

地理データと数理計画モデルによるゴミ回収サービスの評価技法の開発

松崎仁平 ○榊原一紀 立花潤三 (富山県立大学)

An assessment technique for garbage collection services using geographic data and mathematical programming model

J. Matsuzaki, *K. Sakakibara and J. Tachibana (Toyama Prefectural University)

概要— 一般家庭から排出されたゴミを回収する際の回収順はゴミステーションの数が多いと作成が困難である。本論文では、低コストでのゴミ回収を可能にするために配送計画問題として最適化を行う。しかしステーション数が多い場合、計算時間が膨大となり最適解の導出が困難である。そこで、対象問題を集合被覆モデルとして定式化を行った。ルートの生成にあたり、より現実に近い道路ネットワークを表現するため OpenStreetMap を用いた。

キーワード: ゴミ回収, 配送計画, 集合被覆, 最短経路

1 はじめに

現在日本では、国民1人当たり1日約900gのゴミが排出されており、平成29年度のごみ処理事業経費は約1.9兆円である¹⁾。ゴミ処理にかかる経費は年々増加しており、今後も増加することが予想される。また、一般家庭から排出されるゴミは全体の約7割であり、ゴミの回収に多くのコストがかかっている。

一方で現在のゴミ回収に際しては、リサイクルの観点からゴミの分別が一般化している。一般家庭から排出されるゴミを一時的にためておくゴミステーションは特定の種類のゴミのみを回収するステーションや、複数種類のゴミを回収するステーションが存在する。また、同じ地域でも曜日やゴミの種類によって回収対象となるステーションが異なり、複数のゴミ回収ルート計画を作成する必要があるため計画の作成にかかる労力は大きい。

本研究では一般家庭から排出されるゴミの回収コストの試算を目的とし、配送計画問題として定式化する。配送計画問題として計画を作成する場合、全ての実行可能な回収ルート候補の中から最適なものが選択される。しかしゴミを回収対象のステーションは多数存在し、実行可能なルートは膨大な数となる。さらに候補となる回収ルートに対して、その回収計画の精度高い評価のためには、道路ネットワークの構造をふまえたルートの生成が求められる。そこで対象の配送計画をルー

ト生成とルート選択に分割する。候補となる実行可能なルートをあらかじめ複数生成し、その中から全てのステーションを被覆するルートの選択を集合被覆モデルとして表し、現実的な時間で低コストな回収ルート計画の導出を行う。一方で候補ルートの生成にあたっては、対象地区を表現した上で、地点間の最短経路問題を定式化する。

2 ゴミ回収における配送計画

ゴミ回収サービスにおける配送計画の概念を図1に示す。回収車の出発地点となる回収業者の拠点、終着地点となるゴミ処理場が存在し、回収車が回る対象として複数のゴミステーションが存在する。加えて本研究で対象とする地域においてはゴミの種類によって回収業者やゴミ処理場の場所が異なるため、計画はゴミの種類別に作成する必要がある。また計画は長期間にわたり運用されるため、渋滞などの交通状況は考慮しないものとする。一度ゴミ処理場へ到着した回収車が再びステーションを回るような計画は作成しない。

2.1 ゴミステーション

ゴミステーションは可燃ゴミのみを回収するステーション、可燃ゴミと不燃ゴミ・資源ゴミを回収するステーション、不燃ゴミ・資源ゴミのみを回収するステーションなど複数種類存在する。また、ステーション毎に回収曜日が設定されている。一般家庭からゴミを出

す時刻は全てのステーションで同じ時刻が指定されていると仮定し、回収車は指定時刻以降であればいつ回収してもよいものとする。

2.2 ゴミ回収車

ゴミ回収車は出発地点から決められたステーションを回りゴミ処理場へ向かう。本計画におけるデポは、出発地点とゴミ処理場となる。ゴミ処理場から出発地点へ戻る時間は考慮しないことにする。また本来ごみ収集に際しては、回収車の容量制約があるものの、本研究では後述する回収時間制約でこれを考慮しているものとする。

