

消防署移転先探索問題における意思決定を支援するインタラクティブ可視化

福田 章太[†] 中田 匠哉[†] 陳 思楠[†] 佐伯 幸郎^{††} 中村 匡秀[†]

[†] 神戸大学〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

^{††} 高知工科大学〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: [†]fukuda-s@es4.eedep.kobe-u.ac.jp, ^{††}tnakata@bear.kobe-u.ac.jp, ^{†††}chensinan@gold.kobe-u.ac.jp,
^{††††}saiki.sachio@kochi-tech.ac.jp, ^{†††††}masa-n@cmds.kobe-u.ac.jp

あらまし 近年、少子高齢化に伴う救急需要の増加により、消防署の最適な配置見直しが求められている。しかし、従来の静的な可視化では複数施設間の空間的な依存関係を把握できず、意思決定者の持つ仮説や定性的制約を動的に反映する対話的な探索手段も欠如していた。そこで本手法では、メタヒューリスティクスが生成した広範な探索解集合を活用し、意思決定者が指定した空間制約に応じた条件付き分布を対話的に再計算・可視化する分析環境を構築した。神戸市のデータを用いたケーススタディの結果、提案システムは施設間の依存関係を明瞭に表現し、本命の最適地が行政・コスト面の制約で配置困難な場合でも、埋没していた優秀な準最適解を直感的に発見できる対話的探索能力を有することを確認した。

キーワード 消防署配置問題, メタヒューリスティクス, 対話的可視化, Visual Analytics, カーネル密度推定

Interactive Visualization for Supporting Decision-Making in the Fire Station Relocation Problem

Shota FUKUDA[†], Takuya NAKATA[†], Sinan CHEN[†], Sachio SAIKI^{††}, and Masahide NAKAMURA[†]

[†] Kobe University Rokkodai-cho 1-1, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501 Japan

^{††} Kochi University of Technology 185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782-8502, JAPAN

E-mail: [†]fukuda-s@es4.eedep.kobe-u.ac.jp, ^{††}tnakata@bear.kobe-u.ac.jp, ^{†††}chensinan@gold.kobe-u.ac.jp,
^{††††}saiki.sachio@kochi-tech.ac.jp, ^{†††††}masa-n@cmds.kobe-u.ac.jp

Abstract In recent years, the increasing demand for emergency medical services driven by an aging population has necessitated a re-evaluation of optimal fire station placement. However, conventional static visualizations fail to capture spatial dependencies among multiple facilities, and they lack interactive means for practitioners to dynamically reflect their hypotheses and qualitative constraints. To address this, this study proposes an analytical environment that leverages comprehensive optimization logs from metaheuristics to recalculate and visualize conditional spatial distributions in real time based on user-specified constraints. A case study using Kobe City data demonstrated that the system clearly reveals facility dependencies, enabling practitioners to intuitively discover high-quality sub-optimal solutions when administrative or budget constraints render the primary optimal locations unfeasible.

Key words Fire Station Relocation Problem, Metaheuristics, Interactive visualization, Visual Analytics, Kernel Density Estimation

1. はじめに

近年、日本国内における急速な少子高齢化の進展は深刻な社会課題となっており、それに伴う救急搬送需要の増大が全国の消防組織にとって大きな負荷となっている。限られた地域防災資源を効率的に運用し、一刻を争う救急要請に対して迅速な駆

けつけ体制を維持するためには、消防署の最適な配置計画が極めて重要である。しかし、都市開発や人口動態、道路ネットワークの変容により、過去に設置された既存の消防署配置が将来にわたって最適であり続けるとは限らない。社会環境の変化に即して配置を柔軟に見直す必要性が高まる一方で、複数の施設を同時に移転・再配置する計画の策定は、考慮すべき空間的制約

や評価指標が複雑に絡み合うため、行政の意思決定者にとって複雑な作業となっている。

このような消防署移転先探索問題に対し、数理的に最適な配置案を探索・提示するアプローチが盛んに研究されてきた。しかし、従来の自動最適化手法の多くは、アルゴリズムが算出した単一のスコア最良解のみを提示するブラックボックス型のシステムになりがちであった。実際の都市計画や防災計画の現場では、土地買収の可否や法規制、予算制約、政治的要因といった「数式化が極めて困難な定性的制約」が普遍的に存在する。さらに、意思決定者は「この重点施策地域には確実に1署を配置したい」といった主観的な仮説やドメイン知識を有していることが多い。そのため、計算機が提示した最良解が現実の制約によって破綻した際、意思決定者が次の代替案を模索するための対話的な支援の仕組みが不可欠である。

