

修士論文

平常時・避難時における人の流れを考慮した 道路網のリスク分析

藤井 公大

2018 年 3 月 11 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

藤井 公大

審査委員：

笠原 正治 教授 (主指導教員)

安本 慶一 教授 (副指導教員)

笹部 昌弘 准教授 (副指導教員)

平常時・避難時における人の流れを考慮した 道路網のリスク分析*

藤井 公大

内容梗概

大規模災害に対しては、災害発生前後の防災と減災の両面での対策が重要となる。減災の観点では、スマートフォンなどのモバイル端末を用いた避難誘導方式やアプリケーションの研究開発が進められている。一方、防災の観点では、地震等の災害時に沿道建物の倒壊により道路が閉塞する確率（道路閉塞確率）や人の流動を表現したデータ（人の流れデータ）が一般に公開されている。本論文では、避難誘導方式・道路閉塞確率・人の流れデータに基づく、平常時・避難時の人の流れを考慮した道路網のリスク分析手法を提案する。まず、各道路の平常時の利用頻度（平常時道路需要）を人の流れデータを用いて導出する。次に、平常時道路需要を避難者の避難開始位置の地理的分布とみなし、避難時の経路選択を考慮した辺媒介中心性を用いることで、各道路の避難時における利用頻度（避難時道路需要）を導出する。道路閉塞確率と避難時道路需要を組み合わせることで、避難時に道路閉塞と遭遇するリスク（閉塞道路遭遇リスク）の高い道路を検出する。数値実験により、提案手法を用いることで閉塞道路遭遇リスクの高い道路が検出可能であることを示す。また、平常時の人の流れ、避難行動、災害発生時刻によって、検出される道路が空間的に変化することを示す。

キーワード

大規模災害, 道路ネットワーク, 人の流れデータ, 道路閉塞確率, 避難誘導方式

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, NAIST-IS-MT1651092, 2018年3月11日.

Road Network Risk Analysis Considering People Flow under Ordinal and Evacuation Situations*

Kodai Fujii

Abstract

Both disaster prevention (pre-disaster approach) and disaster risk reduction (post-disaster approach) play important roles to mitigate the damage from large-scale disasters. From the viewpoint of disaster risk reduction, there have been studies on evacuation guiding schemes and applications using evacuees' mobile devices, e.g., smart phones. On the other hand, disaster prevention has also been studied mainly on geographical information analysis, e.g., road blockage probability and people flow data. The road blockage probability is the probability that the corresponding road is blocked due to collapse of roadside buildings when an earthquake occurs. The people flow data expresses the people flow in usual time. In this thesis, with the help of evacuation guiding schemes, road blockage probability, and people flow data, we propose a road network risk analysis approach that considers people flow in both ordinal and evacuation situations. First, the proposed approach derives normal road demand, which is the degree of road usage at a certain interval in an ordinal situation, from the people flow data. Then, it calculates evacuation road demand, which is the degree of road usage at a certain interval in an evacuation situation, by regarding the normal road demand as the geographical distribution of the initial locations of evacuees and applying edge betweenness centrality considering evacuation route selection.

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651092, March 11, 2018.

Finally, it detects roads with high risk of encountering blocked road segments by combining the road blockage probability and evacuation road demand. Through numerical experiments, we show the proposed approach can detect such high-risk roads. Furthermore, we show the detected roads spatially change according to the people flow in ordinal situations, evacuation behavior, and disaster occurrence time.

Keywords:

Large scale disaster, Road network, People flow data, Road blockage probability, Automatic evacuation guiding

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究	2
2.1 道路網の特性分析	2
2.2 領域内のリスク分析	3
3. 平常時の人の流れ	4
3.1 人の流れデータ	5
3.2 平常時道路需要	6
4. 避難時の人の流れ	7
4.1 モバイル・クラウド連携型自動避難誘導	7
4.2 リスク考慮型避難経路選択	8
4.3 避難時道路需要	8
5. 平常時・避難時の人の流れを考慮した道路網のリスク分析手法	10
6. 実データに基づく評価	11
6.1 評価モデル	11
6.2 人の流れデータとリスク考慮型経路選択に基づく分析	13
6.3 平常時道路需要の重要性	14
6.4 避難行動の違いによる影響	16
6.5 災害発生時刻の違いによる影響	18
7. まとめ	21
謝辞	22
参考文献	23

図 目 次

1	名古屋市中川区荒子のリスクマップ	9
2	名古屋市中川区荒子地区の地図	12
3	人の流れデータとリスク考慮型経路選択に基づく分析結果 (8 時台)	13
4	均一な平常時道路需要とリスク考慮型経路選択に基づく分析結果 (8 時台)	14
5	リスク考慮型経路選択における避難時道路需要差の分析結果 (8 時台)	15
6	人の流れデータと最短経路選択に基づく分析結果 (8 時台)	16
7	最短経路選択における避難時道路需要差の分析結果 (8 時台)	17
8	人の流れデータとリスク考慮型経路選択に基づく分析結果 (17 時台)	19
9	リスク考慮型経路選択における避難時道路需要差の分析結果 (17 時 台)	20

表 目 次

1	人の流れデータの例	5
2	地図情報	11

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、被災地の多くの地域で鉄道や道路などの交通機関の多くが途絶し、約9割の被災者が徒歩や自動車で避難していたことがわかっている [1]。また、東日本大震災では通信インフラストラクチャ（通信インフラ）も被災したことで、安否情報・避難情報・行政情報などの様々な重要性の高い情報を被災者が円滑に収集・発信することができなかった事例が多く報告されている [2]。このような問題に対しては、災害発生後の減災、災害発生前の防災の両面での取り組みが重要となる。

減災を想定した取り組みとしては、スマートフォンなどのモバイル端末を用いた避難誘導方式やアプリケーション（アプリ）の研究開発が進められている [3–5]。[3]で開発されている避難誘導アプリは、アプリ内に保存された地図情報と避難所の位置情報を用いることで、オフライン環境でも避難所までの経路を提示することができる。さらに、モバイル端末のカメラを用いることで拡張現実（AR: Augmented Reality）による直感的な避難誘導を可能としている。このアプリはすでに関西地方を中心とした約20市区町村で導入されている。

[4]では、避難者とモバイル端末との連携による自動避難誘導方式が提案されている。モバイル端末による避難経路の提示とそれに対する実際の避難者の移動軌跡との差に着目することで、モバイル端末が通行不能箇所を自動的に推定することが可能となる。このようにして得られた通行不能箇所の情報を避難者間でモバイル端末を介して共有することで、避難行動を改善することが可能となる。ここで、避難者に提示される避難経路の安全性を向上することを目的に、リスクマップを用いた迅速性・安全性の高い避難経路の計算方式が提案されている [5]。リスクマップとは、名古屋市など一部の自治体が公開している、地震等の災害時に沿道建物の倒壊により道路が閉塞する確率（道路閉塞確率 [6]）が各道路に付与された地図を表す。

一方、防災を想定した取り組みとしては、前述のリスクマップを用いることで、道路網内の各道路の安全性を事前にある程度予測することができる。また、[4, 5]における避難誘導に基づく人の流れを考慮することで、避難時にある道路が利用される頻度を避難時の道路需要として分析することが可能となる。この分析は、

