モバイル空間統計を活用した水害時の避難者数推計に関する研究

山下　慎二*・Mas Erick・越村　俊一**・永田　彰平***・森田　格*****

Estimating the number of evacuees during floods using Mobile Spatial Statistics

Shinji Yamashita*, Mas Erick**, Shunichi Koshimura**, Shohei Nagata***, Itaru Morita*****

Abstract:
近年，異常気象により災害が激甚化する中で，地域防災計画の見直しや，避難シミュレーションを活用した施策立案が行われている．しかし避難計画では避難行動特性を十分考慮した計画まで検討していないことや，避難シミュレーションでは条件設定に多くの仮定が含まれるため条件設定が分析結果に大きく影響することが課題となっている．
本研究では，避難行動を定量的に予測することや避難シミュレーションの条件設定を精緻化することを目的として，①モバイル空間統計から水害時における避難者数を算定する手法を開発し，②複数の自治体や災害事例のデータを用いた避難者数の予測モデルを開発する．これにより，任意の地域で将来発生する水害での避難者数が予測でき，地域防災計画の見直しや避難シミュレーションの条件設定の精緻化に貢献できる．本稿では①について実施し，差分の差分法を用いて算定した避難者数と自治体が公表する避難者数の比較検証を行った．

Keywords: モバイル空間統計 (Mobile Spatial Statistics)，水害避難 (Flood Evacuation)，差分の差分法(Difference-in-Differences Method)，令和元年東日本台風 (2019 Eastern Japan Typhoon)，避難情報 (Evacuation information)

１．はじめに

１.１　背景

近年，異常気象により災害が激甚化する中で，台風・大雨に伴う洪水や土砂災害等に対する防災施策の検討・効果検証に，デジタルツイン技術として避難シミュレーション（マルチエージェントシミュレーション）を活用するケースが増えている（国土交通省, 2021; 京都府, 2024; 神戸市, 2025）．しかし，避難シミュレーションはエージェントの行動設定や初期条件の設定が結果に大きく影響することから，条件設定の妥当性について課題が残ることがある（富沢ら, 2022; 堀ら, 2008）．特に水害時おいては，警戒レベルごとに避難情報が発令されるため，行動設定は多様かつ複雑となっている．また，避難計画では避難行動特性を十分考慮した計画まで検討していないことも課題となっている（岡島ら, 2021）．

１.２　目的

本研究では，水害時を対象として，災害初期段階から発災後の避難まで長時間の人口移動を分析し，避難情報が人口移動に与える影響を把握する．そのうえで，避難情報を含め，災害情報や被災履歴，土地データ等の種々のデータから人口変動の要因を特定し，水害時の人口変動の再現モデルの構築を試みる．さらには，再現モデルより予測される人口変動に整合するような避難シミュレーションを構築することで，水害時の避難行動に対する対策効果検証や避難計画検証に活用可能な避難シミュレーションの構築を目指す．

２．既往研究と本研究の位置づけ

２.１　既往研究

奥村・仲野（2024）は，2023 年夏季の高気温が首都圏における人々の外出量に与える影響を，モバイル空間統計を用いて統計的に分析した．外出量の算出には，居住地市区町村内の移動を直接捉えることが困難であることから，「最小移動仮定」に基づき，深夜 2 時の人口分布から各時間帯への人口移動量を線形計画問題として推定している．

Nagata et al., (2021) は，COVID-19 の感染拡大に伴う外出自粛要請が，都市部における人々の移動量に与えた影

*　正会員　日本工営株式会社中央研究所（NIPPON KOEI CO.,LTD.）
〒300-1259　茨城県つくば市稲荷原 2304　E-mail：YAMASHITA-SH@n-koei.jp
**　非会員　東北大学災害科学国際研究所（Tohoku University）
〒980-8572　仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1　E-mail：mas@tohoku.ac.jp, koshimura@tohoku.ac.jp
***　正会員　東北大学災害科学国際研究所（Tohoku University）
〒980-8572　仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1　E-mail：shohei.nagata.c7@tohoku.ac.jp
****　非会員　日本工営株式会社中央研究所（NIPPON KOEI CO.,LTD.）
〒300-1259　茨城県つくば市稲荷原 2304　E-mail：MORITA-IT@n-koei.jp

