

# マルチエージェントシミュレーションを利用した ごみ収集作業の最適化

吉田彩乃<sup>1</sup> 高橋尚人<sup>1</sup> 福谷遼太<sup>1</sup> 中島秀之<sup>1</sup>

**概要**：地方公共サービスの1つであるごみ収集作業では、近年の少子高齢化に伴う従事者の不足と、人件費などの高騰による経費の増加が課題となっている。我々は、時間・ルートを固定せずに乗合車輛の配車決定を行うためのサービスである SAVS (Smart Access Vehicle System) をごみ収集作業へ応用し、ごみ収集ルートおよび搬送車輛数の最適化を目指している。そのために、本研究では、まず SAVS を用いてマルチエージェントシミュレーションを行い、搬送車輛数及びごみの積み込み時間が各ごみ収集車輛の総走行時間に与える影響を調べた。

**キーワード**：ごみ収集、マルチエージェントシミュレーション

## Optimization of a Refuse Collection by Multi Agent Simulation

AYANO YOSHIDA<sup>†1</sup> NAOTO TAKAHASHI<sup>†1</sup> RYOTA FUKUTANI<sup>†1</sup>  
HIDEYUKI NAKASHIMA<sup>†1</sup>

### 1. はじめに

平成 30 年度における札幌市の総人口は 1,965,940 人であり、家庭から約 379,600 トンのごみが排出されている。札幌市では、共同住宅と戸建住宅が混在しごみステーション（以下、ごみ ST）を共有している地区においてごみ出しマナーをめぐる問題がおきていることから、住戸を 6 戸以上有する共同住宅には敷地内に住居者専用のごみステーションを設置することを定めている[1]。この影響もあり毎年約 2,000 箇所のごみ ST が増設されており、平成 29 年度の市内ごみ ST 数は 51,234 箇所であった[2]。

札幌市のごみ収集車輛数は予備車輛も含めて直営 71 台、委託 201 台の計 272 台である。委託費は約 37 億円（平成 30 年度実績）で、年々増加しており、残業時間は約 9,000 時間に及ぶ。しかし、委託事業所では従業員等の不足により新たなごみ収集車輛の増車は難しく、これらの残業時間等の解決のためにはごみ収集作業の効率化が必要だと考えられる。

我々は、時間・ルートを固定せずに乗合車輛の配車決定を行うためのサービスである SAVS (Smart Access Vehicle System) をごみ収集作業へ応用し、ごみ収集ルートおよび搬送車輛数の最適化を目指している。以下では、搬送車輛数およびごみの積み込み時間が各ごみ収集車輛の走行時間に与える影響のマルチエージェントシミュレーションの結果を報告する。

### 2. 札幌市でのごみ収集車の走行ルール

札幌市におけるごみ収集車の 1 日の基本的な走行ルールは次の通りである。まず、各車輛は各事業所から出発し、各清掃事務所が定めたエリアのごみ ST を順次周ってごみを収集する。この時、札幌市は委託事業者が各車輛の収集地域と搬送先を指定しているが、収集ルートは委託事業者に一任しており、委託事業者の運転手が自身の経験に基づいて決定している。満積載状態になった時などは、適宜ごみ処理施設へ向かい、施設にて積載量を計測した上で荷下ろしを行う。荷下ろしを終えたら再び担当エリアへ向かい、未収集のごみ ST のごみを収集する。なお、各車輛は休憩のために適宜事業所へ戻る。そして、全てのごみ ST のごみを収集し、処理施設で荷下ろしを終えた後、各事業所へ戻る。

### 3. ごみ収集ルートおよび車輛数の最適化

ごみ収集業を最適化する上でのポイントとして、作業員の収集方法、収集ルートなど様々な点が考えられるが、本研究では、収集ルートと車輛数に着目した。ごみ ST を巡回セールスマン問題に見立てたり、遺伝的アルゴリズム等を用いてごみ収集ルートを最適化する研究[3][4][5]が行われている。筆者らは、ごみ収集ルートを最適化するだけでなく、収集対象のごみ量が多く予期せずに満積載になってしまった後でも、その後の収集ルートをリアルタイムで再計算できるシステムの開発を目指している。そこで、SAVS

