

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11462

研究課題名(和文)人の流動の大規模データを用いた時空間ネットワーク解析基盤の構築

研究課題名(英文)Development of the analytical framework of spatio-temporal networks using large-scale human mobility data

研究代表者

藤原 直哉 (Fujiwara, Naoya)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：00637449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、人流および人流を介した地域間相互作用の分析の基盤となる研究を行った。GPSデータ、基地局データ、アンケートに基づく人流データなどを用い、それぞれのデータの特性を考慮しつつ、人流ネットワーク分析の観点からの地域分類などの分析を行った。応用研究として、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴う人流の変化の分析を行い、感染拡大などとの相関を分析した。また、感染の空間的な拡大過程や都市の形成過程などに関する数理モデルの研究もを行い、理論面からも人流の理解を目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人流は都市における人間活動を理解する上で重要な役割を果たす。例えば都市における経済活動はその都市内外の人流と強い関係がある。また、感染症は人の接触により伝播するので、人流データから感染伝播の地理的特徴を明らかにできると期待される。本課題は、さまざまな人流データの解析の基盤を提供するとともに、人流と感染拡大の関係や都市形成と人流の関係などを理論的にも理解することを目指すものであり、人流に関連する社会における様々な現象の理解に貢献する。

研究成果の概要(英文)：In this project, the research regarding human mobility and interregional interactions through human mobility has been conducted. Considering features of GPS data, cell-tower-based data, and questionnaire-based human mobility data, studies on such as delineation based on the human mobility network analysis have been conducted. This framework has been applied to e.g. analyses of change of mobility after the COVID-19 pandemic, and the correlation between human mobility and spread of COVID-19 has been investigated. Mathematical models on spatial spread of infectious diseases and formation of cities have been introduced and studied, which facilitates the understanding of the human mobility.

研究分野：複雑ネットワーク科学

キーワード：人流 地理情報科学 数理モデル 感染症

1. 研究開始当初の背景

人流は都市における人間活動の実態を表す重要な要素であり、人流を理解することは、都市や人間社会を理解するうえで極めて重要である。そのため、人流の研究は、地理学、経済学、都市工学など、関連する諸分野において様々な観点から行われており、長い歴史を有する。人流の実証研究は、従来はパーソントリップ調査などを元にしたデータを用いて研究が行われてきたが、近年、携帯電話の普及や計算機の性能の向上に伴い、高精度な人流データが大規模に取得できるようになり、従来と比べて非常に多くの研究が行われるようになりつつある。

人流研究は理論面での発展も著しい。例えば、地点間の流動量に関するモデルとして、重力モデルや介在機会モデルが知られているが、近年後者を拡張した放射モデルが提案された(①)。このモデルには調整すべきパラメーターが存在しないにも関わらず実際の人流とよく相関していることが報告されている。また、人流を記述するためにスカラーポテンシャルを導入することで人流を流れ場として理解する研究も行われており(②)、新しい描像に基づいたモデルが多数提案されている。

ある地点からある地点への人の移動量は、発地と着地の性質のほか、その間にある地点や考えている地域全体の性質も関係して決定されると考えられる。このように、要素が互いに相互作用を行う複雑な系を分析する手法として、ネットワーク科学が急速に発展している。多くのネットワーク分析手法が開発され、様々な系に適用されている。ネットワーク分析手法は地理的な系へも適用されている(③、④)が、特に人流においては、地域メッシュや市区町村などを単位として流動量を集計するなどの方法によって重み付きネットワークとして扱うことが可能であり、ネットワーク分析に適した系である。人流は、分、日、週、さらに年など様々な時間スケールが混在しており、特に1日、1週間、1年などで周期的変動を繰り返すという特徴がある。動的なネットワークについても、近年分析が行われるようになっており、静的なネットワークには見られない特徴が報告されるに至っているが、人流が持っているこのような特徴は、動的ネットワーク分析の観点からも興味深い題材を提供していると言える。

