

令和元年6月17日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K01196

研究課題名(和文) 分解・再生スケジュールを考慮したプル型リバースサプライチェーンの構築と実験的検証

研究課題名(英文) Development and experimental verification of a pull type reverse supply chain in consideration of disassembly and remanufacturing schedules

研究代表者

谷水 義隆 (TANIMIZU, Yoshitaka)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60275279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、経済性を考慮したリバースサプライチェーン(Reverse supply chain: RSC)の動的な運用方法について提案を行った。ここでは、再製造企業が再生部品の需要の変動を考慮して、消費者の製品の廃棄を抑制または促進する方法「Pull型RSCモデル」を提案し、その経済性評価と実験的検証を行った。また、進化型計算手法を用いた分解・再生スケジュールの動的最適化手法を提案し、計算機実験により有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、環境負荷の低減と企業利益の向上を同時に目指している。ここでは、二次電池のリユースに着目したが、本研究のアプローチは全ての製品に対して適用できると考えている。この研究アプローチが、製品単体を守る従来のビジネスモデルからの脱却を促し、製品とサービスを一体化することで顧客満足度を継続的に高める新たな環境ビジネスモデルの創出に貢献できることを期待している。

研究成果の概要(英文)：This research proposes a dynamic management method of reverse supply chain in consideration of an economical aspect. The method provides a pull type reverse supply chain model which makes customers throw away the used products positively or negatively according to the demand variation. The effectiveness of the proposed model is evaluated from a viewpoint of economy and verified experimentally. And also, a dynamic optimization method for disassembly and remanufacturing schedules is developed by using an evolutionary computation method, and the efficiency of the method is measured through computational experiments.

研究分野：生産システム工学

キーワード：グリーンサプライチェーン リバースサプライチェーン サステナビリティ リユース 遺伝的アルゴリズム 動的最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでの大量生産・大量消費の経済活動は、大量廃棄につながっており、資源の枯渇や環境汚染の問題が懸念されている。そこで、物質循環の適切な仕組みが必要とされてきた。

国内では、循環型社会形成推進基本法(2000)や家電リサイクル法(2001)が施行された。また、欧州では、WEEE 指令(Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, 2003)が制定され、電気・電子機器および家電製品の分別収集と再利用が義務付けられた。

製造企業では、分解が容易な製品設計やリユース・リサイクルの仕組み作りが進められている。しかし、環境白書⁽¹⁾によると、日本国内の産業廃棄物の排出量は、1990 年度以降、4 トン前後の横ばいで推移しており、資源循環の取り組みが十分に進展しているとは言えない。民間の調査報告書⁽²⁾によると、欧州 4,000 社以上の企業において、環境問題は経済活動の制約条件でしかないと考えられていることが示されており、その理由の一つとして、環境問題への取り組みに「経済的優位性」が得られないことが指摘されている。すなわち、環境問題を継続して推進するためには、環境保全の活動に経済的優位性を高める仕組みが必要と考えられる。そこで、研究代表者は、これまで、製造企業の経済的優位性を損なうことなく環境に及ぼす影響を低減する「グリーンサプライチェーンマネジメント (Green supply chain management)」の研究に従事してきた。

2. 研究の目的

本研究は、経済性を考慮した「リバースサプライチェーン (Reverse supply chain: 以下、RSC)」の動的な運用方法について提案を行う。RSC でリユースやリサイクルを推進するには、1) 分解・再生工程の効率化、2) リユースやリサイクルの需給バランスの調整、の 2 つが重要である。前者は分解・再生スケジュールの最適化問題、後者は RSC の分散協調問題として考える。

本研究は、再製造企業 (以下、Remanufacturer) の利益の向上と製品のリユース率の向上を同時に考慮した RSC の動的な運用方法を提案する。さらに、研究代表者がこれまでに開発したサプライチェーンシミュレーションシステムを拡張して、RSC シミュレーションシステムを開発し、有効性を検証する。一般に、不要な製品は、図 1 の Push 型 RSC モデルのように、消費者が主体的に廃棄する。しかし、再生部品が必要とされていない場合、それらは廃棄物 (ゴミ) になる。そこで、本研究は、図 2 のように、Remanufacturer が再生部品の需要の変動を考慮して、消費者の製品の廃棄を抑制または促進する方法「Pull 型 RSC モデル」を提案し、その経済性評価と実験的検証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 既存の研究で提案したフォワードサプライチェーンモデルに基づいて、RSC モデルを構築する。次に、製品を効率的に回収する Pull 型の交渉プロセスを提案する。さらに、これまでに開発したサプライチェーンシミュレーションシステムの機能を拡張して、RSC シミュレーションシステムを開発する。従来の Push 型 RSC モデルと上記の Pull 型 RSC モデルの実験結果から、利益やリユース率を比較し、提案モデルの有効性を示す。また、製品の初期設定価格など設計変数の値を変化させて、経済的に優位なリユースの条件を分析する。

