

長距離旅行量分布の規則性と その時空間的な特徴

山口 裕通¹

¹正会員 金沢大学助教 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒 920-1192 金沢市 角間町)
E-mail: hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

長距離旅行の量は、季節的な変動が大きく、それは OD ペアごとに大きく異なるという特徴がある。例えば、複数の OD ペアの旅行は年末年始・ゴールデンウィーク・お盆といった期間に集中しており、そのほかにも春と秋の時期で大小が異なる OD ペアも存在する。本研究では、この時間的なばらつきの情報を扱うための方法論（数理モデル）を検討するための第一歩として、都道府県の出発地・旅行先ペア・数年分の時点の「長距離旅行量」を用いて、複数の視点から集計的な規則性（分布形状）を見ていく。その結果、日ごとの旅行量は、ほとんどの居住地-旅行先ペアでそれぞれべき乗則に従うことを明らかにした。そのうえで、空間的な差異を明らかにしたうえで、この規則性が存在することのメカニズムについて考察を試みた。

Key Words: *Optimal-network shape, Intercity travel, Seasonal demand*

1. はじめに

都市間旅行には、時間的あるいは空間的な差をとったときに、その分散が大きいという特徴がある。例えば、旅行量の多い時期と少ない時期の旅行量の差は、日常的な都市内移動と比較して大きい関係にあり、その関係は空間的にも大きく異なる。このような都市間旅客流動の時間的なばらつきの大きさは明らかであったが、我が国全体の旅行を把握しうる正確な定量データを入力するのは困難であった。

例えば、国土交通省が 5 年に 1 度実施している、全国幹線旅客純流動調¹⁾では空間的な分布を真の出発地・目的地で把握することができるが、秋期間の 1 日だけであり季節的な変動を扱うことができない。一方で、交通モードごとの情報であれば、day-to-day の推移を扱うことができるが、各リンクごとの情報にすぎず真の出発地・到着地ごとの総量を把握することができない。さらに、モードごとの輸送容量の影響も考えると、長距離旅行の総量の推移を把握することは困難であろう。このような点から、これまで長距離旅行量の日別のばらつきは把握されてきたものの、あまりその特徴は扱われてこなかった。

携帯電話位置情報などの大規模な位置情報記録データは、このような都市間旅行の日別の時系列変化を大規模かつ正確に把握できる情報である。このようなデータの出現によって、われわれは 1 年間・1 日ごと旅行者数の時系列変化についても十分に取り扱えるようになった。本研究では、その時間的なばらつきの情報に着目

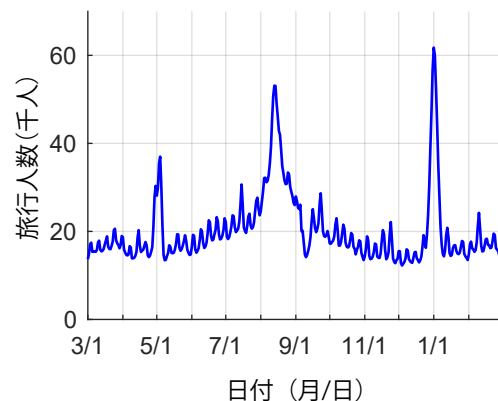


図-1 東京都居住者の北海道への旅行量推移 (2018 年)

していく。

図-1 は、モバイル空間統計²⁾による東京都居住者の昼間 13 時の北海道滞在人数推計値の日推移である。この変化には、以下の 3 点の特徴がある。(1) 1 年間に 3 回、短期間に旅行量が急激に大きくなるピークが存在する。これは、5 月上旬の GW (ゴールデンウィーク)、8 月中旬のお盆、年末年始の 3 期間である。(2) そのほかにも、7-8 月 (夏) が、2-3 月 (冬) より旅行者数が大きいという緩やかな季節変動も見られる。(3) そして、細かい変動は 1 週間周期のもので、平日より休日の方が旅行量が大きいという特徴である。このような時間変動は、日本全国多くの長距離旅行でみられるものである。

