

サーキュラーエコノミーにおける耐久消費財の製品循環と消費者行動のエージェントベースモデル開発

○小出瑠, 山本悠久, 南齋規介 (国立環境研究所), 村上進亮 (東京大学)

Developing Agent Based Simulation Model for Product Circulation and Consumer Behavior of Consumer Durables in the Circular Economy

* Ryu Koide, Haruhisa Yamamoto, Keisuke Nansai (National Institute for Environmental Studies),
Shinsuke Murakami (The University of Tokyo)

概要—製品や素材の価値を有効活用するサーキュラーエコノミー (CE) における消費者行動と環境負荷を評価する手法が確立されていない。本研究では、7つのCE戦略 (リファーマビリティ, シェアリング等) を対象とする耐久消費財の生産・使用・循環に関するエージェントベースモデルを開発した。2種類の家電製品を想定した仮想的数値実験により、消費者行動の限定合理性を踏まえた製品サービスの普及、製品の循環性、環境負荷を動的に定量化し、モデルの実用性を示した。

キーワード: 消費者行動, 製品サービスシステム, エージェントベースシミュレーション, サーキュラーエコノミー, 循環性評価

1 研究背景

近年、製品の価値を有効活用し、廃棄物や汚染を低減するサーキュラーエコノミー (CE) への転換が注目されている¹⁾。例えば、リファーマビリティ, リユース, 修理, レンタル, シェアリング等の様々なCE戦略の導入により、従来型の新品売り切り型からCE型のビジネスモデルへの転換が見込まれる²⁾。このような新しいビジネスモデルでは、製品の入手・使用・排出等、製品供給や利用のあり方が大きく変わることになるが、CEにおける消費者の選択行動は十分に理解されておらず、特に効果的な普及のための介入策の検討が不足している³⁾。また、一度利用された製品が循環することによる製品フロー・ストックの状況が次の選択行動にも影響するため、消費者の選好や行動の多様性が製品循環にも大きく影響を与えることとなり、これらを総合的に捉える手法が必要となる。

CEによる環境的サステナビリティへの貢献 (環境負荷の低減) が期待されるが、一部の効果が相殺されるリバウンド効果や環境負荷が結果的に増加するバックファイア効果が生じる可能性が指摘されている⁴⁾。その要因として、使用回数、製品の代替、製品寿命の変化等の消費者行動が挙げられており、CEの持続可能な導入には、消費者行動の変化に伴う環境的帰結の理解が欠かせない。また、資源の循環利用の度合いを示すサーキュラリティ (循環性) には数多くの指標が提案されているが、特に製品レベルの循環性評価の手法は未確立である⁵⁾。このような社会的要請に対し、環境負荷と循環性を一貫して評価することが不可欠とされるが⁶⁾、既存手法 (離散イベントシミュレーション, ライフサイクルアセスメント, マテリアル・フロー分析等) では、消費者行動の動態と多様性を考慮したCEの評価を行うことは困難である。

そこで本研究では、CEにおける耐久消費財の利用に関する消費者行動と製品循環をシミュレーションし、製品サービスの普及、製品の循環性、環境負荷を一貫して定量化できるエージェントベースモデルを開発した。本報告では、構築したモデルの概要を示すとともに、2つの家電製品を想定したCE戦略の比較および促進策の比較に関する数値実験例によりシミュレーションモデルの実用性を示す。

2 シミュレーションモデル開発

2.1 モデルの概要

本研究で開発したエージェントベースモデルは、消費者行動と製品循環に影響を与える様々な促進策とCE戦略の導入シナリオにおいて、製品サービスの普及をシミュレーションし、製品の循環性と環境影響への帰結的影響を動的に定量化することを目的とする。耐久消費財に関するCE戦略として、修理, リファーマビリティ, アップグレード, リユース, リース, レンタル, Consumer to Consumer (C2C) シェアリングの7つのCE戦略とその組み合わせを対象とする。

本モデルでは、消費者 (世帯) および製品をともにエージェントとして表現することで、これらの多様性と相互作用を捉えたシミュレーションを行う。主な状態変数をTable 1に示す。世帯エージェントの状態変数には、製品の入手・修理・排出の選択行動を決定づける効用関数・知名集合・考慮集合、製品の使用期間を決定づける陳腐化関数、消費者どうしの相互作用を決定づける社会ネットワーク構造・クチコミ受信確率、そして製品の使用・待機・退蔵・共有状況が挙げられる。製品エージェントは、製品の循環形態、所有形態、製造後経過年、製品・部品の年数、部品の故障状況等