こうした背景から、先行研究では単一の最適解のみに依存せず、最適化アルゴリズムの探索過程で得られた良好な解を地図上に重ね合わせて提示する意思決定支援手法が提案された。これにより、良好な解が分布するマクロな傾向（クラスタ構造）を意思決定者に提示できる有用性が示されたものの、依然として以下の3つの重大な課題が残されている。第1に、施設間の空間的依存関係を把握できない点である（P1）。複数の施設を同時に配置する問題では各拠点は相互に影響し合うが、候補地を単に重ね合わせるだけの静的可視化では異なる解の要素が混ざり合い、「どの候補地同士がセットで選択されるべきか」という解の内部構造が埋没してしまう。第2に、探索過程で生成される膨大な解分布が十分に活用されていない点である（P2）。各ループにおける最終世代の優良解のみに視点を絞ることで、一步及ばず淘汰されたものの実務的には極めて価値の高い「準最適解」の多様な配置パターンが切り捨てられている。第3に、意思決定者が自身の主観的な仮説に基づいて能動的に検証を行う「対話的探索」の手段が欠如している点である（P3）。

そこで本研究では、これらの課題を解決するため、最適化アルゴリズムの探索解集合を解空間のデータセットとして活用し、計算機の分析能力と人間の認知・主観を融合させる対話型の意思決定支援システムを提案する。本手法は、意思決定者が地図上で指定した任意の配置制約に応じて探索解集合を条件付きで抽出し（A1）、それらの残差集合に対して評価値に基づく重み付けを行いながら条件付き空間確率分布をカーネル密度推定（KDE）によって対話的に算出する（A2）。この計算基盤をもとに、対話型可視化インターフェースを構築し（A3）、意思決定者が「もしここに1署を固定したら、他の最適配置バランスはどう変化するか」という仮説検証をシームレスに繰り返せる分析環境を実現する。

本論文の構成は以下の通りである。まず第2章では、本研究の社会的背景、消防署移転先探索問題の定義、先行研究の取り組みとその課題、および関連技術について述べる。第3章では、提案手法のコアとなる探索解集合の条件付き抽出アルゴリズム、および条件付き空間分布推定の定式化について詳述する。第4章では、提案手法をWebアプリケーションとして具現化したシステムの技術スタックおよび実装工夫について説明する。第5

章では、実際の神戸市の消防データを用いたケーススタディを通じて、提案システムの可視化能力、ログ活用の有効性、および対話的探索の有用性を検証し、本手法の利点と計算コストに伴う限界について考察する。最後に第6章において、本研究の成果を総括し、システムの軽量化や他ドメインへの応用可能性といった今後の展望について展望する。

2. 準備

2.1 背景

近年、日本では慢性的な高齢化が社会課題となっている。内閣府による高齢社会白書[1]によると、令和6年時点における高齢者人口（65歳以上人口）は3,624万人であり、総人口に占める割合は29.3%に達している。これらの傾向は今後も継続すると考えられており、令和52年には65歳以上人口が約8,700万人となり、2.6人に1人が高齢者となる社会が到来すると推計されている。高齢化の影響は様々な分野に表れており、消防署の救急搬送業務においてもその影響がみられる。総務省消防庁[2]によると、高齢化の進展等に伴い、令和6年中の救急出動件数は772万740件となり、前年と比べて7万9,753件増加したとある。このように救急需要が増大する中、限られた消防資源で効率的に救急サービスを提供することが求められている。

そのため、消防署を適切に配置し、救急車が迅速に現場へ到着できる体制を整備することは重要である。消防署の配置は救急の駆けつけ時間に直接影響するため、住民への救急サービス水準を維持・向上する上で大きな役割を果たす。しかし、都市開発や人口構成の変化などにより、既存の消防署配置が将来にわたって最適であり続けるとは限らない。そのため、社会環境や需要構造の変化に応じて消防署配置を継続的に見直すことが求められる。実際に、尼崎市消防局[3]では、火災件数の減少や救助件数の増加といった需要構造の変化を受け、将来的な消防力の強化を目的として、令和5年に消防署および車両・部隊の配置の見直しについて検討が行われている。

