

2024 年度修士論文

論文題名： 自然災害発生時における避難経路の
混雑度と間接損失の推定

GIS-BASED IMPACT ASSESSMENT BY NATURAL DISASTERS
- TRAFFIC CONGESTION AND ITS INDUCED LOSSES -

指導教員： 五島 洋行 教授

法政大学大学院理工学研究科
システム理工学専攻（経営システム系）修士課程

学生証番号： 23R6202

イノウエ コウ

氏名： 井上 航

専攻名	システム理工学	学生証番号	23R6202
申請者氏名		井上航	
指導教員名		五島洋行	

論文要旨

論文題名	自然災害発生時における避難経路の混雑度と間接損失の推定
------	-----------------------------

近年、日本では豪雨や台風といった自然災害の被害から河川の氾濫や水害への備えが見直されつつある。また、人流による群衆事故への注目も高まっており、2022年に韓国で起きた「梨泰院群衆事故」は大きな衝撃を与えた。群衆事故は避難時にも、パニックに陥った人々が我先に避難しようとして狭い通路や道に集中することで起きる可能性が考えられる。更に、群衆事故のほかにも避難経路で渋滞が起きることで交通渋滞を含む二次被害が生まれることも考えられる。本研究では浸水域シミュレーションと混雑度計算によって河川氾濫時に冠水して道路が使えなくなる場合の交通量予測を行う。

本研究での研究対象地域である東京都足立区は低地帯であり歴史的に洪水被害を受けている。また、人口の多い地域であり自然災害発生時の人流による二次被害発生が考えられる。現在、自治体から公開されている河川氾濫時のハザードマップでは、どの経路で避難することが安全かつ迅速に避難できるかが分かりにくいものとなっている。上記の様な事故を防ぐためにも、どの避難経路が安全なのか、人流が集中しないのかを確認できるハザードマップを提案する。

次にこの実験検証によって得られたデータを用いて二次被害額を算出し、最大交通量となる区間を緩和するための復旧優先区間を数理最適化モデルによって求解し提案する。

In recent years, local governments in Japan have been reassessing countermeasures for river flooding and water disasters caused by torrential rains and typhoons. Attention to crowd accidents has also increased, particularly after the 2022 Itaewon crowd crush in South Korea that brought us a significant impact. During evacuation, panic-driven movements can lead to severe congestion in narrow pathways, potentially increasing the risk of crowd accidents. Traffic congestion on evacuation routes may also cause secondary damage.

This study along these lines simulates traffic conditions giving a river flooding scenario that involves inundation. Traffic congestion levels are then estimated. Adachi Ward in Tokyo is chosen as a study area, which is a high-populated and lowland district. Along with histories of flooding in the past, the majority of the area is exposed to secondary disasters. While at risk, existing hazard maps do not provide clear safe and efficient evacuation routes. We thus create a hazard map that helps us find safe and less congested routes. Furthermore, a mathematical optimization model is constructed to make effective road recovery priorities.

目次

1	はじめに.....	4
1.1	本研究の意義.....	4
1.2	本研究の目的.....	6
1.3	論文構成.....	8
2	基礎理論.....	9
2.1	GIS.....	9
2.2	ハザードマップ.....	9
2.3	メッシュ.....	9
2.4	座標参照系.....	10
2.5	DEM.....	10
2.6	標高行列.....	11
2.7	ベクタデータ.....	11
2.8	ラスタデータ.....	12
2.9	最短経路問題.....	12
2.10	隣接行列.....	12
2.11	近傍.....	13
2.12	迂回損失.....	13
3	先行研究.....	14
3.1	先行研究の有意性.....	14
3.2	氾濫推定域図の作成手順.....	14
4	実験概要.....	16
4.1	実験ステップ.....	16
4.2	氾濫域予測使用データ.....	16
4.2	混雑度計算使用データ.....	17
4.3	足立区内のおおまかな地域名称.....	17
5	洪水浸水想定図作成.....	19
5.1	標高行列作成.....	19
5.2	氾濫域のシミュレーション.....	19
5.3	シミュレーション結果.....	20
6	混雑度計算.....	24
6.1	前提条件.....	24
6.2	制約条件 1.....	24
6.3	制約条件 2.....	25
6.4	制約条件 3.....	27

6.5	計算処理	29
7	実験結果.....	30
7.1	H=2 の場合の結果	30
7.2	H=4 の場合の結果	31
7.3	H=6 の場合の結果	32
8	二次被害額算出.....	34
8.1	迂回による損失	35
8.2	被害道路長.....	37
8.3	復旧優先区間の求解.....	38
9	おわりに.....	41
9.1	まとめ.....	41
9.2	今後の課題.....	42

1 はじめに

本章では、本研究の意義や目的、論文構成について述べる。

1.1 本研究の意義

日本は災害の多い国として広く知られており、地震や火山の噴火、台風や豪雨、水害や土砂災害といった自然災害に頻繁に見舞われる。また、首都直下型地震や南海トラフ巨大地震など、今後数十年以内に発生すると予想される大地震もあるため、これらの地震やそれに続く水害・土砂災害が大きな懸念とされている。更に地球温暖化の影響により、日本では約75年後の2100年までに気温が2.1~4.0°C上昇すると予測されている。これに伴い海水温が上昇し、大気中の水蒸気量が増加するため、1日に100mm以上や200mm以上の降水量を記録する日が長期的に増加する見通しである。加えて近年では、台風や線状降水帯が頻繁に発生し、集中豪雨による河川の氾濫や水害への対応が課題となっている。

また、群衆事故への関心も高まっている。群衆事故とは、瞬間的に人々が密集する場所でパニックが発生し、無秩序に移動が始まることで生じる事故である。人々が一斉に移動し、誰かが転倒した際に周囲や後続の人が気付かず巻き込まれて転倒し、ドミノ倒しのように連鎖的に転倒が発生することで、下敷きになった人が圧死する危険がある。2022年10月29日、韓国の梨泰院で150人以上が犠牲となった「梨泰院群衆事故」が発生している。このような群衆事故は過去にも繰り返し起こっており、例えば花火見物のために川に架かる橋に集まった群衆が原因で橋が崩落する事故や、劇場火災による避難の際に圧死者が発生する事故、駅やスポーツ会場で人が集中して将棋倒しになる事故などがある。近年では群衆事故が目立っていないように思われがちだが、実際には数年ごとに発生している。例えば、2021年にはアメリカの音楽フェスで将棋倒しが発生し死者が出た事故や、2010年には東京都渋谷区の竹下通りで人々が殺到し将棋倒しになった事故がある。

過去の群衆事故は、クーデターなどの政治的集会を除くと、避難経路の不備や建造物の耐力不足が原因で発生することが多く、パニックによる事故が目立つ。一方で近年の事例では、音楽フェスやサッカースタジアムでの将棋倒し、機動隊とデモ隊の衝突による事故が増加傾向にある。そのため、渋谷スクランブル交差点における「DJポリス」による交通誘導のように、人々の行動を指針する存在があることで秩序を保ち、事故防止につながると考えられている。

本研究では、河川氾濫時の避難経路において、人流による事故や避難の遅れを防ぐために、避難経路の混雑度を計算し分析を行う。研究対象地域は東京都足立区とし、氾濫する可能性のある河川は荒川である。図1に示すように、足立区は東京都北東部に位置し、人口は約69万人であり、そのうち約1/4の17万人が高齢者である。地理的には川に囲まれ、平均標高が6m、最低標高が-5mであるため、東京都内でも特に水害リスクが高い地域である。

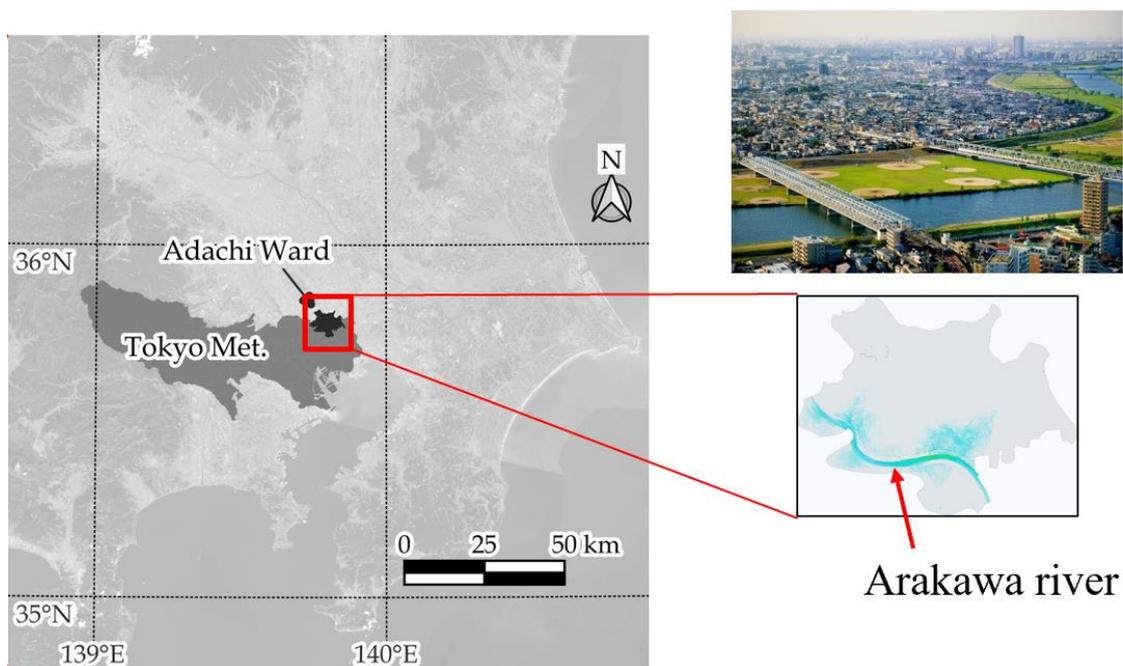


図 1: 足立区と荒川

荒川は古くから氾濫を繰り返してきた。例えば、天安 2 年（858 年）の「日本三大実録」にも武蔵国水滲と記録されており、それ以降も多くの洪水が発生している。明治 43 年（1910 年）には荒川上流部の三峰で 675.8mm、東京で 310.5mm の降水量を記録し、荒川や綾瀬川の堤防が決壊し、東京府の南足立郡の半分、北豊島郡の北半分、南葛飾郡の 7 割が浸水被害を受けた。これを機に明治 44 年（1911 年）に荒川放水路事業が始動し、風水被害や関東大震災による遅延はあったが、昭和 5 年（1930 年）に完成し、放水路区間での洪水被害は発生していない。しかし、その後も洪水は続き、昭和 22 年（1947 年）には戦後最大の台風とされるカスリーン台風により、30 数時間で 1 年間の三分の一の雨量が降り注ぎ、荒川の上流域では想定を 1.12m 上回る水位となり、堤防越えや堤防決壊が発生した。

被害は甚大で、足立区の東半分、葛飾区全域、江戸川区の船堀以北を除いたエリアが浸水し、浸水面積は 78.65 平方キロメートル、最高深度は約 3m に達した。足立区の被災世帯数は 18,397 世帯、被災者数は 74,051 人に及び、床上浸水家屋は 7,059 戸、床下浸水家屋は 11,338 戸であった。更に昭和 33 年（1958 年）の狩野川台風では、足立区に多くの農業用水路が存在することから、その氾濫により低地帯の梅田・本木地区が水没した。荒川支流の芝川も氾濫し、川口市全域が浸水し、足立区側の堤防を超えて荒川北側の堤防に沿って水が流れ込んだため、膝下までの水深が続く洪水が発生した。63 か所の避難所が設置され、延べ 146,000 人が避難した。[1][2].