ここで、図-1 で示した 365 日分の情報を、旅行者数

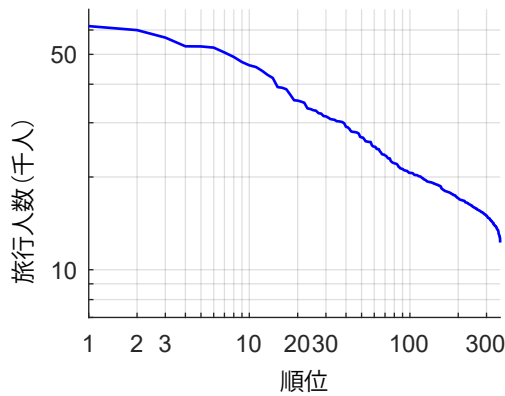


図-2 日別旅行量の順位-規模則（東京 → 北海道，2018 年）

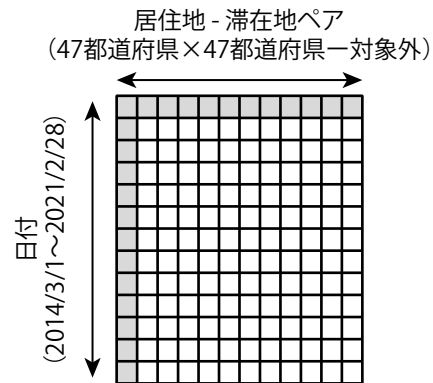


図-3 本研究で用いる推計人口表

の多い順に並べ替えて両対数グラフに示すと図-2のようになり、この図上では年間の県間旅行量の変化はほぼ直線になるという特徴がある。本研究で後述するが、このような規則性は、我が国の多くの都道府県間ペアで確認できる。このような関係は、いくつかのタイプの違う日ごとの旅行数が大きく異なるように見える図-1の時間変化のなかに、一定の規則性があることを意味すると推測できる。

このような両対数グラフにおける直線の関係は、rank-size rule (順位-規模則) とよばれ、地震の発生頻度と規模の関係性 (Gutenberg-Richter law) や都市の順位と人口などに多くみられる規則性⁴⁾である。人の移動の情報についても、距離の分布など複数の情報において、同様の規則性は既に報告されている³⁾。つまり、図-2の関係性は、時間的な情報において確認された特徴は、これまでの研究と異なるものの、ほかの人々の行動の規則性から推測できるものである。

このとき、時間的なばらつきにみられるこの規則性は、どのようなことを意味しているのだろうか？その関係は時間的にどのように変化しているのであろうか？この関係性は、長距離旅客交通サービスの設計において、何か重要な示唆をもつのであろうか？本研究は、これらの疑問に答えるための第一歩として、モバイル空間統計の基礎的な集計からわかる情報をとりまとめていく。

本稿の構成は、以下のとおりである。まず 2. では、本稿で用いるデータを説明する。3. では、全都道府県間ペアを合算した 1 本の時系列推移に着目して、順位-規模則の基本的な性質を明らかにしていく。4. では、都道府県単位の居住地-滞在地（旅行先）ペアごとの、順位-規模則の成立と空間的な差異を明らかにしていく。5. は本論文の結論であり、現時点での上述の疑問に対する回答と残る課題を示す。

2. データ

本研究では、モバイル空間統計²⁾から作成した、都道府県単位の居住都道府県ごとの推計人口を用いる。モバイル空間統計は、NTT ドコモの携帯電話運用情報から作成した人口統計情報であり、そのサンプル率を考えると都道府県単位の人口推移はかなり精度よく推定できていることが期待できる。

本稿で利用するデータは、図-3に示すような単純な一枚の表データのみを用いる。この表の各列は、居住都道府県と滞在地都道府県のペアであり、定義上は $47 \times 47 = 2,209$ ペア存在する。本稿では、このうち、十分に時間変化を議論できるだけの旅行人数がある長距離旅行を対象とするために、以下の 3 種類を除外した 1,456 ペアの数値を用いていく。(1) 居住地と旅行先が一致するペア。(2) 全国幹線旅客純流動調査で分析対象外としていた大都市圏内々ペア（一部の分析では比較対象として利用）。(3) 分析対象期間において推計値が 20 人以下の日を含むペア。

また、各行は時点であり、本稿では 2014 年 3 月 1 日から 2021 年 2 月 28 日までの 7 年間・2,557 日の 13 時台のデータを用いる。13 時台は、最も旅行先に滞在している可能性が高い時間として選択している。

