

都道府県間旅行情報に基づく 都市の階層構造の分析

三方 京生¹・山口 裕通²・中山 晶一朗³

¹ 学生非会員 金沢大学 理工学域 地球社会基盤学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:atsukisamboemail@stu.kanazawa-u.ac.jp

² 正会員 金沢大学助教 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

正会員 金沢大学教授 融合研究域融合科学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

全国規模の行政組織や企業は、各地方の中核都市に支部を置き、その地方を管轄するような階層構造を成している。そのため、その階層構造の上下関係にはより業務的な目的での旅行は多くなる。一方で、都市間の旅行モデルとして広く用いられてきた重力モデルには、階層構造に起因する旅行は組み込まれていない。そこで本研究では、重力モデルの階層構造を組み込んだ新たな都市間旅行モデルを提案し、階層構造を追加したモデルの方が日本と都道府県間移動をよく説明できることを確認した。その上で、都道府県間移動を効率よく説明できる階層構造の推定を行い、その特徴について考察を行った。

Key Words: long-distance travel, Regional hierarchical structure, gravity model

1. はじめに

人々は日常生活以外に、さまざまな目的で移動している。この日常圏外への旅行行動の空間分布には、いくつかの要素が影響すると予想される。例えば、観光目的の旅行であれば、観光地の魅力度やその観光地へのアクセスの良さなどが影響するであろう。そして、業務の出張においても、勤務する企業の事業展開先や、事業所の所在地などの影響によって分布すると予想される。このとき、業務出張においては、同じ企業の中での会議に向けた出張のように拠点間の移動も無視できないほど存在すると予想される。このような移動では、その企業の支社と本社の間で特に旅行が行われると予想される。日本全国に事業を展開する行政組織・企業は、効率よく各都道府県を管轄するために、多くの場合、各地域の中核都市に支局・支社を置き、その地域を管轄させる仕組みをとる。それゆえ、この階層構造の上下関係にある都道府県間には、業務的な流動が多いと予想できる。また、わが国には、支店経済都市と呼ばれるような都市もあり、国家行政機関や複数の企業で共通した空間分布の階層構造をもっており、日本国内の都道府県間旅行の空間分布は、

その階層構造パターンが強く影響を及ぼしている可能性がある。

しかし、都市間旅行の空間分布を表現する代表的なモデルでは、この階層構造を明示的に扱っていない。もっとも代表的な分布交通量モデルである重力モデルは、1946年に Zipf-G.K¹により、式 1-1 のような形として提唱されて以降、交通計画問題を扱う際に多く用いられてきた。

$$Y_{ij} = \frac{p_i \cdot p_j}{d_{ij}} \quad (1-1)$$

このモデルでは、2つの地域間の人口流動量 Y_{ij} を、2つの物体に働く重力からのアナロジーとして説明しようとするもので、出発地点の人口 p_i 、到着地点の人口 p_j 、地域間の距離を表す変数 d_{ij} によってモデル化される。ただ、このモデルだけでは、都市の階層関係の情報は組み込まれておらず、都市間流動を説明しきれないという問題がある。

このような階層構造を扱っていないことにより、例えば、支社への出張で遠方へ高頻度で行くなどといった、

重力モデルでは説明できない流動が考慮されないといった問題が考えられる。また、この階層構造を把握すること自体も価値がある。たとえば、北陸新幹線が開業すると、移動所要時間を考えた「北陸支社」の最適な配置・管轄が変わってくる可能性がある。過去の新幹線の開業で起こった、この階層構造の変化を把握することができれば、より効率的な地方管轄組織の構築や、交通ネットワークの設計といった価値があるであろう。

この都市間の階層構造に起因する都市間旅行の空間分布は、重力モデルのパターンとは大きく異なると予想される。なぜなら、階層構造に基づく移動パターンでは、空間的には近くても異なる階層のもとにある2地点間には、同じ距離の階層構造でつながれた2地点間と比較して流動量が多いと予想されるからである。つまり、都市間旅行行動から重力モデルで説明できる成分を取り除いた残差の中に、階層構造に起因するようなパターンが組み込まれている可能性がある。

それでは、観測された都市間流動から推測できる都市の階層構造はどのようなものなのだろうか。また、昨今の新型コロナウイルス・パンデミックや新幹線などの交通インフラの整備による階層構造はどのように変化しているのだろうか。これらの疑問に答えることで、都市間流動から推定される都道府県間の階層関係の各イベント前後の変化や時系列での傾向がわかるといった価値が期待できる。そこで本研究では、重力モデルだけでは説明しきれない部分として、この都市の階層構造を組み込んだモデルを提案し、旅行行動パターンから推測できるわが国の地域間旅行行動の階層構造の特定に挑戦する。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

本研究は、重力型の都道府県間旅行モデルに都道府県の地域特性を組み込んだ分析を行う。そこで、本章では、重力型モデルを用いた研究、階層構造のような地域特性に関する研究についてそれぞれ整理したうえで、本研究の位置づけについて述べる。

