

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月30日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760330

研究課題名（和文） 税と補助金を課した複数集団進化ゲームモデルの構築と  
その利己的ルーティングへの応用研究課題名（英文） Multipopulation Evolutionary Game Model with Taxation and  
Subsidization, and Its Application to Selfish Routing

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・助教

研究者番号：90452416

研究成果の概要（和文）：利己的なプレイヤーからなる複数集団の相互作用において、統制者が税と補助金を課すことで全集団を目標状態に導こうとするモデルを提案し、目標状態が安定となる条件を明らかにした。また、複数ソース-単一シンクのネットワークにおける利己的ルーティングを複数集団進化ゲームとしてモデル化した。このモデルにおいて、プレイヤーの利己的な行動によって生じるブライスのパラドックスの起こる条件について詳細に調べた。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a model of interactions among multiple populations of selfish players. In our model, the government tries to control all populations to a desirable target state by taxations and subsidizations. The stabilization condition of the target state has been investigated. We have modeled the selfish routing in multisource single-sink networks as a multipopulation evolutionary game. In the model, we have investigated the occurrence condition of Braess paradox which is caused by selfish behaviors of players.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御工学・システム工学・ネットワーク・複数集団進化ゲーム・利己的ルーティング

## 1. 研究開始当初の背景

進化ゲームを用いて行われてきた様々な社会問題（社会ジレンマ）の研究は、原因についての分析が中心で、生じた社会問題を解決するという視点での研究はほとんど行われていなかった。また、利得を税として回収

することでジレンマを解消するという方法論を示唆するものはあったが、数理モデルを用いた理論的な検討はなされていなかった。

多くの社会システムは、集団全体を俯瞰し介入を行う政府や企業の社長などに代表される統率者を持つ。これは、多くの社会システムにフィードバック機構が元々備わって

いることを示しており、システム制御理論の観点からの議論が様々な社会問題の解決に適用可能であることを示している。

このため申請者は、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、単一集団の進化ゲームモデルを提案し研究を行ってきた。しかしながら多くの社会システムは、単一の集団内の相互作用のみで成り立っているわけではなく、異なる戦略集合と利得を持つ様々な集団の相互作用によって成り立っていると考えられる。そこで、より現実に即した複数集団のモデルへの拡張が重要な課題である。

また近年、多数のホストが関わる高度に発達した通信ネットワークにおいて、各ホストが利己的に振る舞うことで、かえってパフォーマンスが劣化する状況がしばしば問題となる。このようなネットワーク上の様々な問題に関して、アルゴリズム的ゲーム理論と呼ばれる新しい方法論が注目を集めており、本研究で取り扱う利己的ルーティングの解析とそこに生じるネットワークの非効率性の解消に関しても活発に研究されている。この利己的ルーティングの研究においては、非効率性を解消する手法として、ネットワークの枝に対して余分なコストを課す方法が提案されているが、この手法で実現された最小遅延フローには、元のネットワークにはない余分なコストが加算されるという問題がある。

これに対し申請者は、利己的ルーティングに単一集団のモデルを適用し、平均遅延が最小となる状態を、税と補助金のメカニズムによって安定化する手法を提案している。この手法では、実現されたフローのもとでは余分なコストがかからない制御が可能である。

しかしながら単一集団のモデルは、単一のソース-シンク間のフローにのみ適用可能であり、様々なソース-シンク間のフローが入り乱れる現実の通信ネットワークを考えると、非現実的なモデルと言わざるを得ない。そのため、より現実的な複数ソース-シンク間のフローを扱う必要性の観点からも、複数集団への拡張が重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、利己的なプレイヤーからなる複数集団間の相互作用により生じる社会問題を分析し、問題解決に導く制御手法を確立することである。さらにその結果を、異なる送信元と送信先でデータを送信する複数種類のフローのルーティングに適用することで、利己的に振る舞うホスト間の利益を調停し、ネットワーク資源をより有効に活用

するための制御手法を確立することである。

このためのモデルとして、統制者が税と補助金を課すことで複数集団の相互作用に介入し、全集団を望ましい状態に導こうとする状況の進化ゲームモデルを提案する。このモデルでは、取り得る行動（戦略集合）と利得の異なる複数集団の利己的なプレイヤーの相互作用を考え、統制者が、各集団の各プレイヤーの利得をある割合（一定税率）で、もしくは一定の額（人頭税）徴収し、戦略と目標状態に依存した補助金を交付することで、全集団を目標状態に導こうと考える。この仮定の下で、集団の戦略分布の変化を表す、税と補助金を課した複数集団レプリケータダイナミクスを定式化する。このモデルの目標状態の安定性を詳細に調べる。