響と感染拡大との関連を，三大都市圏を対象に分析した．分析にはモバイル空間統計を用い，各時間帯の人口を基準人口で割ることで指標化し，職場・夜間娯楽施設・住宅地における移動変化指標を算出している．

中口・杉山（2021）は，さいたま市荒川・鴨川流域を対象に，水害発生時の避難行動シミュレーション動画を用いた学習会を実施し，住民の防災意識や要配慮者支援意識の変容を分析した．シミュレーションで避難者が移動開始するタイミングは，警戒レベルや破堤の有無などを踏まえたシナリオに応じて分析者が設定している．

2.2　本研究の位置づけ

水害時に発生する避難について，どのタイミングでどのくらいの人が避難をするか予測可能な推計手法を開発する．手法はシンプルな手法から試すが，精度に応じてより複雑なモデルを使用することも想定される．

なお，本稿は全体的な研究計画の中間段階に位置づけられるものであり，現時点で得られた知見を整理したものである．具体的には，フレームワークの内，２までの内容について分析した結果を報告する（図 1）．

3．モバイル空間統計を用いた避難者数の算定

3.1　使用データ・収集データ

水害時には，警戒レベルに応じて避難情報が発令されるため，1 時間単位以下の頻度で人口変動を把握できることが理想的である．そこで本研究では，1 時間単位の時系列かつ実数ベースで人口変動の分析が可能なモバイル空間統計（株式会社ドコモ・インサイトマーケティング）を使用した．モバイル空間統計は過去の災害時のデータも取得可能であり，令和元年東日本台風により大きな被害が発生した 2019 年 10 月 12 日を含む前後 3 か月（2019 年 8 月 1 日～10 月 30 日）を対象期間とした．分析対象地は，後述する３．２避難情報発令事例の選定で選定された地区である．

また，避難情報および避難所に関するデータも収集し，避難所については自治体が公表する場所（住所）・開設記録・時間帯別避難者数等の情報を取得し，4 次メッシュコードと紐づけて整理した．避難情報については行政や自治体が公表している資料等から過去の災害での避難情報を収集した．なお，本研究で収集したデータは，避難所情報（自治体 HP 等より収集），避難情報（行政資料）の他，天候，居住人口，流域 GIS データ（国土数値情報），避難者数など多岐にわたる．

3.2　避難情報発令事例の選定

前述したデータの収集を行うのに際し，分析対象となる避難情報発令事例を選定した．まず，対象とする災害については，近年で最も被害が大きかった令和元年東日本台風を対象とした．次に，令和元年東日本台風にて特に住宅被害が大きい自治体を選定した．この際，全壊，

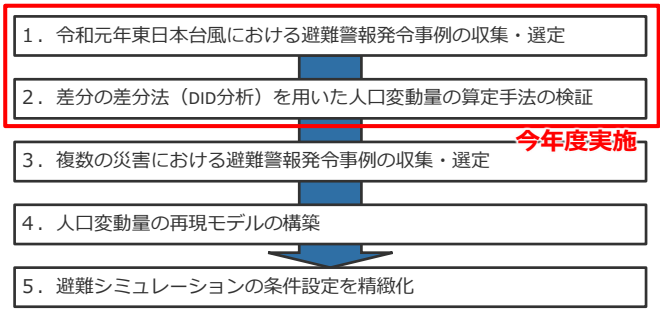


図 1　フレームワーク

表 1　住宅被害

都道府県名	市区町村名	全壊	半壊	床上	床下
栃木県	栃木市	11	2767	1097	3997
長野県	長野市	869	1496	32	1597
福島県	いわき市	121		4044	1504
福島県	郡山市	483		3168	1418
栃木県	宇都宮市		441	724	1340
岩手県	宮古市	71	105	1102	735
栃木県	佐野市	24	1671		1933
宮城県	角田市	18	933		1536
福島県	須賀川市	186	915	128	407
宮城県	丸森町	368	990		315
宮城県	大崎市	111	274	125	613
宮城県	柴田町		261	451	501
福島県	石川町	17	1057		390
福島県	伊達市	146	380	28	298
宮城県	大郷町	77	260	24	160
福島県	福島市			390	133
宮城県	石巻市	2	272	356	8907
長野県	佐久市	31	14	386	958

