

# 部品エージェントを用いた部品のライフサイクルシミュレーション - 複数のリユース方法への対応 -

Lifecycle simulation of parts with part agents - Application of multiple reuse methods -

精密工学専攻 26号 菅原卓巳  
Takumi Sugahara

## 1. 序論

現在の社会は技術の発展に伴い、大量生産・大量消費・大量廃棄を繰り返す消費型社会を形成しており、化石燃料などのエネルギー資源の枯渇、環境への多大な負荷といった環境問題を引き起こしている。こうした問題解決のために循環型社会への移行が急務となっている<sup>(1)</sup>。循環型社会とは、物質の効率的な利用を進めることにより、資源の消費を抑え、環境への負荷を低減する社会のことである。

横木ら<sup>(2)</sup>は、循環型社会実現のために、部品個々のライフサイクルを管理するとともに、生産者と消費者の再利用行動を支援する「部品エージェントシステム」の開発を行ってきた。部品エージェントとは、個々の部品に対応づけられた自律的に行動するネットワークエージェントであり、製品を構成する部品の情報を一個単位で、製造から廃棄に至るまで管理する。部品エージェントはネットワーク上を移動することで対応する部品に追従し、必要な情報を提供するとともに、部品やユーザにとって適切な保全行動を判断してユーザに提案することでリユースを促進する。

部品エージェントを実際の製品に実装して実証実験を行うことは、膨大な時間やコストがかかってしまうために難しい。そのため、谷川ら<sup>(3)</sup>は部品エージェントを評価するためのシミュレーションシステムの開発を行ってきた。

本研究では、シミュレーションシステムの開発を行うにあたって、実際の世界においてはリユースの方法は多岐にわたると考えた。そのため、実際に存在する様々なリユース方法をシステムに導入した。また、これまでは部品単体のみでの動作を扱ってきたが、こちらも実際に近づけるために、組立品を扱うように作り替えた。

## 2. ライフサイクルシミュレーションの概要

### 2.1. ライフサイクルシミュレーション

ライフサイクルとは、製造・組立・使用・修理・分解・そして再利用を経て、最終的に廃棄されるまでに製品が辿る一生のことである。

循環型社会へ移行するためには、必要なサービスや製品機能を最小の資源使用量で提供する「脱物質化」と一度使用した資源を出来るだけ長く効率的に使用する「循環生産」の実現が必要である。また、上記の二つの課題の実現のためには、脱物質化や循環を行わせることが出来るメカニズムの設計が必要であり、これらを前提にした製品の設計が必要となる<sup>(4)</sup>。閉ループ化製品ライフサイクルの設計支援を考えた場合、ある程度不完全なデータを用いても、製品ライフサイクル全体のバランスを評価可能にすること

が必要である。製品ライフサイクル全体のバランスの評価には、定量的な検討が必要である。そのため、製品群のライフサイクル全体での物質、エネルギー、情報、お金の流れをモデル化し、シミュレーションするライフサイクルシミュレーションシステムの開発が行われている<sup>(4)</sup>。

製品ライフサイクルの設計の際に考慮される行動の一つにリユースが存在する。使用済みの製品から部品を取り出し、再利用する部品リユースを行うことで資源・エネルギーの消費を抑制することが期待できる<sup>(5)</sup>。部品エージェントを利用することで、部品リユースの支援を行うことができる。部品エージェントを実用する前に、その有効性を評価するためのライフサイクルシミュレーションシステムの開発が行われている<sup>(2)(3)</sup>。本研究では、部品エージェントを用いたライフサイクルシミュレーションシステムに、現実幅広く利用されているリユース方法を複数導入することで、実際の動きに近づけることを試みた。

### 2.2. 部品エージェントを用いたライフサイクルシミュレーションの流れ

部品エージェントを部品に対応させ、製品のライフサイクル全体を通してシミュレーションを行うことで、部品エージェントシステムの有効性について評価する。

本研究において用いるライフサイクルシミュレーションシステムの流れを 1)-5) に示す。部品エージェントがある程度普及している状態を想定し、複数のユーザが部品を購入して一定期間部品を運用し続けた場合の影響について評価する。

- 1) ユーザ、部品、部品エージェントを作成
- 2) 部品個々の部品エージェントが部品の状態を基に次に  
行うべき最良の行動を提案
- 3) ユーザは部品エージェントの提案に従い行動を選択
- 4) 提案された行動を行った後、2)に戻る
- 5) 2)-4)を 1step として一定の期間繰り返して終了する。

