

モバイル空間統計を用いた復旧・復興過程の 独立成分分析：2014年8月広島土砂災害を例に

佐藤 史典¹・力石 真²・藤原 章正³

¹正会員 中日本高速道路株式会社 本社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦 2-18-19)

E-mail: f.sato.ae@c-nexco.co.jp

²正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: afujw@hiroshima-u.ac.jp

携帯電話の基地局情報を活用したモバイル空間統計は、人口分布の経時的変化に関する詳細な情報を有するため、自然災害をはじめとした非常時における人々の適応行動の把握に有用なデータといえる。一方、モバイル空間統計は、様々な理由で流入・流出した人が混在する集計データであるため、滞在人口の変動要因が不明瞭な点が問題として残る。そこで本研究では、独立成分分析を用いて人口変動要因の把握を試みる。具体的には、2014年8月の広島土砂災害を対象に、災害発生後に生じたであろう、異なる要因に起因する（直接観測されない）人口推移パターン（避難による人口の増減、救援による人口の増減など）を独立成分分析により復元した。分析の結果、独立成分分析により、概ね妥当な解釈が可能な変動要因別人口推移パターンを抽出できることを確認した。

Key Words: *Mobile Spatial Statistics, Independent Component Analysis, Landslide Disaster*

1. はじめに

国や地方自治体の施策立案に用いられる基本的な人口統計データとして、国勢調査や住民基本台帳がある。これらの人口統計は、住民の常住地に基づく常住人口（夜間人口）である。一方、災害発生後の避難行動の把握といった人々の「動き」や、ある時間断面における実際の滞在者数（現在人口）については、既存の人口統計から推測することは難しく、例えば避難者に避難時の行動を尋ねるアンケート調査を実施し滞り場所の情報を取得する必要があった^{1),2),3),4),5),6),7)}。しかしながら、アンケート調査やヒアリング調査といった回顧式の調査は、被災者の負担の増加やデータの精度面での問題が残る。

近年、携帯電話の基地局情報に基づく人口推計データが利用できるようになり（現時点では株式会社NTTドコモが提供するモバイル空間統計が利用可能）、推計値ではあるものの、1時間毎の現在人口の経時的変化を把握することが可能となった。このような人口分布の経時変化を詳細に捉えたデータは、平常時だけではなく、災害などの非常時における人々の行動を把握する上でも有

用と考えられる。例えば、災害発生直後の避難行動の把握や、その後の復旧・復興過程の把握に利用できる可能性がある。

一方、モバイル空間統計は、対象メッシュへ様々な理由で流入・流出した人が混在する集計値データであるため、滞在人口の変動要因が不明瞭な点が問題として残る。この秘匿処理した集計ビッグデータから、現在人口の変動要因を把握する手法の開発が今求められている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、独立成分分析を用いて人口変動要因の把握を試みる。具体的には、2014年8月の広島土砂災害を対象に、災害発生後に生じたであろう、異なる要因に起因する（直接観測されない）人口推移パターン（避難による人口の増減、救援による人口の増減など）を独立成分分析により復元する。

2. 広島土砂災害（2014年8月）

2014年8月20日の午前3:00から午前4:00頃にかけて、局所的な集中豪雨により広島市安佐南区および安佐北区

において、107 件の土石流災害と 59 件のがけ崩れ災害が発生し、死者 74 名、負傷者 69 名、最高で 2,354 名の避難者を出す人的被害が発生した⁸⁾。とりわけ緑井地区、八木地区においては、宅地開発が山地付近にまで拡大していたこともあり、大きな被害があった (図-1)。



図-1 土石災害発生箇所と死者数⁸⁾

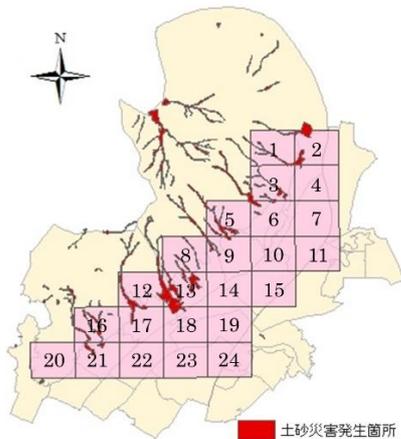


図-2 メッシュ番号と土石災害発生箇所

3. データの概要

以下の分析では、甚大な被害のあった緑井地区・八木地区を中心とした 24 メッシュ(500m×500m)について、2014 年 7 月 1 日から 2015 年 2 月 28 日までのモバイル空間統計のデータを使用し、人口分布の経時変化について分析する。分析エリアを図-2 に示す。