以上のように、データ、分析手法、理論などの急速な発展を要因として、人流の研究は近年急速に広がっており、ネットワーク分析手法などの新しい手法が提案され、新しい知見が得られている。

しかしながら、人流は複雑な現象であり、現状においてはその解明にはまだほど遠いと言わざるを得ない。特に、移動先、例えば都市の中心業務地区などでの人の接触は非常に重要である。例えば都市経済学においては、企業間の対面でのコミュニケーションによる知識の波及が生産性の向上をもたらす、これが都市の集積をもたらす主要因の一つであると考えられている。その一方で、対面接触の増加は感染症の拡大をもたらすという負の効果を生じうる。また、人流データの問題は依然として存在している。携帯端末を通じて得られる人流データは従来のアンケート等によるデータと比べると大規模であるが、全人口に対するサンプル率は高々数パーセントにとどまっており、人流と接触の解明は現状の環境においては未だに困難である。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本課題は、人流データを利用して、人々の流動と流動を介した地域間の相互作用の特徴を動的なネットワークとして明らかにするための基盤を構築することを目的とする。データ分析で得られた知見は、感染症の拡大や都市における経済現象の理解に応用され、将来的には感染拡大の予測・制御や、効率的な人流制御手法への応用を見据えた基礎的な知見を与えるものと期待される。理論研究では、都市の形成や感染症の拡大についてのモデルを提案するとともに理論解析を実施し、データ分析で得られた結果を説明し、かつ、これらの現象が発生する機構を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 実証分析：現在利用可能な様々な種類の人流データについて、それぞれのデータが持つ特徴を検討した上で状況に合わせてデータを選択しながら分析を行う。空間精度はGPSデータが最も高いが、サンプル数は基地局との通信で得られたデータが多い。ジオタグ付きツイートデータは、位置情報のほかに、ツイートなどの付加的な情報が含まれる。また、内容の信頼性はパーソントリップ調査に基づくデータが高く、携帯電話由来のデータと比べてサンプルバイアスが低いと期待される。このように、分析に応じたデータの使い分けを検討するとともに、これらのデータを実際に利用する。また、人流ネットワークが持つ性質を明らかにする。例えば、地域メッ

シュ人口分布の性質を実データから明らかにするほか、ネットワークコミュニティ抽出手法などのネットワーク分析手法を適用する。

データ分析で得られた知見を元に、都市において人流が重要な役割を果たすと考えられる感染拡大および動的な都市形成に関連する現象の分析への応用を行う。具体的には、人流を用いた感染拡大モデルの改良、メッシュ人口分布や移動量の人流データを用いた分析などを行う。

(2) 理論分析：実データの分析によって得られた結果から都市における人流とその果たす役割を理解するために、理論研究も同時に行う。

人流のネットワーク上での感染ダイナミクスの理解を目指し、ネットワーク上での感染拡大モデルの研究を行う。また、複数の感染症の罹患率に相関がある場合や介入の効果などを考慮した際の感染の地理的な拡大の考察は重要なので、これらの状況をモデル化し研究を行う。

Krugman らによって創始された新経済地理学では、都市の形成を、効用関数の最大化と企業の利潤最大化に基づく数理モデルによって表現する (⑤)。近年では、これらのモデルの動学モデルへの拡張が模索されている。地理的な人口分布を理解するために、地点間の流動量が動的に変化する数理モデルを提案する。本課題では、非線形科学の知見に基づいて新たな都市形成モデルを提案し、都市の理解に貢献する。

4. 研究成果

(1) 実証分析

実データを用いて人流や人口分布の特徴を明らかにした。メッシュ人口分布が二つのべき指数を持ったべき則に従うことを示した。また、Twitter データや基地局ベースの人流データから構築した人流ネットワークに対してコミュニティ検出手法を適用し、地理的に連結したコミュニティが得られることを確認した。

