

Title	「モノばらし」の必要性と可能性：サーキュラーエコノミーにおける新産業化に向けて
Author(s)	村松, 竜弥; 妹尾, 堅一郎
Citation	年次学術大会講演要旨集, 40: 618-623
Issue Date	2025-11-08
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	https://hdl.handle.net/10119/20169
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

「モノばらし」の必要性と可能性 ～サーキュラーエコノミーにおける新産業化に向けて～

○村松竜弥, 妹尾堅一郎 (産学連携推進機構)

ryuya-muramatsu@nposangaku.org

キーワード：モノばらし、リバースプロダクション、解体技術、循環経済、サーキュラーエコノミー

1. はじめに

サーキュラーエコノミー (CE: 資源循環経済) の本質は「資源生産性」である。そこでは、製品の「使い続け・使い直し／治し」(ユースの延伸・リユースの繰り返し) のためには、リペア (修理修繕) やメンテナンス (点検・整備) が不可欠だ。また「使い切り」後の再生材料化 (リサイクル) においても「モノくずし・モノほぐし・モノつぶし」等が必須である。両者に多く共通するのが「解体 (選別・分離・分解・分別等)」である。

本論では、まずサーキュラーエコノミーの概要と基本を確認し、その上で「解体技術 (非解体の検査技術等も含め)」の現在位置について事例を通じて確認・整理する。次にそれに基づいて解体技術開発に関する問題提起と課題提案を行う。最後に「モノづくり (プロダクション)」と対比した「モノばらし (リバースプロダクション)」に関する産業化の進展を提案する。

2. サーキュラーエコノミーにおける「使い続け」と「使い切り」

2.1. サーキュラーエコノミーにおける「使い続け」¹

サーキュラーエコノミーの本質は「資源生産性」である。単位当たりの資源がどれだけの価値を生むのか、それを高めることが求められる。資源生産性の観点に基づけば、既存の製品の形状や機能を維持したまま使用期間を可能な限り延長する「使い続け」が重視される。

この「使い続け」には多くの「手段(hows)」がある。

- ① **メンテナンス**：機能・構造・品質・性能等を正常とされる状態に保つために、製品の点検・保守・整備を行うことである。定期点検や予知保全はその典型である。
- ② **リペア**：機能・構造・品質・性能等に不具合がでた場合、それを元に戻すように修理・修繕を行うことである。
- ③ **リプレイス**：機能・構造・品質・性能等を維持するために、摩耗部品を交換することである。摩耗タイヤや汚れたフィルターを交換するなどが典型例である。
- ④ **リフィル**：なくなった消費品を補充することである。ボールペンの替芯やプリンターの取替インク等を交換することが典型例である。
- ⑤ **レトロフィット**：既存製品や設備に新しい技術や部品等を組み込み直し、性能の更新・向上または現行基準に適合させることである。壊れた箇所を直すリペアとは異なり、機能そのものを刷新・強化する点に特徴がある。例えば、パソコンの OS の最新版への入替えが典型例である。あるいは旧式の工作機械に最新のデジタル制御システムを付加するなど、主としてデジタル化にともなう事例が挙げられよう。

これらによって「ユースの延伸」の「使い続け」となる。次に「リユースの繰り返し」がある。

- ⑥ **リユース**：他の使用者に所有権が移る場合等、使用者が異なるものの、製品がそのまま再使用される活動は「リユース」と呼ばれる。中古販売、レンタル、シェアリングサービスなどがリユースの典型である。そこでは上記①～④が行われて「使い続け」が繰り返される。
- ⑦ **リファービッシュ**：初期不良などでメーカーに返品された製品や展示品等で少々使用した程度でありユーザーが所有者として使用したとはいにくい場合、メーカーや専門事業者が修理・清掃・部品交換等を行い、新品同等程度の状態に再整備することである。近年、家電などではリファービッシュ品が増えてきている。
- ⑧ **リマニュファクチャリング**：使用済み製品を分解し、洗浄・検査・補修・加工等を行って再組立して、最終検査をして新製品と同様の機能状態にする。自動車や機械などで始まっている²。