表 1: 荒川氾濫の歴史

和暦	西暦	出来事
天安 2 年	858	荒川洪水の最古の記録「日本最大実録」
寛保 2 年	1742	荒川と利根川の氾濫
安政 6 年	1859	荒川筋各所の堤が切れ浸水被害
明治 43 年	1910	2 週間に及ぶ前線と台風による大洪水
明治 44 年	1911	荒川放水路事業スタート
昭和 5 年	1947	カスリーン台風
昭和 33 年	1958	狩野川台風

平成以降も荒川の増水による氾濫は続いた。平成 11 年には熱帯低気圧による豪雨で、荒川上流域の治水橋で 3 日間の平均降水量 399mm を記録し、平成 19 年には台風 19 号により関東・東北で 140 か所の堤防が決壊、荒川水系でも 3 か所で決壊が発生した。令和元年の台風 19 号は記憶に新しく、当時の気象庁の発表では荒川流域の 3 日間総雨量が 500mm を超える可能性があるとして、荒川東側の江戸川区では都内最多の 35,000 人が避難した。

荒川が氾濫し都内で広範囲な洪水が起こる可能性は決して否定できず、令和元年の台風 19 号では偶然引き潮のタイミングが重なり水位が下がったため、洪水が回避されたという見方もある。こうした台風や豪雨の増加により、近年では水害に対する意識が高まり、足立区を含む江東 5 区で備えや対策が強化されつつある。

1.2 本研究の目的

災害時の避難経路の指標としてハザードマップがある。図 2 に示す足立区のハザードマップ[3]には、おおよその浸水予測や水害時の避難施設、避難方向が示されているが、どの経路が安全かつ迅速な避難に適しているかが分かりにくい。また、避難時における一時的

な人流の増加により起きる群衆事故や交通渋滞といった間接的な二次被害を防ぐために、災害時に混雑しやすい道路をある程度事前に予測したうえで認識しておく必要がある。

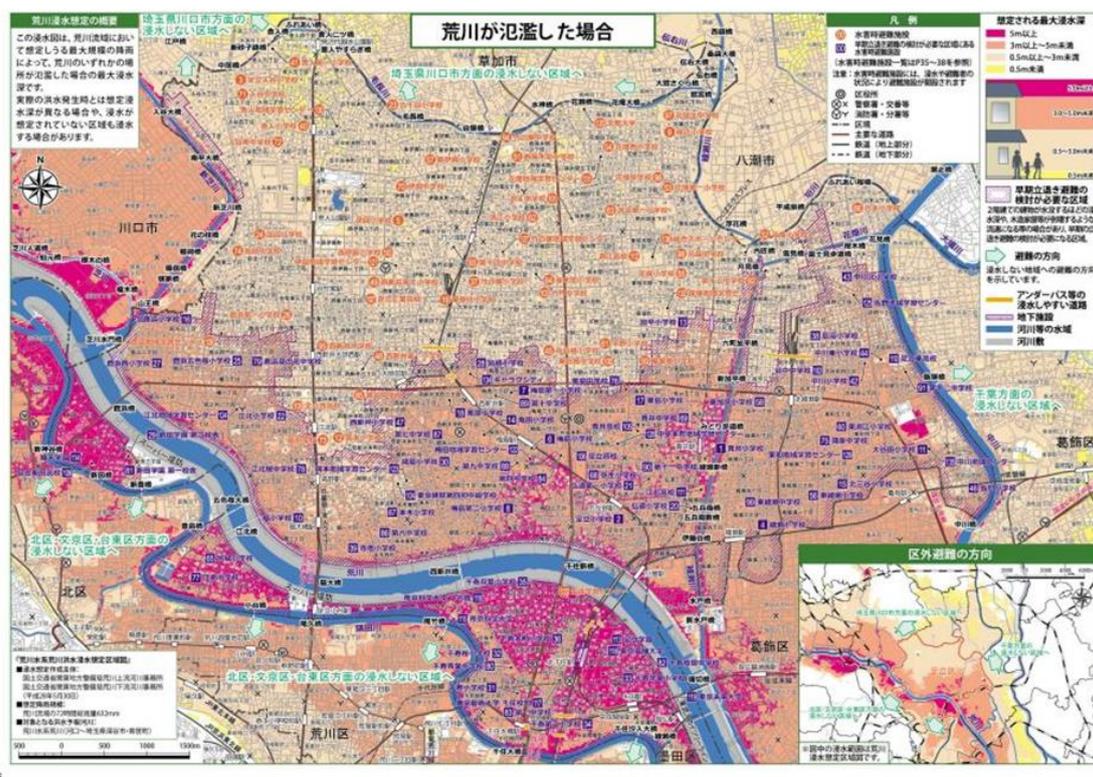


図 2: 足立区より公開, 荒川氾濫時のハザードマップ[3]

そこで本研究では、河川氾濫時をシミュレーションした浸水域を表現した洪水浸水想定図に、最短経路問題を使って混雑度計算を適用し交通量を可視化することを目的とする。また、破損した道路や家屋の修繕費といった直接的な被害ではなく、浸水した道路が使用不可になり迂回が必要になることで人々が余計にかかる移動距離や移動時間によるロスを算出する。この二次被害額を災害が発生する前に事前に把握できることで早期復旧に役立つと考えられる。

1.3 論文構成

本論文は、全9章で構成している。

第2章では、本研究の基礎知識、基礎理論について述べる。

第3章では、洪水浸水想定図作成にあたり用いた先行研究である「数値標高モデルのみによる簡易的な洪水氾濫域予測法」について述べる。

第4章では、本研究の実験概要について述べる。

第5章では、洪水浸水想定図について述べる。

第6章では、混雑度計算について述べる。

第7章では、実験結果を地図上に可視化して考察する。

第8章では、二次被害額算出について述べる。

第9章では、本研究での考察及び今後の課題について述べる。

2 基礎理論

本章では、本研究に用いる用語や理論、関連知識について述べる。

2.1 GIS

GIS¹は地理空間情報活用基本法（平成 19 年法律第 63 号）第 2 条において、「地理空間情報の地理的な把握や分析を可能とするため、電磁的方式で記録された地理空間情報を電子計算機で電子地図上に統合的に処理する情報システム」と定義されている。これにより位置データや空間データの管理・加工・表示が一元化され、高度な分析が可能となる。GIS は多様なデータをレイヤごとに電子地図上に分けて視覚的に表示できる点が特徴である。用途も幅広く、道路や水道、電気、ガスといった社会インフラの管理、更には不動産における情報管理やエリアマーケティング、防災分野などでも活用されている。近年ではインターネットを介した地図情報の表示や GPS²によるナビゲーションなど、日常生活に欠かせない技術となっている。

2.2 ハザードマップ

自然災害時の被害が想定されている領域や危険個所、避難施設、防災関係機関などを表示している地図のことで、防災マップと呼ばれることもあり、市区町村毎に作成されている。ハザードマップと防災マップの違いとして、ハザードマップは災害毎の被害予測図のことであるが、一方の防災マップは避難所や公共施設などを示した地図で災害毎に分かれているものではない。ハザードマップの種類として、洪水ハザードマップ、土砂災害ハザードマップ、地震ハザードマップ、火山噴火ハザードマップがある。いずれの災害ハザードマップも、法令により市区町村が作成しハザードマップの配布やその必要な措置を講じて、住民や登山者等に周知させるように努めることとされている。

なお、本研究で使用する洪水浸水想定図とハザードマップは別物であり、洪水浸水想定図とは河川が氾濫した際の水の広がりや深さのみを表した図である。

2.3 メッシュ

「メッシュ」とは一般的に網の目を意味するが、GIS においては異なる意味を持つ。GIS でのメッシュは国が定めたルールに基づき、地表面を正方形に分割した単位であり、標準地域メッシュや標準メッシュと呼ばれる。代表的なものとして第一次、第二次、第三次メッシュがある。第一次メッシュは 1 度毎の経線と 40 分毎の緯線で区切られ、一辺は約 80km。第二次メッシュはこれを緯度・経度方向に 8 等分したもので、経度 7 分 30 秒、緯度 5 分の

¹ Geographic Information System：地理情報システム

² Global Positioning System：全地球測位システム

間隔で一辺は約 10km となる。第三次メッシュは更に 10 等分し、経度 45 秒、緯度 30 秒の間隔で一辺は約 1km に設定されている。また「100m メッシュ」などのように、一辺の長さでサイズを表すこともあり、100m メッシュは第三次メッシュの 1/10 の大きさである。

メッシュのサイズは多様に設定可能だが、地球が回転楕円体であるため、正方形で地表面を区切るとメッシュ一つ一つは完全な正方形とはならず、緯度や経度方向の実際の距離も必ずしも一辺の長さとも一致しない。このため、各メッシュの正確な面積を求めるのは容易ではなく、距離の計算には調整が必要となる。

メッシュを用いることの利点は、地表面を格子状に分割し、地図上で座標を持たせることで特定の地域の表示が容易になる点にある。また、メッシュごとに統計データを割り当てることで数値データが地図上で視覚化でき、ほぼ同一サイズの区画ごとに周囲と計量的な比較が可能となり、幅広い分野の研究や分析に活用されている。

2.4 座標参照系

緯度や経度は角度であり、これらの数値のみを座標として示されても地球は球面であるため実際の位置は特定できない。この緯度経度だけでの位置の表し方は地理座標系と呼ばれる。これ以外に位置を表す方法として投影座標系がある。投影座標系は地球を 2 次元に投影し、ある地点を原点としたときの距離で表したものであり、距離計算がしやすいことから GIS において使われている。メッシュでの説明のとおり南北方向と東西方向の距離が異なるため、ある点を中心点とした等距離間のバッファは円形ではなく楕円形になる。

日本で使用される測地系は日本測地系 2000 か日本測地系 2011 である。日本測地系とは明治時代に日本全国の地形図を作成するために整備された測量の基準点網をもとに構築された測地系である。日本測地系 2000 は測量技術の向上やこれまでの地殻変動の歪みなどを考慮し構築された日本の測地系で 2002 年から採用されていたが、2011 年に東日本大震災が発生し大きな地殻変動が観測されたため、新たに日本測地系 2011 が使われている。

測地系は日本だけでなく全世界でも使われるため、世界中の座標参照系に割り振られた固有の番号である EPSG コードがある。地理座標系は EPSG:4326 であり、投影座標系では日本は 19 個に分かれており、遠い離島を除く東京都は関東地方と福島県が含まれる EPSG:6677 である。なお、日本測地系 2011 での呼び名は IX 系である。

2.5 DEM

GIS で利用される標高データには DEM³、DTM⁴、DSM⁵といったものが挙げられ、中でも最も代表的なものが DEM である。DEM とは、ある地域における樹木や建物を取り除い

³ Digital Elevation Model : 数値標高モデル

⁴ Digital Terrain Model : 数値地形モデル

⁵ Digital Surface Model : 数値表層モデル

た地表面の標高をデジタルデータで表したものであり、日本では国土地理院が提供している基盤地図情報の DEM データが広く利用されている。DEM は、航空レーザー測量や写真測量によって得られた標高データを用いて作成しており、地形の表現方法は複数のものがある。代表的な表現方法として、メッシュの中心点の標高値を抽出するものや TIN⁶を構成し、その頂点の標高値から地形を表現するものがあるが、基盤地図情報による DEM データは前者の表現方法を取り、メッシュの中心点の緯度経度の座標と標高値の XYZ 形式で表される。

DEM を利用することで、地表面の高低や起伏を表現できるようになるため、色の濃淡で地形表現をした高度段彩図や陰影起伏図、等高線などの作成に役立てられている。また、メッシュの中心点の座標、標高値から 3D 表示も可能となるため、地図の立体化や触地図作成にも役立っている。

2.6 標高行列

DEM データの中身は、XYZ 情報の羅列であり、そのままでは周囲のメッシュの標高もわからないため、直接計算に用いることはできない。そのため、座標情報をもとにモデル化する必要がある。

DEM のモデル化の手法はいくつかあるが、最も一般的な手法として標高行列が挙げられる。標高行列は格子 DEM と呼ばれ、行列の行番号と列番号を地理座標と重ねることで表される。ここで、標高行列の各成分は DEM におけるメッシュであり、そのメッシュの標高値が与えられる。標高行列は成分が格子状に規則正しく並んでいるため、行列の大きさ、メッシュサイズ、左上などの角の成分に対応する座標から各メッシュの座標を取得することも可能である。

DEM を標高行列に変換することで、周囲の地形のつながりが分かりやすくなるだけでなく、地理的な座標情報が不要になるため、3D 化やシミュレーションの際に計算が簡略化されるといったメリットもある。

2.7 ベクタデータ

ベクタデータは、GIS におけるデータ形式の一つで、ポイント、ライン、ポリゴンでの三要素で地理情報を表現するもので、座標と属性情報を持っている。例えば、位置を示す「ポイント」は施設や建物の位置情報に用いられ、道路や河川などの「ライン」はつながりを持つ地理要素を示す。「ポリゴン」は土地利用や行政区画などの領域を示し、境界線で囲まれた範囲を表す。ベクタデータは精度が高く、縮尺の変更に強いいため、地理データを詳細に表現できるが、処理が複雑になることもある。

⁶ Triangulated Irregular Network：不規則三角形網

2.8 ラスタデータ

ラスタデータは、GISにおけるデータ形式の一つで、合同な図形で平面を格子状で完全に被覆し、各図形に属性情報等を保持したデータ形式を指し、広域的な分析に用いられることが多い。各セルには特定の値が割り当てられており、色や標高などの情報が反映される。ラスタデータは主に衛星画像や航空写真、DEMなど、連続的なデータを扱う際に用いられ、精細な画像や変化のある地表面を表現するのに適している。データの処理がベクタデータに比べて容易であるが、解像度に依存しデータ量が大きくなることがある。

2.9 最短経路問題

最短経路問題とはグラフ理論において重み付きグラフの与えられた二つのノード間を結ぶ経路の中で、重みが最小の経路を求める最適化問題である。最短経路問題は主に単一始点最短経路問題と全点对間最短経路問題の2種類がある。単一始点最短経路問題の代表的なアルゴリズムとしてダイクストラ法とベルマン・フォード法がある。

ダイクストラ法はグラフ理論におけるエッジの重みが非負数の場合の単一始点最短経路問題を解く最良のアルゴリズムとして知られている。ダイクストラ法の計算量は頂点の数を V 、辺の数を E 、とすると、 $O((E+V)\log V)$ である。ベルマン・フォード法はエッジの重みが負の場合も考慮できるアルゴリズムであるが、 $O(V^2 + E)$ と計算量が多いため今回は採用しない。

2.10 隣接行列

隣接行列とはグラフ G に含まれるノードが n 個あるとき、頂点 v_i, v_j を結ぶエッジの本数を i, j 要素に持つ n 次正方行列のことである。0,1のバイナリ表現によって i 番目と j 番目のノード同士が隣接マッチングしているかを示している。本研究では一方通行路は存在せず無向グラフとして扱っているため i 番目から j 番目方向、 j 番目から i 番目方向ともに道路でつながっていれば1になるが、一方通行路のある有向グラフである場合は通行できない方向は0となる。