の状態変数を有し、循環型サプライチェーンエージェントは、リース品、レンタル品、在庫品の情報を保持・更新する。

一般的な耐久消費財の寿命を踏まえ、タイムステップは1ヶ月、シミュレーション期間は数十年間とした。エージェントは2次元格子上に配置するが、空間情報には具体的な意味は有しないモデルとした。シミュレーションモデルの実装および数値実験の実施にはNetlogo⁷⁾およびRのnlrxパッケージ⁸⁾を用いた。

消費者と製品エージェントとの間には相互作用があるが、次節以降では消費者行動と製品循環に分けてシミュレーションモデルの概要を示す。

Table 1: エージェントおよび状態変数一覧 (抜粋)

状態変数	説明
世帯エージェント	
効用関数	製品サービス入手, 修理, 排出選択に関する属性の部分効用ウェイト
陳腐化関数	相対的陳腐化に関するワイブル分布の形状・尺度パラメータ
知名集合	世帯が知名する代替案
考慮コスト	代替案を追加的な考慮するために必要となる認知的コスト
過去選択結果	習慣形成を考慮するための過去の代替案の選択結果
クチコミ受信	クチコミ受信確率
使用, 待機, 退蔵状況	世帯が使用, 待機, 退蔵する製品
C2C シェアリング状況	C2C シェアリング貸出可能あるいは貸出中の製品
社会ネットワーク	世帯の社会ネットワーク構造
製品エージェント	
循環形態	製品の循環形態 (新品, リユース品, リファビッシュ品等)
所有形態	製品の所有形態 (所有, リース, レンタル等)
製造後年数	製品・部品の製造後経過年数
故障状況	部品の故障状況
プロセスインベントリ	製品の製造・使用・循環に関する工程実施の記録
循環サプライチェーンエージェント	
リース, レンタル製品	リース, レンタル中の製品
在庫製品	該当する循環プロセスの実施後に販売または貸出を待つ在庫品

2.2 消費者行動モデル

本研究におけるシミュレーションモデルに実装した消費者行動モデルでは、CEにおける3つの選択行動として、製品サービスの入手選択、故障時の修理選択、

使用済み製品の排出選択を対象とした。これらの選択行動について、消費者は市場において入手可能なすべての代替案から完全に合理的な選択を行うとは考えにくい。そこで、本研究では、社会ネットワーク上の情報探索, 知名集合および考慮集合の形成を通して、徐々に代替案を絞り込むことで消費者行動の限定合理性を考慮し、さらに製品サービスの知人利用人数に基づく社会的影響の効果を含めたモデルとした (Fig. 1)。

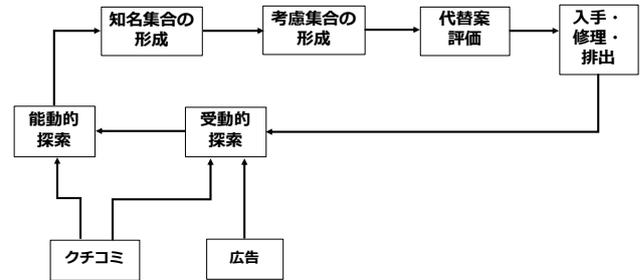


Fig.1: 消費者行動モデルの概要

消費者行動に関する主なプロセスは次のとおりである。まず、世帯エージェントはスモールワールドネットワーク構造を有する社会ネットワークを形成しており、社会ネットワーク上の知人からクチコミを一定確率で受け取り、情報を記憶に定着する。情報交換される内容としては、新たなCE製品サービスの登場 (シェアリングサービス等) に加え、知人のうちその製品サービスを利用している人数 (知覚知人利用人数) が挙げられる。このようなクチコミ受信は、各タイムステップにおいて確率的に行われる受動的探索のほか、意思決定 (入手選択, 修理選択等) の直前に行われる能動的探索がある。さらに、企業や行政からの広告を一定確率で受信する。このようにして、各世帯エージェントは市場に存在する代替案のうち、認知している代替案からなる知名集合を形成する。

