

令和元年6月26日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12537

研究課題名(和文) センサ協調による廃棄物系バイオマス還元物流の適応的モダルシフト

研究課題名(英文) Adaptive modal shift of waste-based biomass reduction logistics by sensor coordination

研究代表者

荒井 幸代 (Arai, Sachiyo)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10372575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、廃棄物系バイオマスの活用に向けて、「リサイクル技術」と「発生から利用まで一連の施設をつなぐ還元物流」の最適化を目的として推進してきた。自治体ごとに異なるリサイクル施設の数、処理能力の違いを調査し、廃棄物の種類に基づいた発生パターンの予測可能性を示した。また、モダルシフトによる還元物流の最適化については、異種モビリティを組み合わせることによって、夜間リソースの有効活用を目的とした最適化問題として定式化した。具体的には、スマートデバイス間の連携による(1)発生量、場所の管理、(2)廃棄量と処理施設能力との関係から配送先候補の選定が可能な管理システムのプロトタイプを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

廃棄物系バイオマスのエネルギー利用技術は、既に実用化レベルにあるにもかかわらず、運用に至っていない。この学術的背景の下、廃棄物の収集や保管場所の確保、いわゆる還元物流がボトルネックである点に着目した。一方、社会的には、2020年の東京オリンピック開催で予想される食品廃棄物の急増、さらに安価で高性能なセンサ技術の発達を背景に、効果的な還元物流モデルを示すことの意義は大きい。モダルシフトは、一般に車から鉄道、船舶へのシフトを指すが、ここでは廃棄物発生量、それを収容可能な保管・処理施設と交通手段、目的地の選定を含む柔軟な配送シフトをマルチエージェントモデルの学習によって獲得する方法を示した。

研究成果の概要(英文)： This issue has been promoted for the purpose of optimizing the "recycling technology" and "reduction logistics connecting a set of facilities from generation to use" for the utilization of waste-based biomass. We investigated the differences in the number of recycling facilities and the processing capacity of sampled municipalities and showed the predictability of the generation patterns based on the type of waste. In the recent days, it is necessary to distribute sensors to estimate the amount of waste. Though it does not pay for price of the sensor, the improvement of the recycling technology, and the improvement of consideration to the environmental problem makes it possible practical usage.

In particular, we constructed a prototype of the management system which can select a delivery target from the relation between (1) the amount of generation, the management of location, and (2) The waste amount and the processing facility ability by cooperation between smart devices.

研究分野：マルチエージェント学習

キーワード：ロジスティクス最適化 還元物流 センサネットワーク マルチエージェントシステム

1. 研究開始当初の背景

廃棄物のうち、とくに食品廃棄物に着目する。食品廃棄物系バイオマスのエネルギー利用について、2015年時点では飼料、たい肥として原材料の利用が最も多かった。この理由はリサイクル費用がほとんど要らない点であるが、これらの用途は既に需要を満たしていることや、国内で排出される大量の食品廃棄物の燃料化、エネルギー利用についての技術は表1[1]に示されるとおり、実用化レベルまで進んでいる。したがって研究対象とすべき課題は、還元物流を構成する①集積箇所への回収、および、②処理施設への配送におけるCO2排出や、交通流への影響であった。

表1：バイオマスの種類ごとに対応する変換技術とその技術水準 (文献[1]から抜粋)

| 変換技術    |              | 技術水準 | 食品廃棄物 | 家畜糞尿 | 下水汚泥 | 農業残さ | 木くず |
|---------|--------------|------|-------|------|------|------|-----|
| 生物化学的変換 | メタン発酵        | 実用化  | ◎     | ◎    | ◎    | ○    |     |
|         | エタノール発酵      | 実用化  | ◎     |      |      |      |     |
|         | アセトン・ブタノール発酵 | 開発   | ○     |      |      |      |     |
|         | 水素発酵         | 開発   | ○     | △    | △    |      |     |
| 熱化学的変換  | 熱分解ガス化       | 実証   | △     | △    | △    | ○    | ◎   |
|         | 超臨界ガス化, 油化   | 基礎研究 | ○     | ○    | ○    |      |     |
|         | 炭化           | 実用化  | △     | △    | △    | △    | ◎   |
|         | エステル化        | 実用化  | ◎     |      |      |      |     |
| 燃焼      | 直接燃焼         | 実用化  |       |      |      | ◎    | ◎   |
|         | 固形燃料化        | 実用化  | ○     |      |      |      | ◎   |

◎：事例多数，○：事例あり（対応技術として向いている），△：事例有（対応可能な技術）

[1] 食品廃棄物系バイオマスのエネルギー利用システムについて—現状、課題及び今後の方向性—  
[https://www.env.go.jp/recycle/waste/conf\\_raw\\_g/04/mat02.pdf](https://www.env.go.jp/recycle/waste/conf_raw_g/04/mat02.pdf) (2015.10.9 アクセス)

