

収集車両の経路ログデータを用いた 各ごみステーションのごみ収集量推計による 収集運搬計画提案ツールの開発

牧 誠也¹・藤井 実²・村崎 充弘³・太田垣 貴啓⁴・眞鍋 和俊⁴

¹正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

E-mail: maki.seiya@nies.go.jp

²正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

³非会員 応用地質株式会社 経営企画本部(〒101-8486 東京都千代田区神田美土代町 7 番)

⁴非会員 応用地質株式会社 地球環境事業部(〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘 43)

我が国の GHG 排出量の約 3% を占める廃棄物処理分野のさらなる脱炭素化, 国内全体の労働力人口減少に伴う一般廃棄物処理, 特に収集運搬の効率化が課題となっている. 近年では, IoT 及び AI 等の活用によって廃棄物処理計画の効率化による脱炭素化が期待されている. 本研究では松山市を対象に収集運搬車にデジタルログと呼ばれる IoT 装置の一種を設置し, 収集運搬車の運航データを観測した. また, 観測したデータ, 車両後部のカメラ画像データ, 対象日の廃棄物収集運搬記録をもとに, 各ステーション単位での廃棄物収集量の推計を行う計算システムを開発した. 計算結果をもとに収集運搬方法・組み合わせの変更による二酸化炭素排出量の削減方法を提案した.

Key Words: IoT, Waste collection and transportation, Waste management, GIS, decarbonization planning

1. 背景・目的

我が国全体の GHG 排出量の約 3% を占める¹⁾廃棄物処理分野のさらなる脱炭素化が求められている. また, 国内全体の労働力人口が減少する中で, 多くの市区町村で一般廃棄物処理の担い手不足等が課題となっている. 平成 30 年に第 4 次循環型社会形成推進基本計画²⁾が策定され, 担い手不足の解消を中心に IoT 及び AI 等の活用による集中管理・効率化での脱炭素化が期待されている.

過去の研究では, アメリカでの収集運搬を対象とし, 各戸収集における収集作業を時間や車両速度から関数化し, 収集車両の運用をコストやサービスの面から評価を行った Quon et al.³⁾, Truitt et al.⁴⁾, Quon et al.⁵⁾による一連の先駆的な研究が存在する. 国内では, 松藤ら⁶⁾によってステーション方式における収集作業の評価及び判断アルゴリズムを構築し, 収集ブロック再構築の検討を行った. これら国内外の先駆的な研究があるものの, その情報は古く, また, 当時の計算機能力の問題もあり, 地図上で表記できるようにはなっていない.

地理情報を用いて収集運搬を扱った研究には, 田畑ら

⁷⁾による愛知県を対象に廃棄物発生空間分布の把握, 再資源化施設までに輸送するための収集・輸送領域をエネルギー消費量が最小になるような施設配置を検討した研究, 牧ら⁸⁾による愛知県を対象に既存のグリッドシティモデルに地域特性等を含めかつ広域適用可能で, 簡易に計算可能な収集運搬モデルへと改良し, 二酸化炭素(以下, CO₂)排出量やコスト等に言及した研究がある. ただし, これらは県レベルのマクロな範囲を対象し, 基礎自治体が行う収集運搬実態を反映できていないと言いがたい. 海外の事例として, Hannan et al.⁹⁾などによって収集運搬分野における最適化やモデリング, ICT/IoT 活用などの事例研究がレビューされている. これらから, 基礎自治体規模でのごみの収集運搬では理論上の最適化・最適配置を検討する研究は多く存在し, 廃棄物の発生実態を把握しようと試みた研究についても存在する.

