

河川洪水時の浸水域からの最短距離脱出を前提とした容量制限付き避難所最適配置

Optimal Shelter Placement considering Capacity Constraints Assuming Shortest-Distance Escape from Inundated Area during River Floods

富澤祐輔*・吉川徹**

Yusuke Tomizawa*, Tohru Yoshikawa**

This study proposes a two-stage optimization model for evacuation shelter locations for river floods, prioritizing immediate escape from inundated area while strictly considering shelter capacity constraints. Traditional plans often ignore the risks of route flooding and shelter overfilling. Using a Genetic Algorithm, we minimized total evacuee travel distances in a case study of Hino City, Tokyo. The results reveal that current shelter configurations suffer from severe geographical mismatches and capacity shortages. Furthermore, our optimization demonstrates a non-linear relationship between capacity and efficiency: providing only the theoretical minimum capacity does not sufficiently reduce total travel distances. Conversely, introducing a small safety margin of 5.3 percent surplus dramatically reduces overall travel distances. This model provides an effective, realistic tool for urban disaster mitigation planning.

Keywords: Evacuation, River flooding, Shelter, Optimal placement, Capacity constraint, Genetic algorithm

脱出避難, 河川洪水, 避難所, 最適配置, 容量制約, 遺伝的アルゴリズム

1.背景と目的

近年、線状降水帯の発生や台風の大規模化に伴い、想定を超える規模の河川氾濫や内水氾濫が各地で発生している。これら水害による人的被害を最小限に抑えるためには、堤防整備等のハード対策に加え、住民の迅速かつ安全な避難を支援するソフト対策の充実が不可欠である。特に、避難行動の最終目的地となる避難所の配置計画は、住民の生命を守る最も基礎的かつ重要な要素であり、科学的根拠に基づいた計画策定が強く求められている。

従来、避難所の配置計画においては居住地から避難所までの最短距離が重視される傾向にあった。発災後に安全を確認しながら移動できる地震災害等であれば、これは有効な指標となり得る。しかし、浸水が徐々に拡大する進行性の洪水災害にこの考え方をそのまま適用すると重大なリスクが伴う。洪水時には経路そのものが浸水する可能性が高

く、最短距離で避難した結果、水位が上昇する浸水想定区域の奥深くへ移動して孤立する懸念があるためだ。すなわち、水害時には避難所への到着よりも先に、まず浸水リスクからの離脱が最優先されるべきである(図-1)。

水害時の避難計画に関する研究は、主に「浸水域からの脱出行動」と「避難所への割り当て」に着目したものに大別できる。前者に関し、蒲倉ら¹⁾は二段階のネットワーク分析により、脱出優先による距離増大を抑制する広域避難の有効性を示した。水村ら²⁾は、浸水規模が拡大するほど脱出避難が最短経路避難よりも減災効果が高いことを明らかにした。これにより、中小河川洪水時の避難ではまず浸水域から安全域へ離脱することを優先すべきという知見は確立している。しかし、これらの研究は経路の安全性検証に主眼が置かれており、脱出後の避難者が容量制約を持つ避難所にどう配分されるべきか、特定施設への殺到による容量超過リスクについては定量的に評価されていない。

一方、北村ら³⁾は津波避難を対象に、浸水域を迂回する経路設定と避難所割り当てを同時に行う動的数値計算モデルを開発した。しかし、河川洪水は堤防の決壊箇所等により浸水拡大の過程が劇的に変化するため、特定シナリオに依存する動的解析よりも、想定される最大規模の浸水域を用いた静的解析に基づき、どのような状況であってもまずは浸水域外への脱出を担保するアプローチの方が適切と考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、河川洪水時における浸水域からの最短距離での脱出と、その後の容量制約を考慮した効率的な収容を両立する二段階の避難所配置最適化モデルを構築する。

災害対策基本法では、切迫した災害の危険から逃れるための「指定緊急避難場所」と、被災者が一定期間滞在する

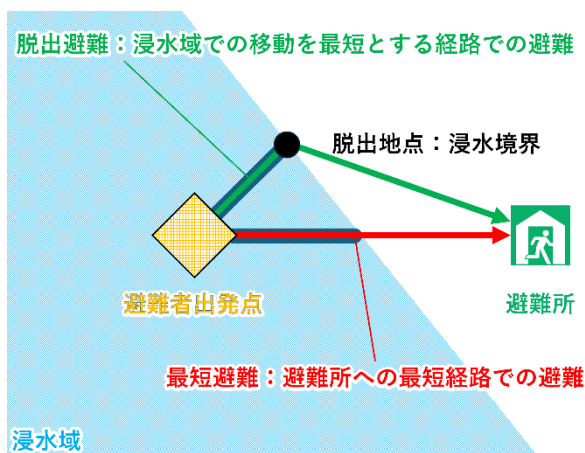


図-1 脱出避難概念図

* 学生会員・東京都立大学大学院都市環境科学研究科建築学域 (Tokyo Metropolitan University)

** 正会員・東京都立大学大学院都市環境科学研究科建築学域 (Tokyo Metropolitan University)

ための「指定避難所」が区別されている。本研究の二段階モデルは、この区分と類似するが、下記の違いがある。

第1段階の浸水域外への移動は、生命の安全を確保するためであり、機能的には緊急避難場所への避難に相当する。ただし本研究の脱出地点は多人数が留まる機能を持たないため、避難者は脱出後すぐに滞在先となる避難所へ移動する必要がある。