グラフ理論で知られている辺媒介中心性 [7] の考え方を応用することで実現できる。また、避難時の道路需要は、避難者の避難行動だけでなく、災害発生時点における平常時の地理的人口分布にも依存する。このような平常時の地理的人口分布の情報は、近年、モバイル端末の普及により位置情報の取得が容易となっている他、一部地域に関しては、アンケートベースの調査（パーソントリップ調査 [8]）やそれに基づく人の流れデータ [9] として提供されている。

本論文では、防災の観点から、避難誘導方式・道路閉塞確率・人の流れデータの情報を組み合わせることで、平常時・避難時の人の流れを考慮した道路網のリスク分析手法を提案する。特に、避難時に閉塞した道路に遭遇する人をできる限り少なくすることは避難の安全性の観点で重要であると考えられることから、このような閉塞した道路との遭遇リスク（閉塞道路遭遇リスク）に着目する。ある道路に対する閉塞道路遭遇リスクは、道路閉塞確率と避難時道路需要を用いることで評価できる。このような閉塞道路遭遇リスクの高い道路が、平常時の人の流れ、避難行動、災害発生時刻によって空間的にどのように変化するかを数値実験により明らかにする。

本論文の構成は以下の通りである。2章で関連研究を、3、4章で本研究で取り扱う平常時・避難時の人の流れについてそれぞれ説明する。5章で平常時・避難時の人の流れを考慮した道路網のリスク分析手法について述べた後、6章でリスク分析結果について述べる。最後に7章でまとめを述べる。

2. 関連研究

本章では、道路網の特性分析と領域内のリスク分析の観点から関連研究を紹介する。

2.1 道路網の特性分析

道路網の特性については、媒介中心性 [10] を用いた検討が進められており、媒介中心性と地理的人口分布の偏りの間に強い関係性があることが示されている [11–14]。媒介中心性とは、グラフ上の任意の2点間の最短経路にある辺が含まれ

る頻度を表した指標である。[11]では、バルセロナにおける時代ごとの歩行者の行動範囲に着目した分析を行っており、バルセロナが中心広場に高い媒介中心性が維持されるように発展してきていることを明らかにしている。[12,13]では、媒介中心性が高くなる地点が、その地域の主要道路や商業地区といった人々が多く集まる場所に集中する傾向にある事が示されている。[14]では、媒介中心性と携帯電話の位置情報から推定された実際の道路の使用状況を考慮することで、各道路が4種類（トポロジ的に重要かつ利用頻度が高い、トポロジ的に重要だが利用頻度は低い、トポロジ的に重要でないが利用頻度が高い、トポロジ的に重要ではなく利用頻度も低い）に分類できることを示している。

これらの先行研究では、道路網において媒介中心性が高い箇所に人が多く集まる、すなわち利用頻度が高くなる傾向があることを示している。一般に、媒介中心性は任意の2点間の最短経路を想定して計算されるが、本論文では、避難時に利用頻度が高くなると予想される道路の発見を目標に、避難行動中に利用される経路を前提とした分析を行う。

2.2 領域内のリスク分析

避難時の領域内のリスクとして、避難所までの到達可能性に着目した研究 [15, 16]、避難経路の危険性に着目した研究 [17, 18]、対象領域内の避難困難地域に着目した研究 [19, 20] がある。

[15]では、建物の倒壊と道路閉塞をモデル化し、道路網内の全ノードから一時集合場所もしくは広域避難場所までの経路をそれぞれ求め、各ノードから避難地までの到達可能性を4段階（孤立して避難できない、避難先・避難経路の変更が必要、避難経路の変更が必要、平常時と変わらない）で評価し、避難の危険性が高い地区を抽出している。[16]では、大地震における建物倒壊・道路閉塞・市街地延焼といった物的被害モデルとパーソントリップ調査データに基づく都市内滞留者の避難行動モデルを作成し、シミュレーション評価により、避難が困難となる可能性が高い地域を町丁目単位で特定している。

[17]では、東京都都市計画局で定められている避難経路危険量を用いて経路の危険性を評価し、既存の広域避難計画の問題点を解明するとともにその改善策を

提示している．[18]では，緯度経度情報が付与された Twitter 情報を用いて人口が集中している地域（人口集中地域）を特定した後，人口集中地域と避難施設間を結ぶ避難経路を経路長の昇順に複数抽出し，媒介中心性を用いた道路網分析やその周辺の地理情報を分析することで，混雑度，災害時活動困難度を考慮した，災害時における避難リスクが高い経路の可視化を時間帯別に行っている．本論文では，平常時の道路需要に基づき領域全体に対する避難開始位置を考慮するとともに，避難経路選択方式として最短経路選択とリスク考慮型経路選択を用いた分析を行う．

対象領域内の避難困難地域に関する研究として [19, 20] がある．[19]では，対象領域の中で避難困難地域をネットワークパーティションモデルの一つであるクリティカルクラスタモデル (CCM) により検出する手法が提案されている．避難の困難さは少領域内の人口とその領域から外部へと通じる道路の容量の比で表現される．さらに，CCM と地理情報システムを用いることで，避難困難地域を地図上に表示する方法を提案している．[20]では，災害発生後において，避難者が災害発生地点からより遠ざかる方向に移動する傾向にあることを考慮した経路選択方式を導入し，CCM を用いて北京の中央ビジネス地区付近の領域における避難困難地域を地図上に表示する方法が提案されている．その際，国勢調査統計に基づく人口分布を用いたリスク分析は行われていたが，時間変化に伴って人口分布が変化した場合の検討は行われていない．

3. 平常時の人の流れ

避難時における道路の利用頻度（以降，避難時道路需要）の導出に際し，平常時の人の流れを考慮することは重要である．なぜなら，平常時に各道路上に存在する人々が災害時においては避難行動を開始すると考えられるため，平常時の各道路の利用頻度（以降，平常時道路需要）は避難時道路需要に影響を与えると考えられるからである．以上の理由から本論文では，避難時道路需要を導出するにあたり，平常時道路需要の概念を取り入れる．本章では，平常時の人の流れを表現した，人の流れデータを用いた平常時道路需要の導出方法を述べる．

表 1: 人の流れデータの例

パーソンID	トリップ番号	サブトリップ番号	日時	経度	緯度	性別	年齢	住所コード	職業	移動目的	拡大係数	交通手段
1	1	1	2013/11/12 7:00	サンプル	サンプル	1	5	123	4	99	83	97
2	1	1	2013/11/13 7:00	サンプル	サンプル	2	15	123	14	99	37	97
3	1	1	2013/11/14 7:00	サンプル	サンプル	1	12	103	8	99	62	97
4	1	1	2013/11/15 7:00	サンプル	サンプル	1	8	124	15	99	64	97

以降では、まず人の流れデータについて説明し、次に人の流れデータを用いた平常時道路需要の導出手順を述べる。

3.1 人の流れデータ

人の流れデータは、パーソントリップデータから生成されたデータである。パーソントリップ調査はアンケートベースの調査方法であり、通勤・通学など特定の目的に沿った移動をトリップと定義する。一つのトリップは、徒歩、電車など、交通手段毎にサブトリップに分割される。パーソントリップデータでは、サブトリップ毎に、移動者のID（パーソンID）、起終点の位置、移動時間、交通手段などの情報が取得されている。人の流れデータは、このようなパーソントリップデータにおける起終点間の移動軌跡を一定の時間間隔（1分）で補完したデータとなっている。このとき、補完処理には、交通手段が鉄道の場合は鉄道の路線図・時刻表が、それ以外の場合には起終点間の最短経路がそれぞれ用いられる。内閣府の調査によると、東日本大震災時においては、約9割以上の避難者が徒歩・自転車・バイク・自動車により避難を行ったことが報告されている [1]。そこで本論文では、人の流れデータ内でこれらの移動方法に該当するデータを用いて分析を進める。

