

モバイル空間統計を用いた人口動態に基づく地域類型化と地震対策への活用

REGIONAL CLASSIFICATION OF POPULATION DYNAMICS CHARACTERISTICS
BY MOBILE SPATIAL STATISTICS AND APPLICATION TO EARTHQUAKE COUNTERMEASURES山田 航輝^{*1}, 倉田 和己^{*2}, 福和 伸夫^{*3}

Koki YAMADA, Kazumi KURATA and Nobuo FUKUWA

This study explores the application of Mobile Spatial Statistics (MSS) to earthquake countermeasures in four parts: the first part indicates the accuracy of MSS. The second part elucidates the local disaster characteristics in Nagoya city by combining the classification of changes to the daily population trends and building collapse risk. The third part examines the risk of victims in population inflow areas who are unable to return home. The fourth part analyzes the disaster response capability by the changing trends in the ageing rate and by the staffing numbers of the fire brigade in population outflow areas.

Keywords : Local Disaster Characteristics, Mobile Spatial Statistics, Earthquake Damage Estimation, Classification, Cluster Analysis

地域災害特性, モバイル空間統計, 地震被害想定, 類型化, クラスタ分析

1. はじめに

都市における人口分布は日時によって大きく変動するため、地震発生時刻が異なれば被害様相にも差異が生じる。一方、平成25年に中央防災会議の南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループが想定した地震の発生時刻は①冬深夜5時、②夏昼12時、③冬夕方18時の3パターン^{注1)}に限られている。各地の自治体が実施している地震被害想定も多くもこれに準じている。しかし、ターミナル駅などのように特定の時間帯に人口が急増するエリアや、ベッドタウンのように日中人口が減少するようなエリアでは、災害リスクの時間変化を踏まえた被害想定が望まれる。多くの場合、地震被害想定では5年に1度実施される国勢調査人口データを基礎資料にしている。この方法は、信頼性が高い反面、最新の人口情勢や、曜日による人口の変化、一日のうちの人口の時間変化を反映できないことに課題がある。

このような背景の下、都市内滞留者の詳細な時空間分布の把握を試みる研究が大佛らによって行われている。大佛(2008)¹⁾は、パーソントリップ調査(以降、PT調査)から得られる時刻別・ゾーン別・施設種類別の滞留者に関する情報と、数値地図データから得られる施設情報(施設種類・規模・棟数・空間分布)を用いて、都市内滞留者の時空間分布を推定するモデルを構築した。また、大佛(2009)²⁾は、NHK放送文化研究所の生活時間調査を用いて平日のPT調査データを休日のPT調査データに変換し、休日の都市内滞留者の時空間分布を滞留者の属性とともに推定した。これらの手法では、10年に1度、平日を対象として実施されるPT調査を用いているため、

最新の人口動態を反映できないことや、調査時期が10月～11月と限られていること、調査範囲外からの観光客や出張者を考慮できないことなどが、課題として残っている。

近年、この課題を解決しうる人口統計データとして、NTTドコモグループが提供する「モバイル空間統計」が注目されている。これは、携帯電話ネットワークの基地局データに基づいて、任意日時の人口分布を推計した統計である³⁾。1時間刻みの人口動態が年齢、性別、居住地(契約地住所)を踏まえてメッシュ単位で把握可能であり、変動の激しい都市の人口を時空間的に把握できる。このデータを防災計画分野へ活用した事例として、2016年熊本地震における広域避難の実像を把握した船越ら⁴⁾、秦ら⁵⁾の研究がある。これらの研究は、災害発生直後の人の移動・滞留を俯瞰的に捉える事で、災害対応の高度化を目指したものである。また廣井⁶⁾らは、大規模災害発生時の疎開世帯数を算出する巨大災害時疎開シミュレーション法を構築し、2016年熊本地震を対象にモバイル空間統計を用いてその検証を行った。また、鈴木ら⁷⁾や村上⁸⁾は、新宿区をモデルケースにモバイル空間統計を用いて帰宅困難者数を推計し、対策の具体化を試みている。さらに松原⁹⁾は、観光防災と帰宅困難者対策をテーマに、モバイル空間統計の活用可能性を静岡県、東京都府中市、埼玉県を例に示している。

このように、モバイル空間統計は地震防災対策の高度化を図る上での活用が期待されているが、既存の研究では災害発生後の避難者に関する分析、あるいは新宿区のような急激な人口変動による災害リスク増大が明らかな地域を対象とした検討に留まっている。今後、

*1 東海旅客鉄道(株) 修士(工学)

*2 名古屋大学減災連携研究センター 特任准教授・博士(工学)

*3 名古屋大学減災連携研究センター 教授・工博

Central Japan Railway Company, MEng.

Designated Assoc. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, Dr.Eng.

Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, Dr.Eng.

同データを基礎自治体の対策へと活用していくためには、人口動態特性を面的に類型化し、その中から優先的に対策すべきエリアを抽出した上で、リスクの実態を把握できる方法論が必要となる。

本研究では名古屋市をモデルケースに、モバイル空間統計とクラスター分析を用いて人口動態の類型化を試みる。その上で、類型化した人口動態情報の活用例として、建物倒壊危険度との関係を分析する。さらに特徴的な人口動態を示すエリアのうち、人口流入地域では、村上⁸⁾の手法を参考に帰宅困難者に関する検討を行う。同様に人口流出地域では、年齢別人口割合の時間変化と地域防災の核を担う消防団員の移動に焦点を当て、災害対応力の変化を分析する。これら一連の手法を示すことにより、基礎自治体の地震被害想定や地域防災計画の精緻化に活用できる基礎データを提供することを目的とする。

2. モバイル空間統計の概要と特性

モバイル空間統計は、NTT ドコモが携帯電話サービスを行う基地局ごとに、基地局エリア内の携帯電話台数を定期的に集計し、住民基本台帳人口データを基に地域別・年代別の NTT ドコモ携帯の普及率を加味して、1 時間刻みの人口動態を推計したものである³⁾。データ整備範囲は NTT ドコモのサービスエリアに等しく、全国の市区町村役場を 100%カバーしている。同社の契約端末数は約 7000 万台、携帯キャリア別シェア率は 45.1% (2018 年 9 月現在) と最も高く^{注 2)}、サンプル数が大きい人口統計としての信頼性も高い。

モバイル空間統計の具体的な人口推定手順としては、①基地局の運用データを非識別処理 (個人識別性の除去)、②集計処理 (NTT ドコモ携帯の普及率を加味して人口推計)、③秘匿処理 (個人の特定に

つながる少人数エリアの削除) となっている (Fig.1)³⁾。得られるデータは、メッシュ単位あるいは行政区ごとの、年齢別・男女別の人口絶対数 (1 時間刻み) である。なお、基地局の運用データに含まれる年齢・性別の情報は携帯電話契約者のものであるため、15 歳未満および 80 歳以上については十分なサンプルが得られず、推計の対象外となっている。

Table1 は清家ら¹⁰⁾を参考にモバイル空間統計と他の主な人口統計の違いを示したものである。モバイル空間統計は、データの更新頻度や日時設定の自由度の高さの点で国勢調査や PT 調査に対して優位性がある。全数調査の国勢調査には統計情報としての信頼性が劣るものの、サンプル率が 3%程度の PT 調査 (平成 23 年中京圏^{注 3)}) と比べると信頼性は高い。一方で、PT 調査で把握可能な、移動の目的や手段は把握できないが、特定日時や曜日・時刻を考慮した分析が可能である。

Table2 に本研究で用いるモバイル空間統計データの概要を示す。以降では、2017 年 6 月 3 日 (土) を「休日」、7 月 12 日 (水) を「平日」とする。これらの日付は、大型連休を避けつつ、特段の催しがない典型的な休日・平日を表すと思われるものを選択した。大藪ら¹¹⁾を参考に、人口集中地区 (DID) において高い信頼性を持つ単位として空間解像度は 1 km メッシュを採用した。