(2) 進化型計算手法を用いた分解・再生スケジュールの動的最適化アルゴリズムを開発する。ここでは、製品と部品の構造関係に基づき、新たな遺伝子モデルを提案する。次に、計算機実験を行い、分解・再生スケジュールを改善することで、リユース率や Remanufacturer の利益が向上することを示す。さらに、他のスケジューリング手法と計算機実験の結果を比較することで、提案したアルゴリズムの有効性を示す。

(3) これまでに作成した RSC モデルを、製品の品質の変化を考慮したモデルに拡張する。ここでは、二次電池のリユースを想定した実証実験を行い、RSC モデルの拡張を検討する。そのために、二次電池の放電特性を計測する電子負荷装置を用いて、二次電池の電子負荷量から蓄電能力の劣化の程度を評価し、二次電池エージェントのプロトタイプを開発する。これを用いて、Pull 型 RSC モデルの経済的優位性を実験的に検証する。

4. 研究成果

環境問題を継続して推進するためには、環境保全の活動に経済的優位性を高める仕組みが必要である。本研究は、経済性を考慮した「リバースサプライチェーン (Reverse supply chain: RSC)」の動的な運用方法について提案を行った。ここでは、再製造企業が再生部品の需要の

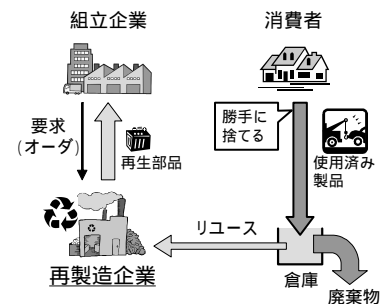


図1 Push型RSCモデル

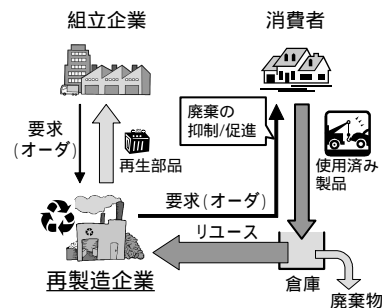


図2 Pull型RSCモデル

変動を考慮して、消費者の製品の廃棄を抑制または促進する方法「Pull型RSCモデル」を提案し、その経済性評価と実験的検証を行った。また、進化型計算手法を用いた分解・再生スケジュールの動的最適化手法を提案し、計算機実験により有効性を検証した。さらに、使用済み製品として、二次電池のエージェント化による実証実験の検討を行った。各年度における研究成果の概要を以下に記載する。

(1)平成27年度は、Pull型RSCモデルの提案とその経済性評価を行った。まず、既存の研究で提案したフォワードサプライチェーンモデルに新たな要素Remanufacturerを追加して、RSCモデルを構築した。次に、製品を効率的に回収するPull型交渉プロセスを提案した。Remanufacturerは、組立企業の部品需要に基づき、使用済み製品の買取希望価格を消費者(Client)に提示する。Clientは、製品の価値変化を表す減少関数を用いて、廃棄の判断を行う。さらに、これまでに開発したサプライチェーンシミュレーションシステムの機能を拡張して、RSCシミュレーションシステムを開発した。ここでは、Clientによる製品の廃棄の判断がワイブル分布関数に従うとし、従来のPush型RSCモデルと上記のPull型RSCモデルの実験結果から、利益やリユース率を比較することで、提案手法の経済的な有効性を検証した。

(2)平成28年度は、進化型計算手法を用いた分解・再生スケジュールの動的最適化アルゴリズムを開発した。分解工程は、一つの製品から複数の部品が生成される。これを表現するために、本研究では、階層型遺伝子モデルを適用した。次に、計算機実験を行い、SPTなどのヒューリスティックルールを用いたスケジューリング手法を用いた計算機実験の結果と比較することで、提案したアルゴリズムの有効性を示した。使用済み製品は、その使用条件の違いにより、回収した製品の状態は均一ではない。そのため、分解・再生に要する時間は製品ごとに異なり、予測は困難である。本研究は、進化型計算手法の遺伝的操作の際に、分解・再生工程の進捗にあわせて、個体を効率良く継承する方法を提案した。これにより、進化型計算の解の探索能力を落とすことなく、スケジュールを動的に改善することができることを示した。

(3)平成29年度は、二次電池のリユースを想定したリバースサプライチェーンのプロトタイプを構築し、実証実験の可能性について検討した。まず、電子負荷方式で二次電池の放電特性を評価し、蓄電能力の時間変化(劣化)から二次電池の価値の減少関数を作成し、RSCモデルを構築した。しかし、実際の二次電池では、充電時と非充電時における放電特性の評価値が大きく変動することが確認された。そのため、数値解析手法を導入することで、真の放電特性を算出し、将来の時点における二次電池の劣化度をより正確に予測する手法を提案した。さらに、RSCシミュレーションシステムを用いて、その補正を考慮することで、より多くの二次電池が適切に回収されるだけでなく、Remanufacturerの利益も向上することを示した。

