

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

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.eedept.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、日本では少子高齢化の進行に伴い、救急需要が増加する一方で、火災件数は減少傾向にあり、消防・救急に関する需要構造が変化している。このような状況の下、従来の消防署配置が需要に適合しているとは限らず、配置の見直しが必要だと考えられる。そこで本研究では、消防署移転における意思決定を支援することを目的として、消防署移転先探索問題を最適化問題として定式化し、探索アルゴリズムを用いて移転先候補の分布傾向を導出する手法を提案する。評価実験では、兵庫県神戸市の実データを用い、山登り法、焼きなまし法、遺伝的アルゴリズムの3手法を適用して比較を行った。その結果、遺伝的アルゴリズムは他の手法と比較して、安定的に良好な解を得られることを確認した。また、探索結果を分布として可視化することで意思決定者に対する有効な判断支援となることを示した。

キーワード 最適化問題, 探索アルゴリズム, 救急サービス, 消防署配置, 高齢化社会

Application and Evaluation of Multiple Optimization Algorithms for 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.eedept.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, emergency demand in Japan has increased due to population aging, while fire incidents have declined, calling for a reassessment of fire station locations. This study formulates the fire station relocation problem as an optimization problem and proposes a method to derive relocation candidate trends using search algorithms. Using real data from Kobe City, Japan, hill climbing, simulated annealing, and a genetic algorithm were compared, confirming that the genetic algorithm stably yields better solutions. Visualization of the resulting distributions is shown to effectively support decision-making.

Key words Optimization problem, Search algorithms, Emergency services, Fire station location planning, Aging society

1. はじめに

近年、日本では少子高齢化の進行により、社会構造や公共サービスに対する需要が大きく変化している。特に高齢者人口の増加に伴い、救急搬送需要は年々増加傾向にあり、消防・救急体制の持続的な維持と効率化が見直しが必要だと考えられる [1]。一方で、火災件数は長期的に減少傾向にあり、消防における需要構造は、従来とは異なりつつある。

このような需要構造の変化は、消防署の配置にも影響を及ぼ

す。従来の消防署配置は、過去の人口分布や火災・救急需要を前提として整備されてきたが、現在および将来において、必ずしも最適な配置であるとは限らない。消防署の移転は多大なコストと時間を要するため、限られた資源の中で、合理的かつ説明可能な意思決定を行うことが求められている。しかし、消防署の移転先を検討する際には救急需要や消防需要、人口分布、道路ネットワーク、救急隊のリソースなど、多様な要因を同時に考慮する必要があり、人手による検討には限界がある。

そこで本研究では、消防署移転に関する意思決定を支援する

ことを目的とし、消防署移転先探索問題を最適化問題として定式化し、探索アルゴリズムを用いて移転先候補の分布傾向を導出する手法を提案する。提案手法では、人口や救急隊数および移動時間を重みとして全ての地域に対する駆けつけ時間の総和を評価指標とし、消防署の配置を評価する内部問題と、その評価値を用いて配置を探索する外部問題からなる二段階最適化構造を採用することで、消防署配置の定量的評価と探索を可能とする。

本研究の新規性は、単一の最適解を一意に提示するのではなく、メタヒューリスティクスを複数回実行し、得られた解の空間的な分布傾向を可視化する手法を提案した点にある。これにより、用地確保や予算といった実務上の制約を考慮しつつ、データに基づいた柔軟な意思決定を支援することが可能となる。

本研究のアプローチは、(A1) 内部問題による定量的評価, (A2) 外部問題による広域探索, (A3) 結果の可視化, の3段階からなる。評価実験では、兵庫県神戸市の実データを用い、山登り法、焼きなまし法、遺伝的アルゴリズムの比較を通じて、提案手法が意思決定支援において有効な判断材料を提供できることを確認する。

2. 準備

2.1 背景

近年、日本では慢性的な少子高齢化が社会的課題となっている。内閣府による高齢社会白書 [2] によれば、令和 6 年時点における 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 65 歳以上となる社会が到来すると推計されている。