第2段階はこの移動を対象とし、避難所の容量制約の下で総移動距離を最小化する配置を求める。

具体的には、浸水域外への脱出を最優先としつつ、避難所の容量を制約条件として組み込み、遺伝的アルゴリズムを用いて総移動距離を最小化する最適配置を導出する。さらに、実都市スケールでの適用を通じて本手法の有効性を検証することを目的とする。

2.研究手法

本研究は東京都日野市を対象地域とする。本市は多摩川および浅川が流れる低地と日野台地と呼ばれる高台が複雑に入り組んだ地形を有し、低地エリアにおける広範囲の浸水被害から高台へ迅速に移動する脱出避難が有効と考えられる地域である。

道路ネットワークデータには OpenStreetMap (OSM)⁵⁾ を使用し、道路の交差点および行き止まり端点をノード、ノード間を結ぶ道路区間をリンクとするグラフとして構築した。全体の規模はノード 5,314 個、リンク 14,988 本、総延長 $5.1 \times 10^6 \text{m}$ である。

各リンクについて、国土数値情報（洪水浸水想定区域データ）⁶⁾ の 0.5m 以上浸水域と交差するものを浸水道路、それ以外を非浸水道路とした。

この際、単に浸水域と交差する道路を除外するだけでなく、災害時の通行リスクやネットワークの連結性を担保するため、以下の2点の判定処理を追加した。

第一に、橋梁の通行可否判定である。河川氾濫時においては、橋梁そのものが浸水していなくとも、流失の危険や水位上昇に伴う予防的通行止めにより利用できなくなる可能性が高い。そのため、浸水想定区域境界から 50m 以内に位置する橋梁は一律で浸水道路と判定した。

第二に、孤立道路の除外処理である。浸水域外の道路であっても、周囲の道路がすべて浸水している場合、その道路は孤立し、避難経路としては機能しない。そこで、非浸水道路のネットワークを連結成分に分解し、構成ノード数が 20 以下の成分に属する道路は実質的な孤立状態とみなし、浸水道路として再定義した。本ネットワークの連結成分は 38 個であり、その内訳は 2,120 ノードおよび 1,327 ノードの2つの大規模成分と、17 ノード以下の 36 個の微小成分（計 138 ノード）に明確に分かれていた。両者の間に中間的な規模の成分は存在せず、閾値を 18 から 1,326 の範囲のいずれに設定しても分類結果は変わらない。すなわち本判定は閾値の選び方に対して頑健である。ただしこの成分間の断絶は対象地域のネットワーク構造に由来するものであり、他地域への適用にあたっては本研究と同様の確認が必要である。以上の処理を経て構築された非浸水道路ネットワーク（ノード 3,447 個・リンク 4,959 本）、浸水道路ネットワーク（ノード 2,040 個・リンク 2,791 本）（図-2）を最適化計算に使用する。

避難者数は日野市地域防災計画⁷⁾に基づき、浸水想定区域内人口（58,401 人）に自宅外避難意向を根拠とした避難

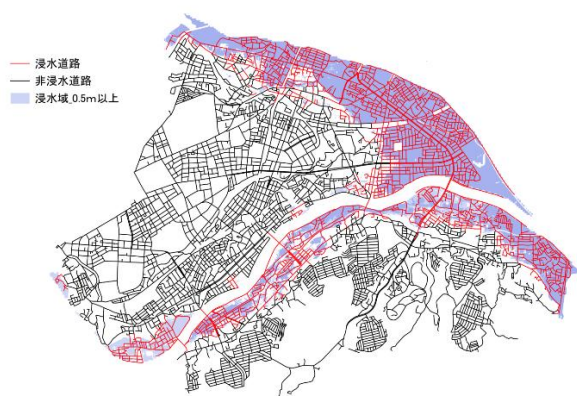


図-2 日野市 浸水・非浸水道路ネットワーク

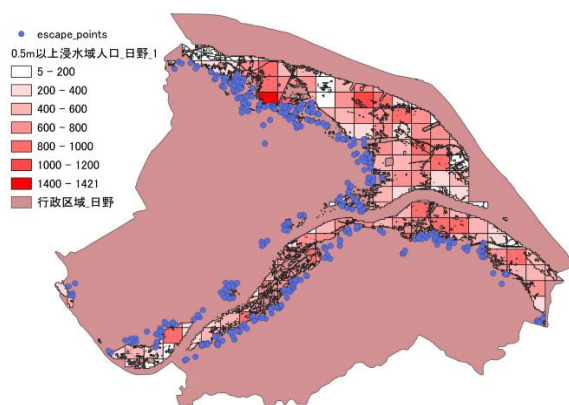


図-3 日野市 浸水域人口・脱出地点

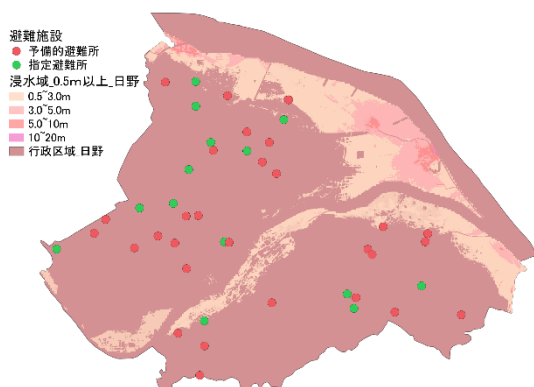


図-4 日野市 指定・予備的避難所の配置

率（65%）を乗じた計 37,961 人とした。需要の空間分布は 250m メッシュ人口データ⁸⁾を用いて人口比率に応じて按分し、各需要点の避難者数を設定した。（図-3）

