

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04635

研究課題名(和文) 複数解をもつ都市・交通均衡モデルの実証分析のための確率論的アプローチ

研究課題名(英文) A stochastic approach for empirical study of urban transport models with multiple equilibria

研究代表者

長江 剛志 (Nagae, Takeshi)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30379482

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)：近年、シェア・モビリティやフード・デリバリーといった新しい移動・輸送サービスや、テレワークや複数拠点居住といった新しい生活・勤務様式の普及により、都市・交通の様相は大きく変化しつつある。本研究では、こうした都市・交通システムの非可逆的・構造的変化を考慮した政策立案・評価を目的として、第1に、複数解の存在を前提として、都市・交通均衡モデルの確率的安定状態を定量的に記述・分析するための枠組を提案した。第2に、安定状態を特徴づける定常分布を具体的に推定するための効率的な手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、規模の経済性などによって複数の均衡解が存在し得る都市・交通均衡モデルに対し、対象が直面する動学的不確実性を明示的に考慮した上で、その定常分布を定量的に分析するための方法論を開発した。本研究成果を活用することで、たとえば「衰退しつつある地方都市に新たな公共交通サービスを導入することで再度活性化が可能か否か」といった問題に対し、2つの均衡----「多くの利用者が新交通サービスを利用し活性化する均衡」と「交通サービスがあまり利用されず衰退が進む均衡」の両方----の存在を考慮しつつ、前者がより高い確率で生じ得るような政策の立案や定量的評価が可能となる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, the structure of urban and transportation systems has been changing dramatically with the spread of new mobility and transportation services such as the shared mobility and the food delivery, as well as new lifestyles and work styles such as telework and multi-location living. For the policy making and its evaluation in consideration of such irreversible and structural changes in urban and transportation systems, we proposed a framework for quantitatively describing and analyzing the stochastic stable state of an equilibrium model of urban and transportation systems, assuming the existence of multiple equilibria. We also developed an efficient method for estimating the stationary distribution that characterizes the stable state.

研究分野：土木計画

キーワード：複数均衡 ポテンシャル・ゲーム 動学的不確実性 マルコフ連鎖モンテカルロ法 ボルツマン分布

1. 研究開始当初の背景

近年、バイクシェア/ライドシェア・ビジネスの台頭や自動運転による電動バスの実現・普及といった技術進展により、都市の構造や交通行動が急速かつ大幅に変化する可能性がある。こうした状況を踏まえた都市政策・交通政策の立案・評価のためには、多数の企業の集積により取引が促進される集積経済や、公共交通などで多数の旅客貨物を運ぶことで単位あたり輸送費用が逡減するという規模の経済性を考慮できる均衡モデルが必要不可欠である。こうした規模の経済性を考慮した都市・交通均衡モデルは本質的に複数の解が存在し、その中のどれが実現するかは、不確定である。しかし、このような複数解の存在と、その不確定性を前提とした実証分析の枠組は、本研究開始当初、我々の知る限り過去には存在しなかった。

例えば、都市部の渋滞軽減のために自動電気バスを導入する状況を考えよう。一般に、バスの輸送費に規模の経済性（バスの利用者数が多いほど 1 人あたりの交通費用が低下する）が働く時、複数の均衡解が存在することが知られている。簡単のために、利用者の総数は一定で、各利用者はバスか自家用車のみを利用するとし、バスの利用者数をモデルの状態変数とする。いま、このモデルに次の 2 つの均衡解が存在すると仮定しよう：(i) 現状解：バスが殆ど利用されず多くの利用者が自家用車で通勤する（渋滞が軽減されない）；(ii) 目標解：多くの利用者がバスを利用し自家用車の通勤者数が減少する（渋滞が軽減される）。直感的には、バスの路線や運行計画を注意深く設計することで、目標解がより実現されやすくなると考えられる。しかしながら、現状解と目標解のどちらか一方のみを確定的に選択する従来手法では、バス路線や運行間隔などの政策のわずかな違いによって選択される均衡解が不連続的に変化し得るため、目的解が実現され易くなるような意思決定が極めて困難となり得る状況であった。