高齢化の進行による影響は様々な分野に表れており、消防署における救急搬送業務もその一つである。総務省消防庁 [3] によると、令和 6 年中の救急出動件数は 772 万 740 件であり、前年と比べて 7 万 9,753 件増加している。さらに、年齢区分別の搬送人員の構成比を示した図 1 から、高齢者の占める割合が増加している一方で、その他の年齢区分では減少傾向にあることが分かる。このことから、高齢化の進行が救急搬送件数の増加に影響を与えており、今後も同様の傾向が続くと考えられる。

一方で、火災件数は減少傾向で推移している。令和 6 年中の出火件数は 3 万 7,141 件 (対前年比 1,531 件減, 4.0% 減) であり、10 年前の平成 26 年中の出火件数 4 万 3,741 件と比較すると 84.9% まで減少している [4]。

以上より、日本においては高齢化の進行に伴い救急需要が増加する一方で、火災件数は減少傾向にあり、消防・救急に関する需要構造が変化していることが読み取れる。このような需要の変化は、従来の消防署配置が必ずしも現在および将来の需要に適合しなくなる可能性を示唆している。

2.2 着目する課題

消防署を適正に配置することは、救急の駆けつけ時間の短縮や火災被害の軽減に直結するため、非常に重要である。しかし、前節で述べたように、救急需要の増加や消防需要の減少といっ

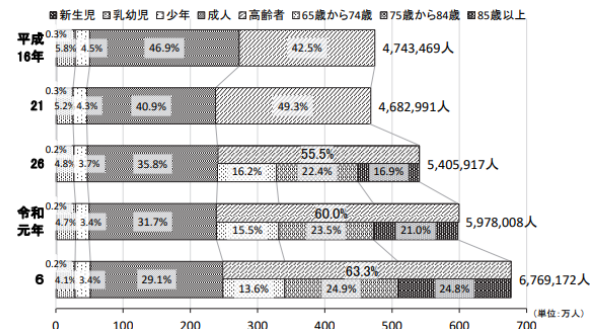


図 1 傷病程度別の搬送人員と 5 年ごとの構成比の推移 [3]

た需要構造の変化が進行する中で、既存の消防署配置が最適であるとは限らない可能性がある。実際に、尼崎市消防局 [5] では、令和 5 年に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、消防署および車両・部隊の配置について検討が行われている。このように、消防署配置の見直しは重要である。

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 [6] を考慮する必要がある。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・評価することが求められる。しかし、そのような検討を支援する手法は、現状では十分に確立されていない。

そこで本研究では、どのように消防署移転における意思決定を支援できるかという課題に着目する。

2.3 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。

2.3.1 従来の配置手法における限界

消防署移転先探索問題に対しては、これまでにも様々な数理モデルが提案されてきた [7]。しかし、2.2 節で述べた通り、現実の移転計画においては、用地確保や予算といった経済的制約に加え、整備指針に基づく政治的・法的、あるいは空間的な考慮が複雑に絡み合うため、計算上の最適解が必ずしも実効性を持つとは限らない。このことは、数理的な厳密解を追求することが、必ずしも実務上の正当性と直結しないことを示唆している。実際、Marianov らは、立地選定において「政治的実現可能性 (political feasibility)」が極めて重要な要素であると指摘している [7]。以上より、従来の単一の解を導出する数理最適化アプローチだけでは、実際の意思決定現場における柔軟な検討を十分に支援できないという限界がある。

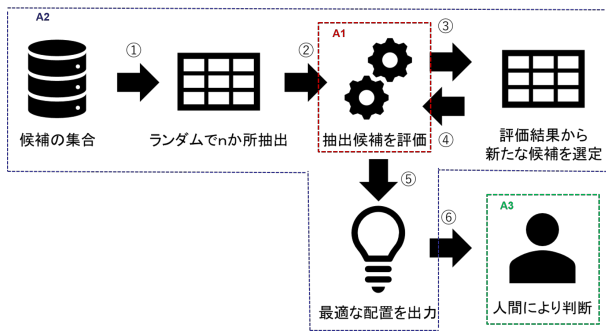


図2 提案手法アプローチ

そこで本研究では、単一の最適配置を一意に決定することを目的とするのではなく、探索過程で得られた複数の良好な配置案を集計し、その分布傾向を提示することで実務的な意思決定を支援するアプローチを重視する。