図-3 を見ると、避難需要は多摩川および浅川沿いの低地部、特に鉄道駅周辺の既成市街地に極めて高く集中している。このような偏りのある空間分布は、浸水域外に脱出した直後の特定避難所における急激な需要過多を招く要因となっている。

収容施設として、同市では「指定避難所」に加えて災害規模や混雑状況に応じて開設される「予備的避難所」（学童クラブ、交流センター、高校、大学等）が計 51 箇所設定されている（図-4）。

収容施設のうち 10 箇所は、浸水域の境界から 100m 以内に立地している。ただしいずれも区域外にあり、境界からの距離は最短で 4.5m であった。境界に近接するため想定を超える規模の浸水が生じる可能性を否定はできないが、これらはいずれも二階建て以上の建築物であり、浸水が生じた場合でも上階への垂直避難により収容機能を維持し得ると判断される。以上より、本研究では日野市が指定する指定避難所および予備的避難所の計 51 箇所すべてを収容施設として採用する。

収容施設の容量として、発災直後の緊急的な受け入れ（一時的な過密収容：3.3 ㎡/2 人）を想定した最大収容人数を採用するが、その総容量は約 29,230 人に留まり、約 8,730 人の容量不足が生じている。

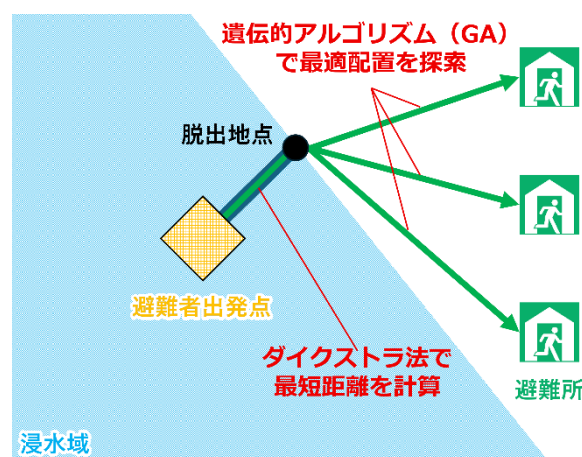


図-5 モデル概要図

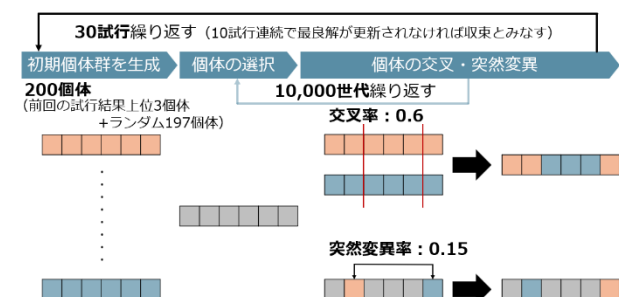


図-6 遺伝的アルゴリズムの概要

日野市地域防災計画では、こうした不足分に対し、指定緊急避難場所の校庭や民間施設の駐車場を活用した車中泊避難（3 人/台）などの検討がなされている。しかし、迅速な脱出が求められる河川氾濫時において、車中泊避難は避難のために車の移動が多くなれば、深刻な道路渋滞を招き、避難行動そのものを阻害するリスクを孕む。また、膨大な不足容量を民間施設のみで補填することは協定や立地上の限界がある。

このように、既存の指定施設のみを前提とした配置計画では、避難需要と避難所の容量の不均衡を解消しつつ移動効率を最大化させる地点を特定するには限界がある。

そこで本研究では、現状配置と理想的な最適配置とを比較し、現状の配置を評価するため、既存避難所を用いた現状評価を行うとともに、最適配置シミュレーションにおいては既存避難所の位置的な制約を取り払い、地理的・ネットワーク的観点から本来必要とされる避難所の空間分布を理論的に導出するため、浸水域外の全道路ノード（3,447 個）を候補地点として設定した。なお、候補地点は地理的・ネットワーク的観点から導かれる理論上の位置であり、施設を建設可能な敷地を意味するものではない。

以上の想定を踏まえて、本研究では、避難者の移動を以下の二段階に分けて表現し、行政による事前の計画立案の視座から、避難所の配置と避難者の割当を決定する最適化モデルを構築する（図-5）。したがって本モデルは、個々の住民がどの避難所を選択するかという意思決定を再現するものではなく、計画上の最適配置を求めるものである。

【第1段階】浸水域内の避難開始点から、浸水想定区域境界線上の脱出地点までの移動。早期脱出を最優先とし、道路ネットワーク上の最短距離経路をダイクストラ法により探索し、経路および脱出地点を固定する。

【第2段階】脱出地点から安全域内の避難所への割り当て。容量制約下で全員を効率的に収容するため、遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて避難所の最適配置および避難者の最適割り当てを同時に決定する。

第2段階における避難所配置-避難者割当の問題は、脱出地点から避難所までの総移動距離の最小化を主目的としつつ、未収容者の発生をなるべく回避するものとして定式化する。第1段階の移動（避難開始点から脱出地点まで）は、避難所の配置に関わらず一定であるため定数として扱い、第2段階における脱出地点から避難所までの移動を最適化の対象とする。目的関数 $F_{minisum}$ は、総移動距離と、未収容者に対するペナルティ項の和として次式で定義する。

$$F_{minisum} = \min \left[\sum_i \sum_{j \in J_A} (d_{e_i, j} \cdot X_{ij}) + K \cdot U_{total} \right]$$