ただし, 一般廃棄物のような多量に発生する廃棄物を対象に, その発生実態を把握し, 自治体や実務者の収集運搬計画に活用できる簡易な方法を用いて計画提案まで焦点に向けた研究は多くない. 特に, 自治体や業務委託

者が計画を採用することから、理解・比較のしやすい提案が可能なツールの開発が重要である。

このような状況から、本研究では収集車両に車両の運行状況を逐次把握することを目的にデジタコグラフを設置し、ごみステーションの立地から各車両が収集したごみの量がどこで収集されたかを推定する計算モデルを開発し、自治体で行われている収集運搬の見える化ツールを開発した。また、開発したツールの結果を用い、CO₂排出量削減シナリオを複数の異なる方法を提案を行った。

2. 研究方法

本研究では、対象の自治体もしくは委託業者の資産となる収集車にセンサーの取り付けを実施することから、センサー設置に協力が得られる自治体を対象とした。その中で、複数台の収集車両へのセンサー設置を行うことができ、各収集車における処理場への収集運搬量を提供いただいた松山市を対象とした。

(1) 研究対象地

a) 松山市の特徴

松山市は愛媛県の県庁所在地であり、図-1のように四国の瀬戸内海側に位置する。人口は約50万人で中核都市に分類され、人口密度は約1190人/km²¹⁰⁾である。



図-1 四国における松山市の位置

b) 松山市のごみ収集方式

松山市では収集所ではステーション方式によるごみ収集を行っている。ステーション方式とは処理地区内の複数の世帯から発生したごみを1か所のステーションと呼ばれる集積所に集め、このステーションに集積されたごみを収集運搬する方式である。

(2) センサーの設置

本研究では収集車両のうち、12台に矢崎エナジーシステム株式会社製のデジタコグラフ¹⁰⁾を収集車両に設置することで運行状況のセンシングを行った。以後では、各車両をNo.1～12と定義し、分析を実施した。表-1はデジタコグラフを設置した各車両について、収集運搬記録によって収集運搬量データの取得できた期間及び周回

数を示したものである。収集運搬記録の取得ができなかったため、No.12では9月の処理場への収集運搬記録が欠測していた。

表-1 観測期間と収集運搬データの期間及び周回数¹²⁾

車両番号	観測期間	収集運搬データの取得期間	収集運搬周回数
No.1	2020年 9月1日～	9月1日-11月30日	195
No.2		9月1日-10月31日	131
No.3		9月1日-10月31日	131
No.4		9月1日-10月31日	116
No.5		9月1日-10月31日	137
No.6		9月1日-10月31日	134
No.7		9月1日-10月31日	138
No.8		9月1日-10月31日	138
No.9		9月1日-10月31日	141
No.10		9月1日-10月31日	128
No.11		9月1日-10月31日	138
No.12		10月1日-11月30日	132

デジタコグラフとはデジタル形式の回転速度計で、自動車を対象とする走行位置、車速加速度、走行距離などを逐次的に計る計器である。デジタコグラフでは0.5秒間隔でデータを観測し、観測地点の緯度・経度、速度[km/h]、前回計測地点からの移動距離[m]、総移動距離[m]などを取得でき、速度[km/h]、前回計測地点からの移動距離[m]、総移動距離[m]は整数値である。

(3) 収集量推定に用いるデータ

本研究では、デジタコグラフのデータ(以降、経路ログデータ)のほか、ステーションの位置、処理施設・業務事務所の位置及び2020年9月から11月の処理場への搬入量記録の提供を受け、これらを分析に用いた。

処理場への搬入量記録では1車両が1日に複数回処理場に搬入を行うことが確認された。1車両が処理場に搬入を行うまでの経路を「1周」と定義し、1周ごとに搬入が記録された時間で経路ログデータを分割して以後の分析を行った。ステーション位置として主に収集運搬を行う地域内の1343か所のごみステーションデータの提供を受けた¹²⁾。ただし、委託先事業所の担当地域データを紙ベースで提供を受けたことで、全てのステーションが取得できていないことから、ステーション位置の情報収集は今後の課題である。