3. 提案手法

本研究では、全ての地域に対する駆けつけ時間の総和が最少となる消防署の移転先候補を計算により導出し、最終的な判断を行う人間の意思決定を支援することを目的とする。この目的を達成するため、消防署移転先探索問題を最適化問題として定式化し、複数の探索アルゴリズムを適用する。

本研究で提案する手法は、消防署の配置を評価する内部問題と、その評価結果に基づいて移転先を探索する外部問題からなる二段階最適化構造をとる。内部問題では、ある消防署配置が与えられたときの駆けつけ時間を定量的に算出し、その総和を評価値として求める。外部問題ではその評価値を目的関数として、駆けつけ時間が最小となるような消防署の移転先配置をメタヒューリスティクスで探索する。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：内部問題の定式化

消防署配置が与えられた際に、地域と消防署との対応関係を組み合わせ最適化問題として解き、全ての地域に対する駆けつけ時間の総和を算出するための数理モデルを構築する。

- A2：外部問題への探索アルゴリズムの適用

A1 で求めた評価値を用い、探索アルゴリズムを適用して、より良い消防署配置を探索する。

- A3：結果の可視化と意思決定支援

得られた移転先候補および評価結果を可視化し、人間による最終的な意思決定を支援する。

3.1 A1：内部問題の定式化

本節では、消防署の配置を評価するための内部問題の定式化を行う。これは、消防署移転先探索問題を最適化問題として扱う際に、配置の良し悪しを定量的に評価する評価関数が必要となるためである。本研究では、この内部問題を組合せ最適化問題として定式化する。組合せ最適化問題とは、膨大な離散的な選択肢の中から、与えられた制約条件を満たしつつ目的関数の値を最小化（あるいは最大化）する解を見つけ出す問題である[8]。

具体的には、ある消防署配置が与えられたとき、各地域に対

して担当する消防署を割り当てる問題を考える。ここで、その対応関係は、人口や救急隊数および移動時間を重みとして、全ての地域に対する駆けつけ時間の総和が最小となるように最適化したうえで決定する。この最小値を、対象とする消防署配置に対する最適評価値とする。

以下に、内部問題の具体的な定式化を示す。まず、変数を以下のように定義する。

- $x_{ij} \in \{0, 1\}$ ：地域 i を消防署 j に割り当てるかどうかを表す決定変数（1：割り当てる，0：割り当てない）

- $P_i \in \mathbb{N}$ ：地域 i における人口

- $T_{ij} \in \mathbb{R}$ ：地域 i と消防署 j の間の移動時間

- $R_j \in \mathbb{N}$ ：消防署 j に所属する救急隊の数

- $C \in \mathbb{N}$ ：1つの救急隊が担当可能な人口数

ここで P_i は各地域の救急搬送需要が人口に比例すると仮定し設定している。一方、消防署 j の許容量 C は、当該消防署に所属する救急隊の実績最大搬送件数に、市全体の救急搬送件数と総人口の比率を乗じることで算出している。

次に、全ての地域に対する駆けつけ時間の総和を最小化することを目的関数として式(1)のように定義する。本研究では、この目的関数の値を、外部問題における消防署配置の良し悪しを表す評価スコアとして用いる。

$$\min \sum_i \sum_j P_i T_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

最後に、以下の二つの制約条件を課す。

- 各地域はちょうど1つの消防署に割り当てられる
- 各消防署はそのリソースの範囲内でのみ地域を割り当てられる

前者は各地域が複数の消防署に割り当てられたり、いずれの消防署にも割り当てられなかったりすることを防ぐために式(2)を設けている。後者は特定の消防署に過剰な負荷が集中することを防ぐために設けており、式(3)のように消防署 j に割り当てられる人口の総和は、その消防署が保有する救急隊数に基づく上限以下とするように制限している。

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad (\forall i) \quad (2)$$

$$\sum_i P_i x_{ij} \leq C R_j \quad (\forall j) \quad (3)$$

3.2 A2：外部問題への探索アルゴリズムの適用

本節では、A1 で求めた評価値を用いて、最適な消防署配置を探索する外部問題について述べる。探索にはメタヒューリスティクスを用いる。理由は2点ある。第一に、本問題は広大な探索空間を有する離散的な組み合わせ最適化問題であり、実務において許容可能な時間内で解を導出する必要があるためである。第二に、本研究が重視する「政治的実現可能性」を考慮するためである。既存研究のような唯一の厳密解の追求ではなく、