重力型のモデルを用いた研究は、田村ら²⁾や、柳川ら³⁾が挙げられる。田村らは、地域人口の増減要因を整理したうえで、地域間人口移動のうち大学進学時の都道府県間人口移動に着目し、その特徴をモデル分析によって明らかにした。分析手法として、重力モデルに地域間の経済格差を組みこんだ、修正重力モデルを用いている。その研究の結果、修正重力モデルの適用し、重力モデルの枠組みに沿った分析が可能であることを確認した。また、都道府県間の進学移動と地域間の経済格差との相関関係を明らかにしている。柳川らは、重力モデルに出発地と目的地の鉄道延長密度の比を表す項を含めて、その式に

ついて回帰分析を行った。その結果として、鉄道の集中度が人口の集中度に影響を与える可能性を示し、インフラの整備水準が人口の一極集中に与える影響の分析を行った。

階層構造のような地域特性に関する研究は、石川ら⁴⁾や、菅野ら⁵⁾が挙げられる。石川らは、北陸新幹線の整備を例として、最適企業組織配置モデルを用い、企業の業務処理能力、費用構造という特性の違いによって業務構造の変化がどのように異なるか分析した。その結果の比較を通して、交通条件の変化が業務構造にもたらす影響を企業の特性ごとに明らかにした。菅野らは、上位計画としてトップダウン的に設定・付与されていた地方ブロックに対し、実際の関係人口による地域間の結びつきの強さに依拠した地方ブロックの逆推定を行った。

これらの既往研究からわかるように、重力型の都市間流動モデルは研究によって応用されて、利用されている。その一方で、都道府県単位での地域間の関係性を分析するような研究もいくつかみられる。ただ、重力型の都市間流動モデルを用いた、都道府県単位の階層構造を扱う研究はされていない。そこで、本研究では、基本的には都市間流動モデルとして重力型モデルを採用する。さらに、重力型モデルの観測流動量に対する誤差の中に、階層構造に起因する都市間流動が行われていると仮定し、その要素を組み合わせた新たな都市間流動モデルを提案する。

3. 重力型の都道府県間旅行モデルと重力-階層モデル

(1) 重力型のモデル

本研究で扱う重力型の都道府県間旅行モデル (3-1) について説明する。

$$Y_{ij} \sim \alpha \frac{P_i^{\beta_1} P_j^{\beta_2}}{D_{ij}^{-\beta_3}} \quad (3-1)$$

このモデルは、Zipf が提唱した式 (1-1) のモデルを基本としたもので、ある都道府県間の流動量 Y_{ij} が、それぞれの人口規模 β 乗の積に比例し、都道府県間の距離の β_3 乗に反比例することを表している。ここで、 P_i は都道府県 i の人口、 P_j は都道府県 j の人口、 D_{ij} は都道府県 ij 間の距離、 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ は係数である。

各都道府県の人口 p_i, p_j について、千人当たりの人口を 2020 年の国勢調査⁶⁾の数値を適用する。 d_{ij} については、物理的距離以外に、時間距離、費用距離などの利用が考えられる。本研究では、2015 年の全国幹線旅客純流動調査⁷⁾の一つの情報として公開されている最短所要時

間 (分) を用いる。

(2) 重力-階層モデル

本研究で提案する、新たな都道府県間旅行モデルを式 3-2 に示す。

$$Y_{ij} \sim \exp(\alpha + \gamma_1 H_{ij} + \gamma_2 H_{ji}) \frac{P_i^{\beta_1} P_j^{\beta_2}}{D_{ij}^{-\beta_3}} \quad (3-2)$$

式3-2は、式4-1の重力型の都道府県間旅行モデルに、都市の階層構造に沿った人の流動量を、0-1ダミー変数 H_{ij} を用いて表し説明変数として加えたものである。ただし、 p_i は都道府県 i の人口、 p_j は都道府県 j の人口、 d_{ij} は都道府県 ij 間の距離、 $\alpha, \gamma_1, \gamma_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ は係数である。

この0-1ダミー変数 H_{ij} は、2都道府県間における、2段階の階層構造の関係の有無で定義する。つまり、 H_{ij} については、都市が都市を管轄するという階層関係がある場合は1、ない場合は0となる。また、他の都道府県を管轄する都道府県は、自らの都道府県も管轄するものと定める。このダミー変数は、都道府県ごとのODペアの数だけ存在し、本論文では、わかりやすく 47×47 の配列として表記する。なお、このような階層変数を仮定しているため、本研究では、2階層（上階層と下階層のみ）の階層だけを扱っていく。

例えば、47都道府県のうち、ある10県（新潟、富山、石川、福井、山梨、長野、岐阜、静岡、愛知、三重、行政区画名省略）について、図3-1のような階層構造を成しているとする場合、そのダミー変数の定義例を表3-1に示す。ただし、図3-1について、高さの長い都道府県ラベルは上階層、高さの短い都道府県ラベルは下階層で

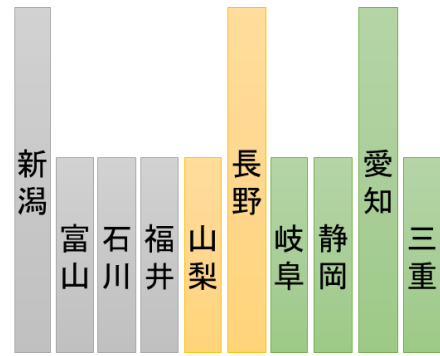


図3-1 8県の階層構造の例

あり、色によって階層構造による地域ブロックを表している。つまり、この例では、新潟県が富山県、石川県、福井県を管轄し、長野県が山梨県を、そして、愛知県が岐阜県、静岡県、三重県を管轄する関係にある。この階層を行列で表記したものが、表3-1である。この表では、第1列に上階層をおく都道府県名が記載されており、行方向に見ていくことで、その都道府県の管轄下にある都道府県で1、それ以外の時に0が入る形となる。