2.3 配送シナリオ

本研究で扱う配送計画のシナリオは、ゴミの種類、回収曜日毎に存在する。回収ルート計画の最適化はこのシナリオ毎に行う。

2.4 ゴミ回収コスト

回収ルート計画はゴミ回収コストの削減を目的として最適化する。ゴミ回収にかかるコストは、人件費、回収車のガソリン代および維持管理費で算出する。

2.5 関連研究と本研究の位置づけ

ゴミ収集計画に対する関連計画としては、例えば、小泉ら²⁾による研究では、ゴミの発生量の不確実性を含む配送計画問題に関して、ファジィ線形計画法(Fuzzy Linear Programming)を適用しゴミの発生量の曖昧さも考慮して、経済性を向上させ、同時に安全性の確保も満足するような収集輸送モデルを提案している。ファジィ線形計画とはファジィ数理計画問題の一部である。ファジィ数理計画問題とは我々の認識に含まれる曖昧さを取り扱っており、ファジィ集合を導入することで

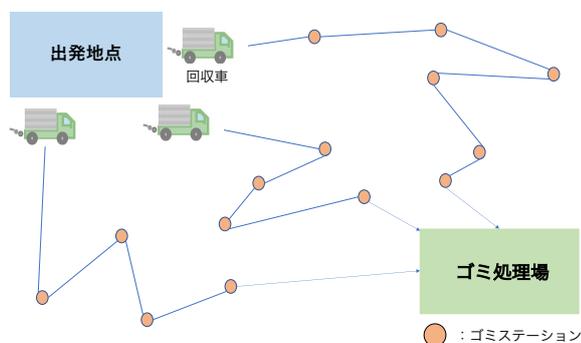


Fig. 1: ゴミ回収サービスにおける配送計画

我々の認識に近い数理計画の定式化をなすものである³⁾。また、立花潤三ら⁴⁾の研究では、一般廃棄物のリサイクルに重点を置き、政策面、経済面および産業面、教育面にまで視野に入れた幅広い範囲での総合的な検討が必要であるとしている。このような背景のもと、効率的かつ合理的に廃棄物処理システム計画を行うため、総合的かつ多面的な検討の実現を目指した廃棄物処理システム計画のモデル分析を行なっている。

さらに、配送計画以外でのゴミ収集に関する研究として、奥野麻衣子ら⁵⁾の研究では、路上収集にともなう窒素酸化物(NOx)、一酸化炭素(CO)、および全炭化水素(THC)の発生量のシミュレーションを行い、(1)集積場間の距離、(2)収集車の走行速度、(3)収集地域の面積の3つが大気汚染物質の発生量に与える影響を調べている。これらのようにゴミ収集に関する研究は多く存在する一方で、それらの多くは、対象とした地域を格子状の道路ネットワークに置き換えて考えている。それらに対し本研究では、実際に存在する道路ネットワークを明示的に示した配送計画問題について考える。具体的にはOpenStreetMap(OSM)⁶⁾を用いて、実際の道路ネットワークを表現する。これにより、より正確な配送時間を最適化モデルに反映させることが可能になり、現実に近い状況を想定したルート計画の設計をすることができる。一方で、実際の道路ネットワークを反映した配送計画問題を考慮した場合、その最適化には膨大な計算時間が必要となる。そこで集合被覆モデルを導入し、ルート計画問題をルート生成問題とルート組み合わせ問題に分割することにより、計算時間の削減を指向する。その際、OSMとDijkstra法の導入により、最適性の精度を保証している点が本研究における新規性である。

3 ゴミ回収における集合被覆モデル

2章で示した配送計画問題を対象とし、計算機による回収ルート計画の最適化を行う。対象問題ではゴミステーションとゴミ回収車は複数存在し、計画全体での回収車が選択するルートの組み合わせは膨大な数になるため、計算時間も膨大になると予想される。そこで、実行可能な複数のルートをあらかじめ生成し、その中から全てのステーションを被覆するルートの選択を最適化する集合被覆モデルとして表す。あらかじめ

生成するルートに最大回収時間を制約条件として設定し、短時間でステーションを回る高品質なルートのみを生成する。高品質なルート集合の中から最適なルートを選択することで計算時間の短縮とゴミ回収にかかるコストの削減を図る。