(4) 経路ログデータによる収集量推定モデル¹²⁾

a) 各ステーションの収集量の推定モデル

本研究では、松藤ら⁹⁾の研究をもとに、各ステーションでの収集量は以下の式(1)のようにあらわされ、収集量は停止時間数の合計に比例するものと仮定した。

$$q_{Ti} = \alpha \frac{\sum_j s_{Tij}}{2} \quad (1)$$

ここで q_i^T はT周目のステーション*i*における収集推定量[kg]を表し、 α は時間当たりの収集量の係数[kg/s]、 s_{ij}^T はT周目のステーション*i*から一定距離内存在するログデータを1~*j*と番号付けし、各番号*j*に車両が停止しているか移動しているかを0もしくは1で表すダミー変数である。式(1)における係数の2はセンサーの観測間隔が0.5秒であり、1秒当たりに変換するための係数である。

松藤ら⁹⁾の研究にあるように、ステーションでの収集作業には一定時間の準備作業・発進作業にかかる作業時間が必要となる。ただし、収集運搬作業の中でステーション付近の待機時間は、ごみの積込み作業と仮定し、各ステーションの収集量は時間に比例するものとした。

b) 経路ログデータによる収集量の推定

図-4は計測された経路ログデータをもとに各ステーションの収集量を推計するアルゴリズムを表すものである。本研究ではESRI社 Arc GIS ver 10.7の Model moduleを用いて ArcToolBoxの Buffering と Clipを用いて自動計算システム構築した。停止時間を求める際に求める際にはステーションから一定距離D内の経路ログデータを対象にダミー変数 s_{Tij} の総和数を求めることで収集量の推計を行う。本研究では経路ログデータが道路網と必ずしも一致しないことから一定距離Dを大きく設定し、20mとした。

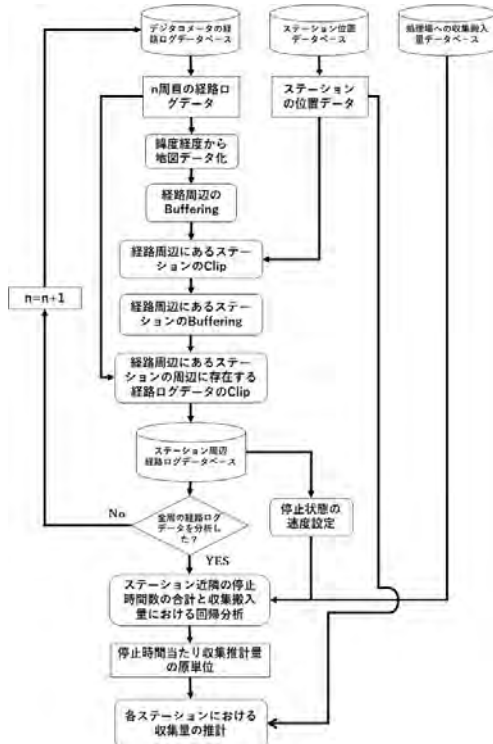


図-4 各ステーションの収集量推計アルゴリズム

(5) 収集量推定モデルのキャリブレーション

式(1)に記載したように収集推定量はステーションでの停止時間によって推計を行う。ただし、収集運搬量は処理場への搬入量記録として観測されるため、各ステーションでの収集量から時間当たりの収集量の係数 α を求めることはできない。そのため、図-4に記載したように、T周目の収集推定量 q_{Ti} の合計とT周目の処理場への搬入量記録 Q_T を比較した式(2)となる係数 α を求めた。

$$Q_T = \sum_i q_{Ti} \quad (2)$$

式(2)を満たす係数 α を求める際の変数パラメータは切片のない回帰分析を実施する必要がある。ダミー変数 s_{Tij} は停止状態か否かを表すもので、本研究のデジタコグラフでは速度[km/h]もしくは前回計測地点からの移動距離[m]を用いて定義することができると考えられる。岸野ら¹⁰⁾による既往研究では収集作業を10km/h以下の時間数としたことを考慮し、本研究では、5km/hから20km/hまで5km/h刻みの4区分で分析を実施した。以上から、ダミー変数 s_{Tij} は停止状態か否かを表す速度の設定から4パターンの線形回帰分析を実施し、決定係数から適切なモデルを採用するものとした。