4. 政府機関の階層構造も併用した重力モデルの推定

(1) 分析モデル

本研究で提案する分析モデルを式4-1,4-2に示す。

$$\ln Y_{ij} \sim \alpha + \beta_1 \ln P_i + \beta_2 \ln P_j + \beta_3 \ln D_{ij} \quad (4-1)$$

$$\ln Y_{ij} \sim \alpha + \gamma_1 H_{ij} + \gamma_2 H_{ji} + \beta_1 \ln P_i + \beta_2 \ln P_j + \beta_3 \ln D_{ij} \quad (4-2)$$

表 3-2 8県の階層構造を表すダミー変数の配列の例

	新潟	富山	石川	福井	山梨	長野	岐阜	静岡	愛知	三重
新潟	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
富山	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
石川	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
福井	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
山梨	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
長野	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
岐阜	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
静岡	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
愛知	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
三重	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

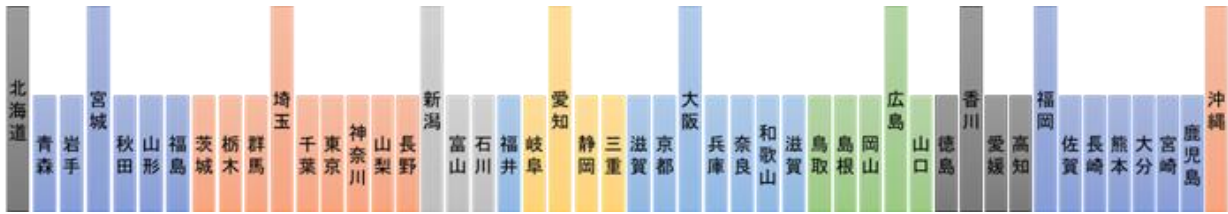


図 4-1 国土交通省地方整備局の地方管轄業務組織

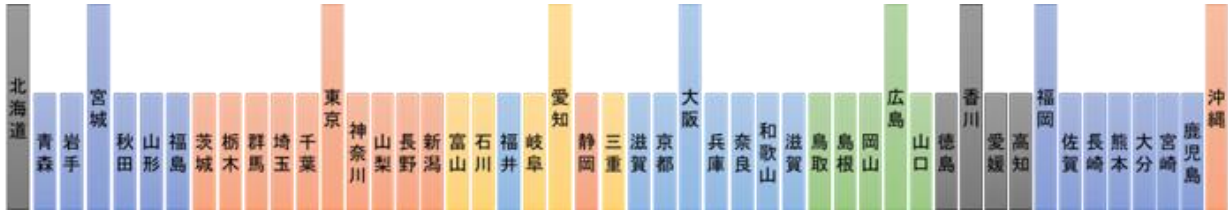


図 4-2 経済産業省経済産業局の地方管轄業務組織

式4-1は、式3-1の両辺に対数を取り、線形化した形である。式4-2は、式3-2を同じく両辺に対数を取り線形化したもので、式4-1に階層ダミー変数である H_{ij} 、 H_{ji} を組み込んだ形である。

本節では、階層構造を組み込んだ提案モデルの説明力向上を示すために、全国組織の例として政府機関の階層構造を適用した提案モデルと重力型の都道府県間モデルを比較する。具体的には、都市間流動量を被説明変数とした重回帰分析により、それぞれの係数パラメータを推定して、各係数の仮説検定による階層構造変数の統計的な有意性や、自由度調整済み決定係数と平方根残差二乗誤差を比較することを通じて説明能力の向上の大きさを示す。その際、階層構造を示す階層ダミーは、外生変数として、国土交通省地方整備局と経済産業省経済産業局の地方管轄業務組織（図 4-1,4-2）を所与として組み込んで分析する。また、重回帰分析を行った都道府県間流動量は、2015年・2017年・2019年・2021年の4月第1月曜日のモバイル空間統計⁸⁾による推定値を用いる。

(2) 係数推定結果

5つの分析対象日での実行結果（推定係数、p値、平方根残差二乗和 ϵ 、自由度調整済み決定係数 R^2 ）を表4-1~4-5に示す。なお、各値は有効数字3桁で表記している。

まず、表4-1~4-4のp値をみる。2015年04月06日、2017年04月03日、2019年04月01日、2021年04月05日のいずれの日付でも、すべての係数のp値が0.05より小さい値を示していることがわかる。つまり、ここで用いたデータではすべての説明変数が統計的に有意に0でないことを示している。つぎに、各説明変数の推定された係数をみる。 α 、 γ_1 、 γ_2 、 β_1 、 β_2 については、すべての日

