災害常襲地域における防災協力行動の学習モデル

災害の性状が社会に与える影響の基礎的考察

A LEARNING MODEL OF DISASTER PREVENTION COOPERATION
ON REGION FREQUENTLY STRUCK BY DISASTER

Social effect of disaster characteristics

上 田 遼*

Ryo UEDA

This research represents a learning model of cooperation behavior for disaster prevention to study the basic relationship between disaster and social reaction. Multi-Agent system on virtual space, where disaster periodically happens and agents learn behavior strategy, is set up. Agents pursue for property selfishly or cooperate for disaster based on their own parameter of cooperation. Then some parametric studies on disaster characteristics and behavior rules were carried out. The results showed that cooperation emerges when disaster scale is moderate. If disaster scale is too large or too small, agents prefer short-term gain. Regardless of such condition, cooperation generates when agents restraint each other by penalty on uncooperative agent. Cooperation and penalty criteria increase as disaster scale gets large. This implies a point in common with some former studies in humanities and literature.

Keywords: Multi-Agent, Disaster, Learning, Cooperation, Social Dilemma, Catastrophic Risk

マルチエージェント, 災害, 学習, 協力, 社会的ジレンマ, 大規模激甚リスク

1. はじめに

近年、東日本大震災をはじめとする激甚災害に対する社会的関心が高まっている。市民がいかに協力して災害から生命や財産を守っていくかは切実な問題であるが、そのためには人間行動に関する根本的な理論づけも重要と考える。協力行動に関してはゲーム理論¹⁾やミクロ経済学²⁾などにおいて理論研究が行われているが、防災の問題を対象として建築学的観点から人間・環境・災害の相互作用を動的なシステムとしてモデル化した研究はほとんど見当たらない。また、主に人文科学の分野では、和辻³⁾の著名な論考を代表として、災害と当該地の人間の文化形成に関係があることが指摘されているが、モデルを用いて仮説の検証を行えば相補的な知見が得られると考える。文化が、長年の人間・環境の相互作用の結果学習された行動様式であると考えれば、モデルにおいても繰り返しの災害に対して防災行動が学習されるはずである。一方近代的な災害リスク工学⁴⁾では、定式化、定量化されたリスクについてはその解や合理的な対策が研究されているが、未知の激甚災害に対しては適用上の課題が残されているとともに、近代とは時代を隔てた原初状態の学習を想定した場合、リスク理論を直接持ち込むことはできないと考える。

そこで、本研究は災害に対する人間行動の基礎的理論づけとモデル化を提案するとともに、災害に対してシンプルな行動ルールから防災協力行動が創発されることを示す。それとともに、創発される行動が災害の性状(規模や頻度)に対して異なること、その違いが現

実の社会と通底することを仮説として立て、検証を行うことを目的とする。前半では、エージェントモデルを用いた基礎理論とモデル化に関する実装を行い、後半ではケーススタディを通して構築したシステムがどのように反応するか、検討と考察を行う。

(1) 背景と既往研究

防災を一つの協力行動ととらえると、その意味づけはどのように考えられるであろうか。今、災害に繰り返さらされている人間の集団を仮想的に考え、その一人一人を、ゲーム理論の用語にならって以下プレイヤーと呼ぶことにする。プレイヤーの財産は、災害によって脅かされている。プレイヤーは自己の財産を自分自身の利益としてもよいが、財産のうちの一部を防災に役立てるため公共に供出してもよい。供出された財産によって地域の防災力が向上すれば、将来災害によって被害を受けるリスクが小さくなり供出したプレイヤー自身も、集団の他のプレイヤーも、恩恵を受けられると期待できる。すべてのプレイヤーが平等に財産を供出すれば、安全な社会が実現でき、なおかつ各人の財産も守られる。しかし、一部の悪意のプレイヤーは、自分だけは財産を供出せずに、防災の恩恵を無償で受けようとするかもしれない。多くのプレイヤーがこのような「ただ乗り」を行えば、防災は成り立たなくなる。したがって、1プレイヤーの利益と、集団での利益が相反する「ジレンマ」が生じる。ただ乗りを行うプレイヤーは、ゲーム理論¹⁾において一般に「フリーライダー」と呼ばれる。主として経済学において、さまざまな公

* 小堀鐸二研究所 修士(工学)

Kobori Research Complex, M. Eng.

共財を対象にその問題が議論されているが、これまで防災を対象にした本格的な研究は少ない。

一般的な人工社会に関するマルチエージェントモデルを用いた研究は Epstein& Axtell⁸⁾が詳しく、交易や貧富の差、文化の伝播、公害に至るまでさまざまな問題への適用例があり、社会・経済学的な多くの知見を得ている。しかし、災害に主眼を置いた工学的な研究は行っていない。大宮⁹⁾ほかは公共財の独占問題(共有地の悲劇)を対象として、谷⁷⁾ほかは公共財を特定せず投資と利益を一般化した基礎モデルとして、それぞれエージェントモデルを用いた検討を行っている。建築分野に関連する事例としては、避難シミュレーション等への適用例^{たとえば8)9)10)}は多いが、本研究のような社会的観点を取り入れたものは少ない。藤井・谷本¹¹⁾は建築熱環境の社会的ジレンマ問題にマルチエージェントモデルを適用した事例を報告している。各々のエージェントは仮想空間の建築物において空調を用いるが、空調を過度に使用すると建築外部に排出された熱がさらなる気温の上昇を招くというジレンマである。また、人間と社会的環境の相互作用に関しては谷本・藤井¹²⁾¹³⁾が入札における談合問題やアカデミックソサイエティ(学术界)の盛衰への適用例を報告している。

