

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 ( 共通 )

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 6 年 6 月 1 4 日現在

機関番号：3 2 6 0 1

研究種目：基盤研究(C) ( 一般 )

研究期間：2020 ~ 2023

課題番号：2 0 K 0 4 9 7 1

研究課題名 ( 和文 ) 循環型サプライチェーンにおける持続性とコストのコンフリクト

研究課題名 ( 英文 ) Challenges within Closed-Loop Supply Chains: Conflict between Sustainability and System-wide Cost

研究代表者

細田 高道 ( Hosoda, Takamichi )

青山学院大学・国際マネジメント研究科・教授

研究者番号：5 0 5 7 0 1 2 3

交付決定額 ( 研究期間全体 ) : ( 直接経費 ) 3,300,000 円

研究成果の概要 ( 和文 ) : 本研究は、使用済み製品を市場から回収・再生した上で再度販売する、いわゆる循環型のループを併せ持つサプライチェーン ( 循環型サプライチェーン ) の特性について数理的アプローチにより検討した。研究において想定した製品は近年再生技術の進展と普及が進んでいるペットボトルである。主な研究成果は以下に示す2つのパラドックスの存在を証明したことにある：1) 回収から再生するまでのリードタイムは長い方がサプライチェーン全体のコストは小さくなる、2) 原材料から製品を製造するコストよりも使用済み製品から製品を再生するコストの方が低い場合であっても、再生量を増加させるとサプライチェーン全体のコストが上昇する場合がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の一方向の供給のみを対象としていたサプライチェーン分野の研究において、サプライチェーン内のリードタイムは短ければ短いほど全体のコストは下がると結論付けられていた。リードタイムが短ければ、計画する際にあまり遠い先まで予測しておく必要もなく、サプライチェーン全体をコントロールしやすいことがコストが小さくなる理由である。我々の研究成果は、このような従来型サプライチェーンでは常識であったことが、循環型サプライチェーンにおいては当てはまらないことを示唆している。また、再生コストが仮にかなり低いとしても、再生量をいたずらに増加させるとは、サプライチェーン全体のコスト上昇になる場合があることも示した。

研究成果の概要 ( 英文 ) : Using a mathematical approach, this research investigates the characteristics of a supply chain with a circular loop (or, closed-loop supply chain), in which end-of-life products are collected from the market, recycled and then sold again. The products assumed in the study were PET bottles, for which recycling technology has been progressing and spreading in recent years. The main results of the study proved the existence of two paradoxes: 1) the longer the lead time from collection to recycling, the lower the overall cost of the supply chain; 2) even if the cost of recycling products from used products is lower than the cost of manufacturing products from raw materials, the cost of the entire supply chain may increase if the amount of recycling is increased.

研究分野：オペレーションズ・マネジメント

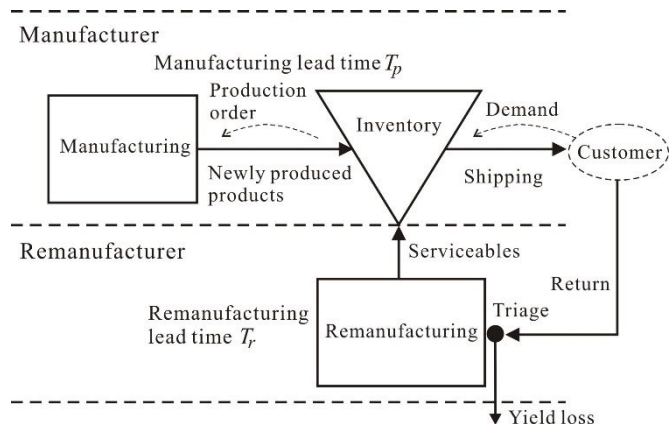
キーワード：循環型サプライチェーン リサイクル ブルウィップ効果

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

持続性の高い循環型社会構築の重要性から、使用済み製品（例えばペットボトル）の回収に多くの企業や自治体に取り組んでいる。しかしながら、回収後に再生される割合は極めて低く、多くの使用済み製品は埋め立てや焼却処分となっている。ペットボトルのように高回収率であっても再生は促進されない理由には再生技術と再生コストの問題があると思われる。再生技術については、使用済みペットボトルのみからペットボトルやポリエステル繊維を再生する技術は確立されており、徐々にではあるが普及しつつある。今現在の最大の問題は再生コストであろう。