(4)これまでの研究では、二次電池のリユースを想定したリバースサプライチェーンのプロトタイプシステムを構築し、実証実験の可能性について検討した。平成30年度は、二次電池のリユース時における残存価値の差異を考慮し、リユース計画を動的に修正する手法を提案した。さらに、計算機実験により、残存価値に差異がある場合でも、各企業の損益に不具合が生じないことを検証した。また、進化型計算手法を用いた分解・再生スケジュールリングアルゴリズムでは、階層型遺伝子モデルの新たなコーディング手法を開発した。これにより、既存の手法と比較して、使用済み製品の分解・再生スケジュールをより短縮することができることを計算機実験により検証した。

本研究は、環境負荷の低減と企業利益の向上を同時に目指している。ここでは、二次電池のリユースに着目したが、本研究のアプローチは全ての製品に対して適用できると考えている。この研究アプローチが、製品単体を売る従来のビジネスモデルからの脱却を促し、製品とサービスを一体化することで顧客満足度を継続的に高める新たな環境ビジネスモデルの創出に貢献できることを期待している。

<引用文献>

- (1) 環境省, 平成25年版 環境白書 / 循環型社会白書 / 生物多様性白書, 2013
- (2) BearingPoint, 2008 Supply Chain Monitor “How Mature is the Green Supply Chain?”, 2008

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

Yoshitaka Tanimizu, Michisuke Sakamoto, Hideyuki Nonomiya, A Co-evolutionary Algorithm for Open-shop Scheduling with Disassembly Operations, *Procedia CIRP*, Volume 63, pp. 289-294, 2017, 査読有

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.138>.

Hideyuki Nonomiya, Yoshitaka Tanimizu, Optimal Disassembly Scheduling with a Genetic Algorithm, *Procedia CIRP*, Volume 61, pp. 218-222, 2017, 査読有

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.177>.

Yoshitaka Tanimizu, Hiromasa Ito, Kenta Matsui, Integrated Production and Transportation Scheduling for Low-Carbon Supply Chains, Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design, Springer, pp.399-415, 2016, 査読有

Kenta Matsui, Yoshitaka Tanimizu, A Negotiation Model for Closed-Loop Supply Chains with Consideration for Economically Collecting Reusable Products, Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design, Springer, pp.435-447, 2016, 査読有

Yoshitaka Tanimizu, Katuhumi Amano, Integrated Production and Transportation Scheduling for Multi-Objective Green Supply Chain Network Design, Procedia CIRP, Vol. 57, pp.152-157, 2016, 査読有

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.027>

[学会発表](計 26 件)

Katsuya Tanaka, Yoshitaka Tanimizu, A Study of Estimating Remaining Values of Rechargeable Batteries for Closed-Loop Supply Chains, 2018 International Symposium on Flexible Automation, 2018

Yousuke Tanaka, Yoshitaka Tanimizu, Optimal Disassembly Scheduling Using an Evolutionary Algorithm Based on a Tree Structure, 2018 International Symposium on Flexible Automation, 2018

Masataka Sugimoto, Yoshitaka Tanimizu, Outsourcing Strategy for Supply Chain Resilience to Unexpected Production Disruptions, 2018 International Symposium on Flexible Automation, 2018

Tomoya Tanikawa, Yoshitaka Tanimizu, A Partial Modification Method for Disturbed Production Schedules by Using Hybrid Genetic Algorithm, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2017

Ryota Nakatani, Yoshitaka Tanimizu, An Evolutionary Algorithm for Assembly, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2017

田中勝也, 中谷亮太, 谷水義隆, 循環型サプライチェーンにおける二次電池の製品価値推定に関する研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017

田中耀喬, 野々宮偉之, 谷川智哉, 谷水義隆, 分解工程を考慮したリアクティブスケジューリングシステムの実機連携に関する検討, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017

杉本真隆, 中谷亮太, 谷水義隆, レジリエントサプライチェーンのための外注を考慮した生産スケジュールの改善, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017

谷川智哉, 野々宮偉之, 谷水義隆, リアクティブスケジューリングにおける拡散共進化遺伝的アルゴリズムの拡張, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016

野々宮偉之, 谷水義隆ほか, 分解工程のための遺伝的アルゴリズムを用いたスケジューリング手法の提案, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016

松井健太, 谷水義隆, 西田太郎, 中谷亮太ほか, 循環型サプライチェーンにおけるリユースのための経済的回収モデルの提案, 生産システム部門研究発表講演会 2016, 2016

Yoshitaka Tanimizu, Sosuke Uchino, Yuuki Sakai, Michisuke Sakamoto, Hideyuki Nonomiya, et al., A Hierarchical Co-Evolutionary Genetic Algorithm for Open-Shop Scheduling Problem with Machining and Assembly Operations, International Symposium on Scheduling 2015, 2015

野々宮偉之, 谷水義隆, 坂本道亮ほか, 拡散共進化遺伝的アルゴリズムを用いた生産スケジュールシステムの開発, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015

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。