また、別の観点として災害を人文科学的にみれば、災害は文化の形成に深く関係していると考えることができる。この議論は、和辻哲郎³⁾が著した風土の例が有名である。和辻によれば、災害が少なく気候が比較的穏やか且つ予測可能な欧州地域では、自然を理解し克服、利用しようとする理性の文化が発達するのに対し、風水害が頻発する東アジアでは災害を受容する忍耐の文化、生命を常に脅かす砂漠のような過酷な地域では限られたオアシスの覇権を争う闘争の文化が、それぞれ発達するとしている。文化に対する深い洞察として大変重要であると考えられる。また Gelfand¹⁴⁾は、33カ国の分析から災害の脅威の規模がその土地の文化の「窮屈さ」(社会的処罰の厳しさ)を高めるとしている。そこで本研究では原初状態から協力行動がどのように創発されるかという観点から考察を行い、現実との対応関係を吟味する。飯田¹⁵⁾は Gelfand¹⁴⁾らに着想を得て、2者の繰り返し囚人のジレンマ(Iterated Prisoner's Dilemma, IPD)のモデルに災害の発生を組み込んで災害の頻度が及ぼす影響を考察しているが、当初仮説とした災害の頻度とプレイヤーの処罰戦略の厳しさの関係は実証できなかったと報告している。飯田のIPDにおける各戦略の利得行列の値は他のプレイヤーの戦略との関係で決まり、災害による利得減が実質的には関係しておらず、戦略による差が生じないためと推測される。また、プレイヤーには固定された戦略が与えられ、学習は行われていない。本研究では、人間・環境・災害が相互に影響し合うようにするため、モデルの考え方は根本的に異なるものとしている。

リスク工学との関係でいえば、東日本大震災の巨大津波のように、低頻度ではあるが被災地域に破滅的被害をもたらすリスクは Catastrophic Risk⁴⁾(あるいは略して Cat Risk)とも呼ばれる。リスクの定量化が難しく、リスク評価の上で重要な課題であるが、今日必ずしも明確な答えは見つかっておらず、いわば Open Question となっている。リスクが事前に定量化できない以上、被害量が人間・環境・災害の相互関係から刻々と変化する動学的アプローチが必要と考える。

エージェントの行動モデル¹⁶⁾において代表的な一つの考え方と

しては、エージェントが自己の過去の行動の結果から便益の期待値を評価し、それを最大化する行動を選択するものである。しかし、上記の Catastrophic Risk の問題とも関連するが、将来の自己の蓄積財産ひいては市街地全体を喪失するような状態を想定する場合には、被害の期待値そのものが未知であるがゆえに、既往の期待効用理論は直接適用できないと考える。また、文化形成などの原初状態を考えるに当たり、そのような「合理的」戦略は適用しにくいと考える。本研究では効用を直接定量化しなくとも、エージェントが周囲のエージェントや環境との相互作用の中で戦略を模索することにより、災害に対する戦略を学習できると作業仮説を立てて検討を行ったものである。

本研究は初歩の試みではあるが、背景として述べたように建築その他のさまざまな学術分野に通底しており、それらへの一助となることを意図している。本研究の基礎理論は、将来的に応用可能と考えている。

(2) 本研究の災害の概念

本研究において扱う「災害」は、後述のように抽象化された概念であるため、必ずしも特定の地域、地形、災害に議論を限定するものではないが、冒頭にも述べたように、東日本大震災の津波のように激甚被害をもたらすものをイメージしている。それは、堤防のように防災力のある構築物があれば一定程度までは被害を防ぐことができるが、ひとたび防災の閾値を超えればその当該地域に壊滅的被害をもたらす性格のものである。

2. 防災協力行動の学習モデル

以下に、解析に用いる災害常襲地域とエージェント、および災害の発生規則のモデルに関して述べる。

(1) 災害常襲地域のモデル化

災害常襲地域を仮想的に簡略化した、図1のような10×10の100グリッドの平面領域を考える。この地域には、モデル化された災害が、ある一定の再来周期で発生する。エージェントは、それぞれのグリッドに1人ずつおり、地域全体で100のエージェントがいる。エージェントは他のグリッドへは移動しない。エージェントは、行動の成果の蓄積と戦略の特徴を代表して、自己の「財産」と防災への「協力率」という2つのパラメータを持ち、各グリッド(エージェントにとっての居住環境)は、「防災力」という1つのパラメータを持つ。詳細は次に後述する。財産は現実世界の金銭や物品を抽象化したものであり、防災力は、堤防高さや構造耐力などを抽象化した、環境の災害に対する抵抗性能である。