頂点の集合を $V(G)$ 、辺の集合を $E(G)$ 、接続関数を I_G とする。

$$V(G) = v_1, v_2, v_3, v_4$$

$$E(G) = e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$$

$$I_G(e_1) = v_1, v_2, \quad I_G(e_2) = v_1, v_3, \quad I_G(e_3) = v_2, v_3, \quad I_G(e_4) = v_2, v_4, \quad I_G(e_5) = v_3, v_4$$

上記のような場合の隣接行列 A は以下のようになる。

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

2.11 近傍

シミュレーションにおける「近傍」は特定のセルや位置に対して影響を与えたり受けたりする周囲の範囲やセルのことを指す。近傍の定義によってシミュレーションでの拡散パターンや影響の範囲が変わり、モデルに大きな影響を与える。よく使用される近傍としてムーア近傍とノイマン近傍がある。ムーア近傍は中心のセルを囲む上下左右と斜め 8 方向のセルを近傍とするもので、感染や災害の拡散などの広がりを持った影響範囲を表現したいときに用いられる。ノイマン近傍は上下左右 4 方向のみを近傍とするもので、都市計画や化学物質の拡散など規則的で秩序のある成長を表現したいときに用いられる。本研究では高い場所から低い場所へ水の自然な広がり方を表現するために前者を用いる。

2.12 迂回損失

迂回損失とは災害などで道路や交通インフラが遮断され、通常の経路を使用できなくなる際に発生する損失のことを指す。交通網が遮断されることで、車両や人が通常経路を使用できず、代替ルートを利用するために迂回を強いられる。この迂回に伴い移動距離や移動時間が増加し、燃料費や輸送コスト、労働時間の増加などが発生するため、経済的な損失が生じる。本研究では避難先となる目的地候補地点への移動距離の増加による人々の移動に関わる時間的ロスを徒歩時速で計算し被害額を算出する。

3 先行研究

本研究第5章で作成する洪水浸水想定図で最もよく参考にした「数値標高モデルのみによる簡易な洪水氾濫域予測法[4]」を先行研究として紹介し、ここでは特に重要な「氾濫推定域図」の作成ステップを以下に記載する。

3.1 先行研究の有意性

防災計画やリスク評価において重要な役割を果たす洪水氾濫域の予測は詳細な地形データ、流量観測、気象データなどを組み合わせた複雑な数値モデルを必要とするのが従来の方法である。しかし、これらは計算負荷が高く、またリソースデータの限られた地域では適用が難しいことが課題となっている。この先行研究ではこれらの課題を解決するために数値標高モデルのみをリソースデータとして洪水氾濫域の予測を可能にするものである。

地形データとしてDEMを使用し、河川流域や地形の低地を抽出する。次に破堤位置の水位の仮定を行い、周辺セルへの伝播をシミュレートする。この手法は水害シミュレーション以降にも混雑度計算する過程があり、計算量が膨大になる本研究に適している手法であると考え使用する。

3.2 氾濫推定域図の作成手順

洪水氾濫域を簡易的に推定するために、DEMを使用して氾濫推定図を作成する具体的な手順は以下の通りである。

1. 破堤位置を決め、そこでの浸水深 H を与える。更に、徐々に水深を深くするための刻み幅 $\Delta h = H/N$ を決める。ただし、 N は自然数であり、破堤位置は洪水の開始地点とし浸水が始まる地点である。浸水深 H は瞬間的な目に見える水位ではなく、降水量のように単位時間あたりでの合計水量を指している。 N はシミュレーション回数を指しており、この回数が多いほどより現実味のある連続的な結果が得られる。 N 回の結果を重ね合わせるため、例えるとコマ撮りで項数が多いことによるメリットである。
2. 洪水発生地点の標高値を h_0 として Δh だけ上げる。 $h_0 + \Delta h$ を新たな標高値として更新し、これを水面標高として扱う。
3. 新たに浸水した地点 i の近傍である8地点において、すでに浸水しているかどうかを全てについて計算する。この段階でまだ浸水していない地点 j で、かつ $h_j \leq h_i$ であれば、 h_j を $\min[\Delta h; h_i - h_j]$ だけ上げ、これを浸水地点とする。なお、地点 j の周囲に浸水場所が多数ある場合は標高値の増加量はそれらの地点での標高値との差分の平均値を使用する。また、既に浸水している場所の標高が更に変化することは、計算量を減らすために考慮していない。

図3に具体例($\Delta h = 2m$)を示す。3×4のセルで構成されており、各地点の中の数値は標高値である。左下の標高110mと109mの2地点が浸水地点のとき、太線で囲

んだ標高 105m,104m,108m の 3 地点が隣接している水の流れ込む箇所であり新たな浸水地点となる。標高 105m 地点と 104m 地点は 109m 地点と隣接しているので、それぞれ $2m(\Delta h = 2m < 109 - 105, \Delta h < 109 - 104)$ だけ標高値は変化し、標高 108 地点では標高 110m 地点及び 109m 地点と隣接しているため、平均値である $1.5m(\frac{110-108+109-108}{2} = 1.5)$ だけ変化する。浸水地点である標高 109m は、隣の浸水地点である標高 110m 地点より標高が低いに変化させない。

120	100	104	110
115	108	105	106
110	109	104	108
↓			
120	100	104	110
115	109.5	107	106
110	109	106	108

図 3: 氾濫推定の計算例

- 手順 3 において新たに浸水地点が追加されれば、その浸水地点を使って手順 3 を繰り返す。もし、追加された浸水地点がなければその時点で浸水域を記録し、現在の浸水域での水面標高を地面標高と仮定して、手順 2 に戻る。ただし、洪水開始地点での標高値の増加量がすでに設定値Hに達していれば手順 5 に進む。
- 手順 4 で作成されたN枚の浸水域を図に重ね合わせ、手順 1 で定めた破堤位置での氾濫域推定域図を作成する。
- 河道沿いの数地点から M 個の地点を破堤位置に選び、手順 1-5 で作成した M 枚の氾濫推定域図を重ね合わせ、河川流域全体の最終的な氾濫推定域図を完成させる。本研究ではこれを洪水浸水想定図と呼ぶ。

4 実験概要

本章では、本研究の実験ステップの説明と、第5章及び第6章での洪水浸水想定図作成、混雑度計算の際に使用するデータについて述べる。また、便宜上足立区の地域名称についても示す。

4.1 実験ステップ

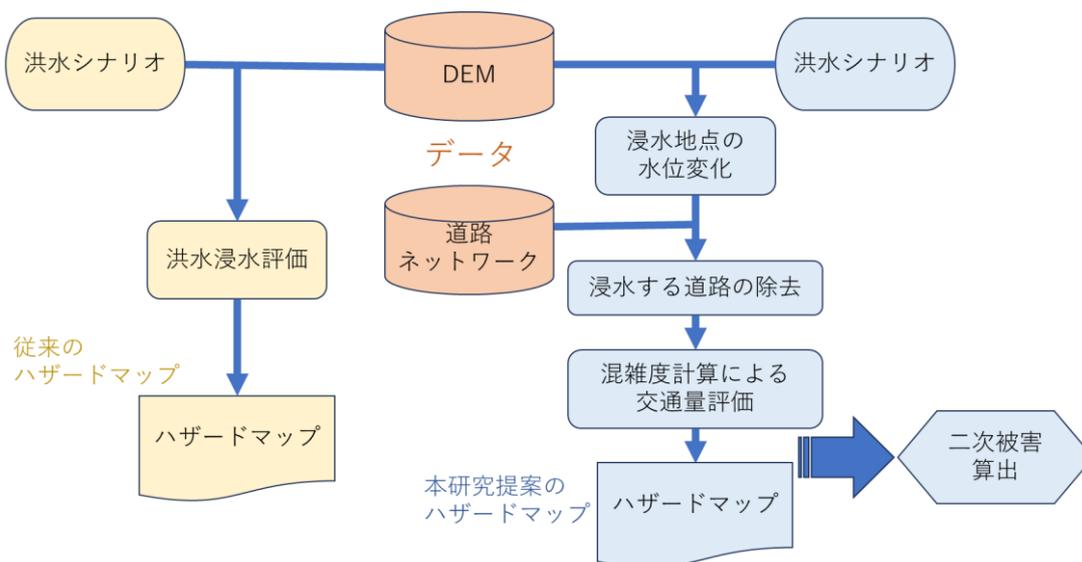


図 4: 実験ステップのフローチャート

従来のハザードマップと比較した本研究の実験ステップのフローチャートを図4に示す。本研究では洪水被害を3段階に分けてシミュレーションを行い、その結果毎の使用可能道路ネットワークを作成し混雑度計算による交通量評価をすることで、現在行政から公開されているハザードマップより有用性のあるものを提案するとともに、得られた計算結果から災害後の間接的なロスである移動コストの増加について二次被害額を算出する。

4.2 氾濫域予測使用データ

有用な避難経路を算出するのに欠かせないものが、洪水浸水想定図やハザードマップである。国土数値情報ダウンロードサービスから洪水浸水想定区域というデータが入手可能であるが、メッシュサイズが大きいデータであるため、河川氾濫の大まかな影響範囲や規模を確認することはできても市区町村単位に拡大するとかなり粗いデータである。本研究では足立区に地域を限定した実験を行うため、このデータをそのまま用いることは不適切である。そこで、本研究ではメッシュサイズが5mの標高データを用いて洪水浸水想定図を作成することが望ましい。標高データは国土地理院の基盤地図情報より入手した5mメッシュ

の DEM データを使用する。このデータはメッシュの中心点の座標と標高を示すものであるため、シミュレーションが可能になるように行列形式に変換し氾濫域予測を行う。

4.2 混雑度計算使用データ

道路ネットワークはコンサベーション GIS コンソーシアム事務局の「地理院地図 Vector(仮称)提供実験」のデータをもとに、コンサベーション GIS コンソーシアムが編集・調整したデータを使用する。この道路データは島嶼部を除く東京都と周囲の隣接する県の一部地域の領域内全ての道路が含まれている。このデータから足立区領域内のみの道路データを抽出する。この抽出した道路データをそのまま扱くと本研究で需要点となる交差点ノードが約 10 万個存在するため計算量を考慮して主要道路でない細かい生活道路と災害時の住民の被害に適さない高速道路、河川敷の遊歩道を除いた新たな道路ネットワークに編集し実験を行う。この道路ネットワークと交差点ノードを図 5 に示す。

黒丸で囲われた 15 個のノードは避難時の目的地候補点である。太い道にあり任意に指定する区境に存在するノードである。詳しくは 6 章混雑度計算での制約条件で触れる。

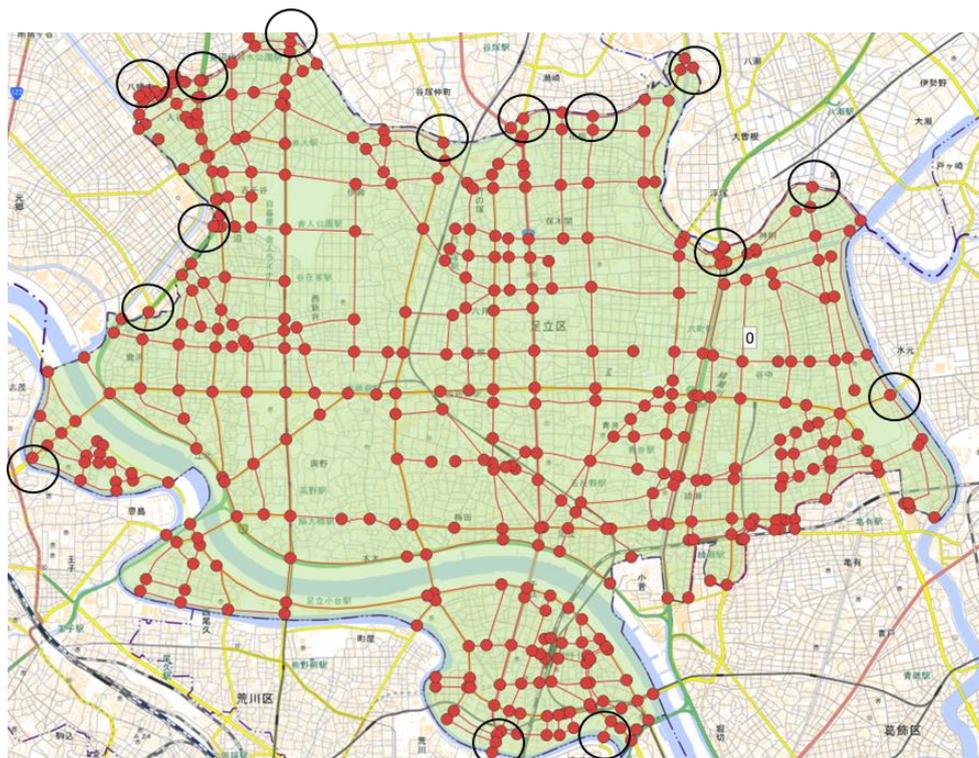


図 5: 足立区領域内の道路ネットワーク

4.3 足立区内のおおまかな地域名称

本研究では足立区内の地域を図 6 のような地域としておおまかに分類する。町丁目単位で着目すると実際の地区名と異なる箇所もあるが、本研究での結果の記述や考察にて各地区

を示すための表現である。ただし、本研究で人口データとして扱った町丁目単位での夜間人口は実際の地区と一致するものを使用しているため、図6での分類は説明のために便宜上設定した地域名称である。