一方で、消防署の移転先を検討する際には、救急需要や消防需要、地理条件、道路網など多様な要因を同時に考慮し、さらに消防力の整備指針[4]を踏まえる必要があるため、その検討プロセスは極めて複雑である。加えて、一度決定した配置を変更することは容易ではなく、大規模な事業となることから、複数の配置案を事前に比較・評価しながら慎重に意思決定を行うことが求められる。しかし、消防署配置の見直しにおいては、多数の候補地や評価指標を考慮した上で配置案を網羅的に検討することが難しく、意思決定者の負担は大きい。そのため、消防署移転に関する意思決定を支援する仕組みが求められている。そこで本研究では、消防署移転における意思決定支援を目的とし、計算機による候補地探索と可視化を組み合わせた支援手法について検討する。

2.2 消防署移転先探索問題

前節で述べた課題を踏まえ、本研究では、消防署の移転に関する意思決定を支援するため、任意の n 個の消防署の移転先を決定する問題を「消防署移転先探索問題」と定義する。本問題は、地理情報、人口分布、および道路ネットワークなどの情

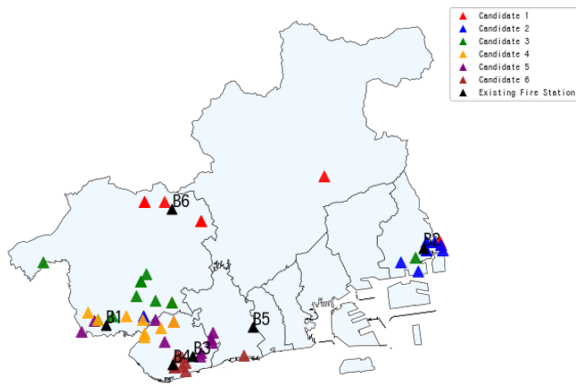


図1 GAによる静的可視化

報を考慮し、消防署の配置を評価・比較することで、より望ましい配置を選定することを目的とする。ここで、望ましい配置とは、全ての地域に対する駆けつけ時間の総和が最小となる配置であると定義する。

2.3 先行研究

2.3.1 消防署移転先探索問題に対する最適化アルゴリズムの適用と評価

先行研究として、消防署移転における意思決定支援を目的とし、消防署移転先探索問題に対して複数の最適化アルゴリズムを適用した研究[5]がある。

この研究では、単一の最適解を提示するのではなく、メタヒューリスティクスを複数解実行し、良好な解の配置案を集計し、その分布傾向を可視化することで意思決定を支援するアプローチが提案された。また、問題を消防署配置を評価する内部問題と、配置を探索する外部問題からなる二段階最適化問題として定式化し、外部問題に対して山登り法、焼きなまし法、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用して比較評価を行った。神戸市消防局のデータを用いた評価実験の結果、GAは他の手法と比較して良好な解を安定して発見できるだけでなく、図1に示す通り、探索結果から明瞭なクラスター構造を得られることが確認された。このことから、GAは消防署移転における意思決定支援に有効な探索手法であることが示された。

2.3.2 探索解集合

本研究では、先行研究において定式化された最適化アルゴリズムの探索過程において得られる解集合を探索解集合と定義する。探索解集合は、各世代における消防署の移転先配置パターンおよびその評価値から構成される、探索過程における離散的なサンプル集合として扱う。例を表1に示す。また、探索解集合に含まれる解はその評価値に基づき、最良解および準最適解に分類される。最良解は各ループの最終世代の中で最も評価値が良い解であり、準最適解は最良解ではないが、相対的に高い評価値を持つ解とする。

2.3.3 先行研究の課題

先行研究には3つの課題があると考えられる。

P1：静的可視化では施設間の空間的依存関係を把握できない

先行研究では、探索によって得られた消防署候補地を地図上に重ね合わせて可視化している。しかし、複数の消防署を同時

解	候補地	候補地	候補地	候補地	候補地	候補地	評価値
解1	地点A	地点B	地点C	地点D	地点E	地点F	100
解2	地点A	地点B	地点E	地点G	地点H	地点I	90
解3	地点C	地点D	地点H	地点I	地点J	地点K	110
...	...	...	...	...	...	...	...