(2) エージェントの行動

エージェントは、自己の財産を増加させるべく利己的な行動を行う一方、防災へ貢献する協力行動も行うものとして、モデル化する。エージェントの行動ルールを模式的に図2(a)に示す。エージェントは、1ステップごとに当該グリッドから必ず1.0の収穫を得ることができる。ここで、1.0とは基準化された財の1単位である。そして、この収穫をもとにエージェントは利己的行動と防災協力行動の2つの行動のいずれかをとる。図中の右への分岐が利己的行動、左への分岐が防災協力行動である。利己的行動を選択した場合、エー

エージェントは 1.0 の収穫をそのまま自分の利益とする。その結果、当該エージェントの財産が 1.0 増加する。他方、防災協力行動を選択した場合、エージェントは 1.0 の収穫を自己の利益とはせず全てを防災に役立てる。具体的には、自分自身のグリッドを含むノイマン近傍(上下左右)の 5 グリッドに収穫を 0.2 ずつ配分する。その結果、5 グリッド各々の防災力が 0.2 ずつ上昇する。この防災力は、後述の災害の発生と関係している。エージェントが利己的行動をとるか、協力行動をとるかは、当該エージェント固有の協力率 α によって確率的に、それぞれのエージェント個別に、決定される。すなわち確率 α で協力行動をとり、確率 $(1-\alpha)$ で利己的行動をとる。これは、ゲーム理論の表現を用いれば、確率的な「混合戦略」と等価である。

(3) グリッド

エージェントの生活環境と防災力のモデルであり、防災力の向上についてはエージェントの項目において既述のとおりである。また、防災力は時間を経て劣化すると考えられるため、1 ターンあたり 1% ずつ防災力を減少させる。なお、この設定は一旦構築された防災力によって全体系が不必要に硬直するのを避ける目的のものであり、減少率の多少の増減は議論・結論の定性的な部分に影響しないことを予め確認している。

(4) 災害の発生

繰り返し発生する災害をモデル化する。その概要を図 3 に示す。災害の特性を表すパラメータとして、災害の規模 S (Scale) 及び再来周期 T (periodic Time) はケーススタディごとに定める。ここで災害の規模 S の定義は、グリッドに生じる Hazard の量を基準化するものであり、災害発生時には Hazard の量を 1 列ごとに 0~ S の範囲において一様乱数を用いて生成させて、決定する。列ごとに Hazard をランダムに変化させた理由は、今回災害を一般化して、地震動のような全領域的災害と、津波、竜巻のような比較的領域を限定した災害との中間としたためである。災害は、 T step ごとに発生させる。災害発生時には、各々グリッドにおいて災害の Hazard と防災力を比較し、判定を行う。Hazard よりも防災力が上回った場合には何ら被害が生じないが、Hazard 上回った場合には激甚被害が生じたものとし、当該グリッドのエージェントの財産を 0 とし、当該グリッドの防災力も 0 とする。すなわち全てが 0 に戻る。すなわち、被害量はエージェント・場所ごとに異なる。

(5) エージェントの学習

エージェントは、自己の財産を最大化させるべく、財産増加に有効となると期待できる協力戦略の学習を行う。エージェントの学習ルールを模式的に図 2 (b) に示す。エージェントは 1 ステップごとに周囲(ノイマン近傍)のエージェントの財産と自らの財産を比較し、もし隣のエージェントの財産が自分よりも多ければ、当該エージェントが有効な戦略を行っていると考えて当該エージェントの協力率 α を模倣して自己にコピーする。また、突然の発想転換や外来者の侵入をイメージして、一定の確率 0.01 でエージェントは協力率 α を乱数で設定し直す。なお、環境がエージェントに継続的に与える影響を、環境とエージェントを一对一に明確に検討するため、エージェントが災害によって財産被害を受けてもエージェント自身は死亡(退場)の扱いとはせず、エージェントが被災したことを以て α を新規発生させることは行わない。これは 1 個人が不老不死の生命を持つことを仮定するのではなく、学習結果が当該地に伝承され文化的

に持続されることをイメージして、エージェントを永続させている。被災したエージェントは財産が 0 となり、周囲の被災しなかったエージェントから新たな戦略を学習して活動を再開することになる。

以上のシステムの挙動をまとめると、本研究のモデルにおいては、エージェントが行動を繰り返すことにより、エージェントの財産およびグリッドの防災力が徐々に蓄積、増加していく。しかし、災害が発生し、かつその規模が防災力を上回れば、財産、防災力ともに当該グリッドから失われる。エージェントは、財産の多いエージェントから協力率を学習するため、災害環境に対して(少なくともローカルかつ短期的には)最適な戦略を学習していく。このような局所的な最適戦略が必ずしも全体として最適とはならないことが、今回の研究の重要な着眼点の一つである。