2. 研究の目的

廃棄物系バイオマスを活用するための課題は、リサイクル技術の向上だけでなく、発生から利用まで一連の施設をつなぐ還元物流の最適化が大きなカギである。しかし、自治体ごとに異なるリサイクル施設の数、処理能力、規模の違いは、どの範囲で回収計画を立てるのかという問題、また、廃棄物発生の時期、量の不確実性も、最適化問題としての定式化を困難にしている。

そこで、本研究では、不確実かつ動的な環境に対して有効と思われるマルチエージェントモデルを導入し、最適ではないが、柔軟で合理的な解(案)を探索するシステムのプロトタイプを示す。具体的には、スマートデバイス(センサ)間の協調による(1)発生量、発生箇所の管理、(2)廃棄量と処理施設能力との関係から配送先候補を選定、(3)配送先ルートの交通負荷を考慮した運行時刻の選定法を示し、現状で示されているモダルシフト案の評価を目的とした。

3. 研究の方法

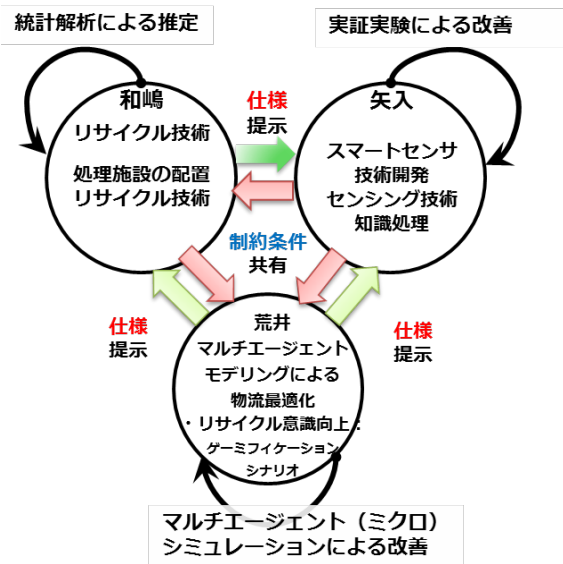


図1 研究体制

本研究で対象とする還元物流の最適化に対して、3つの専門性からアプローチする(図1)。1つは、リサイクル技術における廃棄物回収、処理に要する時間的スパンに関する調査(リサイクル技術からの輸送可能性:和嶋)、2つ目は、廃棄物の状況や、交通状況に関する情報を収集するセンサ技術の活用と必要な仕様に関する調査(戸別配布可能な安価なセンサ開発と性能評価:矢入)、3つ目は、センサによる協調的な問題解決の実現に向けた動的環境に適応するためのマルチエージェントモデリング(動的かつ不確定要素を含む環境における最適化技術検討:荒井)である。H.28前半は、1~3の調査およびモデリングに関して検討し、シミュレーション環境を構築する。H.29年以後は、モデリング実験—シミュレーションの繰り返しによって修正を加えながら精査した。

4. 研究成果

- (1) 概要：本研究が対象とする還元物流の範囲を図 2 に示す。還元物流は、「廃棄物の種類（乾燥系、湿潤系/あるいは、木質系、農業、畜産系、廃材系 etc.）」「処理施設の場所、処理能力」他、様々な要因が存在する。図 1 は、これに加えて、「廃棄物を回収する段階」と「回収後の再生処理の段階」で、それぞれ複数の場所（空間的広がり）や、複数のスケールの異なる時間間隔を考慮しなければならないことを示している。また、供給と需要のバランスに関しては、順方向の物流が需要を予測して供給を計画するのに対して、供給を予測して、それに見合う需要を考える需給バランスの問題である。しかし、太陽光の利用における需給バランスについては、物流を考える必要も、エネルギー変換に要するタイムラグもない点で、本問題よりも比較的容易である。

