

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：34304

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K21671

研究課題名（和文）機械学習を用いた既存の都市内部構造モデルの定量的評価と再構築

研究課題名（英文）Evaluation and Reconstitution of Existing Models of Urban Structure in Japan Using Machine Learning

研究代表者

桐村 喬（KIRIMURA, Takashi）

京都産業大学・文化学部・准教授

研究者番号：70584077

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、同心円やセクターという従来の都市内部構造モデルの日本の都市に対する適合度について、機械学習の手法を援用して定量的に評価するとともに、様々な規模の日本の都市を対象とした機械学習による都市内部構造の分類を通じた、新たな都市内部構造モデルの構築を目指したものである。機械学習による定量的な評価については、必ずしも十分な成果を得られなかったものの、教師付き分類を用いた地域分類手法や、因子生態的アプローチに代わる機械学習的なアプローチによる新たな都市内部構造の分析手法の開発という点で一定の成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、近年急速に発達してきた機械学習手法を、まだ十分な適用事例の蓄積がない都市地理学的課題に適用しようとしたものである。当初の研究計画は十分には達成できなかったものの、リモートセンシングで用いられている教師付き地域分類を都市内部構造の分析に利用し、類型や因子へのラベル付け問題への対処を図ったほか、従来用いられてきた因子分析主体の居住地域構造分析に非負値テンソル因子分解（NTF）などの機械学習手法を用いたことも本研究の重要な達成点である。

研究成果の概要（英文）： This study aims to quantitatively evaluate the suitability of the traditional urban internal structure models for Japanese cities using machine learning techniques, as well as to construct a new urban internal structure model through the classification of urban internal structure using machine learning for Japanese cities of various sizes. Although the quantitative evaluation using machine learning did not necessarily produce satisfactory results, certain results were achieved in terms of the development of a regional classification method using supervised classification and a new urban internal structure analysis method using a machine learning approach as an alternative to the factorial ecological approach.

研究分野：都市地理学

キーワード：都市圏 都市内部構造モデル 小地域統計 地理情報システム（GIS） 機械学習

1. 研究開始当初の背景

都市内部構造に関する多くの既往研究では、居住者に関する指標や類型の分布を地図化し、そのパターンについて、視覚的に同心円的あるいはセクター的であるかどうか判断されてきた。例えば単身世帯比率や核家族世帯比率は、都心を中心とした同心円的な分布パターンを示しており、単身世帯比率は都心で、核家族世帯比率は郊外で高くなるのが一般的である。また、職業別就業者比率は都心をかなめとした、特定の方向のみの扇形(セクター)の分布をなすことが知られている。一方で、分布パターンの捉え方の差は研究者ごとに生じるものであり、既往研究の成果との比較の際などに障害となることもあり、誤った結論を導くこともある。そこで、都市内部構造のパターンそのものを全国的な視点から分析して都市内部構造のパターンの共通基準として内部構造モデルの再構築を行うことで、現代都市研究の深化・発展に貢献できるものと考えた。また、近年、急速に発達しつつある機械学習による画像認識・分類手法に着目し、都市内部構造の分析に適用することで、従来的手法の限界を超えて、既存の都市内部構造モデルの定量的評価や新たなモデルの構築を行うことができると考えられた。

2. 研究の目的

日本の都市の内部構造に関する研究においては、従来、バージェスの同心円モデルやホイトの扇形モデルなどを念頭に置いた、同心円やセクターという地理的パターンの基準をもとにして、分析、解釈がなされてきた。一方で、近年の日本の大都市圏においては、人口の停滞や減少、諸機能の東京一極集中など、その内部構造を大きく変容させるような現象が生じており、従来的なモデルやパターンの捉え方が適当ではなくなっている可能性がある。そこで、本研究では、従来の都市内部構造モデルや典型的パターンの日本の都市に対する適合度について、機械学習の手法を援用して定量的に評価するとともに、大都市や中小都市など、様々な規模の日本の都市を対象とした機械学習による都市内部構造の分類を通じた、新たな都市内部構造モデルの構築を目指すこととした。