また、通信ネットワークにおいて、複数のホストが異なる送信元（ソース）と送信先（シンク）の間で、自分のデータの送信遅延を最小化しようと利己的に振る舞う利己的ルーティングと呼ばれる状況を考える。この利己的ルーティングに対し、あるソースからシンクへのフローを1つの集団に、ソースからシンクへの複数のパスのうちどのパスを使うかの選択をプレイヤーの戦略に対応づけることで、複数集団進化ゲームモデルを定式化する。このモデルの性質を詳細に調べる。

## 3. 研究の方法

本研究で扱う社会システムのモデルを図1に示す。

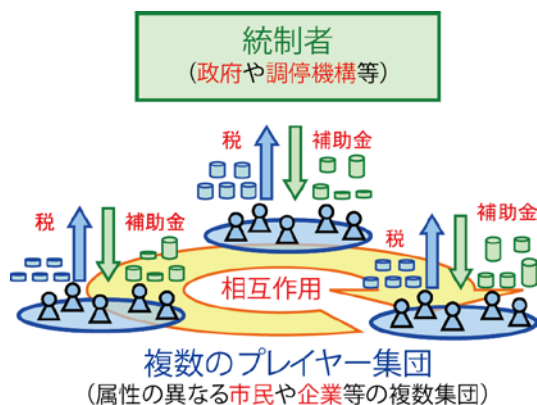


図 1: 統制者を内包する複数集団社会システムのモデル

多数のプレイヤーからなる複数の集団が相互作用していると考えられる。これらの集団は、実社会システムにおいては、住んでいる地域や職業、収入といった点で異なる市民の集団や、異なる企業（そこに勤める社員をプレイヤーとする集団）等に対応する。現代の社会

システムにおいては、これらの集団が独立して存在する場合はまれであり、地方自治体や国の政府といった外部の統制者によって介入を受けることが普通である。そこで本研究では、複数集団の相互作用に加えて、それに介入する統制者を含めた社会システムのモデルを考え、政府が課税と補助金の交付を行うことで集団を制御しようとする状況を考える。このモデルは、一般のプレイヤーの集団を制御対象、統制者を制御器と考えるとシステム制御の観点からとらえると、図2で表される状態フィードバック制御系となることがわかる。

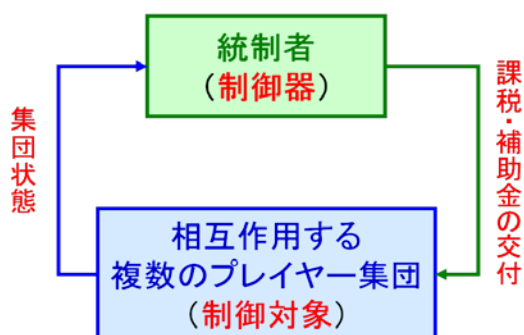


図 2：社会システムの状態フィードバック機構

これに対し本研究では、税と補助金を課した複数集団進化ゲームモデルの定式化と、目標状態の安定性の解析を行い、その結果を、利己的ルーティングの制御をはじめとする工学システムに応用することを考える。具体的には以下の手順で研究を行った。

#### (1) 複数集団進化ゲームモデルの構築

複数の集団のプレイヤーが相互作用する状況において、統制者が各プレイヤーから、属する集団毎に異なる①一定額の税（人頭税）または② 利得の一定の割合の税を回収し、属する集団と戦略に依存した補助金を交付することで目標状態を実現しようとする状況をレプリケータダイナミクスによってモデル化する。

#### (2) 複数集団進化ゲームモデルの工学的応用

##### ① 利己的ルーティングへの応用

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ティングを、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おくことで、レプリケータダイナミクスによってモデル化する。このモデルにおいて、プレイヤーの利己的な行動によって生じる非効率性を明らかにし、その解消法について検討する。

##### ② ポテンシャルゲームの工学的応用

各プレイヤーが利己的に行動したとしても全体の目的が達成される特殊なゲームとしてポテンシャルゲームがある。1つのチップ上に多数のプロセッサ要素を実装したMP-SoCの周波数最適化や、センサネットワークにおける複数のモバイルセンサの最適配置問題をポテンシャルゲームに変換して解く方法について検討する。