2. 研究の目的

1. で例示したような状況では、均衡解の生起を確率的な事象として取扱い、それぞれの均衡解の尤もらしさ（*i.e.*、均衡解の生起確率）を定量的に評価するというアプローチが自然であろう。これにより、例えば、3 つの政策 A、B および C に対して、目標解の生起確率がそれぞれ 55%、85% および 45% である時に、政策 B を選択するといった意思決定が可能となる。そのため、本研究の核心をなす学術的「問い」を「複数の均衡解を持つ都市・交通均衡モデルに対して、各均衡解の生起確率をどのように定義し、それをどのように定量的に評価するか」と設定した。

均衡解の定常分布（生起確率）を求めることの意義を、図 1 を用いて説明しよう。同図は、1. で述べた、自動電気バスの例において、3 つの政策 A、B および C のそれぞれに対する状態変数（バスの利用者数）の生起確率（定常分布）の例を示している。ここで、従来の確定的手法では「政策 A、B では目標解が、政策 C では現状解が将来時点の解として確定的に選定される」としよう。このとき、従来手法では、「政策 A と C のように定常分布が類似した政策間で異なる均衡解が選択される」、「政策 A と B のようにともに目標解が選択されるような政策を比較できない」といった問題が生じる。これは、個々の政策に対して 1 つの均衡解を確定的に選定するというアプローチを採用する以上、その均衡解の選択方法をどれだけ工夫しようと決して回避できない、極めて厄介な問題である。一方で、本研究の提案手法では、個々の政策における個々の均衡解の生起確率を直接評価できるため、合理的な意思決定として、目標解の生起確率が最大となる政策 B を選択できる。このように、本研究では、均衡解を確定的に選択するという従来手法の改良・拡張では決して克服できない問題を、均衡解の生起確率を定量的に評価するというアプローチによって解決することを目的と設定した。具体的には、以下の 2 つの目的を設定した：

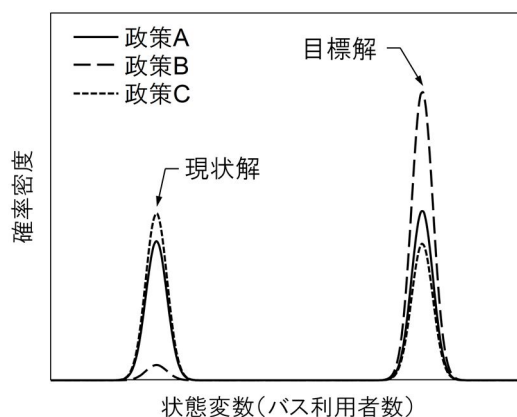


図 1：複数の均衡解を持つ定常分布

1. 個体群ゲーム（**population game**）のモデルの状態（*i.e.*、各戦略を選択する主体数）がある確率的進化過程に従う時、その定常分布が解析解を持つことを明らかにすること
2. 都市・交通政策に関する合理的意思決定の支援を見据え、解析解に基づき、政策ごとの定常分布の差異を定量的に評価するための方法論を提案すること

3. 研究の方法

任意の一般的な状況で上述の目的を達成することは容易ではないことが想定された。そのため、本研究では、都市・交通均衡モデルのうちポテンシャル・ゲーム (**PG: potential game**) に分類されるものに対象を限定した。**PG** は個体群ゲームの重要なクラスであり、各主体の利得に関する全ての情報をポテンシャル関数と呼ばれる関数のみで表現できるという特徴を有する。

一般的に、個体群ゲームは、離散主体モデルと連続主体モデルに分類できる。本研究で対象とする都市・交通均衡モデルは、数千以上の主体を持つことを想定しているため、連続主体モデルを用いることが自然なモデル化であると考えられる。連続主体モデルは、離散主体モデルの主体数を ∞ とした場合に相当する。本研究に関して、既往研究のレビューを行った結果、従来の個体群ゲームモデルでは、離散主体モデル、連続主体モデルともに、系の不確実性が個々の主体の認知誤差にのみ起因するとされており、そのような従来モデルでは、連続主体モデルにおいて系の不確実性が消失してしまう (*i.e.*, 連続主体モデルで表されるのが妥当な規模の主体を対象とした事象でも、現実世界で観測されるような系の不確実性が既存の個体群ゲームモデルでは適切に表現できない) という問題を新たに発見した。

そこで、本研究では、この問題点を解決すべく、個別ゆらぎに加えて新たに全系ゆらぎを導入した系の確率動学を提案することとした。その上で、提案した確率動学の下での系の定常分布の性質や関数形状を解明することとした。また、その結果に基づき、マルコフ連鎖モンテカルロ (**MCMC: Markov chain Monte Carlo**) 法によって定常分布からのサンプリングを行い、都市・交通に関する政策や意思決定の定量的評価を行うための方法論を開発することとした。