3. 研究の方法

申請時に当初計画していた研究の方法は以下のとおりである。

(1) 都市内部構造分析のための機械学習手法の開発

本研究では、機械学習における画像認識・分類の手法を援用し、都市の内部構造、特に様々な指標の地理的パターンの解析を行う。機械学習は、入力されたデータを反復的に学習し、データの特徴を抽出する手法である。一般的に、機械学習による画像認識・分類では、一枚の画像を $R \cdot G \cdot B$ の3つの次元に分割してそれぞれの値を学習することで、パターンの特徴を認識・分類する。このとき、一枚の画像を特定の都市とし、 $R \cdot G \cdot B$ を特定の指標として考えれば、画像認識・分類手法を都市内部構造のパターン認識や分類に応用できる。そこで、国勢調査などのメッシュ単位の統計データを用いて、画像認識・分類に適した機械学習手法をもとに、都市内部構造のパターン認識と分類を行う手法を開発する。

(2) 従来モデルの日本の都市への適合度の評価

同心円モデルや扇形モデルのような従来モデルに基づく、社会経済的特性などの代表的指標の分布パターンを生成し、これらを「正解画像」として、(1)で開発した機械学習手法により学習する。そして、実際の都市における指標分布を抽出して比較し、従来モデルの適合度を求める。この方法によって、同心円モデルが30%、扇形モデルが70%というような適合度を得ることができるものと予想される。都市における指標分布の抽出の際には、様々な空間的スケールを設定して都市的地域を抽出し、それぞれの空間的スケールに応じた適合度の評価を定量的に行う。一方、機械学習によって得られた結果には、一定程度の誤りが含まれると予想され、規模の違う複数の都市を対象として現地調査を行い、修正を加えながら評価の精度を向上させる。

(3) 日本の都市内部構造の典型的パターンの抽出と都市のグルーピング

国勢調査などから得られる様々な指標をもとに、日本全国の各都市の特徴を機械学習手法によって学習させることで、都市内部構造の典型的パターンを抽出するとともに、類似した内部構造をもつ都市をグルーピングする。典型的パターンの抽出にあたっては、複数の空間的スケールを設定して、全体的なパターンだけでなく、都市内部の特定地域におけるパターンも抽出する。これにより、都市間の類似性から都市内部構造の特徴を分析できる。ここで抽出する都市内部構造の典型的パターンは、新たなモデル構築における重要な要素であり、複数の都市での現地調査を通じて、その妥当性を検証しながらパターンの修正を図る。

(4) 日本の都市の現状に基づいた都市内部構造モデルの再構築

既存の都市内部構造モデルの評価や、日本の都市内部構造の典型的パターンの抽出によって得られた結果を総合して、日本の都市の現状に基づいた、新たな都市内部構造モデルを再構築する。モデルの構築においては、現地の都市景観など、統計データに現れないような要素との整合性を重視し、現地調査を引き続き実施しながら、必要に応じて(3)の作業を再度行うなどして、モデルの精緻化を図る。最終的に得られたモデルや様々な都市に関するデータは、インターネット

トを通して公開する。

4. 研究成果

本研究課題は2019年度に採択され、当初は2021年度までの3年間で実施することとしていた。しかし、研究を遂行するにあたって、2つの問題に直面したため、当初期待された成果は十分に得ることができなかったものの、機械学習ベースの都市内部構造についての新たな分析手法が開発できるなど、一定の成果を得ることができた。

まず、直面した問題のうちの1つは、画像認識・分類に適した機械学習手法をもとにした都市内部構造のパターン認識と分類を行う手法を利用して、従来の都市内部構造モデルの日本の都市への適合度の評価を行うことが当初の予想に反して、十分には達成できなかった点である。社会経済的特性についての統計データを、ピクセル単位の画像データ(あるいはGISのラスターデータ)のように、正方形のグリッド単位のデータに変換したうえで、都心を所与のものとして設定したうえで、同心円やセクターなどの空間的なパターンの適合度を算出しようとしたものの、十分な結果は得られなかった。方法的・技術的な問題の可能性がある一方で、現代の日本の大都市圏が、同心円やセクターのような既存のよく知られた空間的なパターンでは捉えきれないものになっている可能性がある。いずれにしても、当初の方向性での機械学習による都市内部構造の分析手法の開発については成功を収めたとはいえないものの、機械学習ベースの様々な分析手法の適用を試みる過程で、以下のように、いくつかの成果が得られた。