半壊，床上浸水，床下浸水の 4 項目について各被害件数が多い上位 10 個の市区町村をリストアップし（着色部分），2 項目以上でリストアップされた自治体を抽出したところ，宮古市，角田市，丸森町，いわき市，郡山市，須賀川市，栃木市，宇都宮市，佐野市，長野市が選定された（表 1）．なお，住宅被害件数で選定した理由は，避難者数が多い（避難が多く発生している）市区町村では，住宅被害も多くなる，と想定したためである．住宅被害以外にも人的被害や土砂災害も発生しているが，避難者数が多くても人的被害が発生しないケース（もしくはその逆）が想定されることや土砂災害は市区町村の地理的特徴に起因することが多く一概に被害件数に比例して避難者数が多くなるとは言えないため，住宅被害件数で選定している．選定された市区町村について避難情報発令事例を収集すると約 220 件の発令事例が収集できた．さらにこの中から警戒レベル 4 以上で複数回発令した事例を抽出し選定事例とした．複数回発令がある地区では避難者数が多くなり，モバイル空間統計でもその変動量が把握しやすくなること，及びモバイル空間統計は携帯基地局データが基になっていることから高齢者の移動が十分反映されていないと想定されることから，これらの条件を追加した．最終的には，40 地区 84 件の発令事例が選定された（表 2）．

表 2　発令事例

市区町村名	地区名	発令警報	発令時刻（初回）	発令時刻（最終）
栃木県栃木市	永野川沿いの地域	避難勧告→災害発生情報	2019/10/12 18:55	2019/10/12 19:50
栃木県栃木市	三杉川（藤岡町願成寺橋付近）	災害発生情報	2019/10/12 16:30	2019/10/12 23:55
栃木県栃木市	赤津川沿いの地域	避難勧告→避難指示→災害発生情報	2019/10/12 16:30	2019/10/12 20:00
栃木県栃木市	巴波川沿いの地域	避難勧告→災害発生情報	2019/10/12 16:30	2019/10/12 20:45
長野県長野市	篠ノ井横田	避難指示（緊急）→災害発生情報	2019/10/12 20:05	2019/10/12 20:42
長野県長野市	豊野町浅野	避難指示（緊急）→災害発生情報	2019/10/13 0:45	2019/10/13 1:19
長野県長野市	篠ノ井地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 18:00	2019/10/12 23:40
長野県長野市	若穂地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 18:00	2019/10/12 23:40
長野県長野市	松代地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 18:00	2019/10/12 23:40
長野県長野市	大岡地区の土砂災害警戒区域	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 16:20	2019/10/12 19:30
長野県長野市	大豆島地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 18:00	2019/10/12 23:40
長野県長野市	朝陽地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）→災害発生情報	2019/10/12 18:00	2019/10/13 2:12
長野県長野市	長沼地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）→災害発生情報	2019/10/12 18:00	2019/10/13 2:12
長野県長野市	豊野地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）→災害発生情報	2019/10/12 18:00	2019/10/13 2:12
長野県長野市	柳原地区（千曲川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）→災害発生情報	2019/10/12 18:00	2019/10/13 2:12
福島県いわき市	大久地区（大久川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 16:20	2019/10/12 19:50
福島県いわき市	常磐地区（藤原川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 19:40	2019/10/12 22:00
福島県いわき市	全域	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:10	2019/10/12 22:00
福島県いわき市	平地区（新川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:20	2019/10/12 19:10
福島県いわき市	好間地区（好間川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:20	2019/10/12 19:30
福島県いわき市	四倉地区（仁井田川沿川）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 16:20	2019/10/12 21:50
福島県郡山市	安積町（阿武隈川流域）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:00	2019/10/12 22:13
福島県郡山市	旧市内（阿武隈川流域）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:00	2019/10/12 22:13
福島県郡山市	田村町（阿武隈川流域）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:00	2019/10/12 22:13
福島県郡山市	西田町（阿武隈川流域）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:00	2019/10/12 22:13
福島県郡山市	日和田町（阿武隈川流域）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:00	2019/10/12 22:13
福島県郡山市	富久山町（阿武隈川流域）	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 15:00	2019/10/12 22:13
福島県郡山市	谷田川流域	避難指示（緊急）→災害発生情報	2019/10/12 21:41	2019/10/13 1:08
栃木県宇都宮市	姿川流域	避難勧告→避難指示	2019/10/12 19:15	2019/10/12 20:20
栃木県宇都宮市	田川流域	避難勧告→避難指示	2019/10/12 19:15	2019/10/12 20:20
岩手県宮古市	市内全域	避難勧告→災害発生情報	2019/10/12 17:00	2019/10/13 1:00
宮城県角田市	全域	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 19:30	2019/10/12 19:50
福島県須賀川市	阿武隈川流域	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 17:00	2019/10/12 19:15
福島県須賀川市	岩瀬地区	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 16:38	2019/10/12 19:15
福島県須賀川市	小塩江地区	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 18:36	2019/10/12 22:00
福島県須賀川市	釈迦堂川流域	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 17:00	2019/10/12 19:15
福島県須賀川市	大東地区	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 18:40	2019/10/12 22:00
福島県須賀川市	長沼地区	避難勧告→避難指示（緊急）	2019/10/12 16:30	2019/10/12 19:15
宮城県丸森町	全域	避難勧告→災害発生情報	2019/10/12 15:20	2019/10/12 19:50