似たアプローチとして対象問題を集合分割モデルとして表す方法がある。このアプローチでは、ルート選択において計画全体で全てのステーションを1回のみ回るルートが選択される。ゴミ回収サービスでは全てのステーションを1回のみ回るため集合分割モデルとして表現可能であるが、選択可能なルートの組み合わせは少数しか存在しない。一方で集合被覆モデルではステーションを1回のみ回るルートも選択肢に含まれ、集合分割モデルの最適解を含むため、集合分割モデルより高コストな計画は選択されない。同じ候補ルート集合を対象としても選択可能なルートの組み合わせが集合被覆モデルの方が多くなるため、集合分割モデルでは計画を作成できないような候補ルート集合でも、集合被覆モデルでは計画を作成可能である場合がある。また集合分割モデルの最適解より低コストな計画を作成可能な場合もある。集合被覆モデルで得られた計画から、複数回回るステーションを1回のみ回るように計画を修正すれば、実際のゴミ回収サービスにおける実行可能な計画となる。以上の理由により、本研究では集合被覆モデルとしてゴミ回収ルート計画を作成する。

本計画問題における集合被覆モデルはFig. 2のようになる。ゴミステーション集合 \mathcal{L} に含まれる全てのステーションを被覆するように、ルート集合 $R_1, \dots, R_r, \dots, R_N$ から選択する。ルートは、選択するルートにかかるコストの合計が最小になるように選択する。

3.1 ルート選択

ルート選択問題におけるモデルの基本要素、決定変数、目的関数、制約条件を示す。

3.1.1 基本要素

ルート選択における基本要素を示す。

- 定義

- ゴミステーション $i \in \mathcal{L}$
- 候補ルート $r \in \mathcal{R}$

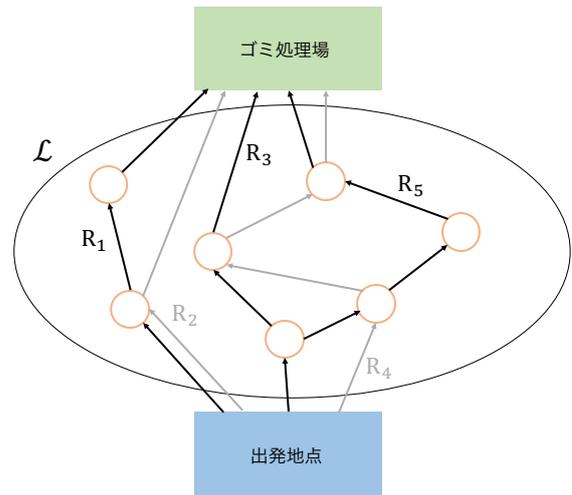


Fig. 2: ゴミ回収ルート計画における集合被覆モデル

- 定数

- ルート r の総回収時間 t_r
- ルート r の総移動距離 d_r
- 回収車台数 Y
- 回収車一台当たりの週間維持管理費 c_c
- 回収車一台当たりの作業員数 m
- 作業員1人当たりの時給 c_m
- ガソリン単価 g
- ステーション i のルート r への割り当て $a_{i,r}$:

$$a_{i,r} = \begin{cases} 1: \text{ルート } r \text{ がステーション } i \text{ を回るとき} \\ 0: \text{そうでないとき} \end{cases}$$

3.1.2 決定変数

決定変数を示す。

- ルート r の採用 y_r :

$$y_r = \begin{cases} 1: \text{ルート } r \text{ を採用するとき} \\ 0: \text{そうでないとき} \end{cases}$$

3.1.3 目的関数

本計画問題の目的はゴミ回収コストの削減である。ゴミ回収コストは1回の計画運用における総コストとし、ゴミ回収にかかる人件費、ゴミ回収車のガソリン代および維持管理費の総和で定義する。計画は一週間に1回運用されるため、維持管理費は一週間当たりとする。

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} t_r c_m m y_r + \sum_{r \in \mathcal{R}} d_r g y_r + c_c Y \rightarrow \text{minimize} \quad (1)$$

各項にかかる係数は以下の数値を用いた。維持管理費は回収車の購入費用と保険料で計算した。

- ガソリン (軽油) 単価 : 16.81 円/km^{7, 8)}
- 作業員 1 人あたりの人件費 : 3833.3 円/h⁷⁾
- 維持管理費 : 13982.85 円/台・週^{7, 9)}

3.1.4 制約条件

制約条件を示す。

ゴミステーションは 1 回以上回収ルートに組み込まれる。

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} a_{i,r} y_r \geq 1, (i \in \mathcal{I}) \quad (2)$$