ユーザが部品を使用した場合、使用時間に応じて部品の性能が低下する。性能の低下により使用不能となった場合はその部品を廃棄し、ユーザは新品を購入して運用していく。

行動提案機能の詳細は 3 章にて説明する。

### 2.3. リユース方法の選定

部品エージェントが提案する行動の一つに部品の交換が存在する。これまでのシステムにおける部品の交換動作は、部品保管庫内の部品とユーザの手元の部品を交換する方法の一つだけであった。

しかし、実際の現実世界においてはリユースの手段は多数存在する。そのため、本シミュレーションシステムを実際の動きに近づけるために、現実で幅広く利用されているリ

ユースの手法をいくつか抜粋してシステムに導入し、それらのリユース方法を用いて部品の交換を行う。

環境省が公開している平成30年度リユース市場規模調査報告書<sup>(6)</sup>において、「過去一年間における中古品・リユース品の購入経験」及び「自らが使わなくなった製品の売却・引き渡し経験」についてのアンケート結果が公開されている。これらの調査結果を基にして、本シミュレーションシステムに新たに導入するリユース方法を決定した。本研究においては、使用している部品の交換の際にリユース品を用いている。この時、部品の購入と売却の両動作を含めて部品の交換という一動作としている。そのため、今回新たなリユース方法を導入するにあたって、購入経験のアンケート結果と売却・引き渡し経験のアンケート結果の両方において高い割合を獲得していた方法を採用することとした。この条件に該当する方法として、「リユースショップ・中古品販売店による購入、売却」「フリマアプリでの購入、売却」「インターネットオークションサイトでの購入、売却」の三つを採用した。そのほか、購入経験のアンケート結果または売却経験のアンケート結果のどちらか一方において高い割合を獲得しているリユース方法もいくつか存在するが、前述した理由によりこれらは採用しなかった。

## 2.4. 組立品対応

これまでのシステムにおいては、部品単体でのシミュレーションが行われていた。しかし、実際には部品単体ではなく、複数の部品が組み合わさった製品を人は運用していくこととなる。そのため、シミュレーションを実際の行動に近づけるため、部品単体でのシミュレーションから、複数の部品を組み立てた状態の物を運用できるように変更を加えた。

ユーザは複数の部品を組み立てて作成した組立品(以下アセンブリ)を所持し、これを運用していく。アセンブリ内部の各部品及びアセンブリに対してそれぞれ部品エージェントが対応し、状況に応じて保全行動の提案を行う。

## 3. 部品エージェントによる将来予測

部品エージェントは部品の将来状態を予測し、保全行動の提案を行う。部品エージェントが部品の将来状態を予測する際、部品が持つライフサイクルモデルを利用する<sup>(2)</sup>。ライフサイクルモデルは、生産・使用・廃棄などといったライフサイクルステージ(Stage)とそれらを繋ぐパス(Path)によって構成される。部品は自身の状況に応じてそのステージを移行していく。これまでの研究<sup>(3)</sup>においてライフサイクルモデルのステージは、生産(Production)、使用(Use)、交換(Replace)、廃棄(Disposal)の四種類で構成されている。今回、リユース方法を増やすにあたって部品エージェントにそれぞれのリユース方法を用いた交換を区別させるために、各リユース方法を用いて交換を行う Replace ステージを、異なるステージに振り分けた。すなわち ReplaceA, ReplaceB, ReplaceC となるように Replace のステージをリユース方法毎に細分化したライフサイクルモデルを作成した。Fig. 1 に新たに作成したライフサイクルモデルを示す。

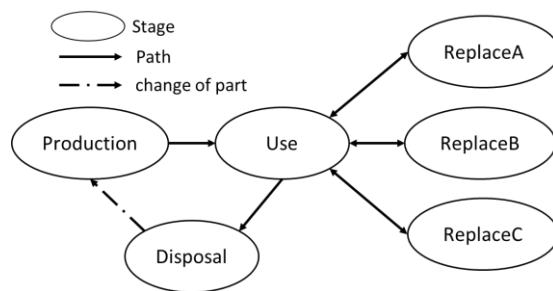


Fig. 1 Life cycle model for multiple Replace

部品エージェントはこのライフサイクルモデルを時間経過に沿って展開することで将来予測を行う<sup>(2)</sup>。展開されたライフサイクルモデルを Fig. 2 に示す。これは 1step あたりに部品が行うことのできる動作を示している。