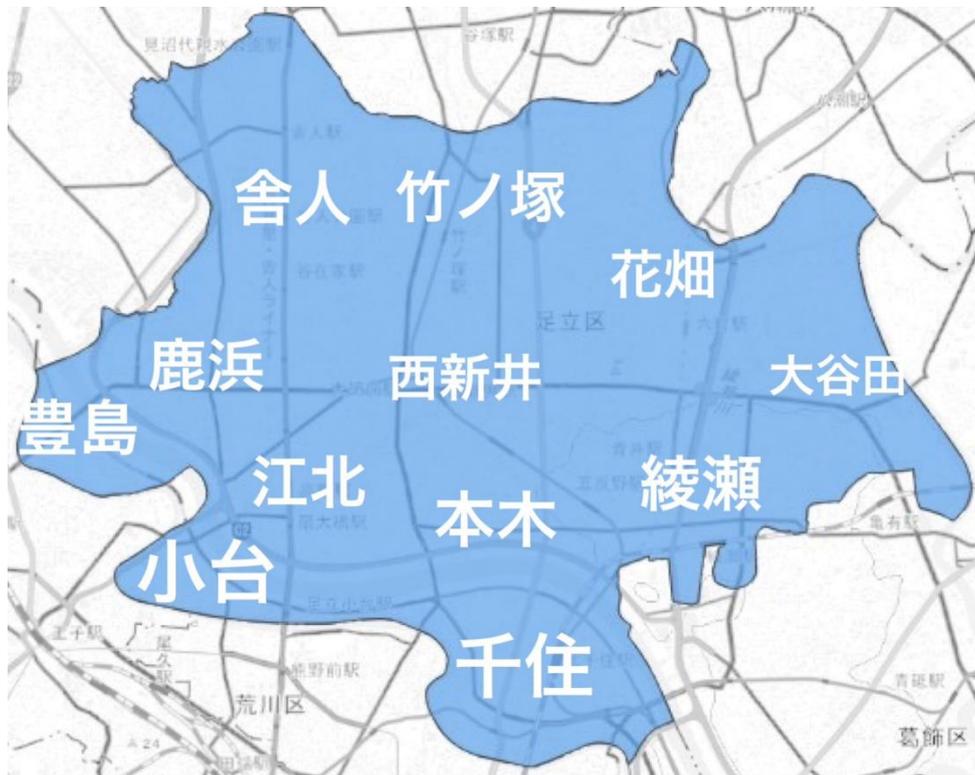


図 6: 地域名称付け

5 洪水浸水想定図作成

本章では、第6章の混雑度計算で用いるための洪水浸水想定図の作成について述べる。

5.1 標高行列作成

前述のとおり、足立区領域内におけるメッシュサイズが小さい洪水浸水想定図やハザードマップのDEMデータは現状公開されていない。そこで、地表面の起伏情報を表すDEMデータのみを用いて氾濫域のシミュレーションを行い、洪水浸水想定図を作成する。シミュレーションの準備として、まずは基盤地図情報から得たDEMデータを標高行列に変換する。

基盤地図情報から得たDEMデータはXYZ形式の三次元データであり、地図上の北西の頂点から始まり南東の頂点まで並んでいる。足立区の四方の頂点はそれぞれ、北西頂点=(最西端座標, 最北端座標), 北東頂点=(最東端座標, 北端座標), 南西頂点=(最西端座標, 最南端座標), 南東頂点=(最東端座標, 最南端座標)。標高行列はメッシュサイズや頂点座標をもとに各行、列の番号から座標を導き出せることを利用すると、座標情報から行列形式に変換することが可能である。西から東へ一列ずつ向かい、北から南へ一行ずつ向かう行列データである。本研究では5mメッシュの縦横のメッシュサイズ、頂点座標から2059×1621の標高行列を作成し、各成分に標高値を格納することで三次元データとなる。

5.2 氾濫域のシミュレーション

基本的な考え方や手順は「数値標高モデルのみによる簡易な洪水氾濫域予測法」[4]と同様であり、使用する変数名も同じものを使用し、以下のように数値を設定する。

手順1では、氾濫が生じる河川の堤防の決壊地点を設定し、その地点での浸水深 H を与える。ここでの浸水深 H は堤防を越水する瞬間的な高さではなく破堤位置から流れ出す水の量がその地点で最終的にどの程度の深さまで達するかを指し示す。つまり、降水量のような一定時間でその地点に溜まる水量に相当する。今回、破堤位置は任意で選択した八か所とし、そこでの浸水深を $H=2,4,6[m]$ としてそれぞれシミュレーションを行う。選んだ八か所の破堤位置について、水流の浸食作用により、河川の流れが変化する箇所であるカーブの外側は一般的には破堤のリスクが高いとされている。そのため、足立区内における荒川のカーブの外側を破堤位置として、川の北側に五か所、南側に三か所と図7のように設定する。ただし、現実にはそれら河川のカーブの外側は決壊のリスクが高いことを見越して他の地点よりも強度を高めて施工されている場合もあり、実際はどの地点で破堤が発生しても不思議ではない。また、設定された破堤位置から離れた箇所では浸水到達が遅れる計算結果が出るが、実際の破堤地点が不明なため、こうした地域での浸水の到達も計算結果とは大きく異なる

可能性がある。そうした理由から、より精密な氾濫シミュレーションを行う場合は破堤位置の数をもっと増やすことが望ましいが、計算時間の問題から本研究では八か所のみ限定している。

また、 $\Delta h = 0.10[m]$ として、 H の値によってそれぞれ刻み幅を変化させることはせず固定する。足立区は、その全域が低地帯で地表面の起伏に乏しい地域であり、今回使用するデータのメッシュサイズは5mであることから、隣り合うメッシュ間で標高が大きく変わることは少ない。また、 Δh の値を小さくすることで一度のシミュレーション内で変化する標高値は小さくなるため、低地帯が広がる足立区でも計算が可能となる。 Δh の値は H のどの場合にもよらず0.10[m]とする。

手順 2,3 では上記の八か所の決壊地点で刻み幅 Δh ずつ標高を上げてシミュレーションを行う。なお、決壊地点及び各地点の変化後の標高値は水面標高としている。

手順 4 では、各地点で N 回シミュレーションを行い、それぞれの結果を保持し、決壊地点での浸水深が H に達するまで繰り返す。

手順 5 では、手順 4 で作成したシミュレーション結果である N 枚の氾濫域図を平均化することで各地点の洪水浸水想定図が作成される。

最後に、各地点での結果を重ね合わせることで足立区における荒川の洪水浸水想定図が完成する。

5.3 シミュレーション結果

$H=2,4,6$ におけるそれぞれのシミュレーション結果を図 7-9 に示す。図中の色について表 2 浸水深カラーランプに示す。

表 2: 浸水深カラーランプ

白	0m
青	0.5m 未満
緑	1.0m 未満
黄色	1.5m 未満
橙	2.0m 未満
赤	2.0m 以上

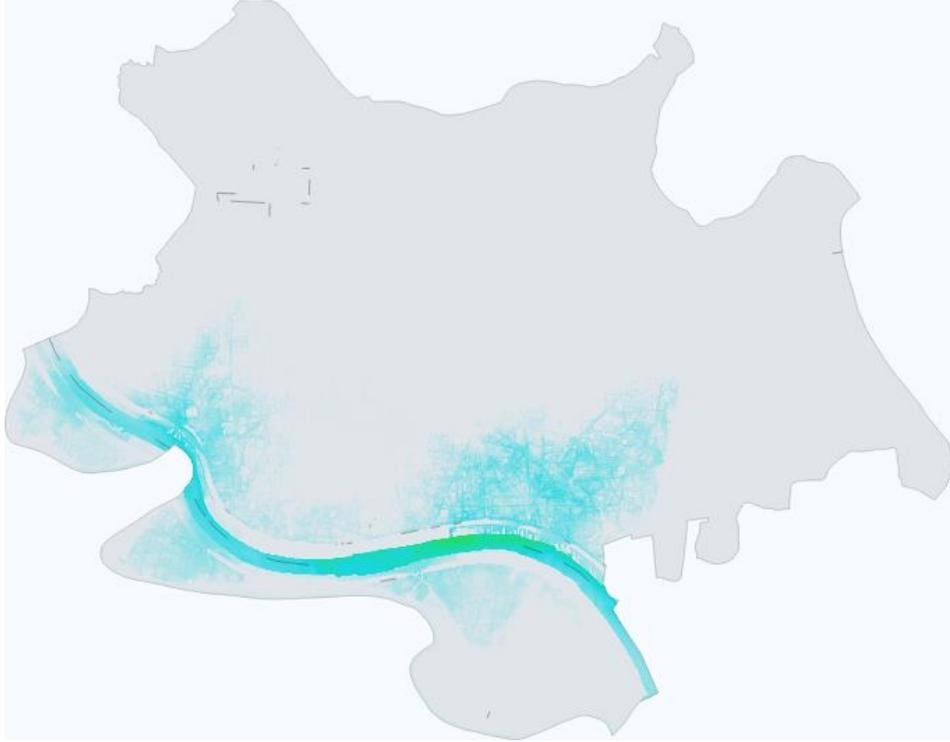


図 7: 浸水深 $H=2$ の場合の氾濫域シミュレーション

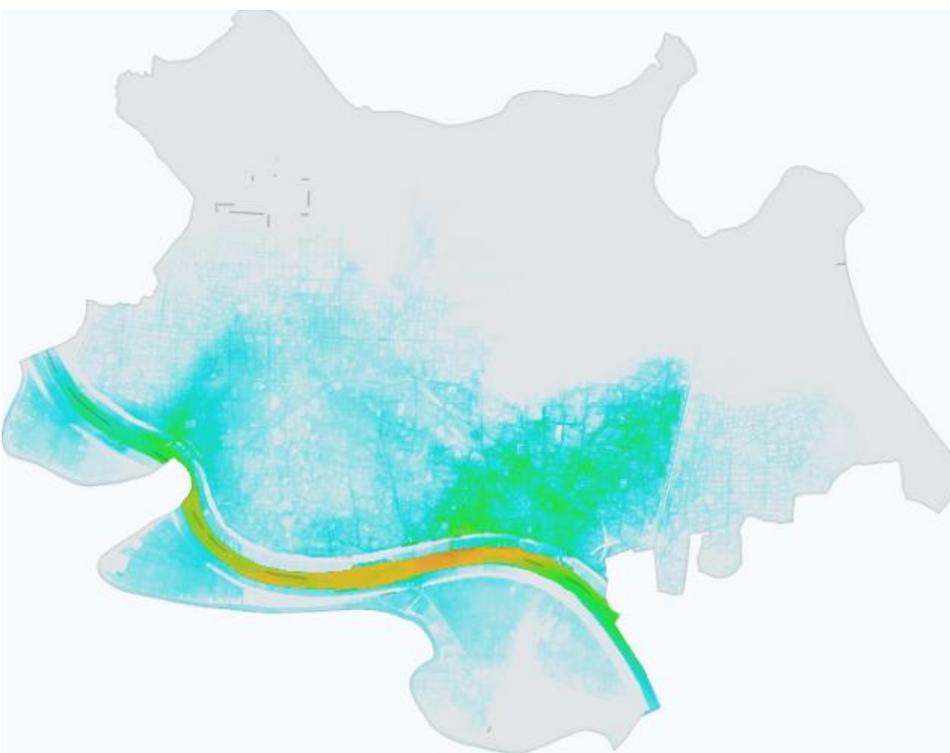


図 8: 浸水深 $H=4$ の場合の氾濫域シミュレーション

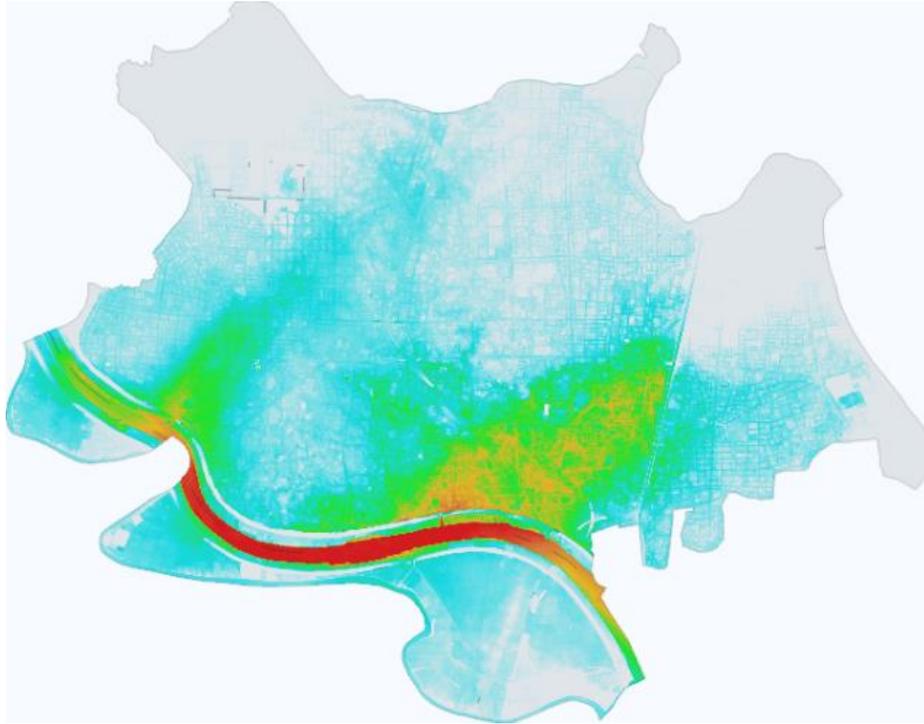


図 9: 浸水深 H=6 の場合の氾濫域シミュレーション

今回 3 種類の氾濫シミュレーションを行った目的は様々な被害状況を想定することでどの地域がより早く避難すべきかを示唆することを可能にするためである。一番被害の大きい浸水深 H=6 の場合では浸水深が 6m に達する前に 2m や 4m に達するため、シミュレーション結果である図 9 だけでは途中段階での被害状況が明確にならない。つまり、浸水深 H=2 の場合の図 7 で色のついている地域は越水後早々に避難すべきという意味になる。