ここで、図-1 は、図-3 のある列のデータを一部取り出して作成したものである。つまり、本研究では、おもに列方向の数量分布の特徴を、順位-規模則に着目していきながらまとめていく。

3. 集計的な都道府県間旅行の推移と順位-規模則

(1) 総量の順位-規模則の変化

まず、時間的な側面に着目するために、図-3 の横方向（すべての対象居住地-滞在地ペア）を合算した値の時系列変化を見ていこう。図-4 は、その行ごとの集計

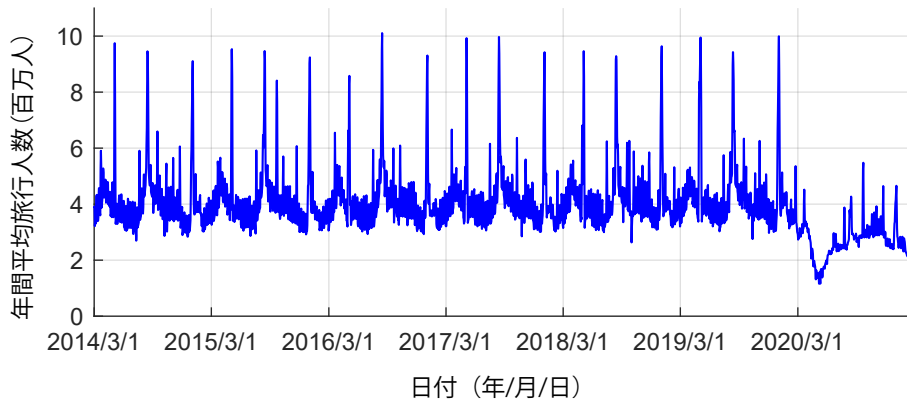


図-4 総都道府県間旅行量の 7 年間の推移

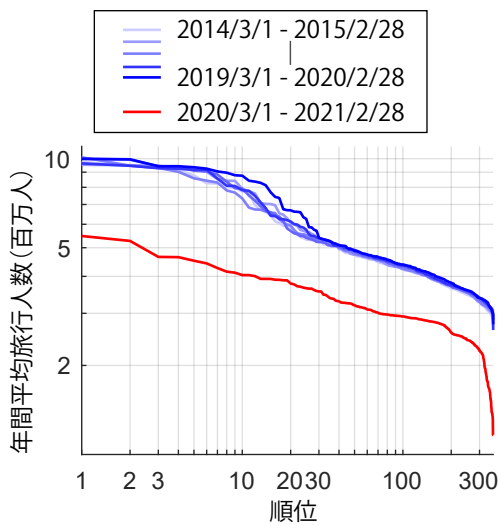


図-5 1 年ごとの総旅行量の順位-規模則

値の 2,557 日分の時系列推移を示している。この図から、日本全国で合算した旅行者数の時系列推移も、図-1 に似た時系列変動を毎年繰り返していることが読み取れる。具体的には、おおよそ以下の 3 種類の時間変化を組み合わせた形である。1 つ目は、1 年に 3 回 (GW・お盆・年末年始) それ以外の期間の 2 倍以上になるような短期的なピークがある。2 つ目は、4 月と 8 月周辺で旅行量が大きめという緩やかな季節変動がある。3 つ目は、1 週間周期の平日より休日の方が多めという変動である。

このうち、2020 年 3 月以降は、明らかに例年より旅行数が小さく、大きなピークもほとんど見られない特徴がある。これが、COVID-19 パンデミックによる影響であり、例年と比較して県外滞在人数が大幅に少なくなったことが確認できる。また、1 回目の政府による緊急事態宣言の期間には、特に大きな旅行人数減少がみられる。

つぎに、それぞれ 1 年ごとに分割した順位-規模則を

みることで、経年的な変化を確認していこう。ここでは、うるう年の調整のために、3 月 1 日から 2 月 28 日までの 365 日のデータのみを用いていく。7 年分のデータをそれぞれ順位ごとに並べ替えて、両対数グラフにプロットしたものが図-5 である。この図から、2019 年までの 5 年の順位-規模関係は、ほとんど大差がなくそれぞれ線形の関係が確認できる。つまり、この順位-規模則はかなり時間的に安定した関係であることがわかる。