後述する考慮集合の形成を経て、最終的な代替案の評価は、ランダム効用理論に基づいて行われる。世帯 h が考慮集合 C から代替案 k を選択する確率は、多項ロジットモデル (修理選択については二項ロジットモデル) により次のとおり与えられる。

$$P(k|C) = \frac{\exp(W_{k,h})}{\sum_{j=1}^n \exp(W_{j,h})} \quad \forall j \in C \quad (1)$$

ここで、各代替案に関する効用の確定項 $W_{k,h}$ は、代替案の属性 l に関する水準 $x_{k,l}$ とそのウェイト $\beta_{h,l}$ からなる属性アプローチより次のとおり定義される。

$$W_{k,h} = \sum_{l=1}^L \beta_{h,l} x_{k,l} \quad (2)$$

本研究においては、製品サービスの属性として、価格、製造後経過年、循環形態 (リユース品, リファ-

ビッシュ品等), 所有形態(買い切り, レンタル, シェアリング等), 無償修理保証期間, 知覚知人利用人数を含めた. 知覚知人利用は, ある代替案を社会ネットワーク上の知人の多くが利用している場合にその代替案の利用が増加する社会的影響のうち同調現象(Conformity)⁹⁾をモデル化したものである.

消費者は意思決定の最終段階において知名しているすべての代替案を合理的に検討するわけではなく, ある程度高い期待効用が見込まれる選択を考慮集合としてあらかじめ絞り込んだ上で選択を行うことが知られている. 本研究における消費者行動モデルでは, Manskiによる考慮集合モデル¹⁰⁾に従い, 世帯 h が代替案 k を選択する確率は, 市場における入手可能集合 G とその部分集合である考慮集合 C を形成する確率により次のとおり定義される.

$$P_h(k) = \sum_{C \in G} P_h(k|C)P_h(C|G) \quad (3)$$

ここで, 考慮集合の形成は, Roberts-Lattinモデル¹¹⁾に基づき, 既に形成された考慮集合 C に追加的な選択肢 k を加えることによる期待効用 EU とその考慮コスト c_h を比較することにより次のように決定される.

$$EU(C \cup k) - EU(C) > c_h \quad (4)$$

ここで, 各代替案はその追加的な期待効用が閾値を超えたときにのみ, 考慮集合に追加される. なお, 習慣形成の影響を反映するため, 最初に考慮集合に含まれるデフォルト代替案は, その世帯エージェントが前回選択した代替案とし, 期待効用の最も高いものから順番に考慮集合への追加が判断される.

2.3 製品循環モデル

製品循環モデルは, 7つのCE戦略(修理, リファーマビッシュ, アップグレード, リユース, リース, レンタル, C2Cシェアリング)の導入に伴う製品の製造, 使用, 廃棄, 循環までの工程をシミュレーションするものである. こうしたCE戦略は単体で導入されるばかりでなく, 例えばリユース品の修理, リファーマビッシュ品のレンタル等, 組み合わせで導入されることが想定されることから, CE戦略の組み合わせ(リファーマビッシュ済みのレンタル, リユース品の修理等)についても考慮するモデルとした(Fig. 2).

製品循環に関する主なプロセスは次のとおりである. 新しく製造された製品は, 消費者行動モデルにおける選択結果に従い, 消費者に所有(買い切り)または貸出(リースやレンタル)のいずれかの形態で提供される. 使用中の製品は, その製品を構成するいずれかの主要部品が故障するか, 故障以外の理由による相対的陳腐化(ライフスタイルの変化や機能不足への不満等)により使用が中止される. 部品 i が製造後の経過月数 t において故障する確率は, ワイブル分布により次のように与えられる.

$$h_i(t) = \frac{\alpha_i^{fail}}{\beta_i^{fail}} \left(\frac{t}{\beta_i^{fail}} \right)^{\alpha_i^{fail}-1} \quad (5)$$

また, 世帯 h が利用する製品が故障以外の理由により使用中止される確率は次のように与えられる.

$$h_h(t) = \frac{\alpha_h^{rel}}{\beta_h^{rel}} \left(\frac{t}{\beta_h^{rel}} \right)^{\alpha_h^{rel}-1} \quad (6)$$