ここで、 i は避難開始点、 j は避難所候補点、 J_A は避難所集合を表す。 $d_{e_i, j}$ は脱出地点 e_i から避難所候補点 j までの道路ネットワーク距離、 X_{ij} は避難開始点 i から避難所 j に割り当

てられる人数を表す。右辺第2項は容量制約に関するペナルティ項である。 K は未収容者1人あたりのペナルティ係数、 U_{total} は全避難所における未収容者の総数を表す。

未収容者1人あたりのペナルティ係数 K は、経路の移動距離を確実に上回るように、OSMから算出した日野市の道路総延長 ($5.1 \times 10^5 \text{m}$) よりも大きい 1.0×10^6 とした。

実装にあたっては計算効率を高めるため、各避難開始点から最短の脱出地点への経路、および脱出地点から全避難所候補 (3,447 ノード) までの距離行列をダイクストラ法で事前に計算し、静的データベース化した。これにより GA 評価関数内での配列参照のみで距離取得が可能となった。

GA (Python で実装した) では、開設する避難所の集合と、各脱出地点の避難者を最初に割り当てる避難所 (初期割当と呼ぶ) をリストとして保持する個体表現を採用した。すなわち遺伝子は割当そのものではなく、各脱出地点の初期割当を表している。

評価関数は、この遺伝子から次の手続きにより容量制約を満たす割当を生成する。まず脱出地点を入力順に一つずつ取り上げ、初期割当に従って避難者を避難所へ割り当てる。当該避難所の残容量が不足する場合は、収容しきれない人数について、当該脱出地点からの道路ネットワーク距離で近い順に他の開設避難所を探索し、残容量のある避難所へ割当先を変更する。いずれの避難所にも収容できない人数は未収容者として計上する。なお本手続きは避難者の移動を逐次的に再現するものではなく、計画上の収容分担を決定するものである。

表-1 パラメータ設定

項目	値
個体数	200
世代数	10000
交叉率	0.6
突然変異率	0.15
エリート保存数	3

表-2 ケース別 計算条件

ケース	候補地点	避難所数	避難所 容量 (人)	不足容量 (人)
現状 (無制限)	既存施設	51	∞	0
現状 (実容量)	既存施設	51	29230	8730
不足	道路ノード	70	35000	2961
均衡	道路ノード	76	38000	0
余裕	道路ノード	80	40000	0

表-3 シミュレーション結果一覧

ケース	避難所数	未収容者(人)	総移動距離(km)	最大距離(km)	収束時試行回数
現状 (無制限)	51	0	31204	1.77	1
現状 (実容量)	51	8730	54204	4.94	7
不足	70	2961	6410	4.85	5
均衡	76	0	6333	6.18	3
余裕	80	0	4807	2.54	7

この処理には乱数を用いていないため、同じ遺伝子からは必ず同じ割当が得られ、評価値はその遺伝子に固有の値となる。交叉や突然変異により遺伝子が変われば割当も変わるため、探索は割当を含めた解全体の改善に向かう。

探索性能のチューニングとして、攪拌能力が高い「二点交叉 (交叉率 0.6)」と、局所解脱出を図る「突然変異 (率 0.15)」を設定した。世代交代には「エリート保存 (上位 15 個体)」と「トーナメント選択 (サイズ 3)」を併用した。さらに、30 回の各試行の上位 3 個体を次の試行の初期個体へ強制的に引き継ぐ「多段階探索戦略」を導入した。本計算では世代数 10,000 回、試行回数 30 回に設定し、最良解の更新が 10 試行停滞した時点で収束とみなした (表-1)。

本研究で構築した GA の探索プロセスの全体像を図-6 に示す。初期個体群の生成から始まり、評価、選択、交叉、突然変異を経て次世代を生成するサイクルを反復する。多段階探索において前回の優良個体を確実に引き継ぐことで、広範な探索空間の中で局所解への埋没を防ぎつつ、効率的に最適解へ収束させる設計としている。

解析ケースは、既存 51 箇所を用いる「現状評価 (無制限・実容量) ケース」と、容量を 500 人に統一し理論最小数 76 箇所を閾値とした「最適配置 (不足・均衡・余裕) ケース」の計 5 ケースで検証を行う (表-2)。なお、不足ケースは「配置は最適化されているが容量は現状と同様に不足している」状態を表すもので、容量不足の解消と配置の改善という 2 つの効果を分離して評価するために設定した。

計算は Intel Core i7/16GB メモリ環境で実施した。

3.結果と考察

配置シミュレーションの結果を表-3 に示す。また、各解析ケースにおける最良目的関数値の世代推移を図-7 に示す。グラフは横軸に世代数、縦軸に目的関数 (総移動距離とペナルティの和) の最良値の推移を表しており、いずれのケースも初期世代で目的関数値が急激に減少し、その後緩やかに最適解へ近づく典型的な収束挙動を示している。なお、図-7 では、比較のため最終的な目的関数の値が 0 となるよう調整している。

なお、以下に示す総移動距離および最大移動距離は、いずれも避難所に収容された避難者に関する条件付きの値である。未収容者が発生するケースでは、未収容者の移動距離は集計に含まれていない。これらの未収容者は市域外を含むより遠方への移動を要すると考えられるため、未収容者数の異なるケース間で総移動距離を直接比較する際には、母数が異なる点に留意する必要がある。