また、停止状態にあるデータが Buffer 内に存在するステーションを停止するステーションと定義し、停止時間数の合計と停止したステーション数を説明変数とする切片なし重回帰分析を行うことでステーションでの準備行動の影響についても検討を行った。

(6) 収集量推定の見える化・CO₂排出量削減案の提案

本研究の成果によって、各ステーションでの収集推定量を見える化したマップを用い、松山市の収集運搬のCO₂削減案として、自治体や事業者に理解しやすい以下3つの異なる方式による収集運搬計画の提案を実施した。

1. 1日に複数周運搬を行う1車両での1日の収集運搬でのCO₂削減案
2. 複数車両における1日の収集運搬でのCO₂削減案
3. 1週間ごとの各車両データ1週間の収集運搬でのCO₂削減案

これら以外の効率化は今後の研究課題である。

3. 結果および考察

(1) 計測された経路ログデータの概要

図-5はある車両のある1周分の経路ログデータを表したものである。事務所を出発し、市中のステーションを巡回して処理場に運搬を行う。1週の収集量は平均1t程度で、最大で3t程度であった。また、平日には午前2回、午後1回の収集されることが多く、収集を行う距離は午後のほうが午前に比べて長くなる場合が多かった。



図-5 ある車両のある1周分の経路ログデータ

(2) 収集量推定モデルのキャリブレーション結果

図-6は停止状態を表すダミー変数 S_{Tij} を5km, 10km, 15km, 20kmとした場合の回帰分析によるキャリブレーションを行った結果である。

この結果から、停止状態を表すダミー変数 S_{Tij} を5kmとした場合が最も高い決定係数(切片あり $R^2=0.3871$)となった。図-6の結果から、本研究で用いた0.5秒間隔のデジタログラフの精度では停止状態とみなす速度を小さくするほど精度が高くなるが、20km程度まで結果には大きく影響を与えず、位置情報の変化量から廃棄物収集量の推計が可能だと考えられる。また、停止時間と収集量は完全には一致しないものの、停止時間の増加によって収集量が増加する傾向は確認された。

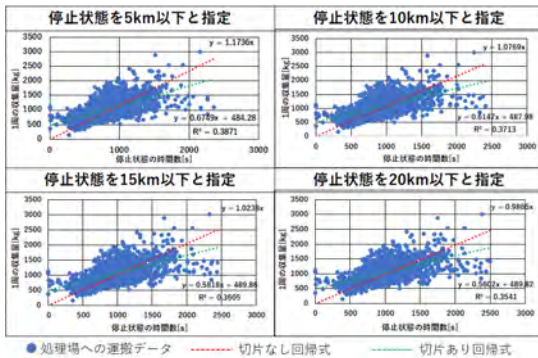


図-6 停止状態ごとの回帰分析結果

停止ステーション数は通常50以下で停止時間が増えるほどその数も増える傾向があるが、2周分のみ80を超え異常値とみなせるデータが存在した。この2つの経路ログデータを除いて、停止時間数の合計と停止したステーション数を変数とする切片なし重回帰を実施した。その結果、停止したステーション数のp値は0.226と有意性は確認できなかった。

以下、本研究では簡易な計画支援を行えるようにするため、切片なし回帰式を採用し、各ステーションの収集量を速度5km以下の状態数[0.5s]÷2×1.17[kg/s]として各ステーションの廃棄物収集量を推計した。

(3) 収集量推計結果とCO₂排出削減案の提案

1周における収集量の最大値は3tほどであったが、本研究の方法で求められる推計値には推定誤差が生じるため、最大積載量を3tと考えて計画を提案することは難しい。ただし、現在の平均値である1t程度から2t程度まで平均積載量を増加させることは可能と考えられ、そのような運用を行うことで処理場への移動距離を削減し、収集車両の燃料消費を削減することでCO₂排出量の削減を行うことが可能だと考えられる。

a) 1日に複数周運搬を行う1車両での1日の収集量の推計結果とCO₂排出削減案

図-7は収集車両No.1の10月1日における収集推計量を地図上に見える化したものである。10月1日は平日であるため、3周収集運搬を実施し、処理場への平均収集運搬量は約760kgであった。