表1に人の流れデータのサンプルを示す。表1の各行（エントリ）は、その行に記載されたパーソンIDに対応する移動者の1分ごとの位置（緯度、経度）を表している。パーソンID、トリップ番号、サブトリップ番号の順にフィルタリングすることで、特定の移動者の移動軌跡を取得することができる。さらに、表1に示すように、移動者の属性情報（性別・年齢・住所コード・職業）、移動目的、拡大係数、交通手段が記録されている。

ここで、拡大係数とは、人の流れデータの基となっているパーソントリップデータで導入されているパラメタである。対象領域内に存在する人々の全体の動きを、サンプリングデータから統計的に推定する必要があるが、この推定プロセスを拡大と呼ぶ。拡大係数は、パーソントリップ調査を行なった調査主体が定めた値であり、本論文で用いる人の流れデータの基となるパーソントリップ調査データを提供している中京都市圏総合都市交通計画協議会では、「あるサンプルに対して x という拡大係数が設定されている場合、そのサンプルが採っていたトリップと同じトリップ採る人が x 人いると仮定」と定義している。したがって、表1のあるエントリに対する拡大係数は、そのエントリに対応するトリップを行なった人数となる。

3.2 平常時道路需要

ある時間帯 t においてある道路 e 上に存在する人の数を平常時道路需要 $D_N(t, e)$ と定義する。人の流れデータを用いる場合、まず、各エントリに含まれる緯度・経度に対応する道路をマップマッチング [21] により特定する。その結果、人の流れデータにおける時間粒度と同様に、1分単位で各道路上に存在する人の数を取得できる。この数に拡大係数を掛けることで、1分単位での平常時道路需要が導出できる。本論文では、通勤・通学の時間帯や帰宅の時間帯など、人の生活サイクルを考慮した分析を行うため、1時間単位での平常時道路需要を用いるが、これは当該の時間内に含まれる1分単位の平常時道路需要の平均と定義する。このようにして得られた人の流れデータに基づく、時間帯 t における道路 e に対する平常時道路需要を $D_N^{\text{PF}}(t, e)$ と定義する。

なお、近年モバイル端末の普及により、プライバシーへの配慮の下、人々の位置情報を収集することが可能となっている。このような位置情報を収集することができる場合にも、同様に一定の時間間隔毎の平常時道路需要を算出することが可能となる。一方、対象とする地域によっては（時間帯ごとの）人口情報しか手に入らない場合も考えられる。このような場合は、時間帯ごとの各道路に対する平常時道路需要は均一であるものと仮定し分析を行うことが考えられる。以降では、この場合の平常時道路需要を $D_N^{\text{FLAT}}(t)$ と表記する。

4. 避難時の人の流れ

避難時の人の流れは避難誘導の有無や、避難誘導が可能な際は用いられる避難経路に依存して決まる。避難誘導を利用できない場合、オフラインマップの利用や避難者自身の判断に基づく避難行動がとられることから、こうした避難者の移動は最短経路に従う可能性が高い。また、[4]での自動避難誘導方式においても最短経路を基盤とした避難誘導が想定されている。一方、[5]では迅速性と安全性の両立を目指したリスク考慮型経路選択方式が提案されている。

以降では、自動避難誘導方式とリスク考慮型経路選択方式についてそれぞれ4.1節、4.2節で述べた後、これらを前提に導出される避難時道路需要について4.3節で述べる。

4.1 モバイル・クラウド連携型自動避難誘導

近年、避難者、モバイル端末とクラウドが相互に連携することで、避難誘導の自動化を実現する避難誘導方式が提案されている [4]。[4]では、モバイル端末上に事前に保存された地図、避難所の位置と GPS (Global Positioning System) により測位された現在位置の情報から、モバイル端末が避難者に避難所までの推薦経路を提示することで避難誘導を試みる。また、避難者の避難行動はモバイル端末の GPS 機能を用いて定期的に移動軌跡として記録される。避難者は通行不能箇所に遭遇すると自身の判断に基づき迂回行動をされると考えられる。モバイル端末は、このとき生じる推薦経路と移動軌跡との差から通行不能箇所を自動的に推定するとともに、新たな推薦経路の計算を行う。さらに、発見された通行不能箇所の情報を WiFi Direct [22] や Bluetooth [23] といった端末間通信や、残存する通信インフラ（無線 LAN や携帯網）との通信を介して、他のモバイル端末やクラウドサーバと共有することで、避難行動の改善を実現する。[4]では、避難の迅速性に着目し、推薦経路として最短経路選択方式を採用している。

4.2 リスク考慮型避難経路選択

[5]では、4.1節における自動避難誘導方式に対して、さらに避難途中の通行不能箇所との遭遇をできる限り抑えることを目指した、リスク考慮型経路選択方式を提案している。災害により道路が通行不能となる可能性については、一部の自治体において分析が進められており、名古屋市では南海トラフ地震により各道路が通行不能となる確率（道路閉塞確率）を分析し、データを公開している [6]。道路閉塞確率は地震の揺れによって沿道建物が倒壊したり道路が液状化することで、道路が閉塞する確率を数理的にモデル化し、評価している。道路閉塞確率の計算は、沿道建物の構造（木造、非木造）・建築年・高さ、道路の幅員と液状化の可能性を用いて行われる。図1に、名古屋市中川区荒子地区の道路閉塞確率を示したリスクマップの例を示す。図では、赤線が濃い道路ほど道路閉塞確率が高いことを表している。

対象領域を表す地図の内部構造をグラフ $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ で表す。 $\mathcal{V}$ は地図上の交差点などの頂点からなる集合、 $\mathcal{E}$ は地図上の道路を辺とする集合である。道路 $e \in \mathcal{E}$ に対する道路閉塞確率を p_e ($0 \leq p_e \leq 1$) とし、道路間の閉塞が独立に生じると仮定すると、ある経路 r が通行可能となる確率は、次式で表される。

$$f_p(r) = \prod_{e \in r} (1 - p_e) \quad (1)$$

(1) が高いほど経路 r が通行できる可能性が高い。[5]では、迅速性と安全性を両立するために、まず $k \geq 1$ 本の最短経路の候補を計算した後、それらの中から最も安全性が高い、すなわち (1) が最大となる経路を選択する。

4.3 避難時道路需要

経路選択方式が決まると、グラフ理論で知られている辺媒介中心性 [7] の考え方を応用することで避難時道路需要を定義できる。辺媒介中心性は、グラフ $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ において、辺 $e \in \mathcal{E}$ が任意の2頂点 $s, d \in \mathcal{V}$ 間の経路 $r(s, d)$ に含まれ