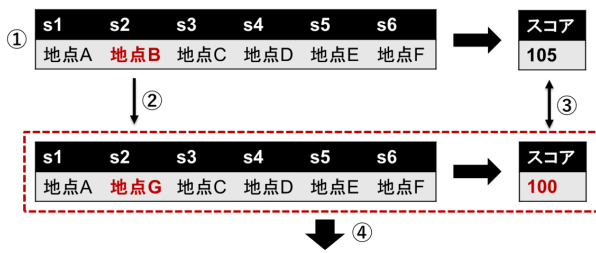


図3 $n = 6$ の場合における山登り法

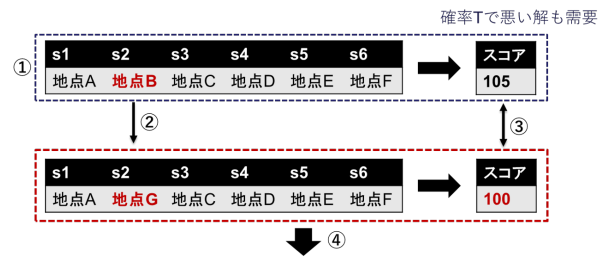


図4 $n = 6$ の場合における焼きなまし法

多様な十分に良好な解を幅広く探索することで、現場の制約に応じた柔軟な選択肢を提示することが可能となる。

メタヒューリスティクスは、山登り法、焼きなまし法、および遺伝的アルゴリズムの3手法を適用し、各手法における評価関数の最小化を目指す。それぞれの選定理由は以下の通りである。

- 山登り法：計算コストが極めて低く、局所的な改善傾向を迅速に把握できるため。
- 焼きなまし法：探索初期に確率的な移動を許容することで、局所最適解への陥入を回避し、より広範囲の有望な解を探索できるため。
- 遺伝的アルゴリズム：複数の配置候補を並行して探索し、優秀な解の情報を継承・交換するため、複雑な制約下でも安定した解を見つける能力が高いため。

なお、本研究における探索アルゴリズムでは、移転対象となる消防署の配置のみを探索変数とする一方で、A1で定義した内部問題においては、移転しない既存消防署の配置も含めた全体の消防署配置を評価対象としている。これにより、消防署全体を包括的に評価することが可能となる。

3.2.1 山登り法への適用

山登り法は、局所探索の代表的な手法であり、離散最適化問題に広く適用されている [9]。基本的な考え方は、現在の解の近傍解を探索し、評価値が改善される場合にのみ解を更新する操作を反復することで、より良い解を逐次的に探索する点にある。

本研究では、消防署を n 箇所配置する問題に対して、山登り法を以下の手順で適用する。

- **初期解の生成**：移転先候補の中から n 箇所を選択し初期配置を生成する。
- **近傍解の生成**：現在の配置に含まれる 1 箇所を、近傍の候補地点にランダムに置換することで近傍解を生成する。ここで近傍とは、あらかじめ定義した移転先候補における近接地点を指す。
- **解の更新**：A1 で定義した評価関数を用いて現在の解と近傍解を評価し、評価値がより小さい解を新たな解として採用する。
- **反復**：上記の操作を所定の回数繰り返す。

図3には、 $n = 6$ の場合における山登り法による探索の概念図を示す。

3.2.2 焼きなまし法への適用

焼きなまし法は、局所最適解からの脱出を可能にする確率的

戦略を導入した探索アルゴリズムである [10]。山登り法では評価値が改善される場合にのみ解を更新するのに対し、焼きなまし法では解が悪化する場合であっても、一定の確率で解を受理することで、探索の多様性を確保し、大域的に良好な解を探索することを目的とする。