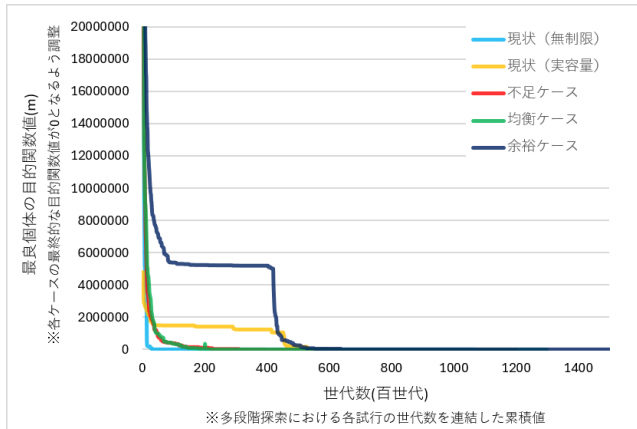


図-7 最良目的関数値の世代推移

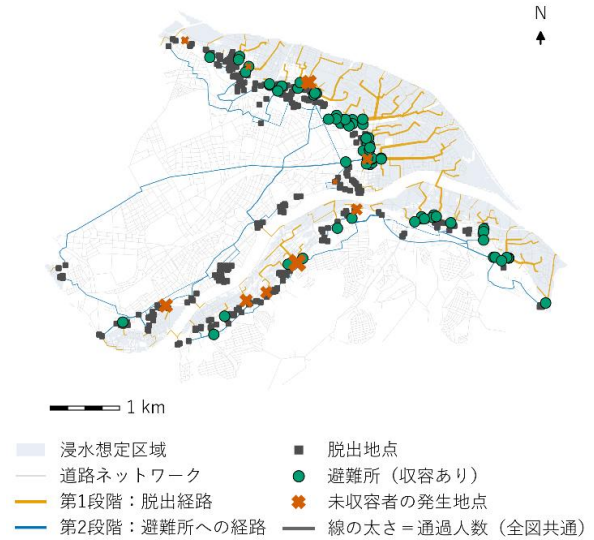


図-10 不足ケースの最適配置と避難経路

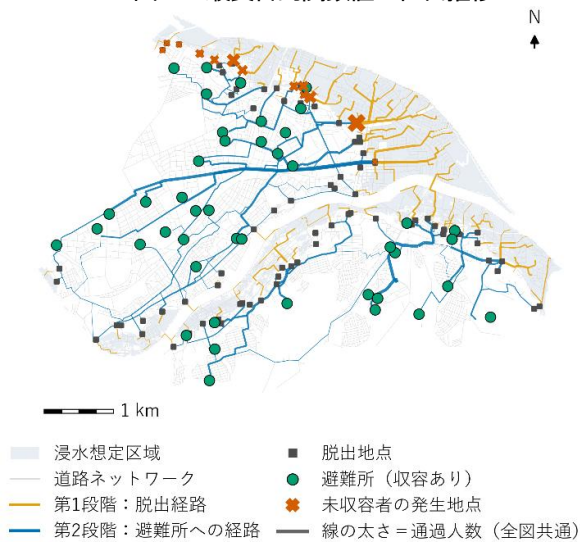


図-8 現状（実容量）ケースの最適配置と避難経路

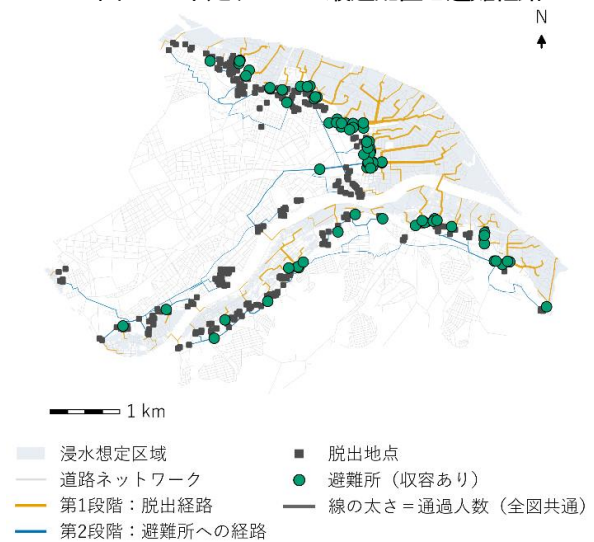


図-11 均衡ケースの最適配置と避難経路

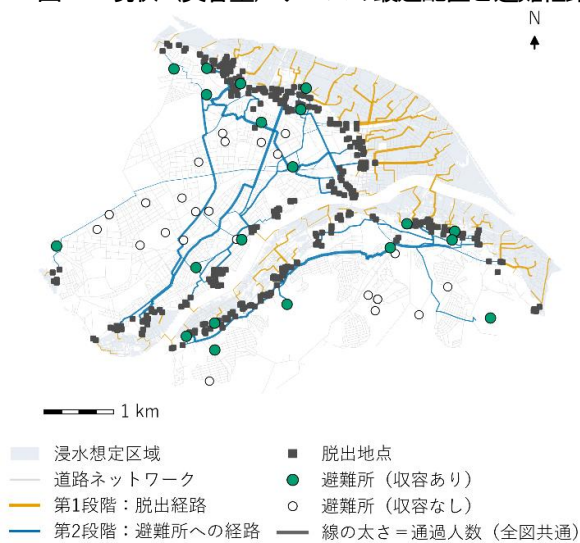


図-9 現状（無制限）ケースの最適配置と避難経路

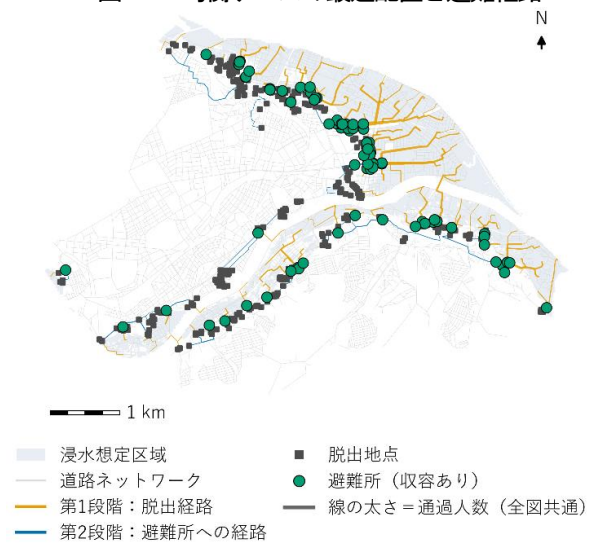


図-12 余裕ケースの最適配置と避難経路

まず、既存避難所を用いた現状評価の結果を述べる。実容量ケース（図-8）では約 23%（8,730 人）の未収容者が発生し、さらに収容可能者の最大移動距離は 4.94km に達しており、極めて大きい移動負担が生じている。一方、容量制約を撤廃した無制限ケース（図-9）では未収容者は 0 人だが、総移動距離は約 31,204km と余裕ケースの約 6.5 倍の移動コストを要した。これは現状の避難所が、河川洪水時においては、脱出地点に対して地理的に非効率な配置であることを示している。

均衡ケースでは第 2 試行という極めて早い段階で探索が停滞し早期収束したのに対し、余裕ケースでは第 6 試行まで更新が継続した。これは、施設数に余力を持たせたことで厳しい容量制約による余力の無さが緩和され、より局所的で微細な配置および割り当ての調整を行う余地が生まれたためであると考えられる。すなわち、余裕ケースでは大まかな全体配置が決定した後も、さらに小さい範囲での細やかな解の改善プロセスが機能し続けており、結果として全体の移動効率をより高度なレベルへと押し上げている。

