

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820181

研究課題名(和文) 部分観測下でのマルチエージェント系の制御のための非協力ゲーム設計

研究課題名(英文) Noncooperative Game Design for Controlling Multiagent Systems under Partial Observation

研究代表者

金澤 尚史 (Kanazawa, Takafumi)

大阪大学・基礎工学研究科・講師

研究者番号：90452416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：利己的なエージェントからなるシステムにおいて、個人の利益と全体の利益が対立し、望ましい状態が実現されない場合がある。本研究では、価値観の異なる複数のエージェント集団からなるシステムを、各集団の戦略分布は観測できないが、全集団での戦略分布に基づいて補助金を配分することで制御する統制者を導入し、目標とする状態を実現する制御法を提案した。一方、複数のエージェントがリソースを共有する場合に、虚偽の申告に対するペナルティやリソース要求に対する価格を導入することで、エージェントの利己的な行動を抑制し、利得を公平化するリソース配分メカニズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：In multiagent systems that consist of selfish agents, since a purpose of each agent often conflicts with total purpose of whole system, desirable states may not be achieved. In this study, we propose a control method with the government who offers a subsidy to the agents based not on the strategy distribution of each population but on that of whole populations in order to achieve the target output. When multiple agents share some divisible resource, we also propose a fair utility resource allocation mechanism by introducing a penalty scheme and a pricing mechanism to reduce several selfish behaviors of the agents.

研究分野：工学

キーワード：システム工学 制御工学 マルチエージェントシステム 複数集団ゲーム メカニズムデザイン

### 1. 研究開始当初の背景

利己的なエージェントからなる社会システムにおいて、システム全体にとって望ましくない状態が実現される場合があり、古くから社会ジレンマとして知られている。このジレンマを解消する方法論について、エージェントの行動の変化を考慮した動的な数理モデルを用いた研究はあまりなされていなかった。そのため申請者は、エージェントの利己的な行動から生じる社会ジレンマを解消するため、税と補助金を課す統制者を含めた社会システムのモデルを構築し議論することが有効であると考え、研究を行ってきた。

これまでの研究では、統制者は各エージェントがどの集団に属しているか区別可能で、集団ごとに異なる税と補助金を決定できると仮定されている。これは、エージェント集団の内部状態を完全に観測することができるという前提で、ある種の状態フィードバック機構を税と補助金によって実現したものと考えることができる。このモデルを図1に示す。

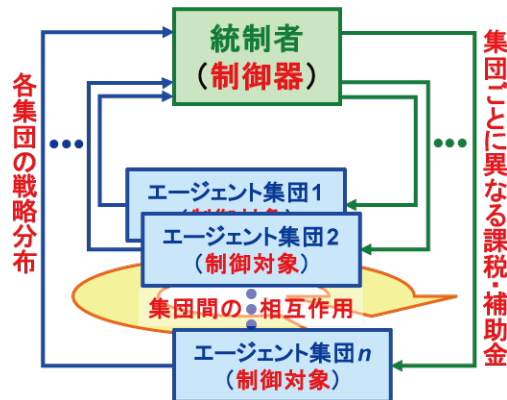


図 1: 既存の複数集団社会システムモデル

一方現実の社会システムにおいては、エージェントの行動は目に見えるかたちで観測可能であったとしても、各エージェントの価値観を知ることは難しく、どのエージェントがどの集団に属しているかわからない場合も多い。また、公平性の観点から、集団ごとに異なる税と補助金を課すことが難しい場合もある。このことから、これまでの研究成果を、各集団の戦略分布(状態)が直接観測できず、集団全体の戦略分布(出力)のみ観測可能な場合に対しても適用できるように拡張することは非常に重要な課題である。

また近年、情報通信技術や仮想化技術の発達に伴い、限りある通信リソースや計算リソースをいかに効率的にエージェントに配分するかが、非常に重要な課題となっている。

一般にリソース管理者は、エージェントの要求に基づいて各エージェントへのリソース配分を決定するが、エージェントが利己的に振る舞う場合、多くのリソースを配分されるほど大きな利益が得られるため、過大なリ