本研究はさらにその先、つまり再生技術と再生コストの問題が完全に解決された状態を前提とする。つまり、製造業者と再生業者からなる循環型サプライチェーン・システム（上図）において、使用済み製品を原料として製品を製造する再生コストが、（石油由来の新しい）原材料から製品を製造する製品製造コストよりも安くなった状況を前提とする。このような理想的な状況において、回収した使用済み製品をできるだけ多く活用し再生することは、はたしてシステム全体のコストを常に最小化するのであろうか？ というのが本研究の当初の問いである。

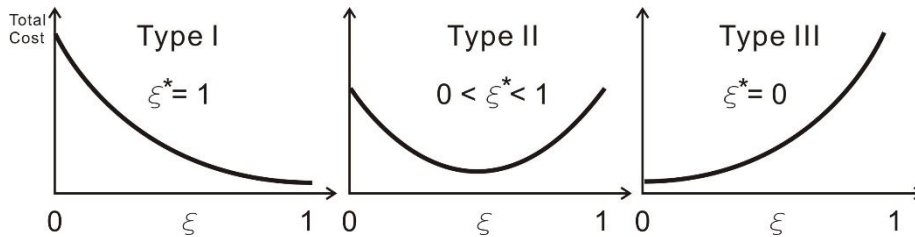
この問いには背景がある。回収と再生も考慮する循環型サプライチェーンにおいては通常想定される結果とは真逆の事象が起きうることが例えば van der Laan et al. (1999) によって示されている。彼らは、これまでの通説に反して再生のリードタイムが長いほどコストは低くなる、という興味深い結果を発見している。この逆転現象は「リードタイム・パラドックス」と呼ばれているが、本研究の申請者を含む研究者によってその発生メカニズムは詳細に検討されている（Hosoda et al., 2015; Hosoda and Disney, 2018）。しかしながら循環型サプライチェーンにおけるパラドックスの研究はまだ始まったばかりであり、リードタイム・パラドックス以外にも未発見のパラドックスは存在しうると考えることが妥当である。

- Hosoda, T., Disney, S. M. and Gavirneni, S. (2015) “The impact of information sharing, random yield, correlation, and lead times in closed loop supply chains”, *European Journal of Operational Research* Vol. 246(3): 827-836.
- Hosoda, T. and Disney, S. M. (2018) “A unified theory of the dynamics of closed-loop supply chains”, *European Journal of Operational Research* Vol. 269(1): 313-326.
- van der Laan, E., Salomon, M., and Dekker, R. (1999), “An investigation of lead-time effects in manufacturing/remanufacturing systems under simple push and pull control strategies”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 115, pp. 195–214.

## 【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

### 2. 研究の目的

本研究は、新たなパラドックスとして使用済み製品を再生する際の「歩留り率」にも注目し、持続的社会の視点からは高い歩留り率が望ましいにもかかわらず、高い歩留り率は同時にシステム全体のコストを(再生コストが非常に安価であっても)上昇させてしまう現象(「歩留りパラドックス」と呼ぶことにする)を引き起こす可能性を提示する。ここでいうシステム全体のコストとは、再生コスト、新製品製造コスト、完成品在庫コストの合計である。システム全体のコストを示す関数は歩留り率に対して下に凸の



関数となり、下に示す3つのタイプのどれかに該当しうることを申請者はすでに確認している。持続的社会の視点からも最も望ましいのは下図の左端にあるタイプ I であり、この場合は歩留り率( $\xi$ )を高めれば高めるほど、システム全体のコストは下がる。反対に、最も望ましくないのはタイプ III であり、この場合は歩留り率を上げるほどコストは上昇してしまう。つまり再生コストの方が安価であったとしても歩留りパラドックスが発生していることになる。まとめると、本研究の学術的問いは、歩留りパラドックスは存在するのか？ そして仮に存在するとした場合にその発生メカニズムはどのようなものか？ さらには、対処方法は存在するのか？ と言えよう。