3.3　分析手法

避難者数の算定については，モバイル空間統計から得られる 4 次メッシュ単位での人口分布を用いる．「差分の差分法（DID 法）」では，災害時の避難情報発令前後の人口変動を介入群，平常時の人口変動を対象群と設定し，それらの差分を求める．この「差分の差分値（DID 値）」が避難情報発令に伴って移動した避難者数と解釈する．DID 値が正であれば当該メッシュに避難者が避難しに来た（流入した）と解釈でき，負であれば当該メッシュから他のメッシュに移動した（流出した）と解釈できる．地区単位ではなくメッシュ単位で分析した理由については，避難者が同地区内の施設に避難することを想定した際に，メッシュ単位の流出入が発生しているものの地区単位では相殺され，DID 値を算出すると避難行動が観測できなくなることを懸念したためである．その他，この手法における仮定を整理する．

- １メッシュが 1 時間に変動するメッシュ人口は純増（流入）もしくは，純減（流出）のみを想定して，増加・減少が同時に発生しない．
- 同一メッシュ内の近隣住民がメッシュ内で避難する場合は，避難者数としてカウントできない．
- DID 法は 3 種類の対象群を用いて算出するため，その平均値を最終的な DID 値（避難者数）として分析する．

なお，具体的には，対象群①「発災前の休日の平均データ」，対象群②「発災前の休日かつ雨天だった日の平均データ」，対象群③「発災前の平日かつ雨天だった日の平均データ」の 3 種のデータを用意した．

3.4　検証方法

DID 値を避難者数として解釈することの妥当性を検証するため，各自治体が公表している開設避難所と避難者数の情報を用いて精度検証を行う．地区単位で報告された避難者数（一部は市町村単位で報告された数）を，提案手法で再現できているか集計する．この際，各地区で開設されていた避難所が含まれるメッシュにて，避難情報が発令された前後 1 時間における DID 値を集計する．開設の記録が無い場合は，避難者数が報告されている避難所を抽出し，当該避難所が含まれるメッシュの DID 値を集計する．ただし，避難所があるメッシュにおいては，避難情報発令直後にメッシュ人口が減少すること（つまり DID 値が負になること）は無いと仮定し，DID 値が負の場合は 0 で補完することとした（非負条件）．

4．検証結果

分析結果を表 3 に示す．佐野市は，市区町村が公表する避難情報の発令記録がないため分析対象から外した．宮古市は，避難情報の発令記録があったものの，避難所の開設記録や避難者数が報告されている避難所が無かったため，分析対象から外した．残りの避難情報発令事例で提案手法の検証を行った．