表 4-1 2015年4月第1月曜日

2015/04/06	重力型モデル		提案モデル (地方整備局)		提案モデル (経済産業局)	
	推定係数	p値	推定係数	p値	推定係数	p値
切片	11.6	1.94e-137	10.6	6.11e-112	10.7	2.45e-118
P_i	0.693	1.29e-176	0.704	5.56e-183	0.700	4.43e-182
β_j	0.773	5.63e-211	0.784	8.93e-218	0.774	3.40e-214
D_{ij}	-2.99	0	-2.84	0	-2.85	0
H_{ij}			0.819	1.61e-8	0.751	1.82e-7
H_{ji}			0.819	1.58e-8	0.974	1.47e-11

表 4-2 2017年4月第1月曜日

2017/04/03	重力型モデル		提案モデル (地方整備局)		提案モデル (経済産業局)	
	推定係数	p値	推定係数	p値	推定係数	p値
切片	11.5	1.42e-138	10.5	4.51e-113	10.6	2.66e-119
P_i	0.730	1.12e-196	0.741	3.23e-203	0.738	2.28e-202
β_j	0.745	2.92e-203	0.756	6.70e-210	0.747	1.02e-206
D_{ij}	-2.97	0	-2.83	0	-2.84	0
H_{ij}			0.802	2.07e-8	0.765	7.04e-8
H_{ji}			0.805	1.80e-8	0.957	1.67e-11

付で正の値を示している。つまり、出発・到着地人口が多いほど、都市間流動が大きくなっていることを示している。

つぎに、階層構造の係数の推定値についてより細かく見ていこう。上層から下層のダミーにかかる係数は0.751~0.903の範囲であり、他のペアと比べて、 $\exp(0.751) \approx 2.12 \sim \exp(0.903) \approx 2.45$ 倍ほど旅行量が多いことがわかる。同様に、下層から上層のダミーにかかる係

表 43 2019年4月第1月曜日

2019/04/01	重力型モデル		提案モデル (地方整備局)		提案モデル (経済産業局)	
	推定係数	p 値	推定係数	p 値	推定係数	p 値
切片	10.9	2.91e-130	9.98	2.28e-105	10.1	1.74e-111
P_i	0.737	3.69e-203	0.747	1.05e-209	0.743	1.85e-208
P_j	0.782	2.24e-223	0.793	1.43e-230	0.785	2.92e-227
D_{ij}	-2.94	0	-2.80	0	-2.81	0
H_{ij}			0.821	6.40e-9	0.780	2.84e-8
H_{ji}			0.785	2.81e-8	0.913	8.18e-11

表 44 2021年4月第1月曜日

2021/04/05	重力型モデル		提案モデル (地方整備局)		提案モデル (経済産業局)	
	推定係数	p 値	推定係数	p 値	推定係数	p 値
切片	12.5	1.67e-154	11.4	9.56e-127	11.6	3.87e-134
P_i	0.660	1.08e-161	0.672	1.55e-168	0.666	1.58e-166
P_j	0.742	3.62e-196	0.755	4.27e-204	0.746	1.52e-200
D_{ij}	-3.10	0	-2.95	0	-2.96	0
H_{ij}			0.903	4.90e-10	0.859	2.60e-9
H_{ji}			0.857	3.46e-9	0.945	6.06e-11

表 45 重力モデルと提案モデルの平方根残差二乗和と自由度調整済み決定係数

日付	重力型モデル		提案モデル (地方整備局)		提案モデル (経済産業局)	
	ϵ	R'	ϵ	R'	ϵ	R'
2015/04/06	0.750	0.802	0.740	0.807	0.739	0.808
2017/04/03	0.740	0.806	0.730	0.811	0.728	0.812
2019/04/01	0.732	0.811	0.722	0.816	0.721	0.817
2021/04/05	0.753	0.803	0.741	0.809	0.740	0.810

数は、0.785~0.975の範囲であり、 $\exp(0.785) = 2.19 \sim \exp(0.975) = 2.65$ 倍ほど旅行量が多いことがわかる。これらにより、階層構造の上下関係にある都道府県間では、ほかの都道府県間と比較して双方向に旅行量が多い傾向にあることが確認でき、この傾向は 2015 年~2021 年の範囲で共通であったことが確認できる。また、 β_3 については、すべての時点・モデルで負の値である。これは 2 地点間の距離が離れているほど都市間流動量が少なくなっていることを示しており、予想される結果と合致している。

次に、表 5-5 で重力型モデルと提案モデルを比較する。平方根残差二乗和 ϵ については、5 時点いずれにおいても、2 パターンの階層構造を当てはめた提案モデルの残差が、重力型モデルの残差よりも小さくなるという結果が得られた。この大小関係は、説明変数を増やしたため

に、定義上このような大小関係になる。つぎに、説明変数を追加することによる罰則も考慮した、自由度調整済み決定係数 R' では、すべての日付で重力型の都市間旅行モデルの R' よりも大きくなるという結果が得られた。つまり、自由度調整済み決定係数によるモデル選択においては、すべての時点・階層構造仮定において、提案モデルが採用される。

以上の結果から、本研究で提案した階層構造を考慮した都市間旅行モデルが、シンプルな重力型モデルよりも、都市間流動量に対する説明能力があることを証明することができた。つまり、その重力型の都市間旅行モデルで説明しきれない部分に、階層構造に起因する都市間流動が生じていることがいえる。