## 4. 研究成果

本研究では、統制者が税と補助金を課すことで複数集団の相互作用に介入し、全集団を目標状態に導こうとする複数集団進化ゲームモデルを提案し、その性質を調べた。また、複数ソース-単一シンク間の利己的ルーティングをレプリケータダイナミクスとして定式化し、複数集団モデルで特有に生じる非効率性について明らかにした。さらに、センサネットワークのセンサ配置問題に複数集団進化ゲームモデルを応用した。MP-SoCの周波数最適化問題をポテンシャルゲームに変換して解く手法を提案した。詳細は以下の通りである。

#### (1) 複数集団進化ゲームモデルの構築

複数集団進化ゲームにおいて、政府が集団毎に異なる税と補助金を課すことで全集団を目標状態に導こうとする以下の2つのモデルを提案した。

##### ① 集団毎に異なる一定額の税（人頭税）

##### ② 集団毎に異なる一定の税率の税

を各集団内のプレイヤー全員に一律に課すモデルである。

両モデルにおいて、政府は各集団に交付する補助金の総額と各集団の目標状態とを決定する。補助金は、目標状態に依存した割合で各戦略をとるプレイヤーに配分され、同じ戦略をとるプレイヤーで等分割される。これらの複数集団ゲームにおいて、各集団の戦略分布の変化を表す税と補助金を課した複数集団レプリケータダイナミクスをそれぞれ定式化し、目標状態に対応する平衡点を局所・大域漸近安定とするのに必要な税額・税率と補助金の条件を明らかにした。

#### (2) 複数集団進化ゲームモデルの工学的応用

##### ① 利己的ルーティングへの応用

まず、送信元が複数で送信先が1つの場合の利己的ルーティングを、1つの送信元-送信先間のフローを1つの集団と考えることで複数集団進化ゲームによってモデル化した。

送信元と送信先が1つずつの場合は、最適なフローとして最小遅延フローを考えることができるが、複数の送信元が混在する状況

では、各送信元からのフローの伝送遅延の間にトレードオフが存在し、単純に最小遅延フローを考えることはできない。そこで、利己的ルーティングにおいてデータの伝送遅延が最小となるフローが実現されない状況として知られるプライスのパラドックスに着目し、その性質について詳細に調べた。特に、近年提案された「均衡がパレート最適ではない」という新しい定義と、「あるネットワークに経路を追加したにもかかわらず均衡での伝送遅延が増える」という古典的な定義を、各送信元からの平均遅延の関係と、均衡のパレート最適性を元に分類し、新しいパラドックスが古典的なパラドックスを包含する概念であることを示した。これにより、ネットワークの非効率性を解消するには、新しい定義に基づくパラドックスを解消する必要があることを明らかにした。

## ② ポテンシャルゲームの工学的応用

複数集団進化ゲームの別の工学的問題への応用として、ある領域を効率的にセンシングするために複数のセンサを配置する被覆制御問題を考えた。センサの位置を重心座標系で表現することでポテンシャルゲームに変換し、レプリケータダイナミクスを用いることで、最適なセンサ配置を分散的に求める手法を提案した。また、障害物のある領域に対するセンサ配置についても考え、同様にポテンシャルゲームに変換して最適なセンサ配置を求める手法を提案した。

さらに、複数のプロセッサ要素とそれらを相互に接続する通信ネットワークを1つのチップ上に実装した MP-SoC と呼ばれるアーキテクチャにおいて、タスクの実行時間の短縮だけではなく温度上昇の抑制を考慮した、各プロセッサのクロック周波数最適化に対して、ポテンシャルゲームの性質を用いた最適化手法を提案した。

## 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3件)

- ① 武田 龍三郎, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「プレイヤーの多面性を考慮したn人進化ゲーム」, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J94-A, pp. 243-252, 2011, 査読有り.
- ② Naoki Hayashi, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, ``Potential Game Theoretic Approach to Power-aware Mobile Sensor Coverage Problem,`` IEICE Transactions on Fundamentals,

Vol. E94-A, pp. 929-936, 2011, 査読有り.

- ③ Takafumi Kanazawa, Yasuhiko Fukumoto, Toshimitsu Ushio, and Takuro Misaka, ``Replicator Dynamics with Pigovian Subsidy and Capitation Tax,`` Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications, Vol. 71, pp. e818-e826, 2009, 査読有り.