本研究では、山登り法と同様の近傍構造を用い、以下の手順で焼きなまし法を適用する。

- **初期解の生成**：移転先候補の中から n 箇所を選択し、初期配置を生成する。
- **近傍解の生成**：現在の配置に含まれる 1 箇所を、近傍の候補地点にランダムに置換することで近傍解を生成する。
- **解の更新**：A1 で定義した評価関数を用いて現在の解と近傍解を評価し、近傍解の評価値が現在の解より小さい場合には必ず採用する。一方、評価値が悪化する場合であっても、確率 T に基づいて近傍解を受理する。
- **確率の更新**：確率 T を減衰率 α 倍することで更新する ($0 < \alpha < 1$)。
- **反復**：上記の操作を所定の回数、または確率 T が十分に小さくなるまで繰り返す。

図4には、 $n = 6$ の場合における焼きなまし法による探索の概念図を示す。

3.2.3 遺伝的アルゴリズムへの適用

遺伝的アルゴリズムは、複数の解候補を同時に保持し、交叉や突然変異といった操作を通じて探索を行う点に特徴がある [11]。

本研究における遺伝的アルゴリズムの適用手順を以下に示す。なお、各個体は消防署の配置を表し、A1で定義した内部評価問題に基づく評価値を適応度（スコア）として用いる。

- **初期集団の生成**：移転先候補地の集合 A から n 箇所をランダムに抽出した配置 S を m 個生成し、初期集団とする ($m > 3$)。各候補配置について、A1で定義した評価関数を用いてスコア r_m を計算する。
- **親個体の選択**：現在の集団からランダムに3個の個体を抽出し、その中で最も評価値の良い配置を親個体 p_1 とする。同様の手順により、もう一つの親個体 p_2 を選択する。
- **交叉**：親個体 p_1 と p_2 に対して交叉操作を行い、 p_1 の前半要素と p_2 の後半要素を結合した子個体 c_1 、および p_1 の後半要素と p_2 の前半要素を結合した子個体 c_2 を生成する。
- **突然変異**：各子個体 c_1, c_2 に対して、確率 T で1要素をランダムに選択し、別の候補地へ置換することで突然変異を与える。これにより探索の多様性を確保する。

- **子個体の生成**：上記の親選択，交叉，突然変異の手順を繰り返すことで，合計 m 個の新たな候補配置を生成する。

- **世代更新**：生成した m 個の候補配置を次世代の集団 S とする。

以上の手順を所定の世代数だけ反復することで，評価値の小さい，すなわち駆けつけ時間の総和が短い消防署配置を探索する。なお，交叉および突然変異によって重複や欠損が生じた場合には，候補地集合からランダムに補正を行い，常に n 箇所の配置となるよう調整する。

図 5 には， $n = 6$ の場合における遺伝的アルゴリズムによる探索の概念図を示す。

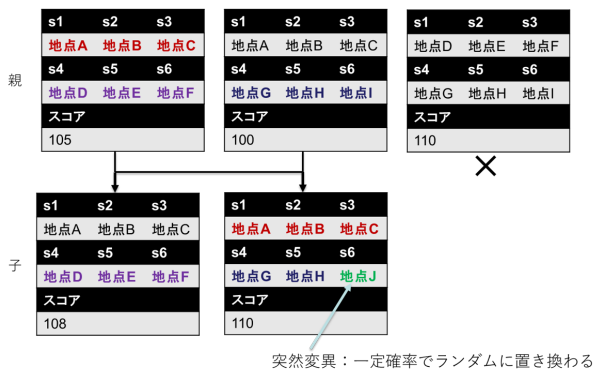


図 5 $n = 6$ の場合における遺伝的アルゴリズム

3.3 A3：結果の可視化と意思決定支援

本節では，A1 および A2 で求めた消防署配置の探索結果を基に，意思決定をどのように支援するかについて述べる。

2.3.1 節で示したように本研究では，良いと思われる配置の全体的な傾向を出力とする手法が求められる。そこで，本節では A2 で述べた探索アルゴリズムを用いた探索を m 回実行する。得られた複数の探索結果を集計・可視化することで，移転候補地の選択頻度や分布を分析し，消防署配置に関する意思決定を支援する。

4. 評価実験

提案手法の有効性を検証するため，兵庫県神戸市のデータを用いて評価実験を行った。本実験における RQ は**複数の最適化アルゴリズムのうち配置場所に関する意思決定を支援することに適した手法はどれか**，とする。