荒川の北側に注目すると、H の値がいずれの場合も港北、本木といった低地帯地域を中心に広がっている。本研究の水害シミュレーションでは足立区領域内の被害が大きい場合を想定するために本木付近の破堤位置が 3 か所あるためこのような結果になるが、任意に設定する破堤位置を変えることでシミュレーション結果が変わる。実務で用いる場合は水理学や建築学によって求解される脆弱性のある堤防地点を、本研究で提案する手法の任意の破堤位置に設定することで有用性のあるものとなる。

また、北西部に位置する大谷田ではあるラインを境として水の広がりが抑えられていることが図 7-9 から読み取れる。これは足立区を縦断する綾瀬川が存在するからである。農研機構による津波の減勢効果の水理実験[5]で排水路の有無で浸水域の広がりが変わることが示されているため、綾瀬川がこの排水路の役割を果たしていると考えられる。

荒川の南側は隅田川と荒川に挟まれる地域であり大部分が標高 1m 以下の低地帯であるため H = 4,6 の場合にはほぼ全域が浸水してしまうが、鉄道軌道の集まる南西部の千住では標高が周囲より高いため浸水しにくくなっている。この地域では浸水しないため避難の必要

性はないが周囲の道路が浸水してしまうため、しばらくは陸の孤島状態に陥る.

6 混雑度計算

本章では、前章で作成した洪水浸水想定図と道路データを合わせて行う混雑度計算について述べる。

ダイクストラ法を用いた単一始点最短経路問題は、一対一最短経路問題と一対全最短経路問題がある。一対一最短経路問題は始点と終点を一つずつ設定し、始点から終点までの最短になる経路と最短距離を求める問題である。また、一対全最短経路問題は始点を一つ設定し、始点から始点以外の各点までの最短になる経路と最短経路も求める問題である。

混雑度は始点を変えながら一対全最短経路問題を解き、最短経路として登場したリンクをカウントしていくことで求まる交通量を指す[6]。本研究では洪水浸水想定図と道路ネットワークを重ね合わせて災害時の避難経路を求めるが、災害時は平常時と異なり人流は河川から離れるように移動すると想定されるため、災害時の混雑度計算では全対全最短経路問題ではなく、足立区の境界付近の15個のノードを目的地候補とする全対15の最短経路問題となる。通常のダイクストラ法の計算量は $O((E+V)\log V)$ であるが、今回の場合では $O(V*(E+V)\log V)$ を15回繰り返したものとなる。

災害時は浸水によって使用できない道路が発生するため洪水浸水想定図の浸水域との被覆道路は通過できない制約を設けることで災害時の最短経路である避難経路を求める。

6.1 前提条件

足立区の全道路を元に交差点ノードを作成するとノード数が約10万個存在するため、主要道路のみを対象とし細かい生活道路は省く。生活道路を省いたため存在しないと考えられるが、使用データだけでは一方通行かどうかの判断ができないため本研究での道路ネットワークは無向グラフとして扱っている。また、高速道路や河川敷歩道は洪水被害での避難道路としては望ましくないと考えられるため考慮していない。

6.2 制約条件1

荒川が氾濫したとき低地帯の広がる足立区では区内全域に洪水浸水被害が広がるため、足立区内の人は荒川から離れ区外へと避難していくと想定する。ここで、荒川より南側の豊島、小台、千住地区にいる人は南側に隣接する北区、荒川区方面へ避難し、荒川より北側地域の人は埼玉県、千葉県方面へと避難する。ただし、千住の南東方向や葛飾区西部のように荒川流が存在する地域は避難方向の地域として不適切なので除外する。

一般的に地震などの被害では自治体内での指定された避難所へ避難し支援を受けるが、水害では避難所が河川に近づく方向の場合や浸水地域の場合があるため、足立区行政からも示されているように近隣の自治体の避難所が避難者を受け入れそこを目指すようになる。

河川が氾濫した際、その水の広がりや他の河川や水路である程度止まると農研機構による津波の減勢効果の水理実験[5]で示されている。足立区は四方を川に囲まれているため、

区外へと避難することでおよその避難は完了する。

異常のような理由から、足立区の北部、東部、豊島南西部、千住南部地域の県境区境に避難先となる目的地ノードを設定する。

6.3 制約条件 2

一般社団法人日本自動車連盟(JAF)の道路冠水時の走行実験[7]によると、一般的なセダン車は水位 30cm で走行可能という結果が出ているが、自動車は排気口であるマフラーから水がエンジン内部に侵入してしまうと故障することが多い。そのため、マフラーに届かない程度の水位 15cm を本研究では走行可能かどうかの浸水判定基準とする。なお、この 15cm は自動車の最低地上高から考えたマフラーの穴に水が浸入しないと考えられる高さである。

洪水浸水想定図から 15cm 以上浸水している領域をモノクロで表現したものが図 10-12 である。これを道路データに重ね合わせて残ったものが使用可能道路として新たな道路ネットワークになる。

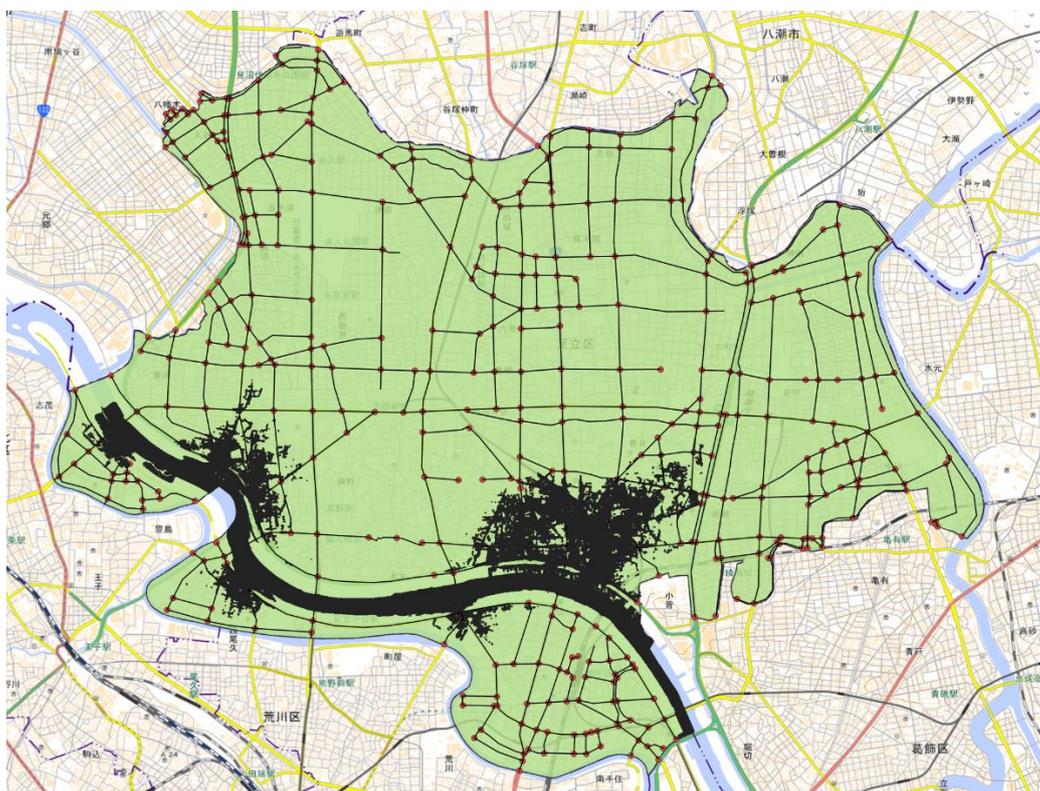


図 10: H=2 の場合の浸水域

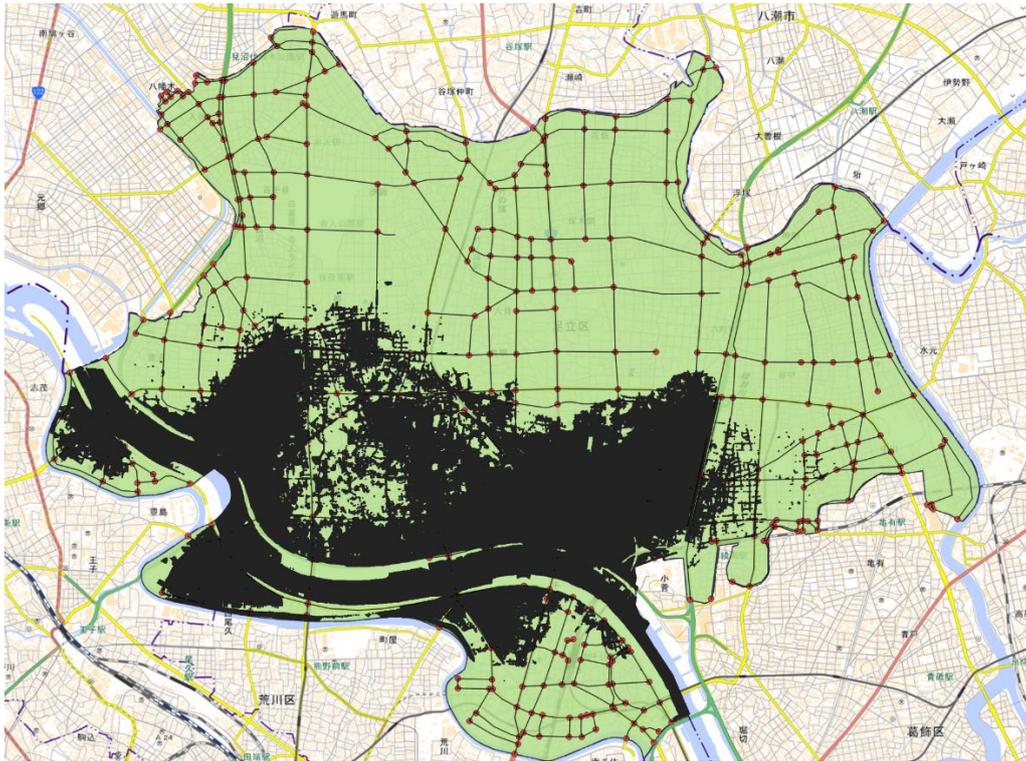


図 11: H=4 の場合の浸水域

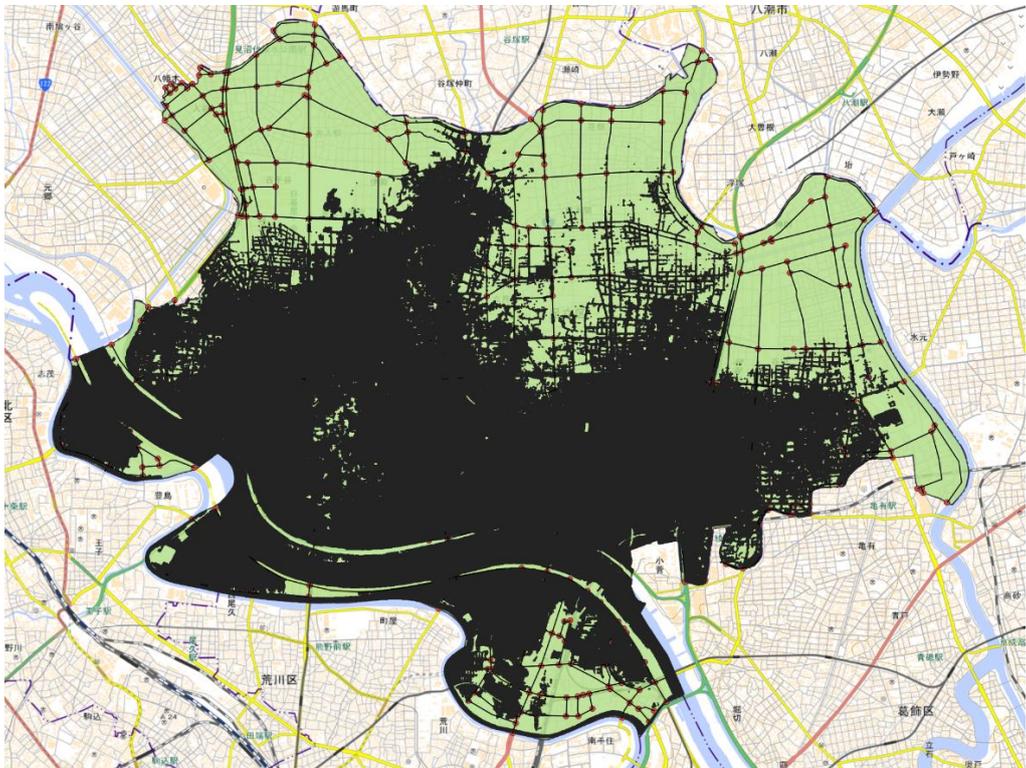


図 12: H=6 の場合の浸水域

6.4 制約条件 3

避難における需要点となる交差点ノードに人口による重みづけを行う。この操作をしない場合交差点ノード毎の人口が均一化されているため、図 13 に示すように主要道路の多い地域では需要点が多いつまり人口が集中している、主要道路の少ない地域では人口が少ないという扱いになる問題が発生する。