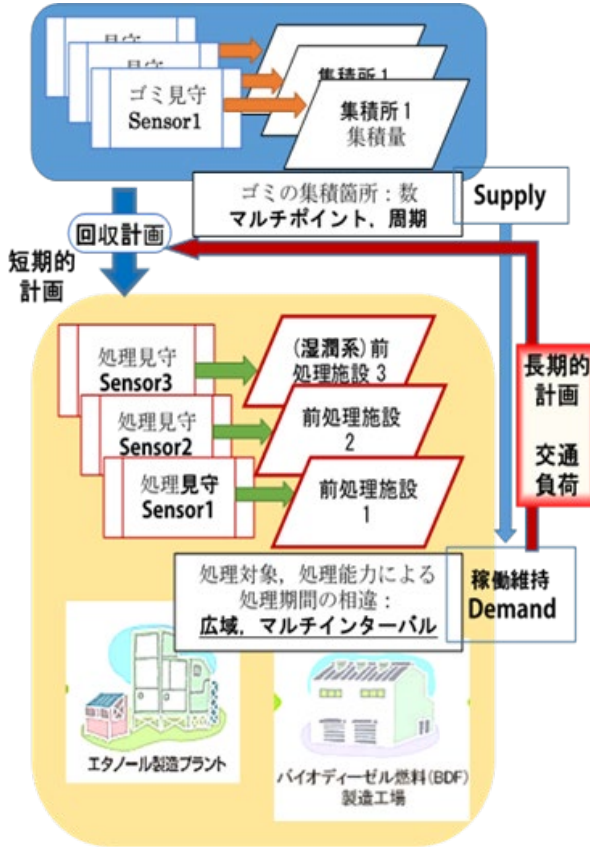


図 2 還元物流の概念図

しかし、申請者らは、これらの空間的、時間的スケールの異なる要因の存在は、エネルギー利用に関してマイナスの要素ではないと考えた。たとえば、現在自治体が示している鉄道や船舶輸送等を利用したモーダルシフトをうまく利用することによって、再生利用エネルギーの一端を担えるプラスの可能性を探る。

所与とできる条件は「廃棄物生成量と場所」、目的関数として輸送時間以外の保管場所（時間）の最小化を設定した。バイオマス化可能になるまでの保管場所の確保が最も困難であることから、輸送期間を（輸送機関に支障のない程度に）最大化し、保管場所を最小限にとどめることが究極の目的となる。物流最適化については、制約と目的関数を報酬に反映した強化学習に基づいたマルチエージェントシミュレーションを用いた。

所与とできる条件は「廃棄物生成量と場所」、目的関数として輸送時間以外の保管場所（時間）の最小化を設定した。バイオマス化可能になるまでの保管場所の確保が最も困難であることから、輸送期間を（輸送機関に支障のない程度に）最大化し、保管場所を最小限にとどめることが究極の目的となる。物流最適化については、制約と目的関数を報酬に反映した強化学習に基づいたマルチエージェントシミュレーションを用いた。

- (2) 廃棄物生成の不確定性を考慮したロジスティクス最適化：

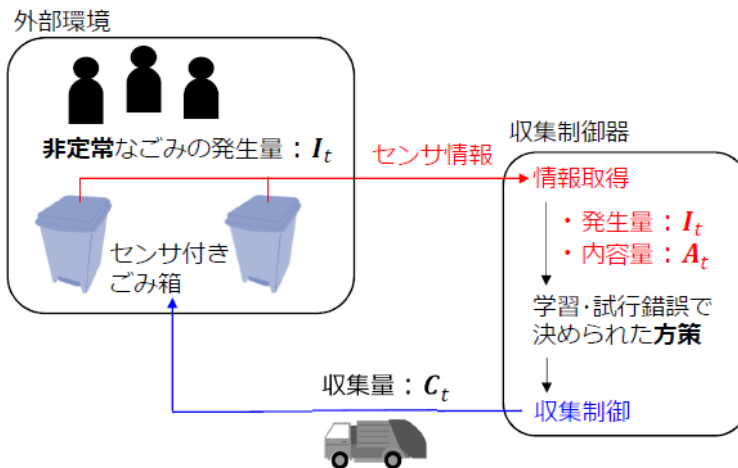


図 3 センサ情報に基づくごみ収集

- ① IoT 技術を駆使したセンサ付きごみ箱の導入

ごみの戸別回収、および、上述した東京オリンピック開催時を想定した臨時の廃棄施設におけるごみ収集の効率化に対して、IoT 技術を駆使したセンサ付きごみ箱はごみの蓄積状況をリアルタイムで計測・送信し、送信された情報はごみ収集の管理システムモデルを構築した。従来法は、「容量に達するごみ箱を感知して溢れる前に収集する」に留まっていたが、これに対して、提案法ではセンサ情報を駆使し、これに基づいた回収アルゴリズムである。具体的には、それぞれのごみ箱で容量だけを考慮するのではなく、周辺のごみ箱の状態やごみの発生傾向を考慮することで収集効率の向上を計算機実験によって確認した。

## ② ごみの発生量の変動

天候やイベントの有無など廃棄物量は、無数の潜在変数によって変動し、すべての潜在変数を把握しない限り強化学習による最適なごみ収集の方策（以下、収集方策）は求められない。また、数理的最適化手法もリアルタイムでの計算は困難であった。そこで本研究では、複数の潜在変数によって変動する環境において、強化学習による最適方策の獲得を実現した。具体的には、変動する環境は混合分布モデルによって表されるとし「非正常環境」と定義した。非正常環境への強化学習の適用法には、環境の変化に合わせて新たな方策を学習する手法や既存の方策を再学習する手法が一般的であった。しかし、実環境や失敗が許されない環境において新たな方策の設計や再学習は困難であった。本研究では、非正常環境の変化をセンサ情報としてあらかじめ取得できるものとして、この情報を用いて非正常環境において効率的な収集方策を獲得するための強化学習適用法を示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 9 件）