モバイル空間統計の名古屋市における適用性を確認するため、名古屋市の総人口について年齢 (7 区分) と性別 (2 区分) に分けてそれぞれ、平成 27 年国勢調査¹²⁾との比較を行った (Table3)。国勢調査は夜間人口なので、ここで比較するモバイル空間統計は平日の 4 時台を使用した。全ての年代でモバイル空間統計が国勢調査の人

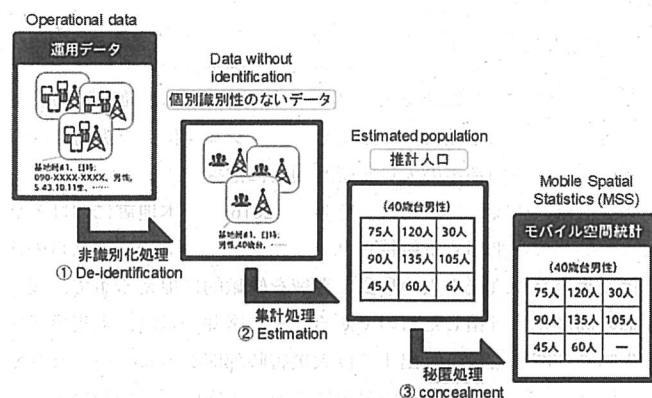


Fig.1 Procedure for creating the Mobile Spatial Statistics (MSS)

Table1 Comparison of MSS and other major demographics

	Mobile Spatial Statistics (MSS)	Population Cesus	Basic Resident Register	Person Trip Survey (PTS)
Update Frequency	○ Anytime	△ Once every five years	△ Once every a month	△ Once every ten years
Freedom of date	○ Anytime	△ Specific day	△ Specific day	△ Specific day
Survey area	○ All over Japan	○ All over Japan	○ Municipality	△ Specific area
Reliability	○ Estimate expansion of reality	○ Census	○ Census	△ Less samples
Attribute	○ Sex, Age, Residence	○ Sex, Age, Residence	○ Sex, Age, Residence	○ Sex, Age, Residence
Time Resolution	○ Every hour	-	-	○ Every hour
Visiting aims	× Impossible to grasp	-	-	○ Roughly grasp
transportation	× Impossible to grasp	-	-	○ Means and routes can be grasped

Table2 Outline of MSS used in this study

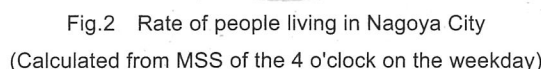
Date	Saturday, June 3, 2017	Wednesday, July 12, 2017
Weather※	Sunny	Cloudy
Ave, Max, Min degree ※	19.3, 24.7, 14.9°C	28.6, 34.4, 24.7°C
Area size	1 km square	
Target city	Nagoya city	
Time	13 hours of the day, at 4, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 18, 19, 20, 21, 22, 24	
Age	15~19, 20's, 30's, 40's, 50's, 60's, 70's (7section)	
Sex	Male, Female (2section)	
Residence (Contracted address)	Prefectures, City, Section of village	

※Record in Nagoya city by Meteorological Agency

Table3 Comparison of Nagoya City Population Census and MSS (in Nagoya City)

Age	Population Census (2015)		MSS (July 12, 2017)		Ratio	
	M [a]	F [b]	M [c]	F [d]	[c] / [a]	[d] / [b]
15-19	53,426	51,618	55,684	54,150	1.04	1.05
20's	130,728	125,865	148,184	139,846	1.13	1.11
30's	158,112	149,841	186,479	173,132	1.18	1.16
40's	181,832	172,068	218,069	198,916	1.20	1.16
50's	140,589	135,200	163,018	152,317	1.16	1.13
60's	142,060	145,273	162,295	161,940	1.14	1.11
70's	107,085	128,995	120,306	140,760	1.12	1.09
Subtotal	913,832	908,860	1,054,035	1,021,061	1.15	1.12
Total	1,822,692 [e]		2,075,096 [f]		1.14 ([e] / [f])	

1km メッシュ単位での、国勢調査人口（全年齢）と 4 時台モバイル空間統計人口（15 歳以上 80 歳未満）の割合の分布図（Fig.3）からは、約 60%のメッシュで±25%以内に収まっており、大藪ら¹¹⁾による既存研究と比較して名古屋市内では十分適用性があると判断した。割合が 1 を超える（モバイル空間統計の推計値の方が多い）メッシュには名古屋駅など都心や工業地域の名古屋港周辺が該当し、これは国勢調査には計上されない夜間滞在者の存在と考えられる。また、Fig.3 の点線で囲った緑地帯や南西部の農地で割合が 1 を超えるのは、国勢調査の人口が極端に少ないためと考えられる。



3-1. 1日を通じた人口動態による地域の類型化

ることにより、様々な情報と重ね合わせた分析を容易にするとともに、人口動態が特徴的なエリアを抽出することで、より詳細なリスクの評価（本論の4章・5章）へと繋げられるような方法論を提案する。

1 日を通じた人口動態は、曜日や時刻、立地、土地利用、公共交通機関の利便性等の様々な要因によって様相が異なる (Fig.4)。そこで 1km メッシュを単位とし、各メッシュの時刻毎の人口をパラメータとしたクラスター分析によって、類型化を試みる。このように地域の人口動態をクラスター分析で類型化する手法は岡本¹³⁾がパーソントリップ調査の個票データを用いて実施しており、地域の特徴を実態に即して把握できることが確認されている。本研究では、4 時台の人口に対する各時間帯 (6 時, 7 時, 8 時, 10 時, 12 時, 14 時, 18 時, 19 時, 20 時, 21 時, 22 時, 24 時) 人口の比をとり、12 次元のパラメータとした (Table4)。ここで 4 時台に対する差ではなく比をとったのは、名古屋市内ではメッシュ間の人口差が大きく、差を用いてクラスター分析を行うと、人口の絶対数で分類がほぼ決まってしまうためである。