なお、2019 年のみは、10 位から 30 位の部分でほかの都市より上に凸の形で、若干外れている特徴がある。これは、この期間のゴールデンウィークは、新天皇即位の日 (5/1) が休日になったために、GW がカレンダー上で 10 連休となり、旅行量が多い日数が増加したからである。つまり、1 回しかサンプルがないが、このようなイベントが発生すると、この順位-規模則がゆがむ可能性があることをしめしている。

次に、COVID-19 の影響を受けた 2020 年 (赤線) を見ていこう。この期間においても、1 位から 300 位まではおおむね直線の関係にあり、旅行者数の大小関係はおおむね同様の規則性に従っていることが分かる。なお、初回の緊急事態宣言期間は、300 位以降であり、この先では大きくカーブする形となっている。

(2) 曜日・祝日と分布の関係

つぎに、図-5 の内訳を見ていながら、「なぜ両対数グラフ上で直線の関係がみられるのか?」を考えていこう。ここでは、COVID-19 の影響や 10 連休の影響をうけていない、2018 年の情報を用いて考えていく。

図-6 は、2018 年の順位-規模の関係の中で、3 つのピーク期と祝日・連休のみに印をつけたものである。まず、時系列推移の特徴からも明らかだが、上位 10 位までは、GW・お盆・年末年始が重なる形で占めている。そして、祝日・連休がそれ以降の順位を多く占めていることが確認できる。つぎに、図-7 は、上述の旅行量の多い期間を除いた平日・土日のみをそれぞれつない

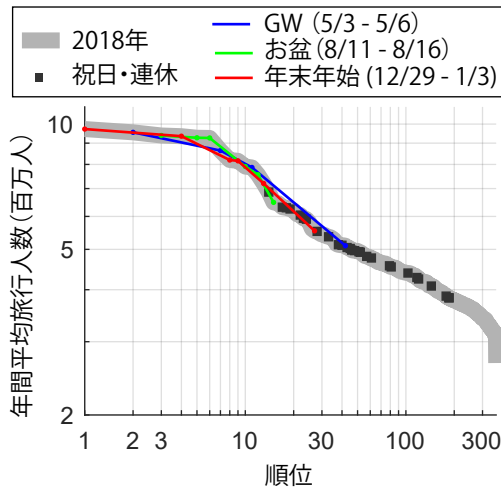


図-6 2018 年の総旅行量の順位-規模則 (連休・ピーク時)

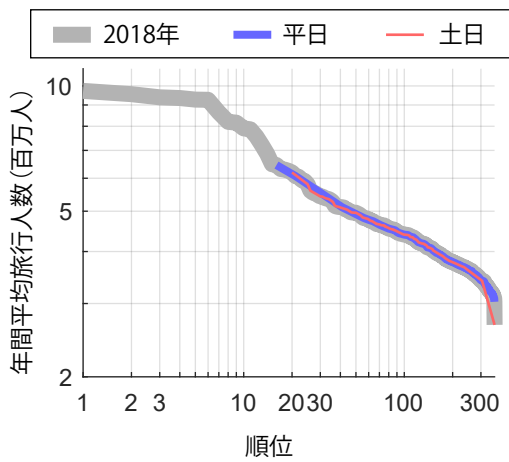


図-7 2018 年の総旅行量の順位-規模則 (平日・休日)

だものである。平日と土日は、それぞれ下位の部分を占めており、相互に重なり合う形で直線の関係を構成していることが分かる。

以上の関係から、日変動の直線となる順位-規模関係は、上位から「ピーク3期間」「祝日・連休」「土日」「平日」がそれぞれ部分的に重複しながら構成されていることが分かった。それでは、「4グループの旅行数が、それぞれ単一の正規分布に従う」と仮定したときも、直線の順位-規模関係は観測されるのだろうか？

ここでは、2018年のデータを用いて、上述の疑問にモンテカルロシミュレーションで答えていく。まず、2018年3月1日から365日間における、4グループ（ピーク3期間、祝日・連休、土日、平日）の平均値・標準偏差値・日数を算出した結果が、表-1である。この表から、「ピーク3期間」、「祝日・連休」、「土日」、「平日」の順に、日数が多くなり、平均旅行数と分散が小さくなる関係にあることが確認できる。