今回利用するデータには、1 時間毎の性別、年代別、居住地別の人口分布データが格納されているが、以降の分析では居住地情報のみ利用する。居住地情報に基づき、

以降、対象エリア内 (緑井、八木、八木町、川内、可部南、落合、口田、真亀地区) の住民を「域内」、それ以外の住民を「域外」と呼ぶこととする。なお、住民か否かの判断は、携帯電話契約者の居住地情報に基づいているため、実際の居住地とは異なる可能性がある。

4. 分析方法

本研究では、変動要因別の人口推移パターンを復元することを目的に独立成分分析⁹⁾¹⁰⁾を適用する。具体的には、独立成分分析によって得られた原系列に対し数量化 1 類を適用することより影響要因を抽出し、変動の原因について考察を加えることにより、人口推移パターンを把握する。以下、独立成分分析について簡単に説明した後、適用した数量化 1 類に用いた変数について述べる。

(1) 独立成分分析

本研究では、独立成分分析の結果得られる独立成分が、変動要因別人口推移パターンの原系列を表すとの考えの下、分析を進める。 p 個の変動要因別人口推移パターン \mathbf{s} の集計量として観測人口メッシュデータ \mathbf{x} が観測される場合を考える。具体的には、各メッシュにおける観測人口を $\mathbf{x} = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t))^T$ (T は転置操作)、原系列を $\mathbf{s} = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_p(t))^T$ 、未知係数で定義される混合行列を \mathbf{A} ($p \times p$ 行列) とすると、以下の関係式が成立する。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \tag{1}$$

ここで混合行列 \mathbf{A} および原系列 \mathbf{s} は未知であるため、適切な仮定を置き、独立成分および混合行列を推定する必要がある。独立成分分析では、多くの場合、変数の白色化、中心化に加えて、①原系列の独立性 (i.e., 同時確率密度関数 $P(s_1, s_2, \dots, s_p) = P_1(s_1)P_2(s_2) \dots P(s_p)$)、②原系列は非ガウス分布に従う、という仮定を置き、混合行列 \mathbf{A} および原系列 \mathbf{s} が推定される。②の仮定は、直感的には「独立な確率変数の和の分布はガウス分布に近づく」という中心極限定理から導かれる仮定である。具体的には、①の仮定が正しいとすれば、ガウス分布から遠ざかるように (すなわち非ガウス性を最大化するように) 独立成分を定めてやれば、元の互いに独立な原系列が復元できる、という考えに基づく。非ガウス性の最大化を行うための尺度として、尖度やネグントロピーが存在するが、尖度は外れ値に対してロバストではない等の指摘はなされている⁹⁾ことから、本研究ではネグントロ

ピーを用いる。なお、モデルの推定は R パッケージ FastICA を利用した。

今回の実証分析では、24 個のメッシュが存在し、また、各メッシュにおいて域内と域外の 2 系列のデータが存在するため、計 48 メッシュの観測データを使用する。

(2) 数量化 1 類

独立成分分析で得られた独立成分 \hat{s}_i を目的変数として、ダミー変数(週と曜日と時間)を説明変数として回帰分析をしている。なお、未知パラメータ $\beta_w, \beta_l, \beta_h$, 週ダミー x_{iw} , 曜日ダミー x_{il} , 時間ダミー x_{ih} , 誤差項 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_i^2)$, 原系列 $i = 1, 2, \dots, 7$ である。

$$\hat{s}_i = \sum_{w=1}^{34} \beta_w x_{iw} (\text{週ダミー}) + \sum_{l=1}^6 \beta_l x_{il} (\text{曜日ダミー}) + \sum_{h=1}^{23} \beta_h x_{ih} (\text{時間ダミー}) + \varepsilon_i \quad (2)$$

表-1 回帰分析での目的変数と説明変数

目的変数	独立成分 $\hat{s}_i (i = 1, 2, \dots, 7)$
説明変数	週ダミー : 1 週間毎のダミー
	曜日ダミー : 日曜, 月曜, 火曜, 木曜, 金曜, 土曜のダミー
説明変数	時間ダミー : 0:00, 1:00, 3:00, 4:00, 5:00, 6:00, 7:00, 8:00, 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00, 17:00, 18:00, 19:00, 20:00, 21:00, 22:00, 23:00)のダミー

5. 分析結果

以下、独立成分分析、数量化 1 類の分析結果をまとめる。表-2 にそれぞれの独立成分の解釈、図-3 に回帰分析の結果より算出した各変数群の分散への寄与率、図-4~45 に独立成分分析の結果、および、回帰分析の結果を整理する。