表1 探索解の例

に移転する場合、各消防署の配置は独立ではなく、相互に影響し合う。候補地を個別に重ね合わせて表示するだけでは、異なる配置案(解)に属する候補地がすべて混ざり合ってしまう、「どの候補地とどの候補地が同時に選択されるべき組み合わせなのか」という解の内部構造を視覚的に識別することができない。そのため、施設間の空間的な依存関係を十分に把握することが困難である。

P2：探索過程で得られる解分布が活用されていない

先行研究では、GAの最終世代から得られた良好な解のみを対象として可視化を行っている。しかし、GAの探索過程では、多数の準最適解や異なる特徴を持つ解が生成されている。意思決定支援では、単に最良解を提示するだけでなく、どのような代替案が存在するのかを把握できることが重要である。そのため、探索過程で得られる解分布全体を活用することで、より多様な配置案を提示できる可能性がある。

P3：意思決定者が仮説検証的に探索できない

実際の意思決定プロセスにおいて、意思決定者は「この地域には行政の施策上、確実に1署を配置したい」「この既存の消防署の場所は動かしたくない」といった、主観的な仮説や業務上の制約条件を持つことが多い。しかし、先行研究の可視化手法は、計算機が出力した結果を静的に閲覧することしかできず、意思決定者が自身の持つ仮説や関心に応じた条件を動的に指定して探索することができない。そのため、利用者が対話的に探索結果を分析できる仕組みが求められる。

これらの課題を解決するためには、空間的分布の可視化手法および対話的分析手法が必要となる。

2.4 意思決定支援のための関連技術

2.4.1 カーネル密度推定(KDE)

カーネル密度推定(KDE)は、点群データから確率密度関数を推定する非パラメトリック手法であり、データ分布の滑らかな表現を得るために広く用いられている[6]。また、空間データ解析においては、ホットスポットの可視化や分布構造の把握に利用されている[7]。

2.4.2 Visual Analytics

Visual Analyticsは、人間の認知能力と計算機の分析能力を統合し、対話的な分析を通じて分析推論プロセスを支援することで、最終的な意思決定を支援する分野である[8]。特に、人間が仮説を生成し、視覚的分析を通じてそれを検証するという分析サイクルが重要とされている。しかし、先述した通り先行研究ではこのような対話的な仮説検証プロセスは十分に考慮されていない。近年のデータサイエンス領域においては、効率性を追求するデータサイエンスの自動化(AutoDS)と、意思決定者の文脈理解や創造性を重視するインタラクティブ可視化(VIS)

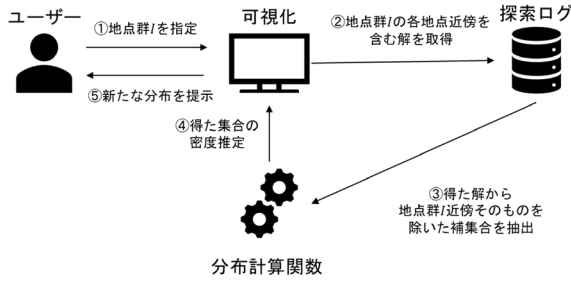


図2 提案手法アプローチ

解1	地点A	地点B	地点C	地点D	地点E	地点F	100
解2	地点A	地点B	地点E	地点G	地点H	地点I	90
解3	地点C	地点D	地点H	地点I	地点J	地点K	110
...	...	...	...	...	...	...	...



地点B	地点C	地点D	地点E	地点F	100
地点B	地点E	地点G	地点H	地点I	90

図3 探索解集合の条件付き抽出手法

という、相反する性質を持つアプローチをいかに調和・融合させるべきかという議論[9]が活発に行われている。さらに、計算機による多目的最適化のプロセスに高度な視覚的インタラクションを統合し、意思決定者が視覚的に最適化プロセスをコントロールする Visual Analytics の手法[10]も提案され、注目を集めている。

本研究では消防署移転先探索問題において得られた探索解集合に、こういった Visual Analytics の考えと KDE を用いることで、施設間の空間的依存関係を対話的に理解できる意思決定支援可視化システムを実現する。