これら①～⑤、ならびに⑥～⑧を組み合わせることにより、製品の寿命を延伸するだけでなく、安全性、環境性能、利便性などを維持・強化することも可能となる。

2.2. サーキュラーエコノミーにおける「使い切り」後の処理

「使い続け」（ユースの延伸、リユースの繰り返し）をしていっても、いつかは「使い切り」の段階を迎えざるをえない。「使い切った」後に廃棄物処理に廻すのではなく、そこで製品を部品や材料に分解して再資源化することが求められる。つまり、資源を再投入可能な形に戻す工程と位置づけられる。

①**ディスアセンブリー（物理的解体／分解）**：製品を部品・部材レベルに物理的に解体・分解すること。特に機械系製品のように部品等を組立てたモノを逆に部品・部材レベルにすることを指す。

②**マテリアルリサイクル（物理的再生利用）**：製品を破砕・粉砕・溶解などの物理的処理を通じて素材レベルに戻して再利用すること。PET ボトルを再生繊維として利用する技術や、鉄スクラップの再溶解による鋼材製造が典型例である³。

③**ケミカルリサイクル（化学的再生利用）**：化学反応を用いて高分子や複合材料を原料レベルにまで分解し、新規資源と同等程度の品質で再利用すること。たとえば、PET ボトルのケミカルリサイクル⁴は、高品質の再生材供給を可能にしている。

3. 「使い続け」における「解体」技術の現在

サーキュラーエコノミーにおける「使い続け」は、製品寿命を延ばすことを通じて資源消費を最小限に留める最も直接的な方策である。その基盤には、製品修繕するため「解体」（分解等）が求められる。ここでは「製品の修理修繕のための解体」の代表的な三つの事例を取り上げる。

3.1. IoT 活用の予知保全：JAL および製造業の事例

日本航空（JAL）は、航空機の整備において IoT を活用し、予知保全の高度化を進めている。従来の定期点検などの整備データに加え、センサーから得られる運行データを解析し、故障兆候を早期に検出する仕組みを構築している。これにより、整備作業は「壊れてから直す」のではなく「壊れる前に取り替える」へと移行しつつある。ここでは部品の取り外し（分解）とその部品の修理もしくは交換が不可欠であり、情報技術と物理的解体作業とが有機的に結合した新しい保全体系が生まれている。また、部品取り外し前の状態診断においては、X線検査、超音波探傷等の非破壊検査技術が活用されており、解体の必要性や範囲の判断、再利用可能性の評価を通じて無駄な解体を回避している。

同様の発想は製造業全般にも広がっており、工場設備や生産ラインにおいても予知保全が導入されつつある。振動・温度・稼働状況などのデータに加え、超音波や赤外線による非破壊検査も活用し、異常を検知した時点で部品を交換する。このように、IoT を介した「見える化」と分解・修理/交換とが組み合わせることで、設備の寿命延伸とダウンタイム削減が同時に実現されている⁵。

3.2. Panasonic Factory Refresh：パナソニックの事例

パナソニックは、初期不良などでメーカーに返品された製品のみならず、使用済みの中古家電製品も再整備し、品質保証を付したうえで市場に再投入する「Panasonic Factory Refresh」事業を展開している⁶。テレビ、洗濯機、冷蔵庫、ブルーレイレコーダーなど13カテゴリーに及ぶ。再生拠点である宇都宮工場などでは、独自に設定した5項目（外観、内観、製造年、使用期間／回数、臭気）に基づき、製品を解体・分解して、清掃・部品交換・再検査を行い、完成品へ再生している。1年間のメーカー保証付きで販売され、利用者の満足度は94%と高評価を得ている。

3.3. タイヤリトレッド：ブリヂストンの事例

ブリヂストンは、産業車両用タイヤを「リトレッド」している。摩耗したトレッド部分を削り取り、新たなゴムを貼り付けてタイヤを再生使用する手法である。これはタイヤを台タイヤ（本体）とゴム（摩耗品）とに分解して、摩耗部分のみを取り替えるものだ⁷。つまり、タイヤを解体・分解して修理・修繕していると言えよう。リトレッドタイヤは、資源消費量を50%程度、CO₂排出量を約51%削減できるとされ、環境負荷低減とコストメリットを同時に達成している⁸。リトレッド工程では、タイヤ内部の損傷を検出するためのシアロ検査、超音波検査などの非破壊検査を含む品質管理が実施されており、安全安心な再生プロセスを保証している。