図 1: 名古屋市中川区荒子のリスクマップ

る頻度を表した指標であり，次式で定義される．

$$C(e) = \sum_{s,d \in \mathcal{V}} \mathbb{I}(e \in r(s, d)) \quad (2)$$

ただし， $\mathbb{I}(\cdot)$ は括弧内の条件が満たされる場合に 1，そうでなければ 0 となる指示関数である．

辺媒介中心性は，任意の 2 頂点間の経路にある道路が含まれる頻度を表しているが，避難時においては，目的地が避難所の集合 $\mathcal{D}$ に限定される．また，避難の開始は道路通行中に発生する可能性を考慮する必要がある．さらに，辺媒介中心性では各経路の重みが 1 として扱われているが，避難開始時の道路需要，すなわち平常時道路需要（3.2 節）による経路の重み付けについても考慮する必要がある．以上の点を考慮し，ある時間帯 t においてある道路 e を避難時に利用する避

難者数の推定値として、避難時道路需要を次式で定義する．

$$D_E(t, e) = \sum_{e' \in \mathcal{E}} D_N(t, e') \cdot \mathbb{I}(e \in r(e', \mathcal{D})) \quad (3)$$

ただし、 $D_N(t, e')$ は時間帯 t における道路 e' の平常時道路需要、 $r(e', \mathcal{D})$ は道路 e' から $\mathcal{D}$ の中で最寄りの避難所までの経路を表す．

ここで、3.2 節で述べたように、 $D_N(t, e')$ については、人の流れデータを利用できる場合とできない場合でそれぞれ $D_N^{\text{PF}}(t, e')$, $D_N^{\text{FLAT}}(t)$ と値が異なる．また、経路 $r(e', \mathcal{D})$ についても経路選択方式によって異なる．そこで、人の流れデータの利用の有無と経路選択方式の違いを考慮し、以下のように避難時道路需要を表記する．

- $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$: 人の流れデータに基づく平常時道路需要とリスク考慮型経路選択方式を仮定した場合．
- $D_E^{\text{PF,SP}}(t, e)$: 人の流れデータに基づく平常時道路需要と最短経路選択方式を仮定した場合．
- $D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$: 均一な平常時道路需要とリスク考慮型経路選択方式を仮定した場合．
- $D_E^{\text{FLAT,SP}}(t, e)$: 均一な平常時道路需要と最短経路選択方式を仮定した場合．

5. 平常時・避難時の人の流れを考慮した道路網のリスク分析手法

避難時に閉塞した道路に遭遇する人をできる限り少なくすることは重要である．そこで本論文では、道路網のリスクとして、避難時に道路閉塞に遭遇するリスク（閉塞道路遭遇リスク）を取り扱う．閉塞道路遭遇リスクが高い道路は、4 章で述べた道路閉塞確率と避難時道需要が共に高い道路とみなすことができる．特に、避難者が自動避難誘導方式とリスク考慮型経路選択方式により迅速性・安全性の

表 2: 地図情報

都市名	地図サイズ	グラフ頂点数	辺の本数
名古屋市中川区荒子	1,500 [m] × 2,100 [m]	939	1527

高い避難行動をとれるとした場合においても，閉塞道路遭遇リスクが高くなる道路を明らかにすることが重要と考えられる．

ただし，避難時道路需要については定義式 (3) より，目的地である避難所付近の道路に対する値が他の道路に比べて高くなる傾向がある．このことは，各道路に対する避難所からの距離を考慮した閉塞道路遭遇リスクの評価の必要性を示唆している．ここで，リスク考慮型経路選択方式に従う避難行動を想定した場合， $D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$ は道路網の構造と目的地の位置のみに依存して値が決まるのに対し， $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ ではそれらに加えて平常時道路需要に基づく避難開始時の地理的人口分布の偏りも値に影響を与える．したがって， $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ と $D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$ との差分に着目することで，避難開始時の地理的人口分布の偏りにより生じる避難時道路需要を評価できると考えられる．ただし， $D_N^{\text{FLAT}}(t)$ には人の流れデータに基づく平常時道路需要の平均を用いるものとする．

$$D_N^{\text{FLAT}}(t) = |\mathcal{E}|^{-1} \sum_{e \in \mathcal{E}} D_N^{\text{PF}}(t, e)$$

6. 実データに基づく評価

本章では，平常時・避難時の人の流れを考慮した道路網のリスク分析手法の有効性についてリスク分析結果を基に検証する．

6.1 評価モデル

分析対象の地域には，人の流れデータおよび道路閉塞確率が利用可能な名古屋市中川区荒子地区の地図を用いる．図 2 に使用した荒子地区の地図，表 2 に地図を表現するグラフの詳細を示す．なお，避難の目的地とする避難所については実



図 2: 名古屋市中川区荒子地区の地図

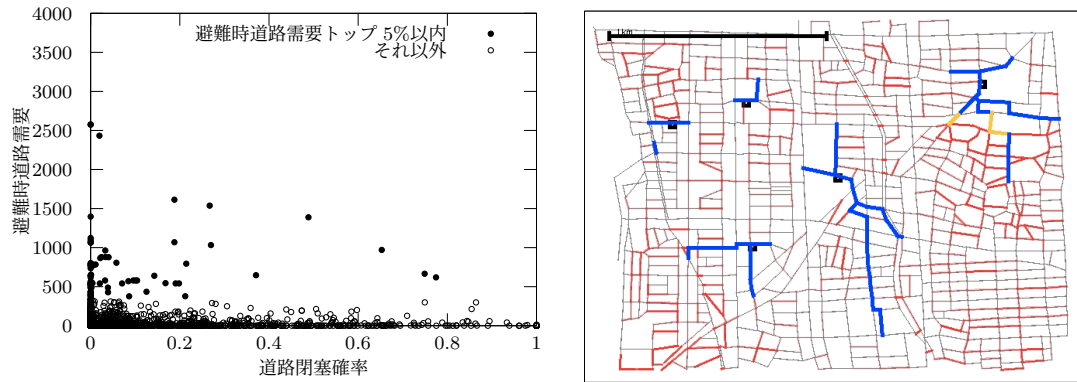
際の避難所5箇所（黒四角）を設定している．なお，隣接する各頂点間の道路は双方向に存在するものとする．

使用する人の流れデータセットは，存在するデータの中で最も新しい，「空間配分版 2011 年中京都市圏 人の流れデータ」を用いた．本論文では特に，通勤・通学および帰宅といった人の生活サイクルを考慮した分析を行うため，このデータセットの内，平日である 2011 年 10 月 3 日の 0-24 時のデータを用いた．このとき，人の流れデータにおける緯度・経度情報を用いて図 2 に示す領域内に位置するデータのみを抽出するとともに，鉄道・地下鉄・航空機・船舶といった道路網に関係しない交通手段を持つデータを分析対象データから除外した．本論文で分析対象とする時間帯は，通勤・通学の時間帯として 8 時台（8:00-8:59），帰宅の時間帯として 17 時台（17:00-17:59）とする．

6.2 人の流れデータとリスク考慮型経路選択に基づく分析

まず、人の流れデータに基づく平常時道路需要の下、リスク考慮型経路選択に従って避難行動が取られる場合に対する、閉塞道路遭遇リスクについて分析する。図 3a に、各道路 e に対する道路閉塞確率 p_e と避難時道路需要 $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ との関係を示す。また、図 3b では、リスクマップ上に避難時道路需要が上位 5%に含まれる道路において、道路閉塞確率が 0.6 以上の道路を黄色、その他の道路を青色で示している。