Table4 Parameter in Cluster Analysis

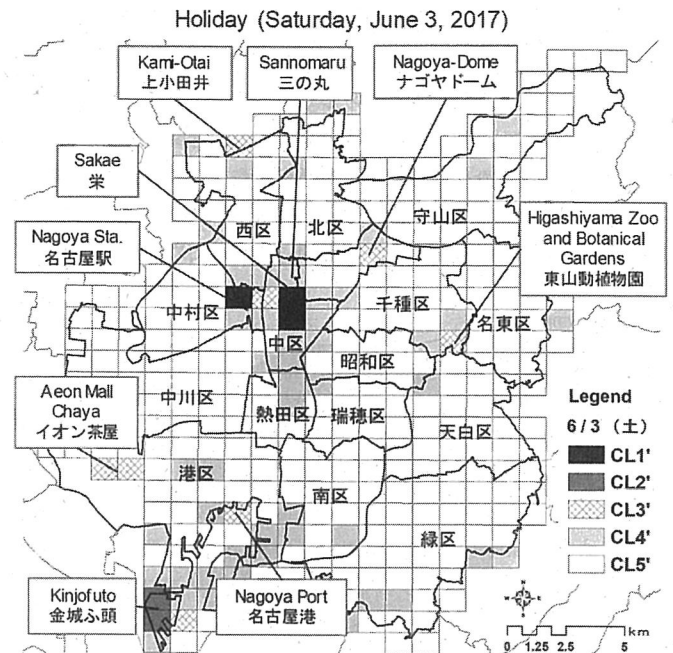
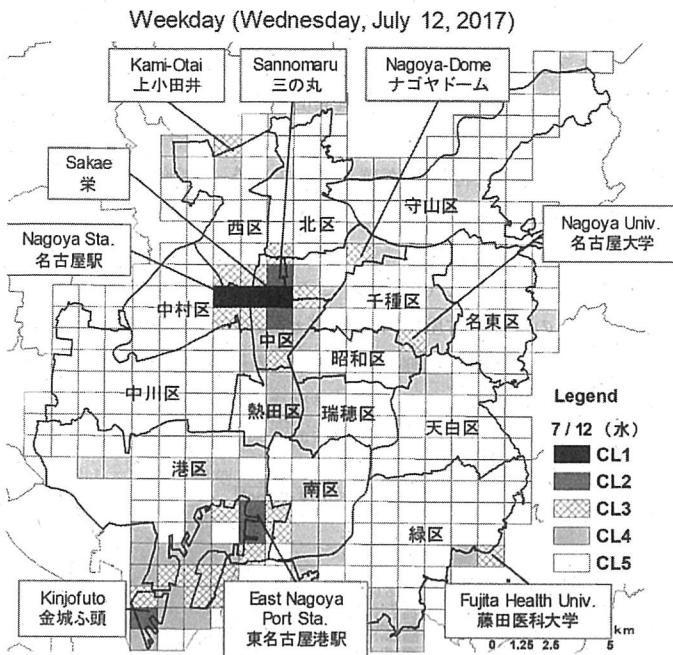
No.	Mesh-ID	Hourly Population			
		4	6		24
1	52370698	1,066	1,047		1,057
2	52370699	1,211	1,178		1,271
3	52370700	2,034	1,973		1,998
i	5236.....	A _i	B _i		M _i
Parameter		B _i / A _i			M _i / A _i
x _i					

— 2347 —

類する場合の評価式は(1)の通りであり、この値が最小になるように分類を決定する。

$$\sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} (d(x, c_j))^2 \quad (1)$$

ここに、 k : クラスター数、 c_j : クラスターの重心点を表し、距離 d はクラスター重心 2 点間のユークリッド距離である。以降でのクラスター数は、1 日を通じた人口動態の差を捉えた上で各クラスターの意味付けが行える数として、探索的に検討した結果、5 分類とした。

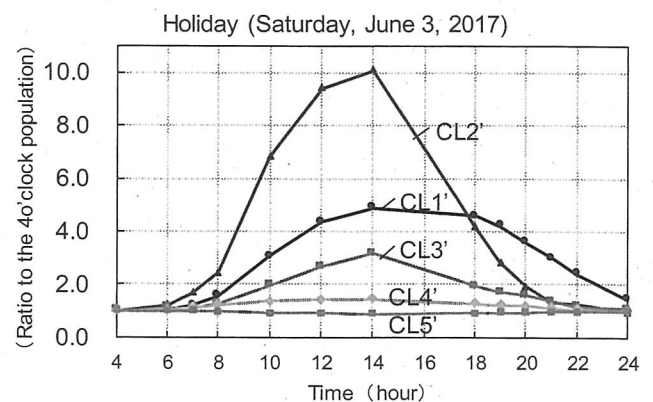
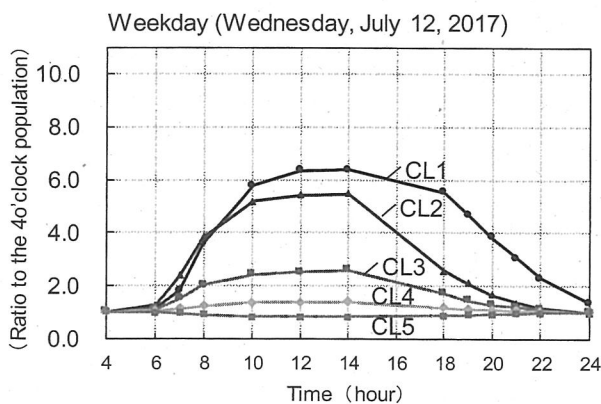


(a) Distribution of each cluster (CL)

(b) Composition of each cluster (CL)

Weekday (Wednesday, July 12, 2017)			
CL	Number of 1 km squares	Ratio (%)	Meaning of Cluster
CL1	3	0.81	City center 都心エリア
CL2	5	1.35	Working 就労エリア
CL3	21	5.68	Various bases 拠点エリア
CL4	70	18.92	Population equilibrium 人口均衡エリア
CL5	371	73.24	Population outflow 人口流出エリア
Total	370	100	

Holiday (Saturday, June 3, 2017)			
CL	Number of 1 km squares	Ratio (%)	Meaning of Cluster
CL1'	3	0.81	City center 都心エリア
CL2'	2	0.54	Leisure レジャーエリア
CL3'	8	2.16	Various bases 拠点エリア
CL4'	53	14.32	Population equilibrium 人口均衡エリア
CL5'	304	82.16	Population outflow 人口流出エリア
Total	370	100	



(c) Temporal change in the average value of the ratio to the 4 o'clock population in each cluster (CL)

Fig.5 Cluster analysis results on the weekday and the holiday in Densely Inhabited District (DID) of Nagoya city

Fig.5 に、名古屋市の人口集中地区における平日・休日の15歳～79歳のデータを対象に、クラスター数を5としてクラスター分析を行った結果を示す。また初期値依存性の問題に対しては、異なる初期値を300回選択し、評価式(1)が最小となる結果を採用することで対応した。図中の(a)は各クラスター(CL)の空間的分布を、(b)からは各CLの割合と意味付けを、(c)からは各CLにおける人口の時間変化を読み取れる。

平日のCL1～CL3 および休日のCL1'～CL3'では、昼間に人口の流入が見られる。特に都心エリアのCL1とCL1'は、名古屋駅や栄といった都心部に当たり、昼間は4時台の5～6倍程度の人口となっている。平日の人口流入は7時台ころから顕著になるが、休日では8時台以降になだらかに流入が増えており、人口流入の仕方に違いが見られる。

平日CL2は、官庁街の三の丸や、東名古屋港駅周辺の工業地域などの就労エリアが該当する。これらの地域は夜間人口が少ないわりに昼間の流入が多いため、都心エリア(CL1, CL1')並みの人口流入割合となっている。ただし人口が増えている時間帯は都心エリアよりも短く、多くの就労者が勤務終了する18時以降は一気に人口が減少している。一方、休日CL2'は、レゴランドやポートメッセなごやなどの集客施設が立地する金城ふ頭当たる。

CL3とCL3'は最大3倍程の人口流入があり、平日CL3は主要な乗換駅や大学、ナゴヤドーム等の拠点と湾岸工業エリアが該当する。一方で休日CL3'は、東山公園やイオン等の観光・商業拠点が含まれる。CL4とCL4'は昼夜間で人口が均衡するエリアで古い住宅地であり、CL5とCL5'は昼間に人口が流出するエリアで新興住宅地に当たる。

以上から、平日・休日のそれぞれにおいて1日を通じた人口動態の違いに基づいた地域の類型化が行えた。クラスター分析という数学的な手法に基づいているため、クラスター分類数による任意性はあるものの、主観を排除した分類手法であるといえる。これにより、次章以降で人口変動に伴う詳細なリスク評価を行う上で、対象とするエリアを選定するための類型化が実施できた。

3-2. 建物倒壊危険度との関係による地域災害特性の把握

前述の類型化結果の活用例として、建物倒壊危険度との関係进行分析し、地域災害特性の把握を行う。建物倒壊危険度は、東京都「地震に関する地域危険度測定調査」¹⁴⁾を参考に、地震動と液状化、および急傾斜地崩壊による建物全壊棟数を指標とし、Fig.6に示す手順で推計する。地域の相対的な危険度を比較するために、特定の地震ハザードを設定するのではなく、工学的基盤に同一の地震動の強さ(30cm/s)を設定している。Fig.7は名古屋市内における建物倒壊危険度の推計結果であり、ランクVを最も危険度が高いとした5段階で危険度を表している。地盤が軟弱でかつ木造家屋の多い、名古屋市西部で相対的に地震時の建物倒壊危険度が高いことがわかる。