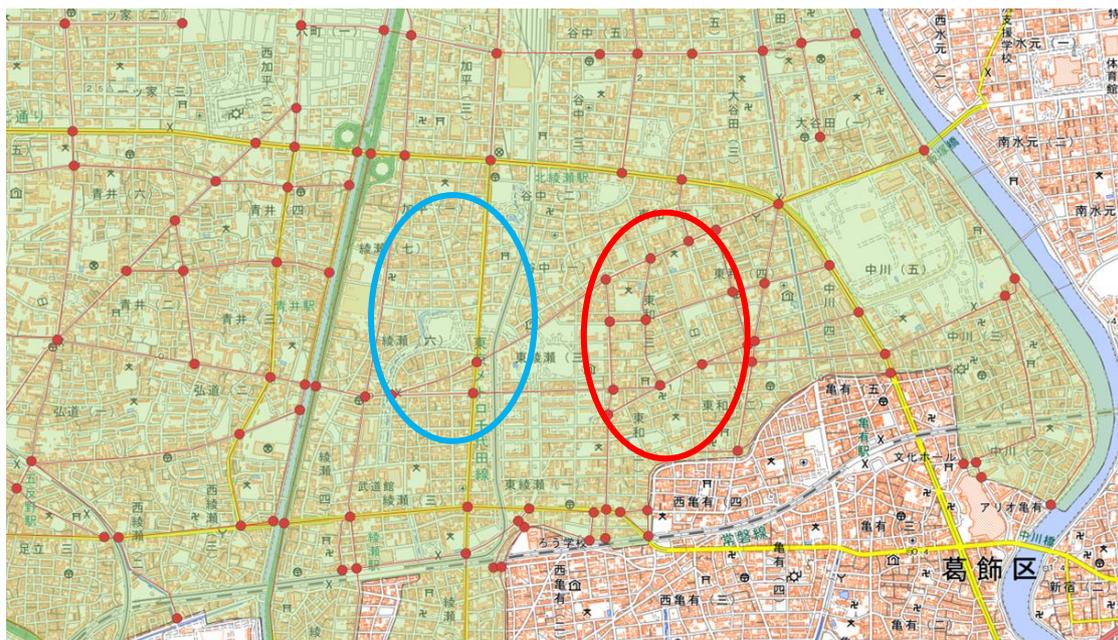


図 13: 交差点ノードの問題点

この問題を解決するために交差点ノードに人口に重みづけをする。x座標 y座標のデータがある交差点ノードに町丁目単位での人口データを加える。交差点の近隣の町丁目単位での人口データを重みとする。交差点人口の計算方法は任意の町丁目内に含まれるまたは隣接する交差点ノードの数で人口を割り、任意の交差点ノードが町丁目重心点付近に存在していればその値、町丁目境界のような重心点から離れた地点に存在していれば近隣の逆距離加重平均の値とする。この町丁目別人口を交差点ノードに割り振る手順について図 14 と式(1)で示す。

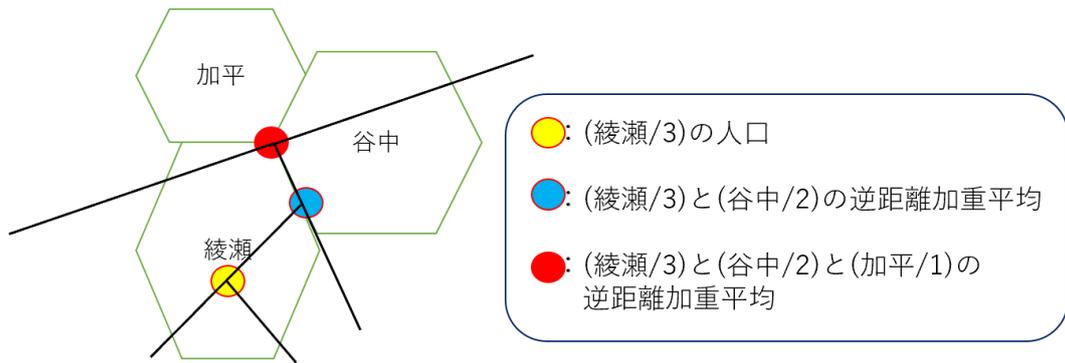


図 14: 人口重みづけ例

$x_i (i = 1, 2, \dots, n)$: n 個の交差点ノード X_i の人口重み

$p_j (j = 1, 2, \dots, m)$: X_i に隣接する P_j 町丁目の人口

$w_j (j = 1, 2, \dots, m)$: P_j の重心に設定する人口重み

k_{P_j} : P_j 町丁目に含まれるまたは接する交差点ノードの数

$d_j (j = 2, \dots, m)$: m 個の町丁目重心点から x_i までの距離

$$w_j = \frac{p_j}{k_{P_j}}, \dots \dots \dots (1)$$

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{w_j}{d_j}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{d_j}}, \dots \dots \dots (2)$$

式(1) w_i は重みづけをするのに用いる町丁目単位の地区名に対しての重みづけを数値化するものであり、式(2) x_i は交差点ノードに重みづけをするものである。

逆距離加重平均による重みづけ後は実際の夜間人口に基づいた現実に近い分析が可能になる。この結果、集合住宅や工場など地図上の建築物の過密具合からだけではわからない正確な人の量を予測できる。この操作をすることによって実際の人口分布に近い値を本研究での各交差点ノードに割り振ることが可能になる。

6.5 計算処理

上記前提条件および制約条件で混雑度計算を行う。目的地候補 15 点を終点とするダイクストラ法によって導かれた各最短経路の中で最も移動距離が短いものを通過経路として採用し、経路として現れたリンク番号に登場回数を追加する。この時、人口重みづけの値の分を登場回数とする。この操作を浸水していない各交差点ノードに行い登場回数を更新する。最終的に得られた通過経路として使われたリンクの登場回数とそのリンクの位置を地図上に可視化させることで混雑度計算の計算処理が完了する。

この後第 8 章に記す二次被害額算出では、この実験過程で得られたデータを用いて計算を進めていく。

7 実験結果

6章の混雑度計算を行った結果を可視化したものについて考察をする。

7.1 H=2 の場合の結果

H=2 の場合の混雑度計算結果を地図上に可視化したものが図 15 である。黒線は交通量 0、青線は 5 段階で 2 万毎に区分し太いものほど交通量が多く表現している。さらに混雑が予測される交通量 10 万以上 20 万未満の道路は薄橙、20 万以上 30 万未満の道路は橙、30 万以上 40 万未満の道路は赤で表現している。

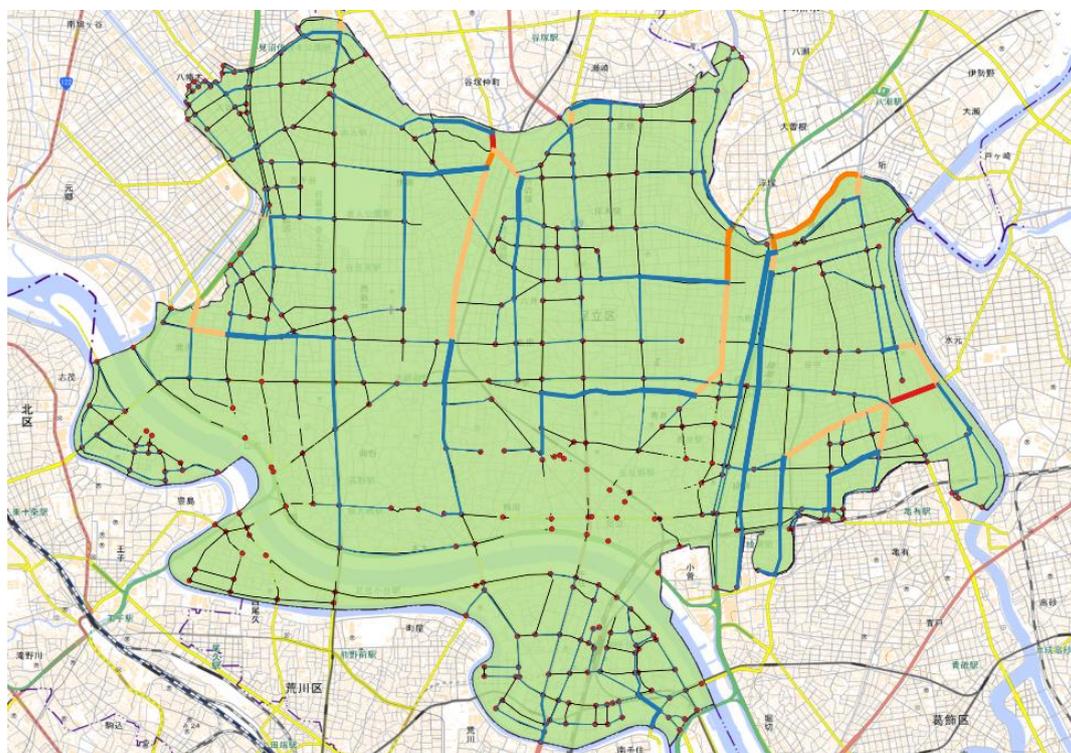


図 15: H=2 の場合の混雑度計算結果

荒川の氾濫によるシミュレーションであるため、南側と北側で道路ネットワークが分断されている。H=2 の場合では南側に位置する豊島、千住地区の避難候補となる目的地は浸水していないため、周辺の冠水していない道路は使用され青くなっている。小台地区は目的地がなく北側へは渡れないため、冠水していない道路があっても陸の孤島状態であるため避難には適さず使用されず黒くなっている。このような陸の孤島状態になる地域は破堤位置の浸水深がシミュレーションの設定値になる前の段階で避難を開始する必要があることが読み取れる。シミュレーションの設定値程度で洪水が止まればインフラの回復まで住居等で

待つと避難しなくても良いが、設定値を超えて続くシミュレーションの H=4,6 のような状況になることを想定すると早期に避難を開始しておくことが望ましい。南側は北側に比べ交通量が少なくなっているが、これは北側に比べ面積が小さいことでカバーしている交差点ノードの数つまり人口が少ないことが原因であると考えられる。

北側については、一部被害地域があるが使用可能道路が多く残っているため後述する H=4,6 の場合で触れる。

7.2 H=4 の場合の結果

H=4 の場合の混雑度計算結果を地図上に可視化したものが図 16 である。黒線は交通量 0、青線は 5 段階で 3 万毎に区分し太いものほど交通量が多く表現している。さらに混雑が予測される交通量 15 万以上 20 万未満の道路は薄橙、20 万以上 25 万未満の道路は橙、25 万以上 30 万未満の道路は赤で表現している。

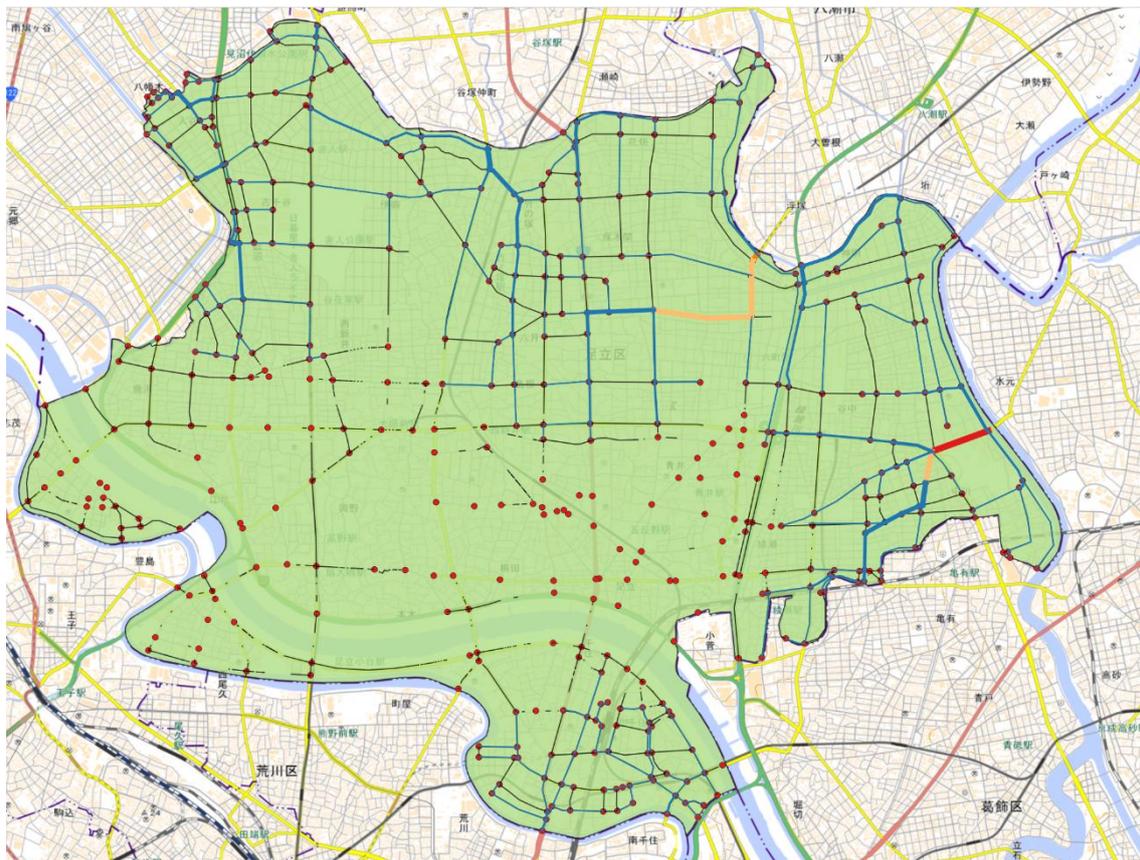


図 16: H=4 の場合の混雑度計算結果

H=4 の場合では豊島地区は大半が冠水してしまい避難ができなくなる。荒川北側に着目すると、東部の交通量については H=2 の場合と同じような区間が多くなっているが、西部の交通量は少し違う結果となっている。これは浸水域が西部の中心部まで広がっており、