図 3b から、まず、高い避難時道路需要を持つ道路が避難所付近に集中していることが分かる。これは、前述のように、避難所を目的地として経路が計算されるため、多くの避難経路に避難所付近の道路が採用されるためである。一方で、図 3b 中の下地域から中央の避難所に向かって伸びている道路群のように、避難所から離れている道路が高い避難時道路需要を持つ場合もある。これは、図 3b 中下の地域の道路の平常時道路需要が高い値を持つことが原因と考えられる。次に、避難時道路需要が上位 5% 以内の道路に対し、道路閉塞確率が 0.6 以上となる 3 本の黄色の道路に着目する。4.2 節で述べたように、リスク考慮型経路選択方式では高い道路閉塞確率を持つ道路をできるだけ避けるように経路選択を行う。し



(a) 道路閉塞確率と避難時道路需要の関係 (b) 避難時道路需要が上位 5% の道路の位置

図 3: 人の流れデータとリスク考慮型経路選択に基づく分析結果 (8 時台)

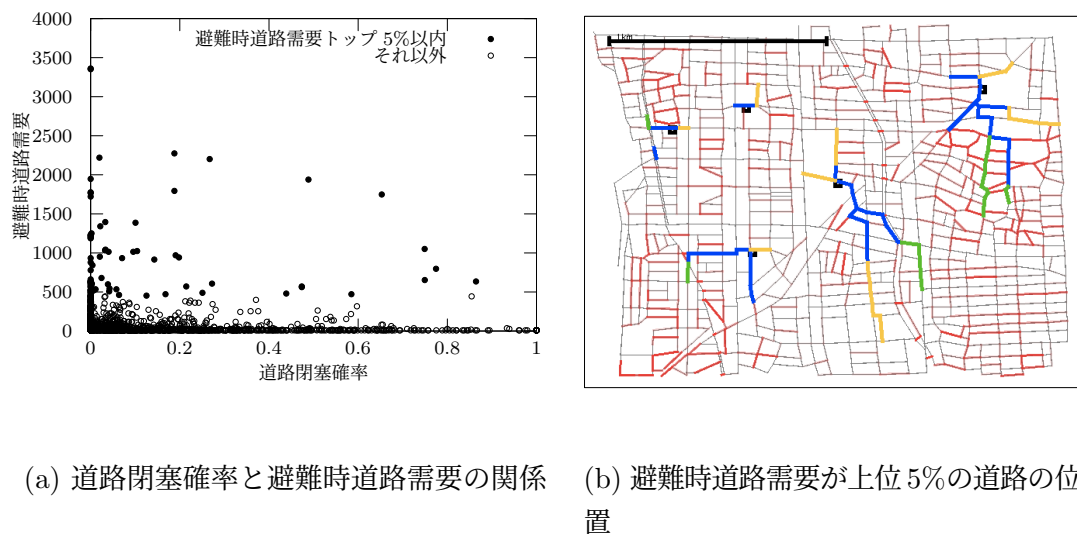


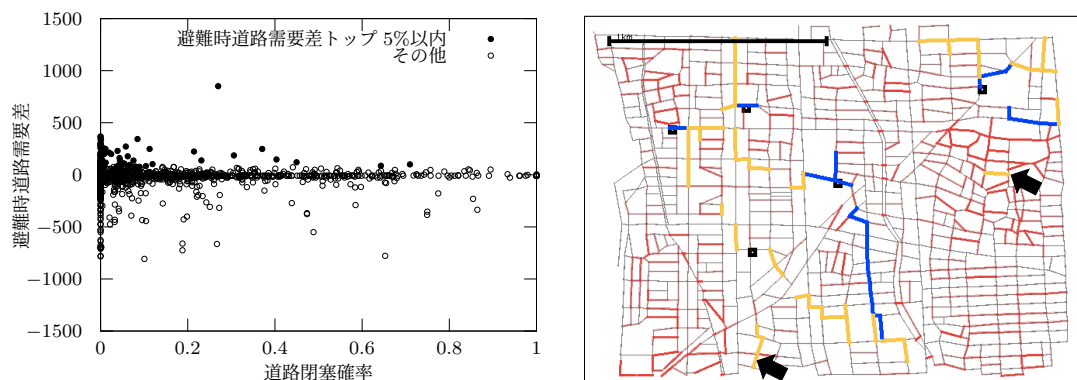
図 4: 均一な平常時道路需要とリスク考慮型経路選択に基づく分析結果 (8 時台)

たがって、これらの道路はリスク考慮型経路選択方式を用いても回避することが難しい、閉塞道路遭遇リスクの高い道路であることがわかる。図 3b から、これらの道路は道路閉塞確率の高い道路が密集している地域に存在し、リスク考慮型経路選択においても回避が難しい道路であることがわかる。また、周辺の平常時道路需要の高さも原因として考えられるが、この点については 6.3 節で検討する。

6.3 平常時道路需要の重要性

次に、人の流れデータなど実データに基づく平常時道路需要を考慮することの重要性を示す。図 4a は、均一な平常時道路需要の下、リスク考慮型経路選択に従って避難行動が取られる場合における、各道路 e に対する道路閉塞確率 p_e と避難時道路需要 $D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$ との関係を示している。また、図 4b では、リスクマップに対して、 $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ と $D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$ の両方で上位 5% に含まれる道路を青色、 $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ のみの上位 5% に含まれる道路を黄色、 $D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$ のみの上位 5% に含まれる道路を緑色でそれぞれ示している。

避難時道路需要が上位 5% となる道路は全部で 76 本となるが、このうち 55 本の青色の道路は、人の流れデータの利用の有無にかかわらず、避難時道路需要が



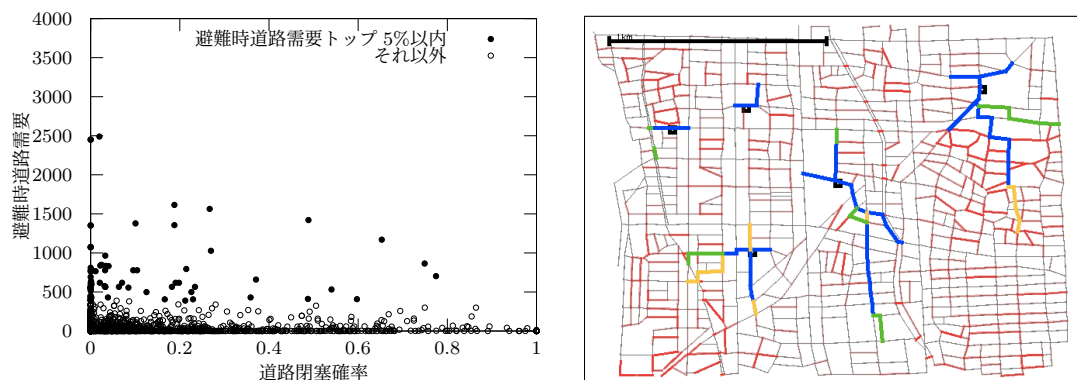
(a) 道路閉塞確率と避難時道路需要差の関係 (b) 避難時道路需要差の上位5%の道路の位置

図 5: リスク考慮型経路選択における避難時道路需要差の分析結果 (8 時台)

高くなっている．人の流れデータによる平常時道路需要を考慮することで，実際に避難時の利用頻度が大きくなる可能性が高い道路として 21 本の黄色の道路を発見できていることがわかる．一方，平常時道路需要を均一とした場合に検出された 21 本の緑色の道路に関しては，実際よりも避難時道路需要を過剰に見積もっていると考えられる．

