

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（特設分野研究）

研究期間：2018～2022

課題番号：18KT0060

研究課題名（和文）付加製造技術を用いた人工物の適応的アップグレードに関する実証研究

研究課題名（英文）Research on adaptive upgrading of artefacts using additive manufacturing technology

研究代表者

福重 真一（Fukushige, Shinichi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10432527

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）：異なる機種や世代の使用済み製品からリユース可能な部品を取り出し、付加製造によって個別に作製されたアダプタ部品を介して同一機能・性能・形状のリマニュファクチャリング製品を製造する「適応的リユース・アップグレード」の実証実験を行った。これにより、形状や構造が標準化されていない部品であっても、アダプタを介して同一の新造製品に再利用可能であることを確認した。また、実験により得られたデータを解析することで、本研究が提案する適応的リユース・アップグレードのコストおよび環境負荷削減効果を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、小規模の生産者が中古製品や部品を再利用するためのネットワークを活用し、付加製造技術を用いて製品のリマニュファクチャリング、さらにはアップグレードを行うという、従来の集中管理型の大量リサイクルとは異なる資源循環システムの形態を提案した。また、その一連の工程を複数の工業製品を対象とした実証実験によって再現し、そこで得られたデータを用いて分散型の資源循環形態が社会へ与える影響を環境性と経済性の観点から評価した。

研究成果の概要（英文）：Manufacturing experiments of 'adaptive reuse and upgrading' were conducted, in which reusable components are taken from end-of-life products of different models and generations, and the parts are reused and assembled with adaptor components that are individually produced by additive manufacturing. We confirmed that even components whose shape and structure are not standardised can be reused in the same newly manufactured products by using the adaptor components. The data obtained from the experiment were analysed to assess the cost and environmental impact of the adaptive reuse and upgrading proposed in the study.

研究分野：ライフサイクル工学

キーワード：Additive Manufacturing Reuse Remanufacturing

1. 研究開始当初の背景

近年、付加製造(Additive Manufacturing, AM)に代表されるデジタルファブリケーション技術の進展に加えて、パーソナルな設計環境やオープン化された設計情報、インターネットを介したものづくり支援サービスなどの普及を背景として、個人や小規模の製造業者による分散型の生産形態が登場している。生産消費者(Prosumer)と呼ばれるこのような新しい形態の生産者による、小規模・自律分散型の生産活動を支えるしくみとして、設計データの共有サイト、AMによる造形サービス、資金調達のためのクラウドファンディング、試作から量産や販売までを橋渡しするサプライチェーン構築サービスなどがあり、新製品のアイデアを製造・販売に結び付けるオープンイノベーションのための環境が急速に整いつつある。加えて、既存の製造業においても、ユーザの多様なニーズに対応するため、従来は社外秘であった設計情報の一部を公開することで、外部のデザイナーや一般ユーザによるカスタマイズが可能な製品が登場している。さらには、既存の工場や製造設備をネットワーク化することで、個人のアイデアを究極の多品種少量生産によって実現する「クラウドマニュファクチャリング」のコンセプトなどが提案されている。また、FabCommonsのようなオープンデザインのためのライセンスも提案されており、生産に必要な設計図や製造手順などの情報をインターネット上でグローバルに共有するのみならず、世界中の参加者がこれらに独自の改良を加えながら新しい設計を生み出していくしくみも整いつつある。