4. 「使い切り」の後の「モノばらし」技術の現在

「使い続け」では製品の機能維持を目的とした部分的な分解・修繕が中心であったのに対して、「使い切り」後の処理においては、多様な素材が複雑に組み合わせられてできた製品を適切に解体・分解することで部品・部材を分別し、そのうち再利用可能性の高い部品・部材の効率的回収が中心となる。

4.1. 複合機のリマニュファクチャリング

複合機やプリンターにおける「リマニュファクチャリング」は「使い切り」後の代表的処理事例である。例えば、リコーは複合機の再生モデルとして「再生機（サーキュラーエコノミー機）」を提供している。これは市場から回収した使用済み複合機をユニットや部品単位まで分解し、所定の品質基準に基づいて部品を選別・交換・清掃・再組立する工程を経て製造される製品である⁹。部品のリユース率を重視しており、再生複合機では重量換算で平均 86%の部品が再利用されている¹⁰。また、CO₂排出量は新造機と比べて約 59%の削減である。さらに、回収時期や使用状況に基づいて回収数を高精度で予測する技術を活用し、再生機の生産計画へとつなげているという¹¹。

4.2. EV バッテリーの自動解体

電気自動車（EV）の普及に伴い、使用済みバッテリーは増加するので、その自動解体技術の確立が急務である。ドイツのフラウンホーファー IPA は、KUKA 製産業用ロボット KR QUANTEC を用いた「DeMoBat（Battery and Electric Motor Industrial Disassembly）」プロジェクトを実施、センサー制御されたロボットアームが高電圧バッテリーを安全かつ精密に分解するプロセスを検証している¹²。

4.3. PET ボトルのリサイクル

大量消費される PET ボトルの使用後の循環資源化は社会全体で喫緊の課題となっている。JEPLAN は、使用済み PET ボトルを分子レベルまで分解し、不純物を除去したうえで、石油由来と同等品質の再生 PET 樹脂（HELIX 等）に再構成するケミカルリサイクル技術を展開し、サーキュラーエコノミーの実装に貢献している。これにより、従来のマテリアルリサイクルでは難しかった品質維持と資源循環の両立が近づいている。ただし、エネルギー使用量と高コストが問題とされる¹³。

4.4. 繊維のリサイクル

ポリエステル繊維のケミカルリサイクルが、繊維業界で注目されている。帝人フロンティアは、物流業界のユニフォームの使用後、ポリエステル繊維をケミカルリサイクルによって再資源化し、「繊維 to 繊維」の完全循環型プロセスを試みている。ユニフォーム設計段階から素材のリサイクル性を考慮、回収効率やリサイクル後の品質確保にも配慮した実用展開が進めているとされる¹⁴。

5. 考察①：解体技術の問題と課題

5.1. 「使い続け」と「使い切り」事例の整理と問題点

3 章で取り上げた「使い続け」の事例は、製品寿命を延長し、新たな資源投入の削減に寄与するものだった。しかし、航空機では、製品として使用期間を最大限に延長した後、個々の部品が持つ部品寿命までを使い切り、資源循環のプロセスが制度的に十分に整備されていない。

考慮すべきは、製品寿命と部品寿命の関係である。製品寿命は、従来は「キーストーン（基幹）部品」によって決まるため、その部品が使用できなくなった場合、製品全体を取り替えざるをえなかった。だが IoT、AI、ロボット活用等によって短命部品を適切に交換・修理することで、製品全体の延命ができるようになりつつある。ただし、部品の複雑化や素材の多様化により、解体効率の低下や再資源化コストの上昇、品質保証の困難さといった問題が顕在化している。