つぎに、地方整備局と経済産業局という 2 種類の階層ダミー変数の間の比較を行おう。いずれも経済産業局を当てはめたモデルのほうが、平方根残差二乗和が小さく、自由度調整済み決定係数が大きいことがわかる。つまり、重力型の都市間旅行モデルの残差を、階層ダミー変数を用いて説明する場合、地方整備局よりも経済産業局のほうがモデルとしての推定能力が高いことがいえる。

5. 最小残差二乗和法による階層構造の推定

(1) 階層構造推定モデルの定式化

本章では、式 4-2 で外生変数であった階層ダミー変数 H_{ij} 、 H_{ji} を新たに未知変数 h_{ij} 、 h_{ji} としてその値も推定する (6-1)。つまり、観測された都道府県間流動量から、提案モデルの誤差を最小にするように、我が国の都道府県間階層構造を示す階層ダミー変数を推定する。

$$\ln Y_{ij} \sim \alpha + \gamma_1 h_{ij} + \gamma_2 h_{ji} + \beta_1 \ln P_i + \beta_2 \ln P_j + \beta_3 \ln D_{ij} \quad (5-1)$$

続いて、推定方法について述べる。本研究では、式 5-1 を最小二乗法によりすいている。このとき、階層ダミー変数が満たすべき条件を追加すると、以下のような目的関数を最小化する問題となる。

$$\min_{\alpha, \beta, h, u} \sum_{i, j \in Z, z} \{ \ln Y_{ij} - (\alpha + \beta_1 \ln P_i + \beta_2 \ln P_j + \beta_3 \ln D_{ij} + \gamma_1 h_{ij} + \gamma_2 h_{ji}) \}^2 \quad (5-2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in Z} h_{ik} = 1, \quad i \in Z \quad (5-3)$$

$$\sum_{k \in Z} h_{k,j} \leq 47u_i, \quad \forall (i, j) \in Z \times Z \quad (5-4)$$

$$u_i = h_{ii} \quad (5-5)$$

$$h_{ij} \in (0, 1), \quad \forall (i, j) \in Z \times Z \quad (5-6)$$

$$u_i \in (0,1), \forall i \in Z \quad (5-7)$$

ここで、 Y_{ij} は、モバイル空間統計データ⁶⁾による出発地点*i*から到着地点*j*への観測都市間流動量（千人）である。また、 P_i, P_j はそれぞれ都道府県*i, j*の人口（千人）であり、 D_{ij} は、*ij*間の最短所要時間（分）である。そして、階層ダミー変数の係数 γ_1, γ_2 は外生的にそれぞれ 2.00, 1.50が最終的に採択される。

制約条件の内容について述べる。式 5-3 は、階層ダミー変数行列の列方向成分の和に関する制約であり、すべての都道府県にとって、「上層」に位置する都道府県は一つであることを表している。式 5-5 の左辺 u_i は階層ダミー変数行列の対角成分 h_{ii} であり、都道府県*i*について $u_i = 1$ のとき、その都道府県は上階層であることを示す。つまり、その都道府県が上階層にあるときには、対角成分が 1 となることから、式 5-3 の制約は、ほかの都道府県の下につくことがないことを意味する。そして、 $u_i = 0$ の下階層にある都道府県にとっては、上にある都道府県は一つだけに限られることを意味する。つぎに、式 6-4 は、ある都道府県の影響かある下の都道府県の数を示す制約である。 u_i を用いることで、上階層の都道府県では、最大数が 47 であり、下階層の都道府県では最大数が 0（つまりその下に所属する都道府県はない）ことを示す。

この、5-2から5-7までの数理最適化問題を数理的に解いていく。しかしながら、 $\gamma_1 h_{ij}$ の項があることから、この問題は、混合整数制約付きの4次計画問題となり容易に解くことはできない。そこで、本研究では、 γ_1 と γ_2 の候補を挙げて外生変数として扱い、残りの $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, h_{ij}, h_{ji}$ を推定するアプローチをとる。このときの最適化問題は、混合制約付きの2次計画問題であり、数理最適化ソルバーであるGurobiで比較的容易に解くことができる。

そこで、本研究では、下記に示すような流れで都道府県間流動量から都市の階層構造の推定を行った。まず、2021年4月第1月曜日時点において、一定の範囲の (γ_1, γ_2) を発生させて、それぞれで数理最適化問題を解く。そして、最も残差二乗和が最小となる (γ_1, γ_2) を探索する。そして、その最適な (γ_1, γ_2) をほかの時点（2021年5月、6月第1月曜日）にも適用して、それぞれの時点の階層構造を推定する。また、北陸新幹線開通前である2014年、コロナ蔓延前である2019年の4月第1月曜日についても、 (γ_1, γ_2) を同様の値に設定して推定を行った。