図-8の細かいグレーの線は、表-1のパラメータを用い

表-1 2018年の曜日グループごとの総旅行者数の統計量

	日数	平均 (百万人)	標準偏差 (百万人)
ピーク期間	16	8.076	1.423
連休・祝日	28	5.065	0.827
土日	80	4.515	0.560
平日	241	3.707	0.447

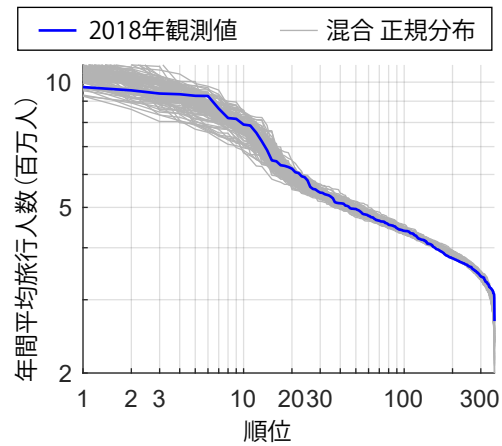


図-8 正規分布混合モデルによる順位-規模則 (2018年データ)

て、乱数をそれぞれ同日数だけ発生させて順位-規模関係を100回書いた結果である。この図から、この発生させたグレーの線も、ほとんど直線に近いことが近いことが分かる。つまり、4グループの正規分布を混合する形で、順位-規模関係の線形則をほとんど再現できる。

ここで、日別の都道府県間旅行量が順位-規模則に従うためには、表-1の日数・パラメータが一定の規則性に従う必要がある。このうち、日数はカレンダーで決まっているものであり、日ごとの総旅行量のそれぞれのグループの平均旅行量と標準偏差が、順位-規模則に従うような値をとっていることが分かる。次の節では、都道府県ペアごとに同様の規則性の存在を確認していく。

4. 都道府県間ペアごとの時空間分布

(1) 東京 → 石川における順位-規模則の経年変化

ここで、図-3の列ごとに、順位-規模則を見ていこう。まず、居住地-滞在地ペア・東京 → 北海道では、図-2に示したように、2018年のデータで順位-規模則をおおむね満たすことが確認できている。つぎに、本節では東京 → 石川の順位-規模関係を見ていこう。このペアでは、2015年3月15日に北陸新幹線開業があったために、「新幹線開業のような交通サービス条件の変化があると、順位-規模関係はどのように変化するか？」を確

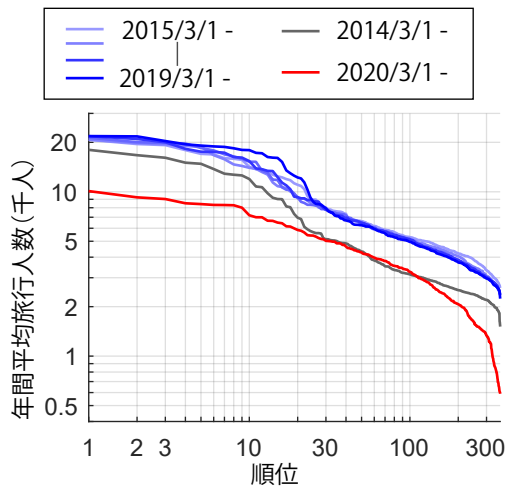


図-9 東京 → 石川における順位-規模則の経年変化

認していくことができる。

図-9が、東京 → 石川の日ごと旅行量の順位-規模関係を7年分を示したものである。このうち、2015年以降が北陸新幹線開業後であり、2014年は北陸新幹線開業前の旅行量分布に相当する。この図から、東京 → 石川の順位-規模則の変化には、以下の3点の特徴があることを読み取ることができる。(1) 図-5と同様に、どの都市においても10位から300位の範囲ではほぼ直線の関係が確認できる。(2) 新幹線開業前と比較して、2015年から2019年までの旅行量分布は、全ての順位で旅行量が大きくなっていることが分かる。(3) 傾きは、新幹線開業前後で同じか、若干開業後に傾きの大きさが小さくなる(旅行量の分散が小さくなる、ここでは低順位の増加比が大き)傾向にある。つまり、新幹線開業前後でおおよそ共通して順位-規模則は満たしており、若干の傾きの変化が起こりうる事が分かった。