まず \hat{s}_1 については、曜日単位の周期的な変動成分が強く効いている成分であることが確認でき(図-6)、特に土曜・日曜が大きな負の値を示している(図-8)。曜日に次いで、時間帯による変動も確認され、10:00 から 20:00 の間で負の値をとる独立成分といえる(図-9)。さらに、商業施設が集まるメッシュ 13, 14, 17, 18, 22, 23 において域外からの来訪者が増加していることから(図-5)、買い物目的の来訪者の行動を捉えた独立成分であることが想定される。Kitamura and Van Der Hoom¹¹⁾は、オランダのパネルデータを用いて 1 週間の行動パターンを明らかに

している。買い物トリップは土曜に多くなる傾向(オランダでは、多くの店が日曜を休業日としていることもあり、日曜の買い物トリップは少ない傾向)を明らかにしており、今回の分析結果は Kitamura and Van Der Hoom と整合的といえる。以上より、独立成分 \hat{s}_1 は、買い物による移動の原系列を示していると解釈する。

\hat{s}_2 は、10 月中旬に正から負に転じる独立成分であることが確認できる(図-12)。また、域内 a_2 はメッシュ 8, 10, 11, 12, 15, 18, 19, 24 において大きな正の値、メッシュ 6, 9, 13, 14 において大きな負の値を示している(図-10)が、このような移動に該当する人口変動要因は見当たらなかった。原因として、携帯電話基地局の新設等の要因によって滞在メッシュがずれた等の要因が考えられるが、原因は不明であり、ここでは \hat{s}_2 は解釈が難しい独立成分となった。

\hat{s}_3 は、8/20~9/1 の期間において大きな正の値を示す独立成分である(図-18)。また、域内 a_3 を参照すると、メッシュ 5, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18, 22 といった土砂災害発生箇所付近のメッシュにおいて負になり、メッシュ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 15, 19, 23, 24 が正となっていることから(図-16)、被災箇所から離れた場所への人口移動が見られる。一方、域外 a_3 を参照すると、特にメッシュ 18 において正となっている(図-17)。これは、メッシュ 18 に位置する梅林小学校が土砂災害の救助・復旧・復興の起点として使用されていた⁸⁾ことに起因すると考えられる。以上を踏まえ、 \hat{s}_3 は、被災箇所からの避難(避難所以外への避難)、及び土砂災害の救助・復旧・復興の起点として、梅林小学校付近が使用されていたことを示す独立成分と解釈できる。

\hat{s}_4 は、お盆、土砂災害後及び正月を除き、周期的な成分で構成されていることが確認できる(図-24)。また、域内 a_4 は全域で負(図-22)、域外 a_4 は正を示しているメッシュが多数見られる(図-23)。また、時間による寄与率が大きいことが確認でき(図-3)、6:00 から増加し 13:00 頃にピークを迎え、その後減少することがわかる(図-27)。また、回帰分析(曜日)より、土曜・日曜が大きな負の値を示しており、平日と休日の行動パターンの違いを示している(図-26)。以上を踏まえ、 \hat{s}_4 は、住民が日中に通勤・通学のため外出し、夕方・夜に自宅に戻っている様子を示す独立成分と解釈する。

\hat{s}_5 は、8/20 から 9 月後半にかけて負の値を示すことが確認できる(図-30)。域内 a_5 は特にメッシュ 18 が負となっている一方(図-28)、域外 a_5 はメッシュ全域において負となっていることがわかる(図-29)。これは、梅林小学校が避難所として使用されていたこと⁸⁾、救助・復旧・復興のための県外からの多数の来訪者がいたこと⁸⁾により、特にメッシュ 18 に人口が集中しているものと推察される。以上を踏まえ、被災箇所以外のメッシュへ避難(避

難所への避難), 救助・復旧・復興活動を示す独立成分と解釈する。

\hat{s}_6 は, 8/20 頃に負に転じ, 11/1 頃に 0 付近で安定する独立成分である(図-36)。域内 a_6 はメッシュ 18, 22, 23 以外において特に大きな正の値を示している(図-34)。また, 週ダミー・時間ダミーによる寄与率が高いことが把握できる(図-3)。以上を踏まえ, \hat{s}_6 は, 土砂災害後の住民が避難所等から戻ってくる様子ならびに土砂災害前の水準に人口が戻っていない様子を反映している独立成分と解釈する。

\hat{s}_7 は 8/20 後にわずかに正に転じているが, すぐに災害前に戻る独立成分であることが確認できる(図-42)。また, 週ダミー・時間ダミーによる寄与率が高い(図-3)。さらに, 域外 a_7 にてメッシュ 13, 14, 18, 22, 23 が大きな正となっている(図-41)。以上を踏まえ, \hat{s}_7 は, 短期的な救助・復旧活動を示す独立成分と解釈する。