得られた成果の1つは、非負値行列因子分解(NMF)・非負値テンソル因子分解(NTF)による都市内部構造の分析手法の開発であり、2020年の人文地理学会大会において成果を発表した。NMF・NTFは、教師無し機械学習を用いて非負の行列に分解し、データ中の潜在的なパターンを抽出する手法であり、NMFは2次元行列を、NTFは多次元行列を抽出するものである。画像認識や画像分類、音響信号処理によく用いられる手法である。地区×指標からなる2次元の地理行列をNMFで分解すれば、地区×因子と、因子×指標の2つの行列に分解できるため、因子生態研究と似たアプローチで都市内部構造を分析できることになる。時間軸を入れた3次元の行列であれば、NTFによって因子×地区、因子×年次、因子×指標という3つの行列に分解できる。東京・大阪・名古屋を対象としてNMF・NTFを用いた分析を行った結果、どちらの手法でも、同心円的なパターンを中心とする社会経済的特性の基本的な空間的なパターンを抽出することができた。図1は、NTFを用いた分析結果のうち、東京と大阪について示したものである。それぞれの4つの地図は因子ごとの値の分布を示しており、地図の下の指標名は寄与度(関係性)の強いものを

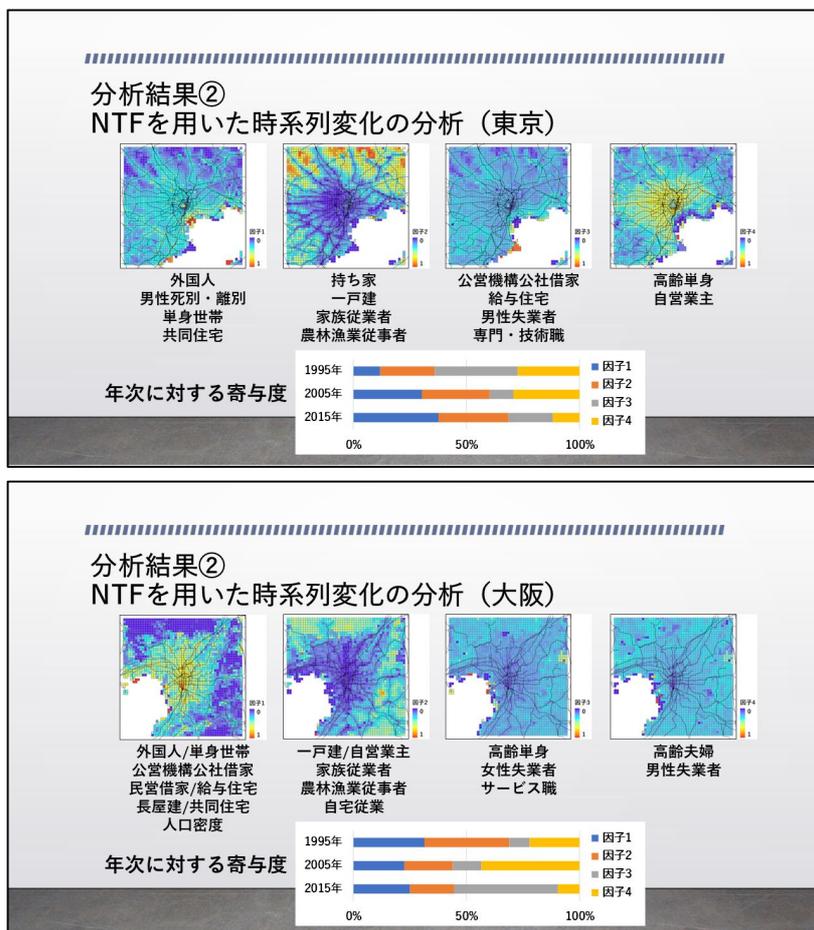


図1 NTFを用いた分析結果(東京・大阪)
2020年人文地理学会大会発表資料より

示している。年次に対する寄与度をみると、東京における因子1のように、年々上昇するものも確認できた。

もう1つの成果は、リモートセンシングにおける土地被覆分類でよく用いられる、機械学習による教師付きの分類手法を参考にして、都市内部構造を分析するための新たな手法を開発することができた点である。この手法は、畳み込みニューラルネットワークを利用して、都市内部の特定の地域の社会経済的特性を学習したうえで、都市全体、あるいは別の都市についての地域分類を行うものである。例えば、土地被覆分類では、市街地や緑地、田、畑などの分類ごとに、既知の地域の特徴をトレーニングデータとして学習することになる。