ソースを要求し、結果として社会ジレンマと同様の問題が生じる。

このようなリソース配分問題もエージェント間のゲームと見なすことができる。エージェントの価値観(リソース配分と利益の関係)は一般に個人情報であり、全体にとって望ましい状況を実現する配分ルールや価格、罰則などを定めることは非常に困難である。しかしながらこれまで、エージェントの利益の総和の最大化の観点からの研究が広く行われている。一方で、エージェントの利益の公平化も重要な問題であり、公平なリソース配分を実現する非協力ゲームの設計は非常に重要な課題である。

### 2. 研究の目的

利己的なエージェントからなるマルチエージェントシステムにおいては、各エージェントの利益とシステム全体の利益が対立し、望ましい状態が実現されない場合がある。本研究の目的は、利害の異なる複数のエージェント、または複数のエージェント集団からなるシステムにおいて、エージェント間の相互作用を非協力ゲームととらえ、全体にとって望ましい状態の実現を保証する非協力ゲームを設計することである。

このためのモデルとして、まず、利害の異なる複数のエージェント集団が共存する社会システムを考える。このモデルに対して、統制者による補助金を用いたエージェントの利得操作を導入し、その進化ゲームモデルを提案する。このとき、統制者は各エージェントがどの集団に属するか知ることはできないと仮定する。このモデルにおいて、目標状態を実現するのに必要な補助金の条件を明らかにする。

次に、複数の利己的なエージェントがリソースを共有する状況を考える。リソース管理者にとって、各エージェントの価値観(リソース配分と利益の関係を表す関数)は未知であるが、リソース配分によって得た利益(値)は観測可能とし、エージェントの申告に基づいて、リソースを配分することを考える。このとき、虚偽の申告に対してペナルティを科すことでエージェントの虚偽の申告を抑制し、公平なリソース配分を実現するメカニズムを提案する。また、各エージェントのリソース要求に対して価格を設定し、過大なリソース要求を抑制することで、公平なリソース配分を実現するメカニズムを提案する。

### 3. 研究の方法

エージェント間の相互作用を非協力ゲームととらえ、全体にとって望ましい状態の実現を保証する非協力ゲームを設計するという目的の下、(1)補助金の交付による利得操作を考慮した進化ゲームモデルの構築と(2)利己的なエージェントに対する利得公平化リソース配分メカニズムの提案を行う。

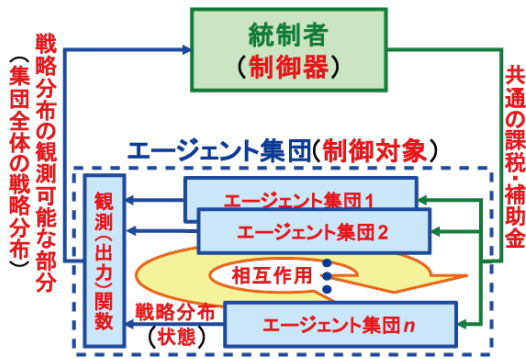


図 2: 複数集団モデルの出力に基づく制御

- (1) 補助金の交付による利得操作を考慮した進化ゲームモデルの構築  
出力に依存した補助金による制御法の提案

取り得る戦略は同じであるが、異なる価値観を持つ複数のエージェント集団において、繰り返し、属する集団に関わりなくランダムに選ばれたエージェントが2人ゲームを行う状況を考える。各エージェントは他のエージェントの属する集団を知ることができず、自身の利益のみを考えて利己的に戦略を変更するとする。このとき、各集団の戦略分布を並べたベクトルを状態変数とし、全集団の戦略分布を出力変数として、各集団の戦略分布の変化を表すレプリケータダイナミクスを状態方程式として定式化する。さらに、その平衡点の安定性について詳細に調べる。

次に、このモデルに対して、補助金を交付することでエージェント集団を制御する統制者を導入し、図2に示した、複数のエージェント集団からなる社会システムをモデル化する。統制者はエージェントの属する集団を区別できないとし、各集団の戦略分布(状態)を直接知ることはできず、エージェント集団全体の戦略分布(出力)のみ知ることができるとする。したがってこのシステムは、出力フィードバックシステムととらえることができる。統制者は、エージェント集団の目標出力(状態)、集団全体に交付される補助金の総額をそれぞれ決定する。補助金は、各戦略をとるエージェントに対して目標出力に依存した割合で配分された後、同じ戦略をとるエージェントで等分割される。このシステムの状態方程式としてレプリケータダイナミクスを定式化し、目標状態を漸近安定化するのに必要な税と補助金の条件について調べる。