H=2 の場合まででは最短となっていた目的地候補点まで到達するのに迂回するのが必要があり、結果的に迂回するの必要のない次に近い目的地候補点である西側の県境方向に変わったからであると考えられる。

7.3 H=6 の場合の結果

H=6 の場合の混雑度計算結果を地図上に可視化したものが図 17 である。黒線は交通量 0、青線は 5 段階で 4 万毎に区分し太いものほど交通量が多く表現している。さらに混雑が予測される交通量 20 万以上 25 万未満の道路は薄橙、25 万以上 30 万未満の道路は橙、30 万以上 35 万未満の道路は赤で表現している。

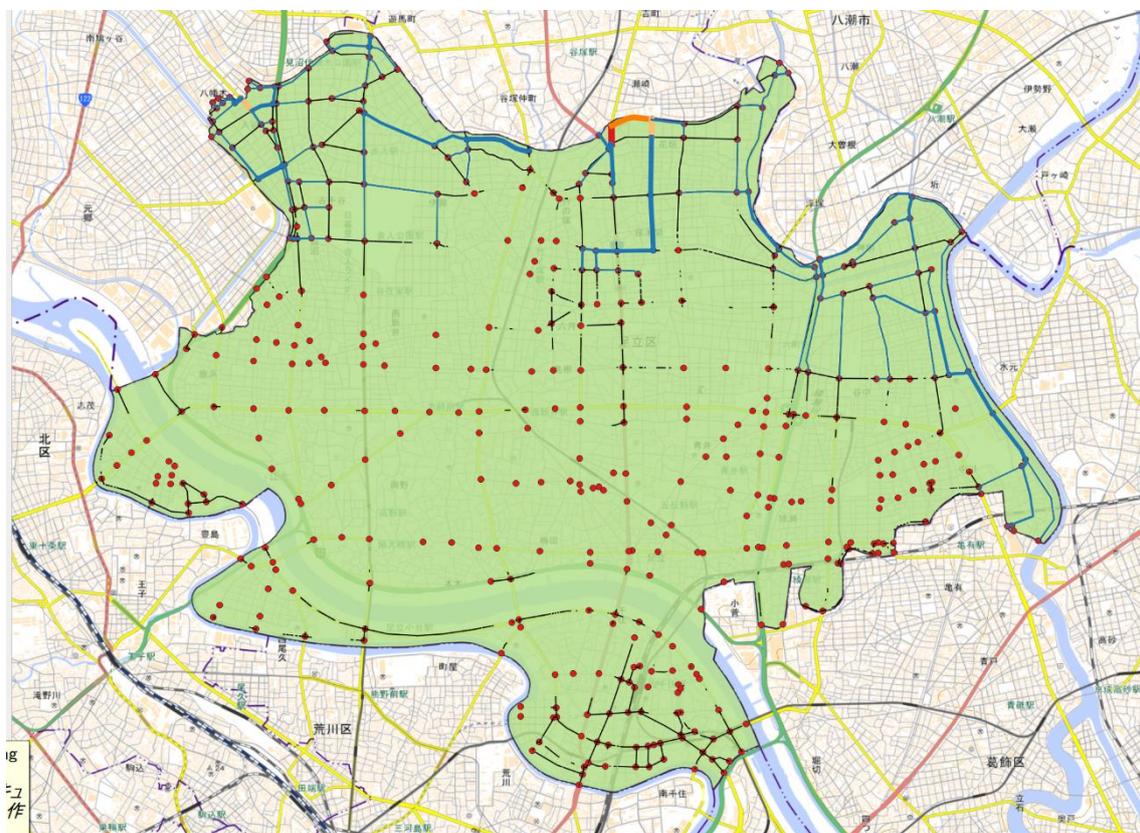


図 17: H=6 の場合の混雑度計算結果

H=6 の場合では豊島地区だけでなく千住地区も全域が冠水してしまい避難ができなくなる。荒川北側では中心部まで浸水域が広がっており、道路ネットワークも東西で分断される結果となる。H=4 の場合とは異なるが H=2 の場合での交通量の多かった区間に近い区間の交通量が多く表れている。このような結果になったのは足立区中心部を南北に縦断している国道に近い地域には人口が多いことが原因であると考えられる。道路ネットワーク

が東西に分断されたことでこの地域住民の目的地候補点の一つだけになり、交通量が分散されず一か所に集中した結果である。

避難に適さず使われていないが冠水していない道路について着目すると、 $H=4$ の場合と比べて $H=6$ の場合では広範囲にわたって浸水が進み、交差点ノードである赤い点しか存在せず周囲に黒い線である道路が残っていない地域が多くなっている。これはかなり深刻なレベルでの浸水であり住居に立て籠って復旧を待つだけでは済まないものであるため、早急な避難の必要性を提示できる結果であると考えられる。

8 二次被害額算出

災害時の道路被害は道路本体の復旧にかかる直接損失(一次損失)と道路が使用できなくなることで通行機能低下による間接損失(二次損失)に分けられる。今回は交通流についての研究であるため後者について考えていく。本研究の8章では水害が発生したことにより生じる損害について考察する。道路や堤防の修繕は建築学、死傷者に対する補填は医療や保険の知識が必要になってくるため今回は考察せず、間接損失に該当する人々の動きが平常時と変わってしまうことによる距離的かつ時間的損失について考察する。図18で示されているように土木研究所の資料[8]から本研究で扱う交通への支障は間接損失または二次損失に該当する。

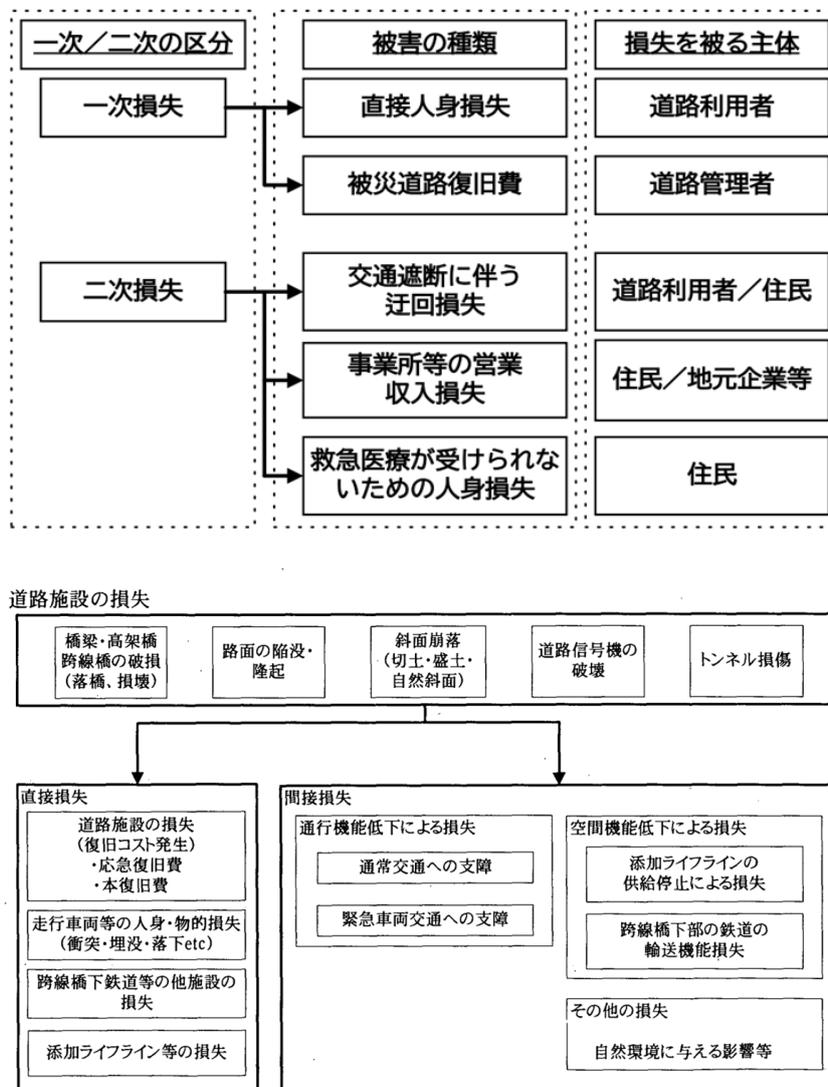


図 18: 道路災害による損失概念図[8]

災害発生時の復旧において費用便益分析というものが用いられる。費用便益分析はどの行動が実行に移す価値があるかを判断するとき有用である意思決定法である。これは意見や偏見といったものではなく全体利益を俯瞰して考慮し実行に移すものである。とりわけ行政では災害後は住人からの意見が多くなるため、あらかじめ意思決定を素早く行えるようにする必要がある。費用便益分析では意思決定内容の実行に伴う費用とその結果得られる便益に金銭的価値を与え、差額から純便益を求める。これによって各アイデアの経済的妥当性を推定し、実行に移る優先順位をつけることが可能になる。本研究では平常時と災害直後の交通流による時間的損失を金額換算し、移動に関する損失が解消することによる便益を算出する。

8.1 迂回による損失

水害によって道路が冠水する場合、対象道路は復旧するまで使用不可となり別の経路を用いるか遠回りをする必要がある。迂回による損失とは、遠回りをすることによって平常時から道路を利用していた利用者の走行時間、走行経費の増加による損失である。つまり、図 19 に示すように検討対象道路網において平常時と災害時の移動に関わる費用の差とする。

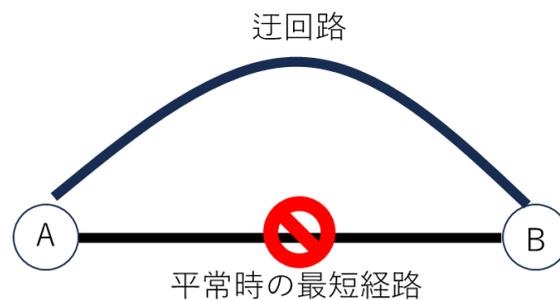


図 19: 迂回による損失

- L_i : リンク i の迂回による損失額
- Q_{ti} : リンク i の経過時間 t での交通量
- C_{ti} : 災害時のリンク i 始終点の平均移動費用
- C_{t0} : 平常時のリンク i 始終点の平均移動費用

$$L_i = \sum_{\text{経過時間}} (Q_{ti} * (C_{ti} - C_{t0})) \quad \dots \dots \dots (3)$$

国土技術政策総合研究所の資料[9]を参考とし本研究に沿う形に定式化を行う。迂回損失額の算出には上記式(3)を用いる。交通量は被害人数、平均移動費用は移動距離を徒歩平均時

速である 4km/h で割り想定時給である 1000 円を掛けたものとして計算を進める。
迂回による損失額は表 3 にある結果となる。

表 3: 各浸水深での迂回損失額

破堤位置の浸水深 H(m)	浸水時の移動距離(km)	迂回損失額(百万円/日)
2	85,030	12.6
4	126,705	23.0
6	131,725	24.3

H=2 の場合では被害域は少ないが荒川を境に南北に足立区が分断されるため荒川北岸の本来ならば千住方向に移動する方が最短距離であった人が足立区北部の県境方向に移動することになり、行先が変わることでの移動距離延長による迂回損失額が発生することがわかる。

H=4 の場合では被害域は増えているが面積のわりに損失額の増加量が抑えられている。荒川南北での分断のような新たな分断が発生していないからと考えられる。

H=6 の場合では被害額は増えているが H=4 の場合と近い金額となっている。これは被害域が大きすぎて使用不可道路である冠水路が大半を占めるようになり、数値計算での対象となる地点や道路が少なくなりすぎたことによると考えられる。

本研究では迂回による損失として定式化を行い二次被害額の算出をしたが、洪水浸水や津波被害といった自然災害による被害域はある地点を中心に広がっていくため、この定式化は要所となる道路が事故で使用できなくなることを対象とした研究やシミュレーションであればより興味深い結果が得られると考えられる。