社会経済的特性においても、高級住宅地や公営住宅団地、ブルーカラー就業者の多い密集市街地など、都市内部構造を構成するいくつかの分類ごとに、それぞれの分類によく当てはまると考えられる既知の地域の社会経済的特性を学習し、その結果をもとにすれば、都市全体を分類することができる。また、この学習結果を利用すれば、他の都市についても分類することができる。例えば、東京大都市圏における高級住宅地のトレーニングデータとして田園調布周辺を学習するなど、他の分類についてもそれぞれ学習した結果をもとに、大阪大都市圏を分類することで、芦屋市周辺や奈良市周辺などを、“田園調布”周辺地域と類似した地域であると分類することができる。すなわち、“芦屋は大阪(関西)の田園調布である”というような比喩的表現を、社会経済的特性の分類結果として得ることができる。この手法についての研究成果は、2021年度にEsri User Conferenceにおいてポスターで発表し、Thematic Map部門で2位の表彰を受け、RGS-IBG Annual International Conference(英国)においてオンラインで、人文地理学会大会において対面で、それぞれ口頭発表した。図2は、東京基準での東京と大阪の分類結果を示したものであり、東京基準・東京の図中の「トレーニングデータの中心セル群」がトレーニングデータとして学習された地域の中心である。例えば「住宅密集・高齢化地区」は、墨田区京島周辺がトレーニングデータであり、東京の典型的な“下町”といえるだろう。東京の場合、都心から見て東部から北東部にセクター状にこの類型が広く分布している。東京基準で大阪を分類すると、南北に細長く伸びる都心を取り囲むように、東西の両方に、京島周辺と同じような“下町”の類型である「住宅密集・高齢化地区」が広がっている状況が読み取れ、セクター的というよりも、同心円的な分布を示している。

研究の実施に当たって直面した、もう1つの問題として、2020年初頭からの新型コロナウイルス感染症の感染拡大が挙げられる。本研究課題では、分類結果や適合度評価の結果の妥当性を検証するために、現地調査を積極的に行う計画であったものの、新型コロナウイルス感染症の感染拡大によって行動に大幅な制約がかかり、現地調査を十分に実施することができなくなって