(2) (γ_1, γ_2) の決定

発生させる (γ_1, γ_2) の範囲をそれぞれ0~5.0（0.5刻み）とした。この範囲の (γ_1, γ_2) の組み合わせで式6-2

表 5-1 (γ_1, γ_2) と平方根残差二乗和 ϵ

γ_1	γ_2	ϵ	γ_1	γ_2	ϵ	γ_1	γ_2	ϵ
1.5	0.0	0.715	2.0	0.0	0.716	2.5	0.0	0.721
1.5	0.5	0.700	2.0	0.5	0.700	2.5	0.5	0.706
1.5	1.0	0.689	2.0	1.0	0.690	2.5	1.0	0.696
1.5	1.5	0.685	2.0	1.5	0.684	2.5	1.5	0.691
1.5	2.0	0.685	2.0	2.0	0.685	2.5	2.0	0.691
1.5	2.5	0.690	2.0	2.5	0.690	2.5	2.5	0.695
1.5	3.0	0.700	2.0	3.0	0.700	2.5	3.0	0.704
1.5	3.5	0.714	2.0	3.5	0.713	2.5	3.5	0.716
1.5	4.0	0.727	2.0	4.0	0.727	2.5	4.0	0.729
1.5	4.5	0.738	2.0	4.5	0.737	2.5	4.5	0.737
1.5	5.0	0.742	2.0	5.0	0.741	2.5	5.0	0.741

を解いたときの残差 ϵ について、表5-1に $(\gamma_1, \gamma_2) = (1.5 \sim 2.5, 0 \sim 5.0)$ の結果を示す。なお、日付は2021年4月第1月曜日である。

表 5-1 より、 (γ_1, γ_2) の値がそれぞれ(2.0,1.5)のとき、平方根残差二乗和が最小となっている。よって本研究では $(\gamma_1, \gamma_2) = (2.0, 1.5)$ として、他の時点（2021年5月、6月第1月曜日、2014年、2019年4月第1月曜日）にも外生的に用いた。

(3) 多時点の都道府県の階層構造推定結果

図5-1~3に、2021年における4月、5月、6月の第1月曜日の都道府県間旅行量での分析により推定された階層構造を示す。また、表 5-2 に 3 時点での平方根残差二乗和 ϵ 、推定係数、そして、表 5-3 に 5 章で経済産業局の階層構造を外生的に代入したときの平方根残差二乗和 ϵ と、推定係数を示す。

表 5-2、表 5-3 からわかるように、2021年4月、5月、6月の第1月曜日の3時点の平方根残差二乗和は、経済産業局の階層構造を代入した重回帰分析の残差よりも小さい値となった。これは、階層構造を未知変数とした、混合整数二次計画問題を解いた結果であり、その日付で経済産業局の階層構造よりも都道府県間旅行量をより説明できる階層構造が推定できたといえる。各推定係数である α, β については、2021年6月第1月曜日の α が最も差が大きく1.10であった。また、推定された階層構造は、どれも経済産業局の階層構造とは大きく異なるものとなったことは、図 5-1~3 から容易にわかる。

算出された階層構造の内容をみていこう。まず、上

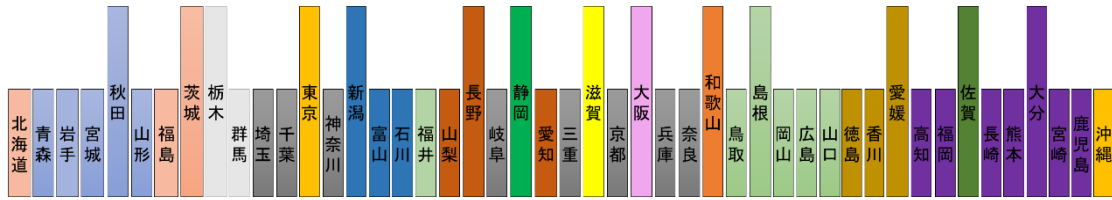


図 5-1 2021 年 4 月第 1 月曜日

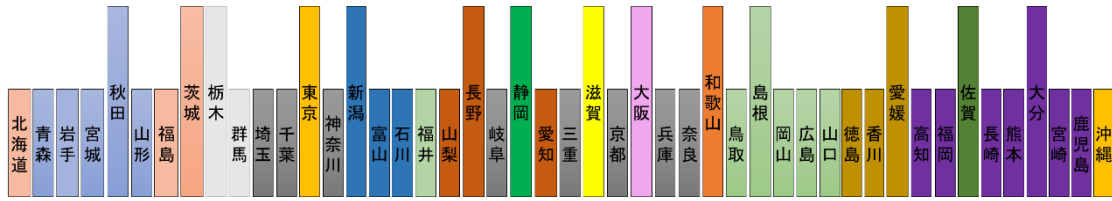


図 5-2 2021 年 5 月第 1 月曜日

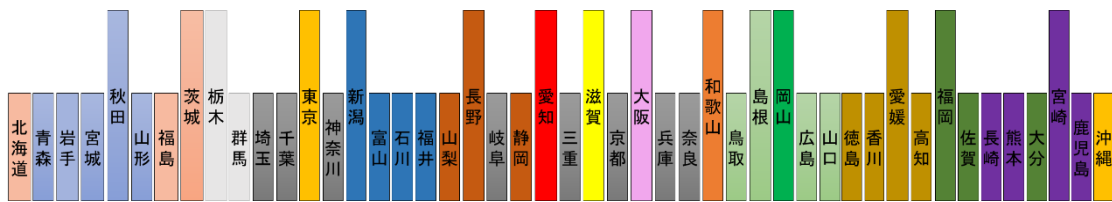


図 5-3 2021 年 6 月第 1 月曜日

表 5-2 平方根残差二乗和 ϵ と各推定係数

	ϵ	α	β_1	β_2	β_3
2021/4	0.700	12.8	0.692	0.799	-3.29
2021/5	0.759	14.9	0.984	0.402	-3.48
2021/6	0.658	13.9	0.713	0.660	-3.45