図 2 エージェントの行動モデル

図 3 災害の発生とその被害のモデル

(6) 初期状態と解析方法・ケース

初期のグリッドの防災力は 0、エージェントの財産は 0 とする。エージェントにはそれぞれ個別に、0~1 の間の一様乱数により、協力率 α を与える。したがって、初期状態では平均して 0.5 の協力率が与えられることになる。初期設定後 1000 ステップを繰り返し、エージェントの協力率や財産、グリッドの防災力を計算し、変化の指標として協力率、財産、防災力の平均をステップごとに評価し、その履歴を記録する。個別の解析結果は乱数に依存するため、同一条件で 50 回の試行解析を行い、その平均をとることとした。50 回の回数は、結果のばらつきを考慮して平均がおおむね安定的に評価できるように検討し設定した。後述のようにパラメータの組み合わせを変えて延べ約 200 ケースのパターンがあり、その各々に 50 回の試行を行ったため、試行はのべ 10,000 回程度となった。

3. 解析結果

はじめに、モデルの挙動を確認するため、代表例として災害の規模 $S=3$ 、周期 $T=10$ の条件下で、50 回の解析を行った。

パラメータの変化を確認するため、ある1回の解析について、ステップ0(初期)、100、101、1000(終了)の各時点における財産、防災力、および協力度の分布をそれぞれ図4に示す。ステップ0においては、初期状態であり、協力率はランダムに分散している。ステップ100ではエージェントの活動により部分的に財産や防災力が蓄積されつつあり、協力率も近隣のエージェントが互いに学習し、協力率が等しい集団が幾つか形成されている。ステップ101は災害が発生した直後の状態を表し、防災力が小さいグリッドでは、エージェントの財産およびグリッドの防災力は0となっている。このようなステップを繰り返すことにより、財産および防災力は増加、減少を繰り返しながら大きなトレンドとしては徐々に増加していく。現実で言えば、都市が災害を受けながらも復興を繰り返しながら発展している状況と解釈できる。ステップ1000では、財産が増加していることが確認でき、また、協力率については、協力率の類似したエージェントが地域ごとにゆるやかに集団を形成している。

図4 財産・協力率・防災力の分布の推移の例
(初期、100、101 ステップ、及び最終1000 ステップ)

次に、財産、協力率、防災力について、全時刻歴における50回の試行の平均をとって推移を評価した。それぞれ図5に示す。協力率は、初期値の平均0.5からいったん下降するが、その後はやや上昇し、一定の値を中心に増減を繰り返すようになっている。これは、途中計算をトレースした上で、以下のように考察できる。初期段階のしばらくの期間は、防災力が相対的に小さいため防災が実質的に効果を持たず、そのような状況では協力率の小さいエージェントが

有利となる。防災に財産を割かず、自己の利益だけを増やそうとするのである。周囲のエージェントも同様の戦略を学習する。しかし、これは短期的な利益を生むだけであり、一時的な財産の増加はあっても、やがて訪れる災害で毎度無に帰してしまう。一方そのような状況の中でも、一部の協力的なエージェントは徐々に防災力を築き、それによって財産を守れるようになる。災害をしをしながら財産が増加を始めると、周囲のエージェントも協力的な戦略を学習するようになる。これによって、ますます防災力と財産の蓄積が加速される。しかし防災力が一定程度高まると、今度はそれに便乗して自らは防災に協力せず、財産だけを増やそうとする非協力的なエージェントが財産を増やし、それが周囲へ学習されていく。冒頭で述べたフリーライダーの問題である。非協力的なエージェントが増えすぎると防災力が劣化し、再び災害の被害を受けるようになる。これが、後半の協力率の値が一定程度振動する理由と考えられる。重要な点は、これらの挙動はモデルから創発されるものであり、全体系として恣意的なコントロールは行っていない点である。

図5 財産・協力率・防災力の平均の時刻歴推移

(1) スタディ1 災害の規模と協力度の関係

背景でも述べたように、災害の性状が社会に与える影響は最も基本的かつ本質的な課題である。そこで、はじめに災害の規模 S がエージェントの協力度等に及ぼす影響を検討する。災害の規模を $S=0, 0.5, 1, 2, \dots, 10$ まで変化させた。災害の周期 T は10に固定した。乱数の影響があるため、それぞれのケースにおいて50回の試行を行い、その平均をとった。

災害の規模に対する財産、協力率、防災力の平均の変化を図6に示す。財産は、災害が大きいくほど単調減少かつ下に凸型の曲線を描き、 $S=9$ 以上では財産はほぼ0となった。単純減少する理由は被害が大きくなるためである。また S が小さいときには感度が大きく、 S が大きいくときには感度は小さくなることわかる。協力率のグラフは上に凸型であり、 $S=3$ において最大値およそ0.4をとり、災害がそれ以上となると減少傾向となっている。また、 $S=9$ 以上はほぼ下限値に近いとみられ、変化の感度は小さい。これは、次のように考えられる。災害が十分小さい場合には、防災協力を行っても得られる効果が小さいため、協力率が小さくなる。一方、災害があまりに大きい場合防災が全て無為に帰してしまい、協力率が小さなエージェントが有利となって協力率が小さくなる。その結果協力率は中