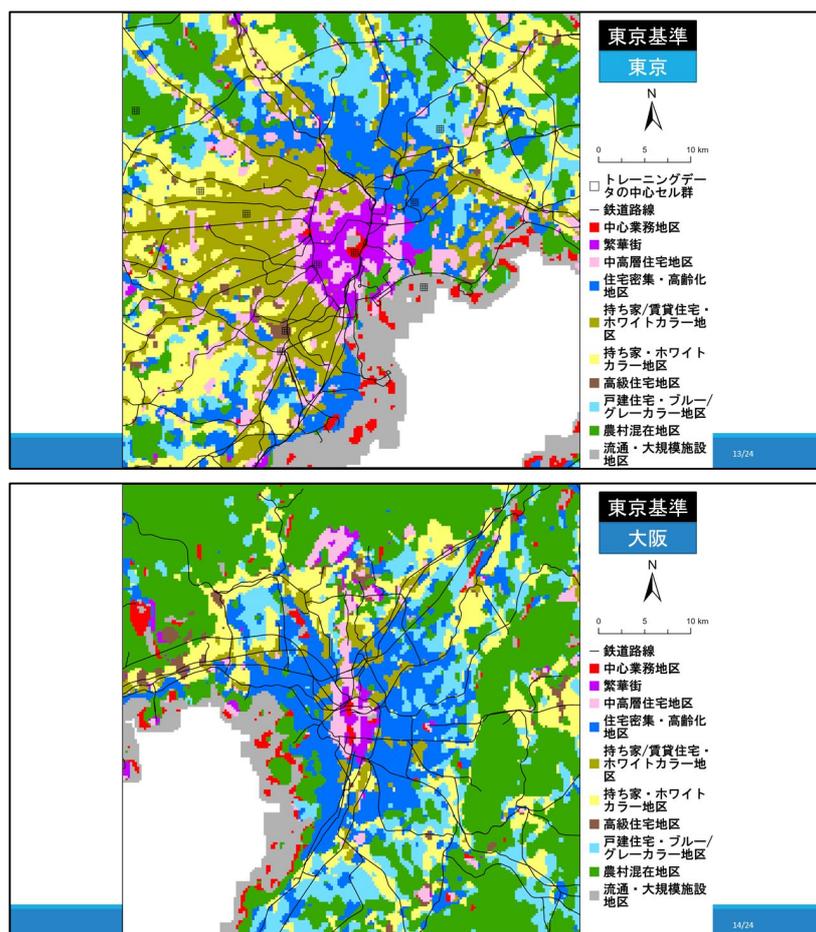


図2 畳み込みニューラルネットワークによる東京基準での分類結果(東京・大阪)
2021年人文地理学会大会発表資料より

しまった。そのため、全国の都市を分析対象として、3(3)・(4)で示したような分析を進めていくことが困難となった。結果的に、関連する研究蓄積が豊富である、三大都市圏を中心とした分析にとどまってしまう、当初の計画を十分に達成することができなかった。これに対しては、現地調査を十分に実施できず、現地でのデータ収集ができなかったために、学習の対象とする地域を選定する際の基準を検討することを目的に、2021年度に、東京圏および大阪圏に居住する住民への大規模なアンケート調査結果の集計・分析を行った。その結果については、2022年度に実施に当たって論文として公表している。

最終年度とした2023年度は、これまでの研究成果のうち、特に畳み込みニューラルネットワークによる分類手法を精緻化しつつ、データの追加購入なども図りながら、これまでの研究成果をまとめて論文として公表する予定であった。しかし、研究代表者に関して、所属機関の異動があったために研究以外の活動へのエフォートが大きくなり、研究への十分なエフォートを割くことができなかった。なお、この年度の成果として示した阿部和俊編著『日本の都市地理学研究』（古今書院）に含まれる桐村 喬「計量的手法を用いた都市地理学の成果と課題」(6章)は、本研究課題とも関連が深い、因子生態研究を中心に、日本における研究史をまとめたものであるが、2022年度半ばに原稿を執筆したものである。

機械学習関連の技術は日進月歩であり、本研究課題の申請のタイミングからの約5年間にも目まぐるしく変化している。そのため、前述のような3(1)・(2)に関する問題も、解決可能な段階にまで至っていることもありうる。また、日本の大都市圏の内部構造自体が、そのような典型的パターンで十分に捉えることができなくなっている可能性もあり、その点についての検証も、継続的に取り組み、その延長線上にある3(3)・(4)に関する作業も進めていく必要がある。しかしながら、生成AIを含め、機械学習に関連する顕著な技術的進歩の状況を考えると、本研究課題としてはこの段階で一旦終了として、仕切り直すほうがよいと判断した。居住地域構造に関連する基盤研究(C)「3次元的な視点からみた高度成長期以降の大都市圏における居住分化の変容過程」(23K01008、代表)や、不完全な地理空間情報の分析ツール開発を行う基盤研究(A)「不完全空間情報による空間推論のためのツールボックスの開発と応用」(22H00245)にも取り組んでおり、今後はこれらの研究課題のなかで、本研究課題で得られた機械学習ベースの分析手法を利用し、方法の精度向上や、当初の計画になるべく近い形での研究を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 桐村 喬	4. 巻 61
2. 論文標題 大都市圏住民がもつ地区類型のイメージとその空間的パターン 教師付き機械学習による都市内部構造分析に向けて	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 皇學館大学紀要	6. 最初と最後の頁 115-143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takashi Kirimura
2. 発表標題 Supervised Geodemographic Classification Approach Using Neural Networks: A Case Study of Tokyo and Osaka
3. 学会等名 Esri User Conference 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Kirimura
2. 発表標題 Supervised geodemographic classification approach using neural networks: a case study of Tokyo, Osaka, and Nagoya
3. 学会等名 RGS-IBG Annual International Conference 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐村 喬
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークによる都市内部構造分析の試み
3. 学会等名 2021年人文地理学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐村 喬
2. 発表標題 非負値行列因子分解・非負値テンソル因子分解を用いた都市内部構造分析の試み
3. 学会等名 2020年人文地理学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 阿部 和俊 編	4. 発行年 2024年
2. 出版社 古今書院	5. 総ページ数 666
3. 書名 日本の都市地理学研究	

〔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
---------	---------