉鎖性が必要ない。

4.2 制度設計のヒント

事例研究⁹⁾では、交流のコミュニティを踏まえることで包摂的なコミュニティができたが、本研究でも交流ゲームがあることで包摂ゲームだけでは生じなかった間接互惠が成り立ち、行動だけではフリーライダーである弱者も協力される包摂的なコミュニティができてことが示された。そして、包摂的なコミュニティが成立にいたる過程では不寛容度が低めの多様なエージェントが存在することが有効であり、そのためには模倣対象をすぐに模倣できるのではなく、模倣対象に少し近づくというゆっくりとした社会学習がよいことが示唆された。

全体の人数が少ないと、交流コミュニティに参加する寛容性が高い人や前に会ったことある人に会う頻度が増えて、包摂的なコミュニティになりやすいことも示された。会う頻度が増えると、交流回数や相手の変化に気づく回数が増えるかもしれない。相手の異変に気付くと、より確実な包摂に繋がるだろう。また、交流ゲームの回数が包摂ゲームの回数より多いと協力を増やしやすいく。実際に、交流が行われる施設や場所が必要となり、その場の運営と支援が必要となる。

一方、即時模倣モデルのようにすぐに模倣できる場合は、交流ゲームへの参加コストが全体の状態をもっとも左右する。

前節で見たような町内会活動は、町内会にいらなくなるというコストを考えて参加する場合だけではなく、人によっては全体の利益のために参加する規範意識が高い人もいる。しかし、規範意識が低い人はそのような全体利益のための活動には参加せずにフリーライダーとなる。規範意識の高い人は参加コストが高く自分が損をしても、全体の利益のためになると考えて交流のコミュニティに参加するが、そのような規範意識の高い人はフリーライダーから搾取されることになる。そのような社会は望ましくないため、行政が参加コストを下げるような制度を作った方が望ましいが、それができない場合はコミュニティ自身で作らなければならず、それがさらなるコストを生み出す。

このような場合、直接的に参加コストを下げるのではなく、別の手段で寛容度を上げることを考える必要がある。すなわち、直接互惠でしか動かない人に対して、間接互惠によって良い結果をもたらした話を伝え続けることが重要になる。例えば、以前あった災害時に助け合った話を語り継ぐ、あるいは、困ったときにこんな良いことがあったなどのことを言い続けることが該当する。間接互惠が良い結果をもたらした話を言い続けることが目先の利益に飛びつくような即時的な模倣ではなくゆっくり学習する教育にも繋がるかもしれない。すぐに変えるのは難しいが、いつかはみんなの模倣確率が下がるかもしれない、そうすると包摂的なコミュニティで協力が増えることにも繋がる。

4.3 漸近模倣の有効性

本研究では、漸近模倣、すなわち、模倣対象の性質をすぐにまねられるのではなく、その方向に少しずつ近づくような模倣をする、という模倣の方法が、包摂的な社会の成立に有効であることがしめされた。この漸近模倣モデルでは、高参加コストでも、あるいは、他のパラメータの変化やフリーライダーの侵入に対しても、非常にロバストに協力が成立することがわかった。

このようなロバストに協力を成り立たせる仕組みは、本研究で提示した「直接互惠的な交流を行うゲームと間接互惠的なゲームを行うゲームの組み合わせ」というケースにのみ有効であるとは限らない。なぜなら、フリーライドすることによって得をする他者をまねようと思ってもまねることはできず、「少し悪い人」の方向に変化するくらいしかできないので、全体としては「とても良い人」と「まあまあ良い人」がたくさんいるような社会ができるからである。これまで多くの協力の進化の研究で、いくつかの協力が成立する条件

が示されてきた。その中でも、裏切り者を排除するなどして相互作用する相手を選択することができれば、協力的な人ばかりの社会を作り維持することができるということに対応する条件がいくつかある。上述のとおり漸近模倣もそのような状態を成立させる仕組みである。今後、他の協力の進化のモデルに漸近模倣を採用入れてどのような場合に広く協力が進化しえるかを調べて行く必要がある。

