

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01656

研究課題名（和文）GPSビッグデータに基づくヒューマンモビリティ科学の基盤構築

研究課題名（英文）Establishment of human mobility science based on GPS big data

研究代表者

高安 美佐子（Takayasu, Misako）

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：20296776

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：約100万人のスマホGPSデータを解析し都市圏の人流に関する基本的な特性を明らかにした。大都市圏での人流パターンを流域という視点に基づいてマクロ的に捉える新しいデータ解析手法を確立し、流域のサイズの分布や形状が都市に依存しない普遍的な特性を持ち、さらに、Covid-19の感染下でも基本特性が維持されていることを見出した。また、人流を電流とみなすアナロジーによって、都市圏の交通流を近似する電気回路モデルを構築し、新たなシミュレーション手法の基盤を構築した。さらに、基本的な感染症の数理モデルをGPSデータに基づく人口集中の効果を考慮するように改良し、感染者数の増減を予測可能とするモデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一人一人の移動を観測できるスマホのGPSデータからマクロな集団的な人の動きを抽出する新しい手法として流域解析を導入し、また、人流を電流とみなす独創的なアナロジーに基づいて都市の交通インフラを反映した電気回路モデルを開発した。物質の電気回路で成立することが知られている揺動散逸関係がこの仮想的な電気回路でも成立していることを見出し、人流を物理学的な視点からモデル化することの有効性を実証した。また、基本的な感染症の数理モデルを拡張し、GPSデータを有効に使った感染症の新しいモデルを開発した。このモデルにより、いつ、どこで感染症のリスクが高くなるかを定量評価できるようになった。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the GPS data of about 1 million people and clarified the basic characteristics of the flow of people in the metropolitan area. We have established a new data analysis method that captures the pattern of human flow in a metropolitan area from the perspective of drainage basins. We found universal characteristics in which the size distribution and shape of the basin do not depend on the city. It was found that the basic characteristics were maintained even under the infection of Covid-19. In addition, we constructed an electric circuit model that approximates the traffic flow in the metropolitan area by analogy that regards the human flow as an electric current, and built the foundation of a new simulation method of macroscopic human flow. In addition, we improved the basic mathematical model of infectious diseases to take into account the effects of population concentration based on GPS data, and developed a model that can predict the number of infected people.

研究分野：統計物理学

キーワード：GPSデータ ヒューマンモビリティ 輸送現象 モデル構築 数値シミュレーション 統計物理モデル
COVID-19 行動パターン

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンの GPS データが学術研究の対象として使えるようになり、ヒューマンモビリティに関する研究が新たな局面に入ってきた段階だった。それ以前は、人の移動に関するデータとしては、駅でのアンケート調査や、道路での交通量の計測などコストがかかり網羅的ではない情報しか得られなかったが、スマートフォンのユーザーの位置情報が入手できるようになり 24 時間、100 万人近い人の動きを詳細に追跡できるようになってきた。このようなデータをどのように解析し、何を読み取り、どのようなモデルを作るのかに関して研究すべきことが山積みだった。

特に、本研究で注目しているのは、統計物理学の概念がどの程度人間の行動に当てはめることができるか、である。温度やエントロピーのような量をヒューマンモビリティに導入することができるか、など、物質科学の概念を適用できるかどうかを明らかにするだけでも極めて創造性の高い研究になると考えていた。

2. 研究の目的

スマートフォンの GPS ビッグデータを統計物理学の概念や手法を用いて解析し、人の移動に関する基本的な特性をモデル化するヒューマンモビリティ科学の基盤を構築する。20 世紀半ばに統計物理学によって物質の様々な輸送現象に関しては精密な記述ができるようになったが、人の移動に関しては、これまで詳細な観測ができなかったため体系的な記述ができていない。GPS ビッグデータによって、一人一人の移動の詳細な特性を長期間にわたって観測することが可能となり、移動行動の特性に基づいて幾つかのグループに分類した上で、数理モデル化し、目的に合わせた様々な条件で数値シミュレーションを行うことが可能となる。都市における交通の最適化、地域経済活性化のための交通網の提案、災害時の避難指針などの実務的な問題に加え、自動運転の実現によって個人レベルの移動の自由度が劇的に高まった近未来社会をシミュレートするなど、従来の学術領域の枠組みを越えた新しい実用的な科学に発展すると期待する。