回収車の台数は Y である。

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} y_r = Y \quad (3)$$

3.2 ルート生成

本研究の対象問題における集合被覆モデルとは、目的関数 (1) 式に従い、候補ルート集合から全てのステーションを 1 回以上回るルートを選択するモデルである。配送計画問題において実行可能な全てのルートを列挙することで最適な回収ルート計画を得ることが可能だが、ステーションは多数存在し実行可能なルート数は膨大な数になる。そのため、本研究では一部の最適解に近いルートのみを生成する。出来るだけ短い時間でステーションを回るルートが最適解に近いと考え、回収車 1 台当たりの最大稼働時間を設定する。また、少数の離れたステーションを回るルートも最適解として考えられるため、ルートに含まれるステーション数はランダムに選択する。

3.2.1 基本要素

ルート生成における基本要素を示す。

- 定義
 - ルート r に含まれるステーション集合 \mathcal{N}_r
 - ルート r で k 番目に回るステーション $v_k \in \mathcal{N}_r$
- 定数
 - 回収車の最大稼働時間 T
 - ステーションでの作業時間 t_s

- ステーション i から $i+1$ までの移動にかかる時間 $t_{i,i+1}$

ステーションでの作業時間は回収車が停止してからゴミの積み込みを開始するまでの準備時間 16.7s⁷⁾ とゴミの積み込み時間の和で定義する。ゴミの積み込みにかかる時間は積み込み速度 0.77kg/s⁷⁾ と回収するゴミの量から計算する。

3.2.2 ルート生成条件

ルートの生成条件を示す。

ルート r にかかる移動時間とステーションでの作業時間が、回収車の最大稼働時間を超えてはならない。

$$\sum_{i \in \mathcal{N}_r} (t_{i,i+1} + t_s) \leq T, (i = 1, \dots, \mathcal{N}_r - 1) \quad (4)$$

3.2.3 ルーレット選択

ルート生成において、最大稼働時間を超えないようにしつつ、同じルートが生成されないようにする必要がある。回収時間を削減しつつ、回るステーションの選択にランダム性を持たせるためルーレット選択によってルートを生成する。ルーレット選択とは、適合度が高い個体を確率的に選択する方法である。ルート生成における適合度が高いステーションとは、選択したステーションからの移動時間が短いステーションを指す。選択したステーションを a とすると、次にステーション b が選ばれる確率 $p_{a,b}$ は以下のように与えられる。移動時間が短いステーションを適合度が高いステーションとするため、 $h_{a,b}$ は (6) 式のように移動時間の逆数とする。

$$p_{a,b} = \frac{h_{a,b}}{\sum_{i \in \mathcal{I}} h_{a,i}} \quad (5)$$

$$h_{a,b} = \frac{1}{t_{a,b}} \quad (6)$$

3.2.4 OpenStreetMap による道路ネットワーク生成

ルート生成において使用する道路ネットワークは OpenStreetMap (OSM) によって作成する。OSM は道路、交通インフラ、土地などの地理データを誰でも自由に利用可能なように、作成・提供するプロジェクトである。このプロジェクトで公開されている地理データはオープンデータベースライセンスの下でデータの

二次利用が可能のため、本研究では OSM を用いて道路ネットワークを表現する。この道路ネットワークによりルート生成を行う。以下に OSM から得られる情報を示す。

node その地点の緯度・経度によって定義される点を示し、バス停・駅の有無、地点名などを属性にもつ。

way 複数の node を順序つきで表現したもので、線状の道路・鉄道・川・建物などを表現している。道路情報には、その道路に含まれる node の順列、一歩通行規制の有無、道路の形態、道路名などを属性に持つ。

relation 2つ以上の node や way で構成され、バスルート・自転車ルート・鉄道線・境界線などを表現する。

本研究では、node と way の情報を使用して道路ネットワークを作成する。node はゴミステーション、ゴミ回収ルートの出発地点および到着地点に対応する。way はステーション間の最短経路を求めるための道路としている。回収車が通行可能な道路は一般道とし、高速道路は使用しない。

3.2.5 優先度付きキュー Dijkstra 法

OSM の地理データにより作成した道路ネットワークを用いてステーション間の最短経路を求める。任意の 2 点間の最短経路を求めるアルゴリズムとして優先度付きキュー Dijkstra 法を用いた。優先度付きキュー Dijkstra 法は、辺の重みが非負のグラフの最短経路を求めるアルゴリズムである Dijkstra 法において、始点からのコストが未確定のノード群を優先度付きキューで管理することにより計算を高速化したアルゴリズムである。以下に優先度付きキュー Dijkstra 法のアルゴリズムを示す。