間的な災害の規模において最大となると考えられる。この結果の示唆するところは、社会の形成において一定の災害の脅威が協力関係を促進することである。一方災害があまりにも大きい場合には粗野の状態から脱せないということでもある。これはゲーム理論の公共財の問題において、投入に対する見返りが少ない場合に全てのプレイヤーが非協力を選択する均衡状態が存在するのと同様と考えられる。ただし、後述で考察するように、災害が大きくてもエージェントが適切な協力関係となればこの粗野の状態から抜け出せる可能性を持っている。防災力は、協力率とほぼ相似のグラフを描いており、協力率が高いほど防災力が高まっていることが確認できる。

図6 災害規模に対する財産・協力率・防災力の変化

(2) スタディ2 災害の周期と協力率

次に、災害の規模だけでなく、再来周期も災害の特徴を代表する重要なパラメータであると考えられる。そこで、災害の周期がエージェントの協力度に及ぼす影響を検討するため、周期を $T=2, 4, 5, 10, 20, 25, 50$ まで7通りに変化させた。災害の規模との組み合わせも検討するため、各々の周期について、災害の規模も $1 \sim 10$ まで変化させた。周期と規模の組み合わせは、70通りとなった。 S, T の組について各々について50回の試行を行い、財産、協力率、防災力を平均評価した。

スタディの結果を、横軸に災害周期、縦軸に災害規模をとって、コンターを描いて図7に示す。財産については、この図の右下の、周期が長く規模が小さいケースほど財産が増加する傾向となり、容易に理解できる。協力率については分布傾向が異なり、協力率が極大となる領域が存在し、図の左下から右上付近に分布している。この理由は、スタディ1において規模のみを変化させた場合からの類推から考察できる。協力を助長する適度な災害の周期と規模の組み合わせが存在することが、一般性を持つことの傍証になっている。ただし、災害規模が小さい場合、例えば $S=1$ や 2 の行に着目すると、周期に対する協力率の感度(変化)は小さく、極大値はやや不明瞭となっている。防災力の分布は、協力率と同様となっている。

ここで考察を深めるため、規模が小さく頻繁に発生する災害(S 小 T 小)と、規模が大きい稀にしか発生しない災害(S 大 T 大)がそれぞれ結果にどのように影響するか、Hazardを基準化して検討する。 $[S=2, T=2], [S=4, T=4], [S=5, T=5], [S=10, T=10]$ の組は、十分長期的にみたときの災害のHazardの期待値が等しい。それは、 S/T

すなわち単位 Step あたりの発生回数の期待値が同じであることから確かめられる。そこで、これらの組を横軸に並べて、財産、協力率、防災力を比較して図8に示す。 S 小 T 小のケースでは財産が多く、協力率も高く、災害を凌駕することに成功しているが、 S 大 T 大のケースでは財産が少なく協力率も低い粗野な状態から脱していない。以上の結果から、災害のHazardの期待値が等価であっても稀な激甚災害では協力行動が学習されにくくなることがわかる。

図7 災害周期と災害規模の任意組み合わせに対する財産・協力率・防災力の変化

図8 頻発小型災害と稀な激甚災害の組み合わせに対する財産・協力率・防災力の変化

図9 モデル地域内に災害規模の差が存在する場合における協力率の学習伝播の影響

(3) スタディ3 災害の地域差と協力率の伝播

次に、現実の世界では災害の規模は地域ごとに異なることが通常であろう。そして、ある地域の支配的戦略が他方へ伝播し良い影響を及ぼすことが期待される。そこで、災害の地域性が及ぼす影響を検討するため、図9左上に示すように災害の規模を一つのモデルを中央で分割して $S=4$ と $S=9$ に設定し、地域差を設けた。前述のようにスタディ1では、 $S=4$ は中程度の災害規模であり、協力率、財産とも高い一方、 $S=9$ は、災害規模が大きく、協力率、財産ともに低かった。ここで、便宜的に領域各列を左の列から地域1~10と呼ぶこととする。災害の周期 $T=10$ とし、全地域で共通とした。最終的な財産、協力率、防災力の空間分布を示すために、50回の試行を行った上で、地域1~地域10の地域ごとに平均を評価した。その結果を図9右と下段に示す。実線は地域差を設けた場合を表し、概ね地域5を境に財産、協力率ともに減少している。一方点線は2つの領域相互の伝播が全くなく独立な場合である。これはスタディ1において一様に災害規模を与えたときの $S=4$ と $S=9$ の場合の結果を引用して示している。この実線と点線の違いが、協力率の学習伝播の影響と考えられる。伝播がない独立の場合、 $S=9$ では協力率はほとんど0であったが、伝播の影響により協力率が境界付近で平滑化され、災害規模大の領域でも相対的に高まっている。一方、 $S=4$ では財産、協力率の低下がみられ、残念ながら必ずしも正の効果だけではないことがわかる。

(4) スタディ4 フリーライダーと社会的罰則の適用

防災力の向上を図るにあたって、フリーライダーの存在が阻害要因となることは背景において既述した。すなわち、防災力に便乗しながら自分は防災に協力せず、自分の財産を増やそうとするエージェントである。現実においては、人々は一定の協力負担を要請し、それを怠れば法的に罰せられるなどの処罰のシステムがある。そのようなシステムを簡単に模擬するため、利己的な(協力率の低い)エージェントに罰を与えるようなルールを与える。