Fig.8に平日と休日の、人口動態の類型と建物倒壊危険度の関係を示した。最も建物倒壊危険度が高いランクVには人口流出エリア(CL5, CL5')の一部が該当する。災害対応を担う年代の流出により、災害時要配慮者となりうる高齢者の割合が増加することで、昼間に脆弱性が高まる地域である。この問題については第5章で詳細に検討する。また、都心エリア(CL1, CL1')は建物倒壊危険度がラ

ンクIIからIIIと中程度であるが、日中は人口流入が著しいため被災者の増加により災害リスクが高まり、帰宅困難者の問題が懸念される。この点は第4章で検討する。このように、地域類型と建物倒壊危険度の関係から、建物倒壊危険度が同じ地域でも、人口変動により地域災害特性が異なることが分かる。

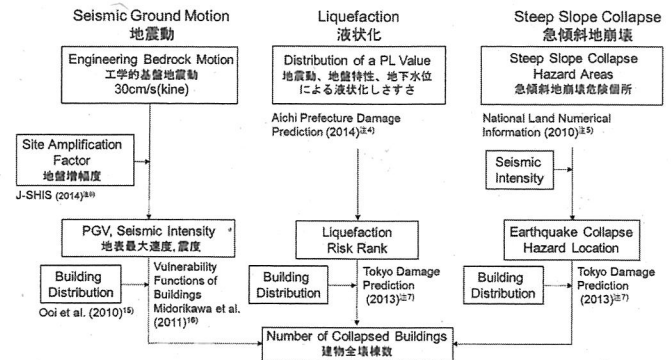


Fig.6 Estimation procedure of building collapse risk

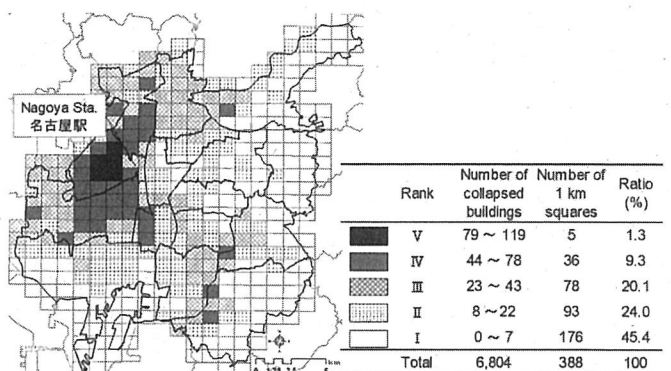


Fig.7 Building collapse risk distribution in Nagoya city

4. 昼間人口流入地域における帰宅困難者に関する分析

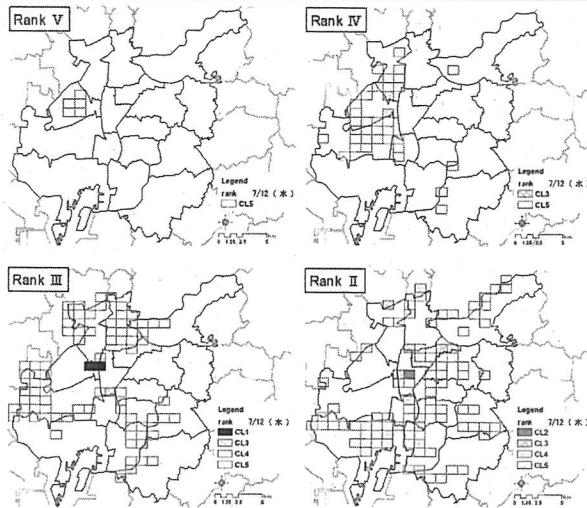
第3章に示したクラスター分析による類型化では、都心エリア(CL1, CL1')や平日の就労エリア(CL2), 休日の集客エリア(CL2')では、昼間の人口流入により、時間帯によって被災者の数や属性が全く異なることが明らかになった。これらの地域では、大量の流入人口がもたらす帰宅困難者問題が懸念される。

本章では、名古屋駅周辺(CL1, CL1')と東名古屋港駅周辺(平日CL2), 金城ふ頭(休日CL2')において、村上⁸⁾および東京都の被害想定(2006)^{注8)}を参考にして帰宅困難者数を推計する。具体的には、モバイル空間で得られる契約地情報(1kmメッシュごとの、市町村別の契約者数合計)から当該市町村の役所を居住地とみなし、そこまでの距離が10km未満は全員帰宅可能、10km以降20km未満は1kmごとに帰宅困難者になる割合が直線的に10%ずつ増加し、20km以上は100%帰宅困難者となると仮定した。この手法を用いて帰宅困難者数を推計し、既存のPT調査を用いた推計との比較、および各エリアに必要な帰宅困難者対策の考察を行う。

Fig.9^{注9)}に帰宅困難者の推計を行う名古屋駅周辺の対象エリアを示す。対象エリアは第3次名古屋駅周辺地区都市再生安全確保計画

Weekday (Wednesday, July 12, 2017)

CL	Meaning of Cluster	Building Collapse Risk Rank					Total
		I	II	III	IV	V	
CL1	City center	1		2			3
CL2	Working	4	1				5
CL3	Various bases	13	4	2	2		21
CL4	Population equilibrium	37	21	12			70
CL5	Population outflow	103	67	62	34	5	271
Total		158	93	78	36	5	370



Holiday (Saturday, June 3, 2017)

CL	Meaning of Cluster	Building Collapse Risk Rank					Total
		I	II	III	IV	V	
CL1'	City center	1	1	1			3
CL2'	Leisure	2					2
CL3'	Various bases	5	2	1			8
CL4'	Population equilibrium	31	10	10	2		53
CL5'	Population outflow	119	80	66	34	5	304
Total		158	93	78	36	5	370

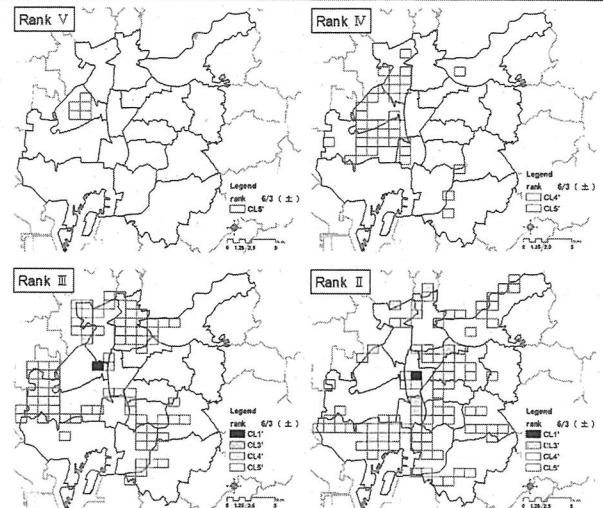


Fig.8 Relationship between cluster analysis results and building collapse risk

(以下、第3次計画)^{注10)}と同様の範囲とした。第3次計画では、PT調査を用いて帰宅困難者数の推計が行われており、これと比較して、モバイル空間統計による帰宅困難者の推計値が大きく外れていなければ、以降で他の地域に同手法を適用できると考えられるためである。Fig.10は、名古屋駅周辺における発災時間帯別の平日・休日滞留者・帰宅困難者数と、第3次計画においてPT調査から推計された帰宅困難者数を示している。第3次計画では、平日14時台で202,000人の滞留人口と85,000人の帰宅困難者が推計されている。一方、モバイル空間統計を用いた推計では、平日最大の滞留者数は12時台の187,000人であり、第3次計画と概ね一致する。一方、帰宅困難者数の最大値は平日12時台の約58,000人であり、第3次計画より27,000人(32%)程度少ない。これは、モバイル空間統計が14歳以下および80歳以上の人口を含んでいないことを考慮すれば、妥当な推計値^{注11)}であると考えられる。