3. 提案手法

本研究の目的は、消防署移転先探索において、施設間の空間的依存関係を対話的に理解し、さらに利用者が仮説検証的に探索を行うことを可能とする意思決定支援可視化システムを実現することである。これを実現するキーアイデアは探索解集合を経験的な解空間として利用し、利用者が指定した配置条件に応じて条件付き分布を対話的に再計算・可視化することである。具体的なアプローチを以下に示す。また、全体の流れを図2に示す。

- A1：探索解集合の条件付き抽出
- A2：条件付き空間分布の推定
- A3：対話型可視化による意思決定支援

3.1 A1：探索解集合の条件付き抽出

本節では、分布推定に必要な探索解集合の抽出方法について述べる。本処理は、ユーザーが地図上で「ここに配置したい」あるいは「この配置を固定したい」と考える任意の地点集合を選択した際に、その条件に応じた条件付き分布を提示するために必要となる。処理の流れは、①ユーザーが選択した地点を含む解集合の取得、②取得した解集合からユーザーが選択した地点を除いた残差集合の抽出、の2段階からなる。

図3を用いて説明する。例えば、図3においてユーザーが地点Aを選択した場合を考える。まず、**ユーザーが選択した地点を含む解集合の取得**は、図3の矢印より上部の処理を指す。具体的には、地点Aを含む解（色の付いた行）を探索解集合から抽出する。次に、**取得した解集合からユーザーが選択した地点を除いた残差集合の抽出**は、図3の矢印より下部の処理を指す。ここでは、先ほど取得した解集合から、ユーザーが選択した地点である地点Aを除去し、残りの地点のみを抽出する。

なお、図3では地点Aのみを例として示しているが、ユーザーは複数の地点を同時に選択することも可能である。抽出された残差集合に含まれる地点群は、次節A2で述べるカーネル密度推定（KDE）の入力標本として用いる。

3.2 A2：条件付き空間分布の推定

本節では、A1で抽出された残差集合に基づき、カーネル密度推定を用いて条件付き空間分布を推定する手法について述べる。本処理は、抽出された点群データをヒートマップとして可視化し、ユーザーに提示するために必要となる。本研究では、各配置パターンに対応する評価値 s_i を用いて、各解の分布推定への寄与度を決定する。スコアは小さいほど優れた解であるため、スコアの小さい解ほど大きな寄与を与えるよう重み付けを行う。また、推定される確率密度関数が適切に正規化されるよう、各解の重みは全体で総和が1となるように調整する。

分布推定の入力標本としては、各配置パターン $\mathbf{x}_i$ から抽出された残差集合 $R(\mathbf{x}_i)$ （すなわちA1で取得した残差集合）に含まれる消防署の位置座標を用いる。このとき、対象地域内の任意の位置 $\mathbf{u} = (\text{lon}, \text{lat})^T$ における条件付き確率密度関数 $\hat{f}(\mathbf{u})$ は、二次元ガウス核関数 K_h を用いて次式で表される。

$$\hat{f}(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^{N_C} \alpha_i \sum_{\mathbf{p}_{ik} \in R(\mathbf{x}_i)} K_h(\mathbf{u} - \mathbf{p}_{ik}) \quad (1)$$

ここで、 N_C はA1で抽出された条件適合解の総数、 α_i は配置パターン i のスコアに基づいて正規化された重み、 $R(\mathbf{x}_i)$ は配置パターン $\mathbf{x}_i$ から抽出された残差集合、 $\mathbf{p}_{ik}$ は残差集合に含まれる第 k 番目の消防署の位置座標、 K_h は帯域幅 h をもつ二次元ガウス核関数を表す。推定された確率密度 $\hat{f}(\mathbf{u})$ の高い領域は、ユーザーが指定した配置条件を満たした場合に、その他の消防署が同時に配置されやすい潜在的な集中領域を示している。

3.3 A3：対話型可視化による意思決定支援

本節では、A1およびA2で定式化した条件付き分布の計算をもとに、ユーザーが地図を介して能動的に探索を行うための対話型インタフェースについて述べる。提案システムにおける仮説検証のインタラクションループ（図4）は以下の通りである。

まず、システムは初期状態として、制約のない全探索解集合に基づく無条件の分布をヒートマップとして地図上に提示する。ユーザーはこの初期分布を俯瞰することで、「どのエリアに消防署の配置が集中しやすいか」というマクロな傾向を把握する。次に、ユーザーは自身のドメイン知識や施策上の関心に