[学会発表] (計21件)

- ① 寺岡 沙織, 潮 俊光, 金澤 尚史, 「障害物回避を考慮した時間駆動型通信による被覆制御」, 平成23年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, 2012年1月19日, 学校法人 常翔学園 大阪センター.
- ② 浜口 慎平, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「ある2ソースネットワークにおける2種類のプライスのパラドックス」, 平成23年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, 2012年1月19日, 学校法人 常翔学園 大阪センター.
- ③ Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, ``Voronoi Coverage Control with Time-Driven Communication for Mobile Sensing Networks with Obstacles,`` IEEE CDC-ECC 2011, December 12, 2011, Orlando, USA.
- ④ 坪谷 浩美, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「2人2戦略の場合の多目的ゲームと多面的ゲームの均衡解の関係」, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会, 2011年6月30日, 沖縄県青年会館.
- ⑤ 金澤 尚史, 安藤 智弥, 潮 俊光, Pruekprasert Sasinee, 「ポテンシャルゲームによるMP-SoCのtemperature-awareな周波数最適化」, 第55回システム制御情報学会研究発表講演会, 2011年5月19日, 大阪大学.
- ⑥ Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, Takafumi Kanazawa, and Naoki Hayashi, ``Application of Potential Games to Voronoi Coverage Problems with Vehicle-free Areas,`` IEEE RTAS 2011 Work-in-Progress, April 12, 2011, Chicago, USA.

- ⑦ 市場 忠祐, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「非一様な相互作用のある複数集団レプリケータダイナミクス」, 電子情報通信学会 コンカレント工学研究会, 2011 年 1 月 21 日, 海峽メッセ下関.
- ⑧ 浜口 慎平, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「2 ソース Bk グラフにおけるブライスのパラドックス」, 電子情報通信学会 コンカレント工学研究会, 2010 年 11 月 19 日, 関西大学.
- ⑨ 林 直樹, 潮 俊光, 金澤 尚史, 「ポテンシャルゲームを応用した凸制約のある非線形最適化問題の一解法」, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2010 年 10 月 28 日, 大阪大学.
- ⑩ 川村 知広, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「多面性を考慮したレイクゲームのレプリケータダイナミクス」, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2010 年 9 月 14 日, 大阪府立大学.
- ⑪ Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, Takafumi Kanazawa, and Naoki Hayashi, ``Potential Games Based Coverage Control with Voronoi Partition,`` NOLTA 2010, September 7, 2010, Krakow, Poland.
- ⑫ 浜口 慎平, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「ある 2 ソースネットワークにおけるブライスのパラドックス」, 電子情報通信学会 コンカレント工学研究会, 2010 年 6 月 21 日, 北見工業大学.
- ⑬ 寺岡 沙織, 潮 俊光, 金澤 尚史, 林 直樹, 「ボロノイ分割による被覆制御へのポテンシャルゲームの応用」, 電子情報通信学会 コンカレント工学研究会, 2010 年 6 月 21 日, 北見工業大学.
- ⑭ Naoki Hayashi, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, ``Application of Potential Games to Power-aware Mobile Sensor Coverage Control,`` IEEE RTAS 2010 Work-in-Progress, April 13, 2010, Stockholm, Sweden.
- ⑮ 武田 龍三郎, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「プレイヤーの多面性を考慮した n 人進化ゲーム」, 電子情報通信学会 総合大会, 2010 年 3 月 16 日, 東北大学.
- ⑯ 市場 忠祐, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「定率税と補助金を課した複数集団レプリケ

ータダイナミクス」, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2009 年 12 月 21 日, つなぎ温泉清温荘.

- ⑰ 武田 龍三郎, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「プレイヤーの多面性を考慮したレプリケータダイナミクス」, 第 52 回 自動制御連合講演会, 2009 年 11 月 21 日, 大阪大学.
- ⑱ 武田 龍三郎, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「調停機構を持つ多面的エージェントによる 2 人ゲームのレプリケータダイナミクス」, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2009 年 11 月 13 日, 屋久島環境文化村センター.
- ⑲ Tadasuke Ichiba, Takafumi Kanazawa, and Toshimitsu Ushio, ``Multipopulation Replicator Dynamics with Capitation Tax and Subsidy,`` NOLTA 2009, October 20, 2009, Sapporo, Japan.
- ⑳ Takuro Misaka, Takafumi Kanazawa, and Toshimitsu Ushio, ``Control of Selfish Routing Based on Replicator Dynamics with State-Dependent Tax,`` NOLTA 2009, October 19, 2009, Sapporo, Japan.
- ㉑ Takafumi Kanazawa, Takuro Misaka, Toshimitsu Ushio, and Yasuhiko Fukumoto, ``A Control Method of Selfish Routing Based on Replicator Dynamics with Capitation Tax and Subsidy,`` IEEE MSC 2009, July 8, 2009, Saint Petersburg, RUSSIA.

## 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・助教  
研究者番号：90452416

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：