これら分散型の生産技術やネットを介した設計支援サービスにより、例えば生産消費者がAMを用いたスペアパーツの製造やメンテナンスを行い、個人間で中古製品や部品を再利用するネットワークを構築するなど、従来とは異なる形態の資源循環が促進される可能性が指摘されている。すなわち、生産消費者によるメンテナンス、リペア、リユース、リマニュファクチャリングといった自律分散型の循環システムがAMを通じて実現される可能性がある。このような、従来の拡大生産者責任の範囲に収まらない多様な生産者による循環形態が製品のライフサイクルを非常に複雑にし、大量リサイクルを前提として構築されたこれまでの循環システムの変更を余儀なくされることも考えられ、その影響の範囲や大きさを評価することが重要な課題の一つとして挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では、AM技術を用いた中古製品のリユースやアップグレードに着目し、これを実現する新しい循環工程を提案する。さらには、様々な工業製品を対象としたリユース・アップグレードの実証実験によって環境負荷やコストを推定し、その結果に基づいてAMを用いた分散型の循環形態が社会に広く普及したときの効果をライフサイクルシミュレーション(LCS)によって見積もる。

製品のアップグレードとは、メンテナンスやリマニュファクチャリングの一環として製品の機能や性能の向上を行う工程であり、構成部品の交換や追加などによって、廃棄や買い替えに至る前に製品の持つ機能をユーザの要求に追従させることで、製品の価値寿命を延長する手段である。製品の長寿命化のためには、メンテナンスや修理による故障の回避だけではなく、価値寿命の延長をも考慮することが重要である。ここで「価値寿命」とは、技術の進歩や消費者の嗜好の変化などにより、製品の機能や性能が陳腐化し、物理的には故障していない製品が廃棄されてしまうまでの時間である。

製品の長寿命化は、ライフサイクル全体から見た資源使用量や廃棄物量の削減につながり、持続可能な人工物システムを実現するための有力なアプローチの一つである。従来、製品のアップグレードを実現するためには、製品開発の段階において将来の部品交換や追加・削除を可能にするような製品形状や部品間のインターフェースをあらかじめ設計しておく必要があった。しかし、将来の技術進歩や要求機能の変化を設計時に適切に予測し、様々なアップグレードの可能性をあらかじめ製品に組み込むことは極めて困難である。

そこで本研究では、設計時にアップグレードを想定していない製品であっても、AM技術を用いることで要求機能・性能に合わせて事後的にアップグレードを行う「適応的」なアプローチをとる。具体的には、図1に示すように、複数の中古製品からリユース可能な部品を取り出し、これらの部品形状に合わせた新しいプラットフォーム部品をAMを用いて製造することで、異なる製品から取り出したリユース部品同士を組み合わせると一つの製品として機能させる。さらには、この再生工程においていくつかの機能部品を最新の部品に交換することで、製品のアップグレードを実現する。

上記のプロセスを実際の工業製品を対象とした実験によって実証するとともに、そのような循環形態が広く普及した社会におけるライフサイクルシステム全体の環境性と経済性をLCSによって明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、分散化・多様化した生産形態が普及した社会における、AMを活用した資源循環

のシナリオを複数描き、それぞれのシナリオにおける環境負荷を実際の工業製品を対象とした実証実験によって推定する。さらには、実験によって得られた結果に基づいて社会全体への影響をLCSによって定量化する。

本研究で取り組む課題は以下の3つである。

- (1) シナリオ作成：個人や小規模の生産者が中古製品や部品を再利用するためのネットワークを構築し、AM技術を用いてスペアパーツの製造やリユース、さらにはアップグレードまでも行うという、従来の製品ライフサイクルとは異なる形態の資源循環のシナリオを複数作成する。
- (2) 適応的リユース・アップグレードの実験：様々な中古製品から再利用可能なリユース部品を取り出し、これらと最新性能の部品、およびAM技術によって造形されたプラットフォーム部品とを組み合わせることで変化する市場ニーズに適応しうるアップグレード製品を試作し、同種の最新製品との性能や消費者の受容性に関する比較評価を行う。また、製品の構成素材をAMの樹脂材料としてリサイクルした場合の環境負荷とコストの評価も同時に行う。
- (3) ライフサイクルシミュレーション：上記の実験データに基づいて、本研究で提案するリユースやアップグレードを中心とした新しい循環形態が社会に普及した場合の環境影響や経済性をシナリオごとにLCSによって定量的に評価する。