4. 研究成果

本研究の代表的な成果は以下のように取りまとめられる：

1. 都市・交通均衡モデルを確率的進化動学に基づく個体群ゲームとして取扱い、既存の個体群ゲームを主体の種類とゆらぎの種類に応じて、**i)** 離散主体・個別ゆらぎモデル、**ii)** 連続主体・個別ゆらぎモデル、に分類した。
2. 個々のモデルにおける都市・交通状態の定常分布の推定方法を俯瞰し、それぞれのモデル、方法での問題点を指摘した。
3. それらの問題点を解決するために、個体群ゲームが **PG** となる場合において、全系ゆらぎを導入した新たな確率的進化動学を連続主体・個別-全系ゆらぎモデルとして提案し、その定常分布が **Boltzmann** 型の解析解を持つことを示した。
4. その性質を利用し、**MCMC** 法を用いた定常分布の推定方法を提案した。

これらの成果の詳細は、長江・水谷¹⁾で報告している。

本研究で提案した方法論を、社会的相互作用と空間的競争を考慮した企業立地 (**SISC**) モデル²⁾に適用することにより、上記の成果の有用性・妥当性を確認した。図 2 は、地点数を **3** とした **SISC** モデルの状態 (各地点の主体数) の定常分布を、本研究の提案方法論を用いて推定した結果を単体上に示したものである。同図では、各地点に主体が集中する状態 (三角形の各頂点付近)、**3** 地点に主体が分散する状態 (三角形の中心付近)、の **4** 種類の均衡解が確認でき、提案方法論により、それらの生起確率が定量的に評価できていることが見て取れる。この適用事例を通じて、次の **2** 点も実証的に確認した：**i)** 従来の離散主体モデルでは、主体数に応じて定常分布の形状が大きく変化し、主体数が多くなった場合には、系の不確実性が消失してしまう、**ii)** 従来の定常分布の推定手法 (*e.g.*, 固有ベクトルに基づく方法、**multi-agent simulation** を用いる方法) では、定常分布を正しく推定できない、あるいは正しい定常分布を推定するために膨大な計算時間が必要となる。こうした課題については、今後、順次解決していく予定である。

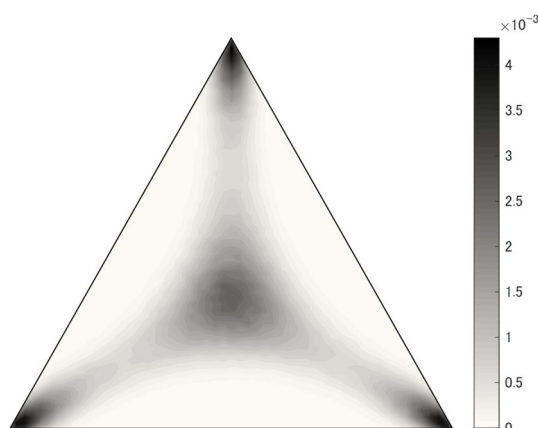


図 2：複数の均衡解を持つ定常分布の推定結果例

引用文献

- 1) 長江剛志, 水谷大二郎: 連続主体ポテンシャル・ゲームの確率的進化動学と定常分布推定方法, 土木学会論文集 **D3** (土木計画学), **Vol.76, No.2, pp.138-155, 2020.**
- 2) 高山雄貴, 赤松隆: 空間競争を考慮した **Social Interaction** モデルによる複数都心の創発, 土木学会論文集 **D3** (土木計画学), **Vol.67, No.1, pp.1-20, 2011.**

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 長江剛志, 水谷大二郎	4. 巻 76
2. 論文標題 連続主体ポテンシャル・ゲームの確率的進化動学と定常分布推定方法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 138 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.76.2_138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水 廉, 長江 剛志	4. 巻 76
2. 論文標題 二次元空間を対象とした大規模な二主体集積経済モデルの効率的解法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 223 ~ 235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.76.3_223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水廉
2. 発表標題 大規模な Fujita and Ogawa (1982) モデルの効率的解法
3. 学会等名 土木計画学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長江 剛志
2. 発表標題 確率的ポテンシャル・ゲームとモデル推定
3. 学会等名 第3回神戸大学土木計画セミナー
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	水谷 大二郎 (Mizutani Daijiro) (30813414)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------