以上の結果をまとめると, 表-2 に示すように, 独立成分分析により, 概ね妥当な解釈が可能な変動要因別人口推移パターンを抽出できることを確認した。また, 災害後の避難行動を避難所への避難/避難所以外への避難に分解できる可能性があること, 短期的な避難行動と長期的な復旧・復興過程を峻別できる可能性があること等, 災害発生直後の避難計画やその後の復旧・復興過程に有用と思われる情報が抽出できることを確認した。

表-2 独立成分の解釈一覧

独立成分	独立成分の解釈
\hat{s}_1	・買い物による移動
\hat{s}_2	・解釈が難しい
\hat{s}_3	・被災箇所以外のメッシュへ避難 (避難所へ避難しない) ・救助・復旧・復興活動
\hat{s}_4	・通勤・通学
\hat{s}_5	・被災箇所以外のメッシュへ避難 (避難所へ避難する) ・救助・復旧・復興活動
\hat{s}_6	・住民が日常生活に戻るまでの長期的推移
\hat{s}_7	・救助・復旧・復興活動

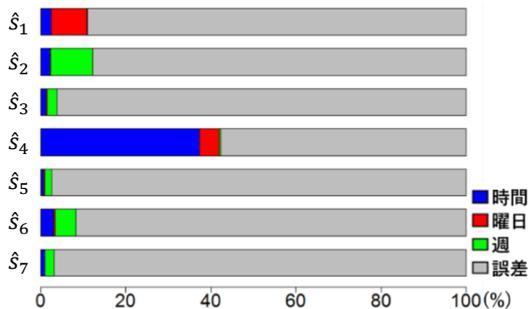


図-3 各変数群の分散への寄与率

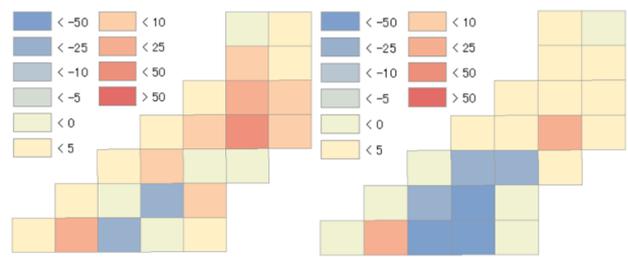


図-4 域内 a_1 の推定結果

図-5 域外 a_1 の推定結果

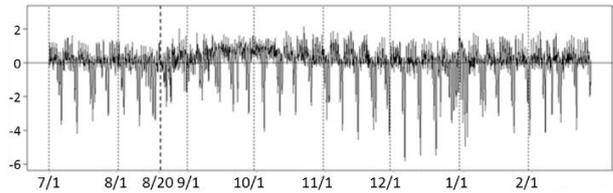


図-6 \hat{s}_1 の推定結果

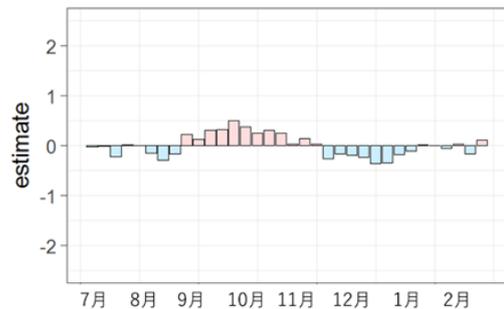


図-7 回帰分析(週)

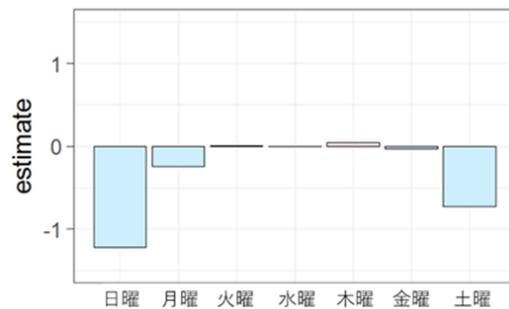


図-8 回帰分析(曜日)

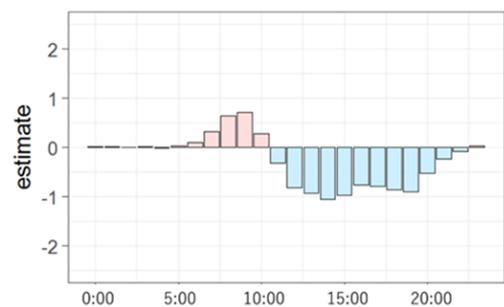


図-9 回帰分析(時間)