(2) 季節変動の順位-規模則モデルと全都道府県ペアのパラメータ推定結果

全ての都道府県ペアを対象として、順位-規模則の存在を確認していこう。順位-規模関係が両対数グラフ上で直線となるということは、日ごとの旅行者数はべき乗モデルとして下記のようにシンプルに記述できる。

$$\log(m_{n,y,i,j}) = \alpha_{y,i,j} \log(n) + \beta_{y,i,j} \quad (1)$$

ここで、 n は365日のなかでの順位であり、 $m_{n,y,i,j}$ が y 年の居住地-滞在地ペア(i,j)の日別旅行量で、 n 番目に大きい日の旅行者数である。さらに、平均値が1となるように、平均旅行者数で割った値を適用する場合には、下記の条件も満たす。

$$1 = \frac{n^{\alpha_{y,i,j}} \exp(\beta_{y,i,j})}{365} \quad (2)$$

この条件を用いることで、 $\alpha_{y,i,j}$ と $\beta_{y,i,j}$ の片方が決まると、もう一方も導出できる。そのため、ここで見られ

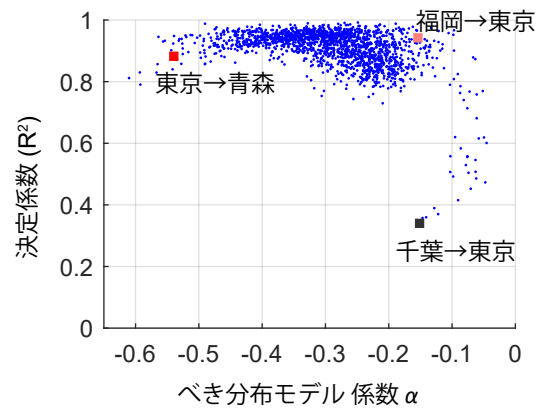


図-10 各都道府県ペアのべき乗モデルの係数と決定係数の関係

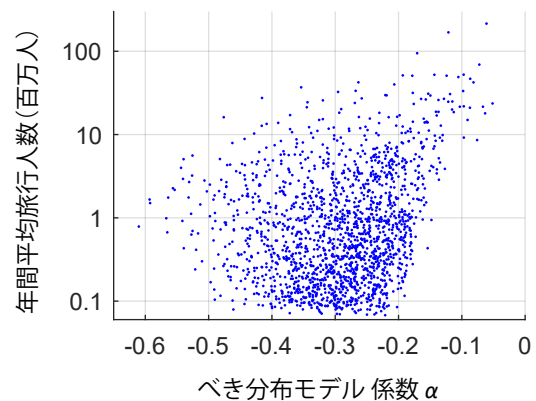


図-11 平均旅行数とべき乗モデルの係数の関係

た規則性に基づくと、パラメータ $\alpha_{y,i,j}$ ひとつだけで、分布の形状が決まることとなる、

このパラメータ $\alpha_{y,i,j}$ は居住地-滞在地ペア (i,j) ごとに以下の最小二乗法を用いて算出できる。

$$\begin{aligned} \min_{\alpha} \sum_{n=1}^{365} (y_n - n^{\alpha} \exp(\beta))^2 \\ \text{s.t. 式 (2)} \end{aligned} \quad (3)$$

ここでは、ほかの居住地-滞在地ペアにおいても、式(1)のべき乗モデルで説明できるかを確認していく。モバイル空間統計による2018年3月1日から365日分のデータを式(1)のモデルを適用する。なお、ここでは、比較のために図-3の居住地-滞在地ペアだけでなく、大都市圏内々のペアも同様にもちいてく。

図-10は、居住地-滞在地ペアごとに推定した $\alpha_{y=2018,i,j}$ と決定係数の関係を示したものである。まず、決定係数だけを見ると、ほとんどの居住地-滞在地ペアが0.8を上回っており、おおむね式(1)でよく大小関係を説明できていることが確認できる。具体的には、1,789ペアのうちで、1,720ペア(約96%)が決定係数0.8を上回る結果であった。そして、分布の形状