4. 研究成果

異なる機種や世代の使用済み製品からリユース可能な部品を取り出し、付加製造によって個別に作製されたアダプタ部品を介して同一機能・性能・形状のリマニュファクチャリング製品を多数製造する適応的リユース・アップグレードの実証実験を行った。

スマートフォンを対象製品として、その機能・構造図に基づきリユース部品を選択し、これらのリユース部品に要求される性能の範囲、およびアダプタの形状を3D-CADモデルを用いた様々なシミュレーションによって決定した。異なる種類・世代のスマートフォンから取り出した液晶パネルモジュールの形状を計測し、その3次元データに基づいて付加製造によりアダプタを個別に出力することで、同一形状・機能を持つスマートフォンのリマニュファクチャリング製品を複数台製造した。すなわち、形状や構造が標準化されていない部品であっても、アダプタを介して同一の新製品に再利用可能であることを確認した。

以上の実験により得られたデータを解析することで、本研究が提案する適応的リユース・アップグレードのコストおよび環境負荷削減効果を試算した。その結果、従来の集中管理型の製品ライフサイクルと比較して、本研究が提案する適応的リユース・アップグレードに基づく分散型の資源循環シナリオでは、環境負荷や資源消費量が大きく削減される可能性が高いことが示された。しかし、ライフサイクルコストについては、集中管理型の資源循環シナリオがより低いコストで実現できることが明らかになった。適応的リユース・アップグレードによる分散型の資源循環では、AM材料のコストに加えて、使用済み製品から取り出した部品を個別に計測し、それぞれの形状に合わせたアダプタを製造するためのコストが、リマニュファクチャリング製品のライフサイクルコストを増加させる要因となることが分かった。

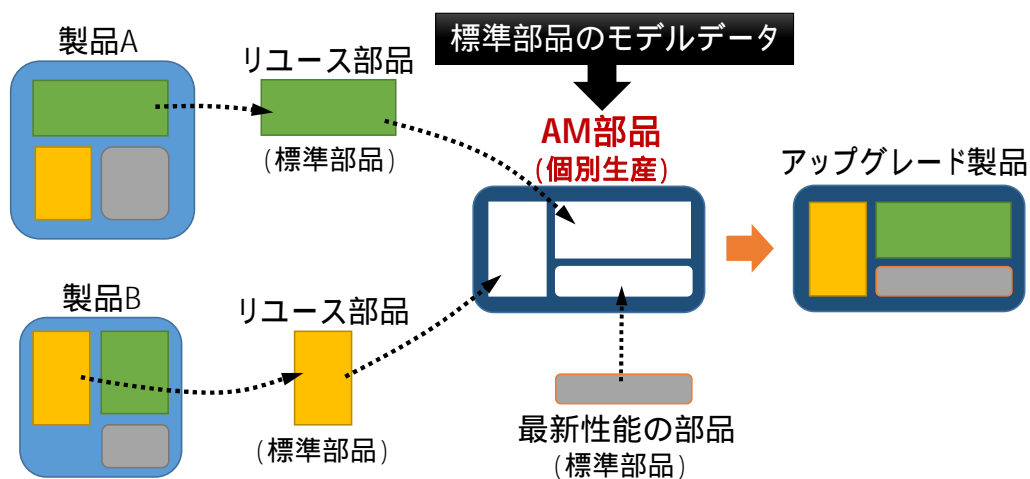


図1 AM技術を用いた中古製品のリユース・アップグレード

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 H. Kobayashi, S. Fukushige, H. Murata,	4. 巻 Vol. 25, No. 1 & 2
2. 論文標題 A Framework for Locally-oriented Product Design Using Extended Function-structure Analysis and Mixed Prototyping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Global Environmental Research	6. 最初と最後の頁 43-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Fujimoto, S. Fukushige, H. Kobayashi	4. 巻 Vol. 14, No. 6
2. 論文標題 Data Assimilation Mechanism for Lifecycle Simulation Focusing on Process Behaviors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 882-889
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2020.p0882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 H. Kobayashi, H. Murata, S. Fukushige	4. 巻 90
2. 論文標題 Connected lifecycle systems: a new perspective on industrial symbiosis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 388-392
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2020.01.107	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 -