### 3. 研究の方法

多くの既往の研究においては、本研究の想定とは逆に、歩留りは高ければ高いほどシステム全体のコストは減少するとしている研究が多い(最新の研究では Ponte et al., 2019)。同様の結果を導いている研究に共通しているのは、需要と回収を示すモデルに自己相関が無くかつ相互の相関も無い、いわゆる単純な白色雑音を活用している点である。白色雑音は数学的扱いが容易となる点では優れているものの、あまりに現実を簡易化しすぎるとの批判もある。本研究の一つの特長は需要と回収のプロセスに First Order Vector Autoregressive( VAR(1) )モデル( Box and Tiao, 1977 )を採用することである。VAR(1) モデルは、新規需要と回収それぞれに一次の自己相関を設定することができ、また需要と回収間における相互の相関も設定できる。現実の現象をより精緻にとらえたモデルを活用した上で、歩留りパラドックスの存在を証明し発生メカニズムを解明することが本研究の目的であり学術的貢献ともなる。

- Box, G.E.P., Tiao, G.C. (1977) "A canonical analysis of multiple time series", *Biometrika*, Vol. 64, pp 355 – 365.
- Ponte, B., Naim, M. M., Syntetos, A. A. (2019) "The effect of returns volume uncertainty on the dynamic performance of closed-loop supply chain", Forthcoming in *Journal of Remanufacturing*.

## 【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

## 4. 研究成果

本研究の研究成果は2つのパラドックスの存在を証明したことにある:1)循環型サプライチェーンにおけるリードタイムパラドックスの存在、および2)循環型サプライチェーンにおける歩留まりパラドックスの存在。

1)のパラドックスについては、これまでの研究においてもその存在が報告されていたが、本研究においてはそれら研究を発展させ、より現実に近い前提を置いた上で検証し、パラドックスの存在を改めて証明したことに学術的価値がある。再生のリードタイムは長い方がサプライチェーン全体のコストは下がる、という発見は、再生プロセスに要する時間を極端に短くする必要はなく、処理時間短縮に労力をかけるよりも、再生の品質など別の重要な部分に労力をかけることがより適切であることを示している。また、回収された使用済み製品および再生品の輸送においても、例えば船舶の活用により輸送時間はより長くなる場合においても、経済的に有利になることを示している。

2つめのパラドックスの存在証明は、より上位の研究成果である「循環型サプライチェーンのコストは再生量に対して下に凸である」から導きだされたものである。つまり、循環型サプライチェーンのコストは前述の3つのタイプのどれかに必ず属するということである。タイプIであれば、回収と再生の量を増やせばコストも下がるので、持続的社会実現と企業の利益の両立が可能である。重要なのは、例えばタイプIIIの場合にどのように対処すべきかであろう。当初はタイプIIIであっても、タイプIのような理想的なコスト関数へと移行させる方法や手順を示すことが持続的社会構築のためには重要を考え、本研究では例として、廃棄量に対するペナルティを適切に課すことで、徐々にタイプIに移行される方法を提案している。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1 . 著者名 Hosoda Takamichi、Disney Stephen M.、Zhou Li	4 . 巻 239
2 . 論文標題 The yield rate paradox in closed-loop supply chains	5 . 発行年 2021年
3 . 雑誌名 International Journal of Production Economics	6 . 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijpe.2021.108187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1 . 発表者名 Hosoda, T., Disney, S. M., Gaalman, G.
2 . 発表標題 Global dual sourcing: ARMA(1,1) demand and its decomposition
3 . 学会等名 23rd International Working Seminar on Production Economics (国際学会)
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 Hosoda, T., Disney, S. M., Gaalman, G.
2 . 発表標題 Autocorrelated Price-sensitive Demand and the Dynamics of Supply Chains
3 . 学会等名 INFORMS Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Hosoda, T., Disney, S. M., Gaalman, G.
2 . 発表標題 Supply chain dynamics and economics based on autocorrelated price models and linear demand models
3 . 学会等名 日本経営工学会春季大会
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Hosoda
2. 発表標題 Non-stationary price and demand processes in a supply chain
3. 学会等名 CSAM Meeting, Exeter Business School (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Hosoda
2. 発表標題 Impact of customers reaction to autocorrelated price sensitive demand on supply chains
3. 学会等名 53rd Annual Conference of the Decision Sciences Institute (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.M. Disney
2. 発表標題 Impact of correlated price sensitive demand on the dynamics and economics of supply chains
3. 学会等名 6th World Conference on Production and Operations Management (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------