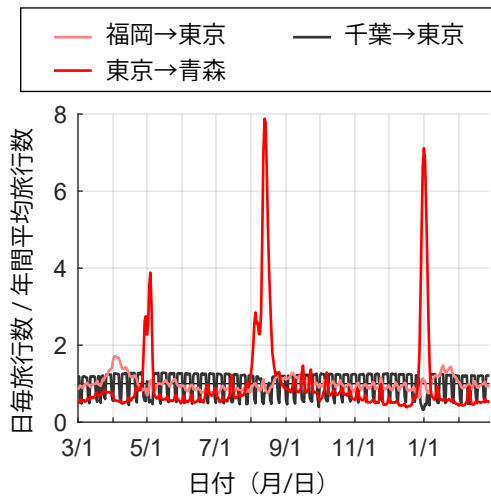


図-12 3 都県間旅行量の推移 (2018 年)

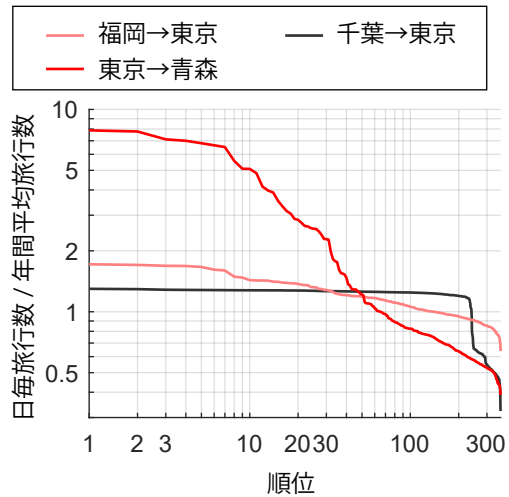


図-13 2018 年の 3 都県間旅行量の順位-規模則

を決定する係数 α に着目すると、-0.6 から-0.1 までの間で居住地-滞在地ペアごとに異なる値をとっていることが分かる。

以上のことから、日本の都道府県間ペアごとの日別旅行者数は、(1) 大半がべき乗モデルに従うと仮定することができ、(2) さらにそのパラメータは都道府県間ペアごとに-0.6 から-0.1 までと大きく異なることが確認できた。

一方で、図-11 をみると、パラメータ α と年間平均旅行者数の間には特に相関関係がないことが分かる。つまり、旅行量の総数の順位-規模則の傾きの間には、明確な関係は見られないことを示している。

なお、とくに決定係数が小さいで居住地-滞在地ペアは、係数 α が大きい (0 に近い) 傾向がある。決定係数が 0.5 を下回るで居住地-滞在地ペアは、千葉・神奈川県・埼玉 → 東京、滋賀・京都・奈良・兵庫・和歌山 → 大阪、岐阜 → 愛知、佐賀 → 福岡であり、共通して大都市への通勤行動が多いと思われるペアである。これらは、図-3 では除外していた、「大都市圏内々」のペアである。

(3) 代表的な居住地-滞在地ペアの時系列推移

つぎに、図-10 の位置が大きく異なる居住地-滞在地ペアの分布を見ていこう。図-12 と図-13 が、それぞれ 3 ペアの時系列変動と、順位-規模関係を示したものである。

東京 → 青森は、図-10 の、べき分布モデルに対して当てはまりのいい、多くの居住地-滞在地ペアの分布の中でも最も α が小さい (絶対値が小さく、傾きが大きい) 特徴がある。このペアの旅行量の時系列変化は、図-12 にあるように、GW・お盆・年末年始の 3 シーズンに特に集中している。とくに、お盆のピークでは、ピー

ク時以外の 8 倍もの旅行者数が青森県に滞在している。

その一方で、福岡 → 東京は、逆に日別旅行量の分散が特に小さいペアの一つである。図-12 にあるこのペアの旅行量の時系列変化は、ここまでで見てきた時間変化と異なり、GW・お盆・年末年始のピークが見られない。その代わりに、4 月初旬と 1 月初旬に旅行量の増加が確認できる。これらの時期は、年度・年始の時期であり、ビジネストリップが多くを占めるペアの特徴であろうと考えられる。このような時間変動においても、両対数グラフ上での順位-規模関係 (図-13) は直線に近い関係にある。