図-7内の赤枠のエリアは3周のうち、どの周であっても収集作業を行っているとして推計された。そのため、このエリアで午前実施される1周目と2周目を一度に実施することで、車両の燃料消費を抑え、CO₂排出量の削減につなげられると考えられる。このような1日の中で複数周回する際に同じエリアのごみを収集運搬している傾向は他の車両でも確認された。

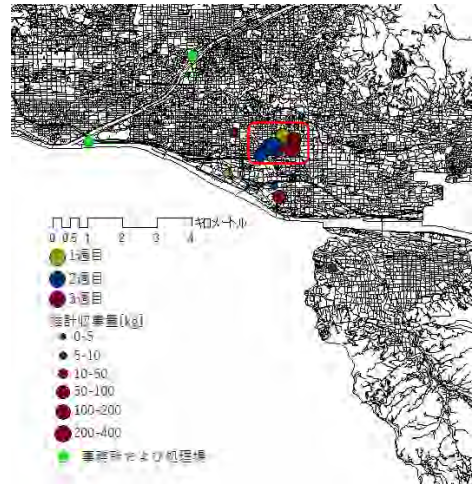


図-7 収集車両No.1の10月1日における収集推計量

b) 複数車両における1日の収集量の推計結果とCO₂排出削減案

図-8は全収集車両の10月1日における収集推計量を地図上に見える化したものである。全収集車両が3周収集運搬を実施した。1周分の車両の積載量は1tを下回る程度であった。車両番号によって収集を行うステーションは異なるが、1台の車両がごみの収集を行う箇所は図-8で見えるようにある程度決まったエリアを中心に行われている傾向が確認された。

CO₂排出量の削減策として、No.9の1周目の近隣に

No.3やNo.6の2周目、3周目の収集地点が存在する。そのため、No.3やNo.6の2周目、3周目のステーションの一部をNo.9の1周目に積載し、周回数を減らす方法が考えられる。このような方法で、積載量とエリアの組み合わせを行うことで全体での車両の周回数を減らし、CO₂排出量を削減可能と考えられる。

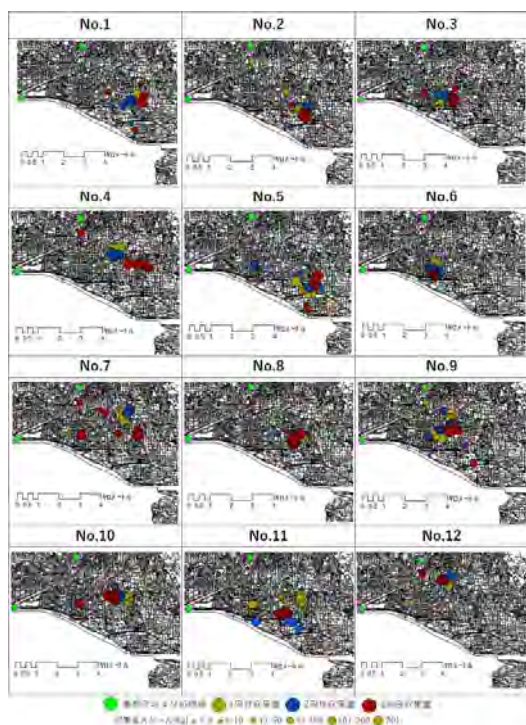


図-8 全収集車両の10月1日における収集推計量

c) 1週間ごとの各車両データ 1週間の収集運搬での収集量の推計結果とCO₂排出削減案

すべての車両の収集運搬記録のデータが存在し、祝日を挟まない期間として10月19日から24日の6日間を対象とした。図-9は10月19日から24日までの6日間の全収集車両の収集量を日毎に地図上で見える化したものである。この結果から、月曜日と木曜日、火曜日と金曜日、水曜日と土曜日は似たエリアを収集していた。特に、市南東部は水曜日と土曜日のみ収集がなされ、他の曜日に収集は行われていない。このことから、収集事務所で3パターンの収集計画が行われ、週に2回この収集計画に基づいた作業が実施されていると考えられる。