<sup>1</sup> 札幌市立大学  
Sapporo City University

をゴミ収集作業へ応用することを目指し、本研究ではそのための基礎調査をシミュレーションによって行なった。

### 3.1 Smart Access Vehicle System

SAVS は中島らが提案したフルデマンド型公共交通であり、実証実験において複数台リアルタイム完全自動配車に成功している[6]。その特徴の1つに多数のデマンドが発生してもリアルタイムの配車計算が可能であることが挙げられる。SAVS では以下の流れで配車される[7]。①利用希望者が乗降車希望時刻、乗降車位置、乗車人数を指定して配車リクエスト、②サーバが最適な車種を選択、③車種にルートを指示（すでにデマンドを保持している場合は新しいルートを指示）、④利用者に乗車予定時刻と目的地到着予定時刻を伝える。オペレーターを介さずに上記の処理を自動で行う。

SAVS では逐次最適挿入法[8]を用いて最適な車種探索が行われている。新たにデマンドが発生した場合、各車種はデマンドの乗降車地点を現在保持している経由地点リストの任意の箇所に挿入し、全経由地点において挿入により生じる遅延の総和を、挿入前の達成予定時刻と比較し、計算する。これを基に新たなデマンドの達成予定時刻（目的地到着時刻）を求め、この達成予定時刻と遅延の総和を挿入後のコストとする。各車種間での準最適解を求めるため、車種間での乗客の交換や一旦車種に割り当てられた乗降地点の前後関係は変更されない。また、乗客の指定した到着予想締め切り時刻をオーバーする場合には、デマンドの割り当てを行わない[9]。

## 4. シミュレーション方法

### 4.1 乗車リクエスト

本研究では、SAVS における乗客を各ゴミ ST でのゴミに置き換えることで、乗客が持つ各パラメータを以下のように設定した。乗客の乗車位置を各ゴミ ST 位置、降車位置をゴミ処理施設の位置とした。ゴミ収集では、通常 SAVS で扱うデマンドと異なり、総デマンド数、乗車希望時刻、降車希望時刻等は事前に決定されており、乗客数に相当する各ゴミ ST のゴミ量だけが変化する。

### 4.2 シミュレーション環境

オープンソースであることと、外部連携用の API も用意されているなどの利活用の容易さ、加えて、デフォルトとして交差点での右左折時の減速や停止地点に近づくとき徐々に減速して停止するといったことがある程度実現されていることなどから、交通シミュレーターとして交通系物理シミュレーター SUMO (Simulation of Urban MObility) を使用した。

#### (1) 道路ネットワーク

シミュレーションで使用する道路ネットワークを SUMO の NETGENERATE 用いて作成した (図 1)。ネット

ワークの形状はランダムとし車線数も 1 または 2 のどちらかをランダムで設定した。また、左側通行とした。道路の総延長を札幌市中央区の総延長の約半分となる約 200 キロメートルに設定した。各交差点には信号を配置した。ネットワーク上に事業所に見立てた全車種の出発地点と、ゴミ処理施設に見立てたゴールを設けた。各車種は図 2 のスタートから出発し、ネットワーク上のランダムな地点に設けられたゴミ ST でゴミを収集し、最終的にゴールに向かう。

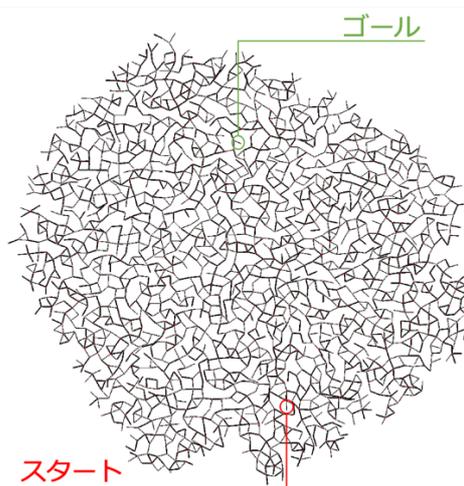


図 1 道路ネットワーク

### 4.3 シミュレーション条件

ネットワーク上のランダムな場所でデマンドを発生させた。ゴミ収集開始時刻に全てのごみ ST から一斉にリクエストが発生するように設定した。シミュレーション時間（ゴール地点到着までの制限時間）は、朝 8 時 30 分から 12 時までを想定し、3 時間 30 分とした。各ゴミ ST で発生したデマンドをコストが低くなるよう各車種に分配し、全デマンドがどれかの車種に分配された後、各車種はシステムが提示した順番でゴミ収集へ向かうように設定した。配車決定のための評価関数では SAVS と同様に、デマンド達成予定時刻と遅延の総和をコストとして算出した。加えて、各車種間での準最適解を求めるものとし、各車種間で一旦割り当てられたゴミ ST の交換や収集の順番の前後関係は変更されないことにした。