表 5-3 経済産業局の階層構造を代入した重回帰分析の結果

	ϵ	α	β_1	β_2	β_3
2021/4	0.740	11.6	0.666	0.746	-2.96
2021/5	0.805	13.6	0.982	0.341	-3.17
2021/6	0.745	12.8	0.706	0.600	-3.17

の階層に位置する都道府県を見ていくと、図 5-1 (2021 年 4 月第 1 月曜日) で上階層となった都道府県は、秋田県、茨城県、栃木県、東京都、新潟県、長野県、静岡県、滋賀県、大阪府、和歌山県、島根県、愛媛県、佐賀県、大分県の全 14 県であった。ほかの 2 時点でも似た結果であり、図 5-2 (2021 年 5 月第 1 月曜日) では 4 月と全く同じ結果であった。図 5-3 (2021 年 6 月第 1 月曜日) の結果では、静岡県、大分県が下階層となり、愛知県、岡山県、福岡県が上階層というところで 4 月と異なる結果であった。

つぎに、それぞれの上階層の都道府県の下にある都道府県を見ていこう。図 5-1 (2021 年 4 月第 1 月曜日) では、下層にある都道府県がない状態であった。そして、秋田県は、福島県を除く東北地方の都道府県を傘下にお

き、茨城県は、福島県と北海道を傘下においており、かなり遠方にある北海道が下につく形となった。ほかの時点との比較を見ていくと、図 5-2 (2021 年 5 月第 1 月曜日) は下階層の構造を含めて全く同じであることが分かる。つぎに、図 5-3 (2021 年 6 月第 1 月曜日) をみると、いくつかの違いが確認できる。具体的には、4 月・5 月では島根県の傘下にあった福井県が、新潟県の傘下に来ている。そして、上階層であった静岡県、佐賀県はそれぞれ、長野県、福岡県の傘下に来ている。

次に、図 5-1~3 で、階層構造が形成する上階層と下階層の組み合わせを、日本 8 地方区分と比べて考察していく。まず、東北地方 (青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島、行政区分名省略) については、福島県を除く 5 県で秋田県を上階層とする地域が推定された。この結果は、

秋田県を中心とする都市間流動が、所要時間・人口などの情報から推測できる情報よりもとくに多かったことを示している。本分析の実施前には、東北地方の上階層となる県は、多くの企業の東北地方の支店が集中する政令指定都市・仙台市のある宮城県であることを想定していた。しかし、本分析の結果では、秋田県の方が人口・距離に応じた推測量より多くの交通量があるという結果であった。

また、このような地域中心となるような最大都市の立地する都道府県が上階層ではないという結果は、他の地方でもいくつか確認されている。図 5-1, 2 を見ると、中部地方（静岡と北陸は除く）では最大都市・名古屋を含む愛知県でなく、長野県が上階層都市となっている。中国地方では、最大都市・岡山、広島を含む岡山県、広島県ではなく、島根県が上階層都市となっている。また、九州地方（佐賀県を除く）では、最大都市・福岡を含む福岡県ではなく、大分県が上階層都市となっている。

その一方で、図 5-3（6月）では、地方の中心になりうる政令指定都市を含む都道府県（たとえば、愛知県、岡山県、福岡県）が上階層となっている。つづいて、福島県を含めた北関東地方（茨木、栃木、群馬、行政区分名省略）について、福島県と茨木県は、栃木県と隣接する県であるが、栃木県の下階層ではなく、2 県で 1 地域を形成する結果となった。この結果は、福島県と茨木県、栃木県と群馬県の 2 県間の都市間流動が、他の組み合わせや、4 県で 1 県を中心とする都市間流動を考えるよりも多く行われていることを示している。そして、北陸地方（新潟、富山、石川、福井、行政区分名省略）について、いずれの結果でも、新潟県を上階層とする地域としてまとまっている。唯一、3 時点で安定していない結果は、図 5-1, 2 では福井県が新潟県の傘下ではなく、島根県の傘下にくる結果となった点のみである。

各地方では、複数の都道府県で 1 地域を形成する結果を示したが、東海地方や関西地方では、静岡県、愛知県、滋賀県、大阪府、和歌山県が、傘下の都道府県のない単独での 1 地域を形成する結果がみられている。

このように、都道府県間旅行量から、我が国の階層構造を推定した結果、想定と大きく異なる構造や、いくつかの都道府県が地域ブロックに所属しないという結果が得られることが分かった。このような結果となった原因として、大きく 2 種類のことが考えられる。一つ目は、現実の都市間流動の構造として、本研究で得られたような構造がみられるという可能性である。しかし、交通量の総量で考えると、例えば秋田県が東北地方の中心として機能しているとは考え難く、業務構造の中心にあるとは考え難い。これは、茨城県—北海道も同様である。そのため、相対的に旅行量が大きくなる要因が、本研究で扱った「業務構造の階層構造」「重力モデル型の旅行」