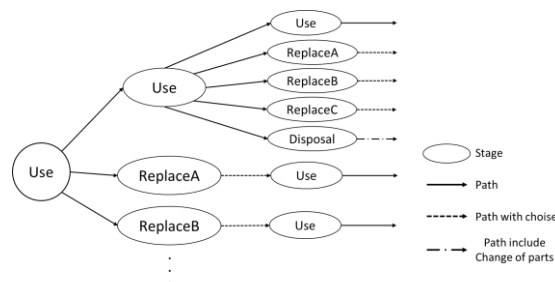


Fig. 2 Expanded life cycle model

各ステージには、発生する Profit, Cost, Environmental load といった特性値が設定されており、各パスには、部品エージェントがそのステージを選択する確率が設定されている<sup>(2)</sup>。また、これらの特性値及び確率は部品のその時点の性能に応じて変化する<sup>(3)</sup>。部品エージェントはこれらの特性値と確率を基に次のステージの評価を定める。

各ステージの持つ特性値を  $V$ 、各パスの持つ確率を  $P$  として、次のステージから数 step 先までの間の  $V$  と  $P$  について掛け合わせた値を合計した数値を算出し、次のステージにおける、ある特性値の期待値  $EV$  とする<sup>(2)</sup>。Profit, Cost, Environmental load についてそれぞれ  $EV$  を算出し、式(1)に示すような値 INDEX を求める。INDEX の値が最も高くなるステージを最良のステージとして提案する。

$$INDEX = Profit - Cost - Environmental\ load \quad (1)$$

## 4. リユース方法

従来のシミュレーションシステム<sup>(3)</sup>に、三つのリユース方法を新たに導入した。Replace ステージの際には、これらのリユース方法を利用して部品の交換を行う。4.1 節に従来のシステムにおけるリユース方法の詳細設定を記載する。4.2-4.4 節に新たに導入した三つのリユース方法の本システム内での詳細設定を記載する。4.5 節において、一度のシミュレーションで複数のリユース方法を同時に利用する場合について述べる。

### 4.1. ストレージ

- 1) 部品の保管庫となるストレージを用意する。
- 2) 初期状態としてストレージ内部に部品を用意
- 3) Replace が選択された部品はストレージに移動

- 4) ストレージからユーザは部品を得る

#### 4.2. リユースショップ

- 1) 部品の売買を行うリユースショップを用意する。
- 2) 初期状態としてリユースショップ内部に部品を用意
- 3) Replace が選択された部品はリユースショップに売却、部品はショップの保管庫に移動、売却する部品の価格分の金額をユーザは得る
- 4) 売却された部品は修理され、性能を一定量回復する
- 5) リユースショップからユーザは部品を購入、保管庫から部品を得る、購入する部品の価格分の金額をユーザは支払う

#### 4.3. フリマアプリ

- 1) フリマアプリを用意する。
- 2) Replace が選択された部品は、ユーザによって価格が設定され、フリマアプリを用いて出品される。
- 3) 出品されている部品の中から一つを選択して購入を行う、購入者は価格分の金額を出品者に渡す。出品物がない場合は新品を購入する。
- 4) 自身の出品物に購入の要求があった場合、その部品を相手に引き渡し、価格分の金額を受け取る
- 5) 一定の期間で入札のなかった部品に関しては、ユーザは出品を取り下げ、廃棄する

#### 4.4. インターネットオークションサイト

- 1) インターネットオークションサイトを用意する。
- 2) Replace が選択された部品は、ユーザによってオークションサイトを利用して出品される。
- 3) 出品する際には即決価格を設定する。即決価格を超える金額による入札があった場合はその場で落札が成立し、入札者に部品を引き渡す。入札分の金額を得る。
- 4) 出品されている部品の中から一つを選択し、金額を提示して入札する。出品物がない場合は新品を購入する
- 5) 自身の入札している部品に対して別のユーザからより高額の入札が行われた場合、別の部品を探してそちらに入札を行う
- 6) 1Step 毎の終了時点で入札のある部品に関しては、最も提示金額の高い入札者に対して落札処理が行われ、部品が引き渡される。落札者は提示していた金額を出品者に渡す
- 7) 一定の期間で入札のなかった部品に関しては、ユーザは出品を取り下げ、廃棄する