車種数は 5, 10, 20, 30 の 4 種類とし、ゴミ ST 数は、10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500 の 10 種類とした。車種の平均走行速度は時速 50 キロメートルに設定した。各車種の最大積載可能容量と各ゴミ ST で収集されるゴミ量はそれぞれ 1,500 キログラムと 10 キログラムであった。シミュレーション回数は条件ごとに 3 回とした。

実際のごみ収集作業では、ゴミ ST ごとにごみを車種へ積み込むための時間と、ゴミ処理施設での待ち時間がかかる。そのため、積み込み時間を 5 分、ゴミ処理施設での待ち時間を 1 時間とした場合のシミュレーションも行なった。

この時の車輛数は10台とし、ごみST数は100, 200, 300, 400, 500の5種類とした。車輛の平均走行速度と最大積載可能容量はそれらを設定しない場合と同様の時速50キロメートルと1,500キログラムとした。シミュレーション回数も同様に3回とした。

## 5. シミュレーション結果

車輛数・ごみST数の全ての条件において、積み込み時間・待ち時間の有無に関係なく、時間内に全ごみSTのごみを収集できた。

### 5.1 平均走行時間

各車輛数における積み込み時間・待ち時間なしの時の平均走行時間を図2に示した。全ての車輛数において、ごみST数が車輛数よりも多い時は、ごみST数の増加に伴い、走行時間も長くなった。20台と30台の間には、その他の台数の時に比べ走行時間に大きな差は見られなかった。積み込み時間・待ち時間ありの時の平均走行時間を図3に示す。ごみSTが500箇所の時には、なしの場合に比べてありの場合の方は走行時間が約4倍長かった。

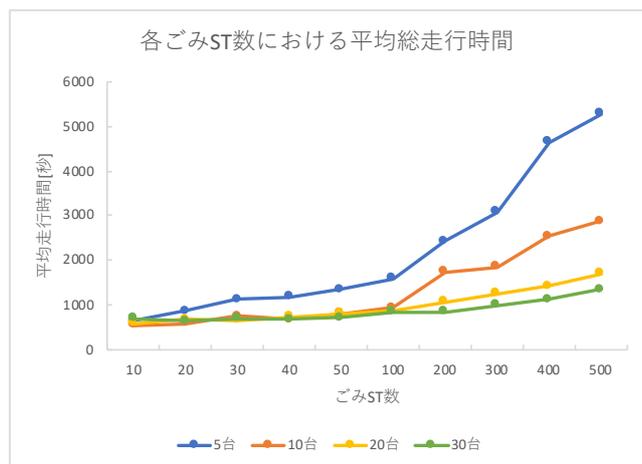


図2 車輛の平均走行時間

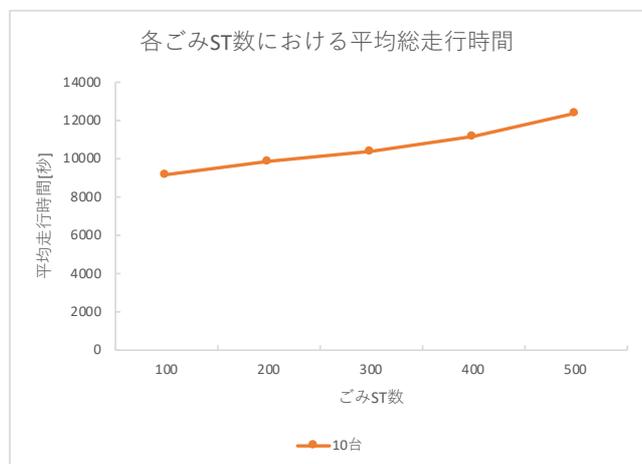


図3 車輛の平均走行時間

### 5.2 平均デマンド処理数

積み込み時間・待ち時間なしの場合の各車輛数における平均デマンド処理数を図4~図7に示した。車輛数が増えるにつれて、デマンド処理数の最大値と最小値の差が大きくなった。最大値と最小値の差が小さい方が車輛をより有効活用できていると考えられる。そのため、今回のシミュレーションにおいて、ごみSTが500箇所の場合、5台が最も効率の良い台数だと考えられるが、作業時間を追加した場合には、10台でも全ごみSTを廻るのに制限時間ぎりぎりまでかかった(図3)。そのため、本シミュレーション条件下では、10台から20台の間で車輛数を設定することが適切だと考えられる。