3. 研究の方法

本研究では、大きく 3 つに分けられる研究の方法を用いた。

第 1 は、当初から予定していた都市圏の人流の流域を解析するという独自の視点に基づいた研究である。第 2 は、人流を電流のように見なし、その電流と整合するような等価電気回路を推定し、都市圏の交通インフラを記述するという独創性の非常に高い研究である。第 3 は、研究途中で発生した Covid-19 の感染拡大に伴って新たに計画した GPS データを活用した感染モデルの構築である。

第 1 の研究では、約 100 万人の GPS データから推定される人の移動のデータの基本的な解析を行った。データは、時刻と経度と緯度、および、速度、が ID 番号ごとに並んだ形式であるが、プライバシー保護のために深夜の時間帯は欠損し、また、ID 番号はランダムに付け替えられている。このような特性を踏まえて、早朝から深夜までのひとりひとりの移動履歴を取り出し、さらに、マクロな移動特性を観測するために、30 分刻み、500 m 角の格子の上にマッピングするデータ処理を行った。このマクロ化した格子での平均化した速度場のパターンを、東京都市圏、名古屋都市圏、大阪都市圏に関して観測した。パターン同士の類似度を密度で重みづけしたハミング距離によって定義し、時間帯ごとのパターンをデンドログラムによって分類した。誤差を考慮して、朝の通勤時間帯、昼休みの時間帯、夕方の帰宅時間帯、に関して、統計物理学の手法に基づいて流れのパターンの特性を定量的に分析した。そこから、流域の大きさ分布や形状に関する統計的な特性を明らかにした。

第 2 の研究では、都市圏レベルのマクロな人流を記述する新たな数理モデルとして、電気回路とのアナロジーに基づく人流のモデルを開発した。人流を電流とみなすアナロジーに基づき、データから観測される平面上の 500 m メッシュに分割した領域での人流を近似的に再現するような電気抵抗と電圧の空間分布を推定した。得られる電気抵抗の分布は都市交通の構造によって決まり、電圧の空間分布はマクロな人の流れを生み出すポテンシャル力の特徴づける基本的な量となる。また、人流のゆらぎの特性を分析するため、物質で成立する揺動散逸関係が人流においても成立しているかどうかを検証するデータ解析をおこなった。

第 3 の研究では、約 100 万ユーザーの GPS データに基づき、感染の各段階や緊急事態宣言や GOTO トラベル実施時期などのイベントごとに期間を分割し、複数の都市部における人流

の流域解析を実施し、時間帯ごとの流域の変化を定量的に評価した。次に、1日の人の行動を個人レベルで、在宅、移動、勤務、その他（外食や買い物など）の4つのパターンに自動分類する手法を開発し、それぞれのCOVID-19に伴うイベント期間にどのように行動パターンが変化したかを計測した。その結果を感染者数の増減の時系列データと比較し、特に感染拡大と関連の強い行動パターンに関してはさらに詳細な行動パターンに分類するなど深堀を進めた。これによって、行動と感染の関係性をデータに基づいて明らかにし、得られた基本的な特性を記述する数理モデルを構築した。

4. 研究成果

第1の研究に関しては、大都市圏での人流パターンを流域という河川工学の視点に基づいてマクロ的に捉える新しいデータ解析手法を確立した。これまでは、個々のユーザーの出発点と目的点を解析するOD(Origin-Destination)解析が主な人流解析の手法であったが、流域というマクロな視点を導入した解析をすることで、様々な新しい発見があった。国内の8つの都市圏の人流に関して流域解析をした結果、流域のサイズ分布はいずれの場合もほぼ同じようなベキ分布で近似され、個々の流域の形状はフラクタル的なスケーリング関係で共通して特徴づけられることが確認できた。これらの成果は論文として発表し、国内・国外の学会でも発表した。

また、研究の途中の年度である2020年初頭より、Covid-19の感染拡大が発生し、人流はそれ以前と比較すると大きく変化した。この人流の変化の過程で、流域パターンがどの程度変わったのかを調べた結果、流域パターンにはあまり大きな変化が生じていないことが確認された。人流密度は減ったが、流域のパターンは都市のインフラに大きく依存することから、あまり大きな変化にはならなかったと解釈をした。この成果は論文として発表し、また、国内・国外の学会でも発表した。