ところで、第3次計画で想定されている、帰宅困難者向けの退避施設の収容人数は約22,000人と、帰宅困難者の数に対して圧倒的に足りない。第3次計画で示されているように、企業等における一斉帰宅の抑制や、行政による災害情報の適切な提供が必要である。一方、モバイル空間統計では休日の14時～18時台にかけて44,000人程度の帰宅困難者が推計された。休日は退避施設が使用できない等の事態が想定される。

Fig.11に居住地別の帰宅困難者数を示す。昼間においては、比較的遠距離の岐阜県民や三重県民の帰宅困難者も多く生じている。また、その他の都道府県からの帰宅困難者は平日・休日ともに18時台が最大で7,000人近くに上る。第3次計画による退避施設は発災後24時間までの利用が想定されているが、遠方からの来訪者は公共交通機関の停止により長期間の滞在を余儀なくされる可能性が高い。



Fig.9 Target area for estimation of the number of victims unable to return home (Around Nagoya Sta.)

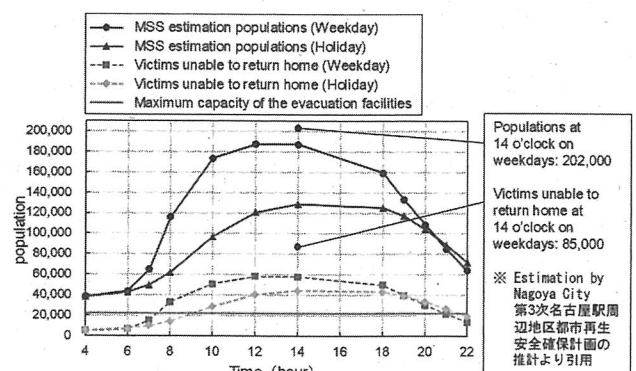


Fig.10 Temporal change of MSS estimation populations and the number of victims unable to return home (Around Nagoya Sta.)

Fig.12^{註9)}は東名古屋港駅周辺(平日 CL2)の分析対象エリアを、Fig.13は同エリアにおける発災時間帯別の平日・休日滞留者・帰宅困難者数と平成27年国勢調査人口¹²⁾を示している。東名古屋港駅周辺には大規模工場が立地しているため、平日14時台における滞留者数が約5,100人であり、帰宅困難者数の最大推計値は同じく14時台の約1,400人である。なお、同範囲の平成27年国勢調査での人口は71人であるが、モバイル空間統計では平日・休日ともに4時台で夜間就労者とみられる約600人の存在が確認できる。これらの就労者は工場近隣に居住しているため推計上は帰宅困難者とはならないが、工場内でそれだけの人間が被災するというのは検討すべき要因である。

また、Fig.14の居住地別帰宅困難者数を見ると、8時台から14時台にかけて愛知県北西部の一宮市在住の帰宅困難者数が80~100人程度、三重県の桑名市在住の帰宅困難者が50~60人程度存在する。これらの就労者は公共交通機関の停止により中長期の滞在を余儀なくされる可能性があり、水・食糧等の備蓄が求められる。このように、本手法によって帰宅困難者問題の発生地域やその規模などの検討が可能となる。

Fig.15^{註9)}は金城ふ頭(休日 CL2')の分析対象範囲を、Fig.16は同範囲における発災時間帯別の平日・休日滞留者・帰宅困難者数を示している。金城ふ頭には平日・休日を通じて催事を行っているポートメッセなごやと大規模レジャー施設のレゴランド・ジャパン・リゾートなどが立地している。名古屋駅や東名古屋港駅周辺とは逆に、休日の滞留者数が突出しており、14時台で最大6,600人程度である。

さらに、東名古屋港駅周辺と比べ遠方からの来訪者の割合が多いため、帰宅困難者数は14時台で最大3,700人程度となり、平日14時台の滞留者数を上回る水準となった。さらに、Fig.17の居住地別帰宅困難者数分布を見ると、平日に比べ休日の方が帰宅困難者の居住지가広範に及ぶことが確認できる。このようなリスクの把握は、催事の事業主のみならず、インバウンド需要により観光産業の発展をねらう地元行政にとっても、災害対応の立案や、来訪者の安心安全・信頼の確保の上で重要であると考えられる。

5. 屋間人口流出地域における災害対応力に関する分析

クラスター分析により日中の人口流出エリアに分類された地域は、昼間の災害において被災人口自体は夜間よりも少ないものの、年齢別の人口割合の変化に焦点を当てると災害対応の担い手が流出し、災害時要配慮者となりうる高齢者の割合が増加している可能性がある。本章では、モバイル空間統計に含まれる契約者の年齢情報を用いて、人口流出エリア(CL5、CL5')における高齢化率の時間変動の有無と、地域防災の中核を担う消防団員の勤務地データ^{注12)}から、地域の脆弱性および災害対応力の時間変化を分析する。

平日 CL5 と休日 CL5' のそれぞれ4時台・14時台における高齢化率分布と各クラスター(CL1~CL5およびCL1'~CL5')における高齢化率の時間変動をFig.18及びFig.19に示す。モバイル空間統計のデータ上の制限から、ここでの高齢化率は15歳~79歳人口に対する65歳~79歳人口の割合で示している。Fig.19からは平日 CL5 と休日 CL5' のみ昼間に高齢化率が増加することが分かり、Fig.17では特に平日の中村区西部や中川区、守山区、緑区等で高齢化率の増加

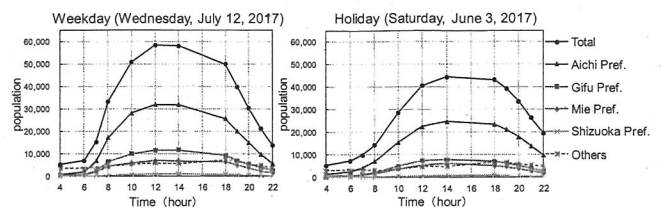


Fig.11 The number of victims unable to return each residential areas (Around Nagoya Sta.)

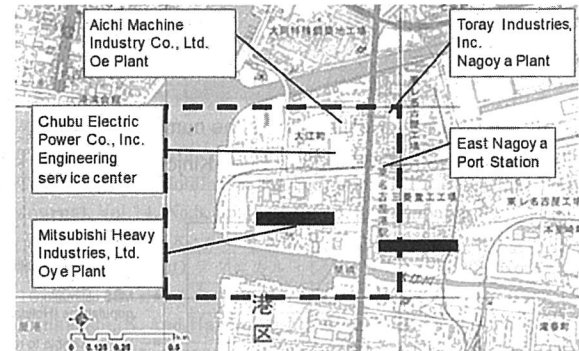


Fig.12 Target area for estimation of the number of victims unable to return home (Around East Nagoya Port Sta.)

※ The black painted part was due to deleting the description different from January 1, 2019 as of now

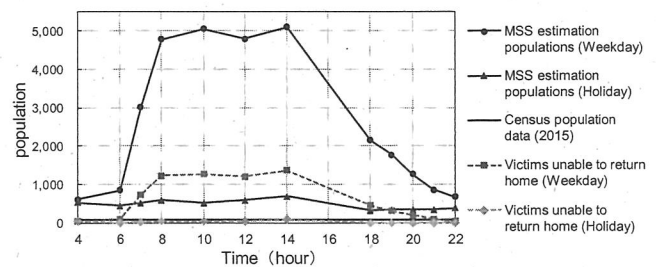


Fig.13 Temporal change of MSS estimation populations and the number of victims unable to return home (Around East Nagoya Port Sta.)