次に，人の流れデータの考慮の有無による避難時道路需要の差，すなわち $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e) - D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$ に着目することで，道路網の構造と避難所の位置による影響を除いた，避難開始時の地理的人口分布の偏りにより生じる閉塞道路遭遇リスクを評価する．図 5a に，各道路 e に対する道路閉塞確率 p_e と避難時道路需要差との関係を示す．また，図 5b では，リスクマップに対して，避難時道路需要差と $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ の両方で上位 5% に含まれる道路を青色，避難時道路需要差のみの上位 5% に含まれる道路を黄色でそれぞれ示している．

避難時道路需要差が上位 5% となる道路は全部で 76 本となるが，このうち 30 本の青色の道路は人の流れデータによる平常時道路需要を考慮することでも検出できる，特に高い避難時道路需要を持つ道路である．一方で，この分析により 46 本の高い避難時道路需要を持つ黄色の道路が新規に検出されている．これらの道路は，避難所付近の道路が避難時道路需要 $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ の上位を占めていたため



(a) 道路閉塞確率と避難時道路需要との関係 (b) 避難時道路需要が上位5%の道路の位置

図 6: 人の流れデータと最短経路選択に基づく分析結果 (8 時台)

これまでの分析では検出できなかった、高い避難時道路需要を持つ道路である。

なお、黄色の道路の中には対象領域の境界付近に位置する道路が複数存在することがわかる。こうした道路は避難経路に含まれる頻度が中央付近の道路と比較して少なくなる傾向があるのに対し、避難時道路需要差が高い値を示していることから、周辺の平常時道路需要が高いことを表していると考えられる。

ここで、図 5b 中の矢印で指された2つの道路に着目する。これらの道路は共に道路閉塞確率が0.6以上の道路であり、この分析により新規に発見された高い閉塞道路遭遇リスクを持つ道路である。

6.4 避難行動の違いによる影響

本節では、2種類の経路選択方式（リスク考慮型経路選択、最短経路選択）に伴う避難行動の違いが各道路の避難時道路需要にどのような影響を与えるかを示す。まず、人の流れデータに基づく平常時道路需要の下、最短経路選択に基づき避難行動が取られた場合の、各道路の閉塞道路遭遇リスクについて分析する。図 6a に、各道路 e に対する道路閉塞確率 p_e と避難時道路需要 $D_E^{\text{PF,SP}}(t, e)$ との関係を示す。また図 6b では、リスクマップに対して、 $D_E^{\text{PF,SP}}(t, e)$ とリスク考慮型経

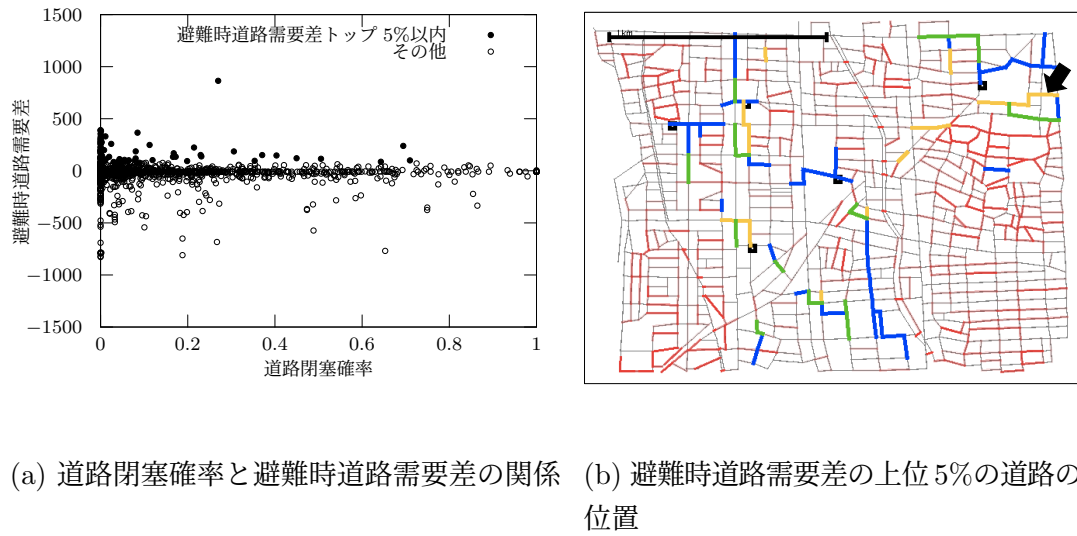


図 7: 最短経路選択における避難時道路需要差の分析結果 (8 時台)

路選択における避難時道路需要 $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ の両方で上位 5% に含まれる道路を青色, $D_E^{\text{PF,SP}}(t, e)$ のみの上位 5% に含まれる道路を黄色, $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ のみの上位 5% に含まれる道路を緑色でそれぞれ示している。

避難時道路需要が上位 5% となる道路は全部で 76 本となるが, このうち 61 本の青色の道路は, 経路選択方式の種類に関わらず, 高い避難時道路需要を示している。一方で, 最短経路選択においては黄色の道路, リスク考慮型経路選択においては緑色の道路が避難時道路需要が高い道路としてそれぞれ 15 本ずつ検出されていることがわかる。この違いは, 経路選択における道路閉塞確率の考慮の有無によるものであり, リスク考慮型経路選択方式では最短経路選択より安全な経路が選択されたと考えられる。このことは, 例えば, 図中右の道路閉塞確率の高い道路が密集した地域における黄色の道路として表れており, これらの道路においては, リスク考慮型経路選択を用いることで閉塞道路遭遇リスクを小さくできる道路となっている。

次に, 最短経路選択における人の流れデータの考慮の有無による避難時道路需要の差, すなわち $D_E^{\text{PF,SP}}(t, e) - D_E^{\text{FLAT,SP}}(t, e)$ に着目することで, 道路網の構造と避難所の位置による影響を除いた, 避難開始時の地理的人口分布の偏りにより生じる閉塞道路遭遇リスクを評価する。図 7a に, 各道路 e に対する道路閉塞確

率 p_e と避難時道路需要差との関係を示す。また、図 7b では、リスクマップに対して、最短経路選択およびリスク考慮型経路選択の避難時道路需要差の両方で上位 5%に含まれる道路を青色、最短経路選択のみの上位 5%に含まれる道路を黄色、リスク考慮型経路選択のみの上位 5%に含まれる道路を緑色でそれぞれ示している。

避難時道路需要差が上位 5%となる道路は全部で 76 本あり、このうち 53 本の青色の道路は、経路選択方式に関わらず、避難開始時の地理的人口分布の偏りにより生じる避難時道路需要が高い道路である。一方で、違いの現れた 23 本の道路に関しては、リスク考慮型経路選択方式では最短経路選択方式に比べて平均道路閉塞確率を約 $1/6$ に抑えられていることが確認できた。特に、図 7b 中の矢印で示される道路は道路閉塞確率が 0.6 以上であり、最短経路選択方式では避難時道路需要も高い、閉塞道路遭遇リスクが高い道路となっている。この道路に対しては、リスク考慮型経路選択を用いることで避難時道路需要を抑えることができることがわかる。

