

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19860045
 研究課題名（和文） 利得の動的再配分による集団統制のモデルの解析と
 そのネットワーク制御への応用
 研究課題名（英文） Analysis of a Model of Populations Governed by Dynamic Payoff
 Reallocations and Its Application to Network Control
 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：利己的なプレイヤー集団を，統制者が，利得の回収・再配分という手法を用いて目標状態へと制御しようとする状況を表すモデルを定式化し，その性質を明らかにした．さらに，集団内の戦略分布を，ネットワークを利用するユーザの伝送経路の選択に，利得を伝送遅延に対応づけることで，集団統制のモデルを利己的ルーティングの制御に応用し，遅延の最小となるフローを安定化するための条件を明らかにした．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

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・進化ゲーム・レプリケータダイナミクス

利得の回収と再配分・社会システム・利己的ルーティング

1. 研究開始当初の背景

これまでに進化ゲームを用いて行われてきた社会ジレンマの研究は，どのような原因でジレンマが生じるか，または，どのように解消されるかについての分析がほとんどであり，社会問題そのものを解決するという視点での研究はほとんど行われてこなかった．これまでの研究にも，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存在する．しかしながら，進化ゲーム等の数理モデルを用いて理論的に詳細に検討したものは存在しない．このた

め，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必要がある．

現代の社会システムがプレイヤー集団のみで成り立つ場合はまれであり，政府やリーダーなどに代表される統制者が集団全体を俯瞰して相互作用に介入し，集団に対して影響を与えている場合がほとんどである．これは実社会システムの多くがフィードバック機構を元々備えていることを示しており，いかにして集団を望ましい状態に導くかという問題が，システム制御理論の観点から議論するのに適した問題であることを示している．

近年、通信ネットワークが高度に発達するなかで、その資源の有効利用が問題となっている。多数のユーザが関わるネットワークにおいては、各ユーザが利己的に振る舞うことでかえって全体のパフォーマンスが劣化する様な状況がしばしば起きている。この状況はまさに、前述の集団の統制モデルにおいて問題となる、全体の利益と個人の利益との対立に対応していることは明らかである。したがって、利得の再配分を用いた集団の統制モデルにおいて得られた、集団状態を制御するための知見がそのまま有効に活用できると考えられる。

また、ネットワークの制御において、bio-inspired をキーワードとした様々な技術が登場し、その柔軟性や対障害性が注目されている。元来生物進化をモデルとし、社会システムの分析に応用される本研究のモデルは、この流れをもくんだものとも言える。

2. 研究の目的

本研究では、統制者が集団の状態をモニタし、集団の相互作用に介入することで、集団を目標とする状態に導こうとする状況のモデルを定式化する。統制者による集団への介入をモデル化し、その性質を理論的に調べることで、実社会の問題を解決に導く方策に関する指針を得ることができると考えられる。

本研究の目的は、これまでになされてきた、進化ゲーム理論を用いた社会問題の分析を発展させ、集団を問題解決に導く制御手法を確立することである。さらにその結果をネットワークの制御に応用することで、利己的に振る舞うユーザ間の利益を調停し、ネットワーク資源をより有効に活用することである。

このためのモデルとして、利己的なプレイヤーの集団に対して、統制者が、集団内のプレイヤーの利得の一部を回収し、目標状態にあわせて再配分するという方法で介入することにより、集団を望ましい状態に導こうとするモデルを提案する。

本研究では、以上の定義から、集団の戦略分布のダイナミクスを表すレプリケータダイナミクスを定式化することで、利得の動的再配分による集団統制のモデルを提案する。このモデルにおいて、目標状態の安定性を詳細に調べることで、様々な社会問題を解決するための政策決定や制度設計に関する指針を得る。

また、集団内の多数のプレイヤーを、ネットワークを利用する多数のユーザに対応づけることで、集団統制のモデルをネットワークの制御に応用し、各ユーザの利益の公平化、資源の有効利用を目指す。

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：統制者を含む社会システムのモデル

多数のプレイヤーからなる集団をプレイヤー集団と呼ぶ。現代の社会システムが、プレイヤー集団のみで成り立つ場合はまれであり、政府などの外部からの統制者が介入し、集団に対して影響を与える場合がほとんどである。そこで本研究では、プレイヤー集団と相互作用するような統制者を含めた社会システムのモデルを考える。これは統制者を、社会システムに元々備わった制御機構であると考えたモデルである。

またこのモデルは、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てシステム制御の観点からとらえると、図 2 で表されるような状態フィードバック制御となることがわかる。

統制者は、プレイヤー集団の状態をモニタし、その集団に対する介入戦略を、制御入力として決定する。統制者が適切な戦略をとることで制御対象となる集団を望ましい状態に導くことができ、誤った戦略をとれば集団をかえって望ましくない状態に導いてしまうことになる。

研究目的でも述べた通り本研究では、相互作用する多数のプレイヤーからなるプレイヤー集団に対して、統制者が利得を回収、再配分するという方法で介入する状況を考える。具体的には以下の手順で研究を行った。