これは施設数の増加に伴い配置の自由度が拡大し、微細な改善を行う余地が生じたためと考えられる。1 回の試行に要した時間は 1 時間 30 分～1 時間 50 分程度であり、30 試行で約 50 時間であった。

不足ケース（図-10）では 2,961 人の未収容者が発生した。均衡ケース（図-11）では未収容者 0 を達成し、収容された避難者の総移動距離は約 6,333km、最大移動距離は 6.18km であった。未収容者の問題は解決したものの、総容量が総需要をわずかに上回るのみであるため、避難者の一部を遠方の避難所へ割り当てなければ全員を収容できない。この制約の下で総移動距離を最小化した結果、収容された避難者の最大移動距離が大きくなったものと考えられる。

対して、わずかな余力を持たせた余裕ケース（図-12）では、総移動距離は約 4,807km（均衡ケース比約 24%減）へと劇的に減少し、最大移動距離は 2.54km であった。

各ケースにおける移動距離の分布を図-13 に示す。最適配置の 3 ケースはいずれも避難者の約 90%が 0.5km 以内に収容されるのに対し、現状の 2 ケースでは分布が大きく右方に広がっている。とくに現状（実容量）ケースでは、収容された避難者の中央値が 2.14km に達し、避難者の 4 分の 1 が 2.9km 以上の移動を要する。また現状（実容量）および不足ケースでは累積収容率が 100%に達しておらず、その差が未収容者の割合を表している。本節で示した集計値がいずれも収容された避難者に限った条件付きの値であることが、図からも確認できる。

本結果は、現状の避難所配置が量的不足だけでなく、河川洪水時には配置場所の構造的な非効率性を抱えていることを示している。また、容量制約の導入は施設数と避難効率の間に非線形な関係を生じさせた。（図-14～図-16）理論上の必要数を確保するだけでは不十分であり、数パーセントの余裕を意図的に組み込むことで施設 1 箇所あたりの移動距離の改善量が大きくなることが明らかとなった。この差