Fig. 3 は Dijkstra 法における無向グラフの例である。ノードは A~F が存在し、ノードをつなぐエッジの数値は移動にかかるコスト、ノードの数値は出発地点からの総コストである。ノード A を出発地点、ノード F を目的地点とした場合の解法を示す。前提として、出発地点からの総コストが確定していないノードは優先度付きキューに保持されており、その順序は現在保持されている出発地点からの総コストが小さい順である。

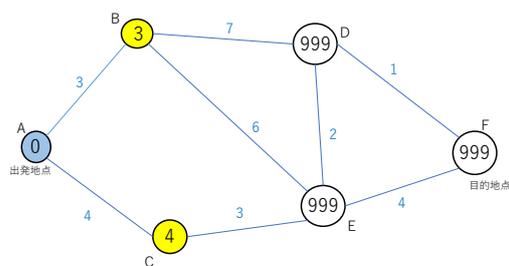


Fig. 3: Dijkstra 法における無向グラフの例

Step1 出発地点のコストを 0、それ以外のノードへのコストを十分大きな値に設定し、全てのノードを優先度付きキューへ挿入する。

Step2 優先度付きキューの先頭に保持されているノードを取り出し、キューから削除する。取り出したノードを X、X に接続している全てのノードを Y とする。

Step3 全ての Y に対して、「Y の出発地点からの総コスト」 > 「X の出発地点からの総コスト」 + 「X から Y へのコスト」であれば Y の出発地点からの総コストを小さい値へ更新する。

Step4 ノード F の出発地点からの総コストが確定するまで、Step2 と Step3 を繰り返す。

Fig. 3 においてノード A、B、C は優先度付きキューから削除された確定済みのノードである。優先度付きキュー Dijkstra 法における「ノード」、「エッジ」、「コスト」は本研究においてそれぞれ「ゴミステーション」、「ステーション間の経路」、「移動距離 (時間)」に対応する。Step1 で出発地点から各ノードへのコストとして設定する十分大きな値として、ここでは 999 という値を使用している。

4 計算機実験

4.1 対象地域

本研究では富山県南砺市を対象として、ゴミ回収の最適化検証を行う。南砺市は 8 地域に分けてゴミ回収サービスを提供しており、回収するゴミの種類は可燃ゴミ、不燃ゴミ、資源ゴミ、プラ容器、紙容器の 5 種類である。本研究では、以下に示すような規模の異なる 3

つの地区を取り上げ、いくつかのゴミ種別を対象として検証を行う。

- 上平地区 (不燃ゴミ) : ステーション 22 箇所, ゴミの量 12.5kg/ステーション
- 城端地区 (可燃ゴミ, 火・金) : ステーション 60 箇所, ゴミの量 91.4kg/ステーション
- 福野地区 (可燃ゴミ, 金) : ステーション 100 箇所, ゴミの量 87.2kg/ステーション

4.2 実験環境

以下に計算時の環境を示す。

- CPU : Intel Core i7 3.7GHz
- メモリ : 16GB
- CPLEX : Ver.12.7.0.0

ルート選択に ILOG CPLEX¹⁰⁾ を使用し, 計算時間が 1 時間を超えた時点で計算を終了する。解の探索の進行度である双対 GAP(g^{DUAL}) は (7) 式で定義される。

$$g^{DUAL} = \frac{f^{UB} - f^{LB}}{f^{LB}} \times 100 \quad (7)$$

4.3 検証結果

以下の項目について検証を行いゴミ回収ルート計画を得た。結果を示す。

4.3.1 候補ルート数を変えた場合

ルート数の異なる候補ルート集合を作成し, 生成ルート数ごとに回収ルート計画を作成する。候補ルート数に対する計画を評価するため, 上平地区のみを対象とする。生成するルート数は 10,000, 30,000, 50,000, 100,000, 300,000, 500,000 とする。生成ルート数毎に得られた計画の運用コストを比較する。ルート生成においてランダム性を考慮し, 10 種類の異なる候補ルート集合を用意し 10 週類の計画を得た。Fig. 4 に得られた計画の総コストの平均値, 最大値, 最小値を示す。全て 1 時間以内に集合被覆モデルによる最適解が得られた。