ジオタグ付きツイートデータにおいて、地名を表すと考えられる語が有意に多くツイートされている地域メッシュを特定した。その最大連結成分は、多くの場合、地名に対応する行政区画を中心に空間的に分布しているが、その地理的範囲は行政区画と必ずしも一致しているわけではないことを明らかにした。すなわち、ある地名が実際に利用されていると考えられる地理的範囲をツイートデータから明らかにすることができた。

新型コロナウイルス感染症の拡大により、人流と感染拡大の関係が注目された。2020 年春のいわゆる第一波の時期における東京での人流分析を行った。その結果、人流データから定義された特徴量の時系列と感染拡大を特徴づける実効再産数の時系列の間に相関関係が見られることを報告した。日本においては感染拡大時においても強制力を伴ったロックダウンは行われなかったが、本研究は、強制力を伴わない行動自粛要請下での人流変化と感染拡大の関係についての分析であるという特徴がある。本研究をまとめた論文は Scientific Reports 誌に掲載され、国際的にも評価を受けた。

さらに、感染拡大と人流の関係性について分析を行った。その結果、東京都における第一回目の緊急事態宣言の発令中には、移動先の滞留人口および移動距離に応じて移動量が 2019 年と比較して有意に減少したことを確認し、第二回目の緊急事態宣言の発令中には移動距離に応じて移動量が有意に減少したことを確認した。これらの結果は、感染の拡大状況や緊急事態宣言の発令状況に応じて、都市圏における住民の行動が適応的に変化していることを示唆するものであり、今後の感染拡大対策を考える上で重要な示唆を与えるものである。

(2) 理論分析

感染拡大時において介入を行った効果の理論解析を、SIR モデルに基づいて行った。1 回のみ介入を行う場合、感染最終規模は感染開始のタイミングに依存し、最終規模を小さくする開始タイミングが存在することを見出した。また、ピーク時の感染者数に関しても同様に、1 回のみ介入の場合、感染者数を最小化するタイミングが存在することを示した。複数の感染症が相互作用するモデルの動的な性質を分析した。感染症の相互作用は、例えば COVID-19 の流行とともにインフルエンザの感染者が大きく減少したように、今後の感染症の流行を考えるうえで重要な可能性がある。これらのモデルは人流データと組み合わせることで、地理的な感染拡大や介入の地理的效果の評価に応用できる可能性がある。

データから得られる人口分布を再現するモデルは、都市の形成を理解する上で極めて重要である。各地点での人口分布と地点間の移動量が相互依存しながら共発展するモデルを提案した。このモデルは従来知られていた同様のモデルと比較すると調整すべきパラメーターの数が極めて少ないにもかかわらず、数値計算の結果、現実の人口分布と近い分布が得られることがわかった。また、このモデルにおいてパラメーターを変化させると、人口が空間的に均一に分布する状態から特定の地点に人口が集中する状態への分岐が観測されることを示した。また、この分岐が発生する機構を明らかにするために空間一様状態の線形安定性解析を行い、理想化された状況においては、有限の波数が不安定化することを示した。

<引用文献>

- ① F. Simini et al., *Nature* 484, 96 (2012).
- ② M. Mazzoli et al., *Nature Communications* 10, 3895 (2019).
- ③ M. Barthelemy, *The Structure and Dynamics of Cities* (Cambridge University Press, 2016).
- ④ M. Barthelemy, *Physics Reports* 499, 1 (2011).
- ⑤ M. Fujita, P. Krugman, A.J. Venables, *The Spatial Economy* (MIT Press, 2001)