第2の研究は、都市圏の人流を電気回路のアナロジーを適用して解析するという独自の着想に基づいたオリジナリティの高い研究であり、500mメッシュに区分した領域それぞれに、東西方向と南北方向の電気抵抗をデータと整合するように推定した。そのとき、抵抗と人流の積で決まる局所的な電位差が全体として経路依存しないようにすること、すなわち、対応するベクトル場のローテーションが0に近くなることを制約条件として要請した。数十万個の未知変数をローテーションの2乗和が最小になるという最適問題の置き換え、具体的に抵抗値を決定することに成功した。その結果、朝、昼、夕方どのように電位が変化するかを可視化することができ、都市圏の人流を電位の変動という形で表現することが可能となった。さらに、電気抵抗値ごとにそこでの人流のゆらぎの大きさを観測すると、一般の電気回路で成立するような揺動散逸関係がほぼ成立していることを発見した。人間の行動というマクロな量に関して、物質の世界と同じ法則が成立することは学術的に重要な発見である。また、この発見によって、ゆらぎの大きさを電気抵抗値によって想定できることから、電気抵抗モデルによってゆらぎを考慮したシミュレーションが可能となり、実用上も重要である。これらの成果は、論文として出版が決まり、国内・国外の学会でも発表する予定である。

第3のCovid-19の感染のモデルにGPSデータを用いる研究は、当初予定にはなかったが社会のニーズが高いことから人員を補強して対応した。感染の基本的な数理モデルであるSIRモデルは、未感染者S、現感染者I、免疫獲得者R、に関する微分方程式であり、まず、そのモデルの考え方にしたがって、GPSデータをどのように組み込むかを考察した。GPSデータによって局所的な人の密度の変化を観測できるので、そこから、未感染者と現感染者の中で隔離されていない人の接触確率をモデル化することができる。理論的には、未感染者の割合が小さい場合には感染確率は未感染者の密度の2乗和に比例することが導出され、それに基づいてデータ解析とモデル構築を進めた。その結果、感染者数に関する実データとのデータ同化によって、予測可能な数理モデルを導出することができた。感染が起こりやすい場所と時期を定量的に評価したり、個々の人の一日の行動がどこにどれくらい滞在したかによってどれくらい感染のリスクがあるかを評価することが可能となった。これらの成果は、論文として投稿中であり、国内・国外の学会で発表していく予定である。

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 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shida, Y., Takayasu, H., Havlin, S., Takayasu, M.	4. 巻 6
2. 論文標題 Universal scaling of human flow remain unchanged during the COVID-19 pandemic	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Network Science	6. 最初と最後の頁 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41109-021-00416-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shida Yohei, Takayasu Hideki, Havlin Shlomo, Takayasu Misako	4. 巻 10
2. 論文標題 Universal scaling laws of collective human flow patterns in urban regions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21405(10pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-77163-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 志田洋平、尾崎順一、高安秀樹、高安美佐子
2. 発表標題 電気回路のアナロジーによる人流ポテンシャルの導出
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎順一、志田洋平、高安秀樹、高安美佐子
2. 発表標題 GPSデータを用いたCOVID-19の近接感染モデル
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun'ichi Ozaki, Yohei Shida, Hideki Takayasu, and Misako Takayasu
2. 発表標題 Infection rate analysis at each daily activity under COVID-19 pandemic using human mobility data
3. 学会等名 Conference on Complex Systems 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志田洋平, 尾崎順一, 高安秀樹, 高安美佐子
2. 発表標題 電気回路のアナロジーによる都市内人流のポテンシャル場
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎順一, 志田洋平, 高安秀樹, 高安美佐子
2. 発表標題 GPSデータを用いたCOVID-19の近接感染モデルII
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 志田洋平, 高安秀樹, 高安美佐子
2. 発表標題 人流類似度の提案による日にちの自動分類
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 (オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Shida, Hideki Takayasu, Shlomo Havlin and Misako Takayasu
2. 発表標題 Scaling Laws of Synchronized Human Movements in Metropolitan Areas using GPS Data
3. 学会等名 URBAN COMPLEX SYSTEMS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 志田洋平, 高安秀樹, 高安美佐子
2. 発表標題 GPSデータを用いたコロナ禍における人流パターン解析
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志田洋平, 高安秀樹, 高安美佐子
2. 発表標題 GPSデータを用いた人流パターンの自動分類
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 志田洋平, 高安秀樹, 高安美佐子
2. 発表標題 GPSデータを用いた人の流動解析と数理モデリング
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学
4. 発表年 2019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	尾崎 順一 (Ozaki Jun'ichi) (40846739)	東京工業大学・科学技術創成研究院・助教 (12608)	

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			
イスラエル	Bar-Ilan University	Department of Physics	Prof. Shlomo Havlin	