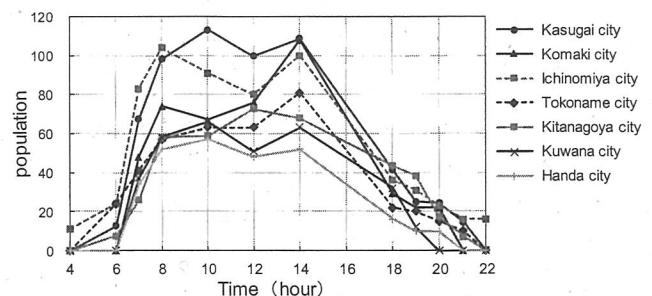


Fig.14 The number of victims unable to return each residential areas (Around East Nagoya Port Sta.) (Top 7 municipalities with a large number of victims unable to return home at 14 o'clock)

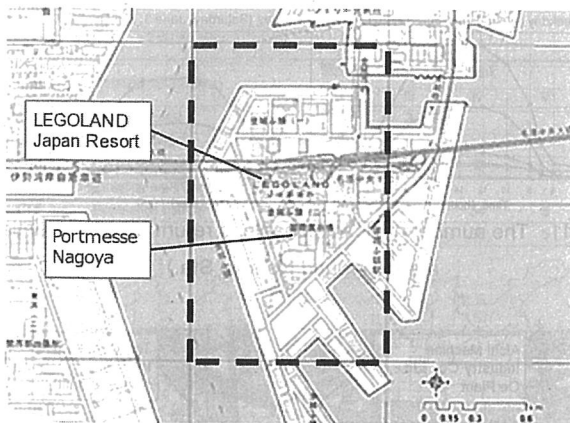


Fig.15 Target area for estimation of the number of victims unable to return home (Around Kinjofuto)

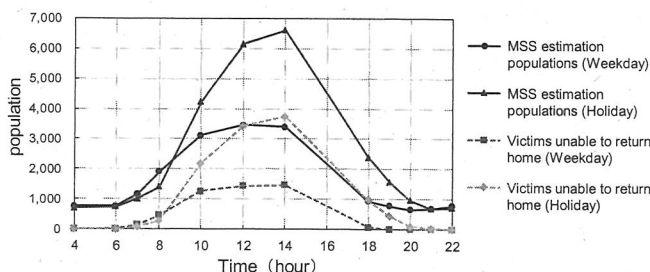


Fig.16 Temporal change of MSS estimation populations and the number of victims unable to return home (Around Kinjofuto)

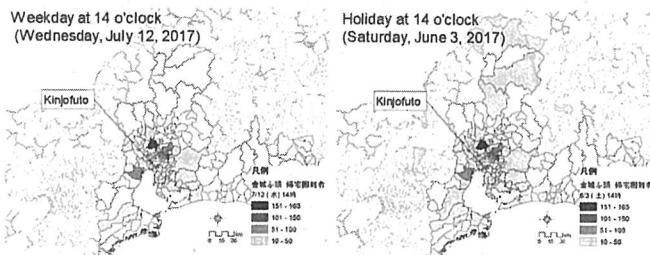


Fig.17 Distribution of victims unable to return each residential areas (Around Kinjofuto)

が大きい。昼間に高齢化率が 30%を超えるメッシュもある。一方、休日昼間の高齢化率の高まりは平日に比べて小さい。 Fig.20 日 CL5 と休日 CL5'における男女別の高齢化率の時間変動を示す。男女別にみると、平日・休日共に夜間では女性の高齢化率の平均値が男性よりも高い。しかし、平日の昼間にかけてはほぼ一致することが分かる。これは、就労や就学等による男性の流出の影響と考えられる。

Fig.21 名古屋市における学区別の消防団員数と、勤務地が居住区外の消防団員の割合の分布を示す。名古屋市における消防団員の構成に係るデータは、平成 30 年 4 月 1 日時点のものを用いる。データの概要は下記の通りである^{注12)}。

- ① 消防団員個人データ (団名 (学区名), 階級, 性別, 年齢, 勤務場所区分)
 - ② 消防団員実員状況 (定員, 実員, 充足率)
- 名古屋市周縁部の中村区, 守山区, 名東区, 緑区では, 消防団員

の内 40%以上が居住区外に勤務している学区が半数以上を占めており, 中には 80%を超える学区も存在する。Fig.18 平日における人口流出エリア (CL5) の高齢化率が増加するエリアと, 居住区外に勤務している消防団員割合が大きい学区とはある程度対応がある。すなわち, そのような地域は, 昼間において高齢化率増大と消防団員流出の相互作用による災害対応力の不足が懸念される。

以上の分析に加え, CL5 には建物倒壊危険度が高い地域も含まれている。そのような地域では, 災害対応力が不足することを前提に, 建物の建替えや耐震補強, 家具の固定などの事前準備の重要性が高い。また, 共助や互助を通じた要配慮者の把握や支援手段の確認が必要となる。

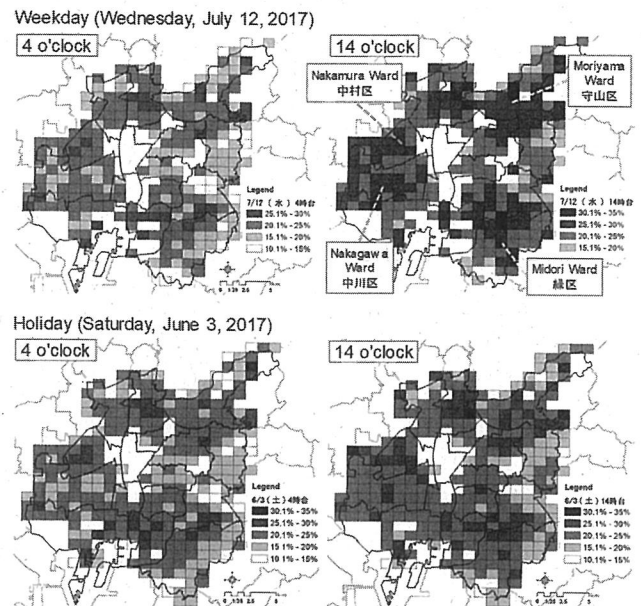


Fig.18 Distribution of aging rate in CL5 (weekday) and CL5' (holiday)

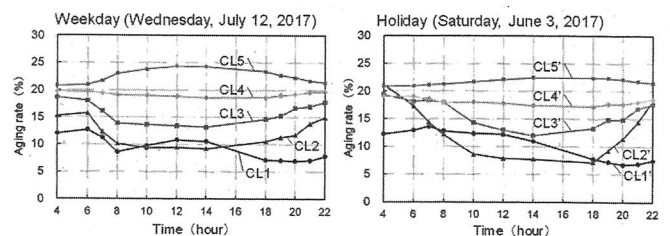


Fig.19 Temporal change of the average value of aging rate in each cluster (CL)

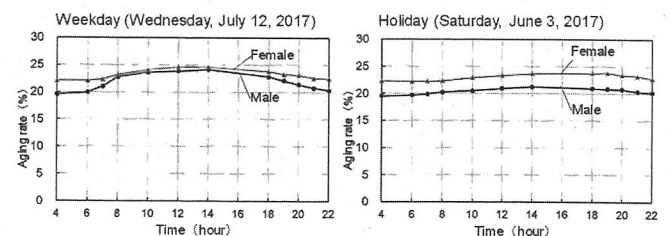


Fig.20 Temporal change of the average value of aging rate by gender in CL5 (weekday) and CL5' (holiday)