4.1 実験条件

4.1.1 移転対象施設

移転対象とする施設は，神戸市消防局からランダムに抽出した以下の 6 施設とする。

- 伊川谷出張所
- 青木出張所
- 塩屋出張所
- 高丸出張所
- 板宿出張所
- 押部谷出張所

4.1.2 変数の定義

地域 i は，神戸市内の小学校区 163 か所として定義する。この定義を採用した理由は以下の 2 点である。

1 点目は，計算コストを削減し，現実的な時間内で解を導出するためである。A1 で定義した割当最適化問題は，地域数が増加するにつれて計算量が急激に増大することが知られている。

2 点目は，小学校区が「小学生が徒歩で通学可能な範囲」を基準としており，防災・行政施策における意思決定単位として適していると判断したためである。

一方で，消防署の移転先候補地点については，より詳細な空間的検討を行うため，町単位の 789 か所を候補として設定する。

また，1 つの救急隊が担当可能な人口数 C は 60000 とした。これは，実際の救急隊の最大搬送可能件数に対し，神戸市における実績搬送数と人口の比率を乗じることで算出した値である。

4.1.3 探索回数および設定

A2 で用いた各探索アルゴリズムについて，A1 の評価関数が合計 500 回実行されるように反復回数を設定した。また，A3 で述べた可視化および判断のための分析では，探索を $m = 10$ 回実行し，その結果を集計する。

4.2 使用データおよび実装環境

実装言語には Python を用い，主要なライブラリとして NumPy および PuLP を使用した。地域 i と消防署 j 間の移動時間 T_{ij} は Google Routes API を用いて算出した。人口データには，2023 年度の神戸市小学校区別人口データを用いた。

4.3 結果

山登り法，焼きなまし法，遺伝的アルゴリズムの 3 手法について，配置場所の意思決定支援に適した手法はどれかという観点から比較を行った。図 6 に，各手法により得られた解のスコア分布を示す。

図 6 より，遺伝的アルゴリズムは他の手法と比較して，性能の悪い解（すなわちスコアが高い解）が出現しにくく，解が比較的安定していることが分かる。これは，意思決定の過程において，極端に不適切な解が候補として提示されるリスクを低減できることを意味しており，意思決定支援の観点から有用な特性であると考えられる。

一方で，焼きなまし法は最良解を得られる可能性があるものの，解の分布が不安定であり，意思決定者が確信を持って選択するにはリスクが伴う。

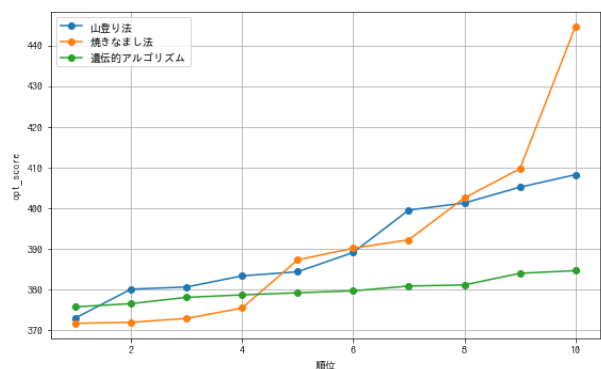


図 6 各メタヒューリスティクスにおけるスコア分布の比較



図7 山登り法による結果



図9 遺伝的アルゴリズムによる結果



図8 焼きなまし法による結果

次に、各探索アルゴリズムによって得られた移転先候補の座標を地図上にプロットした結果を、図7、図8、図9にそれぞれ示す。

図7および図8より、山登り法および焼きなまし法では、移転先候補が比較的広範囲に分布していることが確認できる。これらの手法では、探索過程の特性により、地理的に分散した解候補が生成されていると考えられる。

一方、図9に示す遺伝的アルゴリズムの結果では、移転先候補が特定の地域に集中して分布しており、他の手法と比較して空間的な分布傾向が明確に表れている。具体的には、地図左上に位置する西区南部から垂水区全体にかけて一つのクラスタが形成され、さらに地図右側の東灘区周辺にも別のクラスタが確認できる。このような分布傾向は、意思決定の際に有望な配置候補地域を把握するための手がかりとなり、意思決定支援の観点から有用な情報を提供するものといえる。