なお、修理・修繕のためには従来は解体・分解が必要であったが、近時、非破壊検査技術の進展も著しい。例えば、従来から用いられてきた X 線検査、超音波探傷、渦流探傷などに加え、AI を用いた画像診断や「波動散乱逆問題の解析的な解法」¹⁵などの技術により、解体をせずに部品の内部劣化や損傷を把握することを可能になってきた。これらにより、寿命を残している部品を解体せずに検査することが可能となっている。

5.2. 自動車部品におけるモノばらし

自動車は数万点規模の部品を刷り合わせで構成する製品である。自動車産業では、製造段階から廃棄段階までのライフサイクル全体で、循環資源の使用が求められている¹⁶。

デンソーでは、車両廃棄時に発生する部品・素材の再資源化を見据えた解体・分別技術の検討が進められている。特にアルミやプラスチックでは、「リサイクル材の量と質をいかに確保するか」が課題として示されている。新車生産に必要とされる材料スペックと、再資源化によって得られるリサイクル材との間にはギャップが存在しており、その橋渡しのためには動脈と静脈の連携や多額の投資が不可欠であるとされている。また、再生プラスチックは品質のばらつきが大きく、安定供給のための品質保証体制の確立が重要であると指摘されている。

いずれにせよ現状では、自動車リサイクルの大半がシュレッダー処理に依存しており、粉碎された樹脂類は異なる成分が混ざり合い、再生材としての価値が低下している。この状況を改善し、部品や素

材ごとに分別を可能とする技術の確立が、自動車の資源循環を高めるために不可欠である。

5.3. モノばらし技術における主な課題

モノばらし技術が実装されるには、いくつかの達成すべき課題ある。

第1に、ライフサイクル全体を考慮した設計の導入である。解体が困難である一因は、設計と廃棄の非連続性にある。製品開発に「解体容易性設計 (Design for Disassembly)」などの「DfX (Design for X)」を適用することが不可欠であろう¹⁷。

第2に、安全かつ効果的・効率的な解体プロセスの確立である。特にEVバッテリーや複合材料の処理にはロボティクスやAIを活用した安全な自動化が求められる。解体手順や専用設備の普及が急務だ。

第3に、再生資源の品質保証と市場受容性の確立が必要である。再生部品やリサイクル素材の品質を担保し、LCAに基づく環境価値を正しく可視化することが求められる。

第4に、制度的枠組みの整備と業界横断的な協働である。循環型社会の実現には、サプライチェーン全体での設計指針の共有や法制度が必要となる。

これらの課題を達成するためには、部品寿命の管理と非破壊検査の普及が欠かせない。これらによって、モノばらし技術が全体の効率と資源生産性が向上するはずである。

5.4. 生成AIロボットの活用

モノばらし技術の高度化において、生成AIロボットの導入は解体効率と品質の向上に不可欠である。特に複雑な製品構造や危険な作業環境では人的作業には限界がある。その解体プロセスを自動化・知能化することで、モノばらしの産業化が大きく拡張できるだろう。これについては別途議論をしたい¹⁸。

6. 考察②:「モノばらし」という「モノづくり」

6.1. 「モノばらし」と「モノづくり」の相似と相違

従来、製品ライフサイクルの終端に位置づけられてきた「モノばらし (選別・解体・分離等)」は、サーキュラーエコノミーにおいて、新たな価値を創出する活動として再定義されよう。「モノづくり」が資源から製品を組み立てるプロセスであるのに対し、「モノばらし」は製品から資源を取り出すプロセスである。両者は方向性こそ異なるが、設計思想、工程管理、品質保証を基盤とする点で共通しており、どちらも技術体系として今後の社会に不可欠であると言えよう。相違点は、「モノづくり=新たな製品価値の創出」に対し、「モノばらし=持続可能な資源価値の創出」である。

また、部品寿命と製品寿命の関係を踏まえると、両者の関連性はさらに明確になる。モノづくりにおいては、キーストーン (基幹) 部品が製品全体の寿命を規定するが、モノばらしの技術があれば部品寿命を個別に延伸し、結果として製品全体の寿命を長く維持できる。製品寿命が尽きた後には、モノばらしを通じて再資源化し、次のモノづくりに資源を供給できる。したがって、モノばらしは単なる再利用工程ではなく、次世代産業を形成する活動と言えるだろう。