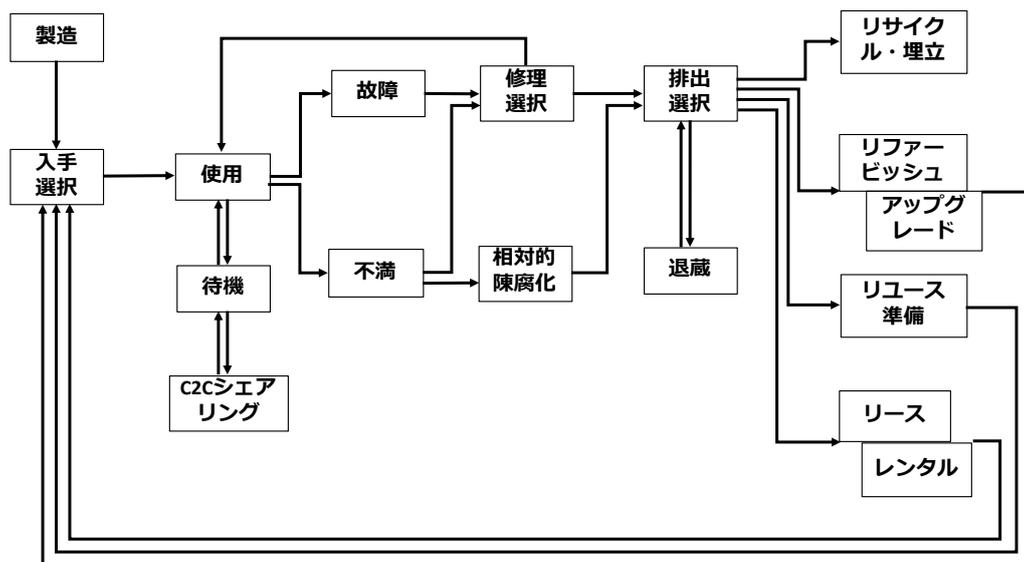


Fig.2: 製品循環モデルの概要

ここで、 α および β はワイブル関数の形状および尺度パラメータである。このモデルでは、これらのパラメータに多様性を持たせることで、部品や世帯による使用中止確率の違いを反映することができる。

なお、常時稼働する製品ではなく、小型家電のように断続的に使用される製品では、製品の稼働と待機状態が更新される。稼働開始確率および使用期間は二項ロジットモデルおよびワイブル分布により与えられる。また、C2Cシェアリングが導入される場合、待機状態の製品は確率的にシェアリング可能品として待機され、他の世帯エージェントへの貸出が可能となる。

故障した製品は、所有品の場合には世帯の意思決定により修理実施の有無が決定される。貸出品の場合には、サービス提供者により修理が行われる。相対的陳腐化が生じた製品、あるいは故障時に修理が行われず使用が中止された製品は、世帯による排出選択を経て循環サプライチェーンエージェントに回収される。

回収された製品は、CE戦略の導入状況に従い、メーカーによるリファービッシュ（場合により機能アップグレード）、中古販売店によるリユース準備、サービス提供者によるリースやレンタル向けの準備が行われるか、リサイクルまたは埋め立て処分が行われる。リユース、リース、レンタルでは、回収製品の点検、清掃、必要に応じた修理が行われる。リファービッシュでは、故障部品の交換あるいは予防的な部品交換が行われ、機能アップグレードが同時に行われる場合には、製品の製造後経過年が更新される。これらの工程では、複数のCE戦略の組み合わせを考慮することができ、シナリオ次第では、中古販売店によるリユース品の修理、リースやレンタル事業者による貸出向け品のリファービッシュ実施が可能である。

製品循環のための準備工程が完了した製品は、循環サプライチェーンの在庫として追加され、世帯の製品サービス入手選択の代替案として消費者行動モデルに反映される。在庫が一定期間経過した場合、あるいは技術的な処理可能年数や部品保持期間を経過したために修理ができない製品は、リサイクルまたは埋め立て処分される。