6.5 災害発生時刻の違いによる影響

最後に、災害発生時刻の違いが各道路の避難時道路需要に与える影響について示す。これまでの 8 時台のシナリオに対して、新たに帰宅の時間帯である 17 時台の平常時道路需要を用いた分析を行う。まず、人の流れデータに基づく平常時道路需要の下、リスク考慮型経路選択に従って避難行動が取られる場合に対する、閉塞道路遭遇リスクについて分析する。図 8a に、各道路 e に対する道路閉塞確率 p_e と避難時道路需要 $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ との関係を示す。また、図 8b では、リスクマップに対して、8 時台と 17 時台の $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ の両方で上位 5%に含まれる道路を青色、8 時台の $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ のみの上位 5%に含まれる道路を緑色、17 時台の $D_E^{\text{PF,RA}}(t, e)$ のみの上位 5%に含まれる道路を黄色でそれぞれ示している。

避難時道路需要が上位 5%となる道路は全部で 76 本となるが、このうち 67 本の青色の道路は、通勤・通学および帰宅の時間帯に関わらず、高い避難時道路需要を持つ道路として検出されている。一方で、8 時台においては緑色の道路、17 時台においては黄色の道路が避難時道路需要が高い道路としてそれぞれ 9 本ずつ

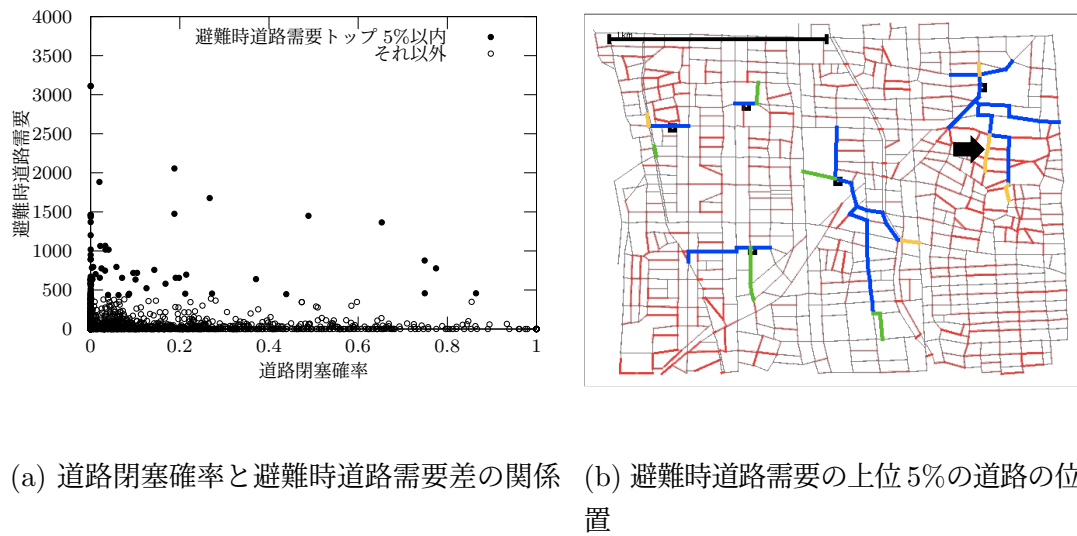
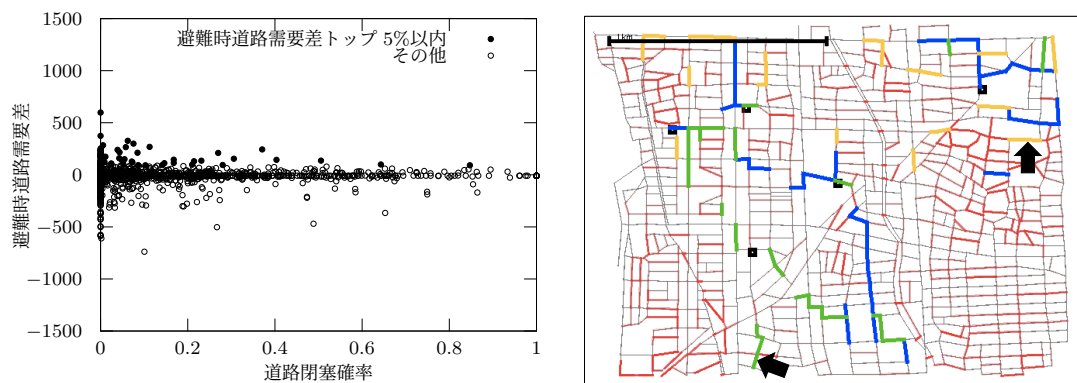


図 8: 人の流れデータとリスク考慮型経路選択に基づく分析結果 (17 時台)

検出されていることがわかる。この違いは、時間帯の違いによって変化する平常時道路需要の影響を受けたことが理由としてあげられる。例えば、図 8b 中右に位置する道路閉塞確率が密集する地域では、8 時台と比べて 17 時台の方が避難時道路需要の高い道路が増えていることが分かる。また、図 8b 中の矢印で指された道路に関しては、8 時台では検出されなかった道路閉塞確率が 0.6 以上の道路である。これらの道路については、8 時台では閉塞道路遭遇リスクは高くないが、17 時台では閉塞道路遭遇リスクが高くなる道路である。

次に、リスク考慮型経路選択における人の流れデータの考慮の有無による避難時道路需要の差 ($D_E^{\text{PF,RA}}(t, e) - D_E^{\text{FLAT,RA}}(t, e)$) で分析できる、避難開始時の地理的人口分布の偏りにより生じる各道路の閉塞道路遭遇リスクに対し、時間帯の違いが与える影響について分析する。図 9a に、17 時台における各道路 e に対する道路閉塞確率 p_e と避難時道路需要差との関係を示す。また、図 9b では、リスクマップに対して、8 時台および 17 時台の避難時道路需要差の両方で上位 5% に含まれる道路を青色、8 時台のみの上位 5% に含まれる道路を緑色、17 時台のみの上位 5% に含まれる道路を黄色でそれぞれ示している。

避難時道路需要差が上位 5% となる道路は全部で 76 本となるが、このうち 50 本の青色の道路は、通勤・通学および帰宅の時間帯に関わらず、避難開始時の地理



(a) 道路閉塞確率と避難時道路需要差の関係 (b) 避難時道路需要差の上位 5% の道路の位置

図 9: リスク考慮型経路選択における避難時道路需要差の分析結果 (17 時台)

的人口分布の偏りにより生じる避難時道路需要の高い道路である。一方で、8 時台においては緑色の道路、17 時台においては黄色の道路が検出の違いとしてそれぞれ 26 本ずつ存在していることがわかる。このとき、それぞれの時間帯において検出された道路に着目すると、8 時台では避難時道路需要の高い道路が領域全体に散らばっているのに対し、17 時台では領域の上部に集中していることがわかる。図 9b 中の矢印に指された道路閉塞確率が 0.6 以上の 2 つの道路に着目する。これらの道路は共に高い閉塞道路遭遇リスクの高い道路であるが、左下に位置する道路は 8 時台で検出された道路、右上に位置する道路は 17 時台で新たに検出された道路である。

以上のことから、道路に対する避難時道路需要や閉塞道路遭遇リスクが災害発生時刻の違いによって変化すること、及びその変化を提案手法により捉えられることがわかる。

7. まとめ

本論文では、災害発生前の防災の観点において、平常時・避難時の人の流れを考慮した道路網のリスク分析について検討した。まず、平常時における各道路の利用頻度（平常時道路需要）と避難時における各道路の利用頻度（避難時道路需要）を定義した。平常時道路需要は、平常時の人の流れを表現する人の流れデータを用いて導出できる。一方、避難時道路需要は、辺媒介中心性の考え方を応用し、ある道路が避難経路に含まれる頻度として導出できる。ただし、避難経路の利用頻度は、各経路の起点に対する平常時道路需要に従うものとする。さらに、この避難時道路需要を道路閉塞確率を組み合わせることで、閉塞道路遭遇リスクの高い道路の検出を試みた。