6.2. モノばらしの技術体系とは

「モノばらし」を、単なる廃棄作業ではなく、体系的な技術の集合体として捉える必要がある。「モノづくり」が設計・加工・組立といった複数の工程で成り立つように、「モノばらし」もまた、主に以下の工程に大別できるだろう。

第1、「診断・選別技術」。これは、非破壊検査によって製品を解体することなく状態や内部構造を「見極める」ための技術である。具体的には、AIによる画像認識や機械学習を活用して、製品を構成する部品や素材を高精度に診断し、センサー技術で部品の劣化状態や再利用の可否を診断することも含まれる。この技術が、次の解体プロセスを支える。

第2、「解体・分離技術」。これは診断・選別された情報に基づき、製品を物理的に解体・分離する技術である。前述のリアセンブリングだ。産業用ロボットを活用した精密解体は、特に危険物や複雑な製品の処理で不可欠だろう。手作業では不可能だった効率的かつ安全な解体と分離を可能にする。

第3、「再資源化技術」。これは解体・分離された部品や素材を、次の循環工程へとつなげる技術である。前述のマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルなどが挙げられる。この技術は、回収された資源の価値を最大化し、高付加価値な再生品として市場に戻す役割を担う。

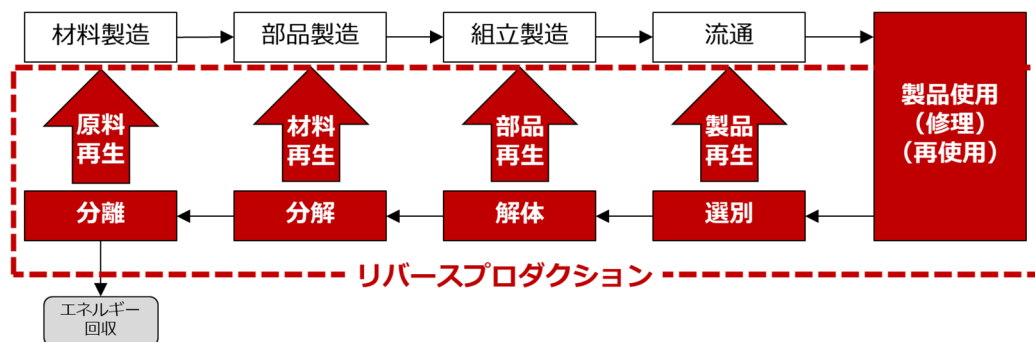
これら3つの技術要素を相互に連携させることで、モノばらしは「廃棄物処理」から「資源生産」へと発展し、持続可能な社会を支える不可欠な技術体系となるのではないかと。

7. 提案：モノばらし産業の育成「解体技術を基盤とする連続使用支援産業と資材再生産業」

7.1. リバースプロダクションの定義

「使い続け」と「使い切り」の両者に共通して必要となるのは、製品を選別・解体・分離する解体技術（モノばらし）である¹⁹。それを体系的に捉えた時、それを「リバースプロダクション」と呼ぶことにしよう（図表 1 リバースプロダクション）。リバースプロダクションとは、修理・再使用・再資源化のために製品を選別・分解・分別する技術群を中核とし、製品ライフサイクルを逆方向に進める再生産プロセスと定義できる。従来の「モノづくり（プロダクション）」が資源から部品・製品を組み立てる順方向のプロセスであるのに対し、「モノばらし（リバースプロダクション）」は製品から資源へと逆方向に戻すプロセスである。

図表 1 リバースプロダクション



7.2. 連続使用支援産業と資材再生産業

「モノばらし産業」は、その体系的な育成が不可欠である。この新産業は、製品ライフサイクル全体にわたる価値創造を担う、「連続使用支援産業」と「資材再生産業」という二つの柱で構成される。

「連続使用支援産業」：製品の寿命を最大限に延ばすことを目的とする。ここには、製造業だけでなく、第三者の修理・メンテナンス専門事業者や、リファビッシュ品を扱うプラットフォーム事業者が含まれる。AI を活用した予知保全サービスや、需要予測に基づいた部品供給システムを駆使し、製品が壊れる前に、あるいは壊れた後に効率的に修理・再生するサービスを提供する。これにより、資源の新たな投入を抑制し、製品が持つ価値を継続的に利用可能にする。