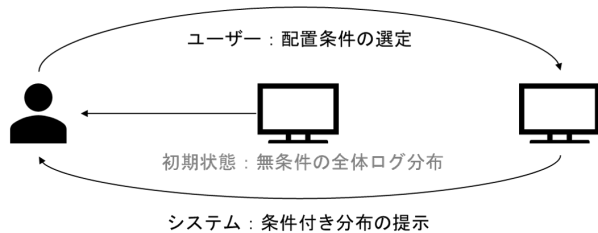


図4 対話型可視化システム

に基づき、「特定の地域に消防署を配置・固定した場合、他の消防署の最適な配置傾向はどう変化するか」という仮説を立て、地図上に直接クリックすることで空間制約を動的に入力する。

制約が入力されると、システムは裏側で A1 および A2 の計算を即座に実行し、更新された条件付き分布を新たなヒートマップとして地図上に提示する。ユーザーは、この変化した分布をもとに、さらなる配置条件の追加や変更を対話的に繰り返す。これにより、ユーザーはユーザー自身の最適な配置を探索することが可能となる。

4. システム実装

本研究で提案した手法の有効性を検証するために Web アプリを実装した。具体的な技術スタックは以下のとおりである。開発言語として Python3.11、フレームワークとして Streamlit を採用した。モジュールとして、GeoPandas, Shapely, SciPy, Folium を使用した。

データは神戸市消防局からランダムに抽出した 6 施設の移転先候補を先行研究のアルゴリズムにより計算した 5100 行の探索解集合を用いる。

5. ケーススタディ

この章では、実際にシステムを用いて効果検証を行う。検証項目として先述した課題 P1, P2, P3 に対応する以下の 3 つを考える。

- E1：条件付き分布の可視化能力
- E2：探索解集合利用の有効性
- E3：対話的探索の有効性

5.1 E1：条件付き分布の可視化能力

ここでは施設間の依存関係、すなわち「どの候補地とどの候補地が同時に選択されるべき組み合わせなのか」という解の内部構造を視覚的に識別できるかを確認する。図5は、探索解集合に関して一切の空間制約を課していない初期状態の無条件分布である。この初期分布を俯瞰すると、対象地域東側の特定のエリアに確率密度（候補地）が強く集中しているマクロな傾向が観察される。意思決定者がこの東側エリアへの配置を主観的な仮説として想定し、該当するクラスタ周辺をターゲット地点として指定した際の条件付き分布が図6である。図6の条件付き分布では、指定したターゲット周辺の確率密度が消えている。これは、東側への配置によって同地域の救急需要のカバーが完了したことを意味し、意思決定者は東側に対してこれ以上の配置検討が不要であることを直感的に把握できる。したがって、