週単位でのCO₂排出量の削減策として、曜日による収集範囲の近似性から、月曜日・火曜日の収集エリアを広げることで水曜日を土曜日と同様に1周で収集を完了する方法が考えられる。月曜日と火曜日及び木曜日と金曜日では収集が実施されるステーションに重なる箇所があるため、ごみの発生が多いエリアと考えられる。このエリアにおいて、日曜日を挟む月曜日と火曜日のほうが木

曜日と金曜日の組み合わせに比べて収集量が多くなるように思われるが、平日の1週の積載量は平均1t程度で最大積載量を下回ることから日曜日を挟む収集量増加効果が仮にある場合でもこのような方法によるCO₂削減法は可能であろうと考えられる。

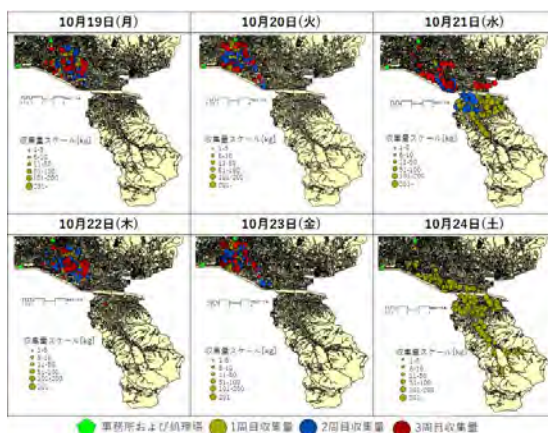


図-9 10月19日～24日までの全収集車両の収集量

4. まとめ

本研究では、ごみの収集運搬時におけるCO₂排出量の削減を検討するため、松山市の収集運搬車両を対象にデジタルログを設置し、数か月分の経路ログデータを観測した。観測した経路ログデータとごみステーションの位置データ情報をもとに各日・各ステーションにおける収集運搬量の推計を行った。

その結果、1周におけるごみステーション近隣での停止時間の合計と処理場に運搬された収集量の間には相関関係がみられた。この結果をもとに、各ごみステーションにおける収集量を推計し、1)1日1車両、2)日複数車両、3)1週間複数車両を対象としたCO₂排出量削減策の提案を行うことができた。

本研究の結果から、ごみステーションの付近で収集車両が停止しているかどうかによって収集量を推計することの可能性が示された。より精度の高い収集運搬の推計を行うには同時に取得しているエンジンの回転数などをもとに分析することが必要と考えられる。一方で、本研究と同程度の精度での提案を必要とする際には時間ごとの位置情報によって推計が可能のため、スマートフォンのアプリケーションなどでより安価な形で収集量を推計し、計画の提案をすることも可能であろうと考えられる。

ただし、本研究ではステーション方式を用いている松山市のデータを用いているため、より人口密度の大きい大都市や戸別収集方式、歩道へのごみ箱敷設方式を行っている自治体など異なる条件の自治体で同様の方法による推計が可能かはわかっていない。そのため、他の自治