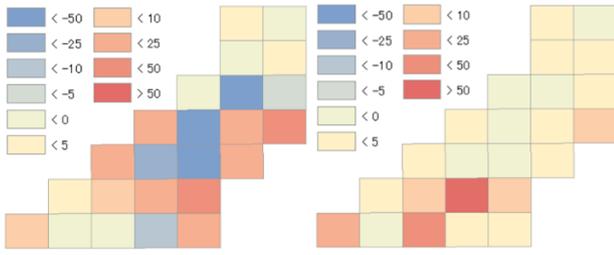


図-10 域内 a_2 の推定結果

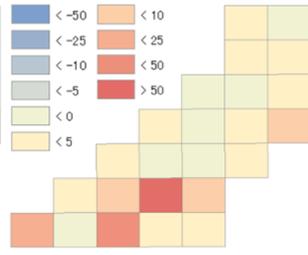


図-11 域外 a_2 の推定結果

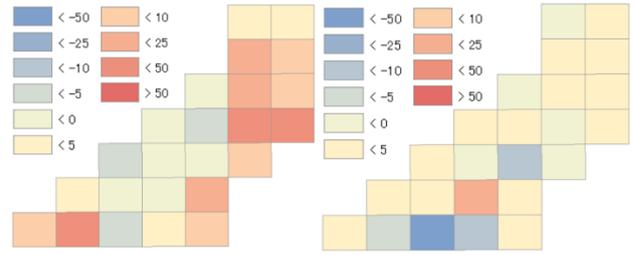


図-16 域内 a_3 の推定結果



図-17 域外 a_3 の推定結果

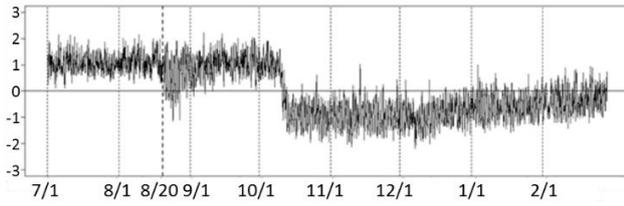


図-12 δ_2 の推定結果

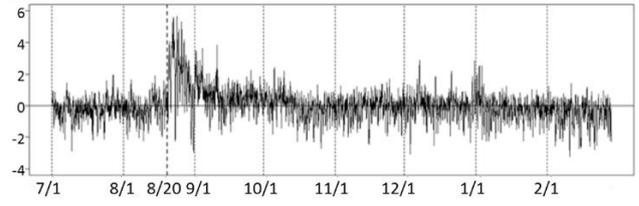


図-18 δ_3 の推定結果

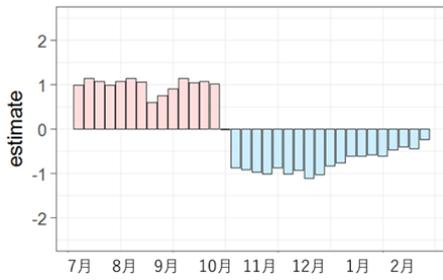


図-13 回帰分析(週)

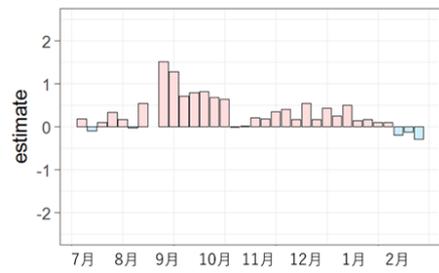


図-19 回帰分析(週)

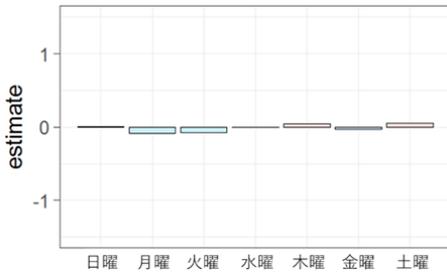


図-14 回帰分析(曜日)

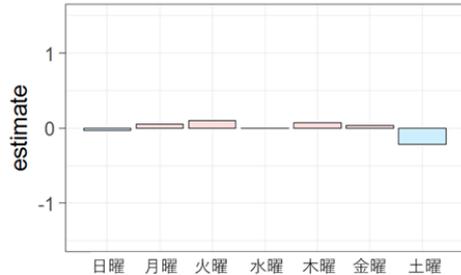


図-20 回帰分析(曜日)

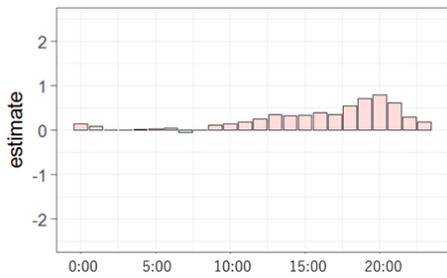


図-15 回帰分析(時間)