千葉 → 東京ペアは、決定係数が 0.340 であり、パラメータを推定した中で最も順位-規模則に従わないペアである。このペアの旅行量の時系列推移は、図-12 のような形であり、平日に大きくそれ以外の時期に少ない傾向にある。つまり、「通勤」行動が多くを占めているペアであることが推測される。このような時間変動では、最も日数の大きい平日が最も旅行人数が大きくかつ分散が小さいために、図-13 のように平日の日数 (241 日) の順位までがほとんど同じ量で、それ以上の順位で急激に旅行量が下がる形となる。その結果、順位-規模則から大きくかけ離れた形となる。このようなことから、日別旅行量の順位-規模則が見られるようになるのは、日常的な通勤行動が少ない、非日常行動が多くを占める都道府県ペアであることがわかる。

5. おわりに

本研究では、都道府県をまたぐ日々の旅行者数の着目し、その数量分布にみられる規則性 (順位-規模則) に着目し、日本におけるその特徴を整理した。まず、大都市圏内々を除く、都道府県間ペアを合算した、総旅

行量の順位-規模則を見た結果、いかの 6 点を明らかにした。(1) 1 年ごとに、それぞれ日ごとの旅行数は順位-規模則にしたがう。(2) COVID-19 による影響時も、緊急事態宣言時の大幅な減少を除けばおおむね従う。(3) その内訳は、ピーク期間 (GW, お盆, 年末年始) と連休・祝日, 土日, 平日の順に相互に重なり合いながら構成している。(4) 4 グループそれぞれが正規分布に従うと仮定して乱数を発生させた結果も、低位を除けばおおむね順位-規模則にしたがう。これは、4 グループの日数と、それぞれのパラメータ (平均・標準偏差) の関係が一定の規則性に従っていることによると推測できる。

さらに、都道府県間ペアごとにみると、(5) 96%以上の居住地-滞在地ペアで直線のモデルで決定係数 0.8 である。つまり、順位-規模則から大きく外れていないことが明らかになった。一方で、大都市圏内々などの通勤目的が多くを占めると推測されるペアでは、順位-規模則から大きく外れることも明らかになった。(6) 順位-規模則の傾きは、居住地-滞在地ペアごとに大きく異なる。具体的には、東京 → 青森のようなケースでは、需要の多くが GW・お盆・年末年始に集中するために、ばらつきが大きい特徴がある。その一方で、福岡 → 東京のケースでは、4 月と 1 月に弱いピークがある以外は、それほど大きな時間変動がない。このように時間変動が大きく異なるペアにおいても、それぞれ順位-規模則はおおむね成立していることがわかった。

本稿には、いくつかの課題が残されている。まず、順位-規模則が成り立つ (両対数グラフで直線の関係にある) との判定方法である。本稿では、図示した結果と決定係数を用いて考察したが、より定量的かつ精度よく判定できる方策を検討する必要がある。さらに、この順位-規模則が成立するメカニズムについて、より詳細な分析が必要である。本稿のシミュレーションでは、365 日を 4 グループにわけて、それぞれ正規分布に従

うと考えた場合も、おおむね順位-規模則に従うことを明らかにした。つぎは、順位-規模則に従うために必要な、各グループのパラメータの条件を明らかにしていくことで、いくつかの推論が可能であろう。単純に、4 グループの日数によって、「たまたま」順位-規模則のような関係が成り立つ、という可能性もある。また、ここで示した関係性は、交通サービスの容量の影響もうけている可能性があり、そのような供給制約との対応関係も重要であろう。今後も、「順位-規模則が人々の旅行量に対してどのような意味を持つか?」という問いに回答できるよう、上述の課題を見る研究を継続していく予定である。

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金 20H02270, 21H01455, 文部科学省卓越研究員事業として支援を受けた研究活動による成果の一部です。ご支援に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省: 全国幹線旅客純流動調査, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000016.html (last access: 2021/10/01)
- 2) NTT ドコモ: モバイル空間統計に関する情報, https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/disclosure/mobile_spatial_statistics/ (last access: 2021/10/01)
- 3) González, M. C. and Hidalgo, C. A. and Barabási, A.-L.: Understanding individual human mobility patterns, *Nature*, Vol.453, pp.779-782, 2008.
- 4) Zipf, G. K.: Human behavior and the principle of least effort: An introduction to human ecology, 1949.

(Received Oct. 1, 2021)

(Accepted)

THE FEATURES OF RANK-SIZE RULE ON SPATIO-TEMPORAL LONG-DISTANCE TRAVEL VOLUME

Hiromichi YAMAGUCHI