以上の結果から、遺伝的アルゴリズムは、数値的なスコアの安定性に加えて、移転先候補の空間的な分布傾向を明確に示すことができる手法であるといえる。このような分布の可視化により、単一の最適解を提示するのではなく、「移転先として有望な地域」を複数提示することが可能となり、意思決定者に対する判断支援として有効であることが示唆される。

5. 考察

5.1 提案手法の利点

評価実験の結果より、本研究で提案した手法は、全ての地域

に対する駆けつけ時間の総和を指標として、消防署の移転先候補を計算により導出し、人間の意思決定を支援できることが確認された。

特に遺伝的アルゴリズムは、他の探索手法と比較してその特性から安定的に良好な解を得られる傾向があり、複数回の探索結果を可視化した際にも、移転先候補の分布に明確な傾向が現れた。これは、意思決定者に対して有用な判断材料を提供する点で有効であると考えられる。

また、本実験では2023年度の人口データを用いたが、将来の人口推計や需要予測データを適用することで、将来を見据えた配置検討にも拡張可能である。以上より、本手法は移転先探索における合理的な意思決定を支援する有効な手段であるといえる。

5.2 提案手法の限界

本研究で提案した手法にはいくつかの限界が存在する。第一に、救急需要の扱いに関する課題が挙げられる。本研究では地域に居住する人口を基に評価を行ったが、実際には通勤・通学等により昼夜で人口分布が変化するため、真の救急需要を正確に反映しているとは限らない。

第二に、実際の救急出動件数を直接考慮できていない点である。例えば、高齢者層は若年層と比較して救急出動の発生確率が高く、人口規模と救急需要の間には乖離が生じる可能性がある。そのため、年齢構成や過去の搬送実績を考慮した救急需要モデルの導入が、今後の課題として挙げられる。

6. まとめ

本研究では、救急需要の変化に伴い必要となる消防署移転において、意思決定をどのように支援できるかという課題に着目し、探索アルゴリズムを用いて移転先候補の分布傾向を計算する手法を提案した。

さらに、神戸市の実データを用いた評価実験を通じて、複数の探索アルゴリズムを比較し、遺伝的アルゴリズムが本問題において安定的に良好な解を得られることを示した。また、探索結果を分布として可視化することで、意思決定者に対する判断支援が可能であることを確認した。

一方で、本研究では需要人口や実際の救急搬送件数を十分に考慮できていないという課題が残された。今後、年齢構成や過

去の搬送実績，さらには将来の需要予測を取り入れることで，より現実的かつ実用的な意思決定支援へと発展させることが可能であると考えられる。

以上より，本手法は複雑な消防署移転先探索問題に対する意思決定支援の有効な手段となり得るものであり，将来的にはより良い救急サービスの提供に貢献することが期待される。

謝辞 本研究の一部はJSPS 科研費JP25H01167, JP25K02946, JP25K24389, JP24K02765, JP24K02774, JP23K17006, JP23K28091, JP23K28383 の研究助成を受けて行われている。本研究は神戸市消防局との共同研究の一環で行われている。

文 献

- [1] 総務省消防庁, “令和6年度 救急業務のあり方に関する検討会の報告書,” 2024. https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-151/02/houkokusyo.pdf.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 総務省消防庁, “令和7年版 消防白書,” 2025. https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r7/items/r7_d1-d6.pdf.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] V. Marianov and C. ReVelle, “Siting emergency services,” Facility location: a survey of applications and methods, pp.199–223, 1995.
- [8] 田中俊二, “組合せ最適化問題とスケジューリング,” システム/制御/情報, vol.64, no.6, pp.200–205, 2020.
- [9] A.W. Johnson, “Generalized hill climbing algorithms for discrete optimization problems,” PhD thesis, Virginia Tech, 1996.
- [10] J.E. Orosz and S.H. Jacobson, “Analysis of static simulated annealing algorithms,” Journal of Optimization Theory and Applications, vol.115, no.1, pp.165–182, 2002.
- [11] M. Mitchell, An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press, 1998.