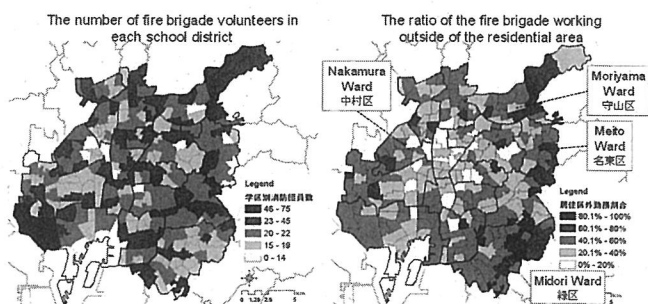


Fig.21 The number of fire brigade volunteers in each school district and the ratio of the fire brigade working outside of the residential area

6. まとめ

本研究では、自治体での地震被害想定や地域防災計画を精緻化することを目的に、人口動態に関する基礎データを提供するための手法として、モバイル空間統計とクラスター分析を用いた人口動態に基づく類型化を行った。さらにその活用方法として、建物倒壊危険度との関係の分析や、人口流入エリア、人口流出エリアそれぞれにおける詳細なリスク評価の例を示した。本研究により得られた主な成果は次のとおりである。

- ・ 1 日を通じた人口動態の違いに基づいて、地域を類型化するための手法を構築した。名古屋市を対象に、k-means 法を用いたクラスター分析によって、1 km メッシュ単位での人口動態の地域差を明瞭に区分できることを示した。
- ・ 人口動態に基づく類型化と建物倒壊危険度との関係から、災害特性の把握を行った。建物倒壊危険度が同じでも、人口動態が異なることで、各地域のリスクが異なることが確認できた。
- ・ 昼間の人口流入が著しい地域に着目し、帰宅困難者に関する分析を行った。既存の PT 調査による推計では扱えない、近隣県以外からの外来者数を考慮することで、帰宅困難者対策の基礎データを得ることができた。
- ・ 昼間人口が流出する地域では、高齢化率の時間変化と消防団員の勤務地データ^{注11)}から、災害対応力の変化に関する分析を行った。平日昼間に高齢者の割合が増加し、かつ消防団員が流出することで、特に災害リスクが高まる地域を明らかにした。

本手法を用いることで、自治体は、帰宅困難者や災害時要配慮者の問題をより具体的に検討することができる。また、大規模工場等の事業者は、事業の継続・早期復旧へ向けて、従業員の帰宅・参集の分析が可能となる。今後の課題として、モバイル空間統計に含まれる居住地（契約地）情報をさらに活用し、遠方からの来訪者が多い地域、遠方への出勤者が多い地域等を抽出することで、より詳細に人の移動によるリスクを把握していきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、株式会社ドコモ CS 東海法人営業部の方々には、モバイル空間統計の特性理解についてご助言をいただいた。また、名古屋市の消防団員に関するデータのご提供には山田尚功氏（名古屋市消防局総務部職員課人事係）のご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Osaragi, T.: Estimation of Spatio-Temporal Distribution of Population Using Detailed Digital Map, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Vol.73, No.634, pp.2674-2678, 2008. 12 (in Japanese)
大佛俊泰:数値地図を用いた都市内滞留者の時空間分布推定, 日本建築学会計画系論文集, 第 73 巻, 第 634 号, 2673-2678, 2008. 12
- 2) Osaragi, T. and Shimada, R.: Spatio-Temporal Distribution on Weekdays and Holidays for Estimating Human Damages from Devastating Earthquake, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Vol.74, No.635, pp.145-152, 2009. 1 (in Japanese)
大佛俊泰・島田廉: 平日と休日における都市内滞留者の時空間分布推定と地震被害想定への応用, 日本建築学会計画系論文集, 第 74 巻, 第 635 号, 145-152, 2009.1
- 3) Terada, M., Nagata, T., and Kobayashi, M.: Population Estimation Technology for Mobile Spatial Statistics, NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.14, No.3, pp.10-15, 2013. 3 (in Japanese)
寺田雅之・永田智大・小林基成: モバイル空間統計における人口推計技術, NTTDOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol.20, No.3, pp.11-16, 2012. 10
- 4) Funakoshi, K. and Hatayama M.: A study on the method to identify shelters and its support measures, IPSJ SIG Technical Reports, Vol. 2017-IS-139, No.3, 2017. 3 (in Japanese)
船越康希・畑山満則: 熊本地震における避難所の同定手法の提案とそれを用いた支援政策に関する研究, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-IS-139, No.3, 2017. 3
- 5) Hada, Y., Sekiya, N. and Hiroi U:Evacuation Behaviors in Wide Area beyond the Area of Municipalities in the 2016 Kumamoto Earthquake, Journal of the Japan Society for Disaster Information Studies, No.15-2, pp.255-266, 2017. 7 (in Japanese)
秦康範・関谷直哉・廣井悠: 2016 年熊本地震における市町村を超える避難行動ー人口統計データからの考察ー, 災害情報, No. 15-2, pp.255-266, 2017. 7
- 6) Hiroi, U, Saito, K., and Fukuwa, N.: The study of construction and verification about Refuge Simulation after Catastrophic Disaster - Case Study for Quantitative Examination about Nankai Trough Megathrust Earthquake-, Journal of the City Planning of Japan, Vol.53, No.3, pp.897-904, 2018. 10 (in Japanese)
廣井悠・斉藤健太・福和伸夫: 巨大災害疎開シミュレーションの構築と検証ー南海トラフ巨大地震を対象とした疎開行動の量的検討ー, 日本都市計画学会都市計画論文集, Vol.53, No.3, pp.897-904, 2018. 10
- 7) Suzuki, T., Yamashita, M., and Terada, M.: Using Mobile Spatial Statistics in Field of Disaster Prevention Planning, NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.14, No.3, pp.37-45, 2013. 1
- 8) Murakami, M.: Applicability of Mobile Spatial Statistics for Estimating the Number of Victims Unable to Return Home, City Planning Review, Vol.306, pp.64-67, 2013. 12 (in Japanese)
村上正浩: 帰宅困難者の推計へのモバイル空間統計の活用, 日本都市計画学会, 都市計画, Vol.306, pp.64-67, 2013. 12
- 9) Matsubara, N.: Grasping dynamic population by "Mobile Spatial Statistics" From the viewpoint of tourism disaster and stranded persons, Journal of the Information Processing and Management, Vol.60, No.7, pp.493-501, 2017. 10 (in Japanese)
松原徳和: モバイル空間統計による動態人口把握ー観光防災, 帰宅困難者対策の観点から, 情報管理, Vol.60, No.7, pp.493-501, 2017. 10
- 10) Seike, T., Mimaki, H. and Morita, S.: Study on the Population Characteristics in a City Center District Utilizing Mobile Spatial Statistics, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Vol.80, No.713, pp.1625-1633, 2015. 7 (in Japanese)
清家剛・三牧浩也・森田祥子: モバイル空間統計を活用した都市拠点地区の人口特性分析に係る研究ー昼夜間を通じて都市の実態人口分布を捉える新たな統計手法, 日本建築学会計画系論文集, 第 80 巻, 第 713 号, pp.1625-1633, 2015. 7
- 11) Oyabu, Y., Terada, M., Yamaguchi, T., Iwasawa, S., Hagiwara, J. and