実データを用いた数値実験により、閉塞道路遭遇リスクの高い道路の検出の有効性について、人の流れデータの考慮の有無、避難行動（経路選択方式）の違い、災害発生時刻の違いの観点から検証した。その結果、避難行動によらず閉塞道路遭遇リスクが高くなる道路が存在すること、リスク考慮型経路選択方式を用いた場合においても、閉塞道路遭遇リスクが高くなる道路を回避できない場合があることを示した。また、人の流れデータなどの実データを利用しない場合では閉塞道路遭遇リスクや避難時道路需要が過剰もしくは不足して見積もられる可能性があることを示した。このことは、道路網のリスク分析において、実データを利用した分析の重要性を示している。最後に、災害発生時刻が異なると閉塞道路遭遇リスクや高い避難時道路需要を持つ道路の位置が大きく変化することを示した。

謝辞

主指導教員である本学情報科学研究科の笠原正治教授には、本研究を進めるにあたり、多大なるご指導、ご助言を賜りました。また、研究活動以外においても、学生生活を送る上で様々なご助言を賜りました。心より感謝の意を表します。副指導教員である本学情報科学研究科の安本慶一教授には、お忙しい中、本研究に対してのご指導、ご指摘を賜りました。心より感謝の意を表します。同じく副指導教員である本学情報科学研究科の笹部昌弘准教授には、日頃より本研究の主な方針や具体的な内容に関して、細部に至るまで丁寧なご指導を賜りました。また、最後まで本研究を完遂できるようあらゆる方面からサポートをして下さりました。心より感謝の意を表します。本学情報科学研究科の川原純助教には、研究会などにおいて多くのご指摘、ご助言だけでなく、落ち込んでいる際には励ましのお言葉をいただきました。心より感謝の意を表します。本学大規模システム管理研究室秘書の橋本洋子様には、研究活動に関するお力添えだけでなく、誕生日の際には可愛らしいお菓子をくださり、とても元気付けられました。心より感謝の意を表します。本学大規模システム管理研究室の同輩、後輩との日頃の何気ない会話でオンとオフのメリハリをつけることができ、また、本研究を進める上で様々なご協力を賜りました。心より感謝の意を表します。最後に、長年の学生生活を支えて頂いた家族に心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 内閣府. 東日本大震災における地震・津波時の避難に関する実態調査. available at <http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/tyousakekka.html>.
- [2] Ministry of Internal Affairs and Communications. 2011 WHITE PAPER Information and Communications in Japan. available at <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/eng/WP2011/2011-index.html>.
- [3] 一般社団法人全国防災共助協会. 避難誘導アプリ「みたちょ」. available at <http://bousai.or.jp/mitacho/>.
- [4] N. Komatsu, M. Sasabe, J. Kawahara, and S. Kasahara. Automatic Evacuation Guiding Scheme Based on Implicit Interactions between Evacuees and Their Mobile Nodes. *GeoInformatica*, pp. 1–15, 2016.
- [5] T. Hara, M. Sasabe, and S. Kasahara. Short and Reliable Path Selection for Automatic Evacuation Guiding Based on Interactions between Evacuees and Their Mobile Devices. *In Proceedings of The 14th International Conference on Mobile Web and Intelligent Information Systems*, pp. 33–44, 2017.
- [6] 名古屋市住宅都市局都市計画部都市計画課. 震災に強いまちづくり方針. available at <http://www.city.nagoya.jp/jutakutoshi/cmsfiles/contents/0000002/2717/honpen.pdf>, 2015.
- [7] M. Girvan and M.E.J. Newman. Community Structure in Social and Biological Networks. *In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 99, No. 12, pp. 7821–7826, 2002.
- [8] 東京都市圏交通計画協議会. 東京都市圏パーソントリップ調査 PT データ利用の手引き. available at <http://www.tokyo-pt.jp/data/file/tebiki.pdf>.

- [9] Y. Sekimoto, R. Shibasaki, H. Kanasugi, T. Usui, and Y. Shimazaki. PFlow: Reconstruction of People Flow by Recycling Large-Scale Fragmentary Social Survey Data. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 10, No. 4, pp. 27–35, 2011.
- [10] L.C. Freeman. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, Vol. 40, No. 1, pp. 35–41, 1977.
- [11] 福山祥代, 羽藤英二. バルセロナの歴史的発展過程と歩行者の行動圏域を考慮した広場—街路のネットワーク分析. 土木学会論文集 D1 (景観・デザイン), Vol. 68, No. 1, pp. 13–25, 2012.
- [12] S. Porta, P. Crucitti, and V. Latora. The Network Analysis of Urban Streets. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 369, No. 2, pp. 853–866, 2006.
- [13] S. Porta, E. Strano, V. Iacoviello, R. Messori, V. Latora, A. Cardillo, F. Wang, and S. Scellato. Street Centrality and Densities of Retail and Services in Bologna, Italy. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 36, No. 3, pp. 450–465, 2009.
- [14] P. Wang, T. Hunter, A.M. Bayen, K. Schechtner, and M.C. Gonzalez. Understanding Road Usage Patterns in Urban Areas. *Scientific Reports*, Vol. 2, No. 1001, pp. 1–6, 2012.
- [15] 市川総子, 阪田知彦, 吉川徹. 建物倒壊および道路閉塞のモデル化による避難経路の危険度を考慮した避難地への到達可能性に関する研究. GIS-理論と応用, Vol. 12, No. 1, pp. 47–56, 2004.
- [16] 大佛俊泰, 沖拓弥. 密集市街地における大地震時の避難困難率について. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 77, No. 681, pp. 2561–2567, 2012.
- [17] 高橋洋二, 兵藤哲朗. 避難経路および避難場所の危険度に着目した避難計画の評価に関する研究江東区地域防災計画における広域避難計画の安全性向上

- に関するケーススタディ. 日本都市計画学会 都市計画論文集, No. 40-3, pp. 691–696, 2005.
- [18] 菅野真生, 江原廣田 雅春, 横山昌平, 石川博. 道路ネットワーク分析を用いた災害時における避難リスクの高い経路の可視化. *DBSJ Japanese Journal*, Vol. 15-J, No. 5, pp. 1–8, 2017.
- [19] R.L. Church and T.J. Cova. Mapping Evacuation Risk on Transportation Networks Using a Spatial Optimization Model. *Transportation Research Part C*, Vol. 8, pp. 321–336, 2000.
- [20] X. Chen, M.P. Kwan, Q. Li, and J. Chen. A Model for Evacuation Risk Assessment with Consideration of Pre- and Post-Disaster Factors. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 36, No. 3, pp. 207–217, 2012.
- [21] D. Bernstein and A. Kornhauser. An Introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants. *Transportation Research Board, Technical report*, 1998.
- [22] Wi-Fi Alliance, P2P Technical Group. Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification v1.0, 2009.
- [23] Bluetooth Special Interest Group. Specification of the Bluetooth Core System 5.0. available at <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>, 2016.