このように製品の循環利用において生じる製造、輸送、修理、廃棄等の工程は、インベントリとして記録される。さらに、各工程に関する環境負荷等の原単位を入力することにより、環境インパクトを算定することができる。インパクト項目 i に関する環境負荷 IMP_i は、製品 p の工程 j に関するインベントリ $INV_{p,j}$ 、原単位行列 $UI_{j,i}$ により次のとおり算出される。

$$IMP_{p,i} = INV_{p,j} \times UI_{j,i} \quad (7)$$

$$IMP_i = \sum_p IMP_{p,i} \quad (8)$$

3 ケーススタディ

3.1 シミュレーション実験条件

本研究で開発したエージェントベースモデルの実用性を検討するため、家電製品を想定した2つの仮想的数値実験を行った。ケースAでは、大型家電を想定したリファービッシュ済製品のリースサービスを普及する促進策（価格低減、広告、サービス水準改善）の比較を行った。ケースBでは、小型家電を想定した複数のCE型ビジネスモデル（リユース、レンタル、C2Cシェアリング）の比較を行った。各シナリオの一覧をTable 2に示す。

このシミュレーション実験はモデルの実用性を検討するための仮想的なケーススタディであり、パラメータ設定は可能な限り文献値を参照し、仮定により設定した。実験条件として、世帯エージェント数2000、シミュレーション期間は30年間とし、各シナリオ100回の計算機実験を行った。

Table 2: 仮想数値実験のシナリオ一覧

シナリオ	説明
ケースA：大型家電リースサービスの促進策比較	
A1.価格低減	価格低減による部分効用増加
A2.広告	広告による知名集合の拡大
A3.サービス水準	リファービッシュ可能期間・部品保持期間の延長
A4.全促進策	全促進策の組み合わせ
ケースB：小型家電のCE型ビジネスモデル比較	
B1.リユース	価格低減と無償修理保証期間延長によるリユース促進
B2.レンタル	レンタルサービス導入
B3.シェアリング	C2Cシェアリングサービス導入

3.2 結果

仮想ケーススタディに基づく数値実験を通し、本研究で開発したエージェントベースモデルにより、CEにおける新たな製品サービスの普及、製品ストック・フロー、環境負荷を動的に定量化できることが示された。

ケースAでは、価格低減、広告、サービス水準改善等の促進策による新たな製品サービスの普及状況を定量化した (Fig. 3)。促進策により効果発現までにかかる期間が異なること（広告は早期の普及に有効であり、サービス水準改善の効果発現は遅い）、複数の促進策を組み合わせた場合には非線形的な効果がみられることが示唆された。また、全促進策シナリオでは、回収済製品の不足により普及率が頭打ちになるなど、製品循環システムにおけるボトルネックが確認された。

このような消費者行動の変化に伴う製品の循環性の評価として、異なる所有形態における製品の動的なフ

ローを定量化し、サンキー図として可視化することが可能である。この数値例では、リース導入が無い場合（現状維持）に比べ、リース導入に全促進策を実施した場合、所有から利用へと消費者行動と製品供給が転換され、リース、リファービッシュ、修理を通した製品の循環率が改善した。同様に、製品循環の様々な断面における循環性指標を定量化することができ、例えば新品生産・廃棄台数の削減、修理率の向上、製品寿命の延長が確認された。

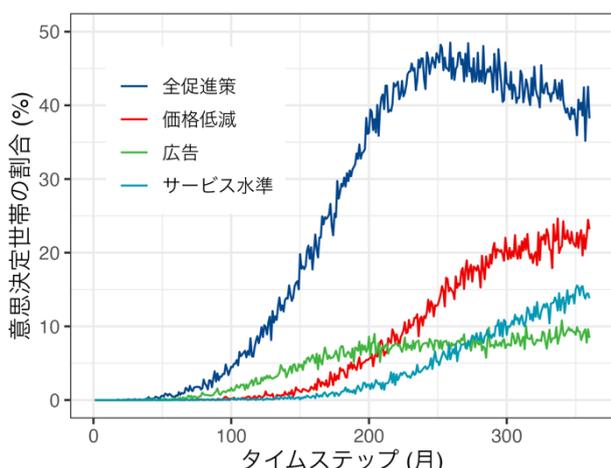


Fig.3: リファービッシュ済み製品のリースサービスの普及率：促進策比較（ケース A）

ケースBでは、製品のフローのみならず、様々なCE型ビジネスモデルの導入に伴う社会全体における世帯による使用中製品のストックを定量化した（Fig. 4）。この数値例では、リースシナリオでは必要な製品台数そのものには変化はみられないが、シェアリングサービスの導入シナリオでは、製品ストックの台数は2割程度減少しており、所有から利用への消費者行動と製品供給の転換に伴い、少ない製品の台数で消費者のニーズを満たすことができる特徴が確認された。