- Koizumi, D.: Evaluating Reliability of Mobile Spatial Statistics, NTT DOCOMO Technical Journal, Vol.14, No.3, pp.16-23, 2013. 1
- 12) Ministry of internal Affairs and Communications Statistics Bureau : Population Census in 2015 (accessed 2019.2.1) (in Japanese)
総務省統計局 : H27 年国勢調査結果, <https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.html>, 2015 (参照 2019.2.1)
- 13) Okamoto, K.: Katsudoubetsu tairujinko kara mita Nagoyashi no jikukankouzo (Spatio-temporal structure of Nagoya city from the distribution of population by activity), The journal of the Faculty of Literature, Nagoya University. History, 110, pp.161-174, 1991 (in Japanese)
岡本耕平 : 活動別滞留人口からみた名古屋市の時空間構造, 名古屋大学文学部研究論集 (史学), 110, pp.161-174, 1991
- 14) Bureau of Urban Development Tokyo Metropolitan Government : Community Earthquake Risk Assessment Study, Vol.8, 2018. 2 (accessed 2019.2.1) (in Japanese)
東京都都市整備局 : 地震に関する地域危険度測定調査報告書 (第 8 回), http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/download/kiken.do_01.pdf?1803, 2018. 2 (参照 2019.2.1)
- 15) Ooi, M., Ishibashi, K. and Fujiwara, H.: Development of the Building Structure Database for Seismic Risk Evaluation, The 13th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.1708-1715, 2010 (in Japanese)
大井昌弘・石橋圭太・藤原広行 : 地震リスク評価のための全国建物分類データベースの開発, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1708-1715, 2010
- 16) Midorikawa, S., Ito, Y. and Miura, H.: Vulnerability Functions of Buildings based on Damage Survey Data of Earthquakes after the 1995 Kobe Earthquake, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.11, No.4, pp.34-47, 2011 (in Japanese)
翠川三郎・伊東佑記・三浦弘之 : 兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻, 第 4 号, pp.34-47, 2011

注

- 注 1) 内閣府中央防災会議「南海トラフ巨大地震の被害想定項目及び手法の概要」(2013 年 3 月)の被害想定的前提条件(想定シーン)による。
- 注 2) 携帯電話の事業者別契約数は一般社団法人電気通信事業者協会により下に公表されている。本研究では、2018 年 9 月の実績を参考にした。
(<https://www.tca.or.jp/database/index.html>)
- 注 3) 中京都市圏総合都市交通計画協議会の第 5 回パーソントリップ調査(平成 23 年調査)「国際競争力と住みやすさを備えたモビリティ首都: 中京都市圏」を目指して (http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/chukyo-pt/persontrip/pdf/h26_pt_2609.pdf) によると、中京都市圏の平成 23 年調査時の人口は約 1,000 万人で、約 31 万人分の調査結果を得ている。ゆえに、第 5 回中京都市圏パーソントリップ調査(平成 23 年 10 月~11 月実施)のサンプル率は約 3%といえる。
- 注 4) 愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査報告書(2014 年 3 月)において推計された PL 値を使用している。詳細は下記に公表されている。
(<http://www.pref.aichi.jp/bousai/2014higaiyosoku/greenbooknew2.pdf>)
- 注 5) 愛知県提供資料より作成された国土数値情報の土砂災害危険箇所データ(2010 年)を使用している。
- 注 6) 防災科学技術研究所の地震ハザードステーション(J-SHIS)からダウンロードできる表層地盤データ(2014 年 12 月)を使用した。
- 注 7) 液状化・急傾斜地崩壊による建物全壊率は、南海トラフ巨大地震等による東京の被害想定報告書(2013 年 5 月)の第 3 部被害想定手法, 4-2 各被害の想定手法による値を使用している。
- 注 8) 首都直下型地震による東京の被害想定報告書の「手法編 8 帰宅困難者」に示されているように、既存のパーソントリップ調査を用いた帰宅困難者の推計では、滞留場所から自宅までの距離を指標にしている。一方、本研究では、モバイル空間統計のデータの制限から、契約地情報の当該市町村の役所までの距離を指標にしている。
- 注 9) 国土交通省国土地理院の電子国土基本図(地図情報, 2014 年)を背景図として作成している。
- 注 10) 大規模な地震が発生した場合における滞在者等の安全の確保を図るた

めに必要な施設整備等に関する計画で、官民が連携した多様な主体で構成される協議会により作成される。名古屋駅周辺における第 3 次計画は平成 30 年 5 月に策定された。詳細は下記の通り。

(<http://www.city.nagoya.jp/jutakutoshi/cmsfiles/contents/0000075/75609/3.pdf>)

注 11) 平成 30 年 10 月 1 日現在の愛知県の年齢別人口では、14 歳以下および 80 歳以上の人口は全年齢のおよそ 20%にあたる。そのため、この年代を含まないモバイル空間統計による推計は、仮に第 3 次計画と全く同じ精度だったとしても、およそ 20%程度の過小評価となるはずである。

注 12) 名古屋市消防局総務部職員課から提供を受けた。平成 30 年 4 月 1 日時点の名古屋市の消防団員に関するデータである。

REGIONAL CLASSIFICATION OF POPULATION DYNAMICS CHARACTERISTICS BY MOBILE SPATIAL STATISTICS AND APPLICATION TO EARTHQUAKE COUNTERMEASURES

*Koki YAMADA ^{*1}, Kazumi KURATA ^{*2} and Nobuo FUKUWA ^{*3}*

^{*1} Central Japan Railway Company, M.Eng.

^{*2} Designated Assoc. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, Dr.Eng.

^{*3} Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, Dr.Eng.

The actual situation of population distribution in cities varies greatly depending on the date and time, and the earthquake occurrence time can make a big difference to the extent of damage. As estimated by the national government and the local municipality, the earthquake occurrence times follow three patterns: (1) winter at 5 p.m., (2) summer at noon, and (3) winter at 6 p.m. Such damage estimations consider data from a census conducted once every five years as demographics. Although the reliability is high, the problem is that the findings cannot reflect the recent population situation, consider the trend of population by the day of the week, or reflect a realistic picture of the daytime population dynamics because these are statistics pertaining to a night population. NTT DOCOMO has developed a new technique to determine population statistics called Mobile Spatial Statistics (MSS), which estimates the actual population based on mobile phone operation data. It can serve as a tool to understand the population distribution of cities with rapid fluctuations. However, there are few studies that focus on understanding the population dynamics of a single day at times of normalcy and clarifying issues on local disaster response using MSS. Therefore, this study indicates the possibility of the application of MSS in times of normalcy to earthquake damage estimation and disaster prevention plans.

This study consists of four parts. The first part reveals the features and accuracy of MSS by comparing them with population census data. In Nagoya city area, MSS at 4 a.m. on a weekday exceeded the census population data in all ages because about 10% of the MSS's population comprised visitors from other municipalities. However, the excess rate was 4% to 20%, thereby showing that the MSS maintains accuracy.

The second part elucidates the local disaster characteristics of Nagoya city by combining the classification of daily population trends and building collapse risk on a weekday (Wednesday, July 12, 2017) and on a holiday (Saturday, June 3, 2017). Classifications into five characteristics based on daily population trends were performed using cluster analysis by MSS on the population within a 1 km square. By combining those classification results with building collapse risk, it is clear that there are differences in the areas and time zones in which the risk of disaster increases.

The third part, with regard to population inflow areas by classification results, examines the risk of victims who are unable to return home. A past estimation used the Person Trip Survey (PTS), which has been conducted once every 10 years on weekdays in each city in Japan. This study estimates the number of victims unable to return home by using MSS. Therefore, it considers not only the latest population data but also that of the holidays. Using it together with the PTS could lead to formulating detailed measures.

The fourth part analyzes changes in local disaster response capability based on changing trends in the aging rate and the composition of fire brigade volunteers in population outflow areas by classification results. In particular, during daytime on weekdays, there are areas and time zones in which disaster risk will increase because the proportion of elderly people who require assistance during a disaster increases, and the fire brigade often work outside of the area.

A series of analysis results using MSS can effectively serve as basic data for earthquake damage estimation and disaster prevention plans considering the day of the week and time.

(2019年3月10日原稿受理, 2019年8月8日採用決定)