表 3　避難者数の推計結果

都道府県	市町村	地区名	4_避難勧告	4_避難指示	5_災害発生情報	合計（推計避難者数）	避難者数（公表値）
宮城県	丸森町	全域	208	0	240	448	474
	角田市	全域	170	170	0	339	1,030
栃木県	宇都宮市	姿川流域	7	42	0	50	392
		田川流域	245	232	0	478	874
	栃木市	巴波川流域	13	0	142	155	581
		永野川流域	0	0	35	35	1,027
		赤津川流域	45	186	78	308	202
福島県	いわき市	全域	5,075	4,133	0	9,207	6,968
		四倉地区	253	82	0	335	235
		大久地区	166	187	0	353	219
		好間地区	410	263	0	672	441
		常磐地区	417	444	0	861	411
	郡山市	谷田川流域	0	56	73	129	600
		阿武隈川流域	181	373	0	554	2,109
	須賀川市	阿武隈川流域	92	49	0	141	109
長野県	長野市	大岡地区	5	0	0	5	14
		大豆島地区	8	0	0	8	10
		朝陽地区	7	0	23	29	13
		松代地区	119	245	0	364	1,981
		篠ノ井地区	101	95	0	196	1,954
		若穂地区	35	93	0	128	284
		豊野地区	42	182	385	609	708
合計			7,598	6,832	975	15,405	20,636
平均			345	311	44	700	938

表 3 では，地区別に発令毎の推計避難者数と地区合計の推計避難者数を算出していた．地区合計と公表されている避難者数を比較すると，丸森町や須賀川市等では一定再現できている地区がある一方，栃木市や郡山市では大きく乖離している地区が見られた．両者を比較する指標については，RMSE が 842 人，相関係数が 0.91，平均絶対誤差率は 62%であった. 推計値の平均避難者数は 700 人，公表値の平均避難者数は 938 人であった．相関係数は良好な値が出ているものの，推計値として一定の信頼性を得るためには誤差率は 20%程度まで改善する必要があると考えられる．

特に○○流域と表記されている地区では誤差が大きい傾向にあるが，これは公表資料から避難情報が発令された流域に存在する避難所の特定が困難であったため，誤差が発生しているものと考えられる．さらに，モバイル空間統計では高齢者の移動が十分に考慮できないことも精度が低い原因の一つであると考えられる他，３．３で設定した仮定に起因する影響も考えられる．

５．まとめ

本稿では，令和元年東日本台風で避難情報が発令された地区を対象に，DID 法を用いて避難者数を推計し，実際の避難者数と強い相関がある結果を得ることができた. しかしながら, 誤差や RMSE は大きい結果となったため, 仮定条件の再確認や推計手法の見直し等，原因探求と手法改良が必要である．併せて，フレームワークの 3 以降の作業フローも並行し，人口変動量の再現モデルの開発を実施していく．

謝辞

本研究は東北大学の「災害レジリエンス共創研究プロジェクト」により助成を受けました．

参考文献

国土交通省（2021）屋内外をシームレスに繋ぐ避難訓練シミュレーション．<https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc20-014/>.

京都府（2024）スマートけいはんなプロジェクト．<https://www.pref.kyoto.jp/bunkaga/smart_keihanna_project.html>.

神戸市役所（2025）『都市計画や防災計画に資する、「富岳」を活用した デジタルツインシミュレーション』の社会実装に向けた取り組み ～神戸駅周辺地域の垂直避難に関する検証～.
<https://www.city.kobe.lg.jp/a93584/516920176162.html>.

富澤敦・森山祥文・松本勝紀・江波戸孝明・小池和喜隆・山下慎二・ダスルベル・森田格・鈴木達也・大山雄己（2022）人流シミュレーション及び社会実験型避難訓練を活用した交通防災拠点のあり方検証．「第 68 回土木計画学研究発表会・講演集」

堀宗朗・宮嶋宙・犬飼洋平・小国健二（2008）地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション．「土木学会論文集 A」, Vol.64, No.4, 1017-1036.

岡島寛・甲斐しずく・徳永慎也（2021）潜在避難者を考慮した大規模災害における避難所避難者数推移の動的モデル．「システム制御情報学会論文誌」, Vol. 34, No.2, pp.47-57.

奥村誠・仲野ゆい（2024）夏季の高気温が外出量に与える影響の統計分析．「第 38 回応用地域学会研究発表大会発表論文」

Nagata, S., Nakaya, T., Adachi, Y., Inamori, T., Nakamura, K., Arima, D., Nishiura, H. (2021) Mobility Change and COVID-19 in Japan: Mobile Data Analysis of Locations of Infection. *Journal of Epidemiology*, 31(6), 387-391.

中口毅博・杉山峻太（2021）水害発生時の避難行動シミュレーションが住民意識の変容に及ぼす効果の分析．「日本都市計画学会　都市計画報告集」， No.20, 2021 年 11 月