具体的には、協力率が罰則水準の協力率 α_p に満たないエージェントが自分自身の財産増行動を選択した場合、そのステップ毎ある額の罰金を徴収する。徴収した罰金は、簡単のため防災力への転用や

再配分は行わない。また、財産より罰金が多いときには財産は0とし、負にはならないこととする。罰則基準と罰金額それぞれについてケーススタディを行った。

はじめに軽微な災害を想定し、災害の規模は $S=1$ とし、周期は $T=10$ とした。罰則のスタディとして、罰金額を $0.0 \sim 0.9$ の範囲、罰則水準を $0.1 \sim 0.7$ で変化させた。横軸に罰金額、縦軸に罰則を発動する水準となる協力率を取り、財産、協力率、防災力との関係をコンターにして図10に示す。財産に着目すると、縦軸の下方に位置する、罰則水準が低い場合ほど財産が大きくなっている。したがって、災害が軽微な場合には罰則の小さな自由放任型の罰則が適することが示唆される。横軸の罰金額の変化に対しては、財産の変化は小さい。協力率と防災力をみると、図の右上ほど、すなわち罰金額が高く罰則の水準も高いほど、協力率、防災力ともに高まることになる。

次に、激甚災害を想定し、災害の規模は $S=10$ とし、周期は同じく $T=10$ とした。同様に罰金額を $0.0 \sim 0.9$ の範囲、罰則水準を $0.1 \sim 0.7$ で変化させた。財産、協力率、防災力と罰則の関係を図11に示す。このケースでは、財産に着目すると図の右上、すなわち罰金額が高く水準も高いほど、財産も大きくなる結果となっている。さきほどの $S=1$ のケースとは対照的である。これは、罰則の導入により短期的に利益を求める非協力的なエージェントが減少する一方、大きな災害に対して防災力が奏功した結果、全体の財産が増加したためと考えられる。ただし、罰金水準をあまりに高くした場合には、財産の減少がみられる。したがって、罰則が過度に大きすぎると全体の利益を損ねるため、財産を最大化するような罰則の適正水準が存在することがわかる。

図10 罰金額と罰則水準の組み合わせに対する財産・協力率・防災力の変化($S=1$: 軽微災害型)

図 11 罰金額と罰則水準の組み合わせに対する
財産・協力率・防災力の変化(S=10: 激甚災害型)

(5) スタディ 5 罰則の学習と災害規模との関係

前述のスタディでは、罰則の基準を強制的に、固定的に与えた場合であった。ここでは、最後のスタディとして、罰則についてもプロセスの中で学習させることとし、それが災害の規模と関係していることを検証する。

罰則および学習のルールは、以下のように与える。まず、エージェントは周囲(ノイマン近傍)のエージェントの各協力率を調べる。自分より協力率が低いエージェントを制裁の対象とし、そのエージェントが自己財産を増やすことを選択した際に、罰金をかける。この罰金の額はエージェントごとに0~1の範囲の任意の値をとることができ、当該エージェントの他者に対する厳しさを表すものとする。罰金の額は、初期状態では各々のエージェントに0~1の値を乱数で与え、それ以降は協力率と同様に、周囲のうち財産の多いエージェントから模倣学習を行うものとする。また、学習とは無関係に、0.01の確率で罰金額を0~1の範囲の乱数で新たに設定し直す。

災害の規模 S はモデル全体で同一とし、変化させた。ただし、今回のスタディでは災害規模に対して結果の感度が比較的小さかったため、 S の上限は 15 まで大きくした。

罰則の学習がある条件下における災害規模に対する財産、協力率、防災力の変化を図 12 に示す。ここで比較として罰則の無いスタディ 1 の結果($S=0\sim10$)を再掲、併記している。罰則が存在する場合には、災害規模が強まるほど協力率が緩やかに高まる結果となった。スタディ 1 のように、ある一定規模以上において協力率が著しく低下した結果とは対照的である。スタディ 1 では、非協力的なエージェントが短期的な利益を上げたため非協力的戦略が支配的となって