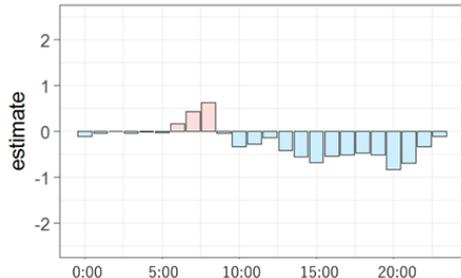


図-21 回帰分析(時間)

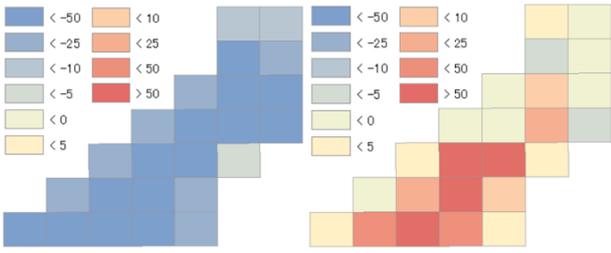


図-22 域内 a_4 の推定結果

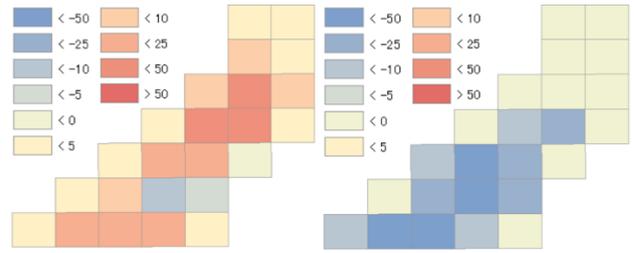


図-23 域外 a_4 の推定結果

図-28 域内 a_5 の推定結果

図-29 域外 a_5 の推定結果

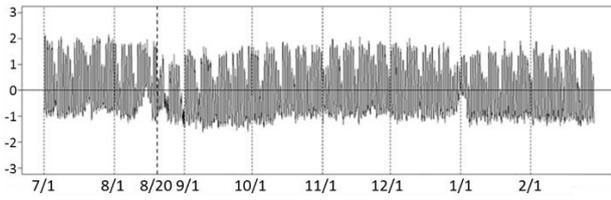


図-24 δ_4 の推定結果

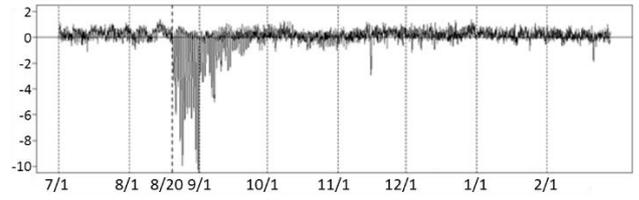


図-30 δ_5 の推定結果

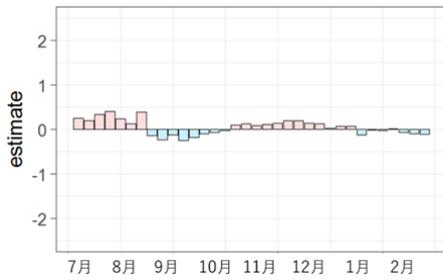


図-25 回帰分析(週)

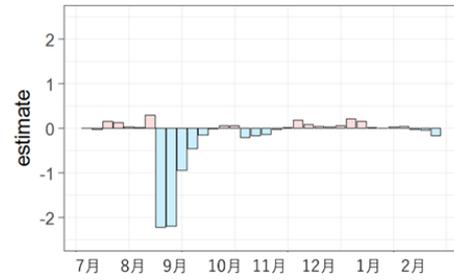


図-31 回帰分析(週)

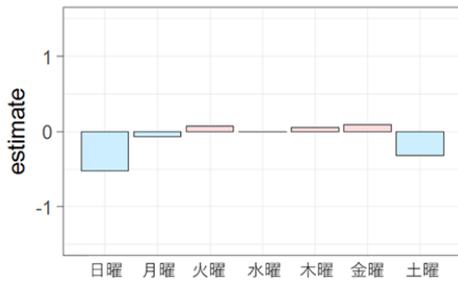


図-26 回帰分析(曜日)

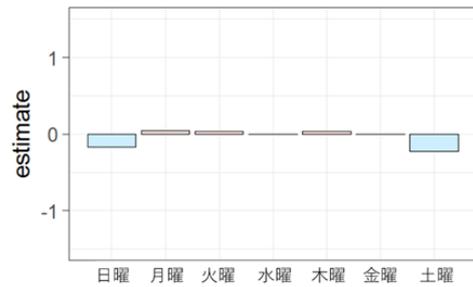


図-32 回帰分析(曜日)