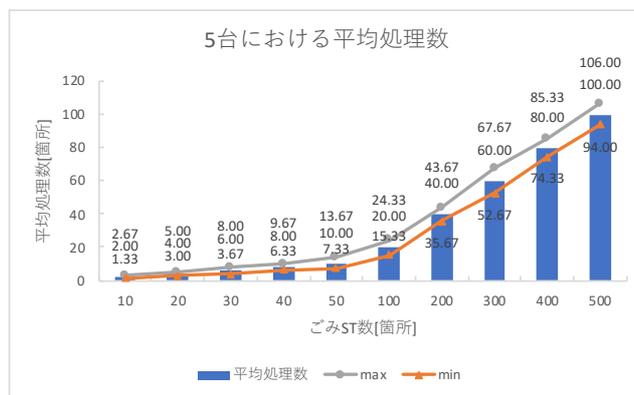


図4 デマンド平均処理数(車輛数:5台)

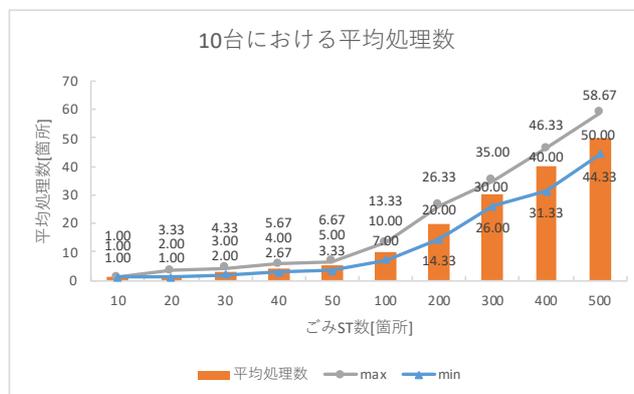


図5 デマンド平均処理数(車輛数:10台)

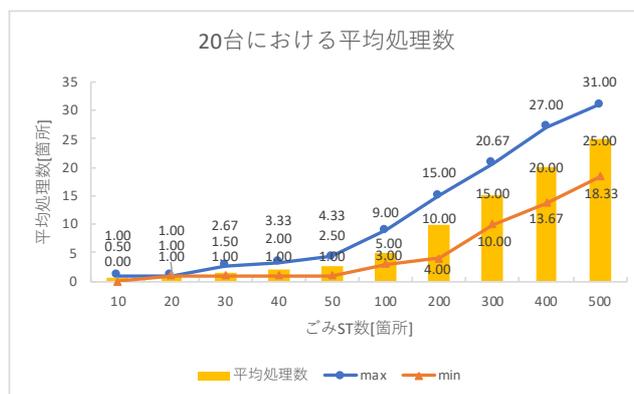


図6 デマンド平均処理数(車輛数:20台)

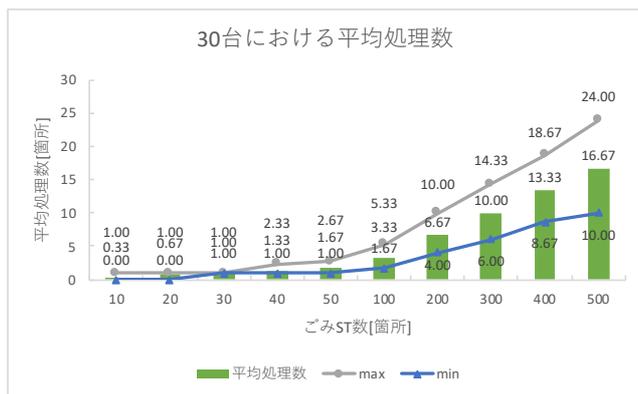


図 7 デマンド平均処理数 (車輦数: 30 台)

## 6. ごみ収集ルート最適化への応用

上記の結果より, SAVS の配車アルゴリズムをごみ収集作業の最適化に利用できると考えられる. しかし, ごみ収集作業では, その日のうちに全てのごみ ST のごみを収集できればよく, SAVS の様に乗客の待ち時間等を考慮する必要がない. そのため, 車輦を決めるための評価関数では, 各経由地点の遅延時間を考慮する必要がないと考えられる. 図 8 に積み込み時間・待ち時間ありの時のデマンドの平均処理数を示した. 最大値と最小値の差が大きく, 例えばごみ ST が 400 箇所の場合, 75 箇所のデマンドを処理している車輦がある一方, 1 箇所しか処理していない車輦もあった. 今回のシミュレーションでは各車輦が満積載にならない様に各ごみ ST のごみ量を設定していたが, 多くのデマンドを処理する車輦が満積載になるようになれば, 結果が変わる可能性はある. しかし, 車輦の有効活用の点では, 車輦間のデマンド処理数に差はない方が好ましいと考えられるため, 評価関数を変更し, そのための指標を含む必要がある.