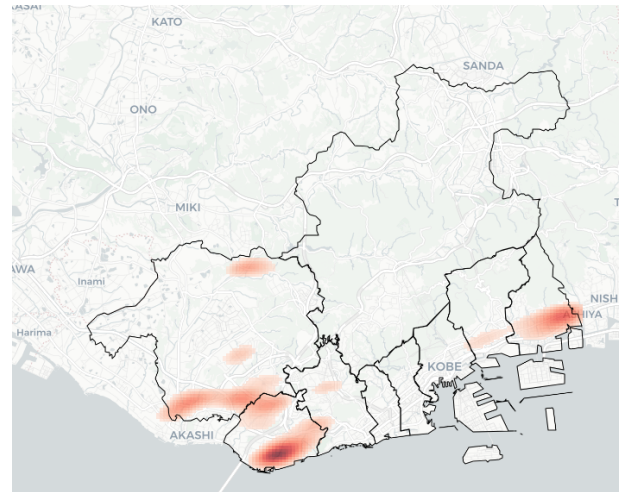


図5 無条件の全体分布

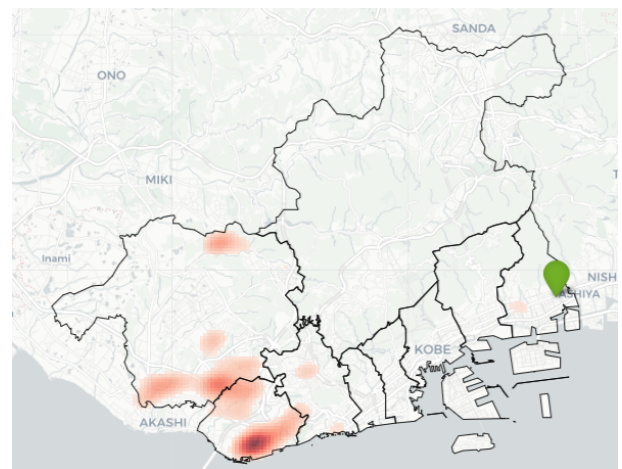


図6 ユーザーにより 1 署を固定した条件分布

提案手法はドットの重ね合わせだけでは埋没していた「東側には 1 署で十分であり、それ以外はその他のクラスタから選ぶべき」という情報をヒートマップの動的変化として視覚的に表現できており、利用シナリオを通じて課題 P1 に対する有用性を確認できた。

5.2 E2：探索解集合利用の有効性

ここでは探索解集合の使用による可視化への有効性を確認する。図7は優良解のみを KDE によってヒートマップ化したものである。探索解集合を用いたヒートマップである図5と比較すると、探索解集合を用いたものは東側のクラスタの少し左側や、西側の大きなクラスタの少し右側に小さなクラスタを確認できる。これは探索解集合を用いたことにより最良解には一步及ばなかったものの、比較的優秀な準最適解の配置パターンを副クラスタとして提示できたからである。したがって、探索解集合全体を情報源として活用する提案手法は、多様な配置案の検討を支援しており、利用シナリオを通じて課題 P2 に対する有用性を確認できた。

5.3 E3：対話的探索の有効性

ここでは、利用者が自身の持つ仮説に基づいて条件を動的に指定し、仮説検証を繰り返す「対話的探索」の有効性を検証

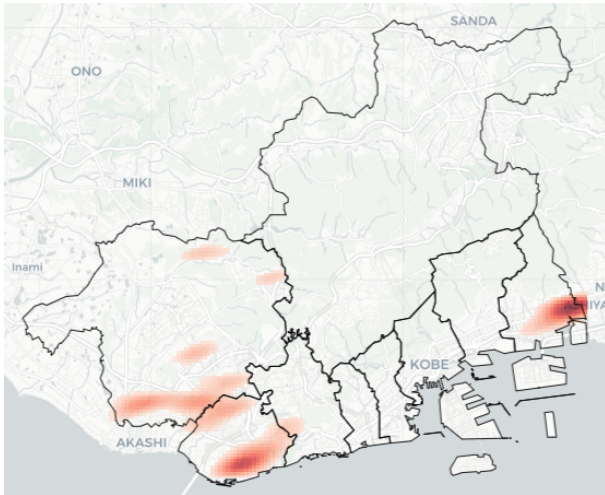


図7 優良解のみによる分布

する。

E1 の検証において示したシナリオの通り、利用者は初期状態の全体分布（図5）を俯瞰した後に特定の候補地を選定・クリックし、それに応じてシステムが動的に回答して条件付き分布（図6）へと遷移する。このインタラクションは2 署目以降の配置決定プロセスにおいても同様に連続して適用可能であり、利用者は自身の主観的な意思や仮説を反映させながら探索を進めることができる。

また、実務における消防署の配置計画では、コスト面や行政上の要因、あるいは用地確保の空間的な制約などにより、確率密度が最も高い主クラスタの中心（本命地）へ実際には配置できないケースが頻発する。このような状況に直面した場合でも、E2 の検証で示した「全探索解集合の活用による準最適解の可視化」が極めて有効に機能する。利用者は、本命地を避けた周辺のなだらかな裾野や小さな副クラスタへと関心を移し、そこを新たな空間制約として指定することで、自身の主観的な意図に沿いつつ、かつ救急カバー性能が比較的高い代替配置案へと論理的に辿り着くことができる。

したがって、提案システムは利用者が自身の持つ実務的な制約条件や仮説を動的に投入し、柔軟に意思決定を行う分析環境を提供できており、課題 P3 に対する有用性を確認できた。