候補ルート数を増やしていくと配送計画問題における最適解に近づくため, 集合被覆モデルによって得られた計画の総コストは下がる。ルート数 300,000 と 500,000 では最小値がほぼ同じとなったため, 300,000 ルートほ

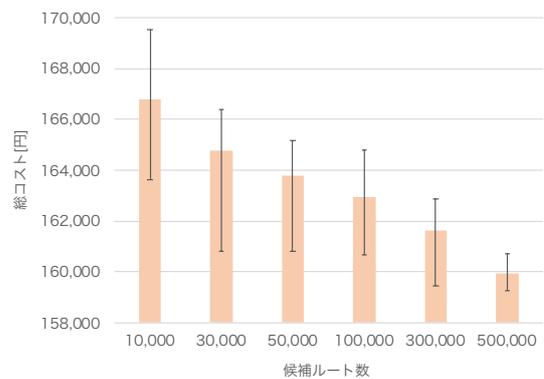


Fig. 4: 候補ルート数ごとの計画の総コスト (上平地区)

ど用意すれば十分最適解に近い結果が得られると言える。一方で最大値に着目すると, 500,000 ルート用意すれば乱数を変えなくても十分低コストな計画が得られる。

4.3.2 車両台数を変えた場合

ゴミ回収ルート計画における回収車台数を変化させた場合の, 計画の運用コストおよび回収車 1 台当たりのコストを比較する。候補ルート数について, 上平および城端地区は 50,000, 福野地区は 30,000 とする。ルート生成においてランダム性を考慮し, 10 種類の異なる候補ルート集合を用意し 10 週類の計画を得た。Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9 に得られた計画の総コスト, Fig. 6, Fig. 8, Fig. 10 に回収車 1 台あたりの収集時間の平均値, 最大値, 最小値を示す。福野地区のみ 1 時間で最適解が得られなかったため, 双対 GAP の最大値と最小値を Table 1 に示す。

回収車の台数を増やすと計画の総コストは高くなる。一方で回収車 1 台あたりの収集時間は短くなるため, 作業者の労働時間に合わせて車両台数を設定することができる。城端地区では回収車の台数を 2 台から 3 台に増やすことで 1 台あたりの回収時間は大きく短縮されている一方で, 計画の運用にかかるコストは上平地区ほど増加しない。福野地区は車両台数を増やすことで回収車 1 台あたりの回収時間は上平地区より大きく改善され, 計画にかかるコストは城端地区より大きい結果が得られた。

4.3.3 ゴミステーションを削減した場合

現在設置されているステーションの一部を削減し, 回収ルート計画を作成する。ステーション数の割合は

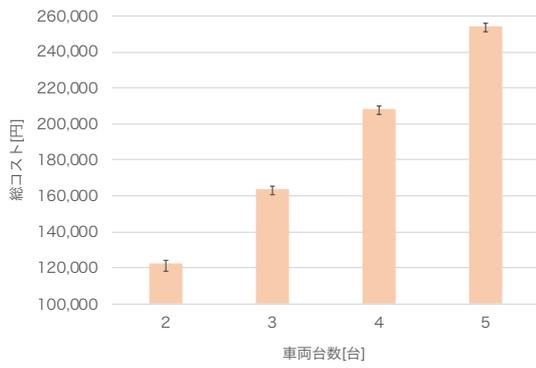


Fig. 5: 車両台数ごとの計画の総コスト (上平地区)

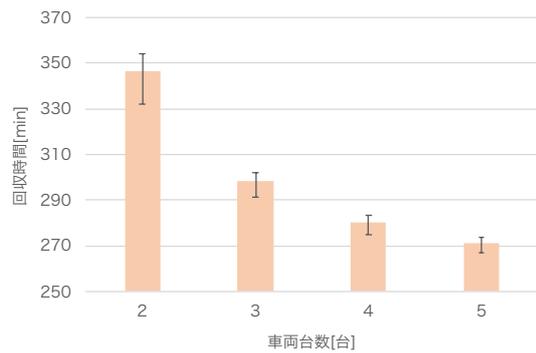


Fig. 6: 回収車 1 台あたりの平均収集時間 (上平地区)

100, 90, 80, 70, 60, 50%とする。削減方法は 3.2.3 節のルーレット選択を用いて、ステーション間の平均移動時間の逆数を削除する確率とする。候補ルート数は、上平および城端地区は 50,000、福野地区は 30,000 とする。削減するステーションを変えてそれぞれ 10 種類の計画を得た。Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 に得られた計画の総コストの平均値、最大値、最小値を示す。福野地区のステーション割合 100, 90, 80, 70%については 1 時間で最適解が得られなかったため、双対 GAP の最大値と最小値を Table 2 に示す。