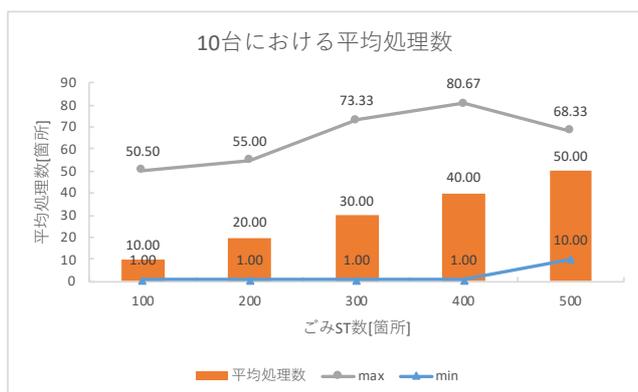


図 8 デマンド平均処理数 (車輦数: 10 台, 積み込み時間・待ち時間あり)

また, ごみ収集作業では, その日に発生するデマンドの総数や発生時刻, 目的地到着希望時刻は事前に決定している. リアルタイムでの再計算のためには, 計算速度の高速

化のために, 一度割り当てられたデマンドの車輦の移動や前後を入れ替ええない等の条件は必要となる可能性もある. しかし, 最初の割り当てを決める時には, それらを固定しておく必要はないため, 最初の配車決定時と再計算時で車輦の決定条件の変更も考慮する必要がある.

## 7. まとめ

ごみ収集ルートを最適化するだけでなく, 収集対象のごみ量が多く予期せずに満積載になってしまった後でも, その後の収集ルートを実タイムで再計算し最適化できるシステムの開発を目指し, そのために SAVS の配車アルゴリズムが応用可能かシミュレーションによって調べた. その結果, ごみ収集を想定したデマンドを全て車輦に割り当てることができた. しかし, 車輦数やデマンド数によっては, 各車輦での処理数に差があった. 車輦の有効活用の点では, 車輦間の処理デマンド数の差は小さい方がより有効活用できていると考えられる. そのため, 評価関数を変更する必要があると考えられる.

加えて, ごみ収集作業では, SAVS と違い, ある特定の日のデマンドの総数及び発生時刻, 到着希望時刻は事前に決定している. そのため, より最適な配車計算のためには, 最初の配車計算時には, SAVS にあるような車輦の決定条件を考慮する必要はないと考えられる. 最初の配車計算と高速な計算が要求される再計算時とで, 車輦の決定条件を変更することも考慮する必要がある.

## 参考文献

- [1] “ごみステーションの設置及び清掃保持等に関する要綱”. [https://www.city.sapporo.jp/seiso/gomi/st\\_yoko/st\\_yoko.html#riyusetaisuukijun](https://www.city.sapporo.jp/seiso/gomi/st_yoko/st_yoko.html#riyusetaisuukijun), (参照 2020-02-11).
- [2] “清掃事業概要”. <https://www.city.sapporo.jp/seiso/seisozigyogaiyo.html>, (参照 2020-02-11).
- [3] 高桜洋, 大山達雄. ネットワークモデルによる都市ごみ収集輸送システムの最適化. オペレーションズリサーチ, 1994, vol. 12, p. 653-658.
- [4] 中川子敬至. ゴミ・ステーションを巡回する収集車の経路問題. オペレーションズリサーチ: 経営の科学, 2002, vol. 47, no. 11, p. 737-742.
- [5] 藤野和徳. 遺伝的アルゴリズムによるごみ収集輸送計画. 土木学会論文集, 1997, vol. 558, p. 139-146.
- [6] 中島秀之, 小柴等, 佐野渉二, 白石陽. Smart Access Vehicle システムの実装. DICOMO 2014, 2014, p. 1760-1766.
- [7] 中島秀之, 松原仁, 平田圭二, 鈴木恵二, 田柳恵美子, 金森亮, 野田五十樹, 佐野渉二, 落合純一, 松館渉. 地域交通の未来像としてのスマートアクセスビークルサービス. 人工知能学会全国大会論文集, 2018, vol. JSAI, p. 1-4.
- [8] 野田五十樹, 篠田孝裕, 太田正幸, 中島秀之. シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価. 情報処理学会論文集, 2008, vol. 49, no. 1, p. 242-252.
- [9] 中島秀之, 野田五十樹, 松原仁, 平田圭二, 田柳恵美子, 白石陽, 佐野渉二, 小柴等, 金森亮. バスとタクシーを融合した新しい公共交通サービスの概念とシステムの実装. 土木計画学研究・論文集, 2015, vol. 71, no. 5, p. 1\_875-1\_888.