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 1件）

1. 著者名 Yabe Takahiro, Tsubouchi Kota, Fujiwara Naoya, Wada Takayuki, Sekimoto Yoshihide, Ukkusuri Satish V.	4. 巻 10
2. 論文標題 Non-compulsory measures sufficiently reduced human mobility in Tokyo during the COVID-19 epidemic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18053
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-75033-5	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 Olivares Patricio, Creixell Werner, Fujiwara Naoya	4. 巻 30
2. 論文標題 Dynamical impacts of the coupling in a model of interactive infectious diseases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 93144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0009452	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 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 藤原直哉
2. 発表標題 感染症ダイナミクスと 人流分析
3. 学会等名 地理情報システム学会東北支部 2021年年度研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Fujiwara
2. 発表標題 Response to severe disasters revealed by the human mobility data
3. 学会等名 JICA Innovative Asia JFY 2021 (Big data and Sustainable Development Goals (SDGs))
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原直哉
2. 発表標題 人流データ分析で捉える社会構造の変化
3. 学会等名 第13回 総合科学を考えるセミナー「ウィズコロナ時代の社会と情報科学」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤亮, 坪井和史, 藤原直哉
2. 発表標題 Does COVID-19 pandemic change our daily mobility? Evidence from Japanese cellar-phone data
3. 学会等名 第35回応用地域学会研究発表大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazufumi Tsuboi, Naoya Fujiwara, Ryo Itoh
2. 発表標題 Does COVID-19 pandemic change our daily mobility? Evidence from Japanese celler-phone data
3. 学会等名 11thThe Asian Seminar in Regional Science (ASRS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazufumi Tsuboi, Naoya Fujiwara, Ryo Itoh
2. 発表標題 Network analysis of human mobility and impact of COVID-19 pandemic on human mobility
3. 学会等名 RIMS共同研究「人口と環境の数理地理モデリング」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazufumi Tsuboi, Naoya Fujiwara, Ryo Itoh
2. 発表標題 Mobility change and COVID-19: Evidence from the cellular-phone data in Tokyo
3. 学会等名 The XV World Conference of Spatial Econometrics Association (SEA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原直哉, 翁長朝功, 和田崇之, 竹内昌平, 瀬戸順次, 中谷友樹, 合原一幸
2. 発表標題 感染抑制介入の数理モデル: 経済的影響の評価に向けて
3. 学会等名 第 34 回応用地域学会研究発表大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原直哉
2. 発表標題 人流ネットワーク分析とその周辺
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原直哉
2. 発表標題 地理情報データ解析と複雑ネットワーク
3. 学会等名 先端数理科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Fujiwara
2. 発表標題 Rare Events Associated with Human Mobility
3. 学会等名 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桐村喬, 藤原直哉, 平岡喬之
2. 発表標題 ジオタグ付きツイートで用いられる名詞の空間的広がり と階層性 - 京都市における事例分析 -
3. 学会等名 地理情報システム学会第28回学術研究発表大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoya Fujiwara
2. 発表標題 Theoretical Modeling of Information Transmission in Visual Systems
3. 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoya Fujiwara, Takashi Kirimura, Takayuki Hiraoka
2. 発表標題 Mobility networks and distribution of location-specific nouns in geo-tagged tweets
3. 学会等名 NetSci-X 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木高明、藤原直哉、中垣俊之
2. 発表標題 実地形上における都市と道路のパターン形成
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoya Fujiwara
2. 発表標題 Towards Prediction of Complex Geospatial Phenomena
3. 学会等名 ACM SIGSPATIAL 2018 Workshop on Prediction of Human Mobility (PredictGIS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原直哉、青木高明、Marck Fricker、中垣俊之
2. 発表標題 Pattern formation and co-existence of steady states in a co-evolving model of cities and roads
3. 学会等名 応用地域学会第32回研究発表大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原直哉
2. 発表標題 地理空間データを用いた社会経済現象解析
3. 学会等名 経済・社会への分野横断的研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 桐村喬（編）、磯田 弦、板井 正斉、岸江 信介、峪口 有香子、田中 誠也、藤原 直哉、渡辺 隼矢（著）	4. 発行年 2019年
2. 出版社 古今書院	5. 総ページ数 152
3. 書名 ツイッターの空間分析	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	Purdue University			
チリ	Universidad Tecnica Federico Santa Maria			
米国	Harvard University			
英国	University of Oxford			
米国	Massachusetts Institute of Technology			