6. 考 察

6.1 提案手法の利点

前章において、提案手法が消防署移転先探索問題における意思決定支援に有用であることを示した。しかし、開発した「メタヒューリスティクスの探索解集合を活用した条件付き分布の可視化」および「対話的探索インターフェース」のコアとなるアーキテクチャは、消防署配置という特定のドメインに依存するものではなく、より広範な空間最適化問題に一般化して適用可能である。実際の都市計画やインフラ整備における拠点配置問題では、計算機が算出する純粋な数理的最適解（距離やコストの最小化など）と、現実世界における多様な定性的制約（地価の変動、法規制、地元住民との合意形成、政治的要請など）

との衝突が普遍的に発生する。例えば「災害時の避難所配置」や「物流拠点の配置」などに適用することが可能である。

6.2 提案手法の限界

本提案手法では、ユーザーが地図上で空間制約（ピン留め）を更新するたびに、バックエンドで 5000 件程度の探索解集合に対する条件付き加重カーネル密度推定を再計算している。今回の検証規模においても、ユーザーのインタラクションに対する応答速度には数秒程度の待ち時間が生じており、対話的探索のリアルタイム性を維持するための実質的な境界線であることが確認された。したがって、対象地域がさらに広域化し、かつ探索解集合の行数が数万、数百万件規模へと膨れ上がった場合、KDE の再計算コストが増大し、意思決定者の思考の連続性を妨げるリスクがある。したがって今後の課題としてアルゴリズムの軽量化やシステムの並列化等が必要になると考えられる。

7. ま と め

本研究では、消防署の移転先探索問題において、意思決定者の支援を目的とした探索解集合に基づく空間的分布の可視化手法および対話的分析手法を提案した。実際の神戸市のデータをもとにシステム化を行い、ケーススタディによる効果検証を行った結果、本手法が施設間の空間的依存関係の識別や潜在的な代替案の提示に寄与し、意思決定者の支援において有用性が示唆された。

一方で、空間制約の更新に伴う加重カーネル密度推定（KDE）の再計算コストが大きく、データ規模の増大に伴ってリアルタイム性が低下し、意思決定者の思考の連続性を損なうリスクがあるという技術的課題が残された。今後は、バックエンドにおける計算処理の並列化や GPU を用いた加速化、あるいは探索解集合の適切なサンプリング手法の導入といったシステムの軽量化を図ることで、より広域な対象地域や大規模なデータセットに対しても実用的なリアルタイム応答性を維持できるシステムへと発展させる必要がある。

文 献

- [1] 内閣府, “令和 7 年版 高齢社会白書,” 2025. https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2025/zenbun/pdf/1s1s_01.pdf.
- [2] 総務省消防庁, “令和 7 年版 救急救助の現況,” 2025. https://www.fdma.go.jp/publication/rescue/items/kkkg_r07_01_kyukyu.pdf.
- [3] 尼崎市消防署, “尼崎市消防署等配置計画,” 2025. https://www.city.amagasaki.hyogo.jp/_res/projects/default_project/_page/_001/034/481/keikaku.pdf.
- [4] 消防庁, “消防力の整備指針,” 2008. https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento134_12_shiryo_09.pdf.
- [5] 福田章太, 中田匠哉, 陳思楠, 佐伯幸郎, 中村匡秀, “消防署移転先探索問題に対する複数の最適化アルゴリズムの適用と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, 第 125 巻, pp.28–34, March 2026.
- [6] B.W. Silverman, Density Estimation for Statistics and Data Analysis, Chapman and Hall, London, 1986.
- [7] T.C. Bailey and A.C. Gatrell, Interactive Spatial Data Analysis, Longman, 1995.
- [8] J.J. Thomas and K.A. Cook, Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, 2005.
- [9] J. Rogers, M. Anastacio, J. Bernard, M. Chakhchoukh, R. Faust, A. Kerren, S. Koch, L. Kotthoff, C. Turkay, and E. Wall, “Visualization

and automation in data science: Exploring the paradox of humans-in-the-loop,” 2024 IEEE Visualization in Data Science (VDS), pp.1–5, 2024.

- [10] J. Hakanen, S. Radoš, G. Misitano, B.S. Saini, K. Miettinen, and K. Matković, “Interactivized: Visual interaction for better decisions with interactive multiobjective optimization,” IEEE Access, vol.10, pp.33661–33678, 2022.