「資材再生産業」：連続使用が困難になった製品やその構成部品を、新たな資源として再生することを専門とする。高度な「解体・分離技術」と「再資源化技術」を駆使し、複雑な複合材料や使用済み製品から、高品質な再生素材を安定的に供給する。この産業の役割は、単なる廃棄物処理ではなく、モノづくりを支える安定した資源供給元となることだ。

この二つのサブ産業は密接に連携する。例えば、連続使用支援産業が使い続け困難と判断した製品を、資材再生産業が引き受けて再資源化する、あるいはまた、製品設計段階から両者が協働することで、解体しやすい製品の開発が可能となり、より効率的な資源循環が実現するはずである。

8. むすび

本論では、サーキュラーエコノミーにおける「モノばらし」の必要性和可能性を、「使い続け」と「使い切り」における技術事例の分析を通じて検討した。「モノばらし」は単なる廃棄物処理ではなく、製品から新たな資源価値を生み出す「リバースプロダクション」として定義できる。様々な技術は、このリバースプロダクションを高度化し、効率的かつ安全な資源循環を可能にする。そして、「連続使用支援産業」と「資材再生産業」という二つの柱から成る「モノばらし産業」の育成を提案した。それが、サーキュラーエコノミーの実現に不可欠であると主張したい。

とはいえ、本論はまだ十分というわけではない。多くの方々からのご指摘・ご助言・ご示唆がいただければ望外の喜びである。

- ¹【1】妹尾堅一郎「線形経済から循環経済への“バトンゾーン”をデザインする～トランスフォーミングとメタモルフォーゼに関する一考察～」2D03、研究・イノベーション学会、2024。
- 【2】妹尾堅一郎「イノベーション、活かすも殺すも、制度次第～サーキュラーエコノミーがアジャイルガバナンスを必要とする理由～」1B06、研究・イノベーション学会、2023。
- 【3】妹尾堅一郎、伊澤久美、宮本聡治「サーキュラーエコノミーにおける「モノつかい続け」～「ユースの延伸とリユースの繰り返し」を支援する産業の育成に関する一考察～」(口頭)、2C23、研究・イノベーション学会、2022。
- 【4】妹尾堅一郎、伊澤久美、宮本聡治「脱「バージン材・新品モノづくり」がもたらすイノベーション～モノづくりの変容と多様化とそれに資する関連技術群～」第36回年次学術大会、2C22(口頭のみ)、研究・イノベーション学会、2022。
- 【5】妹尾堅一郎、伊澤久美、宮本聡治「サーキュラーエコノミーの含意を整理する～循環経済の概念群に関する一考察～」、1B06、研究・イノベーション学会、2021。
- 【6】妹尾堅一郎、伊澤久美、宮本聡治「資源循環立国と静脈産業技術開発～循環経済社会構築に関する一考察～」、1B04、研究・イノベーション学会、2021。
- 【7】妹尾堅一郎「“新品生産販売主義”から“既存品継続使用主義”へ～サーキュラーエコノミーに対応する“3Rの脱構築”に関する一考察～」、1A03、研究・イノベーション学会、2019。
- 【8】妹尾堅一郎「技術起点型から社会文化起点型へ～サーキュラーエコノミーによるイノベーション起点の重点移行～」、1A02、研究・イノベーション学会、2019。
- 【9】妹尾堅一郎「妹尾教授のビジネス探訪～新潮流の Business 航海術～」、月刊時局、連載第1回(2017.04月号)～第101回(2025年10月号)、2017～2025.10(継続中)、時局社。
- 【10】妹尾堅一郎「講壇:オピニオン」『日刊工業新聞』、2021/10/04～2024/3/04、日刊工業新聞社。
- 【11】妹尾堅一郎「生活産業ビジネス塾」『日刊工業新聞』、第1回～第67回、2024/05/31～(継続中)。日刊工業新聞社。
- 【12】妹尾堅一郎「「買い換え」から「使い続け」へ～循環経済の概要・本質・基本を知り、対応を検討・実行する～」、連載「事業と知的財産、その関係を問う」第1回～第4回、『知財管理』Vol. 74 No.7, 2024、(一社)日本知的財産協会(2024)
- 【13】妹尾堅一郎「循環経済というビジネスモデル大乱世をどう生き抜くか(前編)～買い替えから「使い続け」へ。モノづくりと価値モデルのイノベーション」、TALKING POINTS、『ダイヤモンドクォーター』、2024 夏号:「同(後編)～日本企業の宿題「イノベーション」を後略せよ」、2024 秋号、ダイヤモンド社