#### 任意の目標状態を実現する補助金の配分法の提案

これまでに扱った税と補助金による利得操作を課したレプリケータダイナミクスでは、目標状態がもとのシステムの平衡点の場合のみに限定されていた。しかしながら、全体にとって望ましい状態が、もとのシステムの平衡点であるとは限らない。そこで、任意

の目標状態をゲームの均衡点や進化的に安定な状態、レプリケータダイナミクスの平衡点にする補助金の配分法について検討する。

#### 利己的ルーチングへの応用

複数集団進化ゲームモデルの工学的応用として、申請者がこれまで取り組んできた利己的ルーチングについて考える。各ホストが自身のデータの伝送遅延を最小化しようと利己的に行動する利己的ルーチングは、あるソース-シンク間のフローを1つの集団とし、そのソース-シンク間のどのパスを使うかを戦略とすることで、レプリケータダイナミクスによってモデル化できる。本研究では、補助金による利得操作を課したレプリケータダイナミクスの複数ソース-複数シンク間の利己的ルーチングの制御への応用について検討する。特に、これまでの研究で変化しないと仮定していた単位時間あたりのフロー要求量が、データを送信することによる利益と伝送遅延に依存して変化する状況をモデル化し、その制御法について検討する。

- (2) 利己的なエージェントに対する利得公平化リソース配分メカニズムの提案

複数の利己的なエージェントが共有するリソースの公平な配分法について考える。公平なリソース配分を実現するためには、配分されたリソース量とそれによってエージェントの得る利益との関係(価値観)を、リソース管理者が知る必要がある。しかしながら、一般にエージェントの個人情報であるため、直接知ることはできない。そこで、エージェントの申告に基づいてリソース配分を行うことが考えられる。このとき、エージェントが虚偽の申告を行うことで、より多くのリソースを得ようとする場合があり得る。リソース管理者はエージェントの価値観は知らないが、リソース配分後に得た利益は観測できると仮定し、エージェントが利己的に振る舞っても公平なリソース配分を実現するメカニズムについて検討する。

#### 虚偽に対するペナルティによる公平化

エージェントが真の申告と虚偽の申告を含む確率的な申告を行い、試行錯誤的にその確率を変更する場合を考える。このときエージェントの虚偽の申告を抑制するために、申告と観測した利益が異なる場合にペナルティを科すことで、エージェントが正直に申告した方が得をするようにするメカニズムについて検討する。

#### 要求に対する価格設定による公平化

リソース管理者がリソース要求に対して価格を設定し、要求に応じてリソース配分と支払いを決定する状況を考える。リソース管理者は、前回の配分による各エージェントの利益を観測し、その観測に基づいて、利益が大きいエージェントの価格を高くし、小さい

エージェントの価格を低くするように更新する価格決定法について検討する。エージェントはその価格のもとで自身の利益を最大化しようとするが、多くのリソースを得ようと虚偽のリソース要求を行うと、過剰な支払いが必要となり損をすることとなる。結果として、価格の更新、リソースの要求、それに基づく配分を繰り返すことによって、利益と支払いの差（利得）が等しい公平なリソース配分を実現する手法について検討する。

#### 分散的価格決定による公平化

例えば、通信の帯域幅の配分を考える場合、大きなビルなどにおいては、ビル全体で利用可能な帯域幅を各部屋に配分した上で、部屋ごとに各エージェントに対して配分する必要がある。このような、リソース管理者が複数の副リソース管理者を通じてリソースを配分する状況において、すべてのエージェントの利益を公平化する階層型のリソース配分メカニズムについて検討する。で提案したリソース配分法を用い、各副リソース管理者において局所的な公平化を実現する、各エージェントの利得の観測と公平性指数に基づいたリソース価格更新法について検討する。また、リソース管理者における、各副リソース管理者で公平化された利得とその公平性指数に基づいた各副リソース管理者へのリソース配分の更新について検討する。この2つの手法を繰り返すことで、全体の公平化を実現する手法について検討する。