1. 著者名 Y. Kishita, Y. Mizuno, S. Fukushige, Y. Umeda	4. 巻 160
2. 論文標題 Scenario Structuring Methodology for Computer-Aided Scenario Design: An Application to Envisioning Sustainable Futures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Technological Forecasting and Social Change	6. 最初と最後の頁 120207
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.techfore.2020.120207	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Kawaguchi, H. Murata, S. Fukushige, H. Kobayashi
2. 発表標題 A life cycle simulation method focusing on vehicle electrification and sharing
3. 学会等名 Electronics Goes Green 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田紘己, 川口太郎, 村田秀則, 福重真一
2. 発表標題 自動車と公共交通機関から成る交通システムのライフサイクルシミュレーションモデルの開発
3. 学会等名 第30回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村佳悟, 福重真一, 小林英樹
2. 発表標題 付加製造技術を用いた部品リユースのための製品設計・製造プロセスの提案
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2019
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北浦佑一, 村田秀則, 福重真一, 小林英樹
2. 発表標題 製品群を考慮した拡張機能・構造分析による地域指向設計支援手法の提案
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2019
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihisa TAKAHASHI, Koki JIMBO and Toshitake TATENO
2. 発表標題 Fabrication and evaluation of auxetic structures with different features generated by additive manufacturing
3. 学会等名 Int. Conf. on Design and Concurrent Engineering and Manufacturing Systems Conference (iDECON&MS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koki Jimbo and Toshitake Tateno
2. 発表標題 Design of Thermal Insulation Infill Structures Fabricated by Metal Material Extrusion in Additive Manufacturing
3. 学会等名 Int. Conf. on Design and Concurrent Engineering and Manufacturing Systems Conference (iDECON&MS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加納章央, 福重真一, 小林英樹
2. 発表標題 ライフサイクルシミュレーションにおけるプロセス状態推定手法
3. 学会等名 日本機械学会第28回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Mizokami and Toshitake Tateno
2. 発表標題 Multi-objective Optimization on Deformation of Lattice Structures for Multi-material Additive Manufacturing
3. 学会等名 Asian Conference on Design and Digital Engineering (ACDDE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Momoko Kimura and Toshitake Tateno
2. 発表標題 Design of Compliant Mechanism Fabricated by Additive Manufacturing with Different Strength Materials
3. 学会等名 Asian Conference on Design and Digital Engineering (ACDDE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinichi Fukushige, Keito Asai, Shozo Takata, Chiharu Tokoro
2. 発表標題 Simulation-based Flow Management for Circular Manufacturing of Lithium Ion Battery
3. 学会等名 EcoDesign2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深沢朋弘, 福重真一
2. 発表標題 車載用リチウムイオンバッテリーを対象としたリサイクルプロセスとロジスティクスの統合シミュレーション
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 羽田千宙, 福重真一
2. 発表標題 長寿命製品を対象とした製品組込リユースのための多世代設計支援
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masakuni Tsunazawa, Kohei Sugiyama, Kazuyuki Tasaka, Shinichi Fukushige
2. 発表標題 Understanding distributed recycling: Effects of consumer behaviors on environmental performance
3. 学会等名 EcoDesign2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	館野 寿丈 (Tateno Toshitake) (30236559)	明治大学・理工学部・専任教授 (32682)	
研究分担者	高本 仁志 (Komoto Hitoshi) (30613244)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究部門付 (82626)	
研究分担者	木下 裕介 (Yusuke Kishita) (60617158)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

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
---------	---------