- ² 産総研マガジン “リマニュファクチャリング” とは? (https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20240320.html)
- ³ 三井物産株式会社 Web サイト「Green & Circular」(<https://www.mitsui.com/solution/contents/solutions/circular/material-recycling>)
- ⁴ JEPLAN Web サイト「BRING BOTTLE」(<https://bringbottle.jeplan.co.jp/>)
- ⁵ 住友商事 Web サイト「航空機アフターマーケット事業」(<https://www.sumitocorp.com/ja/jp/sustainability/communication/aircraft-interview/index.html>)
- ⁶ パナソニックホールディングス株式会社 Web サイト「検査済み再生品の中核拠点として宇都宮工場リファーマービッシュ工程をオープン」(<https://news.panasonic.com/jp/press/jn250605-1>)
- ⁷ 大沼妙子、妹尾堅一郎、伊澤久美、瀬川丈史「ブリヂストン業務用タイヤ事業への「サービスビジネスモデル」適用：事例を通じた製造業のサービス化に関する一考察 ⑥」研究イノベーション学会 (2016)
- ⁸ ブリヂストン Web サイト「リトレッドタイヤ」(https://tire.bridgestone.co.jp/tb/truck_bus/solution/retread/)
- ⁹ リコー株式会社 Web サイト「人と地球にやさしいリコー複合機」(<https://www.ricoh.co.jp/products/maker/ricoh/features/multi-function-printer-environment>)
- ¹⁰ リコー株式会社 Web サイト「Sustainability」(<https://www.ricoh.co.jp/products/list/ricoh-im-c6000f-ce-c4500f-ce-c3000f-ce-c2500f-ce/point1>)
- ¹¹ リコー株式会社 Web サイト「製品の回収量予測技術」(https://jp.ricoh.com/technology/tech/007_recycle?utm_source=chatgpt.com)
- ¹² KUKA Web サイト「Industrial battery disassembly makes electric cars even more sustainable」(<https://www.kuka.com/en-us/industries/solutions-database/2024/02/fraunhofer-ipa-battery-disassembly-electric-car>)
- ¹³ 八神実優・妹尾堅一郎「使用済みプラスチックのリサイクルに関する論点群～サーキュラーエコノミー設計に関する一考察～」、2B06、研究・イノベーション学会予稿集、2025 (予定)。
- ¹⁴ 帝人フロンティア株式会社 Web サイト『資源循環でサステナブルな未来を目指す 「繊維 to 繊維」の社会実装への挑戦。』(<https://www2.teijin-frontier.com/story/story14/>)
- ¹⁵ 神戸大学統合研究拠点 Web サイト「散乱場理論研究」(<http://www.ircpi.kobe-u.ac.jp/research/research-04.html>)
- ¹⁶ 経済産業省 (2024)『自動車リサイクル制度の概要』
- ¹⁷ SSAITS Web サイト「デザイン・フォー・エックス (DfX: Design for X) とは何か?」(<https://ssaits.jp/promapedia/method/dfx.html>)
- ¹⁸ 妹尾堅一郎・村松竜弥「A I ロボットは暗黙の身体知を持つか～「ロボット発展段階説」の拡張を通じて、技術と技能を再考する～」、1A04、研究・イノベーション学会予稿集、2025 (予定)。
- ¹⁹ 妹尾堅一郎「循環経済に向け技術開発を急げ」、私見卓見、経済教室、日本経済新聞 2021.3.5。