#### 4. 研究成果

本研究では、統制者（制御器）がエージェント（制御対象）の価値観などの一部の情報を知ることができない状況や、エージェント集団の状態を直接観測することができずある観測（出力）関数を通して限定的な情報しか得られない状況で、エージェントが利己的に振る舞ったとしても目標が実現できるよう制御する問題を非協力ゲームとしてモデル化し、その性質を明らかにした。

##### (1) 補助金の交付による利得操作を考慮した進化ゲームモデルの構築

###### 出力に依存した補助金による制御法の提案

取り得る戦略は同じであるが、異なる価値観を持つ複数のエージェント集団において、各エージェントが属する集団に関わりなくランダムに選ばれたエージェントと繰り返しゲームを行う状況を考え、各集団の戦略分布を並べたベクトルを状態変数とし、全集団の戦略分布を出力変数として、各集団の戦略分布の変化を表すレプリケータダイナミクスを状態方程式として定式化した。次に、システムを制御する統制者を導入し、現在の出力と目標出力に依存する、各戦略をとるエージェントに対する補助金を考慮したレプリケータダイナミクスを定式化した。このダイ

ナミクスについて、目標出力に対応する状態の漸近安定化条件を明らかにした。

###### 任意の目標状態を実現する補助金の配分法の提案

これまでに扱った補助金による利得操作とは異なり、目標状態がもとのシステムの平衡点でない場合にも適用できる、任意の目標状態をレプリケータダイナミクスの平衡点にする補助金の配分法を提案し、その安定化条件を明らかにした。また、目標状態がナッシュ均衡になる条件と進化的に安定な戦略になる条件も同様に明らかにした。

###### 利己的ルーチングへの応用

複数ソース-複数シンク間の利己的ルーチングにおいて、データ送信による利益と伝送遅延に依存したフロー要求の変化を考慮したレプリケータダイナミクスを提案した。さらに、税と補助金による利得操作を課したレプリケータダイナミクスを応用し、状態に依存した仮想的な遅延を加えることで、目標とするフロー要求と各経路に流れるフローの割合を実現する制御法を提案し、目標フローの安定化条件を明らかにした。

##### (2) 利己的なエージェントに対する利得公平化リソース配分メカニズムの提案

###### 虚偽に対するペナルティによる公平化

エージェントが真の申告と虚偽の申告を含む確率的な申告を行い、試行錯誤的にその確率を変更する場合を考え、虚偽の申告に対してペナルティを科すことで、エージェントが利己的に振る舞ったとしても公平なリソース配分を実現する制御法を提案した。

###### 要求に対する価格設定による公平化

リソース管理者がリソース要求に対して価格を設定し、要求に応じてリソース配分と支払いを決定するリソース配分メカニズムを提案した。リソース管理者は、前回の配分による各エージェントの利益を観測し、その観測と公平性指数に基づいて価格を更新する。エージェントが合理的に振る舞うとの仮定の下で、価格の更新、リソースの要求、それに基づく配分を逐次的に繰り返すことにより利益と支払いの差（利得）の意味で公平なリソース配分を実現する手法を提案した。

###### 分散的価格決定による公平化

リソース管理者が複数の副リソース管理者を通じてリソースを配分する状況において、すべてのエージェントの利益を公平化する階層型のリソース配分メカニズムを提案した。で提案したリソース配分法を用い、各副リソース管理者において局所的な公平化を実現する、各エージェントの利得の観測と公平性指数に基づいたリソース価格の更新法を提案した。また、リソース管理者における、各副リソース管理者で公平化された利

得とその公平化指数に基づいた各副リソース管理者へのリソース配分の更新法を提案した。このとき、エージェントが自身にとって最適な要求を行う前提で、パラメータを適切に定めれば、エージェントの要求とリソース価格が、要求と配分が一致する、公平なりソース配分に収束することを示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Takuya Morimoto, Takafumi Kanazawa, and Toshimitsu Ushio, ``Subsidy-Based Control of Heterogeneous Multiagent Systems Modeled by Replicator Dynamics,`` IEEE Transactions on Automatic Control (掲載決定, 巻・頁・発表年未定, 査読有り).  
DOI: 10.1109/TAC.2015.2504519

[学会発表](計19件)

三宮 茂俊, 金澤 尚史, 「公平性指数に基づく分散的価格決定による利得公平化リソース配分法」, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016年5月26日, 京都テルサ(京都府京都市).