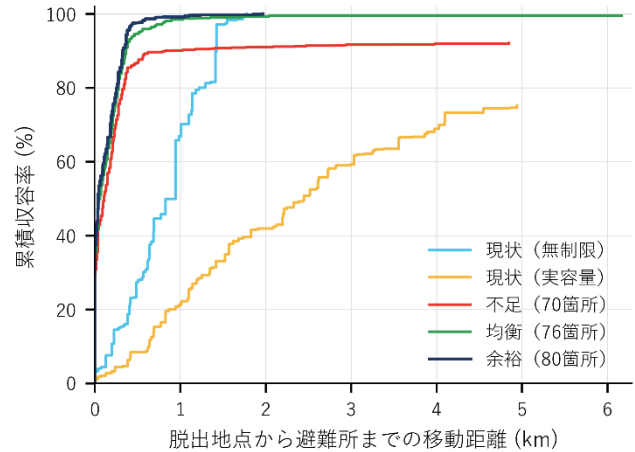


図-13 各ケースにおける移動距離の累積分布

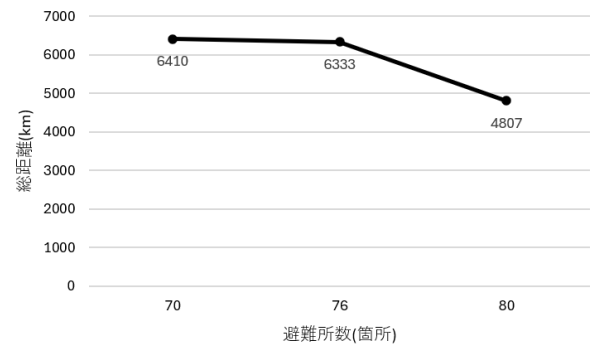


図-14 避難所数と総距離

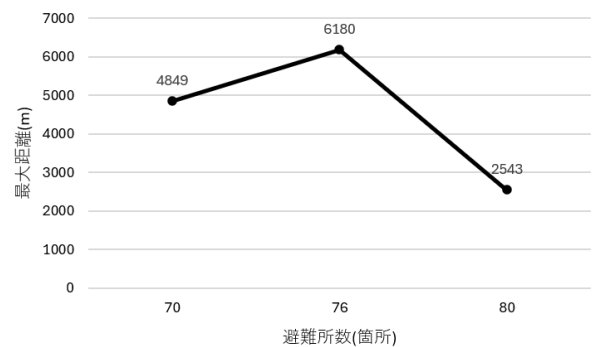


図-15 避難所数と最大距離

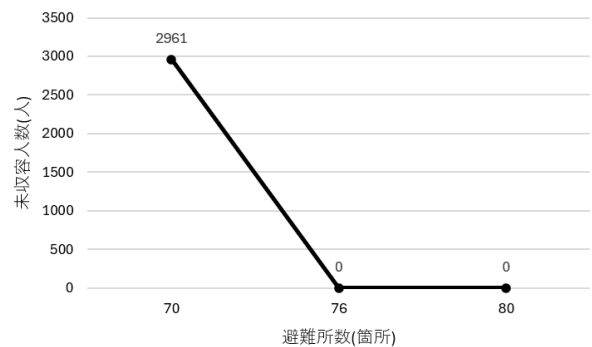


図-16 避難所数と未収容人数

は分布全体にも表れており、余裕ケース（80 箇所）では避難者の 95%が 0.38km 以内に収容されるのに対し、均衡ケース（76 箇所）では 0.48km、不足ケース（70 箇所）では 0.51km を要する（図-13）。

余裕ケースの避難所配置（図-12）を見ると、浸水想定区域の境界線付近に集中する傾向が見られた。これは移動距離最小化を図ったことによる数学的特徴である。しかし、実際の避難所の運用では境界付近への滞留は新たな被災リスクや避難におけるボトルネックを招く恐れがある。したがって、本最適解は河川洪水時の避難における比較基準となる避難所配置として捉えて、実社会への適用時には安全距離の確保や具体的な避難所設置可能箇所の考慮などの制約を加えた修正が必要である。

3,447 箇所の候補から最大 80 箇所を選定する大規模な組合せ最適化問題に対し、総移動距離を削減できたことは、本手法の実用的な有用性を示している。

本研究の問題は、需要の分割を許す容量制約付き p-メディアン問題として定式化でき、避難所の配置を固定すれば割当は輸送問題に帰着する。したがって問題の困難さは 3,447 箇所から 80 箇所を選定する部分に集約され、近年の数理最適化ソルバーの性能を踏まえれば、この規模に対しても良質な下界の算出や厳密解の探索が可能と期待される。

本研究が GA を採用したのは、第一に、容量が不足する場合の扱いに柔軟性を確保するためである。総容量が総需要を下回る場合、誰が未収容となるかは移動距離の最小化のみでは定まらない政策的な選択を含む。本研究では、初期割当に従って避難者を割り当て、容量超過分のみを近い避難所へ配分するという規則を評価関数に組み込んだが、GA では遺伝子から割当を生成するこの規則を差し替えるだけで、異なる配分方針の下での比較が可能である。第二に、最大移動距離の抑制や避難所立地に関する安全距離の確保など、今後の拡張として想定される要素を、評価関数の変更のみで組み込めるためである。

4.総括

本研究では、浸水域からの早期脱出と避難所容量制約を統合した二段階最適化モデルを構築し、東京都日野市を対象としたケーススタディを通じて検証した。得られた主な知見は以下の通りである。

第一に、容量制約の導入により現状計画の潜在的な脆弱性を定量的に顕在化させた。既存避難所に実容量を適用すると約 23%の未収容者が発生し、容量無制限とした場合でも総移動距離が余裕ケースの約 6.5 倍に達した。これは施設の単なる増築では解決できない、水害特有の脱出地点と配置場所との地理的な構造的ミスマッチを意味する。

第二に、理論上の必要最小数を確保するだけでは移動効率の面で不十分であることを示した。必要最小数を満たす均衡ケース（76 箇所）では未収容者は生じないものの、収容者の総移動距離は約 6,333km にとどまった。これに対し、5.3%の余剰を確保した余裕ケース（80 箇所）では約 4,807km

と約 24%減少した。この差は移動距離の分布全体に及んでおり、避難者の 95%が収容される距離は均衡ケースの 0.48km から余裕ケースの 0.38km へ短縮された。すなわち、理論必要数に数パーセントの施設数を上乗せすることによる移動距離の改善量は、施設 1 箇所あたりで見て著しく大きい。ただし、いずれの値も避難所に収容された避難者に関する条件付きのものであることに留意する必要がある。