の他にも存在し、本研究で得られた結果は当初想定した業務構造だけでなく、その旅行構造も含むものである可能性がある。二つ目の原因としては、入力している所要時間や人口変数が正確でない可能性である。例えば、中心都市であり所要時間算出の基準となっている秋田県秋田市は、県境から大きく離れており、さらに鉄道サービスも新幹線ほど高速でないため、東北各県への公共交通による移動には大きな時間がかかる。その一方で、山形県境・岩手県境の近くには、湯沢市・横手市など別の都市があり、それらの比較的近い都市では比較的多くの県境をまたぐ移動が多い可能性がある。その結果として、入力した所要時間情報と比較してより多くの流動が観測されたために、階層構造があるように誤検出された可能性がある。上階層となる都道府県が、各地域で、物理的距離の中間地点の都道府県が多い傾向にあることも、隣接都市間での旅行量と、所要時間情報算出に適用した都道府県の代表駅を基準とした情報の乖離から意図した働きをしていない傾向を示している可能性がある。この問題を解決するためには、交通サービスコストの扱い方と、隣接県の情報の扱い方がより重要になるであろう。

6. まとめ

都市間旅行においては、魅力のあるところかつ近いところほど旅行者が多いという、重力型の都市間旅行モデルであらわされる旅行量の分布の他に、都市の業務的な階層構造に起因するような都市間流動が行われていると予想できる。このようなフローがある場合は、階層関係にある都市間ではその距離・規模から想定される流動量より大きい値が観測される可能性がある。このような特徴を検出して扱えるモデルができれば、観測都市間流動量から導き出せる都市の階層構造を推定することができる。そこで、本研究ではこのような階層構造に基づくフローの存在の検証として、重力型の都市間旅行モデルに階層ダミー変数を加えた新たなモデルを提案する。そして、まず重力モデルとの比較を行うことによって実際に上述のような階層構造に基づくフローがあるかどうかを検証した。つぎに、この仮説に従って観測都市間流動量の残差を最小にするような、我が国の都市の階層構造を推定した。

まず、階層構造に基づくフローの存在を確認するために、国土交通省地方整備局・経済産業省経済産業局の地方管轄組織の階層構造を外生的に階層ダミー変数に代入して、その構造が都市間旅行量に組み込まれているかを確認した。ここでは、観測都市間流動量に「モバイル空間統計」データによる都道府県間旅行量を用いて、2015 年から 2021 年までの 4 月第 1 月曜日で、それぞれ回帰分

析により重力モデルに追加して階層構造変数が統計的に有意な影響を持つのか検定を行った。その結果、階層ダミー変数を含め、各説明変数の統計的有意性、自由度調整済み決定係数の上昇、そして、平方根残差二乗和の減少を確認することができた。つまり、階層構造を追加した提案モデルの説明能力が重力モデルよりも優れており、実際の都道府県間流動に、階層構造による影響が含まれている可能性が示された。

つぎに、階層ダミー変数自体も未知変数として、最小残差二乗法による混合整数二次計画問題を解くことで、複数の時点で残差を最小にする階層構造の推定を行った。その結果、地方整備局や経済産業局で用いられている地方管轄業務組織よりも、観測都市間流動量に対する誤差の小さい階層構造を推定することができた。2021年4月、5月、6月の3時点の比較分析により、東北地方・北関東地方で同じパターンの階層構造がみられたことが明らかになった。一方で、その結果には、上階層となった都道府県にその地域の業務構造の中心と考えにくい都道府県が含まれていたり、空間的にかなり離れた都道府県が傘下となるケースなど、想定していた構造を推定できていない可能性も示唆される結果であった。そのため、交通整備や新型コロナウイルスによる、階層構造の変化を旅行量パターンから推測するためには、現時点のモデルのさらなる検証が必要であることが分かった。検証のポイントとしては、人口項・距離項などが、空間構造を十分に説明できていない可能性などによる影響などが予想される。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 20H02267, 20H02270, 21H01455, 22H00222, 文部科学省卓越研究員事業の支援を受けた研究活動による成果の一部です。

参考文献

- 1) Zipf.G.K : The $P_1 P_2 D$ Hypothesis: On the Intercity Movement of Persons
- 2) 田村一軌：大学進学にともなう都道府県間人口移動の定量分析—修正重力モデルによる分析—, AGI Working Paper Series, Vol.2017-03, pp.1-17, 2017-02
- 3) 柳川篤志・川端裕一郎・藤井聡：インフラ整備水準が人口の一極集中に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.77, No.2, pp.160-173, 2021
- 4) 石川拓武・奥村誠：北海道新幹線整備が代表的企業の業務構造にもたらす影響のモデル分析
- 5) 菅野貴文・安藤慎吾・谷口守：関係人口の実態に基づく地方ブロックの逆推定
- 6) 総務省統計局：2020年国勢調査
<<https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2020/index.html>>
- 7) 国土交通省：第6回全国幹線旅客純流動調査
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000016.html>
- 8) NTT ドコモ：モバイル空間統計
<<https://mobaku.jp/>>

(2022.3.6 投稿)

Analysis of urban hierarchical structure, based on inter-prefecture travel data

Atsuki SAMBO, Hiromichi YAMAGUCHI and Shoichiro NAKAYAMA