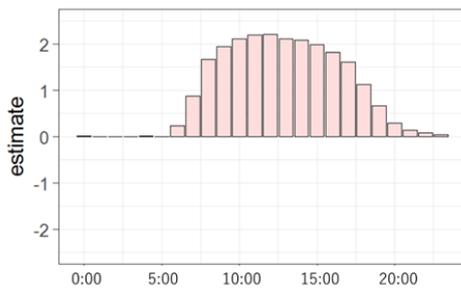


図-27 回帰分析(時間)

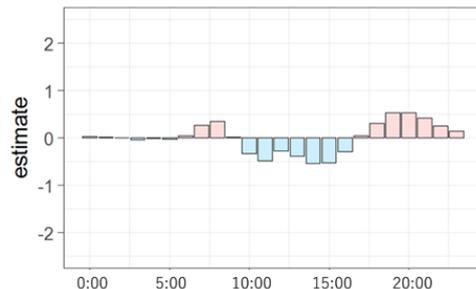


図-33 回帰分析(時間)

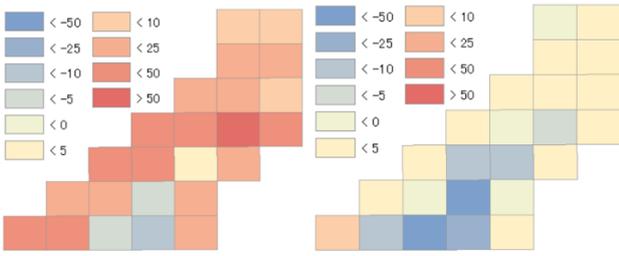


図-34 域内 a_6 の推定結果 図-35 域外 a_6 の推定結果

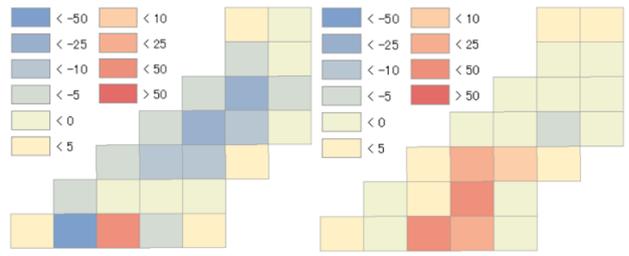


図-40 域内 a_7 の推定結果 図-41 域外 a_7 の推定結果

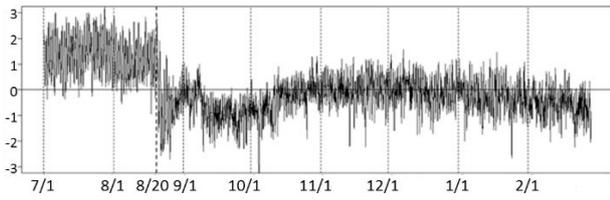


図-36 δ_6 の推定結果

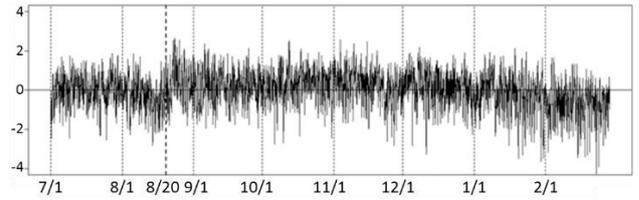


図-42 δ_7 の推定結果

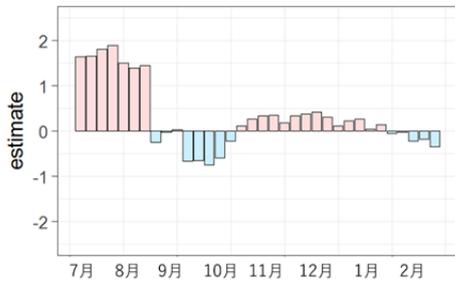


図-37 回帰分析(週)

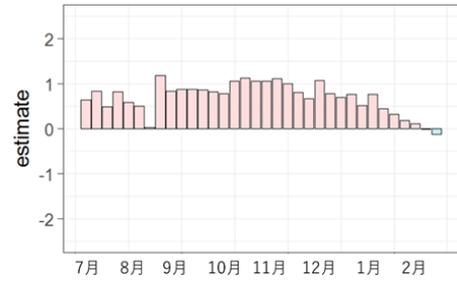


図-43 回帰分析(週)

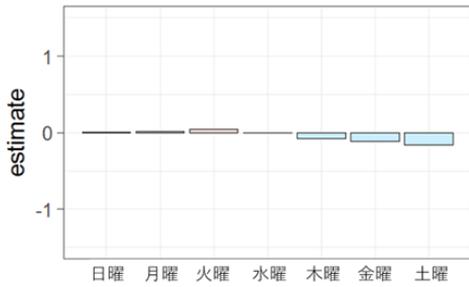


図-38 回帰分析(曜日)