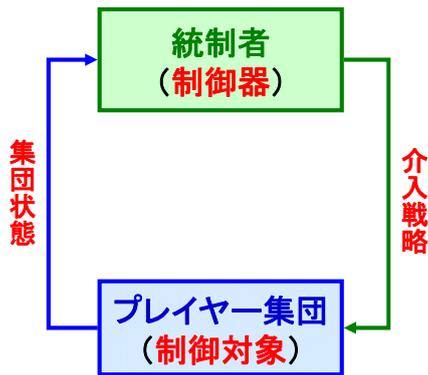


図 2：社会システムの状態フィードバック制御機構

(1) 集団統制モデルの定式化と性質の調査

以下の2つのモデルを提案し、その性質を詳細に調べる。

① 税率を動的に変更する統制者のモデル

プレイヤーの利得を一定の割合で回収する一定税率のモデルにおいて、統制者の利得を集団の状態と現在の統制戦略に依存するものとして定義する。利得に依存して統制者が介入戦略を変更するとし、統制者が、現在の混合戦略によって得られる利得と完全な介入によって得られる利得の差に比例して介入の度合いを動的に変更すると考え、統制者の戦略のダイナミクスを、集団の戦略分布のダイナミクスと同様レプリケータダイナミクスによってモデル化する。

② 人头税と補助金のモデル

すべてのプレイヤーから一定額の税（人头税）を回収し、目標状態に合わせて再配分することを考える。一定税率のモデルと同様に、税と補助金による統制を考慮したレプリケータダイナミクスによってモデル化する。

(2) 集団統制モデルのネットワークの制御への応用

集団における多数のプレイヤーを、ネットワークを利用する多数のユーザと置くことで、(1)で提案し性質を明らかにした集団の統制モデルをネットワークの制御に応用する。特にパケットルーティングを例題として用い、利得の回収と再配分を行うことで、遅延が最小となる経路を安定化し、ネットワーク全体の通信のパフォーマンス向上を目指す。

4. 研究成果

本研究では、利己的なプレイヤー集団を、統制者が、利得の回収・再配分という手法を用いて目標状態へと制御しようとする状況を表す2つのモデルを定式化し、その性質を調べた。さらに、集団内の戦略分布を、ネットワークを利用するユーザの伝送経路の選択に、利得を伝送遅延に対応づけることで、集団統制のモデルを利己的ルーティングの制御に応用した。

詳細は以下の通りである。

(1) すでに提案している、集団内のプレイヤーの利得を一定の割合で回収するモデルにおいて、統制者をゲームのプレイヤーととらえなおし、集団の状態に応じて介入度を変更する、利得の動的再配分のモデルを定式化した。このモデルでは、統制者の混合戦略を、完全統制と放任という極端な2つの戦略の中間的なものとして定義した。また利得を、集団の状態と現在の介入度に依存するものと考え、介入による利益とコストの和として定式化した。この条件の下で、統制者が、現在の混合戦略によって得られる利得と完全統制によって得られる利得の差に比例して介入の度合いを動的に変更すると考えると、統制者の戦略のダイナミクスも、集団の戦略分布のダイナミクスと同様レプリケータダイナミクスによってモデル化される。このモデルを2戦略ゲームに適用し、平衡点の分岐現象を詳細に分析した。特に目標状態に対応する平衡点の局所的、大域的漸近安定条件を明らかにした。

(2) 利得を一定の割合で回収する一定税率のモデルとは別に、新たに統制者が一定額の利得を集団内のプレイヤーから回収する（人头税）モデルを提案した。このモデルが、統制者の介入のないレプリケータダイナミクスにフィードバックを加えた非常にシンプルなモデルとなることを示し、目標状態に対応する平衡点の局所的、大域的漸近安定条件を明らかにした。

(3) 通信ネットワークにおいて、多数のユーザが単一の送信元と送信先の間で、自分のデータの伝送遅延を最小化しようと利己的に振る舞う状況を利己的ルーティングと呼ぶ。利己的ルーティングにおいては、ユーザの利己的な振る舞いによって、遅延が最小となるフローが実現されない場合がある。本研究では、人头税に対応する付加的な遅延を課し、補助金に対応する遅延を割り引くことで最小遅延フローを安定化する手法を提案した。このとき、元々の伝送遅延を減少させら

れない点と、必要以上に大きな税を課すと逆に非効率性を招くことになる点を考慮し、人頭税を状態に依存したものに拡張した。この提案モデルにおいて最小遅延フローを漸近安定化する条件を明らかにした。

(4) 利己的なユーザの振る舞いによって生じる非効率性を特徴付けるものとして、ブライスのパラドックスと呼ばれるものが知られている。ブライスのパラドックスとは、遅延の非常に小さい経路を追加したにもかかわらず、逆にネットワークのデータの平均伝送遅延が悪化することを言う。ブライスのパラドックスを生じる一般性を持ったグラフとしてブライスグラフと呼ばれるグラフが提案されている。