いたが、罰則の学習を入れることで非協力的なエージェントが罰則を受け、協力的なエージェントが支配的となるためと考えられる。そして、災害規模が大きい場合には協力することの利益が大きく、一層協力が促進されるためと考えられる。一方、エージェントの罰則の厳しさの目安として、罰金額の平均を同じく図 12 の右下に示す。罰金額は災害の規模に対してわずかに増加傾向がみられるが、協力率ほど明確ではない。プロセスを確認すると、ステップが進んでも罰金額が大きい厳罰のエージェントと罰金額が小さい寛大なエージェントが常に共存している。そのことの確認のため災害規模 $S=1$ と 10 のケースにおいて、全試行の全エージェントの協力率を横軸、罰金額を縦軸にとりプロットして図 13 に示す。横軸の協力率は、 S が大きいと明確に大きい(右)側へシフトしているが、罰金は必ずしもそのようになっておらず、ばらつきが大きい。また、協力率と罰金額の相関もみられない。これは、罰金額に関してどのような均衡が生じていると考えられる。罰金額が小さい集団は、協力率が低くても罰則の影響が小さく一時的に財産を増やすことができるが、やがて周囲に現れた厳罰のエージェントから罰則を受けて財産を減らされてしまう。しかし、罰則が厳しすぎるとお互いに財産を増やすことができず、次第に寛大な集団が支配的となる。このような動的な均衡によって、系全体として概ね一定値に落ち着くと考えられる。最終ステップ付近では厳罰の集団と寛大な集団が少しずつ影響し合いながら共存している状態となっており、この状態は災害規模の大小が異なっても定性的には同様であった。なお、最終値は、初期にエージェントに持たせる罰金の値に依存するのではないかと考え、初期の値を 0~0.2(平均 0.1)に与え直して検討したが、突然変異によって生じた乱数から学習が広がり、最終的には 0.5 程度になった。したがって、初期条件に依存しない安定的な均衡状態が存在するようである。

上記の結果が示唆することを再度整理する。災害の厳しい環境下では罰則の影響によって社会全体として協力に積極的となる傾向が生じる。ただし、それは必ずしもすべての人間が一様に他者に対して厳しくなるということを意味しない。寛大な人間、厳粛な人間が一定程度共存し適切に均衡を保ちながら全体的な系としては協力する傾向が高まる。これは、現実の社会と比較しても、自然かつ妥当な結果であると考えられる。

図 12 罰則の学習がある条件下の災害規模に対する
財産・協力率・防災力・罰金額の変化

図 13 協力率と罰金額の分布(S=1 と S=10 の比較)

(6) 含意と今後の課題

今回は、初歩の試みとして災害を一般化して Hazard の分布や周期などを与えたが、対象とする災害を特定して、より詳細に設定した場合にどのような影響があるか検討したいと考えている。

また、災害の惨禍が繰り返される要因の一つとして、「災害は忘れた頃に一」と言われるように、人々が被災後に長い年月を経て防災の重要性を忘却してしまうことが挙げられる。忘却のメカニズムを取り入れた場合の検討も重要課題である。これに関連して、エージェントの移動、移住についても検討が必要である。今回の研究では、個別地域(グリッド)に与えた条件がエージェントに継続的な学習によって及ぼす影響を明確にするため、グリッドとエージェントを一対一対応させ、移動又は死亡しない仮定とした。しかし、東日本大震災では、津波常襲地域において過去の災害を教訓に集団で高台移転を行い、高台に定住した集落は被害が少なく、高台移転後利便性の高い低地に戻ってきてしまった集落では、被害が大きかったことが報告されている。集団で移転する/しない、低地に戻る/戻らないは集団居住に関する協力問題、あるいは記憶の伝承・忘却問題として定式化できるのではないかと考えている。

また、自然発生的に防災が創発された端的な事例としては、美濃地域における「輪中」^{たとえば 18)}が広く知られており、木曽三川の水害に対して住民は歴史的に協力して堤を築いて暮らしを守ってきた。輪中の成立過程としては、基本的に領主主導ではなく農民の自主的努力の結果とされる。輪中のような水害では、一部に堤を築造すると他所の水害が増大する兼合いがあるようであり、全ての地域が一斉に協力することのインセンティブになると考えられる。人間・環境・災害系の相互作用の興味深い事例と言えるであろう。

本研究において、基本的な防災協力行動の創発を成立させることができた。基礎理論をさらに発展させるとともに、モデルを上記に例示した具体的な災害、地域へ適用することが今後の課題である。

4. まとめ

防災協力行動のメカニズム及び災害が協力行動に及ぼす影響を基礎的に研究するため、災害常襲地域を模擬したマルチエージェントモデルを構築した。短期的な自己の利益と防災への協力が相反する中で災害に対して防災協力行動が創発されることを仮説として立て、その検証を行った。モデル化においては、各々のエージェントは自身の「協力率」に応じて、防災力の向上か私有財産の増加を確率的に選択するものとした。エージェントがどのような協力(非協力)戦略をとるかをマクロには制御せず、協力率はエージェントが周囲の