体における適用可能性を確認していくことが必要になる。

謝辞：本研究は令和2年度先端的な情報通信技術等を活用した廃棄物処理システムによる脱炭素化支援事業検討委託業務（環境省）及び松山市環境部清掃施設課の協力によって行われました。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 環境省(2021)：廃棄物分野における地球温暖化対策について https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/ondanka_wg/pdf/004_04_04.pdf (2022年3月17日閲覧)
- 2) 環境省(2018)：循環型社会形成推進基本計画 https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_4.pdf (2021/04/01 閲覧)
- 3) Jimmie E. Quon, Abraham Chames, Stephen J. Wersan (1965) : Simulation and Analyses of a Refuse Collection System. Proc. of ASCE Journal of the Sanitary Engineering Division, Vol. 91 Issue. 5, pp.17-36. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI0000575>
- 4) Marcus M. Truitt, Jon C. Liebman, Cornelius W. Kruse (1969) : Simulation Model of Urban Refuse Collection. Proc. of ASCE Journal of the Sanitary Engineering Division, Vol. 95 Issue. 2, pp.289-298. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI0000950>
- 5) Jimmie E. Quon, Masaru Tanaka, Stephen J. Wersan (1969) : Simulation Model of Refuse Collection Politics. Proc. of ASCE Journal of the Sanitary Engineering Division, Vol. 95 Issue. 3, pp.575-592. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI0000972>
- 6) 松藤敏彦, 神山桂一, 田中信寿(1987)：都市ごみステーション収集のモデル作成に関する研究. 土木学会論文集, 第377号, pp.61-69. <https://doi.org/10.2208/jscej.1987.61>
- 7) 田畑智博, 後藤尚弘, 藤江幸一, 井村秀文, 薄井智貴(2002)：発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究. 環境システム研究論文集, 30巻, pp.315-322. <https://doi.org/10.2208/proer.30.315>
- 8) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 五味馨(2019)：地域特性を考慮した収集運搬による費用・CO₂排出量推計のための修正グリッドシティモデルの開発. 廃棄物資源循環学会論文誌, 30巻, pp.153-165. <https://doi.org/10.3985/jsmcwm.30.153>
- 9) M.A.Hannan, M.S.Hossain Lipu, Mahmuda Akhtar, R.A.Begum, Md Abdullah Al Mamun, Aini Hussain, M.S. Mia, Hassan Basri (2020) : Solid waste collection optimization objectives, constraints, modeling approaches, and their challenges toward achieving sustainable development goals. Journal of Cleaner Production, Vol. 277, 123557. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123557>
- 10) 2020年都道府県・市区町村別主要統計表（国勢調査）, 総務省統計局
- 11) 矢崎エナジーシステム株式会社 HP : [http://www.yazaki-keiso.com/pdf/catalog/dtg5.pdf](http://www.http://www.yazaki-keiso.com/pdf/catalog/dtg5.pdf)
- 12) 環境省(2022)：令和2年度先端的な情報通信技術等を活用
- 13) 岸野泰恵, 白井良成, 水谷伸, 竹内孝, 須山敬之, 納谷太, 上田修功(2019)：ゴミ収集車に搭載したセンサを用いた状況識別による地区別ゴミ量推定と地区特性の分析. 情報処理学会研究報告, 15号, pp1-7. <http://id.nii.ac.jp/1001/00198750/>
- 14) した廃棄物処理システム報告書

(Received March 28, 2022)
(Accepted August 22, 2022)

Development of waste collection and transportation planning tool by estimating the amount of waste collection at each station using the route log data by IoT

Seiya MAKI, Minoru Fujii, Mitsuhiro Mursaki, Takahiro Ohtagaki and Kazutoshi Manabe

The waste treatment field in Japan was accounted for about 3% of total GHG emissions. Then, decarbonization of the waste treatment field and improvement of the efficiency of municipal solid waste treatment have been need. In recent years, IoT and AI technologies is expected improving the efficiency and decarbonization of waste treatment planning. In this research, we installed a kind of IoT device called a digital tachometer on waste collection and transportation vehicles in Matsuyama City. And, we observed the route-log data of the collection and transportation vehicles by this IoT devices. We also developed a calculation system that estimates the amount of waste collected at each station based on the observed data, camera image data from vehicle and waste collection report at waste treatment plants. In addition, we proposed a method of reducing CO₂ emissions by changing the route based on the calculation results of the developed system.