#### 4.5. 複数のリユース方法を利用する場合

シミュレーションを実行する際に、利用するリユース方法を一種類のみにする場合と、複数のリユース方法を利用する場合の両方を選択可能としている。一種類のみを利用する場合は、3章の Fig.1 で示したライフサイクルモデルにおける Replace ステージを、選択したリユース方法を用いて交換する一種類のみとする。複数のリユース方法を利用する場合は、各リユース方法を利用した交換をそれぞれ別の Replace ステージとして用意し、部品エージェントがそれぞれを評価することで状況に応じて適切な方法を選択する。

## 5. シミュレーション結果

部品エージェントを評価するためのシミュレーションシステムに、新たなリユース方法を複数導入し、実行した結果を示す。リユース毎の結果の差を確認しやすくするために、アセンブリへの対応は利用せずに部品単体で動かした結果を示す。

### 5.1 シミュレーション設定

部品はハードディスクドライブ(以下 HDD)を例として実行した。HDD のライフサイクルにおける各プロセスで発生する CO<sub>2</sub> 排出量を Table 1 のように設定した。使用の排出量は一時間当たりの値としている。

Table 1 CO<sub>2</sub> emission[kg]

Production	Use	Dispose	Repair
10.9	0.00343	0.245	1.09

HDD の性能は使用時間に応じて低下することとしている。部品の性能の低下は、最大値を 100%として、使用時間 10000 時間で性能が 0%となるよう線形に低下していくこととする。また、性能が 0%になった部品は廃棄される。

リユースショップの場合、部品の修理を行うが、この際に修理で回復する性能の量は最大値の 30%分とした。

また、フリマアプリとインターネットオークションの場合、出品物が 10 ステップの間購入されずに経過した場合は出品を取り消し、廃棄とした。

部品の売買により金銭の取引が発生する場合、ここでは金額を部品の性能に比例した値に設定した。

ユーザの人数は 20 人、合計ステップ数は 1500step、Use は 1step につき 8 時間使用とした。各リユース方法をそれぞれ一種類のみでの利用とした場合と、新たに導入した三つのリユース方法を 4.5 節に述べた手順を用いて合わせて利用する場合のそれぞれにおいてシミュレーションを実行する。三つのリユース方法を用いる場合を Combined とする。従来のリユース方法を用いる場合を Storage とする。

全体で発生した CO<sub>2</sub> 排出量、全部品が行った仕事量、ユーザ全員の損益の合計について結果を出力した。それぞれ五回ずつ実行した結果を平均して出力している。

### 5.2 全体で発生した CO<sub>2</sub> 量

全体の CO<sub>2</sub> 排出量を算出した結果を Fig. 3 に示す。

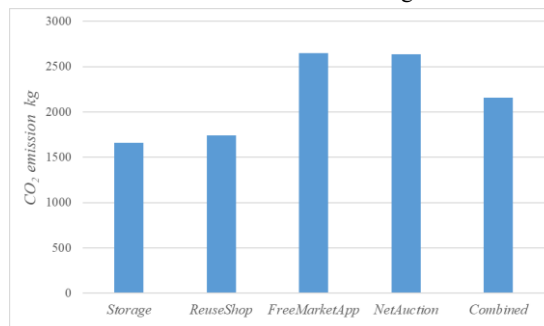


Fig. 3 CO<sub>2</sub> emissions

この結果では、フリマアプリとインターネットオークションの CO<sub>2</sub> 排出量が多かった。また、ストレージとリユースショップは CO<sub>2</sub> 排出量が少なかった。