一方、本研究がもともと目的としていた制度設計を目指すという観点から言うならば、この知見は制度設計に活かせるようなものではない。まずは、このような社会学習を実際に人々が行っているかを実証的に検討する必要があるだろう。上記の漸近模倣の仕方は、コミュニティのような問題を考える上では、少なくとも、すぐに戦略をまねできるような生物進化のモデルよりもリアリティがあるように感じられる。この印象論を越えて実証的に人間がコミュニティのような場で行っている社会学習を明らかにするには、社会心理学の知見をサーベイし本モデルで設定している模倣との整合性を検討する必要がある。さらには、本モデルで想定しているような状況で人間が実際にどう社会学習するかを実験的に確かめることができる可能性もある。もし制度設計を考えるのであれば、このような人間の社会学習の理解に基づいて、教育の制度を考えることになるだろう。これは、すぐに効くような制度設計ではなく長い時間がかかるものだと考えられるが、将来的な方向性として検討する価値はある。

5 結論

本研究は、社会的排除のリスクが高い高齢者を包摂する地域コミュニティが成立する条件を明らかにするために、直接互惠による交流ゲームと間接互惠による包摂ゲームの2種類の協力ゲームを行うコミュニティをモデル化した。そして、現実に近い社会学習方法を採用した2つのモデルを比較することを通して、社会的包摂が安定的に維持される条件をシミュレーションによって探索した。

結果から、参加コストが小さく、参加人数が少なくすること、交流ゲームの回数が包摂ゲームのそれを上回ること、あるいは、社会的学習が緩やかに進む条件で社会的包摂が実現されていることを示した。

本研究の結果から、払ったコスト分だけのメリットをもらうという直接互惠的な考え方ではなく、「自分が助けた人だけでなく、助ける行為を誰かが見ているので、いつか自分も協力してもらえるかもしれない」という間接互惠的な考えが確実になり立つために、人々が知り合ったり、直接知らない人でもうわさが流通したりするような、人間関係を作り続けるベースとなるコミュニティを維持することが有効だと言える。すなわち、いつ自分が助けてもらう側に回るかわからないので、普段から交流しておくことが大切であり、交流できる場を維持する設計が必要である。

間接互惠関係は現代的・個人主義的な考え方からすると納得されにくいかもしれない。しかし、個人主義をつきつめていくと、直接互惠しか残らないし、それどころか、自分の利益のみを追求する利他行動をしない集団に陥りかねないという現代社会の問題がある。

そういう風潮に対するアンチテーゼとして、コスト

をある程度高く払ってでも協力コミュニティを維持することが、包摂的なコミュニティに繋がるということ、このモデルのシミュレーション解析で実際に示したことになる。

また、漸近模倣という社会学習の方法が協力の成立に有効である可能性を示したことは、本研究が協力の進化という研究に対して学術的に貢献できている点である。今後、この社会学習が実際に人間で成立しているのか、そして、他の相互作用の場合にも有効に協力を成り立たせられるのかを調べて行く必要がある。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP15H01774, 及び JSPS 科研費 16K16353 の助成を受けている。

参考文献

- 1) 総務省統計局：高齢者の人口（2013）＜<https://www.stat.go.jp/data/topics/topi721.html>＞（2019/2 閲覧）
- 2) 内閣府：平成 28 年版高齢社会白書（概要版）（2016）。（2018/3/27 閲覧）
- 3) 厚生労働省：「社会的な援護を要する人々に対する社会福祉のあり方に関する検討会」報告書（2000）＜https://www.mhlw.go.jp/www1/shingi/s0012/s1208-2_16.html＞（2018/11/20 閲覧）
- 4) 真島理恵，高橋伸幸：「間接互惠性の成立：非寛容な選別主義に基づく利他行動の適応的基盤」．心理学研究，76（5），436-444．（2005）
- 5) Nowak, M. A. & Sigmund, K.: Evolution of indirect reciprocity by image scoring. *Nature* **393**, 573/577 (1998).
- 6) 長谷川裕紀，小川正光：「高齢者の生活様式と地域のコミュニティの支援構造に関する研究」．『愛知教育大学家政教育講座研究紀要』．**44**, 117/132 (2015)
- 7) Gilbert, R.: Evolution of direct and indirect reciprocity. *Proceedings of the Royal Society B*, **275**, 173/179 (2008). DOI:10.1098/rspb.2007.1134
- 8) 西日本新聞：「なぜ？入会金 10 万円 驚きの自治会ルール 「出不足金」女性だけ徴収の地域も」，2019 年 01 月 30 日 06 時 00 分，＜<https://www.nishinippon.co.jp/nnp/anatoku/article/483029/>＞（2019/3/4 閲覧）