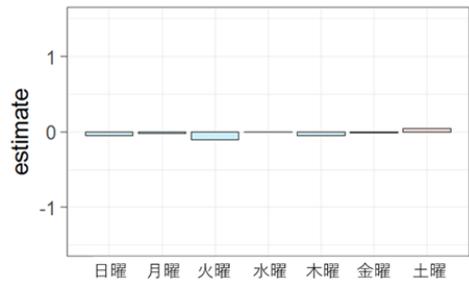


図-44 回帰分析(曜日)

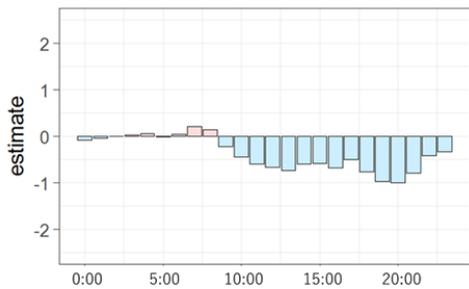


図-39 回帰分析(時間)

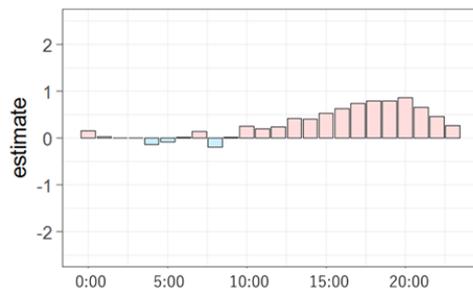


図-45 回帰分析(時間)

6. おわりに

本研究では、2014年8月の広島土砂災害を対象に、災害発生後に生じたであろう変動要因別人口推移パターンを、独立成分分析により抽出することを試みた。分析の結果、推定した独立成分に考察を加えることにより、異なる要因に起因する人口推移パターンの考察が可能となることを確認した。今回の分析ではメッシュ数の制限や細分化されたデータの欠損の関係上、年代別、性別の違いを考慮できていないものの、人口の多い地域であれば年代別、性別の分析を行うことも可能である。また、本研究では比較的広く利用されている FastICA アルゴリズムに基づく独立成分分析を適用したが、それ以外にも様々なアルゴリズムが提案されており¹⁰⁾、今後、方法論の比較分析も実施する必要がある。

参考文献

- 1) 近藤観慈, 金田明香里, 林拙郎: 山間地域における豪雨災害時の住民避難—2004年9月台風21号三重県宮川村災害の事例—, 砂防学会誌, Vol.59, No.4, pp.32-42, 2006
- 2) 宮瀬将之, 菊井稔宏: 土砂災害における避難要因について, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, pp.55-61, 2009
- 3) 水野正樹, 富田陽子, 桂真也, 小山内信智, 花田良太, 安田武道: 災害情報を用いた土砂災害時の住民の避難率の分析, 砂防学会誌, Vol.65, No.3, pp.29-34, 2012
- 4) 及川康, 児玉真, 片田敏孝: 水害進展過程における住民対応行動の形成に関する研究, 土木学会論文集 IV, No.786, pp.89-102, 2005
- 5) 片田敏孝, 児玉真, 及川康: 水害進展過程における住民の災害情報の取得構造に関する実証的研究, 土木学会論文集 IV, No.786/IV-67, pp. 77-88, 2005
- 6) 奥村誠, 塚井誠人, 下荒磯司: 避難勧告の信頼度と避難行動, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.2, 2001
- 7) 本間基寛, 片田敏孝: 津波防災における災害事前情報と住民避難の関係に関する考察, 災害情報, No.6, pp.61-72, 2008
- 8) 8.20 豪雨災害における避難対策等検証部会: 平成 26 年 8 月 20 日の豪雨災害避難対策等に係る検証結果, 平成 27 年 1 月 (URL: <http://www.city.hiroshima.lg.jp/www/contents/1476873330360/files/01honpen.pdf>, 2017 年 4 月 24 日閲覧)
- 9) Hyvarinen, A., Karhunen, Oja, E.: Independent Component Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- 10) Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.: The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition, Springer, 2009.
- 11) Kitamura, R., and Van Der Hoorn, T.: Regularity and irreversibility of weekly travel behavior, Transportation, Vol. 14, No. 3, pp. 227-251, 1987.

(2017. 4. 28 受付)

INDEPENDENT COMPONENT ANALYSIS OF RECOVERY AND RECONSTRUCTION PROCESS BY USING MOBILE SPATIAL STATISTICS: A CASE STUDY OF LANDSLIDE DISASTER IN AUGUST 2014, HIROSHIMA

Fuminori SATO, Makoto CHIKARAISHI and Akimasa FUJIWARA