上平および城端地区においては、10%ステーション

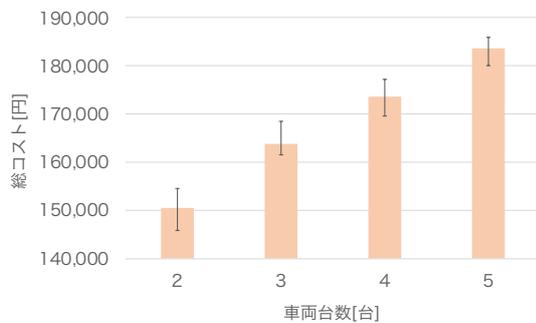


Fig. 7: 車両台数ごとの計画の総コスト (城端地区)

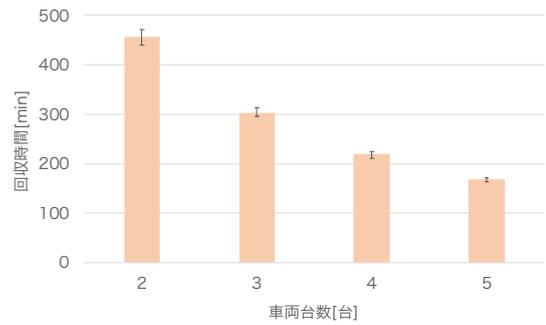


Fig. 8: 回収車 1 台あたりの平均収集時間 (城端地区)

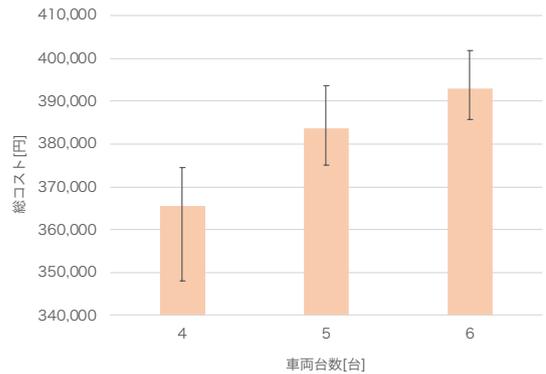


Fig. 9: 車両台数ごとの計画の総コスト (福野地区)

を減らすことによって大きく計画の総コストが削減できた。福野地区では線形的なコストの低下が見られた。上平地区において、計画の総コストの最大値と最小値の幅がステーションを減らすにつれて大きくなっている。このことから、削減するステーションの選び方は計画の総コストの削減量に関わることがわかる。一方で、他のステーションから離れたステーションを削減してしまうと一部の住民の利便性は大きく下がる。コスト削減と住民の利便性の両方を考慮して削減するステーションを選ぶ必要がある。ステーションの削減方

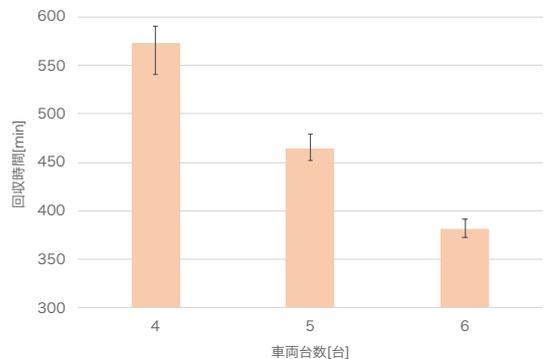


Fig. 10: 回収車 1 台あたりの平均収集時間 (福野地区)

Table 1: 福野地区の双対 GAP

車両台数 [台]	4	5	6
最大双対 GAP [%]	16.52	16.26	12.62
最小双対 GAP [%]	2.5	11.27	7.4

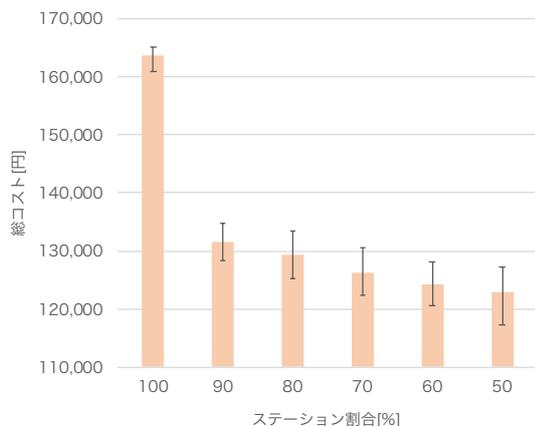


Fig. 11: ステーションの割合ごとの計画の総コスト (上平地区)