- (1) T. Wajima : Desalination of seawater using natural zeolite for agricultural utilization, International Journal of GEOMATE, vol.16, pp.21-26, (2019). DOI: 10.21660/2019.56.4538, (査読有).
- (2) 本木雄斗, 荒井幸代 : 状態表現と報酬関数の相互設計法における実験的考察, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J10 1-D, No.9, pp.1295 - 1304, (2018). DOI: 10.14923/transinfj.2017SAP0015, (査読有).
- (3) D. Tsutsui, T. Wajima : Desalination property of various calcined layered double hydroxides from seawater, vol.4, pp.15-21, (2018). DOI: 10.5281/zenodo.1745082, (査読有).
- (4) T. Wajima : Selective Removal of Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> from Seawater using Ag- and Pb-exchanged Natural Clinoptilolite Zeolites, vol.72, pp.332-333, (2018). DOI: なし. (査読有).
- (5) Yasuhiro Yoshida, Sachiyo Arai : Charge Control of Regenerative Power for Energy Saving in Railway Systems, The 3rd IEEE International Conference on Agents, pp.64-74, (2018). DOI: 10.1109/AGENTS.2018.8460096, (査読有).
- (6) Yusuke Nakata, Yuki Kitazato, Sachiyo Arai : Detection of Features Affording a Certain Action via Analysis of CNN, The 3rd IEEE International Conference on Agents, pp.28-31, (2018). DOI: 10.1109/AGENTS.2018.8460062, (査読有).

(他 3 件)

〔学会発表〕（計 21 件）

- (1) 吉田賢央, 荒井幸代 : 鉄道システムの省エネルギー実現に向けた回生電力の充放電制御設計, 2018 年度人工知能学会全国大会, (2018).
- (2) 山本慶佑, 荒井幸代 : 多段・多目的最適化における解の網羅的発見, 2018 年度人工知能学会全国大会, (2018).
- (3) 村上 奨悟, 矢入 郁子 : 高抽象度赤外線画像センサを用いた行動認識システムの研究, 2018 年度人工知能学会全国大会, (2018).
- (4) Takumi Kimura, Shogo Murakami, Ikuko Egushi Yairi : Monitoring System with Ultra Low-Resolution Imaging and the Examination of Its Ease of Installation, (国際学会) (2018).
- (5) T. Wajima : Desalination of seawater using natural zeolite for agricultural utilization, 4th International Conference on Science, Engineering and Environment (SEE-Nagoya2018) (国際学会) (2018).
- (6) 中畔幸次郎, 和嶋隆昌 : 水酸化物を用いた竹からの効率的な炭化物吸着材の作成プロセス, 2018 年度化学工学会, (2018).
- (7) 久須美隼也, 和嶋隆昌 : 乾燥と脱臭への利用を指向した天然ゼオライトの改質, 2018 年度化学工学会, (2018).
- (8) 村上 奨悟, 加藤 友基, 矢入 郁子 : 高抽象度赤外線画像センサを用いた行動認識システムの研究, ヒューマンインタフェース学会, (2017).
- (9) 吉永和史, 北里勇樹, 荒井幸代 : センサ情報を利用したごみ収集最適化のための強化学習アプローチ, 電子情報通信学会, 日本ソフトウェア学会, 情報処理学会, 人工知能学会共催エージェント&マルチエージェントシンポジウム, (2017).
- (10) 池永晶子, 石川翔太, 荒井幸代 : 多目的計画における代替案選択行動に基づく各目的の選好

度推定, 電子情報通信学会, 日本ソフトウェア学会, 情報処理学会, 人工知能学会共催エージェント&マルチエージェントシンポジウム, (2017).

(11) Ryosuke Saitake, Sachiyo Arai: Parameter Estimation of Multi-Objective Reinforcement Learning to Reach Arbitrary Pareto Solution, IEEE International Conference on Agents2016, (国際学会) (2016).

(12) Sachiyo Arai, Haichi Xu : Faster Convergence to Cooperative Policy by Autonomous Detection of Interference States in Multiagent Reinforcement Learning, 14th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, (国際学会) (2016).

(他 9 件)

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名 : 和嶋 隆昌

ローマ字氏名 : Takaaki Wajima

所属研究機関名 : 千葉大学

部局名 : 大学院工学研究院

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 00380808

研究分担者氏名 : 矢入 郁子

ローマ字氏名 : Ikuko Yairi

所属研究機関名 : 上智大学

部局名 : 理工学部

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 10358880

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。