木下 雅也, 金澤 尚史, 「複数集団レプリケータダイナミクスにおいて任意の目標状態を安定化する補助金配分法」, 電子情報通信学会 総合大会, 2016年3月15日, 九州大学(福岡県福岡市).

三宮 茂俊, 金澤 尚史, 「二層型利得公平化リソース配分のための価格決定メカニズム」, 第3回制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月7日, 南山大学(愛知県名古屋市).

井深 直人, 金澤 尚史, 「ボロノイ被覆問題における基地局に対するデータ伝送経路の分散最適化」, 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会, 2016年3月4日, 海峡メッセ下関(山口県下関市).

井深 直人, 金澤 尚史, 「障害物回避を考慮したロジックダイナミクスを用いたボロノイ被覆制御」, 第58回自動制御連合講演会, 2015年11月15日, 神戸大学(兵庫県神戸市).

木下 雅也, 金澤 尚史, 「集団ゲームにおいて任意状態を大域漸近安定化する補助金配分法」, 第58回自動制御連合講演会, 2015年11月15日, 神戸大学(兵庫県神戸市).

Manao Machida and Takafumi Kanazawa, ``Population-Independent Pairwise Proportionally Imitative Dynamics for Multipopulation Games,`` 2015 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 11, 2015, Hong Kong, China.

町田 真直, 金澤 尚史, 「集団に依存しない成功の模倣に基づく複数集団ゲームダイナミクス」, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2015年9月9日, 東北大学(宮城県仙台市).

町田 真直, 金澤 尚史, 「集団に依存しない利得差比例模倣に基づく複数集団ゲームダイナミクス」, 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会, 2015年6月18日, 小樽商科大学(北海道小樽市).

木下 雅也, 金澤 尚史, 「人頭税と補助金を用いた集団ゲームでの任意の目標状態の安定化」, 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会, 2015年6月18日, 小樽商科大学(北海道小樽市).

西田 佳祐, 金澤 尚史, 「フロー要求の変化を考慮した利己的ルーチングの仮想遅延による制御」, 第2回制御部門マルチシンポジウム, 2015年3月5日, 東京電機大学(東京都足立区).

Shigetoshi Sannomiya and Takafumi Kanazawa, ``Iterative Cost Update Method of Generalized Kelly Mechanism for Fair Utility Resource Allocation,`` 2014 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 6, 2014, San Diego, California, USA.

三宮 茂俊, 金澤 尚史, 「利得公平化リソース配分に対する一般化ケリーメカニズムの応用」, 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会, 2014年7月9日, 北海道大学(北海道札幌市).

井深 直人, 金澤 尚史, 「ボロノイ被覆問題に対するロジックダイナミクスに基づく分散制御法」, 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会, 2014年7月9日, 北海道大学(北海道札幌市).

岩田 篤彦, 金澤 尚史, 「利得の最大要素に基づいた多目的ゲームのレプリケータダイナミクス」, 電子情報通信学会 総合大会, 2014年3月20日, 新潟大学(新潟県新潟市).

青木 優介, 金澤 尚史, 「利得単調ダイナミクスで特徴付けられる利己的エージェントへの公平なリソース配分」, 第1回 制御部門マルチシンポジウム, 2014年3月5日, 電気通信大学(東京都調布市).

Takuya Morimoto, Takafumi Kanazawa, and Toshimitsu Ushio, "Game Theoretic Approach to the Stabilization of Heterogeneous Multiagent Systems Using Subsidy," 52nd IEEE Conference on Decision and Control, December 11, 2013, Florence, Italy.

西田 佳祐, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「仮想遅延に基づく利己的ルーチングの制御～マルチコモディティネットワークの場合～」, 計測自動制御学会 関西支部 物理と情報をつなぐ次世代システム制御研究会 講演会, 2013年11月, 大阪市立大学 文化交流センターホール(大阪府大阪市).

西田 佳祐, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「マルチコモディティネットワークにおける利己的ルーチングの仮想遅延に基づく制御」, 電子情報通信学会 システム数理と応用研究会, 2013年7月11日, 熊本大学(熊本県熊本市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金澤 尚史 (KANAZAWA, Takafumi)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・講師  
研究者番号: 90452416