法としてルーレット選択を用いているため、ステーション数が多い地区では密集しているステーションのみが廃止され、計画にかかるコストはステーション集合に対してあまり大きく変化しなかったと考えられる。

5 おわりに

本研究では、地理データと集合被覆モデルによりゴミ回収サービスの評価を行った。対象の配送計画を集合被覆モデルで表すことで計算時間を短縮しつつコスト削減が可能であることが示された。一方で、ステーション数が非常に多い地域では集合被覆モデルを用いても計算時間が長くなるため、今後はさらに計算時間が短くなるような手法を検討する。また、他の地区でも同様の検証を行い、本手法の効果を確認する。

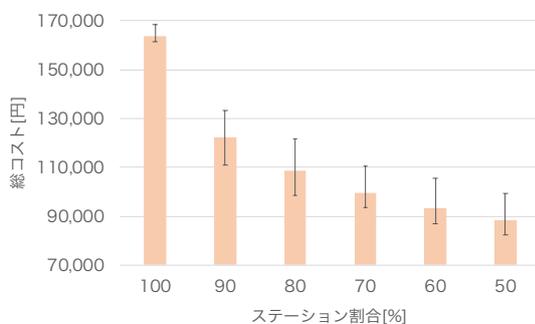


Fig. 12: ステーションの割合ごとの計画の総コスト (城端地区)

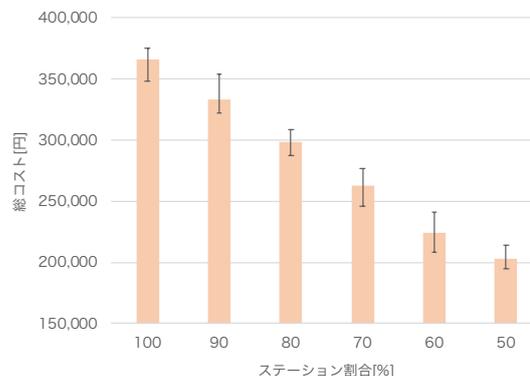


Fig. 13: ステーションの割合ごとの計画の総コスト (福野地区)

Table 2: 福野地区の双対 GAP

ステーション割合 [%]	100	90	80	70
最大双対 GAP [%]	16.52	15.28	9.22	4.52
最小双対 GAP [%]	2.5	4.82	0.01	0.01

参考文献

- 1) 環境省：一般廃棄物処理事業実態調査の結果（平成 29 年度）について，(2019)
- 2) 小泉明，戸塚昌久，稲員とよの，川口士郎：都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル，土木学会論文集，**443 II-18**, 101/107 (1992)
- 3) 乾口雅弘：確率計画問題とファジィ数理計画問題，日本ファジィ学会誌，**4-1**, 21/30 (1992)
- 4) 立花潤三，春名攻：リサイクルを考慮した一般廃棄物処理システム計画に関するモデル分析，土木計画学研究・論文集，**18-1**, 187/194 (2001)
- 5) 奥野麻衣子，御代川貴久夫：路上ゴミ収集の環境負荷のシミュレーション，廃棄物学会論文集，**13-4**, 223/230 (2002)
- 6) OpenStreetMap：<https://www.openstreetmap.org/>, (2020)
- 7) 藤井実，村上進亮，南齋規介，橋本征二，森口祐一，越川敏忠，齋藤聡：家庭系容器包装プラスチックごみの収集と運搬に関する評価モデル，廃棄物学会論文集，**17-5**, 331/341 (2006)
- 8) 藤井実，村上進亮，南齋規介，橋本征二，森口祐一，中村卓也，越川敏忠：家庭系ごみの分別収集に係わる収集車の走行距離・台数等の調査，廃棄物学会論文集，**18-6**, 443/453 (2007)
- 9) 国土交通省：自動車損害賠償責任保険料（共済掛金）表，(2020)
- 10) IBM: ILOG CPLEX Optimizer, <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/>, (2020).