また、製品のライフサイクル（生産、使用、輸送等）別にGHG排出量を定量化した（Fig. 5）。これにより、環境負荷を増大させる主な要因となるホットスポットを特定することができる。この数値例では、リースシナリオと比較して、レンタル導入によりGHG排出量が若干増加するバックファイア効果がみられるが、シェアリングでは排出削減につながる可能性が示唆された。

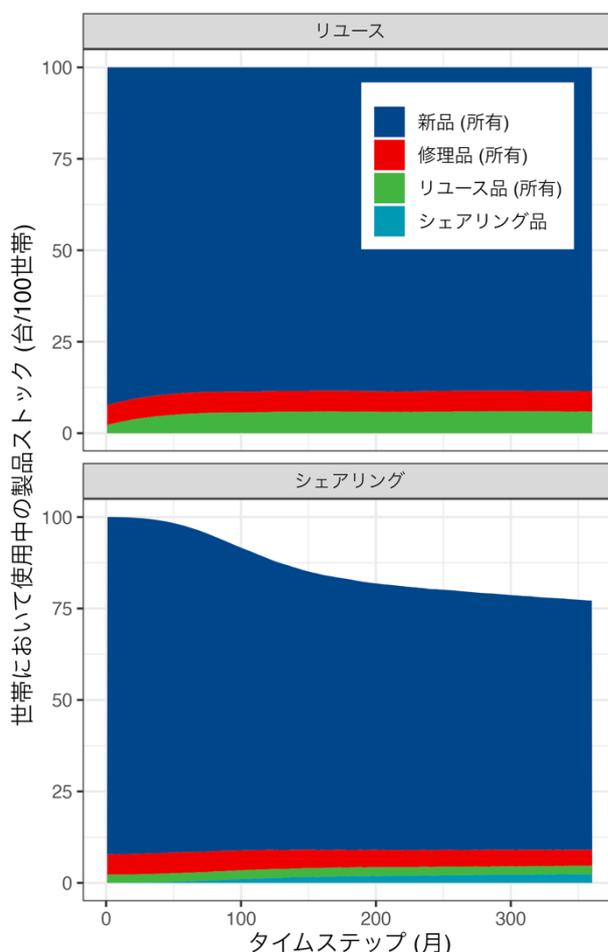


Fig.4: リユース・レンタル・シェアリング導入時の製品ストック台数の推移（ケース B）

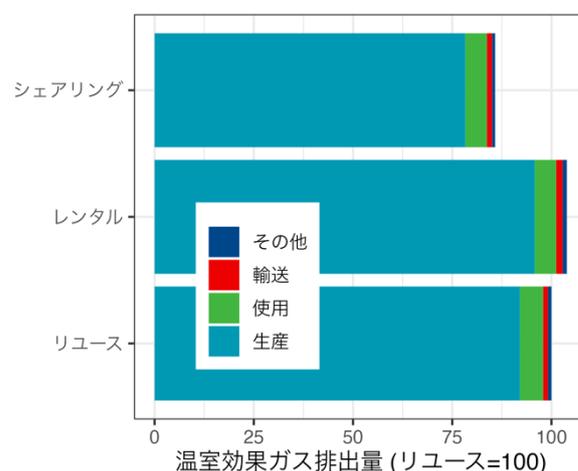


Fig.5: リユース・レンタル・シェアリング導入時のライフサイクル温室効果ガス排出量（ケース B）

4 結論

本研究では、CEにおける耐久消費財の生産・使用・循環に関する消費者行動と製品循環のエージェントベースモデルを開発した。提案手法では、製品サービスの入手・修理・排出や使用状況に関する消費者行動の動態と多様性を考慮した上で、新たなCE戦略や促進策の導入を含む様々なシナリオにおける製品循環性と環境負荷への帰結を定量化することができる。

2種類の家電製品を想定した仮想的ケーススタディを通じて、提案手法が様々なCE戦略による帰結の比較や促進策の有効性を検討することに有用であることが示された。数値実験では、新たなCE戦略が動的に普及し、これに伴い新品製造量、廃棄物発生量、環境負荷の低減が見られた。また、リユースとリース等のビジネスモデル間の競争や、リファービッシュとリースの組み合わせ等のCE戦略間の相乗効果も確認された。