以上の知見と GA の探索挙動の分析から、本研究で提案した手法は、容量制約という現実的な壁を考慮した上で最適な施設配置と必要数を導き出す有効な計画支援ツールとして機能すると結論付けられる。

実社会の防災計画への適用やさらなる理論的な検討の可能性に向けた今後の課題は以下の 4 点である。

第一に、行政区を超えた広域避難体制の構築および早期避難の促進によるソフト対策の強化である。本研究のシミュレーションは日野市内の施設への避難を前提としたが、市境付近の居住者にとっては、行政区分に関わらず近隣他市の避難所へ向かう方が、地理的な移動距離や標高差の観点から合理的かつ安全な場合がある。したがって、災害時における自治体間の相互受入協定など、行政境界に縛られない水平連携が移動負担の軽減において極めて有効な選択肢となる。また、本モデルは発災直前の切迫した状況下での最短距離での脱出を想定しているが、現実の災害対応においては、事前の早期避難により十分な猶予時間を確保することが最も確実な安全策である。早期避難によって遠方の避難所への移動も許容されれば、特定施設への局所的な需要集中を空間的・時間的に分散させることが可能となるため、ハード整備と並行して住民の避難行動開始の早期化に向けた施策の充実が強く求められる。

第二に、避難所の立地安全性および動的な道路交通状況を組み込んだモデルの拡張である。本研究で導出された最適配置は、移動距離の最小化を数学的に追求した結果、避難所の多くが浸水想定区域の境界線付近に極端に集中する傾向を示した。しかし、想定を上回る規模の洪水や内水氾濫、あるいは土砂災害との複合災害が発生した場合、境界付近の施設は直ちに被災リスクに晒され、十分な安全性を担保できない恐れがある。そのため、実運用に向けては、浸水域から一定の距離を確保する必要がある。さらに、実際の避難時には、低地から高台へ抜ける限られた脱出経路や避難所周辺の道路において、車両や歩行者の集中による深刻な渋滞・ボトルネックが予想される。今後は、道路のネットワーク容量や動的な混雑度を考慮に入れた多目的最適化を行うことで、効率性と安全性を高次元で両立させる、より現実的で精緻な配置計画の策定が求められる。

第三に、本研究は河川洪水時の避難のみを考えた避難所設置を検討しているが、実際には地震や土砂崩れといった災害を考えた避難所設置との関係を検討する必要がある。地震の場合には、地盤の脆弱性を考慮すると安全な地域は河川洪水時と類似すると予想される一方で、河川洪水時に比べて避難所を分散配置する必要性が高まることから、河

川洪水時との間にトレードオフが存在する可能性がある。さらに土砂崩れが豪雨あるいは地震時に発生した場合、河川に近い危険性が高い地区から安全性が高い台地上に避難する道路が被害を受けて遮断されることが懸念される。これらを考慮した理論的検討も将来の課題である。

第四に、本研究で得られた配置を出発点とした、より実務に近い計画手法への展開である。本研究では現状配置の非効率性を評価する基準線を得るため、浸水域外の全道路ノードを候補として理論上の最適配置を導出した。実際の計画立案においては、既存施設の配置を所与としたうえで、どこに何箇所を追加すべきかを検討することが求められる。本研究の結果は、追加すべき施設数の目安と優先すべき地域を示すものとして、この検討の基礎資料となり得る。

また、避難所の配置を固定した場合の割当は輸送問題として厳密に解くことが可能であり、本研究の割当手続きが与える解との差異を検証することが望まれる。

なお本研究は、著者らが口頭発表したパイロットスタディ⁹⁾を発展させたものである。

<謝辞>

本研究は科研費 21K04417, 24K07838 の支援を受けた。

【参考文献】

- 1) 蒲倉 光, 梅本 通孝 (2020), 「大規模河川氾濫による浸水想定区域からの脱出を一義的目標とした避難計画の効果に関する基礎的研究」, 地域安全学会論文集, 37 巻, p.249-258, 地域安全学会.
- 2) 水村 拓洋, 田口 博之, 中村 仁 (2023), 「中小河川同時氾濫時における浸水域脱出を最優先とした避難経路の有効性の検証 ～埼玉県久喜市を事例として～」, 土木学会論文集, 79 巻 (27 号), 論文 ID: 23-27023, 土木学会.
- 3) 北村 福太郎, 稲津 大祐, 池谷 毅, 岡安 章夫 (2018), 「津波浸水を考慮した避難経路および避難所選定ツールの開発」, 土木学会論文集B 2 (海岸工学), 74 巻(2 号), I_391-I_396, 土木学会.
- 4) 北村 福太郎, 稲津 大祐, 池谷 毅, 岡安 章夫 (2019), 「津波浸水を考慮した避難経路選択に与える地形と浸水特性の影響」, 土木学会論文集B3 (海洋開発), 75 巻 (2 号), I_785-I_790, 土木学会.
- 5) OpenStreetMap contributors, 「OpenStreetMap」, <https://www.openstreetmap.org>, 2026/1/20.
- 6) 国土交通省, 「国土数値情報 (洪水浸水想定区域データ)」, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A31a-2024.html>, 2026/1/20.
- 7) 日野市防災会議 (2022), 「日野市地域防災計画」.
- 8) 国土交通省, 「国土数値情報 (250m メッシュ別将来推計人口データ)」, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-mesh250r6.html>, 2026/1/20.
- 9) 富澤祐輔, 吉川徹 (2026), 「河川洪水時における浸水域からの最短距離脱出を前提とした避難所最適配置」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.327-328, 日本建築学会.