### 5.3 全部品が行った仕事量

使用時の部品の性能を時間に関して積分したものを仕事量としている。全部品が行った仕事量の合計を算出した結果を Fig. 4 に示す。

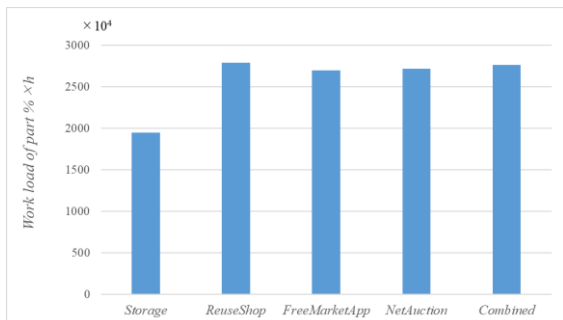


Fig. 4 Amount of work load

仕事量は、ストレージの場合が最も少なかった。一方で、リユースショップの場合が最も高くなった。

### 5.4 ユーザ全員の損益の合計

損益とは、ユーザが得た利益から支払ったコストを引いた値を指している。ユーザ全員の損益の合計量を算出した結果を Fig. 5 に示す。

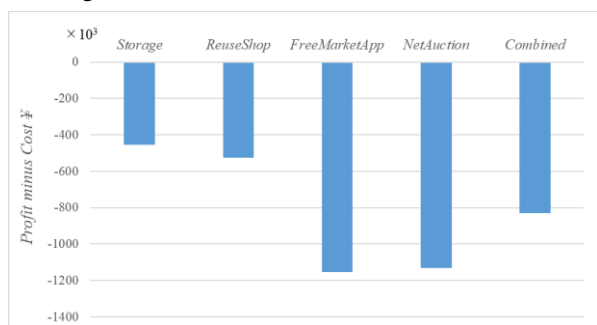


Fig. 5 Profit minus cost

全ての方式において、コストが利益を上回り損益は負の値となった。ストレージとリユースショップの場合は比較的に金銭の損失は少なくなった。フリマアプリとインターネットオークションの場合はどちらも他よりも金銭の損失が大きくなってしまった。

### 5.5 結果に対する考察

それぞれのリユース方法毎に実行した際に、部品の生産及びリプレースの回数を出力した結果を Table 2 に示す。

Table 2 Number of operations in each reuse method

	Production	Replacement
Storage	65.6	8714.8
ReuseShop	41.2	102
FreeMarketApp	135.4	492.8
NetAuction	133.2	583.2
Combined	84.6	171

結果を見ると、フリマアプリやインターネットオークションの場合では生産が他より多くなっている。これは一定期間の経過で出品物を廃棄する設定と、サイト上に商品が無い場合に新品を購入する設定の影響であると考えられる。リユースショップの場合に生産が最も少なくなってい

るが、これは部品の修理によって性能が回復することで部品の廃棄が少なくなっていることが要因と考えられる。

交換の回数に大きく差が出ている。これは最良のステージ選択の際の特性値及び確率の計算に部品の性能を利用していることが要因と考えられる。性能が低くなるほど Replace は選択されやすくなるため、修理の発生するリユースショップや、新品の購入が多くなったフリマアプリやインターネットオークションの場合は交換の回数が少なくなり、ストレージの場合は性能の低くなった部品の交換を繰り返し、交換の回数が増えてしまったと考えられる。

部品の修理作業による効果、商品価格の設定、出品の取り消しに関する設定などは、技術や物価の変動、人間の心理が関係し、実際には一定に定まらないため、これらをシミュレーション上に再現する方法を検討する必要がある。

## 6. 結論

部品エージェントシステムを評価するためのシミュレーションシステムに、実際に広く用いられているリユース方法を複数種類導入し、それらのリユース方法を用いた部品の交換を行えるようにした。リユース方法を部品エージェントが個別に評価して選択できるように変更を加えた。

今後の展望として、各種リユース方法における動作について、より実際に近づけていけるような設定の検討が必要である。

## 参考文献

- (1) 環境省, 使用済製品等のリユースの促進について, <http://www.env.go.jp/recycle/circul/reuse/index.html>(2021/1/21 閲覧)
- (2) Y. Yokoki, H. Hiraoka, Life cycle simulation of mechanical parts with part agent considering user behavior, The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, pp116-121, (2017)
- (3) Tanigawa T, Nagahata T, Masuda N, Hiraoka H(2018) Data structure for life cycle simulation in consideration of part agents promoting the reuse of mechanical parts. In: The 17th ICPE, A-2-3
- (4) 梅田靖, 阪井則雄, 富山哲男, ライフサイクルシミュレーションによる製品ライフサイクルの設計, マテリアルライフ学会誌, 13-3(2001) pp.105-109.
- (5) 木村文彦, 梅田靖, 高橋慎治, 田中信壽 ほか, インバース・マニュファクチャリング ハンドブック-ポストリサイクルの循環型ものづくり-, 丸善(株), (2004)pp.238-239
- (6) 環境省環境再生・資源循環局総務課リサイクル推進室, 平成 30 年度リユース市場規模調査報告書, (2019)pp.62-65.[http://www.env.go.jp/recycle/H30\\_reuse\\_research\\_report\\_all.pdf](http://www.env.go.jp/recycle/H30_reuse_research_report_all.pdf)(2021/1/21 閲覧)