8.2 被害道路長

第 6 章の洪水浸水想定図と道路ネットワークの重ね合わせによって使用不可となった道路長をシミュレーション結果毎にグラフにまとめたものが図 20 である。

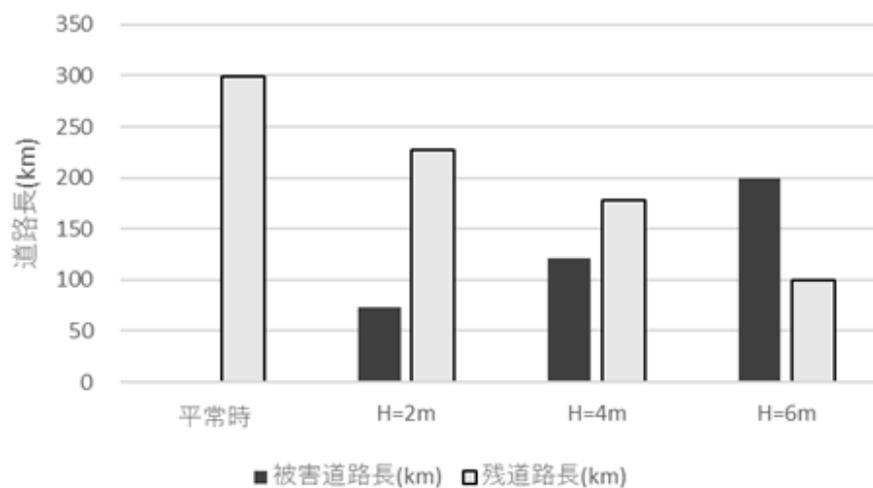


図 20: 各シミュレーションによる被害道路長

被害道路長は H=2 の場合 72.9km, H=4 の場合 121km, H=6 の場合 199km と求まる。通常道路修繕費は 1km あたり 500 万円ほど必要であるが、本研究では水害を対象としているため時間経過によって水が引いた後は積もった土砂等の清掃で復旧が可能であるため道路修繕に関する被害額は算出しない。

8.3 復旧優先区間の求解

本研究では混雑度計算により7章に記載のあるとおりの交通量予測の結果が得られたが、冠水路の復旧を行うことで図21に示すような平常時の交通量に戻る。

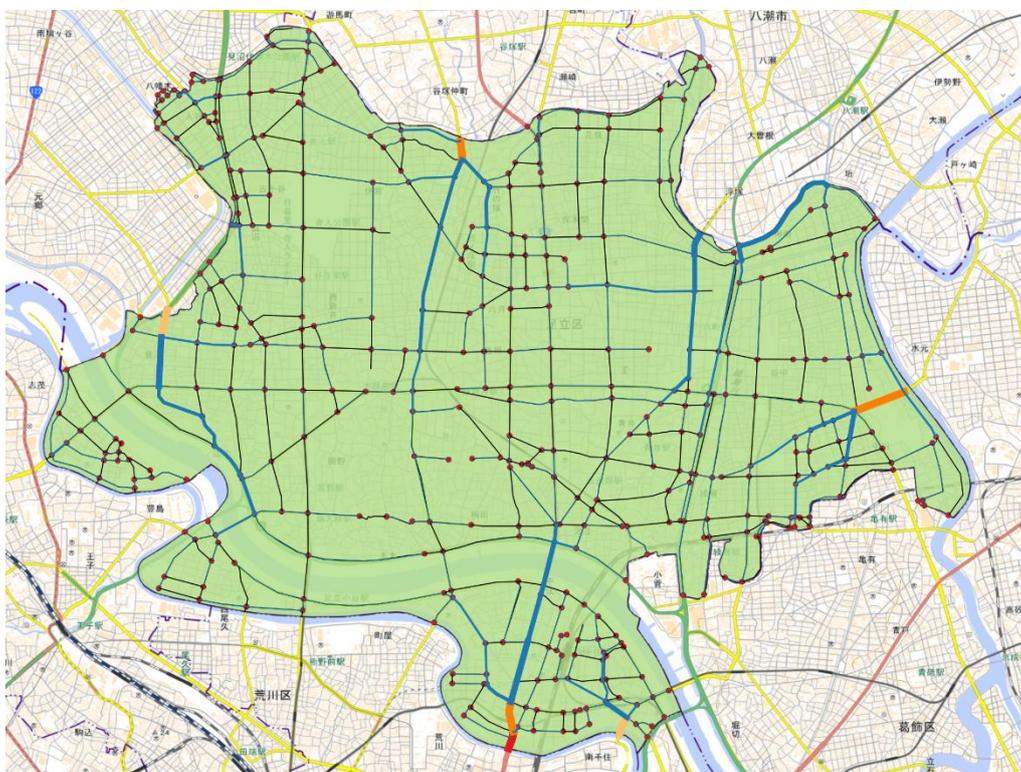


図 21: 平常時の混雑度

自然に水が引くのを待つほかにも有用性のある浸水区間は人為的に早期復旧を進めることで社会便益に繋がることがある。そのためには復旧対象道路に優先順位をつける必要がある。7章の結果で最大交通量となっている赤い線の区間の交通量を減らすことを目標とする数理最適化モデルを以下に記す。

(1) 変数の設定

- $G=(V, E)$: 道路ネットワーク
- V : 交差点ノードの集合
- E : 道路リンクの集合
- $U(\subseteq E)$: 冠水により使用不能なリンク集合
- $A(= E \setminus U)$: 使用可能なリンク集合
- $x_i \{= 1: \text{リンク} i \text{を復旧する}, = 0: i \text{を復旧しない}\}$
- S : 全復旧のシナリオの集合
- $s(= \{x_i\}^{|U|})$: 復旧シナリオ
- $R(= \cup_{i \in U} E(x_i = 1))$: 復旧するリンクの集合
- $T(e, s)$: 復旧シナリオ s 下でのリンク e の交通量

(2) 定式化

$$\min_{s \in S} \max_{e \in \{A \cup R\}} T(e, s), \quad \dots \dots \dots (4)$$

subject to

$$\sum_{i \in U} x_i \geq 1, x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in U. \quad \dots \dots \dots (5)$$

リンク i の復旧をするシナリオ下で最大交通量となっているリンク e の交通量を最小化する目的関数である式(4)と、冠水により使用不能な道路 1 区間以上を復旧し、復旧対象とするか否かをバイナリ表現する制約条件の式(5)である。任意の区間を一つ以上復旧する場合には、一番混雑度の大きい区間の交通量を減らすことに繋がる最良な区間を上記式(4)によって求解することができ、復旧優先度の高い道路が明確になる。求まった区間を使用可能化した後に混雑度計算を再度行ったものが以下である。

H=2 の場合はノード番号 330 と 399 間のリンクである西新井橋が復旧優先度の最も高い区間と求まり、この区間を使用可能道路とする混雑度計算を行った結果 16,344 だけの交通量が修繕箇所を経由して千住方面へ南下して避難していくことが求まる。最大交通量の箇所を軽減させるものであり全体的な交通量の変化は少なく図 15 と類似しているため、地図上での可視化は省く。

H=4 の場合は復旧区間が一つのままであると最大交通量区間に影響がなく、復旧区間が三つで求解することができる。ノード番号 73 と 123 間のリンクである環状七号線が復旧優

先度の最も高い区間と求まり，この区間を使用可能道路する混雑度計算を行った結果 39,838 の交通量が修繕箇所を經由して花畑方面へ避難していくことが求まる。

H=6 の場合は復旧区間が一つのままであると最大交通量区間に影響がなく，復旧区間が四つで求解することができる。ノード番号 156 と 210 間のリンクである東西に分断された区間が復旧優先度の最も高い区間と求まり，この区間を使用可能道路する混雑度計算を行った結果 84,854 の交通量が修繕箇所を經由して竹ノ塚西部および舎人方面へ避難していくことが求まる。

9 おわりに

本章では、本研究のまとめ及び実験結果から得られた今後の課題について述べる。

9.1 まとめ

本研究では5章で水害シミュレーションを行い洪水浸水想定図の作成し、6章で道路ネットワークに重ね合わせて混雑度計算を行った。これにより災害時の避難における道路の交通量を地図上に可視化することができ、混雑が想定される区間を明確にすることができた。また、 $H=2,4,6(m)$ の各シミュレーション結果を用いて実験を行っているため、荒川による洪水被害の段階的な広がりを示唆することができ各地域の避難時期がわかる新たなハザードマップを提示できたと考えている。これは現在足立区から公開されているハザードマップよりも有用性のあるハザードマップであると考えため、本研究の手法を用いた災害対策を行政に提案したい。人口データによる重みづけをする前は交差点の数が多い地域ほど人口過密地帯とみなされていたが、逆距離加重平均による重みづけ後は実際の夜間人口に基づいた現実に近い分析が可能になった。この結果、集合住宅や工場など地図上の建築物の過密具合からだけではわからない正確な人の流れを予測できる。本研究では水害の中でも河川氾濫での浸水被害について扱ったが、破堤位置と設定した地点を海岸線の脆弱性のある堤防位置とすることで津波被害のケースにも応用することが可能であると考えられる。

本研究で作成したハザードマップによって避難する人々は移動を開始する前にどの区間が冠水して通行不可なのかを把握することが可能になるため、避難先へ移動するとき一度進んだ道を引き返すことなく冠水路となり得る道路を避けながら目的地へ進むことができるので円滑な避難行動に繋がる。これにより人々の移動方向に秩序が生まれ人流事故のような災害とは直接関係のない事故を減らすことができる。本研究では目的地までの最短経路で移動する前提で混雑度計算を行い交通量予測をしたが、実際に避難するときにはこのハザードマップを確認したうえで各々の判断で混雑区間だけを避けるような回り道をする事で交通量の分散に繋がるため、道路混雑度の可視化は有効であると考えられる。

間接損失の推定は災害直後の避難する人々には関係ないが、災害発生後の復旧フェーズにおいて役に立つ。道路が冠水している間は平常時に使えていた生活道路が使えなくなること各住居へ戻れた後も移動には遠回りによる距離的かつ時間的ロスが生じる。自治体は災害レベルによる迂回による損失額や被害道路長を事前に把握しておくことで災害発生後も円滑に復旧作業に取り掛かることができるようになると考えられる。また、復旧区間の優先順位が分かっていることで費用便益分析においてより効果的な区間から復旧作業に取り掛かることが可能になり、道路遮断による経済的損失を少なくすることに繋がる。

9.2 今後の課題

本研究での対象地域は低地帯の広がる東京都足立区であったため近隣メッシュとの標高差は少ないが、対象地域が渋谷区のように起伏の多い場合には勾配による負荷計算も付与することによってより興味深い結果が得られるようになると考えられる。勾配を考慮する場合、実際の点間距離を所要時間に変換する数理モデル構築をしてノード間の重み設定をすれば良いが、区間の双方向重みが上りと下りで異なり扱う道路ネットワークのデータ量が2倍になるという問題点が考えられる。

本研究では Python での混雑度計算の計算時間として最大で 3935 秒かかった。計算に使用した PC のスペックは表 4 である。また、得られた交通量をカウントしたデータは csv ファイルであるが最大 1.2GB であった。人口を扱う前の段階では 4MB 程度の csv ファイルであったが人口を考慮する過程でデータ量が莫大になったため、この手法を実用する場合は人口データの数字を 100 人単位程度で割ってから混雑度計算を行い、最後の可視化や被害額算出の段階で割った分を掛ける方がプログラム上の試行回数が減り、計算量データ量ともに軽量化され効率的であると考えられる。

表 4: 実験環境

CPU	11 th Gen Intel® Core™ i5-1135G7
OS	Windows 11 Home
CPU メモリ	8.00GB(使用可 7.84GB)
GPU	Intel® Iris® Xe Graphics
GPU メモリ	1.00GB
使用言語	Python3.8.8 64bit

参考文献

- [1] ”荒川水系荒川 洪水浸水想定区域図”, 国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所, https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr%E2%83%A9_content/content/000647152.pdf, (参照 2024-12-14).
- [2] ”荒川放水路変遷誌もっと知っておきたい荒川放水路の歴史と効果”, 国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務局調査課, https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr%E2%83%A9_content/content/000704042.pdf, (参照 2024-12-14).
- [3] 足立区ホームページ, 荒川氾濫時のハザードマップ, <https://www.city.adachi.tokyo.jp/documents/2808/hm05-08.pdf>, (参照 2024-12-14)
- [4] K. Matsutani, J. Magome: “A simple prediction method of potential flooding area only using digital elevation model,” Theory and Applications of GIS, Vol. 22, No. 1, pp. 17–18, 2014.
- [5] K.Sekijima, H.Kiri, I.Azechi, N.Kimura, and Y.Kohgo : ”On the Tsunami runup energy dissipation effect and impact on Tsunami inundation of agricultural drainage channels”, Vol.87, No.1, pp.I_87-I_90, 2019.
- [6] H. Goto, Y. Kakimoto, and Y. Shimakawa: “Lightweight computation of overlaid traffic flows by shortest origin-destination trips,” IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E102-A, No. 1, pp.320–323, 2019.
- [7] ”冠水路走行テスト”, JAF, <https://jaf.or.jp/common/safety-drive/car-learning/user-test/submerge/waterway-driving>, (参照 2024-12-23).
- [8] H. Kobashi, Y. Kin, S. Kato, N. Tsuneoka, J. Nakano, and M. Tanaka: “The risk management support manual on road slope disaster,” Tech. Report, PWRI, Vol. 3926, Chap. 2, pp. 1–3, 2004.
- [9] T. Kusakabe, H. Taniya, and Y. Yoshizawa: “Study on effects of earthquake disaster prevention investments for road infrastructures”, Tech. Note, NILIM, No. 160, pp. 15–28, 2004.