このブライスグラフに本研究の提案手法を適用し、最小遅延フローを安定化するのに必要な税額を具体的に求めた。

また、従来手法である marginal cost tax と呼ばれる税を課す手法についてレプリケータダイナミクスを用いて詳細に分析し、それが安定化に必要な以上の課税となることを示し、最小遅延フローの伝送遅延に影響を与えないという提案手法の優位性を明らかにした。

以上で述べたように、本研究では、社会システムを、集団に影響を与える統制者を包含したものととらえたモデルを提案することで、集団状態の制御という考え方を導入した。またこのモデルを利己的ルーティングに応用することで、その工学的応用可能性を示した。

本研究によって、課税や補助金の交付を代表とする統制者による集団に対する介入の効果を理論的に検討することが可能となる。本研究により確立されたモデルは、社会的ジレンマや、様々な社会問題に対する施策の理論的検討を可能にするという形でゲーム理論や社会学の発展につながるだけでなく、多数の主体が相互作用を行う系における制御手法を確立するものでもある。

本研究で提案したモデルやその制御手法は、本研究でも取り扱った多数のユーザの接続するネットワークの経路選択や、複雑系におけるリソース配分問題等への工学的応用も期待され、分野横断的な研究へと発展する可能性を秘めている。

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 2 件)

- ① Takafumi Kanazawa, Hayato Goto, and Toshimitsu Ushio, ``Replicator Dynamics with Dynamic Payoff Reallocation Based on the Government's Payoff,`` IEICE Transactions on Fundamentals, Vol. E91-A, pp. 2411-2418, (2008), 査読有り.
- ② Takafumi Kanazawa, Toshimitsu Ushio, and Hayato Goto, ``Replicator Dynamics with Government's Intervention by Collection and Reallocation of Payoffs,`` IEICE Transactions on Fundamentals, Vol. E90-A, pp. 2170-2177, (2007), 査読有り.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 金澤 尚史, 福本 靖彦, 潮 俊光, 「人頭税と補助金を課した2戦略レプリケータダイナミクスの分岐現象」, 電子情報通信学会 総合大会, 2009年3月19日, 愛媛大学.
- ② 吉原 千尋, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「集団間の移動を考慮したn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3月11日, キャンパスプラザ京都.
- ③ 見坂 卓郎, 金澤 尚史, 潮 俊光, 福本 靖彦, 「ブライスグラフにおける税による最小遅延フローの安定化」, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2009年1月23日, 宮崎ホテルマリックス.
- ④ Takurou Misaka, Takafumi Kanazawa, Toshimitsu Ushio, and Yasuhiko Fukumoto, ``Stabilization of the Minimum Latency Flow in Braess Graphs by State-Dependent Tax,`` TAIS2008, November 28, 2008, Hyogo, Japan.
- ⑤ 見坂 卓郎, 潮 俊光, 金澤 尚史, 福本 靖彦, 「状態に依存したTaxを課した利己的ルーティング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, 2008年9月16日, 明治大学.
- ⑥ Ryuzaburo Takeda, Takafumi Kanazawa, and Toshimitsu Ushio, ``Evolutionary

Game Model of Water Resource Development Problem,’’ NOLTA2008, September 9, 2008, Budapest, Republic of Hungary.

- ⑦ Takafumi Kanazawa, Toshimitsu Ushio, and Yasuhiko Fukumoto, ``Bifurcation Phenomena of Replicator Dynamics with Dynamic Capitation Tax,’’ NOLTA2008, September 9, 2008, Budapest, Republic of Hungary.
- ⑧ Takafumi Kanazawa, Yasuhiko Fukumoto, and Toshimitsu Ushio, ``Replicator Dynamics with Pigovian Subsidy and Capitation Tax,’’ WCNA2008, July 4, 2008, Orlando, Florida USA.
- ⑨ 武田 龍三郎, 金澤 尚史, 潮 俊光, 福本 靖彦, 「進化ゲーム理論による水資源開発問題のモデル化」, 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2008 年 5 月 18 日, 京都情報大学院大学.
- ⑩ 金澤 尚史, 潮 俊光, 「利得の動的再配分のある 2 戦略レプリケータダイナミクスの分岐現象」, 電子情報通信学会 総合大会, 2008 年 3 月 19 日, 北九州学術研究都市.
- ⑪ 金澤 尚史, 潮 俊光, 「利得の動的再配分を伴ったレプリケータダイナミクスの分岐現象」, 第 8 回計測自動制御学会制御部門大会, 2008 年 3 月 7 日, 京都大学.
- ⑫ 福本 靖彦, 金澤 尚史, 潮 俊光, 「ピグー補助金と人頭税を課した社会システ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, 2007 年 12 月 19 日, 福井工業大学.
- ⑬ Takafumi Kanazawa, Hayato Goto, and Toshimitsu Ushio, ``Replicator Dynamics with Dynamic Payoff Reallocation Based on the Government’s Payoff,’’ NOLTA2007, September 19, 2007, Vancouver, Canada.

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

(3) 連携研究者