本研究で提案した消費者行動および製品循環モデルは、消費者行動の決定要因（知名、価格、サービス水準等）、製品循環システムにおけるボトルネック（製品入手・修理・排出の需給バランス等）、消費者行動の多様性（消費者層のターゲティング等）についての理解を深めることに有用である。提案手法を活用することで、既存手法では十分に考慮されてこなかった消費者行動の動態と多様性を反映した上で、CEへの転換に有効なビジネスモデルの設計や政策的介入の評価を支援できることが期待される。

本研究で開発したエージェントベースモデルは、次の点において、既存手法では困難であったCEの評価を可能とするものである。まず、提案手法による環境負荷および循環性指標の定量化は、何らかの介入が行われた場合の社会全体への帰結的な影響を数十年間のシミュレーション期間にわたり動的に定量化するものであるが、従来のライフサイクルアセスメントやマテリアル・フロー分析では対応することができないものである。また、消費者行動に着目した価格低減や広告などの様々な促進策による効果の検討、消費者行動の限定合理性や異質性の考慮、新たなビジネスモデルの消費者への普及過程の定量化は、離散イベントシミュレーションにより再現することが困難であった。さらに、提案手法は7種類のCE戦略（修理、リファービッシュ、アップグレード、リユース、リース、レンタル、C2Cシェアリング）を網羅しており、これらの比較や複数のCE戦略を組み合わせたビジネスモデルの検討を行うことが可能であり、CEにおける消費者行動と製品循環を対象とするモデルとしては、これまでに類を見ないシミュレーション手法である。

提案手法は、製品使用期間に関するアンケート調査、消費者の選択行動に関する選択実験、製品ライフサイクルに関する環境負荷原単位データ等の実証データを用いたキャリブレーションが可能ないように設計されて

いる。実証データを用いた実課題に対するシミュレーション実験および感度分析の適用は、今後の研究課題である。本研究は、環境面の持続可能性を定量化する産業エコロジーの手法と消費者行動に着目した社会シミュレーションの手法を組み合わせるにより、CEの普及と環境的帰結を評価する新たなアプローチを提案するものである。

謝辞

本研究の一部は科研費（JP21K12374, JP19H04325）、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20223001）の助成を受けて実施された。

参考文献

- 1) Ellen MacArthur Foundation: Towards the Circular Economy: Opportunities for the consumer goods sector, 1/112 (2013)
- 2) Salvador, R., Barros, M.V., Freire, F., Halog, A., Piekarski, C.M., De Francisco, A.C.: Circular economy strategies on business modelling: Identifying the greatest influences, *Journal of Cleaner Production*, **299**, 126918 (2021)
- 3) Camacho-Otero, J., Boks, C., Pettersen, I.: Consumption in the Circular Economy: A Literature Review, *Sustainability* **10**, 2758 (2018)
- 4) Koide R., Murakami S., Nansai K.: Prioritising low-risk and high-potential circular economy strategies for decarbonisation: A meta-analysis on consumer-oriented product-service systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **155**, 111858 (2022)
- 5) Kristensen, H.S., Mosgaard, M.A.: A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?, *Journal of Cleaner Production*, **243**, 118531 (2020)
- 6) Harris, S., Martin, M., Diener, D.: Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy, *Sustainable Production and Consumption*, **26**, 172/186 (2021)
- 7) Wilensky, U.: NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL (1999)
- 8) Salecker, J., Sciaini, M., Meyer, K.M., Wiegand, K.: The nlrx r package: A next-generation framework for reproducible NetLogo model analyses, *Methods in Ecology and Evolution*, **10-11**, 1854/1863 (2019)
- 9) Cialdini, R.B., Goldstein, N.J.: Social Influence: Compliance and Conformity, *Annual Review of Psychology*, **55**, 591/621 (2004)
- 10) Manski, C.F.: The structure of random utility models, *Theory and Decision*, **8**, 229/254 (1977)
- 11) Roberts, J.H., Lattin, J.M.: Development and Testing of a Model of Consideration Set Composition, *Journal of Marketing Research*, **28**, 429/440 (1991)