エージェントの財産を調べ、最も財産が多いエージェントの協力率を模倣して学習するものとした。乱数の影響があるため、繰り返し計算を行い、最終結果の平均を評価した。

スタディの結果、以下の知見を得た。

- ・災害の規模を増大させると、協力率が最大となる中間的な災害規模が存在し、あるレベルまでは協力率が高まるが、それ以上となると協力率は著しく低下する。災害の規模が小さいと、防災協力の意義が失われる一方、災害規模が非常に大きいと、周囲の多くの協力がなければ効果を得られないため、短期的な自己の利益が優先され、全体として非協力的となるためと考えられる。
- ・災害の周期についても変化させると、規模におけるスタディ同様に協力率の最大点が存在する。
- ・学習の伝播の影響を検討するため、災害の規模に地域差を持たせると、協力率の分布は学習の伝播により地域の境界付近を中心に平均化された。地域差のない条件に比べて、災害の規模が大きい地域では協力率、財産ともに増大し良好な影響を与える一方、災害規模が小さい地域では、協力率、財産ともに低減した。
- ・社会的罰則が行動に及ぼす影響を検討するため、協力率が一定値以下のエージェントに対して罰金を与えると、協力率が高まった。罰金を受けるような協力率の低い戦略が財産を得難くなり、学習され難くなるためと考える。財産への影響は災害規模に依存し、災害規模が小さい場合には、罰則水準が低いほど財産は増加した。このような場合社会的に自由放任が適することが示唆される。一方、災害規模が大きい場合には、一定の罰則を与えることにより協力が推進され、かつ財産が増大した。ただし、極端に過大な罰則は、かえって財産の減少を招いた。
- ・災害が罰則の学習結果に及ぼす影響を検討するため、エージェントが他のエージェントに与える罰金の額を任意の値とし、自分より協力率が低いエージェントに対してエージェント固有額の罰金を与えるようにし、罰金額は学習によって獲得するようにした。その結果、災害規模が大きくなるほど協力率が高まった。そしてまた、協力率が高まることで、社会全体の罰則の水準も上昇した。これは、災害が激しいほど当地の文化の「窮屈さ」が高まるとする Gelfand ほかの指摘とも対応すると考える。

以上から、本研究におけるマルチエージェントモデルの適用性を示した。それとともに、災害常襲地域において防災協力行動が創発される条件は、災害条件が厳しいことだけでなく、人間相互がときに罰則によって相互に牽制し合いながら、互いに協力する戦略を学習することが必要であることを示した。その罰則は、法的に強制的に与えなくとも学習結果によって得られた。理論をさらに発展させるとともに、モデルを具体的な地域、災害へ適用することが課題である。

謝辞

匿名の査読者に、本研究を発展させるための貴重なご意見をいただきました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 岡田 章: ゲーム理論・入門—人間社会の理解のために、有斐閣、2008
- 2) 青木正直ほか監修: 50 のキーワードで読み解く 経済学教室 —社会

経済物理学とは何か？一，東京図書 2011

- 3) 和辻哲郎:風土・人間学的考察, 岩波書店, 1931
- 4) 馬奈木俊介: 災害の経済学,中央経済社 2013
- 5) Joshua M Epstein, Robert Axtell 著, 服部正太,木村香代子訳: 人工社会—複雑系とマルチエージェント・シミュレーション,共立出版, 1999
- 6) 大宮健太, 宮西啓司, 鈴木恵二: 共有地の悲劇におけるメタエージェント化機能の進化的な効果, 情報処理学会研究報告, 知能と複雑系, No.37, pp.1-6, 2006.3
- 7) 谷 賢太郎,前田 義信,林 豊彦: 空間的なシミュレーションによる社会的ジレンマの基礎的性質に関する考察, 電子情報通信学会技術研究報告, 福祉情報工学 111, pp.59-62, 2011.5
- 8) 渡辺公次郎, 近藤光男: 津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発, 日本建築学会計画系論文集,Vol.74, No.637, pp.627-634, 2009.3
- 9) 齋藤崇, 鏡味洋史: マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション 奥尻島青苗地区を例として, 日本建築学会計画系論文集, No.597, pp. 229-234, 2005.11
- 10) 上田遼, 瀬尾和大, 元木健太郎: 地域防災力に着目した地震火災時の災害時要援護者救助シミュレーション 東京都杉並区阿佐ヶ谷高円寺の木造密集市街地を例として, 日本建築学会計画系論文集, No.622, pp.137-144, 2007.12
- 11) 藤井晴行, 谷本潤: 地球環境と共生する持続的社会の探究・人間・環境・社会システムの計算モデル-, 情報処理学会研究報告, 知能と複雑系, pp.167-172, 2003.1
- 12) 谷本潤, 藤井晴行: マルチエージェントシミュレーションによる談合モデル, 情報処理学会研究報告, 知能と複雑系, pp.63-68, 2003.1
- 13) 谷本潤, 藤井晴行:複雑系モデルに基づくアカデミック・ソサエティの盛衰予測に関する研究 : 大学における研究組織と効率に関する考察, 日本建築学会計画系論文集, No.559, pp.299-306, 2002.9
- 14) Gelfand et al : Differences Between Tight and Loose Cultures, A 33-Nation Study, Science, Vol.332, Issue 6033,pp.1100-1104, 2011.5
- 15) 飯田正樹: 災害発生の頻度が文化に与える影響の研究—マルチエージェントシミュレーションによる繰り返し四人のジレンマを通して—, 構造計画研究所第 12 回 MAS コンペティション報告書, 2012
- 16) 高玉 圭樹:マルチエージェントシステムの基礎と応用—複雑系工学の計算パラダイム, コロナ社,2003
- 17) 村尾修: 建築・空間・災害・リスク工学シリーズ 10-,コロナ社, 2013.8
- 18) 国際協力事業団: 防災と開発—社会の防災力の向上を目指して—,JICA 研究所, 2003.3

(2013年11月26日原稿受理, 2014年 7 月 2 日採用決定)